

中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7 月 5-8 日, 2025

福建 厦门

C03-镁及镁合金

C03-Magnesium and Magnesium Alloy

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



C03. 镁及镁合金

分会主席：蒋斌、曾小勤、单智伟、王慧远、秦高梧、杨艳

C03-01

高性能铸造镁合金设计、应用与思考

蒋斌

重庆大学

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 Gd、Y、Mn、Sn 等合金化的新型高塑性镁合金，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%。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，已成功应用于大型镁合金汽车构件。

C03-02

Mg-Al 系低合金动态异构变形特征及强塑性同时提升机制

查敏*、王思清、王通、王慧远

吉林大学

近年来，低合金化镁体系凭借低密度、低成本及良好加工性而受到广泛关注，但其溶质含量较低、析出强化效果有限，常具有相对较低的强度，难以满足汽车及航空等领域的应用需求。鉴于镁合金塑性变形具有强烈取向依赖性，研究者们通过构建软/硬取向晶粒共存的微观组织，利用软硬取向晶粒间变形不相容性实现 HDI 强化及硬化效果，成功提升镁合金强塑性。然而，基面/随机取向晶粒的简单混合仍无法兼顾早期强化和后期应变协调需求，难以进一步克服强塑性失配难题。为此，本工作采用衬板辅助轧制结合短时退火工艺，在 Mg-1.27Al-0.38Ca-0.45Mn 低合金中构建了由三重取向晶粒（基面/随机/横向取向晶粒）均匀混合形成的微观组织，成功实现了优异强塑性组合（屈服强度达~218 MPa，延伸率为~27.3%）。基于准原位 EBSD 结合 DIC 技术，系统揭示了该合金的动态异构变形特征，即 TD 取向晶粒在变形初期与基面取向晶粒共同作为“硬区”以提高强度，随后转变为与随机取向晶粒共同作为“软区”，通过激活基面滑移和多种非基面滑移系，提高合金持续变形的能力，从而显著改善塑性。本研究为低合金化镁体系组织设计及强塑性调控提供了新思路。

C03-03

高性能镁锂合金研究进展

杨艳*、周港、刘伟豪、崔晓飞、蒋斌、彭晓东、潘复生

重庆大学

针对常用镁锂合金 Mg-Li-Al/Zn 牌号少，绝对强度较低，合金的强度-塑性-低密度不易兼得等问题，提出了高塑性双相基体+微纳第二相协同的组织构筑新方法；基于第二相与双相基体的交互作用，提出了纳米动态析出、动态再结晶和元素偏聚协同的多尺度微纳组织调控新机制；基于 Ca、Sn 等元素的合金化和成形工艺设计与优化，发展了 Mg-Li-Ca/Sn 等密度<1.60g/cm³ 的高性能超轻合金，实现了合金强度与塑性的协同调控与提升。成功研发了高性能镁锂合金棒材和板材，为超轻镁锂合金的推广应用奠定重要基础。

C03-04

航空镁合金应用技术研究及未来展望

刘雅菲、徐严谨*

中国航空制造技术研究院

一代材料，一代装备。随着我国航空武器轻量化成为主流发展趋势之一，镁合金作为最轻的金属结构材料，在克克计较的航空航天领域有较强的选材吸引力。镁合金良好的阻尼减震性能，可以较好的承载冲击和振动，适用于飞机传动载荷部位。但其较低的绝对强度，不耐腐蚀，阻燃性差，较高的成本一定程度

限制了镁合金的航空规模化应用。镁合金的特性决定了其在航空领域应用的典型部位，结合镁合金材料的优缺点和航空镁合金国内外发展现状，探讨我国航空工业镁合金应用存在的主要问题，从飞机选材角度对未来航空镁合金提出展望和服役性能要求，推动镁合金在航空领域的发展与应用。

C03-05

基于原位同步辐射与晶体塑性的镁/高熵复合材料变形研究

尚晓晴、曾小勤*

上海交通大学

半固态触变成型工艺适用于制备镁基复合材料，其原理为将镁合金粒子与增强颗粒混合，加热为半固态浆料，而后高速注射入模具，这一过程能够有效避免颗粒沉降，用于制备增强相密度高于镁基体的复合材料。本研究利用半固态注射成型制备了高熵合金增强的镁基复合材料 AlCoCrFeNi/AZ91D，复合材料中，增强颗粒在基体内均匀弥散分布，变形后，AlCoCrFeNi 颗粒既未产生断裂也未与镁基体脱开，由此，AlCoCrFeNi/AZ91D 复合材料获得了优异的力学性能。

利用透射电子显微镜（TEM）对界面进行表征，发现镁基体与 AlCoCrFeNi 颗粒之间形成了约 20 nm 宽的富 Al 层，该层与基体及增强相之间的晶格错配较小，有助于增强界面结合强度。通过原位同步辐射实验对复合材料的变形特征进行了深入分析，晶格应变结果表明，AlCoCrFeNi 颗粒在加载过程中始终承担有效载荷，其拉伸方向的最大应力达到 418.75 MPa，半高宽演化结果进一步证实了硬质 AlCoCrFeNi 颗粒在变形过程中发生了塑性变形。开展了全场晶体塑性仿真，仿真结果与同步辐射实验在第二相颗粒的应力、晶格应变演化方面均有较好的对应；晶体塑性的应力分布结果表明，增强颗粒 AlCoCrFeNi 边缘的应力远高于内部，颗粒内部等效应力约为 700 MPa，而边缘的等效应力则高达 1200 MPa，边缘区域的高应力以及界面形成的纳米尺度软层，使高强颗粒的边缘产生了塑性变形。

将半固态注射成型技术与高性能的 AlCoCrFeNi/AZ91D 复合材料结合，在 3C 电子、汽车等领域的关键部件制备方面具有广阔的应用前景。

C03-06

The Effect of Nickel Foil Interlayer on the Microstructure and Properties of Mg/Al Rolled Composite Plates

Hong He, Lu Pu, Xianquan Jiang*

Southwest University

Mg-Al laminated composites combine the advantages of both Mg and Al materials, which can significantly improve the overall performance and application prospects of Mg and Al materials. However, for rolled composite Mg/Al composite plates, brittle intermetallic compounds such as Al₃Mg₂ and Al₁₂Mg₁₇ will be formed at the Mg/Al interface during heat treatment and reduce the interfacial bonding strength. Ni has high solid solubility in Mg and Al respectively. In this study, by implanting Ni foil at the interface of Mg/Al rolled composite plate, the thickness of nickel foil, annealing temperature after rolling and holding time on the interface microstructure and performance are explored, the results show that implantation of Ni 25 μm thick foil the performance is optimal, the existence of nickel foil at the interface of the interface of Al and Mg interface of a single diffusion into the mutual diffusion of Al, Mg, Ni, the formation of Mg₂Ni, Mg₆Ni, Al₃Ni, MgAlNi₂ multi-phase mixed interface, enhanced the interface bond strength; rolled samples at 200, 230, 250, 270, 350 °C annealing, mechanical properties are optimal at 230 °C annealing without Al₃Mg₂, Al₁₂Mg₁₇ intermetallic compound formation, with the increase in temperature in the Ni/Al interface formed in the Al₃Ni, the Mg/Ni interface formation of Mg₂Ni, Mg₆Ni mixed phase was formed at the Ni/Al interface and Mg/Ni interface with increasing temperature, which inhibited the formation of brittle Al₃Mg₂, Al₁₂Mg₁₇ compounds; annealed at 230 °C for 0, 5, 30, 120, 600min, respectively, the results showed that the peeling strength was highest when annealed for 5min.

C03-07

金属 Ti 颗粒增强 Mg-Zn-Mn 基复合材料组织与力学性能研究

凡冀川 1、杨鸿*1、郑开宏 2、潘复生 1

1. 重庆大学

2. 广东省科学院新材料研究所

镁基复合材料由于其质量轻、比强度高、比模量高、耐磨性好等优点，在航空航天、汽车、国防军工等领域具有广泛的应用前景。颗粒增强体具有成本低、制备工艺简单、易于成型、力学性能各向同性等显著优势，受到了广泛关注。目前采用的颗粒增强体多数为陶瓷颗粒，但陶瓷颗粒与镁熔体的润湿性较差，不利于形成强的界面结合，且陶瓷颗粒一般是脆性相，容易引起应力集中，导致微裂纹的萌生，使镁基复合材料强度提高的同时塑性下降。金属钛相对密度低、熔点高、刚度高、强度高、塑性好，钛和镁之间不发生反应，且钛和镁都是密排六方晶体结构，相容性好。

本研究选择钛颗粒作为增强体，Mg-Zn-Mn 系镁合金作为基体，选用超声辅助半固态搅拌铸造法制备镁基复合材料，后续采用热处理与热挤压实现了强度和塑性的协同提升。其中 Mg-6Zn-1Mn-2Ti 复合材料屈服强度达 231MPa，抗拉强度达 361MPa，延伸率达 24.8%。基于此，进一步研究了界面反应对力学性能的影响，发现界面反应产物应在纳米尺度（~70 nm）更有利于晶粒细化，并且形成半共格或共格界面更利于载荷传递。

C03-08

依托 JMA 打造学术共同体，服务镁发展

杨艳、熊晓明、陈晶、秦雪梅、陈先华、彭晓东、潘复生

重庆大学

镁及其合金是最轻的金属结构材料和极具潜力的储能材料，其应用研发对我国实现双碳战略目标、缓解能源危机意义重大。Journal of Magnesium and Alloys (JMA) 作为全球镁材料领域最重要的成果发布平台，涵盖整个镁及镁合金科学与工程领域的理论与实验研究，致力于刊发一流学术成果。期刊紧密团结全球镁及镁合金研究学者，打造 JMA 学术共同体，持续提升期刊国际影响力，服务全球镁发展。期刊最新影响因子 13.8，位居全球同类期刊第 2 位，JCR1 区、中科院 1 区。

C03-09

低成本大规模制备 3N8 以上纯度金属镁的原理探索与工业实践

单智伟

西安交通大学

原镁杂质含量高、波动大，不仅会劣化镁在特定应用场景的服役性能，还会显著带来性能的不稳定性，成为制约镁材料应用推广的关键因素之一。当前主流的原镁纯化方法普遍存在或纯化能力有限，或成本高昂、规模小等问题。前期基于“气态原子选择性分离”原理，依托现有主流硅热法原镁冶炼工艺，从矿石原料直接制备出纯度达 99.995% 的百克级高纯镁，并在工业上实现了 Mg9995A 等级高品质镁的稳定量产，为下游大部分应用提供了稳定、优质原材料。然而，为满足高端镁合金制备和战略金属还原剂等关键应用，仍需低成本、规模化制备 Mg9998 等级以上高纯镁。本报告围绕工业条件下多因素波动、大尺度运行和宽时域反应等复杂工况，结合热力学计算、数值模拟、实验原理验证和工业实践，系统揭示了杂质元素在硅热法体系中的形成和演化规律，明确其对不同工况的敏感性特征。在此基础上，依据杂质的理化特性和波动特征，提出靶向去除策略，并进一步深入阐明了各类关键杂质的去除机理及其主要影响因素，进而开发和优化了相应的提纯技术与工艺装置。目前，该系列去除机理及配套技术已在工业上取得阶段性成效，在 1000 吨/年产能的硅热法横罐装置上成功制备出 3N8 级高纯镁。后继通过工艺适配与优化，有望进一步提高达标率和扩展规模，真正实现 3N8 及以上高纯镁的低成本规模化稳定生产，为产业提供优质原材料支撑。

C03-10

Mg-Evaporation Induced Amorphous Multi-Principal Element Alloys for Advanced Oxygen Evolution Reaction

Huang Yizhong

Chongqing University of Science and Technology

Nanyang Technological University

Multi-principal element alloys (MPEAs) have been recognized as emerged electrocatalysts that facilitate the high efficiency for oxygen evolution reaction (OER). With the noble metals free, they are cost-effective and a potential candidate to replace the traditional RuO₂ and IrO₂. The catalysis can be further improved through the construction of their lattice structures. This study proposes an innovative approach which makes use of pulsed laser irradiation to synthesize nano-sized amorphous MPEA particles. The low-boiling-point element Mg is incorporated with Fe, Co and Ni to synthesize MPEAs (FeCoNi)_{1-x}Mg_x (x=0.05, 0.15, 0.25, 0.35). The high thermal temperature generated during the interaction between the laser beam and MPEAs gives rise to the evaporation of Mg leading to the amorphization. The increase of Mg content intensifies the amorphization extent. (FeCoNi)_{0.65}Mg_{0.35} achieves a lower overpotential (256 mV@10 mA/cm²) for OER compared to the crystal counterparts and demonstrates long-term catalytic stability. Theoretical calculations reveal that amorphization strengthens OOH* adsorption energy due to improved charge transfer. This research provides insights into novel synthesis strategies and the catalytic mechanisms of amorphous alloys.

