

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

C02-高性能铝合金
C02-Advanced Aluminum Alloys

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

C02. 高性能铝合金

分会主席：熊柏青、范云强、陈江华、张济山、邓运来

C02-01

汽车轻质覆盖件用时效快速硬化铝合金材料

熊柏青

中国有研科技集团有限公司

6xxx 系铝合金具有耐腐蚀、时效处理后屈服强度高、可回收性好等优点，是以铝代钢、实现汽车覆盖件轻量化的理想材料。采用 6xxx 系铝合金薄板制造汽车覆盖件，要求材料在轧制成形-固溶热处理后具有尽可能低的屈服强度和优异的冲压成型性能，而在冲压成覆盖件之后，要求材料在汽车白车身的烤漆条件下迅速硬化，且材料在烤漆过程中的屈服强度增量越大、汽车覆盖件减薄设计的空间越大。因此，追求汽车覆盖件用 6xxx 系铝合金板高成形性能与高烤漆硬化性能的优异匹配，是该领域必须面对的技术难点、也是永恒的技术发展。通过创新发展了汽车覆盖件用 6xxx 系铝合金的快速时效响应强化、组织协同调控理论基础和工业化制造技术体系，我国已实现了合金薄板批量生产与稳定供货，产品生产企业成功进入国际一流供应商行列。

C02-02

解决材料科学难题的先进三维与定量电镜技术

陈江华^{1,2}

1. 海南大学精密仪器高等研究中心，海洋材料表征技术创新研究院
2. 海南大学海南省皮米电子显微学重点实验室

高强铝合金中尺寸细小的早期强化相的成分、结构以及演变的表征尚存在难度，这一直以来限制着高强铝合金的发展。我们的研究通过采用原子分辨率的透射电镜(TEM)成像技术和第一性原理计算来解决这些问题。近年来，我们研究了大量典型的高强铝合金，例如 2xxx 系(AlCu, AlCuMg 和 AlCuLiMg)，6xxx 系(AlMgSi 和 AlMgSiCu)和 7xxx 系(AlZnMg 和 AlZnMgCu)合金,采用了不同的合金成分，并进行了不同的热处理工艺，以便理解“性能-结构-工艺”之间的关系。结合球差矫正的高分辨 TEM 和球差矫正的扫描 TEM(STEM),我们的主要关注点在于重新认识在这些重要的合金中出现的强化相以及阐明过去遗留下来的关于它们的析出行为的争议。我们的研究表明：

(1) STEM 的原子分辨率成像技术可以在原子尺度提供直观的析出相结构模型，但是 HRTEM 的原子分辨率成像技术具备快速定量的图像模拟分析可能，可以提供超出电镜的分辨率极限精度的精细的析出相结构。这两种技术的结合可以更有效地解决材料科学中的显微结构难题。

(2) 铝合金中大多数早期析出相的成分和结构都是高度动态的。随着时效的进行,这些动态析出相的形核,成熟和生长通常遵循特定的演变路径,并且有特征的基因骨架来引导它们各自的演变。我们的研究所揭示的精细的析出规律与目前所发表的教科书和文献中的理解非常不同。利用原位/准原位 TEM 观察,我们揭示了其中一些相变路径,尽管在 TEM 样品中激发相变所需的温度可能远低于实际块体材料中的温度。

C02-03

选区激光熔化高强铝合金 Al-Fe-Cu-xZr 的成形性与微结构研究

徐京豫¹，张诚²，柳林*²

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所
2. 华中科技大学材料科学与工程学院、材料成形与模具技术全国重点实验室

激光粉末床熔融 (LPBF)，属于一种增材制造技术 (AM)，由于其能够实现复杂三维构件的成形，在航空航天和汽车等领域具有广阔的应用前景。但铝合金具有高激光反射率和高导热率，且在 LPBF 过程中

易形成粗大的柱状晶,使 LPBF 技术在成形高质量铝合金构件方面仍存在极大挑战。迄今为止,除共晶铝硅系合金外,多数高强铝合金体系在 LPBF 成形过程中,易发生开裂。针对高强铝合金的 LPBF 成形难题,本工作基于共晶合金和晶粒细化策略,自主开发了系列高强 Al-1Fe-0.6Cu-xZr(x=0.3、0.6、0.8、1.3at%)合金体系,并系统研究了 Zr 含量对 LPBF 铝合金成形性、微观结构和力学性能的影响。研究发现,随 Zr 含量的增加,铝合金的成形性显著改善,在 LPBF 过程中飞溅和缺陷逐渐减少,表面粗糙度降低。模拟表明,LPBF 成形性主要由熔池的稳定性决定,而熔池稳定性与熔体速度梯度(MVG)和 Marangoni 力密切相关。Zr 含量增加会使 MVG 分布更加均匀,并减小 Marangoni 对流,有利于熔池稳定性和成形性的提升。另一方面,Zr 含量对微观结构也具有显著影响。四种 LPBF 成形的铝合金都表现出粗晶区(CGZs)和细晶区(FGZs)交替分布的异质结构,但随 Zr 含量的增加,CGZs 中粗大的柱状晶转变为精细的等轴晶。这种由柱状晶到等轴晶的转变(CET)是由于随 Zr 含量增加,固液界面的温度梯度(G)与凝固速率(R)之比(G/R)逐渐降低。此外,Zr 含量的增加还导致 CGZs 和 FGZs 中晶粒逐渐细化,这是由于冷却速率($G \cdot R$)的增加促进了平均晶粒的细化。由于良好的成形性和精细的等轴晶结构,LPBF 制备的含 0.8 和 1.3at% Zr 的铝合金几乎全致密,并表现出优异的性能。本工作为设计具有良好成形性和优异力学性能的新型 LPBF 铝合金提供了理论依据和技术路线。

C02-04

超重力场对 Al7050 合金凝固组织和力学性能的影响

尤方杰, 赵新宝*, 王嘉晖, 岳全召, 谷月峰, 张泽
浙江大学材料学院高温合金研究所

本文考察了超重力场对铸态 Al7050 合金枝晶组织、宏观偏析和力学性能的影响。研究结果发现,合金在超重力场中凝固后出现了结构梯度和成分梯度。沿超重力方向,被显著细化的 α -Al 晶粒和粗大的定向柱状枝晶共存于样品底部。其主要机制为:超重力场极大地增强了合金凝固过程中的浮力对流,由此诱发的枝晶破碎和“结晶雨”共同作用导致晶粒细化。枝晶的定向生长主要是强化对流影响枝晶尖端的浓度场的结果。此外,枝晶间第二相组成元素 Zn、Mg 和 Cu 沿超重力方向形成宏观的成分梯度,导致样品底部出现大量 AlZnMgCu 第二相。和常重力相比,合金沿超重力方向的抗压强度和相对压缩率均提高;合金的梯度组织造成不同位置硬度的差异,梯度结构相互作用,提高了合金的整体力学性能。

C02-05

退火温度对 5A02Al-Mg 合金力学性能及耐腐蚀性的影响

郭帅, 邓运来*
中南大学

研究了退火温度对 5A02 铝合金微观组织和腐蚀性能的影响。使用扫描电子显微镜(SEM)与能谱分析(EDS)对不同退火温度试样进行第二相粒子分析。通过金相试验与电子背散射衍射(EBSD)分析了在不同退火温度下 5A02 铝合金管的晶粒分布以及再结晶程度。通过拉伸试验与硬度测量了合金的力学性能,通过晶间腐蚀实验评估了其抗晶间腐蚀性能。研究结果表明,退火温度对 5A02 铝合金管材的晶粒组织有着明显影响。随着退火温度提高,抗拉强度明显下降。保持 1h 退火时间,当退火温度低于 300°C 时,试样抗晶间腐蚀性能随温度升高而上升。当退火温度高于 300°C 时,试样抗晶间腐蚀性能随温度升高而下降。

C02-06

25~300°C 宽温度范围内具有高强度的 Al-Cu-Li-Sc 合金性能研究

秦高梧, 薛昊*
东北大学

现代航空航天、交通运输等领域对高强铝合金提出了更高的要求,基于加工、装配、维修和回收的考

虑,希望能在一种铝合金中实现 25°C~300°C宽温度范围内的高强度。但目前为止,研发该类合金依然有很大挑战。为解决实际工程需要,本研究设计了一种新型 Al-Cu-Li-Sc 合金,在 25°C, 200°C和 300°C下强度分别为 482 MPa, 351 MPa 和 186 MPa,相比 Al-Cu-Li 合金、新型 Al-Cu-Sc 合金、7075 铝合金及 2219 铝合金等,具有 25°C~300°C宽温度范围内更优越的综合力学性能。本研究为发展轻质高强耐热铝合金提供了新思路。

C02-07

高强高韧高服役性 6xxx 铝合金材料的开发及应用

张海^{1,2}, 秦简², 董其鹏¹, 刘方镇¹

1. 苏州大学高性能金属结构材料研究院
2. 魏桥(苏州)轻量化研究院

本文从汽车轻量化用铝合金材料的需求出发,详细的介绍了国内外汽车底盘关键零部件对铝合金材料的要求和目前国内外新型 6xxx 铝合金材料的研发现状及在汽车上的应用。并介绍了苏州大学高性能金属结构材料研究院在**高强高韧高服役性 6xxx 铝合金**的开发与应用情况。通过微观组织调控尤其是超细亚晶的控制,开发出了新型 6xxx 铝合金材料,其屈服强度达 410MPa,延伸率 10%,疲劳强度大于 150MPa。该合金的高强度和高韧性主要源超细亚晶的控制。目前,我们开发的高**高强高韧 6xxx 铝合金**已经应用于汽车框架结构、承载车架以及锻件等。

C02-08

高强铝合金腐蚀行为的原子尺度研究

赵欢¹, Yue Yin², Yuxiang Wu², Siyuan Zhang², Andrea M Mingers², Dirk Ponge², Baptiste Gault², Michael Rohwerder², Dierk Raabe²

1. 金属强度国家重点实验室, 西安交通大学, 西安
2. Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf, Germany

高强铝合金因其优异的强度质量比而广泛应用于航空航天工业。然而,在长期服役过程中,往往受环境的影响而发生腐蚀等局部破坏,严重威胁着产品的安全性^[1]。澄清材料在腐蚀过程中的微观组织演变和机理对提高**高强铝合金服役性能**至关重要。本报告将以 7050 为例,针对腐蚀过程中不同溶质反应问题,利用三维原子探针技术^[2],建立了 7050 合金在盐水腐蚀中铝,锌,镁,铜元素的反应速率以及腐蚀氧化物膜的原子级图像,并指出氧化物可能作为物阻止材料发生氢脆的屏障。研究结果丰富和发展了腐蚀理论,为提高材料服役性能提供了理论指导。

