

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

C03-先进镁合金
C03-Advance Mg alloys

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

C03. 先进镁合金

分会主席：曾小勤、蒋斌、王慧远、单智伟、应韬

C03-01

材料基因工程与不锈钢合金设计

曾小勤*

上海交通大学

镁作为一种轻量化的金属结构材料，在航空航天、汽车交通、电子通讯等领域具有极大的应用潜力，但是镁的易腐蚀性极大的阻碍了其在海洋环境下的应用。合金化是提高镁合金抗微电偶腐蚀的有效途径，但是选择合金元素的种类以及含量是设计耐腐蚀镁合金最大的困难。报告人基于材料基因工程的研究范式，采用高通量计算与实验的方法，开展了不锈钢合金成分设计与优化，从上万种备选体系种筛选出具有优异耐腐蚀性能的高耐蚀镁合金（不锈钢合金）。研究表明，基于合金元素溶度积调控，不锈钢合金在溶液中能够快速沉积具有非晶结构的腐蚀产物膜，这种致密的氧化膜能够有效阻止氯离子的侵入和持续的氧化，同时具有自修复特性，其耐腐蚀性能较商用镁合金提高了 10 倍。该项研究不仅有效的解决镁合金本体的抗腐蚀性能，而且也设计具有高耐腐蚀性的合金材料提供了新的思路。

C03-02

镁基材料研究前沿与热点分析

杨艳*, 彭晓东, 潘复生

重庆大学

镁是最轻的结构金属，也是非常有潜力的储能材料，在实现“碳中和”和“碳达峰”双碳战略目标、缓解能源危机方面具有广阔前景。据统计，2022 年在 Web of science (WoS) 核心合集数据库中检索到超过 4600 篇与镁相关的论文，内容涉及镁及镁合金研究与应用的多个方面。通过文献计量学分析了镁合金的研究趋势和研究热点。镁合金的微观结构、力学性能和腐蚀防护仍是主要的研究热点，生物镁材料、镁离子电池和储氢镁材料备受关注。然而，要进一步拓宽镁合金的应用范围，还需要克服许多困难，如结构用镁合金的强度低、塑性差、耐蚀性较差，生物镁合金的降解速度快，镁储氢材料充氢和放氢范围窄、镁电池材料电解质不相容、高性能阴极和阳极材料稀缺等问题。

C03-03

高强 Mg-Gd 系合金厚板轧制过程中微观组织演变机理研究

潘虎成*, 王森, 秦高梧

东北大学

本研究通过小变形量轧制制备了高强度的 Mg-Gd-合金厚板，并对变形机制和动态再结晶（DRX）机制对组织演变的影响进行了系统研究。在轧制早期阶段，{10-12}拉伸孪晶被激活，其具有较强的<10-10>取向和较弱的<02-21>-<1211>取向分布。随后通过 DRX 过程，大多数样品最终形成了<10-10>纤维组织，而在高温和大晶粒尺寸条件下则形成了<02-21>-<1211>组织。研究发现，棱柱面<a>滑移在 DRX 过程中起着重要作用。在连续 DRX 过程中，棱柱面<a>滑移参与了 30°[0001] GBs 构建以及<10-10>纤维组织的形成。在不连续 DRX 过程中，棱柱面<a>滑移诱导晶粒围绕[0001]轴旋转，并停留在<10-10>//RD 和<11-20>//RD 取向上，最终形成了<10-10>-<11-20>双纤维组织。在 475°C 和 40% 下压量下，轧制获得了厚度为 30mm 的 Mg-Gd 板材，具有 303MPa 的极限抗拉强度和 18.4% 的延伸率，其中异构强化的贡献达到 47.4%。以上结果可为通过调节轧制温度和压下量来实现具有不同组织、高强度和大尺寸板材提供了较好的理论指导。

C03-04

FCVA 预处理和聚 PDA 改性对 WE43 生物镁合金表面 Ca-P 涂层耐蚀性及生物相容性的影响

齐福刚^{*1}, 戴翌龙¹, 余加², 欧阳晓平¹

1. 湘潭大学
2. 重庆大学

本研究通过小变形量轧制制备了高强度的 Mg-Gd 合金厚板, 并对变形机制和动态再结晶 (DRX) 机制对织构演变的影响进行了系统研究。在轧制早期阶段, {10-12} 拉伸孪晶被激活, 其具有较强的<10-10>取向和较弱的<02-21>-<1211>取向分布。随后通过 DRX 过程, 大多数样品最终形成了<10-10>纤维织构, 而在高温和大晶粒尺寸条件下则形成了<02-21>-<1211>织构。研究发现, 棱柱面<a>滑移在 DRX 过程中起着重要作用。在连续 DRX 过程中, 棱柱面<a>滑移参与了 30°[0001] GBs 构建以及<10-10>纤维织构的形成。在不连续 DRX 过程中, 棱柱面<a>滑移诱导晶粒围绕[0001]轴旋转, 并停留在<10-10>//RD 和<11-20>//RD 取向上, 最终形成了<10-10>-<11-20>双纤维织构。在 475°C 和 40% 下压量下, 轧制获得了厚度为 30mm 的 Mg-Gd 板材, 具有 303MPa 的极限抗拉强度和 18.4% 的延伸率, 其中异构强化的贡献达到 47.4%。以上结果可为通过调节轧制温度和压下量来实现具有不同织构、高强度和大尺寸板材提供了较好的理论指导。

C03-05

基于 Mg-Al 系合金的高耐蚀镁合金设计与开发

杨耀*, 曾小勤
上海交通大学

镁合金作为最轻的金属结构材料是理想的轻量化材料, 但镁合金较差的耐蚀性能限制了其大规模应用。Mg-Al 合金作为最为常见的商用镁合金, 改善其耐蚀性能是最为直接有效实现低成本耐蚀镁合金的方式之一。该研究工作通过向 Mg-11Al 合金中微合金化 0.2% 的 Y 元素, 实现了镁合金短期耐蚀性能的显著提高, 其最低腐蚀电流密度仅为 2.3 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, 但随着腐蚀时间不断延长, 该合金表现出显著的局部腐蚀倾向性。TEM 观测结果表明镁合金表面膜层/基体界面处存在纳米孔洞, 这些缺陷降低了表面保护性膜层的长期稳定性。研究者通过剧烈塑性变形细化了第二相, 减弱了微电偶腐蚀效应, 将局部腐蚀转变为均匀腐蚀。由于镁合金表面析氢速率的下降, 表面膜层/基体之间的孔洞数量明显减少, 形成了由外向内逐渐致密的膜层结构, 因此经过晶粒细化后的 Mg-Al-Y 合金表现出长期的高耐蚀性能, 中性盐雾腐蚀速率达到 0.02 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{day}$ 。因此, 设计高耐蚀镁合金的关键在于合实现镁合金表面腐蚀产物膜层微结构的致密化, 该思路也可应用于其他成分体系的镁合金。

C03-06

卡车车厢用高品质镁合金的研制与应用

任凌宝¹, 王钊², 权高峰¹, 晁鹏翔², 李铭², 王帅¹, 刘泽宇¹, 谢千峰¹, 赵宇茸¹, 刘博宇¹, 单智伟^{*1}

1. 西安交通大学材料科学与工程学院, 金属材料强度国家重点实验室, 陕西省镁基新材料工程研究中心
2. 陕西汽车控股集团有限公司, 德创未来汽车科技有限公司

运煤重卡的镁合金轻量化设计与应用对降低能耗与碳排放, 提高运输效率意义重大, 然而普通市售镁合金性能不足且稳定性较低, 亟待提升品质以满足车体服役需求。本研究通过不同运煤工况 CAE 仿真优化设计了镁合金轻量化厢体单元结构, 确立了不同部位镁合金材料强韧性-耐蚀性-焊接性-抗疲劳性等差异化性能配置需求。通过合金净密化制备有效提升车体材料耐蚀性; 应用多层次异构设计实现易成形高强韧车体结构单元的制备; 基于不同结构单元氩弧焊/激光焊等焊接匹配设计、工艺优化实现高稳定耐疲劳焊接结构开发; 同时基于车用新能源电池舱体中温服役条件, 采取多元微合金化数量级提升蠕变抗力, 保障舱体镁合金构件稳定服役。最终本团队成功研制了业内首台镁合金运煤重卡, 高品质镁合金用

量超过 800 公斤，最大镁合金单体制件尺寸 13 米，相比原钢制方案综合减重近 1 吨，节能减排效果显著；目前已通过 2 万公里商业化营运测试，并进行相关技术标准研制。本项目通过政产学研用合力推进，将为打造中国金属镁产业“有标准、有体系、有联盟、有法制”的精品产业链条提供有益参照。

C03-07

油气开采可溶镁合金封堵工具表面铁基非晶涂层的制备与组织性能研究

李宏祥^{*1}，孙艺佼¹，杨军²，张济山¹

1. 北京科技大学

2. 中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆井下技术作业公司

非常规油气开采是我国能源领域的重大需求。封隔器投球滑套多级压裂技术是非常规油气开采的核心技术之一，可溶镁合金球座的规模化应用是提升我国非常规油气开采技术的重要途径。然而，在异常苛刻的井下环境中，可溶镁合金球座不仅面临高温高压地下水和压裂液的腐蚀，而且面临携砂压裂液的冲蚀磨损，所以可溶镁合金球座会遭受严重破坏，致使压裂作业无法进行。为了解决可溶镁合金球座表面防腐与抗冲蚀磨损两个瓶颈问题，我们采用超音速火焰喷涂技术在可溶镁合金表面制备了高结合强度、耐腐蚀、抗冲蚀磨损的铁基非晶涂层。本报告将系统回顾我们在这一研究方向上的研究进展，包括可溶镁合金/铁基非晶涂层的界面结合机制、KCl 浓度/pH 值/温度和压力等对可溶镁合金表面铁基非晶涂层腐蚀行为的影响、可溶镁合金表面铁基非晶涂层的冲蚀行为等。本项研究为非常规油气开采用可溶镁合金封堵工具的腐蚀与磨损防护提供了一种可行的解决办法。

C03-08

AZ31/x 双金属层状复合板的制备及界面调控

何维均^{*}，田雨禾，罗年春，唐意智，蒋斌，潘复生

重庆大学

镁合金具有密度低、比强度高、阻尼性好等优势，但也面临绝对强度偏低、塑性不佳、不耐腐蚀等挑战。通过将镁合金与强度高、塑性优、耐腐蚀等材料进行层状复合，可进一步改善镁合金的综合性能。在团队前期研究过程中，以最常用的变形镁合金 AZ31 为基材，分别以工业纯 Al、商业纯 Ti、商业纯 Zr、稀土镁合金以及 GFRP 等材料为性能改善层，通过热轧复合、热压复合等方式，制备了 AZ31/x 双金属层状复合板。研究了中间过渡层、轧制变形量、热压温度等制备工艺对 AZ31/x 双金属层状复合板界面结构、界面结合性能以及整体性能的影响。研究结果表明，Ti 箔中间层可显著改善 Mg/Al 复合板的界面结合性能，Mg/Ti 复合板的整体拉伸性能优于基于体积混合定律的预测值，Mg/Zr 界面剥离强度高于 Mg/Mg，AZ31/Mg-Y 复合板在界面处会形成高热稳定的 Al-Y 粒子，以 PE 为玻璃纤维的基体时能获得良好的 Mg-GFRP 界面结合性能。研究结果对于提高镁合金强塑性能、开发新型镁基材料、进一步扩大镁合金的应用具有一定的参考作用。

C03-09

高塑性 Mg-Al-Ca 阻燃镁合金

黄秋燕^{*}，吕奕澎，李应举，杨院生

中国科学院金属研究所

Mg-Al-Ca 系合金是潜在的低成本高阻燃合金，但要达到高燃点，合金中 Ca 含量需在 2% 以上，这导致合金的塑性较低，难变形。本研究通过在挤压过程中产生非对称剪切作用，促进取向随机的动态再结晶晶粒的形成，合金的基面织构减弱。通过晶粒细化和织构弱化，使合金保持高燃点、高强度的同时，其延伸率维持在 15% 以上。阐明合金挤压过程中的动态再结晶机制，并研究了挤压温度对合金显微组织和力学性能的影响。随着挤压温度降低，合金屈服强度从 143MPa 升高至 208MPa，抗拉强度升高至 290MPa，伸

长率从 15%增加到 19%。

C03-10

镁合金表面 GO@LDHs 自修复复合涂层

吴量*, 陈燕宁, 姚文辉, 潘复生

重庆大学

镁合金耐蚀性能差是制约其工程应用的关键技术瓶颈, 具有重大国家发展战略需求, 在镁合金表面构筑可以自我修复的主动防护涂层已成为目前研究的热点。本研究充分结合氧化石墨烯 (GO) 和类水滑石 (LDHs) 的结构特性和优势, 在镁合金微弧氧化膜表面成功构筑 GO 掺杂 LDHs 复合自修复膜层, 研究不同水热时间对 GO/LDHs 复合膜层生长的影响规律, 并提出生长机制, 阐释 8-HQ 等有机缓蚀剂对复合膜层的腐蚀防护机制, 研究 GO/LDHs-MAO 复合膜层对稀土阳离子缓蚀剂和阴离子缓蚀剂的共同负载行为, 阐明了双重自修复机制。

C03-11

火焰作用下镁合金的燃烧机理

胡波*, 韩嘉璇, 蒋珍飞, 李德江, 曾小勤, 丁文江

上海交通大学

“易燃烧”是限制镁合金应用的三大瓶颈之一, 虽然阻燃镁合金的问世使得美国 FAA 取消了“在飞机客舱内使用镁合金”的禁令, 但却并未真正打消从业者对“镁火”的忌惮。前期主要采用静态的熔体氧化方式做到了熔炼过程不起燃, 仍需进一步实现镁零件服役遭遇动态火灾时不起燃。本工作首先解决了动态火焰作用下难测定镁合金燃点的难题, 然后以代表性的 ZM5、ZM6、WE43 为载体, 研究火焰作用下镁合金的燃烧机理, 结果表明, 氧化膜受力破裂是诱发镁合金点燃的关键, 这不同于静态氧化过程中镁蒸气冲破氧化膜。膜层连续性、致密性和强韧性对镁合金点燃特性有着决定性影响。此外, 基于能量守恒定律推导了火焰作用下镁合金燃烧特性的数学模型。最后, 基于氧化膜强韧性设计开发了几种燃点高于 1000°C 的阻燃镁合金, 3mm 厚的样品在 1200°C-20min 火焰加热下不起燃, 可满足新能源电池包托盘等零件对阻燃镁合金的需求。

C03-12

p 型 Mg_3Sb_2 基热电材料的电热输运性能调控

韩广*

重庆大学

低成本、环境友好型 Mg_3Sb_2 基材料在热电能量转换领域具有重要应用潜力。相比于 n 型 Mg_3Sb_2 , 其 p 型材料的电学性能较差, 导致其热电优值 (zT) 相对较低。针对这一难题, 我们通过成分调控实现 p 型 Mg_3Sb_2 电热输运性能的协同优化。研究表明, Cd 掺杂能够增加 p 型 Mg_3Sb_2 的载流子迁移率并降低声速, CaZn_2Sb_2 合金化则能提升 Mg_3Sb_2 的价带简并度并增强声子散射, 结合 Li/Ag 掺杂实现载流子浓度的大幅提升, 从而将热电优值显著提高至 1 左右。本研究为 p 型 Mg_3Sb_2 基材料热电性能显著优化提供了一种可行策略。

C03-13

Mg-5Zn-1.5Gd-0.2Zr 挤压合金<10-10>-<11-20>双峰丝组织的形成机制研究

肖磊*, 陈俊锋, 汪炳叔, 王晨

福州大学

本工作系统研究了 Mg-5Zn-1.5Gd-0.2Zr 合金挤压过程中<10-10>-<11-20>双峰丝组织的形成机制。研究发现,在挤压比 15:1、挤压温度 300°C和挤压速度 3mm/s 的条件下, {10-12} 拉伸孪晶在初始挤压阶段大量开动,促进了<0001>基面迅速旋转至平行于挤压方向的取向;随后,一部分晶粒在 {10-12} 拉伸孪晶的扩展、互相吞并下被旋转至<10-10>取向,另一部分晶粒具有偏离<11-20>的取向,但在位错的作用下也逐渐旋转至<10-10>平行于挤压方向的取向,导致组织呈现出强<10-10>取向;然后,多种动态再结晶机制被观察到,变形晶粒的广泛存在使得连续动态再结晶(CDRX)机制在挤压过程中占据主导地位,由 CDRX 产生了<10-10>和<11-20>取向的晶粒,使得 DRX 晶粒具有双峰丝组织取向;最终,挤压实验合金中形成了<10-10>-<11-20>双峰丝组织,但少量晶粒的基面偏离了挤压方向,发现是由<10-10>或<11-20>取向的晶粒内部进一步变形所致。

C03-14

镁合金大型铸件研发与应用

罗天骄*

中国科学院金属研究所

Mg-Gd-Y 系合金是高温性能非常优异的耐热镁合金,如典型的 WE54 和 WE43 耐热镁合金,常用于高温性能要求较高的航空领域。但当温度达到 350 °C时,耐热镁合金的力学性能依然会出现大幅度下降,同时还会发生高温氧化,极大的限制了它的应用,因此开发在 350 °C下依然拥有超高强度和优异抗氧化性能的耐热镁合金具有重要意义。

本文采用扫描电镜、电子背散射衍射和透射电镜等分析测试方法研究了 Ag 对 Mg-6.5Gd-5.6Y-0.1Nd-0.01Ce-0.4Zr 合金显微组织、力学性能和高温氧化行为的影响。研究表明,合金中添加 0~2.0 wt.%Ag 后,合金的晶粒尺寸得到显著细化,在时效过程中细化了 β' 析出相,并促进 γ'' 相析出,析出相可以有效钉扎位错并阻碍位错运动,提高了铸态合金室温及 350 °C下的力学性能。2.0Ag 合金力学性能最优异,室温下屈服强度为 269 MPa,抗拉强度 306 MPa,延伸率为 1.15 %。350 °C屈服强度为 166 MPa,抗拉强度 236 MPa,延伸率为 14.2 %。合金经挤压变形和 T6 处理后,与 0Ag 合金相比,2.0Ag 合金中存在更多细小的析出相,对位错运动的阻碍效果更强,高温性能更优异。室温屈服强度和抗拉强度分别为 287 MPa 和 380 MPa,延伸率较低为 2.5 %。350 °C下屈服强度和抗拉强度分别为 137 MPa 和 183 MPa,延伸率为 23.7 %。铸态合金氧化时表面均形成 MgO、Y₂O₃、Gd₂O₃ 和 ZrO₂ 等具有保护性的复合型氧化膜,由于 Ag 的添加促进了 Mg₃Gd 和 Mg₂₄Y₅ 相的形成,降低合金中 Gd 和 Y 含量,导致 350 °C和 400 °C氧化时氧化膜形成缓慢,降低抗氧化性;而 450 °C氧化时,Ag 促进了 Gd 和 Y 向外扩散,使氧化膜形成更快,提高了合金的抗氧化性。

C03-15

镁合金大型铸件研发与应用

蒋斌*

重庆大学国家镁中心

镁合金具有密排六方晶体结构,主要滑移系数量少且滑移方向对称性差,导致常用镁合金的塑性较差。镁合金熔铸特性导致大型复杂铸件缺陷多、成品率低。通过第一性原理计算和合金化,在改善镁合金塑性的“固溶强化增塑”机制基础上,发展了一系列新型高强塑性镁合金,其中铸造镁合金的室温抗拉强度超过

350MPa、室温延伸率可达到 10%，有效改善了合金的铸造工艺性，突破了传统固溶强化损害塑性、高强塑与多物性难以兼得的瓶颈，实现批产应用。发展了镁合金熔体纯净化、晶粒细化、热裂控制等先进冶金质量控制技术，以及复杂结构镁合金铸件制备加工技术，已用于复杂薄壁汽车零部件和大型航空航天关键构件，实现了大规模应用，并开发出世界最大的镁合金铸件。