C03-11

高性能 Mg-Bi 基合金组织调控及强韧化机制

郭恩宇*、李泓睿、张至柔、王同敏

大连理工大学

开发高性能镁合金对于进一步扩大镁合金的工业应用至关重要。Mg-Bi 合金是一种新型的低成本合金体系，塑性变形能力好。然而，已报道的挤压 Mg-Bi 基合金的力学性能普遍较低。本研究选择 Mg-5Bi (wt.%) 合金作为基体合金，通过调整 Al、Sn 等合金成分来调控微观组织，进而改善力学性能。首先通过 Al 元素的合金化实现了强塑性协同提高，晶粒细化、析出增强与织构弱化是力学性能改善的主要作用机制。随后以 Mg-Bi-Al 合金为基体，添加 Sn 显著增强沉淀强化效果，从而获得超高的强度。结果表明，添加 Sn 可细化晶粒并显著促进动态析出。实验结果与密度泛函理论计算表明，Bi 原子替代 Mg₂Sn 相中的 Sn 原子，Mg₂Sn 逐渐成为主要强化相之一。制备的新型 Mg-5Bi-3Al-5Sn 合金具有超高的强度，其屈服强度为 384 MPa，抗拉强度达 400 MPa。本研究为高性能 Mg-Bi 基合金的开发提供了实验基础和理论依据。

C03-12

定向能量沉积镁合金微观组织控制及强塑性提高机制

贾海龙

吉林大学

采用线弧定向能量沉积技术制备大型镁合金构件在汽车、航空航天等领域具有广阔应用前景。本工作重点探究了电弧摆动、外加粒子、层间冷却等策略对线弧定向能量沉积 ATZM31 合金薄壁构件的成形质量、微观组织演变及力学性能的影响。

C03-13

利用位错转变协同提升纯镁强塑性

郑江*

重庆大学

协同提升强度-塑性是镁合金的研究焦点和难点。本文通过位错转变在纯镁中引入高密度的<c+a>位错，从而实现了强塑性协同效应的显著提升：屈服强度从 87.6 MPa 提升至 156.6 MPa，延伸率从 7.7%提高至 17.6%。通常，由于室温下临界分切应力(CRSS)较高，在镁中引入高密度<c+a>位错十分困难。我们的研究发现，可将拉伸孪晶作为“位错转换器”，将基体中的基面<a>位错转化为孪晶内的<c+a>位错。通过预拉伸

在纯镁中引入大量基面 $\langle a \rangle$ 位错，随后通过压缩变形激活拉伸孪生，将基面 $\langle a \rangle$ 位错转变为 $\langle c+a \rangle$ 位错。位错转变处理产生了大量的 $\langle c+a \rangle$ 位错和 I1 层错，从而提高了强度。高密度的 $\langle c+a \rangle$ 位错、I1 层错，以及孪晶内降低的 c/a 轴比，促进了锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移，从而显著提升了塑性。这种位错转变策略为在实现镁合金强塑性协同提升提供了一条有效途径。

C03-14

镁合金砂型铸造起燃机理及防燃阻燃技术研究进展

张伦勇*

哈尔滨工业大学

航空航天飞行器向轻量化快速发展迫切要求实现大型复杂镁合金构件的整体化铸造成形，超越了目前镁合金铸造安全生产的重量上限，易于燃爆。为此细致研究镁合金的燃烧规律已刻不容缓。本报告在梳理镁合金燃烧研究现状基础上，着重介绍近来我们针对大型复杂镁合金的砂型铸造开展的镁合金燃烧过程及其影响规律的研究进展。这些工作揭示了镁合金的起燃过程，发现表面氧化膜破裂是镁合金起燃的限制性环节；二氧化碳气体是砂型铸造镁合金过程中镁合金燃烧的主要氧化性气氛，同时热解气体中的一氧化碳和氮化物等气体与二氧化碳存在耦合促进作用，导致镁合金剧烈燃烧；Nd 元素添加可提高镁合金的燃点，有助于抑制镁合金燃烧。上述工作为进一步开发镁合金防燃阻燃技术提供了理论指导。

C03-15

调控镁锌钙金属玻璃的降解行为：通过锌的内部迁移形成富锌非晶层

余毅、潘杰*

华中科技大学

推进可生物降解的医疗器械的发展，并深入理解其降解机制，对于革新骨科医学和改善患者预后至关重要。镁锌钙金属玻璃（MgZnCa MG）因其在骨科应用中比传统晶体合金具有更大的潜力而脱颖而出。然而，尽管它具有诸多优势，但对于 MgZnCa 金属玻璃的降解行为，尤其是在模拟患者日常活动条件下的降解行为，目前仍缺乏全面的了解。

在本研究中，我们阐明了 MgZnCa 金属玻璃的降解机制，特别强调了其独特的富锌非晶层的形成，这一层显著减缓了基体的降解速率。详细分析表明，MgZnCa 金属玻璃的非晶结构促进了镁和钙的选择性溶解，导致基体内部产生大量空位。这些空位为锌原子的内迁提供了通道，最终形成了致密的富锌层。富锌层的周期性形成与溶解在降解路径中起到了缓冲作用，从而确保了 MgZnCa 金属玻璃的降解速率显著低于其晶体对应物。

C03-16

Ti_p 作用下镁基材料的组织与力学性能调控规律研究

邓坤坤

太原理工大学

颗粒增强镁基复合材料（PMMCs）材料在秉承镁合金优点的同时弥补其不足，具有高强度、高模量等优点，但其韧性差，致使应用空间受限。针对此问题，论文将 Ti_p 引入至 Mg 基体中开发了 Ti_p/Mg 材料，研究了其高温变形行为，明晰了 Ti_p 作用下 Mg 基材料的 DRX 行为及高温变形机理，确定了可加工区间。通过热挤压在 Ti_p/Mg 中构建了类层状构型，基于 Mg 基体硬度调控，探讨了 Ti_p/Mg 类层状构型对其协调变形行为的影响规律。最后介绍研究团队在高强镁合金、高塑镁合金、高模量镁基复合材料、高强可降解镁基材料的研究成果。

C03-17

Zn 添加对低含量 Mg-Al-Mn 系合金强塑性与断裂行为影响机制

王琨

吉林大学

低合金化 Mg-Al-Mn 系合金具有高热稳定性、可高效成形等优点。然而，镁合金具有密排六方晶体结构，室温下可激活的独立滑移系有限，导致其塑性变形能力差。再者，镁合金的强基面织构进一步削弱其

成形性。此外，低合金由于缺乏充足的强化相，导致其强度较低。本文针对低合金化 Mg-Al-Mn 系合金“强度-塑性/成形性”呈倒置矛盾的瓶颈难题，基于多元少量合金化设计理念，结合热变形（挤压、轧制）的协同调控，成功开发了含有微量 Zn 和 RE 的新型 Mg-Al-Mn 系合金。阐明了 Zn 对 Mg-0.5Al-0.4Mn-0.4Zn-0.2Ce (wt.%, 0.4Zn) 合金强塑性及断裂行为的调控机制。Zn 添加促进了锥面<c+a>滑移激活，降低了晶界微裂纹；Zn 偏聚强化的晶界可作为微裂纹扩展的缓冲屏障，并可持续激发相邻晶粒中的非基面位错。明晰了 Zn 对 Mg-1.2Zn-0.5Al-0.4Mn-0.2Ce (wt.%, 1.2Zn) 合金各向异性及成形性的影响机制。1.2Zn 合金优异成形性（杯突值~6.6 mm）源于织构弱化、拉伸孪晶与锥面<c+a>滑移激活增加，以及 Zn 偏聚介导的 GB 内聚力增强等。厘清了异质结构调控对 Mg-0.6Al-0.6Mn-0.5Zn-0.2Ce-0.2Nd (wt.%, A200-10) 合金强塑性及断裂行为的影响机制。异质界面不仅阻滞裂纹扩展，同时裂纹尖端附近 unRXed 晶粒会持续激活非基面位错；A200-10 合金保持较高位错密度提高 TYS 的同时，鼓励更多异质结构参与变形，带来 HDI 强化并抑制应变软化，实现 TYS (~306 MPa) 和 FEL (~18.4%) 的优异结合。

C03-18

Revisiting tension-compression asymmetry in a Mg alloy: insights from statistical strain partitioning and intra-/inter-granular mechanisms at the nanoscale

Ran Ni, Dongdi Yin*

Southwest Jiaotong University

Tension-compression asymmetry (TCA) is a fundamental mechanical characteristic in Mg alloys, but its nanoscale strain partitioning and the corresponding integrated intra- and inter-granular deformation modes remain unclear. To this end, the nanoscale strain partitioning together with the activity of both the individual slip modes and grain boundary sliding (GBS) were quantitatively and statistically investigated based on approximately 30 million measured strain data for an aged twin-free Mg-10Y sheet during tension and compression. This was accomplished using multimodal analysis of high-resolution digital image correlation (HRDIC) and electron backscattered diffraction (EBSD) data. The results revealed that strain partitioning exhibited pronounced TCA, where the mean and maximum effective shear strain (ϵ_{eff}) values of both slip bands (SBs) and the grain mantle (GM, the region near grain boundary) for tension were larger than that for compression, implying more intensive strain localization in tension. TCA was also evident from analysis of the relative slip activity for the various slip modes, where pyramidal <c+a> slip was barely activated during tension, but it exhibited a relatively high activity during compression. The GBS activity, which was quantified in terms of both the GBS displacement and the participation rate, was higher for tension compared with compression. This work, which demonstrates experimental and quantitative TCA strain partitioning and GBS characteristics for the first time, provides valuable experimental information useful for a more complete understanding of TCA in polycrystalline Mg alloys.

C03-19

Mg-Sm 系稀土镁合金组织与性能研究

袁明*

西南大学材料与能源学院

通过 Sm、Gd、Zn 等元素的合金化设计，制备了低稀土含量的高强塑稀土镁合金。利用金相显微镜、扫描电镜、透射电镜、X 射线衍射仪和材料力学性能试验机研究了合金热挤压过程中的组织演变与力学性能。明晰了该合金的析出序列及强韧化机制。通过旋锻成形，制备了屈服强度超过 500MPa 的高强镁合金。

C03-20

镁合金微观变形行为及强韧化机制研究

于铭迪

上海交通大学

Easy activation of basal <a> dislocation causes limited ductility of magnesium, which exhibits insufficient strain hardening, leading to the localization of plastic deformation, instability and crack nucleation. Here, micropillar compression tests in a magnesium-yttrium-calcium alloy found an anomalous strain hardening

phenomenon induced by interactions between basal $\langle a \rangle$ and pyramidal $\langle c+a \rangle$ dislocations. Dislocation interactions generate strong obstacles that inhibit the continuous slip of basal $\langle a \rangle$ dislocations, preventing deformation instabilities associated with basal slip localization. Meanwhile, the strain hardening is enhanced during plastic deformation, which would otherwise be limited by the easy glide of basal $\langle a \rangle$ dislocations. Additionally, the activation of more $\langle c+a \rangle$ dislocations contributes to improved ductility. These dislocation interactions can be tuned by activating multiple slips via reducing the critical resolved shear stress ratio between non-basal and basal slip systems. Overall, this study offers a new fundamental perspective on promoting strain hardening and overcoming strength-ductility trade-off in magnesium alloys.

C03-21

Machine learning-assisted efficient design of Mg-Gd-Y based system alloys

Minglei Zhang*

Henan University of Science and Technology

With the rapid development of machine learning technology, its application in materials science is gradually becoming an important tool for mechanical property prediction and alloy design. In this paper, a machine learning based multi-objective optimization method is proposed to predict and optimize the yield strength (YS), ultimate tensile strength (UTS) and elongation (EL) of Mg-Gd-Y system alloys. Various advanced algorithms were used to construct efficient prediction models for YS, UTS, and EL, and the hyperparameters were tuned by a Bayesian optimization algorithm to improve the prediction accuracy. Subsequently, an innovative use of genetic algorithm (NAGA-III) was implemented for the multi-objective co-optimization of YS, UTS and EL to obtain the optimal solution for the alloy properties. On this basis, Shapley Additive Explanations (SHAP) interpretable analysis method was applied to dig deeper into the non-linear relationship between alloy composition and properties as well as the interactions of various factors, revealing the key influencing factors in alloy design. The experimental results show that the proposed method can effectively improve the accuracy of alloy property prediction and provide theoretical guidance and practical basis for the multi-objective design of Mg-Gd-Y system alloys.

C03-22

基于固相扩散反应原位合成高温稳定粒子及其对镁合金力学性能的影响

何维均*、冯洋、徐慧、蒋斌

重庆大学

添加第二相粒子阻碍位错运动是提高镁合金高温强度的重要途径。第二相粒子本身的熔点越高，其热稳定性一般越高，越有利于在高温条件下阻碍镁合金中位错的运动。在镁合金凝固过程中析出的初生第二相粒子，其熔点一般较高。但是由于熔体中元素扩散较快，镁合金熔体中析出的第二相粒子一般较为粗大，难以有效发挥其强化作用。在固态镁合金中析出的第二相粒子，其熔点相对较低，难以在高温条件下起到有效强化作用。为此，本研究以 Mg-Al 系合金、纯 Al 以及 Mg-Y 合金为原材料，通过热轧复合和固相扩散反应，原位制备生成 Al₂Y（其熔点超过 1480℃）等 Al-RE 高热稳定的第二相粒子。SEM 和 TEM 表征发现，所制备的 Al-RE 粒子尺寸在纳米尺度与亚微米尺度之间，显著小于传统 Mg-Al-Y 合金熔体析出的几十微米尺度的 Al-RE 粒子。400℃条件下的热暴露测试表明，所引入的 Al-RE 粒子具有较好的热稳定性，并且能有效阻碍基体晶粒的粗化。在 Y 元素总体含量为 2%时，原位引入 Al-RE 高热稳定粒子后，镁合金在 300℃温度条件下的抗拉强度达到 180MPa，显著高于 AZ31 和 Mg-3Y 合金。

C03-23

高熵合金涂层作用下复合铸造 Mg/Al 双金属界面调控与强化机制

蒋文明*

华中科技大学

Mg/Al 双金属结合了镁合金和铝合金的优点，在航空航天、汽车等领域具有广泛应用前景。然而，Mg/Al 双金属界面易于形成脆硬的 Al-Mg 金属间化合物，显著削弱了 Mg/Al 双金属性能，限制了其应用。本研究提出通过在铝合金嵌体表面喷涂高熵合金涂层，通过热力学和高熵合金理论计算等方法从热力学角度设计

了高熵合金涂层成分,探索高熵合金涂层对 Mg/Al 双金属界面组织和性能的影响机理,旨在获得固溶体构成的双金属界面,大幅提升双金属性能。研究表明, Mg/Al 双金属界面引入高熵合金涂层并结合超声场后,界面原子扩散受到抑制,界面厚度显著降低。Al 与 FeCoNiCrCu 高熵合金涂层之间更倾向于形成 $\text{Al}_x\text{FeCoNiCrCu}$, Mg/HEA 界面形成的熔池在极高的冷却速率下形成纳米晶。高熵合金涂层作用下,界面形成以固溶体和共晶组织为主的低硬度界面组织,双金属的剪切强度由 34.63 MPa 提升至 76.69 MPa,提高了 121.45%。

