

## E01. 材料先进制备加工技术

分会主席：刘雪峰、谢建新、刘峰、刘永长、管仁国

### E01-01 (Keynote)

#### 探索与思考：薄板坯连铸连轧技术三十年

毛新平

宝钢股份中央研究院

### E01-02 (Invited)

#### 奥氏体耐热钢成形与加工过程组织演化规律

刘永长

天津大学

S31042 钢是在 25Cr-20Ni 型奥氏体耐热钢的基础上添加 Nb、N 等合金元素获得的，较高的 Cr 含量使其抗蒸汽氧化性能和抗高温腐蚀性能优于传统的 18Cr-10Ni 型钢，高温服役时第二相沉淀强化作用使其具有优异的高温持久强度，被广泛应用于超超临界火电机组的过热器和再热器上。S31042 钢成形与加工过程的析出相有  $M_{23}C_6$ 、NbC 相、NbCrN 和  $\sigma$  相，其中主要析出相为弥散分布于晶内的 NbCrN 相， $M_{23}C_6$  相在晶界和界内均有析出，形貌分别为链状和颗粒状，高温服役中还会析出硬脆金属间化合物  $\sigma$  相，这里系统总结了冷轧、线性摩擦焊及热处理过程碳化物的析出与演化规律，旨在为奥氏体耐热钢组织设计和热强性提高提供有效指导。

关键词：奥氏体耐热钢；冷轧；线性摩擦焊；时效；沉淀强化

### E01-03

#### 高强高导铜铬系合金成分优化与水平连铸基础研究

付华栋，徐胜，谢建新

北京科技大学

Cu-Cr-Zr 合金具有优异的力学和导电性能，是高速铁路接触线和超大规模集成电路引线框架的理想材料。然而该合金在非真空条件下熔炼时 Zr 元素极易氧化烧损，且与石墨等炉衬材料发生反应，导致合金成分精确控制难度大、铸锭均匀性和一致性差。上述特点导致合金需真空熔炼、后续加工工艺流程长、生产效率和成材率低等一系列问题。本文旨在寻找一种 Zr 元素的替代元素开发新型可非真空熔炼的 Cu-Cr-X 合金，探明合金凝固、变形及热处理过程的组织性能演变规律，为开发一种新型高强高导 Cu-Cr-X 合金的高效制备加工技术奠定基础。相关研究结果如下：微量 Ag 元素的添加可以使 Cu-Cr 合金的抗拉强度达到 515.6 MPa，导电率为 84.6% IACS，综合力-电性能与 Cu-Cr-Zr 合金相当。通过热冷组合铸型水平连铸技术实现了 Cu-Cr-Ag 合金的短流程高效制备，连铸主要工艺参数为：熔体温度为 1250 °C，热型温度为 1275 °C，连铸速度 80 mm/min。以热冷组合铸型水平连铸工艺制备的表面质量良好、人字状柱状晶组织 Cu-Cr-Ag 合金板坯为对象，无需固溶处理，经冷轧变形 92.5%、450 °C 保温 1.5 h 时效处理后，合金带材的抗拉强度为 505.1 MPa，导电率为 81.6% IACS、综合力学-电学性能优良、制备加工工艺简单。

关键词：Cu-Cr 系合金；HCCM 水平连铸；轧制变形；时效处理

### E01-04

#### 利用等径角挤压制备高强高导 CuCrZr 合金

佟运祥，王玉，张殿涛，李莉

哈尔滨工程大学

CuCrZr 合金由于其具有高强度、优异的导电特性、良好的疲劳性能与热稳定性而获得广泛关注。因此，CuCrZr 合金已经获得了众多工业应用并在很多领域表现出潜在的应用价值，例如电阻焊电极、高铁接触线等。然而，多数工程应用通常要求合金兼具高强度与高导电特性。本文主要利用一步等径角挤压制备高强高导 CuCrZr 合金。等径角挤压在 450 °C 经过 8 道次挤压后，晶粒尺寸细化至 300 nm 左右，略大于室温等径角挤压样品的晶粒尺寸。同时 450 °C 挤压合金中含有大量的纳米尺寸的析出相。随挤压道次增加，CuCrZr 合金的显微硬度增加。室温等径角挤压样品的导电率随挤压道次增加而降低，而 450 °C 挤压合金的导电率随挤压道次增加而增大。450 °C 等径角挤压可获得兼具高强度和高导电率的 CuCrZr 合金，这主要可归结为晶粒细化与纳米尺寸的析出相强化基体，而析出相的形成可增加导电率。

关键词：CuCrZr；等径角挤压；力学性能；导电率

## E01-05

### 新型 Fe-Cu 复合材料的设计及性能研究

战再吉, 李鑫, 曹海要

燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室

铜合金具有良好的导电性、但其强度低耐磨性差, 高温下容易发生软化, 限制了其在工业中的使用。通过添加陶瓷强化相会提高铜合金复合材料强度, 但是由于第二相粒子的电子散射作用会大幅降低导电性。随着航空、航天、交通等高新技术领域的发展, 增加了对铜合金的综合性能要求, 常规材料和制备工艺已经难以满足需求。基于粉末冶金液相烧结技术设计一种新型 Fe-Cu 复合材料, 以尺寸均匀呈密排堆垛方式的 Fe 合金粉为强化相, Fe 合金粉末间隙以液相 Cu 进行填充形成导电骨架结构; 为了进一步达到强化作用, 对 Fe 合金粉末的成分进行设计, 使其能在淬火后形成马氏体等组织。通过调整 Fe 和 Cu 的含量比例制备出新型 Fe-Cu 合金, 协调控制材料的导电性和力学性能。采用真空热压液相烧结技术制备出 Fe-Cu 复合材料, 优化其制备工艺。研究了铜含量, 导电骨架尺寸对导电率和力学性能的影响; 进一步对材料进行强韧化热处理, 研究了热处理工艺对材料组织和力学性能的影响; 在此基础上进行了高速载流摩擦磨损性能研究。研究表明: 含 50wt.%Cu 的复合材料导电率能达到 31% IACS, 抗拉强度达到 457 MPa。对含 37wt.%Cu 的复合材料进行强韧化处理, 调质后铁基组织为回火索氏体, Fe 和 Cu 界面结合良好, 抗拉强度为 588 MPa, 导电率达到 20% IACS 以上。材料高速载流摩擦磨损试验表明, 由于 Fe-Cu 合金强度的提高使其磨损抗力显著提高, 在大载荷或者高滑动速度下, 磨损机制为粘着磨损; 载流条件下摩擦磨损机制主要为粘着磨损。

关键词: Fe-Cu 复合材料; 导电率; 力学性能; 摩擦磨损

## E01-06

### 低镍镍基单晶高温合金热处理过程组织演变及合金元素均质化

苏香林<sup>1</sup>, 许庆彦<sup>1</sup>, 王润楠<sup>1</sup>, 许自霖<sup>1</sup>, 刘世忠<sup>2</sup>, 柳百成<sup>1</sup>

1.清华大学

2.中国航发北京航空材料研究院

涡轮叶片是航空发动机核心热端转动部件, 使役环境最恶劣、应力最复杂、结构最复杂、要求最严格, 其承温能力直接决定航空发动机的热动力效率和推重比。镍基单晶合金具有高的室温和高温强度、良好的塑性和断裂韧性、优异的高温抗蠕变抗疲劳性能、良好的高温抗氧化抗热腐蚀性能、良好的高温组织稳定性和使役可靠性, 成为涡轮叶片制造的首选材料。为提高单晶叶片的承温能力和高温蠕变抗力, 以 Re、Ru 和 Ir 的添加为标志, 国外镍基单晶合金已从第一代发展至第七代。同时, 因 Re、Ru 和 Ir 的储量稀缺和价格昂贵, 通过合金成分优化设计, 在保证性能水平前提下, 创制低 Re 和无 Re 合金也成为镍基单晶合金发展重点并取得重要进展。单晶叶片定向凝固时先形成枝晶干后形成枝晶间, 枝晶干富集 W、Re 等  $\gamma$  相形成元素, 枝晶间富集 Al、Ta 等  $\gamma'$  相形成元素, 枝晶干至枝晶间存在成分梯度、微观偏析严重、枝晶间存在非平衡结晶相。枝晶干至枝晶间成分不均匀导致枝晶干至枝晶间强化相形核生长不协调及成分、尺寸和形貌不均匀, 影响叶片高温使役热强性和热稳定性。热处理是单晶叶片成性核心工艺, 通过热处理固溶铸态粗大  $\gamma'$  相、消除共晶、均质化叶片, 再经高温和低温时效使叶片的主强化相尺寸、形貌、分布、体积分数达到最佳配合, 从而使叶片获得最佳使役性能。镍基单晶合金定向凝固后微观偏析严重, 某些低熔点相形成合金元素在热处理过程发生由枝晶间至低熔点相的反常上坡扩散, 导致叶片在后续真空加热及保温过程存在初熔风险。开展叶片热处理过程实验研究, 建立叶片热处理过程组织演变、合金元素均质化和热物性变化间的关联, 对优化叶片生产工艺、改善叶片初熔缺陷、提高叶片成品率及使役性能具有重要科学意义和工程价值。采用合金成分优化设计方法和定向凝固螺旋选晶法设计并制备低镍镍基单晶合金, 研究制定镍基单晶合金的固溶及时效热处理制度。采用金相显微镜、场发射扫描电镜、电子探针、差热分析和热力学模拟计算, 研究铸态低镍镍基单晶合金多步固溶热处理过程  $\gamma/\gamma'$  共晶溶解、固溶及时效热处理过程  $\gamma'$  相和碳化物演变、合金元素均质化演变及热物性变化。基于实验和理论计算结果, 阐明了低镍镍基单晶合金铸态组织及微观偏析形成规律、热处理过程组织演变机理、合金元素均质化演变及枝晶干枝晶间合金元素扩散机制, 建立了低镍镍基单晶合金热处理过程组织演变、合金元素均质化和热物性变化间的关联。

关键词: 镍基单晶高温合金; 定向凝固; 组织演变; 合金元素均质化; 热处理

## E01-07 (Invited)

### 核电用钢性能老化再生技术

张新房, 刘学兵

北京科技大学

核反应堆主管道是在压水堆核反应堆一回路系统中将压力容器、主泵和蒸汽发生器相连接的管道部件，属于核安全一级部件，同时也是反应堆冷却剂压力边界的重要组成部分，对反应堆安全和正常运行起重要的保障作用。第一代、二代主管道材料主要为 316 不锈钢和铸造双相不锈钢，主管道材料在一定温度（280-500 °C）长期服役后性能不断退化，发生严重的老化脆化现象，表现为耐腐蚀性能降低，硬度增加，韧性下降，材料发生脆性断裂的概率增大，直接威胁核电站的安全运行。诸多研究表明，引发主管道材料失效的根本原因在于材料中不断析出及粗化的析出相（ $C_{123}C_6$ 、 $\sigma$ 、 $\chi$  相等）导致了脆化问题。如何控制有害析出相的数量、尺寸及种类是从根本上解决主管道材料老化脆化损伤的核心问题。尽管常规高温热处理手段可以将有害析出相重新溶解到基体中，但是由于核反应堆的特殊性，“非原位的固溶热处理”对发生老化脆化的主管道材料性能的修复基本不具有现场可操作性。提出利用“基体和析出相电化学性能的差异”这一新观点对己发生老化脆化的主管道材料进行“原位”性能修复、再生。研究发现：经处理后，316 奥氏体不锈钢中析出相的平均尺寸由老化态的 700 nm 减小至 300 nm，析出相的数密度由最初的  $3.281 \times 10^5 / \text{mm}^2$  降低到  $1.823 \times 10^3 / \text{mm}^2$ ；铸造双相不锈钢（400 °C 老化 20000 h）中铁素体调幅分解产生的  $\alpha'$  相重新融入基体，铁素体的纳米硬度值由 7.85 GPa 降至 3.21 GPa。老化脆化的管道材料经处理后，材料的韧性得到大幅度提高，材料的耐腐蚀性能得到一定程度的恢复。通过系统探讨主管道材料中析出相的形成过程及其尺寸、数量和类型的演变规律，明确老化脆化材料性能修复、再生的机理。该研究有望为核电部件的延寿提供一种新方法和新思路，从而降低核电部件的运行成本，推动国产核电关键部件的可靠性和安全性。

关键词：核电；不锈钢；老化再生

#### E01-08 (Invited)

##### 氢致钛及钛铝合金高温塑性加工改性机理研究

宗影影，邵斌，郭斌，单德彬

哈尔滨工业大学

随着航空航天技术的飞速发展，对材料的性能要求越来越高，比强度高、比刚度大、质量轻的新型材料受到迫切需要。钛及钛铝合金由于具有轻质高强的优点，是航空航天领域的重要材料，但是室温塑性差、热加工难度大，一直是制约其广泛应用的瓶颈问题。氢致钛合金塑性加工改性技术是一种把氢作为临时合金元素，通过改善微观组织结构，达到降低变形抗力和成形温度、提高塑性、改善热加工性能的新方法，利用此方法可以降低钛合金成形温度 100 °C、减小变形抗力 40%，对于减少模具的变形和磨损，延长模具寿命，拓展钛合金的应用具有重要意义。最佳氢含量的确定一直是氢致塑性加工改性技术的理论瓶颈，针对此，在氢致钛合金高温塑性加工软化和硬化规律方面进行了系统深入的研究，大量实验证明，当置氢合金在  $\alpha$  单相区或  $\alpha+\beta$  两相区变形时，氢致塑性加工软化，当在  $\beta$  单相区变形时，氢致塑性加工硬化；建立了氢致钛合金软化数学模型，并由此确定了不同类型钛合金的最佳氢含量。揭示了氢致塑性加工改性机理，发现了氢致  $\alpha$  (hcp)  $\rightarrow$   $\beta$  (bcc) 相变是氢致改性的主要因素，将该技术推广应用于具有 hcp $\rightarrow$ bcc 晶格结构转变的钛铝合金和第 IV 族锆合金中，结果表明亦存在氢致塑性加工改性效应；发现氢致位错运动、片层分裂和孪晶亦是氢致改性的影响因素；建立了氢含量、组织演变与力学性能之间的模型，将此技术应用于实际构件的研制，实现了氢致改性技术的工程应用。

#### E01-09

##### Pb-Mg-10Al-0.5B 合金的本构模型改进、加工图及组织演变研究

段永华，包伟宗

昆明理工大学

Pb-Mg-Al-B 核屏蔽材料具有高强度和优异的中子/射线综合屏蔽性能，对不同能量的 X 射线屏蔽率均达到 90% 以上，尤其对 X 射线能量介于 40-88 KeV 之间的“Pb 弱吸收区”的屏蔽率达到 97.5% 以上，有效地解决了“Pb 弱吸收区”的问题； $\gamma$  射线屏蔽率为 49.75%（137Cs 源）和 34.21%（60Co 源）；中子的屏蔽率高达 92.7%，有望成为新一代核屏蔽材料。但由于 Pb-Mg-Al-B 核屏蔽材料中含有大量的金属间化合物  $Mg_2Pb$ ，导致 Pb-Mg-Al-B 核屏蔽材料的室温变形十分困难，限制了该材料在结构材料方面的应用。本文选取 Pb-Mg-Al-B 核屏蔽材料系列中的 50Pb-39.5Mg-10Al-0.5B 合金（wt%，以下简称 Pb-Mg-10Al-0.5B 合金）为研究对象，采用 Gleeble-3500 热模拟压缩试验机研究了 Pb-Mg-10Al-0.5B 合金在变形温度 493-653 K、应变速率  $0.01-10 \text{ s}^{-1}$  的高温变形行为，分别利用 Arrhenius 模型、多元线性回归模型和人工神经网络（ANN）模型描述了合金的本构方程和流变行为，通过计算流变应力的预测值与实验值的相关系数（ $r$ ）、平均相对误差的绝对值（MARE）、均方根误差（RMSE），分析了三个模型的准确性。基于动态材料模型（DMM 模型），建立了合金的热加工图，分析了合金在热变形过程中的功率耗散规律和塑性失稳条件。根据热加工图与变形组织分析，获得 Pb-Mg-10Al-0.5B 合金的热加工工艺

参数。实验结果表明，Pb-Mg-10Al-0.5B 合金的流变行为受应变、应变速率和温度的影响，流变应力随应变速率降低及温度和应变升高而降低；ANN 模型比 Arrhenius 模型和多元线性回归模型能够更准确地预测合金的流变应力；热加工图对应变较为敏感，即当应变为 0.5 和 0.7 时，加工图出现了裂纹区，且不稳定区大小随应变而改变；通过加工图和变形组织演变分析发现，Pb-Mg-10Al-0.5B 合金的最佳热加工温度为 590-653 K，应变速率为 0.01-0.3 s<sup>-1</sup>。这将为建立正确的 Pb-Mg-Al-B 核屏蔽材料的变形加工工艺提供理论指导。

关键词：Pb-Mg-10Al-0.5B 合金；变形行为；人工神经网络；加工图；组织演变

## E01-10

### CT20 钛合金管材冷轧过程中的性能和织构分析

郭荻子，杜宇，赵彬，赵永庆

西北有色金属研究院

本文研究的 CT20 钛合金是一种 20K 使用的近  $\alpha$  型低温钛合金，可进行冷轧及冷弯变形。采用传统冷轧获得的 CT20 钛合金管材，需经过复杂的等温热处理工艺方可获得优异的室温、低温力学性能匹配，但其尺寸精度较差、组织均匀性差，导致扩口、压扁等工艺性能不稳定，使得后续进行管材空间多向冷弯成型时易开裂。针对该合金管材工艺性能差的现状，以相同轧制变形率、不同 Q 值的三种 CT20 合金管材为研究对象，通过室温拉伸测试、压扁测试以及 X 射线衍射技术（XRD）对管材的性能及织构进行了测试和分析。确定了 CT20 合金管材的形变织构和退火织构类型，研究了轧制工艺参数 Q 对织构类型的影响，及织构与性能之间的关系。结果表明，冷轧 CT20 合金管材的形变织构和退火织构其总体类型相同，均为轴向 <10-10> 织构。轧制过程中提高轧制 Q 值会使完全再结晶退火后的 CT20 合金管材产生周向织构，从而提高其压扁性能。

关键词：形变织构；再结晶织构；Q 值

## E01-11

### 提高孔结构高温疲劳抗力的冷挤压表面强化方法

王欣<sup>1</sup>，艾莹珺<sup>1</sup>，古远兴<sup>2</sup>，汤智慧<sup>1</sup>

1. 中国航发北京航空材料研究院
2. 中国航发四川燃气涡轮研究院

作为发动机部件的重要细节结构，孔在服役过程承受大应力交变载荷作用。参照轮盘孔结构设计孔型疲劳试样，研究了原始和冷挤压强化后中心孔试样的疲劳性能，并进行了残余应力和表面粗糙度分析。结果表明，冷挤压强化对于 GH4169 合金中心孔疲劳性能具有明显的增益作用，在 825 MPa/400 °C 下，挤压强化后中心孔疲劳寿命较原始状态提高了 2.5 倍以上。引入深层残余压应力以及孔壁位置的粗糙度优化是 GH4169 合金孔结构挤压后的重要强化因素。挤压强化可作为提高发动机孔结构可靠性的重要强化方法。

关键词：高温合金；孔结构；冷挤压；高温疲劳性能

## E01-12

### 低碳钢、超低碳钢铁素体区轧制工艺基础及组织性能控制

赵虎<sup>1</sup>，王建功<sup>2</sup>，程鹏飞<sup>2</sup>，周甸<sup>2</sup>，夏银锋<sup>2</sup>，王晓东<sup>2</sup>

1. 首钢集团有限公司技术研究院
2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司

铁素体区轧制技术具有节约能源、提高成材率、减少轧辊损耗、提高带钢酸洗效率、降低冷轧工序轧制负荷、提高钢板深冲性能等诸多优点，是近年发展起来的一项绿色节能的先进轧钢技术。本文通过测定低碳钢和超低碳钢动态 CCT 曲线和变形抗力，分析了低碳钢（C~0.04%）和超低碳钢（C~0.0025%）铁素体区轧制工艺的制定依据。在常规热连轧生产线上，实现了低碳钢和超低碳钢的稳定批量生产。铁素体轧制热轧板组织在厚度方向存在不均匀性，表层为完全再结晶组织；中心为部分再结晶组织，少量再结晶晶粒分布在纤维状变形组织间。铁素体区轧制热轧板中心存在较强烈的{111}织构。经过冷轧和连续退火后，与常规轧制相比，铁素体区轧制工艺所生产的低碳钢和超低碳钢具有较大的晶粒尺寸。铁素体区轧制钢板比常规轧制钢板具有更加优异的力学性能。铁素体区轧制超低碳钢板屈强比为 0.48，而常规轧制钢板屈强比为 0.52；铁素体区轧制超低碳钢板  $\Delta r \leq 0.3$ ，而常规轧制超低碳钢板  $\Delta r \leq 0.7$ 。铁素体区轧制低碳钢板比常规轧制钢板具有低的屈强比，高的延伸率。总之，铁素体区轧制低碳钢板和超低碳钢板具有更加优异的成形性能。

关键词：铁素体区轧制；低碳钢；织构；屈强比；宽厚塑性应变比

### E01-13

#### 脉冲电磁场处理对硬质合金力学性能的影响研究

吴明霞, 杨屹, 杨刚, 魏灿, 韦辽

四川大学

硬质合金具有优异的强度和耐磨性, 被广泛地应用于生产生活的各个领域。随着工业的迅速发展, 对高品质、高性能硬质合金产品的需求增加, 众多适用于硬质合金的强化后处理技术应运而生, 然而由于经济成本、能耗、环保等因素的限制没有得到大规模的应用。本文基于脉冲磁化处理与脉冲电流处理技术, 提出了脉冲电磁场耦合处理工艺, 并对硬质合金材料及其刀具开展改性后处理实验。通过分析不同脉冲电磁处理工艺对硬质合金力学性能的影响, 发现磁场强度为 1 T 时对材料的增硬效果显著, 硬度提高约 64 HV, 磁场作用时间越长增硬效果越弱; 电流密度为 20 A/mm<sup>2</sup> 时对试样的增硬效果最明显, 硬度提高约 34 HV。磁场强度为 1 T 时试样的抗弯强度约降低 15%; 磁脉冲的频率越高对抗弯强度的弱化就越厉害。脉冲电流处理则会提高硬质合金试样的抗弯强度, 在电流密度为 25 A/mm<sup>2</sup> 时抗弯强度提高约 60%。脉冲电流与磁场的耦合能充分利用二者对硬质合金的增硬效果, 同时也通过脉冲电流对硬质合金抗弯强度的增强来弥补脉冲磁场对材料抗弯强度的负面作用。在耦合工艺中脉冲电流具有主导作用, 将低强度的脉冲磁场与高强度的脉冲电流耦合对硬质合金硬度和抗弯强度起到强化作用。

关键词: 硬质合金; 脉冲电场; 磁场; 力学性能

### E01-14 (Invited)

#### 材料智能化制备加工技术

刘雪峰

北京科技大学

材料智能化制备加工技术是应用人工智能、大数据、虚拟仿真、数值模拟仿真、信息处理和先进控制等技术, 以一体化设计与智能化过程控制方法取代传统制备加工过程中的“试错法”设计与工艺控制方法, 实现材料组织性能和产品质量的精确设计与制备加工过程的精确控制, 获得最佳的材料组织性能与制备加工质量。该技术被认为是 21 世纪前期材料制备加工新技术中最富潜力的前沿研究方向, 引起了各工业发达国家的高度重视, 已成为必争领域和未来竞争制高点。介绍了材料智能化制备加工技术的提出背景和发展意义, 讨论了其概念、特点及有关基础理论与关键问题, 概述了材料智能化制备加工技术的研究开发现状, 交流了自行发明的智能化无模拉拔、智能化半无模拉拔及智能化无模拉轧的研究成果, 展望了材料智能化制备加工技术的发展未来和应用前景。

### E01-15 (Invited)

#### 高强超声场中液固相变机理与新材料合成

翟薇, 吴文华, 陈芳, 魏炳波

西北工业大学

超声场对涉及液相和液固相变的材料制备过程具有重要影响。本文研究超声波在液相中的传播规律, 以及空化和声流效应, 并采用高功率超声制备金属材料, 金属/有机和有机/无机复合材料。实验研究了超声场对于三元 Al-Sn-Cu 偏晶合金的液相分离和凝固过程的作用机制。超声作用能够抑制由于液相分离引起的宏观偏析。与一维 z 方向超声作用相比, 三束正交超声波的施加能够大大增强声场对液相分离过程的有效作用范围, 有效的克服了一维超声波能量衰减快、作用范围小等局限性。进一步构建了超声场中难混溶区液相分离模型, 数值模拟并对比研究了一维和三维超声作用下熔体中的声场和流场分布以及空化效应发生区域, 揭示了不同维度超声作用对偏晶合金液相分离过程中的传热和传质以及第二相液滴形核和生长的影响规律。采用去合金法和超声化学方法制备不同结构的多孔 CuO@PNIPAM 纳米复合材料, 并对其葡萄糖传感性能进行了研究。在超声合成过程中, 创新性采用 N<sub>2</sub> 对反应液相体系进行间歇式曝气, 大量 N<sub>2</sub> 在 CuO 表面的吸附既可以作为空化泡的形核点, 又能降低液相的表面张力, 从而有效扩大了超声空化效应的作用范围, 制备出了具有良好无机/有机界面性能的 CuO@PNIPAM 纳米复合材料。该复合材料可作为温度响应性葡萄糖传感器, 实现温度触发的葡萄糖传感过程。创新性通过高强超声结合循环曝气的作用方式, 成功制备出 SiO<sub>2</sub>@PNIPAM 无机/有机壳核粒子, 并通过控制曝气参数, 实现了该种结构中壳层和核层厚度的主动调控。该有机/无机材料子可以作为温敏颗粒, 制备出具有温度响应特性的乳液, 用于对阿司匹林等药物的温度控释。

关键词: 功率超声; 空化效应; 声流效应; Al-Sn-Cu 偏晶合金; CuO@PNIPAM

### E01-16

#### 金属塑性成形数值模拟与优化集成

洪慧平  
北京科技大学

金属塑性成形过程具有材料非线性、几何非线性和接触非线性等特点,涉及复杂工艺过程链,受多种因素影响且往往交叉作用,因此需要借助计算机数值模拟(特别是 FEM)更好地揭示过程的物理本质和各影响参数间的内在关系。通过准确计算塑性成形过程中总体目标量(变形力、变形功等)、局部目标量(应力场、应变场、应变速率分布、温度场,应力集中、温度峰值等)和微观目标量(再结晶、晶粒大小等)等,为优化工艺过程提供技术基础。长期以来模拟工作者在每次模拟之后通常需要评价该模拟进程和结果,在对设计方案和模型修改后重新启动模拟程序计算,这种重启过程经常需要反复多次,严重降低了优化工作效率。因此金属塑性成形工艺设计迫切需要建立自动优化新技术。本文以大型模拟软件 LARSTRAN/SHAPE 为例结合典型塑性成形过程介绍数值模拟与优化相互集成的方法(CAOT)并通过并行组合优化以及分布计算减少模拟计算时间(包括省去人机交互)使高效率模拟实际复杂塑性成形过程成为可能,实现考虑工艺和设备限制条件的自动优化。

关键词:金属塑性成形;数值模拟;过程优化;集成

#### E01-17

##### 冷压缩连接接头界面结合行为研究

谢碧君,孙明月,徐斌,李殿中

中国科学院金属研究所

本研究利用热模拟试验机 Gleeble-3800 对 316LN 不锈钢进行了室温压缩连接,随后分别升温至 700 °C、900 °C 和 1100 °C 保温 1 min。整个实验过程在 100 torr 的真空条件下完成,压缩变形量为 50%。结合 EBSD 和 TEM 等技术,通过分析界面的结合特征进一步研究了界面的结合机制。EBSD 分析结果表明再结晶晶粒优先在结合界面处形核且再结晶晶粒朝界面两侧生长,随着保温温度升高,逐渐出现跨越界面的再结晶晶粒,这有助于实现界面的完全愈合。TEM 实验分析表明冷变形使得表面的初始氧化膜破碎,露出的新鲜金属相互结合。然而破碎的氧化膜颗粒被包裹在原始结合界面上,这对界面的结合有消极的影响。此外,TEM 表明破碎的界面氧化物颗粒为锰的氧化物。上述结果表明,通过冷压缩连接及随后的高温退火处理后,再结晶在结合界面处发生,使得界面实现初步结合。然而,破碎的界面氧化物颗粒会阻碍再结晶晶粒跨越界面生长,从而抑制的界面的完全愈合。

#### E01-18

##### 形变处理工艺对 Cu-Ni-Co-Si 合金组织性能的影响规律

李江<sup>1,2</sup>,米绪军<sup>1</sup>,黄国杰<sup>1</sup>,彭丽军<sup>1</sup>,解浩峰<sup>1</sup>,康永林<sup>2</sup>

1.有研工程技术研究院有限公司

2.北京科技大学

Cu-Ni-Co-Si 合金凭借其优良的综合性能广泛应用于引线框架、电子接插件等领域。本文研究形变热处理条件下不同 Ni/Co 比的 Cu-Ni-Co-Si 合金的性能与显微组织结构变化,对合金的力学性能和电学性能进行测量,并采用金相显微镜(OM)、透射电子显微镜(TEM)、高分辨电子显微镜(HRTEM)等分析测试方法分析其显微组织。结果表明:时效前的冷变形可以加速时效析出过程,增强合金的硬度和导电率;不同 Ni/Co 条件下合金的性能均有显著地提升,其中,Ni/Co 比为 1.95 左右时,合金的综合性能最优良。该合金的峰时效主要为第二相粒子强化,析出的第二相主要是(Ni,Co)<sub>2</sub>Si 粒子;采用铸锭—热轧—冷轧(变形量为 60%)—时效—二次冷轧(变形量为 40%)—二次时效工艺处理的合金可以得到硬度和导电率的最优组合。

关键词:Cu-Ni-Co-Si 合金;Ni/Co 比;形变处理;第二相强化

#### E01-19

##### 镍基 690 合金晶界碳化物形变过程的原位拉伸研究

李慧,刘锡荣,夏爽,刘文庆

上海大学

镍基 690 合金由于其优良的耐腐蚀性能与综合力学性能,常被用于压水堆核电站蒸气发生器传热管材料,晶界处碳化物的析出对其服役性能有明显影响。本工作利用 SEM、EBSD 和原位拉伸技术研究了晶界工程处理的镍基 690 合金样品在 715 °C 时效 15 h 后不同类型晶界处碳化物以及附近基体的形变规律。实验结果表明:在 SEM 原位拉伸过程中,晶界处析出的碳化物是与晶界一起迁移的,但不同类型的晶界与滑移线的关系是不一样的:滑移线能够穿过孪晶界,而不能穿过  $\Sigma 9$ 、 $\Sigma 27$

以及随机晶界。当形变到达 40%时, 为了协调变形, 所有晶粒都会产生多系滑移, 表现出良好的塑性。微裂纹萌生的位置大多位于碳化物与基体的相界面处以及晶界处和碳化物内部。相对于在  $\Sigma 3c$  晶界和  $\Sigma 3i$  晶界,  $\Sigma 9$ 、 $\Sigma 27$  以及随机晶界较易形成微裂纹。但不同类型晶界处微裂纹的萌生与晶界所处的三晶交界类型有一定的关系: 临近晶界类型的  $\Sigma$  越高, 晶界处越易萌生微裂纹。此外由 3 条低  $\Sigma$ CSL 晶界构成的三晶交界相对于其他类型的三晶交界有较好的抵御微裂纹形成的能力。根据实验结果讨论了晶界碳化物析出对样品形变损伤规律的影响。

关键词: 碳化物; 晶界类型; 三晶交界; 晶界工程; 原位拉伸; 690 合金

## E01-20

### 204C2 铬锰系奥氏体不锈钢冷轧及退火工艺的实验研究

王天一<sup>1</sup>, 宋仁伯<sup>1</sup>, 蔡恒军<sup>2</sup>, 文健<sup>2</sup>, 苏阳<sup>1</sup>

1. 北京科技大学

2. 鞍钢联众(广州)不锈钢有限公司

以 204C2 铬锰系奥氏体不锈钢为实验材料, 对其冷轧和退火后的性能及组织进行检测与观察, 分析了冷轧变形量和退火工艺对 204C2 不锈钢性能及组织的影响。实验结果表明, 冷加工后该奥氏体不锈钢强度增加, 塑性降低, 随着形变量的增加, 组织中形变孪晶数目增多, 加工硬化程度增加; 退火后的组织基本为奥氏体, 再结晶之后的晶粒大小较为均匀, 退火软化效果明显。对于实验中 204C2 铬锰系奥氏体不锈钢最佳退火工艺为: 在 1020 °C 下退火 1 min (快冷), 以此得到最佳的力学性能。

关键词: 铬锰系奥氏体不锈钢; 加工硬化; 退火软化; 力学性能

## E01-21 (Invited)

### 高通量等离子熔射耐磨蚀涂层制备及测试技术

崔洪芝

山东科技大学

针对海洋、矿山、电力等行业工况条件复杂, 耐磨蚀涂层材料性能不足, 使用寿命短, 传统涂层合成制备及测试技术效率低, 以及高性能涂层材料成分多元、制备工艺复杂、组织和性能多样化的特点, 开发了高通量等离子熔射耐磨蚀涂层组合制备及磨损、冲蚀等分级并行测试技术。相较于传统的单样制备方法, 高通量等离子熔射涂层制备技术可实现多个成分体系的合金粉体之间的灵活切换, 一次制备可以快速获得不同成分体系、工艺参数的涂层样品阵列, 并且等离子熔射过程中粉末及强化相颗粒之间的组合以及原位形成, 液态及半固态凝固, 可获得晶须、增强颗粒共存, 具有纳米-亚微米-微米跨尺度微观结构的金属/陶瓷涂层, 同步完成多组分目标材料体系制备, 使制备具有高效性、系统性和一致性。在此基础上研究 Fe 基、TiAl 基金属陶瓷复合材料以及高熵合金等, 研究过渡族金属碳、氮、B 化物等高硬度、高熔点、高的热稳定性的强化相, 对涂层性能的影响。采用高分辨透射电镜 (HRTEM)、VASP 软件包和 edge-to-edge 匹配模型研究了 TiCN/Fe<sub>2</sub>Ti、Fe<sub>2</sub>Ti/ $\alpha$ -Fe、TiB<sub>2</sub>/TiC, Ti<sub>2</sub>AlC/TiC、TiAl/Ti<sub>2</sub>AlC 的界面性能, 实验结果与理论预测取得了较好的一致性。有利于提升涂层的性能。相对于传统的单样测试方法, 高通量涂层测试技术可以对样品阵列进行多参数、多级快速磨损和冲蚀实验, 一次装夹可以快速检测 30 个以上的样品, 通过采用扫描式测量、表征磨蚀体积、形貌等信息, 作为筛分样品或者涂层体系、微观组织结构的依据, 并在此基础上进行深入的界面以及取向关系分析, 建立耐磨蚀涂层材料、组织结构、性能等数据管理系统。

关键词: 高性能涂层; 等离子熔射; 高通量制备与测试; 数据管理

## E01-22

### 锌铝镁镀层在 NaCl 体系中的腐蚀行为研究

王海全, 蒋光锐, 刘广会

首钢集团有限公司技术研究院

热浸镀锌是防止钢材腐蚀的重要方法。为了提高镀锌层的防护效果开发新型合金镀层, 进行了大量的含镁的锌合金镀层研究工作。而且, 随着锌资源的不断消耗和环境污染的日益严重, 热镀锌镀层在耐蚀性能和力学性能等方面已不能满足要求, 耐蚀性能更高、经济性能更好的新型合金镀层成为研究和开发的重点。在热镀锌镀层中添加适量的镁和铝可以有效提高镀层的耐腐蚀性能和力学性能, 从而可以延长镀层的使用寿命, 又能通过降低镀层质量减少锌的消耗。日本和欧洲的钢铁公司相继开发了多种成分不同的热浸镀锌铝镁合金镀层钢板。部分热浸镀锌铝镁镀层钢板进行了商业化生产。许多研究者对锌液中添加镁对提高镀层耐蚀性能进行了研究。但是, 上述研究只对热浸镀锌铝镁镀层的耐蚀性能进行评价, 没有从腐蚀产物的形成机理、损伤后的防护机理给出原因分析。因此, 本文作者采用 SEM 观察了 GI 镀层和锌铝镁镀层在 NaCl 体系中的微观结

构和镀层腐蚀后的表面形貌,用电化学和循环腐蚀试验分析镀层钢板的腐蚀行为和耐腐蚀性能,并用 XRD 分析镀层表面腐蚀产物的相组成。结果表明: 锌铝镁镀层表面由不同相构成的复杂组织, 主要物相富锌相以及锌和金属间化合物  $Zn_2Mg$  组成的二元共晶相, 同时包含前两项以及富铝相的三元共晶相和富铝相的枝晶结构。纯锌镀层由典型的共晶相、块状相和针状相组成, 共晶相占据了镀层表面的大部分面积。锌铝镁镀层的腐蚀电位与纯锌镀层 GI 相当; 锌铝镁镀层的阻抗较 GI 高出约 1 个数量级。原因分析为热镀锌铝镁镀层中 Al、Mg 及  $Zn_2Mg$  相的存在可以使得镀层表面形成稳定的化合物, 降低电化学试验时镀层的电流密度和溶解速度; 镀层中的共晶相可以使得 Mg 元素在镀层中均匀分布, 从而抑制阴极反应; 镀层腐蚀后生成的不溶性的胶状腐蚀产物, 可以有效隔断镀层与外界物质间的电子传输。

