文章编号:1000-5854(2026)04-0420-06

7075 铝合金的晶界特征分布及其对晶间腐蚀行为的影响

李　蕊[1]，张建军[1]，解磊鹏[2]，贺春林[3]

(1.河北师范大学 分析测试中心,河北 石家庄　050024;2.河钢材料技术研究院,河北 石家庄　052165;
3.沈阳大学 辽宁省先进材料重点实验室,辽宁 沈阳　110044)

摘　要:7075 铝合金极易发生晶间腐蚀(intergranular corrosion,IGC)和剥落腐蚀.为研究 7075 铝合金晶界特征分布(grain boundary character distribution,GBCD)对晶间腐蚀的影响,通过电子背散射衍射(electron back scatter diffraction,EBSD)技术对其晶界特征分布进行表征,借助金相显微镜观察其在 25 ℃、pH=2、质量分数为 3.5%的 NaCl 溶液中浸泡 1.5、7 h 后的腐蚀形貌.结果表明,随着浸泡时间的延长,7075 铝合金的晶间腐蚀速率增加,其中大角度晶界的腐蚀增长速率最快.本研究明确了 7075 铝合金晶界特征分布与晶间腐蚀行为之间的相关性,为调控晶界结构和改善其耐蚀性能提供实验和理论依据.

关键词:7075 铝合金;晶界特征分布;电子背散射衍射;晶间腐蚀;耐蚀性

中图分类号:TG 174.3　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.13763/j.cnki.jhebnu.nse.202603009

Grain boundary character distribution and its influence on intergranular corrosion behavior of 7075 aluminum alloy

Li Rui[1], Zhang Jianjun[1], Xie Leipeng[2], He Chunlin[3]

(1.Testing and Analysis Center,Hebei Normal University,Shijiazhuang Hebei　050024,China;
2.HBIS Material Technology Research Institute,Shijiazhuang Hebei　052165,China;
3.Liaoning Provincial Key Laboratory of Advanced Materials,Shenyang University,Shenyang Liaoning　110044,China)

Abstract:The 7075 aluminum alloy is susceptible to intergranular corrosion(IGC) and exfoliation corrosion.To investigate the effect of grain boundary character distribution(GBCD) of 7075 aluminum alloy on intergranular corrosion,the grain boundary character distribution was characterized by electron back scatter diffraction(EBSD).The corrosion morphologies were observed by metallurgical microscope after soaking in 3.5% NaCl solution(pH=2,25 ℃) for 1.5,7 h,respectively.The results showed that with the increase of soaking time,the intergranular corrosion rate of 7075 aluminum alloy increased,and the corrosion growth rate of large angle grain boundaries was the fastest.This study clarifies the correlation between the grain boundary character distribution and intergranular corrosion behavior in 7075 aluminum alloy,providing experimental and theoretical basis for regulating grain boundary structure and improving its corrosion resistance.

Key words:7075 aluminum alloy; grain boundary character distribution; electron back scatter diffraction; intergranular corrosion; corrosion resistance

收稿日期:2025-10-26;**修回日期**:2026-01-06

基金项目:国家自然科学基金(51171118);河北师范大学博士科研启动基金(L2023B52)

作者简介:李　蕊(1993-),女,河北秦皇岛人,实验师,研究方向为腐蚀与防护.

通信作者:贺春林(1964-),男,教授,博士生导师,研究方向为腐蚀与防护.E-mail:ccllhhe@126.com

7075 铝合金因其具有较高的强度和良好的力学性能而被广泛应用于航空航天领域[1-2].然而,该合金在腐蚀环境中易发生局部腐蚀.例如,Cu、Fe 元素形成的 Al_7Cu_2Fe、$(Al,Cu)_6(Fe,Cu)$等金属间化合物,可导致基体发生点蚀[3],而晶界处 η 相($MgZn_2$)的阳极溶解则会引发晶间腐蚀(intergranular corrosion,IGC).

