

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2022.103

高腐蚀条件下用铝合金材料腐蚀机理

李波¹, 樊磊¹, 孙博¹, 白洁¹, 毛先胤¹, 宋守波²,
杨大宁³, 张志清², 陈科羽⁴, 狄睿⁵

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵阳 550000; 2. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 3. 海南电网有限责任公司电力科学研究院, 海口 570100; 4. 贵州电网有限责任公司输电运行检修分公司贵阳管理所, 贵阳 550000; 5. 贵州电网有限责任公司贵安供电局, 贵阳 550000)

摘要: 铝合金具有低密度、低熔点、高比强度及优良的耐腐蚀性能等特点, 被广泛用于航空航天、建筑、船舶等领域。在服役过程中, 铝合金的表层氧化膜易受到环境中活性阴离子的破坏而发生腐蚀, 对其性能造成严重的损害, 故研究铝合金在高腐蚀性环境的腐蚀行为对工程选材具有非常重要的指导意义。选择 6061 铝合金、2195 铝锂合金和 7075 铝合金为研究对象, 对其在特定腐蚀介质中的腐蚀过程和力学性能进行分析, 研究了铝合金在特定腐蚀介质中腐蚀形貌与力学性能的变化规律。结果表明: 腐蚀初期, 在高 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 离子浓度的腐蚀环境中, 3 种铝合金的氧化膜受到阴离子破坏后发生点蚀, 使基体暴露在腐蚀环境中, 进而发生电化学腐蚀, 6061 铝合金和 2195 铝锂合金腐蚀方式是由点蚀向面蚀转变, 7075 铝合金腐蚀方式为晶间腐蚀; 经过腐蚀后 6061 铝合金能保持稳定的强度和塑性, 7075 铝合金和 2195 铝锂合金的强度和塑性都明显降低。

关键词: 铝合金; 腐蚀; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG171

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)05-031-09

Corrosion mechanism of aluminum alloy materials under high corrosion conditions

LI Bo¹, FAN Lei¹, SUN Bo¹, BAI Jie¹, MAO Xianyin¹, SONG Shoubo²,
YANG Daning³, ZHANG Zhiqing², CHEN Keyu⁴, DI Rui⁵

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, P. R. China;
2. School of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
3. Electric Power Research Institute of Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570100, P. R. China;
4. Guiyang Management Office, Transmission Operation and Maintenance Branch of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, P. R. China; 5. Gui'an Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550000, P. R. China)

Abstract: With the advantages of low density, low melting point, high specific strength and excellent corrosion resistance, aluminum alloys are widely used in aerospace, construction, shipbuilding and other industries. During

收稿日期: 2021-08-14 网络出版日期: 2022-03-08

基金项目: 南方电网重大科技专项资助项目(GZKJXM20191302)。

Supported by China Southern Power Grid Major Science and Technology Project (GZKJXM20191302).

作者简介: 李波(1970—), 高级工程师, 主要研究方向为电网设备无损检测、电力设备腐蚀及电气与电工材料, (E-mail) 1203410323@qq.com。

通信作者: 张志清, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事材料表面处理和材料强韧化研究, (E-mail) zqzhang@cqu.edu.cn。

service, the surface oxide film of aluminum alloys is susceptible to corrosion by active anions in the environment, causing serious damage to its performance. Therefore, studying the corrosion behavior of aluminum alloys in a highly corrosive environment is very important for engineering material selection. In this work, 6061 aluminum alloy, 2195 aluminum-lithium alloy and 7075 aluminum alloy were taken as the research objects, their corrosion process and mechanical properties in specific corrosive media were analyzed, and their corrosion morphology and mechanical properties in specific corrosive media were investigated. The results show that in the early stage of corrosion, in a corrosive environment with high Cl^- , NO_3^- , and SO_4^{2-} concentrations, the oxide films of the three aluminum alloys undergo pitting corrosion after being damaged by anions, which exposes the matrix of the alloys to the corrosive environment, resulting in electrochemical corrosion. The corrosion of both 6061 aluminum alloy and 2195 aluminum-lithium alloy progresses from pitting corrosion to surface corrosion, while the 7075 aluminum alloy corrosion mode is intergranular corrosion. After corrosion, 6061 aluminum alloy maintains stable strength and plasticity, but the strength and plasticity of 7075 aluminum alloy and 2195 aluminum-lithium alloy are significantly reduced.

Keywords: aluminum alloy; corrosion; microstructure; mechanical properties

铝是现代工业体系中应用十分广泛的金属元素,在金属材料中的使用量仅次于钢铁^[1]。铝合金具有高比强度、低密度、低熔点、优良的加工性能及耐腐蚀性能等特点^[2],随着全球能源和环境问题日益突出,其在机械、建筑、电器、交通运输、复合材料、涂层材料等领域发挥着更加重要的作用^[3-4],尤其是在防腐喷涂材料方面,铝合金具有得天独厚的优势,热喷铝涂层被广泛应用到结构钢的防腐工程中。

