

C01.粉末冶金

分会主席：刘文胜、庄志刚、钟景明、程继贵、肖志瑜、曾克里、马运柱

C01-01

粒径可控的3D打印金属粉末—制备、表征与特色平台

聂祚仁，宋晓艳，贺定勇

北京工业大学材料科学与工程学院

随着目前国内金属材料3D打印技术的发展，对高端3D打印金属粉末的需求越来越紧迫。获得高质量3D打印制品的特种粉末批量制备技术及其精细表征分析方法，是目前金属材料增材制造领域的关键科学技术问题。本报告在概述现有的3D打印用金属粉末制备方法的基础上，重点介绍北京工业大学近年来在3D打印特种金属粉末材料方面的工作进展。在北京市3D打印科技创新与产业计划的培育下，北京工业大学集中开发出细颗粒球形高活性纯金属、高流动性难熔金属及预合金、纳米微结构金属/陶瓷复合材料等多种3D打印用特种粉末的批量制备新技术，在保证高纯度的基础上，实现了单峰、双峰、小粒径、窄分布等特种粉末的粒度调控。建立了激光吸收率与粉末颗粒表面特征参量及微观组织结构之间的关系模型，形成了系统的3D打印用金属粉末的量化表征分析方法。对应减少表面球化、高致密、均匀晶粒组织等高性能打印制品的要求，提出了3D打印特种金属粉末材料的协同设计原则。基于近年开展的研发工作，北京工业大学已建成3D打印纯金属、预合金、多元合金、金属/陶瓷复合材料等特种粉末批量制备与检测分析高端平台，包括国内首个快速换型的3D打印粉末气雾化制粉平台、高纯预合金棒材熔炼、纳米复合粉原位合成-团聚造粒集成系统、粉末特性全方位量化表征等多种特色设施装备。前期研发成果已获得多项授权发明专利，研制的特种粉末在硬质合金异形制品、医疗植入等3D打印制造中得到应用，并可望为满足航空、医疗、能源、精密加工等高端领域需求，设计研发特色高质量的3D打印金属材料。

关键词：3D打印；特种金属粉末；粒径调控；气体雾化；原位合成；激光吸收率

C01-02

材料与装备

白书欣

国防科技大学

C01-03

钨铜梯度界面的第一性原理设计

梁超平，龚浩然，刘文胜

1.中南大学粉末冶金研究院

2.轻质高强结构材料国家级重点实验室

钨是所有金属元素中熔点最高、蒸汽压最低的元素，同时模量高、抗辐射、耐腐蚀，非常适用于高温、高压、高辐照等极端服役环境。铜延展性好，导热性和导电性高，机械性能优异。因而，钨与铜合金的连接件被广泛应用于航天、航空、电子等行业。为了获得更好的性能，研究者希望钨铜有更好的结合的同时又能保持钨与铜的各自的优异性能。由于钨铜两相不互溶，且钨与铜之间巨大的性能差异，导致钨铜材料中存在严重的安全问题，如铜的热膨胀系数是钨的热膨胀系数的四倍($\alpha_{Cu} \approx 4\alpha_W$)，铜的强度杨氏模量则仅仅只有钨的三分之一($E_{Cu} \approx 0.3E_W$)。差距巨大的热膨胀系数和杨氏模量导致在受到高热载荷时钨铜界面上出现残余应力和热应力，最终导致空位的产生和融合，产生大量裂纹，影响材料的寿命和应用，甚至导致材料直接失效。使用梯度界面能够缓解钨与铜之间的巨大性能差距，是实现钨与铜可靠连接的有效手段，但现阶段的研究工作都只是为了尽量缩小两者之间的性能差距。为此，梯度层数已经由从1层增加到4层。针对这一现状，我们从材料的本征电子结构出发，利用第一性原理计算开展了钨铜梯度界面设计。我们首先通过团簇展开预测钨铜之间的固溶体形成能力以及金属间化合物的稳定性，从而在梯度层中最大化梯度层界面两端的固溶。其次，利用自主开发的德拜模型工具软件计算了钨铜的物理性能，通过匹配不同梯度层间的强度、热膨胀系数、热导等关键参数，缩小两者之间的性能差距，减小了残余应力和热应力。同时，我们计算了梯度材料中界面功函数变化规律，得到不同晶体取向梯度材料界面的稳定性。最后，通过线性优化以上模拟结果，设计出了梯度成分为 $W_8Cu_1 / W_7Cu_2 / W_6Cu_3 / Cu_6W_3 / Cu_8W_1$ 的五层钨铜梯度材料，实现了钨铜的高品质连接。

关键词：钨铜梯度界面；第一性原理；强度

C01-04

Grain Boundary Wetting and Nanoprecipitation in a Heterogeneous Structured Cu-5at.%Zr Alloy

周登山¹, 杨超^{1,2}, Ondrej Muránsky^{1,3}, 张德良

1.东北大学

2.中科院上海应用物理研究所

3.Australian Nuclear Science and Technology Organization

A Zr-rich intermetallics that wets grain boundaries of the particle-depleted regions is first observed in a heterostructured Cu-Zr alloy produced by a combination of ball milling, spark plasma sintering and hot rolling. After cooling the as-rolled sample from an elevated temperature with water, dense nanoprecipitates are formed within Cu grains of the particle-depleted regions in which the grain boundaries are wetted by the Zr-rich intermetallics. Such microstructural features significantly differ from those observed in the sample processed by a combined elevated temperature annealing and furnace cooling. In comparison with the water quenched sample, larger Zr-rich intermetallics and much less nanoprecipitates are along grain boundaries and within Cu grains of the particle-depleted regions in the furnace cooled sample. In addition, the particles present in the particle-rich regions of the furnace cooled sample have larger sizes than those in the water quenched sample. As such very different microstructural characteristics, the water quenched and furnace cooled samples exhibit distinctly different tensile properties and fracture behaviors.

关键词: Grain boundary wetting; Nanoprecipitates; Heterogeneous Metallic Materials

C01-05

简易合成均匀混合的 Fe-Y₂O₃ 纳米磁性复合粉末

张德印, 秦明礼, 吴昊阳, 贾宝瑞, 曲选辉

北京科技大学

采用一种简单的基于溶液燃烧合成的方法成功制备出 Y₂O₃ 颗粒均匀分布的 Fe-Y₂O₃ 纳米磁性复合粉末。首先, 通过溶液燃烧合成制备出混合氧化物粉末 (Fe₂O₃ 和 Y₂O₃)。接着, 通过氢气还原混合氧化物粉末制备出均匀混合的 Fe-Y₂O₃ 纳米复合粉末。对 Fe-Y₂O₃ 纳米磁性复合粉末的相组成, 比表面积, 形貌和磁性能进行了详细表征。研究了还原温度对所制备的 Fe-Y₂O₃ 纳米复合粉末的相组成和形貌的影响。在 400°C 还原得到的 Fe-Y₂O₃ 纳米复合粉末的平均颗粒尺寸为~34.2nm, 饱和磁感应强度为 161.9 enu/g。鉴于这种简单快捷的制备方法将有助于制备其他金属/氧化物纳米复合粉末。

关键词: 溶液燃烧合成; Fe-Y₂O₃ 纳米复合材料; 磁性能

C01-06

行星齿轮的粉末锻造及其性能研究

江峰, 王邃, 王琪, 王华磊, 张冰清, 孙军

西安交通大学

在粉末冶金行业, 特别是产品大规模应用于汽车领域、机器人行业时, 迫切的要求是降低成本。利用粉末冶金工艺的近净成形特点, 可降低零部件的生产成本, 使得粉末冶金零件在汽车、机器人中的应用迅速扩大。然而, 没有经过锻造或者表面致密化的粉末冶金零部件, 受限于材料的残留孔隙使得抗疲劳强度与耐磨性比锻钢零部件低。粉末锻造是由粉末冶金与闭模锻造相结合形成的一种新材料加工技术或新型金属成形工艺, 它将制造近终或最终形状零件 (粉末冶金) 和高的材料力学性能 (锻造) 结合起来, 填补了常规粉末冶金与锻造工艺间的空隙, 并能获得和钢锻零件相媲美的力学性能。

本文选择 Q61 预合金粉(4600), 通过粉末压制、脱脂、烧结工艺获得标准试块预压件, 然后进行闭模热锻获得致密的标准块, 并进行硬度、拉伸、疲劳性能测试, 采用热模拟试验机进行不同温度、不同应变速率下得高温热压缩试验, 获得该材料的热锻工艺参数。重新设计加工了一种行星齿轮的粉锻预压件, 热锻获得行星齿轮零件, 并对于其组织和性能进行了研究, 结果表明获得的行星齿轮密度基本完全致密 (7.8g/cm³), 空冷时硬度 HRC29-32, 淬火时硬度 HRC58-62, 尺寸误差在 ±0.1mm, 空冷较低的硬度为后续整形工艺提供了保证, 后续淬火获得的高硬度节省了渗碳工序。该工作为粉末锻造技术在我国工业界的发展提供了有益的探索。

关键词: 粉末锻造; 行星齿轮; 热锻工艺; 致密化。

C01-07

γ -TiAl 粉末板材的制备和焊接性能研究

卢正冠, 吴杰, 徐磊, 李一平, 杨锐, 郭瑞鹏

中国科学院金属研究所

轻质高温材料 γ -TiAl 板材在航空领域有很大的应用空间。采用粉末冶金工艺可以制备出组织和性能均匀的 TiAl 坯料, 采用粉末制坯+轧制工艺可以有效改善 TiAl 合金难加工难变形的特点。本文研究了 TiAl 预合金粉末的制备、粉末除气、粉末坯料的轧制等工艺过程对 Ti-47Al-2Cr-2Nb-0.15Mo (at.%) 板材性能的影响。为了扩大 TiAl 板材的应用范围, 进行了 TiAl 板材在不同条件下的电子束焊接实验。结果表明, 采用粉末制坯+热变形工艺制备的 TiAl 板材性能良好, TiAl 粉末合金的焊接性能对温度和粉末的致密度响应敏感。焊接前热处理可以有效改善焊接性能。通过焊后热处理, TiAl 粉末板材的强度和拉伸强度均得到改善。

关键词: γ -TiAl; 粉末冶金; 热等静压; 板材; 电子束焊接

C01-08

元素粉末制备 MAX 相多孔材料及其性能研究

刘新利

中南大学材料科学与工程学院

无机多孔材料中, 金属材料的抗高温氧化和抗腐蚀性差, 陶瓷材料存在脆性和难加工性等, 限制了无机多孔材料的进一步发展和应用。三元层状化合物 $M_{N+1}AX_N$ 相特殊的晶体结构使得材料呈现较好的弹性, 具有相对低的热膨胀系数, 好的导热和导电性, 以及很好的耐腐蚀性。本文通过元素粉末反应合成工艺, 制备出了高纯度、高孔隙率的 Ti_3SiC_2 、 Ti_3AlC_2 和 Ti_2AlC 等多孔材料, 以及非对称多孔膜材料; 以 Ti_3SiC_2 为例, 采用各种现代检测手段对 Ti_3SiC_2 多孔材料的孔结构性能, 力学性能, 抗酸碱腐蚀性能进行了深入研究。同时, 通过分段烧结和数学计算等手段, 探讨了元素粉末反应合成 Ti_3SiC_2 多孔材料的造孔机理。最后, 简要介绍了 Ti_3SiC_2 多孔材料潜在的应用价值。

C01-09

钴基硬质合金制备技术发展动态和展望

徐涛

中钨高新

C01-10

碳表面树脂包覆对石墨/铜复合材料的显微组织和性能的影响

肖鹏

中南大学

C01-11

钨铜粉末轧制的有限元模拟研究

崔利群¹, 韩胜利¹, 胡可¹, 李达人², 胡建召³, 刘祖岩³

1. 广东省材料与加工研究所

2. 广东理工职业学院

3. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

本文对粉末轧制过程做了假设简化, 建立钨铜粉末轧制有限元模拟模型, 利用 Abaqus 有限元分析软件对钨铜粉末轧制成形的规律进行了研究。模拟结果表明: 钨铜合金粉末轧制过程中, 轧辊辊缝越大, 轧制所得板材相对密度越大, 粉末横向流动位移越小; 轧制速度越快, 所得板材相对密度越小, 粉末横向位移也就越小, 温度场分布越均匀; 轧制温度越高, 板材相对密度越大, 粉末流动性越好。

C01-12

应力诱发 HCP 到 FCC 相变的原子尺度研究

倪颂, 赵衡旅, 宋旻

中南大学

一般来说,金属及合金的塑性变形主要是通过位错运动和孪生变形完成,即位错机制及孪生机制。研究表明,材料在变形过程中产生相变同样可以作为一种协调变形的有效方式。通过控制材料在变形过程中发生的相变可以成为一种提高材料力学性能的有效途径,而对相变机制的深入理解则可为通过控制相变来提高金属与合金的力学性能提供关键的科学依据。本研究通过对 HCP 结构金属 Zr、Hf 进行轧制变形诱发 HCP→FCC 的相变,通过高分辨透射电子显微分析从原子尺度理解相变机制。结果表明,相变分为两种类型,一种为基面型,其两相界面平行于 HCP 基体的基面;另一种为柱面型,其两相界面平行于 HCP 基体的柱面。基面型相变为肖克莱不全位错在每隔两层基面上滑移导致,且诱发相变的不全位错为随机排列,分别来源于<a>型螺位错以及<a>型 60°混合位错的分解;而柱面型相变通过一种“原子迁动-剪切机制”完成。

关键词:相变;位错;不全位错

C01-13

添加不同 Al₂O₃/ZrO₂ 含量对 93W 合金性能与组织的影响

刘波¹, 李小强^{1,2}, 胡可¹, 黄冠翔¹

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.华南理工大学 金属材料高效近净成形技术与装备教育部重点实验室

在 93W-4.9Ni-2.1Fe 高密度钨合金中同时加入不同含量的纳米 Al₂O₃/ZrO₂ 陶瓷粉末,通过分步球磨技术与二次混合球磨处理粉末,随后冷等静压成型,氢气气氛下烧结和氮气气氛下后续热处理。并通过光学显微镜、SEM、TEM、显微硬度、拉伸和压缩实验分析纳米陶瓷粉末对 93W 合金显微组织和力学性能的影响规律。研究显示,ZrO₂、Al₂O₃ 主要分布在 W-M 界面与粘结相中,只有少量分布在 W-W 界面与 W 晶粒内,且随着陶瓷相含量的增加,钨晶粒的形状由最初的近球形变为椭圆形,到 3wt.%含量则变为不规则多面体。这主要是由于 Al₂O₃ 与 ZrO₂ 颗粒的加入改变了钨颗粒某些晶面的能量状态,使晶粒沿着某些方向生长得更快。随陶瓷相含量的增加钨合金的二面角、W-W 连接度总体呈上升趋势;而钨晶粒尺寸则呈减小趋势,加入 3wt.% Al₂O₃ 与 ZrO₂ 后钨晶粒尺寸则由未加入时的 47.2μm 下降为 23.22μm;制备的钨合金硬度则相应由不含陶瓷相时的 298.2HV 增加到了 350.3HV。Al₂O₃ 和 ZrO₂ 含量的增加虽在一定程度上降低了钨合金的抗拉强度和伸长率但压缩屈服强度略有上升。

关键词:高密度钨合金;纳米陶瓷粉末;显微组织;力学性能

C01-14

SiC 晶须添加对 WC-10Co 硬质合金组织和性能影响的研究

李剑峰^{1,2}, 程继贵^{1,2}, 陈鹏起^{1,2}

1.合肥工业大学

2.安徽省粉末冶金工程技术研究中心

硬质合金是由难熔金属硬质化合物(WC、TiC、TaC、NbC 等)和金属粘结相(Co、Ni、Fe 等)组成的一类合金,属于金属陶瓷。因其具有高硬度和高强度,被称为现代工业牙齿,在机械、冶金、矿山、精密仪器、军事等工业中占有极其重要的地位。但由于传统的硬质合金韧性不高,工作时工件易发生开裂、破断等早期失效现象,并且其韧性和硬度之间存在尖锐的矛盾,导致硬质合金的应用范围受到了限制。为了进一步提高硬质合金的综合性能,向合金中添加晶须作为增强相被认为是一种可行的方法。本实验以 WC 和 Co 为原料,VC 和 Cr₃C₂ 为晶粒长大抑制剂, SiC 晶须为增强相。通过对成形压坯和烧结体的密度、显微组织、力学性能的分析,考察不同含量 SiC 晶须对合金的影响。实验结果表明, SiC 晶须在合金中分布均匀,未发生团聚现象。当 SiC 晶须的添加量为 0~0.4 wt.%时,样品的相对密度变化不大,均大于 99%。而随着 SiC 晶须的进一步添加,样品的相对密度逐渐降低。合金在碳化硅添加量为 0.4 wt.%时具有最高的硬度,其洛氏硬度达到 92.3 HRA。而当碳化硅晶须的添加量为 0.6 wt.%时,合金具有最高的抗弯强度和断裂韧性,其分别达到 2270 Mpa 和 13.4 MPa·m^{-1/2}。SiC 晶须的加入使得合金断裂时,产生了晶须拔出,消耗了更多的能量,从而使得材料获得了增强补韧性的效果。

关键词:WC-10Co; SiC 晶须;微波烧结;力学性能;显微组织

C01-15

梯度结构金属纤维多孔材料的吸声性能

王建忠, 敖庆波, 马军, 康新婷, 吴琛, 葛渊, 汤慧萍

Northwest Institute for Non-ferrous Metal Research

金属纤维多孔材料是一类结构功能一体化材料,可被广泛应用于过滤分离、高效换热、表面燃烧、阻尼减振、电磁屏蔽、电极材料、催化剂载体等领域。由于其具有优异的吸声性能,还可用于环境或仪器设备的噪声处理。对于金属纤维多孔材料而言,增加其厚度可显著提高材料的吸声性能,尤其是高频吸声性能。然而,对于限域空间的噪声处理,材料厚度受到严格的限制,因此需要通过调整并优化材料的结构来提高其吸声性能。本文采用纤维直径为 $8\sim 20\mu\text{m}$ 的316 L不锈钢纤维为原料,通过牵切、铺制、烧结等工序制备了厚度为 $1\sim 3\text{mm}$ 、孔隙率为58.8%、67.7%和76.4%的不锈钢纤维多孔材料,然后采用“叠加+烧结”法制备了2层和3层梯度结构不锈钢纤维多孔材料,最后采用B&K声学阻抗管测试了多孔材料在声波频率为 $50\text{ Hz}\sim 6400\text{ Hz}$ 范围内的吸声系数。研究表明:梯度结构的界面对多孔材料的吸声性能产生显著影响,使得其吸声性能远高于单层结构多孔材料的吸声性能。对于2层梯度结构不锈钢纤维多孔材料而言,材料厚度相同且声波频率低于 3000 Hz 时,第一层材料的孔隙率应低于第二层材料的孔隙率;若第一层材料的孔隙率相同,则第二层的孔隙率越高,材料的吸声性能越好。对于3层梯度结构不锈钢纤维多孔材料而言,具有“高孔隙率+中孔隙率+低孔隙率”梯度结构的多孔材料的吸声系数最高。