## E01-23

### 激光原位合成 $ZrB_2$ -C 增强 Cu 基涂层的微观结构

吕相哲, 战再吉, 曹海要, 彭宇相, 张琦

燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室

激光熔覆技术作为一种先进的表面改性技术, 通过利用高能激光束使熔覆材料与基体同时熔融凝固, 获得冶金结合的增强层。高温自蔓延反应是一种在反应过程中大量放热的化学反应, 利用高温自蔓延反应可以原位合成增强相, 相较于直接加入增强相材料, 原位自生的增强相在基体中形核、长大, 与基体结合强度高, 增强效果显著。本研究采用 Al-ZrO<sub>2</sub>-B<sub>4</sub>C-Ni-Cu 粉末为原料, 以激光熔覆技术与高温自蔓延反应相结合的方式, 在纯铜表面制备二硼化锆 ( $ZrB_2$ ) 与球形石墨 (C) 增强 Cu 基复合涂层。利用光学显微镜, X 射线衍射仪, 透射电子显微镜, 能谱仪和维氏硬度计等分析了涂层的组织结构, 原位自生增强相的生长过程和显微硬度。结果表明: 涂层中原位自生的  $ZrB_2$  沿[-1-120]晶向生长为细针状, 直径约为 4  $\mu m$ , 最大长度约为 100  $\mu m$ , 界面结合良好, 为纤维增强相。以原位自生的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为核心, C 原子在其表面形成球形石墨, 球形石墨的直径约为 600 nm。增强相分布均匀, 熔池基体成分由于快速冷却, 非平衡凝固形成树枝晶结构, 并包裹增强相。原位自生  $ZrB_2$ -C 增强 Cu 基涂层的力学性能提升显著, 平均显微硬度达 480 HV<sub>0.2</sub>, 约为纯铜基体的 8 倍。

关键词: 激光熔覆; 原位合成;  $ZrB_2$ ; 球形石墨; 复合涂层

## E01-24

### 镍基镀层在铜表面的反置换沉积及其抗腐蚀性

张兴凯, 梁爱民, 张俊彦

中国科学院兰州化学物理研究所

铜具有出色的导电、导热和力学性能等, 在电力系统、电子器件和机械制造等领域应用广泛。虽然铜通常不会因析氢反应而腐蚀, 但当腐蚀介质中存在 Cl<sup>-</sup>、O<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 等时, 铜会发生较显著腐蚀, 并影响其优异性能。为改善铜的抗腐蚀性, 化学还原镀镍磷是常用方法之一。但由于铜对次亚磷酸钠的氧化反应不具催化活性, 要实现铜表面化学还原镀镍磷, 需活化预处理。此外, 化学还原镀镍磷液中含有镍盐和还原剂, 因此存在稳定性差等问题。与化学还原镀相比, 置换沉积具有沉积液组成简单、稳定性好和效率高等优点。但铜的标准电极电位 ( $E_{Cu^{2+}/Cu} = 0.337 V$ ) 高于镍 ( $E_{Ni^{2+}/Ni} = -0.250 V$ ), 因此理论上铜不能与镍离子发生置换反应而在其表面生成镍基镀层。如何使铜的稳定电位低于镍的沉积电位, 从而使其与镍离子发生“反置换”反应, 是实现铜表面镍基镀层“反置换”沉积的关键。基于接触电势理论, 我们将铜与铝接触, 使铜在仅由硫酸镍和氨水组成的镀液中的稳定电位负移 (从 -0.554 V 降低至 -1.152 V), 并低于镍的沉积电位, 在铜表面“反置换”沉积制备了镍镀层。EDS 和 XRD 测试显示, 镀层成分为纯镍。SEM 观测发现, 所沉积镍镀层结构致密, 厚度约为 1  $\mu m$ 。电化学分析表明, 镍镀层的腐蚀抑制效率为 98.6%, 略优于化学还原镀镍磷层 (95.1%)。但针对 PCB 铜线路等, 基于铝接触的镍镀层制备方法难以应用。能斯特方程表明, 铜在溶液中的稳定电位受铜离子浓度、溶液酸碱度和络合剂等影响。我们实验发现, 铜在硫代硫酸钠溶液中的稳定电位为 -0.619 V, 低于镍在其中的稳定电位 (-0.170 V)。而且, 在仅由硫代硫酸钠和硫酸镍组成的“反置换”沉积液中, 铜的稳定电位 (-0.438 V) 依然低于镍 (-0.382 V)。在“反置换”沉积液中浸泡 10 min 后, 铜表面可获得银色镀层。EDS 和 XPS 结果显示, 镀层除镍之外还有少量硫元素存在, 硫主要来自硫代硫酸钠的分解。XRD 结果表明, 镀层由 Ni 和 Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> 相组成。SEM 观测发现, 所沉积镍硫镀层由尺寸约 70 nm 的微结构紧密堆积而成。电化学分析表明, 铜表面“反置换”沉积镍硫后, 其在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀电流密度由 39.33  $\mu A \cdot cm^{-2}$  降低至 1.927  $\mu A \cdot cm^{-2}$ , 说明镍硫镀层具有优异抗腐蚀性。综上, 通过降低铜的稳定电位, 实现了镍基镀层在铜表面的“反置换”沉积, 且所沉积镍基镀层具有优异抗腐蚀性。

关键词: 铜; 反置换沉积; 镍基镀层; 抗腐蚀性



## E01-25

### Pt 改性 Al 梯度 MCrAlY 涂层的制备和氧化性能研究

孙健<sup>1,2</sup>, 刘书彬<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>1,2</sup>, 于昊君<sup>1,2</sup>, 姜肃猛<sup>1</sup>, 宫骏<sup>1,2</sup>, 孙超<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院金属研究所
2. 中国科学技术大学

采用电弧离子镀 (AIP), 电镀 Pt 和化学气相沉积 (CVD) 相结合在单晶高温合金基体上制备 Al 梯度和 Pt 改性的 Al 梯度 MCrAlY 涂层。分析了涂层的组织和结构, 并且对比研究了两种涂层在 1100 °C 下的恒温氧化行为和 1200 °C 下的循环氧化行为。两种涂层都由富 Al 的外层和富 Cr 的内层组成。在恒温氧化过程中, Pt 改性的 Al 梯度 MCrAlY 涂层具有较低的氧化速率, Pt 的添加可以有效的抑制高温合金基体和涂层之间元素的互扩散, 从而减小 Al 元素的消耗, 抑制  $\beta$  相向  $\gamma'$  相的转变。在循环氧化过程中, Al 梯度 MCrAlY 涂层的氧化膜的脱落量大于 Pt 改性 Al 梯度 MCrAlY 涂层, Pt 元素的添加可以抑制氧化膜的脱落, 从而提高了涂层的抗循环氧化性能。大量的富 Pt 相偏聚在氧化铝的晶界处, 阻碍了  $\text{Al}^{3+}$  延晶界扩散, 从而降低氧化速率。

关键词: 电弧离子镀; 梯度涂层; Pt 改性; 高温氧化

## E01-26

### 激光熔覆原位自生 $\text{ZrB}_2$ -ZrC/Cu 复合涂层的制备及性能研究

曹海要, 战再吉, 高杰, 吕向哲

燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室

铜及其合金由于其较高的导电、导热性能以及优异的腐蚀抗性, 广泛的用于航天、航空、汽车工业, 以及作为电接触元件的原材料。但是, 其较差的磨损抗性以及较低的抗拉强度限制了其在工业方面的应用。与传统表面改性技术相比, 激光熔覆具有效率高、界面结合好以及涂层厚度厚等优点, 因此激光熔覆技术在材料表面改性领域引起广泛的关注。本研究利用高能激光束, 在纯铜基体表面通过添加将 Cu 粉、Cu-Zr 合金粉以及镍包  $\text{B}_4\text{C}$  粉原位合成了  $\text{ZrB}_2$ -ZrC/Cu 金属陶瓷复合涂层。通过调整制备工艺参数, 制备  $\text{ZrB}_2$ -ZrC/Cu 金属陶瓷复合涂层最佳的工艺参数为激光功率为 2800 W, 扫描速度为 3 mm/s, 光斑直径为 3 mm, 搭接率为 50%。在最佳工艺参数以及最佳的粉料配比下, 制备的涂层最高抗拉强度为 340 MPa, 电导率为 43% IACS。通过物相及显微观察分析, 发现  $\text{ZrB}_2$ 、ZrC 成功的由 Zr- $\text{B}_4\text{C}$  在激光作用下合成, 增强相均匀的分布在涂层中。 $\text{ZrB}_2$  呈现较多的形态, 包括长条状、针状和薄片状, ZrC 呈典型的等轴状。高速载流摩擦磨损试验结果表明, 随着滑动速度的增加, 涂层由最初的轻微的磨粒磨损变为剥层磨损, 随着增强相含量的提高, 涂层的抗磨损性能也随之提高, 其磨损机制由粘着磨损变为磨粒磨损; 随着加载电流的增加, 涂层的磨损情况加剧, 在较大的电流下其磨损机制为粘着磨损。

关键词: 激光熔覆;  $\text{ZrB}_2$ ; ZrC; 显微组织; 性能

## E01-27 (Invited)

### Al-16Si 过共晶铝硅合金非平衡凝固组织研究

王建华, 杨树杰, 刘亚, 彭浩平, 苏旭平

常州大学

为使 Al-16Si 过共晶铝硅合金获得完全的伪共晶凝固组织, 系统研究了熔炼温度、固-液两相区冷却速度和金属型温度对 Al-16Si 合金非平衡凝固组织的影响。采用全自动图像分析仪对非平衡凝固 Al-16Si 合金试样进行显微组织的观察, 分析初生硅的析出行为和获得全部伪共晶组织的可能性。研究得到如下结果: (1) 将 Al-16Si 合金分别在 700 °C、800 °C、900 °C、1000 °C 熔炼保温 80 min 后, 流经室温引流装置并在室温金属型内凝固时, 当熔炼温度为 900 °C 时合金非平衡凝固组织为初生硅和共晶组织, 凝固组织中的初生硅尺寸最小且数量最少。(2) 当 Al-16Si 合金在 900 °C 熔炼保温 80 min 时, 合金熔体流经室温引流装置并分别在室温、527 °C、577 °C 和 627 °C 的金属型中凝固。研究表明, 在 527 °C 的金属型中凝固后合金组织中的初生硅尺寸非常细小且呈弥散分布状态, 但不能得到完全的伪共晶凝固组织。(3) 将 Al-16Si 合金在 900 °C 熔炼保温 80 min 后, 流经液氮冷却的引流装置, 然后分别在室温、527 °C、577 °C、627 °C 的金属型中凝固。研究表明, Al-16Si 合金熔体在固-液两相区进行强制冷却后, 在 527 °C 金属型中凝固可以完全抑制初生硅的析出, 可得到全部的伪共晶组织。

因此, 对 Al-16Si 过共晶合金来说, 只有在合适的温度下进行熔炼、然后在其固-液两相区强制冷却抑制初生硅的析出、并在共晶温度以下适当温度下进行非平衡凝固才能最终得到完全的伪共晶组织。

关键词: 过共晶铝硅合金; 非平衡凝固; 固-液两相区; 控制凝固; 伪共晶组织

## E01-28 (Invited)

### 有色金属材料连续流变挤压过程组织性能调控

管仁国

东北大学

连续流变挤压技术具有工艺流程短、产品性能优良等优点,论述了该技术基本原理及其在制备高性能有色金属材料方面的应用。主要内容包括:建立了剪切/振动耦合下熔体结晶形核率模型,开发了剪切/振动耦合组织细化技术,实现了高性能金属的流变成形;开发了半固态金属浆料的制备与流变挤压成形一体化装备,实现了系列新合金材料研发与产业化;发明了从液态金属到超细晶金属的短流程制备技术,实现了从液态金属到超细晶铝材的高效短流程加工。采用连续流变挤压制备的高强铝合金导线、耐热铝合金导线与高 Mg 含量的 Al-Mg 合金线性能优于已有同类产品。

关键词:连续流变挤压;短流程;组织;性能

## E01-29

### 生物可降解 Zn-Mn 合金:从室温极脆至极塑

石章智,于静,刘雪峰

北京科技大学

低合金化 Zn-Mn 合金(Mn<1%)是一种新型的生物可降解锌合金,目前对该类的合金的研究正处于起步阶段。根据 Zn-Mn 二元相图,我们设计了 Zn-0.4Mn 和 Zn-0.8Mn 合金。铸态 Zn-0.4Mn 和 Zn-0.8Mn 合金极脆,延伸率均不超过 1.0%,这与目前已报道的多种铸态 Zn 合金延伸率不超过 3%的现象具有一致性。为了消除铸态 Zn-Mn 合金的脆性,我们设计了 4 种工艺路线:(1)大应变量热轧(热轧态);(2)大应变量热轧,然后大应变量冷轧(冷轧态);(3)大应变量热轧,200℃保温 2 小时空冷,然后大应变量冷轧(中温退火冷轧态);(4)大应变量热轧,380℃保温 1 小时水淬,然后大应变量冷轧(高温退火冷轧态)。上述 4 种工艺路线都显著提高了 Zn-Mn 合金的塑性,但它们对合金室温力学性能的改善又各具特点。1 号工艺路线可以显著提高两种 Zn-Mn 合金的强度和塑性,热轧态 Zn-0.4Mn 和 Zn-0.8Mn 合金的延伸率分别达到 36%和 46%。2 号工艺路线对 Zn-0.4Mn 合金的塑性有进一步提高,使其达到 76%,但对 Zn-0.8Mn 合金的塑性仅有微弱提高,与热轧态 Zn-Mn 合金相比,冷轧态 Zn-Mn 合金的屈服强度和抗拉强度均降低,出现明显的“加工软化”现象,与传统金属材料的加工硬化截然相反。3 号工艺路线将两种 Zn-Mn 合金的室温延伸率提高至 89-94%,部分样品的延伸率接近 100%。与冷轧态 Zn-Mn 合金相比,中温退火冷轧态 Zn-0.4Mn 合金的强度几乎不变,而中温退火态 Zn-0.8Mn 合金的强度提高,但仍低于热轧态的强度。4 号工艺路线不仅将 Zn-0.8Mn 合金的室温延伸率提高至 90%且使强度恢复至略高于热轧态的水平,而对 Zn-0.4Mn 合金其强度提高的作用更显著,但是延伸率提高效果降至 54%。比较可知,3 号工艺路线对合金成分最不敏感,同时实现了两种 Zn-Mn 合金的室温极高塑性。研究表明,3 号工艺路线实现极高塑性的机理是:(1)塑性变形导致的 Zn 晶粒显著细化(晶粒尺寸小于 3 μm);(2)退火引发的 Zn 晶粒织构大角度转动为继续变形提供了有利条件;(3)室温拉伸变形断口附近 MnZn13 第二相促进 Zn 晶粒发生室温动态再结晶,释放了累积的应力,阻碍了裂纹扩展。上述研究结果可能对多种 Zn 合金的加工都具有指导意义,为极大提高 Zn 合金的室温塑性提供了多种方法。

关键词:生物可降解锌合金;室温超高塑性;形变热处理;动态再结晶

## E01-30

### 抑制 Cu-Cr-Zr-Ti 合金中平衡态 bcc-Cr 相形核的研究

汪航

江西理工大学工程研究院

本文通过大气熔炼-铁模浇铸-固溶-时效工艺制备 Cu-Cr-Zr-Ti 合金,采用 APT、HRTEM 等分析检测手段研究 Cu-Cr-Zr-Ti 合金时效过程中第二相的形核长大及元素富集、迁移规律。结果表明,Cr 原子在富 Cr 相中心处富集,而 Zr 原子则分布于富 Cr 相的外表面。此外,热力学计算表明 Ti 原子的存在降低了 fcc-Cr 相的形核能垒而使其优先形核,基体中 Ti 原子的快速扩散有利于 fcc-Cr 相的长大并抑制了 fcc-Cr 相的溶解,这导致基体中 Cr 原子浓度贫化而阻碍了 bcc-Cr 相的形核析出。

## E01-31

### 高精度薄壁铝管热冷组合铸型连铸制备工艺

王一笑,刘新华

北京科技大学

高精度薄壁铝及铝合金管材具有耐腐蚀好、比强度高优点，是航空航天、电子电器、机械制造、交通运输等领域轻量化、降低成本等的关键材料。内外表面无轻微的擦伤、划道及其它表面缺陷，表面为机械加工的精度，无须表面处理防腐性能良好，质量轻等众多优势，使其具有广阔的应用前景。目前传统生产方式采用半连续铸锭—热挤压—冷轧或拉伸—矫直工艺，生产的管坯主要存在尺寸精度低、成材率低、工艺流程长、受设备限制、生产难度相对较大等问题。本文在前期工作基础上，通过实验室开发的新型热冷组合铸型连铸工艺制备高精度薄壁铝管。研究制备参数对固液界面位置、管坯表面质量、尺寸精度、组织与力学性能的影响规律。研究表明：采用热冷组合铸型水平连铸工艺制备高表面质量、外表面具有强轴向取向柱状晶组织的纯铝管材（ $\Phi 70 \times 5$  mm）。在保持熔体温度  $T_{Al}=750$  °C、冷型段最大冷却水流量  $Q=1200$  L/h 及其他制备参数不变的条件下，通过调整拉坯速度和热型段加热温度，制备强轴向取向柱状晶组织纯铝管坯的主要工艺参数的工作范围：热型段加热温度  $T_M=700-740$  °C、拉坯速度  $V=20-60$  mm/min。在  $T_{Al}=750$  °C、 $Q=1200$  L/h、 $T_M=720$  °C 的条件下，随着拉坯速度由  $20$  mm/min 提高到  $120$  mm/min，固液界面位置由热型段与冷型段过渡区逐渐向冷型段移动，外表面柱状晶平均宽度减小且晶粒与轴向的夹角增加，最后逐渐变为等轴晶组织，内表面始终为柱状晶。在  $T_{Al}=7500$  °C、 $Q=1200$  L/h、 $v=80$  mm/min 的条件下，当热型段加热温度由  $700$  °C 升高到  $740$  °C 时，固液界面位置向冷型段移动并进入冷型段，柱状晶平均宽度由  $12.0$  mm 减小到  $1.1$  mm，外表面粗糙度  $R_a$  为  $0.4-0.6$   $\mu\text{m}$ ，内表面粗糙度为  $0.3-0.75$   $\mu\text{m}$ 。

关键词：高精度薄壁铝管；连铸；热冷组合铸型

## E01-32

### 自然对流下镍基单晶高温合金定向凝固过程枝晶生长模拟研究

杨聪，许庆彦，柳百成

清华大学

在合金凝固中，自然对流能改变枝晶形貌，影响合金偏析，甚至导致雀斑等凝固缺陷的产生。过去数十年中，原位观测技术和微观组织模拟模型得到了很大发展，但是镍基高温合金定向凝固中流体自然对流对枝晶组织生长的影响研究尚未开展。本文建立了耦合格子玻尔兹曼方法的多相场模型，用于模拟自然对流作用下的高温合金定向凝固枝晶生长过程。针对高温合金复杂的多元合金体系，使用 Pandat 热力学数据库为多相场模型提供真实的合金热力学与动力学数据，实现了准确的枝晶组织模拟。针对大尺度范围的枝晶生长模拟与对流计算，开发了基于 GPU 加速的大规模并行计算算法来加速计算，该算法相比于 CPU 单核计算速度提高了 200 倍以上。本文首先研究了高温合金不同元素在给定冷速下枝晶干与枝晶间的元素分布情况，得到的模拟结果与相同凝固条件下的实验结果吻合良好。然后设置了不同的温度梯度和抽拉速度来研究自然对流与枝晶组织形貌在不同定向凝固工艺条件下的变化。对不同凝固条件下的糊状区流体速度做了统计分析，并使用 Flemings 判据来评估糊状区内流体流动速度的相对大小以及判断雀斑的形成。最后，研究了不同单晶倾角下枝晶生长形貌和糊状区内流体流速的变化，并对结果进行了定量分析。

关键词：自然对流；高温合金；枝晶生长；相场模拟

## E01-33

### 高强高导 Cu-Ni-Si 合金的制备及机理

廖万能，刘雪峰，王思清，易峰

北京科技大学

本文采用控温铸型连铸技术制备了 C70250 铜合金带坯，对带坯进行了变形量为 97.5% 的冷轧，然后在时效温度为  $400-550$  °C，时效时间为  $0-480$  min 条件下进行了时效处理，采用拉伸试验机、导电率测试仪、OM、XRD、SEM 和 TEM 对合金的力学性能、导电性能和微观组织进行了表征，研究了合金微观组织对性能的影响，并分析了其机理。结果表明：控温铸型连铸技术制备的 C70250 铜合金带坯具有倾斜的粗大柱状晶组织，晶粒平均直径为  $1.3$  mm，经变形量为 97.5% 的冷轧后，C70250 铜合金形成了沿着轧向平行分布的纤维条带状变形组织。当合金时效温度为  $450$  °C、时效时间为  $60$  min 时，C70250 铜合金带材抗拉强度为  $758$  MPa、屈服强度为  $723$  MPa、导电率为  $54.5\%$  IACS，与传统制备工艺相比，抗拉强度提高了  $5.2\%$ ，导电率提高了  $36.3\%$ ，实现了强度和导电率的同步提升。峰时效时 C70250 铜合金保留了冷轧时的纤维条带状组织并均匀分布大量细小弥散的  $\text{Ni}_2\text{Si}$  相，析出粒子的尺寸为  $6-10$  nm，一方面，纳米析出粒子与冷轧过程中形成的致密位错墙缠结有效地阻碍了位错运动，通过加工硬化和 Orowan 强化共同作用提高了合金的强度，另一方面，溶质原子得到充分析出，基体得到净化，横向晶界较少，显著降低了对电子的散射作用，从而大幅度提高了 C70250 铜合金的导电性能。研究结果为制备高强高导 Cu-Ni-Si 合金提供了新的思路。

关键词：C70250 铜合金；纳米析出相；条带状组织；高强；高导

## E01-34 (Invited)

### 流变挤压铸造 7075 高强铝合金的拉伸性能和断裂行为

郭洪民<sup>1,2</sup>, 张树国<sup>2</sup>, 杨湘杰<sup>2</sup>

1. 南昌大学
2. 江西省高性能精确成形重点实验室

重视发展具有自主知识产权的高性能轻型金属结构材料的先进成形理论和方法, 已经成为我国汽车和高科技领域重大而迫切的需求。流变成形使用的原材料是具有触变性的半固态浆料, 可实现平稳充型, 有效避免充型过程中气体、氧化物和涂料的卷入, 可通过热处理进一步提高材料的力学性能; 半固态浆料中含有 40-60%的固相, 凝固收缩小; 模具的内浇口断面尺寸较大, 利于压力的传递和液态金属的补缩, 避免疏松, 降低热裂倾向。流变成形的材料具有低缺陷、高致密度、高力学性能等优势, 被誉为 21 世纪最具潜力的轻合金高性能复杂结构件成形技术之一。高强铝合金 (2×××系、7×××系等变形铝合金) 具有高的热处理强化潜力, 高的强度、韧性和耐损伤等综合性能。目前主要利用锻造、挤出、轧制和机械加工等技术成形加工 2×××系和 7×××系铝合金, 且零件形状较简单。流变成形高强铝合金可以获得远高于锻造和机械加工的材料利用率, 降低成形设备的吨位和能耗, 且能够实现复杂形状结构件的近净成形, 同时获得优于 A356 和 319 等铸造类铝合金的力学性能, 满足汽车、高铁和航空等领域对高综合性能、高可靠性、轻量化复杂结构件的迫切需求。高强铝合金是流变成形实现以铸代锻、以轻质有色金属代替钢和铸铁的关键材料, 流变成形是高强铝合金实现复杂结构件近净成形的关键技术。将摆动振荡式半固态浆料制备工艺和挤压铸造相结合, 开发了流变挤压铸造工艺和装备。论文重点介绍了流变挤压铸造 7075 高强铝合金的微观组织、力学性能和拉伸断裂行为。T6 热处理状态下, 平均晶粒尺寸为 30 μm, 抗拉强度为 514 MPa, 屈服强度为 461 MPa, 延伸率为 10.1%, 综合力学性能达到现有报道最高水平。断口表面由大韧窝、极小韧窝构成区和撕裂棱构成, 呈较好的韧性断裂。结合断口特征和数值计算讨论了流变挤压铸造 7075 合金的断裂行为, 分析了两类孔洞类缺陷的存在形式和形成原因。

关键词: 7075 高强铝合金; 流变挤压铸造; 微观组织; 力学性能; 断裂行为

## E01-35

### 利用熔点降低法测量金属单质的固-液界面能

王连文

兰州大学

固-液界面能是凝固过程中至关重要的参数, 但是不容易测量。对于金属单质而言, 目前基本上只有根据凝固的均匀形核理论来测量固-液界面能的方法; 该方法一个最主要的问题是: 无法确保在实验中发生的是均匀形核。与凝固的均匀形核法相对应的, 其实还有另外一种方法, 即熔点降低法。这两种方法所依据的热力学原理是一样的, 都是考虑曲率引起的体系 Gibbs 自由能的变化。与凝固的均匀形核法相比, 熔点降低法的突出优点是可以直接测量样品的尺寸和熔点的降低, 从而在不做任何假定的前提下求得固-液界面能。但是由于缺少合适的样品体系 (仅限于 Sn, Pb, Bi, Au), 熔点降低法被较少的提到。(最“近”的利用熔点降低法获得的固-液界面能的数据是 1970 年以前的。) 本文从实验上拓展了熔点降低法的样品体系 (可以测量 Fe, Cu 等), 又综合分析了迄今文献中的已发表数据, 对利用熔点降低法获得的金属单质的固-液界面能进行了总结, 并与凝固的均匀形核法的数据进行了对比分析。

关键词: 固-液界面能; 熔点降低法; 均匀形核法

## E01-36

### 定向凝固中取向依赖枝晶生长动力的相场模拟研究

邢辉<sup>1</sup>, 董祥雷<sup>2</sup>, 王建元<sup>1</sup>, 金克新<sup>1</sup>

1. 西北工业大学
2. 郑州大学

温度梯度方向与晶粒择优取向是合金定向凝固中两个特定方向, 当这两个方向存在一定夹角时, 枝晶将以非对称倾斜模式生长。本文利用定量相场模拟方法系统研究了取向依赖倾斜枝晶生长动力学与枝晶-海藻晶转变机制。研究表明倾斜枝晶生长方向选择强烈依赖于抽拉速度与各向异性强度, 而随着错配角度的增大, 一次枝晶间距将逐渐增加。此外, 数值模拟结果表明较低抽拉速度、较大温度梯度与较弱各向异性在错配角度较大的条件下, 将有利于枝晶向海藻晶的形貌转变。

关键词: 定向凝固; 枝晶生长; 相场模拟

## E01-37

### 定向凝固制备 $\text{BaFe}_{1.86}\text{Co}_{0.14}\text{As}_2$ 铁基超导棒材的组织与性能研究

杨玉通, 黄海友, 谢建新

北京科技大学

在已知的众多超导材料体系中, 铁基超导材料作为一种高温超导材料自 2008 年发现以来, 以其高的超导临界转变温度和临界电流密度, 引起了科学家们的广泛关注。目前, 铁基超导材料的制备方法主要有粉末装管法制备铁基超导线、带材和自由生长法制备单晶样品。但是, 目前上述两种制备方法仍存在很多问题: 自由生长法制备制备出的单晶样品尺寸太小而无法投入到实际应用中去, 而粉末装管法制备出的线、带材受限于致密度低、杂相与裂纹过多以及晶界弱连接效应这三个主要问题。这些问题都是铁基超导材料制备过程中急需解决的问题。定向凝固方法可以用于制备较大尺寸的单晶或柱状晶组织材料, 所制备的材料组织除具有纯净度、致密度高等优点外, 还具有高取向性, 小角度晶界比例高, 可控相组成等特点。基于定向凝固方法在材料组织控制上的优势, 若将其应用于铁基超导材料的制备, 有望解决铁基超导材料的上述组织问题, 提升材料性能。本文介绍了一种球磨法制备前驱体, 结合冷等静压技术的定向凝固工艺制备铁基超导棒材的方法。通过球磨法将 Ba 片、As 粉、Fe 粉和 Co 粉混合制备  $\text{BaFe}_{1.86}\text{Co}_{0.14}\text{As}_2$  的前驱体, 将前驱体装入一定规格的橡胶套或硅胶套, 利用冷等静压技术将原始材料压制成具有规则形状的高致密度坯料, 再将坯料装入刚玉管中进行定向凝固。该方法不仅可以减少原材料中低熔点元素的氧化与挥发, 同时还可以获得高致密度的原始坯料, 进而提高最终制备的铁基超导材料的性能。对制备的超导棒材 (直径 6.5 mm, 长度 60 mm) 进行超导性能测试, 临界转变温度为 26.4K, 磁场电流密度为  $2.0 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$  (4.2k, 2T)。其中转变温度在  $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Co}_x)_2\text{As}_2$  超导材料体系文献报道多晶材料中是最高的。同时, 结合冷等静压技术的定向凝固制备铁基超导材料工艺在前期的探索中也发现一些需要解决的问题。其中加热温度高, 砷、钡等低熔点元素易挥发, 导致成分偏离, 易生成杂相, 且砷、钡等元素易氧化, 如何防止元素挥发和氧化是该工艺的关键问题之一。在后期的研究中, 我们将通过改善制备工艺条件, 探索最佳的牵引速率、加热温度、保温时间等工艺参数来进一步提升所制备铁基超导材料的性能。总之, 该方法为高性能铁基超导材料的制备提供一条新的途径。

关键词: 铁基超导; 定向凝固; 球磨; 冷等静压

## E01-38

### 钛微合金钢连续冷却条件下的组织演变和纳米碳化物的析出强化研究

陈松军<sup>1</sup>, 李烈军<sup>1</sup>, 彭政务<sup>1</sup>, 霍向东<sup>2</sup>, 胡玲<sup>1</sup>, 张伟鹏<sup>1</sup>

1. 华南理工大学

2. 江苏大学

基于 Gleeble-3800 热模拟试验机, 采用扫描电子显微镜和透射电子显微镜等方法研究了钛微合金钢在变形后不同连续冷却速率 (0.1-30 °C/s) 下的组织演变和纳米碳化物的析出行为。结果表明, 冷却速率小于 1 °C/s 时, 相应的显微组织主要为多边形铁素体和少量珠光体; 随着冷速的增加, 中温相变组织逐渐由针状铁素体向粒状贝氏体过度。透射试样观察表明, 铁素体基体上不均匀地分布着尺寸约为 4-10 nm 的 TiC 粒子。试样的显微硬度值表明: 冷却速率小于 5 °C/s 时, 显微硬度值随冷却速率的增加而减小, 显微硬度值在 278-235 HV 之间; 冷却速率大于 5 °C/s 时, 显微硬度值随冷却速率的增加而升高, 硬度值范围在 235-315 HV 之间。显微硬度值在冷却速率为 0.1 °C/s 和 30 °C/s 时出现两个峰值表明了两种强化机制, 即低冷却速率下的析出强化和高冷却速率下的相变强化。另外, 冷却速率低于 5 °C/s 时, 同一试样中不同部位的铁素体晶粒的显微硬度值呈现不均匀的分布状态, 也表明了素体中纳米碳化物析出的不均匀性。

关键词: 钛微合金钢; 纳米碳化物; 析出强化; 显微硬度; 针状铁素体

## E01-39

### 500MPa 级铁道货车车体用钢的连续冷却转变曲线测定及组织研究

蒋茂林, 余伟

北京科技大学

进行了 500 MPa 级铁道货车车体用高强耐候钢的成分设计 (0.05C-0.85Mn-0.75Cr-0.45Ni-0.05Sb-0.03Nb-0.02Ti) 和实验室冶炼, 且先在 JMatPro 软件上模拟了 CCT 曲线作为预测, 再采用膨胀法结合金相法, 在 Gleeble3500 热模拟试验机上测定了该类耐候钢种的实际连续冷却转变曲线 (CCT 曲线, 冷速为 0.5-50 °C/s), 并通过金相显微镜和 SEM 观察了转变产物, 用维氏硬度计测定各冷却速度下试样的显微硬度。研究了冷却速度对该类钢种组织及硬度的影响。结果表明, 在约 15 °C/s

的冷速下, 可获得贝氏体组织, 屈服强度达到 500 MPa 以上。

关键词: 耐候钢; CCT 曲线; 相变; 组织

#### **E01-40 (Invited)**

##### **利用纳米相沉淀强化制备高强度钢**

张中武, 许松松, 赵宇

哈尔滨工程大学

传统高强钢在提高强度的同时由于较高的碳含量和合金含量使焊接性能和低温韧性受到较大影响, 控制高强钢性能所需较高的冷却速率往往使材料尺寸也受到限制。纳米相强化是指利用尺度在 2-5 nm 的纳米相强化代替碳强化和合金强化。纳米相强化的优势是 (1) 强度提高的同时保持较好的韧性; (2) 合金含量低; (3) 由于低碳而改善焊接性能。本报告将简要介绍我们近期在高强、高韧低合金钢方面的研究工作, 重点介绍合金设计理念、纳米相形成动力学、显微结构控制及其对力学性能的影响。

#### **E01-41 (Invited)**

##### **金属材料的纳米结构/相强韧化**

申勇峰, 管仁国

东北大学

研究工作以纳米尺度亚结构对金属材料的强化、韧化为主题, 分别在不锈钢、高锰钢、相变诱导塑性钢、Al/Mg 合金中通过引入纳米尺度结构/相, 成功的实现了该类材料在强度提高的同时保持良好的塑性变形能力。主要内容包括: (1) 晶粒细化。通过有效的细化不锈钢的相组成比例及晶粒尺寸, 可以有效地控制材料的微观结构, 使其强度塑性匹配满足工程应用的实际需求。当奥氏体与马氏体相比为 3: 1, 且晶粒尺寸为 270 纳米时, 不锈钢的抗拉强度由 800 MPa 提高至 2000 MPa。实验观察及理论分析均表明晶粒细化导致加工硬化能力弱化的主要因素是: 小晶粒尺寸抑制了变形过程中的相变及孪生行为, 导致位错增殖及活动能力下降。(2) 纳米尺度孪晶。利用纳米尺度孪晶结构使高 Mn 钢的强度显著提高的同时保持良好的塑性变形能力, 并借助于中子衍射实验对于变形机理进行了分析。(3) 纳米片层状奥氏体相。该组织对于抑制 TRIP 钢在变形过程中的裂纹萌生及延迟断裂具有关键作用, 可以实现稳态奥氏体-马氏体相转变, 促进 TRIP 钢塑性变形能力, 获得良好的强度塑性匹配。而粒状奥氏体较快的相转变速率, 使样品在变形过程中的应力/应变完全集中于晶界区的奥氏体上, 极易造成应力集中, 导致裂纹在晶界区萌生及扩展, 最终出现局部剧烈变形, 塑性较差。(4) 纳米析出相。超细晶 (~400 nm) 低合金钢中的纳米尺度球形 Fe<sub>3</sub>C 可有效使该钢的屈服强度及抗拉强度提高为 1260 MPa 和 1400 MPa, 结果显示纳米尺度 Fe<sub>3</sub>C 不仅可以提高强度, 而且可以保持良好的塑性变形能力。在铝合金的连续挤压成形过程中, 纳米尺度 Al<sub>3</sub>(Sc, Zr) 析出相可以有效的将晶粒从 100 μm 细化至 0.8 μm, 纳米析出相的细化作用与其体积分数成正比, 而与粒径成反比。在镁合金的连续挤压成形过程中, La 的纳米析出相 (La<sub>5</sub>Sn<sub>3</sub>, Mg<sub>2</sub>Sn, Mg<sub>17</sub>La<sub>2</sub>) 具有显著的细化作用。Mg-3Sn-1Mn-xLa (wt.%) 合金中的 La 含量为 1.0wt.% 时, 该合金的强度及拉伸延展率均达到最大值, 分别比商业 Mg-3Sn-1Mn-0.87Ce (wt.%) 提高了 29% 及 32%。

关键词: 强度; 塑性; 纳米尺度; 晶粒细化; 析出

#### **E01-42**

##### **高速搅拌摩擦焊 AZ31 镁合金接头的组织与性能研究**

徐安莲<sup>1,2</sup>, 张国军<sup>1,2</sup>, 黄禹<sup>2</sup>

1. 广东华中科技大学工业技术研究院

2. 华中科技大学

搅拌摩擦焊被誉为“继激光焊后又一革命性的焊接技术”, 是镁、铝合金的首选焊接方法。但目前搅拌摩擦焊的焊接速度一般低于 0.5 m/min, 影响了加工效率, 严重阻碍了搅拌摩擦焊的大规模商业化应用。为了提高焊接速度、促进搅拌摩擦焊的应用, 在商用搅拌摩擦焊接设备上以 3 m/min 焊接速度进行了 4 mm 厚 AZ31 镁合金的对接焊试验, 并进行了显微组织和力学性能的测试与分析。结果表明, 当旋转速度为 1600 r/min、焊接速度 3 m/min、下压量 0.15 mm 时, AZ31 搅拌摩擦焊焊缝成型性好, 无缺陷, 焊核区平均晶粒尺寸 9.1 μm, 接头抗拉强度为母材的 82%。

关键词: 高速搅拌摩擦焊; AZ31 镁合金; 力学性能

#### **E01-43**

##### **AZ31 镁合金无针搅拌摩擦点焊接头组织及性能研究**

冯武渊, 李文亚, 杨夏炜, 徐雅欣, 褚强, 姚朔天  
西北工业大学

本文采用无针搅拌摩擦点焊工艺对 1.8 mm 厚的 AZ31 镁合金进行了焊接。采用不同的搅拌头旋转速度与停留时间, 研究工艺参数对接头组织与性能的影响规律。研究表明, AZ31 镁合金的无针搅拌摩擦点焊接头组织可分为三个区域搅拌区 (SZ)、热力影响区 (TMAZ) 与热影响区 (HAZ)。随着转速与停留时间的增大, 搅拌区的深度逐渐增大、Hook 缺陷由两板界面处向上板表面扩展。此外, 接头的拉剪强度以及两种不同的断裂模式 (界面剪切断裂与拔出断裂) 均与 Hook 缺陷密切相关。当搅拌头转速为 1180 rpm、停留时间 9 s 时, 接头的拉剪强度达到最大值, 为 4.34 kN。

