

铝铜合金晶间腐蚀防护研究进展

陈 松,冯欣颖,洪丽华,王卫国

(福建理工大学,福州 350118)

摘 要: 综述了稀土元素掺杂、表面涂层和晶界工程三种提高铝铜合金耐腐蚀性方法的研究现状,并对铝铜合金晶间腐蚀未来的研究方向进行了展望。通过晶界工程提高近奇异晶界的比例,从而改善铝铜合金的抗晶界腐蚀性能,对铝铜合金的有效防护提供了参考意义。

关键词: 铝铜合金;晶间腐蚀;元素掺杂;表面涂层;晶界工程

中图分类号: TG174 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-748X(2025)03-0062-06

材料作为国防安全、经济建设和社会发展的物质基础,服务于人民生活、国民经济等诸多领域,支撑整个社会经济和国防建设^[1]。伴随着新兴产业的快速发展,我国已成为世界上最大的铝生产和消费国,铝合金已逐渐成为仅次于钢铁的第二大金属结构材料。其中,2 系铝铜合金材料因具有高比强度等优良性能逐渐成为重要的工程材料之一,已被广泛应用于各个领域,尤其在交通运输、石油化工、电气建筑、航空航天等领域发挥着不可替代的作用。然而,铝铜合金存在明显缺点,即在自然环境因素作用下易出现各类腐蚀问题(如大气腐蚀、海水腐蚀、土壤腐蚀等)。铝铜合金被腐蚀后会在外观色泽及使用性能等方面发生变化,而且其腐蚀具有隐蔽性强和突发性高的特点,这不仅严重威胁人民的生活安全,同时也大大缩短材料的服役寿命,对社会经济的发展造成严峻挑战。据统计 2014 年,我国全行业腐蚀总成本为 21 278.2 亿元,占国民生产总值(GDP)的 3.34%,平均每人需承担的腐蚀成本为 1 555 元^[2]。

铝铜合金局部腐蚀类型主要有小孔腐蚀、晶间腐蚀和应力腐蚀等^[3],在实际工况下,这三种腐蚀会同时出现,且都与晶界析出行为有关。当晶界处析出物的电位与基体相差较大时,易形成点蚀;当析出物沿晶界连续析出形成网状结构时,易形成晶间腐

蚀;当析出物沿晶界析出且体积膨胀而产生应力时,易形成应力腐蚀。因此,调整晶界类型,控制晶界的析出行为有利于改善铝铜合金的腐蚀问题。其中,铜元素作为铝铜合金的主要合金元素之一,可调控晶界析出相、无沉淀析出带及晶内的电位差,从而提高合金的抗腐蚀能力。但在固溶作用下铝铜合金中的铜元素会出现分布不均,晶内与晶界附近的铜原子浓度差异形成腐蚀电位差,导致晶间腐蚀。笔者根据现有实验室以及现场调研的研究结果,从稀土元素掺杂、表面涂层和晶界工程三方面,综述了提高铝铜合金耐腐蚀性能的方法,并对未来的铝铜合金晶间腐蚀研究方向进行了展望。

1 稀土元素掺杂

稀土元素包括钐、铈、镧系 17 种元素,由于 4f 和 5d 轨道的特殊性,其具有光、电、磁等优异性能^[4]。稀土元素最外层电子结构的特殊性使其化学性质比较活泼,能与铝元素形成稳定的金属间化合物,起到细化组织的作用^[5]。我国丰富的稀土资源为发展稀土工业创造了得天独厚的条件,也为稀土在我国经济各方面的应用奠定了坚实的物质基础^[6]。当前,随着稀土元素合金化理论的不断发展和稀土元素提纯技术的改进,添加一定量的稀土元素成为提高铝铜合金耐腐蚀性能的高效方法。

郑玉林等^[7]研究了稀土元素 Yb 添加量分别为 0%(质量分数)和 0.2%(质量分数)的 2519A 铝合金在 165 °C 下经时效处理后的晶间腐蚀行为。结果表明,不含和含 Yb 合金的晶间腐蚀最大深度分别为 80 μm 和 65 μm ,可见添加适量 Yb 能够提高铝铜合金的晶间腐蚀抗力。KAIRY 等^[8]以 2XXX 系