C02-09

Al-8Ce 合金组织与性能优化: 电磁搅拌和 Sc、Zr 微合金化

肖进荣, 叶洁云*, 汪志刚
江西理工大学

铝合金由于其较低的密度,优异的铸造性能,低廉的成本以及在大多数环境中良好的耐腐蚀性能,受到了广泛关注。Al-Ce 合金具有高可用性和低成本等优点,是极具应用潜力的新型**高强铝合金**。为了进一步提高 Al-Ce 合金的强度,本文研究了电磁搅拌处理、Sc-Zr 元素添加及其两者协同作用对 Al-8Ce 合金组织及性能的影响。结果表明:电磁搅拌处理后的 Al-8Ce 合金由于电磁场的强制对流和枝晶破碎形核的综合作用,初生 α -Al 变得粗大,共晶 Al₁₁Ce₃ 相细化但片状间距显著增大。Sc-Zr 微合金化处理的 Al-8Ce 合金与铸态相比, α -Al 由树枝状变为细小类圆形,共晶 Al₁₁Ce₃ 相由片层状变为纤维状,这得益于 Al₃(Sc, Zr)相的异质形核作用和 Sc-Zr 元素富集产生的吸附细化作用。Sc-Zr 微合金化对 Al-8Ce 合金的力学性能优化效果较电磁搅拌处理及两者协同处理效果最佳,其抗拉强度和屈服强度由铸态时的 157 MPa 和 85 MPa

分别提升到 192 MPa 和 115 MPa, 分别提高了 22.3%和 35.3%; 进一步时效处理后, 由于 Al₃(Sc, Zr)粒子的二次析出, 导致抗拉强度(从 192 MPa 至 272 MPa)和屈服强度(从 115 MPa 至 221 MPa)显著改善, Al₃(Sc, Zr)相的强化机制主要为析出强化。本研究的意义在于通过优化 Al-Ce 合金的室温性能, 进而提高材料的高温性能, 为扩大 Ce 元素作为铝合金主要合金元素的应用提供理论依据和参考。

C02-10

通过塑性变形和热处理调控析出行为提高 Al-Cu-Li-Sc 合金的强度

谢元康, 邓运来*

中南大学

Al-Cu-Li 合金以其优异的性能被广泛应用于航空航天制造业, 然而, 添加少量的 Sc 元素会在均匀化过程中形成高温难溶的含 (Cu、Sc) 富集相, 固溶热处理后 Al 基体中 Cu 原子含量下降, 导致时效过程中形成 T₁ (Al₂CuLi) 强化相所需的 Cu 原子数量下降, 显著降低力学性能, 目前对于如何克服这一不利因素的研究很有限。本研究采用时效硬化曲线和室温拉伸试验, 并结合 TEM、EBSD 和 SEM/EDS 表征, 系统研究了新型塑性变形与热处理方法对含 Sc 的 Al-Cu-Li 合金微观组织、力学性能的影响。SEM/EDS 表征结果表明, 较高温度下的塑性变形能有效破碎粗大相, 促进高温固溶处理时的溶解, 减少含 (Cu、Sc) 富集相的形成, 残余相的体积分数由 1.5%下降到 0.8%, 显著增加 Al 基体中 Cu 原子的含量。通过 TEM 表征和强化模型计算表明, T6 时效处理后所有析出相 (GPB 区、S 相、T₁ 相) 中, T₁ 相是合金的主要强化相。此外, 固溶处理后含 Cu 残余相的减少, 促进峰值硬度时 T₁ 相的数量密度和体积分数增加, 显著提升合金的强度。总之, 通过优化 Cu 元素的分布和调控时效析出行为, T6 热处理后获得了一种强度-延展性良好 (屈服强度>500 MPa, 同时保持>10%的断后伸长率) 的含 Sc 元素的 Al-Cu-Li 合金, 提出的工艺有望为开发具有优异性能的 Al-Cu-Li 合金提供新的策略。

C02-11

Ti、V 复合添加改善 Al-8Si 基压铸铝合金组织与性能的研究

王强¹, 刘文君*¹, 杨琴², 高亮², 杨明波¹

1. 重庆理工大学材料科学与工程学院

2. 重庆长安汽车股份有限公司

Al-Si 共晶合金具有较低密度、较高比强度和良好的铸造性能, 然而其共晶组织粗大且不均匀, 以及含铁相调控困难等问题限制了其更广泛的应用。本文以汽车后地板用 Al-8Si-0.3Mg-0.5Mn 合金为基础, 研究 Ti、V 元素的复合添加对高压压铸合金组织与性能的影响。结果表明, 随着复合添加量的增加, 合金的抗拉强度和延伸率明显下降。微量复合添加下的 Al-8Si-0.3Mg-0.5Mn-0.08Ti-0.08V 合金综合性能最好, 其屈服强度 154MPa, 抗拉强度 301MPa, 断后伸长率 13%。微量复合添加后的合金共晶组织细小均匀, 平均晶粒尺寸 7.56μm, 含 Fe 相以球状形貌分布于基体中, 从而在保证合金塑性的同时阻碍位错运动, 提升合金的强度。此外, 结合断口形貌分析对合金的强韧化机理进行了探讨。

C02-12

Mn 微合金化对 A357 铝合金组织和力学性能的影响

黄云龙, 廖恒成*

东南大学

通过显微组织观察和室温/高温拉伸试验, 探索了 Mn 的微量添加对于 A357 铝合金的组织以及室温/高温力学性能的影响。Mn 微合金化使 A357 合金铸态时室温抗拉强度由 158MPa 提高到 159MPa、屈服强度由 96MPa 提高到 101MPa、伸长率由 3.9%提高到 4.7%, 使 T6 态合金室温抗拉强度由 309MPa 提高到 320MPa、屈服强度由 287MPa 提高到 303MPa、伸长率由 1.2%提高到 3.7%; 而在 250°C高温拉伸时, Mn

微合金化使 A357 合金铸态时的抗拉强度由 97MPa 提高到 112MPa、屈服强度由 89MPa 提高到 90MPa、伸长率由 10.7% 下降至 5.9%，使 T6 态合金的抗拉强度由 207MPa 提高到 225MPa，屈服强度由 205MPa 提高到 216MPa，伸长率由 2.9% 提高到 3.3%。Mn 微合金化使 A357 合金铸态和 T6 态下室温和高温的抗拉强度和屈服强度得到了显著的提升。Mn 微合金化对 A357 合金 6 组织中枝晶 α -Al 相和共晶 Si 相没有明显的影响，但降低了富 Fe 相的数量。Mn 的加入使得 π -Fe 相转变为 $\text{Al}_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$ 相，这有助于提高合金室温和高温下的强度。

C02-13

激光粉末床熔融 Al-Mn-Mg-Sc-Zr 合金的热处理研究

邓运来
中南大学

激光粉末床熔融 (LPBF) Al-Mn-Mg-Sc-Zr 在制备过程中，由于极快的冷却速度，合金内部具有较高的残余应力和明显的各向异性，降低合金的性能。热处理是改善铝合金组织与性能的重要方法，本文研究了两种热处理制度对该合金组织与性能的影响。首先，采用等温加热制度，揭示了 LPBF 制备合金的再结晶行为向析出强化的调控作用及其对性能的影响。然后，研究了一种低升温速度的加热制度，揭示了再结晶与析出强化的相互作用机理，阐明了低升温速度加热的热处理制度有利于降低各向异性、提高强度和耐腐蚀性能的机理。

C02-14

基于有序团簇结构单元揭示 Al-Mg-Si 合金中纳米析出相演变机制

丁立鹏*, 贾志宏, 刘庆
南京工业大学

由于铝合金时效早期的析出相尺寸小、高度共格且结构局部无序，导致对该系合金析出相形核及演变路径缺乏统一的认识，致使合金析出强化潜力无法充分发挥。围绕该科学问题，报告人基于原子分辨率电镜定量解析技术，提出通过解析析出相内部有序团簇结构单元（具有特定结构的稳定原子集团）揭示及调控铝合金时效早期相变行为的新策略，发现 Al-Mg-Si 合金中 β'' 、 β' 、U1、U2、B 等相都存在共同的有序团簇结构单元（Al-Si 原子对），通过对 Al-Si 原子对的原位表征发现， β'' 、 β' 、U1 等相的转变实际上都是通过 Al-Si 原子对的形核、位移及旋转造成的。而在 Al-Mg-Si-Cu 合金中，Cu 原子会形成通过形成有序团簇 Cu sub-unit clusters，抑制 β'' 的形成，并促进含 Cu 亚稳相 QP1 和 QP2 相的形成。因此，申报人通过追踪各个析出相内部有序团簇结构单元的形成和演变，提出了新的 Al-Mg-Si 合金、Al-Mg-Si-Cu 析出相转变路径及析出序列。

C02-15

激光粉末床熔融成形 AlSiFeNiMn 合金和 TiB₂/AlSiFeNiMn 复合材料的显微组织与力学性能

刘允中*, 丁天颢
华南理工大学

通过激光粉末床熔融技术成形的 Al-Si 合金具有良好的成形性和室温力学性能，但 AlSi10Mg 等 LPBF 成形铝合金高温力学性能较差，这限制了其应用范围。向铝合金中添加 Fe、Ni 等合金元素和加入陶瓷增强体均可以有效提高其高温力学性能。本文研究了一种全新的 LPBF 成形 AlSiFeNiMn 合金，并向其中添加 2wt% 与 4wt% 的亚微米级 TiB₂ 粉末以制备铝基复合材料，优化了其 LPBF 成形过程的工艺参数，分析显微组织，并测试了室温和高温下的拉伸性能。研究表明，对于 AlSiFeNiMn 合金，其具有优良室温力学性能 (520MPa, 8%) 的同时，合金元素的加入显著提高了合金中第二相的热稳定性，使其高温下的抗拉强度大幅提高。400°C 下其抗拉强度达到 150MPa。而在 TiB₂/AlSiFeNiMn 复合材料中，TiB₂ 增强体均匀

分布在基体组织内,产生弥散强化效应。随着 TiB₂ 含量的提高,复合材料的室温抗拉强度略有提高,而高温抗拉强度明显提升。添加了 4wt%TiB₂ 的样品在 400°C 时抗拉强度提升了 26.7%,达到 190MPa。

C02-16

合金化元素对 Al-Mg-Zn 合金中 T-Mg₃₂(Al, Zn)₄₉ 相稳定性与力学性能的 DFT 研究

薛博育^{1,2,3}, 肖伟^{*1,2,3}, 李锡武^{1,2,3}, 高冠军^{1,2,3}, 张永安^{1,2,3}, 王立根^{1,2,3}, 熊柏青^{1,3}

1. 中国有研科技集团有限公司有色金属材料制备加工国家重点实验室
2. 有研工程技术研究院有限公司
3. 北京有色金属研究总院

T-Mg₃₂(Al, Zn)₄₉ 相作为新型交叉 Al-Mg-Zn 合金中重要的时效强化相,其析出过程和性能受 Cu 和 Ag 等合金化元素的显著影响。本研究利用密度泛函理论(DFT)对 Al-Mg-Zn 合金中时效强化相 T-Mg₃₂(Al, Zn)₄₉ 相进行了建模与分析,深入探讨了 Cu 和 Ag 含量对 T 相稳定性和力学性能的影响。在 0 至 5% 的合金化元素含量范围内, T 相保持了良好的晶格稳定性。随着 Cu 和 Ag 含量的增加, T 相的晶格常数和形成能均呈现线性下降趋势, Ag 元素在降低形成能方面表现更为显著,但对晶格常数的影响较小。力学性能分析表明, T 相的弹性模量与 Cu 含量呈正相关,而 Ag 的影响则不明显。Pugh 准则和泊松比分析揭示了 Cu 含量增加导致 T 相韧性下降的趋势。研究结果不仅与实验观察相符,还从原子和电子层面深入阐释了合金化元素对 T 相性能的影响,为 Al-Mg-Zn 合金的合金设计和性能优化提供了重要的理论支撑。

