



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

C02-高性能铝合金

C02-Advanced Aluminum Alloys

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.scimeeting.cn>



C02. 高性能铝合金分会

分会主席：熊柏青、范云强、陈江华、李红英、刘刚

C02-01

高性能铝合金的开发与应用

李红英

中南大学

报告主要围绕高性能导体材料开发和应用、航空航天用先进铝合金开发和应用，包括节能型导线开发及多场景应用、耐损型导线开发及大规模应用、飞机用大截面轻型电缆国产化、航空航天轻量化用铝合金材料等四部分内容。选择应用非常普遍的纯铝、中强铝合金和耐热铝合金三类导体，介绍协同提升导电率和强度、耐热性的导线设计制备技术，以及针对不同应用场景设计导线结构和实现工程应用。介绍高导电的高强度、耐腐蚀和超耐热导线制备技术，以及导线结构设计和服役测评系统，实现跨区域大容量高可靠输电。飞机线缆重量与飞机总重占比接近 20%，以铝代铜可以获得非常显著的减重效果，然而，飞机用铝芯电缆完全依赖进口，介绍飞机用大截面电缆研制及产线建立情况。国产飞机 C919 选用占整机重量 8.8% 的铝合金，主要由 Alcoa 供货，国产化需求十分迫切，重点介绍铝锂合金工业化制造难点、铝锂合金的研制及应用情况。

C02-02

Al-Cu 合金 θ' 相高温时效析出序列及热稳定性研究

伍翠兰

湖南大学

Al-Cu 合金具有轻质高强、耐热耐蚀、易加工成形等优点，在航空航天、汽车工业等领域广泛应用。 θ' 相是 Al-Cu 合金中主要的强化相，其热稳定性直接决定合金的热稳定性。采用先进的电子显微学、第一性原理计算和性能测试，研究 Al-Cu 合金 θ' 相高温时效析出行为及热稳定性提升机制。250 °C 及以上温度的时效析出路径：(I) SSSS $\rightarrow\theta'$ HTP $\rightarrow\theta'$ ；(II) SSSS $\rightarrow\theta'$ S-HTP $\rightarrow\theta'$ ，其中由 θ' S-HTP 转变而来的 θ' 相细小且具有大的径厚比。低温时效形成的 θ'' 析出相在 300 °C 快速溶解，并促使 θ' 相粗化和 θ 相的过早形成，降低合金的热稳定性。Sc、Zr、Mn 元素微合金化在高温时效过程中偏聚到 θ' 相界面及内部，提高 θ' 相的热稳定性和高温力学性能，使得合金在 300 °C 保温 1000h 后的室温强度仍然大于 300MPa。

C02-03

共晶合金在极端条件下的组织性能研究进展

卞泽宇^{1,2}、冯辉²、蔡毓龙¹、崔帅¹、汪明亮²、王浩伟²

1. 中国科学院微小卫星创新研究院

2. 上海交通大学

随着工业领域对极端工况应用场景需求的持续升级，新一代高性能铝材料研发亟需突破高温环境下的长期服役稳定性与快速复杂成形工艺适应性两大核心挑战。对于在 300~500°C 中温区间服役的构件，传统铝合金在 200°C 以上便将发生快速失稳粗化，导致材料丧失强化效果并快速软化失效。而在增材制造技术实现短周期定制成型的同时，如何保证打印材料性能的同时实现试样高质量成型仍旧是关键难题。共晶合金具备耐热稳定性及成型适应性优势，当前研究在此基础上，通过成分及组织结构设计等手段探索开发了过渡元素或稀土元素为主元素新型共晶合金体系，并研究了微合金化、界面结构优化等强化手段在提升合金耐热性能及成型性能的影响。以慢扩散过渡族元素为主体，引入高效强化、高温稳定的耐热析出相以及综合优化合金性能的外加陶瓷颗粒，实现多尺度结构设计提升合金在高温的性能表现。测试表明，多尺度结构设计共晶合金在 400°C@20MPa 的条件下蠕变速率低至 $9.9 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$ ，比其他典型耐热铝合金低 1-5 个数量级，具有较为显著的高温蠕变抗性。然而该类共晶材料的微观组织构建及性能优化对冷速存在一定程度的依赖。为进一步提升强化组织体积分数，优化组织结构，进一步研究极端冷速下的成型适应性及性能优化。共晶合金在增材制造中展现出独特的工艺适配性与性能调控优势。通过诱导共晶合金形成纳米级

金属间化合物，优化强化相的原位生成与分布优化，同步提升材料强度、塑性和热导率。同时，共晶合金固有的窄凝固区间显著降低热裂纹敏感性，且其成分稳定性有利于抑制多层沉积过程中的元素偏析，从而保障构件成形质量。通过优选成分工艺制备得到的增材制造共晶样品硬度达到 197HV，优于现役常规高强铝合金性能表现。在高温下的蠕变性能表明合金具有更优越的蠕变抗性。综合来看，共晶体系的多相协同效应为功能梯度材料设计提供了新途径，为复杂构件的高性能一体化制造奠定了重要基础，具有深入研究的价值。

C02-04

亚共晶 Al-Si 合金力学性能和导电率协同优化机制

崔晓丽*¹、王研²

1. 广东海洋大学

2. 山东理工大学

随着新能源汽车、电气电工、航空航天等领域的迅速发展，铝合金的服役要求也不断提高。通过对铝合金实现结构-功能一体化设计，从而满足材料的性能需求，目前已展现出广阔的应用前景。通常，大多数铝合金材料的力学性能和导电性存在倒置效应，这一矛盾限制其应用范围。为实现铝合金的多方面应用，拓展其实用价值，以亚共晶 Al-Si 合金作为研究对象，通过成分调控、熔体处理、挤压变形、轧制变形、热处理等多种手段优化合金成分，进行微观组织调控以及第二相尺寸、形貌特征的变化研究，改善材料的微观组织，从而实现合金力学性能与导电性的协同优化。

C02-05

冷轧变形对 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu-Zr 复合材料显微组织演变及力学性能的影响

孙文超*

北京工业大学

本工作采用扫描电镜、电子背散射衍射和透射电镜等方法，系统研究了形变路径对 TiB₂/Al-Zn-Mg-Cu 复合材料的力学性能、强化机制以及时效析出的影响。通过改变双向轧制中的两个方向的变形量来调节合金的组织分布以及改善 TiB₂ 的分散性。双向轧 55% 变形量可以得知双向轧制后合金内部的组织分布更加分散，而且合金内部的组织强度减弱，而且各分部点的强度比较均匀。随着双向轧变形量的增加合金内部的组织强度呈现出先减小后增加的趋势。过双向轧制变形量 55% 后合金中位错的分布更加均匀，形成复杂的网络状结构，这其中主要包括位错缠结、亚晶界等。单向轧 55% 变形量的合金的抗拉强度达到 893MPa，屈服强度达到 875MPa。双向轧制在变形量为 55% 是在 RD 和 TD 方向上均有良好的拉伸性能，并且延伸率可以到达 6% 以上。

C02-06

新型高镁 Al-Mg-Zn-X 合金的 T 相主导强化策略

李锡武、温凯、肖伟、熊柏青

中国有研科技集团有限公司 有色金属结构材料全国重点实验室

航空航天等高端装备轻量化对铝合金提出更高强韧性与耐蚀性协同要求，而传统 Al-Mg-Zn 合金面临“强度-耐蚀性”倒置难题：T 相数量不足制约强度提升，晶界 β 相析出导致耐蚀性劣化。近年来，基于多尺度强化相调控的新型合金设计成为突破传统性能瓶颈的重要途径，其中探明 T 相稳定化机制及微合金化协同效应是实现合金性能跃升的核心科学问题。本研究通过融合第一性原理计算与实验验证，构建 T 相原子尺度构效关系，创新提出高 Mg 与微量 Si 协同合金化策略，为发展兼具高强度和耐蚀性的新型铝合金提供全新解决方案。团队采用密度泛函理论 (DFT) 和特殊准随机结构 (SQSs) 方法深入探究了 T-Mg₃₂(Al,Zn)₄₉ 相的结构特性，发现增加 Zn 含量会降低 T 相形成能，并提升了 T 相的共价性和力学性能；结合文献验证发现，Ag/Cu/Si 微合金化可进一步降低 T 相形成能；基于此开发的新型高 Mg 含量 Al-Mg-Zn-Si 合金中，Si 促进 GPT' 区形成并调控溶质分布，结合时效工艺适配优化实现了基体纳米 T' 相与沿晶界的 T'+ η' 双相协同析出；工业化试制合金材料的综合性能明显优于传统 Al-Zn-Mg-Cu 合金，这为开发新型高性能轻量化铝