C03-16

镁合金半固态注射成型技术的基础研究与创新开发

谷立东¹，邓俊钧^{*2}，王杰¹，尚晓晴¹，曾小勤¹，黄伟良²

1. 上海交通大学

2. 伯乐智能装备股份有限公司

半固态注射成型技术（Thixomolding）被认为是镁合金最有发展前景的近净成形工艺，具有安全、环保、高效的优点。然而商用 AZ91D、AM60B 等镁合金，往往无法发挥出半固态成型工艺的性能潜力。本研究开展了新型高性能半固态镁合金及镁基复合材料的设计开发，首先对 Mg-Al-Zn 合金体系进行了热力学计算优化，并实验验证了 AZ37 合金具有较好的综合性能，然后以成型某 1mm 以下薄壁件为例，结合 DIC 技术进一步系统研究了不同工艺参数、不同粒径和含量的 SiC 颗粒对半固态成型 AZ37 镁合金的组织、变形、断裂和力学性能的影响。发现当 SiC 粒径为 5 μ m 且添加量为 12wt.% 时，复合材料中的增强相在镁合金基体中仍呈现均匀分布。此外，SiC 的加入还降低了初生 α -Mg 相的含量，显著细化了微观组织。该一次成型镁基复合材料的屈服强度高达 193MPa，弹性模量为 55GPa，延伸率为 4%，在铸态下展现出优异的强韧性。本研究不仅为高性能半固态镁材料的研发提供了新的思路，还指明了 Thixomolding 技术在轻量化领域中潜在的新技术方向和应用趋势。

C03-17

镁合金表面陶瓷复合涂层设计、制备与耐蚀应用研究

陈俊锋^{*1}，邱雯怡¹，梁思琰²，叶星龙¹，林文鑫¹

1. 福州大学

2. 哈尔滨工业大学(深圳)

镁合金及其复合材料由于优异的性能，如低密度，高强度，高导热性等，广泛的应用在现代工业领域。然而，低的耐腐蚀性限制了工业上镁合金的使用。本研究团队提出在镁合金微弧氧化陶瓷层表面原位生成 LDH 层，设计制备一种多功能的高耐蚀陶瓷复合涂层。本报告围绕该多功能复合涂层的形貌与结构特征、性能特点、制造工艺、应用现状展开综合介绍，研究 LDH 与原始陶瓷层间的交互作用和陶瓷复合层的耐蚀保护机理。其中将重点介绍以福州大学为代表的国内单位在该材料制备与表征与应用方面的研究工作与结果。

C03-18

不析氢高耐蚀镁合金的腐蚀行为及机理

曹福勇^{*}

厦门大学

镁合金在水溶液中发生腐蚀或溶解时通常会发生析氢反应而产生氢气。本报告主要研究了通过磁控溅射得到的 Mg-Zn 合金和 Mg-Al 合金，以及通过压铸得到的 AM60M 合金在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀行为和机理。Mg-Zn-合金具有以下特点：(i) 具有非晶结构且含有部分纳米级晶粒；(ii) 腐蚀速率远远低于纯镁；(iii) 在腐蚀或阳极溶解过程中没有氢气产生，这是由于其较正的腐蚀电位抑制了阴极析氢。这是一种

以前从未实现过的防止镁腐蚀过程中析氢反应发生的新方法。同时，Mg-Al 合金是由于钝化，所以在一定的电压范围内没有氢气析出；压铸 AM60M 由于生成较致密的腐蚀产物膜因此在浸泡一段时间后也没有氢气析出。

C03-19

The multi-solute solid solution behaviour of magnesium alloys and their application on materials design

Yuan Yuan^{*1}, Tao Chen^{1,2}, Jun Wang¹, Xianhua Chen^{1,2}, Fusheng Pan^{1,2}

1. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400044, China
2. Lanxi Magnesium Materials Research Institute, Lanxi, 321100, China
e-mail address of corresponding author: yuanyuan17@cqu.edu.cn

The low-density magnesium (Mg) alloys are attractive for the application in aerospace, transportation and other weight-saving-required fields for their unique properties. However, the mass production and application of Mg alloys are still quite limited due to the low room-temperature ductility and anti-corrosion properties.

Alloying is always an effective method to improve the comprehensive properties of Mg alloys. It is noteworthy, as being Mg alloys, the most important phase is inevitably the primary Mg phase. Hence, the solid solution strengthening & softening, anti-oxidation, anti-corrosion mechanisms, are proposed for Mg alloys and also widely approved and applied in various Mg alloy design. Additionally, it is also notably, the functional properties can also be tailored by controlling the alloying element solution in the matrix. To be concluded, the solution and precipitation behavior of alloying elements in Mg alloys are quite fundamental and important for the Mg alloy design. Based on extensive review, it is found the multi-alloying-element-solution in primary Mg phase may bring cocktail effects and deliver the balanced comprehensive properties [1].

In this work, the detailed effects of alloying elements on the lattice parameters, inherited chemical and physical properties of primary Mg phase have been calculated [2]. And the correlation between the alloying elements' features and solubility in primary Mg phase has been proposed. Further, the two different alloying elements solution in the primary Mg phase has been studied, including the element's interactions, the change of the properties of primary Mg phase, and etc.. Specially, the relatively substitution sites of the two different alloying elements have been considering in this calculation, where dozen pair-sites have been selected. It is observed, the similarity of the elements can significantly affect the relatively substitution sites in the lattice.

Based on the above work, the solution behavior of two alloying elements in the primary Mg phase have been thermodynamic calculated, where some of typical systems were also experimental studied [3]. With study on dozens ternary Mg-based systems, it is observed the solution behavior of two alloying elements in the primary Mg phase are with quite typical features, as shown in Figure 1. Considering the precision of the database, series alloy experiments have been performed and these solution behavior features have been validated. Combining those typical solution behavior features and physical relation between varied properties and the matrix, the basic alloy design principles of varied targeted Mg alloys have been proposed. With the design concept, we designed the ultrahigh damping Mg alloy and the low degradation rate of Mg-Sr-Y alloy.

It is promising that by selected proper multi-alloying-elements (with optimal ratio) solid solution in the α -Mg phase, the comprehensive properties of Mg alloys with targeted performance can be synergy improved. The description of the solution behavior and the proposed material design principles can also be applied into other alloy systems.

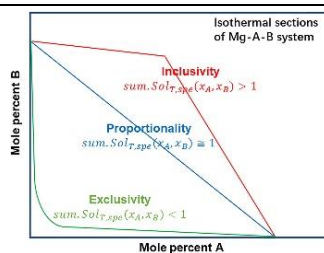


Figure 1. The classification rule of the solid solution behavior in ternary Mg alloy systems

References (up to four, please use following format)

- [1] Jun Wang, et al. "Multi-solute solid solution behavior and its effect on the properties of magnesium alloys", Journal of Magnesium and Alloys, 10.7 (2022): pages_1786-1820
- [2] Tao Chen, et al. "Features and classification of solid solution behavior of ternary Mg alloys" Journal of Magnesium and Alloys, (2024) DOI: 10.1016/j.jma.2023.11.011
- [3] Tao Chen, et al. "Interaction of elements in dilute Mg alloys: a DFT and machine learning study", Journal of Materials Research and Technology, 21 (2022): pages_4512-4525

Biographical Note

Yuan Yuan, CCMg, College of Materials Science and Engineering, focuses on thermodynamic and kinetics of Mg alloys and alloy design, has published more than 70 papers, and was awarded of the Youth of the Year of International Magnesium Science & Technology.

C03-20

镁合金表面 Zn 基掺杂微弧氧化耐蚀涂层及其生物学性能研究

杨超*, 应韬, 曾小勤

上海交通大学

镁合金的密度和弹性模量与人的骨骼最接近, 作为可降解的骨连接材料具有极大的生物医学应用前景。然而其腐蚀降解速率过快且不可控的问题导致其在植入后过早失效, 甚至引发炎症。微弧氧化涂层可以为其提供保护, 但表面存在孔洞缺陷。Zn 基耐腐相掺杂可以改善孔洞腐蚀, 本研究首先通过设计含 F 电解液构建低介电性 MgF_2 相, 降低涂层生长电压进而缓解 ZnO 颗粒掺杂时存在的烧蚀问题, 使得 ZnO 掺杂的微弧氧化涂层耐蚀性能显著提升。磷酸锌具有极低的溶度积, 被广泛用于耐蚀相掺杂, 然而其在镁合金微弧氧化涂层中因与碱性电解液反应而造成掺杂不稳定。基于此提出先构建钝化层再生长磷酸锌的分步策略, 成功实现磷酸锌的生长, 并大幅提升了镁合金的防腐性能。最后研究了磷酸锌掺杂微弧氧化涂层作为骨固定材料的生物降解性能, 生理环境下涂层展现出缓慢降解特性, 磷酸锌可以缓解材料中 Mg^{2+} 离子溶出并保持成骨细胞适应的弱碱性环境, 材料表现出优异的生物学性能。

C03-21

新型低合金化高性能镁合金设计

王慧远*

河北工业大学

新型低合金化镁合金易于铸造和加工制备, 生产成本低。然而, 较低的合金含量容易导致镁合金的抗拉强度和热稳定性不足, 且难以获得超塑性变形。课题组基于多元微合金化镁合金的元素交互作用、微观组织演化规律及力学性能等研究, 开发了具有室温高强度、高塑性和高温超塑性的低合金化镁合金, 实现了弱织构细晶和多层级组织控制, 探讨了低合金镁合金的组织热稳定性机制、室温强韧化机制和高温超塑性变形行为。本研究为新型低合金高性能镁合金的设计与开发提供了支撑。

C03-22

镁合金{10-12}拉伸孪晶的多尺度计算研究

刘泓^{*1}, 林凤祥², 聂建峰³, Irene J. Beyerlein⁴

1. 上海交通大学
2. 苏州实验室
3. Monash University
4. UC Santa Barbara

孪晶是镁合金中重要的变形模式。但是, 孪晶形核、生长的动态过程以及这些过程中的应力场变化尚未被系统研究。本研究结合相场模拟方法和基于 Eshelby 等效夹杂理论的微弹性力学解析计算, 研究了拉伸孪晶形核和生长过程中应力状态的变化, 并系统分析了单个孪晶颗粒的内外部应力场随孪晶的长度, 厚度等因素的变化规律。同时, 本研究还拓展到不同晶粒之间孪晶的交互作用, 用相互作用能分析了满足孪晶穿晶的晶界形态和取向。此相互作用能还和目前常用的几何匹配因子做了对比, 给定了几何匹配因子的适用范围, 揭示了孪晶穿晶现象的内在规律。

C03-23

复杂镁合金压铸件的塑性预测

郑江^{*}

重庆大学

在新能源汽车迅速发展的今天, 镁合金压铸件在汽车车身、减震塔等关键结构件上有广阔的应用前景。然而, 其力学性能, 尤其是塑性, 离散度大, 限制了压铸铝合金部件在轻量化领域的广泛应用。针对该问题, 本研究将压铸数值模拟与实验分析相结合, 综合采用 CT、EBSD 和 DIC 等分析技术, 系统分析了镁合金压铸件中的缺陷特征和组织特征, 以及变形不均匀性。探明了铸造缺陷 (尤其是孔洞) 和预结晶晶粒对应变集中和塑性的影响规律。发现压铸件中大量的孔洞和预结晶晶粒是导致塑性波动的重要因素, 并构建了考虑微观组织和缺陷的塑性预测模型。该模型可与商业铸造软件结合预测镁合金压铸件的塑性分布, 为工艺优化提供指导。

C03-24

新型多尺度混晶结构高强塑稀土镁合金组织调控及强韧化机制

查敏^{*1}, 王思清¹, 马骁¹, 贾海龙¹, 王慧远²

1. 吉林大学
2. 河北工业大学

高稀土含量镁合金通常具有高强度, 但其成形性较差, 难以用常规轧制手段制备, 且大压下量轧制易开裂。本工作通过衬板辅助控轧手段在难变形稀土镁合金 (WE43、WE94) 中实现了单道次大压下量轧制, 成功制备了具有优异强塑性的稀土镁合金。SEM、EBSD 和 TEM 表征表明, 大压下量控轧 WE43 与 WE94 合金均为典型的混晶结构。特别地, 混晶结构中的细晶区包含大量随机取向的超细晶, 提供了优异的晶界强化, 并有利于开启基面滑移; 混晶结构中的粗晶区由取向不同的亚结构组成, 且织构较弱, 有利于后续塑性变形过程中多种滑移系激活。此外, 合理的时效处理可进一步提高混晶结构稀土镁合金的强度, 且仍然保持较高的塑性。基于 EBSD、TEM 和 3D-APT 精细表征分析, 揭示了细晶区的滑移传递以及粗晶中非基面滑移激活实现多种滑移模式的开启提高镁合金塑性机制; 阐明了粗晶内高密度析出相与非基面位错产生强相互作用从而有效阻碍位错滑移提高混晶结构稀土镁合金强度机制。本工作为难变形镁合金的大变形量加工、组织控制与强韧化调控提供了支撑。

C03-25

旋转磁场作用下 Mg-Al-Ca 系合金的凝固行为与止裂机理杜旭东^{*1,2,3}, 王峰^{2,3}, 徐振耀¹, 白盛巍^{2,3}, 周乐^{2,3}, 王志^{2,3}, 魏子淇^{2,3}, 毛萍莉^{2,3}

1. 沈阳工业大学 电气工程学院

2. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院

3. 辽宁省镁合金及成形技术重点实验室

镁合金已成为航空航天、汽车轻量化、电子 3C 和生物医疗等领域的重要材料。但由于镁合金凝固温度区间大, 在铸造镁合金生产过程中极易产生热裂缺陷, 严重限制了镁合金的应用和发展。文章提出了通过磁控工艺控制和降低合金热裂敏感性的方法, 通过“T 型”热裂敏感性测试系统及差热分析测试系统, 研究了 Ca/Al 比值, 微合金化及旋转磁场强度对低成本 Mg-Al-Ca 系合金凝固行为及热裂敏感性的影响。结果表明, 改变合金成分无法在不损失合金力学性能的前提下有效地提高其抗热裂性能。而在旋转磁场作用下, Mg-5Al-3Ca 合金的热裂敏感性会随激励电流强度的增加而明显降低。磁场凝固条件下, 合金枝晶结构逐渐弱化, 晶粒尺寸显著降低, 且残余液相补缩驱动力得到提升, 由此使得合金的热裂纹萌生被抑制, 液相补缩效率明显提高, 合金的抗热裂性能显著提高。

C03-26

Towards high stiffness and ductility-The Mg-Al-Y alloy design through machine learning

Zhiyuan Liu*, Li Jin, Jie Dong

Shanghai Jiao Tong University

In traditional trial-and-error method, enhancing the Young's modulus of magnesium alloys while maintaining a favorable ductility has consistently been a challenge. Six key features that influence stiffness and ductility have been extracted in this study, with the shape and dispersion of the reinforcements in the alloy quantified by the image recognition technology. Predictive models for Young's modulus and elongation are established, with errors less than 2.4% and 4.5% through XGBoost machine learning model, respectively. Mg-9Al-17Y alloy is optimally selected from the search space via the grid search method. The Young's modulus of this alloy reaches 51.5GPa, and the elongation is 7%, both of which satisfy the required properties. Moreover, the SHapley Additive exPlanation (SHAP) is introduced to boost the model interpretability. This indicates that balancing the volume fraction of reinforcement, the most important feature, is key to achieve Mg-Al-Y alloys with high Young's modulus and favorable elongation through the two models. Enhancing reinforcement dispersion and reducing the size of reinforcement and grain can further improve the elongation of high-stiffness Mg alloy.

C03-27

高合金化 Mg-Gd-Y 合金强度随稀土含量的演变

郑志莹*, 董志华, 蒋斌

重庆大学

本工作研究了挤压态高合金化 Mg-Gd-Y 合金的力学性能随合金中稀土含量的变化规律。在宽合金化稀土含量范围内 (~9-27 wt.%), 合金的强度随稀土总含量呈非单调变化。当稀土含量达到 18 wt.%时, 拉伸屈服强度和极限抗拉强度达到最大值, 分别为 275 MPa 和 348 MPa。其中, 细晶强化和固溶强化机制是影响屈服强度的主要因素, 而镁基体内稀土合金元素固溶度的竞争导致了固溶强化贡献的非单调变化, 从而导致了拉伸屈服强度随稀土含量变化的非单调变化。此外, 高稀土含量镁合金中急剧增多的块状析出相会恶化合金的塑性变形能力, 导致抗拉强度降低。本研究将为新型高合金化镁合金的设计提供了理论指导。

C03-28

Crack propagation path deflection induced by α -Mg / LPSO interface and its effect on the fracture toughness of cast Mg-RE-Zn alloys

Qiankun Li*, Li Jin, Jie Dong
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

The poor fracture toughness hinders the widespread application of high-strength cast Mg-RE-Zn alloys. A systematic investigation of the fracture mechanisms of such alloys is necessary to develop materials with synergistic enhancement of strength and toughness. This study modulated three morphologies of long-period stacking ordered (LPSO) phases, namely blocky, thin lamellar, and thick lamellar LPSO, in semi-continuous casting Mg-RE-Zn alloys through various heat treatments. The influence of LPSO phases on the fracture toughness of this alloy before and after aging was systematically investigated, as well as the fracture mechanism related to LPSO phases was also elucidated. Initially, electron backscatter diffraction (EBSD) analysis was employed to assess the influence of grain orientation on crack propagation. The results revealed that the propensity for interface decohesion introduced by LPSO phases can alter crack propagation paths, thereby weakening crack tolerance. Subsequently, fracture toughness tests were conducted on the alloys. In solution-treated alloys, the observation of flat crack tunneling facilitated crack propagation, consequently impairing the fracture toughness of Mg-RE alloys. In contrast, in Mg-RE-Zn alloys, the presence of blocky LPSO phases weakened the tunneling effect by diverting crack propagation paths, thereby enhancing the fracture toughness. After aging, multiple interfaces in Mg-RE-Zn alloys, including α -Mg/blocky LPSO phase interface and α -Mg/lamellar LPSO phase interface, were prone to decohesion under a triaxial stress state. Additionally, the aging procedure also led to the formation of additional sub-micrometer and nanometer-size precipitate-free zones (PFZs), which were favorable for crack propagation, resulting in a notable decrease in fracture toughness of aged Mg-RE-Zn alloys. Fracture toughness improvement in Mg-RE alloys without LPSO phases after aging was attributed to the nanometer-sized precipitation within grains. The diffuse distribution of nano-precipitation inhibits dislocation slip and increases the proportion of secondary cracks, which provides a better release of internal stresses at the crack tip, thereby enhancing the fracture toughness of aging-state Mg-RE alloys. These findings would contribute to an in-depth understanding of the design for damage tolerance in high strength and toughness casting Mg-RE-Zn alloys.

C03-29

热处理对 Mg-Zn-Mn-Cu 合金性能的影响规律

周伟*
北京有色金属研究总院

利用 X 射线衍射仪(XRD), 布氏硬度仪, WD-Z 型数字涡流电导仪等研究了时效热处理后 Mg-5.8Zn-1.0Mn-xCu(wt.%)合金性能的变化。获得了合金的电导率及力学性能的数据, 进而探寻热处理对 Mg-5.8Zn-1.0Mn-xCu(wt.%)合金性能的影响规律。结果表明: 经过时效处理后, 合金第二相为 MgZn_2 相及 MgCuZn 相, 随着时效时间延长, Mg-5.8Zn-1.0Mn-xCu(wt.%)合金的电导率可达 18.68 MS/m, 硬度可达 69.77 HV。Mg-5.8Zn-1.0Mn-xCu(wt.%)合金时效处理后电导率的提升归因于 MgZn_2 相析出降低了合金的晶格畸变, 硬度的提升则是由于析出的第二相阻碍位错运动所致。

C03-30

热处理对电弧增材制造 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr 合金微观结构演变、力学性能和腐蚀行为的影响

李家民*, 侯娟

上海理工大学

镁合金作为一种轻质高强度的金属结构材料,在航空航天、汽车制造、电子通讯等领域拥有广泛的应用前景。镁合金增材制造 (AM) 已经成为生产复杂结构的一种有前途的技术,力学性能已得到一定程度的研究,但 AM 镁部件的腐蚀性能仍未得到开发。在本研究中,采用电弧增材制造 (WAAM) 技术来制备 Mg-6Gd-3Y-0.5Zr (VW63K) 薄壁墙。结果表明,与铸造 VW63K 相比,WAAM-VW63K 具有显著的晶粒细化、无织构晶体结构、相似的相组成、较强的机械性能和稳定的腐蚀性能。对 WAAM-VW63K 进行了 450°C、2h 的固溶处理和 200°C、96h 的时效处理,α-Mg 晶粒的平均尺寸几乎保持不变,获得了优异的机械性能和耐腐蚀性能,极限抗拉强度为 367 ± 4.1 MPa,屈服强度为 246 ± 4.2 MPa,伸长率为 3.2 ± 0.2 %。自腐蚀电位为 -1.313 V,自腐蚀电流密度为 1.941×10^{-5} A/cm²。这种出色的性能可以归因于 WAAM-VW63K 的细小晶粒强化和热处理后具有显著板长宽比的致密 β' 析出物的沉淀强化。

C03-31

Probing the varying ranges of damping capacity of magnesium alloys containing long-period stacking ordered phases

Chaoyu Zhao*, Fulin Wang

Shanghai Jiao Tong University

Traditional high damping Mg alloys, based on the concept of purified matrix, cannot withstand large vibrational strain, inhibiting their practical use. The current study employed Mg alloys containing long-period stacking ordered (LPSO) phase and designed representative microstructures, to probe the varying ranges of damping capacity. It is found that intragranular LPSO lamellae effectively purify the matrix without hindering dislocation vibrations, hence contribute to improving damping capacity at small strain. They also provide additional boost to damping capacity at intermediate strain. Precipitates, as matrix purifiers, are detrimental to damping capacity. Quantitative analyses of damping curves and the correlation with stress-strain data reveal that the transition to the rapidly rising part on damping curves physically corresponds to plastic yielding. This further inspired two perspectives of viewing damping capacity at the characteristic strain values of different materials, representing a paradigm shift of material selection and providing a rational criterion for future alloy development.