铝合金表面会形成一层非常致密的氧化膜,隔绝了铝基体和外界环境的直接接触,因而具有良好的耐腐蚀性能。但是,在某些环境状况较差,频繁出现酸雨、大雾等极端天气的地区,环境中的 SO_4^{2-} 、 Cl^- 等具有一定腐蚀性的阴离子破坏铝合金表面的氧化膜,导致其出现点蚀等多种形式的腐蚀现象^[5]。目前,对铝合金暴露在不同环境中的腐蚀行为的研究已有很多报道。杨敏杰^[6]对 7075 铝合金在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀规律随时间的变化进行了探究,发现在腐蚀初期,7075 铝合金由于氧化膜的阻隔,腐蚀速度非常缓慢,而在氧化膜被破坏后,基体暴露在腐蚀环境中,腐蚀速度加快。侯丹丹^[7]研究了 6082 铝合金的晶间腐蚀行为,结果显示,在腐蚀初期,纵向腐蚀深度逐步增加,随着腐蚀时间延长,纵向腐蚀深度增加的幅度变得很小,横向腐蚀范围和腐蚀程度逐渐加大。Zhao 等^[8]探究了 7A85 铝合金在青岛工业-海洋大气环境中的腐蚀行为及机理,结果表明,裸露的 7A85 铝合金在工业-海洋大气环境中会发生点蚀和晶间腐蚀,其力学性能随着腐蚀时间延长逐步恶化。

目前国内外关于铝合金在高腐蚀性环境中的腐蚀行为研究报道很少,对铝合金在高腐蚀性条件下的腐蚀机制研究也比较少^[9],缺乏对高腐蚀性环境下铝合金腐蚀规律的认识。因此,笔者将多种铝合金在高腐蚀性环境中长时间浸泡腐蚀,通过研究铝合金在高腐蚀性环境中表征和力学性能的变化来探究铝合金在高腐蚀性环境中的腐蚀规律,为选择耐腐蚀性能良好的热喷涂材料提供依据。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

腐蚀实验所采用的材料为某公司提供的 6 mm 厚的 6061 铝合金、7075 铝合金及 2195 铝锂合金板材,其中 6061 铝合金为 6XXX 系列铝合金,其主要合金元素有 Al、Mg、Si 等 3 种元素。7075 铝合金和 2195 铝锂合金为高强铝合金,2195 铝锂合金主要合金元素为 Al、Cu、Li、Mg、Ag 等 5 种元素,7075 铝合金主要合金元素有 Al、Zn、Mg、Cu 等 4 种元素。3 种合金的成分如表 1~3 所示。

表1 6061铝合金化学成分(以质量分数表示)

Table 1 Chemical composition of 6061 aluminum alloy							%
w(Si)	w(Cu)	w(Mg)	w(Fe)	w(Mn)	w(Ti)	w(Cr)	w(Al)
0.36	0.02	1.74	0.30	0.07	0.02	0.20	97.29

表2 2195铝锂合金化学成分(以质量分数表示)

Table 2 Chemical composition of 2195 aluminum-lithium alloy							%
w(Cu)	w(Li)	w(Mg)	w(Al)	w(Zr)	w(Fe)	w(Al)	
4.00	1.00	0.44	0.40	0.11	0.05	94.00	

表3 7075铝合金化学成分表(以质量分数表示)

Table 3 Chemical composition of 7075 aluminum alloy								%
w(Zn)	w(Cu)	w(Mg)	w(Si)	w(Fe)	w(Mn)	w(Ti)	w(Cr)	w(Al)
5.65	1.76	1.52	0.49	0.20	0.09	0.03	0.22	90.13

1.2 实验过程

参照 GB/T 19745—2018,本次腐蚀试验所选用的腐蚀溶液的组成为 1 L 5%NaCl 溶液加 2 mL 硝酸(HNO_3 , $\rho=1.42 \text{ g/mL}$)和 5 mL 硫酸(H_2SO_4 , $\rho=1.84 \text{ g/mL}$),然后加入适量的 NaOH 溶液来调节溶液的 pH 值到规定值 3.5。分别选取 10 mm×10 mm×6 mm(板厚)6061 铝合金、2195 铝锂合金和 7075 铝合金的块状试样及特定尺寸的拉伸试样进行浸泡腐蚀试验,试验时间为 0、6、12、24、48、96、168 h。实验前依次用 600#、1000#和 1200#砂纸打磨块状试样和拉伸试样,然后对块状试样特定面进行抛光处理,并用乙醇清洁,吹干。

1.3 表征与性能分析

采用 TESCAN MIRA3 场发射扫描电子显微镜观察腐蚀后的铝合金的微观形貌,分析其腐蚀层厚度。用能谱仪(EDS)分析腐蚀区的化学成分。采用 Rigaku D/max 2500PC X 射线衍射仪(XRD)测试分析腐蚀区域的物相组成。

分别对不同腐蚀时间的 3 种铝合金拉伸试样进行室温拉伸实验,测试其拉伸性能随腐蚀时间变化的规律。拉伸实验所选取的样品腐蚀时间和表征样品腐蚀时间一一对应,分别为 6、12、24、48、96、168 h。为了保证实验结果的准确性,每一组拉伸试样的平行试样为 3 个,取平均值作为最后的实验结果。室温拉伸实验样品如图 1 所示,采用 SANS-CMT5105 型微机控制电子万能试验机进行拉伸实验,样品两端夹紧,拉伸速率为 1 mm/min。

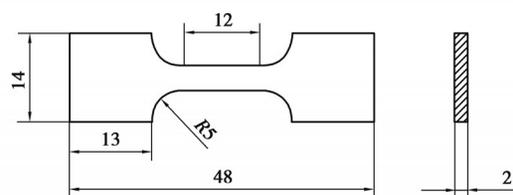


图1 室温拉伸样品图(单位:mm)

Fig. 1 Dimensions of the tensile sample at room temperature (unit: mm)