关键词:多孔材料;吸声系数;声波;孔隙率;特征阻抗

C01-16

选择性激光熔化成形 TC4 钛合金显微组织与力学性能研究

齐蒙超,高靖博,赵晓丽,张德良*

1 东北大学材料科学与工程学院

2 材料各向异性与织构教育部重点实验室

以Ti-6Al-4V(TC4)合金球形粉末为原料,采用选择性激光熔化成形(SLM)技术制备了具有一定形状的TC4钛合金试样。对试样的显微组织和力学性能,热处理的影响以及样品力学性能的各向异性进行了研究。结果表明:SLM成形的TC4拉伸试样具有针状 α' 相马氏体组织,拉伸强度可达到 1064 MPa ,延伸率达 10.9% 。 700°C 退火处理后试样的延伸率提高到 11.4% ,但拉伸强度稍微降低到 972 MPa 。固溶时效处理提高试样的强度到 1097 MPa ,但断裂前伸长率下降到 9.2% 。SLM成形的TC4钛合金盒子壁具有针状 α' 相马氏体组织,但它的力学性能具有明显的各向异性。退火状态下,垂直于激光扫描方向上由于层与层之间的结合性较差,延伸率很低,仅为 1.6% ,远小于平行于激光扫描方向上材料的延伸率(10.1%)。本报告对显微组织与力学性能之间的关系进行了讨论。

关键词:钛合金;选择性激光熔化成形(SLM);金属3D打印;显微组织;力学性能

C01-17

等离子喷涂陶瓷熔融粒子快速凝固过程中外延生长行为研究

姚树伟^{1,2},李长久²,马运柱¹,刘文胜¹

1.中南大学

2.西安交通大学

本文以等离子喷涂工艺为例,研究了陶瓷熔融粒子在快速凝固过程中的外延生长行为。试验采用等离子喷涂技术,在同质与异质基体上分别沉积 Al_2O_3 、 TiO_2 与YSZ等典型陶瓷扁平粒子。通过EBSD与TEM表征扁平粒子的组织结构,系统地研究了沉积温度、晶格失配度以及晶体取向对陶瓷粒子快速凝固过程中外延生长行为的影响规律。研究发现,只有当沉积温度达到某一温度时,陶瓷扁平粒子才能发生同质外延生长,而扁平粒子能否发生异质外延生长还取决于粒子与基体之间的晶格匹配性。基于快速凝固理论,本文建立了陶瓷熔融粒子快速凝固过程中外延生长的预测模型,并研究阐明了熔融粒子在快速凝固过程中外延生长的机制。

关键词:等离子喷涂;陶瓷;熔融粒子;快速凝固;外延生长

C01-18

高纯难熔金属研究现状与发展趋势

曲选辉,章林,秦明礼

1.北京材料基因工程高精尖创新中心

2.北京科技大学新材料技术研究院

难熔金属有良好的高温强度,对熔融碱金属和蒸气有良好的耐蚀性能,在高温下对原子扩散可以起到有效的阻隔作用。

现代微电子、半导体照明等产业用大型晶体生长、镀膜等高端装备的发展对大规格难熔金属坩埚、热场元件和高纯靶材提出了越来越高的要求。大规格高纯钨、钼、铼等难熔金属制品（包括钨管/钨坩埚、钨钼铼高温热场元件、高纯靶材等）已成为上述现高端装备的关键部件和材料，是难熔金属行业的高端产品。我国钨、钼、铼等难熔金属资源相对丰富，但深加工研发起步晚，致使我国的出口多以初级产品和中间产品居多，而难熔金属制品品种少、规格小、精度低、综合性能差，高品质产品主要依赖从国外进口，严重制约了我国优势资源的高效利用和高新技术行业用高端装备的国产化和升级换代。

本报告简要介绍了高纯难熔金属的性能特点、应用领域和市场前景，重点介绍了大尺寸钨管/钨坩埚、钨板、钼板、铼板、高纯钨靶和钨钛合金靶材的国内外技术水平和研究现状。在系统分析国内外大尺寸高纯难熔金属制品在材料纯度、晶粒尺寸及其均匀性、结晶取向等方面差异的基础上，提出我国发展高品质大规格难熔金属制品需重点研究高纯难熔金属中杂质元素的存在形式、走向及作用规律，大规格难熔金属制品烧结和形变过程中的组织演化规律及精确调控，超高纯钨及钨合金靶材晶粒非均匀长大机理及晶粒尺寸控制等科学问题，需重点攻克原料提纯，制备加工过程防脏化，大尺寸制品高温烧结致密化、形变与晶粒均匀性控制，高精度形变加工及精密制备等关键技术。

C01-19

超细/纳米结构硬质合金涂层的制备与耐磨耐蚀机理

宋晓艳, 王海滨, 刘雪梅, 吕皓, 严细锋

北京工业大学

传统粗晶 WC-Co 类硬质合金涂层晶粒组织的超细/纳米化, 可使其获得更高的表面质量、显著提升的结合强度和硬度、以及更强的耐磨耐蚀性能, 是应对日益复杂工况、高性能需求等技术挑战的重要途径。本文从喷涂材料设计制备、涂层高性能化机理等方面介绍了本组在超细/纳米结构 WC 基硬面材料领域的研发工作进展。基于前期建立的超细/纳米 WC-Co 类复合粉末的原位合成技术, 通过引入强化相或合金元素, 调节晶粒尺寸及其分布, 优化喷涂颗粒结构等手段, 实现了低脱碳、高致密、具有强耐磨耐蚀性能的超细/纳米结构硬质合金涂层的批量制备。在此基础上, 提出了超细/纳米结构硬质合金涂层获得高耐磨性能的关键在于脱碳含量及其分布、粘结相组成、相界面特征等因素的优化调控, 揭示了外加载荷作用下影响金属陶瓷涂层塑性变形、断裂行为的关键因素(碳含量、晶粒尺寸分布等)及其与耐磨性能的关系规律; 并利用 CoCr 金属间化合物作为 Cr 元素载体实现了其同时在陶瓷基体与金属粘结相中的均匀分布和固溶, 有效降低了二者间“原电池腐蚀”驱动力, 使涂层耐蚀性能获得大幅提升。目前, 研发的系列超细/纳米结构热喷涂材料已应用于风机叶片、柱塞、大型轴辊等工程部件的表面防护。

关键词: 原位合成技术; 超细/纳米结构; 纳米粉末造粒; 硬质合金涂层; 耐磨耐蚀性能

C01-20

增材制造钛镍合金的相转变行为及其力学性能

卢海洲, 杨超

华南理工大学

钛镍合金属于形状记忆合金的一种, 其超弹性行为、形状记忆效应好, 耐磨性能、耐蚀性能突出, 具有良好的生物相容性, 目前已应用于航空航天、机械、能源、生物医学等领域。由于钛镍合金的可加工性能较差, 运用传统方法(铸造、挤压、切削等)成形复杂结构的功能构件存在困难。近年来, 增材制造的快速发展为直接制备结构复杂的钛镍合金构件提供了可能。选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)作为增材制造技术的一种, 利用金属粉末在激光束的作用下完全融化后快速凝固而成形零件, 适合内部结构复杂、存在多孔结构等传统加工技术难以实现的复杂构件的制造。鉴于此, 本文以气雾化钛镍合金粉末为原材料, 基于 SLM 技术, 在铺粉厚度一定的情况下, 系统研究了工艺参数(激光功率、扫描速度、扫描间距等)对成形件致密度、相转变行为的影响。结果表明在较低激光功率, 适当扫描速度下能够获得孔洞少, 且不存在明显微裂纹的近全致密(致密度 $\geq 98.5\%$)构件。此外在其它参数相同的前提下, 研究了激光功率、激光扫描速度两个参数变化对钛镍成形件相转变行为的影响, 发现扫描速度增大, 成形件的相转变温度范围增大, 相变热循环稳定性减弱。对成形件微观结构进行表征, 结果表明基体包括胞状晶和柱状晶, 由 CsCl 结构的 B2 奥氏体相、畸变单斜立方的 B19' 马氏体相和立方结构的 Ti_2Ni 相组成。通过压缩力学性能实验表明, 其屈服强度 $>1300MPa$, 断裂强度 $>2000MPa$, 断裂延伸率 $>28\%$ 。研究结果表明, 通过调控工艺参数, SLM 技术可以直接制备具有良好综合性能的钛镍合金, 为进一步制备复杂结构的高性能钛镍合金零件提供了一种新方法。

关键词: 增材制造; 钛镍合金; 组织结构; 相转变行为

C01-21

粉末粒度分布优化理论分析及其在粉末高温合金中的应用

叶显爵, 李云平

中南大学

粉末堆积行为对于粉末的烧结性能和材料的性能起着重要的影响。本研究考虑了松动效应, 壁效应和楔入效应, 提出了一种新的双峰粒度分布的粉末填充理论。该理论被应用于粉末镍基高温合金中, 采用粗颗粒和细颗粒的混合粉末进行烧结。用光学显微镜 (OM) 和电子背散射衍射 (EBSD) 对真空热压烧结 (HP) 合金的显微组织进行了观察。发现该理论的预测结果与实验结果非常吻合。细颗粒填充到粗颗粒之间的空隙中使得含有适量的粗颗粒和细颗粒的混合粉末的烧结性能提高。详细分析了具有不同粒度分布的粉末烧结的合金的拉伸曲线和断口形貌, 表明了本理论的可靠性更高。

关键词: 粉末冶金; 高温合金; 松装密度理论; 烧结

C01-22

W 元素添加方式对粉末冶金气门座圈材料组织和性能的影响

陈闻超^{1,2}, 程继贵^{1,2}, 徐家兵¹

1. 合肥工业大学

2. 安徽省粉末冶金工程技术研究中心

粉末冶金气门座圈材料具有成形尺寸精度高、合金选用和制备工艺灵活等优点, 在目前市场上应用最为广泛。而随着压缩天然气 (CNG) 的使用和发动机尾气排放标准的提高, 对气门座圈材料提出了更高的要求, 如需承受高温、硫和水蒸气腐蚀及无铅的润滑的工作条件, 而传统的基体强化型粉末冶金材料因过早磨损无法满足性能要求, 在其基础上加入硬质粒子制备的硬质粒子扩散强化型粉末冶金材料受到了越来越多的重视。钨作为一种重要的硬质粒子, 可以提高铁基材料的硬度、耐磨性和高温力学性能, 其加入方式对铁基烧结材料的组织性能有着明显的影响。传统方式是采用微米级的钨粉和铁粉以及其他原料粉末通过机械混合获得供压制的混合料, 均匀性较差。本文拟开发一种面向 CNG 燃料发动机应用的含 W 粉末冶金气门座圈材料, 并考察 W 元素的不同加入方式和制备工艺对其性能的影响。实验设计以还原铁粉和单质金属粉末等为主要原料, 在牌号为 V513 基体强化型粉末冶金气门座圈材料体系 (Fe-2Cu-0.6Mo-0.9C) 中加入 2wt% 的钨。分别以纯 W 粉和预扩散合金化 W-Fe 粉两种方式将 W 元素引入粉末混合料中, 经压制、烧结制备了气门座圈材料试样。通过对成形压坯和烧结体的密度、显微组织、力学性能的分析, 考察了不同 W 元素的加入方式, 以及成形烧结工艺参数等对材料组织性能的影响。实验结果表明, 添加预扩散合金化 W-Fe 粉的烧结体具有最好的综合性能, 烧结体的密度可达 7.09g/cm^3 , 硬度为 98HRB, 抗拉强度为 448MPa, 压溃强度为 910MPa, 综合性能超过目前广泛应用的 V513 气门座圈材料 ($6.5\sim 6.9\text{g/cm}^3$, HRB80, 压溃 735MPa)。此外, 以预扩散合金化处理的 W-Fe 形式加入 W 元素, 可以使烧结体的组织更为均匀, 减少 W 元素的团聚, 与加入纯 W 粉制备的烧结体比较, 其抗热冲击性能、摩擦磨损性能及耐腐蚀性能有明显的提高。

关键词: 压缩天然气发动机; 粉末冶金气门座圈; W 合金粉末; 显微组织; 性能

C01-23

高温压缩对烧结钼显微组织及性能的影响研究

王伏, 周增林

北京有色金属研究总院

采用 Gleeble 3500 型热—力学模拟试验机, 在 1200°C 、变形速率 0.1s^{-1} 的条件下对 $\phi 8\times 12\text{mm}$ 烧结钼试样进行了高温压缩塑性变形, 变形量达到 50%。采用排水法、维氏硬度计、金相显微镜 (OM) 和 X 射线衍射 (XRD) 分别对烧结态和变形态钼试样进行密度、维氏硬度、显微组织和结构的测定及分析。结果表明, 钼试样经高温压缩变形后致密度从 95.9% 提高至 99.4%, 接近全致密。维氏硬度 HV10 由 $174.5\pm 6.8\text{MPa}$ 明显提升到 $224.1\pm 21.0\text{MPa}$, 增幅达 28.4%; 硬度波动百分比由 7.8% 增大至 18.7% 即硬度分布均匀性降低, 且硬度分布呈现一定规律性, 结合金相显微组织表明变形态样品中存在难变形区、自由变形区和易变形区。同时, 发现变形态样品组织中的孔隙数量、尺寸及晶界处孔隙密度均明显降低, 存在着含有大量亚晶结构的“层片状”晶粒, 晶界密度大大提高, 这也正是变形态样品致密度提高、硬度增加的原因所在。XRD 结构分析显示, 烧结态钼样品中存在一定强度的 $\langle 113 \rangle // \text{ND}$ 纤维结构, 而变形态钼样品中的结构种类增多, 包括 $\{112\}\langle 111 \rangle$ 铜型结构、 $\{001\}\langle 100 \rangle$ 立方结构、 $\{001\}\langle 110 \rangle$ 旋转立方结构和残余的 $\{113\}\langle 111 \rangle$ 烧结结构, 这些结构与高温压缩钼性能之间的关系有待进一步研究。

关键词: 钼; 高温压缩; 维氏硬度; 显微组织; 结构

C01-24

固态再生 H62 黄铜的研究

周钰雨^{1,2}, 巫双骥^{1,2}, 李国平³, 张德良^{1,2}

1. 东北大学材料科学与工程学院
2. 材料各向异性与织构教育部重点实验室
3. 莱芜职业技术学院, 山东莱芜

把回收的精密线切割用的 H62 铜丝切成短丝, 随后通过等离子烧结技术 (SPS) 进行压坯制备, 再利用 200 吨多功能固结系统对压坯进行热挤压制备 H62 黄铜固态再生样品, 最终对制品的显微组织和力学性能进行表征分析。在制备过程中, 直接利用原始丝材, 无需熔炼或者球磨制粉, 低能耗高回收率固态再生 H62 黄铜丝。获得的块体样品具有较高的抗拉强度 (400MPa) 及优良的延伸率 (39%)。显微组织分析表明, 再生 H62 黄铜样品的显微组织主要由 α 相和 β 相两相组成。拉伸断口及其纵截面扫描电镜观察发现: 再生 H62 黄铜属于混合断裂形式, 在断口纵截面观察到明显的沿拉伸方向的二次裂纹, 说明挤压变形后 H62 丝材之间的界面结合还不能满足大量塑性变形的要求, 造成应变集中和局部断裂。总的来说, 利用等离子烧结技术 (SPS) 和热挤压相结合的工艺方法可以制备高质量的 H62 铜块体样品, 成功实现 H62 铜丝快速高效回收。

关键词: 黄铜; 金属材料固态再生; 粉末冶金; 显微组织; 力学性能。

C01-25

激光选区熔化 (SLM) 成形石墨烯纳米复合 K418 高温合金组织、性能及其强韧化机制

陈祯^{1,2}, 魏培^{1,2}, 魏正英¹, 杨喜岗¹, 何成¹, 张丽娟², 卢秉恒^{1,2}

1. 西安交通大学
2. 西安增材制造国家研究院有限贵公司

本文采用无水乙醇超声振荡分散和介质阻挡放电等离子体辅助球 (Dielectric Barrier Discharge Plasma Assisted Milling, DBDPAM) 磨技术制备了石墨烯增强 K418 镍基高温合金纳米复合材料 (GNPs/K418-MMC), 并采用激光选区熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 成形工艺制备了纳米复合材料。采用 Materials Studio 数值模拟和 SLM 工艺实验的相结合的方法, 研究 GNPs/K418-MMC 纳米复合材料 SLM 成形过程中相形成、分布和界面反应对复合材料组织性能的影响, 揭示石墨烯增强增强 K418 复合材料的界面反应机理和强韧化机制。利用扫描电子显微镜 (SEM)、透射电子显微镜 (TEM)、能谱仪 (EDS)、X 射线衍射 (XRD) 和拉曼光谱等手段研究了 SLM 成形 GNPs/K418-MMC 试样的显微组织和物相组成。结果表明, SLM 成形过程中, 石墨烯与 K418 合金中的 Mo 发生了界面反应, 生成 Mo_2C 和 Mo_3C_2 等碳化物, 在晶界和晶内弥散分布, 而残余的石墨烯由于 SLM 成形过程极高的冷却速度而保留在基体内弥散均匀分布, 使得 SLM 成形后的 GNPs/K418-MMC 试样具有更高的室温和高温力学性能和显微硬度。

关键词: 激光选区熔化成形; 石墨烯; K418 高温合金; 纳米复合; 强韧化

C01-26

中温化学气相沉积 Ti(C,N)涂层的集成计算材料工程

杜勇¹, 邱联昌¹, 王少卿²

1. 中南大学 粉末冶金国家重点实验室
2. 石家庄铁道大学 材料科学与工程学院

由于 Ti(C,N)涂层的沉积工艺影响涂层材料的成分、相结构和沉积速率, 因此开发 Ti(C,N)涂层需对沉积工艺进行深入的理解。本文采用热力学计算、计算流体动力学 (CFD) 模拟和关键实验验证相结合的方法 (集成计算材料工程), 研究了沉积温度、压力和气体流量对中温化学气相沉积 (MTCVD) Ti(C,N)涂层化学成分、相结构和沉积速率的影响。热力学计算表明, 固定气体流量和沉积压力的情况下, 随着沉积温度的升高涂层中 Ti 的含量降低而 C 和 N 的含量增大。CFD 模拟结果表明, 在同一料盘上沉积速率由内至外呈下降趋势。在料盘的外部, 上层料盘涂层沉积速率高于下层料盘。最后, 在三种不同温度下制备了 MTCVD Ti(C,N)涂层以分别验证热力学计算和 CFD 模拟预测的化学成分与沉积速率, 实验结果表明理论预测变化趋势较为合理。本工作为新型 MTCVD Ti(C,N)和其他具有工业应用背景的 CVD 涂层的快速开发提供了一种新的思路。