材提供了新方向。

C02-07

铝合金电弧-搅拌摩擦加工复合增材制造组织性能研究

刘莉*、徐望辉、董春林

广州航海学院

在本研究中,提出了一种将层间搅拌摩擦加工(FSP)与电弧增材制造(WAAM)相结合的混合增材制造(AM)工艺,以解决WAAM铝合金中遇到的高孔隙率、粗晶粒和力学性能低的问题。使用Er2319焊丝制备了Al-Cu合金,并进行了层间FSP以改善沉积层的微观结构。分析了层间FSP对WAAM铝合金微观组织和力学性能的影响。结果表明,增材试样横截面上不同区域的孔隙特性不同。层间FSP以通过FSP工具的剧烈搅拌作用和顶段力作用降低WAAM铝合金的孔径、孔密度和孔面积分数。此外,中间层FSP可以显著细化晶粒,从而在WAAM-FSP样品中获得更宽的细晶粒区域。与WAAM样品相比,WAAM-FSP样品具有更大数量密度的点状第二相,这是由于FSP的剧烈搅拌作用和强烈变形引起的第二相颗粒的碎裂和部分溶解。层间FSP增强了所制备的Al-Cu合金的强度和延伸率,这主要归因于层间FSP引起的孔隙率降低、晶粒细化、第二相颗粒碎裂和溶解的共同作用。本研究可为采用WAAM-FSP复合增材制造技术制备高性能的铝合金构件提供理论指导。

C02-08

微合金化耦合对Al-Cu系合金组织结构及力学性能的影响

封巧、张鹏、刘刚*

西安交通大学

随着工业的快速发展,对轻质结构金属材料的性能提出了更高的要求,铝合金作为仅次于钢铁的第二大金属材料,以其高比强、耐腐蚀的特点在工业上广泛应用。本文以微观组织设计为导向,选取经典的时效强化型Al-Cu合金为研究对象,聚焦于快扩散速率元素Cd、中等扩散速率元素Cu与慢扩散速率元素Sc原子之间强烈的交互作用,设想并制定了一种以Cd微合金化元素诱导沉淀相的形核析出,以Sc微合金化元素在 θ' -Al₂Cu/ α -Al界面偏聚为特征的微观组织结构。借助高分辨透射电子显微镜、三维原子探针技术等表征手段、室温及高温力学性能测试,系统的研究了Cd、Sc元素的添加对富Cu沉淀相形核、析出、粗化等阶段的影响。研究结果表明,Cd微合金化元素的添加大大提高了合金的时效动力学和峰值时效硬度,并且Cd颗粒在 θ' -Al₂Cu沉淀相的共格面和非共格面的多个位点处偏聚,有效抑制了在高温热暴露阶段 θ' -Al₂Cu沉淀相的粗化。此外Sc微合金化元素在 θ' -Al₂Cu/ α -Al界面偏聚进一步稳定 θ' -Al₂Cu沉淀相以提高合金的高温性能,使合金兼具室温强韧化和高温热稳定性。通过对Al-Cu合金微观组织及力学性能的特征,探究并阐明了Cd、Sc微合金化元素之间的耦合作用及其对Al-Cu合金力学性能的影响规律。

C02-09

微量Sc/Zr/TiB₂颗粒对Al-Mg合金再结晶和强化行为的影响

李昕宸、陈宗宁*、王同敏

大连理工大学

通过Sc/Zr改性的新一代高性能Al-Mg基铝合金的开发正日益受到关注。然而,添加大量Sc带来成本剧增成为其进一步发展的障碍。在本研究中,微量TiB₂颗粒的引入被用来调节微观结构的演变过程,从而在低Sc添加量下获得理想的强度-塑性。Al-Mg-Sc-Zr-TiB₂合金的极限抗拉强度为442.4 MPa,延伸率为16.6%。通过观察,球状的L₁₂-Al₃(Sc, Zr)纳米析出相弥散分布在基体中,有效钉扎位错,从而增加了小角晶界(LAGBs)的比例并抑制了动态再结晶(DRX)。TiB₂的粒子激发成核(PSN)效应加速了DRX,进一步增加了LAGBs和几何必要位错密度(GND)。此外,TiB₂颗粒削弱了材料的各向异性,抑制了DRX晶粒的生长,从而扩大了后续加工窗口,为材料提供了潜在的应用价值。

C02-10

通过晶界偏析实现 LPBF AlFeCuZr 合金的热稳定性

徐京豫*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

铝合金凭借轻质高强、耐腐蚀的特性，在航空航天等关键领域获得广泛应用。然而，当服役温度超过 200°C 时，晶界扩散和晶界滑移加剧，导致铝合金高温蠕变抗力急剧下降，从而严重制约其中高温环境的应用。在此，我们采用激光粉末床层熔融（LPBF）技术制造了一种无裂纹且接近全致密的 Al-1Fe-0.6Cu-1.3Zr 合金。Al-Fe-Cu-Zr 合金呈现出具有两个不同区域的异质微观构。一个是所谓的粗晶粒区（CGZs），平均晶粒尺寸为 0.95 μm ，其中 (Al,Cu)Fe₃ 纳米颗粒沉淀在铝基体中，铁和铜在晶界（GBs）处共聚。另一种是平均结晶粒尺寸为 0.45 μm 的细晶粒区（FGZ），其中每个 α -Al 晶粒中都析出一个 Al₃Zr 纳米粒子（作为晶核），而在晶界处则出现富含铁的纳米析出物和铁/铜聚集。因此，具有这些独特异质结构的 LPBF Al-Fe-Cu-Zr 合金在高温下均表现出优异的热稳定性，例如，在 450°C（0.82T_m，T_m 为熔点温度）的极端条件下保温 24 小时，样品仍保持精细的异质结构组织（CGZ 晶粒尺寸为 1.48 μm ，FGZ 晶粒尺寸为 0.79 μm ），展示出极出色的组织稳定性，高于迄今报道的添加剂制造的铝基合金。研究成果为开发耐高温铝合金提供理论依据和技术支持，并推动该类材料在航空航天领域的工程应用。

C02-11

亚微米陶瓷颗粒增强 Al-Mg 合金的组织调控

袁旭、王志平、沙刚*

南京理工大学

高性能锻造 Al-Mg 合金具有高比强度，耐蚀性、导电导热以及可加工性好，在轻量化发展的轨道交通建筑电力等行业成为关键材料。高固溶 Mg 可以降低铝合金的层错能，通过合适的机械热处理方法可以细化晶粒，提升材料强度。但在热处理过程中，高固溶 Al-Mg 合金组织稳定性较差。均匀的亚微米 TiB₂ 颗粒与铝基体有更好的结合力以及高温稳定性，在退火过程中对再结晶形核及晶粒长大起到作用。本作品针对锻造 Al-Mg 合金在高温下组织稳定性差的问题，通过添加陶瓷颗粒并调控热处理过程中的再结晶组织，提升材料性能。首先探究了颗粒促进再结晶形核和匀质再结晶的温度效应及晶粒长大行为，提升了合金的高温组织稳定性，其次开发了在接近再结晶温度的低温退火+等温退火方式，揭示了温度对颗粒促进再结晶形核的影响机制，对高性能锻造铝合金的开发应用具有重要意义。

C02-12

解决材料科学难题的先进三维与定量电镜技术

陈江华*

海南大学

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。

C02-13

极端服役环境 X 射线显微原位 CT 的研发与应用

李仁庚*

南京工业大学

摘要: 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。

C02-14

离子辐照下不同硅含量铝合金中缺陷的演化和硬化行为

朱士坤^{1,2}、王左江^{1,2}、曹子奇^{1,2}、刘正煜^{1,2}、冉广*^{1,2,3}

1. 厦门大学能源学院

2. 福建省核能工程技术研究中心

3. 厦门大学材料学院

铝合金因优异辐照性能和低中子截面用作核反应堆关键结构材料, 但铝在中子辐照下嬗变产生的硅会影响微观结构与力学性能。为研究嬗变硅含量对铝镁合金辐照行为的影响, 本研究以传统工业用 5052 铝合金为对象, 加入不同 Si 含量(0~3 wt%) 进行改性, 在室温下开展了透射电镜原位离子辐照和离位离子辐照实验。结合纳米压痕及慢正电子湮没多普勒展宽谱(DBS)开展多尺度结构和性能表征, 研究了硅含量对铝镁合金辐照缺陷演化与硬化行为的影响。结果表明, 合金硬度随辐照剂量增加呈先升后稳趋势(约 5 dpa 后饱和), 且硅含量越高, 硬化程度越弱; 低剂量辐照(0.05 dpa)下, 自由空位浓度随硅含量增加而减小, 高剂量时进一步降至未辐照水平以下。分析显示, 这一现象源于溶质原子作为强正电子陷阱, 通过形成空位-溶质复合体(V-Si/V-Mg)束缚自由空位, 并通过高密度位错环等缺陷结构增强高动量电子湮灭概率, 导致多普勒展宽谱中 S 参数下降。原位 TEM 观察表明, 含硅样品中析出相附近位错环的萌生与生长动力学显著强于基体, 且硅含量越高, 位错环密度及尺寸增幅越大。这一现象归因于晶格失配诱导的应变场、点缺陷偏析行为与溶质硅钉扎效应的协同作用, 共同驱动析出相界面处位错环的密集形核与定向生长。本研究进一步建立了“析出强化+辐照强化”的耦合模型, 并与纳米压痕实验结果进行对照。发现高硅合金中析出相附近的优先形核效应抑制了辐照硬化行为, 并最终缓解了宏观硬化行为。本研究为理解溶质-析出物-辐照缺陷相互作用机制提供了实验依据, 并为开发高辐照耐受性的铝基结构材料提供理论支撑和材料设计思路。

