

C03.先进镁合金

分会主席：曾小勤、蒋斌、杨院生、秦高梧

C03-01

镁合金表面机械研磨处理及强化机制

曾小勤

上海交通大学材料科学与工程学院

采用表面机械研磨处理 (SMAT) 处理镁稀土合金获得了梯度晶粒结构。从表面到中心依次为：表面~30 μm 厚的纳米晶层 (晶粒尺寸~50-100 nm)、尺寸逐渐增大的亚晶层、高密度孪晶层以及中心低密度孪晶层。合金拉伸屈服强度显著提高，但延伸率明显下降。强度的提高主要源于 SMAT 冷变形残余位错在室温拉伸过程中的加工硬化效果，拉伸过程中的应变硬化空间太小也是导致其塑性很差的原因。Mg-3Gd 合金 SMAT 变形机制以孪生为主导，亚晶旋转动态再结晶机制在表面纳米化过程中起到重要作用。

C03-02

低合金化高强度变形镁合金的研究进展

潘虎成，谢红波，任玉平，秦高梧

东北大学

镁合金具有显著的减重优势，目前迫切需要开发出含稀土元素的低成本高性能镁合金。本研究基于 Mg-Ca 基合金的成分优化及常规挤压变形，制备出了系列性能优异的合金材料。低合金化的 Mg-1.0 wt. % Ca 合金的抗拉强度可达约 390 MPa，Mg-0.1 wt. % Ca 合金的抗拉强度也可高达约 300 MPa。组织分析表明，多尺度的亚结构，包括超细的亚晶粒和动态再结晶晶粒组织、具有溶质偏析的亚晶界以及 Mg_2Ca 纳米相等均有助于提高强度。在此基础上，我们制备了一种新型的 Mg-2Sn-2Ca (wt. %) 变形镁合金，该合金表现出了超高的屈服强度(360-440 MPa)。有趣的是，即使以较高的速率进行挤压，该合金的力学性能也几乎没有衰减。超细晶粒(~0.32 μm)，弥散分布的 Mg_2Ca 纳米粒子以及大部分亚晶界处 Ca 原子的富集保证了合金的超高强度。通过对该合金挤压过程中的组织演变研究表明，热成型过程中 Ca 原子的动态配分、高密度位错以及大量 Mg_2Ca 纳米相的析出，均直接导致了挤压态合金中超细晶粒的形成。然而，该合金在保持最高强度时，其延伸率较差，仅为~1.2%。通过多元合金化 Mn 元素的添加，Mg-Sn-Ca-Mn 合金表现出了较好的强度和塑性的结合：屈服强度~450 MPa，抗拉强度~462 MPa，同时延伸率~5%。分析表明，含 Mn 镁合金内可诱导产生高密度位错，同时晶粒内和晶界处有大量的纳米 Mn 颗粒动态析出，可有效促进再结晶晶粒形核，并抑制了动态再结晶晶粒的长大；更重要的是，再结晶晶粒的组织发生了显著偏转和弱化，从而实现了超细晶镁合金具备超高强度、延伸率兼备的力学性能。

C03-03

稀土镁合金的塑性变形机制和位错结构的亚埃电子显微学研究

杨志卿，叶恒强

中国科学院金属研究所

我们利用先进电子显微学技术在原子尺度研究了稀土镁合金中的位错、晶界和孪晶界等晶体缺陷，以及变形过程中位错与合金元素的交互作用，为深入理解材料的强韧化机理提供了详实的显微结构信息。取得如下主要结果：(1) 长周期强化相通过基面滑移发生扭折变形；变形过程中，合金元素与位错间的弹性交互作用诱发柯垂尔气团的形成，钉扎位错。(2) 镁基体内的位错分解形成基面层错，化学交互作用的驱动下合金元素偏聚到层错上，形成铃木偏聚，钉扎位错运动。(3) 基面层错及铃木偏聚能够有效抑制形变孪生，从而减少裂纹形核源。(4) 稀土元素添加，在一定程度上抑制<c+a>位错分解成基面位错锁，使其能够在锥面上长程滑移，从而保障材料具有良好的塑性变形能力。(5) <c+a>位错与倾侧晶界交互作用，驱动晶界滑移和迁移，可以有效消除晶界局部应力集中，延缓晶界开裂。前两者在强化合金方面发挥重要作用，后三者对改善材料塑性至关重要。

C03-04

基于基面相/LPSO 结构的高强度镁稀土合金研究

吴玉娟^{1,2}，容伟²，张宇^{2,3}，宿宁²，黄飞²，彭立明²，丁文江²

1.上海交通大学

2.上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心

3.Department of Materials Science and Engineering, Monash University

本文以 Mg-Gd-Ag 和 Mg-Gd-Zn 合金作为研究对象, 通过 OM、XRD、SEM、TEM、EDS 等显微组织分析和力学性能测试手段, 系统研究了不同合金成分和铸造工艺及热处理工艺对铸造镁合金的组织 and 力学性能的影响规律, 基于基面相/LPSO 结构和柱面相, 成功开发了抗拉强度大于 400MPa 高强度铸造镁合金。

C03-05

镁合金中锥面<c+a>位错形成和分解机制的理论研究

丁志刚¹, 刘伟¹, 孙昊¹, 李爽¹, Dalong Zhang², 赵永好¹, Enrique J. Lavernia², 朱运田¹

1.南京理工大学材料科学与工程学院

2.Engineering and Materials Science, University of California

锥面<c+a> 位错在镁合金的塑性变形过程中扮演着非常重要的角色。从结构上看, 基面<a>位错和柱面<a>位错均无法协调 c 轴方向上的变形, 只有<c+a>滑移可以容纳 c 轴应变从而为滑移过程提供充足的滑移系, 因此提高镁合金塑性的重要的方法就是要增加锥面滑移促进<c+a>滑移系的启动。我们利用第一性原理计算结合分子动力学模拟, 研究了 Mg 以及 Mg-Y 合金中{11-22}<11-23>滑移系的广义层错能曲线。重点研究该位错的形成和分解以及稀土元素 Y 对<c+a>位错形成过程的促进作用。结果表明, 在稳定层错能附近存在一个势能面, 势能面的存在可以让原子在稳定位置附近运动从而回到他们的晶格位置。分子动力学模拟的结果表明, 原子在稳定位置附近的运动会进一步引起层错的集体运动, 使得原子由非晶格位置向晶格位置移动。基于层错的集体运动, 提出了锥面 II 型<c+a>位错的对称滑移路径: 当层错沿<11-23>方向滑移到稳定位置后, 原子首先在层错集体运动的作用下由非晶格位置向晶格位置移动, 原子到达晶格位置后拖尾不全位错沿着<11-23>方向按照领先不全位错的逆过程方式继续滑移形成全位错。这种包含层错集体运动的滑移路径很好的解决了理论计算与实验的矛盾, 为进一步研究镁合金中<c+a>位错的启动提供了新的思路。

C03-06

Mg-Al-Zn 合金的热导率: 实验测定和 CALPHAD 模拟

黄蕾, 刘树红, 杜勇

中南大学粉末冶金研究院

采用实验和 CALPHAD 方法研究了一系列 Mg-Al、Mg-Zn 和 Al-Zn 二元退火合金的热导率。采用扫描电镜和 X 射线衍射确定了合金样品的显微组织和相组成并采用激光导热系数测量仪 (Netzsch LFA457) 测量了合金在 298K-498K 温度范围的热导率。基于获得的实验数据, 本工作分析了热导率的变化机制, 并结合文献中可靠的实验信息, 采用 CALPHAD 方法对 Mg-Al、Mg-Zn 和 Al-Zn 体系所包含的纯组元、线性化合物、固溶体相及两相区的热导率进行了建模和数值模拟, 获得了一套描述上述二元系相关相热导率的参数。采用获得的参数, 可以合理的描述实验信息, 还可以外推到 Mg-Al-Zn 三元两相合金热导率的预测。

C03-07

Mg-Zn-Er 合金板材的微观组织及 力学性能研究

杜文博, 刘金学, 刘轲, 王朝辉, 李淑波

北京工业大学

本文以 Mg-xZn-0.5Er 合金板材为研究对象, 采用光学显微镜、扫描电子显微镜、电子背散射衍射仪及透射电子显微镜等分析测试手段研究了 Mg-Zn-Er 合金板材的显微组织及对合金力学性能的影响规律, 揭示了 Mg-Zn-Er 合金板材在变形、退火过程中的组织、第二相及再结晶现象的演变规律, 分析了显微组织、组织与性能之间的关系。研究结果表明退火过程中发生了动态再结晶行为, 细化了晶粒组织, 提高退火温度使组织类型由 R 型基面组织逐渐向 T 型基面组织转变。晶粒细化、基面组织及初生第二相是影响合金力学性能的主要因素。

C03-08

新型混晶结构镁合金组织控制

查敏, 王理, 张洪敏, 王鹏越, 马趁义, 王慧远

吉林大学材料科学与工程学院

镁合金是在轻质结构零部件应用中颇具潜力的轻量化材料,然而现有商业镁合金室温塑性低、室温成型性差,极大的限制了其工程应用。目前国际上制备高强塑性镁合金主要采用大塑性变形技术,但其很难进行大规模工业应用。我们提出了新型衬板控轧技术,成功制备了混晶结构 AZ91 合金,其室温抗拉强度和延伸率分别达到了~371MPa 和~23%。研究了合金成分,特别是第二相特性和控轧参数对 Mg-Al-Zn 合金混晶组织演变的影响规律;基于准原位 EBSD 表征揭示了混晶组织形成机制;对于高合金含量镁合金,发现降低轧制温度有利于混晶组织的形成。研究了单轴拉伸过程中混晶组织演变过程,揭示了细晶和粗晶在协调拉伸变形过程中的不同作用;揭示出细晶中位错密度接近饱和后,粗晶粒内部大量位错滑移和高密度位错的积累促进了加工硬化,协调和稳定了拉伸变形,导致强度和塑性同时提升。此外,将新型衬板控轧技术和传统轧制技术相结合,通过简单轧制制备了具有低温超塑性 Mg-Al-Zn 合金,缩短了传统轧制超塑性镁合金的制备流程。本研究为新型高强塑镁合金的设计和组织的控制以及短流程制备提供了借鉴。

C03-09

Mg-Y 合金微观变形中的非基面滑移研究

王乐耘, 黄忠鹤, 周碧晋, 汪华苗, 曾小勤

上海交通大学

在 Mg 合金中添加少量 Y 元素能够大幅提高材料的塑性,但目前对于其中的微观机理仍然不甚清楚。本研究利用电子背散射衍射(EBSD)、基于同步辐射装置的三维 X 射线衍射(3DXRD)等表征技术原位研究 Mg-Y 二元合金的拉伸变形。通过对样品表面的滑移迹线分析以及晶粒晶体转动方向的分析,发现 Mg-Y 合金较纯 Mg 有更为丰富的变形机制,除了基面滑移外,扭折、柱面 $\langle a \rangle$ 滑移、锥面 $\langle a \rangle$ 滑移等非基面滑移均可参与变形,而孪晶相应受到抑制。根据 3DXRD 获得的晶粒应力张量,进一步估计了 Mg-Y 合金中几种主要滑移系的临界分切应力(CRSS)。以此作为参数,运用晶体塑性模拟方法可以较好地预测材料的宏观拉伸曲线。

C03-10

Mg-Zn-Mn-Sn 高强变形镁合金的显微组织和力学性能

齐福刚¹, 罗文忠¹, 叶芝松¹, 赵镍¹, 张丁非², 余大亮³

1.湘潭大学

2.重庆大学

3.重庆科技学院

对添加不同 Sn 含量的 Mg-8Zn-1Mn (ZM81) 镁合金进行变形及热处理,测试不同状态下 ZM81-xSn 合金的室温拉伸性能,利用光学金相显微镜(OM)、X 射线衍射(XRD)和透射电镜(TEM)等分析手段观察了不同状态下的显微组织。研究表明,T6 处理,尤其是双级时效,能显著提升挤压态合金的力学性能。其中 ZM81-4Sn 合金具有最佳的综合力学性能,抗拉强度、屈服强度和延伸率分别为 416Mpa、393Mpa 和 5.29%。显微组织表明,峰时效态合金的高强度主要源于杆状 β_1' (MgZn₂) 和 Mg₂Sn 两种析出相的双重时效强化效果。

C03-11

基于镁合金微弧氧化膜的 LDHs 膜层的原位生长及自修复行为

吴量, 张根, 汤爱涛, 刘磊, 丁星星, 潘复生

重庆大学

本文采用原位生长的方法,以镁合金微弧氧化膜为金属阳离子的来源,在不同电压下形成的微弧氧化(MAO)膜上原位生长 MgAl-LDHs 膜层。该方法成功地封闭了微弧氧化膜的孔洞。LDHs 膜层的生长依赖于 MAO 膜的水合溶解,随后 LDHs 膜层同时向内向外生长,向内是朝基体方向生长,向外是朝着膜/溶液界面生长。在制备 LDHs 后,所有膜的厚度都显著增加,最厚的膜达到 18 μ m。经过电化学阻抗测试,浸泡实验以及析氢实验结果表明,在最高电压形成的 MAO 膜层上原位生长 LDHs 膜层,其复合膜层的耐蚀性能最佳。

C03-12

HAADF-STEM 研究时效过程中 Mg-Gd 合金沉淀相的演化与转变

张宇^{1,2,3}, 容伟², 吴玉娟², 彭立明², Jian-Feng Nie^{1,3}, Nick Birbilis³

1.重庆大学材料科学与工程学院

2.上海交通大学材料科学与工程学院轻合金精密成型国家工程研究中心

3.Department of Materials Science and Engineering, Monash University

Mg-Gd 合金系是典型的可沉淀硬化体系。本研究以 Mg-16.2Gd-0.4Zr (wt.%) 合金为对象, 使用 HAADF-STEM 手段对其在 150 °C ~ 300 °C 温度区间等温时效过程中沉淀相的演化与转变开展深入表征和系统研究。与已报道结果不同, 实验观察到 Mg-16.2Gd-0.4Zr 合金在时效早期可形成有序溶质团簇和 GP 区, 在时效后期可形成 β'_F 相; 在 150 °C ~ 300 °C 温度区间, 所有时效状态均未观察到 β'' 相。进一步研究表明, 有序溶质团簇和 GP 区具有相同的最小结构单元; GP 区可作为 β' 相的构建块, 利于其异质形核。实验发现, β' 相的粗化会诱发 β'_F 相和尾巴状混杂结构在粗化的 β' 相周围形成; β'_F 相随后促进 β_1 相的形成, 并最终转化为 β 平衡相。基于本研究的实验结果, 可将 Mg-Gd 系合金传统四阶段沉淀序列改写为: 过饱和固溶体 (S.S.S.S.) \rightarrow 有序溶质团簇 GP 区 \rightarrow β' \rightarrow β'_F + 尾巴状混杂结构 \rightarrow β_1 \rightarrow β 。本研究的结果可为后续高性能 Mg-Gd 系合金的开发和热处理制度提供基础和参照。

C03-13

基于亚快速凝固的新型 Mg-Al 系合金多元少量成分设计

王鹏越, 王理, 查敏, 马趁义, 王慧远

吉林大学材料科学与工程学院

本文以 Mg-Al 系合金为基础, 通过结合多元少量合金化与亚快速凝固方法 (冷却速度: 140 K/s), 开发出一种新型 Mg-Al-Sn-Zn-Bi-Mn (AZTBM) 多元合金。与传统高合金镁体系 (如 AZ91) 常规铸造组织相比, 亚快速凝固 AZTBM 中第二相体积分数明显减少、尺寸细化且呈断网状。其中第二相主要包括: 不连续 Mg₁₇Al₁₂ 以及近球形 Mg₂Sn。由于亚快速凝固 AZTBM 合金中 Al、Zn 等元素在镁基体高含量过饱和固溶, 极大改善了常规铸造镁合金中“偏析严重、组织粗大”问题。差热分析 (DTA), 表明多元少量元素添加使 AZTBM 凝固区间 (89°C) 较 AZ91 (140°C) 缩小 36%, 有助于缓解成分偏析。后续轧制加工表明, 亚快速凝固组织与轧制组织间具有遗传性, 亚快速凝固组织细化和均匀化还会对后续固态加工中基体晶粒细化和第二相演化产生强烈影响, 使得变形 AZTBM 多元合金具有较高室温强塑性 (抗拉强度: 345MPa、延伸率: 21%)。

C03-14

基于人工神经网络的 Mg-Zn-RE-Zr-Ca-Sr 镁合金热处理组织与力学性能预测

付玉, 王晗, 王林伟, 郝海

大连理工大学

研究了不同时效温度和时效时间下 Mg-4.2Zn-1.7RE-0.8Zr-xCa-ySr (wt.%) 镁合金的微观组织和力学性能, 并利用人工神经网络对 Mg-4.2Zn-1.7RE-0.8Zr-xCa-ySr 镁合金的热处理组织与力学性能样本集进行训练和学习。模型的输入参数为 Ca、Sr 含量、时效温度和时效时间, 模型的输出参数为平均晶粒尺寸、抗拉强度、屈服强度、延伸率和显微硬度, 训练算法为改进的 BP (Error Back Propagation) 神经网络 LM (Levenberg-Marquardt) 算法, 建立 Mg-4.2Zn-1.7RE-0.8Zr-xCa-ySr (wt.%) 镁合金热处理组织与力学性能的 BP 神经网络模型。结果表明: 所建立的 BP 神经网络模型的相关系数 (correlation coefficient, R) 达到 95% 以上, 验证实验和残差分析表明预测值与实验值吻合较好, 证明了模型的准确性, 因此, 该模型可以很好地预测 Mg-4.2Zn-1.7RE-0.8Zr-xCa-ySr (wt.%) 镁合金时效后的组织和力学性能。

C03-15

高强韧结构功能一体化新型镁合金及制备加工

王敬丰

重庆大学

C03-16

高强度高塑性 Mg-Li 合金强化机理研究

彭秋明, 付辉

燕山大学

节能环保和可持续发展的迫切需求推动着轻质结构材料的发展和应用。Mg-Li 合金是最轻的金属结构材料, 具有高的比刚度, 良好的切削性能、电磁屏蔽性能和阻尼性能等一系列优点。但是 Mg-Li 合金相对较低的强度阻碍了其在结构材料方面

的大规模应用。通过合金化和变形处理可以提高 Mg-Li 合金的强度，但这些传统工艺会使合金的塑性降低。在本研究中，通过对 Mg-8Li 合金进行超高压处理，能提高合金的强度而不牺牲其塑性。我们发现，在超高压合金组织中存在大量的 $\{10\cdot11\}$ - $\{10\cdot11\}$ 双重压缩孪晶组织，这是首次在镁合金中发现这种双重压缩孪晶结构；同时在孪晶界处还有大量的纳米析出相存在，这些细小的富 Li 相和富 Mg 相具有六方晶体结构，与基体完全共格，这是首次发现六方结构的富 Li 相。超高压 Mg-Li 合金具有高强度和高塑性主要归因于双重压缩孪晶组织和纳米析出相的共同强化作用。因此，超高压工艺是一种调节 Mg 合金组织结构，提高 Mg 合金力学性能的有效手段，为弱变形能力的六方结构的合金材料的强化开辟了新的方向。

C03-17

基于溶质原子和第二相的镁合金导热模型

李德江，苏创业，应韬，曾小勤

上海交通大学

随着集成电路功率密度的增加，散热器必须具有很高的散热能力，以最大限度地发挥散热作用。对高品质散热器的另一个重要需求是减重，这对于如笔记本电脑、移动电话和通信设备等电子设备来说是非常重要的。镁合金由于其低密度和合理的导热性，作为潜在的散热材料越来越受到人们的关注。

本研究以室温下 Mg-RE 合金在铸态和固溶处理条件下的导热系数为对象，定量研究了稀土元素分别以溶质原子和第二相形态存在对镁合金导热系数的影响规律。研究发现，当 RE 元素以溶质原子形态存在时，每增加 1at.% 的稀土元素，导致合金导热系数下降值约为 123 W / (m·K)，而当 RE 元素以化合物形态存在时，每增加 1at.% 的稀土元素，导致合金导热系数下降值约为 6.5-16.4 W / (m·K)。基于合金中溶质原子和第二相形貌及分布特点，采用修正后的 Maxwell 和 EMT 导热模型对不同成分的合金导热系数进行预测，结果表明，修正后的结构模型与实验导热系数实现很好地吻合。研究结果为高导热镁合金成分设计提供了有效的理论指导。

C03-18

Mg-Sn(-Zn)合金中亚稳相结构及合金元素相界面偏聚

陈厚文^{1,2}，聂建峰^{1,2,3}

1.重庆大学材料科学与工程学院

2.重庆大学电子显微镜中心

3.澳大利亚莫纳什大学材料科学与工程系

Mg-Sn 系合金由于其低成本和高强度等特点在最近十几年受到持续关注。Mg-Sn 二元合金是典型的沉淀硬镁合金，Sn 在 Mg 中的固溶度随着时效温度的下降而显著降低。文献报道，Mg-Sn 二元合金在时效过程中形成的析出相仅为平衡相 Mg₂Sn。利用 HAADF-STEM 技术，我们在 100-250°C 时效的 Mg-9.8Sn (wt%) 合金中发现还存在 GP 区和一个位于镁基体基面的亚稳相。亚稳相具有 L1₂ 结构，单胞参数 a=0.453nm，成分为 Mg₃Sn。亚稳相可以由 GP 区转变而成，也可以从镁基体中直接产生。随着时效时间的延长，亚稳相 Mg₃Sn 会原位转变为平衡相 Mg₂Sn。添加 Zn 可以显著提高 Mg-Sn 合金的时效硬化效果。利用 ChemiSTEM 技术我们观察到 Zn 元素在析出相 Mg₂Sn 和镁基体界面处的偏聚，而且 Zn 元素的偏聚与 Mg₂Sn 与基体之间的取向关系及界面结构无关。Zn 元素的相界面偏聚可以降低界面能，提高 Mg₂Sn 相的形核率并抑制其长大。

C03-19

Mg-Al-Ce 变形镁合金的高强高塑化机理研究

黄秋燕，杨院生

中国科学院金属研究所

本实验开发出了一种基于混晶结构的高强塑性兼备的低成本新型含 Ce 镁合金。挤压得到的 Mg-6Al-2Ce (wt.%) 合金的抗拉强度可达 370MPa，延伸率保持在 10% 左右。利用扫描电子显微镜(SEM)、透射电镜(TEM)等手段对合金的微观组织进行表征和分析发现，该合金体系同时具有高强塑性与合金中含有大量弥散均匀分布的 AlCe 纳米颗粒以及合金的混晶粒结构（合金中同时含有晶粒尺寸~0.5 μ m 的超细晶和晶粒尺寸~2 μ m 的粗晶）密切相关。研究认为是大量的纳米颗粒第二相和溶质效应共同作用导致合金出现了明显的晶粒细化，而这种超细晶结构又促使了 Mg-6Al-2Ce 合金抗拉强度显著提高。合金表现出的高塑性则归因于合金的晶粒大小梯度组织，这种晶粒尺寸的梯度变化能在再结晶的超细晶内部和未发生再结晶的晶粒内部触发不同类型的滑移。

