

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202504008

30% 硝酸环境中 2195-T8 铝锂合金的 腐蚀机理

田 干, 刘梦庆, 刘德俊*, 王 硕, 赵一霖, 寇光杰, 杨新智
(火箭军工程大学, 西安 710025)

摘 要: 针对液体战略导弹长期加注贮存工况下铝锂合金贮箱受推进剂腐蚀引发结构完整性退化的问题, 开展了 2195-T8 铝锂合金在酸性介质中的腐蚀机理研究。通过全浸加速腐蚀试验结合扫描电镜 (scanning electron microscopy, SEM) 微观表征和能量色散谱 (energy dispersive spectroscopy, EDS) 分析技术, 系统分析了铝锂合金在硝酸溶液中的动态腐蚀行为与微观析出相作用机制。结果表明: 腐蚀初期以晶内亚稳态点蚀为主导, 晶界电化学差异驱动腐蚀向纵深发展; θ' 相与基体界面能差形成的非共格结构以及 T_1 相周边贫 Li 区形成的电位梯度共同促进局部腐蚀扩展; β'/δ' 强化相诱导的氧化膜结构缺陷能够显著增强腐蚀介质渗透动力学。

关键词: 铝锂合金; 硝酸腐蚀; 晶间腐蚀; 扫描电镜; 能量色散谱

中图分类号: TG146

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2025)04-068-08

Corrosion Mechanism of 2195-T8 Aluminum-Lithium Alloy in 30% Nitric Acidic Environment

TIAN Gan, LIU Mengqing, LIU Dejun*, WANG Shuo,
ZHAO Yilin, KOU Guangjie, YANG Xinzhi
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

ABSTRACT: A study on the corrosion mechanism of 2195-T8 aluminum-lithium alloy in acidic media was conducted to address the issue of structural integrity degradation of aluminum-lithium alloy tanks caused by propellant corrosion under long-term liquid strategic missile fueling and storage conditions. The dynamic corrosion behavior and the interaction mechanism of micro-precipitates of aluminum-lithium alloy in nitric acid solution were systematically analyzed through full immersion accelerated corrosion tests combined with scanning electron microscopy (SEM) micro-characterization and energy dispersive spectroscopy (EDS) techniques. The results show that in the initial stage of corrosion, intragranular metastable pitting corrosion is dominant, and the elec-

收稿日期: 2025-03-31

修回日期: 2025-04-21

录用日期: 2025-05-16

基金项目: 国家自然科学基金 (52272446)

第一作者: 田干 (1982—), 男, 副教授, 主要从事铝锂合金腐蚀及疲劳断裂研究。E-mail: tiangan_2012@163.com

***通信作者:** 刘德俊 (1994—), 男, 讲师, 主要从事铝锂合金腐蚀机理及演化规律研究。E-mail: liudjwxx801@yeah.net

引用格式: 田干, 刘梦庆, 刘德俊, 等. 30% 硝酸环境中 2195-T8 铝锂合金的腐蚀机理[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39 (4): 68-75. TIAN Gan, LIU Mengqing, LIU Dejun, et al. Corrosion mechanism of 2195-T8 aluminum-lithium alloy in 30% nitric acidic environment[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39 (4): 68-75.

trochemical difference at the grain boundaries drives the corrosion to develop in depth. The non-coherent structure formed by the interfacial energy difference between the θ' phase and the matrix, and the potential gradient formed in the Li-poor zone around the T_1 phase jointly promote the local corrosion expansion. The structural defects of the oxide film induced by the β'/δ' strengthening phase significantly enhance the penetration kinetics of the corrosive medium.

KEYWORDS: aluminum-lithium alloy; nitric acid corrosion; intergranular corrosion; scanning electron microscopy; energy dispersive spectroscopy

随着现代战争形态向快速响应方向发展, 传统液体战略导弹体系因发射准备周期长、操作流程复杂而逐渐显露出颓势^[1]。因此, 长期加注贮存已成为各国液体战略导弹作战能力提升的主要途径。铝锂合金因其低密度、高比强度等显著优势, 已成为第四代空天结构材料, 并被广泛应用于贮箱制造。然而, 现役液体导弹推进剂体系($N_2O_4/C_2H_8N_2$)在常温环境中易形成复合腐蚀介质, 影响以铝锂合金为代表的贮箱材料表面完整性和结构性能^[2], 从而威胁导弹弹体长期贮存的可靠性。因此, 揭示铝锂合金在推进剂环境下的腐蚀演化规律, 建立铝锂合金和推进剂相容的贮箱可靠性体系, 是液体战略导弹长贮安全必须解决的关键问题。