2 铝合金腐蚀过程中表面微观形貌与成分演变

经过不同腐蚀时间腐蚀的 3 种铝合金试样表面的腐蚀形貌如图 2 所示。从图中观察到,6061 铝合金在腐蚀介质中的腐蚀速度非常快,仅腐蚀 6 h 后就出现了大面积的腐蚀凹坑,这些腐蚀凹坑大小不一,形状不规则,遍布试样表面。这是铝合金点蚀的典型形貌,其形成原因可用氧化膜破坏理论和吸附理论来解释^[10]。随着腐蚀时间推移,样品表面原始的平整面积逐步减少,腐蚀凹坑面积逐步增大,腐蚀 48 h 后样品原始表面已

经完全被腐蚀,呈现出高低起伏的腐蚀坑洞。腐蚀凹坑快速增加是因为在腐蚀坑形成后,其内外部的电化学条件发生显著变化^[11],坑内发生铝合金的溶解反应,坑外发生耗氧腐蚀反应^[12],氧化铝在坑外不断堆积,使腐蚀坑内部形成闭塞区域,加速了腐蚀坑的加深与扩展^[13],大面积的腐蚀凹坑就是由于各个点蚀坑在持续腐蚀过程中不断扩大,最后连接在一起形成的腐蚀样貌。从6061铝合金腐蚀形貌中还观察到腐蚀坑具有形状规则的方形结构,这种结构比较松散,加大了材料与腐蚀介质之间的接触面积,腐蚀液可以穿过这些松散的结构孔洞,对基体进行持续大面积的腐蚀,因此腐蚀速度非常快。对腐蚀48 h后6061铝合金样品表面点扫描(图3)发现表面仍然是基体元素,未发现S、N和Cl等腐蚀性元素。这可能是由于这些腐蚀性元素在腐蚀过程中起催化作用,并未参与到腐蚀反应中。

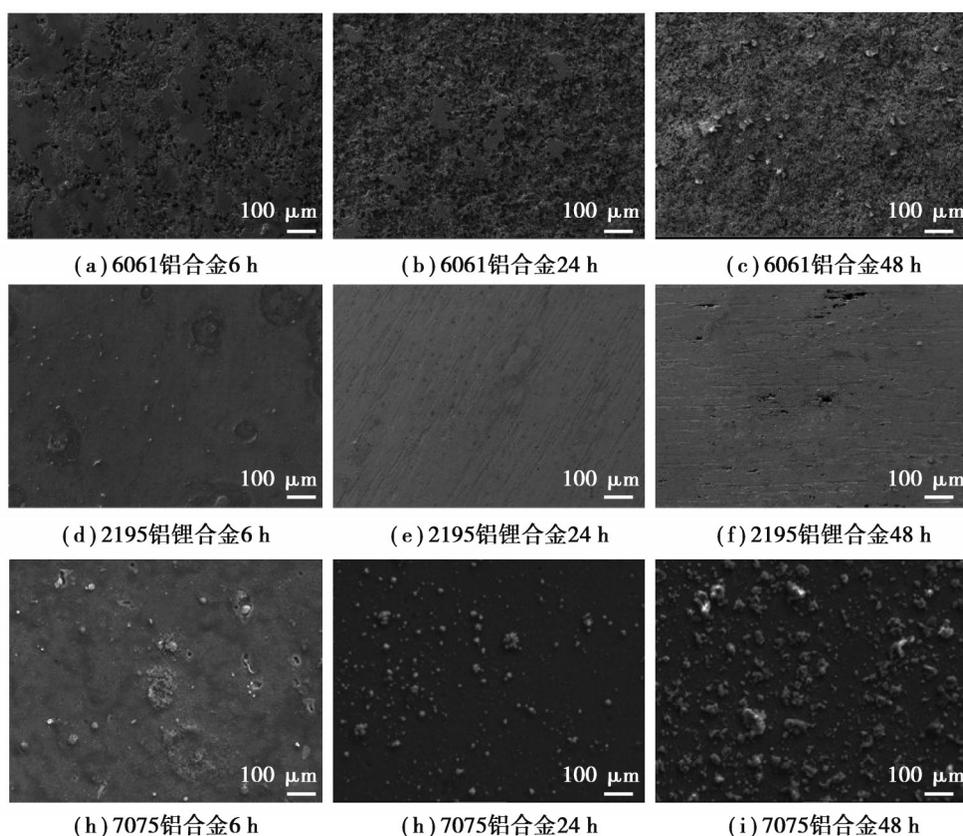


图2 三种铝合金腐蚀形貌随腐蚀时间变化图

Fig. 2 Corrosion morphologies of three aluminum alloys as a function of corrosion time