关键词: 化学气相沉积; Ti(C,N); 热力学计算; 计算流体动力学; 化学成分; 沉积速率

C01-27

通过粉末加工和热机械固结制造低成本高性能金属材料零部件和型材

张德良

东北大学材料科学与工程学院陶瓷及粉末冶金研究所

粉末冶金工艺的本质是把金属材料（包括金属基复合材料）的颗粒体集成，固结并形成具有宏观尺寸的金属材料零部件或型材。颗粒体不只是粉末颗粒，也包括细粒，碎屑和碎丝。通过不同材料颗粒体的混合可以制备的金属材料具有各种需要的化学成分。通过加工（如高能球磨）颗粒，可以使颗粒在固结之前就具有特定的显微组织（如纳米晶或纳米复合材料组织），再通过在固结成形过程中控制颗粒的显微组织演变，就可以获得具有特定显微组织的金属材料零部件和型材。与传统无压烧结不同，热机械固结通过颗粒的塑性变形和颗粒之间在接触面上的快速扩散焊接实现颗粒压坯的致密化和颗粒之间的冶金结合，获得具有相当于或优于铸锭冶金材料冶金质量的金属材料。源于这个致密化和固结机理，热机械固结对颗粒的烧结能力要求不高，粗粉甚至细粒，碎屑和碎丝都可以成功实现固结。热机械固结的这个功能具有重要意义，它为通过使用低成本原材料大幅度降低零部件和型材制造成本提供了空间。同时，通过调控显微组织和成分，高度致密化和颗粒间高度冶金结合实现高性能，从而以低成本制造出高性能的金属材料零部件和型材。本报告将介绍和讨论作者所在的东北大学和上海交通大学课题组在近 7-8 年在通过粉末加工和热机械固结制造低成本高性能金属材料零部件和型材料科研与技术开发上的主要研究结果，涉及的材料包括纳米晶，超细晶和细晶钛，钛合金，钛合金基复合材料，铝合金，铝合金纳米复合材料，铜，铜合金和铜基纳米复合材料。

关键词：粉末加工；热机械粉末固结；显微组织；力学性能；颗粒界面结合

C01-28

退火温度对钨合金球微观组织及压溃强度的影响

常宇，张向东，何旭文，贾玉斌，李先容

中国工程物理研究院材料研究所

钨合金球具有密度大，强度、硬度高等优点，被广泛应用于破甲弹、子母弹中，作为破片式战斗部的毁伤元素。钨合金球通常采用粉末冶金方法，经混料、成形、烧结、磨削加工和真空退火工艺制备。由于钨合金球在磨削加工时受力状态较为特殊，使其表面和心部形成了截然不同的微观组织，对力学性能产生了重要影响。本文按 95W-Ni-Fe-Co 合金成分配料，采用粉末冶金方法制备出 $\Phi 6.8$ mm 的精磨态钨合金球，在 $5 \times 10^{-4} Pa$ 下经不同温度（1150~1310℃）进行真空退火得到退火态钨合金球，采用万能力学试验机进行压溃强度测试，采用 Phenom ProX 扫描电子显微镜观察钨合金球表面、亚表面（沿直径方向距表面 30 μm ）和心部微观组织，采用 EDS 能谱进行钨合金球元素分析，研究退火温度对钨合金球微观组织和压溃强度的影响，为制定最佳退火工艺提供一定的基础。结果表明：（1）钨合金球磨削加工时，形成了粘结相含量极少、以钨为主要元素的无明显晶界界面的连续表面，表面和亚表面晶粒内部蓄积了较大的应变能，导致精磨态钨合金球压溃强度降低；（2）真空退火仅对钨合金球表面和亚表面微观组织产生影响，心部微观组织无显著变化。退火时，钨合金球表面和亚表面钨晶粒发生再结晶，生成再结晶晶粒，随着退火温度升高，再结晶晶粒尺寸逐渐增大，刻蚀液对晶界的刻蚀效果降低，磨削加工残余应力减小，退火温度高于 1290℃ 时，再结晶晶粒尺寸增大的趋势减弱，应力消除趋于完全；（3）高真空（ $5 \times 10^{-4} Pa$ ）下，粘结相中 Ni、Fe、Co 元素存在严重的蒸发。随着温度升高，粘结相蒸发加剧，在钨合金球表面形成缺陷，导致钨合金球表面完整性遭到破坏，造成力学性能下降；（4）随着退火温度升高，压溃强度呈现先升高后降低的趋势。在本实验研究中，1265℃ 可以获得表面完整性好、压溃强度高的钨合金球。通过上述研究，可得出如下结论：真空退火可以有效改善钨合金球微观组织，提高钨合金球的压溃强度。通过调整退火温度来平衡再结晶去应力和粘结相蒸发之间的矛盾，可以获得表面完整性好、压溃强度高的钨合金球。

关键词：钨合金球；微观组织；压溃强度；退火；再结晶

C01-29

钛表面激光粉末沉积梯度 Ti-Al 金属间化合物涂层的组织和耐磨性能研究

刘阳，刘文胜，马运柱，张诚，刘超，杨玉玲

中南大学粉末冶金研究院

钛及其合金以其密度低、比重轻、比强度高耐腐蚀性能好等特点，广泛应用于航空航天、石油化工和生物医药等领域。但因其表面硬度低、耐磨性能差等缺点严重影响了使用过程中的安全性与可靠性。本论文以 Ti6Al4V 粉末和 AlSi10Mg 粉末

为原料,采用激光粉末沉积方法,通过同轴实时变比例送粉,逐层改变钛合金和铝合金粉末成分比例,以高功率激光束熔化金属粉末,制备出成分梯度的 Ti-Al 金属间化合物涂层。利用扫描电子显微镜 (SEM),电子探针 (EPMA) 和微区 X 射线衍射 (micro-area XRD) 显微硬度计和滑动磨损设备等试验手段研究了梯度 Ti-Al 金属间化合物涂层的微观组织结构,成分分布、相结构、硬度分布和磨损行为。研究表明:所制备的梯度涂层具有无裂纹和良好的成分梯度组织结构;金属间化合物 Ti_3Al , $TiAl$, $TiAl_3$ 和 Ti_5Si_3 硬质相为梯度 Ti-Al 金属间化合物涂层的主要相结构;金属间化合物和硬质相的形成增强了梯度涂层的显微硬度,从而提高了其耐磨性。梯度 Ti-Al 金属间化合物涂层的磨损率为 $1.989 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / \text{Nm}$,明显低于钛合金基体。梯度 Ti-Al 金属间化合物涂层作为 Ti6Al4V 合金表面耐磨耐高温涂层具有良好的应用前景。

关键词:激光粉末沉积;梯度涂层;Ti6Al4V 表面;Ti-Al 金属间化合物;显微组织;耐磨性能

C01-30

超细晶 Al-Mg 合金的 Hall-Petch 关系

耿宏伟

- 1.东北大学材料科学与工程学院
- 2.材料各向异性与织构教育部重点实验室

增加 Hall-Petch 系数是一种有效的方法来增强晶界强化以生产高强度多晶金属,而不用将其晶粒尺寸减小至纳米级别。在这项研究中,我们通过机械合金化和粉末压制挤压制备了超细晶(UFG)Al-Mg 合金,研究了超细晶 Al-Mg 合金的 Hall-Petch 系数及其影响因素,研究表明超细晶 Al-Mg 合金的 Hall-Petch 系数受到合金中 Mg 原子含量的影响,随着 Al 晶格内和晶界处溶质 Mg 原子的增加显著增大。这一发现可以帮助我们很好地理解影响超细晶金属的 Hall-Petch 系数的因素,这反过来又有助于优化其组织和微观结构以同时获得高强度和良好延展性。

关键词:超细晶 Al-Mg 合金;晶界偏析;显微硬度;Hall-Petch 关系

C01-31

难熔金属高温热防护技术研究进展

范景莲

中南大学

C01-32

WC-Co-Ru 硬质合金微观结构与性能研究

舒军

自贡硬质合金有限责任公司

C01-33

冷金属过渡 (CMT) 焊接模式对铝合金增材制造组织和性能的影响

方学伟^{1,2}, 张丽娟², 卢秉恒^{1,2}

- 1.西安交通大学机械工程学院
- 2.国家增材制造创新中心

铝合金因其优异的综合性能被广泛的应用于航天航空、汽车等领域。增材制造技术将 CAD 设计数据采用材料逐层累加的方法制造实体零件,具有生产周期短、节省材料、生产灵活等特点,非常适用于现代航天航空领域新产品开发、单件小批量制造的需求。而电弧增材制造技术,具有沉积效率、材料利用率高,设备成本低等优势,冷金属过渡 (CMT) 是一种新的电弧增材制造技术,其将送丝与金属熔滴过渡过程实现了数字化控制,具有飞溅少、热输入量低、电弧稳定等优势,特别适用于航空航天领域中复杂程度大型铝合金零件的增材制造。CMT 焊接技术包括了 CMT、CMT-ADV、CMT-P 和 CMT-PADV 四种模式,不同的铝合金适用于不同的 CMT 模式。本文对 2XXX, 4XXX 和 5XXX 系铝合金进行了沉积工艺研究,分析了不同焊接模式对铝合金组织和性能的影响。结果表明:CMT 模式和 CMT-ADV 模式不适用于 2219 铝合金增材制造,单道墙顶面极易出现明显的驼峰。而采用 CMT-P 和 CMT-PADV 模式制备的 2219 单道墙轮廓光滑,顶面和侧壁平整。其中 CMT-PADV 制备的 2219 铝合金组织由等轴晶和柱状晶构成,晶粒细小。沉积态 2219 单道墙抗拉强度为 275MPa,延伸率超过 14%。相比其它三种模式,采用 CMT 模式制备的 4043 铝合金表面轮廓优异。金相结果显示沉积态 4043 铝合金中存在着大量的柱状树枝晶。采用 CMT 模式制备的 4043 铝合金抗拉强度为 175MPa,延伸率超过 19%。与 2219 铝合金和 4043 铝合金不同,CMT-ADV 模式更适用于 5183 铝合金,成型件表面平整,成型过程中电弧稳定、飞溅小。金相结果显示 5183

铝合金层间结合良好，成型件试样抗拉强度接近 300MPa，延伸率超过了 20%，具有优异的综合性能。根据以上研究，采用 CMT 技术制造了不同形状和大小的铝合金样件，为其在航空航天领域中的应用奠定了良好的基础。

关键词：增材制造；铝合金；冷金属过渡（CMT）；组织性能

C01-34

面向 PFM 的金刚石增强 W-Cu 复合材料的制备与性能研究

卫陈龙^{1,2}，程继贵^{1,2}

1.合肥工业大学

2.安徽省粉末冶金工程技术研究中心

W-Cu 合金兼具 W 的高密度、高熔点、抗电弧烧蚀、低热膨胀系数和 Cu 的高导电、高导热等性能，作为面向 PFM 材料得到了广泛研究。而极限的高温工作环境对 W-Cu 合金的热导率提出了更高的要求。研究表明，金刚石具有优异的热导率（600~2200 W·m⁻¹·K⁻¹），低的热膨胀系数（0.86×10⁻⁶/°C），和低的密度（3.52g·cm⁻³）。在 W-Cu 合金复合材料中添加适量金刚石，可以进一步提高复合材料热导率，降低复合材料密度，调节复合材料热膨胀系数，满足面向 PFM 材料的性能要求。本文采用金刚石增强 W-Cu 复合材料，通过调节金刚石的添加量和烧结工艺，制备满足面向 PFM 材料性能要求的金刚石增强 W-Cu 复合材料。

实验中，以不同质量分数的镀钨金刚石、Cu 包 W 复合粉体为原料，在不同温度、时间下进行烧结。采用 XRD 分析物相组成，采用扫描电镜观察镀层组织形貌，采用激光闪烁法测试复合材料热导率。实验结果表明，烧结温度为 1150°C、保温时间 120min、镀钨金刚石添加量为质量分数 8%时，复合材料获得 96.5%的致密度，热导率最高达 248.7 W·m⁻¹·K⁻¹，高于 W-Cu 复合材料的热导率（200 W·m⁻¹·K⁻¹）。

关键词：W-Cu 合金；热导率；镀钨金刚石；Cu 包 W 复合粉体

C01-35

添加 NaCl 阻隔剂烧结制备多孔镍孔结构性能的研究

王铸博，刘如铁，李浩，熊翔

中南大学粉末冶金研究院

近年来，多孔金属材料已成为新材料的研究热点之一。其中多孔镍因其强度高、低热导率、孔径形态和大小可调、吸能减振等优点，故成为一种功能和结构一体化的新型工程材料。在过滤、催化、汽车、航空等领域日益受到关注。传统的多孔金属材料的制备方法有很多，如熔体发泡法、定向凝固法等。但这些传统方法往往工艺十分复杂，成本也较高，而且通常不能制得某些具有特殊孔形状或孔结构可控的多孔材料。本实验在传统的粉末冶金制备多孔镍的方法中加入 NaCl 作为阻隔剂，将 NaCl 粉末与还原 Ni 粉进行球磨混合，随后对混合粉料进行压制烧结。采用 XRD、SEM、PEDA 等分析手段对烧结制备样品的微观组织结构进行了表征，并对试样中的孔结构及成孔机制进行了初步探讨。结果表明，添加 NaCl 阻隔剂烧结得到的样品经去离子水过滤为单一 fcc-Ni 相，孔径分布形式表现为双孔结构分布；大量微米级尺寸的圆孔以及细小的间隙孔均匀弥散的分布于多孔镍基体中，开孔率可达到 70%。

关键词：阻隔剂；多孔镍；孔结构性能；双孔结构

C01-36

落管无容器处理条件下三元 Ag-Cu-Si 共晶合金的快速凝固研究

王昕，翟薇，魏炳波

西北工业大学应用物理系

采用落管无容器处理技术实现了三元 Ag₃₀Cu_{44.7}Si_{15.8} 共晶合金的深过冷与快速凝固。实验得到了直径为 95~700μm 的快速凝固粒子，其相组成均为(Ag)+(Si)+Cu₃Si 相。理论计算表明，随着液滴直径的减小，液滴过冷度由 26K 增大到 188K（0.267TL），同时冷却速度由 1.114×10²K/s 上升到 1.083×10⁴K/s。形貌分析表明，当液滴直径大于 100 μm 时，液滴凝固组织主要由初生小平面（Si）相、依附于初生相生长的(Ag)+Cu₃Si 两相共晶以及(Si)+(Ag)+Cu₃Si 三相共晶组成。且随着液滴直径的减小，初生(Si)相晶粒尺寸和所占的体积分数均显著减小，而两相共晶和三相共晶间距也随之减小。特别的，当直径降低到 95 μm 时，深过冷状态使该三元共晶合金快速凝固路径发生改变：即初生(Si)相和(Ag)+Cu₃Si 两相共晶消失，(Si)+(Ag)+Cu₃Si 三相直接从过冷液滴中形核生长，成为唯一的组织形态。根据实验结果，进一步对落管无容器条件下的

三元 $\text{Ag}_{30}\text{Cu}_{44.7}\text{Si}_{15.8}$ 共晶合金的快速凝固机制进行了探讨。

关键词：落管无容器；深过冷；快速凝固；Ag-Cu-Si；三元共晶

C01-37

医用可降解 FeMnMg 合金的制备及性能研究

李帅平, 张雅静, 张德良*

1. 东北大学材料科学与工程学院

2. 材料各向异性与织构教育部重点实验室

由于惰性生物金属长期存在体内会导致慢性炎症反应, 引起术后再狭窄的发生, 严重影响介入治疗效果。研究生物可降解植入的金属材料具有重要意义。在生物可降解血管支架领域, 铁基合金一直被寄予厚望。有报道, 利用粉末冶金技术提高了 Fe-Mn 合金的降解速率。Mg 具有较低的电极电位以及良好的生物相容性, 因此, 通过向 Fe-30wt%Mn 固溶体中添加 Mg 来提高合金的降解速率。利用机械合金化制备了 Fe-30wt% Mn-y wt% Mg (y = 0, 2, 4, 6) 合金。然后对 Fe-Mn-Mg 合金进行电化学、浸泡腐蚀和机械性能测试。研究发现: 高能球磨后合金粉末细小、均匀, 组元 Mg 有所固溶。固结粉末后所制备的 Fe-30wt%Mn-2wt%Mg 合金样品具有细小、均匀的显微组织, 它的拉伸强度为 1023.0MPa, 屈服强度为 660.7MPa, 延伸率为 10.2%。动电位极化曲线分析表明所制备 Fe-30wt%Mn-2wt%Mg 合金样品在 1 倍 SBF 模拟体液中具有低于 Fe-Mn 合金的自腐蚀电位, 腐蚀电流密度是 Fe-Mn 合金的 2.5 倍。

关键词: 粉末冶金; 生物可降解金属; 铁-锰合金; 心血管支架; 显微组织; 力学性能

C01-38

放电等离子烧结过程中陶瓷材料致密化动力学及扩散研究

张梅, 李瑞迪, 袁铁锤

中南大学粉末冶金研究院

Equiatomic CrMnFeCoNi high entropy alloy (HEA) was firstly used as sintering aid for preparation of B4C ceramics by spark plasma sintering (SPS) at temperature ranging from 1500 to 2100 °C. The mechanical properties of B4C-5vol.% HEA ceramics as well as densification mechanisms during the SPS process were investigated. B4C-5vol.% HEA ceramic sintered at an optimized low temperature of 1950 °C obtained an attractive combination of properties, including a relative density of 99.27%, a microhardness of 3427 Hv0.2 and a rupture strength of 619MPa, which was 37% higher than the highest strength of pure B4C ceramic. The densification mechanism during the SPS was elucidated by the stress exponent n and the apparent activation energy Q_d . At low effective compaction stresses ($n=1$, $Q_d=519.5\pm 82.6$ kJ/mol) in the temperature range 1700-1950 °C, the densification was controlled by grain-boundary sliding. At high effective compaction stresses (n around 2.5 and 5.5), the densification mechanism transformed to dislocation climb, which were verified by transmission electron microscopy.