C03-24

Mg-Y-Nd 合金中 β_1/β' 耦合结构的多尺度模拟研究

刘泓*

上海交通大学

在 Mg-Y-Nd 合金中,关键的强化析出相 β_1 和 β' 通常形成耦合结构,其中 β' 析出相总是附着在 β_1 的两端。这里的一个问题是,随着 β_1 在固态镁基体中延长,附着的 β' 析出相如何演变。为了研究这一问题,本研究采用基于三维相场方法的多尺度模型,模拟了 β_1/β' 耦合结构中 β_1 和 β' 析出相的演变过程。模拟结果表明,在演变过程中, β_1 析出相延长,而附着的 β' 析出相仅在沿 β_1 延伸方向的一侧生长,并在相反的一侧溶解。这导致了一种视觉效果,即 β' 析出相似乎在固态基体中“移动”。这一现象由化学自由能和弹性应变能之间的相互作用所控制。化学自由能促进 β' 析出相的均匀生长。然而,由 β' 析出相及其所附着的 β_1 板末端集中的应力场产生的弹性应变能,仅有利于 β' 析出相一侧的生长,同时导致另一侧的溶解。当耦合结构的演变受到邻近耦合结构的影响时, β' 析出相的演变强烈受到弹性应变能最小化的驱动。总体而言, β' 析出相倾向于在拉应力场下生长,并在压应力场下溶解。

C03-25

镁合金凝固缺陷模拟仿真与预测调控

张昂*

重庆大学

大型复杂镁合金铸件几何形状复杂,在成形过程中容易出现气孔、缩松等缺陷,极大地影响了合金性能,限制了其规模化应用。为减少和消除缺陷,报告人针对镁合金凝固缺陷模拟仿真与预测方面存在的模型精度差、模拟效率低等问题,从模型建立、算法开发和推广应用等方面,构建了求解凝固过程多场耦合作用下多相交相互作用的理论模型,开发了高效求解多场多相模型的高性能算法,在此基础上,发展了孔隙缺陷调控方法,支撑了高质量镁合金铸件的制备。

C03-26

新型低成本高强耐蚀 Mg-Zn-Ca 系合金成分设计与组织控制

李美璇

吉林大学

Mg-Zn-Ca 系合金具有弱织构特性、良好的成型性和优异的烘烤硬化能力,因而在航空航天和汽车等领域应用前景广阔。然而,Mg-Zn-Ca 系合金通常会发生严重的点蚀,这一瓶颈问题阻碍了其进一步应用。此外,镁合金的强度和耐蚀性呈矛盾关系。因此,如何在提高 Mg-Zn-Ca 系合金耐蚀性的同时不损害强度是亟需解决的问题。我们发现,向 Mg-Zn-Ca 系合金中添加 Sn 元素可显著提高合金的耐蚀性,主要是由于合金表面的腐蚀产物膜中掺杂了 SnO_2 ,表面膜变得更加致密。进一步,我们对开发的 Mg-Zn-Sn-Ca 合金进行了预变形和时效处理,合金在烘烤硬化后,强度得到显著提升,同时耐蚀性没有恶化。其机制主要是由于预变形后引入了大量位错,时效过程中 Zn、Ca 和 Sn 原子偏聚在了位错处,通过溶质原子钉扎位错提升了强度。此外,溶质原子的偏聚也降低了位错处的弹性应变,从而抑制了位错处的优先溶解。因此,即使预变形引入了大量位错,合金的耐蚀性仍然没有下降。本研究可为设计和制备新型高强耐蚀镁合金提供理论指导。

C03-27

激光增材制造高强度镁稀土合金腐蚀行为研究

邓庆琛*、吴玉娟、彭立明

上海交通大学材料科学与工程学院

激光粉末床熔融 (LPBF) 技术因其能够显著提升镁合金的力学性能而受到广泛关注, 然而, 通过该技术制备的镁合金的耐蚀性与传统铸造合金相比仍缺乏深入研究。本研究采用 LPBF 技术和半连续铸造技术分别制备了高强度镁合金 Mg-11Gd-2Zn-0.4Zr (wt.%, GZ112K), 并系统地对比了其在固溶 (T4) 和时效 (T6) 热处理前后的耐蚀性。电化学测试和浸泡试验表明, 不同状态下的耐蚀性排序为: LPBF 态 < LPBF-T6 态 < LPBF-T4 态 < Casting-T4 < Casting-T6 < 铸造态。尽管 LPBF 态合金具有更细的晶粒和 $(\text{Mg,Zn})_3\text{Gd}$ 共晶第二相, 从而提升了其拉伸性能, 但其耐蚀性较差, 主要原因是 $(\text{Mg,Zn})_3\text{Gd}$ 相沿晶界呈网状分布, 缺乏腐蚀阻挡作用, 同时增加了阴极与阳极的比值。在 T4 处理过程中, $(\text{Mg,Zn})_3\text{Gd}$ 相转变为晶界处的块状 X 相和晶粒内的层状长周期堆垛有序 (LPSO) 结构, 从而降低了与基体之间的电位差, 显著提升了耐蚀性。然而, 在 LPBF-T6 态合金中形成的 β' 时效相增加了微观电偶腐蚀倾向, 降低了其耐蚀性。本研究强调了 T4 和 T6 热处理在优化增材制造镁合金耐蚀性方面的关键作用。

C03-28

压铸镁合金粘膜缺陷研究

宋江凤*

重庆大学

镁合金高压压铸过程中容易出现粘模缺陷, 这严重影响了构件质量和生产效率。本文通过熔炼浸泡实验, 分析 Mn/La/Ce 合金化对 H13 钢在 AM60 镁熔体中的界面反应层生长动力学行为的影响, 并基于拉拔实验分析了合金元素及压铸工艺参数对界面化学粘附/机械结合的影响机制。研究发现 Mn/La/Ce 元素添加, 将在界面产生 AlFe 化合物, 导致粘膜缺陷的产生。本研究旨在为控制镁合金一体化压铸缺陷控制提供参考, 进一步推动镁合金在大型复杂结构领域的大规模应用和发展。

C03-29

脉冲电流辅助弯曲 AZ61 镁合金管的组织演化及塑性变形机制研究

徐虹*、蔡瀚荣、刘文龙

吉林大学

为了提升镁合金管材的弯曲成形质量, 本报告以 AZ61 镁合金管为研究对象, 开展了脉冲电流辅助弯曲 (Pulse Current Assisted Bending, PCAB) 试验, 系统研究了不同脉冲电压 (5.0 V 与 10.0 V) 条件下的温度演化规律、宏观成形行为、力学性能以及微观组织演变机制, 旨在揭示 AZ61 管复杂应力耦合场下脉冲电流的作用机理与塑性变形机制。

研究表明, PCAB 工艺可实现快速、均匀的热输入, 实现管材处于较均匀的温度场下成形, 有效改善管材弯曲过程中的椭圆度与壁厚减薄等问题, 显著提升成形精度与塑性。微观组织分析显示, 脉冲电流诱发的电致塑性效应可使拉伸孪生主导的变形机制向非基面滑移转变, 同时电子风力促进了垂直于电流方向位错的迁移, 加快了再结晶过程。进一步研究发现, 随着脉冲电流强度的增加, 在 10.0 V 条件下, 动态再结晶和去孪生现象愈发显著, 再结晶起始更早、程度更高。此外, 10V 脉冲电流促进了位错胞向亚晶界的转化, 并推动亚晶界向新晶界演化, 从而提高了管材的塑性与成形均匀性。

综上所述, PCAB 工艺通过电致塑性效应和热输入调控, 实现了对 AZ61 管材宏观成形行为与微观组织演变的有效控制, 显著提升了弯曲性能和塑性成形能力。研究为 HCP 结构金属管材的高效成形提供了新路径, 并对脉冲电流精密控制加工技术的发展具有重要参考价值。

C03-30

化学成键效应主导镁合金元素界面偏聚的原子尺度研究

何聪 1,2,3*, 厉志乔 4, 陈厚文 4, 曾卓然 1,2,3, 徐世伟 2,3, 聂建峰 5

1 湖南大学材料科学与工程学院, 长沙, 410082

2 湖南大学整车先进制造技术全国重点实验室, 长沙, 410082

3 湖南大学苏州研究院, 苏州, 215131

4 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆, 400045

5 Monash University, Victoria, 3800, Australia

镁合金强度的提升主要源于各类界面（晶界、层错和相界等）对位错运动和孪生变形的阻碍。传统的强化方法主要通过增加界面数量来提高强度，但近年来利用该方法提升强度已接近镁合金的极限，未来，进一步提升强度的方向是对界面结构进行精确的调控。然而，受界面成分影响的电子结构、应变分布、能量状态非常复杂，且与界面结构的耦合作用机制不明确，导致界面结构调控困难。针对镁合金界面微结构调控这一关键问题，申请人结合原子尺度表征和跨尺度计算模拟方法，提出了基于界面化学成键效应主导的元素偏聚实现镁合金界面结构调控的新思路，阐明了成键效应驱动界面元素偏聚的新机制，且基于该新机制，发展了界面偏聚抑制孪晶界迁移、促进层错诱导加工硬化、提升析出相强化效果的调控机制，为通过界面结构设计提升材料力学性能奠定了理论基础。

C03-31

镁合金薄液膜腐蚀行为及机制研究

杨耀*、应韬、曾小勤

上海交通大学

大气腐蚀作为镁合金的主要腐蚀方式之一，本质上是镁合金在薄液膜环境下的电化学腐蚀。本研究工作通过搭建薄液膜腐蚀装置，在多种液膜厚度下对镁合金的腐蚀行为进行了分析与表征，揭示了镁合金表面腐蚀产物膜层和空气中的溶解氧对于薄液膜腐蚀的影响机制。研究表明，在薄液膜下沉积的致密腐蚀产物膜有助于高纯镁产生类钝化行为从而降低腐蚀速率，这种类钝化行为在极薄液膜（厚度 100 μm 和 200 μm 薄液膜）下更为显著；微电偶腐蚀对于表面膜层保护性能有破坏作用，抑制微电偶腐蚀能够提升膜层保护性能；腐蚀产物膜对氧还原反应有抑制作用，腐蚀产物膜的保护性越好，对氧气扩散的阻挡作用就越强，从而使阴极反应中氧还原反应的贡献减小；制备具有保护腐蚀产物膜的镁合金可以抑制大气腐蚀中的氧还原反应，从而降低发生腐蚀的阴极反应速率。

C03-32

高强韧变形稀土镁合金的多尺度断裂行为

纪志康*¹、徐世伟¹、郑明毅²

1. 湖南大学

2. 哈尔滨工业大学

镁合金具有密度低、比强度和比刚度高等优点，在新能源汽车等领域应用前景广泛。然而，在要求高可靠性的领域，低断裂韧性严重限制了镁合金的推广应用。通过组织的构型设计，制备了具有优异强韧性匹配的 Mg-9Gd-4Y-1Zn-0.5Zr 合金，其屈服强度和断裂韧性 K_{IC} 分别为 430 MPa 和 23.1 MPa m^{1/2}。该合金呈现非均质的多尺度多相组织，其微观组织包括双峰组织、块状 LPSO 相、层片状 γ' 相和 β' 纳米析出相。未再结晶晶粒对主裂纹扩展的阻碍作用，导致主裂纹路径发生偏转。微裂纹平行 γ' 相萌生扩展，形成了垂直主裂纹的二次微裂纹。裂纹尖端非基面 $\langle a \rangle$ 位错和锥面 $\langle c+a \rangle$ 位错的激活，有效的提升了合金的韧性。

C03-33

微量 TiB₂ 粒子改性的 AZ91D 复合材料制备及强韧性协同提升机制

杜泽龙、郭恩宇*、陈宗宁、康慧君、张至柔、王同敏

大连理工大学

铸造 AZ91D 镁合金长期受粗大的 α -Mg 晶粒和连续的 β -Mg₁₇Al₁₂ 相困扰，严重制约其力学性能。本研究提出一种 TiB₂ 粒子改性的 AZ91D 合金材料设计与制备策略，实现其强度和塑性的协同提升。在 AZ91D 合金中引入微量（0.3 wt.%）TiB₂ 颗粒，利用其异质形核与生长限制的耦合效应实现晶粒细化。研究发现的晶体学取向关系（ $[11-20]_{\text{Mg}} // [11-20]_{\text{TiB}_2}$, $(01-10)_{\text{Mg}} // (0001)_{\text{TiB}_2}$ ），证实 TiB₂ 可有效诱发 α -Mg 形核，使晶粒尺寸减小 64.4%。此外，TiB₂ 颗粒的加入促使 β -Mg₁₇Al₁₂ 相形貌由粗大的连续网状结构转变为弥散分布的小块状或球状结构。常规熔铸条件下，添加 0.3 wt.%TiB₂ 颗粒的 AZ91D 合金的屈服强度、抗拉强度和

延伸率分别达到 129.2 MPa、247.0 MPa 和 8.5%，较未添加颗粒的 AZ91D 合金分别提高了 9.1%、26.3%和 63.4%。本研究不仅阐明了镁基复合材料中颗粒对基体组织和第二相的调控机理，也为开发铸造镁合金新型细化剂提供了重要思路。