C02-15

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、张志豪*

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。本文提出了一种改善 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。

C02-16

高强韧超细晶 7075 铝合金的制备和强韧化机理

赵永好*

Hohai University

Nanjing University of Science and Technology

铝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析出强化铝合金需要优化处理工艺。本研究工作运用液氮轧制和低温退火工艺制备了高强韧 7075 铝合金(屈服强度为 615MPa,延伸率为 11%),运用高压扭转技术制备了超高强度 7075 铝合金(屈服强度为 1000MPa,延伸率为 5%),利用原位升温等径角挤压技术制备了超细晶 7075 铝合金。研究表明高强 7075 铝合金源于晶界强化、析出强化、位错强化和固溶强化。

C02-17

基于纳米相调控的高强-耐应力腐蚀铝合金开发与制备

唐建伟*、陈良、李志刚、张存生、赵国群

山东大学

高强 Al-Zn-Mg-Cu 合金因其优异的比强度和轻量化特性,被广泛应用于航空航天、轨道交通等领域。然而,高应力腐蚀开裂(Stress Corrosion Cracking)敏感性严重限制了该类金属的更广泛工业应用。此外,铝合金的耐应力腐蚀开裂性能与强度往往呈现明显的倒置关系,这使得在追求高强度的同时提升耐应力腐蚀性能成为一项重大挑战。因此,开发一种兼具高强度与优异耐应力腐蚀性能的 Al-Zn-Mg-Cu 合金具有重要意义。本文通过成分和热处理工艺优化,成功调控了纳米析出相的分布和组成,引入了 $T-Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$ 相和 $Al_{31}Mn_5Cu_3$ 相。借助日本大型同步辐射设施 SPring-8 的高分辨率 X 射线三维成像技术,实时追踪了铝合金在应力腐蚀开裂过程中的裂纹萌生与扩展行为。研究发现,氢脆在 Al-Zn-Mg-Cu 合金的应力腐蚀过程中起主导作用,而阳极溶解的主要功能是促进氢的产生和富集,并引发局部应力集中。T 相和 $Al_{31}Mn_5Cu_3$ 相的协同作用显著提升了合金的综合性能,其抗拉强度达 752 MPa,延伸率为 11.3%,同时具备优异的耐应力腐蚀性能。此外,通过结合第一性原理计算和高分辨表征技术,本文定量解析了应力腐蚀裂纹尖端区域的氢分配行为。结果表明 $Al_{31}Mn_5Cu_3$ 相通过提高合金的耐腐蚀性能,显著抑制了氢的生成和渗入,进而控制了氢影响区的尺寸及其内部氢浓度。T 相作为一种强氢陷阱,能够有效调控氢的局部分布,降低氢在晶界、 η 相界面等易导致氢脆的微观结构处的富集。综上,本文提出了一种通过调控纳米级颗粒分布和组成来提高铝合金应力腐蚀开裂性能的新策略。通过控制氢的产生和分配行为,成功制备了兼具高强度和优异耐应力腐蚀性能的 Al-Zn-Mg-Cu 合金。这一策略不仅为铝合金的设计提供了新思路,还可推广至高强钢、锆合金等其他高强结构材料的开发中,具有突出的工业应用价值。

C02-18

Al-Cu-Ca 系耐热铸造铝合金热裂倾向及组织性能研究

崔世琪*

北京航空航天大学

铝合金在航空航天、汽车、船舶等领域都有着广泛的应用。其中,Al-Cu 系合金具有强度高、热稳定性好等优点,并且拥有优异的热处理强化效果。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、缩松等问题,严重限制了其应用。Ca 元素具有低成本、低密度等优点,在铝合金中 Ca 容易导致铝液粘度增加,导致室温脆性,因此在工业铝合金中一般要严格限制 Ca 的含量。研究发现,向铝基合金中添加 Ca 元素可以形成 $(Al)+Al_4Ca$ 共晶组织,Al-Ca 系合金可以获得优良的铸造性能和耐热性能,但由于 Ca 在铝中的固溶度很小,使得合金的强度不高。为了改善 Al-Cu 合金的铸造性能,本研究向不同 Cu 含量的 Al-Cu 合金中添加了一定量的 Ca 元素,并研究了 Ca 元素对合金热裂倾向的影响,研究结果表明,添加 Ca 元素后,合金的共晶相类型、凝固区间等发生变化,使添加 Ca 后的 Al-Cu 合金热裂倾向明显降低,合金的铸造性能得到改善,但由于 Ca 元素的添加形成高熔点的 AlCuCa 相,导致合金在后续热处理过程中时效析出强化效果减弱,使合金的力学性能降低,为了获得一种兼具良好铸造性能和力

学性能的合金，对 Al-Cu-Ca 合金进行合金化，最终获得一种热处理后室温抗拉强度为 429MPa，断后延伸率为 8% 的合金

C02-19

Al-Cu-Zn-Mg 合金多相协同/竞争析出行为调控及强塑性研究

谭盼*¹、王斌²

1. 西北有色金属研究院

2. 中南大学材料科学与工程学院

高强铝合金是优异的轻质结构材料，强塑性的协同提高一直是追求的目标。时效析出相是决定强塑性的关键，多元析出相的调控机制和强韧化效应仍有待研究。本文利用透射电子显微镜(TEM)、原子探针技术(APT)，从原子团簇的形成和演化进行 Al-Cu-Zn-Mg 合金的合金成分和时效温度调控析出相和强塑性的机理研究。少量 Zn 能促进 S-Al₂CuMg 相析出，使 S 相细化；Zn 和 Mg 含量增加有利于 Zn-Mg 团簇和 GP 区的形成，促进 η -MgZn₂ 相和 T-Mg₃₂(Al, Zn)₄₉ 相析出。Zn/Mg 比为 2.5 时，峰时效合金的析出相为板条状 S 相、针状 η 相和球状 T 相，多元析出相的共强化使合金的强塑性达到最佳。三种时效温度控制时效早期的原子团簇形成和演化调控强化相的析出行为。120°C 低温时效早期的部分大尺寸 Zn-Mg 团簇能作为 η 和 T 相的有效形核基底。150°C 时效使 Cu-Mg 团簇形成，时效早期产生 GP 区和 GPB 区。180°C 时效形成高 Cu/Mg 比的 Cu-Mg 团簇，小尺寸 Zn-Mg 团簇回溶，析出序列为：SSSS → GP 区+GPB 区 → η' +T'+S' → η +T+S。析出相的等效直径为 10~15 nm 时，第二相的强化效果更佳。本文为高强铝合金析出相的调控和强塑性协同提高提供参考。

C02-20

高镁含量 Al-Mg-Zn-Si 合金的淬火敏感性研究

庞嘉钧、熊柏青*、高冠军、温凯

北京有色金属研究总院

近年来，人们提出了一种新型的高镁含量 Al-Mg-Zn-Si 合金，该合金具有密度低、综合性能优异的特点。采用时间-温度-转变曲线(TTT)和时间-温度-性能曲线(TTP)研究了 Al-Mg-Zn-Si-Mn-Zr 合金的淬火敏感性。由于严重的晶格畸变导致电导率误差，我们发现 TTT 曲线难以准确评价该合金的淬火灵敏度。因此，根据 TTP 曲线，确定合金的高淬火敏感区为 227°C~397°C，鼻温约为 333°C，孕育期为 1.35 s。采用透射电镜(TEM)研究了断续淬火过程中的微观组织演变，发现 Mg 和 Zn 原子在淬火过程中以 T 相的形式从过饱和固溶体中析出并粗化。这导致在人工时效阶段纳米尺度 T 相的数量显著减少，并最终降低了时效硬化效果。此外，合金中的 Al-Mn 弥散相、富 Si 相、(亚)晶界和 Al₃Zr 相是淬火诱导析出的优先非均质形核部位，且在晶界和亚晶界上的 Al-Mn 弥散相是影响合金淬火敏感性的主要因素。除此之外，我们还对淬火析出相的成核速率和析出动力学进行了深入的分析。