1984 年 Watanabe[4]首次提出"晶界工程(grain boundary engineering,GBE)"概念,即通过热处理工艺调控材料内部的晶界特征分布(grain boundary character distribution,GBCD),提高低重位点阵(coincidence site lattice,ΣCSL)晶界在随机晶界中的占比,以打断随机晶界的连通性,从而改善材料的相关性能.目前,晶界工程相关研究主要集中于中低层错能面心立方金属,如奥氏体不锈钢[5-7]、镍基合金[8-10]及铜合金[11-13]等,通过提高孪晶占比来实现晶界的调控与设计,进而优化材料性能.Wang 等[14]研究了晶界工程对 316L 不锈钢电化学性能及晶间腐蚀行为的影响,发现高占比的低 ΣCSL 晶界和不连续的随机大角度晶界网络可有效抑制晶间腐蚀.Xia 等[15]研究证实,通过形变热处理可显著提高 Inconel 690 合金中低 ΣCSL 晶界占比,且低 ΣCSL 晶界占比高的样品表现出更优异的耐晶间腐蚀性能,其中 $\Sigma3^n$ 晶界能阻碍晶间腐蚀的扩展.姜涛等[16]发现 B10 白铜中低 ΣCSL 晶界占比越高,其耐腐蚀性越强,其中 $\Sigma3^n$ 晶界可破坏晶界网络的连通性,抑制沿晶腐蚀,从而提高合金耐海水腐蚀性能.Kim 等[17]探究了晶界特征分布对99.999 9%纯铝在晶间腐蚀溶液中敏感性的影响,结果表明 Σ1 晶界在 8%、16%和 38% HCl 溶液中均表现出最优的耐蚀性,Σ3 晶界在 8%和 16% HCl 溶液中也具有良好的耐蚀性,而大角度晶界(high-angle grain boundaries,HAGBs)的耐蚀性显著低于上述 2 种晶界.Mondou 等[18]分析 2024 铝合金的晶间腐蚀敏感性时发现,小角度晶界(low-angle grain boundaries,LAGBs)和低 ΣCSL 晶界具有良好的耐晶间腐蚀能力.

综上,目前关于利用晶界工程调控奥氏体不锈钢、镍基合金和铜合金耐腐蚀性能的研究已较为丰富,且主要集中于 $\Sigma3^n$ 晶界.然而,晶界工程在铝合金耐蚀改性方面的研究仍相对匮乏.基于此,本文中,笔者以 7075 铝合金为研究对象,对其进行热处理加工,并分析其晶界特征分布规律,探究不同晶界类型在模拟加速海水腐蚀环境(pH=2、质量分数为 3.5%的 NaCl 溶液)中的耐晶间腐蚀性能,确定耐蚀性能优异的特征晶界,以期为通过机械热加工技术提高铝合金耐蚀性能提供理论依据和实验支撑.

1 实验部分

1.1 实验材料

所用的材料为轧制态 7075 铝合金,尺寸为 10 mm×10 mm×2 mm,其各化学组分质量百分数见表 1.

表 1 轧制态 7075 铝合金的化学组成

Tab.1 Chemical compositions of as-rolled 7075 aluminum alloy %

元素	含量	元素	含量
Si	0.4	Cr	0.18～0.28
Fe	0.5	Zn	5.1～6.1
Cu	1.5～2.0	Ti	0.2
Mn	0.3	其他	0.2
Mg	2.1～2.9	Al	余量

1.2 样品处理

为获得晶粒尺寸均匀的合金组织,对样品进行再结晶热处理调控实验.将样品分别在 520、530、540 ℃下保温 2.5 h,探究温度对晶粒组织的影响;在 540 ℃下分别保温 2、3、4 h,探究保温时间对合金再结晶行为的影响.所有样品热处理后在空气中冷却,并依次用 400 目、600 目、800 目、1 000 目、1 500 目、2 000 目和 3 000 目的耐水砂纸逐级打磨,用粒径 1.0 μm 的金刚石研磨膏机械抛光至镜面后,置于超声波清洗仪中,依次用丙酮和酒精清洗,并冷风吹干.采用显微硬度计标定至少含有 100 个晶粒的区域,待测区域示意图如图 1 所示.为去除表面应力,对机械抛光后的样品进行电解抛光,直至表面无划痕.电解抛光工艺参数:将不锈钢作阳极,体积分数为 10%的 $HClO_4$ 溶液作电解液,电解电压为 29 V,电解液温度不高于10 ℃,电解抛光时间不超过 30 s.