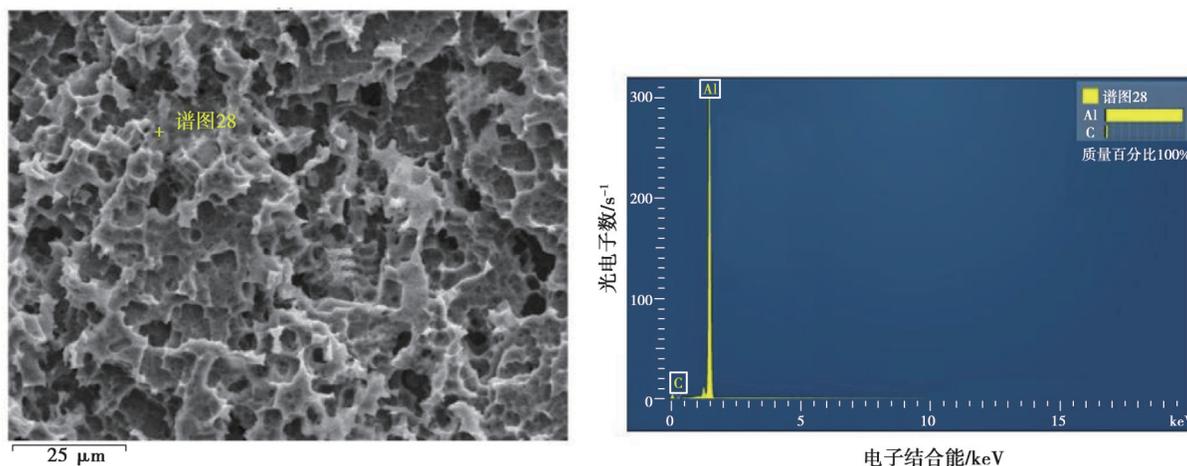


图3 腐蚀48 h后6061铝合金表面EDS点谱图

Fig. 3 EDS spectra on the surface of 6061 aluminum alloy after corrosion for 48 h

相比之下,2195 铝锂合金在酸性腐蚀液中的腐蚀速度比较慢,其 SEM 图像显示腐蚀 6 h 后的 2195 基体上仅存在少量鼓泡,没有出现其他明显的腐蚀形貌。少数鼓泡的出现是由于铝合金表面发生了轻微的点腐蚀,这些点腐蚀优先在富铜相的位置形成,因为富铜相与周围铝基体存在电位差^[14],极易在其位置发生电化学反应而引起腐蚀。腐蚀 24 h 的 2195 铝锂合金试样表面的点腐蚀情况也不明显,仅有少数点蚀坑出现,这可能是因为本次浸泡实验腐蚀的诱导因素是带有腐蚀性的氯离子(Cl^-)和硫酸根离子(SO_4^{2-}),这些离子对铝合金表面生成的致密氧化膜造成了破坏, Cl^- 离子因其半径小而具有非常强的穿透能力,容易被吸附在铝合金表面氧化膜破损和材质不均匀的活性位置,腐蚀性阴离子与表面氧化膜发生化学反应,随着时间延长,氧化膜变薄、破裂,直到铝合金基体裸露而后发生溶解^[15-17]。由于腐蚀前期铝合金表面仅出现少量鼓泡,大部分表面致密的氧化膜还比较完整,所以腐蚀坑的形成进展缓慢。随着腐蚀时间继续延长,在腐蚀 48 h 后,点蚀坑在长大过程中不断与其他点蚀坑合并,形成非常大的腐蚀坑。我们还观察到 2195 铝锂合金在腐蚀过程中,随腐蚀时间增加,其表面覆盖的一层黑色的薄膜越来越黑,这层薄膜非常薄并且极易掉落,可能是在表面留下的腐蚀反应产物。通过对腐蚀 48 h 的样品表面进行 EDS 点扫描(图 4),发现腐蚀 48 h 后 2195 铝锂合金表面基本上还是以 Al 为主,未见 S、N 和 Cl 等腐蚀性元素,这可能是由于生成的腐蚀产物掉落溶解到腐蚀液中了。

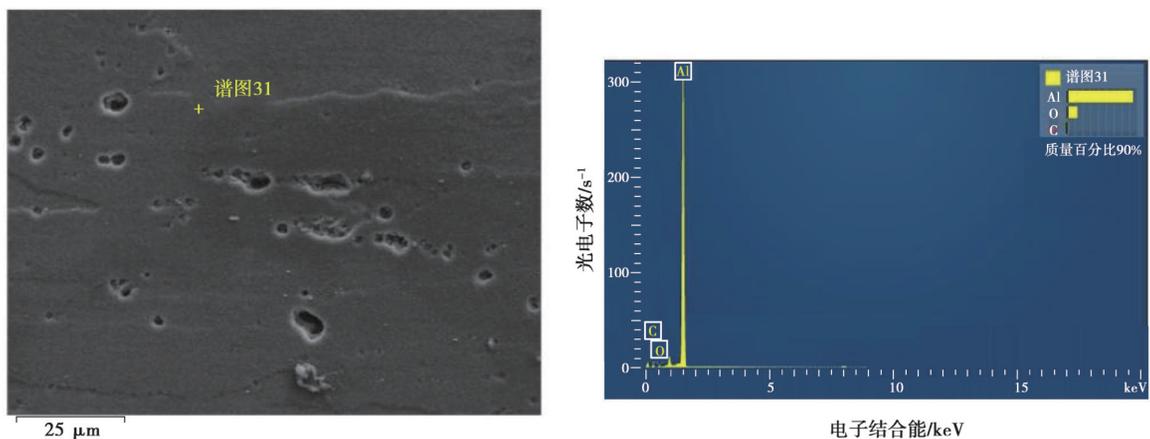


图 4 腐蚀 48 h 后 2195 铝锂合金表面 EDS 点谱图

Fig. 4 EDS spectra of 7075 aluminum-lithium alloy surface after 48 h corrosion

7075 铝合金腐蚀行为类似于 2195 铝锂合金,在腐蚀初期就出现一些零散的絮状腐蚀产物覆盖在样品表面。这是由于 7075 铝合金表面的氧化膜被破坏后,铝基体与腐蚀介质中的 Cl^- 发生电化学反应,在铝合金表面生成一层比较粗糙和疏松的腐蚀产物^[18]。腐蚀 24 h 后覆盖在样品表面的腐蚀产物越来越多,腐蚀 48 h 后覆盖在样品表面的腐蚀产物进一步增多,并出现龟壳状裂纹,这是晶间腐蚀的典型特征。用 EDS 能谱分析腐蚀 48 h 后的 7075 铝合金表面特征点,所得点谱图如图 5 所示。腐蚀 48 h 后 7075 铝合金表面主要存在 Al 元素和 O 元素,说明覆盖在基体上的腐蚀产物为氧化铝。S、N、Cl 等腐蚀性元素并未参与腐蚀反应,可能只起到了腐蚀催化作用。