国内外学者对于铝锂合金腐蚀的相关机理进行了深入地探讨。国内研究主要集中在工艺-组织-腐蚀性能的关联性研究, 李劲风等^[3]系统揭示了 2195 铝锂合金时效态晶间腐蚀的 T_1 相/无沉淀带交替溶解机制, 构建了析出相分布与腐蚀路径的定量关系模型; 马云龙等^[4]通过焊接接头腐蚀电化学研究, 首次发现焊核区再结晶引发的电位反转现象, 为异质结构腐蚀控制提供了理论依据; 蔡超等^[5]建立的腐蚀-时效进程状态图和魏修宇等^[6]提出的自然时效抗蚀性退化模型, 共同完善了铝锂合金腐蚀敏感性的时效调控理论体系。值得注意的是, 麻彦龙等^[7]通过对 AA2099 合金的微区电化学研究, 证实了位错密度梯度对腐蚀微电池形成的决定性作用, 推动了局部腐蚀的跨尺度认知。目前, 国外研究主要聚焦于氯化物环境下的铝合金腐蚀机制解析与表征技术创新, Zhang 等^[8]通过 AA2024 合金在质量分数为 3.5% 的氯化钠 (NaCl) 溶液中的腐蚀动力学研究, 揭示了晶间腐蚀优先于晶体学点蚀的竞争机制; De Sousa Araujo 等^[9]针对 AA2198 合金在稀 NaCl 溶液中的局部腐蚀行为, 建立了滑移带- T_1 相交作用模型, 阐明了晶体学腐蚀的位错驱动特性; Xu 等^[10]

研究了 2195 铝锂合金在多次控温时效处理后的晶间腐蚀和剥落腐蚀特性, 发现高温核化与时效处理后的合金更易发生腐蚀; Yang 等^[11]发现焊接速度对 2195 铝锂合金混合焊接接头处的耐腐蚀性能具有显著影响, 其耐腐蚀性随焊接速度的提升而下降。在表征技术领域, Hashimoto 等^[12]开发的超薄切片-低电压扫描电镜 (scanning electron microscopy, SEM) 联用技术, 将三维腐蚀形貌表征分辨率提升至亚微米级, 为微观腐蚀演化研究提供了新的表征手段。

综上所述, 国内外学者大多在 NaCl 溶液环境 (模拟海水) 下开展铝合金的腐蚀情况研究, 但目前关于硝酸 (HNO_3) 环境下的铝锂合金腐蚀敏感性及损伤行为的研究较少。前期, 课题组已经研究了贮箱用 2195 铝锂合金在 HNO_3 中的腐蚀行为^[13-14]。在此基础上, 本文将进一步结合扫描电镜/透射电镜和高角环形暗场-扫描透射电子显微镜 (high-angle annular dark field-scanning transmission electron microscopy, HAADF-STEM) 技术, 来观测全浸环境下 2195 铝锂合金基体表面腐蚀形貌, 并进一步分析其微观腐蚀规律及机理, 为高强铝锂合金在推进剂贮箱中的应用提供技术支撑。

1 推进剂环境等效分析

左中伟^[15]的研究表明, 四氧化二氮 (N_2O_4) 在长期贮存过程中因吸湿作用与水反应生成 HNO_3 以及亚硝酸 (HNO_2), HNO_2 作为中间产物会进一步转化成 HNO_3 。因此, N_2O_4 与水体系中最终起到腐蚀决定性作用的成分是 HNO_3 。化学方程式为



此外, Dove 等^[16]利用毛细管测定不同含水量下 N_2O_4 中 HNO_3 的质量分数, 其变化关系如图 1 所示。从图中能够看出, 随着 N_2O_4 中含水量逐渐

增加, 体系中 HNO_3 的质量分数不断升高, 并且在含水量达到 8% 后, 整个体系中 HNO_3 的质量分数可达到 40% 以上。因此, 针对长期贮存环境中 N_2O_4 的腐蚀性研究, 可以将其等效为 HNO_3 对贮箱结构腐蚀损伤的探究。基于课题组前期的研究^[17], 质量分数为 30% 的 HNO_3 溶液对铝锂合金的腐蚀速率最快, 且腐蚀动力学与实测贮箱内壁液膜成分高度吻合。因此, 试验配比该质量分数下的 HNO_3 溶液作为腐蚀介质并开展腐蚀机理研究。

