

微弧氧化膜对 7050 铝合金氢致局部塑性变形的影响

蒋子秋^{a,b}, 宋仁国^{a,b}, 王超^b, 姜波^b

(常州大学 a.材料科学与工程学院

b.江苏省材料表面科学与技术重点实验室, 江苏 常州 213164)

摘 要: 目的 改善 7050 铝合金在湿空气中氢致延迟开裂敏感性高的问题, 以延长其使用寿命。方法 采用微弧氧化工艺在铝合金表面生成微弧氧化膜, 研究微弧氧化膜对高强铝合金氢致局部塑性变形的影响。通过双悬臂梁 (DCB) 试样恒位移试验, 评价微弧氧化膜对 7050 铝合金应力腐蚀敏感性的影响, 通过读数显微镜原位观察和记录裂纹扩展情况。利用扫描电镜观察断口形貌, 采用定氢仪分析氢含量。结果 经过微弧氧化处理后, 7050 铝合金氢致局部塑性变形行为明显下降。测得有微弧氧化膜试样的应力腐蚀开裂门槛值 K_{ISCC} 为 $23.340 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, 而无微弧氧化膜试样的 K_{ISCC} 为 $16.934 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。有膜的裂纹扩展速率为 $6.378 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, 无膜的裂纹扩展速率为 $1.3612 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。同时微弧氧化膜使铝合金 DCB 试样中氢的体积分数从 0.281×10^{-6} 下降到 0.163×10^{-6} 。结论 微弧氧化膜可以降低铝合金裂纹尖端的氢含量, 从而抑制铝合金的氢致局部塑性变形。

关键词: 7050 铝合金; 微弧氧化膜; 氢致局部塑性变形; 氢含量; 裂纹扩展

中图分类号: TG174.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2020)08-0029-05

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.08.004

Effect of Micro-arc Oxidation Coating on Hydrogen Induced Local Plastic Deformation in 7050 Aluminum Alloy

JIANG Zi-qiu^{a,b}, SONG Ren-guo^{a,b}, WANG Chao^b, JIANG Bo^b

(a.School of Materials Science and Engineering, b.Jiangsu Key Laboratory of Materials Surface Science and Technology, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problem of high susceptibility of 7050 aluminum alloy to hydrogen induced delayed cracking in humid air, so as to extend its service life. Micro-arc oxidation (MAO) coating was formed on the surface of 7050 aluminum alloy by micro-arc oxidation process to study the effect of MAO coating on hydrogen induced local plastic

收稿日期: 2020-06-19; 修订日期: 2020-07-20

Received: 2020-06-19; Revised: 2020-07-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51871031)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51871031)

作者简介: 蒋子秋 (1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为铝合金应力腐蚀与氢脆。

Biography: JIANG Zi-qiu (1995—), Male, Master, Research focus: stress corrosion and embrittlement of aluminum alloy.

通讯作者: 宋仁国 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料腐蚀与防护、表面工程、计算材料科学等。邮箱: songrg@hotmail.com

Corresponding author: SONG Ren-guo (1965—), Male, Doctor, Professor, Research focus: corrosion and protection of material, surface engineering, computational materials science, etc. E-mail: songrg@hotmail.com

引文格式: 蒋子秋, 宋仁国, 王超, 等. 微弧氧化膜对 7050 铝合金氢致局部塑性变形的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 29-33.

JIANG Zi-qiu, SONG Ren-guo, WANG Chao, et al. Effect of Micro-arc oxidation coating on hydrogen induced local plastic deformation in 7050 aluminum alloy[J]. Surface technology, 2020, 49(8): 29-33.