收稿日期:2024-01-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51971063);福建省自然科学基金(2021J011076)

通信作者:陈 松(1984—),讲师,博士,主要从事晶界工程方面及计算模拟的研究工作,18159493380,gxchensong@126.com

列中的 Al-4%Cu 铝铜合金为研究对象,分析了添加 0.1%(质量分数)Sc 和 0.13%(质量分数)Zr 的合金(Al-Cu-Sc-Zr)与原始合金(Al-Cu)的腐蚀行为。结果表明:浸泡 7 d 后,两种添加稀土元素的合金表面凹坑深度分别为 200 μm 和 132 μm , Al-Cu 表面凹坑直径大于 Al-Cu-Sc-Zr, Al-Cu-Sc-Zr 的凹坑总数高于 Al-Cu,综合凹坑数量、尺寸和深度可见, Al-Cu 的点蚀损伤程度大于 Al-Cu-Sc-Zr。吴立凡等^[9]以 2A12 铝合金为研究对象,分别添加了 0%(质量分数)与 0.25%(质量分数)Ce,利用室内周期浸润腐蚀加速试验模拟酸性严苛的海洋环境,采用失重法测量试样的腐蚀质量损失。结果显示,添加稀土元素 Ce 后,合金的质量损失量明显降低,阻抗模值显著提高,腐蚀产物减少且腐蚀锈层有所减薄。

综上所述,虽然添加少量稀土元素能够在一定程度上提高合金表面膜的致密性,减少晶间腐蚀的最大深度进而提高合金的耐腐蚀性能。然而,在筛选稀土元素过程中,矿物本身性质复杂,需具备极高要求的选矿技术,且稀土元素提纯工艺相对复杂,这大大增加了产品整体成本。

2 表面涂层

自然环境中,铝铜合金表面膜多孔、分布不均,且耐蚀性差,多数腐蚀都优先开始于材料表面。为了解决这类腐蚀问题,最经济有效的方式是对铝铜合金进行表面处理,从而获得具备良好性能的人工膜。目前,主流的表面防护技术有阳极氧化阴极保护技术、激光熔覆技术、添加缓蚀剂、表面制备环保耐蚀涂层^[10]。

丁永志等^[11]以 2A12 铝合金为研究对象,在其表面制备石墨烯富镁涂层,通过盐雾试验、附着力测试和加速腐蚀试验,综合评估了该涂层的耐蚀性。结果显示,涂层附着力大于 18 MPa,耐中性盐雾时长大于 3 000 h,经 10 个周期加速腐蚀试验后涂层未起泡,也未发生腐蚀。这说明 2A12 铝合金基材与石墨烯富镁涂层结合较好,此工艺对海洋环境中 2A12 铝合金的腐蚀防护应用提供了一定的参考价值。黄绎等^[12]以 2024 铝合金为研究对象,采用溶胶-凝胶工艺在其表面制备具有单层与双层结构的 SiO₂ 陶瓷涂层,利用扫描电镜、电化学阻抗谱和中性盐雾试验对涂层的微观形貌和耐蚀性进行了分析。结果显示,经 56 d 浸泡后单层结构的 SiO₂ 陶

瓷涂层的微观结构保持较为完整,未出现裂纹及腐蚀点,双层结构的 SiO₂ 陶瓷涂层维持稳定状态,表面薄膜更加致密,这极大地提高了涂层的腐蚀介质屏蔽作用,使得涂层具有更好的防护耐久性。孙源等^[13]以 2024-T6 铝合金为研究对象,先采用 Hummer's 法在其表面制备氧化石墨烯(GO),再通过电镀法制备 Ni/GO 涂层,利用红外光谱、扫描电镜、X 射线衍射仪分析了涂层的微观组织结构、元素构成和相组成,采用模拟盐水泥浆环境用电化学工作站进行电化学阻抗谱和动电位极化曲线测试。结果表明,与 GO 涂层相比,在不同腐蚀时间下, Ni/GO 涂层的腐蚀电流密度均更低,表明采用电镀方式制备的 Ni/GO 涂层可较大程度地提高 2024-T6 铝合金的耐腐蚀性能。宿辉等^[14]通过无铬、无氟的直接化学镀工艺在 2024 铝合金表面制备 Ni-P 合金镀层,并将镀层置于 3.5%(质量分数)NaCl 溶液中进行电化学测试。结果表明,无镀层 2024 铝合金的腐蚀电位和腐蚀电流密度分别为 -0.72 V 和 3.3×10^{-2} A/cm²,有镀层 2024 铝合金的腐蚀电位和腐蚀电流密度分别为 -0.43 V 和 4.8×10^{-5} A/cm²。由于致密、均匀的非晶态 Ni-P 合金镀层能够抵挡溶液中半径较小、穿透性较强的离子,有 Ni-P 合金镀层的铝合金表现出更加优异的耐蚀性。