C03-32

电弧增材制造 Mg-11Al 镁合金的腐蚀与机械性能研究

胡晨晨*, 陈连喜

佛山科学技术学院

镁合金作为目前最轻的金属结构材料,具有良好的比强度、比刚度、生物相容性和生物降解性,被认为是“21 世纪的绿色工程材料”,在工业和生物医学等领域具有广泛的应用前景。增材制造作为新兴的先进制造技术,相比于传统制造,具有制造效率高、性能优良、可成形复杂结构等优点。其中,电弧增材制造 (Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM) 是以丝材为原料逐层堆积成形的,是一种定向能量沉积方法,相较选区激光熔化粉末技术,WAAM 技术克服了镁合金粉末易氧化、易燃烧、易爆炸的危险性。只是现有 WAAM 研究的镁合金其铝含量一般都在 10 wt% 以内,因此本项目开展 WAAM 制备的 Mg-11Al 镁合金的耐蚀和机械性能研究。

因电弧熔丝沉积镁合金具有各向异性,因此本文主要研究了增材制造 Mg-11Al 镁合金的三个面 (ND 面、BD 面、TD 面) 的性能。采用电化学技术、析氢试验、表面 SEM 和 EBSD 观察、EPMA 和 EDS 成分

分析、显微硬度及拉伸压缩试验等，对镁合金三个面的耐腐蚀和机械性能进行了测试。现有结果表明：在 0.5 wt% NaCl 溶液中，TD 面的耐腐蚀性能较好，ND 面的耐腐蚀性能其次，BD 面的耐腐蚀性能较差；此外，通过 SEM 观察 WAAM 制备的 Mg-11Al 的微观结构和第二相，采用 EDS 能谱表征它们的元素组成。从图中可以看到大量均匀分布的点状第二相(如 Mg₁₇Al₁₂ 相)，并且还有一些极少数孔洞存在；压缩测试结果表明，BD 面平均抗压强度较大(348MPa)，其次是 TD 面(331MPa)，ND 面平均抗压强度较小(321MPa)，从维氏硬度数据分析来看，BD 面平均维氏硬度相对较大(91kg/mm²)，其次是 ND 面(82kg/mm²)，TD 面平均维氏硬度较小(71kg/mm²)。

C03-33

基于神经元仿生结构的高导热镁基复合材料设计与制备

姚繁锦*

上海交通大学

合金化引入的晶格畸变及低导热第二相决定了镁合金的热导率必然低于纯镁的瓶颈性问题。与铝合金相比，镁合金的轻质优势被其差强人意的导热性能所掩盖，使得镁合金对高功率密度、高度集成化电子元件日益严峻的散热需求适应性欠佳，因此亟须优化轻质镁基材料的导热性能以拓宽其应用前景。基于复合材料法则理论基础，优选铜、碳纳米管作为导热增强相，提出了两种适用于不同需求的高导热镁基合金材料设计及成型方法，可实现热导率成倍提高及超过纯镁；采用增强相仿生结构设计方法，师法自然，制备超高导热仿神经元结构镁基合金，热导率突破 200 W/(m·K)，并具备优异的各向同性。该研究可指导先进第二代镁基导热材料的设计及制备，对加速镁合金在 5G 通讯及新能源汽车领域的多维度、深层次应用具有重要意义。

C03-34

Mg-Gd-Zn 系稀土镁合金摩擦磨损行为研究

刘小靖*¹，刘泽田^{1,2}，李泽¹，刘景顺¹

1. 内蒙古工业大学

2. 河北工业大学

稀土镁合金具有高强度、轻量化、耐热性好等优点，在航空航天、汽车工业等领域具有广阔应用前景。提高耐磨性对于优化镁合金性能和拓宽应用范围具有重要意义。本文以 Mg-8.61Gd-3.85Y-1.10Zn-0.42Zr 合金为研究对象，优化热处理工艺，采用 Bruker UMT-TriboLab 高温摩擦磨损试验机对固溶态和时效态合金试样进行 25-450℃摩擦磨损性能测试，采用扫描电子显微镜观察磨痕和磨屑形貌，研究了常温及高温状态下合金的摩擦磨损行为，揭示了其磨损机制的变化规律。研究表明，常温下固溶态和峰时效态合金的磨损机制为磨粒磨损+剥层磨损。固溶态合金的摩擦系数为 0.29，磨损量为 11.67 mg，峰时效态合金的摩擦系数和磨损量更低，分别为 0.27 和 10.67 mg，其耐磨性能更佳。固溶态和峰时效态合金的摩擦系数和磨损量在环境温度低于 300℃时较低，耐磨性优异。固溶态合金的磨损机制在 400℃时转变为表面熔化，峰时效态合金的磨损机制在 300℃时转变为黏着磨损。实验结果可为镁合金摩擦学领域的应用提供理论依据和技术支撑。

C03-35

火焰作用下镁合金组织与剩余性能的演变规律

韩嘉璇*, 胡波, 李德江, 曾小勤, 丁文江

上海交通大学

镁合金的易燃性仍然是限制其广泛应用的重要障碍之一, 利用稀土元素合金化是一种有效提高镁合金阻燃性能的方法。本研究将 AZ80、EZ30K 和 WE43 三种常见商用挤压镁合金直接暴露于火焰中加热, 以揭示了三种合金微观组织和力学性能的演变, 这对评估镁合金部件火灾后的剩余性能具有重要意义。结果表明, 在加热过程中, 合金依次经历了第二相溶解、晶粒长大、晶界熔化、合金熔化和缺陷生成。仅在短期加热 30 秒后, AZ80 合金的伸长率显著增加了 214%, 从 3.82% 提高到 12.01%, 而强度与初始未加热状态相比未发生明显降低, 这归因于合金的回复、晶粒长大、 $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 第二相溶解以及位错密度的降低。相比之下, EZ30K 和 WE43 合金在短期加热 60 秒后, 力学性能变化较小, 这归因于稀土元素的钉扎效应。然而, 在随后的加热阶段, 重新凝固的微观组织和缺陷的存在导致强度和伸长率显著降低。在这三种合金中, 耐火性能的排序为: $\text{EZ30K} > \text{WE43} > \text{AZ80}$, 主要原因是 EZ30K 合金的高导热性和稀土元素提升的热稳定性。

C03-36

新型 Mg-Ga 系镁合金的研究

李子林*, 石章智, 王鲁宁

北京科技大学

铸态镁合金的应用往往因为力学性能和腐蚀性能较差而受到限制, 如何同时提高力学、腐蚀性能是大多镁合金面临的共性问题。据文献报道, Mg-Ga 二元合金具有较好的力学性能和腐蚀性能。本工作在 Mg-Ga 合金的基础上, 设计了一种新型的三元 MGL 合金, 研究了其微观组织、力学性能和腐蚀性能。在微观组织中发现了主要分布于晶界的 Mg_5Ga_2 相, 以及分布在 Mg_5Ga_2 相周围的新型三元相, 在第二相和晶界附近还发现 Ga 元素偏析现象。第二相强化和固溶强化显著提高了铸态 MGL 合金的力学性能。其抗拉强度和伸长率分别为 222 MPa 和 18 %, 较铸态 AZ91 镁合金分别提高了约 50 MPa 和 15%。MGL 合金在 3.5 wt.% NaCl 溶液中浸泡 5 天后的析氢腐蚀速率为 3.20 mm/a, 较 AZ91 镁合金减少了约 20 mm/a, 具有较好的耐腐蚀性能。KPFM 结果显示电势大小为三元相 < Mg 基体 < Mg_5Ga_2 相。在浸泡过程中三元相因电偶腐蚀被优先腐蚀, 去除腐蚀产物后发现未被腐蚀的 Mg_5Ga_2 相。在目前的铸态 Mg 合金中, MGL 合金具有较好的力学性能和较低的腐蚀速率, 为新型高强耐蚀镁合金的开发提供了启发。

C03-37

Development of highly corrosion-resistant Mg-Al-Y extruded alloy via regulating the $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ phase

Haiyang Wang*, Tao Ying, Yao Yang, Xiaoqin Zeng

Shanghai Jiao Tong University

Mg alloys are susceptible to corrosion in service environments due to their high chemical activity, low standard electrode potential ($-2.37\text{V}/\text{SHE}$), and poor protective properties of the surface film, which has become the main reason limiting their large-scale application. Alloying and microstructure regulation are the main means to improve the corrosion resistance of Mg alloys. In this work, we developed a highly corrosion-resistant AW90 extruded alloy (Mg-9Al-0.2Y wt.%) with dispersed $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ phase via Y microalloying and solution-aging treatment. The aged AW90 alloy has an extremely low corrosion rate of 0.14 mm/y (weight loss), which is expected to become a corrosion-resistant magnesium alloy for large-scale application. In this study, the corrosion behavior of the as-extruded, T4 and T6 AW90 alloys are investigated in detail. The corrosion mechanisms of the three alloys are discussed, especially the high corrosion resistance mechanism of T6 alloy. The solution-treated AW90 alloy

exhibited the most severe localized corrosion, which can be attributed to the strong micro-galvanic acceleration effects of small amounts of Al₁₈Mn₄Y/Al₁₂Y phase. More importantly, it is found that the finely dispersed Mg₁₇Al₁₂ phase favors the uniform corrosion of T6 alloy and the formation of a uniform and dense corrosion product film in the initial stage of immersion, resulting in the strong quasi-passive behavior of T6 alloy. The high corrosion resistance of the T6 AW90 alloy is attributed to the formation of the dense Mg-Al layered double hydroxide film, which has stronger resistance to chloride ions.

C03-38

挤压对骨植入用 Mg-3Zn-0.7Mn-0.5Sr 合金微观组织及耐蚀性能的影响

史文鹏*

有研工程技术研究院有限公司

为了提高骨植入用 Mg-3Zn-0.7Mn-0.5Sr 合金的耐蚀性, 本研究使用大挤压比挤压对合金耐蚀性进行优化。经过挤压后, 合金的晶粒尺寸细化至 6.0 μm , 织构类型为基面纤维织构, 体外析氢腐蚀速率由 0.44 降低至 0.35 $\text{mL}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。对两种状态下的合金进行了长期电化学腐蚀, 结果表明铸态合金极化电阻随浸泡时间增幅较小, 表现出较弱的“钝化”能力, 而挤压态合金由于晶粒更加细小且组织更加均匀, 具有更强的“钝化”钝化能力。浸泡腐蚀后的样品进行 X 射线衍射标定结果表明, 合金的腐蚀产物为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 以及羟基磷灰石(HA)。通过扫描电子显微镜观察腐蚀形貌以及腐蚀产物的厚度, 挤压态合金在浸泡不同时间点均具有较铸态合金的更薄且致密的腐蚀产物层。综上所述, 挤压态 Mg-3Zn-0.7Mn-0.5Sr 合金在骨植入领域具有良好的应用前景。

C03-39

稀土镁合金搅拌摩擦沉积增材组织演变及性能提升研究

李子言^{*1,2}, 陈娟^{1,2}, 彭立明^{1,2}

1. 上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心
2. 上海交通大学金属复合材料国家重点实验室

基于搅拌摩擦焊开发的搅拌摩擦沉积增材作为一种固相增材技术, 在加工过程中使得材料发生剧烈塑性变形, 形成致密均匀, 晶粒等轴细小的组织, 极大提升材料的力学性能。搅拌摩擦沉积增材制备镁稀土合金的效率可达 1000 g/h, 是激光增材的 50 倍以上, 而成本仅为其他增材方式的 1/10。本研究利用搅拌摩擦沉积增材实现了 Mg-Gd 系列合金稳定高效的多层增材, 增材后晶粒得到显著细化, 从初始态的 21 μm 细化到约 2 μm , 力学性能得到显著提升。同时, 利用液氮急冷考察了材料从初始态到增材态的组织演变过程, 阐明了热处理对搅拌摩擦沉积增材态合金组织和性能的影响, 显示了利用搅拌摩擦沉积增材制备高性能镁稀土合金具有巨大潜力。

C03-40

Mn 在 Mg 中扩散行为的研究及高锰含量中间合金的制备

张展宁*

北京有色金属研究总院

Mn 是一种重要的合金元素, 可提高镁合金的力学性能和耐蚀性, 属于镁熔体中的包晶反应型元素。通过设计一个 Mn/Mg 固液扩散偶, 研究了 750-800°C 下固体 Mn 在 Mg 熔体中的扩散行为, 有利于后续镁锰中间合金的制备。Mn 在 Mg 中的溶解行为主要是 Mg 从原始 Mn/Mg 界面进入 Mn 晶格。扩散 2 小时的后, Mn 浓度梯度出现在新的固液界面和原始 Mn/Mg 界面之间, 并且原始 Mn/Mg 界面处的 Mn 浓度保持在约 2wt%。当 Mn 浓度为 20wt% 时, 用 Boltzmann-Matano 方法计算了 750°C、775°C 和 800°C 时 Mn 在 Mg 熔体中的互扩散系数, 它们的值分别为 0.10×10^{-12} 、 0.15×10^{-12} 和 $0.55\times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 。采用 MnCl_2 作为原料制备

制备的高锰含量镁锰中间合金，研究了合金化温度、合金化时间、 MnCl_2 添加量对中间合金中锰含量的影响。采用扩散偶探究不同合金化温度下， MnCl_2 与纯 Mn 在 Mg 中的扩散情况。结果表明：合金化温度 800°C ，合金化时间 40min， MnCl_2 添加量 100% 的条件下，Mn 的收得率最高。

C03-41

增材制造高性能稀土镁合金研究

武千业*

上海交通大学

镁合金被誉为“21 世纪绿色工程材料”，是目前世界上最轻质的工程金属材料。本研究通过不同的增材制造技术（激光粉末床熔融技术、激光熔化沉积技术与电弧熔丝增材制造技术）工艺制备了多种高性能稀土镁合金材料，系统研究了不同成型状态下的显微组织与力学性能，并进行了后续的热处理研究，获得综合力学性能较优的稀土镁合金。

C03-42

Ca 对 Mg 热膨胀和力学性能的影响

王翠红*, 董志华, 蒋斌

重庆大学材料学院

本研究探讨了 Ca 对镁的热膨胀和力学性能的影响。研究表明，在较宽的温度区间内，合金中添加 Ca 能显著降低镁的热膨胀系数（CTE），并提高镁的强度。在所研究的浓度范围内，CTE 低至 $\sim 18.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ，极限压缩强度（UCS）高达 373 MPa。Mg-Ca 合金热膨胀系数降低主要是由于表现出较高的点、弹性/剪切模量和低热膨胀系数的 Mg_2Ca 相的体积分数增加。同时 Mg_2Ca 相体积分数的增加也是 Mg-Ca 合金强度显著提高的主要原因。所设计的 Mg-Ca 合金具有低热膨胀和高强度的特点，为开发先进的镁合金提供了一条可行的途径。

C03-43

织构对 Mg-AL-In 合金腐蚀性能研究

冯保净*, 尚晓晴, 应韬, 曾小勤

上海交通大学

本文旨在阐明织构对挤压态 Mg-8Al-0.5In 合金板材腐蚀行为的影响。织构较强的镁合金具有更好的腐蚀性能。通过 DFT 计算，(0001) 晶面的功函数为 3.81 eV，高于 (10-10) 和 (-12-10) 晶面的功函数，说明 (0001) 晶面在热力学上更加稳定不容易发生腐蚀；另外通过失重、析氢和电化学测试，可以说明主要有 (0001) 晶面的样品在动力学上能表现出更好的腐蚀性能。通过对腐蚀形貌以及腐蚀截面形貌的分析，发现对于主要有 (0001) 晶面的样品，腐蚀产物膜较薄且更均匀，裂纹更少，而具有 (10-10) 和 (-12-10) 晶面的样品中的腐蚀产物厚且不均匀。对于后者，也就是非基面织构样品，不同晶面的热力学稳定性差异和动力学腐蚀速率差异是导致膜层厚度的不均匀的主要原因，不同晶面上膜层生长速率的不同会使膜层间产生生长应力，并导致膜层的破裂使膜层丧失保护性，降低了镁合金的耐腐蚀性。本研究结果表明可以通过调控织构来调节镁合金的腐蚀性能。

C03-44

Sc 改性 LPBF-MgGd 合金的组织细化、成形性、强塑性协同提升

刘子翼*, 彭立明

上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心

镁合金作为最轻的结构金属材料,与增材制造技术结合后可以起到更加明显的轻量化效应。激光粉床融化(LPBF)技术有着高冷速、高精度的特点,是研究最为广泛的金属增材制造技术。在前期对稀土镁合金 LPBF 制备的研究实践中出现了成形工艺区间窄、热应力开裂、形成粗大柱状晶、力学性能较低等问题。本研究通过预合金化方式向体系中引入 Sc 元素,对比研究了 Sc 元素对 LPBF 镁稀土合金的成形性、组织特征以及力学性能的影响。研究发现,Sc 元素的添加拓宽了合金的成形工艺区间;成形件晶粒从 34 μm 细化至 4 μm ,织构强度大幅下降;合金 LPBF 态、T5 态、T6 态屈服强度、抗拉强度以及延伸率都得到了协同提升。本研究成功解决了 LPBF 镁稀土合金高强度和高成形性无法同时满足的矛盾,为其后续应用提供了解决方案。

C03-45

动态力学响应和形变诱导的超细同轴纳米晶粒促进了镁-钪合金中裂纹的形成

杨爽*, 刘飞, 向嵩

贵州大学

采用分离式霍普金森压杆(SHPB)冲击装置研究了镁-钪合金在高应变率下的动态力学响应及机理,揭示了其微观组织演变及裂纹形成机理。屈服应力和加工硬化率随冲击应变率的增大而显著增大。变形孪晶和非基面位错滑移是试验过程中的主要变形机制。与绝热剪切带促进裂纹萌生机制相反,我们发现在裂纹附近形成高密度超细同轴纳米晶粒,导致局部软化,促进裂纹萌生和快速扩展。大多数晶粒具有相似的取向,相邻晶粒之间具有独特的 24°、32°、62°、78°和 90°的取向差,表明这些晶粒主要是由界面转变形成的,这与再结晶晶粒具有明显的差异。我们的研究结果揭示了镁合金在高应变率冲击下的动态力学响应和裂纹形成机制。