deformation in high-strength aluminum alloy. Through the double-cantilever beam (DCB) sample constant displacement test, the effect of the MAO coating on the stress corrosion susceptibility of 7050 aluminum alloy was evaluated, and the crack propagation was in-situ observed and recorded by metallographic microscope and reading microscope. The morphology of the fracture was observed by a scanning electron microscope (SEM), and the hydrogen content was analyzed with a hydrogen analyzer. After MAO treatment, the behavior of hydrogen induced local plastic deformation in 7050 aluminum alloy decreased significantly. The stress corrosion cracking threshold K_{ISCC} of the sample with MAO coating was $23.340 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$, while the K_{ISCC} of the sample without MAO coating was $16.934 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$. The crack growth rate of the MAO coating sample was $6.378 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, while that of the sample without MAO coating was $1.3612 \times 10^{-5} \text{ m/s}$. Meanwhile, the hydrogen content in the DCB sample with MAO coating reduced from 0.281×10^{-6} to 0.163×10^{-6} . The MAO coating can reduce the hydrogen content at the crack tip of aluminum alloy, thus restraining the hydrogen induced local plastic deformation.

KEY WORDS: 7050 aluminum alloy; micro-arc oxidation coating; hydrogen induced local plastic deformation; hydrogen content; crack propagation

7050 铝合金属于 Al-Zn-Mn-Cu 系高强铝合金, 该类合金强度高、比重小、焊接性能和加工性能良好, 被广泛应用于地面车辆、航空航天及航海领域^[1-3]。如汽车零部件、飞机仪表、齿轮涡轮。该类合金的应力腐蚀敏感性较低, 在服役过程中容易形成局部塑性变形, 且铝合金材料在断裂前没有明显的预兆, 存在十分严重的安全隐患^[4-6]。因此, 国内外学者针对铝合金应力腐蚀问题做了大量研究^[7-9]。金骥戎等^[10]研究了时效对 7050 铝合金应力腐蚀敏感性的影响, 结果表明, 随着时效时间的延长, 铝合金的临界应力强度因子 K_{ISCC} 随之增大。近年来, 微弧氧化 (micro-arc oxidation, MAO) 作为一种新型表面改性技术, 因其膜层附着力好, 耐磨性高, 耐腐蚀性好, 被广泛应用于生产、生活的各个领域^[11-13]。通过此项技术, 在铝合金等金属表面原位生长出陶瓷膜层, 此膜层与基体结合力牢固, 且有良好的耐热性、耐磨性和耐腐蚀性能, 能够有效地克服铝合金应力腐蚀敏感性高的缺陷^[14-16]。虽然通过微弧氧化工艺获得了良好的耐磨性和耐腐蚀性, 但关于微弧氧化膜对 7000 系铝合金氢致局部塑性变形的研究目前报道甚少^[17-18]。此外, 除了少量关于微弧氧化后的铝合金在腐蚀液中应力腐蚀开裂 (SCC) 的研究外^[19-20], 很少有学者定量地研究有关微弧氧化后的铝合金在湿空气中应力腐蚀开裂的门槛值。本文主要研究了有微弧氧化膜层的 7050 铝合金双悬臂梁 (DCB) 试样在湿空气 (相对湿度为 80%) 中的应力腐蚀开裂 (SCC) 行为。用金相显微镜原位观察裂纹扩展规律, 并计算出有微弧氧化膜的铝合金 DCB 试样在湿空气中的应力腐蚀开裂门槛值。采用扫描电子显微镜 (SEM) 对断口形貌进行了分析, 采用热导检测器计算出断口的氢含量, 研究了氢在铝合金 SCC 过程中所起的作用。初步探讨了微弧氧化膜对 7050 铝合金氢致局部塑性变形的影响。

1 试验

1.1 材料与 DCB 预裂纹试样制备

实验所用 7050 铝合金是由美国 Alcoa 公司所生产, 其化学成分 (以质量分数计) 为: Zn 6.42%, Mg 2.25%, Cu 2.02%, Mn 0.10%, Ti 0.03%, Cr 0.04%, Si 0.07%, Fe 0.11%, Al 余量。严格按照 GB 12445.1—90 的要求, 将 7050 铝合金板材用线切割机加工成 DCB 试样, 见图 1。裂纹预扩展方向为沿材料轧制方向。DCB 试样表面依次使用 400#、800#、1000#、1500#、2000# 砂纸打磨, 除去表面氧化膜和杂质, 然后使用丙酮清洗, 去除表面的油污, 再使用蒸馏水冲洗, 用吹风机吹干。用螺钉加载出 DCB 试样的预裂纹, 使试样预裂纹突进 1~2 mm, 试样表面用透明的涤纶胶带包裹, 使用石蜡和松香的 1:1 混合物封住试样的头部及螺栓部分后, 备用。