C02-21

抗氢脆铝合金的纳米第二相颗粒设计策略

刘刚

西安交通大学

双碳战略下“氢能经济”是未来社会发展的重要推动力，其中氢的存储与运输对结构金属材料的服役性能提出了更高要求。铝合金具有轻质、高比强、低温性能优异等众多优点，是轻量化发展的首选金属材料，也是“氢能经济”的重要候选材料。但是铝合金与高强钢、钛合金等其他金属材料类似，表现出明显的“氢脆”敏感性，即在吸收氢原子后其变形能力下降、塑性降低，极易引起低应力脆断和无征兆失效。经过多年的深入研究，国际上已经提出了多个氢脆的机制模型，也发展了一些抑制氢脆的微观组织设计方法。特别得益于近年来迅速发展的三维原子探针技术在原子层级上的精准定量表征，研究者们逐渐意识到调控金属间化合物第二相颗粒将是提升铝合金抗氢脆能力的有效手段，但是目前还缺乏第二相颗粒特性与分布及其对铝合金抗氢脆能力影响的综合认知，因此第二相颗粒的调控策略尚不清晰完善。本报告将针对抗氢脆铝合

金的第二相颗粒设计进行讨论，并提出复杂金属相纳米颗粒的工程化调控思路，以期新型抗氢脆铝合金的发展提供一定参考。

C02-22

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

本研究采用高强度铝合金为研究对象，结合先进的 X 射线计算机断层扫描（CT）技术，构建了具备微米级分辨率的高性能原位成像系统。该系统集成亚微米级精密控制转台、非接触式热控模块以及全自动力学加载装置，成功实现了材料在高温（ $\geq 300^\circ\text{C}$ ）、超低温（ $\leq -100^\circ\text{C}$ ）、复杂应力状态、应力腐蚀及热压烧结等极端环境下的三维无损原位表征能力。通过对铝合金在不同服役环境下的原位扫描，系统揭示了材料内部孔隙、裂纹、第二相析出与组织重构等微观结构的演化过程。实验结果表明：在热-力耦合作用下，铝合金中的初生缺陷（如铸造孔隙或界面微裂纹）会在特定温度区间快速扩展，成为影响疲劳寿命和力学性能的关键因素。此外，原位观察到的动态微观损伤机制，为后续铝合金合金化设计与热处理工艺优化提供了直接依据。本研究所构建的高分辨率原位 X 射线 CT 成像平台，不仅突破了传统 CT 技术在极端环境应用中的限制，也为铝合金材料在多物理场耦合下的失效机制研究提供了关键手段。该技术的应用显著提升了铝合金服役可靠性评估的科学性与准确性，为新型高性能铝合金材料的设计、筛选和工程化应用提供了有力支持。

C02-23

重固溶再时效处理对 2196 铝锂合金力学性能、腐蚀抗力和电化学行为的影响研究

陈孝学、赵国群*

山东大学

通过拉伸试验、电导率测试、晶间腐蚀和电化学腐蚀试验以及 TEM 观察，研究了重固溶再时效处理对 2196 Al-Cu-Li 合金力学性能、微观组织、腐蚀抗力和电化学行为的影响。结果表明重固溶再时效处理能够在不损失 T6 态合金强度的前提下提高合金的腐蚀抗力。时效析出过程是可逆的，重固溶处理使预时效析出的沉淀相回溶到基体中，使合金的硬度和强度降低，但塑性提高，这有利于后续的矫形和再加工过程。再时效处理可有效调控 δ' 、T1 和 θ' 等析出相的数量与分布，使合金的强度近似达到 T6 态的水平，且延展性提高。重固溶再时效过程中，合金的腐蚀模式由点蚀向晶间腐蚀转变。晶界析出相的粗化和不连续分布以及 PFZ 宽度的增大能够抑制应力腐蚀开裂裂纹的产生和扩展，进而提高合金的抗腐蚀性能。晶界析出相中 Cu 含量的增多有利于减小晶界和基体之间的电化学反应，降低合金的腐蚀敏感性。最终确定的适合 2196 Al-Cu-Li 合金的重固溶再时效工艺参数为 $515^\circ\text{C}/90 \text{ min} + 170^\circ\text{C}/24 \text{ h}$ 。

C02-24

Microstructure evolution of $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ phase in Al-10Ce alloy based on laser directed energy deposition and its high temperature strengthening and toughening mechanism

Zhao Xin, Wenchao Yang*

Northwestern Polytechnical University

This study investigates the effect of the Laser Directed Energy Deposition (LDED) process on the microstructural evolution of the $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ phase in Al-10Ce alloy and the high-temperature strengthening-toughening mechanism, with a comparative analysis against the traditional casting process. The results show that the high cooling rate and strong temperature gradient of LDED process inhibit the formation of coarse primary $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ phase and promote the refinement of eutectic $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ phase. At the same time, columnar crystals are induced to grow along the construction direction, and the density of the alloy is significantly improved by optimizing the process (the porosity is only 0.37 %). Compared with as-cast alloy, the tensile strength of LDED samples at room temperature is increased from 143 MPa to 217 MPa (increased by 51.7 %), the elongation

is increased from 7.1 % to 12.9 % (increased by 81.7 %), and the mechanical properties at high temperature (200-300 °C) are also significantly optimized. Strengthening mechanism is mainly attributed to: (1) The refinement and uniform distribution of Al₁₁Ce₃ phase effectively hinder high-density dislocations; (2) Elimination of primary phase and passivation of phase interface reduce stress concentration; (3) Columnar crystals and large-angle grain boundaries cooperatively regulate dislocation motion. This study provides a theoretical basis for addressing the limitations of LDED in the preparation of large Al-Ce heat-resistant structural parts.

C02-25

交变磁场辅助双级时效用于铝锂合金析出相调控与塑性提升的新途径

周金鑫^{1,2,3}、玄伟东^{*1,2,3}、樊志明^{1,2,3}、张翔宇^{1,2,3}、吕圣炜^{1,2,3}、任忠鸣^{1,2,3}

1. 上海大学

2. 省部共建高品质特殊钢冶金与制备国家重点实验室

3. 上海大学材料科学与工程学院

本研究探究了铝锂合金在交变磁场双级时效处理下的组织与性能演变规律。采用单轴拉伸测试、扫描电镜 (SEM)、透射电镜 (TEM) 及电子背散射衍射 (EBSD) 技术, 分析了 60 mT 交变磁场在不同作用时长下的影响机制, 并深入探讨了磁场与铝锂合金的交互作用机理。结果表明: 铝锂合金在 100 °C 8 h+160 °C 24 h 的交变磁场双级时效处理条件下, 获得最优综合力学性能, 抗拉强度达 503 MPa, 屈服强度 437.5 MPa, 伸长率 10%, 维氏硬度 174 HV。与相同条件下的传统双级时效处理相比, 经交变磁场双级时效处理后合金的伸长率显著提升。交变磁场加速了原子扩散过程, 提高了析出相形核率并减小了析出相尺寸, 析出相平均尺寸从 常规双级时效处理的 88.44 nm 降至交变磁场双级时效处理的 36.69 nm。同时, 位错阻碍机制由单一绕过机制转变为绕过 (T1 相) 与切过 (θ' 相) 的双重机制。均匀分布的析出相降低了应力集中效应, 显著改善了合金塑性。相较于常规双级时效处理, 交变磁场的引入显著提升了合金塑性, 展现出更优异的综合性能。

C02-26

高耐磨纳米孪晶铝硅合金

牛婷婷、彭秋明*

燕山大学

磨损失效是工程材料中动力传动部件最常见的损伤形式, 占服役损失的大约四分之一。开发高耐磨铝合金在降低能耗和减轻重量方面起着关键作用, 进而有助于实现“双碳”目标。本文报道了一种新策略, 通过结合超高压固溶处理与电脉冲辅助时效 (HPEP), 在室温下实现了具有优异耐磨性能 (摩擦系数为 0.31) 的 Al-10 wt%Si 合金。该合金中形成了多组平行的 {111} 孪晶和具有层级结构的 {111}-{111} 双重孪晶, 其性能超越目前所有已报道的铝合金, 甚至钛合金和高熵合金。通过透射电子显微镜 (TEM) 观察、分子动力学模拟 (MD) 和第一性原理计算 (DFT), 阐明了纳米孪晶 Si 的微观结构、形成过程及耐磨机制。研究表明, 纳米孪晶 Si 结构主要是通过孪晶-孪晶碰撞或相界/基体界面对孪晶运动的抑制而引入的, 这些机制相比于共晶 Si 的完整晶体更能有效抑制原子分离, 从而实现均匀的磨损损失和更长的服役寿命。这些新发现为设计兼具高机械性能和优异耐磨性能的材料提供了新的思路。

C02-27

铝锂合金多服役性能的微观组织结构模式协同调控

刘丹阳、李劲凤*

中南大学

高性能铝合金具有卓越的多项使用服役综合性能, 可以满足当前综合工程应用场景。其关于热点的研究进展倍受航空、航天、航海、轨道交通等诸多高技术附加领域的高度关注。铝锂合金作为高性能合金的典型代表, 以其优越的综合性能著称, 备受当前各方研究关注。铝锂合金主要特点在于其时效析出相种类多样, 主要析出相有 δ' 、 θ' 、T1 和 S', 并有 T2、TB、 δ 、 Ω 等其他少量相。其析出相状态复杂多变, 易受

温度和应力等外场条件因素影响。其晶粒组织形态特征同样易受外界条件影响，形态特征复杂，与常规高性能铝合金不同。多种特征的析出相组合与晶粒组织特征与材料（微）合金化成分条件下的合金多性能表现高度关联，深刻影响着合金的实际使用服役性能。