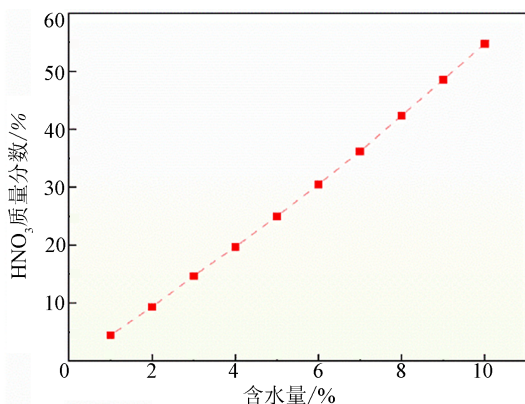


图 1 N_2O_4 中含水量与 HNO_3 质量分数的关系

Fig. 1 Relationship between water content and HNO_3 mass fraction in N_2O_4

2 试验方法

原材料选用西南铝业生产的 2195-T8 铝锂合金板材, 厚度为 4.5 mm。其中, Cu 的质量分数为 3.5%~4.5%, Li 的质量分数为 1.8%~2.5%, Mg 的质量分数为 0.1%~0.4%, Si 的质量分数不超过 0.2%, Fe 的质量分数约为 0.1%, 剩余成分为 Al。试样经电火花线切割加工成 5 mm × 5 mm × 4.5 mm 的立方体后, 依次采用 400~2 000# 碳化硅水砂纸对其进行湿式研磨, 并通过 3 μm 和 1 μm 金刚石悬浮液将试样表面机械抛光至镜面。抛光后试样经超声清洗 15 min 后, 去除表面污染物, 氮气吹干后密封保存于真空干燥皿中以避免其发生氧化。

本文通过日立 SU8010 场发射扫描电镜来分析试样表面腐蚀的微观形貌特征, 同时利用能量色散谱 (energy dispersive spectroscopy, EDS) 分析仪判断元素分布及其含量。通过标准化试样加工、腐蚀介质参数控制以及 SEM 分析技术, 可以精准获取试样表面的微观腐蚀形貌演化、晶界以及析出相化学特征等关键数据, 并基于该试验结果,

重点阐述了 2195-T8 铝锂合金在质量分数为 30% 的 HNO_3 溶液中的局部腐蚀萌生机理、析出相选择性溶解行为, 进而系统揭示其腐蚀失效机理。

3 微观腐蚀形貌分析

图 2 展示了 2195-T8 铝锂合金表面微观结构特征。由图 2 (a) 中勾勒的晶界可以看出, 晶粒沿着轧制方向被拉长; 通过对黄色矩形区域放大观察, 如图 2 (b) 所示, 可以看到这种晶粒是由初始大晶粒和等轴状再结晶晶粒组成。在彩色标记的再结晶晶粒中, 箭头所示为微米级富铜或富铁析出相选择性富集或贫乏, 从而呈现出不均匀的分布特征^[18]。

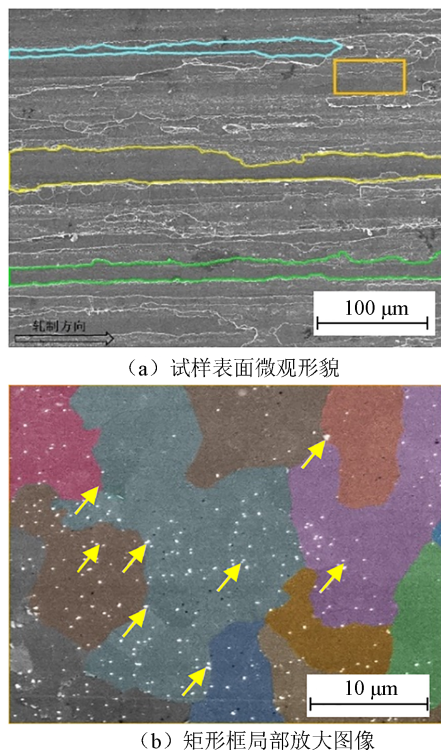


图 2 2195-T8 铝锂合金试样表面微观形貌

Fig. 2 Microscopic morphology of 2195-T8 aluminum-lithium alloy sample surface

如图 3 所示, 通过观察试样表面背散射电子 (backscattered electrons, BSE) 图像, 可以看到虚线框中沿着轧制方向分布着明亮的金属间粒子群簇。利用 EDS 对黄色箭头指向的金属间粒子元素进行探测, 得到金属间粒子元素组成分别为 78.51% 的 Al、12.42% 的 Cu、6.59% 的 Fe、1.92% 的 Ag 和 0.56% 的 Mg, 可见重金属元素比例相对较高。合金中金属间粒子的分布与组成会直接影