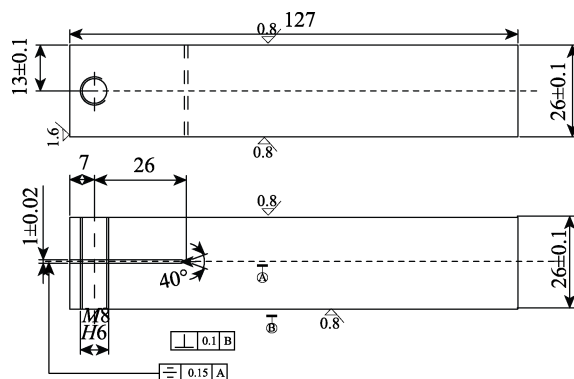


图 1 DCB 试样尺寸 (单位: mm)

Fig.1 Size of DCB sample (unit: mm)

1.2 微弧氧化膜层制备

微弧氧化系统包含 DSM30F 电源柜、操作控制台、工作槽以及冷却系统和搅拌系统。电解液由 10 g/L

的硅酸钠 (Na_2SiO_3)、1 g/L 的氟化钾 (KF) 和 5 g/L 的氢氧化钠 (NaOH) 组成。通过使用冷却系统将电解液温度控制在 30 °C 以下。在微弧氧化过程中, 试样挂在铜棒上, 作为工作的阳极, 阴极为电解池内的钢板, 电解液为工作的载体。微弧氧化是通过双向进行的恒压模式, 在 500 V 的恒定电压下进行, 恒定频率为 400 Hz, 微弧氧化时间为 10 min, 微弧氧化后的试样如图 2 所示。测得其微弧氧化膜厚为 22.5 μm 。将微弧氧化处理后的试样放入湿空气 (相对湿度为 80%) 中, 温度控制在 (35 ± 1) °C。用读数显微镜观察并记录裂纹扩展长度, 并用金相显微镜原位观察裂纹扩展情况。



图 2 微弧氧化后的 DCB 试样
Fig.2 DCB sample after micro-arc oxidation

1.3 性能测试及组织观察

1) 采用 MX6R 正置金相显微镜对裂纹扩展情况进行原位观察, 用读数显微镜测量并记录试样每天的裂纹长度。

2) 当 DCB 试样的裂纹扩展速率 da/dt 小于 10^{-7} mm/s 时, 结束实验, 将试样加载至断裂。采用 JSM-6510 扫描电镜对 DCB 试样断口形貌进行观察, 放大倍数为 500 倍。

3) 从 DCB 断裂样品中取裂纹扩展区的一部分, 加工成尺寸为 10 mm×2 mm×6 mm 的试样。样品在氩气氛中的低温下加热, 除去表面的氢, 然后加热到高温, 熔化样品, 所得气体为 CO_2 、 N_2 、 H_2 、 H_2O 。分离后, 样品中产生的氢通过氩气输送到热导检测器。直接读出氢气的体积, 根据样品体积计算氢气的含量。

2 结果与分析

2.1 微弧氧化膜对铝合金氢致局部塑性变形影响的原位观察

无微弧氧化膜与有微弧氧化膜的 DCB 恒位移试样在 RH 为 80% 的湿空气中的裂纹扩展情况如图 3 所示。图 3a、c、e 为无微弧氧化膜铝合金裂纹宏观形貌, 图 3b、d、f 为有微弧氧化膜铝合金裂纹宏观形貌。由图 3 可以看出, 裂纹扩展速率先快后慢, 同一时间, 有微弧氧化膜的铝合金试样的裂纹扩展速率明显小于无微弧氧化膜的铝合金试样。在裂纹扩展区, 裂纹呈黑色, 可以见到腐蚀产物和氧化现象, 具有脆性特征。