上述表面涂层制备技术在很大程度上改善了铝铜合金基体的耐蚀性,但制备的涂层较薄,在长期服役过程中,一旦出现褶皱、孔洞和裂缝等缺陷则会加速相应部位金属基体的腐蚀。

3 晶界工程

铝铜合金的抗晶间腐蚀性能主要取决于材料的微观成分和晶界特征分布两个因素^[15]。上述的稀土元素掺杂和表面处理技术均未改变材料自身的结构特性,未能从根本上解决材料本身的腐蚀问题。材料的晶界特征分布是定量描述晶界类型及数量的重要指标,晶界类型不同,材料的耐腐蚀性能也不同。因此,了解晶界特征分布有利于深入分析材料的腐蚀行为。目前主要的晶界特征表征手段是电子背散射衍射(EBSD)技术,该技术在测定晶体取向、显微结构及统计晶界结构参数等方面具有优势,极大推动了晶界工程的相关研究^[16]。晶界工程是指基于晶界特征分布先确定耐蚀性良好的特殊晶界,再通过调控合金化、形变和热处理等方式增加多晶材料中特殊晶界的比例,使材料的晶界失效抗力显

著提高^[17-18]。例如,贺添一等^[18]研究了2050铝合金厚板经过晶界工程处理后的微观结构和抗晶间腐蚀性能,建立了不同层的抗晶间腐蚀性能与其微观组织形态的联系。结果发现,从表层到中心层,随着晶粒尺寸的逐渐增大,其抗晶间腐蚀性能逐渐下降。

由于中低层错能面心立方金属材料(如铜合金^[19]、镍基合金^[20]、奥氏体不锈钢^[21])在形变热处理过程中容易形成大量的退火孪晶,晶界工程的研究多围绕这些材料展开。研究表明,材料内部大尺寸互有 Σ 取向关系的晶粒团簇是打断随机晶界网络连通性的关键,有利于提高材料的抗晶间腐蚀性能^[22]。但铝铜合金属于高层错能面心立方金属,生成共格孪晶的能力相较于中低层错能面心立方金属较弱,无法通过热处理方法引入大量的共格孪晶,传统的晶界工程已不再适用。研究还表明,铝铜合金存在一类晶界,其晶界能较低具有较强的腐蚀抗力,同时容易生成,为区别于共格孪晶界,称之为近奇异晶界。BOUNCHET等^[23]研究发现,近奇异晶界对硫的偏聚量有控制作用,一般平均面间距越大的晶

界,硫越不容易产生偏聚。

晶界作为一种面缺陷,需要通过两个晶界面自由度和三个取向关系自由度,共五个微观自由度才能完全定义^[22]。绝大多数研究者进行的传统晶界工程研究仅涉及晶界取向差中的三个自由度,未能考虑到晶界界面的影响。为此,WANG等^[24]基于五参数分析法(FPA)提出了“晶界面匹配”的表征方法,对传统的三参数分析法进行了界面参数的补充,该方法能够更加全面地表征晶界结构特征。大致流程如下:通过EBSD技术获取大量晶界相关数据,然后根据特定轴角过滤以确定取向差,基于FPA显示高频晶界面指数,最后观察高频点晶面是否满足轴角过滤的取向关系,若满足即完成晶界面匹配,其中FPA原理如图1所示。WANG等^[24]基于FPA对高纯铝进行多向热锻及再结晶退火处理后,发现固定取向差下高纯铝中的晶界面特征分布不是完全随机态的,而是表现为满足 $\{111\}/\{111\}$ 界面匹配规律的发生频率最高,表明高纯铝中存在 $\{111\}/\{111\}$ 界面匹配特征的近奇异晶界。