C02-17

时效热处理状态对 Al-Zn-Mg-Cu 合金蠕变时效行为和组织演变的影响

高川¹, 邓运来^{*2}

1. 中南大学轻合金研究院
2. 中南大学材料科学与工程学院

Al-Zn-Mg-Cu 合金是适用于蠕变时效成形航空用壁板构件的高强铝合金,调控蠕变成形前的热处理状态是制备高性能构件的前提。采用单轴蠕变拉伸研究了固溶态、自然时效态(T4)和峰时效态(T6)的 Al-Zn-Mg-Cu 合金的蠕变行为和组织演变。通过准原位 EBSD 观察,表征几何必要位错密度随蠕变时效时间的演变规律,为进一步了解蠕变变形机理与组织调控提供依据。结果表明, 100 MPa/150°C/4h 下不同时效热处理状态的蠕变应变变量表现为: T4 态>T6 态>固溶态,即随着析出程度的增加蠕变应变变量逐渐减小,峰时效状态样品中高密度的析出相对位错运动的阻碍是蠕变应变变量降低的主要原因。蠕变过程中位错有序化并重新排列组合形成亚晶,其中固溶态样品小角度晶界比例增加了 15.5%, T4 态增加了 8.8%。而 T6 态样品由于析出相 η' 对位错的钉扎作用较强,小角度晶界比例基本保持不变。短时的蠕变时效处理也可以促进位错增殖,且初始热处理状态不同的样品其几何必要位错密度增加量也不同: 固溶态>T4 态>T6 态。

C02-18

热处理对 Al-1Si-0.6Mg-0.2Fe 合金组织、导电性和力学性能的影响

刘杰¹, 刘厚韵¹, 崔晓丽^{*2}

1. 山东理工大学
2. 广东海洋大学

In this study, the electrical conductivity (EC) and mechanical properties of extruded state Al-1Si-0.6Mg-0.2Fe alloy (ES-Alloy) are enhanced through T6 heat treatment, and the underlying mechanisms are analyzed in conjunction with model calculations. Results demonstrate that the optimal heat treatment process for the ES-Alloy is 550 °C / 2 h + 230 °C / 16 h. Through the heat treatment process, the alloy's EC and ultimate tensile strength are 57.0% IACS and 247.6 MPa, respectively, which are improved by 4.6% and 54.8%,

respectively.

For ES-Alloy, after heat treatment, owing to reversion and recrystallization, the average grain size of the alloy is 175.9 μm and becomes 6.93 times larger. Combined with theoretical calculation, the contribution of grain boundary strengthening to the alloy's strength is only reduced by 9.1 MPa. However, the reduction of grain boundary area reduces the scattering of free electrons during the transport process, which is beneficial to improving EC. Moreover, by modifying the heat treatment parameters, nanoscale Mg_2Si and large-size AlFeSi second phases present in the alloy keep a favorable lattice match with the Al matrix, proving that this makes the main contribution to the alloy's strength. The microstructures give consideration for both the high efficiency of electron transport and the enhancement of mechanical properties. So, it is advantageous for the improvement of EC and mechanical properties.

C02-19

机器学习用于高强高韧性再生铝合金设计

李全, 王俊升*

北京理工大学

铝合金在回收过程中不断富集 Fe 杂质, 导致粗大片状富铁相和微孔的形成, 从而严重降低合金性能。通常, 稀土元素的添加不仅可以降低微孔水平, 同时改变富铁相的形态, 从而改善合金性能。本研究采用 BP 神经网络、极限学习机、支持向量机和随机森林 (RF) 等机器学习方法, 建立再生铝合金的强度和延伸率回归模型, 并分析输入特征: 合金成分、第二相含量、合金成分+第二相含量、合金成分+第二相含量+热处理工艺对模型预测精度影响。结果表明, 当以合金成分+第二相含量作为输入特征, 预测能力均有显著提高。基于机器学习模型的输入特征相对重要性分析, Fe、Y 和 La 元素以及富 Fe、富 Y 和富 La 相对合金的强度和塑性影响最大, 因此控制 Fe 含量和稀土添加量至关重要。最后, 模型对不同稀土添加量 (0~0.2%) 的新合金性能进行预测, 并进行了实验验证, 获得了性能优异的再生铝合金。

C02-20

耐热高导电铝合金制备及其结构性能相关性研究

兰新月*¹, 李凯², 胡标¹

1. 安徽理工大学

2. 中南大学

本工作针对高压输电领域现有铝合金高温强度不足的问题。结合相图计算和扩散动力学原理设计制备了一组 Al-Fe-Ni-Sc 耐热导电铝合金。Al-Fe-Ni-Sc 合金经固溶处理、热轧冷轧之后强度可达 263 MPa, 且在 200°C 下, 屈服强度、抗拉强度仍能达到 196 MPa 和 212 MPa, 经热处理后电导率为 53.4% IACS。相较于现有的耐热铝合金而言, 其高温强度优势明显。该合金相较于现有的耐热铝合金导线而言, 高温强度大大提升。且本工作进一步通过透射电镜分析了 Sc 元素添加及轧制加工对合金中纳米强化相尺寸、晶体结构及强化相/基体界面关系的影响, 揭示了 Al-Fe-Ni-Sc 合金耐热强化机制, 实现了耐热高强高导电 Al-Fe-Ni-Sc 的可控制备, 有助于提高大载流长距离输电导线的服役稳定性和输电效率。

C02-21

高性能铸造 Al-Si 合金组织性能研究

白浩宇, 张志峰*

北京有色金属研究总院

新能源汽车空压机涡旋盘零件主要采用热锻方式成型, 存在成型载荷大、模具寿命短、生产效率低及成本高等问题。随着对空压机转速要求越来越高, 以 4032 为代表的 Al-Si 合金很难同时满足高强、高耐磨、

低膨胀系数、高导热等高性能使用要求，开发更高性能的新能源汽车空压机涡旋盘用 Al-Si 合金及其近净成形工艺是当前重要的研究课题。

本文采用理论计算和试验研究相结合的方法，通过 Al-Si 合金成分优化设计、显微组织调控、热处理工艺以及半固态成型工艺的手段，系统研究了主合金元素 Si、Cu、Mg、Ni、微合金化元素 Ti、Sr、Sb 以及熔体电磁均匀化处理对合金组织性能的影响规律；制备出组织细小均匀的涡旋盘零件，零件本体抗拉强度 $\geq 400\text{MPa}$ ，屈服强度 $\geq 360\text{MPa}$ ，延伸率 $\geq 5\%$ ，性能达到甚至超越锻件的水平。本研究对于实现新能源车涡旋盘高性能、低成本制备具有重要的支撑作用。

C02-22

Al-Nb-B 细化剂对 ADC12 铝合金晶粒尺寸、铸造流动性和力学性能的影响

范文学^{*1}，郝海^{1,2}，白玉^{1,2}

1. 大连理工大学宁波研究院

2. 大连理工大学，材料科学与工程学院

新一代新能源汽车结构零部件尺寸更大、壁厚更薄、薄壁面积更大、结构更加复杂，这就要求新型的压铸铝合金具有更高的强度和韧性的同时，还需保持良好的流动性。晶粒细化剂的添加可以细化镁合金组织，提高熔体流动性，减少内部缩松、气孔和热裂等缺陷。本文通过微观组织分析、CT 断层扫描、流动性测试和室温拉伸等技术手段系统研究了添加 Al-Nb-B 晶粒细化剂对压铸 ADC12 合金微观组织、铸造流动性、缺陷分布和力学性能的影响作用。结果表明，Al-Nb-B 细化剂的添加可以显著细化 ADC12 合金的表层预结晶晶粒，并降低了铸件末端的铸造缺陷数量，最终提升了合金铸造流动性和室温拉伸性能。添加 0.5 wt.% 的 Al-Nb-B 晶粒细化剂后，ADC12 铝合金的铸造流动长度从 900mm 增加到 1090mm，铸态 ADC12 合金的抗拉强度(UTS)、屈服强度(YS)和伸长率(EL)分别从 175MPa、136MPa 和 3.5% 提高到 201MPa、147MPa 和 5.7%。铸件性能的提升主要归因于细化剂添加后微观组织的细化、固液两相温度区间的缩短以及缺陷数量的降低。

C02-23

Al-Cu-Ca 系耐热铸造铝合金组织性能和制备技术的研究

崔世琪*

北京航空航天大学

耐热铸造 Al-Cu 合金具有密度低、强度高、热稳定性好等优点，拥有优异的热处理强化效果，在航空航天、汽车、船舶等领域都有着广泛的应用。但 Al-Cu 合金由于凝固区间较大，合金的铸造性能较差，在凝固过程中极易出现热裂、缩松、缩孔等现象，严重限制了其应用。在本工作中，通过向 Al-Cu 合金中添加 Ca 元素，可以在合金中形成具有高熔点的 Al-Cu-Ca 三元共晶相——Al₈Cu₄Ca 相，缩小了合金的凝固区间，提升合金的铸造性能。此外，Ca 在 Al 中具有较低的固溶度和扩散系数，因此 Al₈Cu₄Ca 相具有良好的高温稳定性。通过约束杆法测定了合金的热裂敏感性，并采用金相显微镜、扫描电子显微镜、电子万能试验机系统地探究了不同 Cu、Ca 含量的 Al-Cu-Ca 合金的组织及性能，结果表明，Al-7Cu-0.6Ca 合金，在室温下的抗拉强度达到 404MPa，断裂伸长率约 5%，具有优异的室温力学性能以及较低的热裂敏感性，为制备一种兼具良好铸造性能及力学性能的铝合金提供了新思路。

C02-24

半导体行业用铝现状和趋势分析

王国军

中铝材料应用研究院有限公司，先进铝合金技术创新联盟

半导体产业作为现代信息技术的核心，对国家安全和经济社会发展具有重大影响。高品质铝合金材料是半导体设备的关键组成部分，广泛应用于光刻、刻蚀、薄膜沉积等三大关键设备核心零部件的生产制造。

目前, 高端半导体用铝合金材料只能依赖进口, 国产化率不足 10%, 尤其是光刻设备仅为 1%, 随时面临断供风险, 因此, 设备国产化、材料国产化的需求极为强烈。半导体设备制程越先进, 对核心零部件材料的内部组织均匀性、稳定性要求越高, 对材料的加工工艺和服役性能要求越严苛。现有半导体用铝合金材料已无法满足先进制程半导体装备的制造要求, 急需在合金成分设计、组织控制、加工工艺等方面取得突破, 实现高端铝合金材料的生产和应用, 满足国家安全和高质量发展的需求。目前全球半导体产业链集中分布于美国、欧洲、韩国、日本以及中国大陆和中国台湾地区, 其中美欧日韩占据了全球超过 80% 的市场份额。我国虽然在半导体材料领域取得了一定进展, 但与国际先进水平相比仍有差距。