关键词: 无针搅拌摩擦焊; AZ31 镁合金; 显微组织; 力学性能; 断裂机制

#### E01-44

##### 6061-T4 铝合金双轴肩搅拌摩擦焊接接头组织与力学性能研究

杨超

中国科学院金属研究所

本研究分别利用双轴肩工具与常规单轴肩工具对 6 mm 厚 6061-T4 铝合金板材进行搅拌摩擦焊接, 分析研究了不同焊接工艺以及焊接参数对接头微观组织与力学性能的影响。结果表明: 在所选参数下均可获得无缺陷的高质量接头, 两种焊接工艺下接头强度均随着焊接速度提高而增加, 而几乎不随转速改变。对应焊接参数下, 双轴肩焊接接头获得了与常规搅拌摩擦焊接接头相同水平的强度, 最高强度值 (229 MPa) 在 600-300 (600 rpm, 300 mm/min) 参数下获得, 达到母材强度的 93%。除高焊速 (300 mm/min) 双轴肩搅拌摩擦焊接接头个别断于焊核与热机影响区边界, 其余接头断裂位置均位于热影响区 (最低硬度区)。接头断裂位置 (热影响区) 的析出相均发生粗化, 且双轴肩 600-100 参数接头该区析出相粗化程度较对应常规单轴肩焊接严重且密度较高。

#### E01-45

##### 旋转速度对 6016 铝合金与镀锌 IF 钢 FSW 接头界面组织的影响

蔺宏涛<sup>1</sup>, 江海涛<sup>1</sup>, 王怡嵩<sup>1,2</sup>, 张坤<sup>2</sup>, 张韵<sup>1</sup>

1. 北京科技大学

2. 中航工业北京航空制造工程研究所

采用搅拌摩擦焊技术对 6016 铝合金和镀锌 IF 钢进行了异种金属搭接试验, 研究了旋转速度对钢铝 FSW 接头界面宏观形貌和组织特征的影响, 揭示出钢铝 FSW 接头界面组织演变的基本规律。结果表明: 当旋转速度 800 r/min、焊接速度 100 mm/min 时, 在界面处发现孔洞等缺陷; 提高旋转速度, 孔洞等缺陷消失; 镀锌层在焊接过程中融化而被挤出轴肩作用区, 轴肩作用区的钢铝界面随着镀锌层的被挤出发生相互扩散, 生成 Fe-Al 金属间化合物, 厚度随旋转速度的增加而变大; 搅拌针作用区的铝钢界面在高温下被剧烈搅拌, 大量钢颗粒被搅进铝合金基体中, 新的钢铝界面发生接触并相互扩散, 形成钢铝混合的层状组织, 随着旋转速度的提高, 焊接热输入增加, 钢铝混合的层状组织也随之增加; 铝合金焊核区大量第二相在焊接热循环和机械搅拌作用下发生溶解, 部分不溶相为 AlFeSi。

关键词: 6016 铝合金; 镀锌 IF 钢; 搅拌摩擦焊; 界面组织

#### E01-46

##### 304 不锈钢旋转摩擦焊接头熵产率与力学性能的相关性研究

王伟龙<sup>1,2</sup>, 李京龙<sup>1</sup>, 熊江涛<sup>1</sup>, 王桂龙<sup>1</sup>, 张赋升<sup>1</sup>

1. 西北工业大学陕西省摩擦焊工程技术重点实验室

2. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室

旋转摩擦焊的接头力学性能与多焊接工艺参数 (焊接压力、转速、时间) 有关, 本文引入热力学特征量熵产率  $\theta$  作为多工艺参数的拟合参量, 与接头力学性能进行了相关性研究, 为旋转摩擦焊的工艺规范带的建立奠定基础。本文以 304 不锈钢旋转摩擦焊实验为基础, 利用采集到的扭矩以及接头温度得到不同焊接时刻接头熵产生率; 对不同焊接时刻接头进行力学性能测试, 实验结果表明: 在焊接扭矩峰值时刻, 接头熵产生率达到最大值  $1.3 \times 10^4$  w/k, 此时接头的抗拉强度为 770 MPa, 达到母材强度 96%, 延伸率 33%, 达到母材延伸率的 89%; 且随着焊接时间的增加, 接头熵产生率的降低为  $9.6 \times 10^3$  w/k 时, 接头抗拉强度为 501 MPa, 仅为母材强度的 63%, 延伸率 10%, 为母材延伸率的 28%。实验证明在相同焊接参数下, 接头

熵产生率作为多工艺参数的拟合参量,与 304 不锈钢接头的抗拉强度和延伸率呈正相关,进一步研究表明,在不同焊接参数下,熵产生率与接头的抗拉强度和延伸率仍呈正相关。

关键词:旋转摩擦焊;熵产生率;力学性能

#### E01-47 (Invited)

##### 加热气氛对一种 C-Mn-Si-Al 高强度钢选择性氧化的影响

蒋光锐<sup>1,2</sup>, 王海全<sup>1,2,3</sup>

- 1.首钢集团有限公司技术研究院
- 2.绿色可循环钢铁流程北京市重点实验室
- 3.中国钢研科技集团先进金属材料涂镀国家工程实验室

为了研究局部露点技术在含 Al 高强度钢上应用的潜力,采用热浸镀工艺模拟器研究了加热过程的露点温度对一种 C-Mn-Si-Al 高强度钢选择性氧化的影响。加热过程中的露点温度设置为-10、-20 和-50 °C,而在保温过程中的露点温度为-50 °C。采用 SEM/EDS 表征了退火后试样表面的氧化形貌和元素质量分数,使用 GDOES 分析了退火试样表层的元素深度分布,采用 XPS 分析鉴定了试样表面的氧化物种类。试验结果表明,使用-10 °C 露点温度加热时,试样表面氧化轻微,Al 元素出现明显内氧化现象。随着加热过程露点温度降低到-50 °C,试样表面出现较多富含 Mn 和 Al 的氧化物。因此,加热过程中较高的露点温度可以抑制合金元素向外表面的富集,减少试样表面的氧化物数量。

关键词:高强度钢;退火;露点温度;选择性氧化

#### E01-48

##### 基于淬火-配分工艺下低合金高强度耐磨钢组织性能及三体冲击磨损性能研究

卢军, 于浩, 宋成浩, 段晓妮

北京科技大学

破碎机在矿山、水泥、电力等行业中应用广泛,锤头是其主要的磨损件,冲击-摩擦磨损则是一种常见的材料失效形式,传统上多采用高锰钢材料来制作磨损零部件,然而以奥氏体为基体的高锰钢材料往往存在基体强度偏低、表面硬度不足的缺陷,金属消耗快、部件寿命短、更换困难,大大延缓了生产效率、增加了生产成本,以马氏体、贝氏体为基体的耐磨材料因其较高的强度和表面硬度,表现出良好的耐磨性,成为新型耐磨材料研发方向。本研究设计了一种适用于“淬火-配分”(Q&P)工艺的中碳低合金耐磨钢,通过真空冶炼、铸造获得所需的实验钢种,之后通过理论分析和实验研究对 Q&P 工艺进行优化设计,研究和分析了不同淬火温度及不同配分保温时间对材料组织性能的影响规律,得到了最佳的热处理工艺参数,获得了最佳组织-性能匹配的低合金高强度 Q&P 耐磨钢,基体组织由马氏体板条+17.9%膜状残余奥氏体(RA)构成,其抗拉强度 1921 MPa,屈服强度 1487 MPa,总伸长率 11.5%,洛氏硬度 55.8 HRC,室温冲击功 12.5 J。在此基础上对其开展三体冲击磨料磨损性能的研究,并于与传统耐磨材料 Hadfield 合金(Mn13Cr2)进行对比,实验在 MLD-10 型冲击磨损实验仪上进行,记录各组试样在持续磨损 30-90 min 条件下的累积失重量,分别在 2 J 和 4 J 冲击功条件下对两种材料各进行 3 组实验测试并取平均值进行分析,之后利用 SEM、TEM、XRD 对材料的显微组织演变及组织构成进行了研究。结果表明,在相同实验条件下 Q&P 耐磨钢的磨损失重量均要低于 Mn13Cr2,失重量最大相差达 49.5%;随着冲击功由 2 J 增加到 4 J,相同测试时间下两者磨损失重量均降低;Q&P 耐磨钢磨损表面硬化层深度为 2200 μm,而 Mn13Cr2 硬化层深度达到 4000 μm;随着硬化层深度的增加,Q&P 耐磨材料表面硬度逐渐降低并接近母材硬度,残余奥氏体转变率同样呈现下降趋势。分析认为,冲击磨损下材料表面的加工硬化是两种材料同时具有良好耐磨性的关键;一方面,奥氏体为基体的 Mn13Cr2 具有较低的层错能,形变孪晶和位错交互作用是其强化机制;另一方面,马氏体基体高强度、复相组织塑韧性匹配、磨损过程中形变强化以及残余奥氏体相变强化是 Q&P 钢具有更好耐磨性能的原因,使其在抗冲击-摩擦磨损工程领域具备良好的应用前景。

关键词:淬火-配分工艺;三体冲击磨料磨损;残余奥氏体

#### E01-49

##### 淬火温度对牙轮用钢 15MnNi4MoA 的组织与力学性能的影响

陈驰<sup>1</sup>, 宋仁伯<sup>1</sup>, 苏盛睿<sup>1</sup>, 纪文盛<sup>2</sup>, 李世德<sup>2</sup>, 李美宁<sup>2</sup>

- 1.北京科技大学
- 2.鞍钢矿业公司辅助材料厂

研究了不同的淬火温度对牙轮用钢 15MnNi4MoA 的组织性能的影响,采用 OM、SEM 对热处理前后的组织进行观察。



淬火温度为 805 °C、825 °C、860 °C、900 °C，回火温度为 185 °C，淬火保温时间和回火保温时间分别为 25 min 和 50 min。结果表明：在热处理之前（退火态），组织由铁素体和贝氏体组成，在经过油淬+低温回火之后，组织变为板条马氏体；淬火温度对钢的强度影响不大，但对塑性影响较为明显，随着淬火温度的升高，冲击功增加，延伸率先增加后减小。经过 825 °C（25 min）油淬+185 °C（50 min）回火后空冷至室温，试验钢具有较高的强韧性匹配，其抗拉强度为 1332 MPa，屈服强度为 1019 MPa，断后伸长率为 13.3%，冲击功为 181 J，断面收缩率为 64%，性能达到了齿轮生产验收标准。

关键词：15MnNi4Mo；齿轮；热处理；淬火

## E01-50

### Fe-6.0wt.%Si 温轧板的再结晶和有序结构恢复行为及塑性改善机制

肖飞，张志豪，谢建新

北京科技大学

大的温变形可显著破坏高硅电工钢的有序结构从而提高塑性，但另一方面由此产生加工硬化会导致高硅电工钢的塑性下降、变形抗力增大，虽然采用再结晶退火可以消除高硅电工钢温轧板的加工硬化，但同时也会发生有序结构的恢复，导致塑性下降，因此，选择合适的退火条件，在消除温变形高硅电工钢加工硬化的同时抑制有序结构恢复，是提高后续冷轧成形能力的关键问题之一。本文采用弯曲试验、SEM、EBSD、TEM、DSC 等研究手段，以降温温轧的 Fe-6.0wt.%Si 高硅电工钢试样为研究对象，揭示了再结晶退火温度、保温时间对温轧试样的组织、有序结构、显微硬度和三点弯曲力学性能的影响规律，并从有序结构恢复、加工硬化程度、晶粒尺寸等方面探讨了退火改善温轧板塑性的原因，获得了使高硅电工钢温轧板塑性显著提高的退火条件。实验结果表明，Fe-6.0wt.%Si 高硅电工钢温轧试样在 650 °C 以上退火时，有序结构恢复引起的硬度增加部分抵消了再结晶引起的硬度下降，使试样的硬度随退火温度提高的变化较小。温轧试样的有序-无序转变温度  $T_c$  约为 730 °C，在  $T_c$  以下退火时，有序结构恢复导致再结晶晶粒长大缓慢；在  $T_c$  以上退火时，晶粒长大速度明显提高；当温度提高到 800 °C 时，晶界趋于稳定状态，晶粒长大速度又减缓。合适的退火条件可有效提高温轧试样的室温塑性，725 °C 保温 30 min 退火试样室温弯曲挠度比温轧试样提高了 200%，其原因是该退火条件下试样发生完全再结晶、消除加工硬化的同时有序结构未发生完全恢复。

关键词：Fe-6.0wt.%Si 高硅电工钢；再结晶；有序结构恢复；室温塑性

## E01-51

### 拉拔态 Cu-Cr-Sn 合金软化性能研究

罗泽宇，杨斌

江西理工大学

本文对 Cu-0.48Cr-0.16Sn 合金经 60%变形量后在不同退火温度（450-750 °C）下软化行为进行了研究。利用硬度测量、透射电子显微镜（TEM）和电子背散射衍射（EBSD）技术分析了该合金在拉伸和热处理条件下的力学性能和微观结构变化。结果表明，合金的软化性能受析出粗化、位错回复和再结晶的影响。在超过 500 °C 时，再结晶逐渐成为合金软化效果的主要原因。通过硬度测量表征了再结晶动力学。通过 Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov 模型得到 Avrami 指数在 0.87-1.36。计算出 Cu-0.48Cr-0.16Sn 合金经 60%变形量后的再结晶激活能为 117.9 kJ/mol，这表明合金再结晶通过晶界迁移来实现的。Cu-0.48Cr-0.16Sn 合金中 Cr 元素与 Sn 元素的添加使得合金的再结晶温度与再结晶激活能均高与纯铜。另外位错的降低有利于导电性能的上升。

关键词：Cu-Cr-Sn 合金；软化；再结晶；析出；微观结构

## E01-52

### 20LH5 铬锰系奥氏体不锈钢退火工艺研究

苏阳<sup>1</sup>，宋仁伯<sup>1</sup>，蔡恒军<sup>2</sup>，文健<sup>2</sup>，王天一<sup>1</sup>

1.北京科技大学

2.鞍钢联众（广州）不锈钢有限公司

本研究以企业现有的 20LH5 号钢板为基础，该钢板主要用于制造矿山筛分矿粉用不锈钢筛片，通过对其热处理工艺参数的控制达到预期性能并降低成本，通过数据分析进而可获得热处理工艺参数对低成本、高性能耐磨不锈钢冷轧薄板组织与性能的影响规律和作用机理，为工业实际生产提供理论依据和应用基础。热处理实验前首先使用 JMatPro 金属材料相图计算及材料性能模拟软件对材料相图进行模拟计算，得到针对该钢板合适的理论热处理温度区间为 800-1100 °C，在区间设置 5

个温度梯度用空冷及水冷两种方式进行对照试验以获得最佳温度区间及冷却方式。再将热处理时间分别设定为 5 min, 10 min, 15 min 进行对照试验获得最佳时间参数。结果表明: 热处理前冷轧板存在较多的马氏体组织, 经过热处理后冷轧薄板金相显微组织有明显的奥氏体化倾向, 软化效果显著, 其抗拉强度大于 900 MPa, 屈服强度大于 500 MPa, 延伸率大于 45%。最后通过盐雾试验腐蚀速率考核热处理产品质量, 在盐雾试验中对热处理前后的钢板进行 96 小时的耐腐蚀对照实验, 实验计算得到经过热处理的钢板比未经热处理的钢板腐蚀速率缩小一倍以上。

关键词: 耐磨不锈钢; 矿山筛片; 奥氏体化; 冷轧薄板; 热处理

#### E01-53

##### 淬火温度对 42CrMo4-V 钢组织和性能的影响

孙宸<sup>1,2</sup>, 傅排先<sup>1,2</sup>, 刘宏伟<sup>1,2</sup>, 李殿中<sup>1,2</sup>

- 1.中国科学院金属研究所
- 2.中国科学技术大学

本文利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射衍射(EBSD)以及透射电子显微镜(TEM)对 42CrMo4-V 钢不同温度淬火后的组织进行了表征。实验淬火温度选择为 820 °C-940 °C, 回火温度为 660 °C。结果显示, 随着淬火温度的升高, 材料的强度一直增加, 而其低温冲击韧性 (-30 °CAKv) 则呈先升高后降低的趋势, 在淬火温度为 880 °C 时取得最大值, 为 118.7 J。影响性能的主要因素在于钢中碳化物的演化, 随着淬火温度的升高, 淬火组织中的碳化物逐渐溶解进入基体, 而在后续回火过程中重新析出的碳化物的尺寸与分布明显有所优化, 因此低温冲击韧性随之增加。而当淬火温度达到 910 °C 以上时, 淬火组织中的碳化物基本消失, 其轧孔晶界作用消失, 晶粒急剧粗化, 从而导致了低温冲击韧性的降低。而对于拉伸性能, 虽然当淬火温度高于 910 °C 后细晶强化作用减弱, 但固溶强化与析出强化的大大增强使得材料强度随着淬火温度继续提高。

关键词: 42CrMo4-V 钢; 淬火温度; 低温冲击韧性; 碳化物演化; 强度

#### E01-54

##### 牙轮钻头牙爪用钢 15CrNiMo 淬火工艺参数的优化研究

苏盛睿, 宋仁伯, 陈驰, 纪文胜, 李世德, 李美宁

北京科技大学

针对牙轮钻头牙爪用钢 15CrNiMo, 研究不同淬火保温时间 (830 °C、840 °C、850 °C、860 °C、870 °C) 以及不同淬火温度 (15 min、25 min、35 min) 15CrNiMo 钢的显微组织和力学性能变化规律。利用金相显微镜、显微硬度计、扫描电子显微镜等技术以及测试淬火后 15CrNiMo 钢的抗拉强度、屈服强度、冲击韧性等力学性能来研究分析不同淬火参数与显微组织、冲击韧性、硬度等力学性能之间的关系。结果表明, 退火态原坯显微组织主要为铁素体及珠光体组织。随着淬火温度的提高, 铁素体逐渐减少, 板条马氏体逐渐增多, 并且马氏体晶粒呈长大趋势。硬度先增后减, 韧性略有提高。淬火保温时间和试样尺寸有关, 心部完成奥氏体化并且碳化物完全回溶为最佳时间。最佳淬火温度 850 °C, 最佳保温时间 25 min (回火温度 220 °C, 回火保温时间 50 min), 力学性能达到最佳。

#### E01-55 (Invited)

##### 奥氏体锰钢研究进展与发展展望

赵爱民, 孙绍恒, 徐梅, 杨鸿铭, 吴起伟

北京科技大学

本文由 Hadfield 钢入手, 介绍了 Hadfield 钢的起源、发展和其使用领域及在使用过程中出现的问题, 并分析了相关问题的解决途径和研究方向。进一步对改进而来的高锰奥氏体钢、TWIP 钢、低密度无磁钢、Fe-Mn-Si 形状记忆合金等材料的特点、发展现状和机理进行描述, 最后对奥氏体锰钢的未来进行展望。

关键词: Hadfield 钢; 层错能; 孪晶增塑; 无磁钢; 低密度钢; 展望

#### E01-56 (Invited)

##### 高压辊磨机用高强耐磨材料研发

佟伟平, 李海智, 李永存

东北大学

高压辊作为高压辊磨机的重要部件，其辊面强度与耐磨性的高低直接影响高压辊磨机的使用寿命。目前，较为先进的辊面是硬质合金柱钉镶嵌辊面，其使用寿命远高于耐磨材料堆焊辊面。但在实际使用过程中硬质合金镶嵌辊面基体材料耐磨性和强度的不足仍是制约其使用寿命的关键因素。本文针对高压辊磨机的工况要求，采用离心铸造技术制备出新型高强耐磨钢辊面试验件。根据新型高强耐磨钢多元合金成分的特点，采用合理的热处理工艺使其性能获得显著提高，并实现了高强耐磨钢在高压辊磨机硬质合金镶嵌辊面上的产业化应用。主要研究结果如下：根据高压辊磨机辊面材料的性能要求和大型辊套离心铸造的工艺特点，本文首先设计了高压辊磨机用 Fe-C-V-Mo-Cr 高强耐磨钢辊面材料的化学成分。采用离心铸造技术制备出了组织均匀、性能稳定且无宏观偏析的大型高强耐磨钢辊套试验件，其铸态组织主要由马氏体、多组元合金碳化物和残余奥氏体组成，辊套表面与截面的硬度分布均匀，约为 55 HRC。组织中的 MC 型碳化物呈粒状或短棒状分布在晶粒内，主要富集的元素为 V 和 Mo；M<sub>2</sub>C 型碳化物为层片状分布在晶界附近，主要富集的元素为 Mo 和 Cr；细小的粒状 M<sub>23</sub>C<sub>6</sub> 型碳化物均匀地分布在铸态高强耐磨钢的基体组织中，主要富集的元素为 Cr 和 Fe。经热处理后，高强耐磨钢组织主要由马氏体、少量的残余奥氏体、MC 型碳化物、M<sub>2</sub>C 型碳化物、M<sub>6</sub>C 型碳化物和回火后析出的二次碳化物组成。与铸态相比，高强耐磨钢经热处理后硬度显著提高。随淬火保温时间的延长，高强耐磨钢的抗压强度明显提高，最高可达 3800 MPa；同一淬火保温时间下，抗压强度随着回火保温时间的延长逐渐下降。高强耐磨钢具有优异的耐磨性，淬火后经 640 °C 回火（50 HRC）与 560 °C 回火（65 HRC）后，其耐磨性分别是高铬铸铁 Cr16 耐磨性的 3 倍和 15 倍。由于高强耐磨钢组织中高硬度 MC 型碳化物形成一种骨架结构，在磨损过程中该骨架结构不但能够减小磨料粒子的压痕深度，还使磨料粒子由单一的滑动方式转变为滚动与滑动交替的方式行进，从而减小了磨料粒子对样品表面的磨损。高强耐磨钢经深冷处理后组织中析出大量的第二相碳化物粒子，这些粒子的数量随着深冷处理次数的增加和保温时间的延长逐渐增加。深冷处理后高强耐磨钢的硬度有所下降，冲击韧性和耐磨性提高。

关键词：高压辊磨机；耐磨材料；硬度；抗压强度

#### E01-57

##### 硅橡胶基泡沫材料的辐射法制备及成型技术

宋宏涛，高小铃，傅依备，安友，黄玮

中国工程物理研究院

硅橡胶泡沫材料是将硅橡胶基料经过一定形式发泡后制成的高分子弹性多孔材料，它将硅橡胶与泡沫材料的特性结为一体，是理想的垫层、密封、减振、隔音、隔热材料。课题组以橡胶（甲基乙基硅橡胶生胶，中蓝晨光）及助剂（通用沉淀白炭黑，通化双龙化工）为原料，通过混炼，成型后塑封，室温下 60Co 辐射场中，吸收剂量 10~200 kGy，一次性完成交联；之后，水浴震荡下浸泡，取出后干燥，即得硅橡胶基泡沫材料。在微观形貌方面，总吸收剂量高于 20 kGy，方可大量成孔，交联程度不足时致使泡孔骨架不稳固而造成泡孔结构塌陷；尿素或铵盐作为成孔剂时，泡孔丰富，且可形成开闭孔混合泡孔型结构，平均孔径 100 μm 以下，表观密度及孔隙率基本可控；采用碳纤维复合补强时孔隙率有增加趋势，且纤维与橡胶基体之间存在比较牢固的结合。在力学性能，随总吸收剂量的增加，材料的三维空间网格逐渐增多，交联密度及凝胶含量逐渐增大，表面硬度和压缩强度（25%）逐渐升高；30 kGy 时，试样的骨架依然具有较大的弹性导致截面收缩，拉伸强度出现极大值，当总吸收剂量足够大时，射线作用会一定程度地造成链段的降解，拉伸强度呈现先增后减的趋势；断裂伸长率，也呈现先增后减的总体趋势。随成孔剂含量的增大，体相孔隙度逐渐增大（相当于孔缺陷逐渐增多），试样的拉伸强度逐渐降低。随补强剂含量的增大，试样的拉伸强度先逐渐增大之后略有降低（40 phr 时达 2.0 MPa，60 phr 时约 1.7 MPa）。σ-ε 曲线显示试样具有较宽的平台区，且完整无损、回弹性良好。50%×23 °C，1 年后试样的压缩永久形变仅约 5。在热性能方面，综合热分析发现所制得的样品成分较为单一，交联阶段敏化剂的反应以及溶析阶段成孔剂的去除是充分的，400 °C 开始分解，约在 600 °C 时分解完全至恒重。250 °C 等效热老化 20000 h 后，试样依然具有较好的性能，拉伸强度 0.90 MPa、断裂伸长率 80%、总失重低于 20%、压缩永久形变低于 6（50%×23 °C×72 h）。课题组采用辐射法交联，避免了采用过氧化物硫化时体相交联程度及密度不均匀、制品性能控制较为复杂以及需要高温等问题；采用溶析法成孔，避免了采用化学发泡时需要协调硫化与发泡的速度匹配、预交联与二次交联的剂量分配等问题；此外，二者配合，极大地避免制备过程中的化学残留，最终成品无异味、不变色，也可显著提高材料的力学强度以及耐热性能。

关键词：硅橡胶泡沫；辐射交联；溶析成孔

#### E01-58

##### 在线黏度计实际选型和使用中需要注意的问题

丁晓炯

笙威工程技术服务（上海）有限公司

在线黏度测量是目前很多涂料、胶黏剂、化妆品、食品、石油、化工、电子、造纸等行业中应用越来越广泛的技术，在线黏度的测量方法很多，主要有毛细管式、旋转式、振动式、柱塞式等，而测量对象、流体的流变特性、应用面也各不相同。从仪器和流变学的角度出发，对在线黏度测量的方法、流体的流变学类型进行了分析，并提出了在实际选型和使用中需要注意的问题及建议。

关键词：黏度；在线黏度计；流变学；牛顿流体；非牛顿流体

#### E01-59

##### 飞秒激光诱导金属材料表面周期性波纹研究进展

侯学勤，张铮

北京航空航天大学

本文首先介绍了飞秒激光诱导周期性波纹的特征和影响因素，然后，分析了周期性波纹的形成机制，最后，总结了研究周期性条纹面临的挑战。结果表明，周期性波纹一般包括低周期波纹和高周期波纹，受到材料、加工环境和激光参数等影响。低周期波纹是由具有表面电磁场波的入射激光干涉引起。而高周期波纹主要有三种形成机制，分别为入射激光与激光产生的表面等离子体的相互作用，干涉和二次谐波的综合作用和自组织理论。低周期波纹与高周期波纹之间的关系有待深入研究。与周期性波纹形成相关的表面裂纹和孔洞也有待进一步深入解析。

关键字：飞秒激光；周期性波纹；形貌；形成机制；影响因素

#### E01-60

##### 等离子体刻蚀诱导熔石英表面微结构形貌的双阶段演化及其机理

蒋晓龙<sup>1</sup>，蒋晓东<sup>1</sup>，刘颖<sup>2</sup>

1.中国工程物理研究院激光聚变研究中心

2.中国科学技术大学

作为目前最为重要的干法刻蚀技术之一，等离子体刻蚀常引起刻蚀表面粗糙化，微观上表现为出现纳米至微米尺度的表面随机结构。这种粗糙化效应会降低图形转移精度，影响元件性能，因而成为困扰等离子体刻蚀多年的问题。近年来，该效应被积极应用于表面微结构领域，可无需掩膜直接制备特定的微纳结构使样品表面具备诸如减反、亲疏水等特殊性质，在光学、环境、生物等领域具有广阔应用前景。而为了有效地抑制或调控刻蚀表面形貌，对其形成和演化规律的深入理解是十分必要地。本文通过熔石英等离子体刻蚀实验，系统地研究了等离子体刻蚀诱导表面微结构的形貌特性及演化过程，发现了刻蚀形貌的双阶段演化现象：在刻蚀初期，样品表面出现微米尺度的点状凸起结构，各凸起结构间彼此独立；表面形貌表现为由高频凸起结构和低频背景表面组成的“二元尺度”结构，两者间存在着突兀的高度变化和空间频率变化。此外，随刻蚀时间的增加，凸起结构的横、纵向尺寸不断增大，刻蚀表面粗糙度和自相关长度快速、线性增长。而在刻蚀后期，微结构横向生长至一定程度后开始彼此交连，背景表面消失；表面形貌由二元尺度演化为仅包含凸起结构的一元尺度。此时，表面粗糙度的增长依旧线性但速率显著下降，微结构的高度以及表面自相关长度维持不变。针对以上现象，我们提出了一种基于刻蚀产物沉积和凸起结构/背景表面间差异化刻蚀的理论模型，该模型有效地解释和预测了上述的双阶段演化现象。本研究增进了对等离子体刻蚀诱导表面微结构这一的科学认识，为刻蚀表面形貌结构的调控提供了理论依据和指导。

关键词：等离子体刻蚀；熔石英；表面微结构；形貌演化；二元尺度；双阶段演化

#### E01-61

##### Ti-7333 近 $\beta$ 钛合金连续冷却热变形过程中的组织与织构演变

陈家豪<sup>1</sup>，李金山<sup>1</sup>，唐斌<sup>1</sup>，陈逸<sup>2</sup>，寇宏超<sup>1</sup>

1.西北工业大学

2.江苏理工学院

近  $\beta$  钛合金由于其优良的强塑性匹配和深淬透性等优点，被广泛应用于制造航空大型锻件，然而高的组织敏感性导致其组织控制较为困难。本研究以新型高强韧近  $\beta$  钛合金 Ti-7Mo-3Nb-3Cr-3Al 为研究对象，研究了 Ti-7333 合金在热变形和连续冷却共同作用下的组织和织构演化规律。研究结果表明连续冷却热变形将导致 Ti-7333 合金流变应力的增大以及  $\alpha$  与  $\beta$  相间的取向关系的破坏。此外，在变形过程中 Ti-7333 合金的动态软化机制由动态回复与动态再结晶共同主导，而且动态再结晶机制又包括连续动态再结晶和不连续动态再结晶。在变形的初始阶段，由于动态再结晶机制的作用， $\beta$  晶粒显著细化，而且基体的织构因为再结晶晶粒与基体之间大的取向差而发生弱化。但是在变形末期，由于动态再结晶晶粒和基体受到变形作用，

以及动态再结晶机制的弱化,  $\eta$  织构  $\{001\} \langle 100 \rangle$  形成并成为合金的变形织构。

关键词: 近  $\beta$  钛合金; 热机械加工; 织构; 动态再结晶

#### E01-62 (Invited)

##### 稀土 $\text{LaFe}_{11.6}\text{Si}_{1.4}$ 磁制冷合金微量 B 和 C 元素注入效应

郑红星

上海大学

稀土  $\text{La}(\text{Fe}, \text{Si})_{13}$  磁制冷材料制备及其应用过程中, 材料脆性及磁性相变温度调控是需要解决的两个关键问题。现有研究中合金化被认为是一个有效手段, 目前合金化元素大致分为三类: (1) 稀土类元素, 如 Nd、Pr 等替代 La; (2) 过渡族金属元素, 如 Co、Cu 等替代 Fe; (3) 轻元素, 如 N、H、C、B 等作为间隙原子。现有研究中相关实验结果及解析存在诸多争议。本文基于  $\text{LaFe}_{11.6}\text{Si}_{1.4}$  合金, 重点研究微量 B 元素和 C 元素注入后的磁学相变行为。实验结果表明, 经 1373 K 热处理 100h 后,  $\text{LaFe}_{11.6}\text{Si}_{1.4}$  合金、 $\text{LaFe}_{11.6}\text{Si}_{1.4}\text{B}_{0.06}$  合金、 $\text{LaFe}_{11.6}\text{Si}_{1.4}\text{C}_{0.06}$  合金均为近纯 t1 相; 其中 B 元素使得磁相变温度略微降低 4K, 而 C 元素使得磁相变温度由 192 K 升至 206 K。通过引入密度泛函理论, 对 B 元素和 C 元素注入后  $\text{LaFe}_{11.6}\text{Si}_{1.4}$  合金的单元晶胞进行数值模拟分析, 结合 XRD 实验最小二乘法计算结果, 得出在本文给定条件下, B 元素以置换方式进入了 96i 的 Fe2/Si 位, 而 C 元素则优先进入 24d 间隙位。这一解析可以很好的解释两者引起的磁性相变温度变化。本文三个退火态合金均展示出优异的磁制冷性能。

关键词: 稀土磁制冷材料, 合金化, 磁热效应, 密度泛函理论

#### E01-63

##### 基于数据驱动的高强度高导引线框架用铜合金成分设计

王长胜, 付华栋, 谢建新

北京科技大学

随着集成电路制造技术向超大规模方向发展, 对引线框架材料提出了更高强度和导电率的要求, 传统的 Cu-Fe-P、Cu-Ni-Si 和 Cu-Cr-Zr 系合金材料很难同时满足引线框架材料对高强度和高导电率的需求。相关研究表明, 在上述合金中加入一种或多种微量元素后经过适当的热处理工艺可极大地提高强度的同时保持优良的导电率。目前, 添加元素的种类和数量均采用“试错法”来确定, 缺乏可以定量描述成分-性能这种复杂关系的准确模型。本文对公开发表的引线框架用铜合金成分和性能数据进行了数据分析挖掘, 建立了各种不同的神经网络模型来反映铜合金成分和性能间对应关系。以抗拉强度 >800 MPa、导电率 >50% IACS 为目标性能, 设计开发了多种高强度高导 Cu-Ni-Si-Cr-Zn-P 合金, 合金实验测试误差在 10% 以内, 具有较为理想的预测精度。相关研究可为缩短高强度高导铜合金研发周期, 加速新型高强度高导引线框架合金的开发与应用奠定基础。

关键词: 高强度高导铜合金; 神经网络; 多元微合金化

#### E01-64

##### Zr 元素含量对 Cu-Cr-Zr 合金组织和性能的影响

陈金水, 杨斌, 王俊峰, 肖翔鹏, 陈辉明, 汪航

江西理工大学

Cu-Cr 系合金由于其优异的物理和机械性能而广泛用于电力电子、运输和机械制造等行业, 其中 Zr 元素能显著提高 Cu-Cr 合金的强度和热稳定性, 因此 Cu-Cr-Zr 合金作为典型的析出强化铜合金已广泛应用于铁路接触线, 电阻焊电极和集成电路引线框架等领域, 其先进制备技术和强化机制一直是研究热点。本文利用透射电子显微镜 (TEM) 研究了 950 °C 固溶处理 1 h 及 500 °C 时效处理 0.5 h 至 24 h 后不同 Zr 元素含量 Cu-Cr-Zr 合金析出相的晶体学结构和形貌演变规律, 测试了不同时间时效处理后 Cu-Cr-Zr 合金的显微硬度和电导率。结果表明, 显微硬度和电导率首先随着时效时间的延长而提高, 但显微硬度达到峰值后缓慢下降, 而电导率继续增加。纳米级析出相呈现两种形态 (咖啡豆和椭圆形)。随着 Zr 含量的增加, Cu-Cr-Zr 合金在峰值时效时的含 Zr 析出相为 Heusler  $\text{CrCu}_2\text{Zr} \rightarrow \text{Cu}_5\text{Zr} \rightarrow \text{Cu}_4\text{Zr}$ 。Heusler  $\text{CrCu}_2\text{Zr}$  相还会分解成细小均匀的 Cr 和  $\text{Cu}_4\text{Zr}$ , 从而改善合金性能。

关键词: Cu-Cr-Zr 合金, 析出相, 析出相转变, 形貌, 性能

#### E01-65

##### Ti 对 Cu-15Ni-8Sn 合金中元素分布的影响

侯宇, 解浩峰, 彭丽军, 杨振  
有研工程技术研究院有限公司

研究了微合金元素 Ti 对 Cu-15Ni-8Sn 合金中各元素偏析的影响规律, 通过金相显微镜观察不同 Ti 元素含量的合金铸锭显微组织, 采用电子探针测量了合金中各元素的溶质分配系数, 定量地分析了合金中各元素的分布状态。结果表明, 在 Cu-15Ni-8Sn 合金中加入元素 Ti 可以抑制枝晶生长, 细化枝晶, 有利于二次枝晶的生长, 可以促进等轴晶的生成。Ti 原子在晶界的富集可以抑制溶质元素在固液界面的析出, 提高各元素的非平衡溶质分配系数, 有效地减轻 Cu-15Ni-8Sn 合金中的反偏析。

关键词: Cu-15Ni-8Sn; 反偏析; 微合金元素; 细化晶粒

#### E01-66

##### 锌当量与刀具微织构对 $\alpha+\beta$ 型环保硅黄铜断屑性能的影响

杨玉川, 梁良, 杨超  
华南理工大学

采用熔铸的方法制备了不同成分的  $\alpha+\beta$  相硅黄铜, 对不同成分的  $\alpha+\beta$  硅黄铜分别用普通硬质合金刀具和表面微织构刀具进行切削试验。并利用光学显微镜, 扫描电镜, X 射线衍射仪等设备对原始浇铸样和切屑进行观察和检测。结果表明: 随着锌当量系数的增加, 组织由  $\beta$  相网状结构分布于  $\alpha$  相晶界处转变为  $\alpha$  相以颗粒状和短棒状的形态不均匀分布于  $\beta$  相晶粒内, 这种不均匀的分布能够有效地提高材料的断屑性能; 相同加工参数下, 随锌当量的增加, 单元切屑长度和厚度逐渐减小, 切屑背面纤维化程度增加; 并且在剪切力作用下, 切屑截面断口由韧窝断口变成解理断口; 在切屑划过前刀面的过程中, 微织构会对其产生二次切削, 促进了切屑的断裂。本次实验熔铸出的一种  $\alpha+\beta$  相硅黄铜的断屑性能较好, 能达到铅黄铜的 80%到 90%。