C03-46

具有优异综合力学性能 Mg-7Y-2Zn-1Mn 合金微观组织演变及强韧化机制研究

罗宇伦*, 董志华, 蒋斌

重庆大学

本文通过改善挤压前热处理工艺获得了具有优异综合力学性能的挤压态 Mg-7Y-2Zn-1Mn (wt. %) 镁合金合金,并研究了挤压前热处理对 Mg-7Y-2Zn-1Mn 合金微观组织及力学性能的影响。研究表明,挤压态 Mg-7Y-2Zn-1Mn 合金综合力学性能与挤压前热处理工艺密切相关。挤压前进行固溶时效处理(T6 处理)后的挤压态 Mg-7Y-2Zn-1Mn 合金其屈服强度约为 314MPa,抗拉强度约为 396MPa,断裂延伸率约为 9.7%。研究表明,挤压态 T6 样品优异的力学性能主要与 LPSO 相及双峰晶粒组织密切相关。首先,挤压态 T6 样品具有更细小的颗粒状 LPSO 相及更高体积分数的片状 LPSO 相,有效地改善了合金的强度。其次,双峰晶粒组织的出现,不仅具有织构强化效应,还为合金提供了背应力强化效应。同时,由于层片状 LPSO 相协调塑性变形及粗大变形晶粒对裂纹扩展的延缓作用,也在一定程度上改善了合金的塑性。此外,本文还阐明了双峰晶粒组织的形成原因。挤压态 T6 合金样品中块状 18R-LPSO 相、颗粒状 18R-LPSO 相和晶内析出的层片状 14H-LPSO 相分别通过连续动态再结晶、颗粒刺激形核和未连续动态再结晶方式促进动态再结晶的形核,从而细化动态再结晶晶粒尺寸。而,挤压态 T6 合金样品中条状 LPSO 相的增加,抑制了动态再结晶过程。因此,在上述两种再结晶行为的影响下,挤压态 T6 合金样品展现出了双峰晶粒微观组织结构

C03-47

基于镁空气电池的 Mg-Ca 阳极放电性能研究

徐子涵^{*1}, 刘文君¹, 蒋斌², 杨华宝²

1. 重庆理工大学

2. 重庆大学

镁合金的自腐蚀效应和不均匀溶解使得镁空气电池的放电性能,特别是比能量密度远低于理论值。为此,本文通过微合金化调控的方法研究了 Mg-Ca 二元合金的腐蚀与放电性能。结果表明,随着 Ca 含量的增加,合金的耐腐蚀性呈先降低后增加的趋势,在 Ca 含量为 0.4 wt.% 时合金腐蚀速率最小,为 $0.23 \text{ mm} \cdot \text{y}^{-1}$,此时合金的综合放电性能最优异,其比能量密度和阳极效率分别为 $1870.26 \text{ mW} \cdot \text{h} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 60.26%。当 Ca 含量超过 0.6 wt.% 之后,虽然晶粒尺寸细化明显,但 Mg_2Ca 极材阳极相在晶界处聚集,微电偶腐蚀界面增大,阳料的自腐蚀加剧,放电时“块效应”明显。低 Ca 含量 ($\leq 0.6 \text{ wt.}\%$) 合金中弥散阳极相及其与基体的微电偶腐蚀界面在减缓自腐蚀的同时,生成薄且疏松的放电产物,从而实现了合金较好的放电稳定性和较高的阳极利用率。

C03-48

AZ31/ZK60 共挤压镁合金混晶组织及孪生行为研究

常小康*

山东大学材料科学与工程学院

为研究镁合金内部混晶组织及其受力过程中的孪生行为,本文对三种不同状态的 ZK60 心部材料及相同状态的 AZ31 套筒材料进行共挤压成型,获得含有不同组织的镁合金复合棒材。对其分别进行沿挤压方向的压缩试验,利用背散射电子衍射 (EBSD) 技术对压缩后不同状态组织进行分析。结果表明,共挤压镁合金在压缩过程中的加工硬化与二次孪晶有关,混晶组织对孪晶形成及饱和度有促进作用,进而提高材料强度;随着压缩过程应变速率增加,混晶组织的存在使得孪晶增加相对更明显。

C03-49

从溶质偏聚角度理解镁合金挤压组织

石东方*, 王乐耘, 曾小勤

上海交通大学

作为世界上最轻的合金,镁合金可以在满足构件基本性能要求的前提下,显著减少能源消耗和温室气体排放。溶质晶界偏聚会影响锻造镁合金的晶粒尺寸,织构乃至强度。然而,迄今为止,镁中的溶质晶界偏聚主要通过定性的实验观察来研究。在本工作中,我们建立了一个定量模型来计算二元 Mg 合金中溶质的晶界偏析能 (ΔE_{seg}),该模型创造性地考虑了晶界处的相对原子密度以提升模型合理性。我们利用该模型计算了 Mg 基体中溶质 Al, Zn, Ca, Sn, Y, Gd 和 Nd 的 ΔE_{seg} 。结果表明,稀土元素和 Ca 比 Al、Zn 和 Sn 更倾向于发生晶界偏聚。Gd 的强晶界偏聚倾向可解释挤压态 Mg-Gd 合金的晶粒生长速率和晶粒尺寸均小于挤压态 Mg-Al 合金和 Mg-Zn 合金。Gd 的强晶界偏聚倾向也是 Mg-Gd 挤压织构较弱的重要原因之一。本研究为理解溶质晶界偏聚的物理本质及其对微观组织演化的影响机制提供了新思路,也有望为密排六方金属材料的结构设计和性能优化提供指导。

C03-50

基于阳极第二相固溶处理的 Mg-4Li-3Nd-0.2Zn 及挤压态 Mg-xLi-1Ca 系阳极材料的镁空气电池性能研究

徐威*, 崔蓝月, 曾荣昌

山东科技大学

镁空气电池由于具有较高的理论放电电压(3.1 V)和比能量密度(6.8 kWh/kg), 并且结构简单、性价比高、热稳定性高、原料来源广泛等优点, 被认为是继锂电池后未来的理想储能设备。在放电过程中由于存在外加电流镁阳极材料会发生严重的负差效应(NDE), 导致镁合金阳极材料在 3.5 wt.% NaCl 的电解质中会发生严重的自腐蚀, 进而使得部分未参与放电过程的镁基体产生块状剥落现象即“块效应”, 极大地降低镁阳极材料在放电过程中的阳极效率和放电比能量。本工作开发了固溶处理的 Mg-4Li-3Nd-0.2Zn(质量分数, wt.%)及挤压态的 Mg-xLi-1Ca 系阳极材料, 研究了其在 3.5 wt.% NaCl 的电解质中的微观组织、电化学反应行为和放电行为。结果显示, 固溶处理后的 Mg-4Li-3Nd-0.2Zn 中作为阳极第二相的 $Mg_{41}Nd_5$ 晶粒尺寸增大, 体积分数降低, 使得其在合金中分布更均匀。在 450 °C 固溶处理后的镁阳极具有最低的腐蚀速率, 并且固溶处理后的镁阳极在放电电流密度为 5 mA/cm² 时, 阳极效率可以达到 61.29 %, 放电比能量达到 1358.98 mAh/g。固溶处理形成的均匀微观结构可以抑制镁阳极的自腐蚀和“块效应”。因此, 固溶处理后的 Mg-4Li-3Nd-0.2Zn 放电性能得到了显著提升。针对 Mg-4Li-3Nd-0.2Zn 在放电过程中存在的问题, 在本工作中进一步开发了挤压态的 Mg-x (x=1,4,8) Li-1Ca 系阳极材料。结果表明, 在放电过程中, Mg-4Li-1Ca 阳极具有最高的电池电压和比能量。在 1 mA/cm² 的电流密度下, 电池电压可以达到 1.56 V, 在 20 mA/cm² 电流密度下, 放电比能量为 1746.72 mAh/g, 阳极效率可达 82.09 %。Mg-4Li-1Ca 在放电过程中展现出的优异性能主要得益于其作为阳极第二相的 Mg_2Ca 密度和腐蚀电流密度最低, 在三种阳极材料中显示出最低阴极析氢动力学趋势, 可以有效的抑制镁阳极的负差效应以及“块效应”, 并且 Mg-4Li-1Ca 在放电超过 4 小时会在阳极表面生成一层具有保护性的放电产物膜可以进一步抑制放电过程中的自腐蚀从而提高镁阳极在放电过程中阳极效率和放电比能量。因此, 固溶处理是提高镁空气电池阳极放电性能的一种有效手段, Mg-4Li-1Ca 在放电过程中展现的优异性能可以认为其是一种具有潜在商用开发价值的镁空气电池阳极。

C03-51

多功能镁稀土中间合金制备及应用

沈亚肇*, 王奎, 蒋海燕

上海交通大学

针对镁稀土中间合金普遍存在组织分布不均、杂质含量较高, 成分波动较大等问题, 将纳米颗粒诱发的生长控制机制引入新型多功能镁稀土中间合金的研究开发。重点关注第二相种类、尺寸、分布及形态对中间合金组织及性能的影响, 优化新型镁中间合金凝固工艺, 成分偏析与组织成分分布不均匀的问题得到明显改善, 中间合金的组织性能遗传效果显著提高。获得集细化变质、颗粒强化和成分配比三种功能一体化的新型多功能镁稀土中间合金。

C03-52

晶粒取向调控对镁合金板材腐蚀行为的研究

张丹*, 杨青山, 颜宏伟, 刘广林, 李先政

重庆科技大学

镁合金以其轻质、高比强度和资源丰富的特点, 在“双碳”背景下受到广泛关注。然而, 镁合金在含氯溶液中容易形成松散多孔的腐蚀产物, 导致表面膜快速溶解和局部击穿, 限制了其应用范围。调控晶粒取向被认为是提高镁合金耐腐蚀性的重要方法。本研究通过不同工艺手段调控晶粒取向, 结合微观结构演变规律, 研究微观组织对镁合金耐腐蚀性的影响。采用电子背散射衍射(EBSD)分析晶体取向和微观结构, 结合扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)表征腐蚀形貌和腐蚀产物成分, 通过析氢实验和电化

学测试进一步研究腐蚀行为，重点探讨了晶粒取向、孪晶对耐腐蚀性的影响。研究表明，预变形引入的孪晶界可作为屏障阻碍进一步腐蚀，具有 $\{111\}$ 取向的再结晶组织表现出最佳的耐腐蚀性能，强调了晶粒取向和微观结构调控在提高镁合金耐腐蚀性中的关键作用。

C03-53

La 微合金化对铸造 Mg-Gd-Zn 合金微观组织及力学性能的影响

林金铭*, 付彭怀, 彭立明

上海交通大学材料与科学学院轻合金精密成型国家工程研究中心

热处理过程中晶粒的显著粗化是导致铸造镁合金室温力学性能低下的重要原因之一。为了克服该问题，设计了不同 La 含量的 Mg-10Gd-xLa-0.1Zn-0.4Zr ($x=0, 0.1, 0.2, 0.4$ wt%) 合金，采用电阻炉熔炼和金属型重力铸造方式制备研究合金，并结合光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)、透射电子显微镜(TEM)、硬度测试以及室温拉伸等研究手段系统研究了 La 元素对 Mg-Gd-Zn 合金微观组织、力学行为和强韧化机理的影响。结果表明，La 的添加使得高温固溶时 $Mg_{12}La$ 新相在晶界处形成， $Mg_{12}La$ 相能够有效阻碍晶界的迁移、抑制晶粒粗化；此外，La 的添加提高了时效 β' 相的数密度和面积分数，并一定程度上细化了 β' 相尺寸。其中，欠时效 0.4 La 合金具有最高的强度和适中的塑性，屈服强度(YS)、抗拉强度(UTS)和伸长率(EL)分别为 247 MPa、397 MPa 和 5.8%；峰时效 0.2 La 合金兼具优异的强度与塑性，YS、UTS 和 EL 分别为 245 MPa、383 MPa 和 12.1%，强塑积(PSE)高达 4.63 GPa·%。细小的晶粒尺寸有利于含 La 合金强度与塑性的同步改善，而高数密度的纳米 β' 相以及弥散 $Mg_{12}La$ 相在提高合金强度的同时对伸长率有一定的恶化作用。La 元素的合金化是克服镁合金强塑性矛盾现象、同时提高镁合金强塑性的有效策略之一。

C03-54

Mg-0.6Gd-1.3Y 合金铸态与挤压态阳极材料放电性能的对比研究

吴霜*¹, 刘文君¹, 蒋斌², 叶青¹

1. 重庆理工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

镁阳极因放电过程中的自腐蚀、不均匀溶解和表面产物堆积等问题，导致阳极利用率降低，放电过程不稳定，严重阻碍了镁空气电池的发展与应用。为此，本文从第二相设计和组织细化出发，对比研究了 Mg-0.6Gd-1.3Y 合金铸态和挤压态组织的腐蚀与放电性能。结果表明，挤压态组织的腐蚀速率较铸态组织降低 52%，其放电性能也明显优于铸态组织，在 $10\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 下，平均放电电压、阳极利用率、比容量和比能量分别达到 1.385V, 52.88%, $1150.09\text{mAh}\cdot\text{g}^{-1}$, $1592.35\text{mWh}\cdot\text{g}^{-1}$ 。挤压态合金的细小组织和弥散分布的稀土第二相使合金的腐蚀和放电性能提高，其中阴极相 Mg_5Gd 、微阴极相 $Mg_{24}Y_5$ 与镁基体之间产生的电势梯度变化抑制了放电过程中的析氢反应，促进放电产物的均匀脱落，放电后表面较为平整，腐蚀层疏松多裂纹，从而保证了放电过程的稳定和较高的比能量密度。

C03-55

车用高品质镁合金净密化机理探索及其应用

赵宇茸*^{1,2,3}, 任凌宝^{1,2,3}, 单智伟^{1,2,3}

1. 西安交通大学材料科学与工程学院
2. 金属材料强度国家重点实验室
3. 陕西省镁基新材料工程研究中心

现有商用镁合金产品存在性能指标波动范围大、平均值偏低的低品质问题，导致镁合金在车辆轻量化方面的实际应用情况远不如预期。其主要原因是受限于原镁的品质问题、以及传统铸造技术的固有特性，所获得的镁合金产品通常存在疏松夹杂、成分偏析和组织不均匀等问题。因此，本研究团队基于高品质镁

合金的开发设计思路,提出了采用滴铸法制备净、密、均的镁合金铸锭,以获得性能优异且稳定的高品质镁合金。目前,本研究团队已经实现了对镁合金中杂质元素、夹杂物的高效控制,与传统镁合金半连续铸锭相比,所制备镁合金滴铸锭的疏松、气孔缺陷体积占比也明显减少,最终所获得镁合金产品在力学性能指标的稳定性方面得到了显著提升。

C03-56

薄液膜下腐蚀产物对镁合金腐蚀的抑制作用

但宁宁*, 杨耀, 应韬, 曾小勤

上海交通大学材料科学与工程学院

镁及镁合金是最轻的结构材料,具有优异的电磁屏蔽性能、较高的比强度和比刚度,因此镁及镁合金被广泛应用于航空航天、汽车等对轻量化有需求的领域。如在海洋环境中可以使用镁合金来建造通讯塔。然而,在海洋的潮湿环境中镁合金容易受到腐蚀导致损坏甚至失效。暴露在潮湿海洋大气中的镁合金容易腐蚀,主要原因是:(1) 镁的标准电极电位很负 ($-2.372 \text{ V}_{\text{SHE}}$),在热力学上镁很活泼。(2) 海洋大气环境的电解液中离子浓度很高,加速了金属的腐蚀。(3) 在镁表面天然生成的腐蚀产物膜一般是疏松多孔的,因此 H^+ 、 CO_2 和 O_2 等具有腐蚀性的物质容易通过腐蚀膜层中的孔洞扩散并接触到新鲜的镁基体,造成严重的局部腐蚀。金属大气腐蚀的本质是在薄液膜下发生的电化学反应。镁合金在薄液膜下和在本体溶液中的腐蚀行为不同。在薄液膜下,腐蚀性物质的扩散和腐蚀产物的沉积对金属腐蚀速率的影响呈现竞争关系。

本工作研究了在薄液膜下和本体溶液中,高纯镁和 AZ91D 合金表面生成的腐蚀产物对两种金属腐蚀速率的影响。在极薄液膜下浸泡 24h 时,高纯镁和 AZ91D 合金保持较低的腐蚀速率,并出现了类似钝化的行为。其中,当高纯镁浸泡在薄液膜中时,镁表面会沉积一层致密的腐蚀产物膜,而当高纯镁浸泡在本体溶液中时则无此现象。高纯镁和 AZ91D 合金表面沉积的腐蚀产物主要成分是金属氢氧化物、氧化物和碳酸盐。此外,高纯镁和 AZ91D 合金在薄液膜下的 pH 值均低于本体溶液中的 pH 值。这可能是腐蚀产物中氢氧化镁溶解导致的。

本工作主要研究镁合金在薄液膜下的腐蚀机理。研究重点是利用薄液膜反应平台,完成薄层液膜下金属腐蚀的全过程监测。通过动电位扫描、电化学阻抗等电化学测试方法研究液膜厚度和温度的改变对纯镁和镁合金腐蚀行为的影响,建立准原位 pH 观察装置对腐蚀过程中液膜中整体区域的 pH 变化进行实时观察,并结合扫描电子显微镜、X 射线衍射对电极表面腐蚀产物的形貌及成分进行分析。研究薄液膜下纯镁及其合金的电化学腐蚀机理,探讨环境介质、温度、微观组织等因素对纯镁及其合金的电化学腐蚀行为的影响,揭示薄液膜下纯镁及其合金的电化学腐蚀规律。在此基础上,建立镁合金在含氯薄层液膜下局部腐蚀模型。

C03-57

微量 Gd 添加对镁铝系合金细化剂(Al-4Nb-B)细化性能的影响

周欢欢*¹, 白玉¹, 范文学², 郝海^{1,2}

1. 大连理工大学,材料科学与工程学院,凝固控制与数字化制备技术辽宁省重点实验室,辽宁,大连, 116024
2. 大连理工大学宁波研究院,宁波 315016

向熔体中添加细化剂是目前镁合金最有效的细化方法之一,细化剂细化效果取决于有效形核颗粒相的状态。本文采用固液反应法制备了用于 AZ91 合金的 Al-4Nb-B-0.5Gd 细化剂。结果表明,在 Al-4Nb-B 细化剂中加入 Gd 元素可以提升其对镁合金的细化效果,细化剂中 NbB₂ 颗粒相尺寸的减小、形貌的转变(柱状多面体向球状多面体)以及分布弥散性的提高可以提高细化剂的细化效率。结合微观组织分析可知,在细化剂中加入 Gd 元素之后,Gd 元素优先与 NbB₂ 颗粒相表面的活性触点结合,从而降低颗粒相的自由能,抑制了其长大和团聚倾向,增加了形核颗粒相的数密度,使细化效果得到有效提升。与 Al-4Nb-B 细化剂相比,0.5wt% Gd 的添加(Al-4Nb-B-0.5Gd)使 AZ91 的晶粒尺寸减小了 29.5%,抗拉强度和延伸率分别提

高了 14.5%和 6.9%。

C03-58

镁钛异质复合材料界面热/动力学稳定性研究

朱晓东*, 王璠, 周吉学, 程开明

山东省轻质高强金属材料重点实验室, 齐鲁工业大学 (山东省科学院), 250000, 济南镁基复合材料在异质颗粒强化作用下有望获得常温/高力学性能的提升, 然而碳化物、氧化物、氮化物等陶瓷微粒作为增强体, 往往会在提高屈服应力和极限应力时显著降低镁合金延展性。与镁同属密排六方结构的钛等硬金属颗粒被认为能获得较好的界面结合, 有利于提高塑性, 是较为理想的镁基复合材料增强体。然而, 目前关于 Mg/Ti 固液界面润湿、固相界面结构和性质的研究报道仍然较少。因此, 本研究通过建立 Mg/Ti 固液界面原子模型, 采用第一原理计算方法, 预测 Mg 熔体在异质界面处的凝固行为和本征固相界面结构, 研究 Mg/Ti 异质界面稳定性, 并基于过渡态理论探讨稀土合金元素在界面处的富集行为。研究结果将为解释铸造条件下的 Mg/Ti 复合材料界面结构形成和元素偏聚机理提供依据。

C03-59

仿空间条件下 Mg₇₅Zn₂₅ 合金的快速凝固组织与微观力学性能研究

龙强*, 胡亮, 魏炳波

西北工业大学

近年来, 镁合金由于密度低、切削加工性能优异和易回收利用等优点, 在航空航天和汽车制造领域得到了广泛应用。利用空间环境提供的微重力和无容器等超常条件揭示镁合金的凝固机理和相变规律, 实现组织调控, 对提升镁合金性能具有重要意义。