响其耐腐蚀性, 并可能会导致其发生不同的腐蚀缺陷, 从而降低合金的力学性能。

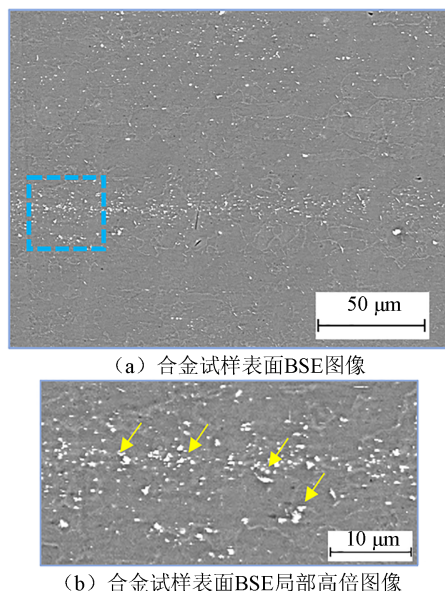


图 3 2195-T8 铝锂合金试样表面 BSE 显微图像

Fig. 3 BSE microscopic images of 2195-T8 aluminum-lithium alloy sample surface

图 4 通过 HAADF-STEM 技术揭示了 2195-T8 铝锂合金三晶界交界处的析出相分布特征。从原子序数衬度分析可知, T_1 相 (Al_2CuLi) 在晶内呈现高度取向的针状结构, 表现出典型的时效析出特征; 而图 4 (a) 中蓝色箭头所指晶界处的 T_1 相密度显著低于晶内, 这与板材 T8 态 (固溶+冷轧+人工时效) 工艺中冷轧环节引入的位错密度梯度及晶界溶质拖曳效应密切相关^[19]。进一步对比三晶界特征发现, 晶界 1 的 T_1 相数量显著高于晶界 2 和 3, 结合晶粒 A、B、C 的明暗衬度差异分析, 表明晶界 1 附近的局部位错密度更高, 为 T_1 相的非均匀形核提供了位错缠结、亚晶界等缺陷区域。此外, 在晶界 2 和 3 处观察到 θ' 相 (Al_2Cu) 的嵌镶分布, 其长轴方向与轧制方向一致, 尺寸为 50~150 nm, 界面为非共格结构, 这类粗大析出相可能通过阻碍位错滑移从而提升合金强度, 但与其与基体的电化学差异将加剧局部微电偶腐蚀敏感性。

如图 5 所示, 经能谱面扫描及线扫描分析发现, Cu 元素在晶界处显著富集, 而 Zr 元素主要分布于晶内, 这与 β'/δ' 相 (Al_3Zr/Al_3Li) 的共格析出行为一致。尽管 β'/δ' 相因 Li 元素检测限制而无法直接进行表征, 但其纳米级共格结构可通过 Zr 元素分布间接推断。此类相虽不直接参与腐蚀反

应, 但其诱导的局部晶格畸变将破坏表面氧化膜的连续性, 为腐蚀介质渗透提供通道。值得注意的是, T_1 相与 θ' 相的空间竞争关系受控于 Li/Cu 比及时效动力学, 即高 Li 含量将促进 T_1 相主导析出, 而冷轧工艺产生的位错网络则优先捕获 Cu 原子, 促进 θ' 相在晶界形核。这种多尺度析出相分布的异质性将导致微区电化学活性差异, 其中 T_1 相-基体界面因 Cu/Li 元素耗尽形成阳极, 而 θ' 相的富 Cu 核心作为阴极, 共同驱动局部腐蚀萌生与扩展。