C02-25

基于晶体塑性有限元法的铝合金管材弯曲表面粗化研究

马顺煜、李豹*

国家有色金属复合材料工程技术研究中心

铝合金管材作为液压、燃油和环控等流体管路系统, 广泛应用于航空航天等领域。铝合金管材在弯曲成形中容易出现橘皮现象, 即管材弯曲后表面产生粗化, 该缺陷严重影响了其表面质量和服役性能, 迫切需要探明管材弯曲表面粗化形成机理, 以避免此类缺陷的产生。

本文采用晶体塑性有限元方法研究 6061-T4 管材弯曲过程中表面粗化起源和形成机理, 建立了基于 Voronoi 镶嵌几何模型和基于晶体塑性有限元(CPFE)本构模型的细观模型, 分析了管材弯曲过程中的应力应变, 研究了管材晶粒尺寸、晶粒取向和异常粗大晶粒对表面粗化的影响规律。结果表明: 管材弯曲表面粗化受晶粒尺寸、晶间取向偏差、异常大晶粒影响, 晶粒尺寸越大, 表面粗化越严重; 管材弯曲变形过程中的表面粗化源于沿厚度方向累积的晶间非均匀变形。

C02-26

Formation mechanism of the microstructural heterogeneity in a die-cast Al-Mg-Si alloy and its effect on mechanical properties

Qicai Sun^{*1}, Lingyang Yuan², Liming Peng¹

1. Shanghai Jiao Tong University

2. Fengyang Aiersi Light Alloy Precision Forming Co., Ltd

Al-Mg-Si series alloys fabricated by high pressure die casting (HPDC) have a broad application prospect in the production of large-scale and thin-walled die-castings. However, the die-cast Al-Mg-Si series alloys usually exhibit obvious microstructural heterogeneity. This study investigated the microstructural heterogeneity of the die-cast Al-7Mg-3Si alloy along the thickness direction, and the corresponding formation mechanism was verified. In this study, the die-cast sample can be divided into four distinct regions (R1~R4) from the surface to the center in turn according to the area fraction of the primary α -Al. Two aspects were considered to be the main reasons for the formation of microstructural heterogeneity. On the one hand, the externally solidified crystals (ESCs) preferentially formed in the shot sleeve and aggregated in the casting center. On the other hand, the cooling rates were quite different in each region, leading to different solidification behaviors. Based on the combination of the microstructural observation and calculated cooling rates, a physical model has been proposed to describe the formation mechanism of the microstructural heterogeneity. The heterogeneous microstructure of the die-cast sample resulted in the inhomogeneity of mechanical properties along the thickness direction. The R2 exhibited the highest micro-hardness than the other regions because of its highest amount of eutectics. Moreover, the casting surface with fine grains (R1) is conducive to improving the EL, whereas the center (R4) showed the lowest tensile properties due to the existence of ESCs and porosity band.

C02-27

限制模压变形技术制备 Al-Mg-Si 合金的组织性能研究

唐辉, 李声慈*

江西理工大学

细化晶粒是改善材料强韧性的有效手段。大塑性变形技术通过引入大量有效应变可以经济地将粗晶粒细化, 而且制备出的晶界清洁致密。限制模压变形技术通过对板料反复交替的压弯、压平变形, 达到累积应变、细化晶粒的目的, 一个完整道次的均匀有效应变可达 1.16。由于该技术不需要对试样进行特殊处理, 可在不改变试样形状尺寸的情况下细化晶粒, 制备过程简单易行。目前, 关于限制模压变形铝合金的研究较为缺乏。本作品以 Al-Mg-Si 合金为研究对象, 探究不同应变方式和变形道次对合金显微组织和力学性能的影响, 构建“工艺参数—微观结构—力学性能”一体化控制关键技术, 为高性能铝合金的成形应用提供参考, 助力汽车、轨道交通、航空航天等领域轻量化发展。

C02-28

反向等温挤压-室温冷轧联合人工时效工艺调控制备超高强 7055 铝合金

李琦伦^{1,2}, 张晓波^{1,2}, 郇清^{1,2}, 乔及森^{*1,2}

1. 兰州理工大学材料科学与工程学院

2. 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室

本文针对当前超高强航空铝合金的应用需求, 自主设计熔炼主体合金成分为 Al-8.1Zn-2.05Mg-2.4Cu-0.12Zr (wt.%) 的 7055 铝合金, 通过添加微量中间合金实现合金的改性。采用反向等温挤压—室温冷轧联合人工时效处理工艺的调控, 制备出性能优异的超高强度 7055 合金, 并对其微观组织和力学性能进行了全面的表征和测试。结果显示合金经过反向等温挤压—室温冷轧联合人工时效后合金出现一定程度的层状异质结构, 在力学性能上表现出明显的择优取向。加入中间合金后的 7055 铝合金低角度晶界的百分比增大, 这与变形晶粒和亚晶粒增多有关。其最大抗拉强度 (UTS) 和屈服强度 (YS) 达到峰值 (UTS: 772 MPa, YS: 752 MPa), 综合断裂延伸率达到 7%。合金强化主要以纳米析出强化相 MgZn₂ 和 Al₃Zr 在晶内的弥散分布, 以及对晶界和位错的织构增强、晶粒细化和钉扎作用, 阻碍了晶粒的长大。晶内的 MgZn₂ 纳米析出相尺度小于 10 nm, 并且其析出惯习面沿 [210]MgZn₂ 方向分布。

C02-29

免热处理高压压铸 TiB₂ 增强铝硅合金的组织性能调控及其强韧化机理研究朱弘毅¹, 汪明亮^{*1,2}, 张华伟^{1,2}, 王浩伟^{1,2}

1. 上海交通大学材料科学与工程学院特种材料研究所

2. 上海交通大学安徽 (淮北) 陶铝新材料研究院

本文通过在传统的高压压铸铝硅合金 (Silafont[®]-36) 中引入少量原位自生 TiB₂ 颗粒, 开发了一款在铸态下兼具良好强塑性的新型免热处理高压压铸材料。该材料能够满足当下一体化压铸大型汽车结构件日益增长的性能指标, 具有较高的工业应用价值。本文在多维度、多尺度下对该材料的组织形貌进行表征, 结合第一性原理计算、流体力学仿真、有限元模拟等手段, 构建组织-性能之间的相互联系, 充分阐述其具体的强韧化机理。本文主要结论为:

1. 结合计算与实验表征发现, 薄壁高压铸件充型过程中伴随的强剪切作用和高凝固速率有利于 TiB₂ 颗粒在熔体及凝固过程中的充分分散。基于这些均匀分散的 TiB₂ 颗粒及其与第二相之间的相互关系, 其强化效果显著优于通过其它制备方法所制备的颗粒增强铝合金材料。

2. TiB₂ 的引入诱导产生了大量细小弥散的 α_{II} -AlFeMnSi 相 (尺寸 $\leq 1 \mu\text{m}$), 其成分、晶体结构与传统的 Al₁₅(Fe,Mn)₃Si₂ 相不同, 并且能够诱导共晶 Si 相生成。由于中心区域先于带状区域凝固, 在中心区域首先产生大量的 α_{II} -AlFeMnSi 和共晶 Si 相, 从而消耗了原本应当富集到带状区域的溶质 Si, 使得带状区域消

失，从而获得更加均匀的组织，利于提高塑性。

3. 为获得均匀的组织及优异的强韧化效果， TiB_2 颗粒添加量应当控制在较低的含量（0.3 wt%）。当添加颗粒含量较高时（2.4 wt%），会在压铸件中产生粗大的外部凝固晶粒以及严重的颗粒团聚，从而损害了组织均匀性，导致塑性下降。

4. 通过添加少量原位自生 TiB_2 颗粒（0.3 wt%），合金的屈服强度提高 18 MPa，延伸率提高 0.9%，打破了目前免热压铸材料设计中“强塑性失衡”的困境。该方法具有低成本、易操作的优势，有望成为新型高强高韧的一体化免热压铸材料。

C02-30

The effect of Mn or Cr addition on the purification of Al-Si alloy

Yi Han¹, Shuyu Yang¹, Dan Feng¹, Yiheng Cao², Pizhi Zhao^{*3}

1. Chinalco Materials Application Research Institute Co., Ltd. Suzhou Branch

2. Chongqing National Innovation Institute of Light Alloys CO.,LTD.

3. Chinalco Materials Application Research Institute Co., Ltd.

Aluminum recycling has a great beneficial effect on the environment and economics. However, one of the greatest challenges is the removal of impurity elements to meet the application requirements. Particularly, iron is one of the common impurity elements in aluminum, which can significantly deteriorate the formability, so it is important to remove iron from the recycled aluminum.

This paper studied the precipitation separation process of Fe-rich intermetallic compounds in Al-6~10wt%Si-1wt%Fe cast alloy with the addition of manganese or chromium. The effect of the melt holding temperature and cooling rate on the precipitation behavior of Fe-rich intermetallic compounds was investigated using OES, OM and SEM-EDS. Intermetallic compounds formed during solidification were simulated using Pandat software. The results shown that the Fe-rich phases tended to precipitate in regular polygonal shape with Mn addition, which was identified to be $\text{Al}_{12}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$ phase by SEM-EDS. On the other hand, chromium addition accelerated the precipitation of $\text{Al}_{12}(\text{FeCr})_3\text{Si}_2$ phase, with higher aspect ratio than $\text{Al}_{12}(\text{FeMn})_3\text{Si}_2$, hindering the separation of Fe-rich phases.

As the holding temperature and cooling rate decreased, the volume fraction of Fe-rich phases increased and the level of residual iron in the separated aluminum melts decreased gradually. When 2wt.% manganese was added to the Al-7wt%Si-1wt%Fe alloy, the iron removal rate was as high as 75%. In comparison, when 0.5wt.% chromium was added to Al-9.5wt%Si-1wt%Fe alloy, the iron removal rate was 42%.