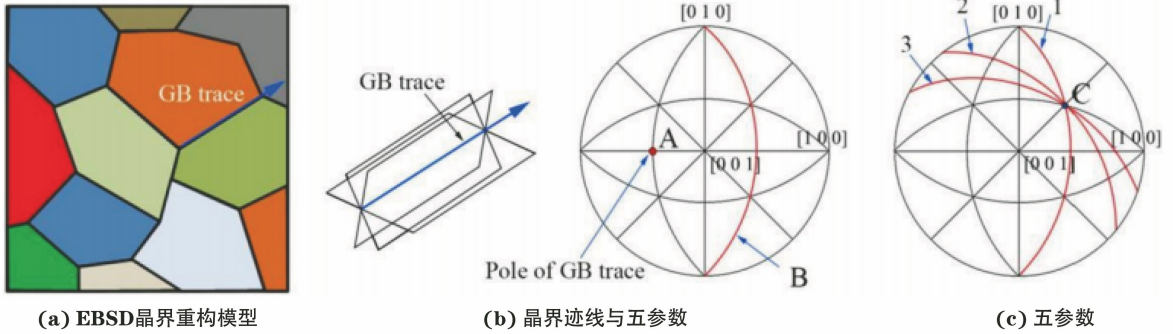


图1 FPA原理示意^[24]

Fig.1 Schematic diagram of FPA: (a) EBSD grain boundary reconstruction model; (b) grain boundary traces and five parameters; (c) five parameters

刘智强^[25]以组织均匀化处理后的Al-1.2%Cu铝铜合金为试验对象,研究不同轧制变形量对该合金中 $\Sigma3$ 晶界的影响。结果表明,随轧制变形量的增加,该合金中初始状态的 $\Sigma3$ 晶界(即取向差为 60° 晶界)比例呈现明显的规律性变化:当轧制变形量从10%增加到20%时,再结晶 $\Sigma3$ 晶界比例从初始状态的13%增至最高值32%;当轧制变形量从20%增加到30%时,再结晶 $\Sigma3$ 晶界比例开始降低,这说明再结晶退火前冷轧变形量能显著影响铝铜合金中再结晶 $\Sigma3$ 晶界的比例。

杜阿华^[26]研究了铝铜合金中 $\{111\}/\{111\}$ 近奇异晶界的形成规律及其析出和腐蚀行为。结果表明,轧制变形量和温度的选择对铝铜合金中再结晶

$\{111\}/\{111\}$ 近奇异晶界的形成有显著影响; $\{111\}/\{111\}$ 近奇异晶界的比例随着轧制变形量的增加而增大,但相较于室温冷轧,在 350°C 热轧的铝铜合金 $\{111\}/\{111\}$ 近奇异晶界的比例更高。对比铝铜合金奇异晶界、近奇异晶界处与一般晶界处的析出行为,结果如图2所示,可见一般晶界处的析出相连续析出,近奇异晶界处不连续析出,奇异晶界处未析出,表明奇异晶界和近奇异晶界相对于一般晶界具有良好的抗腐蚀能力。

蔡长辉^[27]在研究不同因素对7A85铝合金中近奇异晶界的影响时,同样出现 $\{111\}/\{111\}$ 界面匹配特征的晶界,并分析了近奇异晶界对第二相析出的抑制作用。结果表明:通过形变热处理可以

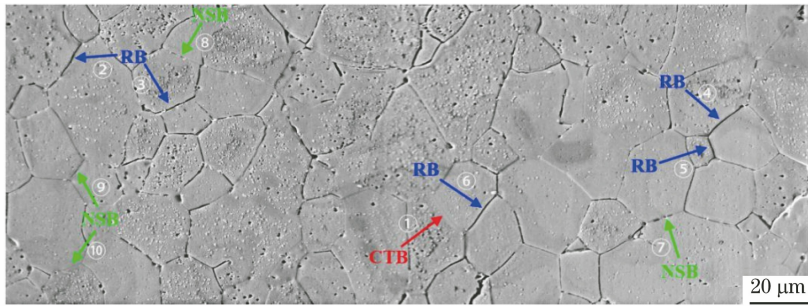
图2 铝铜合金中各种类型晶界的晶间腐蚀形貌^[26]