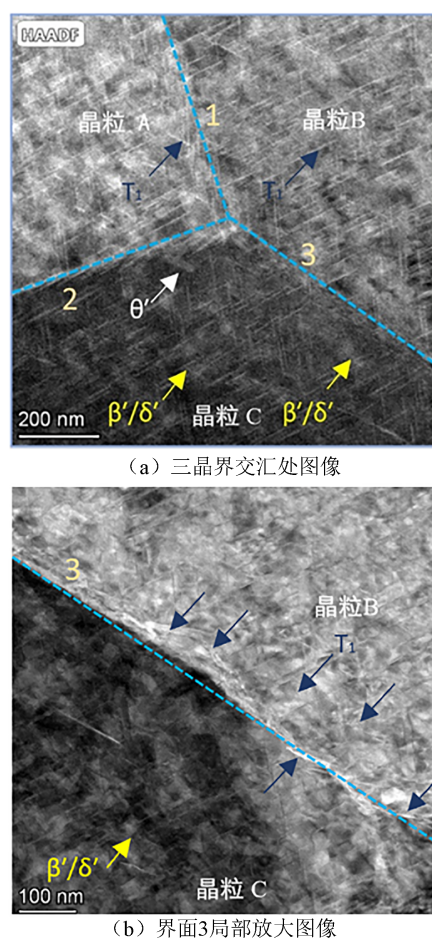


图 4 2195-T8 铝锂合金析出相

Fig. 4 Precipitation phase of 2195-T8 aluminum-lithium alloy

4 铝锂合金局部腐蚀机理分析

本节基于全浸腐蚀试验与多尺度表征结果, 揭示了 2195-T8 铝锂合金在 30% HNO_3 溶液中的局部腐蚀形貌演化规律及其微观作用机制。

4.1 腐蚀形貌演化过程

1) 点蚀萌生与表面均匀性破坏

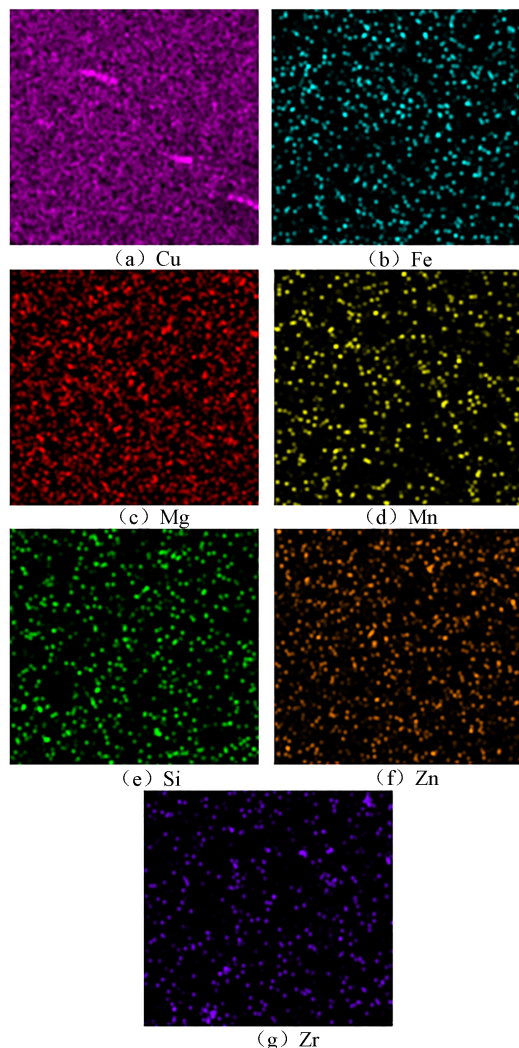


图 5 线、面扫描后的能量色散X射线光谱图像

Fig. 5 Energy dispersive X-ray spectroscopy images after line and surface scanning

图 6 展示了 2195-T8 铝锂合金在 30% HNO_3 溶液中浸泡 8 h 后, 不同放大倍数下的合金试样表面腐蚀微观形貌。从图 6 (a) 中可以看到, 合金表面呈现均匀分布的点蚀坑, 形貌以圆形或椭圆形开口为主。高倍 SEM 图像显示, 点蚀主要萌生于晶内 T_1 相与基体界面处。EDS 分析表明, T_1 相界面因 Li 元素贫化, 形成阳极活性区, 优先发生选择性溶解。此时, 晶界尚未显著腐蚀, 仅局部出现浅层蚀坑, 表明腐蚀初期以晶内点蚀为主导。

2) 晶间腐蚀主导与蚀坑分层扩展

图 7 展示了 2195-T8 铝锂合金在 30% HNO_3 溶液中浸泡 24 h 后的表面腐蚀微观形貌。随着浸泡时间延长至 24 h, 合金表面腐蚀的微观形貌发生显著转变。表面点蚀密度增加, 且蚀坑深度呈现双峰分布, 浅层蚀坑与沿晶界的深蚀坑共存。图 7

(b) 所示, 晶界处形成连续腐蚀通道, 表明腐蚀模式由点蚀转向晶间腐蚀。结合轧制方向扩展特征 (如图 7 (b) 右侧所示), 冷轧工艺引入的晶粒取向与位错分布对腐蚀路径具有导向作用, 晶界富 Cu 区域作为阴极加速了贫 Cu 基体的溶解。

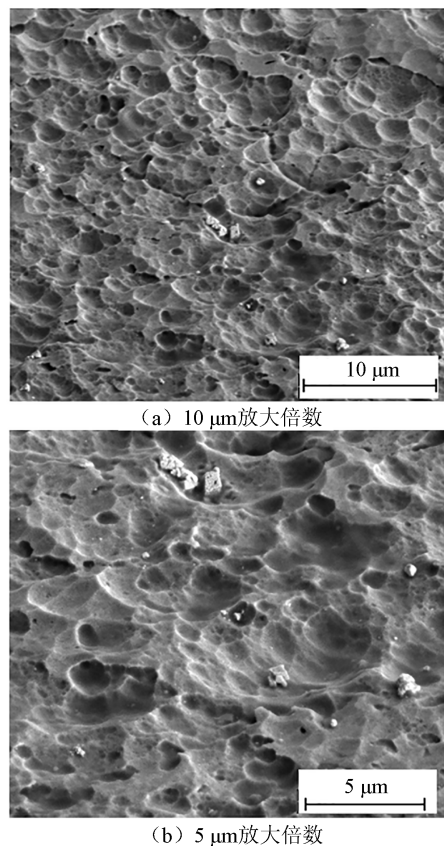


图 6 铝锂合金经 8 h 浸泡后的表面腐蚀微观形貌

Fig. 6 Microscopic morphology of aluminum-lithium alloy surface corrosion after 8-hour immersion

4.2 局部区域腐蚀形貌演化特征及元素变化分析

基于全浸试验与多尺度表征结果, 针对 2195-T8 铝锂合金在 30% HNO_3 溶液中的腐蚀动态过程, 选取 3 个典型区域 (Area 1、Area 2 和 Area 3) 进行微观形貌与元素分布的系统性分析, 揭示了腐蚀萌生、扩展的机制。3 个典型区域分别经 8 h 和 24 h 腐蚀后的微观形貌如图 8~10 所示。