#### E01-67

##### Al 元素对 $Mg_2Si$ 韧脆转变温度的影响

李奥, 赵新鹏, 黄海友  
北京科技大学

金属间化合物由于具有优异的热电、力学性能等, 吸引了材料研究者极大的关注。 $Mg_2Si$  就是其中之一, 它不仅具有良好的热电性能, 而且具有高熔点、低密度、高硬度、高弹性模量和低热膨胀系数等诸多优点, 可作为增强相有效改善镁合金的高温 and 抗蠕变性能, 有望满足汽车工业及航空航天对中高轻质材料的需求。但是  $Mg_2Si$  与其他金属间化合物一样, 存在严重的脆性问题。本文研究了不同铝含量对  $Mg_2Si$  金属间化合物韧脆转变温度及其他力学性能影响, 旨在探索元素添加方法降低材料的韧脆转变温度, 改善  $Mg_2Si$  塑韧性的可行性。首先采用粉末冶金方法制备了不同铝含量 (0, 2, 4, 6, 8, 10wt.%) 的混合粉体, 然后采用放电等离子烧结 (SPS) 方法制备尺寸为  $\phi 9.6 \times 8$  mm 的块体样品。在微机控制电子万能试验机上进行高温压缩实验测试合金的韧脆转变温度, 结果表明, 随着铝含量的升高,  $Mg-Si-Al$  合金的韧脆转变温度逐渐降低。当铝含量达到 6wt.% 以后, 韧脆转变温度基本不再发生变化, 比纯  $Mg_2Si$  降低 100 °C 以上。同时, 对不同铝含量的  $Mg-Si-Al$  合金进行了金相组织观察, 发现铝含量小于 4wt.% 时, 可观察到样品中有少量的单质硅聚集; 而当铝含量到达 4wt.% 以上, 单质硅消失, 晶粒变细小, 且晶界越来越明显有规则; 添加铝可使合金的硬度明显提高, 比纯  $Mg_2Si$  的维氏硬度高 60 HV 左右, 但硬度随 Al 含量的变化并不明显, 基本维持在 470 HV 左右。摩擦磨损实验表明, 添加铝元素也可以提高合金试样的耐磨性能。

关键词: 轻质材料; 粉末冶金; 韧脆转变温度

#### E01-68

##### Mn 含量对 CuNi10.5Fe1.8Mn1 合金组织及性能的影响

刘芳, 王强松, 刘冬梅, 杨书瑜  
有研科技集团有限公司

本文在 B10 合金的基础上, 研究添加不同含量的 Mn 元素 (0-1.2, 质量分数) 对 CuNi10.5Fe1.8Mn1 的合金组织、耐海水腐蚀和力学性能的影响, 并且采用 SEM、EDX 和 XPS 等测试手段分析合金的腐蚀产物膜, 运用电化学测试手段及失重分析, 研究了腐蚀时间对成膜过程的影响规律。结果表明: 随着 Mn 元素含量增高, 表面腐蚀产物中 Ni 的含量越高, 合金的力学性能、硬度明显提高, 并且不同 Mn 含量合金的电化学阻抗谱显示, 随着 Mn 含量增加, 合金的膜层电阻  $R_f$  和电荷转移电阻  $R_t$  增加, 耐腐蚀性能提高。

关键词：白铜合金；Mn 含量；腐蚀性能；组织；电化学

## E01-69

### 高氮马氏体不锈钢的组织研究

蔡欣, 胡小强, 康秀红, 李殿中

中国科学院金属研究所

通过真空正压炉加压冶炼了含氮 0.35wt% 的高氮马氏体不锈钢, 并采用 OM, SEM 和 EPMA 分析了高氮马氏体不锈钢的铸态组织和析出相。同时利用 XRD 研究了不同温度淬火后深冷处理对其组织的影响。结果表明: 高氮马氏体不锈钢的铸态组织为马氏体和少量高温铁素体, 同时部分层片状析出相沿晶界和高温铁素体周围析出, 经 EPMA 分析该析出相为  $(Cr, Mo)_x(C, N)_y$ 。随着淬火温度的升高, 淬火后的残余奥氏体含量逐渐上升, 由 950 °C 的 10% 升高到 1150 °C 的 46%。深冷处理能明显降低较高温度淬火处理后的残余奥氏体含量, 显著提高其硬度, 而对较低奥氏体化温度 (1000 °C 以下) 影响不明显。淬火温度的升高造成析出相溶解, 引起实验钢 Ms 点升高和奥氏体稳定性增加是残余奥氏体含量上升的主要原因。而深冷处理增大残余奥氏体转变为马氏体的动力是深冷处理后残余奥氏体减少, 实验钢硬度增加的主要原因。

## E01-70 (Invited)

### 高热稳定性块体铁锆纳米晶合金的设计、制备及高温力学性能

陈豫增, 单贵斌, 李波, 刘峰

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

共格析出相因其与基体共格的特性, 而具有极低的界面能。因此, 更容易以更小的尺寸和更高的数量密度在基体组织中形成弥散分布。纳米晶材料具有极高的热力学不稳定性, 因此极易发生长大, 这制约了其规模化制备及广泛应用。如能在纳米晶中引入大量共格析出相, 则有望抑制晶粒长大, 获得热稳定性更高的纳米组织。本工作通过在 Fe-Zr 铁素体合金中引入氧掺杂, 获得了与基体高度共格的 D03 结构共格析出相, 并实现了小尺寸、高密度析出相在基体中的弥散分布, 进而获得了高热稳定性纳米合金, 其纳米组织可在 1173 K 退火 24 h 不发生显著长大。在此基础上, 我们采用 SPS 烧结的方法制备出块体纳米晶材料, 测试了块体合金的高温强度及蠕变性能。结果表明, 所制备合金表现出极为优异的高温力学性能: 性能指标大幅优于铁素体耐热钢和部分较为成熟的 ODS 钢。

关键词: 纳米晶; 热稳定性; 共格析出相; 强化; 高温蠕变

## E01-71

### Fe 基非晶在激光 3D 打印中的裂纹抑制与性能调控

李宁, 张健信, 邢伟, 石杰, 柳林

华中科技大学

非晶合金在室温下难以成形加工是制约这类材料工程应用的瓶颈。发展新的成形技术是非晶合金未来发展与应用的关键。近年来发展起来的激光选区熔化(SLM) 3D 打印技术有望解决非晶合金的成形难题。由于非晶合金具有与晶态材料完全不同的原子结构, 激光 3D 打印中的缺陷产生与抑制、组织结构演变及力学性能等诸多科学问题尚不清晰。基于上述背景, 本研究选择高强度、但具有本征脆性的  $Fe_{43.7}Co_{7.3}Cr_{14.7}Mo_{12.6}C_{15.5}B_{4.3}Y_{1.9}$  (at.%, 断裂韧性  $2.2 MPa \cdot m^{1/2}$ ) 非晶合金作为研究对象, 进行了不同工艺参数下的激光 3D 打印。研究发现: 样品中存在大量微裂纹且难以采用工艺调控的方式消除。为了探索这种微裂纹产生的微观机制并提出有效的抑制办法。本研究采用了有限元模拟的方法, 发现在 SLM 成形过程中, 缺陷(如孔洞)周围的应力集中高达 4.1 GPa, 高于 Fe 基非晶合金的断裂强度, 从而诱发了微裂纹。为了抑制微裂纹的产生, 我们选择了 Cu 及 CuNi 合金作为第二相。扫描电子显微镜 (SEM) 分析表明, 混合 20% 质量分数的 Cu 的打印样品出现微裂纹, 但在混合 50% 质量分数的 Cu 和 CuNi 粉末后裂纹完全消除。DTA 结果表明 SLM 成形的合金仍然具有高的非晶含量。为了进一步探索第二相抑制微裂纹的机理, 本研究采用透射电子显微镜(TEM)对非晶基体与 Cu 的界面结合处进行了分析, 结果发现在第二相 Cu 的晶粒中存在高密度位错, 这表明在激光 3D 打印中, Cu 通过塑性变形释放了大量热应力, 避免了微裂纹的产生。随后对所制备的样品进行了力学测试, 发现其断裂韧性高达  $47 MPa \cdot m^{1/2}$ , 相比纯 Fe 基非晶合金提高了近 20 倍。这对促进非晶合金的工程应用具有重要意义。

## E01-72

### 同轴送丝激光增材制造中环形光束对熔道搭接的影响

王涵<sup>1,2,3</sup>, 周伟民<sup>1,3</sup>, 闵国全<sup>1,3</sup>, 宋志棠<sup>2</sup>

- 1.上海市纳米科技与产业发展促进中心
- 2.中国科学院上海微系统与信息技术研究所
- 3.上海产业技术研究院

激光送丝增材制造 (WLAM) 具有材料损耗少、制造成本低、制备周期短、制备的零件力学性能优异等优点, 在大型高性能零件的成形、修复再制造以及材料表面涂覆改性中具有十分巨大的应用价值。近年来, 越来越多的科学者投入到了 WLAM 的研究工作中, 相关报道也在迅速增多, 成形路径是其中的一个重要研究内容。但是, 大部分的研究都集中在了成形路径的规划上, 对于搭接率的研究却极少, 尤其是多层沉积条件下的搭接率研究。本论文以 316L 不锈钢焊丝为原材料, 利用本课题组开发的同轴送丝激光增材制造设备 SITI-CWL, 对多层双道薄壁件成形过程中的熔道搭接率进行了研究。结果表明, 在单层平面熔覆中, 当熔道搭接率为 40-60% 时, 熔覆层表面较为平整。依照简单的熔覆模型认为这个范围的搭接率在多层沉积中较为合适, 因为平整的表面是保证稳定沉积的基础, 使成形件不会因为表面起伏过大而形成缺陷甚至最终导致成形失败。但是, 在多层双道的熔覆实验中发现, 即使搭接率为 0 也能保持熔覆的稳定进行, 不会因为搭接率不足导致成形失败, 这与其他论文中的研究结果有明显的不同。这可能是由于本课题采用的环形激光束的直径要大于熔道的宽度, 使两道熔道中间部位不断被激光照射重熔形成金属熔液, 并在表面张力的作用下向中间聚集堆积。因此, 采用在同轴送丝激光增材制造过程中, 不仅需要考虑焊丝本身熔化形成熔道时相互之间的搭接, 还需要考虑激光重熔对沉积的影响, 这对于复杂零件的成形有着极为重大的影响。

关键词: 激光送丝增材制造; 激光熔覆; 同轴送丝; 搭接率

#### E01-73

##### 激光熔化沉积 80W-20Fe 合金的制备及组织性能研究

马诗雨<sup>1,2</sup>, 乐国敏<sup>2</sup>, 李纯<sup>1</sup>

- 1.北方工业大学
- 2.中国工程物理研究院材料研究所

钨合金由于熔点高、密度高、硬度高、强度高、热膨胀系数小等特点在航空航天、武器、汽车、能源、医疗等国防工业和民用工业领域有着广泛的应用背景。现有钨合金零部件的制造通常采用粉末冶金液相烧结的方式进行, 但该方法一般材料利用率较低, 生产周期较长, 且难以实现大型复杂形状零部件的制备。本研究以 80W-20Fe 为研究对象, 采用激光熔化沉积 (LMD) 增材制造技术探索钨合金的制备新方法。采用不同的成形参数制备了一系列钨铁合金的单壁样件, 并利用激光粒度测试仪、金相显微镜、扫描电子显微镜、X 射线能谱仪、X 射线衍射仪、维氏显微硬度计等对原始粉末和钨铁合金试样进行了表征。结果表明, 钨铁合金主要由 W、Fe 和 Fe<sub>7</sub>W<sub>6</sub> 三种物相组成。其中, W 相以颗粒和枝晶两种形式存在, Fe<sub>7</sub>W<sub>6</sub> 主要围绕着 W 颗粒或 W 枝晶生长。随着体能量密度的增加, 钨颗粒含量减小, 钨枝晶含量增加。枝晶的生成提高了样品的硬度。

#### E01-74

##### 316L 不锈钢选区激光熔化增材制造技术研究

李宗书, 郝若彤, 刘文涛, 张雪伟

中核北方核燃料元件有限公司

选区激光熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 增材制造技术是基于离散、堆积原理, 通过材料的逐渐累积来实现制造的技术。本文采用激光选区熔化设备研究了激光扫描间距、激光扫描速率和激光功率对 316L 材质金属制品缺陷和力学性能状态的影响。研究表明: 扫描间距、扫描速率和激光功率对于成型样件的力学性能、致密度和夹杂缺陷有明显影响; 随着扫描间距在一定范围内 (0.09-0.15 mm) 的增加, 成型样品的延伸率、屈服强度和抗拉强度均呈现增长趋势; 激光功率在一定范围内 (250-265 W) 的增加则会导致成型样品的延伸率、屈服强度和抗拉强度的降低; 随着扫描速率的增加 (945-970 mm/s), 成型样品的延伸率、屈服强度和抗拉强度均呈现先增后降的趋势, 在 960 mm/s 时呈现最优力学性能, 力学性能的变化规律与致密度和显微组织观察结果相一致。

关键词: 激光选区熔化; 扫描速率; 激光功率; 扫描间距; 力学性能

#### E01-75

##### 激光增材制造 La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/(Cu, Ni)梯度功能复合材料研究



彭宇相, 战再吉, 曹海要, 张琦, 吕相哲, 王静雅

燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室

铜具有良好的导电和导热性, 而应用在滑动电接触的条件下, 存在严重的电烧蚀问题。 $\text{La}_2\text{O}_3$ 兼具强韧化与抗烧蚀性能, 梯度设计可以减少层间应力差值, 防止层间开裂, 且使得  $\text{La}_2\text{O}_3$  在底层发挥强韧化作用, 在顶层增加抗烧蚀作用, 激光增材制造技术是采用“离散堆积”原理对构件进行制造, 具有设计自由度高, 生产效率高的优点, 是梯度功能复合材料制备的理想方式, 所以采用激光增材制造技术制备  $\text{La}_2\text{O}_3/(\text{Cu}, \text{Ni})$  梯度功能复合材料极具意义。本研究采用激光增材制造技术制备了  $\text{La}_2\text{O}_3/(\text{Cu}, \text{Ni})$  梯度功能复合材料,  $\text{La}_2\text{O}_3$  与 Ni 基自熔性合金按一定质量比配制, Ni 基自熔性合金具有良好的润湿性和强化作用, 可以提高材料的成型性, 设计  $\text{La}_2\text{O}_3$  梯度变化为: 1-10 wt %。借助扫描电子显微镜 (SEM) 和光学显微镜分析了梯度功能复合材料的微观组织变化, 梯度方向的变化为: 细小的胞状组织、细长的树枝晶状组织, 这部分区域较宽并且没有明显的定向特征、十字状组织; 应用 X 射线衍射 (XRD) 和能量散射谱 (EDS) 分析了梯度功能复合材料的相组成, 结果表明:  $\text{La}_2\text{O}_3$  在底层位于晶内, 在高含量梯度层以后的梯度层中部分  $\text{La}_2\text{O}_3$  在晶界处偏聚; (Cu, Ni) 固溶体分布均匀、杂质元素在晶界处偏析形成  $\text{Fe}_9\text{Ni}_8$  相和  $\text{SiNi}_3\text{C}_{0.15}$  相; 能量散射谱 (EDS) 还用以表征梯度层的元素变化, La 元素的梯度分布为: 0.7~8.59wt %; X 射线衍射 (XRD) 测量各梯度层的残余应力表明, 梯度层的残余应力逐层增加; 以显微硬度变化表征梯度方向的力学性能变化, 沿梯度方向的显微硬度呈现梯度变化; 电烧蚀试验表明: 制备  $\text{La}_2\text{O}_3/(\text{Cu}, \text{Ni})$  梯度功能复合材料具有良好的抗烧蚀性。

关键词: 激光增材制造; 梯度功能复合材料; 组织结构; 力学与抗烧蚀性能

#### E01-76

##### Mn-Cu 合金的选区激光熔化成形工艺以及力学行为研究

冯恩昊, 谭华

西北工业大学

因具备高阻尼, 高强度和低成本等特点, Mn-Cu 合金在工作环境恶劣的条件下, 例如航空工业, 表现出非常广泛的应用背景。但目前铸造的 Mn-Cu 零件表现出低抗腐蚀性, 机械强度差等缺点, 导致其在航空航天领域等要求高强度领域的应用受到极大限制。在本项工作中, 通过参数优化过程, 利用激光选区熔化技术 (selective laser melting, SLM) 成功制备了高致密度 (99.5%以上) 的 Mn-Cu 合金 (Mn-48wt%Cu-2%Sn-2%Al)。显微结构分析表明, 归因于超高的冷却速度, 激光选区熔化制备的 Mn-Cu 合金拥有超细晶粒及均匀的组织结构。同时, 本项工作也同时讨论了热处理对其显微结构及室温拉伸力学性能的影响。结果表明, 选区激光熔化技术可以成为一种高效制备复杂形貌的高性能 Mn-Cu 合金的新工艺。

关键词: Mn-Cu; 选区激光熔化; 力学性能; 阻尼性能

#### E01-77 (Invited)

##### 亚稳 $\beta$ 钛合金热变形过程中超细三态组织结构形成及 $\alpha$ 相变体选择机制

樊江昆

西北工业大学

亚稳  $\beta$  钛合金由于具有高比强度、优异的损伤容限性能、良好的塑性加工性能以及深的淬透性等综合性能而成为航空工业应用领域重要的结构材料。尽管近年来国内外学者对亚稳  $\beta$  钛合金热机械工艺及其组织演变做了大量的研究, 但仍然在一些存在争议和容易被忽视的科学问题, 比如热变形过程中的动态相变及变体选择问题。报告采用 SEM、EBSD、TEM 等表征方法以及晶体学计算, 对亚稳  $\beta$  钛合金 Ti-5553 在热变形过程中的动态  $\beta \rightarrow \alpha$  相转变行为, 包括  $\alpha$  相形核、 $\alpha/\beta$  取向关系以及动态应力诱发相变等科学问题分别进行了表征分析, 发现热力耦合作用下形成了纳米尺度的超细三态混合组织, 阐明了不同热力耦合条件下动态  $\beta \rightarrow \alpha$  相转变规律, 提出了动态相变和动态软化相互竞争机制, 通过晶体学计算揭示了热力耦合作用下  $\alpha$  相变体选择机制以及 Ti-5553 合金变形机制。

关键词: 亚稳  $\beta$  钛合金; 热力耦合; 变体选择; Ti-5553

#### E01-78

##### 初生 $\alpha$ 相含量对高温钛合金组织及性能的影响

乔旭, 李伯龙, 王同波, 李宁

北京工业大学

先进航空发动机苛刻的服役环境对高温钛合金的性能提出了较高的要求,优化的热处理工艺为改善高温钛合金的组织形态和性能提供有效的理论基础。本文研究不同热处理制度对初始组织为等轴组织的高温钛合金显微组织及力学性能的影响,以期获得工艺与合金组织性能的对应关系并得到最优热处理工艺。以  $\alpha+\beta$  相区锻态高温钛合金为研究对象,利用 OM 光学显微镜和 Image-Pro-Plus6.0 软件定量分析固溶工艺对初生  $\alpha$  相影响;利用 TEM 透射电镜观察  $\alpha_2$  相和硅化物析出,并根据硬度测试优化时效工艺。结果表明,随固溶温度升高,初生  $\alpha$  相含量从 920 °C 的 63.3% 降至 990 °C 的 15.3%,当温度升高到 980-990 °C 时,组织由等轴转变为  $\alpha+\beta$  双态组织;继续升温至 1000 °C,转变为片层组织。随时效温度升高,次生  $\alpha$  相析出更充分;而随时效时间延长, $\alpha_2$  相长大趋势更明显。本试验得到的最佳热处理制度为 990 °C/1 h/AC+700 °C/5 h/AC,得到的  $\alpha$  相约为 15.3%,已获得优良的组织性能匹配。

## E01-79

### TC17 合金纳米化表层组织结构及性能研究

杨超, 刘印刚, 李淼泉

西北工业大学

TC17 合金具有比强度高、淬透性好、锻造温度范围宽的特点,是制造压气机盘等航空发动机轻质高温部件的重要结构材料。而 TC17 合金高温轻质构件的失效多始于材料表面,因而对 TC17 合金进行表面改性是提高其服役性能的重要方法。高能喷丸方法将塑性变形技术与纳米化技术相结合,在钛合金表层制备出纳米晶,使得钛合金具有纳米材料独特的结构和优异的服役性能。本文采用高能喷丸法在 TC17 合金表层制备出纳米晶结构,基于高能喷丸纳米化丸试验,对 TC17 合金高能喷丸后表层的组织结构、表面粗糙度和表层性能进行了研究。研究结果表明:在空气压力为 0.45 MPa、喷丸处理时间为 10 min 时,TC17 合金表层剧烈变形区的厚度达到了 30  $\mu\text{m}$ ,最表层出现了晶粒尺寸达到了 61.8 nm 的纳米晶结构,且随喷丸处理时间的延长,喷丸表层的纳米晶尺寸和微观应变均逐渐减小。在空气压力为 0.45 MPa 下,随着喷丸处理时间的增加,TC17 合金喷丸表面的粗糙度呈波动变化,(Ra)值为 2.0-2.5  $\mu\text{m}$ 。同时喷丸表层的显微硬度由未变形基体的 442 HV0.025 增加到 578 HV0.025,提高了 31.4%。

关键词: TC17 合金; 高能喷丸; 纳米晶; 面粗糙度; 显微硬度

## E01-80

### Ti-7333 合金应力松弛行为及其对显微组织的影响

贾晨露<sup>1</sup>, 寇宏超<sup>1,2</sup>, 樊江昆<sup>1</sup>, 唐斌<sup>1</sup>, 李金山<sup>1,2</sup>

1.西北工业大学凝固技术国家重点实验室

2.先进金属材料精确热成型技术国家地方联合工程研究中心

钛合金性能可在较大范围内调整归因为显微组织尤其是  $\alpha$  析出相尺寸、形貌、分布和体积分数的丰富多样性。热机械处理是实现近  $\beta$  钛合金组织性能调控的关键,热力耦合作用下的相转变过程及微观组织演化规律一直是近年来的研究热点。作为残余应力的热激活过程,应力松弛过程中不仅外加载荷迅速下降并趋于松弛极限,而且热变形产生的大量位错、亚结构等缺陷也会影响应力松弛过程中组织演变。本文通过热模拟压缩试验系统地研究了 Ti-7333 合金的应力松弛行为及其组织演化,探讨了应力松弛对  $\alpha$  相析出的影响机制。研究表明,温度以及初始应变变量均会影响 Ti-7333 合金的应力松弛行为,其中温度的影响要远大于初始应变变量的影响。组织观察表明应力松弛可以促进  $\alpha$  相的析出,减少未析出带的产生。结合应力指数和显微组织特征可以得出应力松弛的第一阶段的主要变形机制是位错的滑移与攀移。随着应力松弛速度的减小,原子扩散成为主要的变形机制。

关键词: Ti-7333 合金; 应力松弛过程; 组织演化

## E01-81

### 高温变形工艺及热处理对 Ti-6Al-4V ELI 合金微观组织演变及力学性能的影响

董恩涛<sup>1,2</sup>, 余伟<sup>1</sup>, 蔡庆伍<sup>1,2</sup>, 史佳新<sup>1</sup>, 宁榛<sup>1</sup>, 张泽宇<sup>1</sup>

1.北京科技大学

2.钢铁共性技术协同创新中心

Ti-6Al-4V ELI 钛合金降低了间隙元素和杂质元素含量,且合金元素波动范围窄,使其具有良好的强度、韧性和塑性匹配,可应用于航空航天、医疗、舰船等重要领域。由于其热导率低、变形对温度参数敏感、热加工区间窄和组织多样性等原因,限制了其工业化生产及应用。本文系统地研究了 Ti-6Al-4V ELI 合金分别在  $\beta$  单相区变形、跨相区变形、 $\alpha+\beta$  相区变形及不同热处理制度对其组织与性能的影响,分析了不同组织状态与性能的关系,为改善加工工艺提供了理论依据。研究表明,

在  $\alpha/\beta$  相变点以上单相区变形会使晶粒组织内部产生细条状  $\alpha$  片层, 使得韧性较好, 但为了保证变形区间而采取的保温措施有可能导致晶粒在高温中迅速长大, 形成粗大组织, 影响其力学性能。跨相区变形使组织内部存在细小交错的  $\alpha$  相等亚结构, 使抗拉强度和屈服强度较高。两相区变形会导致不均匀的粗大条状  $\beta$  转变组织。不同热变形工艺得到的组织具有多样性, 其片层厚度、集束大小及  $\beta$  相晶粒尺寸都对材料的性能产生差异影响。热轧态组织经热处理后组织和力学性能趋于均匀, 固溶空冷时效工艺得到的组织均为片层结构, 只是片层的厚度、分布状态、长宽比等形貌特征存在差异, 而固溶淬火时效工艺能使片层组织完成部分球化, 改变组织状态。

关键词: Ti-6Al-4V ELI 合金; 高温变形工艺; 微观组织; 力学性能; 热处理

#### E01-82

##### 激光立体成型 TC4 钛合金热变形行为及热加工图

董秀荣, 杨夏炜

西北工业大学

为了研究激光立体成型 TC4 钛合金热变形行为、组织演变规律及该材料热加工性能, 基于 Gleeble3500 热物理模拟试验机, 采用温度为 750-1100 °C、应变速率为 0.01-10 s<sup>-1</sup>、变形量为 70% 的工艺参数对该材料进行热压缩实验。根据真应力-真应变曲线可得, 材料的流变应力随着应变的增加而迅速增加并达到峰值。在同一应变速率下, 峰值应力随着变形温度的降低而升高。峰值应力之后, 材料出现明显的软化现象; 在同一温度下, 也观察到了相似的现象。基于真应力-真应变曲线, 求得不同应变率下材料的本构方程并绘制不同应变率下材料的热加工图。根据热加工图, 预测了该材料热成形过程中的可靠及失稳两类区域的工艺参数范围, 并通过微观组织分析验证了预测的准确性。

关键词: 激光立体成型 TC4 钛合金; 热变形行为; 本构方程; 热加工图

#### E01-83 (Invited)

##### Fe-C-Mn-Si 钢中基于微观结构的奥氏体/铁素体相变动力学模型

宋韶杰, 刘峰

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

先进高强钢的高强度和g高塑性往往得益于铁素体、贝氏体、马氏体、亚稳奥氏体等两相或多相组织的合理搭配。想要得到性能互补的多相微观组织, 需要深入研究各相组织形成及演化的热力学与动力学特性、准确控制热-机械加工路径、以及明晰低合金元素影响等。奥氏体→铁素体相变作为其他非平衡组织形成的先驱相变, 其热力学和动力学的准确描述至关重要。本工作以 Fe-0.17C-0.91Mn-1.03Si (wt.%) 系低合金钢等温奥氏体→铁素体相变为核心, 结合实验组织特征参量(晶粒尺寸、单位体积内晶界面积等), 考虑晶界形核、以及基于 Gibbs 能量平衡方法耦合合金元素-界面交互作用和软碰撞的球形混合模式生长, 借助微观结构路径理论和晶界形核理论框架, 建立了基于微观结构的可预测铁素体相变理论模型, 并在此基础上分析了相界面迁移热力学驱动力与动力学能垒的演化规律。

#### E01-84

##### 低错配强有序析出增强的超高强度钢

蒋虽合, 吕昭平

北京科技大学

超高强度钢在航空航天、交通运输、先进核能以及国防装备等国民经济重要领域发挥支撑作用, 而且也是未来轻量化结构设计和安全防护的关键材料。然而几十年来高性能超高强度钢的研究始终基于传统的半共格析出产生强共格畸变的学术思路, 存在着析出相数量有限, 析出尺寸不够合理且分布不均匀的固有缺陷, 既降低了塑性又严重影响服役安全性。此外, 昂贵的制备成本也限制了其实际应用, 成为困扰高端钢铁工业发展的难题。本文针对低成本高性能的目标, 创新性提出利用高密度共格纳米析出相来强化超高强度合金的设计思想, 采用轻质且便宜的铝元素替代马氏体时效钢中昂贵的钨和钛等元素, 大幅降低成本的同时通过简单的热处理促进极高密度、全共格纳米析出, 研发出共格纳米析出强化的新一代超高强度钢。调控错配度使得析出相在产生极低共格畸变的同时又具有高的有序抗力, 这极大增强了合金的强度但不牺牲其延展性能。所涉及的颠覆性合金设计思想也可应用于其它结构材料的研发。

关键词: 超高强度钢; 低成本; 共格第二相; 高密度析出

#### E01-85

##### 新型低碳预硬型塑料模具钢的制备与表征

刘航航<sup>1,2</sup>, 傅排先<sup>1,2</sup>, 刘宏伟<sup>1,2</sup>, 李殿中<sup>1,2</sup>

1.中国科学院金属研究所

2.中国科学技术大学

根据多元素的协同作用, 新型低碳预硬型塑料模具钢 (HSTPM 钢) 与工业用高端 718H 钢在 500-650°C 范围内回火相比, 具有更高的强度、硬度和韧性。HSTPM 钢的强度和硬度之所以提高, 主要归因于 0.5 wt% 的 Mo 和 0.1 wt% 的 V 添加对基体组织的晶粒取向, 位错密度和纳米尺寸的析出物的影响。本文利用高角度环形暗场扫描透射电子显微镜 (HADDF-STEM) 对主要强化析出相(V, Mo)C 进行了表征。另外发现, 在 HSTPM 钢中添加 0.015wt% 的稀土 (RE) 时, 可使钢中长条状大尺寸的 MnS 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 变质为细小的球形 Re<sub>2</sub>O<sub>2</sub>S 夹杂。同时, 对夹杂物的数目进行统计, 发现添加 RE 后直径超过 5 μm 的大尺寸夹杂物减少了约 85.3%。钢水的纯净化和 RE 对夹杂物的改性是韧性改善的主要原因。同时, HSTPM 钢中较低的碳含量 (高端 718H, 0.34wt%; HSTPM, 0.23wt%) 也对提高冲击韧性起到很大的作用。最后, 和 718H 模具钢相比, HSTPM 钢多元素的协同效应延迟并最终降低了珠光体转变范围。

关键词: 新型低碳预硬化模具钢; 强度-硬度-韧性; 较低的碳含量; 稀土; 微合金化

## E01-86

### 第三代高强钢中不同复相组织对高周疲劳裂纹扩展影响机理的研究

宋成浩, 于浩, 卢军

北京科技大学

现代汽车结构用钢的主要发展方向是减重、节能、降低排放和提高安全性, 实现这些目标的重要方式是车身轻量化。针对汽车轻量化和高安全性的要求, 未来的汽车用钢应该是具有强度和塑性良好结合的新一代钢铁材料。第三代汽车用钢的强塑积超过 30GPa%, 并且成本低廉, 弥补了第一代和第二代汽车用钢的缺陷。由于疲劳失效是汽车用钢失效的主要原因之一, 它严重威胁人们的安全, 因此在汽车用钢使用前必须对其疲劳性能进行评价。我们致力于设计一种具有亚稳、多相、超细晶粒的第三代汽车用钢, 使其具有高的疲劳抗力, 提高汽车用钢的安全性。本文通过对比不同高强韧复相组织对高周疲劳裂纹扩展的影响, 为新一代耐高周疲劳汽车用钢的研发提供理论基础。本文主要利用高频疲劳试验机、原位疲劳、场发射扫描电镜等手段针对三种高强韧复相钢, TRIP (Transformation induced plasticity)、TAM (TRIP-assisted annealed martensite) 和 I&Q&P (Intercritical heating, quenching and partitioning) 钢的微观组织对高周疲劳性能的影响开展研究。研究结果表明三种钢的抗拉强度均为~1100 MPa, 断后总伸长率均为~30%, 残余奥氏体含量均为~13%, 残余中碳含量均为~1.0wt%, 但三种钢的疲劳强度却不同, 其中 TRIP 钢的疲劳强度最大, 为 830 MPa, TAM 钢其次, 为 740 MPa, I&Q&P 钢的疲劳强度最低, 为 690 MPa, 三种钢的疲劳强度在第三代汽车用钢中均属于较高水平, 影响这三种钢疲劳性能差异的根本原因是微观组织特征不同。下面总结不同组织对疲劳裂纹止裂行为的影响: TRIP 钢由贝氏体、铁素体和残余奥氏体组成, 它们的晶粒细小、分布均匀, 当疲劳裂纹遇到贝氏体和残奥时改变方向, 疲劳裂纹呈小锯齿状; TAM 钢由退火马氏体、贝氏体和残奥组成, 当疲劳裂纹扩展方向与退火马氏体板条垂直时, 止裂作用最显著; I&Q&P 钢主要由回火马氏体、铁素体和残奥组成, 当疲劳裂纹遇到回火马氏体时, 扩展速率明显降低, 可以有效地起到止裂作用, 当疲劳裂纹遇到残奥时, 裂纹改变方向, 增加了裂纹扩展路径。

关键词: 汽车用钢; 高强韧复相钢; 高周疲劳; 残余奥氏体; 马氏体

## E01-87

### 打磨工艺对 301L 奥氏体不锈钢表面耐腐蚀性的影响

任佩云, 孙晓光, 李刚卿, 韩晓辉, 张风东

中车青岛四方机车车辆股份有限公司

301L 奥氏体不锈钢因期优异的耐腐蚀性、较高的综合力学性能, 广泛应用于医疗器械、轨道车辆等高端产品。在以上产品的制造过程中, 打磨是必不可少的工序。然而, 打磨破坏了表面已有的钝化膜, 容易引起腐蚀的发生。本研究通过选取几种工业生产中常用的打磨工具, 对 301L 不锈钢进行打磨处理, 比较了不同工具打磨后表面粗糙度、表面形貌和耐腐蚀性的差异, 对引起耐腐蚀性差异的原因进行了分析。结果表明, 打磨速度及打磨材质均对耐腐蚀性有影响。采用较硬质的打磨工具及较高的打磨速度, 更易诱导马氏体相变, 马氏体的电极电位低于奥氏体, 从而引发电偶腐蚀, 导致不锈钢表面耐腐蚀性下降。而采用较软质工具及较低打磨速度时, 基本不会诱发马氏体相变, 对耐腐蚀性影响较小。

关键词: 不锈钢; 打磨; 耐腐蚀性

## E01-88

### 石墨材料的表面改性研究

张永福, 陈为为, 卜爱明, 程焕武, 王鲁

北京理工大学

为改善石墨材料在较高温度下的抗氧化性能, 采用液相放电等离子沉积法在其表面制备了 SiO<sub>2</sub> 涂层。利用 SEM 和 EDS 等具体研究了表面涂层的组成成分以及微观结构, 并分析了涂层在 1000 °C 环境下的抗氧化性能。结果表明: 采用液相放电等离子沉积法制备的涂层厚度在 10 μm 左右, 高温下 SiO<sub>2</sub> 玻璃相的存在可以很好地保护内部基材不被氧化, 阻止涂层因热膨胀系数差异导致的裂纹扩展现象。相比传统的包埋法和化学气相沉积法等, 该工艺方法操作简单, 设备成本要求低, 时间成本低, 涂层制备效率高, 而且涂层与基体结合牢固。将该工艺应用于实际生产实践, 可大大降低企业生产成本, 提高基体材料的服役性能。

关键词: 石墨; 表面改性; 抗氧化研究; SiO<sub>2</sub> 涂层

## E01-89

### 表面机械处理对铝/铝板材冷轧复合的影响及机理

白于良, 刘雪峰

北京科技大学

表面机械处理的效果对于金属材料冷轧复合的界面结合性能至关重要, 而表面粗糙度和表面硬化层的硬度和厚度是衡量表面机械处理效果的重要指标。本文通过百叶片和钢丝刷打磨了 3003 和 6063 铝合金的待复合表面, 产生了不同的表面粗糙度和表面硬化层状态, 采用激光共聚焦扫描显微镜和纳米硬度仪对打磨后的铝合金表面粗糙度和表面硬化层的硬度进行了表征, 分析了表面粗糙度和表面硬化层对 3003/6063 铝合金的冷轧复合临界压下率和界面结合强度的影响规律, 并揭示了影响机理。结果表明: 钢丝刷打磨的 3003、6063 铝合金的表面粗糙度分别为 7.9 μm、6.6 μm, 百叶片打磨的 3003、6063 铝合金板材的表面粗糙度分别为 2.7 μm、3.4 μm; 钢丝刷打磨的 3003 和 6063 铝合金板材表面硬化层厚度约 6 μm, 3003 铝合金板材的纳米硬度从表面的 2.0 GPa 降低至内部基体的 1.2 GPa, 6063 铝合金板材的纳米硬度从表面的 2.0 GPa 降低至内部基体的 1.3 GPa, 而百叶片打磨的 3003 和 6063 铝合金板材表面没有明显的硬化层; 钢丝刷和百叶片打磨的 3003/6063 铝合金的冷轧复合临界压下率分别为 22% 和 36%; 当压下率为 50% 时, 钢丝刷和百叶片打磨的 3003/6063 铝合金冷轧复合板的界面结合强度分别为 0.8 N/mm 和 1.2 N/mm。不同冷轧压下率条件下, 表面粗糙度和表面硬化层对冷轧复合的界面结合性能的权重不同。在较小的冷轧压下率条件下, 界面主要是机械啮合机制, 表面粗糙度增大有利于机械啮合, 表面粗糙度对冷轧复合的界面结合性能的权重大; 在较大的冷轧压下率条件下, 界面主要是通过硬化层破裂和新鲜金属挤出接触实现复合, 厚的硬化层不利于界面结合, 表面硬化层对冷轧复合的界面结合性能的权重大。

关键词: 铝/铝板材; 冷轧复合; 表面机械处理; 临界压下率; 界面结合强度; 影响机理

## E01-90 (Invited)

### 低温塑性变形制备纳米孪晶 Cu-Al 合金

魏伟<sup>1,2</sup>, 张宗浩<sup>1,2</sup>, 魏坤霞<sup>1,2</sup>, 杜庆柏<sup>1,2</sup>, Igor V. Alexandrov<sup>2,3</sup>

1. 常州大学

2. 功能纳米结构材料(中-俄)联合实验室

3. 俄罗斯乌法国立航空技术大学

铝青铜具有良好的机械性能和耐磨耐蚀性能, 是机器制造业中重要的工程材料。随着现代工业和科学技术的快速发展, 对铝青铜结构件服役性能提出了更高的要求。金属材料的强度与塑性存在此消彼长的固有矛盾, 纳米孪晶可以同时提高材料的强度和塑性。Cu-2.2%Al, Cu-4.5%Al 和 Cu-7.0%Al 合金(层错能分别为 25 mJ/m<sup>2</sup>, 12 mJ/m<sup>2</sup> 和 5 mJ/m<sup>2</sup>) 经低温等通道变形(equal channel angular pressing, cryo-ECAP)、低温轧制(cryo-Rolling)。研究了层错能(SFE)对微观组织、晶粒尺寸、位错密度和拉伸性能的影响规律。随着层错能的减小, 在低温 ECAP 变形过程中剪切带被高密度变形孪晶切割, 逐渐形成阶梯状; 晶粒尺寸逐渐减小, 位错密度逐渐增大。在随后的低温轧制变形过程中, 孪晶片层厚度和晶粒尺寸进一步减小。随着层错能的降低, 拉伸强度增大, 而且在低温轧制变形后进一步增大。Cu-Al 合金强度的提高是由于细小的晶粒、较小的孪晶片层厚度和较高的位错密度。Cu-7%Al 合金可以同时获得最大拉伸强度 871 MPa 和 4.3% 的均匀伸长率。