采用自由落体技术, 研究了二元亚包晶 Mg₇₅Zn₂₅ 合金在仿空间条件下的快速凝固机理和微观力学性能。实验获得的最大过冷度为 154 K。小过冷条件下, Mg₅₁Zn₂₀ 包晶相共析反应完全, 凝固组织由初生 α -Mg 相和 α -Mg+MgZn 共析相组成。随着过冷度增大到 44 K 时, 凝固组织中开始出现 Mg₅₁Zn₂₀ 包晶相且均以纳米晶形式存在, 平均晶粒尺寸为 150 nm。当过冷度增大到 124 K 时, 初生 α -Mg 相的形核被抑制, 凝固组织呈现壳核结构特征, 核区为 Mg₅₁Zn₂₀ 包晶相, 壳区为 α -Mg+MgZn 共析两相。当合金液滴过冷度达到 154 K 时, 共析反应被完全抑制, 得到只含有 Mg₅₁Zn₂₀ 包晶相的凝固组织。纳米力学性能分析表明, 相比于共析组织, Mg₅₁Zn₂₀ 包晶相组织具有高硬度、低弹性模量和高抗磨性。随着过冷度的增大, Mg₅₁Zn₂₀ 包晶相体积分数不断提升, 合金平均维氏硬度显著提高, 最高可达 283 HV, 提升了 39%。

C03-60

双峰织构 AZ31 镁合金在冷拉深过程中的微观组织演化及孪生行为研究

游云翔*, 谭力, 周涛

重庆理工大学

在新开发的等径角轧制和连续弯曲及随后退火 (ECAR-CB-A) 工艺制备的双峰织构 AZ31 镁合金板材上进行了冷深拉实验。结果表明, 在极限拉伸比 (LDR) 为 1.6 时, 板材可成功进行冷深拉, 并且成形性能优于室温下热轧制的基面织构板材。通过 X 射线衍射 (XRD)、光学显微镜 (OM) 和电子背散射衍射 (EBSD) 对深拉变形后的微观结构进行了研究。在外肩刚性区观察到大量的 {10-12} 拉伸孪晶 (ET)。由于双峰纹理, 当外肩区域受径向拉应力时, 被激活的 {10-12} 拉伸孪晶变体与基体内的基面滑移具有较高的施密特因子 (SF), 使得拉制杯的肩部能够维持较好的变形性能。此外, 在该区域还可观察到一些 {10-11} 压缩孪晶 (CT) 和 {10-11}-{10-12} 二次孪晶 (DT), 这些孪晶是由孪晶与滑移系统之间的局部应变适应所激活的。由于不同的应力条件, 内肩区域中 {10-12} ET 的体积分数要低于外部区域。在边缘区域发生的 {10-11}-{10-12} DT 所引起的应力集中是导致在拉伸比 (DR) 为 1.7 时拉制杯子破裂的原因。

C03-61

通过横向梯度挤压工艺形成多型织构改善 Mg-2.2Gd-0.4Zr 合金的成型性李永兴^{*1,2}, 徐军¹, 蒋斌^{3,4}, 尚欣², 杨宏^{3,4}, 周楠¹, 郑开宏¹, 潘复生^{1,3,4}

1. 广东省科学院新材料研究所 广东省金属强韧化技术与应用重点实验室
2. 东莞理工学院 机械工程学院
3. 重庆大学 材料科学与工程学院 国家镁合金工程技术研究中心
4. 重庆轻金属研究院

采用横向梯度挤压 (TGE) 工艺制备了 Mg-2.2Gd-0.4Zr 板材, 以改善其成型性。研究了不同 TGE 工艺 (模具倾角分别为 15°、30°、37°、45° 和 49°) 对挤压板材的微观结构、织构、室温力学性能和成形性的影响。此外, 还采用有限元模拟方法分析了 Mg-2.2Gd-0.4Zr 板材在挤压过程中的流动行为。作为对比, 对 Mg-2.2Gd-0.4Zr 板材采用传统挤压 (CE) 工艺进行加工。结果表明, TGE 板材的织构得到了有效改变。此外, TGE 板材沿横向 (TD) 呈现出不同的织构特征。随着 TGE 模具倾斜角的增大, 挤压板材中心区域的基极向挤压方向 (ED) 的偏移增加, 而在 1/4 边缘区域, 基极沿 ED 向 TD 方向偏移。TGE 板材中形成的多类型织构主要归因于挤压过程中沿 TD 的额外流速和沿 ED 的流动梯度。TGE-45 板材的延伸率高达 45.6%, 屈服应力低至 98.9 MPa。此外, TGE-45 板材的杯突值为 5.46 mm, 比 CE Mg-2.2Gd-0.4Zr 板材的 3.72 mm 高出约 47%。TGE 板材的成型性之所以得到改善, 是因为在埃里希森试验过程中有效协调了多方向的应变。

C03-62

CALPHAD 指导耐腐蚀 Mg-Al-Zn-Mn 合金设计及实验验证

车雪珍*, 李晓静, 刘树红, 杜勇

中南大学粉末冶金研究院

为改善镁合金的耐腐蚀性能, 采用 CALPHAD 方法和实验研究了合金元素 Al、Zn、Mn 含量对镁合金腐蚀行为的影响。基于 CALPHAD 方法计算的不同成分的 Mg-Al-Zn-Mn 合金的凝固路径、相组成, 以及中间相与基体相的电位差等信息设计了热力学腐蚀倾向最小的合金成分。通过微观组织观察、物相分析、腐蚀形貌观察、失重测试、电化学测试等实验验证了 CALPHAD 指导设计耐腐蚀 Mg-Al-Zn-Mn 合金的可行性。

C03-63

亚微米碳化硅颗粒增强镁基复合材料制备、微观组织和力学性能研究

李先政*

广东省科学院新材料研究所

本实验采用粉末冶金和搅拌铸造相结合的方法, 制备出了不同质量分数的碳化硅 (SiC) 亚微米颗粒 (1,2,3wt%) 增强 AZ91 镁基复合材料 (SiC/AZ91), 并对同等质量的 AZ91 合金进行相同实验以作对照。通过对 SiC/AZ91 复合材料与 AZ91 合金的挤压棒材取样, 并进行微观表征和拉伸测试, 探究亚微米 SiC 颗粒添加 AZ91 合金后, 对其微观组织及力学性能的影响。显微组织分析表明, 当 SiC 含量超过 1wt% 时出现较为明显的颗粒团聚现象。随着 SiC 颗粒含量的增加, 复合材料晶粒逐渐细化, 平均晶粒尺寸由 9.4 μ m 降低至 5.2 μ m; β 相 Mg₁₇Al₁₂ 逐渐减少并细化; (0002) 织构强度由 7.27 降低至 4.94。此外, SiC 颗粒在 Mg 基体中发生界面反应, 界面产物有 MgO、Mg₂Si 和 Al₄C₃, 同时还观察到 Mg₃₂(Al, Zn)₄₉ 沉淀相的存在。拉伸测试结果表明, 随着 SiC 颗粒含量增多, 屈服强度也逐渐提高, 当达到 2wt% SiC 时达到最大值 258MPa。抗拉强度和延伸率在 1wt% SiC 时达到最高, 分别为 350MPa 和 15.1%, 在超过 1wt% 含量时, 两项性能均出现下降。综上所述, 亚微米 SiC 颗粒添加 AZ91 合金后出现晶粒细化, 第二相细化, 织构弱化的现象, 并伴随有界面反应出现, SiC 颗粒在 Mg 基体中不具有化学稳定性。同时, SiC/AZ91 复合材料的屈服强度

随颗粒含量增长逐步提高,但抗拉强度和延伸率在 SiC 含量超过 2wt%时出现下降,1wt%SiC/AZ91 材料三种力学性能均有提高。

C03-64

亚微米碳化硅颗粒增强镁基复合材料制备、微观组织和力学性能研究

王锡灶*, 罗天骄, 黄秋燕, 李应举, 杨院生

中国科学院金属研究所

针对低成本阻燃 Mg-Al-Ca-Mn 合金强塑性协同难的问题,我们通过合金成分设计及合理的工艺制备了高燃点高强塑的阻燃 Mg-Al-Ca-Mn 合金。新型阻燃镁合金的燃点在 1050℃以上,抗拉强度 326MPa,断裂延伸率 11.8%,综合性能优异。合金优异的阻燃性能是由于 MgO/CaO 复合氧化膜的形成;定量分析表明晶界强化和织构强化为主导强化机制;可变形第二相和非基面滑移的激活提高了合金的塑性,从而实现了阻燃性和强韧性的良好配合。

C03-65

稀土镁合金搅拌摩擦加工及沉积增材技术研究

陈娟*, 李子言, 彭立明, 张彤晖, 韩靖宇

上海交通大学

固相连接技术--搅拌摩擦焊接(friction stir welding, FSW)于 1991 年由英国焊接研究所提出。搅拌摩擦加工以及搅拌摩擦增材技术均来源于搅拌焊接技术。搅拌摩擦加工则通过快速旋转的搅拌头使加工材料发生剧烈塑性变形和混合,使其微观组织均匀、致密化,可用作细化晶粒和粗大相、消除铸造孔洞缺陷的有效手段。搅拌摩擦沉积增材则利用轴向压力和高速旋转的剪切力使得材料沿行进方向逐层沉积在基板上,其突破了熔融增材界限,具有增材组织结构致密、力学性能高、增材效率高、安全性好的优势,满足对高性能、大型轻合金构件的低成本、短周期制备成型需求,在航空航天领域具有广泛前景。目前国内外关于搅拌摩擦沉积增材技术的研究尚处于起步阶段。本研究采用液体 CO₂ 冷却辅助急停技术研究了 Mg-Gd-Zn-Zr 合金在搅拌摩擦加工过程中的微观组织演变过程,呈现了第二相和晶粒细化的不同演化序列。同时,有效实现了稀土镁合金的搅拌摩擦沉积增材,力学性能较母材获得显著提升,证明了搅拌摩擦增材在获得高性能镁合金材料方面具有独特优势。

C03-66

Sn 元素添加对 Mg-Zn-Ca 系低合金镁合金微观结构和腐蚀行为的影响规律

李美璇*, 李宜家, 王慧远

吉林大学

近年来, Mg-Zn-Ca (ZX) 系低合金镁合金由于其良好的室温成形性、生物相容性以及成本低廉的特点受到广泛关注。然而, ZX 系低合金中通常会形成阴极 Ca₂Mg₆Zn₃ 相和 CaMgSi 相,这些第二相会导致阳极镁基体发生微电偶腐蚀。此外,低合金表面难以形成致密的氧化膜,无法有效抵御腐蚀性离子的攻击。因此, ZX 系低合金的耐蚀性难以满足实际服役需求,亟需探索提高耐蚀性新方法。合金化是提高镁合金耐蚀性的重要方法之一。Sn 元素具有良好的生物相容性。此外, Sn 元素还能参与表面氧化膜的形成,含 SnO₂ 的腐蚀产物膜会更加致密。综上,本工作探索了 Sn 添加对轧制退火态 Mg-2Zn-0.5Ca-xSn (x=0、0.5、1、2 wt.%) 合金微观组织和在 3.5 wt.% NaCl 溶液中浸泡腐蚀行为的影响规律。结果表明,随着 Sn 含量的增加,合金中 Ca₂Mg₆Zn₃ 相逐渐减少,块状的 MgSnCa 相逐渐增多,合金的耐蚀性先提高后降低。加入 1 wt.% Sn 后,合金耐蚀性达到最佳,腐蚀速率为 2.1 mm/y,相较于 ZX 合金,降低了~63%。同时,合金的屈服强度也提高了~40 MPa。尽管 MgSnCa 相相较于 Ca₂Mg₆Zn₃ 相,其与基体间的电势差更大,但是合金

表面的氧化膜却变得更加致密，从而抑制了局部点蚀的扩展，因此合金耐蚀性仍然得到了显著提高。随着 Sn 含量的增加，合金基体的表面电势提高，因此第二相与基体间的电势差降低，此外表面膜中 SnO_2 的含量也逐渐增大，因此 Mg-2Zn-0.5Ca-1Sn 合金具有最佳的耐蚀性。当 Sn 含量为 2 wt.% 时，合金中产生大量粗大的 MgSnCa 相，这些第二相诱发了严重的微电偶腐蚀，因此合金耐蚀性略微下降。本工作为新型低成本耐腐蚀低合金镁合金成分设计提供了借鉴。

C03-67

镁合金析出过程中的热导率和强度预测

罗群^{*1}，李谦²

1. 上海大学
2. 重庆大学

镁合金是实际应用中最轻的金属结构材料，通常采用的合金化方式虽然提高了其强塑性却大大降低了其导热性能。本工作厘清镁合金导热性能与合金中元素固溶度、第二相种类、析出相种类之间的关系，通过构建的 Mg 合金体系热/动力学数据库，设计具有不同 Zn 元素固溶含量、不同第二相种类和不同第二相含量的合金，分析析出过程中析出相的含量和尺寸变化，结合自建的热导率计算模型和硬度/强度贡献方程，预测了成分-温度-时间空间中的镁合金热导率和硬度/屈服强度，筛选出具有高强度高热导率的 $\text{Mg-Al/Zn-RE(La/Ce)}$ 合金，合金的热导率最高达 $156 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ，同时屈服强度达 135 MPa 。

C03-68

多元镁合金凝固过程偏析缺陷模拟研究

张昂*

重庆大学

凝固是铸造镁合金成形的关键过程，在此过程中由于溶质再分配产生的枝晶偏析，会恶化产品的力学性能和可加工性。本报告针对多元镁合金偏析缺陷，以 AZ91 和 VW92 两种典型的商用镁合金为研究对象，开发了多元镁合金偏析缺陷多尺度数值模拟架构，研究了偏析缺陷的宏观分布特征和微观形成机制。宏观层面，研究了不同冷却条件下温度场、溶质场和流场之间的相互作用和分布特征，以此为输入，在微观层面，首先对多元镁合金枝晶偏析相场模型进行了参数分析和实验验证，然后开展了多元镁合金枝晶偏析相场模拟研究，分析了不同温度条件对多元镁合金枝晶偏析的影响，研究了不同合金元素（非稀土和稀土、三元和四元）的偏析差异。研究结果对于深入理解偏析形成机制，指导偏析控制和提升镁合金产品的性能具有重要意义。

C03-69

镁合金压铸件质量智能预测与工艺参数优化

汪星辰*

上海交通大学

大型复杂薄壁结构件减重效果好、制造效率高，是汽车轻量化与制造高效化发展的必然趋势，然而大型薄壁一体化镁合金压铸件在压铸过程中面临铸件各部位铸造条件不均匀、影响铸件质量的因素众多、参数与质量间的映射关系复杂高维等问题，很难通过传统的“经验+试错”法来对铸件质量进行精确的预测与控制，导致成品率低，制造成本依旧较高。随着现代信息技术与人工智能的发展，基于数据驱动的机器学习方法已经逐渐融入先进材料研究与制造过程，推动了材料制造智能化的发展。本研究通过对新能源汽车镁合金压铸生产线数据的采集，建立了工艺参数与铸件质量的大数据集，分析了工艺参数间的相关性与数据集的完备性，建立预测铸件质量的机器学习模型，并开发了工艺参数反向优化算法软件。结果表明，采用 SMOTE 算法进行数据集前处理可以有效提升模型对少数类的训练度，增加缺陷类的检出概率，获得更

高的预测召回率。随机森林模型可以有效实现铸件质量预测，并获得工艺参数重要性排序。基于上述研究开发的工艺参数反向优化软件可以实现 6 种最关键工艺参数优化策略的秒级计算。然而，目前距离压铸全流程智能化控制还有很远的距离。研究压铸全流程工艺参数智能感知采集、铸件质量智能评估预测、关键工艺参数提取与大数据模型建立是未来轻合金压铸领域将要面对的主要挑战与重要研究内容。

C03-70

挤压稀土镁合金中非基面织构的形成机制及其在织构工程中的应用

靳学泽^{*1}，杨国静³，徐新宇⁴，单德彬³，郭斌³，徐文臣³，范存才¹，何斌斌²

1. 香港城市大学
2. 南方科技大学
3. 哈尔滨工业大学
4. 香港大学

镁合金在构件轻量化领域具有广阔的应用前景，然而，低塑性以及较差的成形性能等限制了镁合金广泛的工业应用。揭示挤压镁合金中非基面织构的形成机制可以为改善镁合金的成形性能提供有效途径。

该工作研究了 Mg-Gd 二元稀土镁合金中非基面织构的形成以及转变机制。结果表明挤压镁合金中的织构类型与钆（Gd）原子的浓度密切相关，其中纯镁挤压后再结晶织构为基面纤维织构，低合金化 Mg-Gd 二元合金挤压后再结晶织构为稀土型（RE-texture）织构，而高合金化 Mg-Gd 二元合金挤压后再结晶织构为 c-轴平行于挤压方向的异常挤压织构（C-texture）。其主要原因在于纯镁挤压过程中以不连续动态再结晶为主，且由于 $30^\circ\langle 0001 \rangle$ 晶界能较低而择优长大进而形成基面纤维织构。而 Mg-Gd 合金挤压过程中，Gd 原子有效地阻碍了合金的不连续动态再结晶过程，促进了剪切带内连续动态再结晶过程，且再结晶晶粒初始形核取向与变形母晶粒取向相近，而亚晶粒在长大过程中由于吸收锥面位错其 c-轴逐渐向挤压方向倾转，进而形成稀土型织构或者反常的 C 型织构。晶间取向差轴分析结果以及 TEM 表征结果表明剪切带是由于大量的第一锥面位错异质激活引起的。拉伸测试结果表明挤压 Mg-Gd 二元合金断裂延伸率与织构类型具有密切相关。因此，深入理解镁合金中各种织构类型的形成和转变机制对通过织构工程设计高性能镁合金具有重要意义。

C03-71

激光增材制造高强韧 VW63K 镁稀土合金：成形性、异构组织和专用热处理

邓庆琛^{*}，吴玉娟，彭立明，丁文江

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

Mg-6Gd-3Y-Zr（VW63K, wt.%）是一种常用的铸造镁稀土合金，呈现优异的强塑性协同从而具有广阔的工程应用前景。本研究首次采用激光粉末床熔融（Laser Powder Bed Fusion, LPBF）增材制造技术制备了 VW63K 合金，并系统研究了该合金的成形性、显微组织特征和后续热处理制度。LPBF 态 VW63K 合金在很宽的工艺参数区间都可实现大于 99.6% 的致密度和不开裂，表明具有优异的成形性。LPBF 态 VW63K 合金具有异构显微组织，包括粗大柱状晶粒、细小等轴晶粒（整体平均晶粒尺寸为 $21.72\ \mu\text{m}$ ）、均匀分布的纳米 $\text{Mg}_{24}(\text{Gd}, \text{Y})_5$ 第二相和大量位错。因此，与铸态合金相比，LPBF 态 VW63K 合金的强度和塑性同时提升，屈服强度(YS)、抗拉强度(UTS)和延伸率(EL)分别达到 $218\pm 4\ \text{MPa}$ 、 $284\pm 5\ \text{MPa}$ 和 $11.9\pm 1.6\%$ 。此外，优化了 LPBF 态 VW63K 合金的直接时效(T5)热处理工艺（ $200^\circ\text{C}\times 128\ \text{h}$ ），可产生致密分散的 β' 时效析出相，这种 T5 热处理在提高力学性能方面优于传统的固溶加时效(T6)热处理。LPBF-T5 态 VW63K 合金的 YS、UTS 和 EL 值分别为 $293\pm 6\ \text{MPa}$ 、 $359\pm 4\ \text{MPa}$ 和 $2.9\pm 0.7\%$ 。值得注意的是，LPBF-T5 态合金的屈服强度在不同工艺制备的 VW63K 合金中最高，甚至超过了挤压-T5 态合金。本研究表明 VW63K 合金非常适合用于 LPBF 近净成形具有复杂形状的高强度镁合金工程构件。

C03-72**稀土镁合金设计、制备及应用**

刘勇*

南昌大学

围绕稀土高质量应用需求,针对高性能镁合金应用瓶颈,开发高品质稀土镁中间合金,研究稀土镁中间合金电解机理和净化机制,研究稀土中间合金类型与高性能稀土镁合金组织和性能的映射关系,研究稀土镁合金成分设计、组织调控与性能之间的关联,最后针对稀土镁合金的工业应用提供一些思考。

C03-73**Mg-Gd 合金热膨胀特性及力学性能演变规律**

董志华*, 王翠红, 蒋斌, 潘复生

重庆大学

开发低热膨胀、高力学性能的新型镁合金,对减少镁合金质量缺陷、提高镁合金使用性能、拓展镁合金应用领域均具有重要意义。本研究采用实验及理论计算相结合的方法,研究了 Gd 元素添加对 Mg 基体热膨胀行为及力学性能的影响规律及机理。铸态及固溶状态下, Mg-xGd 合金线性热膨胀系数均随 Gd 含量的增加而明显降低,而其强度则有明显提高且保持较好的塑性,兼具低热膨胀、高力学性能的优势。Mg-Gd 合金的低热膨胀特性主要与固溶 Gd 元素对镁基体晶格振动能的影响有关,而 Gd 元素较强的固溶强化能力及晶粒细化作用,以及对非基面滑移的影响,则是强度明显提升且保持较好塑性的重要原因。