C03-34

镁合金择优取向沉淀调控与强韧化机理

周路通、王金铭、邹国栋、彭秋明*

燕山大学

传统的制造方法，包括铸造、热变形和退火，在实现镁合金的卓越强度和延展性方面面临着巨大的挑战。本研究报道了一种通过超高压+焦耳热处理（UPJT）同时提高 Mg-4Sn（at.%）二元合金室温抗拉屈服强度（YS = 341 ± 9.6 MPa）和伸长率（EL = 15 ± 1%）的有效策略。该时效条件（80 μs, 500 Hz, 600 s）是时效镁合金最有效的时效模式。透射电镜观察（TEM）、密度泛函理论计算（DFT）和分子动力学模拟（MD）证实，这主要与独特的择优取向梯度沉淀结构有关。实验和理论结果均表明，孪晶界诱导析出物偏析和析出物辅助孪晶界迁移是梯度析出结构形成的主要原因。细小的 Mg₂Sn 颗粒能有效地抑制位错运动，提高其强度。相比之下，粗粒 Mg₂Sn 可以发生塑性变形和剪切变形，具有较高的延展性。择优取向梯度结构策略为设计具有优异力学性能的新型镁合金提供了新的前景。

C03-35

纤维增强 Mg/Zn 复合材料组织与变形行为研究

王森巍¹，余加¹，潘复生¹

1 材料科学与工程学院，重庆大学

纯锌（Zn）因其优异的耐腐蚀性和无毒性而被广泛用于生物医用材料，但其工件软化特性无法提供有力的支撑作用。镁（Mg）无毒且具有加工硬化特性。在复合材料领域，增强 Mg 可用于 Zn 基体中，以改善 Zn 基材料的机械性能并赋予其加工硬化特性。在本工作中，通过结构设计和共挤工艺制备具有加工硬化特性的 Mg/Zn 复合材料。微观结构结果表明，Mg 原子扩散到 Zn 基体中，在界面处形成了厚度为~4.7 μm 的纳米级尺寸 MgZn₂ 相层。界面层改变了 Zn 基复合材料的变形模式，由加工软化转变为了加工硬化特征。由于异质变形诱导效应和残余位错增强，有效提高了 Mg/Zn 复合材料的极限拉伸强度（UTS 为 114 MPa）。同时，在前应力和背应力作用下，晶粒靠近界面的非基面滑移系统被激活，促进了 Mg/Zn 复合材料的协同变形。引入增强体 Mg 可以改变 Zn 基合金的变形模式，并通过替代高强度增强体材料 Mg 可进一步提高复合材料的强度，从而为开发高强度 Zn 基生物材料提供了新思路。

C03-36

Fe 改性 Ca-Mg-P 涂层在镁合金表面具有协同抗菌、光热和成骨性能

刘旭辉¹、黄启鸿²、戴翌龙¹、齐福刚*¹、余嘉³、欧阳晓平¹

1. 湘潭大学

2. 杭州师范大学附属医院

3. 重庆大学

过快的降解速率和不均匀腐蚀仍然是制约生物镁合金应用的主要障碍。由于有着优异的生物相容性和耐腐蚀性能，磷酸盐涂层在生物镁合金表面的应用越来越常见。细菌感染是导致植入手术失败的另一个关键因素，由于磷酸盐本身不具备抗菌性能，所以其临床使用受到限制。本工作通过金属蒸气真空弧离子源（MEVVA）技术对 Ca-Mg-P 磷酸盐涂层进行 Fe 离子注入改性。意外的是，Fe 离子注入后不仅提升了 Ca-Mg-P 磷酸盐涂层的抗菌性能和耐腐蚀性能，还改善了其光热转换性能。使得新的 Ca-Mg-P/Fe 磷酸盐复合涂层同时具备离子抑菌和光热抗菌性能。系统研究了 Ca-Mg-P/Fe 磷酸盐复合涂层的形成机理、耐腐蚀性、光热性能和生物相容性，使用蒙特卡洛方法模拟了注入离子的分布情况和能量损失，使用第一性原理计算解释了 Ca-Mg-P/Fe 磷酸盐涂层的耐腐蚀机制。

C03-37

基于恒电位方法与第一性原理的镁合金阴极析氢反应研究

许心宸、朱虹*、王乐耘、曾小勤

上海交通大学

由于镁合金具有轻质和自然丰度高的特点，近年来得到了广泛的关注，然而其实际应用收到易发生电偶腐蚀的固有特性的限制。在本研究中，采用密度泛函理论（DFT）结合恒电位方法，模拟了镁合金的腐蚀极化曲线。通过对纯 Mg(0001)表面的第一性原理模拟，系统地研究了析氢反应的动力学行为，并以从头计算的方式获得了腐蚀极化曲线，从中进一步得出了腐蚀电流密度、腐蚀电位以及 Tafel 斜率，与实验结果良好符合。针对镁合金固溶体，建立了氢吸附能与 Volmer 或 Heyrovsky 反应活化能之间的 Brønsted-Evans-Polanyi (BEP) 关系，以加速腐蚀动力学的评估过程。该计算框架不仅验证了通过原子级模拟准确预测金属合金电偶腐蚀动力学的可行性，也为基于氢吸附能的高通量筛选提供了理论基础，进而加速耐腐蚀金属合金的理性设计与开发。

C03-38

Effect of trace Ce on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Mg-14Gd-xCe-0.5Zr alloy

Dongzhen Wang*, Xiaoya Chen, Quanan Li

Henan University of Science and Technology

The effects of Ce addition on the microstructure, corrosion behavior and mechanical properties of as-cast Mg14Gd-xCe-0.5Zr ($x = 0, 0.3, 0.6, 1$ wt%) alloys were investigated in this work. The results show that the introduction of trace Ce promoted the refinement of the alloy grains and achieved a high degree of homogenization of the eutectic phase distribution. The number of cathodic corrosion potentials in the alloy increased significantly, showing more severe micro-galvanic corrosion. Notably, the addition of 0.3Ce reduces the hydrogen evolution rate of the alloy, and increases the weight loss volume and weight loss rate. This is due to the large amount of dissolution of the eutectic phase, and the oxides/hydroxides of Gd and Ce are attached to the magnesium matrix. The weight loss rate of 0.6Ce alloy is only $7.35 \text{ mg cm}^{-2} \text{ d}^{-1}$, showing the best corrosion resistance. Precipitates are enriched on the surface of 1Ce alloy, and the thicker or aggregated film leads to lower anode utilization. In addition, the introduction of low content of Ce enhances the grain boundary strength, thereby enhancing the mechanical properties. The UTS, YS and EL of 0.6Ce alloy reach 254 MPa, 220 MPa and 4.63 %, respectively. However, with the introduction of excessive Ce, more brittle Mg12Ce phases are accumulated at the grain boundaries, resulting in weakened mechanical properties.

C03-39

协同调控 Mg-6Gd-5Y-1Zn-0.4Zr 环的力学及阻尼性能

付瑞豪

重庆大学

Mg-6Gd-5Y-1Zn-0.4Zr 合金通过离心铸造、均匀化、热轧和时效处理制备。铸态合金的微观结构由等轴晶粒和块状 18R 长周期堆垛有序 (LPSO) 相组成，晶粒内部呈现层状 14H-LPSO 相。均匀化后，块状 18R-LPSO 相溶解于 α -Mg 基体中。热轧后，细小的动态再结晶 (DRX) 晶粒沿变形层状 14H-LPSO 相的边缘分布，合金呈现双峰组织结构。通过 60%轧制和时效处理制备的试验合金的抗拉强度 (UTS)、屈服强度 (YS) 和伸长率 (EL) 分别达到 435 MPa、411 MPa 和 3.0%。与均匀化合金相比，UTS 和 YS 分别提高了 88.3%和 149.1%。时效合金的阻尼值为 0.021，仅比铸态低 0.005。由于存在双峰微观结构和 14H-LPSO 相，Mg-6Gd-5Y-1Zn-0.4Zr 合金实现了强度与阻尼性能的协同效应。试验合金的强化机制主要为细晶强化和 β' 相沉淀强化。Mg-6Gd-5Y-1Zn-0.4Zr 环件的阻尼机制为位错阻尼机制。

C03-40

Unveiling asymmetric precipitation strengthening during tension and compression via statistical slip activity analysis for an untextured Mg-10Gd-3Y-0.5Zr alloy

Ran Ni¹, Zhiwei Jiang¹, Carl Boehlert², Jiang Zheng³, Hao Zhou⁴, Qudong Wang⁵, Dongdi Yin^{*1}

1. Key Laboratory of Advanced Technologies of Materials, Ministry of Education, School of Materials Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China

2. Department of Chemical Engineering and Materials Science, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, USA

3. International Joint Laboratory for Light Alloys (Ministry of Education), College of Materials Science and Engineering, Shenyang National Laboratory for Materials Science, Chongqing University, Chongqing, 400044, China

4. Institute of Materials Plainification, Liaoning Academy of Materials, Shenyang, 110167, China

5. National Engineering Research Center of Light Alloys Net Forming and State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Usually, loading direction is not considered when evaluating precipitation-strengthening behavior. However, different precipitation-strengthening responses under tension and compression (termed T-C asymmetric precipitation strengthening) do exist in Mg alloys. Specifically, after peak-aging (T6) of an untextured and twin-free Mg-10Gd-3Y-0.5Zr alloy, the measured room temperature yield strength increased by 103 MPa (+73%) and 25 MPa (+11%) for tension and compression experiments, respectively. To understand this phenomenon, both the distribution and critical resolved shear stress (CRSS) ratio of individual slip modes were statistically analyzed using slip trace analysis based on over 500 slip trace observations. The distributions and CRSS ratios of the individual slip modes varied as a function of the thermal treatment and the loading direction. The aging-induced increase in the $CRSS_{Pyt\ I}/CRSS_{Pri}$ and $CRSS_{Pyt\ II}/CRSS_{Pri}$ ratios was significantly greater in tension compared with compression, which was consistent with the higher yield strength increase observed after the T6 treatment in tension compared with compression. In addition, the aging effects on the frequency of multiple slip, cross slip and slip transfer were different in tension and compression. Overall, this work highlights the importance of considering the loading direction when studying precipitation strengthening for Mg alloys for the first time.

C03-41

多级结构三维互穿相 Mg-Ti 复合材料制备与性能研究

张明

东北大学

中国科学院金属研究所

自然界中的生物材料展现出卓越力学性能和功能特性，归因于它们内部的多级多尺度、三维互穿构型。然而，在块体金属材料中构筑类似复杂精巧的结构面临巨大挑战。在本研究中，我们提出通过熔体浸渗、液态金属脱合金以及添加固态镁粉作为空间占位的组合方法，制备了一系列具有一级、二级、三级结构尺度的 Mg-Ti 三维互穿复合材料。Mg-Ti 复合材料的特征结构尺寸呈现出单峰、双峰和三峰的分布特征。在不同的结构尺度下，复合材料中的 Mg、Ti 两相保持连续，并在三维空间中相互渗透。此外，研究了 Mg-Ti 复合材料的压缩性能并通过恰当的力学模型较好的描述了其杨氏模量。这项研究有望为开发高性能块体多级结构三维互穿相金属基复合材料提供一种新途径。

C03-42

PDGPT: A large language model for acquiring phase diagram information in magnesium alloys

Zini Yan, Ziyuan Rao, Xiaoqin Zeng*

上海交通大学材料智能设计与加工团队

Magnesium alloys, known for their lightweight advantages, are increasingly in demand across a range of

applications, from aerospace to the automotive industry. With rising requirements for strength and corrosion resistance, the development of new magnesium alloy systems has become critical. Phase diagrams play a crucial role in guiding the magnesium alloy design by providing key insights into phase stability, composition, and temperature ranges, enabling the optimization of alloy properties and processing conditions. However, accessing and interpreting phase diagram data with thermodynamic calculation software can be complex and time-consuming, often requiring intricate calculations and iterative refinement based on thermodynamic models. To address this challenge, we introduce PDGPT, a ChatGPT-based large language model designed to streamline the acquisition of magnesium alloys Phase Diagram information with high efficiency and accuracy. Enhanced by prompt-engineering, supervised fine-tuning and retrieval-augmented generation, PDGPT leverages the predictive and reasoning capabilities of large language models along with computational phase diagram data. By combining large language models with traditional phase diagram research tools, PDGPT not only improves the accessibility of critical phase diagram information but also sets the stage for future advancements in applying large language models to materials science.