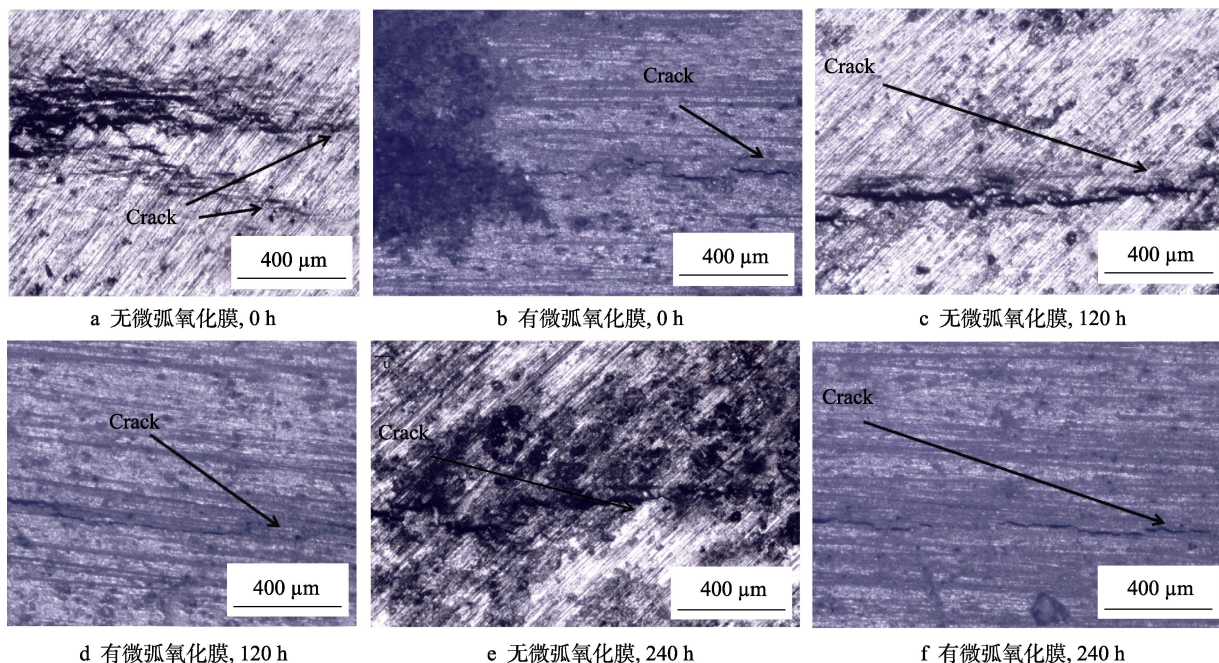


图 3 铝合金 DCB 试样在湿空气中氢致局部塑性变形过程

Fig.3 Local plastic deformation process of aluminum alloy DCB sample induced by hydrogen in wet air:(a) (c) (e) without MAO coating; (b) (d) (f) with MAO coating

无膜试样裂纹周围存在大量微裂纹,主裂纹成“Z”字形不断向前扩展。研究表明,由于裂纹尖端应力集中,导致较高的氢压,即金属中含有过饱和氢,则它们会在各种不均匀处结合生成分子氢,从而产生巨大的内压力,这个压力会协助外应力使氢致裂纹产生和扩展。滑移带也可作为一种强氢陷阱诱导氢浓度,并导致沿滑移方向开裂。当裂纹交叉滑移带相互连通时,形成“Z”形裂纹^[21-23]。

2.2 微弧氧化膜对 7050 铝合金 SCC 敏感性的影响

通过计算每个测量时间 t 与该时间测得的平均裂纹长度 a 的比值,作 at 线,求出裂纹扩展速率 da/dt 。用公式(1)求出每个测量时间裂纹尖端的应力强度因子。

$$K_I = \frac{E\delta H[3H(a+0.6H)^2 + H^3]^{1/2}}{4[(a+0.6H)^3 + H^2a]} \quad (1)$$