该报告基于本铝锂合金研究课题组多年总结的铝锂合金多性能与微观组织结构调控的研究基础，提及构建铝锂合金成分设计与微观组织模式结构调控下的多性能组合关联的有效研究实践。并通过不同热处理制度与加工工艺条件，调控高性能铝锂合金的晶粒组织结构特征，揭示（微）合金化元素成分设计下，提升析出相与晶粒组织特征目标合金性能的协同强韧化机理。为铝锂合金的工业化应用提供有效的工艺技术参数依据。同时，基于大量工程应用性能测试的数据库资料归纳总结能够为今后个性化多性能需求铝锂合金成分设计与制备加工工艺制度设定工作提供有效指导。

C02-28

两步时效 7xxx 系铝合金氢脆新机理

王亚飞*

中国科学院力学研究所

Al-Zn-Mg-Cu (7xxx 系) 合金是目前强度最高的商用铝合金，但其氢脆问题严重。数十年来，7xxx 系铝合金的氢脆抗力提升有限，而同时实现氢脆抗力与强度的协同优化更是极具挑战。纳米级 η -MgZn₂ 析出相是铝合金强化的关键，但最新研究发现它也是氢脆的主要来源。传统两步过时效工艺被用于缓解这一问题，其作用机制通常归因于 η 相的演变。然而，近期研究表明，T 相析出物具有优异的氢捕获能力，这意味着其在实用合金中的作用长期被低估。本研究通过定量分析高锌 7xxx 系铝合金在单步和两步过时效处理中的 T 相析出行为，旨在揭示工业时效过程中 T 相对氢脆的独立影响。结果表明，在相同强度水平下，两步时效合金的抗氢脆性能显著优于单步时效合金，仅用 η 相粗化理论无法完全解释这一差异。高分辨透射电镜分析证实，这种性能提升源于氢捕获 T 相析出物比例的显著增加。该发现为优化工业时效工艺、开发新一代高强抗氢脆铝合金提供了新方向。

C02-29

基于热变形工艺调控的 Al-Mg-Si 合金力学性能和腐蚀性能研究

冯鑫明、张志豪*

北京科技大学

时效硬化 Al-Mg-Si 合金 (6000 系铝合金) 因其较高的比强度、良好的耐蚀性、焊接性及加工成型性等特点，广泛应用于建筑、汽车和航空航天等领域。通常，合金铸锭经过均匀化处理、热塑性成形过程（如挤压、轧制、冲压或锻造）和固溶时效处理后，可获得理想的组织和性能以满足工件的服役需求。因此，明确 Al-Mg-Si 合金热变形动态再结晶组织特征及其对后续固溶过程中的静态再结晶机制、时效力学性能和耐腐蚀性能的影响规律，对于合理选择铝合金的变形条件具有重要意义。

本工作研究了 Al-Mg-Si 合金的在变形温度 400-550 °C，应变速率 0.01-10s⁻¹，真应变 0.2-0.8 条件下变形组织、固溶时效组织及性能的演变规律。研究发现，低变形温度和高应变速率条件会导致固溶时较大程度静态再结晶而降低组织的均匀性。而变形温度较高且应变速率较低时（例如 500 °C、0.01s⁻¹），不连续动态再结晶和连续动态再结晶机制同时湮灭重排位错，形成由大量亚晶组成的热变形组织，并且该条件下热变形组织中较低的位错密度，抑制了后续固溶处理时的静态再结晶，同时提升合金的力学性能和耐蚀性能。

C02-30

Mg 含量影响核用铝合金的辐照缺陷演化与硬化行为的研究

王左江^{1,2,3}、刘正煜^{1,2}、朱士坤^{1,2}、夏海鸿³、付婧⁴、刘学锋³、冉广^{1,2,*}

1 厦门大学能源学院，厦门，361102；

2 福建省核能工程技术研究中心，厦门，361102；

3 国核铀业发展有限责任公司，北京，100088；

4 国电投核素同创（重庆）科技有限公司，重庆，401329；

Al-Mg 合金得益于其优异的耐腐蚀性和力学性能，被广泛应用于先进研究堆的容器与结构材料。作为固溶强化型合金，固溶的 Mg 含量决定了合金的强度。但在辐照环境中，载能粒子会导致合金内产生辐照缺陷，如位错环等。位错环会随着辐照剂量增加进行合并，随后形成位错网络，这对合金的力学性能产生显著影响。然而，迄今为止，关于 Mg 含量对辐照缺陷演化及合金硬化行为的影响仍未有清晰的研究结果。本研究以四种不同 Mg 含量（2.2 wt%、2.4 wt%、2.6 wt% 和 3.5 wt%）的 Al-Mg 合金为研究对象，进行了原位硅离子辐照以跟踪辐照缺陷演化，以及离位硅离子辐照后的纳米压痕和微结构分析等。基于辐照微结构分析与硬度测试的结果，建立了固溶 Mg 含量与铝合金辐照缺陷增长及辐照硬化之间的内在函数关系。纳米压痕结果表明，辐照 10.0 dpa 即位错趋于饱和后，Mg 含量越高，硬度增加的百分比越高，并在 Al-2.2%Mg 与 Al-2.4%Mg 之间出现明显急剧增大，这主要归因于固溶 Mg 原子对辐照位错环形核及相互作用的阻碍作用。原位辐照实验结果表明，固溶 Mg 含量越高，相同辐照剂量下缺陷的“环化”特征越不明显，这显著延迟了环-环、环-线以及环-网络等的三种缺陷作用行为。因此，Mg 含量增加影响了高辐照剂量下位错网络的成型，并导致 Al-Mg 合金的辐照硬化行为由低剂量-高剂量区间表现为的高密度位错环主导-位错网络主导的改变为依赖于 Mg 含量。本研究结果对铝合金在辐照条件下的性能评估提供了实验数据与理论参考。

C02-31

提升铝锂合金的比模量：一种基于机器学习的微合金化元素识别方法

吕憬^{1,2,3,4}、李亚楠^{*1,2,3}、李锡武^{1,2,3}、郑磊⁴

1. 有色金属结构材料全国重点实验室
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
4. 北京科技大学材料科学与工程学院

为了提升航空航天结构材料的比模量，本研究采用机器学习方法优化铝锂合金的微合金化成分。通过分析 151 组合合金成分与弹性模量的数据样本，应用特征生成与选择技术，筛选出八个与比模量高度相关的特征。通过对梯度提升回归（GBR）模型的超参数优化及后续预测，识别出锰（Mn）是一种有益的微合金化元素，实验验证表明，含 Mn 的铝锂合金具有更高的比模量，进一步的显微组织表征与密度泛函理论（DFT）计算表明，Mn 元素通过形成弥散相并增强固溶强化效应，显著提升了合金的弹性模量。本研究展示了机器学习在合金成分设计中的有效性。

C02-32

超高强铝锂合金的微结构调控与强化机制

刘福源、郭恩宇*、陈宗宁、康慧君、张至柔、王同敏
大连理工大学

本研究通过调控铝锂合金的 Cu/Li 比，结合多级热处理与塑性变形工艺，阐明了成分优化与加工路径对析出相演变及强化机制的协同作用。研究表明，优化 Cu/Li 比可显著改变均匀化后残留相的形态与分布，双级均匀化处理有效促进非平衡相溶解，为后续析出相调控奠定基础。自然时效行为的研究结果表明，GP-Li 区与 δ' 相的早期析出为 T₁ 相提供形核位点，而挤压变形与固溶时效工艺进一步激发高密度纳米强化相（以 T₁ 相为主）的析出动力学。本研究通过成分-工艺协同优化，实现了析出相类型、尺寸与分布的精准调控，实现了铝锂合金强度-塑性的协同提升，最终获得屈服强度、抗拉强度和延伸率为 694 MPa、740 MPa 和 6.5% 的超高强铝锂合金，为航空航天等领域用轻量化材料的设计提供了新策略。

C02-33

镨对 Al-Mg 合金组织性能的影响

蒋显全*
西南大学

研究了不同 Lu 含量对 Al-Mg 合金微观组织、力学性能和耐腐蚀性能的影响。结果表明，微量 Lu(0.1%)

可有效提高 Al-Mg 合金的拉伸力学性能和而腐蚀性能。随着 Lu 含量升高拉伸力学性能和而腐蚀性能先逐渐增加而后有所降低, 含量为 0.3wt.% 时性能达到最优。铸态性能变化: 与未添加 Lu 相比, 抗拉强度由 169MPa 提升至 188MPa, 提高幅度 11.4%; 伸长率由 13.3% 提升至 23.3%, 提高到 1.8 倍; 而腐蚀电位 -1.053V 提高到 -0.967V 结果, 腐蚀电流密度由 $5.35 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ 降低到 $3.75 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$, 说明耐腐蚀性能大幅提高。Lu 提高铝合金综合力学性能和耐腐蚀性能的主要原因是一部分 Lu 固溶于基体, 另一部分 Lu 与基体形成等轴状 Al₃Lu 化合物。