C03-43

AZ31B 镁合金超声电弧辅助 TIG 焊接及焊后热处理接头组织性能研究

曹云虎¹, 周佳定¹, 韩柯^{1,*}

¹江苏大学材料科学与工程学院

针对变形镁合金焊接头由于接头晶粒粗大、性能不均匀导致的接头综合力学性能降低的难题, 研究超声电弧辅助交流 TIG 焊接技术以及焊后热处理工艺实验, 探索不同超声激励工艺参数对焊接头组织和性能的影响规律, 开展焊后热处理试验, 对不同热处理工艺条件下焊接头的微观组织与力学性能进行表征。其中超声激励参数组合为 30 V, 70 kHz 时, 焊缝中心区域、焊缝顶部及底部的晶粒细化效果最佳。接头抗拉强度达到 241MPa, 达到母材强度的 91.8%。固溶 420°C×8h +时效 200°C×12h 处理后的超声焊接头的抗拉强度最高, 约为 258.67MPa, 达母材抗拉强度的 98.53%。

C03-44

微纳米 TiB₂-Al₂Y 颗粒对 Mg-9Y-0.6La 合金组织及力学性能的影响

张昆

重庆大学

本研究通过添加纳米 TiB₂/Al 中间合金, 将纳米 TiB₂ 和微米 Al₂Y 颗粒引入 Mg-9Y-0.6La 合金中, 制备了微纳米 TiB₂-Al₂Y/Mg-9Y-0.6La 复合材料。双尺度颗粒不仅促进了动态再结晶, 而且有效细化了晶粒并分散了第二相 (Mg₂₄Y₅、Mg₁₂La 和富 Y 相)。与 Mg-9Y-0.6La 合金相比, 4.31 wt%TiB₂-Al₂Y/Mg-9Y-0.6La 复合材料的屈服强度和抗拉强度分别提高了 69 MPa 和 65 MPa。同时, 4.31 wt%TiB₂-Al₂Y/Mg-9Y-0.6La 复合材料在 300°C 下的抗拉强度为 281 MPa, 高于一些高稀土含量 (RE:10-16 wt.%) 的 Mg-RE 合金; 在 350°C 时的抗拉强度为 241 MPa, 高于部分耐热铝合金。这种显著的强化效果源于双尺度 Al₂Y 和 TiB₂ 颗粒对晶界的钉扎、Y、La 和 Al 元素在晶界的共偏聚以及具有细晶粒的双峰组织。

C03-45

Effect of different extrusion parameters on the microstructure and mechanical properties of Mg-4Sm-3Gd-2Yb-0.5Zr alloy

王凌霄*

河南科技大学

The effect of different extrusion parameters on the microstructure and mechanical properties of Mg-4Sm-3Gd-2Yb-0.5Zr (SGY2) alloy was investigated. It was observed that under different extrusion parameters, unDRXed grains of SGY2 alloy exhibited a pronounced basal plane texture, specifically <01-10>//ED, while the texture of DRXed grains was relatively dispersed. Under the condition of 420 °C and an extrusion ratio of 9.4 (420 °C-ER9.4), the basal plane texture intensity of unDRXed grains was the highest. SGY2 alloy at

different extrusion parameters exhibited recrystallization mechanisms mainly characterized by continuous dynamic recrystallization, with some DRXed grains and deformed grains experiencing discontinuous dynamic recrystallization. At the 420 °C-ER9.4, the second phase particles in the as-extruded SGY2 alloy were smaller in size and exhibited a dispersed distribution. Under this condition, a significant amount of dislocation accumulation, dislocation bypassing, and dislocation tangling phenomena were observed. The primary deformation mechanism of unDRXed grains alloy at the 420 °C-ER9.4 may involve prismatic plane $\langle a \rangle$, pyramidal plane $\langle a \rangle$, and pyramidal plane $\langle c + a \rangle$ slip, thereby activating a significant amount of dislocations. Compared to other extrusion conditions, this condition is more prone to activate non-basal plane slip. The as-extruded SGY2 alloy exhibited superior mechanical properties, with ultimate tensile strength and yield strength of 332 MPa and 278 MPa. This is mainly attributed to the extremely fine grains, with many DRXed grains having grain sizes smaller than 1 μm , and higher density grain boundaries produced under this condition. The unDRXed grains contain a high density of dislocations with small Schmid factor, thus effectively inhibiting basal plane slip and strengthening the alloy to some extent. The increased presence of second phase particles will also contribute to strengthening the alloy matrix through precipitation hardening.

C03-46

镁锂合金表面耐蚀类固超滑复合涂层的构筑及自愈功能特性

李炳志¹、郭恩宇^{*1}、陈晓博²、王同敏¹

1. 大连理工大学

2. 墨尔本皇家理工大学

针对镁锂合金耐蚀性不足的问题,本研究开发了一种基于微弧氧化(MAO)技术与固体状超滑涂层相结合的高性能防腐自修复复合涂层。首先在硅酸盐电解液中制备多孔 MAO 陶瓷层作为基底,利用硅烷偶联剂桥接环氧树脂、亲水性纳米二氧化硅和聚二甲甲基硅氧烷,构筑固体状超滑涂层(SSC)。进一步引入相变石蜡形成自修复型固体状超滑涂层(PSSC)。通过真空浸渍或刮涂工艺将其填充于 MAO 层孔隙中,经固化形成结构致密的复合涂层。结果表明:MAO-SSC/PSSC 涂层的低频阻抗模量($|Z|_{0.01}$)高达 10^8 - $10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$,较裸镁锂合金 LA81($10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$)提升 7 个数量级;经 168 小时盐雾暴露后无腐蚀产物,展现出卓越的耐蚀性。涂层具有优异的疏水性(静态接触角 $>107^\circ$)与超滑性(滑动角 $<8^\circ$),腐蚀液滴极易滚落。机械性能优异,抗砂粒冲击(1300 g)、刀划及多次胶带剥离后仍保持良好疏水性。涂层受损后可通过 60 °C 热触发石蜡相变,在 60 min 内实现自修复,恢复疏水与防腐功能。该涂层体系通过 MAO 层的微孔锚固作用与界面化学交联显著增强结构稳定性,有效克服了传统超滑涂层润滑剂易流失与机械稳定性差的难题,实现了防腐屏障、自修复响应与机械鲁棒性能的协同优化。

C03-47

原位 ZnO 掺杂纳米 Zn/HA 生物陶瓷涂层对 AZ31B 镁合金耐腐蚀性能的调控

张超¹、齐福刚^{*1}、刘旭辉¹、欧阳晓平¹、戴翌龙¹、彭峰²

1. 湘潭大学

2. 广东省人民医院

AZ31B 镁合金因快速腐蚀和生物相容性不足限制了其在生物医用领域的应用。本研究开发了一种基于磁过滤阴极弧技术与水热合成法的多功能复合涂层体系,通过在镁合金表面沉积 Zn 涂层,并采用水热合成法沉积纳米羟基磷灰石(HA)涂层,实现了低损伤制备与性能优化。研究表明,Zn 涂层在水热过程中原位转化为 ZnO,简化了抗菌涂层的制备工艺,并显著提升了抗菌性能和生物相容性。实验结果显示,AZ31B/Zn、AZ31B/HA 和 AZ31B/Zn/HA 涂层的结合力分别为 2.59、6.27 和 12.88 N, AZ31B/Zn/HA 涂层展现了最低的摩擦系数(0.38)、最佳的塑性指数(0.76)及接触刚度($2.91 \text{ N} \cdot \mu\text{m}^{-1}$);AZ31B/HA 和 AZ31B/Zn/HA 的弹性模量分别为 10.35 和 12.71 GPa,压应力分别为 1.10 MPa 和 1.15 MPa,且 AZ31B/Zn/HA 涂层的切向应力最低(0.45 MPa),表现出优异的力学性能。在耐腐蚀性能方面,AZ31B、AZ31B/Zn、AZ31B/HA 和 AZ31B/Zn/HA 的极化阻抗依次为 7.87×10^2 、 2.37×10^4 、 2.90×10^7 和 $5.51 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$,腐蚀速率分别为 12.44、6.81、1.77 和 0.18 $\text{mm} \cdot \text{y}^{-1}$;电化学噪声阻抗分别为 2.22×10^2 、 2.27×10^3 、 8.33×10^4

和 $1.12 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。此外, AZ31B/HA 和 AZ31B/Zn/HA 涂层的平均粒径分别为 272.82、256.58 nm, 载流子浓度分别为 1.78×10^{15} 和 $7.32 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 有效地提高了 AZ31B 的耐腐蚀性能。本研究揭示了 Zn、HA 及 ZnO 的协同作用机制, 为镁合金涂层的高性能设计提供了新思路, 并为其在骨科和口腔科植入物领域的实际应用奠定了理论与技术基础。

C03-48

超轻高性能镁锂合金板材制备与组织性能调控

刘伟豪^{a, b}, 杨艳^{a, b}, 蒋斌^{a, b}, 彭晓东^{a, b}, 潘复生^{a, b}

^a 重庆大学材料科学与工程学院

^b 国家镁合金工程技术研究中心

航空航天、武器装备和 3C 电子产品对超轻合金板材的需求十分迫切。镁锂合金作为目前最轻的金属结构材料, 具有超低密度、高比强度、电磁屏蔽性能优异、阻尼减振性好和良好的变形加工能力等优点, 是最具潜力的轻量化材料。本研究采用 Zr 和 Ca 元素微合金化及挤压-在线加热轧制复合成形工艺制备了 0.5 毫米超轻 Mg-10Li-3Al-3Zn-X 合金板材。探讨了微合金化对铸态和挤压态合金微观结构和力学性能的影响, 并研究了轧制工艺参数对合金板材微观结构、力学性能和成形性能的影响。最终, 在轧制温度 125℃、轧制总压下量 75% 条件制备得到 LAZ1033-0.5Ca 合金板材具有良好的力学性能, YS、UTS 和 EL 分别为 234 MPa、278 MPa 和 13.5%, 同时保持了优异的成形性 (I.E.~7.46 mm)。合金板材的强化机理主要包括细晶强化、形变强化和第二相强化; 同时合金元素 Ca 的加入可以通过再结晶来调控基面织构, 得到良好的成形性。

C03-49

First-principles study on stacking fault energy and slip system initiation mechanism of Mg-X binary magnesium alloy

Xiaojie Jiang, Xiaoya Chen, Quanan Li

Henan University of Science and Technology

In this paper, the structural stability, ideal tensile strength, elastic properties and electronic structure properties of Y, Zn in Mg alloy in solid solution are studied by using density functional theory (DFT) with first-principles calculation under generalized gradient approximation. The binding energy results are all negative, indicating that the Mg-X solid solution can exist stably. Among them, the solution strengthening effect of element Y is better than that of element Zn. Tensile simulation shows that Y and Zn can increase tensile strength of magnesium alloy by 2.067% and 3.31% respectively. When the content increased, the strengthening effect was more remarkable. The combined effect of Y and Zn can counteract the lattice distortion of the individual elements. The calculation results of the elastic modulus show that Mg_{31}Y_1 has the greatest stiffness, including bulk modulus, shear modulus and Young's modulus of 35.41, 18.04 and 46.26 GPa respectively. The strengthening effect of Mg-Y-Zn atom distribution shows that the strengthening effect of uniform distribution alloy elements is more remarkable than that of partial distribution alloy elements. Finally, the density of states and differential charge density are calculated, and the chemical bond strength and atomic contribution of Y(Zn) and Mg atoms are discussed.

C03-50

轻质高性能 Mg-Li-Zn-Er 合金板材的制备及其组织性能研究

李舒珊

重庆大学

传统镁锂合金普遍存在绝对强度不足、密度-强度-塑性难以协同调控、室温成形性能差的问题, 严重制约了其大规模的应用, 如今我们亟待制备高强韧性的轻质可成形镁锂合金薄板来扩大其应用范围。本研究以双相 Mg-Li 合金为研究对象, 通过 Zn 和 Er 元素合金化及挤压-在线加热轧制复合工艺制备了 0.6mm 轻质镁锂合金板材, 通过细晶强化、第二相强化以及位错强化, 在 175℃ 轧制得到的 Mg-8.5Li-3Zn-2.5Er 合金板材获得最好的综合力学性能, 其 YS、UTS 和 EL 分别为 245MPa、288MPa 和 13.3%, 杯突值为 6.47mm,

成功制备出了轻质高强、具有优异成形性的镁锂合金薄板。

C03-51

微量 Y 添加对 AM50 镁合金热裂行为的影响

赵帅

重庆理工大学

热裂是制约镁合金构件薄壁化和集成化最常见而严重的铸造缺陷之一。本研究以典型商用 AM50 铸造镁合金为对象,通过微量 Y (0, 0.3, 0.45, 0.6, wt.%) 添加来对其热裂敏感性进行调控。结果表明,随着 Y 含量的增加,合金的热裂敏感性呈现先减小而后显著增加的变化趋势,在 Y 含量为 0.45 wt.% 时合金的热裂倾向最小。Y 添加带来的组织细化与组织中弥散分布的 Al₂Y 颗粒相和 Mg₁₇Al₁₂ 棒状相,使得 0.45Y 合金展现出最大的抗热裂性能。随着 Y 含量继续增加,组织进一步细化,但组织中的 Al₂Y 相偏聚长大为骨骼状形貌,并分布于含量进一步下降的 Mg₁₇Al₁₂ 相前端,阻断 Mg₁₇Al₁₂ 相的补缩通道,使得合金抗热裂性能显著恶化。此外,通过热力学计算与热裂形成示意图对合金凝固过程中第二相与热裂之间的关系进行了讨论。

C03-52

大变形量轧制制备高强高阻尼 Mg-Gd-Y-Zn-Mn 环件

王佳磊

重庆大学

轻质环形结构件是航空航天、国防军工等重点领域的重要装备部件,为充分保证镁合金环件在飞机、航天器、导弹等中应用的可靠性。本研究发展设计离心铸造-热轧短流程工艺,在保证合金高阻尼性能的同时,大幅提高 Mg-8.9Gd-3.9Y-1.3Zn-0.8Mn 合金的力学性能,轧制后合金组织呈现出细小 DRXed 晶粒包围粗大 Un-DRXed 晶粒的双峰组织结构,累计下压量为 70% 时 RR70 样品 UTS 达到 400MPa。经过时效硬化后,在纳米沉淀物的析出强化效果,以及 LPSO 相和 α -Mn 金属颗粒的复合强化作用下,累计下压量 70%、80% 两种时效态样品 ARR70 和 ARR80 样品 UTS 超过了 450MPa,而且 ARR70 样品依旧保持着最高的 EL: 5.9%,这为下一步离心铸造-环轧制备大尺寸高性能 Mg-Gd-Y-Zn-Mn 环件提供技术和理论支撑。

C03-53

高强韧 Mg-Gd 系合金棒材的制备及其强韧化机理的研究

曾志浩

东北大学

Mg-Gd 系合金得益于其优异的固溶强化和析出强化能力,通常具有较高的强度,但其塑性往往通过强度的提高而出现难以避免的下降。本工作中,我们通过调控挤压工艺并结合时效处理制备出的 Mg-Gd 系合金棒材的屈服强度可达~456 MPa,抗拉强度可达~485 MPa,同时具有~8.7%的延伸率。高强塑的实现得益于变形晶粒和再结晶晶粒共存的“混晶组织”,其中再结晶晶粒被细化到了纳米级,变形晶粒内部也存在大量亚晶片层。通过挤压结合旋锻工艺制备出的 Mg-Gd 系合金棒材屈服强度可达~485 MPa,抗拉强度可达~540 MPa,同时具有~8%的延伸率。该合金中片层状 LPSO 相的存在阻碍了旋锻过程中孪晶的生长,从而使晶粒内部形成了大量的纳米级孪晶。