1.3 腐蚀实验

选取 7075 铝合金轧制面为测试表面,按照 JB/T 7901-1999《金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法》进行实验.将预处理后的试样浸泡于 pH=2、质量分数为 3.5%的 NaCl 溶液中,采用玻璃支架固定,避免样品

与容器壁接触，并保证所有试样在溶液中的浸泡高度一致，利用恒温水浴锅控制溶液温度为(25±1) ℃.经不同时间(1.5、7 h)腐蚀后，取出试样，用蒸馏水冲洗干净，冷风吹干后备用.

腐蚀实验前，采用电子背散射衍射(electron back scatter diffraction，EBSD)技术对经电解抛光去除表面应力的样品进行测试，分析其晶界特征分布，放大倍数为 200×，扫描步长选取最小晶粒尺寸的 1/5～1/10，数据由 Oxford 公司的 CHANEL5 软件分析得出.采用日本 OLYMPUS 金相显微镜观察再结晶热处理后样品的表面形貌及腐蚀后样品测试面的表面形貌，确定样品的晶界腐蚀位置及腐蚀程度.

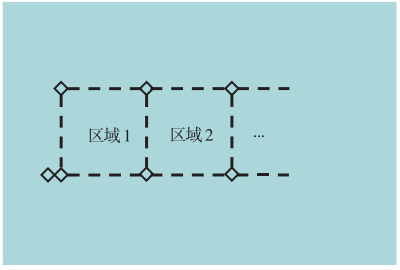


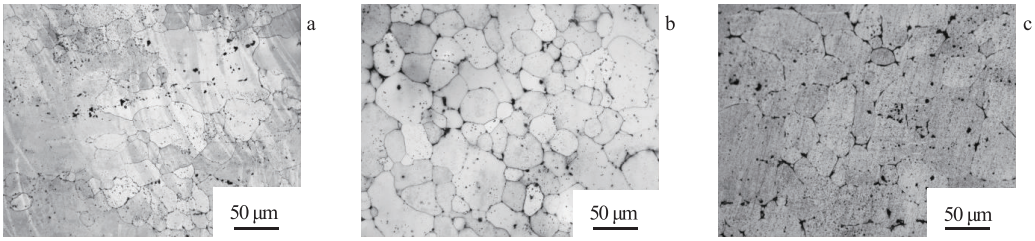
图 1　晶界特征分布的待测区域示意图

Fig.1　Schematic diagram of the tested region for grain boundary character distribution

2　结果与讨论

2.1　7075 铝合金不同热处理态的金相表面形貌

图 2 为轧制态 7075 铝合金在不同温度下保温 2.5 h 后的金相表面形貌.由图 2a 可知，当热处理温度为 520 ℃时，晶粒形状不规则，表明样品在该温度下发生了不完全再结晶现象.当热处理温度升至 530 ℃时，晶粒接近等轴晶粒，再结晶程度接近完全，且晶界处出现明显的晶界析出相(图 2b).当热处理温度进一步升至 540 ℃后，材料实现完全再结晶，获得尺寸均匀的等轴晶粒，晶界析出相增多(图 2c).

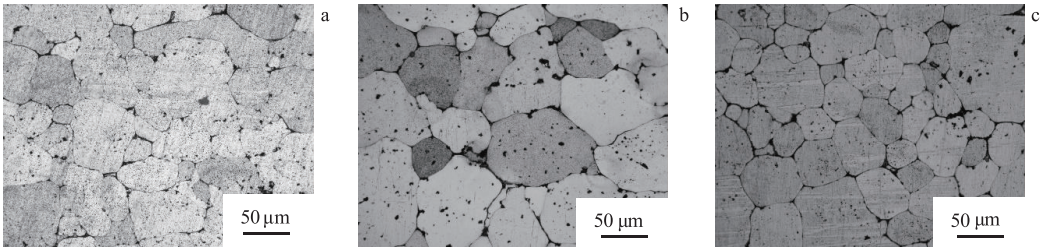


a.520 ℃；b.530 ℃；c.540 ℃.