C02-34

热压温度对快速凝固高锌 Al-Zn 合金微观组织和力学性能的影响

孟显娜*

仲恺农业工程学院

本文采用单辊熔体旋转法、冷等静压 (CIP)、热压及热挤压工艺制备了细晶 Al-27Zn-1.5Mg-1.2Cu-0.08Zr 合金。研究表明: 热压处理可显著提升冷等静压坯料的致密化程度, 同时促进第二相颗粒的析出, 从而为后续热挤压工序提供理想坯料。对比分析显示, 经 200 °C 热压预处理的挤压态合金较好地保留了快速凝固形成的细晶组织特征, 其 η' 相析出物密度更高、晶粒尺寸更细小, 因而表现出最优的力学强度; 而经 150 °C 和 250 °C 热压处理的合金中, 后者因存在微裂纹、晶粒粗化、严重 Zn 偏析及粗大第二相等多重缺陷的协同作用, 导致其强度与延展性均显著降低。断口形貌分析表明, 随着热压温度升高, 合金断裂模式呈现规律性演变: 从 150 °C 热压下的韧窝断裂为主逐步转变为 250 °C 热压时的准解理断裂。本研究明确了高锌铝合金中热压温度-显微组织-力学性能之间的内在关联规律。

C02-35

增材制造高强耐热 Al-Ce 合金组织与性能研究

冯婷、高海燕*、彭朋

上海交通大学

电磁轨道炮是利用一种电磁力加速弹丸的新概念动能武器, 对比传统武器炮口射程远、威力大、精度高。电枢材料作为电磁轨道炮的核心部件之一, 其对枢轨接触状态影响最直接, 电枢的性能直接影响整个发射系统的稳定性和发射性能指标。选择高强、高导电率、耐烧蚀、耐磨损材料对电枢减磨抑弧, 抑制载流摩擦条件下失效有重要作用。目前主流电枢材料为 7000 系和 6000 系铝合金, 其仍存在耐热高强高导不能协调以及不耐磨等问题, 无法满足电枢的极端服役条件对材料的苛刻需求。如何在保持轻质高导的基础上, 同时提升铝基材料的强韧性、耐热性、耐磨性甚至耐蚀性, 是新型铝合金电枢材料研制亟需攻克的关键难题。本研究通过粉末床熔融技术制备高强耐热 Al-Ce 基合金, 实现原位纳米双连续结构的构筑。与铸态 Al-Ce 合金相比, 粉末床熔融成型 Al-Ce 合金强塑性显著提高。进一步通过 Si 元素合金化, 粉末床熔融成型 Al-Ce-Si 合金室温抗拉强度达到 500MPa, 400 °C 下抗拉强度达到 180MPa, 400 °C/200h 热暴露后室温抗拉强度达到 300MPa, 兼具高强度和高耐热。同时, 粉末床熔融成型高强耐热 Al-Ce 合金展现出优异的耐蚀和耐磨性能。

C02-36

增材搅拌摩擦沉积对 Al-Cu-Mg-Ag 合金组织和性能的影响

虞章龙*

江西理工大学

增材搅拌摩擦沉积 (AFSD) 技术因其能够在不熔化和凝固的情况下创建形状自由和完全致密的结构而具有吸引力。因此, AFSD 是基于熔融的增材制造技术的替代方案。然而, 机械性能和微观结构之间的定量关系尚未建立。本研究的目的是讨论不同初始状态对沉积态 Al-Cu-Mg-Ag 铝合金的微观组织和力学性能的影响。在本研究中, 采用 AFSD 技术加工 Al-Cu-Mg-Ag 铝合金原料, 使用电子背散射衍射 (EBSD)、X 射线衍射 (XRD) 和透射电子显微镜 (TEM) 分析微观结构。对沉积态样品进行了室温拉伸测试, 讨论了强化机制, 量化了增材搅拌摩擦沉积的 Al-Cu-Mg-Ag 合金的微观组织与力学性能之间的关系。

C02-37

激光增材制造高强耐热铝合金材料设计及成形验证

王悦婷*

中南大学

铝合金激光增材制造较好地契合了航天领域对材质轻量化、结构镂空轻量化的迫切需求，有望成为下一代运载火箭、卫星等核心零部件成形的关键技术。高速飞行器急需“优异高温强度-复杂形状铝合金舱段”增材制造材料和成形技术（形状越复杂、飞行器性能越高），要求成形出满足 200-400°C 温度使用的，含内流道复杂舱段。针对现有增材制造商用铝合金性能不足难题，充分发挥激光粉床熔化增材制造在结构成形方面“异性复杂轻量化结构”成形以及组织成形方面“极端非平衡凝固”下过饱和固溶铝合金组织制备优势。选用低扩散系数元素，引入可钉扎 Cottrell 气团的元素，一方面实现多尺度强化、另一方面阻碍高温下的刃位错攀移，制备了 300°C 下抗拉强度 ≥ 300 MPa 的耐热铝合金，并进行零件成形验证。

C02-38

6xxx 铝合金中弥散/析出相的协同设计与强韧化

高一涵

中北大学

6xxx 系铝合金型材是新能源汽车结构轻量化的关键用材，其力学性能直接关乎结构安全。报告人及团队以 6082 挤压铝合金（Al-Mg-Si-Mn-Fe 基）为模型材料，开展了一系列以弥散相/析出相设计为核心的研究工作：首先，合金中 α -Al(Fe,Mn)Si 弥散相+ β ”析出相的析出行为存在明显交互作用。这主要归因于二者共享且竞争着 Si 溶质，并受到固溶温度的调控。在此基础上，报告人及团队通过固溶后空冷+免均匀化处理，在 6082 合金中构建了非均质化的 α -Al(Fe,Mn)Si 弥散相+ β ”析出相，并证实其非均质性存在明显的“同步性”——即“要么同步非均质化，要么同步均质化”，据此构建了大量由无弥散相带（DFZs）与弥散相带（DZs）交叠的“软区-硬区”，同步改善了合金的强度与延性。然而，更细致的研究发现，6082 合金中这种双强化相非均质化的同步性却会被固溶后水淬所解除，导致水淬合金不能延续上述的异质结构的构建策略，力学性能不再获得改善。

C02-39

稀土元素 Sc 和 Er 对 Al-Cu-Li 合金纳米析出动力学和力学性能的影响

杨兴海、薛程鹏、李星星、王俊升*

北京理工大学

Al-Cu-Li 合金因高强高刚性在航空航天领域备受关注，但其延展性及高温性能不足，限制了其广泛应用。本研究通过添加稀土 Sc 和 Er 元素，调控 Al-Cu-Li 合金纳米析出相的结构演化动力学，突破了高温力学性能极限。Sc 通过形成团簇抑制空位释放，延缓析出序列，促进“ $\delta'+\theta'$ ”复合析出相形成，同时提高了合金强韧性，抗拉强度达 482 MPa、延伸率达 6.0%。Er 诱导 Cu、Zn 和 Mg 富集区，促进 T1 相形核，消除 δ' 相，使合金强度从 373 MPa 提升至 457 MPa，延伸率从 2.8% 增加至 4.9%。进一步结合过渡元素，设计了耐热 Al-Cu-Li 合金，利用 Sc 微合金化稳定纳米 θ' 析出相，促进了亚微米级强化相的形成。合金在 300°C 服役 100 h 后仍保持 300 MPa 的抗拉强度，表明稀土元素通过调控纳米析出相结构，可实现 Al-Cu-Li 合金耐热性能提升。

C02-40

增材制造用颗粒增强 AlSi10Mg 合金组织与性能研究

董德^{1,2}、李恩发^{1,2}、郑洪亮^{*1,2}、杨小凡^{1,2}

1. 山东大学

2. 材料液固结构演变与加工教育部重点实验室

SLM（Selective Laser Melting，激光选区熔化）作为一种金属增材制造技术，在高强韧铝合金成形领域展现出显著优势，同时与颗粒增强铝基复合材料具有良好的相容性。本文选用纳米 TiN 颗粒和微米

Al₅Ti₃B 颗粒作为增强相颗粒,研究了合金 SLM 成型过程中基板预热条件对材料的微观组织和力学性能的影响;探究了适合于 SLM 成形 AlSi10Mg 材料的后续热处理工艺;探究了两种增强相颗粒对 SLM 成型 AlSi10Mg 颗粒增强复合材料微观组织和力学性能的影响及作用机理。当加入质量分数 1.0%的 Al₅Ti₃B 时,复合材料的屈服强度达到了 346.7 MPa,抗拉强度为 459.7MPa,延伸率为 5.02%,材料硬度为 121.8HV_{0.1}。加入质量分数为 0.5%的 TiN 颗粒时,材料屈服强度为 249.5MPa,抗拉强度为 496.9 MPa,延伸率为 9.62%,维氏硬度为 127HV_{0.1};经过 160°C时效 6h 后,材料的屈服强度可以达到 365.2MPa,抗拉强度为 514.1MPa,材料硬度为 140.1HV_{0.1}。TiB₂ 颗粒作为异质形核质点可以细化晶粒,其存在阻碍了晶粒沿热流方向生长,促进组织晶粒趋于等轴,改善材料性能的各向异性。纳米 TiN 颗粒的存在消除了 AlSi10Mg 材料显微组织沿(001)方向的择优取向,加速了异相形核、促进了再结晶进程,阻碍了晶粒长大。同时起到钉扎晶界的作用。两种颗粒增强的 AlSi10Mg 材料屈服强度、抗拉强度与硬度均得到了显著提升。