C03-54

一种用于表面性质预测的表面特征强化的多任务学习框架——以镁系金属间化合物为例

许心宸、石皋宁、朱虹*、曾小勤

上海交通大学

晶体表面性质在金属腐蚀中起到关键作用,对其进行高效预测可显著加速耐蚀合金设计与优化。然而,由于多组分化合物的样本空间庞大且计算资源有限,关于表面性质的数据集仍十分稀缺,距离这一愿景的实现尚有相当差距。为此,本工作提出了一种强调表面信息的多任务晶体图卷积神经网络 (SEM-CGCNN),能够直接根据晶体结构同时预测多种表面性质。在包含 3526 条第一性原理获得的二元镁金属间化合物表面能与功函数的数据集上进行评估,该模型相较原始 CGCNN 模型在效率和准确性上均表现出显著提升。

通过迁移学习测试了该模型在纯金属及其他金属间化合物的数据集的能力，展示出良好的可拓展性，并可进一步扩展到其他表面性质和材料体系。本研究为原子结构到晶体各向异性表面性质的端到端映射提供了一种高效策略，为理解和筛选具有特定表面特性的材料搭建了框架。

C03-55

Ca、Sr 元素对 Mg-Al 系合金流动性的影响

姜涛

重庆大学

在汽车产业大力推行节能减排的当下，一体化压铸作为一项创新的制造工艺，凭借减少零部件数量、降低车身重量以及提升生产效率等显著优势，成为行业焦点。镁合金因具备低密度、高比强度等特性，在一体化压铸领域极具应用潜力，然而其液态流动性欠佳的问题，给复杂结构件的压铸成型带来挑战。本研究聚焦于 Ca、Sr 元素对 Mg-Al 系合金流动性的影响机制。通过热分析、扫描电镜及能谱分析等手段，系统探究不同 Ca、Sr 添加量下合金的凝固特性、微观组织演变与流动性关联。结果表明，适量 Ca 元素可细化晶粒，改变合金凝固方式，提高流动性；但过量添加会生成粗大脆性相，阻碍液态金属流动；并且 Ca、Sr 混合添加下合金流动性能得到进一步提升，所研制的 Mg-9Al-0.5Ca-4Sr 合金流动性达 790mm，较 AZ91 合金（391mm）流动性提升 101%。

C03-56

Mg-Zn 合金时效析出行为及强塑性协同提升机制

叶辉

吉林大学

承力结构件面临高性能、低成本、轻量化的多维严苛要求。铸造镁合金凭借低密度、成本低廉、可制备大型复杂构件等而备受关注，但如何通过低成本制备工艺实现其优异的强塑性成为亟需解决的难题。鉴于 MgZn 析出相与密排六方晶体结构强烈的取向依赖性，其具有赋予铸造 Mg-Zn 合金强塑性协同提升的潜能。然而，析出强化主要贡献者 β'_1 -MgZn 密度低、尺寸粗大，强塑性强化能力有限，而 β'_2 -MgZn₂ 无明显析出强化能力。此外， β'_1 -MgZn 的亚结构单元丰富、短程无序，导致其类型繁多，析出演变行为存在争议。为此，本工作采用低成本固溶+双级时效热处理策略，揭示了 Mg-8Zn-0.5Al-0.1Mn 合金中高密度 MgZn 析出演变行为，成功实现了优异的强塑性协同（屈服强度达~226.4 MPa，延伸率为~9.8%）。基于 HAADF-STEM、APT、TEM 表征方法，系统揭示了固溶态 Mg-8Zn-0.5Al-0.1Mn 合金中 Zn 溶质向 β'_1 -MgZn 和 β'_2 -MgZn₂ 演变的行为。同时，发现一种促进高密度纳米 β'_1 -MgZn 析出的新型富 Zn-G.P.区，有效抑制了 β'_2 -MgZn₂ 析出。此外，高密度纳米 β'_1 -MgZn 通过阻碍基面位错滑移减小基面与非基面 CRSS 差值，从而激活非基面位错，实现优异的强塑性协同。本研究为高密度纳米 MgZn 析出相提升铸造镁合金强塑性协同提供了新思路。

C03-57

超声搅拌对 AM50-xCa 显微组织及性能的影响研究

熊联宇

重庆大学

AM50 镁合金因低密度、良好韧性及成本优势，应用逐渐广泛。但其基体中的 $Mg_{17}Al_{12}$ 高温不稳定相，限制了合金的高温性能。向 AM50 中添加 Ca 元素，可通过细化晶粒及生成致密 CaO 氧化膜，显著提升合金的阻燃性能。然而，Ca 元素易促使晶界处形成连续第二相，该第二相与基体的变形协调性差，导致外力作用下应力在晶界聚集且难以释放，造成材料塑性降低。

为改善这一问题，本研究在熔炼过程的液态 - 半固态温度区间施加超声搅拌，利用超声的声流效应破碎枝晶、抑制其定向生长，同时结合空化效应产生的瞬时高压冲击波，破碎并细化第二相。通过调控超声功率（500~2000W）和时间（5~25min），探究出适合 AM50-xCa 体系的最佳工艺参数，实现了晶粒与第二相的协同优化。结果表明，优化后合金的室温晶粒尺寸从 400-500 μ m 细化至 100-150 μ m，第二相的连续网状结构被破坏并细化；燃点从 600 $^{\circ}$ C 提升至 800 $^{\circ}$ C；室温拉伸延伸率较未添加 Ca 的 AM50 合金提升 40% 有余，屈服强度和抗拉强度均有不同程度的提高。该研究为镁合金的工程应用提供了新路径。

C03-58

高强塑性 AZ91 合金异构组织形成机制及强塑性机理研究

石奥杰^{1,2}、李佳声²、董加胜²、王莉*²、楼琅洪²

1. 中国科学技术大学材料科学与工程学院

2. 中国科学院金属研究所

镁合金难以兼具高强塑性的矛盾难题是限制其广泛应用的原因之一，本研究旨在通过调控异质结构组织，实现 AZ91 合金强塑性协同提高，并研究异构组织的形成机制及强塑性机理。本研究通过热-力耦合加工以及精准退火调控构建了变形粗晶与动态再结晶细晶交替分布的层状晶粒异构组织，以及静态再结晶晶粒尺寸呈双峰特征的非均匀晶粒异构组织。非均匀晶粒异构组织的 AZ91 合金室温屈服强度 (YS) 约为 235 MPa，抗拉强度 (UTS) 约为 338 MPa，延伸率 (EL) 约为 23.8 %。相比之下，层状晶粒异构组织 AZ91 合金强度显著提升 (UTS $\approx$ 375 MPa, YS $\approx$ 275 MPa) 并保持了较高的塑性 (EL $\approx$ 21.3 %)，同时具有优异的加工硬化能力。单轴拉伸循环加载实验表明，层状晶粒异构组织在拉伸过程中存在晶粒异质变形诱导 (HDI) 的加工硬化行为，并耦合细晶强化、位错强化、Orowan 强化显著提高 AZ91 合金强度。通过滑移迹线表征和数字图像相关 (DIC) 技术，对两种组织合金不同应变阶段的组织演化规律及变形机制分析，发现异质晶粒界面处软/硬区应变不匹配行为是诱发细晶区大量高施密特因子晶粒开启非基面滑移的主要原因，并且部分晶粒间存在位错滑移传递现象，从而有效协调了异质晶粒界面处的应力分布集中。层状粗晶区提高了合金存储位错的能力，并且变形后期产生的二次孪晶阻碍裂纹扩展，进一步提高合金塑性变形能力。本工作制备了具有晶粒异构组织特征的高强塑性 AZ91 合金，建立了晶粒异构组织特征与力学性能的对对应关系，揭示了晶粒异构组织形成机制与强塑性机理，为发展新型高强塑性镁合金提供一种新思路。

C03-59

Mg-9Al 合金熔体结构和输运性能的分子动力学研究

张丽君

重庆大学

镁合金超铸模的发展，由于其结构更加复杂，充填距离更大，对合金的流动性提出了更高的要求。流动性与原子扩散和熔体粘度密切相关。本研究采用分子动力学模拟方法，从原子尺度研究 Mg-9wt%Al 合金熔体在不同温度下的结构、自扩散系数和粘度。使用对分布函数、配位数、H-A 键对指数和 Voronoi 指数描述结构，通过原子均方位移拟合直线斜率来计算原子的自扩散系数，并通过 Green-Kubo (GK) 方程和 Muller-Plathe (MP) 算法计算粘度，通过建立结构-扩散-粘度三者之间的关系，揭示了温度诱导 Mg-9wt%Al 合金输运性能变化的微观机制，其中强调了不同温度下有序度的变化。研究结果将为理解 Mg-9wt%Al 合金熔体流变行为提供原子尺度的理论基础。

C03-60

预氧化处理 SiC 颗粒增强镁基复合材料的界面结构和组织性能研究

熊洪威，王静雅*，曾小勤*

上海交通大学

镁基复合材料 (MgMCs) 能够综合镁合金的低密度和陶瓷的高强度，展现出优异的比强度、比刚度，在航空航天、交通运输、3C 电子等领域都具有广阔的应用前景。然而，大量研究表明 MgMCs 的实际性能与混合法则所预测的理论值之间始终存在巨大差距，这一问题的关键在于复合材料的界面。作为镁基体和增强材料之间的过渡层，界面在复合材料承载过程中会产生应变不连续性，导致严重的应力集中，由界面损伤引起的微裂纹是导致复合材料塑韧性急剧下降和强化效果不明显的根本原因。通过界面调控改善镁基体与增强体的界面结合，提高增强体在变形过程中的应力配分，延缓界面脱粘微裂纹引起的早期断裂，是提高镁基复合材料强韧性的关键因素。

通过对 SiC 颗粒进行预氧化处理进行表面改性，在 SiC 颗粒表面引入了非晶态 SiO₂ 氧化层，并通过搅拌铸造和热挤压工艺制备了镁基复合材料。结果表明，镁基体与 SiO₂ 层发生原位反应，在 SiC 颗粒与镁基体之间形成了厚度约为 240nm 左右的纳米多晶 MgO 层，反应置换出的 Si 元素在镁基体中析出 Mg₂Si 第二相。通过原位微拉伸实验研究了引入氧化层界面前后 SiC/Mg 界面的力学响应，结果表明，含氧化层界面

在拉伸过程中由纳米多晶层变形导致明显的应力降，界面强度提高但界面韧性降低，最终导致复合材料的整体屈服强度提高但延伸率下降。本文系统研究了在 Mg/SiC 复合材料中引入氧化物界面中间层对复合材料界面结构和性能以及整体力学性能的影响和作用机制，对高性能镁基复合材料的设计和 optimization 具有指导意义。

C03-61

含层片状 LPSO 相镁合金的应变局域化研究

王甫霖*

上海交通大学

含有长周期堆垛有序 (LPSO) 相的镁合金因其优异的力学性能成为研究热点，但 LPSO 相以晶内片层形式对拉伸塑性的作用机制尚不明确。本研究通过多尺度显微结构表征、高分辨率全场应变测量与晶体塑性模拟相结合的方法，揭示了 Mg-Gd-Y-Zn-Zr 合金中 LPSO 片层诱发的应变局域化现象。含片层的时效态合金因沿基面产生的晶内微裂纹导致塑性下降，而缺乏片层的对比合金则以晶界裂纹为主。Heaviside 数字图像相关分析 (DIC) 表明，与未含该结构的同系镁合金相比，片层结构显著增强了基面滑移活性，加剧了应变局域化。借助原子力显微镜 (AFM) 和透射电镜 (TEM) 的定位表征发现，密集排布的片层间镁基体中存在严重的滑移台阶。参数化晶体塑性模拟进一步揭示，基面应变局域化源于高刚度相邻片层引发的局部应力集中，且该效应随片层厚度-间距比或体积分数的增加而加剧。此外，片层结构通过促进易启动的基面滑移、抑制难启动但有益的非基面滑移，使变形模式更趋单一，不利于实现均匀变形。这些发现阐明了片层结构对塑性的潜在不利影响，为含 LPSO 相镁合金的优化设计提供了重要指导。

C03-62

高合金化 Mg-Gd-Y 系合金力学性能及其演变机制

董志华*、郑志莹、蒋斌

重庆大学

稀土元素含量对镁合金力学性能有重要的影响。本研究在较大的高稀土含量范围内，研究了高固溶度稀土元素含量 (Gd、Y、Er) 对合金力学性能的影响规律，探究了高合金含量下元素固溶/析出特征、动态再结晶以及织构等微观结构演变规律，阐明了高合金化镁合金力学性能与稀土含量的对应关联机制。研究结果将为新型高合金化镁合金的设计提供参考。

C03-63

旋锻强化 ZX50/SiCp 镁基复合材料的机制研究

王静雅*

上海交通大学

本工作采用旋锻 (RS) 工艺制备了 SiC 颗粒增强 Mg-Zn-Ca (ZX50/SiCp) 复合材料，并系统研究了 RS 对其微观结构演化与力学性能的影响。结果表明，RS 工艺对 ZX50/SiCp 复合材料具有显著的强化效果，使其屈服强度从挤压态的 174.1 MPa 大幅提升至 RS 后的 346.5 MPa。这种显著的强化效应主要源于 RS 过程中形成的多尺度协同强化结构：形成了大量变形孪晶，分割基体晶粒；孪晶界与析出相及增强颗粒的相互作用阻碍了孪晶生长，形成了致密的孪晶网络；随着应变增加，多重孪晶进一步细化孪晶片层；大量位错的激活形成了位错阵列，贡献位错强化；RS 过程中发生动态析出，形成了大量纳米尺度的 Mg-Zn 第二相。此外，RS 过程中的剧烈剪切应变促进了增强颗粒的均匀分散。本工作阐明了旋转锻造诱导的多重强化机制，为高性能镁基复合材料的制备与强化提供了新思路。