图 2　轧制态 7075 铝合金不同温度热处理后的金相表面形貌

Fig.2　Metallographic surface morphologies of as-rolled 7075 aluminum alloy heat-treated with different temperatures

图 3 为轧制态 7075 铝合金在 540 ℃下保温不同时间后的金相表面形貌.可以看到，当保温 2 h 时，晶粒尺寸不均匀，且平均晶粒尺寸偏小，虽有等轴晶粒出现，但样品处于不完全再结晶状态(图 3a).当保温时间延长至 3 h 时，几乎所有晶粒都呈等轴状，且尺寸相对均匀(图 3b)，表明此时样品实现完全再结晶.当保温时间进一步延长至 4 h 时(图 3c)，晶粒仍为等轴晶粒，但尺寸不均匀性明显增大.由以上分析可知，热处理温度对 7075 铝合金微观结构的影响程度大于保温时间.



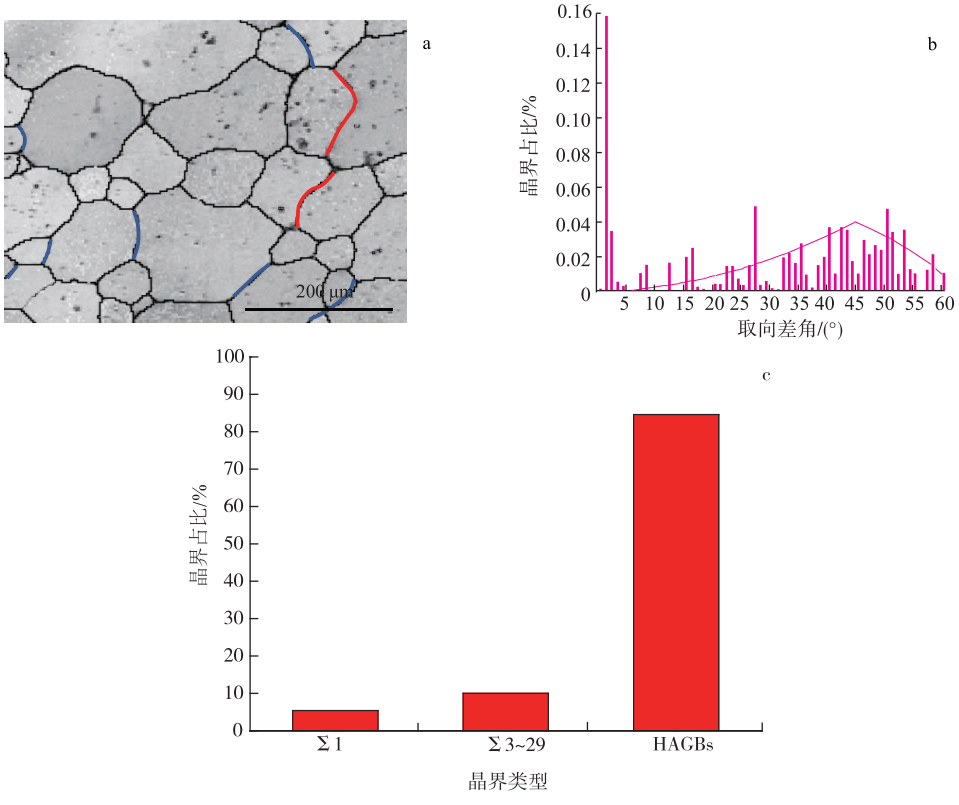
a.2 h；b.3 h；c.4 h.

图 3　轧制态 7075 铝合金保温不同时间的金相表面形貌

Fig.3　Metallographic surface morphologies of as-rolled 7075 aluminum alloy at different holding times

2.2　再结晶态 7075 铝合金的晶界特征分布

结合热处理工艺对 7075 铝合金微观结构的影响规律，选取 540 ℃保温 3 h、空冷条件下完成再结晶的 7075 铝合金作为晶界特征分布的研究对象.选取样品表面不少于 300 个晶界区域进行统计分析，其中一个区域的晶界特征分布结果如图 4a 所示.图 4b 为该区域的晶粒取向差角分布图.通常认为相邻晶粒取向差小于 15°的晶界为小角度晶界，该类晶界由一列位错构成.由图可知，7075 铝合金再结晶后，晶界类型仍以大角度晶界为主，小角度晶界和低 ΣCSL(Σ3～29)晶界占比较低.图 4c 为各类晶界占比统计柱状图.数据显示，7075 铝合金再结晶后，Σ1 晶界、低 ΣCSL 晶界和大角度晶界的占比分别为 5.40%、10.02%和84.58%.表明该合金经 540 ℃保温 3 h、空冷再结晶后，样品中 Σ1 晶界和低 ΣCSL 晶界占比较低，晶界结构主要为大角度晶界.



a.EBSD 测试结果；b.取向差角分布图；c.不同晶界类型占比.