C02-41

Al-Mg-Zn 基交叉铝合金中的动态应变时效及其对塑性变形行为的影响

张修臻¹、李跃²、杨超³、周登山^{*1}、张德良¹、秦高梧¹

1. 东北大学
2. 马克斯·普朗克研究所
3. 上海交通大学

合金的动态应变时效 (dynamic strain aging, DSA) 指的是形变进程下溶质原子扩散到可动位错段及林位错芯部附近,并与之发生动态交互作用的现象。DSA 现象的发生与持续累积通常会诱发局部塑性变形失稳,导致 Portevin-Le Châtelier (PLC) 效应 (即锯齿流变) 的出现,进而显著地影响合金的塑性变形行为与综合力学性能。尽管 DSA 现象在多种合金中已被广泛报道,然而当前学术界对其如何影响应变速率敏感因子及微结构演变方面仍缺乏理解。本研究以高 Mg 含量 (>6wt.%) Al-Mg-Zn 基交叉铝合金固溶体为模型材料,融合跨尺度显微解析、力学评价与模型构建,对上述关键问题进行了深入系统研究。结果表明,Al-Mg-Zn 基交叉铝合金的流变行为和锯齿类型与拉伸应变速率间存在强依存性。当应变量较小时,各应变速率下合金的流变行为差异不大;然而,随着应变量增大,相应的流变应力出现分岔,最终合金的加工硬化率、拉伸强度与断裂延伸率表现出应变速率效应,即随应变速率的减小而同步提升。此外,当应变速率由 0.1 s⁻¹ 降低至 0.00005 s⁻¹ 时,流变曲线锯齿类型由 A 型依次转变为 A+B 型和 C 型。三维原子探针层析 (3D-APT) 分析与透射电子显微 (TEM) 成像结果进一步表明,低应变速率下 (≤0.0001 s⁻¹), DSA 诱导富 Mg-Zn 沉淀物动态析出,随后,这些动态析出物因受到滑移位错的不断切割而发生局部溶解。在溶质动态时效与动态析出的协同作用下,合金的总应变速率敏感因子呈现出应变速率相关性。最后,基于经典的 Kocks-Mecking 模型,构建了一种兼顾时效强化可动位错和林位错的新模型,该新模型精准地预测了不同应变速率下的应力-应变曲线。

C02-42

不同应变速率下峰时效态 Al-Mg-Zn-Si 合金的裂纹萌生及扩展机制研究

白楚周^{1,2,3,4}、温凯^{*1,2,3}、李志辉^{1,3}、王向杰⁴

1. 中国有研科技集团有限公司有色金属结构材料全国重点实验室
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
4. 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室

针对高 Mg 含量新型 Al-Mg-Zn-Si 合金的断裂行为,本研究通过单轴拉伸实验系统探究了峰时效态合金在不同应变速率 (10⁻⁶、10⁻²、10³ s⁻¹) 下的裂纹萌生与扩展机制。结果表明:应变速率对合金的屈服强度与抗拉强度影响不显著,但在 10⁻² s⁻¹ 时延伸率最低。结果表明:应变速率对屈服强度与抗拉强度影响较小,但在 10⁻² s⁻¹ 时延伸率出现显著低谷。结合多尺度表征 (SEM/EBSD 断口分析及 XRD/TEM) 发现:裂纹始终萌生于基体第二相 (以 Mg₂Si 为主);其扩展行为呈现显著速率依赖性——低应变速率 (10⁻⁶ s⁻¹) 下晶内位错充分滑移促使裂纹沿晶界扩展;中应变速率 (10⁻² s⁻¹) 时析出相钉扎位错导致裂纹穿晶扩展并

形成韧窝断口；高应变速率 (10^3 s^{-1}) 下位错密度降低与塑性变形局域化，促使裂纹以穿晶主导模式扩展，断口特征由韧窝向小尺寸韧窝与解理平面共存转变。

墙报

C02-P01

颗粒增强耐磨 Al-Si 合金热处理工艺优化

韩杨、相志磊、陈子勇*

北京工业大学

采用搅拌铸造工艺制备 TiB₂ 增强 Al-Si-Cu-Ni-Mg 合金，对样品进行固溶和时效处理，旨在通过热处理工艺优化获得高强高耐磨的铝基复合材料。结果表明，复合材料的最佳双级固溶制度为 515 °C/6h+535 °C/2h。此时组织中 θ 相和 Q 相已基本回溶基体合金，高熔点相也最大程度回溶，同时共晶 Si 长径比达到最小。材料的峰时效工艺为 175 °C/6h，此时合金的硬度为 91.2 HRB，为所有时效工艺下的硬度最高值。相较于单级固溶+时效处理后合金，最优双级固溶+时效处理后合金的性能得到全面的提升，抗拉强度、屈服强度以及延伸率分别提高了 12.2%、10.4%、70.3%，磨损失重减少了 48.4%。

C02-P02

Al-Zn-Mg 系铸造铝合金的制备与性能研究

许武威、张涛*

北京航空航天大学

铝合金作为工业领域应用最广泛的有色金属结构材料，具有密度低、比强度高显著优势。其中 Al-Zn-Mg 系铝合金凭借其高强度、优异导电性、良好耐蚀性和热导率，以及突出的成型加工特性，已广泛应用于航空航天、汽车制造、电子器件、船舶工业及军事装备等领域。然而，传统铝合金生产需经历铸造、锻造、轧制、挤压及多级热处理等复杂工序，显著增加了应用成本。因此，在维持材料性能的前提下简化制备流程，已成为当前行业发展的关键课题。

本研究通过工艺优化与多组分配方设计，系统制备了 32 种不同成分的铸态合金并表征其性能。实验表明：锌含量增加会引致合金抗压强度先增后降（峰值 1225MPa），屈服强度持续提升至 585MPa，延伸率下降至 20.4%，硬度递增至 223Hv；镁含量变化则导致抗压强度呈双峰特征，当 Zn/Mg=1 时屈服强度出现骤降，延伸率持续递减而硬度稳定增长。值得注意的是，冷却速率的提升可显著改善合金综合力学性能。通过系统优化，最终获得综合性能优异的合金体系，其强度-塑性协同效应为行业技术升级提供了重要参考。

C02-P03

Sr 对 Al-12Si-4Cu-2Ni-Mg 合金的变质机理及拉伸性能

杨子安、陈子勇*

北京工业大学

本工作研究了 Sr 对 Si 相的变质机理，分析了 Sr 元素对 Al-12Si-4Cu-2Ni-Mg 合金组织和力学性能的影响。采用扫描电镜、电子能谱和透射电镜对合金的显微组织和孪晶进行了表征和分析。结果表明，孪晶平面重入边(TPRE)机制和杂质诱导孪晶(IIT)机制不能完全解释 Al-12Si-4Cu-2Ni-Mg 合金中 Si 相的变质机理。除了在孪晶和其周围形成的富 Sr 纳米析出物外，Al-12Si-4Cu-2Ni-Mg 合金中也形成数量较多的富 Al 纳米析出物和少量 AlCu 纳米析出物。这三种纳米析出物和 Sr 原子共同导致了 Si 相的尺寸和形貌发生变化。随着 Si 相变质程度的提高，合金在室温下的极限抗拉强度 (UTS) 和延伸率 (El) 均有所提高。过量的 Sr 导致了粗大 Al₂Si₂Sr 的形成，不利于合金的变质程度和室温力学性能的提高；Sr 对 T6 态 Al-12Si-4Cu-2Ni-Mg 合金中的富 Ni 金属间化合物的形态、种类和数量并未产生影响，T6 态合金在高温下

的 UTS 和 EI 与合金中 Si 相的变质程度密切相关, 加入 0.01wt. %Sr 后的合金中条状 Si 相和富 Ni 金属间化合物构成良好的三维搭接结构, 使得合金在高温下的 UTS 和 EI 达到峰值。Si 相完全变质后的合金中的三维搭接结构被破坏, 合金高温力学性能下降。