C03-74**镁锂合金表面超疏水防护膜层的构筑与耐蚀机理**

郭恩宇*, 欧阳义波, 周志豪, 张至柔, 王同敏

大连理工大学

镁锂合金是一种超轻合金,是重要的轻量化材料。但镁锂合金的耐蚀性差,在腐蚀介质环境中容易失效,常需要经过表面防护实现其工程应用。超疏水涂层由于其疏水特性,具有优良的抗腐蚀能力。本报告将介绍本课题组近些年来针对镁锂合金表面超疏水涂层制备及机理方面的研究成果,包括:(1)采用磁控溅射法在镁锂合金表面沉积了一层与镁电位相近的铝薄膜,该铝薄膜能够在空气中快速氧化,形成致密的氧化铝膜,结合喷涂技术在铝层表面构筑了烷基烯酮二聚体涂层,研究表明合金表面具有超疏水特性,耐蚀性大幅调高。(2)采用一步电沉积法在十四酸/乙醇/硝酸钪电解液中制备了镁锂合金表面超疏水涂层,制备的超疏水涂层致密均匀,无传统涂层存在的裂纹、气孔等缺陷。(3)针对超疏水表面耐久性差的问题,本研究提出一步电沉积超疏水表面并旋涂石蜡基油凝胶制备自修复、耐久超滑涂层的方法。该涂层具有优异的自修复能力,能够抵御外部机械损伤。自修复能力源于涂层约 90%的硅油成分,其优异的流动性赋予油凝胶强大的自愈合能力。由此解决了传统超滑涂层存在工艺复杂、油相易失、耐久性差等缺点。

C03-75**高性能稀土镁合金材料设计与制备**

吴玉娟*, 邓庆琛, 武千业, 彭立明, 丁文江

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

镁合金作为最轻的金属结构材料在航空航天和国防军工装备等领域具有广阔的应用前景,添加稀土元素的镁稀土合金相比于其他镁合金体系具有更优异的综合力学性能。本研究采用传统铸造和变形工艺以及新兴的增材制造工艺制备了一系列高性能 Mg-Gd 系镁稀土合金材料,阐明了显微组织演化规律和强韧化机制,并成功制备了工程样件。

C03-76

高使役耐热稀土镁合金组织性能调控方法

张至柔*, 郭恩宇, 陈宗宁, 康慧君, 王同敏

大连理工大学材料科学与工程学院

与传统的 AZ 系、ZK 系商用镁合金相比, 稀土镁合金 (Mg-RE 合金) 具有更加优良的强度和塑性, 在中高温恒定载荷下具有更高的耐热性, 在航空航天、汽车、国防领域有广泛的应用前景。本研究以不同稀土种类与含量的 Mg-Y、Mg-Nd、Mg-Gd 和 Mg-Y-Nd 合金轧制板材为例, 研究了不同温度和应力下的蠕变行为, 结合显微组织观察, 对合金蠕变前、蠕变过程中、断裂后的显微组织进行观察分析, 区分静态时效和动态时效过程中析出相的演化, 分析不同析出相对于蠕变行为的影响机理。并且通过对比分析二元合金和三元合金的蠕变行为和显微组织, 辨明了稀土元素对镁合金抗蠕变性能的单独及协同影响。本研究深入分析了蠕变过程中的组织演变和位错运动情况, 揭示了蠕变过程中位错和析出相的交互作用, 丰富稀土镁合金蠕变理论, 为镁合金蠕变性能调控提供了实践和理论指导。

C03-77

密排六方金属孪生辅助晶格重构实现低摩擦的机制

李勇*, Xiang Chen

南京理工大学

机械运转时材料之间的摩擦会造成能量的损耗、工作效率降低及部件寿命缩短。据统计, 全世界三分之一的能量以各种形式消耗在摩擦上, 在自然资源日益匮乏和材料素化思想的大环境下, 揭示摩擦耗能机制对于节约能源和资源具有重要意义。19 世纪中叶, 科学家指出金属材料摩擦能量主要以表层材料塑性变形的形式耗散。通常认为, 金属材料沿着位错滑移系摩擦时摩擦耗能最低, 即以密排面为摩擦平面、密排方向为摩擦方向时, 金属摩擦系数达到最低值。针对上述问题, 本研究测量了密排六方结构纯镁单晶中沿着基面上不同滑动方向的摩擦系数, 结合摩擦诱导微结构表征, 发现在基面上垂直于 a 轴(位错滑移方向)滑动时呈现最低的摩擦系数, 亚表层形成了由孪生辅助晶格重组的摩擦诱导微结构。然而在滑移方向(a 轴)上摩擦系数较高, 亚表层形成了大量<c+a>位错。结合原子尺度摩擦模拟和应变能分析, 阐明了位错运动和孪生的能量耗散机制差异, 发现低摩擦现象源于低能态的孪晶辅助晶格重组结构, 而高能态的<c+a>位错容易提高摩擦阻力。基于实验和模拟结果, 我们提出了密排六方结构金属中“孪生辅助晶格重组实现低摩擦”的新物理机制。

C03-78

Mg-Al-Si 多相合金弹性模量计算及 Mg₂Si 细化机理研究

刘树红*, 黄金辉, 杜勇

中南大学

弹性模量通常用来评价材料的力学性能, 如塑性、脆性、强度、硬度等。如何有效并可靠的计算两相及三相以上合金的弹性模量, 对于合金材料的设计研发具有重要意义。我们基于第一原理计算和 CALPHAD 方法提出了一种计算有限温度多相合金弹性模量的方法并应用于 Mg-Al-Si 合金弹性模量计算。计算和实验测定数据的比较验证了计算方法的有效性和可靠性。基于该方法, 我们进一步预测了 Mg-Al-Si 合金 623K 高弹性模量的成分范围。在此基础上, 采用实验和第一原理计算研究了 Ca 和 Y 细化 Mg₂Si 的机理。研究工作期望为高模、高强镁合金的成分设计提供理论基础。

C03-79

低热膨胀镁合金强韧化机制研究

吴素娟*, 黄亚东

重庆大学

Mg-Gd-Y 系合金作为优异的航空航天构件材料, 制备和服役过程中因热胀冷缩易导致构件变形、微裂纹生成及结构破坏而失效。加入负热膨胀粒子是抑制镁合金热膨胀的有效方法, 但因镁较高的化学反应活性易与粒子反应致使负热膨胀效应消失, 且两相界面严重影响镁基材料的力学性能。为此, 我们提出添加结构稳定的锰基反钙钛矿结构的负热膨胀粒子, 利用其磁弹性交互作用以及丰富的磁有序态相变, 在降低镁合金热膨胀系数的同时, 实现镁基材料强度的提高, 并保持优异的塑性。最后结合理论分析我们提出了局域磁矩诱导的强韧化机制, 将为高温镁合金的热物性调控提供了新的策略和指导依据, 推动镁合金在航空构件中的广泛应用。

C03-80

高性能镁稀土合金及其复合材料制备与研究

常治宇^{*1}, 吴玉娟², 邓庆琛², 兰乔², 刘保良², 李大全³, 冯剑³, 彭立明², 丁文江²

1. 绍兴市特种设备检测院

2. 上海交通大学

3. 中国有研科技集团有限公司

面对新能源汽车、航空航天运载工具和国防武器等领域对轻量化结构材料的迫切需求, 开发满足关键承力应用要求的高性能铸造镁合金及其复合材料具有重要意义。半固态技术是制备高完整性合金铸件的有效方法, 而镁基复合材料有望在轻量化的基础上进一步提高材料的强度和刚度。为此, 我们以典型的时效硬化型 Mg-Gd 系合金为研究对象, 系统地研究制浆参数对浆料组织的影响规律以及合金成分、成形工艺参数和热处理制度对合金组织性能的影响, 获得浆料组织与合金组织性能的调控手段。探明浆料中初生 α -Mg 的演变机制, 揭示流变压铸合金中第二相/时效析出相的精细结构演变规律与合金强韧化机制, 开发出了高强度压铸镁稀土合金 (抗拉强度 (UTS) 329MPa、屈服强度 (YS) 209MPa、延伸率 4.5%)。

此外, 我们采用挤压铸造技术制备了硼酸铝晶须增强镁稀土合金基复合材料, 研究了该材料的微观组织、界面特征、机械性能和断裂行为。结果表明, 晶须增强体的引入可以使合金基体的晶粒从 $29\pm 2\mu\text{m}$ 细化至 $2\pm 0.5\mu\text{m}$; 并在基体和晶须界面发现了富含 Gd, Y, Zn, Zr 等元素的双层界面区。该复合材料的室温 YS、UTS 和杨氏模量分别达到 $364\pm 13\text{ MPa}$, $380\pm 16\text{ MPa}$ 和 $77.8\pm 2.1\text{ GPa}$, 实现了镁基复合材料高强度和高模量的一体化组合。

C03-81

Ti 颗粒增强镁基复合材料的组织与力学性能研究

李建波*

重庆大学

镁基复合材料具有低密度、高比强度、比模量、比刚度等一系列优异性能, 在航空航天、国防军工、汽车等领域具有广泛的应用前景和市场价值。镁基复合材料的增强体一般采用陶瓷等硬质增强体。镁基复合材料变形过程中, 增强体与镁基体变形不协调, 在增强体与镁基体界面产生应力集中, 使镁基复合材料的塑性大幅下降。而在金属结构材料应用中, 往往需要材料兼具较高强度和优良的塑性, 以保证良好的结构稳定性。同时, 随着航空、航天及轨道交通轻量化发展, 对镁基复合材料的力学性能、耐磨性提出了更高的要求。因此, 研究和发​​展兼具较高强度和优良的塑性的镁基复合材料对其应用具有重要意义。在本工作中, 采用粉末冶金、搅拌铸造等方法制备了 Ti 颗粒增强 AZ31 镁基复合材料, 研究了挤压态 Ti 颗粒增强 AZ31 镁基复合材料的显微组织、界面结构、力学性能和耐磨性, 分析了 Ti 颗粒与

镁基体的界面结构对挤压态 Ti 颗粒增强 AZ31 镁基复合材料晶粒细化和力学性能的影响机制，为高性能镁基复合材料的开发与应用提供理论支撑。

C03-82

镁合金植入体表面纳米涂层的构建及其降解调控与功能化研究

李令玉*¹, 袁广银², 裴佳²

1. 山东大学齐鲁医院-山东大学

2. 材料科学与工程学院-上海交通大学

可降解镁合金被誉为“革命性的医用金属材料”，其在狭窄性病变血管内完成使命后可完全降解吸收，避免永久性支架材料长期刺激引起不良事件发生。然而，镁合金降解过快、不可控问题限制了临床应用，导致结构过早失效、影响生物相容性。对此，本研究摒弃了常规载药聚酯类涂层技术，巧妙地在镁合金支架表面设计通过非水相合成法制备出邻苯二酚 catechol 基高分子纳米涂层来引入不同含量的铜。铜在分子网络中的交联引入不仅没有像合金化引起电偶腐蚀，反而显著降低镁合金基体早期过快降解（1 个数量级以上）。该载铜高分子涂层修饰的镁合金支架显示了优异的组织细胞和血液相容性，抑制溶血和抗血小板粘附等特性。同时，可控持续缓释的 Mg^{2+} 离子和 Cu^{2+} 离子具有协同诱导血管细胞选择性的生物活性。动物体内植入实验进一步验证显示：与不可降解 CoCr、常规氟化涂层 Mg 相比，该载铜涂层镁合金支架具有优越的快速再内皮化功效（7 天即完成，为已有报道最快之一）、显著减轻内膜增生、炎症反应等，并在 3 个月的随访期间可延缓保持支架结构完整性。该研究为可降解金属基材料开辟了基于“与基体主动交互作用(AIM, Active Interplay with the Matrix)”的表面功能化改性设计新策略，有望更好地开拓新一代可降解医用金属基器械的功效优势、推动其转化应用。

C03-83

大尺寸低各向异性镁稀土合金锻件多向锻造成形技术研究

曾健*, 王锋华, 董帅, 王甫霖, 靳丽, 董杰

上海交通大学

大尺寸低各向异性的高性能镁稀土合金锻件在航空航天和交通运输领域有着巨大的应用前景。基于热压缩应力应变曲线和动态材料模型，建立了均匀化态 Mg-8.5Gd-2.5Y-1.5Zn-0.5Zr 合金的三维热加工图，在不同可成形参数下模拟了方棒的单向锻造和多向锻造过程，获得了方棒成形的最优工艺参数：450℃、10mm/s。通过最优参数下的单向锻造（SDF）和多向锻造（MDF）实验，分别研究了块状 LPSO 相对镁稀土合金锻件力学性能各向异性的影响。结果表明：块状 LPSO 相对力学各向异性有一定的影响，尤其是延伸率。MDF 后的块状 LPSO 相具有更规则的形状和更小的尺寸，并且分布均匀，这是延伸率的低各向异性的原因。此外，MDF 方棒的时效硬化能力高于 SDF 方便。最后利用多向锻造技术成功制备了尺寸为 $\phi 900\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的圆饼形锻件。经过 T6 处理后，锻件各部位组织均匀，性能较为一致，边部和心部的抗拉强度分别为 406MPa、391MPa；屈服强度分别为 327MPa、318MPa；延伸率分别为 16.0%、13.3%。

C03-84

镁合金建筑模板保护层的破坏及其对策

李红旗*

陕西匡迪建筑装饰工程有限公司 镁合金防腐技术研发中心

镁合金建筑模板以其质量轻、力学性能优良，尺寸稳定、表面平整、施工质量好、使用方便、施工效率高、安全隐患小、劳动强度低、对吊装机械依赖少等诸多优点，深受高层建筑施工单位的喜爱，然而由于镁化学性质活泼。特别是镁模板在使用中，当外力造成防护层损伤而透底时，裸露处的镁合金基体在混凝土浆液包围下，持续发生电化学反应，导致基体快速深度腐蚀，致使防腐层大面积脱落、严重影响到镁

模板的使用寿命。已成为制约镁合金建筑模板应用的关键技术瓶颈。本文从镁合金建筑模板表面防护层破损的类型、混凝土构成以及不同组分对镁模板防护层的作用出发、分析了镁合金建筑模板防护层在使用中的破坏过程，得出了镁模板表面防护层的破坏是周期性循环交变应力环境下，电化学腐蚀长时间作用的结果，介绍了利用李红旗镁合金模板防护涂层和李红旗镁合金涂层损伤现场快速修补保护漆，解决这一问题的方法、实验过程和实验结果。目前这种镁模板保护涂层正在多个建筑工地进行实际应用试验。

C03-85

高阻尼镁合金应变振幅相关性研究

万迪庆*

华东交通大学材料学院

镁合金具有高比强度、高比刚度和高阻尼减振能力，完全符合以轻量化、高速化和低碳为主题的现代工业急需，在多个工业领域将发挥无可替代的作用。镁合金的阻尼减振能力同应变振幅密切相关，表现为在不同应变振幅下具有不同阻尼能力，并且其位错内耗机制也随之发生明显变化，目前这种机制转变对其工程应用有何潜在影响远未得到深入研究。本报告以工程用高阻尼镁合金为研究对象，在宽应变振幅范围内深入研究其阻尼应变振幅相关性，揭示镁合金在不同应变振幅下的位错运动形式并区分其内耗机制，并探究材料和测试条件等因素对镁合金阻尼能力的影响，为工程用阻尼镁合金提供必要的技术和理论支撑。

C03-86

纳米颗粒对应变率相关的镁合金压缩流动应力的影响---数值模拟研究

陈洋*

桂林电子科技大学

针对添加纳米颗粒的镁合金，实验发现在初始塑性变形阶段，镁合金的压缩流动应力表现出负应变率效应，即压缩流动应力随应变率的增加而减少（应变率范围 $10^{-3}/s \sim 10^3/s$ ）。目前这一实验现象背后的机理尚不清楚，需要进一步深入研究。本工作提出了一个数学模型，用来描述拉伸孪晶的启动；模型同时包含了纳米颗粒与应变率对于镁合金变形力学行为的影响。该模型与晶体塑性理论框架相结合，用来研究镁合金在不同应变率（ $10^{-3}/s \sim 10^3/s$ ）载荷下的压缩力学性能。数值模拟结果显示出负应变率效应，与实验结果一致。基于模拟结果，本工作揭示出镁合金负应变率效应的微观机理：纳米颗粒对于拉伸孪晶启动的阻碍作用随着应变率的增加而显著减少。基于本工作提出的模型，对纳米颗粒、应变率、晶粒尺寸以及初始织构等因素对于镁合金压缩流动应力的耦合作用进行了研究。

C03-87

一种高比强度抗腐蚀超轻纳米镁合金

Wanqiang Xu（徐万强）^{*1,2,3}, Jing Jia¹, 唐颂^{1,4}, 辛同政^{1,5}, 沙刚^{3,4,8}, 肖阳⁶, Nick Birbilis^{3,7}, John E.

Daniels¹, Yu Wang¹, Michael Ferry^{1,3}, 徐万强

1. UNSW Sydney（新南威尔士大学）

2. 华北理工大学

3. Australian Research Council Centre of Excellence for Design in Light Metals, Australia

4. 南京理工大学

5. 大连理工大学

6. 郑州大学

7. Monash University

8. The University of Sydney

具有高强度、塑性和耐腐蚀性的超轻合金，是国家第十四个五年计划和自然科学基金委重点研发的材料，在交通、航空航天、国防、生物医学、体育和电子产品等领域具有广泛的应用前景。该类合金的塑性和耐腐蚀性通常与强度成反比关系，造成这三者难以同时优化，给超轻合金的发展和应用设置了一道很高的障碍。同时，在所有金属结构材料中，镁合金最轻，比重比铝合金还要轻 1/3 以上，具有比强度高、减震性能好等很多优点，但易于遭受腐蚀，也由于受到其六方晶格限制而室温塑性和成形性能很差，这极大地限制了它成为满足上述超轻合金要求而获得广泛应用的潜力。

在此条件下，我们成功研发了一种密度为 1.4 g/cm³ 左右的镁锂合金，经过铸造、热加工、淬火、时效和冷加工处理，在其内部通过条幅分解方式，形成了体心立方纳米组织。该组织不但赋予了该合金在所有轻质合金中最高的比强度和很高的室温塑性和成型性能，而且由于合金表面在大气环境中自然地形成了一层可以自愈的致密碳酸锂薄膜，而赋予该合金优异的耐腐蚀性能。该成果为具有高强、高塑性和耐腐蚀性能的超轻合金的发展开辟了一条新的道路。

C03-88

Towards dense corrosion-resistant plasma electrolytic oxidation coating on Mg-Gd-Y-Zr alloy by using ultra-high frequency pulse current

Shuai Dong*, Jie Dong

Shanghai Jiao Tong University

Ultra-high frequency (≥ 10 kHz) was employed to produce plasma electrolytic oxidation (PEO) upon the surface of Mg-8Gd-3Y-0.5Zr alloy (GW83, in wt%) to understand its mechanistic contribution to the growth of PEO. The maximal pore area of the resulting PEO coatings was reduced by about one order of magnitude when frequency was increased from 0.5 kHz (65.8 μm^2) to 20 kHz (7.1 μm^2), which is attributed to the ten times reduction in single pulse energy. Cross-sectional SEM micrographs and electrochemical impedance spectroscopy confirm that the PEO coatings obtained at low frequency (i.e. 0.5 and 5 kHz) were consisted of an inner barrier layer and an outer porous layer, while ultra-high frequency PEO coatings were divided into three distinct layers: an inner barrier layer, an intermediate compact layer, and an outer porous layer. Moreover, thickness of the effective corrosion barrier layer of PEO coating including inner barrier layer and intermediate compact layer increased as a function of frequency, resulting in high corrosion resistance of the ultra-high frequency PEO coating. Those findings are anticipated to provide new insights to guide design and preparation of high-quality PEO coatings to tackle corrosion challenges of Mg alloys.