## E01-91

### 金属磨粒对板带钢冷轧乳化液摩擦学及工艺润滑性影响研究

李岩<sup>1,2</sup>, 陈义庆<sup>1,2</sup>, 高鹏<sup>1,2</sup>, 钟彬<sup>1,2</sup>, 肖宇<sup>1,2</sup>

1.海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室

2.鞍钢集团钢铁研究院

采用 Zetasizer Nano ZS90 纳米粒径电位分析仪对现场取样乳化液中的金属磨粒进行粒径分析。利用 Dataphysics OCA50 全自动接触角测量仪研究不同粒径及含量的金属磨粒对乳化液润湿性能的影响。通过 MRS-10A 四球摩擦磨损试验机考察金属磨粒对油膜强度 PB 及摩擦系数  $\mu$  的影响。结果表明金属磨粒的存在会增大乳化液的内摩擦, 导致其接触角变大; 金属磨粒虽然具有一定的抗磨减磨作用, 但当其含量过高或者粒径较大时会影响到接触区润滑油膜的形成, 进而影响到乳化液的润湿稳定性导致其平均摩擦系数  $\mu$  增大。

关键词: 金属磨粒; 冷轧乳化液; 工艺润滑; 摩擦学性能

## E01-92

### 7075 铝合金变断面无缝管恒挤压比挤压过程模拟与分析

潘跃, 刘雪峰

北京科技大学

针对超高强铝合金变断面无缝管传统移动针挤压成形时所需挤压力较大的问题, 发明了变断面无缝管恒挤压比挤压技术, 并以 7075 铝合金为研究对象, 采用 DEFORM-3D 有限元软件, 在挤压温度为 450 °C 和挤压速度为 5 mm/s 的条件下, 分别对 7075 铝合金变断面无缝管的挤压比变化范围为 22.83-36.77 的传统移动针挤压过程和挤压比为 22.83 的恒挤压比挤压过程进行了三维数值模拟, 研究了管材挤压过程中管材断面积、流变应力和挤压力之间的关系, 探讨了 7075 铝合金变断面无缝管恒挤压比挤压对挤压力的影响机理。结果表明: 在本研究工艺参数条件下, 传统移动针挤压和恒挤压比挤压均能得到国际标准要求尺寸的 7075 铝合金变断面无缝管; 当管材断面积从加厚端的 2090 mm<sup>2</sup> 降至管身的 1298 mm<sup>2</sup> 时, 传统移动针挤压时的流变应力将从 43.4 MPa 升至 46.1 MPa, 而恒挤压比挤压时的流变应力仅从 43.6 MPa 升至 44.2 MPa, 后者变化幅度较小; 恒挤压比挤压 7075 铝合金变断面无缝管所需的最大挤压力为 25.6 MN, 与传统移动针挤压相比下降了 26.9%。7075 铝合金变断面无缝管恒挤压比挤压时, 通过采用变断面挤压筒和变断面坯料, 将挤压铝合金管身时的挤压比改变为与挤压铝合金管材加厚端时的挤压比相同, 使挤压全过程的挤压比保持恒定, 减小了铝合金管材断面积变化时流变应力的变化幅度, 消除了传统移动针挤压过程中由铝合金管材断面积减小导致的挤压力的额外增加, 实现了 7075 铝合金变断面无缝管的低挤压力挤压成形。

关键词: 7075 铝合金; 变断面无缝管; 恒挤压比; 挤压力; 数值模拟; 机理分析

## E01-93

### 加工工艺对压水堆格架用国产新锆合金带材力学性能的影响

张鹏飞, 胡旭坤, 孙国成, 高博, 孙美

国核宝钛铝业股份公司

锆合金因其优良的抗腐蚀性能和机械性能被广泛用作核反应堆的堆芯结构材料, 其性能直接影响核电站的安全可靠性和经济性, 而采用新锆合金制造的高燃耗燃料组件由于具有燃耗深、经济性好、运行安全可靠和破损率极低等一系列优点, 致使世界各国都非常重视对其的开发研究并努力将其应用于核反应堆。本文以典型国产新锆合金 (Zr-Nb 系) 为研究对象, 从合金熔炼开始, 经过一系列生产过程制备出反应堆格架用锆合金带材, 通过优化冷加工变形过程, 改变轧制变形量和中间热处理制度, 研究不同加工工艺对锆合金力学性能的影响。研究发现: (1) 国产新锆合金通过合金成分优化, 其力学性能已经达到 Zirlo 合金力学性能水平; (2) 锆合金在冷加工变形时可通过控制变形量、退火温度来细化晶粒提高强度。冷轧形变量越大, 晶粒越细, 材料的屈服强度就越高; 多次冷轧和退火, 会使得晶粒尺寸增大, 材料屈服强度降低; (3) 锆合金在冷变形时冷轧形变量越大, 有利于第二相细小、弥散、均匀分布, 从而提高材料强度。

关键词: 新锆合金; 加工工艺; 力学性能

## E01-94

### 外方内圆核级 Zr 型材挤压模具应力分析及模具结构优化

倪嘉<sup>1,3</sup>, 王练<sup>2</sup>, 张志豪<sup>1,3</sup>, 谢建新<sup>1,3</sup>

1.北京科技大学

2.国核宝钛铝业股份公司

### 3.材料先进制备技术教育部重点实验室

锆合金是核燃料包壳管和反应堆堆芯结构件的关键材料，热挤压是锆合金管材、型材生产最常用的生产方式。由于锆合金热加工窗口窄、挤压热效应大、粘模效应明显等原因，锆合金挤压对模具结构、润滑条件、挤压工艺等要求很高，目前只有美国、俄罗斯、法国等少数国家掌握相关核心技术。锆型材挤压时，由于挤压速度快、挤压温度较高，模具在挤压过程中承受高温、高压和剧烈的摩擦，与铝合金挤压模具相比更容易导致磨损、塑性变形、疲劳损坏和开裂而失效，通过模具结构优化设计对于提高模具的使用寿命具有重要意义。本文针对小型核反应堆外方内圆结构件的需求，以核级 Zr-4 合金为研究对象，采用热模拟实验分析了合金的热压缩变形行为、获得塑性本构关系，采用自行设计的换热系数装置获得了 Zr-4 合金与模具钢的界面换热系数，采用实验和理论计算相结合的方法获得了 Zr-4 合金与模具钢的摩擦因子，在此基础上，采用有限元模拟计算了不同模具结构挤压时的模具应力分布特征，对模具结构进行了优化设计。相关研究对于锆合金异型断面型材挤压技术开发具有重要参考价值。

关键词：Zr-4 合金；挤压；有限元；模具应力

#### E01-95

##### 柱状晶组织 Cu71.7Al18.1Mn10.2 合金的拉伸双程形状记忆效应

姚培胜，黄海友

北京科技大学

Cu 基形状记忆合金 (SMA) 具有形状记忆性能优良、价格低廉等优点。在实际应用中，比如用于热敏器件、自控元件、紧固件等，要求在一定的温度区间，随着温度的升降 SMA 能够具备高且稳定的形状回复，这对 Cu 基 SMA 在双程形状记忆性能上就提出了更高的要求。本研究组的前期研究工作中，采用定向凝固方法制备了大尺寸柱状晶组织 Cu71Al18Mn11 合金，发现合金的超弹性 (SE) 可达 8% 以上。本文采用定向凝固方法制备了室温 SE 为 8.2% 的柱状晶组织 Cu71.7Al18.1Mn10.2 形状记忆合金，在 ( $M_s - 50\text{ }^\circ\text{C}$ ) 温度马氏体状态下对合金试样进行单轴预拉伸训练，并通过热膨胀方式测量合金的双程形状记忆效应 (TWSME)，研究不同预变形量 (Pre-strain) 与 TWSME 的关系，同时采用示差扫描量热仪 (DSC) 研究训练前后合金相变点的变化。结果表明：柱状晶组织 Cu71.7Al18.1Mn10.2 合金的 TWSME 随 Pre-strain 的增加先上升后下降，在 6% 预变形量训练下柱状晶组织 Cu71.7Al18.1Mn10.2 合金获得最高 TWSME 为 2.91%，对应相变点达到最低。在 5% 预应变时获得 2.85% TWSME，训练效率可达 57%，与其他单晶 Cu 基形状记忆合金相媲美，如单晶 Cu-Al-Ni 和 Cu-Zn-Al。本研究为大尺寸、高性能 Cu-Al-Mn 形状记忆合金的开发提供了新思路。

关键词：Cu-Al-Mn；形状记忆合金；柱状晶；双程形状记忆效应；预应变

#### E01-96

##### Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 粉末合金的制备及电子束焊接

吴杰<sup>1</sup>，徐磊<sup>1</sup>，卢正冠<sup>1</sup>，刘巧沐<sup>2</sup>，杨锐<sup>1</sup>

1.中国科学院金属研究所

2.中国航发四川燃气涡轮研究院

采用预合金粉末热等静压工艺制备了 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo (atomic fraction, %) 粉末合金，对 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 粉末合金板坯进行激光焊接。采用 OM, SEM, EPMA 和 X 射线三维成像技术对焊接接头的微观组织进行表征，研究了焊后热处理对焊接接头显微硬度和拉伸性能的影响。结果表明，焊接接头熔合区、热影响区和母材的化学成分均匀，虽然显微组织差异明显，但是显微硬度无明显区别。拉伸性能测试试样断裂于熔合区。X 射线三维成像分析表明，焊接接头熔合区存在大量的显微孔隙是焊接接头发生断裂的失效机制。焊后热处理可以减少焊缝处的显微孔隙数量，从而提高焊接接头塑性。

关键词：热等静压，Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo 粉末合金，微观孔隙，电子束焊接

#### E01-97

##### 扩散焊接头综合力学性能基本特征的研究

彭毓，熊江涛，李京龙，张赋升

西北工业大学陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室

本文从航空、航天、核能、石化等高端制造领域，针对先进材料的核心复杂精密结构件的革新性设计制造，阐述了扩散焊“等强保性精密成形”技术对复杂结构成形的革命性贡献。然而由于此类核心零部件应用于高温、高压、腐蚀、以及长期（航天一般例外）的服役环境且对安全性有苛刻要求，迫使成形工艺必须继承原有母材优异的综合性能，而仅具备“等强保

性”的扩散焊显然难以完全满足。本文提出了严重制约扩散焊在高端制造业核心部件中应用的瓶颈问题是扩散焊接头在塑性、韧性、疲劳以及高温持久等方面的不确定性，以及不确定性随被焊母材性能提高而增加的趋势。为此，本研究以实验所得 S136 模具钢、TC4、AISI420 等材料的 30 个扩散焊接头，并结合了 30 篇文献 9 类合金 178 个不同工艺扩散焊接头的相对力学性能值（与母材值之比）统计分布情况，从而量化表征了接头综合力学性能。上述研究表明：相对抗拉强度大于 90% 的接头比例为 52%，而相对塑性（延伸率）和韧性（冲击功）大于 90% 的接头比例仅有 18% 和 20%；此外，接头强度、塑性和韧性，三者相对母材降低程度和分散性依次增大；接头韧性很难达到母材水平，且大部分（78%）处于母材值的 60% 以下。以上结论表明了扩散焊接头具有“易强难韧”的普遍特性，进一步研究发现这一特性出现的根本原因是扩散焊界面 Bond Line（界面微孔、沉淀相、晶粒取向分布差等）的存在，从而为扩散焊接头综合力学性能的提高提供了研究方向及思路。

关键词：扩散焊；力学性能；易强难韧

#### E01-98

##### 铝合金/高强钢双光束激光深熔焊接接头组织及力学性能

陈鸿熙，崔丽，卢东琪，常耀卿，夏旭，贺定勇

北京工业大学

随着铝/钢异种合金连接结构在汽车制造、航天航空、船舶及国防等领域应用的日益增长，高效、优质的连接方法受到更多研究人员的关注。激光焊接具有能量密度高、焊接速度快、精准控制热输入等优点，已成为国内外研究的热点。然而，由于单光束激光能量分布集中、能量密度高等特点，使得焊接过程中极易出现气孔、飞溅等缺陷，影响铝/钢焊接接头的力学性能。双光束激光焊接具有改善熔池流动性，提高焊接稳定性，减少飞溅、凹坑等特点，为解决单光束激光焊接铝/钢异种合金提供了新思路。本文对 1.5 mm 厚铝合金和高强钢搭接接头进行了双光束激光深熔焊接新工艺的探索，研究了三种不同光束能量比（ $R_S=0.25, 0.33, 0.5$ ）对焊缝成形、接头界面组织和力学性能的影响。结果表明，在其他参数一定条件下，当  $R_S=0.25, 0.33, 0.5$  时采用双光束激光深熔焊接工艺均可获得焊缝成形良好的铝合金/高强钢搭接接头。随着  $R_S$  从 0.25 增加到 0.5，焊缝的熔深由 575.0  $\mu\text{m}$  减小至 424.2  $\mu\text{m}$ ，铝合金/焊缝界面处金属间化合物（IMC）层厚度从 3.4  $\mu\text{m}$  减小至 2.5  $\mu\text{m}$ ，IMC 层平均显微硬度从 771.1 HV 降至 571.9 HV，接头机械抗力从 95.7 N/mm 提升到 115.2 N/mm。在  $R_S=0.5$  时，双光束激光深熔焊接铝合金/高强钢接头具有最高的接头机械抗力，是由于接头具有相对较好的塑韧性。

关键词：双光束；激光深熔焊；铝合金/高强钢异种合金；金属间化合物（IMC）；机械抗力

#### E01-99

##### GH2132 连续驱动摩擦焊初始阶段产热均匀性研究

南旭惊，刘普，金峰，廖仲祥，熊江涛，李京龙

西北工业大学

连续驱动摩擦焊初始阶段是接头产热分布的核心，研究转速对产热分布的影响对工程应用过程中焊接参数的选择具有重要的指导意义。本文以 GH2132 为研究对象，采用实验与数值计算结合的方法系统研究摩擦焊初始阶段转速对界面产热热强分布的影响规律。实验结果表明，不同转速下界面产热存在显著的不均匀性，随着转速从 300 rpm 增加到 2100 rpm，扭矩峰值时刻对应的界面外缘温度下降了约 500  $^{\circ}\text{C}$ ，且发生稳定轴向缩短所需的热累积时间从 1.5 s 增加到 17 s。基于 Matlab 软件构建起始摩擦阶段二维产热模型，并假设：（1）接头的热量主要来自滑动摩擦产热；（2）界面压力呈现中间大、边缘小的双曲线分布形式；（3）忽略周向热传导，采用二维柱坐标下的热传导模型；（4）材料的各物理参数均采用常数。模型获得的等温线形貌及表面温度与实验观测相符，证明了模型的可靠性。采用模型计算上、下极限转速范围内的产热热强分布规律，结果表明界面产热热强分布与转速密切相关，随着转速从 100 rpm 增加到 2100 rpm，产热最为集中的径向位置从边缘逐渐向中心处转移，当转速大于 300 rpm 时，整个界面对应的温差由 100  $^{\circ}\text{C}$  增加到约 600  $^{\circ}\text{C}$ ，界面的产热分布不均匀性更加显著。

关键词：连续驱动摩擦焊；压力分布；产热热强；不均匀性；转速

#### E01-100

##### 使用 Ni 箔扩散焊 TZM 合金与 Nb-Zr 合金接头组织性能研究

林佳美，杨振文，王颖，王东坡

天津大学

针对高温难熔合金的连接问题，分别采用直接扩散焊和加 Ni 中间层扩散焊的方法连接 TZM 合金与 Nb-Zr 合金，连接温度为 1000-1100  $^{\circ}\text{C}$ ，保温时间为 30 min，加压 10 MPa。结果发现，与直接扩散焊相比，采用 Ni 中间层在 1000  $^{\circ}\text{C}$  的温度



下即可获得完整的接头。当连接温度为 1100 °C 时, 两种方法都可以获得完整接头, 但是使用 30  $\mu\text{m}$  Ni 箔扩散焊获得的接头其剪切强度为 228 MPa, 要比直接扩散焊高出 60%。接头中的扩散反应层被确定为: NiMo, Ni<sub>3</sub>Mo+Ni<sub>4</sub>Mo, Ni<sub>8</sub>Nb, Ni<sub>3</sub>Nb 和 Ni<sub>6</sub>Nb<sub>7</sub>, 通过测量各扩散反应层在不同连接参数下的厚度和显微硬度, 建立了界面组织和接头性能之间的联系, 结果表明, Ni<sub>3</sub>Nb 的厚度和剩余的 Ni 箔对接头的抗剪强度有利。随着 Ni 箔厚度从 0  $\mu\text{m}$  逐渐增加到 45  $\mu\text{m}$ , 接头的抗剪强度明显提升, 进一步增加 Ni 箔的厚度至 120  $\mu\text{m}$ , 接头抗剪强度则在 250 MPa 附近浮动。裂纹主要从 Ni<sub>6</sub>Nb<sub>7</sub>/Nb 和 NiMo/TZM 两界面处起源, 而后延伸到中间各扩散层。

关键词: TZM; Nb-Zr 合金; Ni 中间层; 扩散焊; 机械性能

### E01-101

#### 保温时间对 IC10 高温合金扩散焊接头组织及力学性能的影响

袁琳, 熊江涛, 李京龙, 张赋升

西北工业大学

本文以定向凝固 IC10 高温合金为研究对象, 采用了添加 4  $\mu\text{m}$  的多晶 Ni 中间层的固相扩散焊的方法, 焊接温度 1100 °C, 焊接压力 15 MPa, 保温时间 2-7 h。结果表明: 随保温时间的延长, Ni 中间层内的孔洞由先由长条状缓慢趋于圆润化, 并通过焊接时间的进一步增加而逐步闭合。同时, 保温时间的延长使得多晶中间层发生明显长大, 且界面处存在再结晶的现象, 接头的晶体学取向存在差异。由于定向凝固合金消除了横向晶界, 因此母材在垂直和平行于定向凝固方向上的力学性能不同, 为了更好地评价接头的性能指标, 也对经相同热循环后的母材在两个方向上分别进行了拉伸试验: 发现在相同的工艺参数下, 保温时间从 2 h 延长到 7 h, 接头的延伸率由 10%呈近线性递增至 60%; 其抗拉强度虽已达到母材强度(垂直于定向凝固方向, 存在横向晶界)的 100%, 但只保持在平行于定向凝固方向(焊接方向)母材强度的 90%范围内。这一现象说明此时孔洞闭合虽仍然能提高接头的塑性指标, 但对提高接头强度指标的作用已经不明显, 而界面处晶体学取向差异才是影响接头抗拉强度的主要因素。

关键词: 定向凝固; 多晶中间层; 孔洞; 力学性能

### E01-102

#### Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷与 Nb 真空钎焊接头界面组织及性能

赵亚婷, 王颖, 杨振文, 王东坡

天津大学

采用 Ag-Cu-Ti 以及 Ag-Cu-Ti+Mo 两种钎料对 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷与金属 Nb 进行钎焊连接, 研究了钎焊工艺参数和 Mo 含量对钎焊接头组织以及力学性能的影响。结果表明: 使用 Ag-Cu-Ti 钎料时, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb 接头的界面组织为: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti<sub>3</sub>(Cu, Al)<sub>2</sub>O/TiCu+Ti<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>+TiCu<sub>4</sub>+Ag(s, s)+Cu(s, s)/Nb; 当使用 Ag-Cu-Ti+Mo 复合钎料时, 接头中大块的 Ti-Cu 化合物消失, 大量细小的相生成。值得注意的是溶解的 Mo 颗粒对于钎缝组织的细化起到更加重要的作用。随着 Mo 含量的增加, 钎缝逐渐变宽。当 Mo 含量为 8wt.% 时, 通过有限元计算的钎焊接头残余应力的最大值由 296 MPa 降低到 253 MPa。钎焊温度为 900 °C, 时间为 10min 时, 钎焊接头的抗剪强度达到最大值 203 MPa。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Nb 钎焊接头的连接性能主要取决于 Ti-Cu 化合物的分散度以及 Ti<sub>3</sub>(Cu, Al)<sub>2</sub>O 反应层的厚度。

关键词: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 钎焊; 组织; 残余应力; 力学性能

### E01-103

#### 316L 不锈钢扩散焊焊缝晶界迁移对力学性能影响研究

马平义<sup>1</sup>, 李京龙<sup>2</sup>, 张昊<sup>1</sup>, 熊江涛<sup>2</sup>, 张赋升<sup>2</sup>

1. 西北工业大学凝固技术国家重点实验室

2. 西北工业大学陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室

针对 316L 不锈钢热轧棒材, 利用真空扩散焊方法, 在焊接温度 1000 °C、压力 10 MPa 的参数下, 分别进行了 30、45、60、75 和 90 min 不同保温时间下的扩散焊实验, 采用 SEM 分析接头焊合线上的晶界迁移率, 即焊合线上, 穿过焊合线的晶粒所占长度与焊合线总长度的比值, 对接头进行了室温拉伸和 Charpy V 型缺口摆锤冲击实验。结果表明: 当保温时间从 30 min 逐渐增加到 90 min, 接头焊合线上平直的晶界逐渐被迁移晶粒取代, 晶界迁移率随之从 25% 逐渐增加到 95%; 当保温时间 60 min, 晶界迁移率达到 54% 时, 接头强度从 30 min 的 621 MPa 增加到 637 MPa, 与焊前母材的 640 MPa 相当, 晶界迁移率达 54% 以上时, 接头强度随之变化不大; 冲击吸收功随晶界迁移率增加而增大, 当晶界迁移率为 95% 时, 冲击功为 170 J, 达到焊前母材冲击功 280 J 的 61%; 断口分析表明, 试样断于焊缝, 当晶界迁移率较低时, 断口平直, 呈脆性断裂, 个别区域分布有较小尺寸的韧窝, 当晶界迁移率增加到 54% 以上时, 断口韧窝增大增多, 呈韧性断裂; 对比冲击实验

和拉伸实验，接头冲击性能对焊缝处平直晶界更为敏感。

关键词：316L；扩散焊；晶界迁移；力学性能

#### **E01-104**

##### **电弧增材制造 AZ80 镁合金组织与性能的研究**

郭阳阳，任凌宝，周明扬，范琳琳，权高峰

西南交通大学

电弧增材制造技术具有成形速度快、成型件尺寸灵活等优点而越来越受到关注。以 AZ80 镁合金焊丝为原料，基于钨极惰性气体保护焊（GTAW）技术，制备了镁合金单道多层薄壁件，探索成形过程温度场和成形特性，对薄壁件的显微组织和力学性能进行了研究。结果表明：成形过程在第 5 层以后温度场趋于稳定，沉积层的熔宽、熔高也趋于稳定。初始沉积层为细小的树枝晶和等轴晶组织，具有典型激冷铸态特征；受到后续沉积过程非平衡循环热的作用，部分共晶组织发生溶解，枝晶偏析程度减小；层间结合处组织为较粗大的柱状树枝晶，方向垂直于沉积方向。拉伸试验结果显示，沉积态材料的平均抗拉强度为 285 MPa，断后伸长率为 16.7%，明显优于铸态。

关键词：电弧增材；镁合金；显微组织；力学性能

#### **E01-105**

##### **激光增材制造 VN/(Cu, Ni)梯度复合材料结构性能研究**

张琦，战再吉，曹海要，彭宇相，吕相哲，王静雅

燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室

Cu 及 Cu 合金由其优异的导电导热性，在各领域得到了广泛的应用。但在一些工业应用中，不同部位对材料性能要求不同，单一材料无法实现。具有梯度结构的复合材料，其属性在构建方向逐渐变化，为解决这个问题提供了可能性。在激光增材制造过程中，通过逐层调整各组分的比例获得功能梯度材料，具有成分梯度可控以及几何自由度高的优势。采用激光直接沉积技术制备功能梯度材料，利用陶瓷增强和金属铜导电性优良的优点，以及 VN 在高温摩擦时原位氧化生成 Magneli 相提供减摩的效果，构建一个成分、组织及性能渐变的梯度复合材料。在激光成形过程中，粉末中 VN 的比例从 0wt.% 增加到 10wt.%，Cu 比例相应减小，另外通过添加 Ni 基体自熔合金粉提供浸润性。探究了 VN/(Cu, Ni)梯度材料的微观结构和组成变化，显微组织的形成过程，相组成和元素的相对浓度的映射。以及材料的物理及机械性能，随组元混合比的变化规律。讨论相组成和显微结构对性能的影响。研究表明，梯度材料主要由(Ni, Cu)、VN 相以及共晶化合物组成，其主要元素 Cu、Ni、V 沿构建方向呈梯度分布。其组织主要由生长方向不一的细长柱状晶以及部分等轴晶组成，在构建方向上柱状晶呈外延生长趋势。VN 主要分布在枝晶间，且易于聚集在界面处对微观结构产生影响。此外，VN/(Cu, Ni)梯度复合材料的显微硬度从 Cu 侧的 52.64 HV 逐渐增加至顶层的 285.18 HV，增幅近 4 倍。当 VN 含量达到 10wt.%时，梯度复合材料的导电率仍维持在 61.2% IACS。进行载流摩擦实验测试发现，高温摩擦时摩擦系数相较室温时明显减少，减摩效果良好。

关键词：激光增材制造；梯度复合材料；组织结构；力学及摩擦性能

#### **E01-106**

##### **精密铸造管座缩孔缺陷分析与解决**

寇涛，刘业光，杨志远，王兆松，康泰峰

中核北方核燃料元件有限公司

管座作为核电燃料组件的重要组成组分，其尺寸精度要求高、结构复杂。使用精密铸造工艺进行管座制备时，上管座内框位置易产生缩孔缺陷，导致铸件报废。本文采用理论分析、数值模拟结合工艺试验的方法，研究了精密铸造过程中管座缩孔等缺陷的产生原因及去除方案。研究表明：管座缩孔产生的主要原因是浇道与管座内框的冷却速率不一致，不能对管座内框进行有效补缩，导致管座内框产生缩孔缺陷；利用对管座模壳增加加热补贴和底部吹风的铸造优化方案可以有效地解决管座缩孔缺陷。

关键词：管座；精密铸造；数值模拟；缩孔；缺陷改善

#### **E01-107**

##### **2A70 铝合金挤压过程中动态再结晶的数值模拟及分析**

罗晶，刘雪峰

北京科技大学

挤压过程中动态再结晶的调控对于改善铝合金挤压制品的质量具有重要意义。本文以 2A70 铝合金为研究对象,在变形温度 613-733 K、应变速率 0.01-10 s<sup>-1</sup> 和变形量 70% 的条件下,采用 Gleeble-1500 对 2A70 铝合金进行等温压缩实验,研究其高温流变行为,建立流变应力模型和动态再结晶模型;在挤压温度 723K-653 K、挤压速率 0.9-1.5 mm/s 条件下,运用 DEFORM-3D 有限元软件对 2A70 铝合金棒材正向挤压过程进行模拟,揭示其动态再结晶演变情况,并探讨其机理。结果表明:2A70 铝合金的流变应力随变形温度的升高而降低,随应变速率的增加而提高,具有正的应变速率敏感性;采用双曲正弦型 Arrhenius 方程建立的 2A70 铝合金高温流变应力模型和采用 Johnson-Mehl-Avrami (JMA) 方程建立的 2A70 铝合金动态再结晶模型具有良好的精度;正向挤压过程中,2A70 铝合金在模具入口处最先发生动态再结晶,随后在模具死区处也发生动态再结晶;锥形模正向挤压过程中,模具死区处发生动态再结晶的部分随金属流出保留在挤压棒材的外表面,平面模正向挤压过程中,模具入口处发生动态再结晶的部分随金属流出保留在挤压棒材的外表面。2A70 铝合金正向挤压过程中模具死区处产生最大等效应变是发生动态再结晶的主要因素。研究结果有助于制定 2A70 铝合金棒材合理的正向挤压工艺参数。关键词:2A70 铝合金;正向挤压;动态再结晶;数值模拟;形成机理

#### E01-108

##### 电磁悬浮百克级金属的线圈结构设计与实验

蔡晓,王海鹏

西北工业大学

电磁悬浮无容器处理技术有无接触、加热效率高、悬浮力大等特点,现有电磁线圈悬浮金属质量约 0.5-4 g,被广泛用于凝固理论研究,其制备的新材料难以实现广泛的工业应用。大体积金属电磁悬浮熔炼技术可有效地开拓新材料的应用范围,而如何实现百克级金属的稳定悬浮成为亟待解决的首要问题。电磁悬浮线圈的几何构型与材料的悬浮特性有十分紧密的作用关系。典型的电磁线圈由上下反绕的线圈绕组构成,下端的悬浮组用于提供悬浮力,上端的稳定组用于提高悬浮稳定性。本文针对线圈匝数、各匝空间分布和激励电流等多种因素进行分析,对线圈结构进行优化,达到提升电磁悬浮线圈的悬浮性能的目的。基于柱坐标空间的时谐麦克斯韦方程组,建立了电磁悬浮线圈的有限元模型,系统地探讨了线圈的空间分布、匝数对线圈悬浮特性的作用关系。分析了不同金属体的电磁特性。结果表明,相比于单层圆柱 7 匝线圈,单层圆柱 10 匝线圈的悬浮力增加了 31%,而双层圆柱 10 匝线圈的悬浮力增加了 134%,说明双层电磁线圈具有更好的悬浮性能。结合数值模拟结果,实验采用圆铜管和方铜管绕制多种不同构型的单层及双层电磁悬浮线圈,成功实现了包括 Al、Ti 大体积金属及高达 807 g 金属 Cu 的电磁悬浮无容器处理。

关键词:电磁悬浮,大体积金属,悬浮力,优化设计

#### E01-109

##### 粉末冶金多孔高氮无镍奥氏体不锈钢的制备、组织及性能

胡玲<sup>1</sup>,李烈军<sup>1</sup>,倪东惠<sup>1</sup>,彭翰林<sup>2</sup>,陈松军<sup>1</sup>,张伟鹏<sup>1</sup>

1.华南理工大学

2.华中科技大学

本文采用粉末冶金的方法,制备出了多孔高氮无镍奥氏体不锈钢材料,并对其组织和性能进行了研究。三维 X 射线衍射仪测试结果表明,该多孔材料内部孔隙有较好的连通性,非常有利于液体的穿过和流通。研究表明,高温下气固渗氮促进了双相不锈钢向奥氏体不锈钢的转变,氮含量超过 3wt.%且可通过改变工艺参数调整 N 含量,显微组织中呈现细条状和颗粒状的析出物。X 射线衍射仪和透射电镜综合研究表明,两种形态的析出物都是 CrN 相,CrN 析出物和奥氏体基体的晶体学位向关系是 $[011]_{CrN} // [011]_{\gamma}$  和  $(-1-11)_{CrN} // (1-11)_{\gamma}$ ,与基体非共格。随着造孔剂含量增加,孔隙率逐渐增加,力学性能和抗压强度逐渐下降。造孔剂含量为 30 wt.% 时,所制备的多孔高氮无镍奥氏体不锈钢材料孔隙率约为 42%,弹性模量约为 40 GPa,抗压强度约为 360-380 MPa,断裂应变超过 15%。本文制备的多孔高氮无镍奥氏体不锈钢比普通的多孔不锈钢材料有更加优越的力学性能。这种优越的力学性能主要得益于 N 固溶强化和 CrN 等析出物的析出强化机制。

关键词:多孔;高氮无镍;氮化物;晶体学位向关系;力学性能

#### E01-110

##### 实现室温下快速制备取向薄带电工钢的新方法

周梦程,张新房

北京科技大学

电工钢是电力、电子和军事工业不可缺少的重要软磁合金，占磁性材料总量的 90%~95%，也是产量最大的金属功能性材料，其中取向电工钢因具备高的磁感和低的铁损，用于制作定向磁场下工作的变压器、大型配电系统中的铁芯。但是复杂的加工工艺、非常严格的控制要求等导致制造成本很高，国外的取向硅钢生产技术也都以专利形式加以保护，被视为企业的生命。因此，取向电工钢被称为钢铁材料的“工艺品”。之所以取向电工钢制造成本极高，在于其内部影响磁性能的 Goss 织构较难控制，并且随着钢板厚度的降低越发难以掌控，继而影响制成平板的磁性能。若能保证获取锋锐 Goss 织构的同时缩短取向薄带电工钢的制备工艺流程，则可以极大地降低生产成本，提高生产效率。众所周知，取向电工钢中 Goss 织构的锋锐程度（取向密度）直接反映宏观材料的磁性能。但是强 Goss 织构的获得不止是单纯的织构控制问题，而是如何控制晶粒组织、抑制剂、织构三者的协调发展。目前传统加工方法中退火处理是在特殊气氛或者一定真空度的高温炉下进行的，此退火方式对于 Goss 织构的控制技术繁琐复杂，且高温退火阶段所需温度高、时间长，耗能耗时，增加成本负担，不符合当前绿色生产加工的技术需求。提出借助“不同取向的晶粒组织、抑制剂的电学性能的差异性”实现诱导控制 Goss 织构的形成和定向长大，从而达到快速制备高磁感取向硅钢薄带的技术要求。研究发现：新技术制备下的取向硅钢薄带中 Goss 取向密度极大提升，且在室温环境下利用非常短的时间形成锋锐的 Goss 织构，并且可以利用该技术控制 Goss 织构的生长方向来进一步提高 Goss 织构的取向密度，从而在提高取向薄带电工钢的磁性能的同时也极大缩短制备工艺流程。通过系统研究电场与热场交互作用下的晶粒组织、抑制剂和织构的演变，构建电热场与晶界迁移的物理模型，从热力学与动力学角度揭示电流脉冲诱导 Goss 织构形成机理。该技术有望攻克硅钢领域内各种形式的技术壁垒，为电力系统的安全、可靠的运行提供技术保障。

#### E01-111

##### 基于放电等离子烧结脉冲电流作用的 Ti-Nb 扩散行为研究

刘钊，杨超

华南理工大学

放电等离子烧结是一种广泛应用的加工方法，可以为材料的烧结、焊接、致密化等提供力场、磁场、温度场、电场等。随着放电等离子烧结系统提供的脉冲电流的改变，上述外加场将会发生变化，将会对原子扩散和质量传输产生显著影响。目前只有少数文献对放电等离子系统提供外加电场对扩散偶反应扩散速率系数的影响进行定量的分析计算。在本实验中，通过放电等离子烧结系统施加电流，对 Ti-Nb 扩散偶在 900 °C、950 °C 和 1000 °C 的条件下进行等温热处理，Ti-Nb 扩散层厚度会随着热处理温度和保温时间增加而增厚。运用 Hall 公式可计算出 Nb 在  $\beta$ -Ti 中的互扩散系数，并且其会随 Nb 原子浓度的上升而增加。在本实验中，1000 °C 时 Nb 在  $\beta$ -Ti 中的杂质扩散系数为  $2.34 \times 10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ ，其比传统热处理方法超出了 0.5 倍。这表明脉冲电流对原子的扩散和物质的传输方面起着显著而重要的促进作用。

关键词：放电等离子烧结；互扩散；扩散系数

#### E01-112

##### 电流密度对电解铜箔组织与性能的影响研究

程曦<sup>1</sup>，李艳锋<sup>1</sup>，黄国杰<sup>1</sup>，尹向前<sup>1</sup>，李永贞<sup>2</sup>，姚恩东<sup>2</sup>，马秀玲<sup>2</sup>，解祥生<sup>2</sup>，祁善龙<sup>2</sup>，李梓铭<sup>2</sup>

1.有研工程技术研究院有限公司

2.青海电子材料产业发展有限公司

在控制相关电解工艺参数恒定条件下，在不同电流密度下，通过调整电沉积的时间制备了 12  $\mu\text{m}$  厚的电解铜箔。利用 SEM、XRD、EBSD、万能试验机等研究了不同电流密度下电解铜箔的表面形貌、力学性能及织构，分析了铜箔在不同电流密度下的断裂机制。研究结果表明，随着电流密度的增大，铜箔表面颗粒增大且变得尖锐，晶面主要取向为 {220} 面，且择优度呈现先增加后减小再增加的规律。铜箔的 {220} 晶面的高择优会降低铜箔的抗拉强度及延伸率。电流密度在 8-14  $\text{A}/\text{dm}^2$  时，随着电流密度的增加，{220} 面择优程度升高，铜箔抗拉强度及延伸率降低；电流密度在 14-26  $\text{A}/\text{dm}^2$  时，随着电流密度的增加，{220} 面择优程度降低，铜箔抗拉强度及延伸率升高；电流密度进一步增加，在 26-30  $\text{A}/\text{dm}^2$  时，随着电流密度的增加，{220} 面择优程度升高，铜箔抗拉强度及延伸率降低。