C03-20

Mg-Al-Zn-Sn 四元系热力学数据库及其在 AZ 铸造合金设计中的应用

程挺,张利军

中南大学

本论文首先严格评估了文献报道的实测相平衡及热化学数据,并基于 CALPHAD 方法建立了一套自洽的 Mg-Al-Zn-Sn 四元系热力学数据库。随后通过制备系列关键四元合金,对其凝固组织和相变温度进行分析检测,并将实验结果与计算结果进行比较,以验证 Mg-Al-Zn-Sn 四元系热力学数据库的可靠性。此外,基于希尔凝固假设及所建立的热力学数据库,构筑了 Mg-Al-Zn-Sn 四元系富 Mg 端的凝固相图。通过分析 Sn 含量对 AZ 铸造合金凝固组织的影响,获取了系列 AZ 铸造合金的最佳 Sn 元素添加量。最后,通过制备相应 Sn 含量的 AZ 铸造合金,经力学性能和微结构测定证实了所设计合金成分的可靠性。

C03-21

激光增材制造 Mg-RE 合金的研究进展

廖海光,付彭怀,郑飞燕,彭立明

上海交通大学

目前, Mg-RE 合金可以通过两种主流的激光增材制造 (Laser additive manufacturing, 简称 AM) 工艺制备,包括激光熔化沉积 (Laser Melting Deposition, 简称 LMD) 和选区激光熔化技术 (Selective Laser Melting, 简称 SLM)。两种方法通过优化工艺参数可以制备出无缺陷的样品。通过 LMD 技术制备出的 GW103K 合金的加工态和时效态的屈服强度 (YS)、拉伸强度 (UTS) 和伸长率分别为 118MPa-220MPa-13.9% 和 191MPa-298MPa-8.9%。通过 SLM 技术制备出的 GZ151K 合金的加工态和时效态的 YS、UTS 和伸长率分别为 314MPa-395MPa-2.7% 和 385MPa-406MPa-3.7%。相对于铸态合金而言,用这两种 AM 方法制备的合金力学性能较高,并且与锻造态的性能相当;其显微组织具有无织构的等轴细晶晶粒,这种方法使镁合金在用 AM 制造的金属部件中展现出了独特的优势。

C03-22

高压扭转变形纳米 Mg-8.2Gd-3.8Y-1.0Zn-0.4Zr 合金的时效行为

孙婉婷¹, 乔晓光¹, 徐超¹, 郑明毅¹, 赵晓军², 陈厚文², N. Gao³, M. Starink³

1. 哈尔滨工业大学材料科学与工程学院

2. 重庆大学材料科学与工程学院

近年来,轻质高强镁合金受到了广泛关注,进一步提高镁合金强度对拓展镁合金应用具有重要意义。本课题组采用常规挤压变形和时效处理开发了屈服强度达 466 MPa,抗拉强度达 514MPa,延伸率达 14.5% 的超高强韧 Mg-8.2Gd-3.8Y-1.0Zn-0.4Zr (wt%) 稀土变形镁合金。为进一步提高稀土镁合金的力学性能,本文对固溶态 Mg-8.2Gd-3.8Y-1.0Zn-0.4Zr 合金进行了室温高压扭转(HPT)变形,获得了晶粒度为 48 纳米的稀土镁合金,深入研究了高压扭转形变 Mg-8.2Gd-3.8Y-1.0Zn-0.4Zr 纳米晶合金的时效行为。

高压扭转形变纳米晶 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金的最佳时效工艺为 120°C/12h,峰时效温度和达到峰时效所需时间均远低于常规热变形镁稀土合金。纳米晶 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金峰时效 (120°C/12h) 的硬度为 145HV,显著高于常规变形工艺制备的镁稀土合金。剧烈塑性形变产生的高密度缺陷(晶界、位错、点缺陷等)显著影响纳米稀土镁合金的时效析出行为。与常规微米级稀土镁合金相比,剧烈塑性形变纳米晶稀土镁合金具有独特的时效析出行为。常规微米级稀土镁合金峰时效的析出强化相主要为 β' 亚稳相;而高压扭转形变纳米晶稀土合金在峰时效阶段,大量溶质原子偏聚于纳米晶界,未观察到任何析出相。高压扭转形变引入的大量晶界及高密度位错,促进合金元素扩散,导致时效过程中,大量溶质原子偏聚于晶界。这种溶质原子晶界偏聚强化是峰时效态 Mg-8.2Gd-3.8Y-1.0Zn-0.4Zr 纳米晶合金的主要强化机制。提出了晶界溶质原子偏聚的强化模型,揭示了这种溶质偏聚晶界的超高强纳米晶稀土镁合金的强化机理。本研究表明,深入研究镁合金中的偏聚/团簇形成机理及其强化机制,利用偏聚/团簇提高镁合金的强度和塑性,对开发超高强韧镁合金具有重要意义。

C03-23

镁合金残余应力的测试及其研究进展

袁孝民,张津,连勇,杜畅,徐伟生,赵永乐,莫家豪

北京科技大学

本文针对镁合金残余应力产生的原因进行了总结,概述了镁合金残余应力的各种测试方法,并针对国际公认残余应力测试方法的精准度影响因素做了深入分析,同时介绍了一种短波长 X 射线衍射法用于测试镁合金内部的残余应力的无损检测方法。此外还对近期作者开展镁合金残余应力的研究结果进行了介绍。最后分析了镁合金残余应力研究的发展趋势,相对于实验测定残余应力,计算机模拟成本较低,可通过计算机模拟镁合金工件的整体残余应力分布状况,从而可以快速优化镁合金生产工艺,使其残余应力分布较为均匀。

C03-24

Mg-7Gd-3Y-1Nd-1Zn-0.5Zr 合金时效析出行为的研究

刘伟^{1,2}, 杜志伟^{1,2}, 李婷^{1,2}, 韩小磊^{1,2}

- 1.有研科技集团有限公司
- 2.国标(北京)检验认证有限公司

以镁合金 Mg-7Gd-3Y-1Nd-1Zn-0.5Zr (质量分数, %) 为研究对象,通过 X 射线衍射技术、扫描电子显微学、透射电子显微学、扫描透射电子显微学等技术对铸态合金在固溶以及合金时效过程中的组织变化和析出行为进行了研究。结果发现,铸态组织主要由 α -Mg、共晶相(Mg,Zn)₃RE 和堆垛层错组成,经过 525°C/48h 在 30°C 水中淬火的固溶处理使(Mg,Zn)₃RE 全部回溶、晶界附近的堆垛层错消失,此时合金基体内部主要存在富 Zr 相,富 Zr 相不易回溶。在 525°C/48h(30°C, 水)+450°C/2h 的处理使晶内产生针状长周期。分别对经过 525°C/48h(30°C, 水)和 525°C/48h(30°C, 水)+450°C/2h 的合金在 200°C 进行时效,处理过程中硬度先逐渐升高并达到峰值,硬度达到峰值后继续延长长时间硬度值保持不变;525°C/48h+450°C/2h 处理后的微观组织在整个时效过程中的硬度值低于 525°C/48h 处理后的微观组织在整个时效过程中的硬度值。经过 200°C/32h 时效后硬度值达到最高,析出的沉淀相为 β' 。

C03-25

利用分流挤压法制备 Mg-Al-Zn/Mg-Y 层状复合板的室温成形性能研究

王庆航, 蒋斌, 柴炎福, 夏大彪, 何俊杰, 徐军, 潘复生
重庆大学

在这项工作中,我们提出了一个新的方法来获得高室温成形性的镁合金板材--分流挤压。Mg-3Al-1Zn(AZ31)和 Mg-0.3Y(W0)铸锭通过分流模具进行分流挤压,制备出 AZ31/W0 层状复合板。挤压温度,挤压比以及挤压速度分别为 400°C, 30:1, 以及 3mm/s。为了与 AZ31/W0 层状复合板进行对比,通过相同的直接挤压工艺制备出单层 AZ31 和 W0 板。我们利用光学显微镜,扫描电镜, X 射线衍射仪,场发射扫描电镜,拉伸试验机以及杯突试验机对单层 AZ31 板,单层 W0 板以及 AZ31/W0 层状复合板的组织,室温力学性能以及杯突成形性能进行了系统的研究和比较。研究发现, AZ31/W0 层状复合板具有很好的结合界面,在界面上没有扩散层和孔洞的存在,并且具有较高的界面剪切强度。这一结果为 AZ31/W0 层状复合板拥有较高的室温成形性能提供了良好的条件。在室温杯突过程中, AZ31/W0 层状复合板的双峰结构 W0 层(放置在上层)能够激活更多的基面滑移。更重要的是,在晶粒尺寸较大的 AZ31 层(放置在下层)相比晶粒尺寸较小的单层 AZ31 板更易激活较多的{10-12}孪晶,因为孪晶更容易在大晶粒中产生。此时,孪晶具有较高的基面滑移施密特因子。在室温杯突后期能够激活大量的基面滑移,促进厚度方向上的应变。因此,在室温杯突过程中,更多基面滑移的启动和大量{10-12}孪晶的产生导致 AZ31/W0 层状复合板高的室温成形性能。

C03-26

Li 对阻燃 Mg-Al-Ca 镁合金组织与性能的影响

金锺铉¹, 潘复生¹, 河村能人²

- 1.重庆大学
- 2.熊本大学

镁合金由于其优良的机械物理性能,如:低密度、高比强度和良好的阻尼性能,被广泛用于汽车、航空航天和轨道交通等领域。不幸的是,着火温度低、机械强度低和耐腐蚀性能差严重阻碍了其广泛应用。近期,河村教授等开发了力学性能与阻燃性能优异的 Mg-Al-Ca 合金,其着火温度可达 1000°C 以上。该合金受到了广泛关注。在镁合金中, Mg-Li 合金由于其良好的成形能力以及超低的密度被认为是最具发展潜力的镁合金。在本研究中,系统研究了 Li 对 Mg-Al-Ca 合金力学性能和微观组织的影响。

C03-27

基于电镜观测的镁基结构材料设计与应用

单智伟

西安交通大学

结构材料学家的世纪梦想就是通过对材料微结构的认知来理解和掌握材料的宏观力学性能及其演化规律，并进而通过对材料微结构的精准设计来制备出符合特定服役环境要求的结构材料。但随着科学技术日新月异的发展，过去基于金相组织的设计原则已经越来越不能满足日益苛刻的服役环境对材料性能和寿命等综合指标的要求。一个典型的案例就是航空发动机叶片材料，要求它具备极高的匀质性和稳定性才能保证众多的叶片在苛刻环境中长时间服役而没有任何一个发生突然失效；另一个案例是镁基材料，作为最轻质的金属结构材料，它在航空、航天及能源驱动的交通和运载工具上的应用远远落后于人们的预期，究其根源就在于对其微结构及演化机理和规律缺乏系统定量的研究。针对上述认知，本研究团队选取金属镁做为研究对象，以原位，定量的环境透射电镜变形技术为主要手段，在前期工作的基础上，对这些样品在热，以及微量气氛条件下的变形特性及内在机制进行了探索。本报告将着重介绍我们研究团队最近在镁基材料方面所取得的一些研究成果。

C03-28

镁合金晶体塑性-相场法全场耦合模型研究及其应用

董杰¹，刘传来^{1,2}，董帅¹，M. Diehl²，D. Raabe²

1.上海交通大学

2.Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH

在室温变形条件下，孪晶的形核、扩展和长大过程对密排六方金属材料，如镁合金、钛合金和锆合金的塑性变形行为和内应力状态有重要影响。传统的晶体塑性模型可以较好地描述与位错滑移相关的塑性变形机制，但是其中多数孪晶模型仍然采用类似位错单向滑移的方法处理各向异性孪生行为，进而不能准确地描述孪晶的形核和快速扩展局部塑性变形行为及其与位错和晶界的交互作用。在本研究中，建立了一种适用于密排六方金属材料塑性变形的集成全场晶体塑性-相场模型，可以同步描述位错滑移和各向异性孪生变形行为。本方法采用基于位错密度的全场晶体塑性模型描述塑性变形过程中不同的位错滑移行为，在具有高空间分辨率的情况下，预测变形过程中的应力状态和应变分布演化行为。在介观尺度下，对于镁合金多晶体中的孪晶形核过程，利用概率方法建立了随机孪晶形核模型。在相场模型中，孪晶的扩展和长大过程的驱动力来源于系统整体自由能，即孪晶界面能和弹性应变能的释放。利用自编的 in-house 有限元求解器，对于上述建立的耦合模型完全隐私求解。在模型应用方面，首先在单晶体模型中重点研究了局部应力状态对孪晶的扩展和长大过程的影响。利用双晶和多晶体模型研究了塑性变形过程中孪晶、位错和晶界之间的交互作用。该全场耦合模型可以利用 EBSD 数据建立具有真实晶粒形貌的几何模型，可以研究镁合金在复杂应力条件下的塑性变形机制和失效行为。

C03-29

Mg-Gd 基高强铸造镁合金的开发及应用

杨明波¹，程仁菊^{1,2}

1.重庆理工大学和重庆大学国家镁合金材料工程技术研究中心

2.重庆市科学技术研究院

铸造镁合金最为有发展前途的镁合金材料，其研究开发对于镁合金的开发应用意义重大。目前，虽然得到应用的镁合金 90%以上主要集中在铸造镁合金上，但与铝合金材料相比，现有铸造镁合金的性能还难以满足工业应用尤其航空航天领域的需求，因此研制开发高强高韧铸造镁合金对于拓展镁合金的应用范围就显得尤为关键。近 10 多年来，国内外研究者对于高强高韧铸造镁合金已开展了大量的研究，研究结果发现：Mg-Gd 基镁合金是相对有发展前途的高强高韧铸造镁合金，但现有 Mg-Gd 基铸造镁合金的性能还不能同时满足高强高韧的要求。因此，研制开发同时具有高强高韧的 Mg-Gd 基铸造镁合金显得非常迫切。本文结合近几年围绕 Mg-Gd 基高强高韧铸造镁合金所做的工作，重点报道了在合金成分设计、组织性能调控和相关零部件开发及铸造工艺控制等方面的工作，以为高强高韧铸造镁合金的开发应用提供参考。

C03-30

搅拌摩擦加工 Mg-Gd 系合金组织性能研究

陈娟，韩靖宇，彭立明，吴玉娟，阎熙，郑飞燕，丁文江

上海交通大学

搅拌摩擦加工 (Friction stir processing, FSP) 是一种可直接作用于铸态镁合金, 而无需预热的新型大塑性变形工艺, 其过程中产生的热耦合作用可有效细化合金晶粒, 破碎粗大第二相。Mg-Gd 系稀土镁合金由于具有低密度、高强度和良好的抗蠕变等特性获得了广泛的关注, 但铸造 Mg-Gd 系合金中的粗大晶粒, 以及分布于晶界的网状结构第二相和块状 LPSO 结构将阻碍材料力学性能的提升。本研究通过搅拌摩擦加工及热处理对 Mg-Gd 系稀土镁合金进行了组织调控, 制备了含细小弥散第二相的细晶复合组织, 并考察了加工过程中的温度场分布, 显微组织 (特别是织构) 的演变规律。此外, 室温力学性能结果显示, 搅拌摩擦加工可有效提升 Mg-Gd 系稀土镁合金的综合力学性能。

C03-31

铸态及挤压态 Mg-8Gd-1Er-0.5Zr 合金的蠕变断裂行为研究

李淑波, 李瑞静, 刘轲, 王朝辉, 杜文博

北京工业大学

本文利用拉伸蠕变设备对铸态及挤压态 Mg-8Gd-1Er-0.5Zr 合金在 250°C/70MPa 条件下的蠕变断裂行为进行了研究, 利用金相显微镜、扫描电镜和透射电镜等对蠕变断口形貌进行分析, 探讨了晶粒尺寸对 Mg-8Gd-1Er-0.5Zr 合金的蠕变断裂方式及机理的影响。结果表明: 铸态与挤压态 Mg-8Gd-1Er-0.5Zr 合金的断裂方式均以沿晶断裂为主, 位错塞积导致应力集中, 使得裂纹优先在三叉晶界及无析出带处形成; 晶界上的第二相可以强化晶界, 阻碍裂纹扩展。但二者的裂纹扩展方式不同, 其中, 铸态合金发生断裂时无明显塑性变形, 裂纹在晶界无析出带处萌生并扩展, 且随着晶界的滑移而长大, 最终导致铸态合金试样发生脆性沿晶断裂; 挤压态合金蠕变断裂时发生了明显的塑性变形, 晶界处存在明显的蠕变空洞, 孤立的蠕变空洞合并长大是晶界微裂纹扩展的主要方式, 试样产生明显的颈缩, 最终导致挤压态合金试样发生韧性沿晶断裂。

C03-32

含 LPSO 和 γ' 相的超高强易溶 Mg-6.7Y-4.3Ni (wt.%) 合金

武首中, 乔晓光, 郑明毅

哈尔滨工业大学

超高强易溶镁合金在制造井下油气工业压裂工具方面具有巨大的潜力。本文通过常规铸造和挤压制备了中等稀土含量的超高强易溶 Mg-6.7Y-4.3Ni (wt.%) 合金, 采用 SEM、HADDF-STEM 等表征手段分析了合金显微组织对力学性能和降解速率的影响。结果表明, 超高强 Mg-6.7Y-4.3Ni (wt.%) 合金屈服强度达 467 MPa, 抗拉强度达 512 MPa, 断裂伸长率达 8%。该合金的溶解速率很快, 25°C 时在 3%KCl 溶液中的腐蚀速率为 331 mg/cm²/d。铸态合金的晶界处存在大量块状 LPSO 相及少量共晶相 Mg₂Ni, 在靠近晶界的基体内存在少量纳米片状 γ' 相。经挤压变形后, 合金中存在细小的再结晶区和粗大未再结晶区构成的双模组织; 未再结晶区中块状 LPSO 相和纳米片状 γ' 相沿挤压方向伸长; 共晶 Mg₂Ni 相被挤碎成沿挤压方向分布的细小颗粒。合金的超高强度主要归因于平行于挤压方向分布的大量条状 LPSO 相和纳米 γ' 相。镍的加入生成了大量可充当阴极的含镍化合物, 加速合金腐蚀。

C03-33

优化挤压模具角度改善 Mg-3Al-1Zn 合金板材力学性能: 微观组织及织构变化

蒋斌

重庆大学

在 400°C 下, 应用不同角度 (30°、45°、60°、90°) 挤压模具制备 AZ31 镁合金板材。利用有限元数值模拟分析 AZ31 镁合金板材在各挤压工艺中有效应变变化。通过金相, XRD 和 EBSD 观察各挤压板材的微观组织和织构变化, 在万能拉伸试验机上测试挤压镁合金板材的力学性能。结果表明, 在各挤压工艺中沿挤压板材厚度方向能有效引入不同的有效应变。当挤压模具角度为 45° 时, 在板材成形过程中, 沿挤压板材厚度方向形成较大的有效应变差, 从而在挤压过程中形成大的非对称剪切力, 导致挤压 AZ31 合金板材具有均匀的显微组织和弱的基面织构。因此, 该挤压 AZ31 合金板材呈现低的屈服强度, 高的延伸率, 挤压板材力学性能得到改善。研究结果表明, 通过优化挤压模具角度, 能有效改善挤压 AZ31 镁合金板材力学性能。

C03-34

镁合金的塑性变形特点与残余应力产生及消减

杨院生, 罗天骄, 王聪, 朱绍珍, 何明琳

中国科学院金属研究所

作为镁合金中有着重应用前景的变形镁合金正在日益受到重视,由于其特有的 hcp 结构特点,镁合金呈现出独特的变形行为。在经历不同的塑形加工后,镁合金构件中存在不同程度的残余应力,从而直接影响到构件的尺寸精度以及进一步精密加工。此外,镁合金的热处理也辉导致工件中产生残余应力。结合具体的镁合金塑形加工工艺和热处理工艺,本文分析了镁合金的塑形变形特点和产生残余应力的机制以及消减途径,论述了近年来在残余应力表征和消减方面的研究进展。

C03-35

铸造 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 镁合金高周疲劳研究

孟德浩^{1,2}, 李培杰¹, 王端志², 袁文全², 刘文才³

- 1.清华大学机械工程系
- 2.北京宇航系统工程研究所
- 3.上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心

本文基于低压砂型和重力金属型铸造 GW63 镁合金,对铸态和 T6 合金的旋转弯曲高周疲劳进行了研究。获得了合金的高周疲劳 S-N 曲线及疲劳强度,并结合 OM 和 SEM 分析了合金在循环载荷下疲劳裂纹的萌生、扩展及失效行为。研究表明:铸态下砂型铸造和金属型铸造的高周疲劳强度分别为 105MPa 和 95MPa;经过 T6 热处理后,分别提高 14.3%和 21.1%至 120MPa 和 115MPa。铸态合金高周疲劳表现为单点萌生,通过孪生方式发生微塑性变形;T6 态合金高周疲劳表现为多点萌生,以疲劳条带方式向前扩展,通过滑移方式控制微塑性变形。

C03-36

AZ31 镁合金薄壁管材挤压-剪切成形技术应用基础研究

胡红军¹, 张丁非²

- 1.重庆理工大学
- 2.国家镁合金材料工程技术研究中心

传统挤压是目前最成熟的加工工艺,但是晶粒细化相对有限;等通道转角挤压是一种大塑性变形方法,合金在变形前须预挤压,随后在模具内进行多道次挤压,从而获得超细晶。基于此可以将传统挤压与 ECAE 变形挤压综合起来加工出大塑性变形的 TES 挤压新工艺。利用上述工艺通过模具设计、挤压筒设计、挤压杆设计及挤压针设计等,加工出模具最终成功挤出镁合金薄壁管材。本文采用 Deform-3D 有限元软件对 TES 变形过程进行分析,重点研究 TES 变形过程中合金的微观组织演变和物理性能;与普通挤压相比管材挤压剪切成形可显著细化晶粒,提高管材的硬度,从 EBSD 分析中可以得出 AZ31 管材在挤压过程中产生了大量的位错滑移及压缩孪晶{10-11}和拉伸孪晶{10-12},变形态组织的比例明显增加;显著改变镁合金的初始组织,影响其表现性能。

C03-37

合金成分对 Mg-Zn-Y 合金准晶形貌和体积分数的影响

袁姣娜, 王建利, 杨忠, 李建平

西安工业大学

利用铁模铸造法制备了 Zn/Y(at.%)=6:1 的 Mg-Zn-Y 合金,通过 XRD、SEM、EDS、TEM 和 DSC 等研究了合金成分对 Mg-Zn-Y 合金相组成、Mg₃Zn₆Y 准晶相(准晶 I 相)形貌和体积分数的影响。结果表明, Mg-Zn-Y 合金的相组成,准晶 I 相形貌、体积分数及生成反应与合金成分密切相关。随着合金中 Zn 和 Y 元素含量的减少,准晶 I 相的形成反应由单一的包晶反应到包-共晶反应再到完全共晶反应。当合金中 Y≥7at.%时,合金由 (Mg, Zn)₅Y, 准晶 I 相, Mg₂Zn₃ 和 Mg₇Zn₃ 相组成,且以叠层状形式分布在合金组织中。合金在凝固过程中通过包晶反应形成多边形块状准晶 I 相;当 Y<7at.%时,合金中除(Mg, Zn)₅Y, 准晶 I 相和 Mg₇Zn₃ 相外,还析出了 Mg 相。当合金中 Y 含量在 5~6at.%时,准晶 I 相通过包晶和共晶反应生成,以共晶反应为主。当 Y≤4at.%时,准晶 I 相完全通过共晶反应形成 (Mg+I-phase) 层片状共晶组织。所研究的合金中均生成了体积分数大于 27%的准晶 I 相, Mg₃₀Zn₆₀Y₁₀ 合金中准晶 I 相的体积分数最高,约为 77%。