C03-89

高导热镁合金设计、制备及性能调控

任凌宝^{*1,2,3}, 练政希^{1,2,3}, 王悦存^{1,2,3}, 单智伟^{1,2,3}

1. 西安交通大学材料科学与工程学院
2. 金属材料强度国家重点实验室
3. 陕西省镁基新材料工程研究中心

热导率是轻质镁合金散热器件的重要物理性能设计参数。镁二元固溶体系证实固溶元素或第二相一般对镁基体电子导热呈劣化影响，故合金化后一般低于纯镁且常随合金元素含量增加而呈衰减趋势，但多种微量元素及其耦合作用对镁固溶体热导率行为影响规律尚待深入研究。本团队基于 H-R 固溶体准则并结合晶界/晶内强化热力学规律，设计具备晶界溶质共偏聚与晶内纳米相析出的高导热显微组织特征。通过在高纯度（99.99%）镁基体中多微量元素耦合作用调制实现室温热导率反超工业纯镁（ $\sim 160 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）已报道数值 9%，最高可达 $175 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，扩展了镁合金材料热导率设计边界；同时其室温断裂总延伸率超过 35% 且屈服强度超过 180 MPa，在 3.5%NaCl 溶液中呈现均匀腐蚀且速率可降至 0.3 mm/y，证明该类合金具备导热性与机械性能、耐蚀性能的良好协调性，有望应用于通信装备热管理领域。

C03-90

极端环境 X 射线原位 CT 开发与在先进镁合金中的应用

缪克松, 李仁庚*

南京工业大学

材料基础科学理论与先进表征技术开发是材料科学发展的两条主线, 材料表征技术与仪器贯穿材料研发、生产制造、工程应用、服役评价全过程, 不可或缺。近年来, 随着材料研究的不断深入, 现有表征仪器已无法满足材料前沿研究需求, 亟需开发三维、原位、可检测材料深部的表征仪器与技术。基于 X 射线强穿透能力和计算机断层扫描 (CT) 技术, 结合亚微米级精密控制转台和机械控制, 实现微米级高分辨 X 射线 CT 成像, 可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像; 突破了极端环境与 CT 耦合技术, 独创采用非接触式加热模式, 可实现超高温、超低温、复杂应力、应力腐蚀、热压烧结等服役环境下材料三维原位表征。目前该技术已应用于高温合金、镁合金、铝合金、钛合金、碳纤维复合材料、陶瓷、混凝土、岩石等材料, 为三维定量化研究极端环境下关键材料与部件组织与缺陷演变规律提供了有力手段。高性能原位 X 射线 CT 设备的成功研发, 将极大提升关键结构材料在服役工况下的可靠性和安全性。

C03-91

高强高耐腐蚀 Mg-Y-Al 合金的设计制备与耐腐蚀行为研究

朱庆春*

中科院上海应用物理研究所

镁是最轻质的金属结构材料, 在航空航天、3C 数码等应用的轻量化上起到了重要的作用。但镁合金的耐腐蚀性一直不佳, 改善镁合金耐腐蚀性的同时保持优良力学性能是其大规模应用的瓶颈性问题。稀土合金化是镁合金强韧化的有效策略, 但稀土元素大量添加易引入第二相造成电偶腐蚀, 从而导致合金腐蚀性能恶化, 因此实际使用的镁合金高强度和耐蚀性难以兼顾。本研究设计制备了一种新型 Mg-Y-Al 合金, 该合金简单加工处即可获得超过 350 MPa 的屈服强度和低于 0.2 mm/year 的腐蚀速率, 少量 Al 元素的添加使得合金保持了 Mg-Y 系合金的高强韧性, 同时合金表面形成了保护性明显的腐蚀产物膜层, 耐腐蚀性能明显提升, 对该合金表面腐蚀产物形成进行了研究, 研究结果将有助于推动高强不锈钢镁的设计与制备。

墙报

C03-P01

Mg-(Al, Zn)-(La, Nd, Sc, Y)三元体系的相图热力学研究

马成场¹, 郑伟森^{*1}, 王静雅², 鲁晓刚¹, 曾小勤²

1. 上海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

随着集成计算材料工程 (ICME) 的发展, 多种材料计算方法应用于高性能材料的设计研发, 不仅可以轻松地探究大量的合金体系和工艺参数, 有效地探索宽广范围的成分空间, 而且突破了传统试错法的成本和时间限制。计算热力学作为重要的计算方法之一, 通过与专有数据库的结合, 使得多元多相材料的相变过程和显微组织演变模拟成为可能。而专有数据库的可靠性直接决定了相变行为预测的准确度。然而, 针对高导热、高耐蚀镁合金的热力学数据库仍需进一步完善。鉴于此, 本工作采用相图计算 (CALPHAD) 方法开展 Mg-(Al, Zn)-(La, Nd, Sc, Y)三元体系的热力学建模研究, 完善高导热、高耐蚀镁合金体系的热力学数据库, 为高性能镁合金的集成计算设计提供基础依据。

C03-P02

车用镁合金激光焊接成形缺陷及其对疲劳性能的影响

王帅^{*1,2,3}, 刘泽宇^{1,2,3}, 谢千峰^{1,2,3}, 任凌宝^{1,2,3}, 刘博宇^{1,2,3}, 单智伟^{1,2,3}

1. 西安交通大学 金属材料强度国家重点实验室
2. 西安交通大学 材料科学与工程学院
3. 西安交通大学 陕西省镁基新材料工程研究中心

镁合金在轻量化载运装备领域应用潜力巨大, 激光焊接适用于镁合金车体薄壁零件高效连接成形; 然而, 由于镁合金激光焊接快熔激冷特征, 极易在焊缝区域引入微孔洞缺陷(氢气孔或匙孔等), 尽管针对微孔洞缺陷成因已多有研究报道, 但其对车用镁合金激光焊件疲劳性能的影响规律尚待澄清, 而这将直接关系到镁合金车体的可靠安全服役。本团队基于已开发的镁合金轻量挂车实际荷载状态, 采取全流程品质化管控制备了高品质镁合金挤压板材与专用丝材, 通过优化激光焊接工艺参数, 实现大于 80%母材抗拉强度的稳定焊接效率; 然后提取参考车体路谱振动状态, 系统开展了车用镁合金母材及焊接接头疲劳试验; 初步结果显示微孔洞缺陷形态、大小及分布特征对镁合金的疲劳性能有显著影响。本研究为提高车用镁合金激光焊接性能提供了理论支撑和重要数据参考。

C03-P03

Mg-Al-Ca 系合金热压缩变形行为及其非对称挤压研究

吕奕澎*, 黄秋燕, 李应举, 杨院生

中国科学院金属研究所

本文以 Mg-6Al-3Ca-1Zn-0.3Mn 合金为研究对象, 研究了合金在 250°C-400°C 和 1s^{-1} - 0.001s^{-1} 热压缩变形过程中的流变行为。合金热压缩后的真应力-真应变曲线表现出明显动态再结晶特征, 流变应力随温度的升高和应变速率的降低而降低。将应力应变结果拟合到双曲正弦方程中, 得到合金的本构方程。建立了加工图, 结果表明: 低温和高应变速率导致了低功率耗散效率和失稳效率, 失稳区外功率耗散效率高的区域适合该合金的热加工: 603K-673K, 0.001s^{-1} - 0.013s^{-1} 。位错滑移是合金最主要的变形机制, 位错形核连续动态再结晶是大多数变形条件下的再结晶机制。在该机制作用下, 合金组织呈现项链结构, 再结晶由晶界向晶内扩展。低应变速率下, 合金中产生拉伸孪晶辅助变形, 孪晶与位错作用诱发再结晶形核。高应变速率下, 晶界迁移为合金重要的变形方式, 晶界弓出形核为连续动态再结晶的形核机制。

该合金在 340°C、350°C、360°C 下进行非对称挤压成型, 合金经过挤压后均能发生较为完全的动态再结晶。研究了不同温度下挤压过程中的显微组织变化, 阐明了挤压过程中的动态再结晶机制。随着挤压温度降低, 合金屈服强度从 143MPa 升高至 208MPa, 抗拉强度从 258MPa 升高至 290MPa, 同时保持了 19% 的良好延展性。与对称挤压成型相比, 由于非对称挤压的不对称模具结构, 使得坯料在挤压过程中额外产生非对称剪切作用, 促进取向随机的动态再结晶晶粒的形成, 合金的基底织构减弱, 引起晶粒细化和织构弱化。合金变形过程中, 晶界处应力诱发形成的析出相促进动态再结晶形核, 导致析出相周围的再结晶晶粒相对细小。同时, 再结晶晶界提供更多的析出相形核位置, 促进动态析出相的产生, 从而使合金性能得到提高。

C03-P04

纯镁在生理环境下的降解行为及其表面腐蚀产物膜层的研究

王晨羽*, 杨超, 应韬, 曾小勤

上海交通大学

纯镁的腐蚀速率较低,被认为是潜在的体内植入可降解金属材料,然而其在复杂生理环境下的降解行为不同于常规的盐水环境,目前仍缺乏认识。本研究通过对纯镁进行浸泡腐蚀实验,发现体外生理环境中(SBF溶液)的降解速度比盐水中更快,达到 2.81mm/y 。析氢实验表明,纯镁在生理环境中早期12h内的降解速度迅速下降,且后期保持稳定。采用SEM、XRD和XPS分析纯镁浸泡168h后表面和截面的腐蚀产物,发现生理环境下腐蚀产物膜层出现上层为致密的 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2/\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$,下层为多孔 $\text{Mg}(\text{OH})_2/\text{MgO}$ 的分层结构。EIS电化学结果表明,纯镁在生理环境下的低频阻抗由1h的 $126.53\Omega\cdot\text{cm}^2$ 增大到 $1318.76\Omega\cdot\text{cm}^2$,腐蚀产物膜层电阻则由1h的 $86\Omega\cdot\text{cm}^2$ 增大至168h后的 $789.8\Omega\cdot\text{cm}^2$,表明其在降解过程的耐蚀性逐渐增强。此外,纯镁表面在生理环境中会快速沉积低溶度积的磷酸钙而对基体起到保护作用,这有效阻挡了 Cl^- 对腐蚀产物膜层的溶解而促使降解速度的逐渐下降。小鼠体内股骨髓腔内的4周的降解结果与体外SBF一致,表面也呈现外层磷酸钙富集的分层结构。这项工作对认识纯镁在生理环境下降解行为及其作为骨科植入医疗器械的设计具有潜在的价值。

C03-P05

Ag元素对Mg-8Gd-0.8Y-0.5Zn-0.3Zr合金沉淀相的影响

周永峰*¹, 程仁菊¹, 王海军¹, 蒋斌²

1. 重庆理工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

铸造镁稀土合金由于其低密度、高强度和良好的抗蠕变性能,是航空航天装备结构材料轻量化的主要研究方向之一。沉淀生长取向及结构参数决定了合金后续的沉淀硬化能力。如Mg-Gd(-Zn/Ag)系合金中纳米 β' 相(Mg_7Gd , cobe),与镁基体的取向关系为 $(100)\beta'//[(110)\text{Mg}]$ 和 $[001]\beta'//[0001]\text{Mg}$,被认为是钉扎和储存位错最有效的强化相。然而,高强度的Mg-Gd系合金普遍存在塑性不足现象,增加合金中 $\langle c+a \rangle$ 滑移系数量是提升塑性的关键因素。本研究设计了一种新型合金Mg-8Gd-0.8Y-0.5Zn-0.3Zr-xAg($x=0, 0.1\text{wt.}\%$,以下分别简称VW81和VW81A合金)。添加 $0.1\text{wt.}\%\text{Ag}$ 后,时效态VW81A合金($460^\circ\text{C}\times 8\text{h}+200^\circ\text{C}\times 60\text{h}$)的屈服强度、抗拉强度和延伸率分别达到225MPa、338MPa和16.5%,相对于时效态VW81合金分别提高了25%、14%和73%。在强度方面,Ag元素可以提升时效态VW81A合金中 β' 相的长径比,由原先的4.4:1增加至6:1, β' 相的长径比越大,合金的强度越高;在塑性方面,Ag元素可以增加在合金凝固阶段由于溶质偏析(Gd、Y和Zn)形成的II层错(ABCB)数量,而II层错激活合金中 $\langle c+a \rangle$ 滑移系开动,有利于提升合金的塑性。该合金强韧化机制是通过 $\beta'+\text{II}$ 层错共同实现。

C03-P06

可降解镁合金血管吻合器的设计与性能研究

毛琳*, 杨婉雯

上海理工大学

血管吻合是血管外科重要的手术操作步骤,与手工针线缝合相比,血管吻合器的使用能够显著提高吻合效率,快速恢复组织血供,避免组织缺血性坏死。目前唯一在临床上应用的吻合器——Coupler血管吻合器,其吻合环由聚乙烯制成,组织固定钉由不锈钢制成,对血管吻合后Coupler长期存在于吻合口处,影响了血管的正常收缩和舒张功能,限制了血管生理功能的发挥。因此,开发可生物降解的血管吻合器,在完成血管结构功能重建之后吻合器被组织吸收或者排出体外,能够解决现有吻合器在临床应用中面临的问题。本文以可降解的WE43镁合金为材料,设计了一种新型的血管吻合器,该吻合器包括左右吻合环及外

管套,通过旋转外管套可以精确控制左右环的对合距离。采用有限元分析方法,研究在不同对合距离(0.2、0.3、0.4 mm)下,血管吻合端面的应力分布情况,并通过离体组织吻合实验,验证该吻合器的可行性与有效性。结果表明:当施压距离为 0.3 mm 时,血管吻合口端面应力分布较为均匀,吻合器不会对组织造成过度挤压,并可以获得最佳的吻合强度,此时吻合口的撕脱力为 11.53 ± 0.35 N,爆破压为 302.35 ± 12.61 mmHg,满足临床上对血管吻合口强度的要求。因此,本文设计的可降解血管吻合器,可以精确控制组织对合距离,避免组织机械损伤,并能获得较理想的吻合口强度。本文所获得的研究成果可以为可降解血管吻合器的研究和应用提供理论与实验参考。

C03-P07

密排六方金属中通过晶格对应关系对孪晶-位错交互作用的研究

周铄*

吉林大学材料科学与工程学院

位错和孪晶界之间的相互作用对结构金属及其合金的强度、延展性、应变硬化和疲劳等机械性能至关重要。在低对称性六方紧密堆积(HCP)金属(如 α -钛、锆、镁)的塑性变形中,位错滑移和变形孪晶可同时被激活。因此,必不可少会出现大量的孪晶滑移相互作用。为了了解这种相互作用机制,我们采用原子模拟对孪晶-位错反应细节进行研究。一般来说,基体位错可以被晶界吸收、在晶界处解离或转化为孪晶中的另一个位错。这里我们发现,孪晶-滑移相互作用过程中的位错转变遵循晶格对应关系,又称晶格转换原理,即基体滑移系的滑移面和布尔格斯矢量对应的转换成孪晶中的相应平面和矢量。例如,基体的基面(或柱面)位错可转化为 $\{10\bar{1}2\}$ 孪晶的柱面(或基面)位错。我们采用原子模拟系统的研究了柱面位错与 $\{11\bar{2}1\}$ 以及 $\{11\bar{2}2\}$ 孪晶界之间的相互作用。在与 $\{11\bar{2}1\}$ 孪晶界交互时,当柱面位错的滑移面平行于孪晶剪切面时,基体柱面位错会转化为孪晶中的柱面位错,布尔格斯矢量保持不变。相反,当滑移平面与孪晶剪切平面不平行时,柱面位错会转变到 $(10\bar{1}1)$ 平面上形成锥面位错。该结果与变形孪晶中的晶格对应关系的分析结果相吻合。而柱面位错在与 $\{11\bar{2}2\}$ 孪晶界相互作用时,观察到了非常不寻常的有趣现象。当 $(10\bar{1}0)1/3[12\bar{1}0]$ 位错与孪晶边界相互作用时,它首先在孪晶中嬗变为 $(01\bar{1}2)1/3[2\bar{1}10]$ 位错。但 $(01\bar{1}2)$ 并不是一个常见的滑移面,能量并不稳定,随之会在孪晶中进一步转换成一个 $(01\bar{1}0)1/3[2\bar{1}10]$ 柱面位错,这种行为以及其他柱面位错的转变也可以从变形孪晶中晶格对应的角度得到很好的解释。

C03-P08

通过引入纯钛显著提高 AZ31 镁合金的强度和延展性

陈祥*¹, 夏大彪², 黄光胜³, 张军磊⁴, Heung Nam Han⁵

1. 湖北汽车工业学院材料科学与工程学院

2. 季华实验室

3. 重庆大学

4. 昆明理工大学

5. 首尔国立大学

在本项工作中,我们通过挤压工艺将纯钛与 AZ31 镁合金复合在一起,并进行了 350 °C/1 h 的退火处理,显著提高了 AZ31 层合板的力学性能,其屈服强度为 243 MPa,最大抗拉强度为 338 MPa,均匀伸长率为 17.7%。微观结构表征显示,镁层与钛层在层界面附近形成了半共格关系,同时伴随着铝、锌和锰元素的轻微扩散。在异质界面附近,微观结构呈现出显著的异质性,其中镁层具有较大的等轴晶粒和低的位错密度,而钛层则形成了超细晶粒和具有大量位错胞和位错壁的未再结晶晶粒。利用 DIC 技术和原位 EBSD 发现,在塑性变形过程中,层界面附近的微观结构异质性诱导了显著的应变梯度,这需要几何必需位错来协调。这导致了异质变形诱导(HDI)强化和 HDI 应变硬化效应,从而提高了 AZ31 层合板强度和延展性。此外,纯钛层的引入有效阻碍了裂纹的扩展,显著提升了层合板的拉伸塑性。

C03-P09

光伏硅泥作金属镁冶炼还原剂的研究

冯雪楠*, 方华靖, 单智伟

西安交通大学

硅热法炼镁工艺作为我国主要的金属镁生产方式, 仍存在能耗高和原材料成本高的问题。其中还原剂硅铁所需能耗占总能耗的近四分之一、成本占总原料成本的 60%以上。本报告提出利用光伏固废硅泥替代硅铁作还原剂的新思路, 将硅泥干燥脱水后与煅烧白云石和萤石粉按比例配料, 经混合、破碎和压球制备成硅热法炼镁工艺的料球, 并在 1250℃和 10Pa 以下进行还原反应; 硅泥中单质硅含量更高且粒径远小于硅铁, 使得硅泥做还原剂的硅热反应还原率提升超过 5%, 同时所制备的粗镁杂质仅为硅铁的 40%-80%; 每吨粗镁的还原剂成本可降低 1000 余元。目前本思路已在工业中进行推广试验, 使用硅泥部分替代硅铁并取得了阶段性进展。该思路的应用与推广可有效降低硅热法炼镁工艺的能耗和原材料成本, 助力原镁冶炼向绿色高效的方向发展, 同时解决光伏固废难处理的问题。

C03-P10

从粗镁到 5N7 超高纯镁: 金属熔体一步纯化镁蒸气

王安*, 卢思颖, 单智伟

西安交通大学 材料学院

金属镁的使用性能极易受到杂质危害, 即使杂质浓度在 ppm 量级。为去除这些痕量杂质, 工业中常采用真空蒸馏法制备高纯镁。然而真空蒸馏法的实际杂质去除效率较低, 只有经过多次蒸馏才能制备如纯度高于 99.999 wt.%的高纯镁, 这无疑大幅增加了高纯镁的使用成本。为提高真空蒸馏的纯化效率, 我们通过向真空蒸馏过程中引入铝熔体来吸收镁蒸气中的杂质。仅需一次蒸馏, 即可将纯度小于 99 wt.%的粗镁纯化至 99.9997 wt.%的超高纯镁。严重恶化镁抗腐蚀性能的杂质元素, 如 Fe、Ni、Cu 等可以直接降低至 1 ppm 以下。常规真空蒸馏过程中难分离的 Zn 杂质也可降低至 1.78 ppm, 这得益于提高结晶温度。引入液态金属可以大幅提高真空蒸馏法的纯化效率和对原料杂质含量的容忍度, 适用于所有需要通过真空蒸馏纯化的金属材料。

C03-P11

WAAM 制备高品质镁合金复杂构件工艺研究

羿昌波*, 冯靖凯², 任凌宝¹, 王帅¹, 单智伟¹

1. 西安交通大学

2. 西安稀有金属材料研究院有限公司

研究背景: 航空航天及武器装备的轻量化是国家安全的重大战略需求, 随着航空航天等领域对异形复杂镁合金薄壁构件轻量化、高性能的需求日益上升, 传统铸件机械加工等成形工艺的制备能力已接近极限, 很难满足新一代飞行器的需求。为突破传统铸件机械加工成形方式在轻量化设计和实现方面的限制, 从几何维度和材料维度出发, 率先提出“高品质镁合金增材制造专用丝材+结构功能一体化设计+增减材结合制造”方法实现异形高性能镁合金结构件制备的新思路, 探索出航空航天高性能异形复杂零部件的先进成形方法。