C03-64

高应变速率、低应变量旋锻技术制备高强纳米镁合金及其细化变形机理

李政濠¹、赵永好^{1,2}、曹阳^{*2}

1. 南京理工大学

2. 河海大学

镁合金低的强度和断裂韧性限制其大规模应用，通过剧烈塑性变形技术细化晶粒来强化镁合金受到了

制备技术的限制,本质原因是镁合金差的变形能力不允许将晶粒细化到纳米量级。本研究工作运用高应变速率和低应变量旋锻变形技术来制备高强、低成本大块纳米 Mg-Li、Mg-RE 和 Mg-Al 镁合金棒材。研究表明低应变量旋锻 Mg-Li 合金的截面收缩率仅为 20%左右,等效应变仅为 0.3 左右;Mg-Li 合金的强度就可以提高到 408 MPa,比文献报道的最高强度 328 MPa 足足提高了 80 MPa;微观结构研究表明虽然旋锻几乎没有改变 Mg-Li 合金的原始粗晶尺寸,但引入的孪晶和层错间距却达到了纳米量级。低应变量旋锻 Mg-Gd-Y-Zr 合金(截面收缩率仅为 35%)则直接将原始粗晶细化到了晶粒尺寸为 80 纳米的纳米晶,旋锻加时效的 Mg-Gd-Y-Zr 合金的屈服强度为 650 MPa,创造了大块镁合金的最高强度记录。而通过热旋锻工艺制备的 AZ80 镁合金获得了具有径向梯度特征的多级纳米结构,展现出优异的强度-塑性协同性能。其外围区域屈服强度达 367 MPa,延伸率为 11%;芯部区域屈服强度为 351 MPa,延伸率为 7.4%。旋锻技术可以制备理论上无限长的棒材、工艺简单、成本低。旋锻的高变形速率和三维分布的复杂应力应变状态将提高镁合金的晶粒细化效率和抑制裂纹萌生扩展,使粗晶晶粒在很低的变形量下细化到纳米量级,从而避免大变形量所导致的断裂失效。上述结果发表于 Acta Mater. 2020, 200, 274-286; Mater. Res. Letters 2021, 9, 255-262; Acta Mater. 2021, 206, 116604; J. Mater. Res. Technol. 2025, 34, 807-818.

C03-65

稀土镁合金固溶体的反常拉伸强化现象及其机理

罗文博

华北电力大学

通过系统研究镁-稀土(Mg-RE)固溶体合金在高温下表现出的异常拉伸力学行为,即峰值拉伸强度出现在高温,在 150-200° C 温度区间内,合金的峰值抗拉强度(UTS)和屈服强度(TYS)达到最大值,相比于室温性能提升 12-50%;同时表现出随温升的高应变硬化现象,即随着温度从室温升至 200° C,塑性变形过程中的应变硬化率持续增加。研究表明:堆垛层错(SFs)的形成以及位错(特别是不可动<c>不全位错)的钉扎效应共同增强了材料对塑性变形的抗力,从而导致高温强度提升。此外,稀土镁合金固溶体的结构发生显著变化,固溶体中稀土原子的关键作用在于其优先占据非基面位置而非基面位置,随着温度升高,层错与<c + a>位错之间的交互作用显著增强,这一特性有效降低了堆垛层错的形成能。该研究为理解镁-稀土合金的高温强化机制提供了新见解,对设计具有优异力学性能的先进轻量化材料具有重要指导意义。

C03-66

结构功能一体化高强塑可溶镁合金协同调控

代朝能*

西南大学

近年来,为减少油气对外依存度,非常规油气的开采越来越受到国家重视,而高性能可溶井下工具的使用可有效提升此类非常规油气的开采效率,对国家安全和经济正常运行战略意义重大。镁合金因其低密度、高比强度、资源丰富且易腐蚀等特点成为制备新一代高性能(高强/塑可溶)可溶井下工具的首选材料。然而目前报道的可溶镁合金存在力学与降解性能协同调控难、性能偏低、高性能可溶镁合金组织构筑原则不清晰等问题。为此,本研究通过引入特点的 LPSO 和 γ' 功能强化相,通过探究功能型强化相对再结晶行为、晶粒尺寸、织构等组织影响规律,明晰高强可溶镁合金的力学与降解的协同优化机制及组织构筑原则。其次,在低含量 LPSO 相和 γ' 相合金基础上,通过挤压和退火工艺优化,探究不同挤压和退火工艺对合金再结晶行为、晶粒尺寸、织构等组织影响规律,阐明高塑可溶镁合金的力学与降解的协同优化机制及组织构筑原则,为高性能可溶镁合金的设计提供理论指导。

C03-67

基于纳米析出相调控的 ZK60 镁合金导热与强度协同提升机理研究

周璇*、薛德祯、周玉美

西安交通大学

镁合金因其低密度、高比强度及优异的导热性能,在航空航天、汽车及电子领域具有重要应用潜力,但高导热与高强度之间的性能倒置关系限制了其发展应用。本文以 Mg-6Zn-0.6Zr (ZK60) 合金为研究对

象,通过掺杂稀土元素(Gd、Nd)并结合热挤压和时效处理工艺,调控合金的微观组织与成分分布,利用纳米析出相协同提升合金导热性与力学性能。研究表明,Gd、Nd掺杂的挤压态ZKG62和ZKN62合金在室温下导热性能和强度均优于ZK60合金,挤压态ZKN62合金的热导率已达到了 $125.6 \pm 2.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$,屈服强度为 $360 \pm 7.1 \text{ MPa}$ 。时效处理10h后,挤压态ZKG62和ZKN62合金的热导率和强度进一步提高,热导率分别为 $127.8 \pm 2.3 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ 和 $130.2 \pm 2.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$,屈服强度分别为 $372 \pm 4.4 \text{ MPa}$ 和 $379 \pm 6.3 \text{ MPa}$,实现了镁合金强度和导热性能的大幅度同步提升。其性能提升主要归因于稀土元素Gd、Nd掺杂和时效处理促进纳米晶间化合物析出,降低了镁基体中固溶原子含量,从而减少晶格畸变,减少了合金中的电子散射,进而提升热导率;热挤压和时效处理引入纳米析出相及热挤压形成的细晶组织,有利于提升合金的强度。本研究为开发高导热高强度镁合金提供了可行的成分设计与工艺优化策略。

C03-68

低热膨胀镁合金强韧化性能研究进展

吴素娟*、黄亚东

重庆大学

高热膨胀特性易导致镁合金制备和服役过程中构件变形、微裂纹生成及结构破坏而失效,严重影响构件的安全性和可靠性。利用负热膨胀(NTE)材料来补偿基体合金的正热膨胀是一种调控镁合金热膨胀行为的有效手段。然而,由于NTE材料与镁合金之间相反的热膨胀行为,变温引起的界面结构和界面应力的变化不仅影响镁合金热膨胀性能的调控效果,还导致力学性能、尤其是塑性严重降低。在此,我们探讨了具有不同负热膨胀机制的NTE粒子对Mg-4Y-3RE(WE43)镁合金热膨胀性能及力学性能的影响,研究了两相界面处的微观结构和应力分布,结合理论模拟分析了NTE粒子降低WE43镁合金热膨胀系数并优化其力学性能的作用机制。提出了局域磁矩变化以及应力诱导粒子磁相变对镁基材料热膨胀系数、强度和延展性的作用机理,为镁合金的热物性调控提供新的策略和指导依据。

C03-69

Mg-Gd-Y(-Sm)-Zr合金的变形行为

陈晓亚*、庞浩、李全安

河南科技大学

Mg-Gd-Y-Zr系合金具有良好的综合性能,是最有应用前景的稀土镁合金之一。本文以Mg-Gd-Y(-Sm)-Zr合金为研究对象。研究分析了Sm对Mg-Gd-Y-Zr合金室温孪生行为以及热压缩行为的影响,探究了变形温度和应变率对Mg-Gd-Y-Sm-Zr合金动态再结晶和动态析出行为的影响。研究表明:Sm的添加提高了Mg-Gd-Y-Zr合金的室温变形应力,合金中激活的孪生类型均为{10-12}拉伸孪生。Sm通过抑制锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移的活性来阻碍大角度晶界的形成,从而延缓动态再结晶。析出相和再结晶晶粒呈现交错链状分布特征,大尺寸析出相可有效钉扎晶界,使再结晶晶粒的生长受到抑制,再结晶晶粒更加细小。在高温变形过程中,合金启动了锥面 $\langle a \rangle$ 滑移和锥面 $\langle c+a \rangle$ 滑移来协调变形。合金主要以非连续动态再结晶机制为主,随着应变和温度的升高,旋转连续动态再结晶占据主导地位。

C03-70

基于晶体塑性-相场耦合全场模型的镁合金塑性变形与断裂机制研究

刘传来*、董杰

上海交通大学

镁合金塑性变形过程中基面、柱面、锥面滑移和拉伸、压缩、二次孪生等多种变形模式及其与晶界、第二相等之间的交互作用非常复杂,裂纹可在晶界、孪晶界或相界面处萌生和扩展,损伤机制复杂,因此,在介观尺度上研究清楚这些交互作用机制对提升镁合金的强韧性能具有重要意义。本文结合晶体塑性模型能较好描述位错滑移的优点和相场模型可较好描述孪晶形核、扩展和长大的优势,建立了适用于密排六方多晶体弹塑性变形的晶体塑性-相场耦合全场力学模型,实现了在介观尺度下可视化、动态原位化描述密排六方多晶体弹塑性变形机制。基于全场模型和三维电子背散射表征,原位、可视化地研究清楚了镁合金塑性变形过程中位错-孪晶-晶界-裂纹之间的交互作用以及局部应力和应变场的演化规律。发现孪晶-孪晶交互

作用可阻碍孪晶的扩展和长大,从而+促进背应力硬化并提升拉伸塑性;孪晶-晶界交互作用区基面位错的激活可缓解应力集中并抑制微观裂纹的萌生。此外,该建模框架已进一步拓展用于脆性材料的断裂研究,揭示了低应变速率下基面滑移诱导的脆韧转变机制,以及高应变速率下晶间应力集中驱动的裂纹萌生与扩展过程,表明该模型在复杂晶体材料中裂纹演化机制的研究中具有广泛的适用性与预测能力。

C03-71

Ce 含量对 Mg-Zn 合金元素偏聚行为和力学性能的影响

钱晓英¹、董志华^{*2}、蒋斌²、曾迎¹、尹冬弟¹、张英波¹

1. 西南交通大学材料科学与工程

2. 重庆大学材料科学与工程

随着 Ce 含量从 0 增加至 0.7 wt.%, 挤压合金板材在不同拉伸方向的屈服强度、抗拉强度和断后延伸率均表现出先上升后降低的趋势, Mg-1Zn-0.2Ce 挤压合金板材表现出最佳的综合力学性能和杯突成形性能, 挤压方向抗拉强度、断后延伸率以及杯突值分别为 331 MPa、29%和 5.3 mm。主要原因在于, 微量 Ce 元素添加可促进 Zn、Ce 元素在晶界的共偏聚, 且在 0.2 wt.% Ce 时偏聚程度达到峰值。合金元素在晶界的偏聚可有效抑制动态再结晶晶粒的长大, 均匀应变, 激活较多非基面<a>、<c+a>滑移和<a>交滑移协调变形, 且松弛晶界应力, 促进位错滑移沿晶界转移。同时, Zn、Ce 元素在拉伸孪晶界的偏聚阻碍孪晶界迁移, 抑制粗大孪晶的形成, 避免裂纹沿孪晶界快速扩展失效。

C03-72

Microstructural Evolution and Hydrogen Storage Performance of Ce-Substituted Mg-Ni-La Hydrogen Storage Alloys

Nawaz Muhammad Irfan*

University of science and technology Beijing

Mg75Ni20La5-xCex (x= 0,1,3,5) alloys were synthesized by arc melting to investigate the effects of La with Ce on their structural, thermodynamic, and kinetic properties. The microstructure evolution of all samples during ad/dehydrogenation was characterized by XRD and SEM. X-ray diffraction analysis reveals that the as-cast alloy is composed of three phases including primary phase La2Mg17, secondary phases Mg2Ni and small amount of MgO for x=3. whereas at x = 5, Ce2Mg17, CeMg12, and Mg2Ni phases have been identified. After hydrogen absorption, alloys consist of MgH2, Mg2NiH4, LaH3.01 and CeH2.73 phases. The thermodynamics and kinetics of hydrogen storage reaction at specific temperatures were measured by high-pressure gas sorption analyzer. The non-isothermal dehydrogenation performance of the alloys was investigated by thermogravimetry (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC) at different heating rates. Kissinger method is used to calculate dehydrogenation activation energy. SEM reveals that after hydrogen absorption, the microstructure becomes significantly more porous, showing microcrack formation associated volume expansion. It is also well known that the substitution of Ce is more prone to fragmentation during hydrogen uptake, thus providing more channels for hydrogen diffusion. TGA curve gives the onset dehydrogenation temperature of the hydrogenated Mg75Ni20La5-xCex (x= 0,1,3,5) alloy values 471.4, 564.3, 512.7 and 581.3K. Hydrogen absorption kinetics require 229s, 47s, 246s, 542s at 593K for the alloy to reach 85% of the saturated hydrogen absorption capacity. Adding an appropriate amount of 1%Ce can visibly improve the hydrogenation kinetics of the alloy. The hydrogen absorption capacity reached 3.93 wt.% at 633 K and 3 MPa. The absolute value of the absorption enthalpy of MgH2 decreases from 98.9 to 72.9 kJ/mol as the Ce content increases from x =0 to 3, and it is 93 kJ/mol for x=5. The dehydrogenation activation energy decreases from 122 to 85kJ/mol when Ce is increased, except 3%Ce.