C03-38

Ca 含量对喷射沉积含 Nd 镁合金挤压坯中第二相和结构的影响

李振亮, 岳松波, 刘飞

内蒙古科技大学

采用喷射沉积技术制备 Mg-9Al-3Zn-1Mn-9Ca-1Nd (质量分数, %) 并进行热压缩变形, 研究镁合金塑性变形过程中第二相的微观组织与相结构的转变, 讨论分析其变化原因以及其对镁合金织构的影响。结果表明: 挤压坯晶粒细小尺寸大约 1~5 μm , 且其挤压坯形成较强的 (0002) 基面织构和非基面 (柱面、锥面) 织构, C15 粒子 ((Ca,Nd)Al₂ 相) 阻碍晶粒长大, 促进 $\langle a \rangle$ 位错从基面到柱面的交滑移, 同时 C15 粒子也促进 $\langle c+a \rangle$ 位错滑移是挤压坯实现织构多元化的主要原因; 变形的亚结构主要由大量位错缠结区、以 C15 粒子为基底形成的面心立方 (111(-)) 形变孪晶以及以 C15 为基底形成的 Mg-Nd-Zn 型 6H-LPSO 结构组成; 细小的 C15 粒子钉扎位错并产生位错缠结区是能够在第二相上发生孪生或形成 Mg-Nd-Zn 型 LPSO 相的主要原因, 而 C15 粒子内 Nd、Ca 含量变化是导致 C15 粒子向不同方向生长的主要因素。

C03-39

同步辐射和 EVPSC 模拟研究晶粒尺寸对 Mg-3Al-3Sn 合金变形行为的影响

朱高明, 孙迎军, 王乐耘, 汪华苗, 曾小勤

上海交通大学

对不同晶粒尺寸的 Mg-3Al-3Sn 合金 (~5, ~20, ~50 和 ~100 微米) 沿轧制方向进行拉伸实验, 并采用原位 EBSD 和原位同步辐射进行表征, 结果表明所有的样品均表现出优异的塑性 (12%-20%)。原位 EBSD 实验对滑移系统统计显示主要产生了基面滑移和少量的柱面滑移, 对孪晶的统计显示在同等应变条件下大晶粒尺寸产生较多的孪晶。通过原位同步辐射实验分析, 表明小尺寸晶粒具有较大的晶格应变和较大的位错密度。采用 EVPSC 方法对 ~5 微米和 ~50 微米材料的拉伸曲线和压缩曲线进行模拟, 与实验结果吻合良好。

C03-40

Mg-10.13Li-2.83Zn-2.78Al-0.13Si 合金热变形行为研究

高守阳, 李德富, 杜鹏

有研科技集团有限公司

采用 Gleeble-1500 热模拟试验机, 在温度为 150~300°C、应变速率为 0.001~10s⁻¹ 的条件下对 Mg-10.13Li-2.83Zn-2.78Al-0.13Si 合金进行热压缩实验, 分析该合金的流变应力行为并构建热加工图。合金的流变应力曲线表现出的变化是 β 相动态再结晶和 α 相协调变形共同作用的结果。通过对热加工图和显微组织分析, 结果表明 300°C/0.001s⁻¹ 条件下能量耗散效率为 45%, 可以得到发生完全动态再结晶的 β 相和细小圆润的 α 相。这是由于在较高温度和较低应变速率下, Li 的扩散导致 α 相转化为 β 相, 并且在变形过程中从 β 相的再结晶晶界处析出。温度为 150~220°C、应变速率为 0.1 s⁻¹~3s⁻¹ 的条件下为合金的流变失稳区, 在微观组织观察中并未发现有空洞、裂纹和绝热剪切带等缺陷, 但 α 相变形剧烈, 对加工不利。因此, 300°C/0.001s⁻¹ 是本实验条件下最优的热加工工艺参数。

C03-41

多相颗粒对含铝镁合金异质形核行为的影响

李春华, 付玉, 王晗, 郝海

大连理工大学

晶粒细化是改善镁合金力学性能的有效途径, 但针对含铝镁合金目前尚无稳定高效的细化剂, 制约了含铝镁合金的进一步推广应用。本文以典型含铝镁合金 (AZ91) 为对象, 从颗粒相制备工艺及细化机理两方面开展研究, 采用自蔓延高温合成法 (SHS) 及原位生成法复合制备含多相颗粒 (Al₄C₃、TiC、Al₂Y) 的 Al-Ti-C-Y 中间合金。同时探究多相颗粒在 AZ91 基体中的尺寸、形貌、分布, 以及在异质形核过程中颗粒间的相互影响, 并研究多相颗粒对于含铝镁合金的晶粒细化机制。细化结果表明: 多相颗粒 (Al₄C₃、TiC、Al₂Y) 可有效细化含铝镁合金铸态晶粒, 中间合金细化剂的添加量与细化效率有明显的对应关系。

C03-42

室温下应力状态对 AZ31 镁合金轧制板材微观组织演化的影响

黄光胜, 夏大彪, 谢誉璐, 蒋斌, 潘复生

重庆大学

本文提出了两种用于原位电子背散射衍射 (EBSD) 观察的微观拉伸实验装置, 并用此装置研究了单轴拉伸及双轴拉伸应力状态下镁合金 AZ31 微观组织演化的差异。原位 EBSD 结果表明两种应力状态下微观组织演化存在着明显的差异,

其主要原因则是拉伸孪晶在不同应力状态下对变形协调的响应机制存在明显的差异。通过修正的施密特因子 (SF) 算法计算两种应力状态下各变形机制的 SF 在 {0001} 极图上的分布可以证明应力状态的变化对 SF 的影响十分显著。此外, 孪晶与滑移系间变形协调性的也明显受到应变状态变化的影响。而镁合金轧制板材较弱的成形性能可能部分归因于双轴拉伸应力状态下拉伸孪晶与滑移系间较差的变形协调性。

C03-43

海洋大气环境因素对镁腐蚀性的影响

宋光铃, 曹福勇, 赵晨

厦门大学, 海洋材料腐蚀防护研究中心

固体表面物理化学国家重点实验室

镁合金是重要的航空材料, 若用于舰载飞机是, 将不可避免地直接暴露于海洋大气环境中。环境参数如气温、湿度、空气污染、海水成分等将影响镁合金的腐蚀。虽然大气腐蚀是个传统课题, 研究得十分广泛和深入, 但对镁合金而言, 许多环境因素 (如: 海水中所含的各种化学成分、海洋大气的污染物等) 对腐蚀反应的作用目前并不清楚。本报告简要阐述这些海洋大气因素对镁腐蚀的加速与抑制行为, 同时对一些有趣的实验现象 (如: 相比 3.5% NaCl 溶液, 人工海水居然对镁具有一定的腐蚀抑制效应; 雾霾中的特定成分对镁腐蚀有明显的加速作用) 作进一步讨论。希望这些初步的研究工作, 能促进镁合金在海洋大气环境中的工业化应用。

C03-44

挤压镁锂钙合金的剥蚀

曾荣昌¹, 丁自友¹, 藺存国², 杨院生³

1. 山东科技大学

2. 中船重工 725 所青岛分部海洋腐蚀与防护国防重点实验室

3. 中国科学院金属研究所

Corrosion morphology on extruded Mg-1Li-1Ca alloys was discerned after an immersion in 3.5 wt. % NaCl solution for 90, 120 and 150 days through digital camera, OM, SEM, electrochemical tests, XRD and FT-IR. The results demonstrated that exfoliation corrosion occurred on extruded Mg-1Li-1Ca alloy due to elongated microstructure parallel to surface, and delamination of lamellar structure resulted from galvanic effect and wedge effect. Skin layer with fine grains exhibited better corrosion resistance, whereas the interior with coarse grains and the intermetallic compound, Mg₂Ca particles existing in a fibrous structure, dispersed along grain boundaries and extrusion direction. Galvanic effect between Mg₂Ca particles and their surrounding α -Mg matrix facilitated dissolution of Mg₂Ca particles and α -Mg matrix; Exfoliation of extruded Mg-Li-Ca alloys might be a synergic effect of pitting, filiform, intergranular and stress corrosion. Finally, exfoliation mechanism was proposed.

C03-45

残余应力对 Mg-Gd-Y 合金腐蚀行为的影响

王萍

西安工业大学

采用 SEM, TEM, EDS, XRD 对残余应力作用下 Mg-Gd-Y 合金的腐蚀行为进行研究, 通过宏观及微区电化学测试系统对其电化学性能进行表征, 并通过 Ansys 有限元分析软件及 X 射线应力分析仪对宏观及微观残余应力进行分析及表征。结果表明, 随着机械加工残余应力的提高, Mg-Gd-Y 合金自腐蚀电位降低, 腐蚀电流密度提高, 腐蚀速率增大。腐蚀易引发于 MgGd 相周围, 并逐渐向晶界扩展。这不仅与 MgGd 相和基体的电位差和界面结合方式有关, 也与 MgGd 相在凝固析出时的残余应力有关。

C03-46

Mg-Al-Pb-Re 合金变形带材作为阳极在镁-空气电池上的应用

王乃光

广东工业大学材料与能源学院

Mg-Al-Pb-Re 合金放电活性强, 在小电流密度下具有较高的阳极利用率, 适合作为镁-空气电池阳极材料。然而, 该镁合金长时间放电时仍存在电位正移和金属颗粒脱落的瓶颈。在优化成分的基础上通过塑性变形细化晶粒是改善镁阳极材料综合性能的关键, 但变形量对镁合金显微组织与阳极行为的作用机制仍有待澄清。鉴于此, 本文通过挤压变形获得不同厚度的 Mg-Al-Pb-Re 合金带材, 分别对应不同的挤压比(变形量), 并探讨这些带材作为阳极在镁-空气电池中的应用。结果表明, 在挤压之前的均匀化退火态样品晶粒尺寸较大且无明显择优取向, 粗大的 γ 相分布于镁基体中, 这一组织模式导致 Mg-Al-Pb-Re 合金自腐蚀严重、放电平台较低, 但仍高于纯镁和 AZ31 镁合金。挤压变形能显著细化晶粒并形成较强的 (0001)晶粒取向, 这一现象在较小的挤压比(6.8:1)下最明显。因此, 挤压变形能抑制 Mg-Al-Pb-Re 合金的自腐蚀并使其提供较高的放电平台。然而, 15 和 10 毫米厚的带材(挤压比分别为 6.8:1 和 10.2:1)位错密度较高且在晶界处存在位错塞积。此外, 较小的挤压比(6.8:1)会导致 $Mg_{0.78}Pb_{0.22}$ 纳米颗粒析出, 因而这两种带材的阳极利用率和放电平台仍有待提高。大的挤压比(20.5:1, 对应厚度 5 毫米)能降低位错密度并消除位错塞积, 同时削弱(0001)晶粒取向并使晶粒轻微长大。这一组织模式能促进镁合金在长时间(10 小时)放电时活化溶解并使其具备较高的阳极利用率和放电平台。以 5 毫米厚的 Mg-Al-Pb-Re 带材作为阳极的镁-空气电池在 10mA/cm² 电流密度下能提供 1.350 V 的放电平台, 这一数值比 Mg-Li 基合金和铸态 Mg-Al-Pb-Ce-Y 合金更高。此外, 5 毫米厚的 Mg-Al-Pb-Re 带材在 10mA/cm² 电流密度下的阳极利用率达到 64.1%, 高于纯镁和 AZ31 镁合金。因此, 该 5 毫米厚的镁合金带材是一种较为理想的镁-空气电池阳极材料, 对金属阳极的设计制备具有一定的指导意义。

C03-47

AP65 类镁合金在氯化钠溶液中电化学行为的研究

项向春, 余琨, 戴翌龙, 朱化龙

中南大学

研究方法和目的: AP65 是一种用于大功率海水电池阳极的镁合金, 其名义成分为 Mg-6%Al-5%Pb, 性能较好的 AP65 镁合金在实际使用过程中通常要求具备较强的放电活性和较高的库伦效率, 能在短时间内迅速激活并在较负的放电电位下工作。在实际中由于熔炼工艺、变形工艺和热处理工艺的差别, 使得在某种制度下 AP65 并不是最优成分, 本文以四因素 (Al、Pb、Zn、Mn) 和三水平建立起的正交试验通过电化学性能测试来选取最优配比, 并研究第二相对电化学性能的影响。

研究结果与结论: 通过正交试验发现 Al 元素对合金的腐蚀电流、在 150mA/cm² 的电流密度下的平均放电电位及电荷交流电阻的影响最大; 而在 350mA/cm² 的电流密度下的平均放电电位则主要取决于 Pb、Al 元素。综合放电性能最优的合金为 Mg-6%Al-7%Pb-0.5Zn, 其在 150mA/cm² 和 350mA/cm² 恒电流下放电时, 平均电极电位分别可达 -1.67772V (vs.SCE) 和 -1.3491V (vs.SCE), 阳极电流效率分别为 (87.4±0.4)% 和 (86.1±0.5)%。对 Mg-6%Al-5%Pb 合金, 固溶态中的腐蚀在贫溶质原子区优先发生, 此时自腐蚀电流最大, 小电流密度下放电活性最强; 在时效态 Mg-6%Al-5%Pb 合金中, 当晶界和晶内存在弥散的 γ -Mg₂Pb 相以及晶界存在少量块状 γ -Mg₁₇Al₁₂ 相时, 自腐蚀电流较小, 放电活性较弱, 此时腐蚀从晶界周围开始进行; 当晶内 γ -Mg₂Pb 相长大, 且晶界处存在非连续析出 γ -Mg₁₇Al₁₂ 相时, 合金放电活性增强, 此时腐蚀从晶界和晶内同时发生, 且存在与胞状组织有关的层状腐蚀形貌。

C03-48

血管支架用 Mg-Zn-Y-Nd 合金微管的加工及性能表征

朱世杰^{1,2}, 王利国^{1,2}, 王剑锋^{1,2}, 关绍康^{1,2}

1. 郑州大学材料科学与工程学院

2. 河南省先进镁合金重点实验室

随着血管内介入治疗技术的不断发展, 生物镁合金材料以其可降解性、良好的力学性能、生物相容性和生物安全性, 成为新一代具有发展潜力的可降解血管支架材料, 但在临床应用中存在两个问题: 塑性变形能力差、强韧性不足和降解速率较快, 同时, 细长、壁薄且均匀的微管的制备是其在血管支架领域应用的必要条件。报告采用二次热挤压和长芯杆拉拔工艺的结合来制备 Mg-Zn-Y-Nd 合金微管, 对管材的显微组织进行表征, 研究了挤压工艺、拉拔工艺及退火工艺等对组织的影响, 以及拉拔过程中微管显微组织的演变规律, 并对挤压态管坯、拉拔态管材以及退火态管材的微观组织、力学性能和腐蚀性能进行表征, 探讨微管在模拟体液中的腐蚀降解行为, 为 Mg-Zn-Y-Nd 合金微管在血管支架中的应用提供科学依据。

研究结果表明: 在冷拉拔变形过程中, 晶粒内部形成了大量孪晶, 晶粒沿着拉拔方向被拉长而形成纤维状组织, 第二相颗粒得到进一步破碎; 中间退火形成了再结晶组织, 为管材提供了进一步的塑性变形能力。经多道次拉拔和中间退火, 获得微管的外径 2.0mm、壁厚 0.15mm, 壁厚误差在 4% 以下, 平均晶粒尺寸从挤压管坯的 27.32 μ m 细化到 4.39 μ m, 第二

相颗粒呈细小弥散分布。退火后的微管获得了良好的综合力学性能,Φ2.0mm 的微管的屈服强度和抗拉强度分别为 254MPa、300MPa,断裂伸长率为 18%。断口形貌显示,微管的断裂方式是一种混合型断裂,解理台阶和韧窝同时存在。退火态微管呈现出最好的耐腐蚀性能,Φ2.0mm 微管在模拟体液中浸泡 72h 后的腐蚀速率为 0.106mg/(cm²·h),腐蚀比较均匀;拉拔态管材由于孪晶组织以及应力会加速镁合金微管的腐蚀,存在一些较深点蚀坑。

C03-49

生物镁合金及其特种加工技术进展

关绍康^{1,2}, 朱世杰^{1,2}, 王利国^{1,2}

1.郑州大学材料科学与工程学院

2.河南省先进镁合金重点实验室

生物镁合金材料以其可降解性、良好的力学性能、生物相容性和生物安全性,具有组织诱导性能、促进骨的愈合或血管内皮化,成为新一代具有发展潜力的可降解生物材料,但在临床应用中存在两个问题:强韧性不足和降解速率较快。报告针对生物镁合金及器件研发和临床应用面临的问题,详细地介绍了从仿生学的角度开发出 Mg-Zn-Ca 和 Mg-Zn-Y-Nd(-Zr)合金,通过能使生物镁合金获得大塑性变形的往复挤压(CEC)、高压扭转(HPT)、搅拌摩擦加工(FSP)等先进的特种加工技术,获得均匀致密的超细微晶/纳米晶医用镁合金,改变镁合金的腐蚀行为,达到医用镁合金植入器械的均匀降解和提高强韧性。通过全面评价其耐腐蚀性能、力学性能和生物性能,探讨了超细晶镁合金的千人化机制和均匀降解机制,使得镁合金及器件在模拟体液中由点蚀转变为全面腐蚀和均匀腐蚀,降解方式为均匀缓慢降解,有效地控制生物镁合金及器械的降解速率。同时,通过镁合金植入器械的结构优化设计来改善其力学性能,利用表面涂层结构设计和表面处理技术来控制器械(骨植入器械和血管支架)的降解速率,使骨螺钉的降解与骨组织重建相适配,满足材料服役过程的力学相容性和生物相容性。

C03-50

纳米镁基储氢材料的气相合金化法制备及其吸放氢机制研究

邹建新

上海交通大学

C03-51

石墨烯纳米片/AZ91D 镁基复合材料制备及组织性能研究

侯华, 陈利文, 赵宇宏, 张婷, 梁建权, 李沐奚

中北大学

石墨烯纳米片(GNPS)具有优异的力学性能、热学性能和电学性能,是制备金属基纳米复合材料最为理想的增强体之一。然而,由于 GNPS 在金属基体中的均匀分散、GNPS 与金属基体的界面结合和复杂低成本制备工艺等问题,GNPS 增强镁基复合材料的性能并没有达到预期的效果。本文采用了半固态注射成型技术来制备石墨烯纳米片增强镁基复合材料,首先将 GNPS 与 AZ91D 镁合金颗粒在 V 型混粉机内进行混粉,然后将混合好的粉末颗粒加入到镁合金注射成型设备中,来制备 GNPS 增强镁基复合材料。研究了 GNPS 的加入量、成型温度、注射速度、螺杆搅拌速度等工艺参数对复合材料性能的影响规律,并通过 SEM、TEM 等手段,研究了 GNPS 与金属基体的界面结合问题。经过工艺优化所制备的 GNPS 增强镁基复合材料,抗拉强度和延伸率较基体分别提高了 34%和 66%。该技术相对于以往 GNPS 增强镁基复合材料的制备技术,简单、便捷、成本低,适用于镁合金结构件的实际生产应用。

C03-52

自然时效对 GW102 合金组织与性能的影响

杨忠, 郭永春, 夏峰, 段洪波, 高培虎, 李建平

西安工业大学

综合运用 OM、FEGSEM、HRTEM、DSC 和拉伸性能测试等手段分析了自然时效对 Mg-10wt%Gd-2wt%Y-0.5wt%Zn-0.5wt%Zr 合金(记为 GW102)显微组织与力学性能的影响。研究表明:合金挤压后的自然放置对 GW102 合金的显微组织、力学性能及其后续人工时效行为有很大的影响。挤压态合金的 α(Mg)等轴晶完全由多种交滑移组成的变形组织构成;而挤压后经过 3 年的自然时效后,α(Mg)内部的变形组织明显减少,在毗邻晶界处存在大量的无变形区,且在 α(Mg)

晶粒内部发现有 β'' 相析出。合金经过3年自然时效后进行200°C人工时效时,时效初期合金的硬度和抗拉强度相对较高,峰值时效时合金的硬度和抗拉强度显著降低,达到峰值时效所需时间缩短,且出现时效峰值平台(44h-132h)。虽然自然时效对合金的时效析出序列没有明显的影响,但在相同的时效温度和时间下,经过自然时效的相同结构的时效析出相尺寸均偏大。

C03-53

时效处理对 Mg-6Zn-1Mn 合金高周疲劳性能的影响

余大亮¹, 张丁非², 曹鹏军¹, 潘复生²

- 1.重庆科技学院
- 2.重庆大学

本文研究了 T5 处理和双级时效处理对 Mg-6Zn-1Mn (ZM61) 镁合金在拉伸载荷 (R=1) 和拉-压载荷 (R=-1) 下高周疲劳性能的影响。研究表明: 挤压态、T5 态和双级时效态合金在拉伸载荷下的疲劳性能显著优于拉-压载荷下的疲劳性能; 时效过程中析出的 MgZn₂ 可以提高 ZM61 镁合金在拉-压载荷下的疲劳性能, 但是会恶化 ZM61 镁合金在拉伸载荷下的疲劳性能; 对两种载荷疲劳后样品的组织观察发现拉伸载荷疲劳破坏主要与位错运动相关, 拉-压载荷疲劳裂纹萌生主要与孪生相关; 疲劳破坏过程中疲劳裂纹扩展区塑性变形程度很小, 塑性变形主要集中在瞬间断裂区和疲劳裂纹萌生区。

C03-54

定向凝固 Mg-3Zn-0.5Ca 合金在不同生长速率下的组织演变及取向分析

张一^{1,2}, 冯小辉¹, 杨院生^{1,3}

- 1.中科院金属研究所
- 2.中国科学技术大学
- 3.山东省科学院新材料研究所, 山东省轻质高强金属材料省级重点实验室

利用定向凝固技术制备了不同生长速率下的 Mg-3Zn-0.5Ca 合金, 并利用光学显微镜和 X 射线对其组织演变以及取向进行分析。在 20 μ m/s 的生长速率下, 合金组织表现为边界有扰动的胞状晶, 这意味着在该生长速率下合金已发生胞枝转变。在 60 μ m/s 的生长速率下, 组织为典型的柱状枝晶, 具有发达的二次枝晶臂。当生长速率增加到 120 μ m/s 时, 可以观察到组织为枝晶, 且一次枝晶臂间距相比 60 μ m/s 明显减小。此外, 文章还对组织的取向进行了检测及分析, 结果表明胞状晶组织及柱状枝晶组织均表现出沿特定的晶体学方向生长。