C02-31

极端环境 X 射线原位 CT 在铝合金开发中的应用

刘承禄*

南京工业大学

基于 X 射线的强穿透能力和计算机断层扫描（CT）技术，通过结合亚微米级精密控制转台和机械控制，实现了微米级高分辨率 X 射线 CT 成像，能够对毫米至厘米级试样进行三维无损成像。这项技术突破了极端环境与 CT 耦合的难题，独创了非接触式加热模式，可以在超高温、超低温、复杂应力、应力腐蚀和热压烧结等服役环境下进行材料的三维原位表征。在铝合金的开发和研究中，这项技术发挥了重要作用。铝合金材料因其轻质高强的特性，被广泛应用于航空航天、汽车制造和建筑工程等领域。通过极端环境 X 射线原位 CT 技术，可以在铝合金实际使用条件下，实时观测其内部微观结构和缺陷演变过程，为优化铝合金的力学性能和延长其使用寿命提供了重要依据。高性能原位 X 射线 CT 设备的成功研发，不仅提升了铝合金在服役工况下的可靠性和安全性，还为铝合金材料的创新应用和性能提升提供了强有力的支持。这项技术的应用，使得对铝合金材料在极端环境下的研究更加深入，为铝合金的未来发展开辟了新的路径。

C02-32

不同相对密度泡沫铝填充对民机适坠性的影响研究

马常源*, 邹田春

中国民航大学

为满足民机适坠性的要求, 提出使用泡沫铝作为机身段填充材料的方法, 并在此基础上研究了填充不同相对密度泡沫铝的机身结构能量吸收特性和冲击响应特性。首先, 通过电子万能试验机 and 高速动力加载系统对低、中、高三种不同相对密度的泡沫铝进行了准静态和中低应变率下 ($0.001 \sim 100 \text{ s}^{-1}$) 的压缩试验。其次, 建立不同相对密度的泡沫铝等效有限元模型, 通过模型分析结果与实验结果的对比验证模型的有效性。最后, 将泡沫铝等效模型应用于民机适坠性分析中, 研究置入不同相对密度泡沫铝的机身段破坏模式、能量吸收情况和客舱地板处的加速度-时间历程。结果表明: 泡沫铝的平台应力、体积比吸能随相对密度的增大而升高, 致密应变则相反。增加泡沫铝填充能量吸收结构后, 较好地平衡了机身框各部件的吸能比例, 且随着相对密度的增大, 泡沫铝材料的吸能贡献逐渐提高, 客舱地板处的峰值加速度降低, 表明高相对密度泡沫铝缓冲吸能性能更强, 能够有效改善机身结构的适坠性。

C02-33

基于原位 EBSD 拉伸试验揭示 Al-Zn-Mg 合金型材中异质组织的高角度晶界演变机制

何锡宇¹, 邓运来^{*1,2}, 郭晓斌²

1. 中南大学轻合金研究院

2. 中南大学材料科学与工程学院

基于原位 EBSD 拉伸试验研究了具有异质组织的 Al-Zn-Mg 合金晶界 (Grain boundary, GB) 的演变。研究结果表明异质组织的晶界演变不仅与其晶界微取向角 (Grain boundary misorientation angle, GBMA) 和滑移转移系数 ($m' / (\Delta b/b)$) 有关, 还与形变过程中几何必要位错 (Geometrically necessary dislocation, GND) 张量的行为有关。本研究揭示了三种高角度晶界 (High angle grain boundary, HAGB) 对 GND 密度和背应力的影响。在相邻粗晶或纤维状晶粒的 $45^\circ \sim 55^\circ$ GBMA 处, GND 密度的增加并不明显。此外, 形成背应力的最佳晶界是粗晶与纤维状晶粒之间的 HAGBs, 其 GBMA 为 $35^\circ \sim 45^\circ$, $m' / (\Delta b/b)$ 较低。然而, 在 $25^\circ \sim 35^\circ$ GBMA 和低 $m' / (\Delta b/b)$ 的 HAGBs 附近难以形成背应力。结合相邻晶粒类型、滑移转移系数和 GBMA, 本研究提出了新的准则来预测 HAGB 附近 GND 密度的行为。

C02-34

电磁搅拌对于 Al-Zn-Mg-Cu 系铝合金热变形行为影响研究

李沛卓, 李豹*

有研科技集团国家有色金属复合材料工程技术研究中心

研究了电磁搅拌作用下的 Al-Zn-Mg-Cu 系高强铝合金的热变形行为及组织演化规律, 在温度范围为 340°C 至 450°C 和 10^{-3} s^{-1} 至 10 s^{-1} 的应变速率范围内进行了等温压缩实验, 建立了热变形本构方程和合金的加工图, 并利用 EBSD 和 TEM 技术研究了电磁搅拌对于其热变形过程中的组织演化规律; 结果表明, 电磁搅拌可以降低材料的动态再结晶临界值, 从 239.82 KJ/mol 降低至 181.60 KJ/mol , 热加工图中的失稳区域减少, 并且施加电磁搅拌的材料在相同变形状态具有更高的动态再结晶百分比。

C02-35

Cu/Li 比对含 Sc 的 Al-Cu-Li 合金力学性能和腐蚀行为的影响研究

李长林³, 李锡武^{1,2,3}, 张永安^{*1,2,3}

1. 中国有研科技集团有限公司有色金属材料制备加工国家重点实验室

2. 有研工程技术研究院有限公司

3. 北京有色金属研究总院

Cu、Li 作为铝锂合金的主合金元素，其含量直接影响合金中析出相的种类及比例，从而影响铝锂合金的力学性能。本研究中，通过合金时效硬化行为、拉伸性能、腐蚀行为和电化学行为并结合 EBSD 和 TEM 等微观组织分析手段，系统研究了 Cu/Li 比对含 Sc 的 Al-Cu-Li 合金力学性能和腐蚀行为的影响。结果表明，随着 Cu/Li 比的降低合金的峰值强度水平接近但略有下降，Cu/Li 比的变化导致峰值时效合金中析出相的组态不同。在不同 Cu/Li 比的合金中，T1、 θ' 、 δ' 和 S'相的强度贡献总和一致。然而，随着 Cu/Li 比的降低，T1 相的强度贡献率从 81%降至 66%。同时随着 Cu/Li 比的降低，合金中小角度晶界析出相（LAGBs）逐渐增多并呈连续分布，大角度晶界析出相（HAGBs）体积逐渐变大且 Cu 含量降低，均导致低 Cu/Li 比合金抗晶间腐蚀能力的减弱。

C02-36

电磁定向结晶法设计和制备 Al-Si-Ni-Cu 共晶合金的研究

索康宁*

昆明理工大学

共晶合金具有高强度、良好铸造性、良好耐磨性能等优点。但是如何准确、高效的得到多元合金的共晶点仍然是一个难题。本研究为了进一步提高铝基合金的强度，在铝中添加别的元素，并提出一种新的利用电磁定向结晶的方法来设计和制备 Al-Si-Ni-Cu 系多元共晶合金。通过电磁定向结晶法获得了标准共晶 Al-Si、Al-Si-Ni 合金。然后，将电磁定向结晶法扩展到四元体系，研究了在 Al-Si-Ni 基合金中分别添加不同含量 Cu 元素对合金微观形貌的影响，并测定了 Al-Si-Ni-Cu 的共晶点。在缺乏热力学数据的情况下，电磁定向结晶法确定和设计多元合金的共晶点是一种简单高效的方法，具有很大的潜力。

C02-37

粉末预时效的超细晶 Al-Mg-Sc-Zr 合金实现强度与塑性的协同增强

李明溪¹，刘佳硕¹，郑瑞晓^{*1}，李国栋²，刘茂文²，肖文龙¹，马朝利²

1. 北京航空航天大学材料科学与工程学院

2. 北京航空航天大学前沿科学技术创新研究院

一直以来，研究者们致力于在再结晶的超细晶粒中引入高密度的纳米析出相，以期实现强度与塑性的协同增强。然而，这一目标颇具挑战性，因为再结晶与析出相的生长/粗化过程通常是同步进行的。本研究采用预时效的粉末冶金方法，在 Al-Mg-Sc-Zr 合金中成功构建了超细晶与纳米析出相的结合。在预时效阶段，晶粒内部形成了短程有序的 Sc、Zr 原子簇，这为 $Al_3(Sc,Zr)$ 的形核提供了位点，促进了纳米析出相的形成。随后的等离子电火花烧结和热挤压过程促使晶粒组织的再结晶，而低扩散系数的 Zr 有效抑制了析出相的粗化。纳米析出相通过 Orowan 机制增强了合金的强度，并且位错-析出相的交互显著提升了加工硬化效果，从而实现了优异的强度-塑性协同增强。这项工作为同类型金属材料的力学性能提升提供了一条创新路径。

C02-38

新一代 7xxx 铝合金厚板高温高湿环境下的应力腐蚀行为研究

陈送义^{*1,2,3}，张晨¹，郭子龙¹，李昉³，陈康华^{1,3}

1. 中南大学 轻合金研究院，湖南 长沙，410083

2. 中南大学 极端服役性能精准制造全国重点实验室，湖南 长沙，410083

3. 中南大学 中南大学轻质高强结构材料重点实验室，湖南 长沙，410083

新一代 7xxx 系铝合金在高温潮湿环境中的应力腐蚀是应用的瓶颈问题。认识新一代 7xxx 铝合金厚板

不同位置的应力腐蚀性能和机理是对加深晶界微化学和微观组织效应共同作用下的应力腐蚀性能的认知具有重要作用。本文在 70°C、90% 相对湿度的条件下开展了 7085 铝合金厚板 (160mm) T/2、T/4 和表层应力腐蚀 (DCB 裂纹扩展试验), 并研究了各位置中晶粒结构和晶界析出相 (GBPs) 尺寸、分布和晶界微化学。结果表明: T/2 处的裂纹扩展速率和应力强度因子阈值 (KIHEAC) 最低, 表层最高; T/2 处 GBPs 最为粗大且离散, 表层呈细小连续态; T/2 中无晶界偏析区 GBPs 的 Cu 含量最低、Zn 最低, 表层与之相反; 晶界均有明显 Cu 偏析, T/2 晶界中的 Mg 含量最低, 表层最高。T/2 位置的 SCC 抗性显著高于表面位置, 主要与大尺寸未再结晶晶粒、粗的不连续 Q-GBPs 和低 Zn、Mg 含量的 A-GBPs 有关。

C02-39

铝中空位型缺陷稳定结构和能量预测模型

孔祥山*

山东大学

了解空位型缺陷的结构和能量学行为是理解金属缺陷演化的基础。然而, 目前还没有可靠的方法能够确定金属中空位型缺陷基本的结构细节, 或为一般空位型缺陷提供准确的能量学评估。本报告采用第一性原理和分子动力学系统研究了金属铝中空洞、堆垛四面体和空位型位错环的结构和能量学, 明确证明了纳米空洞稳定结构可以通过最大化其空位总配位数来确定, 揭示了其形成能与维格纳-赛茨面积之间存在线性关系, 发现了纳米空洞与额外的单空位的顺序结合能的六个能级, 建立了铝中任意大小纳米空洞形成能和结合能的预测模型。该模型与广泛使用的球形近似相比显示出明显的优势。我们进一步揭示了堆垛四面体和空位环随尺寸的结构演化规律, 拟合了其形成能随缺陷尺寸变化的外推公式。基于上述结果, 评估了铝中纳米空洞、堆垛四面体和空位环的相对稳定性, 揭示了在某一尺寸范围内的主导缺陷类型。该工作提供了理解铝中空位型缺陷形成和演化至关重要的机制见解, 并使预测、控制和预防铝中空位型缺陷相关过程迈出了关键一步。

C02-40

A novel high-strength Al-La-Mg-Mn alloy for selective laser melting

Xinkui Zhang*, liejun li

South China University of Technology

Developing high-strength Al-(La, Ce) alloys for additive manufacturing (AM) would entail considerable economic benefits. In this work, a novel near-eutectic Al-La alloy containing 5.50 wt.% Mg and 0.60 wt.% Mn was designed and fabricated via selective laser melting (SLM). Submicron $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ intermetallics with 3D continuous cellular-dendritic and granular morphologies were observed at the interior and boundary of the melt pool, respectively. Interestingly, these intermetallics are hierarchical and contained numerous Al_6Mn and Mg_2Si secondary nanoprecipitates. The as-fabricated alloy exhibited a tensile yield strength (YS) of 334 MPa and ultimate tensile strength (UTS) of 588 MPa at room temperature, which is the highest UTS reported for Al-(La, Ce) alloys with an appreciable failure strain of ~6.4%. The 3D continuous cellular dendritic intermetallic and high Mg content afford significant strengthening and work hardening ability. In addition, the hierarchical feature of the intermetallics generated additional microcracks to coordinate the deformation.