Fig. 2 Intercrystalline corrosion morphology of various grain boundaries in Al-Cu alloy samples

提高超高强铝合金中近奇异晶界的含量;在已组织均匀化处理的7A85合金基础上进行了470℃保温1h处理后,不同晶界析出相的析出行为与晶界能密切相关,即晶界能越低,晶界越不容易析出第二相粒子。刘光辉等^[28]在应变速率为 0.001 s^{-1} 的条件下,研究了不同压缩温度对Al-Zn-Mg-Cu合金中 $\{111\}/\{111\}$ 近奇异晶界的影响。结果表明,随压缩温度由450℃提升到520℃,合金中 $\{111\}/\{111\}$ 近奇异晶界的比例相应提高,在经520℃压缩的合金中,以小角度晶界为主的细晶组织中 $\{111\}/\{111\}$ 近奇异晶界的比例达到8.77%,以大角度为主的粗晶组织中 $\{111\}/\{111\}$ 近奇异晶界的比例达到4.53%。

4 结束语

本文主要讨论铝铜合金在实际工况中的腐蚀类型,以2系铝铜合金最易发生的晶间腐蚀现象为切入点,着重回顾近年来有关铝铜合金晶间腐蚀问题的研究进展以及提高铝铜合金腐蚀抗力的方法,同时阐述了晶界工程在提高铝铜合金耐腐蚀性能上的应用前景。晶界工程概念最早是在1984年由KRONBERG等^[29]提出,经长期的理论研究发展和EBSD技术的成熟,已形成“晶界工程”研究领域,并成功应用于奥氏体不锈钢、镍基合金、铜合金、铝合金等材料。

通过晶界工程可以通过调控材料内部组织来提高特殊晶界比例和优化晶界特征分布,从而显著提高其耐腐蚀性能。相较于其他方法,晶界工程有望从根本上解决铝铜合金的腐蚀问题,成为今后的主要研究趋势之一。

参考文献:

[1] 谢曼,干勇,王慧. 面向2035的新材料强国战略研究[J]. 中国工程科学,2020,22(5):1-9.

XIE M, GAN Y, WANG H. Research on new material power strategy by 2035[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(5):1-9.

[2] 侯保荣. 腐蚀成本与经济发展[J]. 中国科技产业, 2020(2):21-22.

HOU B R. Corrosion cost and economic development [J]. Science & Technology Industry of China, 2020(2):21-22.

[3] 黄元伟. 铝和铝合金的腐蚀及其影响因素的评述[J]. 上海有色金属, 2012, 33(2):89-95.

HUANG Y W. Review on corrosion of aluminum and aluminum alloys and the influencing factors [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2012, 33(2):89-95.

[4] 林德源,李一,陈云翔,等. 稀土在铝合金防腐中的应用[J]. 稀土, 2016, 37(6):121-127.

LIN D Y, LI Y, CHEN Y X, et al. Researches on the application of rare earths in anticorrosion of aluminum alloy[J]. Chinese Rare Earths, 2016, 37(6):121-127.

[5] 邵晓曦,皮丕辉,郑大锋,等. 稀土在涂料中的应用研究[J]. 涂料工业, 2009, 39(8):55-58.

TAI X X, PI P H, ZHENG D F, et al. Study of rare earth in coatings and its application [J]. Paint & Coatings Industry, 2009, 39(8):55-58.

[6] 胥锴,刘政,刘萍. 稀土在铝及铝合金中的应用现状与展望[J]. 有色金属加工, 2005, 34(5):10-14, 36.

XU K, LIU Z, LIU P. Current situation and prospect of rare earth application in aluminum and aluminum alloys[J]. Nonferrous Metals Processing, 2005, 34(5):10-14, 36.

[7] 郑玉林,暨波,叶凌英,等. 稀土镱对2519A铝合金抗晶间腐蚀性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(12):4806-4810.