C03-55

多向流场中的镁合金凝固组织演化数值模拟

冯小辉, 张一, 杨院生

中国科学院金属研究所

在镁合金凝固过程中施加电磁场、超声场或机械搅拌等均可细化组织并显著改变晶体生长形貌, 获得枝晶、蔷薇晶甚至球状晶等不同凝固组织。本文通过建立多向流场作用下的晶体生长模型, 采用元胞自动机方法模拟了不同熔体流动条件下的镁合金凝固组织演化过程, 再现了单向流动条件下的迎流生长及多向流场中的非枝晶生长, 揭示了多向流场中镁合金晶体生长固液界面前沿温度场和溶质场变化。本文通过数值模拟还获得了不同冷却条件、熔体流速、流动方向等条件对镁合金凝固组织的影响规律, 为外场作用下镁合金凝固制备技术的工艺优化提供了重要依据。

C03-56

长安轻量化技术进展及对产学研的思考

刘波

长安汽车集团

C03-57

变形镁合金规模化生产技术

崔凯

山西银光华盛镁业

C03-58

含稀土高性能镁锂合金微观组织与力学性能研究

刘文才, 吴国华, 冀浩, 彭翔, 丁文江

上海交通大学

本文通过在双相 Mg-Li-Al(-Zn)合金中分别添加 Y、Er 等稀土元素 (0.5-2wt. %) 制备含稀土系列镁锂合金, 利用多种实验手段分析了稀土元素种类和含量、热处理工艺对 Mg-Li-Al(-Zn)合金微观组织和力学性能的影响规律及机制。结果表明, 不同的稀土元素和含量对实验合金有不同的影响, 微量 Y 和 Er 元素都能显著细化 Mg-Li-Al(-Zn)合金的晶粒, 并生成硬质的含稀土第二相。不过, Y 可以使合金晶粒从枝晶状变成颗粒状, 而 Er 对合金晶粒形貌没有明显影响。随着 Y 和 Er 含量由 0 增加到 2%, 合金密度逐渐增大, 硬度稍微降低, 而强度和延伸率均先提高而后降低。其中, 含 0.5Y 和 0.5Er 的合金综合性能最好, 密度为 1.55 g/cm^3 左右, 含 0.5Y 合金的屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 153MPa、218MPa 和 16.9%, 分别提高了 6.4%、13.2%和 13.4%; 含 0.5Er 合金的屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 198MPa、223MPa 和 14.7%, 分别提高了 10.6%、9.9%和 4.3%。而当 Y 和 Er 含量进一步增加时, 由于含稀土第二相的聚集和起强化作用的 Al、Zn 元素的消耗, 合金晶粒粗化, 力学性能下降。另外, 两类镁锂合金均表现出明显的固溶强化效果, 最佳固溶工艺为 $350^\circ\text{C}\times(2-4)\text{h}$, 且含 Y 合金的固溶强化效果稍高于含 Er 合金, 固溶态含 Y 合金的屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 216MPa、276MPa 和 11.1%; 不过, 两类镁锂合金也都具有一定的时效软化现象, 即硬度和强度均随时效温度提高和时间延长而降低。此外, 本文也对实验合金中稀土元素和固溶处理的强化机制进行了探索研究。

C03-59

镁合金及镁-铝异种材料整体表面防护技术

周吉学¹, 杨院生², 曾荣昌³

1. 齐鲁工业大学 (山东省科学院) 新材料研究所
2. 中国科学院金属研究所
3. 山东科技大学

目前镁合金表面防护处理工艺主要是针对单一材质的镁合金材料或者构件进行设计和开发的, 表面处理技术主要有阳极氧化、化学转化膜、电镀及喷漆等。但是在许多镁合金材料应用领域, 镁合金材料是以不同材质的材料经过焊接等连接形成的镁合金复合构件形式出现的, 针对不同材质的合金材料, 需要不同的表面防护处理工艺。针对镁合金、铝合金同种与异种金属连接构件进行了微弧氧化表面处理工艺研究, 研发了镁合金微弧氧化复合功能膜层制备技术, 并解释了膜层的形成机理。

C03-60

利用弧形挤压工艺改善镁合金板材力学性能

徐军, 蒋斌

重庆大学

在 400°C 下, 用弧形挤压模具 (包括对称和非对称弧形挤压模具) 制备 AZ31 镁合金板材, 并将其和传统挤压模具制备的 AZ31 板材进行对比。利用 EBSD 观察挤压过程中微观组织和晶面取向变化, 在万能拉伸试验机上测试挤压镁合金板材的力学性能。弧形挤压后的检测结果表明, 挤压态 AZ31 镁合金晶粒显著细化, 晶粒尺寸分布较均匀, 织构强度降低且沿横向方向引入了新的织构成分。主要原因是由于在弧形挤压过程中引入了沿横向方向新的流速。非对称弧形挤压板材织构强度达到最低值, 其原因是在挤压过程中引入了非对称剪切应力。因此, 非对称弧形挤压板材呈现低的屈服强度, 高的延伸率, 板材的成型性能提高

C03-61

AZ31 镁合金表面磁控溅射 Mg-Cu-Y 薄膜腐蚀性能研究

李庆晴¹, 罗岚², 京玉海¹, 刘勇¹, 吴戈³, 吕坚^{3,4}

1. 南昌大学前湖校区机电工程学院, 江西省轻质高强结构材料重点实验室
2. 南昌大学材料科学与工程学院
3. 香港城市大学机械与生物医学工程系
4. 香港城市大学深圳研究院先进结构材料中心

采用磁控溅射技术对商业态 AZ31 镁合金与经表面机械研磨处理后的 AZ31 镁合金材料进行沉积 Mg-Cu-Y 镀膜处理。通过光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射仪及 CHI 650D 电化学工作站等分析测试手段, 系统研究了原始 AZ31、溅射镀膜后的 AZ31 与溅射镀膜 SMATed AZ31 材料在快速、破坏性强的腐蚀情况下的抗腐蚀能力。结果表明, 原始 AZ31、

溅射镀膜 AZ31 与溅射镀膜 SMATed AZ31 的极化电位依次降低, 极化电流密度按此顺序依次升高。腐蚀均匀性按上述顺序依次降低, 腐蚀后表面均存在腐蚀裂纹, 原始 AZ31 腐蚀裂纹最小, 溅射镀膜 SMATed AZ31 腐蚀裂纹最大。综上可知, 梯度纳米结构和膜的存在降低了 AZ31 镁合金的抗腐蚀能力。

C03-62

时效强化镁合金体系的研究进展

侯彩红¹, 齐福刚¹, 欧阳晓平¹, 张丁非^{2,3}

1.湘潭大学 材料科学与工程学院

2.重庆大学 材料科学与工程学院

3.国家镁合金材料工程技术研究中心

时效强化是改善和提高镁合金力学性能的最有效途径之一。本文介绍了时效强化提高合金强度的途径, 总结了 Mg-Zn 系、Mg-Al 系、Mg-Ca 系、Mg-Sn 系、Mg-Nd 系、Mg-Gd 系和 Mg-Y 系等几种时效合金体系的研究进展, 着重分析了各合金体系的时效析出动力学、时效序列及析出相、微合金化及析出相强化机理等。最后指出时效强化模型构建、析出强化相调控、低成本高性能时效强化合金开发等是时效强化镁合金的研究重点。

C03-63

酸比: 一种用于镁合金化学转化膜溶液设计的新概念

张涛, 张春艳, 于宝兴, 王福会

东北大学

镁合金化学转化膜的制备涉及到金属/溶液界面一系列复杂的化学、电化学反应。从金属/溶液界面溶液一侧来说, 转化膜溶液设计一直都是该领域最为关键话题, 长久以来转化膜配方设计采用试错法、缺乏相关的理论指导的问题。

Birbilis 等人从热力学计算的角度建立了金属离子-pH 图, 该图本质上是一种可以判断在不同金属离子浓度和 pH 值条件下, 能否发生沉积成膜的相图, 其使用方法与 E-pH 图基本相似。依据该相图, 可以确定合适的金属离子浓度和 pH 值, 从而实现磷酸盐化学转化膜的工艺设计。但是, Birbilis 的工作仅考虑了离子共沉积, 而忽略了酸根电离的问题。目前人们普遍通过调节 pH 值来控制酸根电离, 然而对于 $\text{H}_3\text{PO}_4\text{-H}_2\text{PO}_4^-\text{-HPO}_4^{2-}$ 的缓冲体系来说, 绝大部分的 H_3PO_4 、 H_2PO_4^- 和 HPO_4^{2-} 都没有发生电离产生 H^+ 离子。按照现有的工艺设计思路, 在 pH 值相同的情况下, H_3PO_4 、 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 各自的浓度可能大相径庭, 这导致了成膜动力学完全不同, 其耐蚀性能也就出现了很大的差异。

由此可见, 基于动力学和基于热力学的工艺设计同等重要。我们提出了用“总酸度/pH 值”的概念代替 pH 值来进行磷酸盐转化膜工艺设计的思想。把 Mg^{2+} 、 Zn^{2+} 等金属离子、 H_3PO_4 、 H_2PO_4^- 、 HPO_4^{2-} 等弱酸及其酸式酸根所消耗 OH^- 的量定义为总酸度, 总酸度/pH 值=金属离子/pH 值+ $\text{H}_3\text{PO}_4\text{-H}_2\text{PO}_4^-\text{-HPO}_4^{2-}$ /pH 值。其中“金属离子/pH 值”从热力学的角度考虑离子共沉积, “ $\text{H}_3\text{PO}_4\text{-H}_2\text{PO}_4^-\text{-HPO}_4^{2-}$ /pH 值”从动力学的角度考虑酸根电离。根据“总酸度/pH 值”概念进行磷酸盐转化膜工艺设计时, 可以发现即使在一个非常狭小的 pH 值范围内 (3-3.3), 总酸度都会发生很大的变化 (47.5-90)。随着总酸度/pH 值的升高, 磷酸盐转化膜的耐蚀性能可以提高 4 倍。基于总酸度/pH 值概念所设计工艺制备的转化膜其盐雾寿命显著提高, 200 小时盐雾试验腐蚀面积 < 1%。

C03-64

一种新型 Mg-Al-Zn-Ca 高强镁合金的显微组织与力学性能

王方, 肖文龙, 马朝利

北京航空航天大学

近年来, 汽车轻量化和低成本因素促使具备优异力学性能和挤压加工性能的含 Ca 镁合金广受关注。本文对一种新型 Mg-Al-Zn-Ca 镁合金在中低温 (300°C) 进行挤压变形, 获得了优异的综合力学性能。结果表明, 凝固过程中产生的第二相在变形过程中能够促进动态再结晶软化机制, 并同时能够抑制动态再结晶晶粒的长大。因此, 变形组织形成了再结晶细晶区和未再结晶区构成的双态组织, 其中一部分再结晶晶粒被细化至纳米级。这种双态结构的微观组织可获得良好的强塑性匹配, 并具备较高的拉压对称性。这种新型 Mg-Al-Zn-Ca 四元体系镁合金的研究, 对进一步开发高强韧低成本镁合金具有一定的指导意义。

C03-65

热处理对挤压 ZA81M 镁合金的循环变形行为的影响

罗天骄¹, 王聪¹, 周吉学², 刘运腾², 杨院生^{1,2}

1.中国科学院金属研究所

2.山东省科学院新材料研究所, 山东省轻质高强金属材料重点实验室

本文对不同热处理状态的挤压 ZA81M 镁合金的循环变形行为进行了研究。采用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)对合金微观组织和断口形貌进行了分析, 并采用 XRD 衍射分析技术对合金中的析出相进行了确定。结果表明: 经 T6 处理 ZA81M 镁合金中析出了大量纳米析出相, 屈服强度显著提高。在循环变形过程中, T6 试样的应力幅总是高于 T4 试样, 并且在应变幅 0.4%条件下, T6 处理试样比 T4 处理试样具有更高的总应变能量密度和更长的疲劳寿命, 但在应变幅 0.8%条件下, 其总应变能量密度却比 T4 试样低, 其疲劳寿命比 T4 试样更短。T4 和 T6 试样的疲劳裂纹均起源于分布在试样表面的二次相或者晶界, 并沿与载荷垂直的方向扩展。在循环加载过程中纳米析出相能够有效钉扎位错, 阻碍位错运动, 提高合金性能。

C03-66

Mg-Zn-Er 合金热轧板材的显微组织及其性能研究

刘轲, 刘金学, 杜文博, 李淑波, 王朝辉

北京工业大学

本文利用热轧技术制备了 Mg-xZn-0.5Er (x=0.5、2.0、3.0、4.0, wt.%) 合金板材, 并利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、电子背散射衍射仪(EBSD)和透射电子显微镜(TEM)研究合金板材的显微组织, 并对板材进行了室温条件下的成形试验。研究结果表明, Er 能够延迟合金中动态再结晶的发生, 使得局部严重硬化, 产生剪切带, 剪切带与轧制方向具有一定程度的角度偏离, 造成了 R 型双峰基面织构的形成。Mg-Zn-Er 合金中的第二相种类则随 Zn/Er 质量比值的增大而发生变化, 当 Zn/Er ≤ 4 时, 合金中的第二相为 W 相; 当 6 ≤ Zn/Er ≤ 8 时, 合金中的初生第二相为准晶相包裹下的 W 相块体, 同时有大量的二次弥散析出的纳米准晶相颗粒; 当 Zn/Er ≥ 8 时, 合金中的初生第二相为准晶相, 形变析出的纳米相也均为准晶相。力学性能测试结果表明, 随着 Zn 含量的提高, 合金板材的屈服强度、抗拉强度都呈上升趋势, 当 Zn 含量为 4 wt.%时, 平均抗拉强度、平均屈服强度和平均延伸率较高, 其值分别为 303 MPa、274 MPa 和 5.5%。然而, 合金板材室温杯突值(IE)则随 Zn 含量的增加而逐渐降低, Mg-0.5Zn-0.5Er、Mg-2.0Zn-0.5Er、Mg-3.0Zn-0.5Er、Mg-4.0Zn-0.5Er 合金板材的 IE 值分别为 5.67、4.73、2.92、2.20, 基面织构强度的增强和粗大初生相是影响 Mg-Zn-Er 合金板材 IE 值降低主要因素。

C03-67

累积叠轧 AZ31 镁合金的微观组织演变

黄良顺^{1,2}, 裴小兵^{1,2}, 罗岚³, 饶锡新^{1,2}, 京玉海^{1,2}, 刘勇^{1,2}

1.南昌大学机电工程学院

2.江西省轻质高强结构材料重点实验室

3.南昌大学材料科学与工程学院

应用 ABAQUS 软件对 AZ31 镁合金薄板进行累积叠轧变形过程进行了有限元模拟, 采用金相显微镜、万能拉伸试验机 and 显微硬度仪等分析手段, 系统地研究了累积叠轧变形过程中不同压下量对镁合金板材的组织及显微硬度的影响。结果表明: 随着压下量的增加, 材料的组织均匀性和晶粒细化程度更高, 细化的晶粒尺寸为 1~2.6 μm 左右。晶粒细化源于大剪切变形促使动态再结晶程度增加; 同时随着压下量的增加, 镁合金板材之间的界面焊合情况得到了改善。

C03-68

Mg-SiO₂ 纳米复合材料界面结构与腐蚀行为关联研究

付小玲

广东工业大学

通过粉末冶金和热挤压的方式制作了不同体积百分比的镁基纳米复合材料 Mg 和 Mg-0.5SiO₂, Mg-1.0SiO₂。通过 SEM, EDX 和 HRTEM 分析了 Mg-SiO₂ 纳米复合材料的微观结构特征。在基体 Mg 和纳米复合材料 SiO₂ 之间的界面处发现了大量失配位错。同时研究测试了 Mg-SiO₂ 纳米复合材料在 3.5 wt % NaCl 溶液中在 25°C 和 35°C 的腐蚀行为。随着 SiO₂ 体积百分比的增加, 腐蚀速率增加。腐蚀主要发生在晶界附近和 O / Si / Mg 界面附近。研究表明界面处高失配位

错与 Mg / SiO₂ 界面处的加速晶间腐蚀有关。

C03-69

Ca对Al₄C₃/Mg异质形核界面性质影响的第一性原理计算

杨淑青¹, 杜军¹, 赵宇军²

1. 华南理工大学 材料科学与工程学院
2. 华南理工大学 物理与光电学院

异质晶核/基体间界面的物理化学性质是决定异质晶核形核能力的关键因素, 而界面性质又易于受到界面偏聚元素的影响, 从而影响异质晶核的形核能力。在 Mg-Al 系合金中, 碳质孕育是受到关注较为广泛的晶粒细化技术, 其有效孕育晶核 Al₄C₃ 易于受到异质元素的影响。前期研究发现 Ca 易于朝 Al₄C₃ 颗粒表面偏聚, 从而影响晶粒细化效果, 本研究利用第一性原理方法研究了 Ca 对 Al₄C₃/Mg 界面性质的影响, 以揭示其影响机制。

Ca 的偏聚采用了吸附和掺杂两种模式来分析, 主要计算了 Al₄C₃ 表面, Ca 吸附 Al₄C₃ 表面和掺杂 Al₄C₃/Mg 界面。因 Al₄C₃ 结构复杂, 存在多种表面构型其中 Al 终端 28 层构型表面能最低, 且满足化学计量比, 选择该构型作为 Al₄C₃ 表面构型。Ca 吸附选择 0.25ML 和 0.5ML 吸附浓度, hcp、fcc 和 on-top 三种吸附位构型。计算结果表明, 相同吸附浓度下, hcp 位吸附能最大, Ca 原子与 Al₄C₃ 表层 Al 原子和第二层 C 原子都成键。Ca 掺杂 Al₄C₃/Mg 界面, 计算单个 Ca 替换界面 Al1 至第五层 Al5 原子, 替换界面 Mg1 至表层 Mg7 原子。掺杂缺陷形成能结果表明, Ca 原子掺杂界面 Al2 层构型更稳定, 掺杂界面 Mg2 和表层 Mg7 构型更稳定, 即 Ca 倾向于吸附在 Al₄C₃/Mg 界面及 Mg 颗粒表面。对结构进行电荷密度及电荷差分密度分析, 分析吸附构型及界面掺杂构型电荷分布; 对结构进行 DOS 及 PDOS 分析等, 分析吸附构型及界面掺杂构型原子轨道情况。

计算结果对于分析Ca对Al₄C₃异质形核细化的影响提供了理论依据, 对于分析合金元素对细化效果的影响具有一定的参考意义。

C03-70

含亚稳相 Mg-Gd 合金的热力学描述

司怀家, 张利军
中南大学

稀土镁合金因其优异的室温和高温力学性能、耐热性以及耐蚀性能而受到广泛的关注。作为重要的一类稀土镁合金, Mg-Gd 合金中 Gd 在(Mg)中的固溶度大于一般的稀土元素, 能够更好地强化镁基体。此外, Mg-Gd 合金时效过程的析出序列为 S.S.S.(CPH)→β'(DO19)→β'(BCO)→β(FCC)。在时效处理过程中, 析出相 β'能够很明显地强化 Mg-Gd 合金。因此, 获得含亚稳相 Mg-Gd 合金精准的相图热力学描述是进行合金设计的关键。

本文首先详尽评估了文献中报道的相图和热力学实验数据, 并基于 CALPHAD 方法, 获得了一套自洽的仅含稳定相的 Mg-Gd 体系热力学描述。与前人获得的热力学描述相比, 本工作所获得的 Mg-Gd 体系热力学描述能重现更多的实验相图和热力学信息。随后, 基于文献报道的第一性原理计算结果, 结合稳定相的热力学参数, 获得了亚稳相 β'(DO19)和 β'(BCO)随温度变化的能量。通过结合稳定相的热力学参数, 构筑了含亚稳相 Mg-Gd 合金的热力学描述, 进而获得了含亚稳相 Mg-Gd 体系的相平衡信息, 可用于合金成分及热处理机制的设计。

C03-71

井下工具用可溶镁合金的开发

杨军, 张文, 谢涛, 苏敏文
中国石油川庆钻探长庆井下技术作业公司

油气田开发中, 对低渗透油气藏进行压裂改造是增加单井产量的有效技术手段, 相关工具的开发也成为研究热点。多层分段压裂中, 层段间需使用压裂球或桥塞分隔后进行施工, 待所有层段施工完成后, 需将此类分隔性工具从井筒返排出或下钻具钻磨掉, 以便打通井道实现油、气的开采。现有此类工具大多由合金钢制造而成, 由于密度大, 存在钻铣困难、耗时长、不易返排等缺点。利用可溶镁合金制造压裂施工用分隔工具, 工具在完成自身使命后可在井下环境中腐蚀失效, 从而省去钻磨、回收工序, 降低工程风险, 提高施工效率, 同时可避免钻屑及循环液对储层造成伤害。基于以上背景, 本文通过熔炼、热挤压制备了 3 种力学强度、溶解速率各异可溶镁合金材料, 并对其显微组织结构、力学性能、溶解性能及工件的使用性能进行了系统研究。结果表明: 可溶合金密度约 1.8g/cm³, 合金拉伸强度介于 145-350MPa, 屈服强度介于 118-300MPa, 布氏硬度介于 80-95 之间。合金可在含矿化度的水溶液中自行溶解且温度越高溶解速率越快。利用不同可

溶合金加工的压裂球、带压下钻堵塞头及可溶桥塞工具现场使用效果良好。可溶工具的推广应用，将极大地提高油气田开发过程中压裂施工效率，降低施工风险，成为油气田开发领域中的一大利器。

C03-72

第二相 Mg_2Ca 对微弧氧化膜的影响

丁自友，曾荣昌

山东科技大学

本文着重讨论 Mg_2Ca 相对于微弧氧化成膜和腐蚀的影响。利用光学显微镜、扫描电镜、电化学测试、析氢测试和 pH 值检测等方法对基体和微弧氧化膜层的组织、形貌和腐蚀性能进行了研究。

研究表明，在微弧氧化初期， Mg_2Ca 相对膜层的影响较大，不同时间点的膜层形貌存在差异。前人研究表明， Mg_2Ca 相优先于 $\alpha-Mg$ 相腐蚀，这就意味着基体容易出现点蚀坑，实验也证明了这一点。提出了微弧氧化初期在 Mg_2Ca 相影响下的成膜机理，表明膜层优先在 $\alpha-Mg$ 相处（贫 Ca 区）生成，并且膜层生长速率也明显高于晶界和 Mg_2Ca 相处（富钙区），这可能是由于 Ca 不是阀型金属的缘故。微弧氧化膜层多微孔，腐蚀介质容易通过这些孔接触基体，同时， MgO 也不稳定，产生大量的腐蚀产物。由于腐蚀产物的体积膨胀，在膜层和基体截面产生较大的应力集中，加速膜层的破裂和脱落。

墙展

C03-P01

Influence of Al Additions on Microstructure of Mg-6 wt.%Y Alloy and Preparation of the Mg-10 wt.%Al₂Y Alloy

姜中涛¹，蒋斌^{2,3}，戴甲洪⁴，潘复生^{2,3}

- 1.重庆文理学院
- 2.重庆大学
- 3.重庆科学技术研究院
- 4.长江师范学院

In this work, the influence of Al additions on microstructure of as-cast Mg-6Y alloy has been investigated, meanwhile Mg-10Al₂Y master alloy was synthesized. The results show addition of Al into Mg-6Y cast alloy dramatically refine the grain size, and the finest grains of 57 μm were obtained at 1 wt.% Al addition level. The active nucleation Al₂Y particles were reproducibly observed at the centres of fine grains. But continue to add Al, the grain size is obviously coarsening. Two types of Al₂Y phase were discovered in the Mg-6Y-xAl (x=1~4) alloys. One is the granular pre-precipitated phase and the other is irregular eutectic phase, however act as a heterogeneous nucleation sites is the pre-precipitated Al₂Y. The YA65 alloy can be regarded as a grain refiner of Mg with pre-precipitated Al₂Y particles and application prospect has high expected.