式中: E 为材料的杨氏模量,取 72 GPa; δ 为加载线上位移; H 为试样的半高长, $H=13$ mm,最后做出 $da/dt-K_I$ 曲线。

7050 铝合金 DCB 试样的裂纹扩展速率和应力强度因子的关系曲线如图 4 所示,曲线上分出两个区域,即裂纹快速扩展阶段和稳定扩展阶段。区域 I 为裂纹扩展后期,该阶段应力强度减小,裂纹扩展速度强烈依赖应力强度因子^[24]。在区域 II 中,裂纹扩展速度和应力强度因子无关。从两条曲线中可以看出,微弧氧化处理后的铝合金试样的应力腐蚀门槛值约为 $23.340 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,裂纹稳定扩展速率为 $6.378 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ 。而未微弧氧化处理的铝合金试样的应力腐蚀门槛值约为 $16.934 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$,裂纹稳定扩展速率为 $1.3612 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。有微弧氧化膜的铝合金试样应力腐蚀门槛值大于没有微弧氧化膜的铝合金试样,说明 7050 铝合金在微弧氧化后,应力腐蚀敏感性变低。

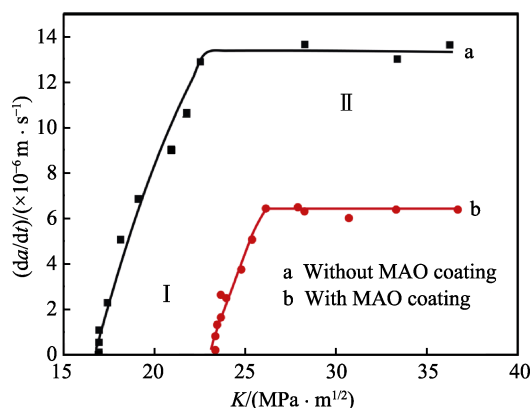


图 4 7050 铝合金 $da/dt-K_I$ 曲线
Fig.4 $da/dt-K_I$ curve of 7050 aluminum alloy

2.3 微弧氧化膜对铝合金 DCB 试样中氢含量的影响

无微弧氧化膜试样中氢的体积分数为 $0.281 \times$

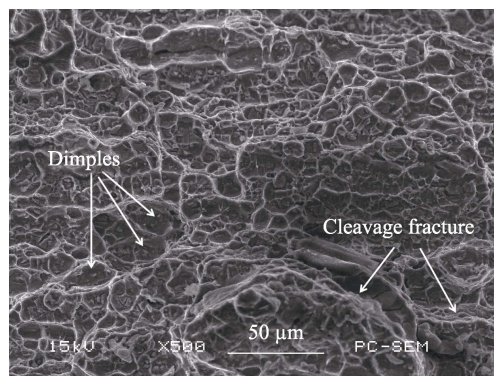
10^{-6} ,有微弧氧化膜试样中的氢含量明显下降,为 0.163×10^{-6} 。众多学者研究认为^[24-25],在铝合金局部塑性变形过程中,新形成的断口表面和腐蚀介质中的水分子发生反应生成自由氢,即:



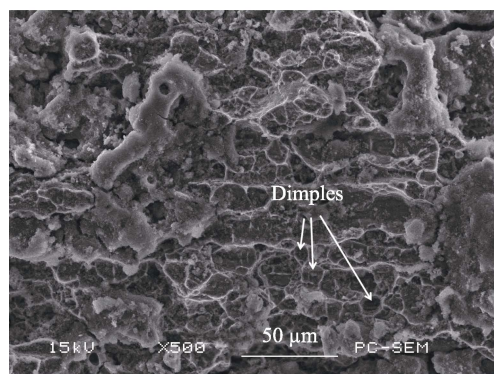
自由氢不断渗入铝合金基体,沿晶界偏聚,导致晶界脆化,从而产生裂纹。随着腐蚀的不断进行,裂纹不断扩展。在湿空气中,DCB 试样不断与水分子发生上述反应,生成自由氢原子,在裂纹尖端富集。当 DCB 试样进行微弧氧化工艺处理后,微弧氧化使铝合金表面形成稳定的陶瓷膜,膜层的阻隔使得应力腐蚀过程中基体与水分子的反应速度直线下降,产生的自由氢含量减少,因而导致有微弧氧化膜试样的裂纹扩展速度远低于无微弧氧化膜试样。由此可认为,当氢在裂纹尖端区浓度较低时,7050 铝合金不易发生氢致局部塑性变形,从而应力腐蚀敏感性降低。这个结果与图 3 的裂纹原位观察相一致。