如图 8 (a) 所示, 合金试样在浸泡 8 h 后, Area 1 内的晶粒表面分布着直径约 2~5 μm 的圆形点蚀坑, 其开口边缘较为光滑, 表明腐蚀初期以均匀溶解为主。通过 EDS 面扫描分析, 晶界处橙色框内 Cu 元素含量高于晶内蓝色框区域, 形成显著的分布差异梯度。与此同时, Mg 和 Fe 等活性元素在晶界附近均匀分布, 表明其尚未发生大规

模选择性溶解。如图 8 (b) 所示, 腐蚀模式由点蚀向晶间腐蚀转变。晶界处出现连续腐蚀沟槽, 且沿轧制方向呈现定向扩展特征。EDS 分析显示, 黄色框内晶界处 Cu 的质量分数进一步升高至 5.08%, 而 Mg 和 Fe 的质量分数显著下降, 表明活性元素的优先溶解削弱了晶界钝化能力。

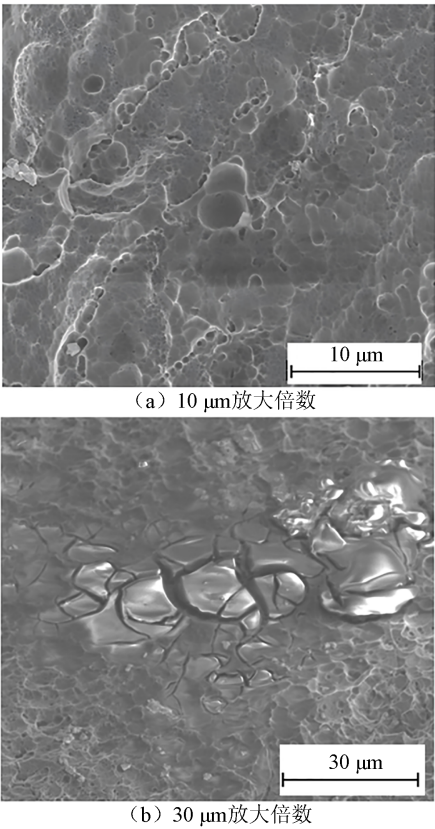


图 7 铝锂合金经 24 h 浸泡后的表面腐蚀微观形貌
Fig. 7 Microscopic morphology of aluminum-lithium alloy surface corrosion after 24-hour immersion

如图 9 (a) 所示, 合金试样经 8 h 腐蚀后, Area 2 内的晶界 θ' 相周围出现微米级界面剥离。高倍 SEM 图像表明, θ' 相的非共格界面为离子渗透提供了优先路径。EDS 扫描显示, 橙色框内 θ' 相核心处 Cu 的质量分数高达 12.42%, 而蓝色框界面附近基体 Cu 的质量分数仅为 3.8%, 形成强烈的分布梯度。如图 9 (b) 所示, 24 h 后, 腐蚀沿晶界扩展形成连续沟槽。EDS 线扫描进一步证实, 黄色框内晶界处 Cu 偏析范围扩大至邻近晶粒, 质量分数提升至 6.12%, 而 Li 元素在界面处几乎耗尽。

如图 10 (a) 所示, 晶粒表面分布着密集的亚微米级蚀坑, 其形貌呈现不规则多边形, 开口边缘锐利, 表明腐蚀初期以局部溶解为主。通过 EDS 面扫描分析, 橙色框内 Al 元素在蚀坑边缘呈

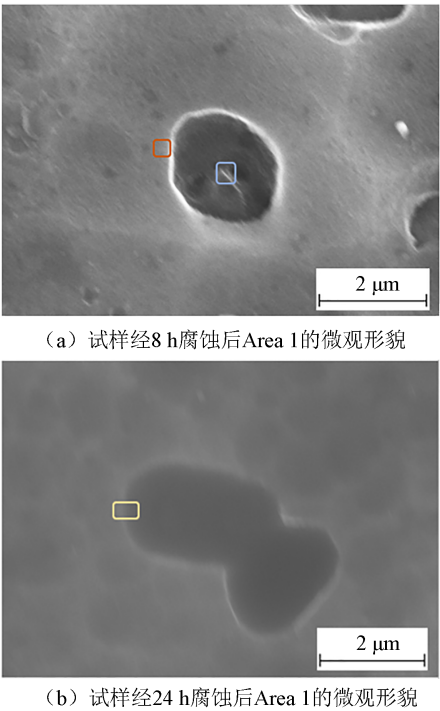


图 8 Area 1 经 8 h 与 24 h 腐蚀后的微观形貌
Fig. 8 Microscopic morphology of Area 1 after 8-hour and 24-hour corrosion