ZHENG Y L, JI B, YE L Y, et al. Effect of rare earth ytterbium on intergranular corrosion resistance of 2519A aluminum alloy[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(12):

- 4806-4810.
- [8] KAIRY S K, ROUXEL B, DUMBRE J, et al. Simultaneous improvement in corrosion resistance and hardness of a model 2xxx series Al-Cu alloy with the microstructural variation caused by Sc and Zr additions [J]. *Corrosion Science*, 2019, 158:108095.
- [9] 吴立凡,李涛,赵慧颖,等. 稀土元素 Ce 对 2A12 铝合金在苛刻环境中腐蚀性能的影响[J]. *稀有金属*, 2019, 43(12):1269-1274.
- WU L F, LI T, ZHAO H Y, et al. Influence of Ce on corrosion resistance of 2A12 aluminum alloy in harsh marine atmospheric [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2019, 43(12):1269-1274.
- [10] 孙鹏,董劲,黄惠,等. 铝合金表面防腐涂层的研究进展[J]. *上海涂料*, 2023, 61(3):52-61.
- SUN P, DONG J, HUANG H, et al. Research progress of aluminum alloy anticorrosive coating[J]. *Shanghai Coatings*, 2023, 61(3):52-61.
- [11] 丁永志,刘元海,慕仙莲,等. 2A12 铝合金表面石墨烯富镁涂层性能研究[J]. *航空科学技术*, 2021, 32(9):57-62.
- DING Y Z, LIU Y H, MU X L, et al. Properties of graphene magnesium-rich coating on 2A12 aluminum alloy[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2021, 32(9):57-62.
- [12] 黄绎,李跃,吴春春,等. 2024 铝合金表面 SiO₂ 陶瓷涂层制备及其耐腐蚀行为[J]. *材料科学与工程学报*, 2022, 40(6):915-922, 955.
- HUANG Y, LI Y, WU C C, et al. Preparation of SiO₂ ceramic coatings on 2024 aluminum alloy substrate and study on their anticorrosive behavior[J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2022, 40(6):915-922, 955.
- [13] 孙焜,罗彦,王旭敏,等. 2024-T6 铝合金表面电镀镍/氧化石墨烯涂层的耐蚀性能[J]. *材料保护*, 2019, 52(8):15-23, 44.
- SUN Y, LUO Y, WANG X M, et al. Corrosion resistance of Ni/GO coatings electrodeposited on 2024-T6 aluminum alloy surface [J]. *Materials Protection*, 2019, 52(8):15-23, 44.
- [14] 宿辉,张迎,原小寓,等. 2024 铝合金直接化学镀镍工艺及镀层性能[J]. *电镀与涂饰*, 2023, 42(1):24-30.
- SU H, ZHANG Y, YUAN X Y, et al. Direct electroless nickel plating on 2024 aluminum alloy and properties of the coating [J]. *Electroplating & Finishing*, 2023, 42(1):24-30.
- [15] 李蕊. 铝合金晶界特征与耐蚀性的相关性[D]. 沈阳:沈阳大学, 2016.
- LI R. Correlation between grain boundary characteristics and corrosion resistance of aluminum alloy[D]. Shenyang: Shenyang University, 2016.
- [16] 王卫国. 电子背散射衍射技术在晶界工程中的应用[J]. *中国体视学与图像分析*, 2007, 12(4):239-245.
- WANG W G. Application of EBSD technique in grain boundary engineering [J]. *Chinese Journal of Stereology and Image Analysis*, 2007, 12(4):239-245.
- [17] 王卫国,周邦新. “晶界工程”若干关键问题[C]//第十一届中国体视学与图像分析学术会议. 宁波:[出版者不详], 2006.
- [18] 贺添一,邓运来,张劲. 2050 铝合金厚板的晶间腐蚀行为研究[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(8):33-37.
- HE T Y, DENG Y L, ZHANG J. Research on intergranular corrosion behavior of 2050 aluminum alloy thick plate[J]. *Hot Working Technology*, 2021, 50(8):33-37.
- [19] 姜有东,袁媛,周江,等. 基于晶界工程技术提升纯铜抗晶间腐蚀性能的研究[C]//第十届全国腐蚀大会. 南昌:[出版者不详], 2019.
- [20] 冯万里. 晶界工程对镍基 690 合金耐晶间腐蚀性能的影响[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
- FENG W L. Effect of grain boundary engineering on intergranular corrosion resistance of nickel-based 690 alloy[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [21] 于耀,白琴,夏爽,等. 晶界工程处理对 316 和 316L 奥氏体不锈钢耐晶间腐蚀性能的影响[J]. *上海金属*, 2021, 43(3):13-18, 25.
- YU Y, BAI Q, XIA S, et al. Effect of grain boundary engineering treatment on intergranular corrosion resistance of 316 and 316L austenitic stainless steels [J]. *Shanghai Metals*, 2021, 43(3):13-18, 25.
- [22] 孙强,汪政,葛林,等. 面心立方金属材料晶界结构调控的研究现状及展望[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(8):2297-2315.
- SUN Q, WANG Z, GE L, et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(8):2297-2315.
- [23] BOUCHET D, PRIESTER L. Grain boundary plane and intergranular segregation in nickel-sulfur system [J]. *Scripta Metallurgica*, 1987, 21(4):475-478.
- [24] WANG W G, CAI C H, ROHRER G S, et al. Grain boundary inter-connections in polycrystalline aluminum with random orientation [J]. *Materials Characterization*, 2018, 144:411-423.
- [25] 刘智强. Al-Cu 二元合金再结晶晶界面分布及晶界面匹配研究[D]. 福州:福建工程学院, 2018.
- [26] 杜阿华. 铝铜合金再结晶近奇异晶界的形成及其析出