关键词：电解铜箔；电流密度；织构；力学性能

#### E01-113

##### 脉冲电流辅助铝合金 PLC 效应的消除

徐慧，张新房

北京科技大学

采用轻量化材料作为减轻汽车自重的方法,已经成为当前汽车工业发展的主要方向。而在多种轻量化材料中,铝合金凭借其密度小、比强度和比刚度高、弹性好、抗冲击性能好,易表面着色,良好的加工成形性以及极高的再回收、再利用等一系列优良特征,成为汽车轻量化材料的最佳选择。5182 铝合金是目前最常用作汽车车身板的合金之一,但其在冲压变形过程中试件表面会形成吕德斯带,并产生锯齿形屈服效应(Portevin Le-Chatelier effect,以下简称 PLC 效应),严重影响成品的表面质量及外观,限制了它在汽车上的进一步应用。PLC 效应在时域上表现为锯齿形的应力应变曲线,空域上则表现为 PLC 变形带的形成和传播。关于 PLC 效应出现的原因,通常大家认可的解释是动态应变时效(DSA)理论,即溶质原子与可动位错间反复的钉扎和脱扎。对于可时效析出强化的铝合金如 2xxx 系、7xxx 系等合金可通过固溶时效析出降低合金的 PLC 效应,但 5xxx 系铝合金是不可时效析出强化的。因此目前针对 5xxx 系铝合金,一般通过增大变形时的应变速率或提高变形温度来降低 PLC 效应。但是这种方法需要较高的温度,会提高生产成本,造成能源的浪费,不利于工业生产。脉冲电流作为一种瞬时高能的特殊处理手段,它可在试样拉伸变形过程中降低铝合金内可动位错密度,从而减少可动位错与溶质原子的交互作用,达到降低 PLC 效应的目的。研究发现,经脉冲电流处理后,5182 铝合金的 PLC 效应完全消失,材料塑性得到提高,试样表面质量得以改善。通过分析材料的微观结构和断口形貌,研究了脉冲电流对位错密度的影响以及电塑性效应的存在。结合电塑性效应和动态应变时效(DSA)理论,探讨了可能存在的机理。脉冲电流的引入是一种简单易行的绿色手段,更符合当前绿色生产的技术需求。

#### E01-114

##### 选区激光熔化 TA15 钛合金的显微组织演化与动态力学性能研究

陈荣<sup>1</sup>, 谭成文<sup>1</sup>, 高正江<sup>2</sup>

- 1.北京理工大学
- 2.中航迈特粉冶科技(北京)有限公司

选区激光熔化技术可直接成型各种复杂结构的钛合金构件,其在飞机、装甲等高速冲击领域具有广泛的应用前景。与传统静态加载环境不同,此类构件主要承受冲击加载,故其材料更为关注在高应变率加载条件下的动态力学性能。本文通过组织分析技术结合分离式 Hopkinson 压杆实验技术,研究了不同热处理条件下选区激光熔化 TA15 钛合金的组织演化过程,及不同显微组织对应的动态力学性能。研究发现:经 800 °C 以上退火后,合金组织中马氏体相逐渐转变为  $\alpha+\beta$  相。当退火温度高于 900 °C 时, $\alpha$  相尺寸随着温度的升高迅速增加,其长宽比也逐渐降低。同时,合金经过双级热处理后,晶界出现等轴的  $\alpha$  相。合金经 930 °C/1 h/FC 退火处理后,其沿沉积方向的平均流变强度 1566 MPa,均匀塑性应变为 0.29,冲击吸收能为 449 J/cm<sup>3</sup>(加载应变率 3400±100 s<sup>-1</sup>);沿垂直沉积方向的平均流变强度 1609 MPa,均匀塑性应变为 0.22,冲击吸收能为 359 J/cm<sup>3</sup>(加载应变率 2800±100 s<sup>-1</sup>)。选区激光熔化 TA15 钛合金动态力学性能呈明显各向异性,且与锻造 TA15 合金棒材相当。关键词:激光选区熔化;钛合金;显微组织;动态力学性能

#### E01-115

##### 铪对铜性能和组织的影响

张乐清  
江西理工大学

采用真空熔炼铸造制备了 Cu-0.15Hf、Cu-0.4Hf 和 Cu-0.9Hf 合金铸锭,随后通过热轧-固溶-冷轧-时效的工艺对合金进行形变热处理,测试了各工艺条件下的力学和导电性能。利用金相显微镜、扫描电子显微镜、透射电子显微镜研究了 Cu-Hf 合金在各工艺阶段的组织演变以及时效析出相的形貌和结构。结果显示:Cu-0.15Hf、Cu-0.4Hf 和 Cu-0.9Hf 合金耐热温度均大于 450 °C,Cu-0.9Hf 合金导电率可达 80%IACS、硬度达 HV180 以上;对 Cu-0.9Hf 合金铸态、固溶态、时效态样品进行 SEM 观察,发现通过合适的形变热处理工艺后,Hf 在铜中的偏聚情况大为改善,时效后变得弥散;同时对 Cu-0.9Hf 合金时效后的样品进行 TEM 观察,在 Cu-0.9Hf 合金中发现了大小约为 20 nm 的细小短棒状并且弥散分布的析出相,经过标定为面心立方 Hf。

#### 墙展

#### E01-P01

##### 高性能绿色热熔胶膜的制备及产业化开发

孙春荣  
中国科学院长春应用化学研究所

热熔胶膜是汽车顶棚总成的主要粘接材料，为了增加热熔胶膜的粘接性能，常在材料的配方设计中加入乙烯-醋酸乙烯酯共聚物（EVA），由于 EVA 原材料制备过程中有少量残留有机挥发物（VOC），导致制备的热熔胶膜性能下降，有机挥发物含量超标。本文以氯化聚乙烯、淀粉做为粘接改性剂，通过在反应加工中将淀粉与聚乙烯母料接枝，提高了与顶棚织物的粘接性，改善了顶棚总成的加工工艺行为和产品的稳定性，最终成功制备了力学性能优异，无 VOC 的新型热熔胶膜产品，为开发新一代乘用车顶棚总成技术奠定了基础。

## E01-P02

### 柴油机用高压油管研究进展

苏航标<sup>1</sup>，杨英丽<sup>1</sup>，郭荻子<sup>1</sup>，王晓<sup>1</sup>，徐建平<sup>1,2</sup>

1.西北有色金属研究院

2.太原理工大学新材料工程技术研究中心

随着柴油机高压燃油喷射技术的发展以及不断严格的环境法规要求，柴油机喷射压力不断提高，使高压油管的承压能力也相应提高。目前国内生产的高压油管耐压仅能达到 90 MPa，90-160 MPa 以下高压油管基本采用进口油管，160 MPa 以上高压油管没有进口材料可选。近几年来，德国和日本等国相继开发了适用于各强度等级的高压油管材料，并研发出提升燃油管耐压性能的相关工艺，我国在开发高压油管材料和提升高压油管耐疲劳性能方面也有了明显的进步，本文主要介绍了国内外高压油管在材料和加工以及后期处理的现状。

关键词：高压油管；柴油机；内壁强化；疲劳；高强度

## E01-P03

### 钛合金管材压扁过程的应力应变和组织变化

陈军，杨海瑛，王廷询，周伟，辛社伟，李倩，张思远

西北有色金属研究院

本论文对 TA24 钛合金  $\phi 638 \times 19$  mm 进行连续加载压扁试验，压扁变形过程的内外管壁的受力状态进行了分析。结果表明：TA24 钛合金管具有良好的压扁性能，均可满足国标压扁间距要求。压扁过程经历了压扁前期、压扁扁圆阶段、压扁直壁阶段、压扁内凹陷阶段、压扁内凹陷区接触阶段。压扁过程中，管样上下壁部分外层受压应力，内层材料受拉应力，拉、压合力作用导致上下壁直线部分产生凹陷，左右圆弧部分材料外层受拉应力、内层受压应力，也由于拉压合力作用出现圆弧半径减小，即产生扁化。由于管样受力不均匀性和压扁失稳过程中的最小能量路径取向起作用，过渡区金属不断向中间凹陷处聚集，加剧上、下壁的凹陷变形，直至上下壁接触上，管材两侧圆弧处应变增大而可变形体积减小，所以左右壁圆弧外表面开裂率增大。压扁过程中管材组织发生明显变化，为拉长变形组织，其中，变形最剧烈的部位为管材顺时针 3 点和 9 点方向，次之是 6 点和 12 点方向。

关键词：钛合金；压扁；压扁间距；扁圆；内凹陷；压扁变形组织

## E01-P04

### Ti-xV 二元钛合金动态压缩力学性能研究

刘睿，王翘楚，惠松骁，叶文君

有研工程技术研究院有限公司

本文研究了 Ti-V 二元钛合金动态压缩力学性能。熔炼了名义成为 Ti-2V、Ti-4V、Ti-8V、Ti-16V、Ti-32V 的五种 Ti-V 系二元合金分别作为  $\alpha$ 、 $(\alpha+\beta)$ 、 $\beta$  三种类型钛合金的代表，采用分离式霍普金森压杆试验装置，在  $3000 \pm 200 \text{ s}^{-1}$  应变率条件下对上述合金进行动态压缩，结果表明，除 Ti-16V 合金之外的其他四个成分合金未发生破坏，表现出良好的动态塑性；除 Ti-32V 合金之外的其他四个成分合金表现出明显的应变强化现象，Ti-32V 合金应变强化与热软化效应达到动态平衡；Ti-16V 合金具有相对最高的动态强度，Ti-8V 合金应变强化之后强度水平可超过 Ti-32V 合金。

关键词：Ti-V 钛合金；动态力学性能；显微组织

## E01-P05

### 超声冲击处理对 TA15/BTi-6431S 钛合金焊接接头残余应力的影响

宋晓云，钱广禄，赵铭钰，刁雨薇，叶文君，惠松骁

有研工程技术研究院有限公司

钛合金具有较高的比强度、良好的室温高温力学性能、优异的耐蚀性，广泛应用于航空航天领域。在航空航天应用中，同一构件的不同部位经常有不同的性能要求，因此需要异种钛合金焊接构件以满足应用要求。焊接构件在焊接过程中不均匀的温度场会产生残余应力，造成焊接构件的变形程度大、尺寸精度低、疲劳强度低等危害，降低焊接构件的使用寿命。超声冲击处理是一种有效的消除残余应力的方法。本文以 TA15/BTi-6431S 异种钛合金氩弧焊焊接接头为研究对象，研究不同的超声冲击处理工艺参数，如冲击次数、冲击头材质、冲击头形状、冲击工作电流等，对焊接接头残余应力分布的影响。结果表明，超声冲击处理可以降低残余应力，且将残余拉应力转变为压应力。冲击次数、冲击工作电流、冲击头材质、冲击头形状都会影响焊接接头处残余应力的分布。随着冲击次数和冲击工作电流的增加，残余应力降低的幅度增大；与被冲击材料力学性能相近，能与焊缝的表面形成点-点接触的冲击头，降低残余应力的效果更好。

关键词：钛合金；焊接；残余应力；超声冲击

#### E01-P06

##### TC18 钛合金双重退火工艺研究

王清瑞，沙爱学，李兴无，黄利军，王庆如

中国航发北京航空材料研究院

本文系统地研究了 TC18 钛合金双重退火工艺，对不同退火工艺进行组织性能对比分析。结果表明：一级退火采用空冷工艺，获得  $\beta$  晶界连续、平直的组织，合金性能水平较低；采用炉冷工艺，一级退火温度对组织和性能影响较大，其中  $b$  晶界  $a$  相呈断续、曲折形态的微观组织可获得优异的综合性能。在此基础上开发了一种综合性能优异的双重退火制度。采用该制度解决了大型锻件  $\beta$  锻造变形量小塑性低的难题。

关键词：TC18 钛合金；双重退火；塑性；组织

#### E01-P07

##### 耐蚀钛合金在高温高压强腐蚀环境下的腐蚀性能研究

陈军，辛社伟，周伟，李倩

西北有色金属研究院

从地壳中开采天然气、地热等能源时，开采用材料会受到高温高压强腐蚀氯化物腐蚀，氯化物含有或不含有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  酸性气体，对材料产生严重的腐蚀。钛合金高比强度、耐蚀性，成为油井管的优选材料。Ti-6Al-4V-0.1Ru 合金是在 Ti-6Al-4V-ELI 合金基础上通过添加 0.1% 的 Ru 元素，Ru 元素的添加提高了在盐溶液及海水的条件下抗缝隙腐蚀性能和应力腐蚀断裂温度门槛值。Ti-6Al-4V-0.1Ru 合金经真空自耗熔炼，锻造成棒材，从棒材上截取拉伸试样和应力腐蚀断裂韧性试样，测试拉伸性能采用 WOL 试样在含有  $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、3.5%NaCl 溶液高温高压釜中测试应力腐蚀断裂韧性。试验结果表明：Ti-6Al-4V-0.1Ru 钛合金力学性能与 Ti-6Al-4V-ELI 合金相当，拉伸强度大于 860 MPa，延伸率大于 13%，Ti-6Al-4V-0.1Ru 在开口度为 0.63 mm、0.85 mm、1.14 mm、1.37 mm、1.55 mm、1.65 mm 的开口度、200 °C 的 4.8 MPa $\text{CO}_2$ 、4.8 MPa  $\text{H}_2\text{S}$ 、3.5%NaCl 溶液高温高压釜中，前五种开口度的试样保持完整，没有裂纹，1.65 mm 的开口度的试样发生开裂， $K_{\text{ISSC}}$  为 77.35 MPa $\sqrt{\text{m}}$ 。

关键词：Ti-6Al-4V-0.1Ru；钛合金；应力腐蚀断裂韧性； $\text{CO}_2$ ； $\text{H}_2\text{S}$ ；氯化物

#### E01-P08

##### 钛板制备工艺对表面质量及组织的影响

张泽宇，余伟

北京科技大学

国内冷轧钛板的表面缺陷较多，与国外的表面质量有明显差距，本文主要研究日本进口钛板 GR1、GR2 与国内钛板 TA1 的组织及其性能差异，分析表面缺陷产生原因，解决 TA1 冷轧板材的表面问题。通过室温拉伸试验得到三种不同材料的力学性能，测试了它们的表面粗糙度，使用 SEM、EDS 及 XRD 表征 TA1、GR1 和 GR2 的微观组织形态及成分。试验表明，GR1 及 GR2 的表面较为光亮，无明显色差，TA1 表面色差较大，TA1 的力学性能最优，轧向抗拉强度和屈服强度分别为 325.19 MPa 和 271.17 MPa，横向分别为 329.19 MPa 和 303.15 MPa，GR1 及 GR2 的粗糙度略低于 TA1，TA1 表面的黑色区域微观组织疏松，氧含量较高，利用 XRD 得到了 GR1、GR2 以及 TA1 的极图与 ODF 图。

关键词：冷轧纯钛；色差；力学性能；粗糙度；SEM；织构

#### E01-P09

##### 热处理对变质含铝高硼高速钢显微组织和性能的影响

张亚光, 符寒光, 林健, 雷永平  
北京工业大学

含铝高硼高速钢的显微组织中含有大量的硼碳化物, 使其具有高硬度、优越的耐磨性和热稳定性。但是, 在铸态组织中, 硼碳化物尺寸较为粗大, 沿晶界呈连续网状分布, 严重降低了材料的强韧性。本文通过增加含铝高硼高速钢的凝固冷却速率, 且加入 RE-Mg-Ca 复合变质剂, 并进行淬火和回火热处理, 对其显微组织进行调控。利用光学显微镜 (OM)、扫描电镜 (SEM)、能谱分析 (EDS)、X 射线衍射 (XRD)、电子探针 (EPMA)、硬度计、环块磨损试验机, 对含铝高硼高速钢显微组织和性能进行了分析。结果表明, 未变质和变质后的含铝高硼高速钢的铸态组织均主要由铁素体、珠光体、少量马氏体和硼碳化物组成, 硼碳化物主要是  $M_2(B, C)$  和  $M_7(C, B)_3$ 。加入 RE-Mg-Ca 复合变质剂后, 铸态组织中的硼碳化物网出现了颈缩和断网现象。经过高温热处理后, 变质含铝高硼高速钢显微组织中的硼碳化物出现了明显的断网和团球化趋势, 且硼碳化物的分布较为均匀。其基体为马氏体组织, 硼碳化物由  $M_2(B, C)$ 、 $M_7(C, B)_3$  组成。热处理后含铝高硼高速钢的硬度和耐磨性明显提高。

关键词: 含铝高硼高速钢; 变质处理; 热处理; 显微组织; 硬度; 耐磨性

#### E01-P10

##### 红外退火温度对氧化铟锡 (ITO) 薄膜光电性能影响规律初探

李佳明, 姜良宝, 陈牧, 韦友秀, 马一博, 颜悦

中国航发北京航空材料研究院

透明导电氧化物薄膜现已在液晶显示器、太阳能电池、气体传感器、幕墙电致变色玻璃、飞机和高速列车导热玻璃 (防冰除雾) 等领域得到广泛应用。目前制备高透光性、高导电性的晶态氧化铟锡 (ITO) 透明导电氧化物薄膜主要采用两种途径: 一是原位衬底加热法直接沉积结晶态薄膜; 二是室温下沉积非晶薄膜后, 再进行晶化热处理。前者要求长时间加热具备耐高温条件的衬底, 对于不能长时间加热的基底材料, 研究快速热处理技术意义重大。本文首先利用磁控溅射技术在化学强化玻璃上制备了三类非晶态 ITO 薄膜 (氩氧比例分别为 30: 1、30: 2、30: 3), 然后采用红外快速退火技术进行了热处理, 退火温度范围为 400-530 °C, 热处理时间为 2 min。实验结果表明, 三类薄膜的表面方阻随退火温度变化规律不同。氩氧比例为 30: 1 的 ITO 薄膜, 随着退火温度从 400 °C 增加至 530 °C, 薄膜表面方阻下降率由 19% 增加至 61%。氩氧比例为 30: 2 的 ITO 薄膜, 在退火温度低于 460 °C 时, 退火后薄膜表面方阻较退火前低。退火温度超过 460 °C 时, 薄膜表面方阻较退火前高且随着温度的增加而增加。在 530 °C 退火时, 氩氧比例为 30: 2、30: 3 的薄膜表面方阻均增加。经过红外快速退火的 ITO 薄膜, 在可见光范围内透过率增加, 与传统加热炉退火效果接近。相比于传统加热炉退火, 在 ITO 薄膜性能接近的情况下, 红外快速退火技术具有以下优势: (1) 效率高, 热处理时间短, 仅为传统加热炉处理时间的 5%-10%; (2) 热处理后化学强化玻璃表面应力下降率小于 3%, 仅为传统加热炉退火的 10%-20%。结果对于优化退火工艺、改善薄膜光电性能以及化学强化玻璃力学性能具有重要的指导意义。

关键词: 透明导电氧化物薄膜; ITO; 红外快速退火

#### E01-P11

##### 淬火温度对 Fe-Cr-B 合金显微组织和性能的影响

田野, 符寒光, 雷永平, 林健, 郭星晔

北京工业大学

利用光学显微镜 (OM), 扫描电镜 (SEM/EDS), XRD 和硬度计等手段, 研究了含 1.0%B、4.0%Cr 和 0.35%C 的 Fe-Cr-B 合金的铸态组织, 以及淬火温度对其显微组织和耐磨性能的影响。结果表明, Fe-Cr-B 合金的凝固组织主要由马氏体、共晶硼化物和二次碳硼化物组成。经过 950-1150 °C 水冷淬火后, 基体和共晶硼化物的类型无变化。共晶硼化物沿晶界析出, 枝晶间连续分布的  $M_2(B, C)$  ( $M=Fe, Cr$ ) 出现断网。随淬火温度的提高: 断网现象愈加明显, 在 1100 °C 淬火时网状硼化物基本断裂, 并成孤立分布; 合金硬度先增加后减小, 在 1100 °C 淬火时, 硬度最高, 达到 62.8 HRC; 其耐磨性与硬度的变化趋势相同。

#### E01-P12

##### 多步骤热处理对低温结构钢显微组织和力学性能的调控

刘庆冬<sup>1,2</sup>, 侯伟<sup>1</sup>, 刘文庆<sup>3</sup>, 顾剑锋<sup>1,2</sup>

1. 上海交通大学材料改性与数值模拟研究所

2. 上海交通大学高新船舶与深海开发装备协同创新中心



### 3.上海大学材料研究所

以 BA160 合金和一种自行设计的低碳 Ni-Cu-Al-Mn 高性能低温合金为对象,通过常规淬火+时效和高温临界回火或多步骤热处理工艺,利用光学显微镜,扫描电子显微镜/电子背散射衍射、透射电子显微镜和原子探针层析技术,研究了富 Cu 析出、M<sub>2</sub>C 型碳化物和 NiAl 相在硬度峰值时的复合强化机制和逆转变奥氏体/二次马氏体在高温临界区(多步骤/循环)回火时的韧化机制。结果表明,在总合金含量(即材料成本)不变的前提下,用部分 Mn 代替 Ni(稳定奥氏体)并添加少量 Al(用 NiAl 相代替富 Cu 析出强化)的新合金具有非常优越的强度和抗回火软化的能力,但其在强化峰值也具有更低的塑性和低温韧性( $E_v \sim 72\text{J}$  vs  $\sim 7\text{J}$ )。临界区低温 675 °C 回火时,两种合金具有非常接近的强度和低温韧性,而随后在 500 °C 再次回火时,BA160 合金的低温韧性基本不变( $E_v \sim 166\text{J}$ ),而新合金的韧性却降低至最大强化时的水平( $E_v \sim 8\text{J}$ )。原子探针分析表明,新合金中的具有极低长大速率且弥散分布的纳米析出(富 Cu 析出和 NiAl 相的复合析出)是高强度和低韧性的主要原因。通过多步骤临界回火处理,新合金的低温韧性得到大幅度改善。逆转变奥氏体或其冷却分解产物(二次马氏体)细化了板条马氏体的有效晶粒尺寸,产生了一种回火马氏体/铁素体-逆转变奥氏体/二次马氏体的双相组织,成为其韧性提高的主要原因。而在多次循环临界回火过程中,溶质富集的二次马氏体/逆转变奥氏体和溶质贫化的(多次)回火马氏体(基体),改变了后续奥氏体逆转变动力学,这为进一步通过调控逆转变奥氏体的分布形态来改善低温韧性提供了理论依据。

#### E01-P13

##### DP600/A5052/DP600 三层板电阻点焊研究

李婷,袁新建,武康龙,汪浩东

重庆大学

铝合金与高强钢在轻量化汽车上有比较广泛的应用,电阻点焊是目前进行车身连接的主要方法。铝合金与高强钢在物理化学性能、组成成分及机械性能上存在较大的差异,两种材料的焊接性较差,因此研究 DP600/A5052/DP600 电阻点焊具有重要意义。在电阻点焊试验中,焊接时间和焊接电流都是通过控制热输出来影响三层板的组织与力学性能,因此,本文主要研究的是焊接时间对三层板组织及力学性能的影响,时间参数选择为 8 cycles, 14 cycles 和 17 cycles。随着焊接时间的延长,铝和钢侧的熔核直径都会随之增加。当焊接时间为 8 cycles,由于热输入不足,缩孔主要集中在铝合金中部。当焊接时间延长时,缩孔集中在电极压力无法束缚电极截面以外的区域。但在焊接时间为 17 cycles,在铝合金厚度缩小最大处存在大的缩孔。DP600 和 A5052 之间的界面区由舌状的 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> 和细针状的 Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> 金属间化合物(IMC)层组成。当焊接时间从 8 cycles 延长到 17 cycles 时,靠近 A5052 的 Fe<sub>4</sub>Al<sub>13</sub> 的平均长度从 2.3 μm 缩短到 0.89 μm,而在 DP 600 附近的 Fe<sub>2</sub>Al<sub>5</sub> IMC 层的厚度从 1.59 μm 扩展到 2.59 μm。在拉剪实验中,随着焊接时间的延长,拉剪力先升高后降低。在时间为 14 cycles,拉剪力达到最大,为 10.796 KN,大约是 A5052/DP600 两层板最大拉剪力的两倍。在焊接时间为 14 cycles 时,利用金相、扫描和透射显微镜对它们的组织特征进行了分析。对于铝合金,熔核区的晶粒从中心部位到边缘逐渐减小;对于双相钢,母材主要是铁素体和奥氏体,熔核区主要是板条马氏体,热影响区主要是马氏体和铁素体所组成,但从熔核区边缘到母材边缘,马氏体的含量逐渐降低,晶粒尺寸逐渐减小。组织的变化与硬度变化相同。铝合金中心部位的硬度最低,母材的硬度最高;两侧双相钢的硬度变化趋势大致相同,即中心部位的硬度最高,母材的硬度最低。

关键词:电阻点焊;铝合金;双相高强钢;组织;力学性能

#### E01-P14

##### 脉冲光纤激光焊接 5A06 铝合金接头组织及性能研究

马晓丽,雷永平,符寒光,林健,郭星晔

北京工业大学

利用 6 KW 光纤激光器对 5A06 铝合金薄板进行搭接非熔透焊接。借助光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、显微硬度计、万能试验机,研究对比了光纤激光的连续输出和脉冲调制输出焊接方式对焊缝宏观形貌、组织形态、显微硬度、拉伸性能以及气孔率的影响规律。结果表明:随着占空比的降低,焊缝表面飞溅逐渐增多。熔合线附近柱状晶区宽度有所减小,焊缝中心仍为细小的等轴晶。焊缝显微硬度逐渐减小,抗拉强度逐渐增加。脉冲与连续激光焊接铝合金的主要差异在于焊缝内部气孔数量、大小以及分布位置的不同。随着占空比的降低,气孔率先增加后减小。当占空比为 50%,焊接速度为 1.5 mm/s 时,气孔率最低,为 0.7%。

关键词:光纤激光;连续;脉冲;组织性能;气孔率

## E01-P15

### Ni-rGO 超疏水复合镀层的制备及性能研究

冉超凡, 王炳英, 刘国栋, 马伊

中国石油大学(华东)

在以氯化镍作主盐的镍镀液中加入氧化石墨烯, 通过电沉积方法在 N80 钢基体上制备了 Ni-rGO 复合镀层, 使用十四酸进行表面改性后镀层具备超疏水性。使用拉曼光谱和傅里叶红外光谱对复合镀层进行表征。通过改变电流密度、搅拌方式和镀液温度制备复合镀层, 使用扫描电子显微镜观察其表面形貌, 并对所制备的镀层进行接触角测试、显微硬度测试以及交流阻抗和动电位极化测试以研究其耐蚀性能; 对超疏水复合镀层进行高温高压下的挂片腐蚀试验, 观察试验之后的镀层微观形貌, 并对其接触角测试等性能测试。通过工艺优化, 镀液中氧化石墨烯浓度为 0.6 g/L 时, 进行电流密度分别为  $7 \text{ A/dm}^2$  和  $15 \text{ A/dm}^2$  的两步电沉积, 镀液温度为  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , 所制备的镀层具有微米级针锥结构的表面形貌, 接触角最高为  $162.87^\circ$ ; 氧化石墨烯在阴极处还原成石墨烯, 显著提高了超疏水表面的显微硬度和耐腐蚀性能; 超疏水复合镀层在高温高压腐蚀试验后仍然具有超疏水性质, 认为其具有较好的耐久性。

关键词: 电沉积; 超疏水; 石墨烯; 复合镀层

## E01-P16

### 激光熔覆原位生成 NbC 增强 Ni60A 合金涂层组织和性能的研究

平学龙, 符寒光, 孙淑婷, 林健, 雷永平

北京工业大学

使用 Ni60A 粉末、纯 Nb 粉和纯  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  粉末, 采用激光熔覆的方法原位生成 NbC 颗粒增强 Ni60A 合金涂层。使用扫描电镜 (SEM), 电子探针 (EPMA), X 射线衍射 (XRD), 显微硬度计和磨损试验机, 研究了原位生成 NbC 对 Ni60A 合金涂层显微组织、物相组成、显微硬度和耐磨性能的影响。研究发现, 涂层与基体呈现良好的冶金结合, 无裂纹气孔等缺陷。Ni60A 合金涂层中存在的物相主要包括:  $\gamma\text{-Ni}$ ,  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ ,  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ ,  $\text{Ni}_3\text{B}$ ,  $\text{Ni}_3\text{Si}_2$ ,  $\text{CrB}$ , 而在 NbC/Ni60A 涂层中出现了  $2\text{-}4 \mu\text{m}$  的块状 NbC 和  $6\text{-}8 \mu\text{m}$  的花瓣状的 NbC。NbC/Ni60A 涂层的显微硬度达到了  $855 \text{ HV}_{0.2}$ , 较 Ni60A 涂层提高了 42%, 耐磨性能也有了很大的提高, 较 Ni60A 涂层提高了约 66%。研究结果为冶金轧辊的修复提供指导。

关键词: 激光熔覆; 原位生成; NbC/Ni60A 涂层; 显微组织; 硬度; 耐磨性

## E01-P17

### Ni20Cr 合金塑性变形过程中的微结构及内应变演变

周秀文, 刘旭东, 杨毅, 刘念

中国工程物理研究院激光聚变研究中心

微米尺度 Ni20Cr (Ni20Cr80 wt.%) 丝的极限成形涉及金属的塑性变形-再结晶-塑性变形的多次循环过程, 塑性变形过程中的组织演变和内应变直接影响其再结晶行为及塑性性能恢复。本文采用冷拉拔法进行塑性变形, 通过一道次和一个模具实现异常大变形, 工程应变量约 46.6%。采用 XRD 和 EBSD 方法进行了样品横截面和纵截面的微结构分析, 采用 Williamson-Hall 方法得到相应的内应变。研究表明, 样品横截面的 [001] 和 [111] 取向晶粒转向其横截面方向, 形成了强的 [001] 和 [111] 织构, 存在先孪生变形后位错滑移的塑性变形机制; 内应变从 0.46% 逐渐增加到 0.781% 达到饱和, 得到单道次的最大工程应变为 46.6%, 抗拉强度从 960 MPa 增加到 1180 MPa。

关键词: 塑性变形; 微结构演变; 内应变; Ni20Cr; 冷拉拔

## E01-P18

### Al 对热挤压态低锡 CuNiSn 合金组织和力学性能的影响

罗保民, 赵超, 李道喜, 罗宗强, 张卫文

华南理工大学

铜镍锡合金是一种新型弹性合金, 具有强度高、导电性好、耐磨耐蚀性能优良、便于机加工以及良好的热稳定性等优点, 因而广泛应用于继电器、导电接触簧片、电位器以及精密仪表传感器的敏感弹性元件等器件中。但高 Sn 含量的 Cu-Ni-Sn 合金在凝固过程中, 容易引起 Sn 元素的偏析, 导致热裂开裂。为解决这一问题, 除采用昂贵的制造方法外, 最直接有效的方案是降低 Sn 的含量。本研究采用光学显微镜、扫描电镜、透射电镜和力学性能测试等方法研究了 Al 对热挤压态低锡 CuNiSn

合金微观组织和力学性能的影响。结果表明：随着 Al 含量由 0wt.% 增加至 1.5wt.%、3wt.% 时，抗拉强度由 425 MPa 提升至 952 MPa、1037 MPa。合金晶粒由 55  $\mu\text{m}$  减小至 33  $\mu\text{m}$ 、26  $\mu\text{m}$ 。发现强度随 Al 的添加显著增加的原因是在含 Al 合金中发现了大量弥散分布的纳米级析出相，该析出相为与基体共格的  $\gamma'$ -Ni<sub>3</sub>Al 相，且与基体存在如下位相关系： $[100]_{\gamma'}/[200]_{\text{Cu}}$ 、 $[010]_{\gamma'}/[020]_{\text{Cu}}$ 、 $[001]_{\gamma'}/[001]_{\text{Cu}}$ ，同时 Al 元素的加入会导致合金的晶粒细化，这是合金得到强化的另外一个原因。本工作发现在低锡 CuNiSn 合金中加入 Al 元素，可以弥补低 Sn 含量引起的强化损失，从而获得高强度低 Sn 含量的铜镍锡合金。

关键词：高强度；低锡铜镍锡合金；热挤压；微量元素

#### E01-P19

##### QCr0.8 合金的热变形行为及动态再结晶临界条件

杨书瑜<sup>1</sup>，王强松<sup>1</sup>，解国良<sup>2</sup>，刘芳<sup>1</sup>，张嘉凝<sup>1</sup>

1. 有研科研集团有限公司
2. 北京科技大学

采用 Gleeble-1500D 热模拟试验机，对热锻态的 QCr0.8 合金进行高温等温热压缩实验，研究该合金在 750-900 °C，应变速率为 0.01-10 s<sup>-1</sup>，总压缩应变量 50% 条件下的流变应力、本构方程和动态再结晶临界条件。结果表明，热变形温度和应变速率对合金的高温变形行为影响显著，温度越高，应变速率越小，合金越容易发生动态再结晶；合金的峰值应力随着热变形温度的增加而减小，随应变速率的增加而增加。热变形过程中的流变应力可用双曲正弦函数关系式描述，合金的高温热压缩变形激活能 Q 为 370.8 KJ/mol，建立了合金的流变应力本构方程；通过合金的  $\ln\theta$ - $\epsilon$  曲线的拐点特征以及对应的  $-\partial(\ln\theta)/\partial\epsilon$  曲线出现的最小值来研究其动态再结晶临界应变  $\epsilon_c$ 。

关键词：QCr0.8 合金；热压缩变形；本构方程；动态再结晶临界应变

#### E01-P20

##### 双相不锈钢的摩擦磨损性能

董强，覃明

日立（中国）研究开发有限公司上海分公司

本研究探讨了在多种条件下双相不锈钢的摩擦磨损性能。特别是在不同的表面涂层及液体环境下，对所测试双相不锈钢材料的摩擦磨损过程进行了观察。实验结果表明，随着表面涂层硬度的增大，材料的磨损将降低。同时，涂层的孔隙率也对材料的摩擦磨损性能有明显的影响。除此以外，对比材料在不同液体环境下的实验结果，在盐水中，缝隙的存在会显著得材料的摩擦磨损性能。在对实验结果进行总结分析的基础上，对提高双相不锈钢的摩擦磨损性能提出了可行性建议。

#### E01-P21

##### Fe<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>C<sub>z</sub> 金属间化合物稳定性、电子结构、力学性能及热力学性能的第一性原理研究

鞠江<sup>1</sup>，康茂东<sup>1</sup>，王滕滕<sup>1</sup>，刘雅辉<sup>1</sup>，李敏<sup>1</sup>，吴赞<sup>1</sup>，孙淑婷<sup>2</sup>，王俊<sup>1</sup>，符寒光<sup>2</sup>

1. 上海交通大学
2. 北京工业大学

借助第一性原理的方法研究了 Fe-Cr-B-Al 合金中 Fe<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>C<sub>z</sub> 金属间化合物的稳定性，电子结构，力学性能以及热稳定性。研究表明 Fe<sub>3</sub>AlC 金属间化合物属于热力学稳定结构。Fe<sub>3</sub>AlC 金属间化合物的形成焓最低，所以其可能是最稳定的化合物。分别用应力-应变和 Vigt-Reuss-Hill 近似对其弹性常数，C<sub>ij</sub>，模量(B, G, E)进行了研究，所有的 Fe<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>C<sub>z</sub> 金属间化合物表现出了不同的各向异性，Fe<sub>3</sub>AlC 金属间化合物具有最高的剪切模量(141.2 GPa)、体积模量(212.6 GPa)和杨氏模量(346.8 GPa)。而且具有最大的刚度和横向变形阻力，在静压下具有最优的固体压缩性能。G/B 比值表明 FeAl 和 Fe<sub>3</sub>AlC 均为脆性相，而 Fe<sub>3</sub>Al 和 FeAl<sub>3</sub> 为韧性相。电子结构结果表明：Fe<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>C<sub>z</sub> 金属间化合物的键合特性为金属和共价键的混合物，具有抗键合效应。Fe<sub>3</sub>AlC 化合物的最大德拜温度为 702.2 K，Fe<sub>3</sub>Al 化合物具有最低的德拜温度，其值为 432.2 K，同时计算了这些 Fe<sub>x</sub>Al<sub>y</sub>C<sub>z</sub> 金属间化合物的硬度。Fe<sub>3</sub>AlC 的硬度为 19.4 GPa，是 Fe<sub>3</sub>Al 的 3 倍。实验结果能够给 Fe-Cr-B-Al 合金的设计及应用提供指导性建议。

仅发表论文

#### E01-PO-01

##### 初次再结晶温度对薄带连铸取向硅钢初次再结晶和二次再结晶的影响

卢翔, 兰梦飞, 方烽, 张元祥, 王洋, 袁国, 张维娜, 王国栋  
东北大学

以薄带连铸取向硅钢为材料, 研究了不同的初次再结晶温度 (780-980 °C) 对初次再结晶和二次再结晶组织和织构的影响, 并基于初次再结晶组织、组织和抑制力对二次再结晶 Goss 织构取向度的影响模型解释了实验结果。结果表明: 不同初次再结晶温度条件下, 样品中均得到完善的等轴晶组织, 其织构以  $\gamma$ -纤维织构为主, 并存在少量的  $\lambda$ -纤维织构。随着初次再结晶温度的增加, 晶粒尺寸不断增加但其均匀性逐渐变差,  $\gamma$ -纤维织构强度逐渐增加。此外, 不同条件下 Goss 织构均较弱, 在 780-880 °C 范围内, 未观察到 Goss 织构组分, 当温度增加至 980 °C 时, 出现了少量的 Goss 织构。二次再结晶之后, 不同初次再结晶样品都发生了完善的二次再结晶。随着初次再结晶温度增加, 二次晶粒尺寸不断增加, Goss 织构取向度先增加后减小, 在 830 °C 达到最大值。

关键词: 取向硅钢; 薄带连铸; 微观组织; 织构, 二次再结晶

#### E01-PO-02

##### 高强镀锌板表面“发麻”缺陷产生机理研究

王畅

首钢技术研究院

本文对高强镀锌钢板表面“发麻”缺陷进行深入分析, 结合现场的实际生产提出有效的改善措施。结果表明: 镀锌板发麻缺陷形成根本在于锌层表面厚度的不均匀, 造成光平整后, 表面粗糙度差较大, 从而形成发麻缺陷形貌; 锌层不均形成的原因在于钢板表面存在较多的表层裂纹, 而此表层裂纹经过全流程跟踪分析发现主要产生自冷轧工序, 由于热轧组织特点造成钢板轧制过程中抗开裂能力较低, 冷轧板表面形成表层 10  $\mu\text{m}$  的表层裂纹; 结合 CCT 曲线的数值模拟, 提出的解决思路主要在于表层组织状态的控制, 可明显抑制粗糙发麻缺陷产生。