C01-39

打造高质量发展钨产业链

庄志刚

厦门钨业集团

C01-40

高性能金属粉末多孔材料制备技术及应用

汤慧萍

西北有色金属研究院

C01-41

医用 β 型 Ti-Nb-Zr-Ta-Si 合金的选区激光熔化制备研究

罗炫¹, 杨超¹, 李元元^{1,2}

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. 吉林大学材料科学与工程学院

钛合金由于具有优异的生物相容性,低的弹性模量,优异的耐腐蚀性被广泛用于生物医疗植入件。与 CP-Ti 和 Ti-6Al-4V 相比, β -钛合金具有更低的弹性模量,更好的耐蚀性和生物相容性。因此,本研究基于前期开发的新型 β -钛合金 (Ti-Nb-Zr-Ta-Si),开展选区激光熔化技术制备研究。通过单道实验,研究了工艺参数(激光功率,扫描速度)对熔池形状和单道形貌的影响机理。研究发现,当线能量密度越大,熔池宽度和熔池深度越大。并且,当功率大于 200W,扫描速度小于 300mm/s 时,在熔池的底部产生锁孔,这主要因为激光经过多重反射后集中在熔池底部,在反冲压力、表面张力和重力的影响下产生锁孔。然后,依据优化的制备参数,打印出高致密块体合金。研究发现,单道搭接率在 70%左右打印的块体致密度较高,达到 99.01%;随着搭接率的增加,致密度也越大,这为新材料增材制造开发工艺参数,制备致密件提供了基础。另外,优选参数制备试样,测试选区激光熔化制备的 Ti-Nb-Zr-Ta-Si 合金的力学性能和弹性模量,并与传统材料进行对比。

关键词:医用 β -钛合金;选区激光熔化

C01-42

晶体相场模型及其在晶体形核和生长中的应用

唐赛,刘文胜,马云柱

中南大学粉末冶金研究院

晶体相场模型是基于经典密度泛函理论建立的。其最大优势在于能在原子尺度研究扩散时间尺度的材料微观组织演化行为。本研究采用晶体相场模型,基于原子尺度对晶体形核、晶体生长这一完整过程开展研究。揭示了形核过程中无序的液相团簇向高度有序的二维六方、二维四方、面心立方、体心立方晶核的转变的相关机制及动力学。阐明了分步形核过程中,事先形成的亚稳相对最终稳定相的形核的作用机制。对于形核之后的晶体生长过程,首先在原子尺度阐明了枝晶形成初期,随着晶核的长大,晶核的多面体形貌如何被破坏并逐渐发展成发达的对称枝晶,然后揭示稳态枝晶的生长机制。本研究通过晶体相场模拟研究,从原子尺度角度加深了我们对晶体形核和生长的物理机制和动力学的相关认识。

C01-43

不同轧制比纯钨退火过程中的显微组织与织构演化规律研究

王康,谷牧,咎祥,罗来马,刘家琴,吴玉程

合肥工业大学

在 1250 °C 下对 50% (W50)、67% (W67) 和 90% (W90) 轧制量的纯钨进行了等温退火实验。主要利用 EBSD 显微分析手段,对三块轧制比纯钨的轧制态和不同退火态样品的显微组织与微观织构进行观察分析,研究了轧制比对纯钨再结晶过程中显微组织及织构的影响规律。样品在热轧至较小变形程度(50%)时,其晶粒沿着 RD 方向稍微被拉长。在轧至中变形程度(67%)时,显微组织发生了明显变化,晶粒变大且沿着 RD 方向被拉的更长,晶粒中出现了变形带等亚结构。样品在高变形程度(90%)时,显微组织出现纤维化和动态再结晶现象。三种变形量热轧钨板的轧制织构差异比较大,W50 的织构主要为 α 织构中的 $\{112\}\langle 110\rangle$ 组分,W67 的织构主要为 γ 织构中的 $\{111\}\langle 112\rangle$ 组分和 α 织构中的 $\{112\}\langle 110\rangle$ 以及 θ 织构中的旋转立方组分即 $\{001\}\langle 100\rangle$ 。W90 的织构主要为 $\{112\}\langle 111\rangle$ 和 Goss 织构。三块钨板完全再结晶后的平均晶粒尺寸和平均纵横比都随着变形量的增加而减小。三块钨板完全再结晶后的织构因变形量不同而有所差异。W50 在 1250 °C 退火后的再结晶织构与其热轧制织构基本一样,主要为 $\{112\}\langle 110\rangle$ 和 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构。而 W67 和 W90 在 1250 °C 退火后的再结晶织构与其热轧制织构完全不同,W67 退火后的再结晶织构的主要为 $\{001\}\langle 100\rangle$ 和 $\{111\}\langle 112\rangle$ 织构。W90 的样品在完全再结晶退火后的织构主要为 $\{001\}\langle 100\rangle$ 织构。

关键词:钨;再结晶;显微组织;织构

C01-44

粉末冶金法制备大排量摩托车钛合金气门

陈峰,闫志巧,许荣君

广东省材料与加工研究所

采用粉末冶金技术制备钛合金,有望使钛合金的性价比变得更具竞争优势,从而拓宽钛材在民用领域的应用。本研究以开发大排量摩托车发动机用钛气门为应用目标展开研究,以 Ti、Al、Fe、Mo 粉为原料,通过混料、冷等静压、真空烧结等工艺获得烧结坯;采用热轧热变形手段实现材料的全致密化,并获得符合尺寸的粉末冶金钛合金棒料;对制备的棒料进行电锻制成气门毛坯,并对毛坯进行热处理,调控钛气门的微观组织;对热处理后的气门毛坯进行精加工,然后对精加工后的气门进行表面处理,使其尺寸精度、表面光洁度和耐磨性满足装机要求;最终对大排量摩托车发动机用钛气门的拉伸性能、微

观组织、硬度及装机试用情况进行了系统研究。

关键词：粉末冶金；钛合金；气门

C01-45

孔隙对粉末冶金 Ti-5Al-2.5Sn 合金拉伸性能的影响

郭瑞鹏^{1,2}, 崔潇潇¹, 卢正冠¹, 吴杰¹, 李一平¹, 徐磊¹

1.中国科学院金属研究所

2.东北大学

利用粉末冶金热等静压成形工艺制备了不同致密度的粉末合金。采用金相显微镜、扫描电镜和 X-ray Micro Computed Tomography 等分析手段,研究了孔隙缺陷对 Ti-5Al-2.5Sn (质量分数, %) 粉末合金冶金质量的影响。结果表明: 0.6%以下的孔隙缺陷不会对 Ti-5Al-2.5Sn 粉末合金的拉伸性能产生显著的影响; 包套在热等静压过程中存在发生泄漏氩气的风险。包套泄漏形成的孔隙缺陷对粉末合金性能危害最大, 其次是热等静压制度的选择恰当与否形成的孔隙, 粉末包套体中由于工艺特点造成的残留孔隙危害最小。

关键词: 孔隙; 粉末冶金; 钛合金; 拉伸性能

C01-46

选区激光融化制备铜镍锡合金的组织 and 性能

陈超, 张耕铭, 周科朝

中南大学粉末冶金国家重点实验室

铜镍锡合金 (Cu-15Ni-8Sn) 具有良好的导电性能、优异的力学性能和耐蚀性, 广泛应用于继电器等电连接器和海洋船舶工业。本文选用气雾化制备的铜镍锡合金粉末结合选区激光熔融技术实现了铜镍锡构件的 3D 打印成形, 利用金相显微镜、扫描电镜、电子背散射衍射 (EBSD)、透射电镜和万能力学试验机研究了选区激光融化态以及热处理态铜镍锡合金的微观组织和力学性能。研究结果表明成形合金的致密度随着激光能量密度的增加而提升, 在无后处理的情况下可实现高达 99.4% 的相对致密度。成形合金晶粒细小, 由面心立方的 α 基体相和 γ 析出相 (Ni_3Sn) 构成, α 相无明显取向分布, γ 相同时在晶内和晶界析出。激光熔融过程中快速凝固导致的晶粒细化作用以及对 Sn 偏析的抑制, 使得沉积态铜镍锡合金的力学性能优异。直接 3D 打印成形的合金屈服强度和抗拉强度分别为 522MPa 和 653MPa, 断后伸长率超过 17%, 与同等成分下粉末冶金法制备的合金性能相当。铜镍锡合金经时效处理后, 力学性能进一步提升, 屈服强度和抗拉强度分别为 786MPa 和 915MPa, 断后伸长率为 8.5%。综上所述, 本文证明了选区激光熔融技术可以实现高性能铜镍锡构件的 3D 打印直接成形。

C01-47

粒度对粉末 Ti_2AlNb 合金组织与力学性能的影响

吴杰¹, 徐磊¹, 刘巧沐², 卢正冠¹, 杨锐¹

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

采用无坩埚感应熔炼超声气体雾化法制备了成分为 Ti-22Al-24.5Nb-0.5Mo (atomic fraction, %) 的预合金粉末, 并对预合金粉末进行了表征。采用预合金粉末热等静压工艺制备了 5 种不同粒度分布的 Ti_2AlNb 粉末合金。采用金相显微镜(OM)和扫描电镜(SEM)研究了热等静压及热处理态 Ti_2AlNb 合金显微组织, 实验结果显示, 热等静压态 Ti_2AlNb 合金经热处理后热致孔洞数量及尺寸显著增加; 粉末粒度显著影响粉末 Ti_2AlNb 合金的孔隙分布及显微组织从而影响综合力学性能尤其是高温持久性能, 采用全粒度的粉末制备的合金综合力学性能好且孔隙少。

关键词: 热等静压; 粉末 Ti_2AlNb 合金; 粒度; 孔隙

C01-48

稀土添加剂在硬质合金中的长程迁移行为

张立

中南大学粉末冶金研究院

C01-49

3D 打印制备 WC-Co 硬质合金涂层的组织及性能研究

唐建成, 叶楠, 胡妙

南昌大学材料科学与工程学院

以球形全致密 WC-25%Co 复合粉为原料, 采用同轴送粉激光熔覆工艺在 304 不锈钢表面制备厚度为 3-5 mm 的硬质合金涂层。通过 X 射线衍射、扫描电镜和能谱仪分析硬质合金涂层的显微组织和物相组成, 并对涂层的显微硬度和耐磨性能进行了研究。结果表明: 激光熔覆的最佳工艺参数为输入功率为 1.5 KW, 扫描速率 500 mm/min; 所得打印层结构致密, 无气孔、微裂纹或者其他显微缺陷, 并与基体实现良好的冶金结合。激光熔覆过程中, 复合粉体边缘的 WC 部分溶解于液相 Co 和基体中, 然后以角片状 WC 和鱼骨状共晶碳化物的形式在未熔颗粒间隙析出; 硬质合金涂层的物相为: WC、Co、 M_6W_3C (M=Fe、Co)、 M_3W_3C 和少量 W_2C 。涂层的硬度和耐磨性大幅提高, 其显微维氏硬度可达 1400-1600 $HV_{0.1}$, 较 304 不锈钢基体 ($< 200 HV_{0.1}$) 提高了 6-7 倍, 磨损失重仅为基体的 4.7%。

关键词: 激光熔覆; WC-Co 复合粉; 硬质合金涂层; 显微组织

C01-50

选区激光熔化 AlSi10Mg 合金冶金缺陷、显微组织及性能研究

任俊业, 吴宏, 李瑞迪, 刘咏

中南大学粉末冶金国家重点实验室

AlSi₁₀Mg 合金虽然已广泛用于选区激光熔化 (SLM) 成形工艺, 但对于该材料 SLM 成形过程中冶金缺陷的形成机理研究仍有待进一步深入。本研究采用不同的成形参数制备了 AlSi₁₀Mg 合金。研究了体能量密度对冶金缺陷、致密化、相组成和力学性能的影响。发现一定体能量密度范围内, 较低体能量密度可以得到更为致密的结构, 拉伸强度更高。随着体能量密度升高, 极限拉伸强度降低, 其主要原因为微孔的产生。微孔的形成机理包括气孔和小孔效应。对于气孔形成从合金熔炼的角度进行分析解释, 而对高体能量密度下微孔增多则借鉴激光焊接中小孔效应模型进行分析。对高体能量密度下组织不均匀性进行了系统表征, 并对相关机理进行讨论。

关键词: 选区激光熔化; 增材制造; AlSi10Mg; 冶金缺陷; 显微组织

C01-51

扩散合金化法制备氧化铝弥散强化铜-10Sn 预合金粉末

闫志巧^{1,2}, 陈峰^{1,2}, 汪涛²

1. 广东省材料与加工研究所

2. 广东省工业技术成果转化推广中心

以氧化铝含量为 0.34%、1.00% 和 3.19% 的三种弥散铜粉末和雾化 Sn 粉为原料, 经 600-800℃ 扩散处理制备弥散铜-10Sn 预合金粉末, 研究扩散合金化温度和 Al_2O_3 含量对粉末物相组成、松装密度、流动性和显微硬度等物理性能的影响。结果表明: 600-800℃ 扩散处理所制备预合金粉末的成分均为 (Cu, Sn) 固溶体。当扩散合金化温度为 700℃ 时, Sn 发生充分固溶, 合金成分与设计成分相当, 为最佳的扩散合金化温度。该温度下所制备的三种预合金粉末具有细粉含量高、松装密度小、流动性好和显微硬度高的特点, 其中-300 目细粉末含量达到 55% 以上、松装密度为 2.40-2.87 g/cm^3 、流动性小于 40s/50g、显微硬度 ($HV_{0.05}$) 为 130-150。

关键词: 氧化铝弥散强化铜; 扩散; 温度; 松装密度

C01-52

关于高温真空电子束熔炼钼提纯方法制备高纯钼的研究

黄志民, 林强, 李斌玲, 祁美贵, 郑艾龙

厦门虹鹭钨钼工业有限公司

本文通过钼原材料的选取和分离, 经还原制备提纯钼粉, 在烧结钼坯后进行高温真空电子束熔炼, 研究用简单高效的方法进行高纯钼制备。本研究可去除钨等高熔点金属, 并对比了高温真空电子束熔炼前后化学成分中各元素的变化情况, 以及机械物理性能的演变等。

关键词: 高纯钼; 高温真空电子束; 提纯

C01-53

非晶粉末烧结过程中的原子扩散系数计算

李鑫鑫, 杨超

华南理工大学

C01-54

固溶温度对生物医用 Ti2448 钛合金的显微组织和力学性能的影响

李霞, 余鹏

南方科技大学

采用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、热膨胀分析仪(DIL)、纳米压痕仪(nano-indentation)、透射电镜(TEM)等分析测试手段, 来研究固溶温度对 Ti55531 钛合金微观组织和力学性能影响。通过对粉末冶金净近成形工艺制备得到的烧结合态 Ti2448 钛合金(弹性模量~67 GPa, 极限拉伸强度~830 Mpa, 断裂延伸率~2%)进行后续固溶处理, 进行 XRD 实验得到原始烧结合态样品的显微组织由密排六方的针状 α 相和体心立方的基体 β 相组成, 经过在固溶处理后水淬至室温后, 样品的显微组织由单一的 β 相组成。通过纳米压痕仪分别对 α 相和 β 相进行压痕实验, 得到 α 相比 β 相的弹性模量高~38%, 硬度高~36%。通过拉伸实验得到经过不同温度下进行固溶处理后样品的弹性模量降低~15%, 极限拉伸强度降低~10%, 断裂延伸率提高 70~90%。由于固溶处理前后显微组织的改变导致样品的力学性能发生显著变化, 得到了低弹性模量(55 ± 2 GPa)、高强度(740 ± 10 MPa)、高延伸率(6.5~19%)的 Ti2448 钛合金。而在不同温度下进行固溶处理的样品的弹性模量和断裂强度没有显著变化, 但断裂延伸率从 6.5%变化到 19%, 固溶温度对样品的塑性影响十分显著。接下来拟通过 SEM、DIL、TEM 对不同温度下固溶处理的样品显微组织和力学性能进一步的分析。

关键词: 粉末冶金; 生物医用; 钛合金; 固溶处理; 低弹性模量

C01-55

Cu-TiH₂ 复合材料的制备工艺及性能研究

周松¹, 唐建成¹, 马运柱², 刘文胜², 叶楠¹

1.南昌大学材料科学与工程学院

2.中南大学粉末冶金研究院

通过向黄铜中添加少量钛, 在熔炼过程中形成铜钛相, 利用氢化处理使铜钛相中的钛元素析出并氢化生成氢化钛从而制得氢化钛黄铜。采用 SEM 和 EDS 分析氢化钛黄铜的显微组织, 研究氢化钛的生成对切削性能的影响, 通过力学性能测试、车削测试等手段考察了所研制氢化钛黄铜的力学性能和切削性能。结果表明: 氢化反应生成的氢化钛在黄铜基体上弥散分布形成类似于铅的脆性颗粒, 制得的氢化钛黄铜的硬度约为 160HV, 抗拉强度为 480~520MPa, 力学性能优于 HPb59-1 铅黄铜; 车削表面光滑无毛刺, 切削屑形貌为 C 短型, 优于普通黄铜的长螺旋型屑。

关键词: 无铅黄铜; 氢化处理; 氢化钛; 力学性能; 切削性能

C01-56(Invited)

锆管表面 SiC 涂层

周新贵

国防科技大学

C01-57

压力烧结 Al-Gd-Ni-Co 非晶态合金粉末的致密化机制和晶化行为研究

王智

华南理工大学

非晶粉末的压制和烧结是制备块体金属玻璃和超细晶纳米晶材料的一种重要方法, 例如制备具有优良软磁性能的 Fe 基非晶合金, 高强度的 Al 基非晶合金, 具有生物兼容性的 Ti 基非晶合金。其中烧结机制和晶化行为对最终大块材料的微观结构和性能有着重要影响。本工作研究了压力下(0 - 764 MPa) Al₈₄Ni₇Gd₆Co₃ 非晶粉末在过冷液相区间的致密化和晶化行为。结果表明压力显著影响其致密化行为: 压力有助于减少孔隙率, 减少粉末之间的面积和粉末之间的 α -Al 含量。发现主要致密化机制为颗粒重排、塑性流变、粘性流变和 Al 元素扩散(从非晶粉末内部向粉末之间扩散)。而且发现压力显著影响非

晶粉末在压制过程中的热稳定性,影响非晶粉末内部的晶体相含量和残留非晶基体的热稳定性。随着压力增加,压力抑制 α -Al 初晶化同时促进化合物生成。这表明非晶粉末在低压烧结中可以获得较多 α -Al 相和较少脆性化合物相。本工作将有助于理解压力辅助烧结非晶合金粉末的致密化和晶化机制,从而获得具有优异性能的大块非晶或者超细晶纳米晶合金。

关键词: 非晶态合金; 烧结; 致密化; 晶化; 压力

C01-58

粉末床增材制造专用新型合金成分粉末开发: 高熵、铝、钛合金

牛朋达, 李瑞迪*, 袁铁锤, 王敏卜, 周立波

中南大学 粉末冶金国家重点实验室

激光增材制造在晶粒细化及构件形状复杂度方面具有不可替代的优势,其中以基于粉末床的选区激光熔化(Selective Laser Melting, SLM)为代表。SLM的非平衡冶金及快速凝固给学术界对于超细晶与亚稳组织带来了新的认识。目前,SLM存在的问题是:增材制造快热快冷和极端非平衡热-流-质过程,致使打印易产生裂纹和气孔等冶金缺陷,使得SLM件的可靠性受到工业界质疑。造成以上的主要原因是,目前增材制造主要采用传统商业牌号合金,尚未针对增材制造特点开发专用合金,成为SLM发展的严峻挑战。中南大学粉末冶金国家重点实验室针对SLM专用高熵合金、铝合金和钛合金开展了研究。开发了TWIP双相高熵合金,完全消除了高熵合金易裂的难题,拉伸性能达到889MPa。开发的稀土铝合金拉伸强度达到535MPa。开发的钛合金拉伸性能达到1150MPa。

C01-59

新型硬质材料(W,Re)C的制备及其性能研究

赵冲, 吕皓, 宋晓艳, 刘雪梅, 王海滨

北京工业大学

本文利用第一性原理计算和实验相结合的方法,设计并首次合成出高硬度、高模量的(W,Re)C材料。通过XRD、SEM、EBSD、HAADF-STEM等系统表征,结果表明高能球磨一定时间后,Re元素可固溶到WC中,并经放电等离子烧结形成成分均匀分布的(W,Re)C固溶体块体材料。微结构分析表明,Re原子固溶进入WC晶胞,WC晶格发生收缩。制备的(W,Re)C固溶体块材平均晶粒尺寸约0.55 μm ,利用纳米压痕试验测得其本征硬度为36.0 GPa、弹性模量为771.3 GPa,与WC单相材料相比,本征硬度和弹性模量分别提高了52.5%和38.6%。本研究表明(W,Re)C是具有优异内禀特性、有发展潜力的新型硬质材料。