图 4　再结晶态 7075 铝合金的晶界特征分布

Fig.4　Grain boundary character distribution of recrystallized 7075 aluminum alloy

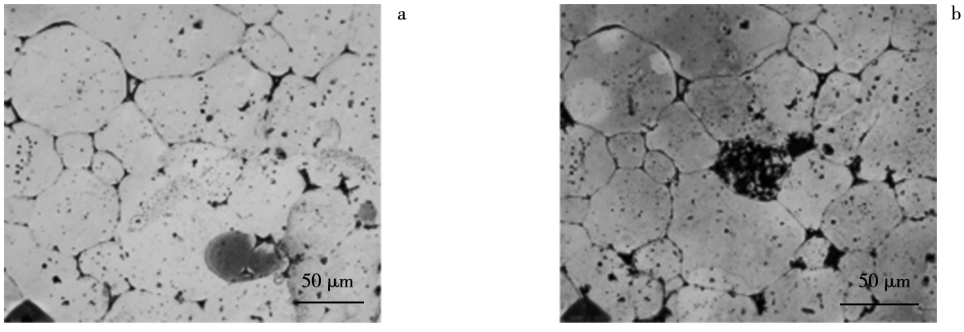
2.3　再结晶态 7075 铝合金的晶间腐蚀形貌

图 5 为再结晶态 7075 铝合金在 NaCl 溶液中经不同时长浸泡后的金相表面形貌.可以看出，随着浸泡时间延长，再结晶态 7075 铝合金的晶间腐蚀现象呈明显加剧趋势.当浸泡时间为 1.5 h 时，样品表面大部分晶界未发生明显的晶间腐蚀，但部分三叉晶界的交界区域发生了严重腐蚀(图 5a).这是由于晶界析出相 $MgZn_2$ 发生活性溶解，使晶界表面形成大量微蚀坑[19-21]，蚀坑不断扩展、连接，使晶界密度相对较高的三叉晶界区域最先受到侵蚀，进而降低了合金的耐蚀性.当浸泡时间延长至 7 h 时，样品腐蚀非常严重，绝大部分晶界均发生明显的晶间腐蚀(图 5b).

2.4　晶间腐蚀与晶界特征分布的相关性

为探究再结晶态 7075 铝合金晶界特征分布对晶间腐蚀的敏感性，选取不少于 300 个晶界的腐蚀情况进行统计分析.图 6 为该合金在 NaCl 溶液中分别浸泡 1.5、7 h 后，不同类型晶界的腐蚀比例统计结果.由图可知，浸泡 1.5 h 时，Σ1 晶界、低 ΣCSL(Σ3～29)晶界和大角度晶界的腐蚀比例分别为 23.81%、35.90%和 38.60%.当浸泡时间延长至 7 h 时，3 类晶界的腐蚀比例分别上升至 66.67%、76.92%和 91.49%.结果表明，在不同腐蚀时长下，再结晶态 7075 铝合金各类晶界的耐腐蚀性能表现出相同的规律：Σ1 晶界的耐蚀性

最好，大角度晶界的耐蚀性最差；3 类晶界的耐蚀性由高到低依次为 Σ1、低 ΣCSL(Σ3～29)、大角度晶界.同时可发现，随着浸泡时间的延长，大角度晶界的腐蚀比例增长速率显著优于 Σ1 晶界与低 ΣCSL 晶界，这与不同类型晶界的晶界能密切相关.一般而言，Σ1 型晶界的晶界能很低，通常不易被腐蚀；相反，大角度晶界的晶界能相对较高，约为 0.5～0.6 J/m^2，热力学稳定性较差，在腐蚀环境中更易成为发生腐蚀反应的活性位点，进而加速腐蚀进程.此外，大角度晶界通常具有更开放、更无序的原子排列结构，为腐蚀介质的渗透和腐蚀产物的扩散提供了快速通道，进而加剧了其腐蚀敏感性.



a.1.5 h；b.7 h.