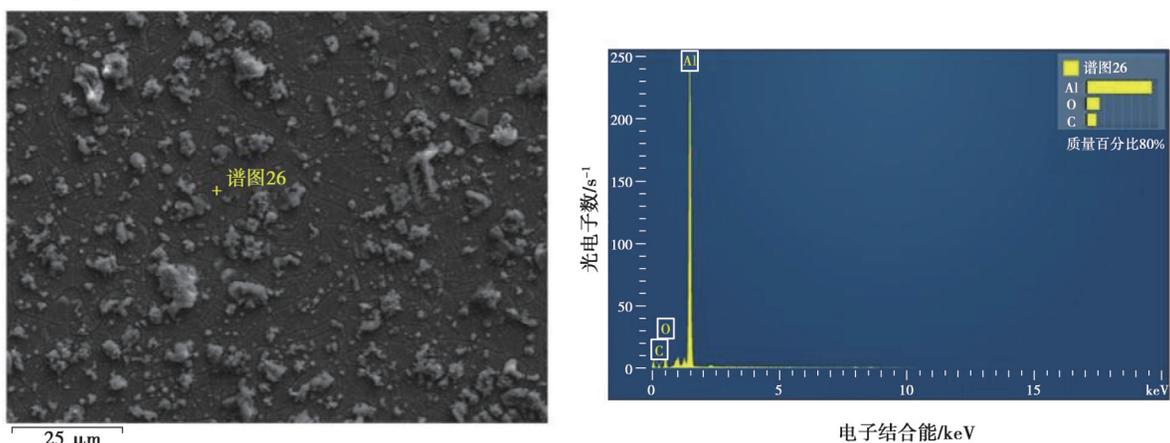


图 5 腐蚀 48 h 后 7075 铝合金表面 EDS 点谱图

Fig. 5 EDS spectra of 7075 aluminum alloy surface after 48 h corrosion

图6为3种铝合金腐蚀层厚度形貌图,图7为3种铝合金腐蚀层厚度随腐蚀时间的变化曲线图。从图中可以看出,3种铝合金腐蚀层深度随腐蚀时间延长在不断增加,在腐蚀6 h后6061、2195、7075铝合金的腐蚀层深度分别为 $8.34\ \mu\text{m}$ 、 $0.00\ \mu\text{m}$ 和 $0.81\ \mu\text{m}$;6061铝合金的腐蚀速度最快,7075铝合金次之,2195铝锂合金还未见明显腐蚀。在腐蚀48 h后,6061、2195、7075铝合金的腐蚀层厚度分别为 $21.60\ \mu\text{m}$ 、 $2.25\ \mu\text{m}$ 、 $12.80\ \mu\text{m}$;6061铝合金腐蚀速度最快,2195铝锂合金腐蚀最慢,这也比较符合3种铝合金表面腐蚀形貌的结果。