C02-41

用于改善 Al-Cu-Mg-Ag 合金高温持久性能的晶粒尺寸调控方法

赵梓尧*

北京科技大学

降低晶界密度 (获得大尺寸晶粒) 有利于改善耐热铝合金的高温持久性能, 延长使用寿命。提出了一

种改善 Al-Cu-Mg-Ag 合金高温持久性能的晶粒尺寸调控方法。采用理论分析获得晶粒尺寸、保温时间与退火温度之间的关系公式。采用三点弯曲热松弛实验确定变形态 Al-Cu-Mg-Ag 合金在不同升温速率下的再结晶曲线,并结合上述关系公式获得再结晶动力学参数。然后根据实际生产条件,计算出给定退火时间下具有最大晶粒尺寸的退火温度,退火试样经固溶时效处理后,晶粒尺寸比直接固溶时效试样提高了 60%以上。该方法可在不明显降低室温力学性能的前提下,使合金在 210°C/190MPa 条件下的持续时间提高 60%以上。

C02-42

原位自生 TiB₂ 改性铝硅合金挤压铸造组织与性能研究

刘相廷^{1,2}, 张洋^{*2,3}, 李龙飞², 韩庆华², 李春明², 纪凯文², 左玲立², 赵凯¹, 王馨玉¹, 王浩男¹, 陈宗宁^{1,4}, 郭恩宇^{1,4}, 康慧君^{1,4}, 郝志刚⁴, 王同敏^{1,4}

1. 大连理工大学材料科学与工程学院, 大连 116024
2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 100083
3. 先进成形技术与装备全国重点实验室, 北京
4. 大连理工大学宁波研究院, 宁波 315016

通过间接挤压铸造工艺制备了原位自生 TiB₂ 改性的 AlSi10MnMg 合金,讨论了原位自生 TiB₂ 对 AlSi10MnMg 合金挤压铸造组织和力学性能的影响。研究发现:引入 TiB₂ 降低了 α -Al 晶粒的尺寸,优化了富铁相的尺寸及形貌,对元素偏析有一定的改善。当适量添加 TiB₂ 时,AlSi10MnMg 合金的延伸率明显提高。当 TiB₂ 添加量为 0.018%时,合金的屈服强度、抗拉强度和伸长率达到 160 MPa、322 MPa 和 7.4%,延伸率较基体提高了 84%。试样的拉伸断口观察发现,随着 TiB₂ 的适量加入,试样断裂机制由脆性断裂向韧脆混合断裂变化,断口处出现许多细小的韧窝和较少的撕裂棱。

C02-43

高强铝合金构件短流程精确成形技术研究

魏鹏飞^{1,2,3}, 胡志力^{*1,2,3}, 华林^{1,2,3}

1. 武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430000
2. 武汉理工大学湖北省材料绿色精密成形工程技术研究中心, 湖北 武汉 430000
3. 湖北隆中实验室, 湖北 襄阳 441000

高强铝合金作为一种结构材料,以其优异的强度/重量比、优异的可铸性、抗冲击韧性强、耐腐蚀、回收率高,在汽车、航空航天和高速铁路行业有着广泛的应用。其中铝合金薄壁构件包括覆盖件和结构件,是航空航天与新能源汽车等高端运载装备重要组成部分,占到飞机零件数量的 50%以上,汽车零件数量的 70%以上,直接决定装备服役性能和安全寿命。此类构件多采用高强铝合金成形,具有大径厚比、三维复杂结构、亚毫米精度等特征,性能要求高、成形难度大。

高强铝合金室温成形性差,利用 W 态/O 态铝合金成形可保证良好的成形性能,但是其淬火和长时间人工时效将会降低构件精度,并且成形复杂零件时很容易产生起皱、破裂等缺陷。为提高高强铝合金的成形性能,目前研究最为广泛的是热成形淬火一体化工艺(HFQ®)和温成形。HFQ®是将坯料转移到冷模成形之前对其进行固溶热处理,冷模种快速淬火,随后的人工时效处理以获得高强铝合金的峰值强度。采用 HFQ®工艺可以获得高强度和高精度的成形构件。但是 HFQ®工艺的时效时间长,铝合金热冲压成形时间<1 分钟,但热时效性能强化时间>12 小时,严重降低了生产效率,并且其长时间的人工时效会降低成形构件的精度。为了避免后续长时间的人工时效,温成形将 T6 态铝合金作为成形坯料,在 200-350°C下进行成形。7075-T6 态铝合金在 300°C时单向拉伸延伸率可达 30%,是室温延伸率的 3 倍。在双拉状态下,250°C时 7075-T6 态铝合金极限胀形高度已经超过室温 5182-O 态。虽然 T6 态铝合金在高温下成形性能得到提高,但是 T6 态坯料温成形后期强度仅为 T6 态合金强度的 93%-97%,力学性能将在烤漆后进一步下降,相比于 T6 态合金强度,强度损失高达 30%。

针对目前高强铝合金成形工艺存在的问题,提出了一种高强铝合金预强化成形工艺(Pre-hardening

forming, PHF)。对于形状复杂、成形深度大的铝合金,采用 PHF 热成形工艺:将预强化坯料短时加热(150-300°C)后成形,成形后无需人工时效处理,直接获得高强韧高精度的铝合金构件。而对于航空航天的大型复杂铝合金构件,因成本和生产节奏的限制,采用 PHF 冷成形工艺:将预强化坯料硬态成形,成形后无需热处理即可获得高性能构件,避免了传统软态成形(O 态/W 态)淬火和长时间人工时效的精度损失,并提高了生产效率。

7075 铝合金经过预强化处理,其在 200°C 下的杯突性能远高于 O 态合金在 200°C 下的杯突性能,表现出优异的高温成形性能。采用 PHF 热成形工艺成形汽车车身中立柱,成形质量良好,无起皱、破裂等缺陷,并且无需后续人工时效即可达到 T6 态合金的力学性能。

7075 铝合金经过预强化处理,其室温 50 mm 杯突高度与 W 态合金的杯突高度相当,表现出良好的室温成形性能。采用 PHF 工艺成形 7075 铝合金帽型梁,成形质量良好,其烤漆后不同变形量区域的强度较为均一,最低屈服强度和抗拉强度分别为 490 MPa 和 570 MPa,均高于 T6 态合金强度。而 W 态铝合金成形的帽型梁不同变形量区域强度差别大于 10%,烤漆后强度均低于 T6 态强度。

预强化坯料的析出相沿{111}面生长,与 FCC 合金位错的滑移面一致,在变形过程中由于位错和析出相的相互作用,导致在变形中持续形成的小角度晶界在位错滑移的条件下不断沿着特定的 Talor 轴旋转,逐渐向高角度晶界转变,不断消耗几何必要位错,以提高塑性。而位错与共格析出相的相互作用,保证了 PHF 工艺成形后的高强度。PHF 工艺采用预强化态坯料成形,消除了成形后的人工时效工序,成形成性一体化,极大提高了生产效率和产品精度,获得高强韧高精度的铝合金构件。

C02-44

Cu 含量对 Al-Cu-Li 合金析出行为及组织性能的影响研究

寻晨阳^{1,2,3}, 李锡武^{*1,2,3}

1. 中国有研科技集团有限公司有色金属材料制备加工国家重点实验室
2. 有研工程技术研究院有限公司
3. 北京有色金属研究总院

Al-Cu-Li 合金是航空航天领域重要的第三代铝锂合金,Cu 含量的变化会直接影响到合金多种沉淀相的析出行为乃至最终性能。本文研究了 Cu 含量(3.1、3.7、4.3、4.7wt.%)对 Al-xCu-1.3Li 合金微观组织演变和性能的影响规律,揭示了 Cu 含量对析出行为、晶粒特征、力学性能和疲劳裂纹扩展(FCG)性能的影响机制。研究表明,随着时效时间延长,四种合金的硬度和强度均先迅速上升,后趋于稳定再缓慢下降;在峰时效态下,Cu 含量的增加对强度和硬度均有明显提升;4.7Cu 合金中 T1 和 θ' 相数量明显增多且尺寸减小,合金的硬度和强度最高,而当 Cu 含量降至 3.1 wt.% 时,合金的硬度和屈服强度分别下降达 40 HV 和 200 MPa。相反地,Cu 含量的增加却对峰时效态合金 FCG 性能不利;当 Cu 含量处于 3.1~4.3 wt.% 时,FCG 速率随 Cu 含量增加而增长缓慢,扩展速率从 9.54×10^{-4} mm/周次降至 2.04×10^{-3} mm/周次($\Delta K=25 \sim 26$ MPa $\cdot$ m $^{1/2}$,稳态扩展阶段),4.7Cu 合金的 FCG 速度明显加快;高 Cu 的 4.7Cu 合金晶粒细小、残留第二相增多,导致其 FCP 性能严重恶化。因此,当 Cu 添加量为 4.3 wt.% 时,合金力学性能和 FCP 性能可达到较好的匹配效果。

C02-45

通过变速非等温时效工艺同步提高 Al-Zn-Mg-Cu 合金强度和耐蚀性

袁硕*

中南大学

在 7xxx 系 Al-Zn-Mg-Cu 合金的研究中,克服强度和耐蚀性之间的不兼容是一个具有挑战性的问题。为了解决这一难题,本研究提出了一种变速非等温回归再时效(VNRR)工艺,并与传统的等温时效处理(T6、T77 和 T73)进行了详细比较。VNRR 由低温缓慢加热阶段、高温快速加热阶段和 120°C 等温时效阶段组成,可同步提高 Al-Zn-Mg-Cu 合金的强度和耐蚀性。本文系统研究了 VNRR 工艺的析出行为、力学性能和耐腐蚀性能。与 T6 试样相比,VNRR 试样表现出更高的硬度和屈服强度,这可以归因于铝基

体中大量充分长大但没有严重粗化的 η' 相。最优工艺下的 VNRRRA 试样耐腐蚀性能与 T77 试样相当，这与晶界析出相 Cu 含量较高且不连续分布密切相关。此外，由于采取逐步升温的工艺过程，避免了现有 T77 工艺高温窗口期过短而导致的表层与心部受热不均匀现象，有利于降低合金表面与心部的温度差，从而有望能够应用于大型厚板铝合金构件的工业化生产。