图 5　再结晶态 7075 铝合金腐蚀不同时间的金相表面形貌

Fig.5　Metallographic surface morphologies of recrystallized 7075 aluminum alloy after corrosion for different durations

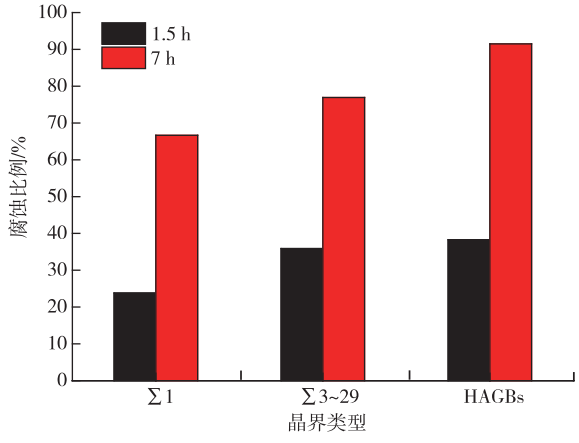


图 6　再结晶态 7075 铝合金不同晶界浸泡不同时间后的腐蚀比例

Fig.6　Corrosion fractions of different grain boundaries in recrystallized 7075 aluminum alloy after immersion for different durations

3　结　论

随着再结晶热处理温度和保温时间的延长，7075 铝合金再结晶程度趋于完全，晶粒尺寸不断均匀化，晶粒逐渐转变为等轴晶粒.其中 540 ℃保温 3 h、空冷条件下，合金可实现最优完全再结晶；在 25 ℃、pH＝2、质量分数为 3.5%的 NaCl 溶液中，随着浸泡时间的延长，7075 铝合金各类型晶界的晶间腐蚀程度均呈加剧趋势，其中大角度晶界腐蚀增长速率最快，其耐蚀性显著劣于 Σ1 晶界和低 ΣCSL(Σ3～29)晶界.本研究明确了 7075 铝合金晶界特征分布与晶间腐蚀行为的内在关联，为后续通过调控晶界结构改善该合金耐蚀性能提供了实验依据与理论支撑.

参考文献：

[1]　Shen Y H，Zhang Y P，Liu X Y，et al.Enhanced long-term seawater corrosion resistance of 7075 Al via defect-sealing silane layer on rapidly deposited cathodic plasma electrolytic Al_2O_3 coating[J].Ceramics International，2025，51(26)：49734-49744.DOI：10.1016/j.ceramint.2025.08.212.

[2]　Yang J D，Zhao Y T，Kai X Z，et al.Synergistic enhancement of in-situ（Al_2O_3＋ZrB_2）nanoparticles and Er on micro-

structure and stress corrosion resistance of 7075 Al matrix composites[J].Journal of Materials Research and Technology,2025,36:6542-6554.DOI:10.1016/j.jmrt.2025.04.287.

[3] 沈耀红.冷轧与热处理对 7075 铝合金微观组织结构的影响[D].重庆:重庆大学,2011.
Shen Yaohong.The influence on the microstructure of 7075 aluminum alloy during cold-rolled and heat treatment[D].Chongqing:Chongqing University,2011.

[4] Watanabe T.An approach to grain boundary design for strong and ductile polycrystals[J].1984,11(1):47-84.

[5] Jia Z P,Guan X J,Wang D Q Q,et al.A novel surface grain boundary engineering approach to improving corrosion resistance of a high-N and Ni-free austenitic stainless steel[J].Corrosion Science,2024,233:112110.DOI:10.1016/j.corsci.2024.112110.

[6] Shi F,Tian P C,Jia N,et al.Improving intergranular corrosion resistance in a nickel-free and manganese-bearing high-nitrogen austenitic stainless steel through grain boundary character distribution optimization[J].Corrosion Science,2016,107:49-59.DOI:10.1016/j.corsci.2016.02.019.