2.4 微弧氧化膜对铝合金 SCC 断口的影响

7050 铝合金 DCB 试样 SCC 断口的 SEM 照片如图 5 所示。图 5a 为未经微弧氧化处理的 DCB 铝合金试样,图 5b 为经过微弧氧化处理的 DCB 铝合金试样。可以看到,在 RH 为 80% 的湿空气中,铝合金的断口主要为穿晶与沿晶的混合型断口。断口形貌由准解理



a 无微弧氧化膜



b 有微弧氧化膜

图 5 湿空气中 7050 铝合金 DCB 试样断口形貌,
Fig.5 Fracture morphology of DCB sample of 7050 aluminum alloy in wet air: a) Without MAO coating; b) With MAO coating

与韧窝形貌组成, 未经微弧氧化的试样断口表层准解理形貌较多。经微弧氧化后, 铝合金断口部分准解理形貌减少, 韧窝变小, 材料的脆性是下降的过程。从断口特征的方面来看, 微弧氧化试样明显抑制了试样的应力腐蚀开裂。这与应力腐蚀测试结果一致。

3 结论

1) 微弧氧化膜能有效阻止氢在 7050 铝合金裂纹尖端的渗透与富集, 从而抑制了铝合金的氢致局部塑性变形。

2) 微弧氧化工艺提高了 7050 铝合金的应力腐蚀开裂门槛值, 有膜试样与无膜试样相比, 其 K_{ISCC} 提高了 27.4%, 从而改善了铝合金的抗应力腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 郑传波, 益帼, 高延敏. 高强铝合金应力腐蚀及氢渗透行为研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(7): 600-604.
ZHENG Chuan-bo, YI Guo, GAO Yan-min. Research progress of stress corrosion cracking and hydrogen permeation behavior of high strength aluminum alloys[J]. Corrosion and protection, 2013, 34(7): 600-604.
- [2] 龚习, 王恒强, 付敏敏, 等. 航空航天用 Al-Cu-Mn 系高强铝合金的研究进展[J]. 热加工工艺, 2015, 44(22): 6-10.
GONG Xi, WANG Heng-qiang, FU Min-min, et al. Research development of high-strength Al-Cu-Mn series aluminum alloy used for aviation and aerospace[J]. Hot working technology, 2015, 44(22): 6-10.
- [3] 任建平, 宋仁国. 双级时效对 7050 铝合金力学性能及氢脆敏感性的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(4): 359-366.
REN Jian-ping, SONG Ren-guo. Effect of two-stage ageing on mechanical properties and sensitivity to hydrogen embrittlement of 7050 aluminum alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(4): 359-366.
- [4] ÖZER G, KAYA I, KARAASLAN A. Effects of retrogression and reaging heat treatment on the microstructure, exfoliation corrosion, electrical conductivity, and mechanical properties of AA7050[J]. Materials and corrosion, 2019, 70(10): 1788-1797.
- [5] YIN Li-qiang, LIU Yuan-yuan, DAI Nian-wei, et al. Effect of hydrogen charging conditions on hydrogen blisters and pitting susceptibility of 445J1M ferritic stainless steel[J]. Journal of the electrochemical society, 2018, 165(16): 1007-1016.
- [6] YANG Yuan-hang, GU Yan-hong, ZHANG Lei, et al. Influence of MAO treatment on the galvanic corrosion between aluminum alloy and 316L steel[J]. Journal of materials engineering and performance, 2017, 26(12): 6099-6106.
- [7] 孙斌, 宋仁国, 李海, 等. 7003 铝合金应力腐蚀裂纹扩展的电化学阻抗谱分析[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(9): 1832-1842.
SUN Bin, SONG Ren-guo, LI Hai, et al. EIS analysis of stress corrosion cracks propagation in 7003 aluminum alloy[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2016, 26(9): 1832-1842.
- [8] SOZAŃSKA M, MOŚCICKI A, CZUJKO T. The characterization of stress corrosion cracking in the AE44 magnesium casting alloy using quantitative fractography methods[J]. Materials, 2019, 12(24): 4125.
- [9] GONÇALVES C M, GODEFROID L B, LIMA M S F, et al. Effect of different forms of application of a laser surface treatment on fatigue crack growth of an AA6013-T4 aluminum alloy[J]. Journal of materials engineering and performance, 2019, 28(9): 5832-5842.
- [10] 金骥戎, 宋仁国, 代春丽, 等. 时效、阴极极化对 7050 铝合金应力腐蚀敏感性的影响[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(3): 90-95.