C02-46

GPa 级高压下 Al-7Si-3Cu-(0.4Mg)合金组织及力学性能调控

方宁^{1,2}, 朱冬冬^{*1}, 魏尊杰²

1. 台州学院
2. 哈尔滨工业大学

采用高压凝固(HPS)手段和时效处理制备得到兼具变质共晶 Si 和纳米 Si 沉淀相的 Al-7Si-3Cu-(0.4Mg)合金，实现合金 Si 元素存在形式的双重正向调控。结果表明：随着凝固压力的升高， α -Al 相的分枝倾向逐渐减弱，共晶 Si 的细化变质程度逐渐提升。在 5GPa 凝固压力下，合金中生成球形纳米晶共晶相，并且合金在 6GPa 的凝固压力下转变为过饱和完全固溶体。对于 5 GPa 和 6 GPa 压力下凝固的合金，经时效处理后，Al-7Si-3Cu 合金中的沉淀相主要为 θ' 相、Al₂Cu 颗粒相和无规则 Si 颗粒相，而 Al-7Si-3Cu-0.4Mg 合金中的沉淀相主要为 θ' 相和位于{100}_{Al}面上生长的 Si 相(Si_[100])，经三维原子探针(3D-APT)分析可知 Si_[100]相内部富集 Mg 元素，其与基体界面处存在 Cu 元素偏析。细密 Si_[100]相显著提升了合金的力学性能，6 GPa 压力下凝固的 Al-7Si-3Cu-0.4Mg 合金在时效处理后硬度达到 259.6 HV，压缩强度达到 1161.8 MPa。

C02-47

低各向异性高强铝合金复合变温锻造及其组织性能研究

尹潇, 刘文胜*, 黄兰萍, 肖代红, 谭鑫, 吴名冬, 赵心阅, 袁硕
中南大学

7 系高强铝合金作为轻质高强、高耐蚀的金属工程结构材料，在航空航天轻量化材料领域有着巨大的潜力，但由于其大规格锻件的高各向异性及表层心部的组织性能不均匀性，使其作为大厚截面结构件在实际生产应用中规格受限，严重制约其工业化应用的发展。而多向锻造作为一种大塑性变形工艺，适用范围广，成本低，可以制备出组织均匀且规格灵活的高性能铝合金产品。本研究基于多向锻造，通过背散射电子衍射、扫描电镜、透射电镜和力学实验等方法，研究了分步多向锻造中不同锻造温度组合对 7085 铝合金在各方向上及表层心部的组织与性能的影响。研究结果表明，经过中温锻造加高温锻造两步复合多向锻造的锻件组织时效析出总量更少，析出相 η' 数密度更高，中温复合锻造过程中锻件表层及心部的形变储能增加，动态再结晶驱动力增强，晶粒更加细小，且后续热处理过程中的静态再结晶得到强化，显著改善锻造变形造成的晶粒晶界组织方向性。当锻件经过 340°C 中温锻造复合 460°C 高温锻造后，时效态 7085 铝合金锻件的高向心部抗拉强度为 548MPa，延伸率可达 12.2%，其心部延伸率各向异性下降至 8.6%。

墙报

C02-P01

Study on high-temperature tensile properties of carbon fiber reinforced 2A14 composite

Shiyin Huang¹, Qingnan Meng^{*1,3}, Jinhao Wu², Mu Yuan¹, Sifan wang¹, Xinyue Mao¹, Yuting Qiu¹

1. College of Construction Engineering, Jilin University
2. Jiaxing Key Laboratory of Intelligent Manufacturing and Operation & Maintenance of Automotive Parts, School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiaxing Nanhu University
3. State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun 130026, China

The short carbon fiber reinforced 2A14 aluminum alloy composite was prepared by vacuum hot pressing sintering and hot extrusion. The influence of the volume fraction of carbon fiber on the tensile properties of the composite at different temperatures was studied. The results showed that the increase of carbon fiber content will enhance the tensile strength of composites at high temperature. The tensile strength of composites with carbon fiber volume fraction of 10 vol % at 220°C was close to that of 2 vol % tested at 180°C. The tensile strength of 10 vol % composite (360 MPa) at 220°C was 13.9% higher than that of 2 vol % composite (316MPa). The increase of high temperature strength corresponded to the load transfer mechanism.

C02-P02

Er 对汽车轮毂用 A356 合金组织和力学性能的影响

汤江涛^{1,2,3}, 梁田^{*1,2}, 姜岳峰^{1,2}, 马颖澈^{1,2}

1. 中国科学院核用材料与安全评价重点实验室（中国科学院金属研究所），沈阳，110016
2. 师昌绪创新材料研究中心（中国科学院金属研究所），沈阳，110016
3. 沈阳化工大学材料工程与科学学院，沈阳，110016

A356 合金是 Al-Si-Mg 系合金，具有优异的力学性能，常用于小型汽车轮毂的制造。但重型汽车的轮毂合金要求抗拉强度要大于 320MPa，伸长率要大于 7%，远高于小型汽车轮毂合金的性能要求。而在合金中加入微量稀土元素是一种强化铝合金性能的有效途径，但稀土元素对 A356 合金组织性能影响机理研究尚不系统。

论文以 Er 合金化的 A356 合金为研究对象，采用重力铸造方法，通过 Thermo-Calc 软件、DSC、OM、SEM、EBSD、TEM、拉伸实验等方法研究了 Er 元素对 A356 合金组织和性能的影响，结果表明：(1)Er 的添加会生成 Al₃Er 相，但其形核温度会在 Si 相和 Al 相之后，因此无法成为异质形核核心来细化晶粒，但 Er 可以使板条状共晶硅转变为纤维状或短棒状，并使共晶反应的起始温度降低，抑制 Si 相的生长；(2)Er 主要富集在 Si 相上，说明 Er 的细化机理属于孪晶凹谷(TPRE)机制。经过 T6 热处理后 Si 相的形貌转变为较为圆润的椭球状，Mg 会回溶 Si 相之中形成 Mg₂Si 相，Er 会和 Fe、Mg、Si、Al 等元素形成化合物存在于组织之中。(3)未经热处理的 0.6wt.%Er 的抗拉强度和伸长率最佳，分别为 260MPa、4%。经过 540°C 固溶+180°C 时效的 T6 热处理后，0.6wt.%Er 合金的抗拉强度大幅提升，伸长率性能变化较小，分别为 323MPa、5%。(4)原始态合金拉伸断口为脆性断裂特征，拉伸断口 EBSD-KAM 图表明应力主要集中在 Si 相和基体间的结合处。在经过 T6 热处理后，拉伸断口上存在少量的韧窝，表明合金的断裂形式开始由脆性断裂转变为韧性断裂。研究结果可用于指导添加 Er 元素对 A356 合金的改性，为开发出符合实际应用的合金材料提供有效支持。

C02-P03

Cu 和 Sb 元素对免热处理 Al-Mg-Si 系合金组织和力学性能的影响

韩玉秀，郑洪亮^{*}，王文浩

山东大学

研究了 Cu 元素和 Sb 元素的添加对免热处理 Al-Mg-Si 系合金组织和力学性能的影响。结果表明，加入 1.5 wt.%Cu，初生 α -Al 和共晶晶粒的尺寸明显减小，但共晶 Mg₂Si 相的形貌由纤维状转变成板片状，导致合金强度提高，延伸率下降。复合添加 1.5 wt.%Cu 和 0.2 wt.%Sb 可以在细化共晶晶粒的同时，细化共晶 Mg₂Si 的形貌，抵消了单 Cu 添加对合金延伸率的不利影响，协同提高了合金的强度和延伸率。复合添加 Cu 和 Sb 后，合金的屈服强度、抗拉强度和延伸率分别由 134MPa、267MPa 和 6.0%提高到 142MPa、301MPa 和 6.5%。强化元素和变质元素对改善共晶组织的耦合作用为 Al-Mg-Si 系合金的开发研究提供了新的思路。

C02-P04

基板预热对颗粒增强增材制造铝合金复合材料拉伸性能的影响

李恩发, 郑洪亮*, 张述豪, 韩玉秀, 张莹, 崔德才

山东大学

本文主要探究 AlSi10Mg 合金成形工艺中有无基板预热和后续热处理对增材制造成形试样的显微组织和力学性能的影响。LPBF 成形参数设置为激光功率 390 W, 扫描速度为 1350 mm/s, 铺粉层厚为 30 μm , 扫描间距为 170 μm , 扫描策略为相邻层激光转角为 67°, 此时的 AlSi10Mg 粉末成形试样具有较高的力学性能。由于成形过程中的快速冷却和加入的增强相颗粒, SLM 成形试样的强化机制主要为细晶强化、固溶强化、弥散强化和载荷传递强化。在无基板加热条件下的纯 AlSi10Mg 粉末成形试样抗拉强度为 461 MPa, 屈服强度为 272 MPa, 延伸率为 9.85%, 硬度为 126 HV0.1; 在 150°C 基板加热条件下的纯 AlSi10Mg 粉末成型试样抗拉强度为 334.7 MPa, 屈服强度为 237.1 MPa, 延伸率为 2.53 %, 硬度为 128 HV0.1。在 150°C 基板加热的条件下, 试样的拉伸性能大幅度降低。两者力学性能产生差异的主要原因为, 150°C 基板加热条件, 会产生原位时效效应, 使得成形组织的 α -Al 晶粒尺寸、共晶硅网络的连通性和尺寸、 α -Al 中过饱和 Si 相的析出效果不同, 微观组织形貌发生变化, 最终导致两者的力学性能产生不同。

C02-P05**Al-Cu-Y 体系相平衡的实验测定与热力学计算**

颜景哲, 刘树红*, 杜勇

中南大学

近年来, 稀土元素常添加于铝合金中, 以提高合金的抗拉强度、耐热性、耐腐蚀性等。据报道, 添加 Y 可以改善铝合金的力学性能, 包括峰值硬度、过时效行为和抗拉强度。科学的成分设计是实现材料微观结构调控进而获得高性能的前提, 成分设计又以相关体系相图为基础。针对 Al-Cu-Y 体系的相平衡报道较少的现状, 本工作基于文献数据评估制备了一系列 Al-Cu-Y 三元合金并退火, 利用 X 射线衍射技术(XRD)、扫描电子显微镜(SEM)和电子探针显微分析(EPMA)表征手段测定了 820K 和 673K 等温截面。基于 CALPHAD 方法优化获得描述 Al-Cu-Y 体系的热力学参数, 以期对稀土铝合金设计研发提供基础热力学信息。

C02-P06**Al-Si-Cu-Mg 半固态成形热处理工艺及强化机制研究**

张莹, 郑洪亮*, 王文浩, 张述豪, 相立新, 崔德才

山东大学

伴随着碳达峰、碳中和理念的提出, 以及新能源汽车的快速发展, 汽车轻量化是大势所趋。材料轻量化是最直接最有效的路径, 铝合金是汽车轻量化的首选材料。采用半固态压铸成形 Al-Si-Cu-Mg 合金, 研究了固溶处理工艺对半固态压铸 Al-Si-Cu-Mg 合金显微组织和力学性能的影响, 探讨了半固态压铸成形 Al-Si-Cu-Mg 合金的强化机理。半固态压铸 Al-Si-Cu-Mg 合金铸态组织具有典型的球晶形貌, 球形 α -Al 均匀分布于基体中, 共晶 Si 相呈珊瑚状存在于晶界处, Al_2Cu 相以共晶状存在于晶界处, $\text{Q-Al}_5\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6$ 以共晶状存在于晶界处。进行热处理产生的固溶强化主要来源于富 Cu 相的溶解及粗大共晶 Si 相的熔断、细化和球化。采取热处理工艺 500 固溶处理 3h, 180 时效处理 10h, 合金布氏硬度为 145.6HB, 屈服强度为 397.0MPa, 抗拉强度为 425.0MPa, 延伸率为 2.1%。在调整热处理工艺时得到最大抗拉强度为 436.5MPa, 此时屈服强度为 413.0MPa, 延伸率为 1.9%。为研究其强化机理, 对半固态压铸 Al-Si-Cu-Mg 合金的铸态和热处理态进行透射分析。在铸态中可观察到较多的位错, 起到位错强化的作用, 在热处理态中可以观察到大量的针状析出物和点状析出物, 对衍射花样进行标定, 确定合金中针状析出相为相, 点状析出物为相。相在合金基体上是非均匀形核的, 在位错、晶界等能量高的位置优先形核和长大; 相在合金基体中均匀分布, 不受位错、晶界等缺陷的影响。半固态压铸 Al-Si-Cu-Mg 合金的强化主要来源于细小弥散相和均匀分