[7] Liang H L,Dong N,Zhang C L,et al.Enhancing the corrosion resistance of high Mo S31254 super austenitic stainless steel using grain boundary engineering[J].Materials Today Communications,2024,39:109196.DOI:10.1016/j.mtcomm.2024.109196.

[8] Prithiv T S,Bhuyan P,Pradhan S K,et al.A critical evaluation on efficacy of recrystallization vs. strain induced boundary migration in achieving grain boundary engineered microstructure in a Ni-base superalloy[J].Acta Materialia,2018,146:187-201.DOI:10.1016/j.actamat.2017.12.045.

[9] Zhang C C,Lu Z,Chu G N,et al.Recrystallization behavior and grain boundary character evolution in an additively manufactured Ni-based GH4099 alloy during heat treatment[J].Journal of Alloys and Compounds,2025,1026:180465.DOI:10.1016/j.jallcom.2025.180465.

[10] Hu H L,Li J W,He W W,et al.Effects of thermo-mechanical processing on the microstructure of Inconel 617 alloy[J].Materials Today Communications,2025,42:111574.DOI:10.1016/j.mtcomm.2025.111574.

[11] Wang Z G,Song C M,Zhang Y H,et al.Effects of yttrium addition on grain boundary character distribution and stacking fault probabilities of 90Cu10Ni alloy[J].Materials Characterization,2019,151:112-118.DOI:10.1016/j.matchar.2019.02.040.

[12] Chen Z P,Yang Y,Lou H F,et al.Effect of thermomechanical processing on the grain boundary character distribution of phosphorus bronze[J].Materials Characterization,2024,217:114401.DOI:10.1016/j.matchar.2024.114401.

[13] Guan X J,Shi F,Ji H M,et al.Gain boundary character distribution optimization of Cu-16at.% Al alloy by thermomechanical process:critical role of deformation microstructure[J].Materials Science and Engineering:A,2019,765:138299.DOI:10.1016/j.msea.2019.138299.

[14] Wang C,Yin J,He J Y,et al.Effect of grain boundary engineering on electrochemical and intergranular corrosion of 316L stainless steel[J].Corrosion Science,2025,254:113050.DOI:10.1016/j.corsci.2025.113050.

[15] Xia S,Zhou B X,Chen W J.Effect of single-step strain and annealing on grain boundary character distribution and intergranular corrosion in alloy 690[J].Journal of Materials Science,2008,43(9):2990-3000.DOI:10.1007/s10853-007-2164-y.

[16] 姜涛,付少利,董健龙.B10 白铜晶界特征分布对耐腐蚀性能的影响[J].有色金属材料与工程,2023,44(1):15-23.DOI:10.13258/j.cnki.nmme.2023.01.003.
Jiang Tao,Fu Shaoli,Dong Jianlong.Effect of grain boundary characteristic distribution on corrosion resistence performance of B10 cupronickel[J].Nonferrous Metal Materials and Engineering,2023,44(1):15-23.

[17] Kim S H,Erb U,Aust K T,et al.Grain boundary character distribution and intergranular corrosion behavior in high purity aluminum[J].Scripta Materialia,2001,44(5):835-839.DOI:10.1016/S1359-6462(00)00682-5.

[18] Mondou E,Proietti A,Charvillat C,et al.Understanding the mechanisms of intergranular corrosion in 2024 Al alloy at the polycrystal scale[J].Corrosion Science,2023,221:111338.DOI:10.1016/j.corsci.2023.111338.

[19] Birbilis N,Buchheit R G.Electrochemical characteristics of intermetallic phases in aluminum alloys[J].Journal of the Electrochemical Society,2005,152(4):B140.DOI:10.1149/1.1869984.

[20] Svenningsen G,Larsen M H,Walmsley J C,et al.Effect of artificial aging on intergranular corrosion of extruded AlMgSi alloy with small Cu content[J].Corrosion Science,2006,48(6):1528-1543.DOI:10.1016/j.corsci.2005.05.045.

[21] Song F X,Zhang X M,Liu S D,et al.The effect of quench transfer time on microstructure and localized corrosion behavior of 7050-T6 Al alloy[J].Materials and Corrosion,2014,65(10):1007-1016.DOI:10.1002/maco.201307192.

(责任编辑　张　会)