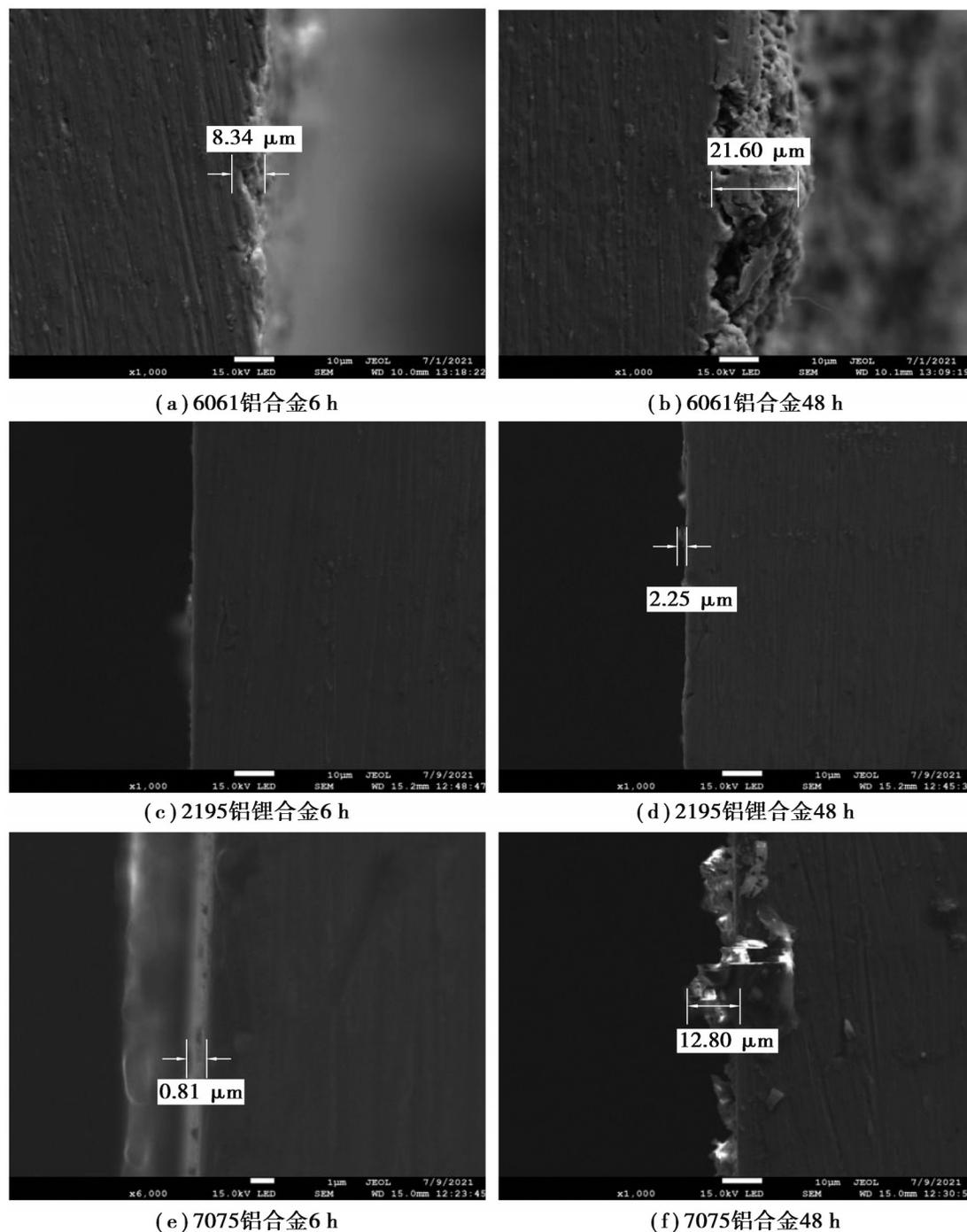


图6 不同腐蚀时间3种铝合金腐蚀层厚度

Fig. 6 The corrosion-layer depths of 3 aluminum alloys at different corrosion times

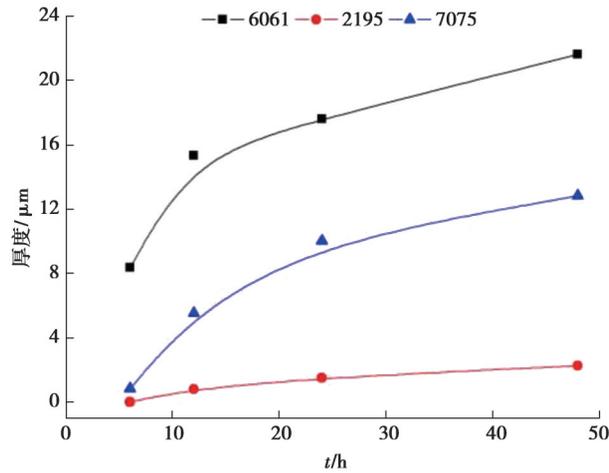


图 7 三种铝合金腐蚀层深度变化

Fig. 7 Changes in corrosion layer depth of 3 aluminum alloys

3 铝合金腐蚀过程中的力学性能演变

对 6061 铝合金母材(BM)和经过不同腐蚀时间腐蚀的样品进行室温拉伸实验,所得工程应力应变曲线如图 8 所示。图 9 为其强度和塑性变化的统计图,图中 σ_b 为抗拉强度, $\sigma_{0.2}$ 为屈服强度, δ 为延伸率。未经过腐蚀的 6061 铝合金抗拉强度为 215 MPa 左右,延伸率为 14.6%。随着腐蚀时间延长,其强度并未发生比较大变化,腐蚀 1 周(168 h)后的样品仍然保持在 214 MPa 左右,而塑性在经过腐蚀后出现了轻微的下降,从母材的 14.6% 降至腐蚀 1 周后的 12.6%。从扫描电镜中,我们观察到 6061 铝合金经过腐蚀后,其表面被腐蚀得很严重,但强度和塑性并没有特别剧烈的改变。因此,在腐蚀环境中 6061 铝合金的性能具有比较好的稳定性。

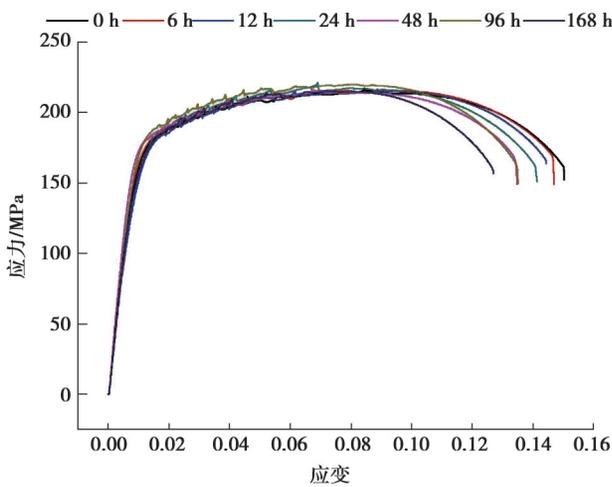


图 8 6061 不同腐蚀时间的 6061 铝合金工程应力应变曲线

Fig. 8 Engineering stress-strain curves of 6061 aluminum alloy with different corrosion time