布的相。

C02-P07

2024-O 态铝合金薄板微观组织及成形性能的演变规律研究

益珊珊*

北京航空航天大学

2024 铝合金板材作为飞机重要的结构件,被广泛应用在蒙皮、骨架、肋梁等重要部分。由于合金元素含量高,2024 铝合金中存在多种、大量的、粗的第二相颗粒,引起板材在服役过程中的应力集中,严重损害板材的机械性能。在本工作中,采用不同的双级固溶工艺,对不同厚度 2024 铝合金板材进行固溶处理,使其第二相尽可能回溶。通过扫描电子显微镜观察了样品的组织形貌,采用电子万能试验机测试板材的力学性能,系统地分析了 2024 铝合金板材第二相含量、再结晶组织与固溶工艺的关联规律,评价板材的成形性。结果表明,经不同双级固溶工艺处理后的板材中第二相含量均在 1%以下,抗拉强度达 480 MPa 以上,并保持延伸率在 10%以上,板材性能非常良好,是飞机蒙皮非常合适的材料。

C02-P08

Sc 和 Zr 协同强化对 Al-7Si-0.7Mg 铝合金组织和性能的影响

相立新, 郑洪亮*

山东大学材料科学与工程学院

为了研究 Sc 和 Zr 微合金化对 Al-7Si-0.7Mg 铝合金组织和性能的影响,利用铜模制备了不同 Sc、Zr 含量 (0wt%Sc+0.2wt%Zr、0.3wt%Sc+0.2wt%Zr 和 0.6wt%Sc+0.2wt%Zr) 的试样。结果表明,随着 Sc 含量的增加, α -Al 晶粒得到细化。但过量 Sc (0.6wt%) 细化效果不显著,并在晶界处通过包晶反应析出较多数量的块状 AlSi₂(Sc、Zr、Ti)₂ 相。DSC 结果表明 Sc、Zr 的加入使得液相线右移,提高了 α -Al 的形核温度,有利于晶粒细化。在热处理后的 α -Al 晶粒内部发现了大量弥散分布的长条状 AlSi₂(Sc、Zr、Ti)₂ 相,尺寸为 200nm-800nm,其与 Al 基体界面结合良好,可作为异质形核的核心。随着 Sc 含量的增加,试样的抗拉强度先增加后降低,伸长率呈下降趋势。在 0.3wt%Sc+0.2wt%Zr 添加量下获得的 Al-7Si-0.7Mg 合金综合性能较好,其铸态下屈服强度、抗拉强度和伸长率分别为 153MPa、284MPa 和 6.6%,T6 态下分别为 357MPa、403MPa 和 6.7%。Sc、Zr 微合金化后的 Al-7Si-0.7Mg 铝合金力学性能的改善归因于微观组织的细化与 AlSi₂(Sc、Zr、Ti)₂ 相的大量析出。

C02-P09

轧制过程引入中间退火工艺对 2195 铝锂合金各向异性的影响

李丰满*

南京工业大学

摘要:第三代铝锂合金由于其强度、韧性、耐腐蚀性和轻量化的先进协同作用,在航空、航天等领域得到了广泛关注,但是仍然存在各向异性的问题,限制了其进一步的应用。通过研究不同轧制工艺对 2195 铝锂合金微观组织和力学性能的影响,发现热轧板材的延伸率最高,但是强度最低,冷轧板材与热轧板材相比提高了强度但是延伸率降低,热轧和冷轧结合的工艺进一步提高了强度但是没有解决延伸率下降的问题。引入中间退火工艺,强度略有提升,但沿 RD 与 TD 方向的延伸率差异值从热轧加冷轧工艺板材的 26.3%降低到 10.8%,沿 RD 方向的延伸率提升 25%。通过微观组织观察,热轧与冷轧工艺之间增加中间退火工艺可以降低晶粒尺寸、改变晶粒变形程度,从而降低 T1 相的尺寸,改善 T1 相分布不均匀的问题,实现合金强度、延伸率、各向异性的同步提升。

C02-P10

Al-Mg-Sc 合金不同热处理工艺下 AlFeMnSi 和 Al₃(Sc,Zr)弥散相的演变及其对力学性能的影响

苏艺*

北京科技大学

微量 Sc 和 Zr 复合微合金化的 Al-Mg-Sc 合金具有强度高、耐腐蚀性能好、焊接性能好等优点，在航天、航空等领域有着广泛的应用前景。本文研究了 Al-Mg-Sc 合金在不同均匀化和退火条件下，AlFeMnSi 和 Al₃(Sc,Zr)弥散相的演变以及对拉伸力学性能的影响。结果表明，相对于三级均匀化，单级均匀化析出的 Al₃(Sc,Zr)弥散相尺寸更小，数量密度更高，具有更优异的抗再结晶性能；在 350°C/1h 退火后，单级 OS (350°C/6h)合金的力学性能明显高于三级均匀化 THS8(270°C/6h+350°C/6h+500°C/8h)合金，但是 550°C/1h 退火后，OS 和 THS8 合金力学性能相似。根据强化机制定量分析可知，350°C/1h 退火后，力学性能的差距主要是因为相比 THS8 合金，OS 合金中 Al₃(Sc,Zr)弥散相尺寸更小，数量密度更高，因此具有更高的析出强化作用；550°C/1h 退火后，力学性能相似主要是因为在此温度下，两种合金的 Al₃(Sc,Zr)弥散相的尺寸和数量密度差别较小，因此析出强化的作用相差不大。同时基于本构模型分析预测的屈服强度值与实验数据相吻合。

仅发表论文

C02-PO01**Study on composition, Fe-rich phase morphology and sedimentation behavior of A380 aluminum alloy after adding Mn to remove Fe**Shuyu Yang¹, Yi Han^{*1}, Dan Feng¹, Yiheng Cao², Ranran Zhu¹, Dongwei Xu⁴, Pizhi Zhao³

1. Chinalco Materials Application Research Institute Co., Ltd. Suzhou Branch

2. Chongqing National Innovation Institute of Light Alloys CO.,LTD.

3. Chinalco Materials Application Research Institute Co., Ltd.

4. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University

In this study, the influence of Mn addition on the theoretical Fe removal rate of A380 aluminum alloy was explored by using the thermodynamic calculation software JMatPro, and the Fe removal effect was verified by experiments. By means of direct reading spectrum, optical metallographic microscope, scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer, the chemical composition change, morphological evolution and precipitation behavior of Fe-rich phase in the alloy were deeply studied. The results show that the theoretical Fe removal rate increases with the increase of Mn addition, and after the Fe-rich phase begins to precipitate, the Fe removal rate gradually increases with the decrease of temperature. The experimental data show that the average content of Fe in the purification zone of ingot is 0.35 wt.%, and the actual Fe removal rate is 61 %, which is consistent with the theoretical prediction. The primary crystal Al₁₅(FeMn)₃Si₂ phase is enriched in the bottom of the ingot in the form of star, snowflake and polyhedron, while the eutectic Al₁₅(FeMn)₃Si₂ phase in Chinese characters is distributed all over the ingot. The size and morphology of Fe-rich phase are the main factors affecting its sedimentation effect.

C02-PO02**Unveiling the effect of deformation parameters on the dynamic recrystallization-dependent superplasticity of a novel Al-Cu-Li alloy**Guotong Zou^{1,2,3}, Jun Li¹, Yaqi Xu¹, Shijie Chen¹, Lingying Ye^{*1,2,3}

1. School of Materials Science and Engineering, Central South University

2. Key Laboratory of Nonferrous Metal Materials Sciences and Engineering, Ministry of Education, Central South University

3. Nonferrous Metal Oriented Advanced Structural Materials and Manufacturing Cooperative Innovation Center, Central South University

Superplasticity is the phenomenon of metal materials that show elongation of larger than 200% under certain conditions, which is sensitive to deformation temperature and strain rate. In this work, the superplastic deformation behaviour and underlying deformation mechanisms of an Al-Cu-Li alloy under various temperatures and strain rates are studied. By using uniaxial tensile, in-situ scanning electronic microscopy (SEM), and Electron Back-Scattered Diffraction (EBSD), the superplastic deformation behaviour, microstructure evolution, dynamic recrystallization mechanism, and fracture mechanism of 2A97 Al-Cu-Li alloy were analysed comprehensively and discussed. Results show that the tested alloy exhibits the largest elongation of 780% at 430°C and 0.002 s⁻¹, the excellent superplasticity is achieved mainly by dynamic recrystallization and grain boundary sliding (GBS). At the optimal deformation condition, the banded grains transform into equiaxed shape via continuous dynamic recrystallization facilitated by coarse secondary phases, and then the GBS plays a vital role on the subsequent deformation stage. Increasing the temperature or decreasing the strain rate causes grain growth, which affects the elongation adversely. At lower temperatures or higher strain rates, the recrystallization process is hindered, and the banded grains that are not conducive to GBS are kept until fracture, which also leads to lower elongation. This work provides a reference for the selection of the optimum deformation parameters of the studied alloy, and in addition, explores the influence of deformation parameters on the superplastic deformation behaviour and mechanism of alloys with initial unrecrystallized structures.

C02-PO03

In-situ surface study of the behaviors and mechanisms of superplastic deformation in a 2195 Al-Cu-Li alloy

Jun Li, guotong Zou, zhixin Shen, shijie Chen, yaqi Xu, lingying Ye*

Central South University

Al-Cu-Li alloys typically undergo dynamic recrystallization during the initial stage of superplastic deformation so as to achieve fine grains, static recrystallization that generally does not occur before superplastic deformation. However, in this study, a 2195 Al-Cu-Li alloy with equiaxed recrystallized microstructure was manufactured before superplastic deformation, and it could achieve an elongation of 523% at a temperature of 430 °C and a strain rate of $2 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. In order to quantitatively calculate the contributions of grain boundary slip, intragranular dislocation slip and diffusion creep to the total strain, high-resolution grids were etched on the surface of the samples using focused ion beam technology to observe the processes of grain boundary slip and cavity formation under a large strain range of 0.92-1.61. Besides, the microstructure evolution during superplastic deformation was also observed through SEM, EBSD and TEM. The results have shown that diffusion creep was the primary deformation mechanism, with a maximum contribution of up to 74.3%. The dynamic diffusion of Cu element was confirmed, and the Cu-rich particles on the grain boundary gradually diminished or vanished with increasing strain, resulting in weakened grain-to-grain connections. Additionally, cavities were observed in the striated bands where no particles were present.