关键词: 硬质合金; (W,Re)C; 第一性原理; 纳米压痕法

C01-60

固态再生TC4钛合金的研究

王蕊, 岳聚昆, 张德良

1.东北大学材料科学与工程学院

2.材料各向异性与织构教育部重点实验室

本研究以回收的TC4(Ti-6Al-4V)钛合金车削屑为原料通过热机械固结的方法来实现TC4钛合金的固态再生并制备出低成本、高性能的TC4钛合金挤压锻样品。研究了样品的显微组织,力学性能,断裂机制以及粉末固结情况。结果表明,TC4挤压锻样品具有较细的 α 片层组织同时夹杂着 β 相, α 片层的厚度在0.4-2 μm 之间。700 $^{\circ}\text{C}$ 退火热处理前后挤压锻TC4钛合金样品的抗拉强度和延伸率分别达到了1300MPa、1250MPa和11.1%、16.8%。热处理之后的样品的断裂方式为韧性断裂,在拉伸试样断口附近的纵截面上未发现由粉末颗粒分离造成的孔洞,说明挤压锻样品在较短的时间内就达到了较高的粉末固结水平。

关键词: 钛合金; 金属固态再生; 热机械粉末固结; 显微组织; 力学性能

C01-61

粉末床增材制造的有限元仿真在航空零部件上的应用技术研究

戴煜^{1,2}, 李礼^{1,2}, 杨文^{1,2}

1.湖南顶立科技有限公司

2.湖南省新型热工装备工程技术研究中心

粉末床增材制造是一个快速凝固的过程，制造过程中的残余应力将导致零件发生失效、翘曲、开裂以及其他问题。由于缺乏增材制造工艺的标准与规范，目前的粉末床增材制造仍然是传统的“试错”模式，一次成功实现零件制造的几率非常低。特别是在制造航空零部件时，“试错”模式更是显示出低效、高成本的技术局限性。采用有限元对航空零部件的增材制造过程进行模拟分析，能够有效解决打印过程中变形的问题，从而实现“一次成功”打印。

关键词：粉末床；增材制造；有限元模拟；残余应力；变形

C01-62

粉末烧结过程中原子扩散系数的定量化及其致密化机理

杨超, 李鑫鑫

National Engineering Research Center of Near-net-shape Forming for Metallic Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

粉末烧结是把粉末颗粒粘结成块状固体结构的材料制备技术。通常情况下，粉末收缩和致密化的影响因素包括表面能、平均颗粒尺寸、粘度、扩散相关的平均晶粒尺寸等各种物性参数，这些影响因素对以粉体之间形成烧结颈为特征的粉末收缩早期阶段尤为重要。对于放电等离子烧结来说，粉体之间的放电和溅射等独特的理化机制，决定了其独特的粉末收缩和致密化机理。根据粉末冶金理论，对于给定的合金成分，不同的表面能、平均颗粒尺寸、粘度、扩散相关的平均晶粒尺寸等各种物性参数，可影响粉体收缩并进一步影响内在的致密化机理。本质上讲，致密化机制可用前述物性参数决定的特定物理量来分析和表述，例如致密化速率、激活能、应力指数、综合影响因子。然而，作为可代表传质能力和控制粉体致密化机理的直接物理量，粉末烧结过程中的原子扩散系数迄今尚未被定量化的分析和推导。

有鉴于此，本文基于 Stokes-Einstein 方程、Arrhenius 方程、扩散蠕变理论、Frenkel 模型，率先建立了可定量化推导粉末烧结过程中原子扩散系数的理论框架，并建立了定量化原子扩散系数与粉体致密化机理的内在关联性。对于 $Ti_{40.6}Zr_{9.4}Cu_{37.5}Ni_{9.4}Sn_{3.1}$ 非晶合金粉末来说，球磨法制备粉末具有较雾化法粉末更高的原子扩散系数，决定了其更高的粉体瞬时致密化速率；然而，定量化的原子扩散系数略低于放射性示踪法的实测值。对于 $Ti_{40.6}Zr_{9.4}Cu_{37.5}Ni_{9.4}Sn_{3.1}$ 晶态合金粉末来说，粉体平均颗粒尺寸越大，原子扩散系数越大，瞬时致密化速率越高，粉体致密化越快。重要的是，晶态合金粉末烧结过程中定量化的原子扩散系数显著高于放射性示踪法的实测值，这表明放电等离子烧结确实可加速原子扩散。研究结果表明，原子扩散系数可用作表征传质能力和控制粉体致密化机理。

关键词：粉末烧结；粉末颗粒；原子扩散系数；致密化机理

C01-63

Optimizing HIP and printing parameters for EBM Ti-6Al-4V

Anders Eklund*, Dragon Hao

Quintus Technologies AB

Hot isostatic pressing (HIP) is widely used today to eliminate internal defects in Ti-6Al-4V produced by powder bed fusion. The HIP process will improve the ductility and especially the fatigue properties of the material. In some cases, the strength of AM Ti-6Al-4V is reduced by the HIPping due to coarsening of the very fine as-printed microstructure due to the elevated temperature during the HIP process. This paper presents an investigation of HIP parameters for EBM Ti-6Al-4V performed with the aim to maximize the strength of HIPed EBM Ti-6Al-4V. A low HIP temperature of 800 °C gives the highest strength and is also enough to eliminate all internal defects. By printing material with intentionally induced porosity by a larger line off-set than standard combined with an optimized HIP cycle the highest strength can be obtained.

Keywords: Ti-6Al-4V, EBM, Hot Isostatic Pressing (HIP), Powder metallurgy, Mechanical Properties

C01-64

热等静压工艺制备 Inconel 718 粉末合金及性能

徐磊

中国科学院金属研究所

采用国际上通用的气体雾化法和等离子旋转电极法制备了 Inconel 718 洁净预合金粉末，并对预合金粉末进行表征。结果表明两种粉末制备手段经过典型高温合金热等静压成型工艺制备的粉末合金室温和高温拉伸性能并无显著区别，粉末合金

经过固溶+时效热处理后材料的性能也并无显著区别且性能均接近锻件水平，气体雾化和等离子旋转电极法制备的洁净预合金粉末均可用于 Inconel 718 合金和构件的研制。

C01-65

等离子喷涂 FeCoNiCrSiAl_x 高熵合金涂层的组织结构与摩擦磨损性能研究

张伟, 吴雨晴, 肖金坤, 张超

扬州大学机械工程学院

高熵合金因具有优异的高强度、高硬度、高塑性、耐腐蚀、耐磨损等综合性能，在工程应用领域具有广阔的发展潜力。本研究选用纯元素作为原料粉末利用粉末冶金高能球磨的方法制备了 Al 含量不同的 FeCoNiCrSiAl_x (x=0、0.5、1、2) 高熵合金粉末，并采用大气等离子喷涂 (APS) 技术在 304 不锈钢基体上制备了 FeCoNiCrSiAl_x 高熵合金涂层，最后对制备的 FeCoNiCrSiAl_x 高熵合金涂层在 800℃ 下进行 2h 热处理。通过对涂层的微观组织结构、力学性能及摩擦磨损性能进行研究，结果表明：经过 15h 的高能球磨后，合金化粉末主要是由 FCC 相组成；对于喷涂态的 FeCoNiCrSiAl_x 高熵合金涂层，主要由 BCC 相组成，且随着 Al 含量的增加，FCC 相的含量进一步降低；喷涂态 FeCoNiCrSiAl_x 高熵合金涂层的硬度在 450~550 HV 之间，热处理后涂层的硬度提升了 30% 左右，随着 Al 含量的增加硬度呈现降低趋势；随着 Al 含量的增加，FeCoNiCrSiAl_x 高熵合金涂层的磨损率逐渐降低，且热处理后涂层的耐磨损性能相比喷涂态有较大的提高。

关键词：高能球磨；高熵合金；热喷涂涂层；摩擦磨损

C01-66

高品质球形钛合金粉末制备技术研究

张飞, 高正江, 马腾

中航迈特粉冶科技(北京)有限公司

增材制造钛合金零部件在航空航天、医疗等领域有着广阔的应用前景。而高品质球形钛合金粉末材料是制约钛合金增材制造技术发展的瓶颈所在。目前，选区激光熔化用钛合金粉末通常采用电极感应雾化工艺制备，目前受技术条件限制，雾化制粉工艺中仍存在空心粉及卫星粉含量高、细粉收得率低、粉末球形度较差等问题。本文基于电极感应雾化工艺，结合数值模拟和工艺实验，研究了雾化喷嘴结构、感应线圈类型、雾化参数等因素对 TC4 粉末性能的影响，分析了不同雾化压力下 TC4 粉末的中位粒径、流动性、球形度等技术指标，研究结果表明，当雾化压力为 3.8Mpa 时，TC4 粉末通粉的中位粒径 D₅₀=55-65um，细粉收得率超过 35%，球形度 0.9 以上，流动性 25s/50g，氧增量 <200ppm。

C01-67

机械球磨时间对 W-Nb 合金氦辐照行为影响

罗罗马, 徐梦瑶, 咎祥, 朱晓勇, 程继贵, 吴玉程

合肥工业大学

实验采用不同球磨时间制备 W-Nb 复合粉末，并通过放电等离子烧结方法制备 W-Nb 复合材料。所得的 W-Nb 复合材料用剂量为 9.90×10^{24} ions/m² 的氦离子束辐照 11 分钟，随后分别在 900、1100 和 1300℃ 下热处理 1 小时。实验结果表明，球磨时间不同导致复合材料中钨钨固溶程度不同，进而造成了材料抗辐照损伤性能的差异。其中，球磨 36 小时的试样的固溶程度最低，其在辐照后表面损伤也最严重，表面出现了纳米绒毛状结构。此外，在同一个样品中，钨的不同的晶面取向也导致了不同的表面损伤形貌。通过对比不同热处理温度的试样，发现富钨区域的晶粒发生了明显的长大，但富钨区域的表面形貌几乎没有变化。这是由于钨的加入使得 He 在钨中的解吸峰右移。

关键词：W-Nb 合金；机械球磨法；放电等离子体烧结；氦辐照；热处理

C01-68

电子束选区熔化成形 TA15 合金的微观组织演变

杨季鑫, 黄永江, 孙剑飞

哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

TA15 钛合金在航空航天领域应用非常广泛，其制备及性能研究具有重要的实际工程意义。本文采用电子束选区熔化成形制备 TA15 钛合金，并研究了制备态合金的微观组织演变及力学性能。优化了 TA15 钛合金的电子束选区熔化参数：束流

大小 9mA、扫描速度 1400mm/s；采用 EBSD、SEM、TEM、XRD 等观察了制备态合金沿打印方向组织结构演变规律。研究表明： α 相的形态和尺寸沿成形高度方向上有显著变化，在样品上表面获得了针状 α 相和 α' 马氏体，样品中部 α 相形态及分布不均匀；熔体从 β 相区冷却过程中， β 相向 α 相的转变遵循 Burgers 取向关系；维氏硬度在样品中下部波动较小，距上表面约 10 个粉层厚度的位置处有显著增加。这是由于不同位置处热历史差异造成 β 相转变路径不一致，熔化层向已沉积层传递热量，对其进行热处理，表层凝固区域由于冷却速率较快， β 相转变为 α' 马氏体进而使其硬度增加。

关键词：电子束选区熔化；TA15 钛合金；微观组织；晶体取向；硬度

C01-69

LED 衬底材料研究

陈景锋

厦门虹鹭钨钼工业有限公司

LED 外延片衬底材料是半导体照明产业发展的基石。由于蓝宝石衬底低廉的价格，成熟的生产工艺，占据了 96.3%LED 衬底市场。但其本身不导电性及低的导热系数，不能在垂直结构及大型的 LED 中使用。选择钼作为衬底材料有以下三个方面的优势。首先，钼本身高的熔点，良好的导热系数，优秀的机械性能，是优秀的 LED 衬底材料之选。其次，经过机械加工处理后，钼片的表面粗糙度能达到 0.3um，能够使 GaN 晶种在其表面上更好的生长，且钼的热膨胀系数与 GaN 相近，不会出现由于热膨胀导致的热应力失配问题。最后，钼衬底比蓝宝石、硅等衬底，其能耗小，符合绿色生产的特点。

C01-70

二维 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ 纳米片中的可调磁孤子相

唐思危^{1,2,3}，马运柱^{1,2}，刘文胜^{1,2}，盖峥³，Randy S. Fishman³，Satoshi Okamoto³

1.中南大学粉末冶金研究院

2.轻质高强结构材料国家级重点实验室

3.橡树岭国家实验室

本文采用多组元粉末压制成坯，真空烧结的方法制备出 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ 多晶粉末，然后通过添加碘元素进行化学气相运输制备出层状 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ 单晶。将单晶进行微剥离成功制备出二维 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ 纳米薄片。研究了具有不同厚度的薄片磁化率温度依赖性和场依赖性。当薄片的厚度约为几百纳米乃至几十纳米的时候，孤子峰的软化和最终消失，同时，在较低磁场方位，新的磁峰出现。本文通过模拟计算解释了由于尺寸限制引起的孤子晶格内的自旋螺旋数的变化导致了孤子峰的出现和消失。与纳米材料中的传统磁性状态相比，定量自旋螺旋的稳定性和厚度可调性使得 $\text{Cr}_{1/3}\text{NbS}_2$ 成为超越摩尔定律的自旋电子纳米器件的潜在候选者。

C01-71

纳米钨粉的注射成形研究

陈铮，秦明礼，杨建军，曲选辉

北京科技大学

采用溶液燃烧合成法和氢气还原法成功制备了粒径约为 30nm 的纳米钨粉，然后使用注射成形方法将粉末成型，经过溶脱、热脱和烧结工艺使其致密化。实验研究了注射成形喂料的流变性能，确定了其临界装载量，并系统地研究了脱脂和烧结工艺。研究表明，与商业亚微米钨粉相比，所合成的纳米钨粉的装载量较低，且对纳米钨粉进行预分散处理之后可以显著地提高其临界装载量。纳米钨粉的脱脂还可以在 1500℃ 烧结时达到超过 95% 的相对密度，晶粒尺寸约为 500nm。

关键词：溶液燃烧合成；纳米钨粉；注射成形；烧结

C01-72

低成本高性能钛基 3D 打印粉体材料开发及其 SLM 成形研究

侯羽航，严明，周英豪，王大为

南方科技大学

钛及钛合金作为一种先进的结构材料，由于其具有优异的比强度、耐蚀性和生物相容性而被广泛应用于航天航空、深海探测和生物医疗等领域。近年来，选区激光熔化技术，作为增材制造 3D 打印中非常重要的一项技术逐渐发展起来。其通过

高能激光束来熔化金属粉末，以逐层累积的方式，最终制备形成目标零件，使结构复杂的零件制备加工更加灵活方便。因此，钛及钛合金的选区激光熔化加工也成为了目前研究应用的重点。然而，纯钛（CP-Ti）粉末价格昂贵，制约了钛合金 3D 打印成型的进一步发展和应用。

为了降低 3D 打印钛合金的原料成本，本研究以制备流程简单、价格低廉的氢化脱氢（HDH）钛粉作为实验对象，通过高能球磨的手段，对原始 HDH 钛粉体进行了形貌改性，制备出了能够应用于选区激光熔化金属打印机上的新型改性钛基粉体材料。实验探究了高能球磨过程中，各项参数对粉体整形效果的影响，确定了适用于 HDH 钛粉的最佳球磨参数。同时，通过一系列实验设备对改性钛粉的球形度、粉体粒径大小和分布、元素含量以及物相组成等进行了表征。

研究发现，在球磨过程中，磨球和球磨罐内壁不可避免存在磨损，从而向改性粉末中引入了 Fe、Cr、O 等杂质元素。这些微量元素以合金化元素的形式进入粉体中，在粉体成型加工过程中，影响马氏体相变和组织形貌，从而改变了材料的力学性能。

同时，本研究通过 SLM125HL 金属 3D 打印机，对改性粉体进行了选区激光熔化成型，制备出了成型件，确定了最优打印参数，并对成型件的机械性能进行了测试。实验结果表明，改性纯钛粉体成型件具有出色的力学性能，在不损失延伸率的情况下，其布氏硬度较 CP-Ti 成型件增大了约 30 HB，最大抗拉强度提高了约 200 MPa。随后，研究通过 SEM、TEM 和 XRD 等设备，对改性纯钛粉体成型件的组织形貌和物相组成进行了表征，确定了改性纯钛成型件中的马氏体组织为 α' 相，并对改性纯钛成型件机械性能的提高做出了解释。

最后，研究考察了去应力热处理对改性纯钛粉体成型件的影响。改性纯钛粉体成型件在经过去应力热处理后，加工硬化效果削弱，硬度和抗拉强度降低，而塑性得到了较大的提升。

关键词：选区激光熔化；钛及钛合金；粉体改性；球磨；马氏体相变；热处理

C01-73

固溶高功函数过渡金属元素强化碳化钨的研究

吕皓，赵冲，宋晓艳，刘雪梅，王海滨

北京工业大学

过渡金属碳化物和氮化物通常具有极高的硬度，因此被广泛地应用于制作切削工具和耐磨涂层。碳化钨作为一种典型的过渡金属碳化物，具有高硬度、高熔点、高化学稳定性等特点，拥有重要的工业应用价值和前景。碳化钨通常被应用于制造硬质合金，通过添加晶粒长大抑制剂、改善烧结工艺等方法，提高硬质合金的硬度以及耐磨性。然而目前对于碳化钨高硬度的机理研究并不充分，限制了对碳化钨硬度的进一步提高以及对硬质合金性能的改进。本文通过第一性原理计算的方法，分析了碳化钨的电子态密度，提出了通过固溶高功函数元素的方法提高碳化钨的价电子浓度，调节碳化钨的费米能级，达到提高碳化钨杨氏模量和硬度的目的。对价电子浓度、局域电势、电子局域函数和功函数的分析，进一步解释了高功函数元素掺杂提高碳化钨硬度的内在机理。以铼元素为例，制备了高功函数元素掺杂的碳化钨。利用纳米压痕方法测试，发现固溶铼元素可以显著提高碳化钨的杨氏模量和硬度，与 WC 相比本征硬度和杨氏模量分别提高 52% 和 38%。本研究提出了提高碳化钨硬度的新方法，并依据理论预测制备出高硬度的碳化钨，为未来提高过渡金属碳化物和氮化物以及硬质合金的硬度及耐磨性提供了新的途径。

关键词：WC；第一性原理；功函数

C01-74

透气模具钢 S136 的激光 3D 打印&增材制造

曾广豪^{1,2}，周英豪^{1,2}，严明¹

1. 南方科技大学

2. 哈尔滨工业大学

因困气而影响注塑制品的质量是注塑工业生产实际中亟待解决的问题之一，本文将利用选区激光熔化（Selective Laser Melting, SLM）技术并结合熔体发泡法，研究：（1）高品质模具钢 S136 的成形及其力学性能，以及（2）在此基础上，开发可透气的 S136 模具钢镶嵌块，以解决注塑过程中的困气问题。

研究结果表明：（1）模具钢 S136 在激光能量密度为 $74\text{J}/\text{cm}^3$ 的 SLM 加工条件下可得到致密度达 99.37% 的 3D 打印件，其断裂强度、硬度为 $908\pm 52\text{MPa}$ ， $683.5\pm 8.7\text{HV}$ ；（2）SLM 过程中的加工参数如扫描间距及激光能量密度、发泡剂的种类及含量对于所制备的透气模具钢的孔隙种类（通孔 vs 闭孔）、孔隙率等均有重要影响。与此同时，合适的发泡剂可提高透

气钢的硬度及耐蚀性。

关键词：选区激光熔化（SLM）；模具；透气钢；熔体发泡法

C01-75

Low temperature co-sintering of tungsten alloy/steel composite structure using HIP process

蔡青山，马运柱，刘文胜

中南大学粉末冶金研究院

W-Ni-Cu alloy/30Cr steel composite structure has been fabricated by co-sintering at temperature as low as 1200 °C for 3 h by hot isostatic pressing method. Microstructural studies revealed liquid phase migration of Cu, Ni and Sn elements was observed at the co-sintering interface, neither intermetallic compounds nor other brittle phases were found in the boundary region. Tensile test demonstrated a good bond strength of interface of W-Ni-Cu alloy/steel composite structure.