- 与腐蚀行为研究[D].福州:福建工程学院,2021.
- [27] 蔡长辉. 7A85 铝合金近奇异晶界研究[D].福州:福建工程学院,2019.
- [28] 刘光辉,王卫国, Gregory S Rohrer, 等. 高温压缩变形 Al-Zn-Mg-Cu 合金动态再结晶后的 $\{111\}/\{111\}$ 近奇异晶界[J]. 金属学报, 2024, 60(9): 1165-1178.
- LIU G H, WANG W G, ROHRER G, et al. $\{111\}/\{111\}$ near singular boundaries in a dynamically recrystallized Al-Zn-Mg-Cu alloy compressed at elevated temperature [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2024, 60(9): 1165-1178.
- [29] KRONBERG M L, WILSON F H. Secondary recrystallization in copper[J]. JOM, 1949, 1(8): 501-514.

Research Progress on Intergranular Corrosion Protection of Aluminum-Copper Alloys

CHEN Song, FENG Xinying, HONG Lihua, WANG Weiguo

(Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The research status of three treatment methods for improving the corrosion resistance of Al-Cu alloy, including rare earth element doping, surface coating and grain boundary engineering is reviewed, and the future research direction of Al-Cu alloy intergranular corrosion is prospected. Through grain boundary engineering, the proportion of near singular grain boundaries is increased, so as to improve the grain boundary corrosion resistance of Al-Cu alloy, which provides a reference for the effective protection of Al-Cu alloy.

Key words: aluminium copper alloy; intergranular corrosion; element doped; surface coated; grain boundary engineering

好书推荐

《现代材料腐蚀与防护》一书于2012年9月由上海交通大学出版社出版,全国发行。该书共分11章,依次为绪论,材料腐蚀过程热力学,腐蚀反应动力学,金属与合金的氧化与热腐蚀,金属材料的全面腐蚀与钝化,金属材料的局部腐蚀,金属材料在应力作用下的腐蚀,金属材料在自然环境和化工介质中的腐蚀与防护,非金属材料的腐蚀与防护,高科技领域中材料的腐蚀,材料腐蚀的防护技术。

本书涉及的内容较为广泛,全面系统的阐述了材料(金属与非金属)腐蚀的基本原理,腐蚀破坏的各种形式和防护技术,重点讨论了航空航天领域、核电工业、新能源和生物医药工程中出现的材料发生问题和应对措施。本书既可以作为材料科学与工程专业的教材,又可以供从事材料设计和研发的有关工程技术人员参考使用。

《现代材料腐蚀与防护》由上海交通大学黄永昌教授、内蒙古科技大学张建旗教授担任主编,上海材料研究所杨武研究员担任主审,并有中科院上海微系统与信息技术研究所(原上海冶金所)黄元伟研究员、华东理工大学潘洪良教授、上海材料研究所李光福教授级高工参与编写。