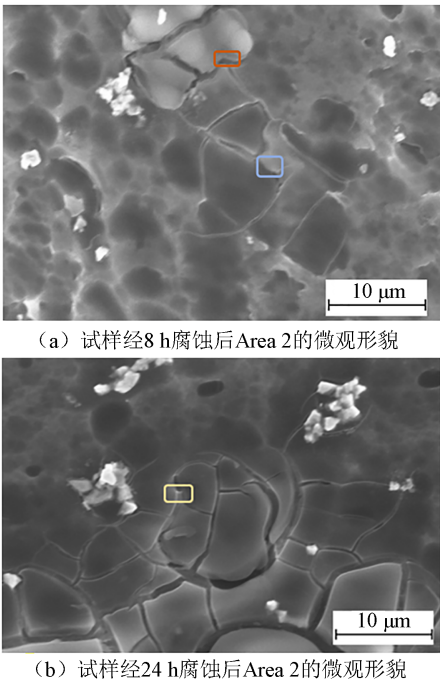


图 9 Area 2 经 8 h 与 24 h 腐蚀后的微观形貌
Fig. 9 Microscopic morphology of Area 2 after 8-hour and 24-hour corrosion

现轻微贫化, 质量分数从原本的 95.6% 降至 93.1%, 而 O 元素的质量分数显著升高, 表明蚀坑表面已形成非晶态氧化铝 (AlO_x) 钝化膜。值得

注意的是,晶粒内部存在离散分布的富 Cu 微粒,其周围基体 Al 的质量分数降至 90.4%,暗示富 Cu 相可能作为局部阴极,驱动邻近基体优先溶解。如图 10(b) 所示,合金试样浸泡 24 h 后,Area 3 内的蚀坑形态发生显著转变,由原来的小蚀坑合并形成沿晶界分布的条带状腐蚀沟槽,且沟槽内部呈现阶梯状溶解特征。经 EDS 分析发现,黄色框沟槽内 Al 的质量分数降至 88.5%,表明钝化膜持续增厚且均匀性下降。

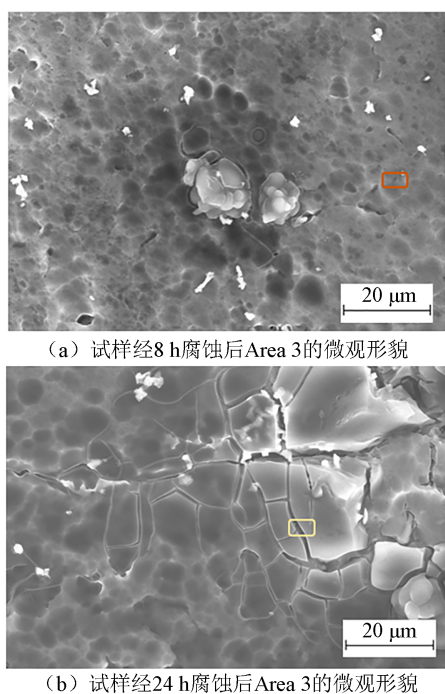


图 10 Area 3 经 8 h 与 24 h 腐蚀后的微观形貌

Fig. 10 Microscopic morphology of Area 3 after 8-hour and 24-hour corrosion

5 结论

本文系统揭示了 2195-T8 铝锂合金在 30% HNO_3 溶液中的腐蚀演化行为及其微观作用机制,得出以下结论。

1) 在 30% HNO_3 溶液中,合金表面腐蚀初期以均匀点蚀为主,随后逐渐演化为以晶间腐蚀为主导的模式。晶界区域的腐蚀速率显著高于晶内,其核心驱动力源于晶界 Cu 元素偏析形成的微电偶效应。富 Cu 晶界作为阴极加速贫 Cu 基体溶解,而离子的渗透与局部酸化进一步加剧了腐蚀在晶间扩展。

2) 晶内 T_1 相的针状取向分布通过位错提升强度,但其界面贫 Li 区成为阳极活性位点,引发定

向点蚀扩展。晶界处 θ' 相因非共格界面与富 Cu 核心形成强阴极,驱动基体选择性溶解。此外, β'/δ' 相引起的氧化膜不连续性为 HNO_3 离子渗透提供了通道,导致点蚀优先萌生于膜缺陷区域。

3) 基于机理分析,提出以下优化路径:调控时效工艺以减少晶界 Cu 偏析并抑制 θ' 相粗化;通过提高 Li/Cu 比促进 T_1 相均匀析出,降低界面贫 Li 区阳极活性;通过微弧氧化或缓蚀剂涂层改性技术以修复氧化膜缺陷并阻断介质渗透。