JIN Ji-rong, SONG Ren-guo, DAI Chun-li, et al. Effects of aging and cathodic polarization on susceptibility to SCC of 7050 aluminum alloys[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2015, 36(3): 90-95.
- [11] MAGAJI N, MAYRHOFFER R, KRÖGER B, et al. Comparison of test methods used to analyze stress corrosion cracking of differently tempered 7xxx alloys[J]. Materials and corrosion, 2019, 70(7): 1192-1204.
- [12] KAZUM O, BELADI H, KANNAN M B. Hydrogen permeation in twinning-induced plasticity (TWIP) steel[J]. International journal of hydrogen energy, 2018, 43(50): 22685-22693.
- [13] XU Z, EDUOK U, TIAMIYU A A, et al. Anodic dissolution pattern of magnesium alloy in different media: Effects of solution treatment on its microstructure and corrosion behaviour[J]. Engineering failure analysis, 2020, 107: 104234.
- [14] 宋仁国. 微弧氧化技术的发展及其应用[J]. 材料工程, 2019, 47(3): 50-62.
SONG Ren-guo. Development and applications of micro-arc oxidation technology[J]. Journal of materials engineering, 2019, 47(3): 50-62.
- [15] 庄俊杰, 张晓燕, 孙斌, 等. 微弧氧化对 7050 铝合金腐蚀行为的影响[J]. 工程科学学报, 2017, 39(10): 1532-1539.
ZHUANG Jun-jie, ZHANG Xiao-yan, SUN Bin, et al. Micro-arc oxidation coatings and corrosion behavior of 7050 aluminum alloy[J]. Chinese journal of engineering, 2017, 39(10): 1532-1539.
- [16] BAI Li-jing, KOU Gang, ZHAO Kai, et al. Effect of in-situ micro-arc oxidation coating on the galvanic corrosion of AZ31 Mg coupled to aluminum alloys[J]. Journal of alloys and compounds, 2019: 1077-1085.

(下转第 54 页)

- steel[J]. *Acta metallurgica*, 1970, 18(1): 147-157.
- [21] VOLKL J, ALEFELD G. Diffusion of hydrogen in metals (I) [M]. Berlin: Springer-verlag, 1978: 321.
- [22] LIN Y C, CHEN D, CHIANG M H, et al. Response of hydrogen desorption and hydrogen embrittlement to precipitation of nanometer-sized copper in tempered martensitic low-carbon steel[J]. *The journal of the minerals*, 2019, 71(4): 1349-1356.
- [23] KOMAZAKI S, KOYAMA A, MISAWA T. Effect of morphology of copper precipitation particles on hydrogen embrittlement behavior in Cu-added ultra low carbon steel[J]. *Materials transactions JIM*, 2002, 43(9): 2213-2218.
- [24] HAGI H. Diffusion coefficient of hydrogen in iron without trapping by dislocations and impurities[J]. *Materials transactions JIM*, 1994, 35(2): 112-117.
- [25] ZHU X, ZHANG K, LI W, et al. Effect of retained austenite stability and morphology on the hydrogen embrittlement susceptibility in quenching and partitioning treated steels[J]. *Materials science & engineering A*, 2016, 658: 400-408.
- [26] RYU J H, CHUN Y S, LEE C S, et al. Effect of deformation on hydrogen trapping and effusion in TRIP-assisted steel[J]. *Acta materialia*, 2012, 60(10): 4085-4092.
- [27] SONG J, CURTIN W A. A nanoscale mechanism of hydrogen embrittlement in metals[J]. *Acta materialia*, 2011, 59(4): 1557-1569.
- [28] DEPOVER T, VERBEKEN K. The detrimental effect of hydrogen at dislocations on the hydrogen embrittlement susceptibility of Fe-C-X alloys: An experimental proof of the HELP mechanism[J]. *International journal of hydrogen energy*, 2018, 43(5): 3050-3061.
- [29] 胡赓祥, 蔡珣, 戎咏华. 材料科学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2010: 126-128.
- HU Geng-xiang, CAI Xun, RONG Yong-hua. *Fundamentals of materials science* [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010: 126-128.