关键词：Tungsten alloy, co-sintering, composite structure, microstructure

C01-76

石墨/硬质合金等离子喷涂涂层强流脉冲电子束改性研究

张悦¹，于福洋¹，耿吴斌¹，董福宇¹，张楠楠¹，关庆丰²

1.沈阳工业大学

2.江苏大学

硬质合金涂层具有硬度高、耐磨性好、高温力学性能稳定等特点，具有广泛的应用前景。喷涂技术成本低、操作简便、成形效率高，是制备硬质合金涂层极具竞争潜力的方法之一。但由于喷涂过程中 WC 容易氧化脱碳，制备的涂层致密度无法进一步提高。研究采用石墨添加的方法避免氧化脱碳现象，同时石墨的添加在涂层服役过程中起到了一定减摩的作用。针对喷涂涂层质地较疏松、表面存在孔隙和空洞等问题，本文采用 HOPE-I 型强流脉冲电子束设备对等离子喷涂 Graphite/WC-Co 涂层进行表面改性处理，通过 XRD、SEM、EPMA 以及 EBSD 等手段表征电子束辐照前后样品的微观组织结构，并对处理前后的样品进行表面显微硬度、耐磨性、粗糙度、结合力等测试与分析，讨论强流脉冲电子束参数对涂层表面改性效果的影响。获得以下结果：电子束处理后涂层表面孔隙和空洞明显减少，局部致密平整，表面形成半球形凸起结构；片层石墨熔化变小，更均匀地分布在涂层表面，部分石墨与硬质合金形成 W-C-Co 三元相。XRD 分析表明，电子束处理后涂层中 W₂C 相逐渐被 WC_{1-x} 相和 Co₃W₉C₄ 相所取代，且随着电子束辐照次数的增加 WC_{1-x} 相和 Co₃W₉C₄ 相比例逐渐增大。测试结果显示，强流脉冲电子束处理 Graphite/WC-Co 涂层的表面显微硬度明显提高，磨损性能和耐蚀性均得到改善。分析表明，涂层致密性和平整度的提高，表面相成分的改善，以及元素分布差异等因素影响，对涂层性能的提高起到重要作用。

关键词：石墨/硬质合金涂层；等离子喷涂；强流脉冲电子束；显微组织；力学性能

C01-77

不同 Mn 含量对粉末冶金方法制备铝青铜的组织与性能影响

尹海清，张国飞，邓正华

北京科技大学钢铁共性技术协同创新中心

用粉末冶金方法制备了 Cu-14Al-2Ni-2Fe-xMn (x=0,1,2,3,4,5,6; %，质量分数) 高铝青铜。利用扫描电子显微镜 (SEM)、万能试验机、摩擦磨损试验机等对不同 Mn 含量的高铝青铜的组织与性能研究后发现：合金中主要存在 α 相、β' 相、γ 相和 k 相。随着 Mn 含量的增加，烧结后降温过程中 β 相发生共析反应受阻，形成 β' 相，并随着 Mn 含量升高呈现增多的趋势，并且合金中的 γ 相随着 Mn 含量的升高而逐渐减少。随着 Mn 含量的增加，合金的屈服强度与抗拉强度先升高后降低，在 Mn 含量为 4% 时分别达到最大值。随着 Mn 含量的升高，合金的摩擦系数呈现出先降低后升高的趋势，在 Mn 含量为 4% 时合金的摩擦系数与磨损量达到最小值。

关键词：Mn 含量；铝青铜；组织；摩擦磨损

C01-78

氧化钷颗粒对 97W-Ni-Co 高比重钨合金微观组织和性能影响

郑建平

1.国家钨材料工程技术中心

2. 厦门钨业股份有限公司技术中心

本文研究了烧结温度和氧化钽添加量对 97W-Ni-Co 高比重钨合金微观组织和性能的影响。采用 SEM 表征合金的显微组织结构, EDS 半定量分析粘结相成分, 同时测定了合金的密度、硬度、准静态抗压强度和抗拉强度。结果表明: 未添加氧化钽的合金在 1440~1480℃ 烧结 60min, 钨晶粒度从 8.5 μm 增加至 28.9 μm 。添加 0~0.5wt.% 氧化钽的合金在 1480℃ 烧结 60min, 合金钨晶粒度从 28.9 μm 细化到 16.2 μm 。合金在 1460℃ 以上烧结, 相对密度可达 99.0% 以上, 微量掺杂氧化钽对合金致密度基本没有影响。随着烧结温度降低和氧化钽添加量增加, 合金晶粒度逐渐减小, 硬度逐渐增加; 在 1440℃ 下烧结, 合金硬度大幅度增加。添加氧化钽合金在 1480℃ 以上烧结, 抗压强度和抗拉强度均有增加, 其中合金抗拉强度增加幅度较大。

C01-79

利用氢化海绵钛和中间合金为原料制备高品质粉末冶金 TC4 钛合金

孙倩倩, 牛红志*, 张德良

东北大学材料科学与工程学院陶瓷与粉末冶金研究所

以氢化海绵钛和 AlV40 中间合金颗粒为原材料, 快速同步机械研磨制备出均匀细小的混合粉末原材料。借助气氛保护下的快速感应烧结和热挤压致密化, 制备出高强度高塑性的粉末冶金 TC4 钛合金。合金的主要力学性能超过普通的粉末冶金钛合金, 并高于熔铸法的锻造钛合金, 致密度为 99.8%, 抗拉强度达到 1320MPa, 延伸率高达 13%。对合金粉末烧结过程中的脱氢反应和物相演变规律进行了系统研究, 发现氢化钛粉末在烧结过程中, 发生吸热的放氢还原反应, 可以消除 TiH₂ 粉末颗粒表面的 TiO₂ 纳米层, 达到粉末颗粒自净化的作用, 最终合金的氧含量仅为 0.25%。

关键词: 粉末冶金钛合金; 同步研磨制粉; 热机械固结; 脱氢过程; 显微组织; 力学性能

C01-80

不同雾化法制备电子束 3D 打印用 Ti6Al4V 粉末及其表征

柳中强¹, 黄传收¹, 肖志瑜,¹ 陈进², 刘瑞平³,

1. 华南理工大学 国家金属近净成形工程技术研究中心

2. 佛山市岁之博新材料科技有限公司

3. 深圳圆梦精密技术研究院

采用自行研制的电极感应熔炼雾化设备制备 Ti6Al4V 合金粉末, 利用欧奇奥 500NanoXY+HR 型静态干法和湿法粒度粒形分析仪、MASTERSIZER 2000 激光粒度分析仪、X 射线衍射仪和扫描电镜对粉末的粒度分布、粒形、相组成和组织进行了表征和分析, 并与等离子雾化法所生产的粉末进行了对比分析。结果表明: Ti6Al4V 合金粉末的 D10、D50 和 D90 分别为 58 μm 、82 μm 、114 μm 和 50 μm 、70 μm 、100 μm , 粒度均呈正态分布, 流动性分别为 24.80 s/50 g 和 20.55 s/50 g, 松装密度分别为: 2.53 g/cm³ 和 2.64 g/cm³; Ti6Al4V 合金粉末平均延伸度分别为 81% 和 92%, 平均圆形度分别为: 80% 和 89%, 粗糙度在 6% 以下的粉末分别占 83% 和 93% 以上, 赘生物指数为 0 的合金粉末分别占 52% 和 81%, 说明均具有良好的球形度, 合金粉末含氧量均低于 0.15%。合金粉末表面均为快速凝固形成的近似等轴状胞状枝晶组织, 内部由大量的针状马氏体组成。以上结果表明自行研制的合金粉末符合电子束 3D 打印钛合金的要求。

关键词: 电极感应熔炼雾化技术; 电子束选区熔化技术; Ti6Al4V 粉末; 粒形; 粒度

墙展

C01-P01

粉末冶金 Be/6061Al 复合材料的时效行为

刘向东, 徐庆东, 何世雄, 张鹏程

中国工程物理研究院材料研究所

Be/6061Al 复合材料的时效行为与 6061Al 合金的时效行为不完全相同。本研究采用显微维氏硬度、高分辨透射电镜 (HRTEM) 和 DSC 实验研究了粉末冶金工艺制备的 Be/6061Al 复合材料 (Be 质量分数为 62%) 的时效行为, 并详细讨论了相应的时效析出机理。研究结果表明, Be/6061Al 复合材料表现出加速时效硬化现象, 其时效析出顺序与 6061Al 合金相似, 但 GP 区的形成受到抑制, 这可归因于 Be/Al 界面引起的空位浓度降低以及界面上 Mg 和 Si 的偏析。

C01-P02

激光选区熔化成形 18Ni300 模具钢的工艺优化及组织性能研究

魏富涛¹, 温利平¹, 谢莹², 肖志瑜¹

1. 华南理工大学
2. 广州昶联热等静压材料有限公司

工艺参数是影响激光选区熔化 (SLM) 成形件性能的主要因素之一, 优化出合适的工艺参数对 SLM 具有重大的意义。本文通过制备 25 个不同参数的试块, 优化出合适的激光功率、扫描速度及能量密度, 并结合能量密度分别研究了扫描速度和激光功率对 18Ni300 模具钢组织性能的影响。结果表明, 随着激光功率的增加, 其各方面性能会逐渐变好, 而扫描速度逐渐增加时, 其各方面性能呈现出先变好再变差的趋势, 当激光功率为 175W, 扫描速度为 400mm/s 时, 18Ni300 的相对密度最高为 99.58%, 抗拉强度, 显微硬度和断后伸长率分别为 1101.56MPa、348.4HV 和 6.44%。

关键词: SLM; 18Ni300 模具钢; 激光功率; 扫描速度

C01-P03

TiC-ZrC 和 TiC-ZrC-WC 微观结构相分离过程的相场模拟

罗泽霖¹, 杜勇¹, 李波¹, 毛鸿¹, 唐赛¹, 孔毅¹, 彭英彪²

1. 中南大学粉末冶金国家重点实验室
2. 湖南工业大学冶金与材料工程学院

TiC-ZrC 复合碳化物熔点高、硬度大, 化学稳定性好, 具有良好的热导率和电导率, 是一种有广泛应用前景的复合材料。最近几年国内外先后报导了 TiC-ZrC 应用于硬质合金和高温涂层的实验研究。TiC-ZrC 在高温下能形成完全固溶体, 在低温下会发生相分离的转变。这种转变能细化晶粒, 起到增加强度和硬度的效果。对于这种相变特点, 本文通过耦合 CALPHAD 方法与考虑弹性应变的相场模型, 模拟了 TiC-ZrC 以及 TiC-ZrC-WC 的微观结构演变过程, 得到了与实验类似的模拟结果。模拟结果显示, TiC-ZrC 层状结构的析出可能是由弹性应变产生, 弹性应该是层状结构出现的主要原因。TiC-ZrC-WC 发生相分离时, 会形成富 Ti,W 和富 Zr 的两相。以上研究有助于理解 TiC-ZrC 应用过程中的相变机制。

C01-P04

激光立体成形下 Ti-6Al-4V 组织形成与变体选择研究

马健凯, 王锦程, 李俊杰, 林鑫
西北工业大学

钛合金由于其性能的优越性在航空、航天、生物医学等领域具有广泛的应用, 尤其在增材制造加工过程和最终获得的微观结构受到研究者的关注。本文研究了 Ti-6Al-4V 在增材制造过程中 β 相析出 α 相出现的变体选择现象, 二氧化碳激光加工过程中的激光功率、扫描速度、扫描方式等都会对 α 相的变体选择产生一定的影响。激光加工过程中热循环往复、冷速快和温度梯度大的特点使得沉积层的组织呈现复杂的形貌。从高温的 β 相 (BCC 结构) 析出低温的 α 相 (HCP 结构) 时遵循 Burgers 取向关系, 即 $\{0001\}\alpha // \{110\}\beta$, $\langle 11-20 \rangle \alpha // \langle 111 \rangle \beta$, 同一个 β 晶粒内部会产生 12 中 α 变体。本研究着眼于理解 Ti-6Al-4V 在增材制造过程中 α 相转变结构。试样的形貌表征采用共聚焦显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM), 以及透射电子显微镜 (TEM), 取向观察采用电子背散射技术 (EBSD)。结果表明: 沉积 1 层试样中含有正交针状的马氏体相, 并且内部含有大量的纳米析出相, 母相与新相之间呈现半共格界面, 在随后的沉积过程中正交针状的马氏体相逐渐变短变粗, 形成网篮组织。从取向分布函数 (ODF) 可以看出随着沉积过程的进行 α 相发生了明显的变体选择。

C01-P05

真空气雾化 Cu 基仿金合金粉末的制备及其性能表征

崔波¹, 朱权利¹, 李博², 陈进³, 肖志瑜¹

1. 华南理工大学
2. 广州纳联材料科技有限公司
3. 佛山市岁之博新材料科技有限公司

利用国产真空气雾化设备制备出一种适用于 3D 打印的新型 Cu 基仿金合金球形粉末, 对粉末的形貌、CIELAB 色度空间坐标值 (L^* 、 a^* 、 b^*)、粒度与粒度分布以及显微组织等进行分析, 并研究其选区激光熔化成形件的显微组织等。结

果表明：气雾化制备出的该成分（Cu_{6.5}AlNi_{1.2}SnInCe）下的 Cu 基仿金合金粉末主要为球形，部分有卫星颗粒，粉末结构由胞状晶和树枝晶组成，显微组织为 α 铜基固溶体；粉末色度值为 $L^*=72.72$, $a^*=2.30$, $b^*=13.15$, 与黄金色度： $L^*=90.36$, $a^*=4.2$, $b^*=36.0$ 相比，较为接近；粉末流动性为 0.32s/g, 松装密度为 4.39g/cm³, 振实密度为 4.67g/cm³, 含氧量为 200ppm；其中粒径在 15~5 μm 间的粉末占总制备粉末的 20~25%，以上性能符合 3D 打印对粉末性能的要求。

关键词：真空气雾化；仿金合金；粉末特征

C01-P06

Ti(C,N)基金属陶瓷刀具的显微组织结构对其切削铝合金过程中磨损行为的影响

赵龙博, 郑智鹏, 齐楠

湖南大学材料科学与工程学院

本文通过调整 Ti(C,N)基金属陶瓷的碳含量，实现了对其显微组织的设计和调控，并结合扫描电镜、X 射线衍射分析和切削加工测试，系统地研究了显微组织对金属陶瓷刀具力学性能和磨损行为的影响。随着碳含量的增加，外加的碳元素与金属陶瓷粘结相中溶解的合金元素反应，促进了 Co₃W₃N 相(η 相)的消失、芯相含量的减少和壳相含量的增加。随着外加碳含量从 0wt.% 增长至 2.4wt.%，金属陶瓷的硬度从 HRA92.7 逐渐下降至 HRA92.5，而抗弯强度先从 1890MPa 增长至 2840MPa(1.2wt.%C)，随后下降至 2190MPa。在干式切削 7075 铝合金的过程中，Ti(C,N)基金属陶瓷刀具的磨损机制主要是磨粒磨损和粘附磨损。随着碳含量的增加和芯相含量的减少，Ti(C,N)基金属陶瓷的摩擦系数增大，这导致了切削温度的提高和刀具耐磨性能的下降。此外，随着切削速度的提高，金属陶瓷刀具中 Co₃W₃N 相(η 相)的存在会加剧刀具的磨损过程。

关键词：金属陶瓷；显微组织；力学性能；铝合金；磨损行为

C01-P07

激光粉末沉积梯度 Ti-Al 金属间化合物涂层的组织和耐磨性能研究

刘阳, 刘文胜, 马运柱, 张诚, 刘超, 杨玉玲

1.中南大学粉末冶金研究院

2.轻质高强结构材料国家级重点实验室

钛及其合金以其密度低、比重轻、比强度高耐腐蚀性能好等特点，广泛应用于航空航天、石油化工和生物医疗等领域。但因其表面硬度低、耐磨性能差等缺点严重影响了使用过程中的安全性与可靠性。本论文以 Ti6Al4V 粉末和 AlSi10Mg 粉末为原料，采用激光粉末沉积方法，通过同轴实时变比例送粉，逐层改变钛合金和铝合金粉末成分比例，以高功率激光束熔化金属粉末，制备出成分梯度的 Ti-Al 金属间化合物涂层。利用扫描电子显微镜 (SEM)，电子探针 (EPMA) 和微区 X 射线衍射 (micro-area XRD) 显微硬度计和滑动磨损设备等试验手段研究了梯度 Ti-Al 金属间化合物涂层的微观组织结构，成分分布、相结构、硬度分布和磨损行为。研究表明：所制备的梯度涂层具有无裂纹和良好的成分梯度组织结构；金属间化合物 Ti₃Al, TiAl, TiAl₃ 和 Ti₅Si₃ 硬质相为梯度 Ti-Al 金属间化合物涂层的主要相结构；金属间化合物和硬质相的形成增强了梯度涂层的显微硬度，从而提高了其耐磨性。梯度 Ti-Al 金属间化合物涂层的磨损率为 $1.989 \times 10^{-4} \text{ mm}^3 / \text{Nm}$ ，明显低于钛合金基体。梯度 Ti-Al 金属间化合物涂层作为 Ti6Al4V 合金表面耐磨耐高温涂层具有良好的应用前景。

关键词：激光粉末沉积；梯度涂层；Ti6Al4V 表面；Ti-Al 金属间化合物；显微组织；耐磨性能

C01-P08

放电等离子烧结原位自生 β -Si₃N₄ 晶须与 ZrO₂ 协同增韧无粘接相 WC 复合材料的研究

李京懋, 李小强, 谢玉洁

华南理工大学

使用放电等离子烧结工艺 (SPS) 制备原位自生 β -Si₃N₄ 晶须与 ZrO₂ 协同增韧无粘相 WC 基复合材料。通过控制主要硬质相 WC 质量分数不变，研究 ZrO₂；Si₃N₄ 质量分数比例对 Si₃N₄ 转化率、材料的微观组织、力学性能的影响。对比参考为含相同质量分数 WC 不添加 ZrO₂ 的 WC-Si₃N₄ 复合材料，结果表明：添加 ZrO₂ 会不同程度上提升复合材料的硬度，少量添加 (<1 wt.%) ZrO₂ 不会降低材料韧性，超过 1 wt.% 质量分数的添加将会影响 $\alpha \rightarrow \beta$ -Si₃N₄ 转化并明显降低复合材料力学性能，其韧性随氧化锆占比升高而降低。本实验中原位自生 β -Si₃N₄ 晶须与 ZrO₂ 协同增韧无粘相 WC 最佳力学性能由 WC-8 wt.%Si₃N₄-1 wt.%ZrO₂ 通过两步烧结 1680°C/1600°C 保温 5 分钟取得 (硬度 18.67GPa HV10, 断裂韧性 10.6 MPa·m^{1/2})。