C03-P02

轧制工艺对一种 Mg-Zn-Y-Zr 合金板材的组织、织构和室温力学性能的影响

施斌卿¹，程永奇¹，闫宏²，陈荣石²，柯伟²

- 1.广东工业大学材料与能源学院
- 2.中国科学院金属所

本研究通过热力学计算设计了一种 Mg-Zn-Y-Zr 板材合金，对比研究了不同轧制工艺（常规压下轧制和大压下轧制）对该合金板材的显微组织、织构、室温拉伸性能、各向异性及应变硬化行为的影响。研究结果表明大压下轧制有利于剪切带的形成并显著抑制再结晶，经再结晶退火后，两种轧制工艺下均得到了完全再结晶组织（ $\sim 15\mu m$ ），同时晶内有大量 50-150nm 纳米尺度内颗粒状 w 相和长条状 Zn_2Zr 相形成。退火后常规压下轧制工艺制备的镁合金板材显示了典型的横向偏转织构，基轴与法向偏转 ~ 30 度；而大压下轧制制备的板材的基轴同时向轧向和横向偏转，与法向偏转角 ~ 50 度。此外，本研究进一步研究和讨论了这种织构对板材沿不同方向的拉伸性能、各向异性指数、应变硬化行为和室温延展成形性能的影响规律。

C03-P03

Mg-Gd-Mn 镁合金的组织、织构与力学行为

赵天硕¹, 潘复生^{1,2}, 胡耀波^{1,2}

1.重庆大学材料科学与工程学院

2.国家镁合金材料工程技术研究中心

使用光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射分析、力学性能测试等技术手段研究了 Mn 含量对 Mg-2Gd-xMn (x=0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, wt.%)三元合金微观组织和力学性能的影响, 结合结构分析, 探讨合金的热变形行为。研究表明, 添加 Mn 元素后, 铸态合金的晶粒尺寸变化不大, 但合金热挤压变形后晶粒得到显著细化, 这主要是由于挤压过程中析出细小弥散分布的 α -Mn 颗粒, 可以抑制再结晶晶粒晶界的迁移; 合金中加入的 Mn 含量越多, 析出的第二相颗粒明显增加, 挤压态合金的屈服强度和抗拉强度也相应提高; Mn 元素能够促进织构强度增加, 取向随机的织构在变形过程中逐渐演变为基面织构。

C03-P04

析出相体积分数对轧制-退火态 AZ80 合金组织与性能的影响

贺兵, 胡耀波, 姚青山

重庆大学材料科学与工程学院

本文研究了析出相体积分数对轧制-退火态 AZ80 合金组织与性能的影响。AZ80 合金轧制前在 175°C 分别时效 0 min, 60 min, 120 min, 180 min, 240 min, 得到对应 $Mg_{17}Al_{12}$ 的体积分数分别为 1.5%, 5%, 8%, 14%, 20%。研究表明, 随着 $Mg_{17}Al_{12}$ 相体积分数的增加, 轧制-退火态 AZ80 合金晶粒逐渐细化, 大角度晶界增多, 晶粒取向相对分散, (0001) 基面织构强度逐渐降低, 强度与塑性逐步提高, 当 $Mg_{17}Al_{12}$ 的体积分数为 20% 时, 其屈服强度与抗拉强度分别为 315 MPa 和 377 MPa, 延伸率为 16.7%。

C03-P05

Ca 元素对 ZT33-Sc 镁合金组织性能的影响

马春华^{1,2}, 卢志文¹, 张丁非², 潘复生², 仲志国¹

1.南阳师范学院

2.重庆大学

本实验研究了 Ca 元素的微合金化对挤压态 Mg-Zn-Sn-Sc 镁合金的显微组织及力学性能的影响作用, 探讨合金的变形机制及强化机理。在实验中设计 6 种合金成分, 研究发现随着 Ca 元素的添加, 其无 Ca 添加时的抗拉强度为 264Mpa, 延伸率为 8%, 力学性能出现逐渐增加的趋势, 当 Ca 元素的含量达到 0.3wt.% 时, 其抗拉强度增加到 338Mpa, 延伸率达到 14%, 当 Ca 元素的含量达到 1.5wt.% 时, 其抗拉强度达到最佳 350Mpa, 而延伸率为 5% 出现下降的趋势, 因此 Ca 元素的添加对挤压态 Mg-Zn-Sn-Sc 镁合金的性能有着显著的强化作用, 且实验证实随着 Ca 元素的添加有 $Ca_2Mg_6Zn_3$ 三元稀土相生成。

C03-P06

热处理 Mg-7Al-1Ca-0.5Sn 合金的强韧性与腐蚀性能

王峰

沈阳工业大学

利用 OM、SEM、EDS、XRD、拉伸试验、失重实验与电化学实验研究了热处理工艺对压铸 Mg-7Al-1Ca-0.5Sn 合金组织, 力学性能和腐蚀性能的影响。结果表明: 压铸态 Mg-7Al-1Ca-0.5Sn 合金组织由 α -Mg, $Mg_{17}Al_{12}$ 和 CaMgSn 相所组成, 固溶处理 (T4: 400°C×15h) 可使 $Mg_{17}Al_{12}$ 相溶入基体, 并改善 CaMgSn 相的形貌。固溶+时效处理 (T6: 400°C×15h+200°C×15h) 使得 $Mg_{17}Al_{12}$ 相在基体上弥散析出, 且晶粒尺寸变化较小, 从而使合金获得最佳的力学性能: 抗拉强度 306.69MPa, 屈服强度 231.23MPa 及伸长率 14.98%, 其比铸态合金分别提高了 18.7%、25.0% 和 46.7%。热处理能够降低压铸 Mg-7Al-1Ca-0.5Sn 合金的耐蚀性。铸态、T4 态和 T6 态合金的腐蚀电流分别为 0.0485mA/cm²、0.0962mA/cm² 和 0.0705mA/cm²。在相同腐蚀时间下, 固溶态合金腐蚀最为严重, 固溶时效态合金的次之, 而铸态合金腐蚀最轻。

C03-P07

Sn 的添加对 Mg-6Zn-3Al 合金组织和性能的影响

管茂生, 胡耀波

重庆大学

本文通过 X 射线荧光光谱仪(XRF)、X 射线衍射仪(XRD)、光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、能量色散 X 射线谱仪(EDS)等手段研究了 Sn 元素含量的变化对于 Mg-6Zn-3Al-0.4Mn (wt.%)镁合金组织和性能的影响。研究了 Mg-6Zn-3Al-xSn-0.4Mn (x=0,2,4wt.%)合金的显微组织和力学性能。结果表明, Mg-6Zn-3Al-0.4Mn 铸态合金呈现明显的枝晶结构, 主要由 α -Mg, MgAlZn 和 Al-Mn 相组成。Sn 的添加生成新的第二相 Mg_2Sn , 随着 Sn 含量的增加, Mg_2Sn 的数量逐渐增多, 尺寸逐渐增大。合金在热挤压过程中发生了动态再结晶, 枝晶结构转变为等轴晶结构, 第二相破碎均匀分布在晶界和晶内。Sn 的添加可以有效增加合金的力学性能, 当 Sn 含量达到 4wt.%时, 合金拥有最好的力学性能, 其屈服强度、抗拉强度和延伸率分别达到 244MPa、328MPa 和 21.2%。

C03-P08

Al 合金化调控 Mg-Sn-Ca 合金微观组织与力学性能的基础研究

戴永强, 潘虎成

东北大学

本文系统的研究了添加不同含量的 Al 元素 (2wt.%, 4wt.%, 9wt.%)对铸态、均匀化态和挤压态 Mg-2.5Sn-2Ca (wt.%) 合金的微观组织和力学性能的影响。研究表明, 合金的铸态组织表现为粗大的枝晶组织, 随着 Al 含量的增加, 其枝晶逐步细化, 均匀化处理后, 铸态合金中第二相部分固溶扩散到基体内部, 使合金成分更加均匀, 挤压态中以上第二相发生破碎, 沿挤压方向呈流线分布。挤压后, 2wt.%Al、4wt.%Al、9wt.%Al 合金的再结晶晶粒分别细化到 $\sim 1.5 \mu m$, $\sim 1.5 \mu m$, $\sim 1 \mu m$, 同时存在着一定比例的未再结晶晶粒, 合金中存在较强的再结晶结构, 和一定比例的未再结晶结构。在 2wt.%Al 合金的未再结晶区域内发现高密度纳米级盘状 Al_2Ca 相, 而在另外两种合金中均未发现这种重要的动态析出相; 此外, 在 9wt.%Al 合金中发现了纳米级的 $Mg_{17}Al_{12}$ 相。挤压态合金的强度表现为随着 Al 元素含量的增加, 先降低后升高, 其中挤压态 2wt.%Al 合金的综合力学性能最佳, 抗拉强度达到 395MPa, 延伸率为 5.9%, 而 4wt.%Al 与 9wt.%Al 合金的抗拉强度分别为 342 MPa 和 355 Mpa, 延伸率分别为 12.3%和 12.0%。

C03-P09

新型 MgSnCaAl 变形镁合金的微观组织与力学性能研究

杨吉顺, 潘虎成

东北大学

本文系统研究了添加不同含量 Al 元素(1 wt.%, 5 wt.%)及微量 Mn 元素对铸态、均匀化态、及挤压态 Mg-2.5Sn-3.5Ca 合金微观组织及力学性能的影响。其中 1Al 的 TXA340 和 5Al 的 TXA345 铸态组织为典型枝晶组织, 添加 0.6Mn 后的 TXAM3450 合金的枝晶组织不明显, 且具有等轴化倾向, 随着铝含量的增加, 晶粒明显细化。铸态组织中主要存在着 MgSnCa 和 Mg_2Ca 第二相, 随着铝含量增加, TXA340 中的 Mg_2Ca 逐渐转变为 TXA345 和 TXAM3450 合金中的 Al_2Ca 相。均匀化后, 部分粗大第二相固溶扩散到基体内部, 使合金成分均匀, TXA340 和 TXA345 合金第二相组成变化不大, 主要为 MgSnCa、 Mg_2Ca 和 Al_2Ca 相, 而 TXAM3450 合金中 Al_2Ca 相转变为 $(Mg, Al)_2Ca$ 相。挤压态合金中, 第二相破碎细化沿挤压方向成流线分布, TXAM3450 合金中 $(Mg, Al)_2Ca$ 成带状分布。合金挤压过程中发生动态再结晶, 晶粒明显细化, 三中合金晶粒尺寸分别为 $1.8 \mu m$, $1.5 \mu m$, $1.2 \mu m$ 。另外, 三种合金中都发现大量 Al_2Ca 相沿基面析出, 随着铝含量增加, 其数量急剧增加且平均间距减小。添加 0.6Mn 后合金强度最高, 抗拉强度达到 374MPa, 延伸率 $\sim 3.4\%$, 其次为 TXA345 合金, 抗拉强度为 354MPa, 同时具有较好延伸率 $\sim 9.9\%$, TXA341 合金抗拉强度 293MPa, 延伸率 $\sim 4.3\%$ 。

C03-P10

Mg-Zn-Er 合金的热裂行为研究

刘耀鸿, 杜文博, 王朝辉, 李淑波, 刘轲, 杜宪

北京工业大学材料科学与工程学院

在模具温度 300°C、浇注温度 730°C 的条件下, 通过凝固曲线采集测试、OM、XRD、SEM 等手段研究了 Mg-5Zn-xEr(x=0.83, 1.25, 2.5, 5, 质量分数, %)合金的热裂性能。研究发现, 随着 Er 含量的增加, 合金的热裂倾向性呈先增加后降低的趋势。当 Er 含量增加到 2.5%时, 合金的热裂倾向性最为严重; Mg-5Zn-5Er 的热裂倾向性最小, 这是因为加入适量的稀土元素 Er 能改变合金的物相组成, 使得合金在凝固过程中发生了 $L \rightarrow \alpha-Mg+W(bcc, \text{面心立方结构})$ 的转变, 缩小了凝固温度区间范围, 晶界附近出现更多的共晶组织, 这有利于凝固后期枝晶间裂纹的补缩, 从而降低了合金的热裂倾向性。

C03-P11

挤压和时效处理对 Mg-10Gd-1Er-1Zn-Zr 合金组织及性能的影响

贾林玥, 杜文博, 王朝辉, 李淑波, 刘轲, 杜宪

北京工业大学

在本研究中详细描述了通过反向热挤压和等温时效处理制备的高强度 Mg-10Gd-1Er-1Zn-0.6Zr 合金。挤压态 Mg-10Gd-1Er-1Zn-Zr 合金表现出双峰组织, 包括细小的动态再结晶 (DRXed) 晶粒和强基面织构的粗大变形晶粒。在挤压前的加热过程及挤压过程中, 溶质原子偏聚形成大量的堆垛层错 (SFs)。结果表明, 最适宜的时效工艺为 200 °C / 40 h; 峰值时效合金在室温下的屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 411 MPa, 461 MPa 和 8.7%。其双峰组织和 β' 相及 SFs 在基体中的大量弥散析出是峰值时效合金的主要强化机制。

C03-P12

复合铸造法制备 Mg / Cu 双金属复合材料及其界面组织和力学行为研究

徐德兴, 赵康宁, 李宏祥, 张济山

北京科技大学

本文采用复合铸造的方法制造了一种 Mg/Cu 复合材料, 其界面组织演变、相组成和力学性能被研究。界面达到良好的冶金结合, 并且形成两种亚层组织: 靠近铜一侧的亚层组织 I 主要由 Mg_2Cu 相组成, 其上分布一些 $MgCu_2$ 枝状相; 靠近镁一侧的亚层组织 II 主要由 $Mg_2Cu+(Mg)$ 条状纳米共晶网络构成, 还有少量游离的 Mg_2Cu 相。由于铜原子的扩散速率比镁原子大, 所以亚层 I 比亚层 II 薄, 分别为 30 μm 和 140 μm 。界面剪切强度为 13MPa 由于形成了 Mg_2Cu 脆性相。这篇文章对于理解 Mg/Cu 界面结合机制提供了一个新的视角。

C03-P13

AZ31 镁合金薄板经不同累积应变的连续弯曲变形后的显微组织与成形性能的变化

韩廷状¹, 黄光胜², 王冠刚², 蒋斌², 汤爱涛², 潘复生²

1.太原科技大学

2.重庆大学

本文在室温下研究了不同累积应变的连续弯曲变形对 AZ31 镁合金板材显微组织与成形性能的影响。结果表明: 经不同累积应变的连续弯曲变形后镁合金板材的显微组织中没有发现孪晶, 这可能是由于细晶组织抑制了孪生的发生; 退火后, 板材表层的晶粒异常长大, 粗晶层的厚度随着累积应变的增加而增加, 并且使镁合金板材的织构朝 RD 方向偏转, 偏转角度随累积应变的增加而增大; 连续弯曲变形及退火处理使镁合金板材呈现出较小的 r 值与较大的 n 值, 杯突值提高到 4.9mm, 与原始板材相比提高了~113%, 这主要归因于镁合金基面织构的改善。

C03-P14

考虑 LPSO 相影响的 Mg-13Gd-4Y-2Zn-0.6Zr 动态再结晶模型

张宏轩

沈阳中科院金属研究所

采用热模拟压缩试验研究 Mg-13Gd-4Y-2Zn-0.6Zr 合金在变形温度为 300~500 °C、应变速率为 0.01~10.0 s⁻¹、变形程度为 55%条件下的变形行为。采用金相显微镜对其热压缩变形后的显微组织进行观察, 结果表明: 300°C 主要由 LPSO 相曲折协调变形, 400°C~450°C 主要由 LPSO 相曲折和再结晶共同协调变形, 500°C 主要由再结晶协调变形。考虑到试样整体变形非均匀性和 LPSO 相对再结晶过程的影响, 单独对 450°C、0.01 s⁻¹ 和 1 s⁻¹、梯度应变变量 (0.2、0.4、0.6、0.8、1.2) 条件下进行热模拟压缩试验。通过 ABAQUS 模拟软件计算变形试样芯部真实应变, 并结合对应的再结晶体积分, 采用修正的 Avrami 方程拟合得到固溶态 Mg-13Gd-4Y-2Zn-0.6Zr 合金的动态再结晶体积分模型, 并根据合金的金相定量试验结果建立 Mg-13Gd-4Y-2Zn-0.6Zr 合金的动态再结晶晶粒尺寸模型。为科学设计和有效控制该合金的锻造工艺提供理论依据。

C03-P15

感应熔炼与挤压制备的双相 Mg-Li 合金的微观结构与力学性能

董含武

重庆市科学技术研究院

Mg-Li 双相合金同时具有密排六方 (HCP) 结构的 α -Mg 相和体心立方 (BCC) 结构的 β -Li 相, 兼具良好的塑性 (甚至超塑性) 与较好的强度。已有的公开研究中, Mg-Li 合金双相合金铸锭的尺寸一般较小, 对较大规模生产制备的参考价值有限。

本研究应用真空感应熔炼技术、在 Ar 气氛中制备了尺寸约为 $\Phi 90\text{mm} \times 260\text{mm}$ 的 Mg-7.20Li-0.89Y 双相合金铸锭, 并在 300°C 下挤压成厚度分别为 8mm 和 2mm 的板材 (挤压比分别为 13 和 33), 然后对合金的微观结构与力学性能进行了研究。

结果表明: 相比金属模铸造的合金, 真空感应铸造的 Mg-7.20Li-0.89Y 合金, 由于铸锭尺寸较大, 冷却速度较小, 导致 α -Mg 相的比例和颗粒尺寸都较大。挤压之后, 合金的 α -Mg 相颗粒变得较为扁平, 并在挤压方向明显变长; 强度最大增加了 59%, 塑性提高为铸态合金的 2-4 倍。较小的挤压比有利于合金伸长率的提高, 且各向异性较小; 挤压比较大的合金, 屈服强度更高。在挤压比 13 合金 45° 方向上, 横截面内的 α -Mg 相颗粒间距多为 2-6 μm (典型值 4 μm), 断裂伸长率最大, 达 64%; 挤压比为 33 合金中的 α -Mg 相颗粒, 在挤压方向上形成明显的纤维状结构, 并参与合金变形与断裂, 提高了该方向上的强度, 但塑性降低。

C03-P16

AM 系镁合金高压压铸件静动态力学性能的研究

张超^{1,2}, 胡耀波^{1,2}

1. 重庆大学

2. 国家镁合金材料工程技术研究中心

本文采用 OM、SEM、XRD 与 EDS 等测试与表征技术, 对 AM50+1Ce 和 AM60 镁合金高压压铸件的微观组织进行观察、显微维氏硬度测试、静态拉伸/压缩力学性能及动态拉伸力学性能测试及断口分析。结果表明, AM50+1Ce 的组织、显微维氏硬度分布更均匀。AM50+1Ce 静态拉伸/压缩的屈服强度、抗拉强度和断裂总延伸率分别为 147 MPa (134 MPa)、262 MPa (356 MPa)、21.9% (22.5%); AM60 静态拉伸/压缩的屈服强度、抗拉强度及断裂总延伸率分别为 150 MPa (122 MPa)、254 MPa (344 MPa)、14.5% (23.6%)。两者拉压不对称性 CYS/TYS 分别为 0.91 和 0.81, AM60 镁合金应变率效应、应变率硬化更明显。两者静态拉伸/压缩的断裂裂纹从合金内部的缩孔缩松及气孔等铸造缺陷处形核、随后长大并向合金表面扩展, 拉伸断口形貌呈韧脆混合断裂的特征。动态拉伸断口表现为多种断裂机制的混合断裂机理, 随着应变率的增大, 合金的断裂有由韧性向脆性断裂转变的趋势。

C03-P17

高钙 Mg-Al-Ca-Mn 合金的超细化加工及组织性能演变

王策, 刘欢, 黄河, 孙甲鹏, 吴玉娜, 嵇孝儒, 马爱斌

河海大学力学与材料学院

本文利用金相显微镜、扫描电子显微镜和透射电子显微镜系统研究了 Mg-4Al-4Ca-0.4Mn (wt.%) 合金经过多道次连续等通道转角挤压 (ECAP) 加工后的显微组织和力学性能演变。结果表明, 铸态合金的显微组织由胞状 α -Mg 晶粒、 α -Mg+Mg₂Ca (+ (Mg,Al)₂Ca) 共晶、以及少量 Al-Mn 化合物颗粒组成。在 300°C 较低道次 ECAP 加工下, 共晶组织破碎, Mg₂Ca 相由长条状破碎为短棒状; 随着挤压道次提高, Mg₂Ca 相进一步破碎为直径为 0.5~1 μm 的颗粒。然而, 破碎后的 Mg₂Ca 颗粒仍呈聚集状分布的原始晶界区域附近。同时, ECAP 促进了基体中纳米级别的球状和针状 Al₂Ca 沉淀相的动态析出。对合金进行的 EBSD 分析结果表明, 变形态合金呈弱织构特征; α -Mg 晶粒逐渐发生动态再结晶, 经 16 道次 ECAP 加工的合金中形成了均匀细小的完全动态再结晶组织, 晶粒尺寸约为 2 μm 。拉伸力学性能结果表明, 相较于铸态合金, ECAP 显著提升了合金的强度和塑性, 但合金强度与文献中报道的高强 Mg-Al-Ca-Mn 合金仍存在一定差距。细化后的 Mg₂Ca 相未均匀分散在基体中是合金强度提升效果不佳的主要原因, 后续将针对如何利用 ECAP 促进 Mg₂Ca 相均匀分散展开深入研究。

C03-P18

组织变化和表面冷喷涂处理对 GW63K 镁合金腐蚀行为的影响

王征远, 刘斌斌, 叶丰

北京科技大学新金属材料国家重点实验室

由于具有高比强度，镁合金成为结构轻量化技术所使用的关键材料，然而镁合金较差的耐腐蚀性能成为限制其应用的主要因素之一。GW63K 镁合金作为一种耐热高强镁合金，同样具有镁合金易受腐蚀的特征，因此，研究组织变化对其腐蚀性能的影响并通过表面处理提高其耐腐蚀性能就显得尤为重要。