(上接第 33 页)

- [17] VENUGOPAL A, PANDA R, MANWATKAR S, et al. Effect of micro arc oxidation treatment on localized corrosion behaviour of AA7075 aluminum alloy in 3.5% NaCl solution[J]. *Elsevier*, 2012, 22(3): 700-710.
- [18] CHEN Lian-xi, SHENG Yin-ying, ZHOU Han-yu, et al. Influence of a MAO + PLGA coating on biocorrosion and stress corrosion cracking behavior of a magnesium alloy in a physiological environment[J]. *Corrosion science*, 2018, 12: 134-143.
- [19] 花天顺, 宋仁国, 宗珣, 等. 恒载荷下的微弧氧化后 7050 铝合金在不同 pH 值 NaCl 溶液中的腐蚀行为[J]. *表面技术*, 2020, 49(5): 269-278.
- HUA Tian-shun, SONG Ren-guo, ZONG Yu, et al. Corrosion behavior of 7050 aluminum alloy after micro-arc oxidation under constant load in NaCl solution with different pH values[J]. *Surface technology*, 2020, 49(5): 269-278.
- [20] KONG De-jun, LIU Hao, WANG Jin-chun, et al. Effects of micro arc oxidation on fatigue limits and fracture morphologies of 7475 high strength aluminum alloy[J]. *Journal of alloys and compounds*, 2015, 45: 393-398.
- [21] HUA Tian-shun, SONG Ren-guo, ZONG Yu, et al. Effect of solution pH on stress corrosion and electrochemical behaviour of aluminum alloy with micro-arc oxidation coating[J]. *Materials research express*, 2019, 6(9): 096441.
- [22] 郑强, 陈康华, 张茁, 等. 高温预析出对 7XXX 系列铝合金力学性能和应力腐蚀性能的影响[J]. *金属热处理*, 2004(11): 23-27.
- ZHENG Qiang, CHEN Kang-hua, ZHANG Zhuo, et al. Effect of high temperature pre-precipitation on stress corrosion cracking resistance and mechanical properties of 7xxx series aluminum alloys[J]. *Heat treatment of metals*, 2004, 29(11): 23-27.
- [23] 李会录, 余竹焕, 强军锋, 等. 高强钢 WOL 试样应力腐蚀开裂的金相跟踪观察[J]. *腐蚀与防护*, 2008, 29(10): 587-588.
- LI Hui-lu, YU Zhu-huan, QIANG Jun-feng, et al. Metallography investigation of hydrogen-induced stress corrosion cracking for high-strength Steels[J]. *Corrosion and protection*, 2008, 29(10): 587-588.
- [24] MURAT B, HUSEYIN C, KAYALI E S, et al. Improved resistance to stress-corrosion-cracking failures via optimized retrogression and reaging of 7075-T6 aluminum sheets[J]. *Metallurgical and materials transactions A*, 2008, 39A(10): 2470-2476.
- [25] OLIVEIRA A F, DE BARROS M C, CARDOSO K R, et al. The effect of RRA on the strength and SCC resistance on AA7050 and AA7150 aluminium alloys[J]. *Materials science and engineering A*, 2004, 379(1-2): 321-326.