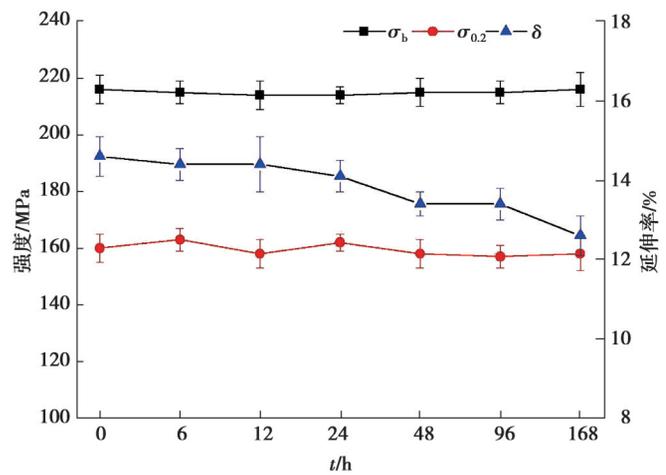


图 9 不同腐蚀时间 6061 铝合金强度和塑性变化图

Fig. 9 Strength and plasticity changes of 6061 aluminum alloy at different corrosion times

2195 铝锂合金作为第三代高强铝锂合金,具有较高的强度和良好的塑性,图 10 为 2195 铝锂合金母材和腐蚀不同时间后的样品的工程应力应变曲线,其强度和塑性的变化见图 11。在被腐蚀后 2195 铝锂合金的强度和塑性都明显地降低了,2195 铝锂合金母材强度为 490 MPa,延伸率为 22.5%,随着被腐蚀时间延长,强度逐步降低,腐蚀 1 周后的样品强度仅为 310 MPa,延伸率降低至 3.5%,强度和塑性相比母材分别降低了 180 MPa 和 19%,这说明 2195 铝锂合金在被腐蚀后性能变化大,耐腐蚀性能相对较差。

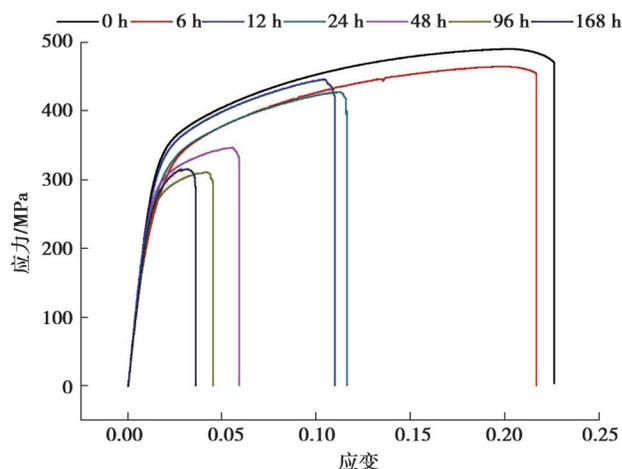


图10 不同腐蚀时间的2195铝锂合金工程应力应变曲线

Fig. 10 Engineering stress-strain curves of 2195 aluminum-lithium alloy with different corrosion time

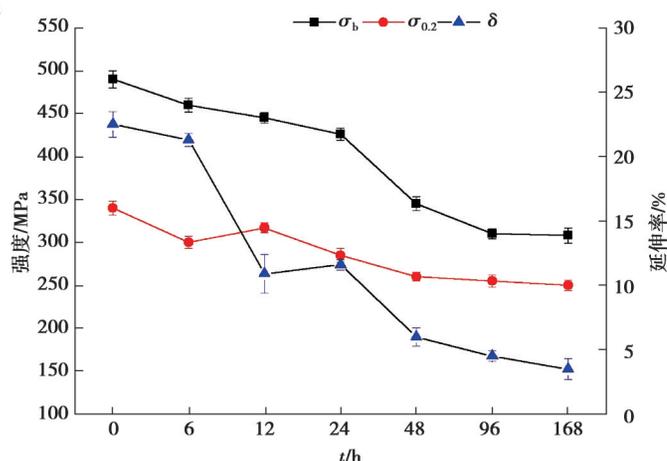


图11 不同腐蚀时间2195铝锂合金强度和塑性变化图

Fig. 11 Strength and plasticity changes of 2195 aluminum-lithium alloy at different corrosion time

图12为7075铝合金母材与经过不同腐蚀时间腐蚀后的样品的工程应力应变曲线,其强度和塑性的变化见图13。被腐蚀后7075铝合金的强度和塑性随时间延长逐步降低,7075铝合金母材抗拉强度为558 MPa,屈服强度为534 MPa,延伸率为11.3%,经过24 h腐蚀后,其抗拉强度为524 MPa,屈服强度为500 MPa,延伸率为8.3%,分别降低了34 MPa、34 MPa和3%。当腐蚀时间延长至1周后,其抗拉强度降低至460 MPa,屈服强度降低至430 MPa,延伸率仅为3.1%。这说明在高腐蚀性环境中7075铝合金的耐腐蚀性能也比较差。

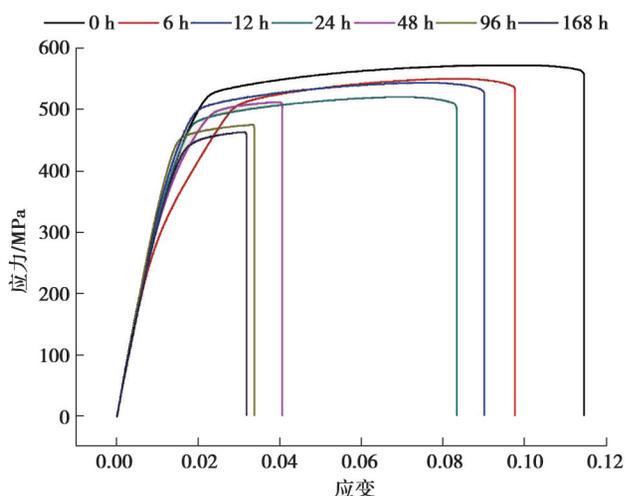


图12 不同腐蚀时间的7075铝合金工程应力应变曲线

Fig. 12 Engineering stress-strain curves of 7075 aluminum alloy with different corrosion time