本研究以铸态 (F)、固溶态 (T4)、时效态 (T6) GW63K 镁合金为研究对象，通过电化学和盐雾试验的方法研究了不同组织状态与腐蚀行为的关系，并与表面冷喷涂 6061 铝合金的样品进行对比，分析了表面冷喷涂对于腐蚀行为的影响。通过对比不同热处理状态的 GW63K 镁合金金相组织发现，经过固溶处理后，铸态组织中存在于晶界处的第二相完全固溶于基体中，同样，时效处理后的试样也没有大块的第二相出现，组织的不同可能影响镁合金的腐蚀性能。电化学试验结果表明，热处理对 GW63K 镁合金的开路电位没有显著影响，均为-1.65V 左右，但时效处理后试样的腐蚀电流密度较铸态和固溶态产生了较为明显的下降。经过 144h 连续盐雾试验，热处理后的试样耐腐蚀性能较铸态合金试样有显著提高，T4 态和 T6 态试样的腐蚀速度只有铸态组织试样的四分之一左右。在试样表面冷喷涂 6061 铝合金涂层后，开路电位升高至-1.2V，腐蚀倾向明显下降；经过冷喷涂 6061 铝合金涂层试样的极化曲线阳极分支出现了类似钝化的现象，随着电位的升高，阳极电流密度没有明显增加。研究表明，热处理可以提高该牌号镁合金的抗腐蚀能力；对合金表面冷喷涂 6061 铝合金涂层后，试样的电化学特征更接近于铝合金，这同样可以显著提高 GW63K 镁合金的耐腐蚀性能。

C03-P19

高塑性 Mg-1Al-xSn-0.3Mn(x=1,3,5)系合金的组织与性能的研究

余加，彭鹏，汤爱涛，潘复生
重庆大学材料科学与工程学院

利用传统的热挤压技术制备出了 Mg-1Al-xSn-0.3Mn(x=1,3,5)变形镁合金。用 X 射线衍射、金相显微镜、扫描电镜、透射电镜以及拉伸力学性能测试等分析了 Sn 含量对 Mg-1Al-0.3Mn 体系变形镁合金组织与性能的影响。结果表明随着 Sn 含量的增加，合金中的 Mg₂Sn 相增多。弥散的高熔点 Mg₂Sn 阻碍了再结晶晶粒的长大，细化了的挤压态合金的晶粒，有利于合金强度的提高。另一方面，随着 Sn 含量的增加，织构得到了弱化，导致合金的强度的降低。Mg-1Al-xSn-0.3Mn(x=1,3,5) 变形镁合金屈服强度均在 250MPa 左右，抗拉强度均在 290MPa 左右，延伸率在 20%左右，该体系属于中等强度的高塑性变形镁合金。

C03-P20

AE42 和 AZ40 镁合金孪生行为对比研究

常丽丽
山东大学

以 AE42 和 AZ40 镁合金为研究对象，采用金相显微组织分析、EBSD 测试等手段对两种镁合金在不同变形条件下的孪生行为进行了系统研究。结果表明，AE42 和 AZ40 镁合金室温压缩过程中产生大量的 {10-12} 拉伸孪晶。{10-12} 孪晶的体积分数随着应变速率的增加而增加。

C03-P21

微量 Cu 的添加对 ZK60 合金显微组织与力学性能影响的研究

何明琳^{1,2}，罗天骄^{1,2}，周吉学³，杨院生^{1,2,3}

- 1.中国科学院金属研究所
- 2.中国科学技术大学材料科学与工程学院
- 3.山东省科学院新材料研究所，山东省轻质高强金属材料省级重点实验室

镁合金具有低密度、高比强度等优势，能有效降低汽车重量，实现节能减排，是一种应用潜力巨大的轻量化材料。Mg-Zn 系是具有最高时效硬化能力的镁合金体系之一，微量 Zr 的添加可以显著细化晶粒，使得 ZK60 合金成为目前应用广泛的、综合力学性能较好的商用变形镁合金之一。但是 ZK60 变形镁合金的屈服强度仅约为 240MPa，相对于铝合金仍然较低。因此，提高 ZK60 合金的力学性能具有十分重要的现实意义。

本文利用光学显微镜、X 射线衍射仪、扫描电镜、电子显微探针以及透射电镜等研究了 0.5wt.%-1.0wt.%Cu 的添加对 ZK60 合金显微组织和力学性能的影响。研究表明，ZK60 合金主要由 α -Mg、MgZn₂ 以及 Zn-Zr 相组成；Cu 的加入可促使 MgZnCu 相析出，且随着 Cu 含量的增加，MgZnCu 相数量逐渐增多，晶粒尺寸减小。电子探针结果显示，Cu 主要

存在于晶界处第二相中,且基体中也有少量的分布。热挤压后所有合金均发生了明显的动态再结晶,随着Cu含量的上升,动态再结晶分数下降、动态再结晶晶粒尺寸减小。同时,基体中的第二相发生破碎,沿着挤压方向呈条带状分布。XRD宏观织构测试表明,所有合金都具有典型的基面织构,当Cu含量为1.0wt.%时,(0002)和(10-10)织构强度明显上升。室温拉伸性能测试表明,随着Cu含量上升,合金的屈服强度上升,ZK60-1.0Cu合金的屈服强度和抗拉强度分别提高到277MPa、331MPa,同时具有较优的伸长率(24%)。经过T5时效后,ZK60-1.0Cu合金的室温拉伸屈服强度可提高至304MPa。挤压态以及时效态ZK60-1.0Cu合金显著提高的力学性能主要源于细晶强化和析出强化。

C03-P22

Mg-6Al-4Zn-1.2Sn 镁合金压铸薄壁件微观组织与力学性能的研究

崔杰^{1,2}, 罗天骄¹, 杨院生¹

- 1.中国科学院金属研究所
- 2.东北大学

Mg-6Al-4Zn-1.2Sn 镁合金为课题组自主研发的铸造镁合金,具有良好的铸造性能与力学性能,具有替代AZ91镁合金、AM60镁合金等商用铸造镁合金的潜力。为研究该合金在压铸薄壁件中的应用,在相同压铸工艺条件下压铸了平均壁厚为3mm的该合金铸件与AZ91镁合金铸件。采用Zeiss金相显微镜,JSM-6460扫描电镜,JEM-2100透射电镜等观察铸件横截面处表层到心部缺陷种类与缺陷分布情况;铸件表层到心部第二相种类、第二相尺寸与其分布情况;表层到心部晶粒尺寸变化;基体内析出相种类与分布情况。采用HV-400型维氏硬度计,AG-100kNG型材料试验机测试压铸铸件的硬度与拉伸性能。采用与AZ91镁合金相同的压铸工艺,Mg-6Al-4Zn-1.2Sn镁合金压铸薄壁件充型完整,不存在热裂问题。铸件横截面位置存在气孔、夹杂与疏松缺陷,距铸件表层800 μ m位置有两条缺陷带,铸件心部缺陷数量较表层缺陷数量多。铸件表层与心部第二相种类相同,均为Mg₁₇Al₁₂相与Mg₂₁(Al,Zn)₁₇相。铸件表层位置晶粒尺寸较小,固溶原子含量较高,心部位置晶粒尺寸较大,固溶原子含量较低,因此铸件表层显微硬度值较心部显微硬度值高12.7HV,高出约19.3%。铸件共晶 α -Mg相内部存在大量细小弥散分布的块状析出相,析出相尺寸在30nm-80nm范围内,且基体内部存在大量孪晶。Mg-6Al-4Zn-1.2Sn镁合金压铸薄壁件拉伸屈服强度,抗拉强度与伸长率分别为146.5MPa,228.5MPa与5.8%,拉伸性能数据均比AZ91镁合金铸件拉伸性能数据高,提高率分别为2.4%,3.6%与20.8%。屈服强度与抗拉强度较高主要与共晶 α -Mg相中弥散析出的析出相有关,析出相的存在阻碍位错的运动,从而提高铸件的力学性能;伸长率较高是由于基体内部存在大量的孪晶,增大了室温拉伸条件下滑移系启动的数量。

C03-P23

固溶处理对铸态 Mg-4.8Al-2.7Ca-0.4Mn 合金组织演变及力学性能的影响

张琳琳¹, 周吉学^{1*}, 王金伟, 刘运腾¹, 唐守秋¹, 杨院生^{1,2}

- 1.齐鲁工业大学(山东省科学院),山东省科学院新材料研究所,山东省轻质高强金属材料省级重点实验室
- 2.中国科学院金属研究所

本文主要研究了固溶处理对Mg-4.8Al-2.7Ca-0.4Mn合金组织演变及力学性能的影响。结果表明:利用Thermo-Calc软件对合金的凝固过程进行模拟后,确定固溶温度为500 $^{\circ}$ C,经过不同的固溶处理时间(2h,4h,6h,8h,24h,36h)可明显改变合金的微观组织。铸态及固溶态合金组织主要由 α -Mg和Al₂Ca相组成,合金铸态组织为明显的枝晶形貌,固溶处理后,枝晶被打断,Al₂Ca相形貌由原来的层片状转变为多边形或者块状,并且呈不连续分布,固溶时间过长会导致Al₂Ca相粗化。500 $^{\circ}$ C下固溶处理4h后,合金的具有最佳的拉伸性能,抗拉强度、屈服强度及延伸率分别为222MPa、182MPa和4.5%,粗化的Al₂Ca导致合金的强度和塑性降低。

仅发表论文

C03-PO-01

Interfacial Reaction and Diffusion Behavior in (Mg-Al)/(Mg-Y) Diffusion Couples

戴甲洪¹, 蒋斌², 潘复生²

- 1.长江师范学院
- 2.重庆大学

Interfacial Reaction and diffusion behavior in (Mg-Al)/(Mg-La) diffusion couples were investigated in this study. The Al_4La and $Al_{11}La_3$ intermetallic compounds form in the diffusion reaction zone in all the diffusion couples. The formation of intermetallic phases were rationalized on the basis of the of the Miedema's model. The local average compositions through the diffusion reaction zone were determined, and employed to construct semi-quantitative diffusion paths on isothermal Mg-Al-La ternary phase diagrams at 673 K. The growth constants of the layer I, layer II and entire diffusion reaction layers were determined. The activation energies for the growth of the layer I, layer II and entire diffusion reaction layers were 120.66 ± 2.78 kJ/mol, 107.95 ± 0.56 kJ/mol and 79.05 ± 0.17 kJ/mol, respectively. In layer I and II, Al has higher integrated interdiffusion coefficients than La. The average effective interdiffusion coefficients values are higher than in the layer I and II.

C03-PO-02

冷却速度对 Mg-3Al-1Y 合金组织及时效性能的影响

罗永欢, 蒋斌

重庆大学

研究了自主设计的水冷铜模吸铸成型及普通模具对 Mg-3Al-1Y 合金的微观组织及时效性能的影响。结果表明, 水冷铜模可以提高冷却速度, 采用 OM 和 SEM 分析后发现, 较普通凝固的合金, 亚快速凝固的合金中, Al_2Y 的大块颗粒消失, 存在着共晶化合物, 晶粒为树枝晶, 通过 EDS 分析, 初步确定其为 Al-Y 化合物的亚稳相。进行 XRD 测试发现, 亚快速凝固的合金中, 没有 Al_2Y 的衍射峰存在, 进一步说明, 提高凝固时的冷却速度可以抑制合金中 Al_2Y 的析出。在随后的时效中, 发现 Al_2Y 有少量析出, 200°C 时效 36h 后, 硬度得到 7% 的提升。

C03-PO-03

一种新型挤压方法以提升镁合金 AZ31 板材的力学性能

柴炎福, 蒋斌

重庆大学材料学院

一种新型的挤压方式, 即斜坡挤压(SE), 以生产制备 AZ31 合金薄板。在其与传统挤压板材相对比的基础之上, 本文主要从微观结构、组织和力学性能对斜坡挤压方法制备的 AZ31 板材进行研究。结果表明, 由于倾斜界面的引入, 斜坡挤压可得到显著细化的晶粒和较强的组织。最终该板材的屈服强度和抗拉强度均比常规挤压板材高得多。其强度的提高主要归功于细化的显微组织(晶粒)和组织强化的共同作用。

C03-PO-04

晶粒尺寸和组织对二元挤压镁锂合金的室温力学性能的影响

赵俊, 蒋斌

重庆大学

对挤压镁锂合金在不同温度 (240°C - 370°C) 下的组织, 组织演变和力学性能进行研究。随着挤压温度的升高, 平均晶粒尺寸从 $5.1\mu\text{m}$ 增加到 $37.5\mu\text{m}$, 及晶粒分布更加均匀。不同的挤压温度导致不同的组织形成。挤压温度为 240°C 时, 板材大部分晶粒 c 轴平行于 ND 和 $\langle 10-10 \rangle$ 方向随机分布。随着温度的升高, 柱面滑移增多, 晶粒 c 轴沿 TD 发生偏转, $\langle 10-10 \rangle$ 沿 ED 发生择优。再结晶晶粒尺寸和组织高度影响着室温力学性能。细小晶粒和强基面组织增强力学强度, 但导致延伸率下降。Mg-3Li 合金 240°C 挤压后呈现出高的屈服强度是由于细小的晶粒和强基面组织。在 370°C 挤压后沿 ED 方向展现出低的塑性是由于晶粒长大和强基面组织, 而沿 TD 方向呈现出高的塑性主要是由于晶粒 c 轴向 TD 方向发生偏转。Mg-3Li 合金在挤压 300°C 后呈现出良好的力学性能。

C03-PO-05

镁合金汽车仪表板横梁压铸热裂成因分析及工艺优化

郑晓剑, 蒋斌, 宋江凤

重庆大学

通过对镁合金汽车仪表板横梁铸件进行零件结构分析、裂纹宏观表征分析和压铸过程有限元模拟及缺陷预测等, 分析了其裂纹缺陷的形成原因。并针对浇注温度、模具预热温度、压射速度等几种影响缺陷形成的主要压铸工艺参数进行

稳健性设计,优化压铸工艺,以降低压铸热裂倾向,提高铸件质量。结果表明:压铸裂纹缺陷主要为热裂纹,发生区域集中在铸件薄厚相接处或圆角过度区域;压铸裂纹缺陷的形成与零件结构、压铸工艺以及合金成分等均有关系,氧化夹杂或缩孔等缺陷可能诱导裂纹萌生及扩展。通过稳健性设计,获得最优压铸工艺参数:浇注温度 690 °C、模具预热温度 220 °C、压射速度 6 m/s。主要压铸工艺参数对压铸热裂倾向的影响程度由大到小依次为:模具预热温度、浇注温度、压射速度。

C03-PO-06

微晶镁合金甩带辊嘴间距对带体厚度及组织的影响

曹凤红, 陈昶
乐山师范学院

以产业制备微晶镁合金薄带为基础,通过自行开发的公斤级甩带装置进行镁合金薄带制备,研究在喷嘴直径一定的条件,随辊嘴间距的变化,对带体厚度及组织的影响规律,同时利用金相显微镜和扫描电子显微镜(SEM)等手段,对急冷甩带制备的镁合金薄带的组织进行对比分析。研究结果表明:随着辊嘴间距的增加,带体的厚度明显增加,且表面粗糙孔隙多,当喷嘴直径一定,辊嘴间距 d 为 1.5mm,急冷转速为 40m/s 时,且须保持辊嘴间距 d 不变才能获得厚度均匀的镁带,且带体厚度约为 50 μ m,晶粒度达到约为 100nm。

C03-PO-07

La 元素对 Mg-6Al-3Pb 合金的组织结构、电化学性能及耐腐蚀性能的研究

宋燕, 马绍星, 蒋斌
重庆大学

镁合金阳极由于具有较负的电极电位,放电平稳,激活时间短,能量密度高,储量丰富等诸多优点受到了研究者的青睐。Mg-6Al-5Pb 合金阳极由于在大电流密度下放电时具有较负较稳定的电位,其库伦效率也较好,因而被广泛研究。然而,Pb 元素是对环境有害的元素,本文旨在研究降低 Mg-6Al-5Pb 合金中 Pb 元素含量的基础上添加标准电极电位较负的 La 元素的镁合金的放电性能。本文主要采用显微组织表征、电化学测试及浸泡实验等方法,从合金化、热处理和挤压变形等三种不同途径,研究 La 元素对低 Pb 含量的 Mg-6Al-3Pb 合金阳极在氯化钠溶液中的放电性能和耐腐蚀性能。具体内容和相关的研究结果如下:(1)在铸态合金中,分别对添加了质量分数为 0.5%、1%和 2%的 La 元素的 Mg-6Al-3Pb-xLa 合金阳极的组织结构、在 3.5wt.%NaCl 溶液中的放电性能和耐腐蚀性能进行研究。实验结果表明,La 的添加增大了合金中金属间第二相的体积分数,其第二相的体积分数随着 La 质量分数的增大而增大,此外合金的晶粒尺寸得到细化,同时提高 AP63 合金的放电活性,其中 AP63-1La 合金在 3.5wt.%NaCl 溶液中的放电性能最优,在 10mA/cm² 电流密度下放电时,平均放电电位为 -1.71V(vs.SCE)。合金的耐腐蚀性能随着 La 质量分数的增大先提高后降低,其中 AP63-2La 合金由于存在较高比例的针状第二相,而针状的第二相可以作为腐蚀的屏障减缓了合金的腐蚀。(2)对 Mg-6Al-5Pb-xLa (x=0,0.5,1.2) 合金进行 400°C 固熔处理 24h,水淬,并对合金的组织、放电性能和耐腐蚀性能进行研究,结果表明通过热处理后合金中的第二相体积分数均有所增加,各个合金的放电活性均得到提升,其中 AP63-1La 合金的放电性能依然是最优的,虽然在 1800s 放电时间里其平均放电电位与铸态合金的一样,但是热处理后合金的激活时间减小,激活的最负电位比铸态的更负。其次,热处理后合金的腐蚀速率均减小了,主要原因是热处理后合金中针状的金属间第二相体积分数增大,抑制了合金的腐蚀。因此,经过热处理后的 AP63-1La 合金比铸态 AP63-1La 合金更适合做镁合金电池阳极。

C03-PO-08

正挤压与圆弧通道复合变形的数值模拟与实验研究

高航, 蒋斌
重庆大学

以 AZ31 镁合金为研究对象,结合正挤压与圆弧变形的特点提出正挤压与圆弧通道复合变形方式,采用有限元软件对其进行模拟。研究圆弧半径对坯料变形过程中应变的影响,并分析不同圆弧半径变形后的等效应变分布的不均匀程度。根据其模拟结果与实验研究进行对比。结果表明:正挤压与圆弧复合变形可显著提高变形过程的累积应变,随着圆弧半径的减小,累积应变增大,但不均匀程度相对增加。当圆弧半径为 20 mm 时,试样可获得均匀的等效应变分布。在复合变形后,AZ31 镁合金的晶粒尺寸可显著细化。

C03-PO-09

稀土元素对 Mg-Li-Al-Zn 合金的显微组织和力学性能的影响

何超, 蒋斌

重庆大学

Mg-Li 合金以其低密度, 高比刚度和良好的磁屏蔽性能而闻名。最近, 已经证明稀土 (RE) 元素能有效地提高 Mg-Li 合金的强度。因此, 主要研究了 RE (Y, Nd) 对 Mg-8Li-3Al-2Zn 合金显微组织, 力学性能和腐蚀行为的影响以及 Mg-8Li-3Al-2Zn-(xRe) 合金的热处理和挤压过程的影响。研究表明, 添加 RE (Y, Nd) 可以有效提高 Mg-Li-Al-Zn 合金的力学性能和耐蚀性能, 对高性能 Mg-Li 合金的开发具有重要意义。结果表明, Mg-8Li-3Al-2Zn (LAZ832) 合金的显微组织主要由 α -Mg, β -Li, AlLi 和 MgLiAl₂ 相组成。随着 Y 的加入, Al₂Y 化合物逐渐形成并逐渐增多, AlLi 相减少, 同时细化组织。Mg-8Li-3Al-2Zn-0.5Y (LAZ832-0.5Y) 合金的拉伸性能与极限拉伸强度 (UTS), 屈服强度 (YS) 和伸长率 (EL) 的最佳组合为 153.0MPa, 218.5MPa 和 16.9%。改进机制与晶粒细化和二次强化有关。此外, 晶界上的 Al₂Y 颗粒抑制了 β -Li 相和 α -Mg 相之间的电偶腐蚀, 同时也减弱了由于 AlLi 相的减少而引起的 β -Li 相内腐蚀发生。而且, Y 添加使腐蚀表面变得更加紧凑。

C03-PO-10

石墨烯的添加对 AZ31 合金在 3.5 wt.% NaCl 溶液中腐蚀和放电性能的研究

杨华宝, 蒋斌

重庆大学材料学院

本文采用粉末冶金的方法, 将 AZ31 合金粉末和石墨烯在保护气氛下机械混合压制成形, 并通过失重, 析氢, 极化曲线, 恒电流放电的方式研究 AZ31/石墨烯复合材料在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的腐蚀和放电性能, 并用铸态 AZ31 进行对比。实验结果表明, 石墨烯的添加会增加 AZ31 的腐蚀速率, 主要是由于石墨烯在 AZ31/石墨烯复合材料中作为阴极的存在, 并与 AZ31 粉末之间发生电偶腐蚀作用从而增加其腐蚀速率。通过研究铸态 AZ31 合金和 AZ31/石墨烯复合材料的放电性能, 发现 AZ31/石墨烯复合材料的放电电位要高于铸态 AZ31, 主要是由于石墨烯可以增加 AZ31 颗粒之间的导电性, 同时由于 AZ31/石墨烯复合材料中孔隙的存在, 会使得电解液更容易进入样品内部、可以增加电解液与 AZ31/石墨烯复合材料的接触; 同时 AZ31/石墨烯复合材料由于较强的自腐蚀速率, 较多的 H₂ 产生的扰动作用, 使得放电产物更容易脱落, 这些都会导致其放电性能的增强。因此, AZ31/石墨烯复合材料的放电性能要优于铸态 AZ31。

C03-PO-11

氨基酸的添加对 AZ31 合金板材在 3.5 wt.% NaCl 溶液中腐蚀性能的研究

吕金倍, 蒋斌

重庆大学

本文研究了氨基酸 (色氨酸和蛋氨酸) 对含有 (0001) 强基面织构的 AZ31 板材在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的腐蚀行为。通过失重, 析氢, 极化曲线和交流阻抗来研究不同浓度的氨基酸对 AZ31 板材的腐蚀性能的影响。结果表明, 两种氨基酸在 NaCl 溶液中均对 AZ31 合金板材有缓蚀作用; 且随着浓度的增加缓蚀效果增加, 但是浓度继续增加时反而会减弱缓蚀作用。在同一浓度下, 色氨酸的缓蚀作用要好于蛋氨酸。蛋氨酸和色氨酸在 AZ31 合金板材表面的吸附都符合 Langmuir 等温吸附模型。利用 Material Studio 5.0 软件分别对蛋氨酸和色氨酸分子结构进行优化, 并研究 (0001) 面分别与蛋氨酸和色氨酸分子的相互作用方式, 发现蛋氨酸以及色氨酸分子在拥有 (0001) 强基面织构的 AZ31 合金板材表面的吸附都是物理吸附和化学吸附共同作用的结果, 但是, 色氨酸在 (0001) 面的吸附作用比蛋氨酸的吸附作用强。