#### E01-PO-03

##### 基于正交试验分析的电火花放电磨削 PcBN 复合片技术研究

贾云海, 郭建梅, 郭妍, 朱立新, 孙越

北京市电加工研究所

聚晶立方氮化硼 (PcBN) 材料由于具有很高的硬度、较高的耐磨性和热稳定, 使其成为硬态车削加工常采用的刀具材料, 在黑色金属加工领域得到越来越广泛的采用。电火花放电磨削加工是一种基于脉冲放电电蚀除原理的自激放电过程, 是目前应用广泛的聚晶立方氮化硼刀具加工方法之一。以 GE 公司 PcBN 复合片 8200 作为被加工材料, 采用正交试验分析方法, 在精密超硬刀具数控电火花放电刃磨机床上加工 PCBN 复合片, 结合扫描电镜观测、粗糙度仪测试, 选取工具电极旋转线速度、电火花放电峰值电流、脉冲宽度作为主要加工工艺参数, 以工件材料去除量、工具电极损耗作为加工效率的评价指标, 以复合片加工表面的表面粗糙度、变质层厚度作为加工质量评价指标, 分析电火花放电磨削加工 PcBN 材料的技术。试验结果表明: 当工具电极旋转线速度在 60 m/min 时, 峰值电流在 2 A, 脉冲宽度 20  $\mu\text{s}$  时, PCBN 的去除量达到 1.1  $\text{mm}^3$ , 工具电极损耗达到 3.2  $\text{mm}^3$ , PcBN 复合片加工表面的表面粗糙度达到 Ra0.8  $\mu\text{m}$ , 变质层厚度不大于 12  $\mu\text{m}$ , 符合一般超硬刀具的加工要求, 加工效率以及加工质量均达到客户需求。

关键词: 电火花放电磨削 (EDG); 聚晶立方氮化硼复合片; 正交试验; 变质层; 加工工艺

#### E01-PO-04

##### 高铜超纯铁素体不锈钢热变形行为研究

尹鸿祥

中国铁道科学研究院集团有限公司

为研究高铜超纯铁素体不锈钢 (21Cr-1.5Cu) 热加工过程中变形温度和应变速率对热变形行为影响, 研究了试验钢变形温度为 950 °C、1000 °C、1050 °C、1100 °C、1150 °C 和 1200 °C, 应变速率为 0.01  $\text{s}^{-1}$ 、0.1  $\text{s}^{-1}$ 、1  $\text{s}^{-1}$  和 10  $\text{s}^{-1}$  条件下的热变形行为。结果表明, 试验钢热变形方程为  $\epsilon(\cdot) = 5.81 \times 10^{13} \sin(\alpha\sigma)^{4.6825} \exp(-323000/RT)$ 。热加工图中流变失稳区主要为三处: 变形温度 950-1060 °C, 应变速率为 0.15-1.1  $\text{s}^{-1}$ ; 变形温度 1050-1080 °C, 应变速率 3-10  $\text{s}^{-1}$ ; 以及变形温度 1130-1180 °C, 应变速率 1-10  $\text{s}^{-1}$ 。分析可知, 热加工图右下角是最适合热加工的区域, 能量消耗效率可达到 40% 以上, 且应变率增加时, 失稳区增大。

关键词: 热加工图; 铁素体不锈钢; 铜; 变形温度; 应变速率

## E01-PO-05

### 冷轧变形对 Cu-Cr-Co-Si 合金组织和性能的影响

孙兴龙, 接金川, 李廷举

大连理工大学

通过在 Cu-Cr 合金中添加 Co 和 Si 元素的方法制备出一种新型高性能合金, 同时经过后续变形工艺和时效工艺处理, 分析 Si 元素含量及轧制变形对 Cu-Cr-Co-Si 合金组织和性能的影响, 实验结果表明: 随着 Si 元素含量的增加及冷轧变形量的增加, Cu-Cr-Co-Si 合金的硬度值得到明显提升, 90%冷轧变形后的 Cu-1Cr-1Co-0.6Si 合金经 440 °C 时效 1 h 峰值硬度为 214.6 HV。随着 Si 元素含量的增加及冷轧变形量的增加, Cu-Cr-Co-Si 合金的电导率略有降低, 90%冷轧变形后的 Cu-1Cr-1Co-0.6Si 合金经 440 °C 时效 1 h, 电导率为 41.6% IACS。

关键词: Cu-Cr-Co-Si 合金, 组织, 硬度, 电导率

## E01-PO-06

### Al 含量对 Fe-Cr-B-Al 合金组织和性能的影响

鞠江, 王俊

上海交通大学

采用增质法研究了 Al 含量对 Fe-Cr-B-Al 合金在 800 °C 空气氛围中抗氧化性能的影响, 并利用 OM、SEM、XRD、EDS 对不同状态合金表面氧化物的形貌、成分、相组成以及合金铸态显微组织进行分析。结果表明 Al 的增加使铸态 Fe-Cr-B-Al 合金的基体组织由马氏体和少量的残余奥氏体逐渐转变为铁素体和珠光体组织, 碳化物类型没有发生变化。Al 含量超过 6.0wt.% 时, 有 Fe<sub>3</sub>Al 型金属间化合物形成。氧化动力学曲线遵循抛物线规律, 无铝 Fe-Cr-B 合金氧化物主要有 (Fe, Cr)<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、M<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Al 元素使合金表面氧化物类型发生了变化, Fe-Cr-B-Al 合金表面氧化物主要为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。循环氧化动力学数据表明 Fe-Cr-B-8Al 合金呈现最优抗氧化性能, 属于完全抗氧化级别。

关键词: Al 元素; 显微组织; 性能

## E01-PO-07

### 不同热处理工艺对 550MPa 级钢的组织 and 性能的影响

樊艳秋, 李少坡, 张海, 王海宝

首钢集团有限公司技术研究院

通过组织观察、力学性能测定等手段, 分析了冷却速度、不同热处理工艺对 550 MPa 级钢的组织 and 性能的影响。实验结果表明, 冷却速度小于 1 °C/s 时, 组织以铁素体或准多边形铁素体为主; 当冷却速度为 1-15 °C/s 时, 组织以粒状贝氏体为主; 当冷却速度高于 15 °C/s 时, 组织以板条贝氏体为主。试验钢分别经 900 °C 淬火、TMCP 后, 均采用了相同的时效工艺进行了时效处理。其中, 经 900 °C 淬火+时效的试验钢组织以粒状贝氏体为主, 且尺寸细小; 经 TMCP+时效的试验钢组织以多边形铁素体和粒状贝氏体为主。经 900 °C 淬火+时效的试验钢的屈服强度高于 TMCP+时效的试验钢, 增量约为 60 MPa 左右; 冲击韧性无明显下降。

关键词: 550MPa; 冷却速度; 贝氏体; 力学性能

## E01-PO-08

### 新型无硼含铌 1800MPa 级热成形钢的微观组织与力学性能

李宝顺, 康永林

北京科技大学

利用热膨胀仪测定了一种新型无硼含铌 1800 MPa 级热成形钢的相变点并绘制其 CCT 曲线, 通过模拟热成形实际生产工艺, 研究加热温度、保温时间、停留时间和水温对其拉伸性能的影响, 并采用维氏硬度计测量试验钢不同条件下的维氏硬度, 采用 OM、SEM 方法观察其冷轧和热成形后的微观组织, 采用 X 射线衍射(XRD)方法研究其热成形后的组织是否有残余奥氏体的存在。结果表明: 冷轧试验钢的微观组织由铁素体和珠光体构成, 热成形后的组织基本是板条状马氏体。当加热温度为 900 °C, 保温时间为 3 min, 停留时间为 8 s, 水温为室温时, 新型无硼含铌 1800 MPa 级热成形钢的力学性能最佳, 其抗拉强度达到 1831 MPa, 屈服强度达到 1400 MPa, 伸长率达到 10.04%, 维氏硬度达到 770 HV 左右。这说明去除传统热成形钢中的硼元素, 同时添加一定量的铌元素, 可在保证淬透性的同时, 使其获得优异的力学性能。

## E01-PO-09

### 低碳钢铁素体区轧制的力学性能和织构研究

刘宏博<sup>1</sup>, 郝磊磊<sup>1</sup>, 王建功<sup>2</sup>, 康永林<sup>1</sup>

1.北京科技大学

2.首钢京唐有限责任公司

本文通过 XRD 检测方法对铁素体区轧制低碳钢的热轧板和退火板进行了织构分析, 并对低碳钢退火板进行了力学性能测试和凸耳实验。研究表明: 热轧板的织构整体较弱, 强度在 1 到 2 之间, 没有强的择优取向; 退火板中形成了较强且均匀的  $\{111\}<110>$  和  $\{111\}<112>$  织构, 这有利于提高退火板的  $r$  值和降低  $\Delta r$  值。退火板的屈服强度为 216 MPa, 抗拉强度为 326 MPa, 伸长率为 42.5%, 屈强比 0.66,  $n$  值为 0.18,  $r$  值平均值为 0.85,  $\Delta r$  值为 0.07, 凸耳率最大仅为 2.44%。

关键词: 铁素体轧制; 低碳钢; 力学性能; 织构; 凸耳率

## E01-PO-10

### 工艺参数对新型 1500MPa 级热成形钢组织与性能的影响

崔振楠, 李宝顺, 仇泉泉, 康永林

北京科技大学

本文对一种新型汽车用 1500 MPa 级热成形钢进行了热成形实验, 利用热膨胀仪测定了其相变点和 CCT 曲线, 确定了最佳的奥氏体化工艺, 采用电镜观察冷轧板以及热成形后钢板的显微组织, 通过 X 射线衍射 (XRD) 方法研究其热成形后的组织是否有残余奥氏体的存在, 研究了停留时间对其力学性能的影响规律。实验结果表明: 原始冷轧板的微观组织主要由铁素体和珠光体组成, 经过热成形后基本组织为马氏体和少量的铁素体; 当热成形工艺为加热温度为 900 °C, 保温时间为 3 min, 停留时间为 8 s, 淬火水温为室温时, 新型 1500 MPa 级热成形钢的力学性能最优, 其抗拉强度为 1519 MPa, 屈服强度为 1060 MPa, 屈强比为 0.73, 伸长率达到 10.52%。说明新型的 1500 MPa 级热成形钢通过合理的工艺, 可在保证淬透性的同时, 使其获得优异的力学性能。

关键词: 热成形钢; 力学性能; 微观组织; 工艺参数。

## E01-PO-11

### ESP 线低碳钢铁素体区轧制工艺的研究

王帆, 田鹏, 康永林

北京科技大学

以日钢 ESP 线生产的 SPHC 为研究对象, 利用热膨胀仪对不同冷却速率下的相转变点进行了测定, 并利用 Gleeble-3800 热压缩试验机模拟了 ESP 线铁素体区轧制工艺, 分析了不同冷速和不同温度下 SPHC 的组织演变规律, 绘制了静态 CCT 曲线, 并对其热压缩变形行为进行了研究。结果表明, 低碳钢在冷速 15 °C/s 以下时, 组织为铁素体以及少量的珠光体和三次渗碳体; 在 780 °C 变形 50% 时出现混晶现象; 拟合计算得出铁素体区轧制的激活能为 112 kJ/mol, 建立了形变储能与温度补偿形变速率因子的关系式; 并在日钢 ESP 线进行了应用, 为无头板带生产采用铁素体区轧制技术奠定了基础。

关键词: ESP 线; 铁素体区轧制工艺; 热压缩变形; 组织演变

## E01-PO-12

### 奥氏体化温度对多相中锰钢微观组织和力学性能的影响

杨永刚, 修旗, 周大元, 李龙, 张韵, 米振莉

北京科技大学

中锰钢具有杰出的强塑性和优异的碰撞吸收能, 是汽车车身的理想材料, 因而受到广泛的关注。现有的研究中, 中锰钢的微观组织多数是由铁素体+奥氏体、 $\alpha'$ 马氏体+奥氏体、或铁素体+ $\alpha'$ 马氏体+奥氏体构成。本文采用淬火-配分工艺获得了新型具有  $\epsilon$  马氏体+ $\alpha'$ 马氏体+奥氏体组织的多相中锰钢, 并研究了奥氏体化温度对多相中锰钢微观组织和力学性能的影响。结果表明: 奥氏体化温度严重影响多相中锰钢的力学性能, 在奥氏体化温度由 890 °C 增加至 920 °C 时, 抗拉强度由 1181 MPa 增加至 1582 MPa; 而奥氏体化温度增加至 950 °C 时, 抗拉强度保持稳定; 同时在奥氏体化温度为 920 °C 时, 多相中锰钢获得最大的延伸率。结合残余奥氏体含量和加工硬化行为分析, 较高的奥氏体化温度使中锰钢的  $M_s$  点升高, 从而改变了微观组织中的残余奥氏体含量; 同时持续的奥氏体转变是多相中锰钢获得较好力学性能的主要因素。

关键词：中锰钢；多相组织；残余奥氏体； $\epsilon$  马氏体；奥氏体化温度；力学性能

#### E01-PO-13

##### 铜铅锡/钢层状复合材料的制备与研究

董博闻, 王世航, 董壮壮, 刘承斌, 接金川, 李廷举

大连理工大学

通过固液复合铸造技术制备出铜铅锡/钢层状复合材料, 通过控制相关工艺参数及对样品进行后续组织形貌观察分析, 讨论了凝固过程中铜合金内部富铅相的粗化过程及其形貌尺寸变化。并通过实验探究了水冷速率对铜钢复合界面质量及铜合金组织均匀性的影响。实验结果表明, 随着冷速降低, 固液界面推进速率降低, 富铅相逐渐由规则球状转变为不规则形态。当界面推进速率过慢时, 受冷速及温度梯度影响, 铜合金层底部出现数百微米尺寸的倒三角形富铅相, 发生严重的宏观偏聚。

关键词：固液复合铸造；铜铅锡/钢层状复合材料；固液界面

#### E01-PO-14

##### 热连轧高强度磁轭钢板精准断面控制技术

何海楠<sup>1</sup>, 王晓晨<sup>1</sup>, 杨荃<sup>1</sup>, 王秋娜<sup>1,2</sup>

1. 北京科技大学工程技术研究院
2. 首钢迁安钢铁集团有限公司热轧事业部

热轧磁轭钢板应用于大型发电机核心部件电机转子的制造, 转子中的磁轭采用钢板冲片叠装而成, 为了满足设备的使用和性能要求, 磁轭在工作中需要承受较大的转动惯量和和拥有良好的磁通量, 这就要求热轧磁轭钢板保证高的强度和高的叠压系数, 这既要满足热轧带钢的强度要求又要保证严苛的板形质量, 尤其是带钢同板极差难控制, 现有热轧板形调控能力不足以满足上述条件, 因此需要一套特殊的热轧工艺策略满足带钢的性能和板形质量要求。本文提出一套针对磁轭钢板制造的热轧工艺技术, 贯穿热轧粗轧和精轧过程的高精度断面控制技术, 包括粗轧最优板形控制技术、高精度板形设定与控制模型、变接触支辊辊形技术、精轧双锥度工作辊技术及下游工作辊智能窜辊技术。这套包括粗轧在内的多机架热轧板形控制策略解决了高强度带钢变形时独特的金属流动特性使得板形难以控制的问题, 显著增强了热轧磁极磁轭钢的板形调控能力和控制精度, 有效的控制带钢同板极差, 实现热轧磁轭钢板在切边 25 mm 条件下横向厚差在 60  $\mu\text{m}$  以内比例达到 95% 的控制能力, 对于提高热轧磁轭钢板的板形质量和成材率有重要意义。

关键词：热连轧；磁轭钢；精准断面控制；轧辊辊形；工作辊窜辊；负荷分配

#### E01-PO-15

##### 润滑条件对 6061 铝合金板料拉深成形极限的影响

王燕齐, 程永奇, 张鹏, 罗干, 李鹏斌

广东工业大学

6061 铝合金在汽车轻量化领域应用广泛, 但其常温下的拉深成形性能欠缺, 研究采用石墨、润滑脂、聚四氟乙烯等润滑剂对板料进行润滑, 探究常温下不同润滑剂对板料拉深成形极限提升效果, 并得到不同润滑条件下对应板料不产生起皱缺陷的临界压边力, 并探究采用橡胶垫圈进一步提升铝合金拉深成形极限。结果表明, 单位压边力为 3 MPa, 200 mm/min 的拉深速度试验条件下, 三种润滑剂的润滑效果都大于油润滑, 且聚四氟乙烯的润滑效果大于润滑脂大于石墨。不同润滑剂产生起皱和破裂的临界单位压边力都不同, 其中石墨润滑剂单位压边力小于 7.5 MPa 时容易起皱, 在大于 9 MPa 时容易破裂; 而使用润滑脂作为润滑剂即使单位压边力为 3 MPa, 也不容易产生起皱, 说明脂润滑条件下板料的起皱趋势较小; 使用聚四氟乙烯薄膜润滑剂在小于 6 MPa 的单位压边力时容易起皱, 当单位压边力大于 8 MPa 时则容易破裂, 6-8 MPa 之间不起皱也不破裂。采用聚四氟乙烯薄膜润滑剂的润滑条件下, 将圆形中空橡胶垫圈粘结于拉深凸模圆角断裂处, 可以减小杯形件圆角处材料流动速度, 从而减小板料在拉深过程中的减薄率, 较油润滑状态板料的拉深成形极限可提高 17%。

关键词：6061；润滑条件；橡胶垫圈；成形极限

#### E01-PO-16

##### 电动缸测试平台的位置精度测量及其误差补偿

李鹏斌, 程永奇, 张鹏, 王燕齐, 陈三一

广东工业大学

随着材料制备与成形加工技术的智能化技术的发展,智能化的成形加工设备和相应的控制技术的要求也越来越高。正是在这种大背景下,电动平台以其优异的定位及推力控制等性能得到了广泛的应用,电动缸作为电动平台的关键零部件,其运动精度决定了电动平台的精度。而电动缸的基本传动形式是旋转电机+梯形丝杠(滚珠丝杠,滚柱丝杠),其制造精度和机械传动不可避免的存在装配误差,螺距误差和间隙误差。对于高精度的电动缸伺服平台来说,就必须对电动缸进行误差分析和补偿。对此研发了一套以研华 IPC-610 工控机作为上位机,研华 PCI-1220U 两轴运动控制卡作为核心控制器,高精度磁栅尺作为检测装置的电动缸伺服测试平台。针对螺距误差和间隙误差,先通过空载和变载建立螺距误差的二维误差补偿表和散点图,再对散点图采用最小二乘线性拟合的方法进行线性误差补偿,测得其平均比例系数,通过调整脉冲当量进行补偿,从而改善螺距误差;通过空载和变载建立间隙误差的二维误差补偿表和散点图,测得其平均间隙误差,而运动控制卡具有间隙补偿功能,可以方便进行平均间隙补偿,从而改善间隙误差。最后达到对电动缸位置精度,间隙误差,重复定位误差的测量和补偿,且经过误差补偿后其定位精度满足 0.3 mm 的控制指标要求。

关键词:电动缸;误差;测量;补偿

## E01-PO-17

### 热轧带钢平整机辊形优化技术研究

宋光义,王晓晨,杨荃

北京科技大学国家板带生产先进装备工程技术研究中心

热轧带钢平整机是热轧成品带钢生产链中的最后一道工序,其作用是对冷却到室温的带钢施加小变形以改善板形质量,提高机械性能和表面质量。针对热轧带钢平整机工作辊不均匀磨损严重、板形调控能力差等问题,对轧辊的辊形配置进行了优化设计,采用变接触支承辊辊形(VCR)与高次正凸度工作辊辊形配置的方案。应用 ABAQUS 有限元软件建立四辊热轧平整机的辊系-轧件耦合模型,计算并分析原有的辊形配置与优化的辊形配置对辊间接触压力、弯辊力调控功效的影响。仿真结果表明:优化的辊形配置改善了辊间接触压力分布,有效降低了辊间接触压力尖峰,并且显著提高了弯辊力调控功效。此辊形配置在某厂 1580 mm 热轧平整机上应用,改善了工作辊磨损的不均匀性,提高了带钢板形的控制能力。

关键词:热轧平整机;VCR 支承辊辊形;高次正凸度工作辊辊形;辊系-轧件耦合模型;辊间接触压力;弯辊力调控功效

## E01-PO-18

### 高碳钢丝冷拔过程中的组织演变和强化机制

陈焕友<sup>1</sup>,李烈军<sup>1</sup>,邢献强<sup>2</sup>,彭政务<sup>1</sup>,陈松军<sup>1</sup>

1.华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心

2.广州市奥赛钢线科技有限公司

本文利用透射电子显微镜、X 射线衍射分析等手段对不同冷拔形变程度的高碳钢丝的珠光体片层间距、渗碳体片层厚度、位错密度以及抗拉强度进行测定。研究发现,随着应变的增加(真应变:0→1.24),珠光体平均片层间距由 140 nm 减小至 70 nm,渗碳体平均片层厚度由 37 nm 减小至 20 nm,位错密度由 $\sim 8.4 \times 10^{13} \text{ m}^{-2}$ 增加到 $\sim 1.3 \times 10^{15} \text{ m}^{-2}$ ,抗拉强度由 1168 MPa 增加到 1545 MPa。基于强化理论与经典公式,分别计算出不同应变程度下位错强化和边界强化对钢丝总强度的贡献。结果表明边界强化最主要为强化机制,其次为位错强化,应变为 1.24 时,分别达到 944 MPa 和 333 MPa。

关键词:高碳钢丝;冷拔;组织演变;位错密度;强化机制

## E01-PO-19

### 非调质钢 45MnSiVSQ 动态连续冷却转变

王云龙,陈银莉,韦贺,赵宜娜

北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心

随着我国汽车产量和汽车用量的增加,致使汽车制造能耗迅速增大,随之带来了环境、能源、资源等一系列压力。伴随这种困境,非调质钢应运而生,非调质钢主要特点是不需要进行调质热处理,达到或接近调质钢力学性能,从而可以达到节能减排,并降低成本的目的。同时,非调质钢与传统的调质钢相比较,减少了调质过程中淬火引起的变形开裂问题,进而也简化校直工序,提高了生产效率。以某企业为例,其生产的高强度中碳非调质钢 45MnSiVSQ 抗拉强度大于 950 MPa,晶粒度达到 5~8 级,制成的半轴产品静扭强度达到 56000 N·m 水平,技术指标已达到国内领先水平;但是该企业所生产的非调质钢的力学性能波动性较大,从而严重影响的生产效益。这主要是因为非调质钢在热加工后没有进行调质处理,致使热变形行为和材料内部微观组织对产品质量具有重中之重的原因。动态 CCT 曲线对材料的加工、微观组织和力学性能的控制具有



重要的指导作用。针对这一问题,本文采用了 Gleeble-1500 热模拟试验机测定了非调质钢 45MnSiVSQ 的相变临界点  $Ac_1$ 、 $Ac_3$ 、 $Ar_1$ 、 $Ar_3$  和 Ms;同时测定了试验钢奥氏体化在不同冷却速度下连续转变时的膨胀曲线,并结合金相-硬度法,绘制了非调质钢的动态连续冷却转变曲线(CCT);然后通过激光共聚焦显微镜和电子扫描电镜(SEM)研究了不同的冷却速度对材料显微组织形貌和珠光体片层间距及洛氏硬度的影响。结果表明:非调质钢 45MnSiVSQ 热变形冷却速度在  $0.1\text{ }^\circ\text{C/s}$ ~ $0.2\text{ }^\circ\text{C/s}$  时,显微组织为均匀分布的铁素体和珠光体组织。在  $0.1\text{ }^\circ\text{C/s}$ ~ $1.0\text{ }^\circ\text{C/s}$  范围内随着冷速的增加,珠光体片层间距减小,洛氏硬度值增大。当冷速达到  $0.5\text{ }^\circ\text{C/s}$  时开始出现贝氏体组织,当冷速为  $1.5\text{ }^\circ\text{C/s}$  时,试验钢开始出现马氏体转变,试验钢中的金相组织为铁素体+珠光体+贝氏体+少量马氏体;当冷速达到  $5.0\text{ }^\circ\text{C/s}$  时,钢中存在 96.3%马氏体、3.7%贝氏体组织,铁素体和珠光体组织已完全消失,洛氏硬度值达到 46.1HRC。试验钢贝氏体转变的临界冷却速率为  $3.0\text{ }^\circ\text{C/s}$ ~ $5.0\text{ }^\circ\text{C/s}$ ;马氏体转变的临界冷却速率为  $10\text{ }^\circ\text{C/s}$ ~ $20\text{ }^\circ\text{C/s}$ 。

关键词:非调质钢 45MnSiVSQ;热模拟;CCT 曲线;片层间距

## E01-PO-20

### Al-5Ti-1B 晶粒细化剂对 Al-Si-Mg-Cu 合金组织性能的影响

王顺成,康跃华,宋东福,周楠

广东省材料与加工研究所

采用 Al-5Ti-1B 晶粒细化剂对 Al-Si-Mg-Cu 合金进行晶粒细化,利用金相显微镜和拉伸试验机,研究了晶粒细化对 Al-Si-Mg-Cu 合金铸造流动性、显微组织与力学性能的影响。结果表明:随着 Al-5Ti-1B 晶粒细化剂添加量的增加,Al-Si-Mg-Cu 合金的  $\alpha$ -Al 晶粒逐渐细化,铸造流动性、抗拉强度和伸长率逐渐升高。当 Al-5Ti-1B 晶粒细化剂添加量增加到 0.5%时,Al-Si-Mg-Cu 合金的晶粒被细化至平均直径为  $90.9\text{ }\mu\text{m}$ ,铸造流动性试样长度为 867 mm,抗拉强度为 234 MPa,伸长率为 10.1%。与未加 Al-5Ti-1B 晶粒细化剂的 Al-Si-Mg-Cu 合金相比,此时 Al-Si-Mg-Cu 合金的铸造流动性提高了 10.9%,抗拉强度提高了 5.9%,伸长率提高了 9.8%。

关键词:Al-Si-Mg-Cu 合金;Al-5Ti-1B 细化剂;晶粒细化;铸造流动性

## E01-PO-21

### 镀锌钢在风沙环境中的腐蚀行为

张超<sup>1</sup>,赵爱民<sup>1</sup>,郭辉<sup>2</sup>

1.北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心

2.潍坊科技学院机械工程学院

热浸镀锌是重要的钢铁防腐蚀方法,广泛应用于家电、汽车以及建材行业,然而其防护性能受使用环境影响较大,我国西北特殊的风沙环境会对镀锌层造成破坏,降低钢结构耐蚀性,研究风沙磨蚀对镀锌钢耐蚀性能的影响具有很强的应用价值。本文在采用气流挟沙喷射法制备不同磨蚀程度镀锌板的基础上,通过中性盐雾实验箱模拟大气氛围对磨蚀试样的腐蚀,并利用高精度电子天平、激光共聚焦显微镜(LSCM)及扫描电子显微镜(SEM),观测失重量、腐蚀形貌及元素含量变化,研究磨蚀程度对镀锌板耐蚀性能的影响。研究表明,相同盐雾腐蚀时间,随磨蚀程度的增加,试样失重量增加,黑色团簇状腐蚀斑点数量增多颜色加深,且腐蚀斑点深度增加;相同磨蚀程度,随盐雾腐蚀时间的延长,失重量增长幅度变大,腐蚀斑点生长变大,且基体颜色由亮白色变为灰色。这主要与随风沙磨蚀程度增加,镀层表面 Fe/Zn 比增大,发生电化学腐蚀速率加快有关。

关键词:镀锌钢;风沙环境;耐蚀性;中性盐雾

## E01-PO-22

### Al-Cu-Li 合金热变形过程微观组织动态演变规律研究

杨胜利<sup>1</sup>,沈健<sup>1,2</sup>

1.中国船舶重工集团公司第七二五研究所

2.北京有色金属研究总院

采用等温热变形实验,结合 TEM 分析,研究了 Al-Cu-Li 合金热变形过程的动态软化机制和析出相动态演变规律。基于 Zener-Hollomon 参数( $Z$ )、变形温度( $T$ )、热激活参数和微观组织分析,明确了合金热变形过程的动态软化机制:当  $\ln Z > 51.70$ ,  $T < 420\text{ }^\circ\text{C}$  时,以螺位错的交滑移和刃位错攀移为主要软化机制;当  $47.10 < \ln Z \leq 51.70$ ,  $T \geq 380\text{ }^\circ\text{C}$ ,以螺位错交滑移、三维位错网络的脱缠以及部分位错脱钉为主要软化机制,有部分动态再结晶出现;当  $\ln Z \leq 47.10$ ,  $T \geq 420\text{ }^\circ\text{C}$ ,以动态回复和动态再

结晶为主要软化机制。合金热变形过程(340-500 °C) $T_1$ (Al<sub>2</sub>CuLi)相的动态析出与细化规律为：340-460 °C 保温阶段有粗大  $T_1$  析出，340-420 °C 变形阶段  $T_1$  相动态析出且被明显细化，细化源自两个方面：(1) 保温阶段析出的粗大  $T_1$  相因变形被碎化和回溶；(2) 原始晶界和变形过程引入的大量位错、亚晶界等为  $T_1$  相的析出提供大量异质形核位置，导致  $T_1$  的细小析出。 $T > 460$  °C，没有  $T_1$  相析出。热变形过程  $\beta'$ (Al<sub>3</sub>Zr)相和含 Mn 相始终稳定存在， $\delta'$ (Al<sub>3</sub>Li)相在淬火过程即可析出。

关键词：Al-Cu-Li 合金；热变形；动态回复与再结晶；动态析出

#### E01-PO-23

##### 低应变热处理过程中纯铜晶界特征分布演化研究

吴国庆，陈子蕴，黄明，秦渊，阿力木江·阿布拉提，姜涵露，杨森

南京理工大学

基于退火孪晶的晶界工程主要是利用形变热处理工艺改善材料中的晶界特征分布，特殊晶界的形成过程和机制是晶界工程领域的重要研究方向，目前晶界特征分布的优化机制还存在各种不足，其主要原因就在于对晶界结构的演化过程缺乏了解。本研究针对纯铜晶界特征分布的优化机制问题，研究了变形量和热处理温度对晶界特征分布的影响，发现在低应变条件下，随着变形量和温度的提高，多晶铜中的变形储能释放方式逐渐由应变退火转变为再结晶过程。在低应变条件下，应变退火方式对晶界特征分布的优化更为有效。通过准原位 EBSD 方法研究了形变热处理过程中的晶界特征分布演化过程，发现应力诱发晶界迁移 (SIBM) 会使得随机大角晶界之间会发生碰撞，导致频繁的发生晶间反应，同时在扫过后的区域会产生大量孪晶，这是晶界特征分布得到优化的关键。

关键词：晶界工程；准原位 EBSD 实验；孪晶；晶界迁移；再结晶

#### E01-PO-24

##### 激光-MIG 复合深熔焊接钢/铝对接接头

卢东琪，崔丽，陈鸿熙，常耀卿，彭志勃，贺定勇

北京工业大学

目前钢/铝接头的连接在航空航天、船舶以及汽车等工业制造领域得到了广泛应用，虽然采用爆炸焊、摩擦焊等固相焊接方法可获得优良性能的接头，但因其生产工艺复杂，效率低，实际应用受到一定的限制。激光焊接由于具有能量密度高、焊接变形小、焊接速度快等优势，受到了研究人员的广泛关注。然而，在单束激光焊接过程中，存在接头装配精度要求高、能量密度过于集中以及焊缝易形成凹陷等问题。新近发展的激光-MIG (metal inert gas) 复合焊既保留了激光焊的优势，又充分发挥了 MIG 焊的优势，改善焊缝成形，提高焊接过程的稳定性，有利于解决单束激光焊接存在的上述问题。本文采用激光-MIG 复合焊接热源对 6 mm 厚的 E36 钢和 5083 铝合金对接接头进行了激光深熔焊接工艺的探索，与单束激光焊接工艺方法对比，研究了钢/铝接头的焊缝成形、接头界面组织以及接头力学性能。结果表明，激光-MIG 复合深熔焊可以获得性能良好的钢/铝对接接头。在激光功率为 3.25 kW、送丝速度为 1.5 m/min，激光偏移量为 0.5 mm，离焦量为 0 mm 的条件下，钢/铝对接接头抗拉强度最高达 85.0 MPa。激光-MIG 电弧复合焊接可改善单束激光焊钢/铝对接接头存在的凹陷缺陷，接头界面金属间化合物中针状  $Fe_4Al_{13}$  相的数量明显减小，钢/铝接头抗力从 8.6 kN 提升至 12.7 kN。

关键词：钢/铝异种合金；复合焊接；激光焊接；抗拉强度

#### E01-PO-25

##### 高熵合金 CoCrCuFeNi 激光重熔组织结构及性能分析

陈昆，樊宇，李沛智

中国矿业大学

高熵合金在硬度、抗压强度、韧性、热稳定性等方面具有潜在优于常规合金材料的特质，在耐高温、耐磨损、耐腐蚀、耐辐射和耐低温合金等方面有着重要的应用前景。目前针对高熵合金的研究多集中在对合金系的设计、制备、铸态和热处理态的组织 and 性能分析等方面，针对高熵合金激光重熔方面的研究还较少。激光重熔是一种先进的表面组织改善技术，已得到广泛应用，因此研究高熵合金的激光重熔对扩大其应用领域是非常有意义的。本文以高熵合金 CoCrCuFeNi 为研究对象，对其进行激光表面重熔，通过光学显微镜、扫描电镜、X 射线衍射分析仪、纳米力学综合测试系统、磨损试验机以及电化学测试站，研究所制备的激光重熔层的力学性能、耐磨性能和耐腐蚀性能。研究结果如下：高熵合金 CoCrCuFeNi 母材组织为等轴树枝晶，由 FCC1 和 FCC2 两种面心立方相组成，FCC1 相为主相；FCC2 相为富 Cu 相集中分布于枝晶间。高熵合金

CoCrCuFeNi 激光重熔层成形美观，组织致密，内部没有出现裂纹和气孔等缺陷；激光重熔后，熔合区成分得到均匀化，晶粒尺寸更加细小，Cu 元素偏析现象得到减轻。在不同的激光功率和重熔速度条件下，均能获得成形良好，表面均匀致密的 CoCrCuFeNi 激光重熔层。激光重熔层的屈服应力大于母材，母材的屈服应力为  $125.94 \pm 23.56$  MPa，激光重熔层的屈服应力为  $262.83 \pm 36.24$  MPa。激光重熔层的磨损量与其表面硬度密切相关，当硬度较大时，磨损量较小。激光重熔层的摩擦系数小于母材，母材的磨损量为  $9.02 \pm 0.42$  mg，激光重熔层的磨损量小于母材，平均磨损量为  $7.73 \pm 0.29$  mg。其磨损主要是粘着磨损和磨粒磨损共同作用的结果。母材和激光重熔层在盐溶液中耐蚀性较好，碱溶液中腐蚀倾向最大，在酸溶液中腐蚀速率最大。激光重熔层的自腐蚀电位为  $-0.3002 \sim -0.2439$  V，母材的自腐蚀电位为  $-0.2090$  V，激光重熔层的腐蚀倾向大于母材。激光重熔层的自腐蚀电流平均为  $1.485 \times 10^{-6}$  A，母材的自腐蚀电流为  $2.9145 \times 10^{-8}$  A，激光重熔层的腐蚀速率也大于母材。

关键词：激光重熔；高熵合金；力学性能；磨损性；腐蚀性

## E01-PO-26

### SWRH82B 盘条心部异常组织成因及控制机理研究

廖琳琳<sup>1</sup>，韦贺<sup>2</sup>，黎立璋<sup>1</sup>，陈银莉<sup>2</sup>，严海峰<sup>1</sup>，刘光华<sup>1</sup>

1.福建三钢闽光股份有限公司

2.北京科技大学

本文采用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)及电子探针(EPMA)分析了 SWRH82B 盘条拉拔断裂的原因，并利用 Thermol-cal 软件建立多元扩散模型，研究了温度、时间对合金元素扩散行为的影响。结果表明：盘条心部的网状先共析渗碳体和马氏体带状异常组织是拉拔断裂的主要原因；盘条心部的 Mn、Cr 元素偏析提高了奥氏体的稳定性，使  $A_1 \sim A_{cm}$  温度区间停留时间较长，是出现先共析渗碳体的主要原因；同时盘条心部 Mn、Cr 等元素的偏析，推迟了珠光体组织的转变进程，当冷速过高时，造成偏析带发生共析转变的时间不足，转变成心部马氏体带；随着保温温度提高和保温时间延长，合金元素的偏析愈小，网状渗碳体和马氏体带含量不断降低，当盘条在  $1050$  °C 保温  $600$  s 时 C、P 元素达到无偏析现象，Cr 元素在  $1150$  °C 保温  $5400$  s 出现扩散均匀情况，Mn 元素  $1200$  °C 保温  $3000$  s 最先出现扩散均匀情况。对于高线斯太尔摩风冷工艺，盘条心部异常组织控制的核心是返温后采用缓慢的冷却速率，延长保温时间，最终优化 82B 盘条的组织性能。

关键词：SWRH82B；马氏体带；网状渗碳体；成分偏析；Thermol-cal

## E01-PO-27

### 熔体旋转冷却+热挤压工艺制备快速凝固 7075 铝合金棒材

廖结莹，李烈军，彭政务，陈紫默，倪东惠，余泳霖

华南理工大学国家金属材料近净成形工程技术研究中心

采用单辊熔体旋转冷却法制备 7075 (Al-Zn-Mg-Cu) 铝合金带材，研究发现当铜辊转速为  $40$  m/s 时，合金元素被过饱和的溶解于铝基体中，形成过饱和固溶体。对快速凝固制得的带材进行冷压+热挤压，在挤压温度为  $500$  °C，挤压比为  $16$  的条件下，制得 7075 铝合金棒材。结果表明，棒材晶粒细小，平均晶粒尺寸为  $6-8$   $\mu\text{m}$ ，抗拉强度约为  $507$  MPa，显微硬度为  $Hv_{100g}=180$ ，并发现  $\eta$  相 ( $\text{MgZn}_2$ ) 从基体内析出。

关键词：7075 铝合金；单辊熔体旋转冷却法；热挤压；显微组织

## E01-PO-28

### 预应变对 Q&P 钢回弹的影响

修旗，米振莉，杨永刚，刘思阳，杨经纬，陈福明

北京科技大学

淬火-配分钢(Q&P)钢是汽车用先进高强钢的杰出代表，因其具有超高的强度以及优异的塑性，而受到国内外专家的广泛关注。基于国内外专家的研究，Q&P 钢已被尝试应用到车身的制造中。然而，Q&P 钢在成型过程中的回弹问题严重限制了其广泛的应用。本文以  $1000$  MPa 级的 Q&P 钢为研究对象，利用拉伸试验机、弯曲试验机、X 射线衍射仪以及电子背散射衍射仪等研究回弹的变化情况，并分析预应变对回弹的影响。研究表明：预应变严重影响 Q&P 钢的回弹量，回弹量随着预应变量的增加而增加。这是因为在预应变处理过程中，Q&P 钢组织中发生了残余奥氏体向马氏体的转变，协调变形的残余奥氏体减少，成形能力变差，回弹量增加。