关键词：WC；粉末冶金；放电等离子烧结；氮化硅转化；断裂韧性

C01-P09

共沉降法制备钨铜连续梯度材料

朱曦^{1,2}, 程继贵^{1,2}

- 1.合肥工业大学
- 2.安徽省粉末冶金工程技术研究中心

W-Cu 梯度功能材料一侧是高导电/高导热的 Cu, 另一侧是低膨胀/高熔点、高硬度的 W, 中间则为组成呈梯度变化的过渡层。这种非均匀的复合材料, 具有热应力缓释功能, 能充分发挥 W、Cu 各自的本征特性, 有较好的力学性能、抗烧蚀性、抗热震性等综合性能, 非常适合作为超高压电触头材料, 喷管喉衬, 电子束靶等高科技领域中的器件及用作核聚变装置中面向等离子体材料。近些年来, 研究人员尝试了熔渗法, 等离子喷涂法, 粉末冶金叠层共压共烧法等方法制备钨铜梯度功能材料, 本文通过共沉降法, 制备了梯度层连续变化的钨铜梯度复合材料, 通过对显微组织观察和硬度测试结果, 进一步验证了材料梯度层的连续性。实验中以 1-2 μm 和 3-5 μm 的铜粉为原料, 按设计与不同粒度的钨粉配成沉降复合粉, 对沉降的梯度合金坯体进行冷等静压并烧结。通过对成形压坯和烧结体的密度、显微组织、力学性能的测试分析, 考察了不同级配的加入, 以及成形烧结工艺参数等对材料组织、力学性能和导热性的影响。实验结果表明, 通过共沉降法可以制备出梯度连续变化的钨铜连续梯度材料生坯。经 1250 $^{\circ}\text{C}$ 烧结之后, 可以得到铜含量为 10~50%且呈连续梯度分布的钨铜复合材料, 沿梯度方向, 随铜含量的减少, 其维氏硬度逐渐升高, 最大值为 398HV。烧结体相对密度达到 98%, 热导率为 242 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ 。

关键词: 钨铜合金; 连续梯度材料; 级配; 热导率

C01-P10

热等静压法开发全致密高性能粉末冶金 HSLA 钢

庞心宽, 刘文胜, 马运柱, 蔡青山, 朱文潭

- 1.中南大学粉末冶金研究院
- 2.轻质高强结构材料国家级重点实验室

粉末冶金 (P/M) 钢因孔隙率高导致力学性能远远低于传统铸钢, 特别是塑性很低, 极大地限制了其在高端领域的应用。为了解决该问题, 本文采用气雾化+热等静压法 (HIP) 制备了全致密的高强度低合金 (HSLA) 钢样品。通过组织观察发现, 试样主要由贝氏体铁素体和马奥岛 (M—A) 组成, 组织均匀细小、无织构。其抗拉强度和延伸率分别达到了 1369MPa 和 11.23%。通过对比发现, 采用热等静压法制备的 HSLA 钢的强韧性组合优于传统铸钢和传统粉末冶金钢, 接近传统马氏体钢, 证实了通过适当的制备工艺和组织控制来制备高性能粉末冶金钢的可行性。

关键词: 粉末冶金; HSLA 钢; 热等静压; 力学性能

C01-P11

低温复杂结构件粉末冶金成形工艺

李一平, 卢正冠, 郭瑞鹏, 徐磊, 杨锐

中国科学院金属研究所

采用无坩埚感应熔炼超声气体雾化法制备了洁净 Ti-5Al-2.5Sn ELI 预合金粉末, 对预合金粉末进行了表征; 利用包套热等静压近净成形工艺制备了全致密的粉末冶金叶轮。通过对不同批次合金成分和性能的测试, 分析了不同氧含量对粉末合金力学性能的影响。研究结果显示, 采用包套热等静压近净成形工艺可获得全致密的粉末合金成分稳定均匀, 力学性能接近锻造合金的水平且稳定性好。阐述了通过降低钛合金中的间隙元素, 特别是含氧量对钛合金组织性能的影响。

关键词: Ti-5Al-2.5Sn ELI; 复杂结构件; 热等静压; 含氧量

C01-P12

锻造、选区激光熔化和电子束熔融制造的 Ti6Al4V 的摩擦磨损性能对比

覃佩婷¹, 王智¹, K.G.Prshanth², 张卫文¹

- 1.华南理工大学
- 2.Norwegian University of Science and Technology, Gjøvik, Norway. Department of Manufacturing and Civil Engineering

Ti6Al4V 合金具有比强度高、耐腐蚀等优点, 在航空航天、船舶、化工和汽车等行业中有着广泛的应用前景, 该合金使用量已占全部钛合金的 75%~85%。摩擦导致的磨损是机械失效的主要原因之一, 而 Ti6Al4V 合金低的耐磨性, 限制其在摩

擦磨损场合下的应用。增材制造与传统锻造的 Ti6Al4V 合金在结构和性能上存在显著差异, 从而导致其具有不同的耐摩擦磨损性能。本工作分别采用电子束熔融 (EBM), 选区激光熔化(SLM)和传统锻造制备了 Ti6Al4V 合金, 并着重研究不同制备工艺引起的摩擦磨损性能的差异。摩擦磨损实验采用环块模式, 其中 GCr15 钢为对磨环, 样品尺寸为 8mm*8mm*8mm, 施加载荷为 50N, 作用时间 600s。结果表明, 通过三种工艺生产的 Ti6Al4V 都含有马氏体组织, EBM 和 SLM 制备的 Ti6Al4V 具有针状微结构 (α), 而锻造制备的 Ti6Al4V 具有粒状 (α) 微结构。传统锻造和 EBM 制备的 Ti6Al4V 合金均有 β 相, 而在 SLM 制备的 Ti6Al4V 合金中未发现。SLM 制备的 Ti6Al4V 合金具有最高硬度, 而锻造制备的合金具有最低硬度。EBM、SLM 和锻造件样品磨损表面都有犁沟、磨粒、裂纹和剥落层。EBM、SLM 和锻造件样品的摩擦系数大小顺序为: SLM<EBM<锻造, 磨损率大小顺序为: EBM<SLM<锻造。在 EBM 试样磨损层和基体间发现富集 C 元素, 说明其在摩擦磨损过程中产生了碳化物。碳化物的产生可能会提高材料表层的硬度, 从而提高材料的耐摩擦磨损性能。发现 SLM 样品具有最厚的磨损层和横向裂纹, 表明其磨损机制存在疲劳磨损。综上可知锻造样品主要表现出磨粒和黏着磨损机理, SLM 样品主要表现出黏着和疲劳磨损机理, EBM 样品主要表现出磨粒磨损机理。耐摩擦磨损性能的顺序为: EBM>SLM>锻造。

关键词: Ti6Al4V; SLM; EBM; 锻造; 摩擦磨损

C01-P13

喷雾造粒法制备球形 WC/CoCr 合金粉末工艺研究

罗浩, 曾克里, 宗伟, 李志

广东省材料与加工研究所

本文对喷涂用 WC/CoCr 混合粉末喷雾造粒工艺进行了研究, 重点研究了料浆参数、雾化盘转速和进口温度对造粒粉末性能的影响, 通过试验优化设计, 得出如下结论: 粘合剂 PVA+10%PEG 具有较好的粘合性能, 能够较好的满足 WC-10Co4Cr 料浆的喷雾造粒过程中对粘合强度的要求; 同时得到的最佳的喷雾造粒工艺为: 雾化盘转速为 15000r/min, 进口温度为 320℃, 此时所得粉末的综合性能最佳: 球形度好, 流动性为 17.6g/50s, 松装密度 4.67g/cm³, 粒度 D15/D50 分别为 4.79 μ m、11.82 μ m。

关键词: 喷涂; 喷雾造粒; WC/CoCr 粉末

C01-P14

添加元素 Fe 对 90W-Ni-Cu 合金烧结特性的影响

朱文谭, 马运柱, 刘文胜, 蔡青山, 庞心宽

1.中南大学粉末冶金研究院

2.轻质高强结构材料国家级重点实验室

本文通过预混—压制成形—真空烧结的工艺过程研究了添加 Fe 对 90W-Ni-Cu 合金烧结特性的影响。借助扫描电镜及能谱分析、电子探针、XRD 和力学试验机等分析手段研究了 90W-Ni-Cu-Fe 合金的显微组织和力学性能。研究表明: Fe 元素的添加极大的降低了钨合金的烧结温度, 在 1300℃下获得了 98.7%的致密度。W-Ni-Cu-Fe 合金呈现典型的液相烧结组织, 晶粒尺寸为 20 μ m 左右。该体系的拉伸强度达到 870MPa, 相比于常规的 90W-Ni-Cu 体系的拉伸强度提高了 100-200MPa, 但烧结温度降低了 100-150℃左右。合金断面形貌主要呈现 W-W 晶间断裂和粘结相的延性撕裂, 同时有部分的穿晶断裂。

关键词: 钨合金; 低温烧结; 掺杂; 拉伸性能

C01-P15

Ti-5Al-2.5Sn ELI 粉末冶金制件的精细化学铣研究

李一平, 郭瑞鹏, 卢正冠, 徐磊, 杨锐

中国科学院金属研究所

采用无坩埚感应熔炼超声气体雾化法制备了 Ti-5Al-2.5Sn ELI 洁净预合金粉末, 采用包套热等静压近净成形工艺制备出全致密的粉末冶金叶轮。化学铣是一种快捷有效除去粉末冶金制件包套和型芯的方法, 由于包套和工件的材质不同、活性不同, 因此在化学铣的不同阶段粉末冶金制件化学特性会发生变化。本文研究了粉末冶金制件从热等静压压坯到最终毛坯的完整化学铣过程, 调整不同阶段的腐蚀液成分和化学铣参数等, 提出一种便捷有效的 Ti-5Al-2.5Sn ELI 粉末冶金制件的化学铣工艺。

关键词: 钛合金; 粉末冶金; 化学铣; 热等静压

C01-P16

难熔金属体积成形中的材料流动及应变分布

杨益航^{1,2}, 郑艾龙², 黄羽², 张厚安¹, 黄志民², 彭福生²

1. 厦门理工学院
2. 厦门虹鹭钨钼工业有限公司

难熔金属材料的塑性变形通常较难进行, 对烧结纯钼施以多向锻压加工后材料变致密, 微观组织获得明显细化, 但锻压坯料内各个部位的晶粒尺寸还是存在差异。由此讨论应变路径对金属力学行为的影响规律, 分析导致应变路径效应的微观机理及其适用的数值模型。分析多向锻坯料的心部应变储能较大, 其金属流动剧烈, 晶粒尺寸相比坯料四周也会偏大, 此实验结果与 Deform 有限元分析结论相近。

C01-P17

热等静压工艺制备 Inconel 718 粉末合金及性能

徐磊

中国科学院金属研究所

采用国际上通用的气体雾化法和等离子旋转电极法制备了 Inconel 718 洁净预合金粉末, 并对预合金粉末进行表征。结果表明两种粉末制备手段经过典型高温合金热等静压成型工艺制备的粉末合金室温和高温拉伸性能并无显著区别, 粉末合金经过固溶+时效热处理后材料的性能也并无显著区别且性能均接近锻件水平, 气体雾化和等离子旋转电极法制备的洁净预合金粉末均可用于 Inconel 718 合金和构件的研制。

C01-P18

电极感应熔炼气雾化制备 Ti-6Al-4V 合金粉末的性能及其表征

黄传收¹, 柳中强¹, 吴苑标¹, 温利平¹, 陈进², 肖志瑜¹

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. 佛山市岁之博新材料科技有限公司

采用国产自行研制的无坩埚电极感应熔炼气雾化(EIGA)设备制备 Ti-6Al-4V 合金粉末, 实验使用环孔型和环缝型两种气雾化喷嘴, 改变雾化压力和熔炼功率, 设计四组工艺参数, 研究雾化工艺对粉末性能的影响规律。根据激光选区熔化(SLM)对粉末的要求, 将筛分得到的粒径小于 53 μm 的粉末进行表征, 采用 MASTERSIZE 2000 激光粒度分析仪分析不同雾化工艺制备粉末的粒度分布, 采用欧奇奥 500NanoXY+HR 型粒度粒形分析仪对粉末的粒形进行量化表征分析。结果表明, 采用环缝型喷嘴、6 MPa 雾化压力和 25 kW 熔炼功率的工艺参数制备的粉末性能最佳, 得到的粉末粒径较小且分布集中, 粒径呈近似正态分布, D10、D50 和 D90 分别为 19.4 μm 、31.9 μm 、和 51.5 μm ; 粉末的球形度较高, 95%的粉末圆度在 85%以上, 椭圆比的平均值为 83.5%, 欧奇奥钝度的平均值为 92.7%, 超过 80%的粉末赘生物指数为 0, 只有极少量卫星粉。通过 XRD、SEM、EDS 能谱和氧氮仪对粉末进一步分析, 发现粉末内部组织为不同取向的针状 α' 马氏体, 空心粉含量较少, 粉末成分无损耗且氧含量较低, 满足 SLM 工艺对粉末性能的要求。

关键词: EIGA; Ti-6Al-4V 合金; 球形粉末; 性能

C01-P19

热处理对粉末冶金 2A12 铝合金组织和性能的影响

杨玉玲, 马运柱, 刘文胜, 刘超, 刘阳

1. 中南大学粉末冶金研究院
2. 轻质高强结构材料国家级重点实验室

粉末冶金铝合金具有低密度、高比强、高耐磨性和耐腐蚀性的特点, 表现出广阔的应用前景, 特别是汽车工业和航空航天工业。本文 2A12 铝合金粉末为原料, 采用传统的压制和烧结方法, 制备粉末冶金铝合金, 并对制得的粉末冶金铝合金进行固溶和时效热处理。借助 SEM、XRD 等对材料的微观组织和物相组成进行分析, 并对材料的力学性能变化规律进行研究, 探讨不同热处理参数对材料的影响作用。研究表明: 制备得到的粉末铝合金在经过固溶和时效处理后, 抗拉强度和硬度得到显著提高。495 $^{\circ}\text{C}$ 固溶处理 2h 后, 边界处的析出相大部分弥散消失, 仅有少量残留, 同时在颗粒内部出现白色细小颗粒, 进而经过 190 $^{\circ}\text{C}$ 时效处理 8h, 边界处的析出相基本会转变成稳定的 S (Al_2CuMg) 和 θ (Al_2Cu) 相, 在边界处产生钉扎效应, 阻碍位错的运动, 可以明显提升粉末冶金 2A12 铝合金的力学性能

关键词: 铝合金; 热处理; 力学性能

C01-P20

Hot deformation and processing maps of a 12Cr-ODS ferritic steel

Lina Guo^{*1}, Benfu Hu², Shunmi Peng¹

1.China institute of atomic energy

2.University of Science and Technology Beijing

The deformation behavior of a 12wt.%Cr oxide dispersion strengthened (12Cr-ODS) ferritic steel has been investigated by using isothermal hot compression tests with Gleeble-1500 thermal simulator. The tests are performed in temperature range of 1070–1150°C and strain rate range of 0.002–0.2 s⁻¹. The true stress–true strain curves show that the peak and steady flow stress decrease with increasing deformation temperature and decreasing strain rate, which can be represented by a Zener–Hollomon parameter in the hyperbolic-sine constitutive equation. The activation energy for hot deformation of 12Cr-ODS ferritic steel is about 384.487 kJ/mol. The processing maps of the material at the strain of 0.3 are obtained according to the dynamic materials model and Prasad instability criterion. The map exhibits two domains: the instability domain in the temperature range of 1075–1120°C and strain rate of 0.02–0.002 s⁻¹, and the stability domain in the temperature range of 1070–1135°C and strain rate of 0.002–0.02 s⁻¹ with peak efficiency of 30%. The steel exhibits dynamic recrystallization (DRX) at 1120°C and 0.002 s⁻¹, which are the optimum parameters for hot working of the alloy.

Keywords: 12Cr-ODS ferritic steel; Hot compression deformation; Flow stress; Processing maps

C01-P21

热处理制度对烧结钨合金钢组织和性能的影响

刘安晋, 王琳, 杨亮, 马世成, 程兴旺

北京理工大学材料学院

高密度合金钢在高应变率冲击环境中有着十分广阔的应用前景。本文将纳米级钨粉作为添加相与马氏体时效钢粉混合, 通过真空热压烧结粉末冶金的方法制备出钨钢合金材料, 并对合金钢的烧结性能进行研究, 主要研究了不同钨含量及热处理制度对合金钢组织结构和力学性能的影响。将纳米级钨钢的烧结态材料和经两种热处理制度处理的纳米级钨钢材料作为研究对象, 探究钨含量以及两种热处理制度对钨钢合金的微观结构和力学性能的影响。烧结态材料的密度随钨含量的增加而增加, 而致密度随钨含量的增加而减小; 烧结态材料的硬度随钨含量的增加而增加; 通过 XRD 测试分析, 钨含量越高, 析出的杂质相的含量越高; 动态力学压缩性能对比发现屈服强度与钨含量相关不大, 而塑形随着钨含量的增加而逐渐降低。准静态抗压强度随钨含量升高而降低。与烧结态材料相比, 热处理后的材料密度无明显变化, 而硬度显著提高。烧结态材料经过热处理形成回火马氏体, 使材料的硬度、屈服强度和抗压强度显著提高, 但经过同种热处理制度后, 随着钨含量的增加, 材料的屈服强度逐渐降低, 同时塑性也逐渐降低。本实验探索了不同钨含量及热处理制度对合金钢组织结构和力学性能的影响, 为制备高强度合金钢提供一定的参考。

关键词: 高密度钨钢; 热压烧结; 热处理; 力学性能

仅发表论文

C01-PO-01

电极感应熔炼气雾化参数对 TC4 合金粉末粒度的影响

金莹^{1,2}, 刘平^{1,2}, 翁子清^{1,2}, 史金光^{1,2}

1.浙江省冶金研究院有限公司

2.浙江亚通焊材有限公司

本文通过电极感应熔炼气雾化工艺制备高品质球形 TC4 合金粉末, 探究了不同雾化工艺参数对粉末粒度的影响。结果表明, 试验制备的 TC4 合金粉末粒度主要分布在 0-250μm 之间。随着雾化压力的增大, 粉末的平均粒径逐渐减小, 0-53μm 粉末收得率逐渐增加。当继续增大压力时, 由于卫星球粉末增多, 0-53μm 粉末收得率反而降低。增加熔炼功率使 0-53μm 粉末收得率提高, 但过大熔炼功率容易使漏嘴堵塞。实验得到的最佳雾化参数为雾化压力 6.0MPa, 熔炼功率 24KW。此时制备的 TC4 合金粉末平均粒径最小, 为 48.6μm, 0-53μm 粉末收得率最高, 为 40.8%。粉末形貌为球形和近球形, 松装密度为 2.40g/cm³, 流动性为 22.4s/50g, 少量粉末有卫星球和空心球存在。