C02-P04

高强度 Al-Zn-Mg 系铝合金组织结构与性能研究

许武威、张涛*

北京航空航天大学

近年来, 高 Zn 含量超高强 Al-Zn-Mg 合金及其强韧化机制成为研究热点, 国内外开展了广泛研究, 推动了合金的发展及其在多个领域的应用。我们针对 Al-Zn-Mg 合金成分设计及强韧化机制和 Zn、Mg 含量的对于 Al-Zn-Mg 合金强韧化性能的影响开展研究。通过对比分析各种制备和强化方法对合金微观组织及性能的影响, 高 Zn 含量超高强 Al-Zn-Mg 合金的强韧化机制及方法, 旨在为高强度 Al-Zn-Mg 合金的成分设计和制备提供指导, 以进一步提升其综合性能。

本研究通过成分设计与工艺优化, 系统制备了多种不同成分的铸态合金并表征其性能。结果表明: 合金中 Zn 与 Mg 元素的含量变化对其力学性能具有显著调控作用。随着锌含量增加, 断裂强度升高到一定之后下降, 屈服强度上升, 而延伸率随之降低, 材料硬度呈稳定增长趋势; Mg 含量增加时, 屈服强度在 Zn/Mg=1 时出现突降后恢复上升, 延伸率持续降低且硬度稳定提升。冷却速率的提升可显著改善合金综合力学性能。通过合金成分及工艺系统优化, Al-Zn-Mg 合金的屈服强度、断裂强度、硬度和延伸率分别为 585MPa、1225MPa、223Hv 和 20.4%, 表现出较好的综合力学性能。

C02-P05

Si 含量对 Al-Cu-Mg 合金时效硬化行为及析出相演变的影响

胡敏、李冲*

天津大学

为研究 Si 含量对 Al-Cu-Mg 合金时效硬化行为及析出相演变的影响, 本研究采用透射电子显微镜及高分辨透射电子显微镜技术, 系统表征了 Al-4.9Cu-1.6Mg-xSi (x=0, 0.1, 0.3wt.%) 合金时效过程中的析出相特征, 并基于改进的 Avrami-Johnson-Mehl 方程解析了其析出动力学。研究结果表明, 提高 Si 含量可显著增强 Al-4.9Cu-1.6Mg-xSi 合金的时效硬化响应。这是由于 Si 元素的添加促进了 Guinier-Preston-Bagaryatsky (GPB) 区及 S (Al₂CuMg) 相的析出。而且, 随着 Si 含量的增加, S 相的析出激活能降低, 从而加速了合金的时效析出动力学。此外, 当 Si 含量达到 0.3wt.% 时, 会诱导富铜的 σ (Al₃Cu₆Mg₂) 相析出。 σ 相的析出导致 Al-4.9Cu-1.6Mg-0.3Si 合金在时效 16 h 时出现硬度回升现象。

C02-P06

Revisiting the atomic structure of T1 phase in Al-Cu-Li alloys with HAADF-STEM and APT

Xiaoya Wang², Jiantang Jiang*¹

1. School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

2. Research Institute of Physical Sciences in Special Environments, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China

The T1 phase (Al₂CuLi) serves as the primary strengthening phase in Al-Cu-Li alloys. However, its precise atomic structure remains controversial due to the challenges associated with characterizing the extremely light Li element. In this study, we investigate the T1 phase using spherical aberration-corrected electron microscopy (HAADF-STEM) and atom probe tomography (APT). Our results confirm the compositional configuration of the T1 phase, revealing that its interfaces consist of mixed Al-Li layers with a Li content of approximately 17 at.%.

The inner layer exhibits a more complex Li-Al arrangement, containing roughly 25 at.% Li. Based on atomic-scale observations, we further refine the atomic model of the T1 phase. This work demonstrates the potential of combining APT and HAADF-STEM techniques for uncovering the structure of complex microstructures, particularly those involving light elements.

C02-P07

直接能量沉积法制备 Cu-Ni 改性 AlSi10Mg 合金的高屈服强度和断裂性能

吴刘坤*

天津大学

屈服强度作为衡量材料强度的一个重要指标，它是材料的实际使用极限。而断裂行为的研究对于分析样品失效特点至关重要。本文研究了直接能量沉积的 Cu-Ni 改性 AlSi10Mg 的微观组织、力学性能和断裂机制。Cu 和 Ni 的引入成功在合金中形成了高温稳定性更好的富 CuNi 相。通过固溶时效调控的富 CuNi 相发生了明显的球化，与 Al 基体形成了更加平滑的结合界面，有效消除了在相界面处应力集中导致断裂的可能性。在富 CuNi 相和共晶 Si 相的协同作用下，合金表现出了更强的高温耐受性。此外，时效处理也导致 Al 基体中析出大量的纳米级 Al₂Cu 强化相，显著提升了合金的力学性能。峰值时效下获得了具有最优析出相尺寸和分布状态的合金。该状态下，热处理后，改性合金在室温和 300°C 下的屈服强度分别达到了 307 MPa 和 200 MPa（相对于 AlSi10Mg 分别提升了 320% 和 344%）。

仅发表论文

C02-PO01

机器学习在铝合金领域的应用：综述

刘子杰、邓亚琪、李险峰*

上海交通大学

随着人工智能与大数据在材料科学中的广泛应用，机器学习已经成为合金领域研究与发展的重要工具。本文系统回顾了机器学习在材料科学，尤其是铝合金研究中的发展与应用。首先，本文重点探讨了数据收集与预处理的方法，详细归纳了典型与新兴的机器学习算法。随后综述了机器学习在铝合金领域的典型应用与研究进展，主要涵盖了成分设计与性能优化、工艺参数优化、微观结构分析、性能寿命预测等。最后，总结了当前面临的主要挑战（如数据匮乏、模型可解释性弱、跨尺度建模难等），并展望了未来发展方向（包括材料基因工程、物理知识引导的模型构建、小样本学习与自动化合金设计等），旨在为铝合金领域的现代化研究提供理论基础与技术参考。

C02-PO02

Microstructure and strengthening mechanism of high-strength and low-density Al-Cu-Li alloy

Yuxing Tian^{*1}, Hailong Cao¹, Haitao Lin², Linzhi Tang², Yunqiang Fan³

1. Chinalco Materials Application Research Institute Co.

2. Southwest Aluminium (Group) CO., LTD.

3. Chinalco Advanced Manufacturing Co., Ltd

Aluminum alloys with high strength and low density characteristics have become an important trend for future aerospace equipment. For a novel Al-3.0Cu-2.0Li-0.4Mg-0.5Ag-0.1Zr alloy, its microstructural characteristics and the influence mechanism of the main precipitated phases T1 (Al₂CuLi) and δ'(Al₃Li) on strength were systematically studied. The results show that the alloy can obtain a highly saturated solid solution and a lower recrystallization fraction after solid solution treatment at 530 °C~540 °C/30min. Aging at

a lower temperature of 150°C can achieve better plasticity, while aging at a higher temperature of 170°C can achieve higher strength; The pre-stretching amount significantly affects the strength and plasticity matching, and it is proposed that the "saturated" pre-stretching amount should be between 3.5% and 4.0%. A pre-stretching amount of 2.5-3.5% is beneficial for strength plasticity matching. During the aging process, the diameter and number density of the δ' phase remain relatively stable, while T1 changes significantly with pre-stretching amount and aging time. Based on the dislocation shear T1 model, the strengthening of the alloy is mainly due to the combined effect of T1 phase diameter D and number density N_a (T1).

C02-PO03

Construction of In-Situ Reaction Oxide Film Layer on Aluminum Alloy and Their Corrosion Resistance Properties

Zongxi Liu^{*1,2}, Benhong Ouyang^{1,2}, Baozhi Zang³, Rong Jing³, Kai Kang³, Gang Li³

1. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection
2. China Electric Power Research Institute Co., LTD.
3. Yantai Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company

Aluminum alloy is widely used in the fields of aerospace and marine engineering due to its excellent comprehensive properties. However, in harsh environments containing corrosive media such as Cl^- and SO_2 , it is prone to pitting corrosion and intergranular corrosion, which seriously affect the service life of the material. Although chemical oxidation processes could improve the protective performance by forming dense oxide films, the coating was often prone to failure due to structural defects or internal stress caused by excessive film thickness, resulting from differences in process parameters. And the influence of the oxide film on the corrosion resistance of aluminum alloy was also not clear. In this study, a dense ANCF coating was successfully synthesized on the surface of aluminum alloy by the chemical in-situ reaction method. The effects of in-situ reaction time on the microstructure, composition, and corrosion resistance of the coating were investigated. The results showed that the ANCF-3 surface coating obtained by in-situ reaction had an amorphous or nanocrystalline composite structure. The contact angle reached 92.15° , the corrosion current density was reduced to $0.653 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, the corrosion rate was reduced to $7.11 \times 10^{-5} \text{ mm}/\text{year}$, and the polarization resistance was increased to $3.04 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$. These improvements were mainly attributed to the synergistic protective mechanism of the hydrophobic surface and the multilayer structure of the ANCF coating. The hydrophobic surface effectively reduced the wettability of the coating, and the multilayer structure provided a physical barrier to prevent the diffusion of corrosive substances to the aluminum substrate. This study provided technical support for the optimization of chemical oxidation processes and was of great significance for promoting the application of aluminum alloy in extreme environments such as marine equipment.