实验方法: 在充分考虑服役环境和机加工能力后, 使用有限元模拟对飞行器结构件进行轻量化优化处理, 确定结构轻量化方案。选择具有良好的强度、耐蚀性和比刚度且商业化应用及推广价值较高的 AZ80 作为成分。丝材的制备过程采用全流程管控(原材料管控+过程控杂)方法, 并使用热挤压加拉拔工艺, 最终制备出成分均匀、丝径均一、表面质量良好、连续、无夹杂夹渣等缺陷的增材制造专用高品质镁合金丝材。

在增材制造专用高品质镁合金丝材的基础上,选择 TIG 增材制造技术,使用镁合金作为成形基板,采用增减材结合制造方法,完成对高品质镁合金构件的制备。

实验结果:与传统铸件机械加工工艺相比,采用增材制造工艺有效避免了传统铸造工艺的固有缺陷(如疏松、缩孔、夹杂和夹渣等),且在提升轻量化效果、提高构件综合性能及稳定性,以及减小原材料消耗和降低成本等方面有显著优化效果。与传统镁合金结构件相比,可进一步减重 20%,强度提升 8%~10%,延伸率提升约 1 倍,性能稳定性明显提高(强度波动 $\pm 15\%$),原料消耗量降低 30%以上,直接成本降低 20%。

实验结论:在增材制造多自由度制造的优势上,引入拓扑优化概念,可以进一步实现轻量化效果;增材制造专用高品质镁合金丝材的制备,有效降低了增材制造镁合金的力学不均匀性、电弧不连续性、性能波动性大和耐蚀性差等问题;使用增减材结合制造可以突破试样块的性能试验,完成复杂结构件的高品质制备。

实验意义:本实验的顺利开展实施,及相关成果的推广应用,有望为更高机动性能的航空航天零部件的设计和制备提供新的技术和方法。

C03-P12

镁锂合金的拉伸-压缩塑性不对称

王靖之*, 郭非
重庆理工大学

21 世纪是与“节能减排”密切关联的一个时代,而要实现这个目标,“轻量化”是一条十分有效的道路。镁合金作为目前最轻的结构材料,在轻量化的道路上作出了巨大贡献。镁锂合金作为镁合金的衍生材料,密度达到了 1.25~1.65 g/cm³,并且拥有生物可降解性、高比强度、高比刚度、良好的电磁屏蔽和减震性能等优点。但是,相对低的绝对强度和耐腐蚀性,以及室温下的时效软化行为限制了其推广应用。本实验以 Mg-10Li、Mg-9Li-6Al 和 Mg-9Li-6Zn 合金为研究对象,对其进行固溶-水淬处理。其中固溶温度分别为 300℃、320℃和 340℃,在该温度下保温十分钟后水淬,以增强镁锂合金的硬度、强度。随后使用 X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、透射电子显微镜、万能试验机等设备对三种镁锂合金进行了组织和性能表征,得到的主要结论如下:

1. 经固溶-水淬处理后, L10、LZ96 和 LA96 合金的硬度得到了提高。硬度测试表明在 LZ96 和 LA96 合金中, β -Li 相的硬度明显高于 α -Mg 相的硬度。XRD 的结果表明 L10 合金中仅有 α -Mg 和 β -Li 两相, LZ96 合金中除 α -Mg 和 β -Li 两相外还存在 MgLi₂Zn、MgLiZn 颗粒相, LA96 合金中除 α -Mg 和 β -Li 两相外还有 AlLi 相与 MgLi₂Al 颗粒相,其中 AlLi 相在 α -Mg 相中呈条杆状,在 β -Li 相中则呈颗粒状。硬度、强度的升高主要归因于固溶-水淬处理使得合金中的硬质相增多(MgLi₂Zn 和 MgLi₂Al)。

2. 在拉伸和压缩性能测试中, L10、LZ96 和 LA96 合金都表现出压缩性能好于拉伸性能的情况。进一步原位拉伸研究表明,在镁锂合金中裂纹萌生多在界面处产生,这些界面主要为 α - β 相界、晶界、颗粒相- β 相界,其中 α - β 相界面处萌生的裂纹数量最多,在三种合金中的占比都达到了 50%以上。裂纹扩展也多沿界面扩展, LA96 合金相较 LZ96 和 L10 合金而言拥有更多的应力集中界面,导致其在拉伸过程中裂纹萌生和扩展更早,塑性更差。而在压缩过程所有的裂纹都不易产生与扩展,所以镁锂合金在这两个过程中表现出的塑性具有较大差异。

C03-P13

预变形对镁合金组织及动态力学性能的影响

伊浩维^{1,2}, 吴晓旭^{1,2}, 王鹏宇^{1,2}, 魏子淇^{1,2}, 毛萍莉^{1,2}, 刘正^{1,2}

1. 沈阳工业大学

2. 辽宁省镁合金及成型技术重点实验室

镁合金在具有轻量化需求的领域具有独特优势,而其密排六方的晶体结构导致的各向异性限制了其发展。在镁合金中引入孪晶是改善各向异性,提高综合性能的有力手段,孪晶的产生依赖于加载方向,为此,

本研究首先利用原位 EBSD 的手段,对两种不同加载模式(沿 ED 压缩和沿 ERD 拉伸)下镁合金的组织演化、孪晶行为等进行原位追踪。之后,采用分离式霍普金森压杆(SHPB)进行动态压缩实验,研究了预先引入拉伸孪晶对镁合金绝热剪切敏感性的影响。结合力学响应和微观分析,分析绝热剪切敏感性与拉伸孪晶的关系。同时研究绝热剪切带中的再结晶机制。结果表明,两种加载方式均有利于拉伸孪晶的形成,但是相较于沿 ERD 拉伸,沿 ED 压缩孪晶更容易形核、长大甚至完全孪生化,孪生区域的整体生长速率更高,这也导致了更强的织构偏转。拉伸孪晶有 6 个等效的孪晶变体,孪晶变体的选择与加载方向有关,两种加载方式下孪晶变体的激活都遵循 Schmid (SF) 定律,少数低 SF 孪晶的激活与晶粒内存在的局部应力场有关。动态压缩试验的结果表明,随着孪晶体积分数的增加,镁合金的绝热剪切敏感性增加,而剪切带内的再结晶程度降低。剪切带中的再结晶机由旋转动态再结晶(RDRX)主导。

C03-P14

The electrochemical corrosion behaviors and Mg-air battery anode performance of Mg-1Sn-1Ca-0.3Mn alloy under different cooling methods

Taihe Le^{*1,2}, Pingli Mao^{1,2}, Qichi Le³

1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang, China
2. Key Laboratory of Magnesium Alloys and the Processing Technology of Liaoning Province, Shenyang, China
3. Key Lab of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang, China

The grain size and Mg₂Ca morphologies of Mg-1Sn-1Ca-0.3Mn (TX11) alloy are tailored using different cooling methods (furnace cooled, air cooled, oil cooled and water cooled). Optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) was used to observe the microstructure, and the electrochemistry workstation and Mg-air battery tests were used to investigate the electrochemical corrosion behaviors and Mg-air battery anodic performance. The results reveal that cooling methods lead to refine grain and the Mg₂Ca-phase morphology changed from linear-like shape to needle-like shape. The linear-Mg₂Ca phase induced by furnace cooled is beneficial for improving electrochemical activity and discharge voltage during the discharge process. Among all TX11 alloy, the average discharge voltage of furnace-cooled TX11 alloy reached 1.163V at a current density of 20 mA cm⁻². In addition, the small grain and uniform distribution round-shape Mg₂Ca phase prepared via oil cooled leads to the alloy best corrosion resistance and best comprehensive discharge performance, with the average discharge voltage, anodic efficiency, specific capacity and specific energy of 1.152V, 57.8%, 1290.3 mA h g⁻¹ and 1487.5 mW h g⁻¹ at 20 mA cm⁻² among four alloys, respectively. The cooling methods provide new ideas for improving the comprehensive discharge performance of Mg-air battery anodes.

仅发表论文

C03-PO01

Study on the mechanism of preparing high strength wrought magnesium alloy by regulation of precipitates

Zhenyang Liu*, Xiaohui Zhang, Chunyu Ma, Dongming Yang, Nan Zhou, Kaihong Zheng

Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences

This study is aimed at high strength wrought magnesium alloys with Mg-Gd-Y-Zn-Mn as the model alloy. Through the preparation and processing of the alloy by extrusion, the characterization of the microstructure (mainly by transmission electron microscopy), and the mechanical testing (Vickers hardness and tensile test), we found that: (1) In addition to the γ' phase and β' phase, there are also $\langle c+a \rangle$ dislocations in the deformed structure of the sample after pre-stretching and aging after extrusion, and its yield strength can reach 429MPa and the ultimate tensile

strength can reach 492MPa. The deformation and strengthening phases together improve the strength and hardness of the alloy. (2) The γ'' phase was found in the pre-stretched microstructure after extrusion, which is a strong evidence that deformation promotes the formation of the γ'' phase. Thus, the mechanism of preparing high strength wrought magnesium alloy by regulation of precipitates is revealed.

C03-PO02

TiB₂ 与 AlRE 相对 Mg-RE 合金组织与性能的作用机理

高瑜阳*, 蒋斌, 潘复生
重庆大学材料科学与工程学院

镁稀土合金(Mg-RE)具有较强的固溶强化和沉淀强化作用,形成的第二相可以提高镁合金的室温、高温力学性能。但随着温度的升高,Mg-RE 系合金中的第二相会粗化、长大或溶解,导致强度明显下降,无法在高温下长时安全服役。向 Mg-RE 系合金中添加 Al 元素可以生成热稳定性好的 Al₂RE 颗粒,Al₂RE 颗粒作为异质形核核心细化合金组织的同时可以改善 Mg-RE 相的分布,提高合金的性能。TiB₂ 颗粒与 Mg 基体晶格匹配度高,可以起到细化 α -Mg 晶粒的作用;可以作为高熔点硬质第二相钉扎位错运动和晶界滑动,提高组织的热稳定性,从而提高镁合金的高温力学性能。因此,探究如何向 Mg-RE 系合金中引入高温稳定性高的第二相(TiB₂、Al₂RE 等),进一步提高合金的组织高温稳定性及高温力学性能,对高强耐热镁合金的开发及其应用具有重要的理论指导意义和工程应用价值。

C03-PO03

Effects of Al₂Y Particles on the Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Y Based Alloys

Kun Zhang*, Yuyang Gao, Ang zhang, Bin Jiang
Chongqing University

The effects of Al₂Y particles on the microstructure and room and high temperature mechanical properties of WE91 alloy were studied. The as-extruded alloys show a bimodal-grained microstructure. The addition of Al₂Y particles increases the tensile strength of WE91 alloy at room and high temperatures. The yield strength and ultimate tensile strength of Al₂Y/WE91 alloy does not decrease obviously with the increase of temperature. The ultimate tensile strength of 2wt.% Al₂Y/WE91 alloy decreases from 312 MPa at room temperature to 308 MPa at 250 °C. At 350°C, 4wt.% Al₂Y/WE91 shows the highest tensile strength (241 MPa), yield strength (213 MPa), and fracture strain (38.9%).

C03-PO04

热-机械工艺优化的低各向异性和高塑性 Mg-Zn-Ce 合金

钱晓英*, 董志华, 蒋斌, 潘复生
重庆大学材料科学与工程

研究了沿挤压方向不同冷轧压下量的热机械工艺结合退火处理对 Mg-1Zn-0.2Ce (wt.%)合金塑性变形及其各向异性的影响。结果表明:经一次冷轧压下 19%,再经过 350°C 1 h 的退火处理,获得了较低各向异性和优异的延展性,沿轧制方向延伸率达 41.6%,沿垂直于轧制方向延伸率达 45.4%。电子背散射衍射表征表明,其机制主要与在 TD 织构成分的晶粒优先形核和生长密切相关,这使得织构从双峰向环型转变。优化后的热-机械工艺使合金的各向异性减弱,延性提高,可显著提高合金的塑性变形能力,促进其更广泛的工程应用。

C03-PO05

搅拌铸造 Tip-AZ91D 镁基复合材料的热压缩本构方程和热加工图研究

张晓辉¹, 陈达^{1,2}, 康跃华^{*1}, 李新涛¹, 郑开宏¹, 潘复生^{1,3}

1. 广东省科学院新材料研究所

2. 湖北汽车工业学院

3. 重庆大学

本文采用 gleeble-3500 热-力模拟试验机、光学显微镜和扫描电子显微镜研究了搅拌铸造 5vol. %Tip-AZ91D 镁基复合材料在热压缩变形温度范围为 300°C-400°C, 应变速率范围为 0.001 s⁻¹-1.0 s⁻¹ 下的热变形行为和显微组织演变。试验结果表明, 该复合材料的应力-应变曲线均存在峰值应力, 然后逐渐降低至一个稳定值。该峰值应力和稳定应力值均随着变形温度的升高和应变速率的降低而降低, 对应显微组织表明该复合材料发生了动态再结晶。根据变形温度、应变速率和流变应力之间的 Arrhenius 关系, 建立了本构方程。进一步依据热加工图理论, 绘制了该复合材料的热加工图, 结果表明该复合材料的流变失稳区间主要分布在低温和高应变速率区, 优化的热加工区温度为 388°C-400°C, 应变速率为 0.001s⁻¹-0.0018 s⁻¹。

C03-PO06

Mg-10Gd-2Y-1Zn-0.5Zr 合金中微观补缩通道与缩松缺陷的相互作用

李闯名^{*1,2}, 张昂^{1,2}, 董志华^{1,2}, 蒋斌^{1,2}, 潘复生^{1,2}

1. 国家镁合金材料工程技术研究中心

2. 高端装备铸造技术全国重点实验室

缩松缺陷的形成是一个受多因素影响的微观过程。本研究借助 SEM、EBSD 和 Micro-CT 等对 Mg-10Gd-2Y-1Zn-0.5Zr 合金内缩松缺陷特征及其形成机制进行了探究, 对缩松缺陷的分布、形态和大小进行了表征; 并从合金凝固阶段的温度条件、 α -Mg 固相骨架的组织特征以及缩松缺陷含量与固相骨架的关系进行了讨论。同时, 通过引入渗透率, 对液态金属在 α -Mg 固相骨架内的流动行为进行了量化。结果表明, 缩松缺陷的形成受液态金属在固相骨架结构内微观补缩能力的影响。 α -Mg 固相骨架的形态特征, 包括补缩通道的宽度和迂曲度, 会显著影响缩松缺陷的大小和形状。不同形态的固相骨架会导致合金具有不同的缩松缺陷形成趋势, 导致液态金属具有不同程度的流动阻力。液态金属固相骨架内的渗透率与缩松缺陷密度呈负相关。该研究有助于深入了解影响 Mg-10Gd-2Y-1Zn-0.5Zr 合金产生缩松缺陷的因素, 对提高铸造质量和合金性能具有指导意义。

C03-PO07

TiB₂ 颗粒对 mg-9gd 性能和组织的影响

陈籽佚*, 高瑜阳, 蒋斌

重庆大学

本文将 Al₂Gd 和 TiB₂ 双尺度颗粒引入 Mg-9Gd 合金中, 研究了颗粒对复合材料显微组织和力学性能的影响。随着颗粒的引入, 铸态合金的组织由枝晶转变为等轴晶。和微米级 Al₂Gd、纳米 TiB₂ 颗粒单独添加相比, Al₂Gd 和 TiB₂ 颗粒复合添加的晶粒细化效果更好。 α -Mg 的平均晶粒尺寸由 Mg-9Gd 基体合金中的 299 ~ 734 μ m 减小到 6.1 wt.%(TiB₂-Al₂Gd)/Mg-9Gd-0.5 la 复合材料中的 44.3 ~ 61.4 μ m。Al₂Gd 和 TiB₂ 颗粒的复合强化作用是挤压复合材料优异力学性能的主要原因。复合材料的屈服强度和极限抗拉强度分别从 148 MPa 和 227 MPa 提高到 211 MPa 和 263 MPa。

C03-PO08

揭示具有优异高温性能的 Mg-11Gd-5Y-2Zn-0.7Zr 合金的变形模式和强化机理

周建新*

本内容系统地研究了挤压态 Mg-11Gd-5Y-2Zn-0.7Zr 合金的力学性能及它们在室温和高温下的微观结构。该合金表现出优异的极限拉伸性能在室温(RT)强度(UTS)为 365 MPa, 当温度升高到 250°C (342 MPa), 300°C (337 MPa)和 350°C (278 MPa)时, 其应变率为 1.85×10^{-3} , UTS 保持相对较高。显微组织表征表明, 这种优异的耐热性主要归因于(i)细小的动态再结晶(DRXed)晶粒和具有强烈织构的非 DRXed 晶粒;(ii)块状晶粒(iii)纳米间距的基底 LPSO/SFs。与其他耐热镁合金相比, 我们固有的化学特性使其具有优越的高温力学性能 GWZ1152 合金的性能。在高温下的变形模式主要是位错产生和位错在块状 LPSO 上积累, 继而开裂扩展。250°C 和 300°C, 非基面滑移在粗晶内产生滑移, 沿滑移轨迹产生裂纹和断裂。GWZ1152 合金在 350°C时的主要变形机制为晶界滑动, 裂纹常出现在晶界上。

C03-PO09

Effect of Sm additions on microstructure and corrosion behavior of magnesium alloy AT61

Lewen Wang*, Yuan Yao, Siqi Li, Mei Li, Li Fu
Shenyang University

The improvement of corrosion resistance of magnesium alloys helps to expand their application range. Compared to the heavy RE alloying, the light RE alloying is an effective and relatively inexpensive method. Based on the AT61 alloy, the addition of 1% Sm on the microstructure and corrosion behavior were studied. According to the XRD and SEM/EDS analysis results, besides the $Mg_{17}Al_{12}$ and Mg_2Sn phases, new short bar-like $Al_{11}Sm_3$ phase and massive Al_2Sm phase appeared in the AT61-Sm alloy. Additionally, 1% Sm additions reduced $Mg_{17}Al_{12}$ phase, which changed from continuous distribution along the grain boundaries to discontinuous distribution of bars or lumps. According to the corrosion experiments and electrochemical property tests, the corrosion resistance of AT61 alloy was greatly improved with 1% Sm additions. The hydrogen precipitation, weight loss corrosion rate, self-corrosion current density and polarization resistance of AT61-Sm alloy was $0.29 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-2}$, $0.48 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$, $7.228 \mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ and $4405.220 \Omega \cdot \text{cm}^{-2}$, respectively. The good corrosion resistance of AT61-Sm alloy is attributed to the grain refinement, uniform distribution of $Mg_{17}Al_{12}$ phase, obstruction of corrosion expansion by $Al_{11}Sm_3$ phase distributed continuously along the grain boundaries, and the synergistic effect of corrosion product films ($Mg(OH)_2$ and Al_2O_3). The above results could provide reference for improving the corrosion resistance of AT61 magnesium alloy.

C03-PO10

Microstructure and mechanical properties of Tip/VW94 composites regulated by gradient ultrafine-grained structure

Qifeng Li^{1,2}, Yi Ding^{1,2}, Xianhua Chen^{1,2}, Jia She^{1,2}, Chunquan Liu³, Fusheng Pan^{1,2}

1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China

2. National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing University, Chongqing 400045, China

3. School of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang, 550025, China

A gradient ultrafine-grained structure was successfully fabricated on the surface of 3.5 wt.% Tip/VW94 composites by sliding friction treatment (SFT), and the microstructure and mechanical properties of the material were investigated. The results show that due to the gradient strain, a gradient deformation layer with a thickness of about 400 μm is formed on the material's surface. The grain size of the surface layer is refined to 87 nm under the effect of severe plastic deformation. During the SFT process, a large number of dislocations are activated, and many twins are present to facilitate coordinated deformation, which promotes grain refinement. Additionally, the strength

of the gradient-structured composites is increased without significant loss of plasticity compared to the original state. The presence of Ti particles leads to the formation of a strain misfit field, which hinders dislocation migration and provides energy for twin nucleation, inducing numerous dislocations and twin boundary strengthening.