关键词：球形钛合金粉末；电极感应熔炼雾化；雾化压力；熔炼功率；粉末粒度

C01-PO-02

纳米氧化钇在碳化钨青铜复合材料中的强化机制

何林恺, 孟庆南, 张弛, 吴金昊, 孙友宏

吉林大学建设工程学院

本文通过热压烧结法制备纳米氧化钇增强的碳化钨青铜复合材料。纳米氧化钇的含量是复合材料性能增强的关键因素。实验数据表明随着纳米氧化钇含量增加, 复合材料的抗弯强度和拉伸强度先增加后减小。当纳米氧化钇含量达到 1.5wt% 时, 抗弯强度和拉伸强度分别达到最大值 941 和 340MPa。碳化钨青铜复合材料的增强效果是由于晶粒细化和位错强化的作用。而当纳米氧化钇含量超过 1.5wt% 后, 断裂模式由于纳米氧化钇团聚影响从韧性断裂转变为脆性断裂, 导致整体强度降低。

关键词：纳米氧化钇；弥散强化；微观结构；断裂行为

C01-PO-03

钢的提取与提纯方法现状

雷造成, 邓勇, 刘大春, 熊恒, 陈思峰

昆明理工大学

目前, 钢的提取和提纯方法可以分为物理法、化学法、物理化学法三种。文章以物理法、化学法、物理化学法角度对目前钢的提取和提纯技术进行了阐述。其中物理法主要有: 区域熔炼法、定向凝固法、真空蒸馏法。化学法包含: 电解法、溶剂或熔盐萃取法、离子交换法、有机化合物法。物理化学法则是物理提纯法和化学提纯法的结合。由于多数含钢物料成分的复杂性、差异性, 高纯钢经常是几种方法相互联合进行制备。最后文章针对目前我国钢的提取和提纯技术现状提出了自己的建议。

关键词：钢；提取；提纯；物理法；化学法；物理化学法

C01-PO-04

Ti₂AlNb 粉末合金的自由锻成形及性能

卢正冠, 郭瑞鹏, 徐磊, 吴杰, 崔潇潇, 杨锐

中国科学院金属研究所

采用预合金粉末热等静压工艺制备出成分均匀的 Ti₂AlNb 合金和坯料, 采用热机械模拟和有限元仿真的方法研究了 Ti₂AlNb 粉末合金的自由锻成形过程。结果表明, Ti₂AlNb 粉末合金在较宽的温度区间内均具有良好的变形能力, 但热变形抗力受应变速率影响显著。选取 1020~1040 °C 作为变形温度, 对 Ti₂AlNb 粉末坯料在开坯锻造过程中的温度场分布进行了有限元模拟, 结果显示粉末坯料各个位置的温降明显 (30~170 °C)。采用无包套锻造和包套锻造工艺分别进行了 Ti₂AlNb 粉末坯料的自由锻 (坯料尺寸 $\Phi 100 \times 200$ mm), 坯料变形后均表面光滑, 成形完好, 但包套锻造工艺可抑制坯料温度下降, 减少成形火次。经粉末冶金+热变形联合工艺制备的 Ti₂AlNb 锻棒, 室温和 650°C 强度和塑性得到显著提高。

关键词：Ti₂AlNb 合金；预合金粉末；粉末冶金；热变形；热加工窗口

C01-PO-05

石墨烯增强钛基复合材料的制备及力学性能

王旭东^{1,2,3}, 曹振^{1,2,3}, 李炯利^{1,2,3}, 张海平^{1,2,3}, 郭建强^{1,2,3}

1. 中国航发北京航空材料研究院

2. 北京石墨烯技术研究院有限公司

3. 北京市石墨烯及应用工程技术研究中心

采用 Ti6Al4V 粉末与石墨烯纳米片混合, 通过热等静压、等温锻的方法成功地制备了石墨烯增强钛基复合材料。用光学显微镜、X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、透射电镜和静态拉伸实验和摩擦磨损测试设备研究了制备的样品的显微组织和力学性能。结果表明, 石墨烯纳米片均匀分布在钛合金基体中, 与基体形成良好的结合界面, 且石墨烯纳米片与钛合金基体发生了部分的化学反应, 但保留了原始的纳米片结构。与未添加石墨烯的钛合金相比, 石墨烯增强钛基复合材料的屈服强度和抗拉强度分别提高 160MPa 和 110MPa, 同时耐磨性也有一定的提高, 表明石墨烯可以有效地增强钛基复合材料。

关键词：钛合金；石墨烯；粉末冶金；力学性能

C01-PO-06

粉末冶金 Ti55 合金的显微组织和力学性能研究

郭瑞鹏, 卢正冠, 吴杰, 崔潇潇, 徐磊

中国科学院金属研究所

采用无坩埚感应熔炼超声气体雾化法制备 Ti55 预合金粉末, 并对预合金粉末进行表征。根据 Ti55 预合金粉末的 β 转变温度选择了 940, 970, 1000 和 1030 °C 四个热等静压成型温度, 研究热等静压温度对粉末合金显微组织和拉伸性能的影响。结果表明: Ti55 预合金粉末为 α' 马氏体组织; 在 940-1030 °C 成型的粉末合金均能完成致密化过程; 粉末合金的拉伸强度随热等静压温度的升高而降低, 而延伸率变化不大; 在 940 °C 成型的粉末合金的拉伸性能接近锻造合金的水平。

关键词: 粉末冶金; 热等静压; 钛合金; 力学性能

C01-PO-07

EIGA 法制备选区激光熔化用 TC4 粉末工艺研究

张飞, 高正江, 马腾, 陈欣, 李文英, 王山

中航迈特粉冶科技(北京)有限公司

增材制造钛合金零部件在航空航天、医疗等领域有着广阔的应用前景。而高品质球形钛合金粉末材料是制约钛合金增材制造技术发展的瓶颈所在。鉴于上述原因, 本文采用电极感应气雾化(EIGA)工艺, 结合 ANSYS 流场数值模拟及工艺试验等方法, 研究了雾化工艺参数对 TC4 粉末形貌、细粉收得率、流动性等性能的影响。实验结果表明, 当采用 4 匝感应线圈、管径 10mm、熔炼功率 32Kw、雾化压力 3.8Mpa 时, 能够获得最佳粉末性能, TC4 钛合金 15-53um 粉末收得率超过 35%, 球形度 0.9 以上, 流动性 25s/50g。采用选区激光熔化工艺进行粉末打印验证, 热处理后, 棒料的屈服强度 1026 Mpa, 抗拉强度 1229Mpa, 延伸率 11%, 性能达到铸件标准。

C01-PO-08

粉末 Ti₂AlNb 合金构件尺寸模拟及控制

崔潇潇, 卢正冠, 吴杰, 徐磊

中国科学院金属研究所

采用 Abaqus 有限元模拟软件模拟了预合金粉末 Ti₂AlNb 颗粒的热等静压致密化过程, 分析了几种常见构件在该过程中截面变形情况, 预测了经热等静压制得构件的截面尺寸, 与实际制备得到的构件尺寸对比发现有限元预测粉末包套尺寸收缩准确率很高达到 97% 以上。同时研究了不同模具结构设计对粉末 Ti₂AlNb 合金构件成形的影响, 预测了热等静压过程中应力、应变的分布情况, 分析对焊缝的不利影响, 以确定合适的焊缝位置及形式, 结合截面的形变规律进一步优化模具设计, 为粉末 Ti₂AlNb 构件成形尺寸的精确控制提供重要理论依据。

关键词: Ti₂AlNb 合金; 粉末冶金; 热等静压; 尺寸控制; 尺寸模拟

C01-PO-09

酚醛树脂改性石墨对铜基粉末冶金摩擦材料的性能影响

刘滩, 肖鹏, 方华婵

中南大学粉末冶金研究院

以电解铜粉、还原铁粉、天然鳞片石墨与其余组元为主要原料, 采用粉末冶金法加压烧结制备铜基粉末冶金摩擦材料, 研究酚醛树脂改性石墨对铜基摩擦材料的显微组织、物理与力学性能, 以及在转动惯量为 0.25 kg·m², 制动压力为 0.6 MPa, 转速 3000~8000 r/min 条件下摩擦磨损性能的影响。结果表明, 通过酚醛树脂改性后石墨所制备的铜基复合材料中石墨分布更加均匀, 密度增大, 开孔率降低, 抗弯强度从 100.21 MPa 增大到 112.36 MPa, 压缩强度从 151.74 MPa 升高至 168.68 MPa; 在相同的石墨含量与制动条件下, 铜基摩擦材料的磨损量降低约 0.71 %, 对偶体积损失减少约 0.64 %, 摩擦系数稳定性提高, 且随摩擦速度增大摩擦系数的降低程度较未改性石墨铜基摩擦材料小; 石墨经酚醛树脂改性后铜基摩擦材料的制动时间缩短约 10 %, 摩擦后材料表面凹坑数量明显减少, 摩擦材料的粘着磨损作用减弱。

关键词: 粉末冶金; 铜基摩擦材料; 改性石墨; 酚醛树脂; 摩擦磨损

C01-PO-10

固态再生 Al-0.8Mg-0.5Si 合金管微观组织演变研究

张震^{1,2}, 梁加淼^{1,2}, 王俊^{1,2}, 张德良³

- 1.上海交通大学材料科学与工程学院
- 2.上海市先进高温材料及其精密成形重点实验室
- 3.东北大学材料科学与工程学院

铝合金零部件在工业化生产过程中会产生大量废屑,这些废屑可通过热机械固结工艺直接制备出与原始材料力学性能相当的再生铝合金型材。本研究以 Al-0.8Mg-0.5Si 车屑为原料,结合热压和热挤压工艺制备出管材,利用电子背散射衍射技术对样品微观组织进行分析和表征,研究氧化物颗粒对热机械变形和热处理过程中微观组织演变规律的影响。结果发现,热机械变形过程中铝屑表面氧化膜破裂促进了屑与屑之间界面结合,破裂后的氧化膜转变成氧化物颗粒并沿塑性变形方向分布;氧化物颗粒的出现导致组织不均匀变形,颗粒附近变形量大,优先发生动态再结晶,其他区域以动态回复为主,从而形成粗晶和细晶共存的双模组织。T6 热处理后,由于静态再结晶的发生,再生材料内部粗晶区域晶粒进一步细化。

关键词: 铝合金屑; 热机械固结; 氧化物; 再结晶

C01-PO-11

热压钕铁硼永磁材料研究进展

吕科¹, 董瑞², 刘国征¹, 赵明静¹

- 1.包头稀土研究院
- 2.内蒙古科技大学

近年来稀土永磁材料的应用领域和需求不断扩大,尤其在风力发电、新能源汽车和节能家电等领域的扩展,推动了钕铁硼磁体向高性能和低成本方向的研究。重稀土储量少制约了钕铁硼磁体的发展,不用或少用重稀土元素制备高矫顽力的钕铁硼磁体是目前的研究热点。热压/热变形工艺可以制备具有纳米量级尺寸晶粒的钕铁硼磁体,在不添加重稀土元素的前提下,具有制备高矫顽力磁体的潜力。本文总结归纳了国内外热压/热变形工艺的研究进展和最新研究成果。介绍了添加元素和制备工艺对热变形磁体组织和性能的影响,分析了晶界扩散工艺在热变形磁体中的应用,为热压/热变形工艺制备高性能钕铁硼磁体提供了参考。

C01-PO-12

Fe-2Cu-1.5Ni-0.5Mo-0.8C 混合粉末的放电等离子烧结研究

叶永权¹, 程淮², 邱昊², 李小强²

- 1.广州航海学院
- 2.华南理工大学

本文采用放电等离子烧结技术烧结 Fe-2Cu-1.5Ni-0.5Mo-0.8C 混合粉末,并详细讨论了粉末的快速致密化过程。结果表明,样品实际烧结温度比测量温度约高 50 °C。粉末的致密化速率与粉末材料屈服强度的温度特性密切相关。从室温到测量温度 550 °C 之间,致密化机制是颗粒重排,颗粒致密度 ϕ_p 随压坯密度增加而不断增加。当温度进一步升高,致密化机制转变为颗粒局部塑性变形。此时,压坯的相对密度继续增加,但 ϕ_p 保持不变。局部塑性变阶段的温度区间只有 70 °C 左右。当测量温度升至 625 °C 后,压坯相对密度的增加依靠整体塑性变形进行。烧结温度为 1000 °C 时,烧结体的相对密度达 99%,其显微组织为珠光体+富镍相,硬度和抗弯强度分别为 28 HRC 和 1408 MPa。

关键词: 放电等离子烧结; Fe-2Cu-1.5Ni-0.5Mo-0.8C; 混粉

C01-PO-13

射频等离子体制备球形 Ti6Al4V 合金粉末的工艺研究

郝振华, 舒永春, 何季麟

郑州大学

目前我国 3D 打印用 Ti6Al4V 合金粉末主要依赖进口,其生产技术和设备被国外垄断,大大限制了我国 3D 打印事业的发展。本研究利用自主研发的射频等离子体球化设备,以不规则 Ti6Al4V 粉末为原料,在不同等离子功率、送粉速率等工艺条件下制备得到了球形 Ti6Al4V 合金粉末。分别采用扫描电镜、X 射线衍射仪、霍尔流速仪、激光粒度仪和斯科特容量

计分别检测分析了粉末球化前后的球化率、物相组成、粒度分布、流动性和松装密度等，分析了工艺参数对粉末性能的影响。结果表明：球化 Ti6Al4V 粉末样品的球化率、流动性和松装密度随着等离子功率的升高，随送粉速率的升高而降低。在等离子体功率 60kW，送粉速率 40g/min 的条件下可得到流动性优于 30s/50g，氧含量低于 1500ppm，球化率大于 95%的球形 Ti6Al4V 粉末。

关键词：射频等离子体；球形粉末；Ti6Al4V

C01-PO-14

Sn 添加对 TiAl 基合金显微组织和力学性能的影响

潘宇，路新，曲选辉

北京科技大学

TiAl 基合金粉末烧结活性低、烧结致密化困难，使其力学性能得不到充分发挥。本实验以 Ti-45Al-8.5Nb-0.2W-0.2B-0.02Y (at%) 预合金粉末为原料，添加 Sn 粉为强化烧结剂，采用粉末冶金无压烧结技术制备了高致密度的高 Nb 钛铝合金，探究了 Sn 添加对 TiAl 基合金的烧结致密化过程、微观组织和力学性能的影响规律。研究表明：添加 Sn 元素有助于降低合金的烧结致密化温度，提高烧结坯的致密度及线性收缩率；而烧结温度的降低有助于控制基体晶粒长大及内部 β 相偏析，从而利于提高材料的综合力学性能。其中 1520℃/2h 所制备的含 1at.%Sn 的 TiAl 基合金，其致密度达到 99.1%，线收缩率达到 9.3%，组织为 α_2/γ 相构成的均匀细小的全片层结构，片层团尺寸为 40-60 μm ，没有 β 相偏析；洛氏硬度为 50.1HRC，抗压强度为 2938MPa，屈服强度为 680MPa，压缩率为 29.1%，力学性能指标均高于未添加 Sn 的 TiAl 基合金水平。

关键词：TiAl 基合金；粉末冶金；Sn；强化烧结

C01-PO-15

Al-Cu-Mg-Si 系铝合金注射成形的研究

杜智渊，吴茂，邱婷婷，曲选辉

北京科技大学

本研究以纯 Al 粉为主要原料，添加 Al-Mg、Al-Si 合金粉和 Cu、Sn 元素粉，采用注射成形(MIM)工艺制备 Al-Cu-Mg-Si 系铝合金材料，研究了烧结过程中合金的微观组织演变及致密化机理，并与传统的压制-烧结(PM)工艺进行了对比。研究发现，PM 和 MIM 铝合金的致密化过程均经历三个阶段：毛细管力主导的颗粒重排过程，溶解-再析出机制控制的晶界平直化过程，以及晶粒长大引起的孔隙填充过程，但 MIM 铝合金的致密化过程明显滞后于 PM 铝合金。铝粉表面氧化膜破除后，氧元素主要存在于 MgAl_2O_4 、 Al_2SiO_5 以及无定形的 Al-Si-Cu-O 等化合物中，氧的存在形式与局部合金成分有关。添加少量合金元素 Sn 可降低合金液相的表面张力，显著促进烧结体致密度，但 Sn 含量较高时会对 MIM 铝合金力学性能产生不利影响。当 Sn 含量为 0.5 wt. %时，MIM 铝合金致密度高于 98%，抗拉强度和显微硬度达到最高值，分别为 220MPa 和 118HV。固溶处理后，抗拉强度可以达到 350 MPa，显微硬度值 150 HV。

关键词：铝合金；注射成形；液相烧结；微观组织演变；力学性能

C01-PO-16

增材制造用钢粉 (316L, H13, P20 和 18Ni300) 微观组织的综合研究

严菊杰，周英豪，严明

南方科技大学

金属粉末颗粒的微观组织表征有助于选择性激光熔化 (selective laser melting, SLM) 工艺参数的选择和调节。本文研究和对比了四种用于选择性激光熔化成形技术的钢粉 (316L, H13, P20 和 18Ni300) 的微观组织，并分析了其对选择性激光熔化工艺的影响。通过 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 和扫描电子显微镜 (scanning electron microscopy, SEM) 进行物相分析和显微结构观察。采用 X-射线光电子能谱 (X-ray photoelectron spectroscopy, XPS) 和透射电子显微镜 (transmission electron microscopy, TEM) 分析四种钢粉的表面结构包括表层的化学成分。结果表明：(a) 四种钢粉都是细小的等轴晶组织，其晶粒尺寸均约为 2~3 μm ；(b) H13, P20 和 18Ni300 由针状马氏体相和少量奥氏体相组成，316L 全部由奥氏体相组成；(c) 四种钢粉都具有层状包覆结构：最外层是较薄(约几纳米)的 Fe_2O_3 氧化层，内部是金属基体；(d) 此外，证实了钢粉表面存在的氧化物层在 3D 打印过程中可增加粉末对激光的吸收率，这有利于选择性激光熔化成形。

关键词：钢粉；微观组织；表面结构；XPS 分析；选择性激光熔化

C01-PO-17

粉末冶金铝合金

邱婷婷, 吴茂, 杜智渊, 曲选辉

北京科技大学

以纯 Al 粉为主要原料, 添加 Cu 单质粉末以及 Al-Mg、Al-Si 中间合金粉, 利用粉末冶金压制烧结方法制备出致密度 98% 以上的 Al-Mg-Si-Cu 系铝合金, 研究了不同烧结阶段的原子扩散及组织演变等过程。研究表明, 烧结致密化过程主要分为 3 个阶段: 初始阶段 (室温~460 °C), 坯体内会首先形成 Al-Mg 合金液相, Mg 原子分别扩散至 Al 或 Al-Si 粉末中, 破除氧化膜, 形成 Al-Mg-O 等化合物; 第二阶段 (460 °C~560 °C), Al-Cu、Al-Si 液相快速填充颗粒缝隙或孔隙, 致密度显著提高; 第三阶段 (560 °C~600 °C), 随温度的升高, 液相的润湿性提高, 晶粒快速长大, 使得大尺寸孔洞填充, 烧结体基本实现全致密。在铝合金晶界处, 除 $MgAl_2O_4$ 外, 还存在着 $MgAlCuO$ 化合物, 因此 Al 粉表面氧化膜的破除机制与合金成分有关。由于 Al-Cu 液相与 Al 具有良好的润湿性, 在表面张力和毛细管力的作用下可快速润湿 Al 粉表面或填充孔隙, 其润湿速率远高于 AlN 的生长速率, 因此本文中未发现 AlN 的生成。

关键词: 粉末冶金; 固相扩散; 液相烧结; 氧化膜; AlN