C03-PO-12

添加 Li 元素对 AZ31 镁合金板材弯曲成形的影响

江洵, 蒋斌

重庆大学

本研究对 Mg-3Al-1Zn (AZ31)、Mg-5Li-3Al-1Zn (LAZ531) 两种挤压镁合金板材在室温下进行了 V 形弯曲实验。通过有限元模拟 (FEM) 分析了板材的在不同方向的应力应变分布。在弯曲过程中, 沿厚度方向, 外侧受拉应力, 内侧受压应力, 应力梯度分布。沿宽度方向, 中心处应力最大, 向两边逐渐减弱; 实际观察到裂纹也是在此萌生。通过电子背散

射衍射 (EBSD)、X 射线衍射 (XRD) 研究了 AZ31、LAZ531 显微组织和结构的演变。发现沿厚度方向, 应力梯度导致显微组织、孪晶梯度分布, 外侧发生了 {101} 压缩孪生和 {101}-{101} 双孪生; 内侧则发生较多的拉伸孪生。AZ31 添加 Li 之后, 晶粒取向更加随机, 织构因此得到弱化; 通过改善位错滑移机制和减少孪生提高了晶界上的应变相容性。因此, 具有较弱织构的 LAZ531 与 AZ31 相比, 在 V 形弯曲过程中显示出更好的弯曲成形性能。

C03-PO-13

Gd 含量对双相 Mg-Li 合金显微组织和性能的影响

张娜¹, 董含武¹, 王立民², 程仁菊¹, 蒋斌^{3,1}, 刘文君^{3,1}, 潘复生^{3,1}

- 1.重庆市科学技术研究院
- 2.中国科学院长春应用化学研究所
- 3.重庆大学

利用 X 射线衍射仪 (XRD)、场发射扫描电子显微镜 (SEM)、电子万能试验机、硬度计研究稀土元素 Gd 对金属模铸造的双相 Mg-Li 合金的显微组织和力学性能的影响。结果表明: 双相 Mg-Li 合金中含有 α -Mg 和 β -Li 相, 添加的 Gd 元素后, 出现了 Mg₃Gd 相, 合金的 α 相晶粒得到细化; 合金中第二相的量, 随着 Gd 含量的增加而增多。Gd 可以强化双相 Mg-Li 合金, Gd 的质量分数少于约 3% 时, 合金的硬度提高较快, Gd 含量继续增加对合金硬度提高较少; Gd 的质量分数约为 6% 时, 强化效果最好, 合金的屈服强度能达到 145MPa。

C03-PO-14

Y 对挤压态 Mg-0.2Sn 板材组织、织构、力学性能的影响

沈亚群, 蒋斌
重庆大学

综合调查了 Y 元素对挤压态 Mg-0.2Sn 板材的组织、动态再结晶、织构、各向异性, 以及力学性能的影响。结果表明, 稀土 Y 的添加可通过形成细小、弥散分布的高温稳定 MgSnY 第二相来细化合金晶粒, 改善合金金相组织。因为颗粒激发形核机制使得合金在 400°C 挤压条件下发生完全再结晶, 再结晶后的晶粒取向随机使得织构弱化。当 Y 添加的范围在 0.2-1.4wt.% 时, Y 的增加可以合金的抗拉强度从 247MPa 提升到 279MPa, 塑性从 22.1% 提升到 38.1%, 性能的提升主要归因于细晶强化, 第二相强化, 非基面滑移的开启。当 Y 添加量为 1.4wt.% 时, 合金的屈服强度为 110MPa, 抗拉强度为 279MPa, 延伸率为 38.1%, 其综合性能最为优异。

C03-PO-15

过滤净化对 Mg-8Gd-4Y-1Zn-0.5Al 合金组织与性能的影响

黄正华¹, 李乾², 姚祎^{1,2}, 周永欣², 徐春杰², 张忠明², 李扬德³, 李卫荣³

- 1.广东省材料与加工研究所
- 2.西安理工大学 材料科学与工程学院
- 3.东莞宜安科技股份有限公司

利用光学显微镜 (OM) 和扫描电子显微镜 (SEM) 分析了 Mg-8Gd-4Y-1Zn-0.5Al 合金经泡沫陶瓷过滤网净化前后的重力铸造试样和挤压棒材组织, 并测试了其室温拉伸力学性能和冲击韧性。结果表明: 过滤净化能有效除去镁合金熔体中的夹杂物。经过滤净化后的各试样综合力学性能明显提高: 重力铸造试样抗拉强度、伸长率和冲击韧性分别达到 225 MPa、9.0% 和 24 J/cm², 较未净化时的 176 MPa、5.5% 和 10 J/cm² 分别提高 28%、64% 和 140%; 挤压棒材抗拉强度、伸长率和冲击韧性分别达到 376 MPa、9.0% 和 64 J/cm², 较未净化时的 343 MPa、6.0% 和 38 J/cm² 分别提高 10%、50% 和 68%。

C03-PO-16

Y 元素对挤压 Mg-0.4wt.%Sn 合金的组织与力学性能研究

王翠红, 蒋斌
重庆大学材料学院

本文研究和比较了挤压态 Mg-0.4Sn-xY (x=0, 0.7 和 2.0wt.%) 合金的显微组织和力学性能。发现了所有的挤压态合金板材都显示出完全再结晶的晶粒结构。合金板材中第二相的数量随着 Y 含量的增加而逐渐增加。在 Mg-0.4wt.%Sn 合金板

材中, 没有添加 Y 元素时, 只观察到了 Mg_2Sn 相, 而在 $Mg-0.4wt.\%Sn-xY$ 合金板材中观察到了 $MgSnY$ 相和 Sn_3Y_5 相。在挤压过程中, 这些第二相可能会阻碍再结晶晶粒的长大, 使晶粒细化, 从而有效地提高合金板材的屈服强度。当 Y 添加量为 0.7% 时, 延伸率从 7.8% 迅速增加到 32.7%, 而沿 0 拉伸方向略微降低到 25.5%。改善具有 Y 添加的合金板材的延展性的关键因素是从强基面织构到沿 ED 方向分散的弱双峰织构的转变。另外, 晶界裂纹表面从光滑到粗糙的改变和应变传播可以分别通过使板材拉伸到 0.10 和 0.05 的塑性应变下观察到, 这些改变可以提高晶界结合力并有助于提高延展性。然而, 随着 Y 添加量增加到 2.0%, 在合金板材中存在粗大的 Sn_3Y_5 相和 $MgSnY$ 相, 这些粗大的第二相在拉伸过程中可能作为裂纹源, 从而降低了 $Mg-0.4Sn-2.0Y$ 板材的延展性。因此, 微量 Y 合金化为实现 $Mg-0.4Sn$ 合金板材的高延展性提供了一种新的方法。

C03-PO-17

Mn 对镁合金组织和力学性能的影响

廖鸿歆^{1,2}, 刘婷婷³, 熊潇^{1,2}, 潘复生^{1,2}

1. 重庆大学材料科学与工程学院
2. 重庆大学国家镁合金工程技术研究中心
3. 西南大学材料与能源学部

镁合金绝对强度低, 塑性变形能力差是限制镁合金应用发展的主要原因之一。为了得到高强度和高塑性的镁合金, 研究了 Mn 对 $Mg-1Sn$ 镁合金显微组织和力学性能的影响。挤压态 $Mg-1Sn$ 合金中主要存在少量细小的 Mg_2Sn 第二相; 而在加入 Mn 元素之后, 合金中出现了粗大的 $\alpha-Mn$ 第二相颗粒, 并且随着加入的 Mn 含量的增加而增加。Mn 元素的加入促进了合金的动态再结晶程度, 合金的晶粒大小随着合金中 Mn 元素的增加而减少。Mn 元素的添加同时提升了合金的屈服强度和伸长率。Mn 元素的加入降低了合金柱面的临界剪切应力, 激活了合金的柱面滑移能, 使得合金柱面能够协调基面发生滑移变形, 这是合金延伸率提升的主要原因。

C03-PO-18

Mg-Y 单相固溶体制备与表征

刘文君^{2,1}, 蒋斌^{2,1}

1. 重庆市科学技术研究院
2. 重庆大学

采用热处理的方法制备了 $Mg-2.4wt.\%Y$ 镁合金单相固溶体, 并对其组织与性能进行了表征。结果显示: 随着温度的升高, 第二相含量逐渐减少, 并在 540°C 固溶 12 小时后获得单相固溶体。同时, 晶粒尺寸随温度升高发生明显粗化, 较低温短时热处理组织长大率超过 150%, 而合金显微硬度则与温度和时间呈反向发展。通过时间、温度单个因素作用下的合金固溶效果分析, 发现在不考虑组织粗化的情况下, 单相固溶体的制备只与温度密切相关, 而与固溶时间的相关性不高。

C03-PO-19

Mn 含量对 $Mg-1.0Gd$ 合金 PSN 效应及力学性能研究

彭鹏¹, 汤爱涛^{1,2}, 王海莲¹, 余加¹, 廖鸿歆¹, 潘复生^{1,2}

1. 重庆大学
2. 重庆大学国家镁合金材料工程技术研究中心

本文研究了 400°C 下热挤压的 $Mg-1.0Gd-xMn$ ($x=0,0.5,1.0,1.5$) 变形镁合金的微观组织和力学性能。结果表明, 当 Mn 元素含量增加至 1.0 wt% 以上时, 形成较好的 PSN 效应, 可以显著细化再结晶晶粒, 且再结晶新晶粒取向随机; 同时, Mn 含量增加至 1.0 wt% 以上会降低 $Mg-1.0Gd$ 合金的再结晶程度, 产生较多的未再结晶区域, 故提升了 $Mg-1.0Gd$ 合金的屈服强度和抗拉强度, 降低了塑性, 当 Mn 含量从 0 wt% 增加至 1.5 wt% 时, 合金的屈服强度从 115.3MPa 提升至 280.6MPa, 提高了 143.4%, 抗拉强度从 195.2MPa 提升至 293.7MPa, 提高了 50.5%, 延伸率从 32.9% 降低至 15.9%

C03-PO-20

Gd 对 ZM61 合金组织与性能的影响

赵阳

重庆大学

通过光学金相(OM),扫描电镜(SEM),X 射线衍射(XRD)等分析方法,研究不同 Gd 含量对 Mg-6Zn-1Mn(ZM61)变形镁合金显微组织和力学性能的影响,并初步探讨 Gd 在镁合金中的存在形式和作用机理。结果表明:Gd 在 ZM61 合金中主要以 I 相和 W 相等第二相的形式存在,少量的 Gd 固溶在基体中;Gd 元素不仅可以改善合金的铸造性能,还可以明显的细化晶、粒改善组织,提高合金的力学性能。其中,当 Gd 的含量为 3.0%时,合金在挤压态时具有综合力学性能,屈服强度和抗拉强度分别为 306MPa、354 MPa,延伸率为 15.6%。当 Gd 含量超过 3.0%,延伸率明显下降,降低合金的塑形,所以 Gd 含量以不超过 3.0%为宜。对合金进行时效处理后,效果不明显,说明热处理对该合金作用不大。

C03-PO-21

Al 对 ZM61 镁合金组织与性能的影响

王丽媛

重庆大学

采用常规的铸造方法制备了 ZM61-xAl(x=0,1,2,3)合金。利用光学显微镜、X 射线衍射仪、扫描电子显微镜和电子万能试验机等对合金的显微组织和力学性能进行了综合分析,并初步探讨 Al 在 ZM61 变形镁合金中的作用机理。结果显示,随着 Al 含量的增加,晶粒逐渐细化,其中合金主要物相有: $Mg_{17}Al_{12}$ 、 Al_8Mn_5 、 Mg_7Zn_3 和 a-Mg 基体相。当 Al 的含量为 3%时,合金具有最佳的综合力学性能,屈服强度和抗拉强度分别为 246MPa、350MPa,延伸率为 18.3%。经过 90°C/24h+180°C/16h 双级时效之后,合金中析出了大量弥散的 $MgZn_2$ 强化相,时效强化效果明显。

C03-PO-22

Al, Cu 合金化对 Mg-6Sn 合金微观组织和力学性能的影响

叶志坚,李彤,娄贵,岳建行,滕新营

济南大学

为进一步扩大和推广镁合金轻质结构材料的工业生产及应用,低成本非稀土镁合金的相应研究得到了广泛关注。其中 Mg-Sn 系合金具有优良的研究与应用潜力,但二元 Mg-Sn 合金的力学性能相对较差。本文通过 XRD, SEM 等研究手段探究了 Mg-6Sn-1Al-xCu(x=0.5,1,2)(wt.%)合金的微观组织并结合拉伸与压缩试验分析合金的综合力学性能。研究表明,在 Mg-6Sn 合金中添加 Al 和 Cu 元素能够提高合金的力学性能,这主要是由于合金的固溶强化和第二相强化导致的结果。此外,与铸态的合金相比,经挤压加工后的合金其微观组织发生显著改变。由于热挤压过程中的再结晶行为, $Mg_2Sn(Al,Cu)$ 共晶组织消失,转变为分散在晶界上的颗粒状析出相。通过拉伸和压缩试验发现,挤压 Mg-6Sn-1Al-0.5Cu 合金的极限拉伸强度(UTS)达到 301MPa,相比于铸态合金提高了 164%。随着 Cu 元素添加量的不断提高,合金的 0.2%压缩屈服强度从 72MPa 增加到 110MPa,但是其极限压缩强度基本保持不变。

C03-PO-23

张力对在线加热轧制 AZ31 镁合金薄板的板材质量的影响

肖毕权¹,宋江凤¹,刘强¹,潘复生^{1,2}

1.重庆大学

2.重庆科学技术研究院

本文采用液压张力温轧机对商用 AZ31 板材进行在线加热可逆轧制制备超薄镁合金薄板,主要研究张力对镁合金薄板的板型质量和微观组织演变的影响。实验所用材料为商用 AZ31 热轧板材,规格为 600mm×80mm×1mm。轧制过程中,张力介于 0.5~1KN,轧辊和轧制温度分别为 443K 和 483K,轧制速率为 0.1m/s,道次压下量 20%,道次间无中间退火。经过 7 个道次的轧制,最终得到厚度约为 0.22mm 镁合金薄板。研究发现,适宜的张力大小对获得板型质量良好的镁合金薄板至关重要。当加载相对较大的 1KN 张力时,容易将 0.2mm 厚的板材拉断;而加载较小的 0.5KN 张力时,板材的板型质量较差。

C03-PO-24

合金元素 Y 对镁力学性能及变形机制的影响

刘婷婷^{1,2},柳杨璐²,廖鸿歆²,潘复生²

1.西南大学

2.重庆大学镁合金材料工程与技术研究中心

由于镁的密排六方结构，滑移系较少，因此低温的塑性变形能力较差，限制了变形镁合金的推广和应用。合金化是有效改善镁合金综合力学性能的手段之一，为探究合金元素 Y 对镁室温力学性能及变形机制的影响，文中制备了浓度范围为 0~4 wt.% 的 Mg-Y 二元合金，并对其进行了显微组织和力学性能分析。经均匀化处理的 Mg-Y 合金在 350 °C 下进行热挤压。结果表明，Y 元素对镁合金有固溶强化、细晶强化和弱化织构的作用。Mg-Y 合金的强度和塑性均有明显提高。此外，利用粘塑性自洽 (VPSC) 模型对 Mg-Y 合金的变形机制进行了研究。Y 元素能够显著提高非基面滑移和拉伸孪晶的相对活动量，可以共同协调基面滑移，从而改善镁合金的塑性

C03-PO-25

含 Ce-Y 稀土的 AZ61 镁合金均匀化处理研究

付伟

广东工业大学

镁合金具有质轻、比强度高、阻尼减震性好、屏蔽电磁波、便于回收等特点。在汽车、航空航天、电子通讯等领域有广泛的应用。利用差热分析仪、光学显微镜、扫描电镜、能谱仪、X 射线衍射仪、显微硬度计和力学万能试验机研究了含稀土 Ce-Y 稀土 AZ61 镁合金的铸态与不同均匀化处理下的组织转变与力学性能变化。结果表明，铸态组织成分偏析严重，含稀土 Ce-Y 的 AZ61 镁合金铸态组织主要由 α -Mg 基体。沿晶界分布的共晶组织 $Mg_{17}Al_{12}$ 、呈花瓣状的 $Al_{10}RE_2Mn$ 相、呈块状的 $Al_{11}RE_4$ 沉淀相， $Mg_{17}Al_{12}$ 呈不连续网状分布在晶界上。均匀化处理后， $Mg_{17}Al_{12}$ 相溶入基体，枝晶偏析基本消除，组元分布更加均匀，但稀土相为耐高温相，只有少量可溶如基体，大部分稀土相依然呈块状分布于基体上，均匀化后材料的抗拉强度从 186MPa 提升至 194MPa，伸长率从 7.7% 提升至 10.2%，硬度从 60.1 下降至 45.57，试样拉伸断口形貌特点表明，均匀化退火使材料的断裂方式从脆性断裂变为脆性韧性混合型断裂。

C03-PO-26

温度和下压量对在线加热轧制的 AT61M 镁合金组织和性能的研究

刘强，宋江凤，陈晶，潘复生

重庆大学

本文主要研究了不同轧制温度和道次压下量对在线加热轧制 Mg-6Al-1Sn-Mn 的镁合金板材组织和性能的影响，并对比了没有出现边裂的轧制态和挤压态的板材在各自的 0°，45°，90° 三个方向的拉伸性能。结果表明：轧制温度和道次压下量对在线加热轧制板材的内部组织和边部裂纹的产生有较大影响，随着轧制温度的升高，压下量的减小，通过金相观察发现板材内部组织变得更加的均匀，且边部平均裂纹数量和最大裂纹深度都明显降低，可能是由于在温度较高时非基面滑移的激活以及动态再结晶的出现导致了板材的高温塑性增强，各向异性减弱。当温度升高到 250°C 及以上且压下量低至 15% 及以下，没有明显的边裂产生。轧制后晶粒得到显著细化，且极大提高了板材的力学强度，室温下板材沿横截面方向 (TD) 具有最高的抗拉强度 379MPa，延伸率达到 14%；而轧制方向 (RD) 具有最高的屈服强度 222MPa，这可能与板材内部的晶粒取向和织构有关。

C03-PO-27

轧制变形对 Mg-5Sn-3Zn-xY 合金组织及性能的影响

陈玉安^{1,2}，王祎¹，张楠¹，高俊杰¹

1. 重庆大学

2. 国家镁合金实验中心

本文研究了轧制变形处理对 Mg-5Sn-3Zn-0.8Y 合金组织和性能的影响，分为普通轧制和交叉轧制处理。400°C 热轧后的合金板材中存在动态再结晶现象，晶粒呈现等轴晶形态且较为细小，同时随着轧制道次增加合金中出现大量孪晶，这对合金的力学性能有所影响。经过轧制后合金中第二相被挤压破碎，呈流线型分布在基体上；而 Mg_2Sn 和 $MgZn_2$ 颗粒相在热轧过程中基本完全溶进基体，轧制态合金中 $MgSnY$ 颗粒相破碎现象比较明显，破碎后的第二相相对弥散的分布在基体上。合金的抗拉强度随着轧制道次增加总体呈现上升趋势，但延伸率先升高后下降，随着轧制道次越多延伸率下降越明显。轧制道次较高的合金中由于大量孪晶的存在出现双峰织构。断口分析单向轧制态合金呈脆韧混合断裂，交叉轧制合金呈韧性断裂。而不同轧制工艺对合金的组织 and 性能影响不明显。

C03-PO-28

镁合金板材超塑性成形性能及变形失稳研究

宋美娟, 黄传辉, 姜文超, 卢维娜
徐州工程学院

本文研究了轧制 AZ31B 镁合金板材的超塑性及变形失稳, 对镁合金板材进行了超塑性拉伸试验和超塑性凸模胀形试验。通过对 AZ31B 镁合金进行超塑性单向拉伸实验和双向受拉胀形实验, 研究其不同加载路径下变形过程中板平面内的两主应变的分布和最小截面处的应变路径变化。结果表明:

(1) 在一定变形温度和变形速率条件下, 试件胀形的最大高度为 41.20mm, 半径为 50mm, 最大断裂延伸率为 216%, 应变速率敏感性指数 可达 0.36, 厚向异性指数为 0.9245、应变硬化指数为 0.26。

(2) 通过对 AZ31B 镁合金板料进行超塑性单向拉伸和双向受拉胀形试验, 得到 AZ31B 镁合金板料在进行拉压或是在双向受拉下的超塑性变形时发生集中性变形失稳的条件, 并用非线性回归分析建立了相关数学模型。

(3) 工业态 AZ31B 镁合金板材在一定的变形条件下具有良好的超塑性; 在变形温度为 573K 中温条件下的超塑性成形性合乎成形零件的基本要求。

C03-PO-29

Sr 含量对 Mg-1Mn 变形镁合金组织和性能的影响

周世博^{1,2}, 潘复生¹, 陈涛¹, 余加¹, 汤爱涛¹

1.重庆市沙坪坝区重庆大学

2.重庆大学国家镁合金材料工程技术研究中心

本文通过在 Mg-1Mn 镁合金中加入不同含量的 Sr 元素, 研究 Sr 含量对挤压态 Mg-1Mn 变形合金的微观组织和力学性能的影响。结果表明, 添加 Sr 元素会有效提升合金的 PSN 机制效应, 细化再结晶晶粒, 同时具有良好的第二相强化作用, 提升了合金的强度, 当 Sr 含量从 0.5wt.% 增加至 1.5wt.% 时, 合金的屈服强度保持在 220MPa 左右, 抗拉强度从 287MPa 提升至 327MPa; 此外, 添加 Sr 元素有一定弱化织构的作用, 随 Sr 元素含量的增加从 0.5wt.% 增加至 1.5wt.%, CYS/TYS 的比值由 0.591 提升至 0.839, 显著改善了合金的拉压不对称性。

C03-PO-30

Unravelling the structure of prismatic plates in the Mg-In-Ca system

谢红波, 潘虎成, 任玉平, 秦高梧

东北大学

相较于基面析出, MgInCa 合金中的棱面析出是阻止基面滑移的更为有效的障碍, 然而, 这个单层棱面析出相的结构, 尤其是原子的堆垛与团簇行为, 仍然是未知的。在这项工作中, 我们用原子尺度 high-angle annular dark-field scanning transmission electron microscopy (HAADF-STEM) 技术, 系统的研究了 Mg-In-Ca 三元合金 200 °C 等温时效 4 h 后棱面析出相的结构。研究表明: 溶质原子自适应的团簇在一起, 并选择性的沿 $[0001]_a$ 方向有序地堆垛, 形成一个椭圆形的准单胞。这些椭圆形的准单胞棒由 Mg 原子列沿 $\langle 11-20 \rangle_a$ 方向结合在一起, 形成了这个与基体完全共格并具有 $\{10-10\}_a$ 惯西面的 3 个变体的二维面结构。这一发现为我们理解凝聚态物质中溶质原子的堆垛与团簇行为至关重要, 并期待为设计高密度棱面析出强化镁合金提供建设性的理论指导。