C03-73

镁-镓合金析出行为研究

张宇、陈厚文*、李慧哲、朱亚慧

重庆大学

镁-镓 (Mg-Ga) 合金是一种新型的可时效硬化型镁合金。本研究采用 HAADF-STEM 技术系统研究了

二元 Mg-Ga 合金的析出行为, 发现在 175-225 °C 温度区间和 2-1024 h 时间范围内, Mg-Ga 合金析出形成的第二相均为 Mg_5Ga_2 相 (β 相)。 β 相的空间形貌为棒状, 截面为方形。时效早期, β 相主要在 a-Mg 的基面形成并沿基体的 $\langle 11-20 \rangle_\alpha$ 方向生长, 与基体的位向关系为: $[001]_\beta // [11-20]_\alpha$, $(240)_\beta // (0002)_\alpha$ 。时效后期, 非基面 β 相增多并偏离 $[001]_\beta // [11-20]_\alpha$ 取向。针对 β 相形貌与取向特征, 采用晶体学方法进行了分析与讨论。

C03-74

大型铸件本体 Mg-x Gd-0.4Zr 合金微观组织与力学性能研究

杨力祥、杨唯一、董喜旺、吴海、黄鑫垚、陈林枫、华溪如、柯林达、肖旅*

上海航天精密机械研究所

本文基于相图、非平衡凝固计算、合金成分优化、砂型差压铸造和热处理工艺优化技术, 借助光学显微镜、扫描电镜、透射电镜和同步辐射 X 射线衍射等分析手段, 详细研究了 Gd 合金化元素对 Mg-Gd-0.4Zr 合金铸态、固溶态和时效态的微观组织与力学性能影响。结果表明: Mg-12Gd-0.4Zr 合金经过 495 °C×14 h+200 °C×30 h 热处理后获得最优力学性能, 其屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 221.1±1.1、351.6±2.7 MPa 和 3.6±0.4 %, 该抗拉强度是大型铸件本体砂型铸造镁合金文献已报道的最高值, 也是仅含柱面析出相 β' 的 Mg-Gd 基合金大型铸件的抗拉极限。对 Mg-12Gd-0.4Zr 合金峰时效态量化各强化机制贡献, 细晶强化、残余固溶强化和析出强化贡献分别为 34.0、36.8 和 149.6 MPa, 占总屈服强度占比分别为 15.4、16.6 和 67.7 %。析出强化占主导作用, 这得益于峰时效态细小弥散分布的柱面 β' 析出相, 有效阻碍基面位错滑移。

C03-75

极端环境 X 射线显微原位 CT 的研发与应用

李仁庚*

南京工业大学

随着轻质合金材料在航空、航天、军工等关键领域的应用, 在高温、低温和复杂应力等极端服役条件下对关键材料和构件的内部缺陷形成、演变和裂纹扩展进行可视化、量化、数字化原位研究, 成为评估部件服役可靠性和预测剩余寿命的重要实验手段。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, 可实现毫米/厘米级试样的三维无损成像。通过配置超高温模块、低温模块、高载荷模块 (拉伸/压缩/弯曲/疲劳), 构建热-力耦合系统, 实现超高温变形、超低温变形以及热冲击、疲劳、蠕变等复杂工况下轻合金材料与部件的原位 CT 成像。极端服役环境 X 射线显微原位 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。

C03-76

Y 微合金化促进 MgNdZr 合金腐蚀-力学性能协同提升机制研究

陈毓洋、应韬*、曾小勤

上海交通大学

在镁合金中, 机械强度和耐腐蚀性之间的传统权衡阻碍了其在苛刻环境中的广泛应用。本研究证明, 在镁 - 钕 - 锆体系中, 采用钇微合金化可克服这一难题。所得的镁 - 钕 - 钇 - 锆合金具有出色的机械性能和抗腐蚀性能, 屈服强度为 302 兆帕, 抗拉强度为 351 兆帕, 伸长率为 19.0%, 在 3.5% (质量分数) 的氯化钠溶液中的腐蚀速率为 0.09 毫米/年。全面的微观结构和电化学分析表明, 钇的添加同时改变了变形和表面腐蚀特性。钇以固溶体形式存在, 削弱了基面织构, 从而提高了延展性, 其对耐腐蚀性的贡献也十分显著。具有低临界离子浓度的锆促进了早期异质成核, 并促进了钕和钇氢氧化物的快速共沉淀。这种从均相到异相膜生长的转变加速了表面钝化, 减少了氢气析出, 并提高了腐蚀膜的密度和稳定性。在腐蚀层中观察到了锆、钕和钇的局部共分离现象, 这导致形成了一层致密且具有保护作用的膜。研究结果揭示了一种克服传统镁合金强度与耐腐蚀性之间权衡问题的方法, 这种可扩展的微合金化策略在既要求结构坚固又要求耐腐蚀的应用中具有巨大潜力。

C03-77

钛颗粒增强 AZ91 基复合材料界面改性与其力学性能研究

张玉松、韩胜利、潘复生*

广东省科学院新材料研究所

本研究采用粉末冶金法制备了锌纳米粉末修饰钛颗粒 (Zn@Ti) 增强的 Mg-9Al-1Zn (AZ91) 合金。锌纳米粉末有效溶入镁基体, 导致铝固溶度降低并析出亚微米级 Mg₁₇Al₁₂ 相。由此获得的 Zn@Ti/AZ91 复合材料呈现出双峰晶粒结构, 实现了强度与塑性的优异协同, 其屈服强度达 248±3.5 MPa, 抗拉强度 378±5.3 MPa, 延伸率 15.0±2.8%。该复合材料的强度提升主要源于三重强化机制的协同作用: 亚微米级 Mg₁₇Al₁₂ 与 Al₈Mn₅ 析出相强化、锌固溶强化以及晶界强化。在塑性机制方面, Mg₁₇Al₁₂ 和 Al₈Mn₅ 析出相能有效阻碍裂纹扩展从而提升延展性。这种创新方法为开发高强高塑镁基复合材料提供了新策略。

C03-78

液态铝阴极熔盐电解氧化镁制备铝镁合金

曹林溪、罗乙娟*

北京科技大学

以氧化镁为原料, 以熔盐电解法制备 Mg-Al 合金。研究过程中采用立式管式炉以铝液为液态阴极, 以石墨作为阳极, 石墨棒作参比电极, 使用电化学工作站对熔盐体系进行恒压电解, 阳极参与反应产生 CO₂ 和 CO 气体, 取代传统氯化镁电解生产中放出的大量有毒有害气体 Cl₂, 随着电解时间的延长, Mg 在 Al 中的含量逐渐增大, 在电解槽中直接生成了 Mg-Al 合金, 同时, 为镁电解生产提供新的思路和方法, 简化了金属镁的生产环节, 降低 Mg-Al 合金生产成本, 减少了 Cl₂ 的产生, 降低环境污染和生产成本。

C03-79

Influence of Sm addition on the microstructure evolution and mechanical properties of Mg-7Gd-0.5Zr magnesium alloy

Zeyu Zheng*

Henan University of Science and Technology

In this study, Mg-7Gd-xSm-0.5Zr (x=0, 1, 3, 5 wt.%) alloys with low Gd content were prepared by fusion casting and then subjected to solid solution and aging treatments under the optimized heat treatment process. The influence of various Sm additions on the microstructural evolution, mechanical properties, and corresponding strengthening mechanisms of the alloys in different states were investigated by DSC, XRD, SEM, EDS, TEM, and electronic tensile testing machine. The results indicated that the addition of Sm promoted the precipitation of Mg₅Gd and the formation of Mg₄₁Sm₅, and the Mg₄₁Sm₅ particles acted as effective heterogeneous nucleation cores, resulting in a significant grain refinement. In addition, the crystal-axis ratio (c/a value) of the alloy was reduced after Sm addition, which contributed to the coordination of plastic deformation during the tensile process. For the aging-state alloys, Sm alloying significantly accelerated the age-hardening response and shortened the gestation period of the alloys. Meanwhile, it promoted the precipitation of high-density nanoscale β' -strengthened phases uniformly in the matrix, forming an almost closed triangular spatial structure along the [01-10]Mg, [-1010]Mg and [1-100]Mg directions, which was favorable for strengthening the hindering effect on dislocations and enhancing the age-hardening effect of alloys. Under the synergistic effect of grain refinement strengthening and precipitation strengthening, the peak-aged Mg-7Gd-3Sm-0.5Zr alloy exhibits an optimum mechanical property at room temperature and 250 °C, with UTS and EL reaching 240 MPa/5% and 261 MPa/8.4%, respectively, showing a typical abnormal temperature effect of tensile strength.

C03-80

TPMS 拓扑结构对无压渗透 Ti-Mg 互穿复合材料塑性变形和断裂的影响

袁滔、郭非*

重庆理工大学

为推动镁基材料在高性能结构与功能集成领域的应用突破, 本研究构建并制备了一种基于三周期极小

曲面 (TPMS) 结构的 Ti-Mg 互穿网络复合材料体系。利用选择性激光熔化 (SLM) 技术制备了 TC4 钛合金支架, 设计并打印了 Diamond、Gyroid 和 SplitP 三种典型 TPMS 构型。随后, 通过无压熔渗工艺将纯镁熔体引入骨架内部, 获得了具有三维连通性的双金属复合结构。通过准原位拉伸试验、数字图像相关 (DIC) 应变场测量、电子背散射衍射 (EBSD) 晶体学分析以及有限元数值模拟 (Abaqus) 等多种表征与模拟手段, 系统研究了这三种拓扑结构下的应变传递机制与断裂行为。研究表明, 不同 TPMS 结构的力学响应存在显著差异。Diamond 结构展现出最高的屈服强度 (185.4 MPa) 及较好的变形协调性。Gyroid 结构虽屈服强度相对较低 (143.3 MPa), 但塑性阶段最为显著、延展性最佳。SplitP 结构则因局部应变集中, 虽初始刚度较大, 却容易发生早期断裂。DIC 与有限元模拟结果一致显示, TC4 骨架在复合体系中主要承担载荷并约束 Mg 相变形, 界面处的应变不连续易导致应力集中并成为裂纹萌生源。其中, Gyroid 结构的应变分布最均匀、应力分散最有效, 而 SplitP 结构则存在显著的局部高应变风险。我们进一步基于体素化模型引入比表面积、欧拉示性数、通道数和连通区域数等拓扑参数进行定量分析, 发现高比表面积和复杂通道网络虽有利于增强界面接触和初始刚度, 但同时易引发局部失稳。相比之下, 高连通性结构 (如 Gyroid) 可有效提升载荷传递连续性与应变协同效果。本研究首次建立了 TPMS 几何特征与 Ti-Mg 复合材料应力-应变行为之间的定量关联, 为基于 TPMS 的金属复合材料结构-性能一体化设计提供了理论依据与实验支撑。

C03-81

悬浮煅烧技术制备硅热法炼镁用高品质煅白可行性研究

马英子、王天宇、王悦存*、单智伟

西安交通大学

目前硅热法炼镁白云石煅烧环节的主流技术为回转窑煅烧工艺, 存在能耗较高、原料利用率低、品质波动大等问题, 已难以满足绿色高效的发展要求。因此亟需开发一种低能耗、高活性、稳定性好的煅烧工艺提升原镁还原率和资源利用率。本工作采用悬浮煅烧技术制备硅热法炼镁用高品质煅白粉, 通过原理验证与工业放大试验论证了其可行性与优势。将悬浮煅烧技术与回转窑技术制备煅白进行对比测试, 结果表明: 悬浮煅烧技术仅需 10s 即可得到水化活性最高为 36% 的煅白, 接近理论正烧状态, 还原率相比回转窑制备煅白提升超 10%, 还原镁渣中氧化镁含量减少~50%, 显著提升了原镁还原率与还原渣再利用率。进一步开展的吨级悬浮煅烧放大试验和工业公斤级还原试验显示, 悬浮煅烧制备段白的硅热反应率高于工业平均水平, 展现出良好的工业适配性与推广前景。

C03-82

Deformation behavior characterized by reticular shear bands and long chain twins in Mg-Gd-Nd(-Zn)-Zr alloys

Cong Wang*

Henan university of science and technology

We analyzed the deformation behavior of Mg-Gd-Nd(-Zn)-Zralloys under high temperature uniaxial compression, and reported two special nucleation mechanisms of dynamic recrystallization (DRX): Nucleation and expansion of DRX based on reticular shear bands (SBDRX) and long chain twins (TDRX). The reticular shear bands in Mg-Gd-Nd-Zralloy are mainly caused by the crossing of strain gradients from different directions, which is related to the high activity of pyramidal $\langle c+a \rangle$ slip at high temperature. The addition of Zn makes the DRX mechanism mutate, and TDRX is dominant in Mg-Gd-Nd-Zn-Zralloy. The nucleation of a large number of $\{10\text{-}12\}$ twins is abnormal, which may be related to the decrease of I_2 stacking fault energy caused by Gd/Nd-Zn compound addition. In addition, the ultra-fine grain structure at 500 °C proves that Mg-Gd-Nd(-Zn)-Zralloy has great potential in application to deformed structural parts.

C03-83

利用二氧化碳等离子体制备致密柔韧非晶碳酸镁薄膜

赵志豪*

西安交通大学

本研究通过二氧化碳等离子体技术成功制备了致密、柔性无定形镁碳酸盐薄膜，旨在改善镁合金表面性能。首先，商用镁块经过机械抛光和 MgO/Mg(OH)_2 预层处理后，暴露于二氧化碳等离子体中，通过冷场发射扫描电子显微镜（SEM）和透射电子显微镜（TEM）观察表面和截面形貌，发现镁表面的 MgO/Mg(OH)_2 层转化为致密的无定形镁碳酸盐薄膜，厚度约为 500 nm，表面均匀且无明显缺陷。机械性能测试显示，处理后的薄膜在拉伸测试和纳米压痕硬度测试中表现出优异的柔韧性和机械性能，与未经处理的纯镁相比有显著提升。本研究为镁合金表面改性提供了一种有效方法，未来将优化等离子体参数或集成纳米增强材料，进一步提高薄膜的强度-延展性协同性能，拓展其在航空航天、生物医学和微电子领域的应用。