参考文献

- [1] DURSUN T, SOUTIS C. Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys[J]. Materials & Design, 2014, 56: 862-871.
- [2] DU S Y. Advanced composite materials and aerospace engineering[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 1-12.
- [3] 李劲风, 郑子樵, 李世晨, 等. 2195 铝-锂合金晶间腐蚀及剥蚀行为研究[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(5): 640-643.
- LI J F, ZHENG Z Q, LI S C, et al. Study on intergranular corrosion and exfoliation corrosion behaviors of 2195 Al-Li alloy[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2004, 22(5): 640-643.
- [4] 马云龙, 杨子奇, 李劲风. 2195 铝锂合金摩擦搅拌焊接头组织与腐蚀行为[J]. 焊接学报, 2019, 40(10): 142-147, 167.
- MA Y L, YANG Z Q, LI J F. Structure and corrosion behavior of friction stir weld joint of 2195 Al-Li alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2019, 40(10): 142-147, 167.
- [5] 蔡超, 李劲风, 王恒, 等. 铝锂合金晶间腐蚀敏感性与时效阶段的相关性[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(10): 2523-2528.
- CAI C, LI J F, WANG H, et al. Dependence of intergranular corrosion sensitivity of Al-Li alloys on aging stage[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(10): 2523-2528.
- [6] 魏修宇, 谭澄宇, 郑子樵, 等. 时效对 2195 铝锂合金腐蚀行为的影响[J]. 中国有色金属学报, 2004 (7): 1195-1200.
- WEI X Y, TAN C Y, ZHENG Z Q, et al. Influence of aging on corrosion behavior of 2195 Al-Li alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004(7): 1195-1200.
- [7] 麻彦龙, 孟晓敏, 黄伟九, 等. 显微组织的非均匀性对 AA2099-T8 铝锂合金局部腐蚀的影响[J]. 中国有

- 色金属学报, 2015, 25(3): 611-617.
- MA Y L, MENG X M, HUANG W J, et al. Effect of microstructural heterogeneity on localized corrosion of AA2099-T8 aluminum-lithium alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(3): 611-617.
- [8] ZHANG X X, ZHOU X R, HASHIMOTO T, et al. Localized corrosion in AA2024-T351 aluminium alloy: transition from intergranular corrosion to crystallographic pitting[J]. Materials Characterization, 2017, 130: 230-236.
- [9] DE SOUSA ARAUJO J V, DONATUS U, QUEIROZ F M, et al. On the severe localized corrosion susceptibility of the AA2198-T851 alloy [J]. Corrosion Science, 2018, 133: 132-140.
- [10] XU Y, WANG X J, YAN Z T, et al. Corrosion properties of light-weight and high-strength 2195 Al-Li alloy[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2011, 24(5): 681-686.
- [11] YANG M, LU J X, CHEN J, et al. Effect of welding speed on microstructure and corrosion resistance of Al-Li alloy weld joint[J]. Materials and Corrosion, 2020, 71(2): 300-308.
- [12] HASHIMOTO T, ZHOU X, LUO C, et al. Nanotomography for understanding materials degradation[J]. Scripta Materialia, 2010, 63(8): 835-838.
- [13] 郭一, 常新龙, 田干, 等. 拉-拉载荷下2195-T8铝锂合金在 N_2O_4 中的预腐蚀疲劳研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(9): 3459-3465.
- GUO Y, CHANG X L, TIAN G, et al. Pre-corrosion fatigue performance of 2195-T8 Al-Li alloy in N_2O_4 under tension-tension load[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(9): 3459-3465.
- [14] 郭一, 刘德俊, 常新龙, 等. 含人工缺陷的2195-T8铝锂合金在 30% HNO_3 中的腐蚀行为[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(3): 896-903.
- GUO Y, LIU D J, CHANG X L, et al. Corrosion behavior of 2195-T8 aluminum-lithium alloy with artificial defects in 30% HNO_3 [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(3): 896-903.
- [15] 左中伟. 四氧化二氮-水模拟体系对金属材料的腐蚀行为[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2019: 12-25.
- ZUO Z W. Corrosion behavior of dinitrogen tetroxide-water simulation system on metal materials [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2019: 12-25.
- [16] DOVE M F A, MAUGER J P, LOGAN N, et al. Laboratory methodologies for propellant corrosion research[J]. Journal of Propulsion and Power, 1996, 12(3): 580-584.
- [17] 刘德俊, 田干, 李玉龙, 等. 30% HNO_3 对2195铝锂合金预腐蚀疲劳特性研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(4): 1129-1137.
- LIU D J, TIAN G, LI Y L, et al. Research on pre-corrosion fatigue properties of 2195 Al-Li alloys in 30% HNO_3 [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(4): 1129-1137.
- [18] 张有宏, 吕国志, 任克亮, 等. 同环境下LY12-CZ铝合金表面腐蚀损伤演化规律研究[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 142-145.
- ZHANG Y H, LYU G Z, REN K L, et al. The evolution rhythm of surface corrosion damage of LY12-CZ aluminum in varied environments[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(1): 142-145.
- [19] ABD EL-ATY A, XU Y, GUO X Z, et al. Strengthening mechanisms, deformation behavior, and anisotropic mechanical properties of Al-Li alloys: A review[J]. Journal of Advanced Research, 2018, 10: 49-67.

(编辑: 刘建民)