关键词：回弹；预变形；Q&P 钢；微观组织

## E01-PO-29

### 热变形对 20CrMnTi 型齿轮钢连续冷却相变的影响

黎立璋<sup>1</sup>, 韦贺<sup>2</sup>, 廖琳琳<sup>1</sup>, 陈银莉<sup>2</sup>, 严海峰<sup>1</sup>, 刘光华<sup>1</sup>, 孙志威<sup>2</sup>

1. 福建三钢闽光股份有限公司

2. 北京科技大学

本文利用膨胀法结合金相-显微硬度法, 在 Gleeble3500 热模拟试验机上研究了 20CrMnTi 钢在未变形与变形条件下的连续冷却相变规律, 绘制了静态和动态连续冷却转变曲线 (CCT 曲线), 并分析和讨论了相变区 (铁素体+珠光体) 开始温度、开始时间及持续时间变化原因。结果表明: 与静态 CCT 曲线相比, 动态 CCT 曲线整体向左上方移动, 即变形对各相的转变有促进作用, 不再生成铁素体+珠光体的冷速由 5 °C/s 提高到 7 °C/s, 马氏体开始转变冷速由 1.5 °C/s 升高至 3 °C/s, 未变形试验钢的铁素体+珠光体转变开始温度约为 703 °C, 变形量为 30% 的试验钢铁素体+珠光体转变开始温度升高至 732 °C 左右; 热变形使铁素体+珠光体转变区得到了扩大; 随着冷却速率加快时, 相变开始时间缩短, 相变持续时间呈现先减小后增大再减小的趋势, 在冷却速度为 0.5 °C/s 和 3 °C/s 时, 铁素体+珠光体相变的持续时间分别达到最小值 (未变形和变形的持续时间分别为 21.9 和 20.1 s) 和最大值 (未变形和变形的持续时间分别为 37.3 和 34.8 s)。

关键词: 20CrMnTi; 热变形; CCT 曲线; 珠光体转变; 马氏体转变

## E01-PO-30

### Al<sub>70</sub>Bi<sub>10</sub>Sn<sub>20</sub> 难混溶合金在不同冷却速率条件下的凝固组织演变

郑智琳, 接金川, 刘仕超, 岳世鹏, 李廷举

大连理工大学

冷却速率对 Al-Bi-Sn 难混溶合金中少数相的形态和分布有很大影响。为了研究在不同冷却速率条件下合金的凝固组织演变规律, 将 Al<sub>70</sub>Bi<sub>10</sub>Sn<sub>20</sub> 难混溶合金分别浇铸到石墨坩埚, 铜模和水中。实验结果表明, 在上述三种凝固条件下, 少数相的微观结构和宏观分布情况有所不同。Al<sub>70</sub>Bi<sub>10</sub>Sn<sub>20</sub> 难混溶合金熔体浇铸于石墨坩埚中的试样显示出具有清晰边界的双层结构, 然而浇铸于铜模中的试样呈现多层结构。另外, 当合金熔体直接在水中淬火后, 试样中的少数相比较均匀地分布在基体中。合金凝固微观组织可以通过 Stokes 运动和 Marangoni 运动之间的相互作用来确定。相应的机制在本文中予以讨论。

关键词: 难混溶合金; 冷却速率; 微观组织演变

## E01-PO-31

### Fe-Mn-Al-C 系 TWIP 钢高温变形行为研究

蒋睿婷, 米振莉

北京科技大学

本文对 Fe-Mn-Al-C 系孪生诱导塑性钢 (TWIP 钢) 的热变形行为及断裂机制进行研究。实验结果表明, 升高温度和降低应变速率均可降低 TWIP 钢的流变应力, 动态应变时效导致在真应力应变曲线上锯齿状流变出现。基于实验获得的真应力应变数据, 建立高温 Arrhenius 模型, 流变应力预测值与实际值相关系数为 0.99447, Arrhenius 模型有较好预测性。此外, 拉伸断口经 SEM 观察发现大量韧窝的存在, 表明 TWIP 钢在高温为韧性断裂。

关键词: TWIP 钢; 高温变形; 本构模型; 断裂机制

## E01-PO-32

### 新型 Nano-BN 水基纳米轧制液摩擦学性能研究

李岩<sup>1,2</sup>, 陈义庆<sup>1,2</sup>, 高鹏<sup>1,2</sup>, 钟彬<sup>1,2</sup>, 李琳<sup>1,2</sup>, 艾芳芳<sup>1,2</sup>, 肖宇<sup>1,2</sup>

1. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室

2. 鞍钢集团钢铁研究院

采用四球摩擦磨损试验机考察新型 Nano-BN 水基纳米轧制液摩擦学性能。同时引入极压抗磨系数 ( $\omega$ ) 对最大无卡咬负荷 (PB 值), 摩擦系数 (COF) 和平均磨斑直径 (WSD) 等参数进行综合分析。运用 JC200C1 润湿角测试仪测量新型水基纳米轧制液的润湿角评价其润湿性能。通过对全新水基纳米轧制液摩擦学性能、摩擦磨损性能研究表明, 添加纳米 Nano-BN 明显提高水基轧制液承载能力、降低摩擦系数和磨斑直径, 测试钢球表面磨损情况得到显著改善。热轧工艺润滑实验表明, 使用水基纳米轧制液能够有效降低轧制力, 改善轧后带钢表面质量。

关键词: Nano-BN; 水基轧制液; 工艺润滑; 摩擦学性能

### E01-PO-33

#### 碳含量对 Fe-Mn-Al-C 低密度钢组织和性能的影响

李文佳, 陈兴品

重庆大学

作为一种新型的高强合金钢, Fe-Mn-Al-C 钢不仅拥有优异的综合力学性能, 还兼具低密度、耐腐蚀的特征。本文研究碳含量对一种奥氏体低密度 Fe-30Mn-10Al-C 钢在固溶处理过程中的硬化效应、微观组织和力学性能的影响。基于两种不同的碳含量, 固溶后的性能差异较大, 通过对微观组织观察分析, 可以发现: 微观组织显示 0.72C 钢与 0.53C 钢都是奥氏体与铁素体双相钢, 对比 0.53C 钢含有 55.9%的铁素体, 0.72C 钢的铁素体只有 17.2%。对比 Fe-30Mn-10Al-0.53C 钢, Fe-30Mn-10Al-0.72C 钢不仅具有更高的硬度和强度, 同时具有更好的塑性。

关键词: 低密度钢, 碳含量, 热处理, 力学性能

### E01-PO-34

#### 冷拉拔变形量对高强高导 Cu-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金线材组织性能的影响

彭冬冬<sup>1,2</sup>, 甘春雷<sup>2</sup>, 王顺成<sup>2</sup>, 鲁世强<sup>1</sup>, 张冬平<sup>2</sup>

1. 南昌航空大学

2. 广东省材料与加工研究所

本文通过对高强高导 Cu-0.2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金进行室温大变形量拉拔加工, 研究了高强高导 Cu-0.2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金线材在拉拔变形过程中的微观组织和力学性能的变化规律。结果表明, 随着冷拉拔变形量的增加, 合金的微观组织由较粗的长条形组织变成纤维组织, 并且变形量达到 90%以后, 发生断裂破碎; 合金的导电率变化较小, 在 87.4-90.1%IACS 范围内变化; 合金显微硬度 HV 从 141 增加到 161, 提高了 14.2%; 抗拉强度  $\sigma_b$  逐渐增大, 经过 20%的冷拉变形后, 抗拉强度  $\sigma_b$  由 492 MPa 提高到了 557 MPa, 屈服强度  $\sigma_{0.2}$  由 452 MPa 提高到了 552 MPa, 延伸率  $\delta$  由 20.1%下降到了 8.1%, 当变形量增加至 99%时, 抗拉强度  $\sigma_b$  进一步增加至 637 MPa, 屈服强度为 547 MPa, 延伸率  $\delta$  降低为 1.0%, 加工硬化比较明显; Cu-0.2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金经过不同的冷拉拔变形后的拉伸断裂为韧性断裂, 拉伸断口为杯锥状, 随着变形量增加韧窝尺寸逐渐减小。

关键词: 高强高导 Cu-0.2Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 合金; 拉拔; 微观组织; 力学性能; 韧性断裂

### E01-PO-35

#### Q&P 钢成形性能的研究与模型预测

李会健, 米振莉, 杨永刚

北京科技大学

淬火-配分钢(Q&P)钢是汽车用先进高强钢的杰出代表, 其具有超高的强度以及优异的塑性, 因而被应用到汽车车身制造以达到轻量化的目的。尽管超高强度的 Q&P 钢能够拥有良好的减重潜力, 然而超高强度会造成成型困难的问题。基于此, 本文针对 1300 MPa 级 Q&P 钢开展成型研究, 采用 Keeler-Brazier 模型对 Q&P 钢成形极限曲线进行预测, 并通过实验获得成型曲线验证。结果表明, 该 Q&P 钢平面应变状态极限应变为 26.4%, Q&P 钢屈强比低, 可以有效避免局部颈缩现象的出现; 微观断口存在明显的韧窝, 且断口均出现在中心应力集中部位; 实验成形极限曲线与模型预测值误差小于 2.69%, 表明该 Q&P 钢具有良好的塑形成形能力。

关键词: 淬火-配分钢; 塑形变形; Keeler-Brazier 模型; 成形极限曲线

### E01-PO-36

#### 模具制造 3D 打印工艺性研究

尹冬凡

有研粉末新材料(北京)有限公司

利用选区激光熔化技术(SLM)成型 18Ni300 模具钢圆棒试样, 对其进行热处理。改变激光功率和扫描速度, 对得到的试样进行显微组织观察和力学性能测试。结果表明, 存在的主要缺陷有孔洞、裂纹以及球化现象, 影响成型件致密度进而影响性能。过低的扫描速度和过高的激光功率会使扫描热影响区增大, 增加成型件变形量。扫描速度与激光功率共同影响热输入量, 热输入量过大会使铸件产生裂纹。提高扫描速度, 成型件硬度升高, 屈服强度和抗拉强度降低; 增大激光功率, 硬

度、抗拉强度和屈服强度均降低。

关键词：选区激光熔化；18Ni300 模具钢；力学性能

#### E01-PO-37

##### 横向静磁场对 M2 高速钢定向凝固组织的影响

李婉琴, 钟云波, 郑天祥, 沈喆, 任维丽, 雷作胜, 任忠鸣

上海大学

M2 高速钢是一种高碳高合金莱氏体钢, 由于其回火组织中弥散分布着大量细小的合金碳化物, 使 M2 高速钢具有高硬度、良好的耐磨性、韧性以及红硬性, 但凝固时从液态金属中析出的大尺寸共晶碳化物, 却是 M2 高速钢的使用寿命降低的主要因素。为改善铸态组织, 本文在 M2 高速钢定向凝固的过程中施加了 0-1 T 横向静磁场, 并进行淬火的实验。研究结果表明, 在试样定向凝固区的横截面组织中, 共晶碳化物随着磁感应强度的增加逐渐偏聚于试样的一侧。而在试样的另一侧析出的共晶碳化物相对减少。当磁感应强度为 0.4 T 时, 共晶碳化物的偏聚最为明显。但随磁场强度继续增加, 偏聚程度又逐渐降低。通过观察试样糊状区的纵截面组织发现, 施加横向静磁场使试样组织在截面的一侧产生偏析, 这种偏析是由于热电磁流动所致。表明由热电磁流动所导致的偏析现象同样在磁感应强度为 0.4 T 时最为明显。最后, 建立了横向静磁场作用下 M2 高速钢中碳化物偏聚的理论模型。

关键词：M2 高速钢；定向凝固；热电磁流动；共晶碳化物；偏析

#### E01-PO-38

##### 退火工艺对中锰钢组织和性能的影响

董瑞<sup>1</sup>, 吕科<sup>2</sup>, 郭辉<sup>3</sup>, 赵爱民<sup>4</sup>

1. 内蒙古科技大学

2. 包头稀土研究院

3. 潍坊科技学院

4. 北京科技大学

采用中锰钢合金成分体系, 设计了两种退火工艺——即传统的两相区退火工艺和预淬火+退火的两段式退火工艺, 并对不同退火工艺后实验钢的显微组织和力学性能进行研究。结果表明, 退火工艺的不同导致实验钢的微观组织完全不同, 力学性能也存在显著差异。冷轧后经传统两相区退火后的显微组织为块状的回火马氏体基体+残留奥氏体, 获得最佳力学性能的热处理工艺为 625 °C 等温 18 h, 此时抗拉强度为 932 MPa, 延伸率为 29.87%, 强塑积为 27.84 GPa%; 而经两段式退火工艺后, 显微组织为块状的回火马氏体基体+残留奥氏体, 但存在两种形貌残留奥氏体——长条状和块状, 残留奥氏体的体积分数最高可达 40.29%, 并且此退火工艺还能够明显缩短最优退火时间, 提高实验钢的力学性能, 在 625 °C 保温 4 h 后即可达到最佳力学性能, 抗拉强度为 1177 MPa, 延伸率为 30.92%, 强塑积为 36.39 GPa%。

关键词：中锰钢；热处理；残留奥氏体；显微组织；力学性能

#### E01-PO-39

##### 中频磁场作用下黄铜凝固过程中组织和性能研究

刘承斌, 接金川, 李廷举

大连理工大学

黄铜合金是一种性能优良的金属, 它有着良好的导热性、导电性、延展性、加工性能和机械性能, 同时还具有一定的强度, 在热加工状态下具有良好的塑性。黄铜合金在生产生活中应用十分广泛, 被用于制造管材, 线材以及各种五金件。随着国家基础工业和市场经济的发展, 对性能优良的黄铜合金的需求持续增加, 对产品质量和使用性能的需求也在提高。通过细化金属晶粒可以显著提高金属的机械性能, 减少缺陷。本实验旨在探究中频磁场和旋转磁场对黄铜合金铸态组织和性能的影响。在中频磁场实验中设置了四组试样进行对比, 中频磁场的输出功率分别为 0 kw、3 kw、4.5 kw、6kw; 在旋转磁场实验中同样设置了四组试样, 旋转磁场的输出电压分别为 0 V、60 V、80 V、100 V, 对铸锭试样分别后进行打磨、抛光、腐蚀。对试样对其宏观组织和微观组织进行拍照, 测定硬度。对铸锭组织和性能与磁场频率的关系进行了探究。实验结果表明: 通过在凝固过程中施加磁场可以显著细化铸态黄铜合金组织, 减少缩孔、气孔等铸造缺陷。但随着磁场频率的持续增加, 铸态黄铜的晶粒大小并非是一直减小, 反而略有增加。在磁场频率小于 4.5 kw 时, 试样的硬度随着磁场频率的增加而增加, 当频率上升到 6 kw 时, 硬度反而有所减小。因为随着磁场频率的提高, 涡流效应的增强, 会产生大量的热量, 反而促进了晶

粒的长大，这时磁场的细化晶粒的作用会被抵消一部分。因此，中频磁场的频率不是越高，磁场对铸态组织的改善作用就越好。凝固过程中施加同旋转磁场对凝固组织也有这很好的细化效果。本次实验主要探究磁场对于黄铜组织和性能的影响，以及对比了不同频率磁场的影响效果。

关键词：黄铜合金；晶粒细化；中频磁场；旋转磁场

#### E01-PO-40

##### 基于 TIG 丝材电弧增材制造 TiB<sub>2</sub>/Al-Si 复合材料的组织特征与力学性能

杨青峰, 夏存娟, 邓亚琪, 王浩伟, 李险峰

上海交通大学

选用  $\Phi 1.2$  mm 的 TiB<sub>2</sub> 颗粒增强的铝硅基复合材料为成形材料, 采用 TIG 丝材电弧增材制造的方法制造块状试样, 并对沉积态试样和热处理后试样的组织特征及力学性能进行研究。观察结果发现, 平行于焊缝方向上的组织和垂直于焊缝方向的组织形貌相似, 沉积态试样的组织由柱状晶和等轴晶组成, 硅和 TiB<sub>2</sub> 颗粒沿晶界分布, 晶粒的大小在 20-40  $\mu\text{m}$  左右。热处理工艺采用 T6 工艺, T6 处理后, 试样的晶粒大小稍有增加, 但变化不明显, 硅的形状由原来的针片状变为块状, 大小在 3-5  $\mu\text{m}$  左右, 硅的边角明显钝化。热处理后试样的硬度由沉积态的 62 HV 提高到 118 HV, 增加了 90.3%。拉伸结果显示, 热处理后试样的平均抗拉强度为 347 MPa, 平均断后伸长率为 8.1%。虽然在断口中存在着孔隙缺陷, 但是试样的断裂是韧性断裂, 经过分析认为气孔主要是氢气孔, 主要是因为成形过程中液态金属中的氢无法逸出。

关键词：丝材电弧增材制造；组织特征；力学性能；孔隙缺陷

#### E01-PO-41

##### ESP 生产线热处理过程对 Nb-Ti 微合金钢组织和析出的影响

汤启波, 武会宾, 许立雄, 牛刚, 袁睿

北京科技大学

试验研究了 ESP 生产线热处理过程对 Nb-Ti 微合金钢组织演变和微合金固溶/析出行为的影响。结果表明：感应加热温度从 1100  $^{\circ}\text{C}$  升到 1250  $^{\circ}\text{C}$  过程中, 原始奥氏体晶粒逐渐粗化, 同时析出物(Ti, Nb)(C, N)逐渐回溶到奥氏体基体中, 使 Nb 的固溶量从 16.2wt% 增加到 72.8wt%。冷却过程中, 由于铁素体相变点的降低, 组织中形成了大量的准多边形铁素体和粒状铁素体, 以及少量的多边形铁素体; 在化学驱动力和体积应变能的综合作用下, 铁素体晶粒最终细化到 2.97  $\mu\text{m}$ 。感应加热回溶的 Ti 和 Nb 通过应变诱导析出方式形成大量的纳米级 M(C, N), 18 nm 以下的小尺寸析出物的百分比达到了 14.7%。析出强化和组织强化的综合作用使试验钢的屈服强度和抗拉强度分别达到了 684 MPa 和 745 MPa。

关键词：ESP；感应加热；固溶量；析出强化

#### E01-PO-42

##### 钛合金冷模热冲压工艺组织特征和性能

李红, 王耀奇, 韩玉杰

中国航空制造技术研究院

运用一种新型热冲压工艺对钛合金进行冷模热成形研究, 在 650-950  $^{\circ}\text{C}$  温度区间, 应变率 0.01-1  $\text{s}^{-1}$  范围内进行单轴拉伸, 通过对微观结构和性能的研究, 分析 Ti6Al4V 合金在以上条件下的成形性能。结果表明: TC4 合金的微观组织随成形温度升高而粗化, 合金强度随温度升高先增强后降低; TC4 合金的塑性、冲击韧性随温度升高不断降低; 在 900-950  $^{\circ}\text{C}$  时, TC4 合金发生了  $\alpha$  相- $\beta$  相的转变, 在成形过程中, 温度的显著降低导致转化  $\beta$  相的形成, 降低了材料的可成形性。

关键词：Ti6Al4V；冷模；热冲压；微观组织

#### E01-PO-43

##### Zr 含量对大应变轧制 2524 铝合金微观组织及力学性能的影响

孙有平, 王松辉, 何江美

广西科技大学

采用光学金相显微镜 (OM)、X 射线衍射 (XRD)、拉伸试验机、透射电镜 (TEM)、SEM 断口分析等, 研究了 Zr 含量对 2524 铝合金显微组织及力学行为的影响。结果表明: 铸态 2524 合金中存在明显的枝晶偏析, 沿晶界分布着大量块状析出相。均匀化退火处理后, 非平衡低熔点相基本溶入基体, 晶间组织分布趋于均匀。大应变轧制变形后, 2524 铝合金中均

得到了典型的纤维状组织，合金中的第二相主要为  $S(Al_2CuMg)$ 相， $\theta(Al_2Cu)$ 相和  $T(Al_{20}Cu_2Mn_3)$ 相，沿晶界呈连续而均匀分布。经时效处理后，形成大量弥散的  $Al_3Zr$  粒子，对位错和亚晶界具有强烈的钉扎作用，能明显提高合金的抗再结晶能力和室温力学性能。随着 Zr 含量的增加，2524 铝合金的力学性能呈现逐渐递增趋势，当 Zr 含量为 0.5wt%时，2524 铝合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 645 MPa、548 MPa 和 11%。

#### E01-PO-44

##### 30Cr3MoA 钢与锡青铜异种材料扩散焊接研究

邹文江，程耀永，熊华平，陈波，吴欣

中国航发北京航空材料研究院

采用真空扩散焊接的方法实现了 30Cr3MoA 结构钢与 ZQSn10-2-3 锡青铜的连接。测试了不同工艺下接头的抗拉强度，并通过光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM) 和电子探针 (EPMA) 分析了接头的微观组织和成分。对扩散焊接头进行了淬火热处理实验。结果表明：在 820 °C/1 h/10 MPa 的工艺参数下接头室温拉伸断裂于锡青铜母材，平均抗拉强度达到 294 MPa，焊缝处形成紧密结合，存在 Ni 元素连续分布的扩散层，经 830 °C 油淬后接头不开裂。

关键词：结构钢；锡青铜；扩散焊；性能；组织

#### E01-PO-45

##### 贝氏体耐磨钢基板的热处理工艺与组织性能研究

彭飞<sup>1</sup>，胡德瑞<sup>2</sup>，陈政<sup>2</sup>，李会健<sup>1</sup>，曹云飞<sup>1</sup>，姜姗姗<sup>1</sup>

1.北京科技大学

2.安徽工业大学

本文以 360 HB 和 400 HB 级别的 NB360 和 NB400 贝氏体耐磨钢为研究目标，对一定成分的贝氏体耐磨钢基板进行热处理工艺研究，以期得到级别水平相应的优化热处理工艺，以便于为实际生产中 NB360 和 NB400 提供工艺支撑。对贝氏体耐磨钢基板的研究实验表明：基板表面只含 D 系夹杂物，等级为 1 级，心部含有 B, C, D 类夹杂物，B, C, D 类夹杂物等级分别为 0.5, 0.5, 1 级；基板的组织为下贝氏体组织加少量残余奥氏体组织。基板经过相应的热处理处理后实验结果表明：贝氏体耐磨钢基板经 890 °C 保温 25 min 后在不同冷却速度下组织和硬度均不同：在空冷的冷却条件下，基板得到的是贝氏体组织；在水冷的冷却条件下，基板得到的为板条马氏体组织；在炉冷的冷却条件下，基板得到的为珠光体和先共析铁素体组织。硬度大小比较：水冷 (438 HB) > 空冷 (415 HB) > 炉冷 (228 HB)。贝氏体耐磨钢基板在空冷 (正火) 后进行不同温度的回火实验，回火对贝氏体组织的影响不大，在 500 °C 回火下仍保留着原始贝氏体板条形态。贝氏体耐磨钢基体实现 HB360 级别 (NB360) 的优化热处理工艺为：890 °C 奥氏体化后空冷+500 °C 回火；贝氏体耐磨钢基体实现 HB400 级别 (NB400) 的优化热处理工艺为：890 °C 奥氏体化后空冷+300 °C 回火。贝氏体耐磨钢基板在水冷 (淬火) 后进行不同温度的回火实验，水冷组织从板条马氏体组织转变为 500 °C 回火后的回火屈氏体和回火索氏体为基体的组织，与基板正火后不同温度回火的硬度变化趋势相比较，在淬火后不同温度回火处理的硬度变化趋势大致相同。

关键词：贝氏体耐磨钢基板；热处理工艺；组织；硬度

#### E01-PO-46

##### 激光冲击次数对 316L 不锈钢焊接接头电化学特性的影响

李玉琴<sup>1</sup>，孟长军<sup>2</sup>，王学德<sup>1</sup>，李文林<sup>1</sup>

1.空军工程大学等离子体动力学重点实验室

2.西安文理学院

针对不锈钢焊接接头电化学腐蚀问题，采用不同激光冲击次数对 316L 不锈钢焊接接头进行表面处理，利用电化学腐蚀极化曲线测试研究了 316L 不锈钢焊接接头的电化学特性，采用金相显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM)、粗糙度、残余应力测试对焊接接头表面形貌组织和残余应力等进行观测分析，揭示了其抗腐蚀机理。结果表明：随着激光冲击次数的增加，腐蚀电流先减小后增大，在激光冲击次数为 2 次时，腐蚀电流达到最小值  $9.684 \times 10^{-7} A/cm^2$ ，且都小于未处理试样，这是由于激光冲击强化促进了表层组织细化和变形孪晶形成等微观结构变化，同时引入残余压应力，抑制了点腐蚀的萌生，阻碍点腐蚀的发展过程，有利于不锈钢焊接接头抗腐蚀性能的提高，但当激光冲击次数超过一定范围，使得表面形貌变差，粗糙度增加，点蚀坑形核几率高，腐蚀电流增大，从而导致抗腐蚀性能下降，因此合理选择激光冲击次数有利于 316L 不锈钢焊接接头抗腐蚀性能的提高。

关键词：激光冲击强化；316L 不锈钢；焊接接头；电化学特性；腐蚀机理



#### E01-PO-47

##### 离子注入晶体 Nd:SGG 平面及条形波导结构制备及特性研究

张连

泰山学院

我们利用双能氧离子注入和光刻掩膜技术相结合在 Nd:SGG 晶体制备了平面和条形光波导结构。注入条件是能量为 (6.0+5.5) MeV 的氧离子, 注入剂量分别为  $(5.0+3.0) \times 10^{14}$  ions/cm<sup>2</sup>, 条形波导宽度为 7 μm。我们利用端面耦合实验测得结果显示双能氧离子注入 Nd:SGG 晶体平面和条形光波导结构, 在 633 nm 的可见光波段无论是平面光波导还是条形光波导都可以很好的限制光的传输。平面光波导也可以很好的限制近红外波段 1539 nm 波长的光传输。我们利用聚焦微拉曼谱实验测得了衬底区和离子注入区域的拉曼谱, 发现双能氧离子注入未对晶格结构造成大的影响。

关键词: 离子注入; 光波导

#### E01-PO-48

##### Al-Mg-Si 铝合金热变形过程中微观组织演变和力学行为物理建模

赵剑威<sup>1</sup>, 王晓晨<sup>1</sup>, 杨荃<sup>1</sup>, 王秋娜<sup>2</sup>

1. 北京科技大学

2. 首钢有限公司迁安钢铁公司热轧部

本文考虑了动态回复、动态再结晶和加工硬化对热变形过程中 Al-Mg-Si 铝合金流变应力的影响。以位错理论为基础, 采用位错密度作为内部变量, 对 Al-Mg-Si 铝合金热压缩过程中流变应力行为和微观组织演变进行了物理建模, 得到了相应的本构关系。以 6061 铝合金作为研究对象, 采用 Gleeble1500 热模拟试验机在不同工况下(温度, 应变, 应变速率)进行热压缩实验, 根据实验结果校准模型中的可调参数。对比模型预测的流变应力与实验结果显示, 模型在不同工况下具有较好的预测能力。

关键词: 物理建模; 位错密度; 动态再结晶; 微观组织演变; 流变应力

#### E01-PO-49

##### 激光增材制造 Ti<sub>2</sub>AlNb 组织与性能

周英豪<sup>1,2</sup>, 李伟鹏<sup>3,2</sup>, 苏阳<sup>3</sup>, 曾广豪<sup>1,2</sup>, 张则焕<sup>1,2</sup>, 王大为<sup>1,2</sup>, 严明<sup>1</sup>

1. 南方科技大学

2. 哈尔滨工业大学

3. 深圳大学

本文主要研究了选区激光熔化制备的 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金的组织与性能。采用 XRD 对打印态的 Ti<sub>2</sub>AlNb 进行了物相分析, 并采用 SEM-EBSD 研究了打印态的微观组织、晶粒大小、晶界分布等特征。研究结果表明, 打印态的 Ti<sub>2</sub>AlNb 主要由 O 相和 β 相组成, EBSD 结果显示 O 相主要弥散分布在 β 相基体上, 说明 O 相主要是从 β 相中析出来的。平行于打印方向的平均晶粒尺寸大约在 30 μm 左右, 并且晶粒之间以大角度晶界为主。当激光能量密度为 65 J/mm<sup>3</sup> 时, 所获得的打印态的力学性能最优, 抗拉强度为 960 MPa, 断裂延伸率为 24%, 但是弹性模量较低, 仅为 90 GPa, 原因是打印态的 Ti<sub>2</sub>AlNb 合金有较多的气孔等缺陷。

关键词: 激光 3D 打印; Ti<sub>2</sub>AlNb; 微观组织; 力学性能

#### E01-PO-50

##### NbTi/Cu 多芯复合超导线集束拉拔变形规律研究

赵圣泽<sup>1</sup>, 刘君<sup>2</sup>, 唐文亨<sup>2</sup>, 孙霞光<sup>3</sup>, 吴金平<sup>1</sup>, 郭荻子<sup>1</sup>, 罗媛媛<sup>1</sup>, 张菁丽<sup>1</sup>, 杨帆<sup>1</sup>

1. 西北有色金属研究院

2. 西安理工大学

3. 西部超导材料科技有限公司

NbTi 合金作为一种典型低温超导材料, 具有高强度和良好的超导性能, 同时原材料及加工成本远低于其它超导材料, 是目前世界上实际应用最广泛和用量最大的超导材料, 常以 NbTi/Cu 多芯复合超导线材形式广泛应用于能源、交通、医疗、热核聚变、科学实验研究等诸多重要领域。目前多采用多道次集束拉拔法制备, 其成形工艺直接决定了超导线的质量和性能。且上述各领域对于 NbTi/Cu 多芯复合超导线使用安全性和稳定性有极高的要求, 因此, 需要对其变形规律进行研究, 发展 NbTi/Cu 多芯复合超导线的高性能精确成形技术。本文采用 Gleeble-3500 型热/力模拟实验机, 进行了 NbTi 合金与 NbTi/Cu

复合材料等应变速率压缩实验。研究了 NbTi 合金热变形行为及 NbTi/Cu 复合材料室温变形行为，建立了 NbTi/Cu 的室温本构关系式。采用弹塑性有限元法建立了 NbTi/Cu 多芯复合超导导线集束拉拔过程有限元模型，引入畸变因子，量化分析变形过程，探明了芯丝的不均匀变形规律，得出以下结论：（1）NbTi 合金热压缩变形在变形温度小于 700 °C 时，真应力应变曲线类似于动态再结晶型曲线；变形温度大于 700 °C 时，真应力应变曲线类似于动态回复型曲线；流变应力随着应变速率的降低和温度的升高而降低。（2）NbTi/Cu 复合材料室温压缩变形在应变速率小于 10 /s 时，真应力应变曲线类似于动态回复型曲线；应变速率大于 10 /s 时，真应力应变曲线在到达峰值后，出现一定的软化下降趋势；室温下，应变速率对流变应力的影响不大；建立了 NbTi/Cu 室温下变形的本构关系式： $\ln\sigma=6.4034+0.0322\ln\dot{\epsilon}+0.0207(\ln\dot{\epsilon})^2$ （3）得出了 NbTi/Cu 多芯复合超导导线集束拉拔过程中不均匀变形规律，芯丝间、芯丝与铜套间接触区域存在等效应力、应变突变。（4）随着铜比增加，芯丝畸变程度降低，铜比大于 1.3 后，畸变变化不明显。得出了道次加工率、定径带长度、工作锥半角、拉拔速度、摩擦系数对 NbTi/Cu 多芯复合超导导线芯丝不均匀变形的影响规律。

关键词：NbTi/Cu；多芯复合超导导线；集束拉拔；不均匀变形

## E01-PO-51

### 利用双辊薄带连铸制备的近终形超级奥氏体不锈钢铸带的组织和性能研究

郝燕森，曹光明，李成刚，刘振宇，李健，刘万春，张维娜

东北大学

本文采用双辊薄带连铸技术制备了近终形超级奥氏体不锈钢铸带，利用 OM 和 EPMA 观察和表征了其凝固行为和偏析行为，并研究了该铸带在不施加平整轧制变形+均匀化处理+冷轧变形（工艺 1）、热轧平整轧制 20%+均匀化处理+冷轧变形（工艺 2）、冷轧平整轧制 20%+均匀化处理+冷轧变形（工艺 3）和冷轧平整轧制 50%+均匀化处理+冷轧变形（工艺 4）这四种工艺条件下的组织和性能的变化规律。实验结果表明，基于双辊薄带连铸技术的亚快速凝固优势，铸带凝固组织主要为细小的枝晶组织，宏观偏析和枝晶间的共晶相得到了抑制和消除，但枝晶间的微观偏析无法避免，Fe 和 Ni 为负偏析，Cr 和 Mo 为正偏析，而 Mo 的偏析最为严重。平整轧制能促进合金元素在均匀化处理过程中的扩散，同时也对后续产品的性能至关产生重要的影响。由工艺 1、工艺 2 和工艺 3 制备得到的冷轧板得强度和塑性均比由工艺 4 得到的冷轧板的强度高，塑性也好。

关键词：超级奥氏体不锈钢；双辊薄带连铸；凝固行为；偏析行为；平整轧制；均匀化处理；冷轧变形

## E01-PO-52

### 焊后热处理对 Ti-5322 合金钨极氩弧焊接头组织和力学性能的影响

宋凯<sup>1,2</sup>，毛小南<sup>1,2</sup>，辛社伟<sup>1</sup>

1.西北有色金属研究院

2.东北大学

Ti-5322 合金是一种低成本装甲钛合金，焊接性能直接影响其使用。为此，本文对 Ti-5322 合金钨极氩弧焊接样品分别进行了 530 °C/4 h/AC 单重时效热处理和 530 °C/4 h/AC+680 °C/2 h/AC 双重时效热处理，研究了两种焊后热处理工艺对 Ti-5322 合金钨极氩弧焊接头组织和力学性能的影响。结果表明：焊态下，焊缝区和热影响区主要由细针状  $\alpha$  相和  $\beta$  相组成，焊缝区的强度和硬度明显高于基体，拉伸试样断裂于基体；单重时效热处理后，焊缝区原始  $\beta$  晶粒内细针状  $\alpha$  相几乎无变化，细小的  $\alpha$  相从残余  $\beta$  相中析出，在晶界处，出现了连续的  $\alpha$  相，导致焊缝区强度和硬度进一步提高，几乎无断裂延伸率；双重时效热处理后，晶内和晶界  $\alpha$  相明显粗化，强度和硬度略微降低，延伸率明显提高。

关键词：Ti-5322 合金；钨极氩弧焊接；焊后热处理；力学性能

## E01-PO-53

### 轨道交通用透明显示触控车窗的大尺寸曲率贴合技术

贾亚丽，丁叁叁，高鹏，钟元木，刘玉文

中车青岛四方机车车辆股份有限公司

与传统车窗玻璃产品相比，本文提供了一种集成了透明显示技术和电容式触控技术的透明显示触控车窗，在业内首次展现了未来车窗产品的可行性。本文较为系统地研究了透明显示、触控与中空玻璃的系统集成与应用技术，攻克了大尺寸“硬+软+硬”的曲率贴合工艺难题与封装难题，解决了贴合气泡、显示不良等缺陷，并经过严格的疲劳载荷与冲击震动试验以及可靠性试验，满足了轨道交通的规格要求。

关键词：透明显示；电容式触控；车窗

## E01-PO-54

### 镀锌板冲压成形过程的锌层失效微观机制研究

黄瑶<sup>1</sup>, 王雷刚<sup>1</sup>, Xiang Ma<sup>2</sup>

1. 江苏大学

2. SINTEF Industry

镀锌钢板由于良好的耐腐蚀性、焊接性能、涂装性能以及可成形性而广泛用于汽车工业。然而，镀锌金属的板材成形对这个行业提出了严峻的挑战。由于在成形过程中的大塑性变形和严重接触摩擦，导致镀锌板的镀层发生剥落、粉化、开裂及划伤等缺陷。本文使用杯突试验来研究镀锌板的成形性，以更好地理解锌层的微观失效机理。结果表明，在镀锌板的拉深过程中，每个变形区的锌层遇到不同程度的失效行为。冲头和压边圈的圆角旁边的区域更严重。在这些严重的失效区域，锌层中的残余应力显示为拉伸性质；并随着变形程度的增加而增加。在钢基材出现任何损伤之前，镀锌层会过早破裂；从而导致粉化，剥落和最终失效。该研究结果可为改善镀锌板的成形性提供理论指导。

关键词：激光 3D 打印；Ti2AlNb；微观组织；力学性能

## E01-PO-55

### 包覆挤压铝棒的快速凝固 AA7090 表面层与内部 AA6082 的结合强度分析

Vegard J. Bjerkestrand<sup>1</sup>, X. Ma<sup>2</sup>, C. J. Simensen<sup>2</sup>, R. Østhus<sup>3</sup> and H. J. Roven<sup>1</sup>

1. Norwegian University of Science and Technology

2. SINTEF Industry

3. SINTEF Raufoss Manufacturing AS

包覆挤压是一种可用于生产具有良好复合性能的轻型零部件的工艺。本文目的是使用此方法生产一种复合材料，其表面层是超高强度铝合金 AA7090，而心部是具有高延展性的普通 AA6082 铝合金。AA7090 的材料是通过快速凝固制备，以获得超微细组织和超平衡第二相。由于其表面层的超高强度，包覆挤压得到的棒料可以在表面层或芯部与表面层之间的界面处发现一些裂纹。这可能是由于温度过高和挤出速度太快造成的。然而，包覆挤压棒的一些区域已经实现了两种不同合金之间的冶金结合。棒材的心部测得维氏硬度平均值是 48，而表面层具有高达 117 的维氏硬度。通过提高包覆挤压和热处理工艺，这种复合材料具有非凡的潜力。