C03-PO-31

关于不同加工状态下 Mg-0.5Zn-0.2Ca-0.2Ce 合金腐蚀性能的研究

张诚, 吴量, 黄光胜, 王冠刚, 蒋斌, 潘复生

重庆大学

不同的加工状态会对镁合金的微观组织及腐蚀性能造成较大的影响, 本论文研究了挤压和轧制两种状态下 Mg-0.5Zn-0.2Ca-0.2Ce 合金的微观组织和腐蚀行为。通过金相显微镜, 电子显微镜和 X 射线衍射仪对两种状态合金的显微组织和织构分布进行了表征。通过析氢实验, 失重实验, 动电位极化测试和阻抗谱测试对两种合金的腐蚀行为进行了研究, 通过 X 射线光电子能谱对腐蚀后表面的膜层进行了成分分析。同时, 将两种状态合金的微观组织和腐蚀行为都与商业态的 AZ31 轧制板材进行了对比。微观显微组织说明 Mg-0.5Zn-0.2Ca-0.2Ce 镁合金轧制退火后, 晶粒和第二相得到细化, 同时轧制退火态合金的织构较挤压态合金弱很多, 而商业态的 AZ31 轧制板材的织构强度则最强, 约为轧制退火态的 3 倍。析氢实验和失重实验表明轧制退火态的合金腐蚀速率最小, 而商业态 AZ31 轧制板材的腐蚀速率约为轧制退火态的 7 倍。

极化和阻抗曲线也表明轧制退火态的合金具有较好的耐蚀性能。轧制退火态的 Mg-0.5Zn-0.2Ca-0.2Ce 镁合金具有较好的耐蚀性能，归功于均匀细化的微观结构，较弱的织构强度以及合金表面形成的具有保护性能的腐蚀膜层。

C03-PO-32

Mg-Zn-Ce-Ca-Mn 和 Mg-Zn-Ce-Ca-Mn-Zr 合金在 3.5 wt.% NaCl 溶液中的耐腐蚀性能研究

赵炎春¹，黄光胜²，王冠刚²，张诚²，彭程¹

1.长江师范学院

2.重庆大学

镁合金是最轻的金属结构材料，在航空、航天、运输、化工、火箭等领域展现出广阔的应用前景，但是较差的耐腐蚀性能严重阻碍了镁合金的商业化应用。合金化是改善镁合金耐腐蚀性能的有效途径，本文通过半连续铸造的方式制备了 Mg-1Zn-0.4Ce-0.3Ca-0.2Mn 合金和 Mg-1Zn-0.4Ce-0.3Ca-0.2Mn-0.3Zr 合金等两种镁合金。并通过金相组织观察，电化学阻抗谱实验，Tafel 曲线测试实验，析氢实验以及 SEM 实验对两种镁合金的耐腐蚀性能进行分析，同时将其耐腐蚀性能与商用热轧态 AZ31 镁合金进行对比。电化学测试结果表明，相比于 AZ31 镁合金而言两种合金都具有更低的腐蚀电流密度和较高的电荷传递阻抗，说明两种合金都具有较好的耐腐蚀性能，同时析氢实验结果与电化学测试结果也高度吻合。同时相比于 Mg-1Zn-0.4Ce-0.3Ca-0.2Mn 合金而言，Mg-1Zn-0.4Ce-0.3Ca-0.2Mn-0.3Zr 合金具有更好的耐腐蚀性能，说明 Zr 元素的添加提高了 Mg-1Zn-0.4Ce-0.3Ca-0.2Mn 合金的耐腐蚀性能。

C03-PO-33

锻压态 AZ81 与 AZ81E 镁合金组织与冲击性能研究

曹凤红

乐山师范学院

本文针对挤锻复合成形的 AZ81、AZ81E 镁合金，在室温条件下，进行了 V 型缺口冲击试验，测试了 Ce 对镁合金缺口冲击韧性的影响，试验结果表明：在室温下条件下，Ce 的加入使 AZ81 镁合金的冲击韧性提高了 18.6%；锻压后 AZ81 镁合金为明显的晶间韧性断裂特征，加入 Ce 后，因 Al₄Ce 相弥散于基体内，对周围组织产生畸变形成畸变强化，AZ81E 镁合金的断口形貌解理特征并伴有韧性断裂。

C03-PO-34

固溶 Al 原子量及温度变化对镁层错能影响的分子动力学计算

王煜焯¹，雷静¹，王海莲¹，彭鹏¹，汤爱涛^{1,2}

1.重庆大学材料科学与工程学院

2.重庆大学国家镁合金材料工程技术研究中心

层错能 (stacking fault energy, SFE) 是衡量晶体材料塑性变形行为的重要本征参数。本文基于分子动力学方法分别模拟计算了温度为 523 K~773 K 时，固溶原子 Al 含量质量比分别为 3.11%、6.21%和 9.28%的 α -Mg 和纯镁的层错能及轴比等参数，其中修正嵌入原子势方法 (Modified Embedded Atom Method, MEAM) 被用于描述模拟体系中原子间的相互作用。结果表明纯镁的层错能在各热变形温度下高于不同固溶 Al 原子含量的 α -Mg，同时纯镁的轴比也高于含固溶 Al 原子的 α -Mg，表明热变形温度下固溶 Al 原子的加入有利于镁的塑性变形。

C03-PO-35

不同牌号焊丝对 AZ31B 镁板焊接接头组织与力学性能的影响

田迎春，高平，邸建辉，兰兰，张鸣一

内蒙金属材料研究所 (中国兵器工业第五二研究所)

本文以 AZ31B 镁合金薄板为焊接母材，研究了钨极惰性气体保护焊 (TIG) 焊接接头组织结构特征与力学性能，分析了三种不同牌号的镁合金焊丝的焊接接头的力学性能。研究发现：镁合金焊缝多为较细小的等轴晶，焊缝中心晶粒相对较粗大，焊缝金属主要由 a-Mg 固溶体和 b-Mg₁₇Al₁₂ 金属间化合物组成。三种不同镁合金焊丝的焊接接头拉伸性能测试表明：采用 AZ61 焊丝焊接方法可以获得高质量的焊缝，其强度可以达到母材的 91%左右，而采用 AZ31B 和 AZ91D 焊丝的接头拉伸强度仅能达到母材的 70.2%和 78.9%左右。断口分析显示：焊接接头在拉伸时断裂首先发生在焊缝内，断口具有韧-脆混合断裂的形貌特征。

C03-PO-36

镁合金自纯化合金元素作用的热力学分析

熊潇¹, 汤爱涛^{1,2}, 康靓¹, 王玉容³, 汪琴⁴, 彭鹏¹, 余加¹

- 1.重庆大学材料科学与工程学院
- 2.国家镁合金材料工程技术研究中心
- 3.中国核动力研究设计院四所
- 4.乐山市产品质量监督研究所

本文以为降低镁合金中杂质元素 Fe 含量提供理论参考为目的,运用 Pandat 热力学模拟软件进行了热力学计算与分析,建立了相关的含微量 Fe 的多元镁合金相图。初步探讨了合金元素对杂质元素 Fe 在镁合金中的溶解度影响,明确杂质元素在熔体中的存在形式和对应含量与熔体温度、反应时间及合金元素种类之间的关系,分析结果表明,Ag、Al、Ca、Ce、Cu、Gd、La、Mn、Nd、Ni、Sn、Sr、Y、Zn 及少量 Zr 等能降低 Fe 元素在 Mg 中的溶解度,其中一些元素同时能与 Mg 中的 Fe 形成含 Fe 相沉降在熔体底部,这些元素理论上能够作为镁合金除 Fe 的自纯化合金元素,基于上述理论分析,选取了 Al、Mn、Zr 三种合金元素开展验证实验研究,研究结果与理论计算结果基本吻合。

C03-PO-37

Mg-Gd-Y-Zn-Mn 高强韧镁合金型材挤压成形的数值模拟与实验研究

彭星, 王敬丰, 王奎, 高诗情, 薛丹月, 潘复生

重庆大学国家镁合金材料工程技术研究中心

21 世纪以来,由于轻量化和节能减排的要求,高强镁合金型材在国防军工、航空航天及轨道交通等领域应用越来越广泛。本文运用基于 ALE 算法的 HyperXtrude 软件和 Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 高强镁合金的本构方程,对军用航空集装箱用工字梁及边框型材的挤压过程进行数值模拟,以实现挤压机选取、挤压质量预判、型材结构和模具设计评判及挤压工艺优化的目的,最终为实际试验提供科学的指导依据。工字梁型材模拟结果表明,突破模具口的最大压力为 727.9 MPa,所需挤压机最大挤压力计算得 9661.30 KN;平均速度和速度均方差分别为 8.26 mm/s 和 2.35 mm/s,在误差范围内,工字梁型材结构和模具设计基本合理。通过正交试验法得出挤压温度 460 °C、挤压速度 0.81 mm/s 的最佳工艺。边框型材模拟结果表明,焊合室静水压力大于合金压缩屈服强度,能有效焊合;通过最大压力值 491.5 MPa 计算出所需挤压机最大挤压力为 24114.2 KN;型材截面平均速度为 65.96 mm/s,计算出速度均方差为 15.96 mm/s,在误差范围内,型材结构和模具设计基本合理。采用正交试验法优化挤压工艺,得出挤压温度 470 °C、挤压速度 0.125 mm/s 的最佳挤压工艺。实际试验中,采用 1250 T 挤压机及最佳工艺参数,得到表面质量好、组织均匀、极限抗拉强度在 460 MPa 以上的高强镁合金工字梁型材。最后,选取 2500 T 挤压机和最佳挤压工艺,成功挤出成形质量良好、组织均匀、性能合格的高强镁合金边框型材。

C03-PO-38

Ca 含量对 Mg-Gd 合金高温氧化性能的影响

吴佳佳¹, 袁媛^{1,2}, 蒋斌^{1,2}, 郁笑雯¹, 潘复生^{1,2}

- 1.重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044
- 2.国家镁合金工程技术研究中心, 重庆 400044

本文就 Ca 的添加对 Mg-Gd 合金在 550°C-650°C 温度区间下的高温氧化行为进行了研究。采用扫描电子显微镜(SEM),热重分析仪(TGA),X 射线衍射仪(XRD)和 X 射线光电子能谱仪(XPS)等多种表征方法对样品的表面形貌、氧化行为、物相和元素组成进行检测。实验结果表明,添加少量 Ca 元素(0.5wt%)可有效提高 Mg-Gd 合金高温下的抗氧化性能。其原因是该合金经过高温氧化后表面形成了 CaO/Gd₂O₃/MgO 复合氧化膜,此膜能够有效保护合金,抑制进一步的氧化。随着 Ca 含量的增加,表层氧化膜中 CaO 含量不断增加,而 Gd₂O₃ 含量不断降低,合金的氧化速率进一步减小。在 Mg-3.5Gd-xCa(x=0, 0.5, 1.0, 3.0)合金中,Mg-3.5Gd-3.0Ca 合金表现出最优的抗高温氧化性能,此合金高温氧化后表层形成了致密排列的 CaO 膜层,该膜极大地抑制了合金的进一步氧化。

C03-PO-39

第一性原理对 Mg 中 Fe、Ni 元素固溶度的计算预测

陈涛¹, 袁媛¹, 杨丽¹, 吴佳佳¹, 周世博¹, 潘复生^{1,2}

- 1.重庆大学

2.国家镁合金材料工程技术研究中心

镁作为密度最低的结构材料,在交通运输、医疗、电子工业等领域具有广泛的应用前景,但是镁合金较差的腐蚀性限制了它的应用。镁合金中 Fe、Ni 元素的存在会引起严重的电偶腐蚀,其腐蚀速度与杂质元素含量密切相关。实验检测发现 Fe、Ni 元素在镁合金中存在一容许极限,该极限与 Fe、Ni 在镁基体中的固溶度值相关。由于 Fe、Ni 元素在镁合金中的固溶度为 PPM 级,常规的实验检测手段难以检测和表征。因此,本工作基于第一性原理计算 Fe、Ni 的掺杂的能量变化,并基于稀溶体模型外推 Fe、Ni 在镁基体中的固溶度。基于前述方法进一步计算了当镁基体中含 Mn, Al 元素时, Fe、Ni 的固溶度的变化和析出。

C03-PO-40

热处理工艺对 Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 高强镁合金断裂韧度的影响

薛丹月,王敬丰,刘世杰,高诗情,彭星,潘复生

重庆大学

在本研究中,分别通过对金相观察、扫描电子显微检测、X-射线和单轴拉伸实验,探索了不同热处理工艺下 Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 合金的断裂韧度。选择 540°C×4h T4, 540°C×4h T4A 和 540°C×4h+450°C×10h T6 三种热处理工艺来控制析出的 LPSO 相的形态、分布和大小。结果显示, Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 合金经 540°C×4h T4A 炉冷处理形成的粗大层状 LPSO 能最有效地提升合金的断裂韧度;从铸态下的 12.49 MPam^{1/2} 提升到了 15.23 MPam^{1/2},提高了 21.94%,断裂机制是沿晶断裂和穿晶断裂混合的解理断裂。晶内较粗大的层状 LPSO 能为裂纹扩展过程中提供更多的能量消耗路径,这是它比析出块状 LPSO 和细小层状 LPSO 相提升断裂韧度更明显的重要原因。

C03-PO-41

Ni/Zn 对压裂球用 Mg-Gd-Y-Zn-Mn 高强韧镁合金组织与性能的影响

高诗情,王敬丰,刘世杰,彭星,薛丹月,王奎,潘复生

重庆大学

由于镁合金是最轻的结构金属材料并且具有良好的比刚度可以满足材料结构轻量化的要求,目前受到了极大的关注。并且,因为镁的标准电极电位很低,作为一种可降解的材料在生物医药和石油产业具有巨大的应用潜力。本研究的目的是解决石油开采过程中返排的问题,找到一种材料用于制作智能降解压裂球。在 Mg-Gd-Y-Zn-Ni-Mn 合金中,保持 Gd、Y、Mn 元素含量不变,设计 Ni/Zn 原子比不同的铸态合金。通过金相显微镜,扫描电子显微镜观察,压缩力学测试,腐蚀浸泡失重测试以及电化学测试等手段,研究 Ni/Zn 原子比对铸态合金微观组织,力学性能以及降解性能的影响。结果表明随着 Ni/Zn 原子比的增加,铸态合金的晶粒大小没有明显的变化,块状共晶相(LPSO 相)的含量增加,而骨骼状 W 相的含量降低。抗压强度呈先降低后升高的趋势,延伸率则得到了一定程度的改善。此外 Ni 含量的增加加速了铸态合金在 95 °C 的 3 wt% KCl 溶液中的降解过程。最后制备出了抗压强度达 460 MPa,降解速率达 1420 mm/a 的可降解镁合金压裂球材料。

C03-PO-42

通过预拉伸和退火处理获得具有高强高塑 Mg-Zn-Ca-Ce 镁合金板材

王冠刚,黄光胜,刘帅帅,韩廷状,汤爱涛,蒋斌,潘复生

重庆大学

Mg-1.5Zn-0.2Ce-0.2Ca 变形镁合金具有优越的成形性能,但其强度相比其他合金系来说偏低,屈服强度在轧制方向仅有 165.4MPa,在横向为 125.9MPa。并且由于该合金轧制板材{0001}极图的极轴由法向朝横向偏转 40°,这会造成板材呈现出严重的屈服强度各向异性。本文通过对轧制板材横向进行不同程度(3%, 5%, 7%, 11%)的预拉伸变形并配合一定的退火处理工艺,使得该合金的屈服强度大幅度提高,甚至在预变形为 11%,150°C退火 10h 时横向的屈服强度提高了 106%,达到 259.3MPa,抗拉强度提高了 18%。当预变形为 5%,并在 150°C退火 10h 时板材轧向和横向的屈服强度分别为 203.3Mpa 和 204.1MPa,延伸率只有略微减小,平面塑性各向异性基本消除。该合金的各向异性减弱,尤其是强度的各向异性减弱是因为沿 TD 方向进行预拉伸时,基面滑移大量启动,由于该基面滑移具有一定的方向性,使得沿 TD 方向的位错密度增加,因此造成在 TD 方向上强度增量大于 RD 方向,并最终使得板材在两个方向上具有相当的强度和延伸率。该研究得到的规律和机理将为变形镁合金的生产提供指导意义,从而扩大变形镁合金的工业化应用。

C03-PO-43

少量稀土元素 Ce 对 ZM21 镁合金挤压组织和性能的影响

樊世波¹, 赵亚忠², 王彤¹, 彭建³

1.山西八达镁业有限公司

2.南阳理工学院

3.重庆大学

采用常规金相, XRD, SEM 分析, 以及常温拉伸实验, 研究了少量稀土元素 Ce 对挤压态 ZM21 合金的组织 and 性能的影响。结果表明: 挤压态合金晶粒得到大幅的细化, 第二相为 Mn 相和稀土相。在合金变形过程中, 稀土第二相破碎分布在晶内和晶界间, 通过稳定细晶组织和阻碍塑性变形时晶界的滑动对合金的力学性能施以影响。

C03-PO-44

Mg-10Gd-4Y-1.5Zn-0.5Zr 合金的超细化加工及组织性能演变

刘欢, 王策, 黄河, 吴玉娜, 孙甲鹏, 嵇孝儒

河海大学

本文利用 X 射线衍射仪、扫描电镜、透射电镜和压缩试验系统研究了 Mg-10Gd-4Y-1.5Zn-0.5Zr (wt.%)合金经多道次连续等通道转角挤压 (ECAP) 加工的显微组织演变和力学性能。结果表明, 铸态合金的显微组织由 α -Mg 晶粒、岛状 Mg₃Gd 相、少量富 Y 相颗粒以及晶界附近的层片状 14H 长周期相 (LPSO) 相组成。经 ECAP 加工后, Mg₃Gd 相发生破碎并逐步细化, 但细化后的 Mg₃Gd 相颗粒仍然聚集在晶间区域, 未均匀分散在基体中。在 ECAP 加工早期, 14H LPSO 相发生扭折, 并随着变形程度的加剧, 其逐渐在扭折带处破裂。此外, ECAP 加工促进了 α -Mg 的动态再结晶, 细化后的 α -Mg 晶粒的平均尺寸约为 1 μ m, 且随着 ECAP 加工道次的继续增加, 其晶粒尺寸保持稳定。另外, 在经 16 道次 ECAP 加工的合金中, 纳米尺度的 γ' 沉淀相动态析出。压缩测试结果表明经 16 道次加工的合金表现出最优异的力学性能, 其抗压强度和断裂应变分别为 548 MPa 和 19.1%, 其强韧性的显著提升源自于显微组织的细化, 包括动态再结晶晶粒、微米级的 Mg₃Gd 和 14H LPSO 相颗粒, 以及动态析出的 γ' 纳米沉淀相。

C03-PO-45

铸造方式对 Mg-Gd-Y 合金耐蚀性的影响

程仁菊¹, 唐鸿², 刘文君^{1,2}, 张娜¹, 董含武¹, 蒋斌^{2,3}, 潘复生^{1,2,3}

1.重庆市科学技术研究院

2.重庆大学材料科学与工程学院

3.重庆大学国家镁合金材料工程技术中心

作为所有结构金属中最轻的一种, 镁合金以其低密度、高比强度、良好的减振和抗冲击性能、优异的导电导热性能和突出的电磁屏蔽效果等诸多优点, 广泛地应用于汽车、航空航天和电子等领域。然而, 镁合金化学性质活泼, 标准电极电位仅为 -2.36 V, 在潮湿的空气和溶液中很容易就发生腐蚀, 生成的氧化膜疏松多孔, 致密系数 α 仅为 0.79, 无法有效保护基体, 阻碍腐蚀的进行。铸造方式是否对镁合金的耐蚀性能有一定的影响, 目前尚未见报道。本文主要研究了镁合金常用的两种铸造方式, 即低压砂型铸造和重力金属型铸造对新开发的高强镁合金 Mg-Gd-Y 合金耐蚀性和腐蚀过程的影响。研究表明: 低压砂型铸造 Mg-Gd-Y 合金, 其析氢速率高于重力金属型铸造合金, 即低压砂型铸造合金腐蚀性较重力金属型铸造差。合金的主要腐蚀类型为颗粒相 Mg₃(Gd,Y) 和 Mg₅(Gd,Y) 与 α -Mg 基体构成的电偶腐蚀, 其中 Mg₅(Gd,Y) 相可以通过固溶处理进行有效去除, 而 Mg₃(Gd,Y) 由于熔点较高, 不能通过固溶处理去除。低压砂型铸造合金中的颗粒相主要由 Mg₅(Gd,Y) 构成, 重力金属型铸造合金中的颗粒相主要由 Mg₃(Gd,Y) 相构成, 经过固溶处理后, 低压砂型铸造合金中的颗粒相数量减少, 耐蚀性大幅度提高; 重力金属型铸造合金中残留颗粒相数量较多, 耐蚀性没有明显改善。

C03-PO-46

Mg-Gd-Y-Zn-Mn 高强高韧镁合金型疲劳行为研究

王敬丰, 付弦, 苏辰, 王奎, 刘世杰, 李顺, 马尧, 彭星, 高诗情, 薛丹月, 潘复生

重庆大学

通过对 Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 镁合金进行总应变幅控制下的室温高周疲劳实验, 研究其在固溶态 (T4)、固溶+挤压态及固溶+挤压+时效态三种不同状态下的循环应力响应、疲劳极限和循环应力-应变行为。结果表明: 在三种不同状态下, Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 镁合金都表现为循环应变硬化效果, 合金经过疲劳循环应力后, 内部组织和晶粒得到明显细化。

此外, Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.8Mn 镁合金的应变疲劳寿命与塑性应变幅、弹性应变幅之间的关系分别服从 Coffin-Manson 和 Basquin 关系式, 通过拉-压疲劳测试, 测得 T4、固溶+挤压态和固溶+挤压+时效态合金的疲劳极限分别可达到~110MPa 、~114MPa 和~135MPa, 优于大部分镁合金的疲劳极限。此外, 对疲劳断口形貌的观察结果表明, 疲劳裂纹萌生区、稳态扩展区、和失稳断裂区分布明显, 疲劳裂纹萌生于试样表面, 主要沿着晶界扩展。

C03-PO-47

AZ31 镁合金低温拉伸力学性能研究

邹勤, 蒋斌, 杨华宝

重庆大学

在不同低温下对 AZ31 镁合金板材进行拉伸实验, 采用扫描电镜 (SEM) 和光学显微镜 (OM) 对断口及其附近的显微组织进行观察, 研究了低温对 AZ31 镁合金拉伸变形行为的影响。研究表明, 当变形温度由室温 300 K 逐渐降至 77 K 时, 合金的屈服强度与抗拉强度逐渐提高, 而延伸率却逐渐降低。这主要是因为低温变形过程中, 随着温度的降低, 位错密度增加, 形变硬化效果增强, 导致材料强度增加。