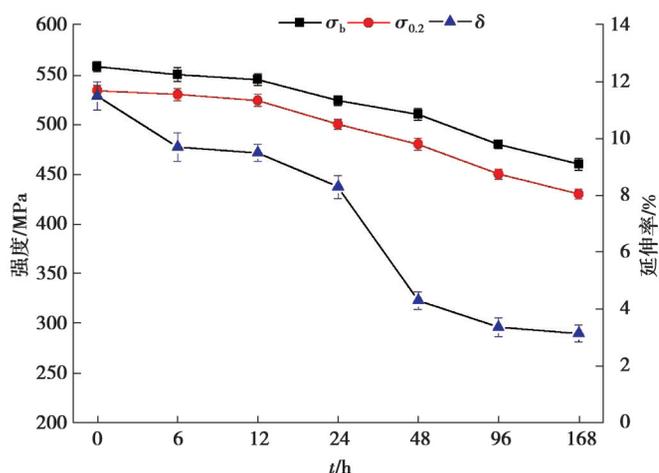


图13 不同腐蚀时间7075铝合金强度和塑性变化图

Fig. 13 Changes in the strength and plasticity of 7075 aluminum alloy at different corrosion time

4 结论

1) 3种铝合金的腐蚀行为不尽相同,6061铝合金和2195铝锂合金在高 Cl^- 、 NO_3^- 、 SO_4^{2-} 的腐蚀液中的腐蚀方式是由点腐蚀向面腐蚀转变,而7075腐蚀方式是逐步出现大面积龟甲状裂纹,并且7075铝合金和2195铝锂合金腐蚀后表面会覆盖一层腐蚀产物薄膜,而6061铝合金的腐蚀产物溶解到了腐蚀液中。

2) 在被腐蚀后,6061铝合金的强度和塑性都没有明显的变化,而2195铝合金和7075铝合金随着被腐蚀时间延长,其强度和延伸率都明显地降低,说明6061铝合金的力学性能具有比较好的腐蚀稳定性,2195和7075铝合金铝锂合金的耐腐蚀性能不佳。

参考文献

- [1] 钟掘. 提高铝材质量基础研究的进展[J]. 轻合金加工技术, 2002, 30(5): 1-10.
Zhong J. Progress in the basic research of improving aluminum materials quality[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2002, 30(5): 1-10. (in Chinese)
- [2] Zaid B, Saidi D, Benzaid A, et al. Effects of pH and chloride concentration on pitting corrosion of AA6061 aluminum alloy[J]. Corrosion Science, 2008, 50(7): 1841-1847.
- [3] 叶浩. 2024 铝合金的熔铸及形变热处理工艺研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
Ye H. Research on casting and thermo-mechanical treatment of 2024 aluminum alloy[D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese)
- [4] Ghiaasiaan R, Amirkhiz B S, Shankar S. Quantitative metallography of precipitating and secondary phases after strengthening treatment of net shaped casting of Al-Zn-Mg-Cu (7000) alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2017, 698: 206-217.
- [5] Lee H, Kim Y, Jeong Y, et al. Effects of testing variables on stress corrosion cracking susceptibility of Al 2024-T351[J]. Corrosion Science, 2012, 55: 10-19.
- [6] 杨敏杰. 喷射成形 7055 铝合金型材抗腐蚀性性能研究及机理分析[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
Yang M J. Study on corrosion property and mechanism of spray formed 7055 aluminum alloy [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [7] 侯丹丹. 6082 铝合金的微观组织演变规律和晶间腐蚀行为研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
Hou D D. Research on microstructure evolution and inter-granular corrosion behavior of 6082 aluminum alloy[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [8] Zhao Q Y, Guo C, Niu K K, et al. Long-term corrosion behavior of the 7A85 aluminum alloy in an industrial-marine atmospheric environment[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 12: 1350-1359.
- [9] Zhang S, Zhang T, He Y T, et al. Long-term atmospheric pre-corrosion fatigue properties of epoxy primer-coated 7075-T6 aluminum alloy structures[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129: 105225.
- [10] 李晓刚. 材料腐蚀与防护概论[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
Li X G. Introduction to corrosion and protection of materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2017. (in Chinese)
- [11] 徐火平, 刘慧丛, 朱立群, 等. 盐雾环境中高强铝合金点蚀行为与暴露面积的关系[J]. 航空材料学报, 2010, 30(4): 59-64.
Xu H P, Liu H C, Zhu L Q, et al. Relation between pitting corrosion behavior and exposed area of high strength aluminum alloys in neutral salt spray[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(4): 59-64. (in Chinese)
- [12] 李亚萍, 曲鸣飞. 机械装备用 6xxx 系铝合金在氯盐溶液中的腐蚀行为及其防护[J]. 电镀与环保, 2019, 39(6): 42-44.
Li Y P, Qu M F. Corrosion behavior and protection of 6xxx-series aluminum alloy for mechanical equipment in chloride salt solution[J]. Electroplating & Pollution Control, 2019, 39(6): 42-44. (in Chinese)
- [13] 魏立艳. 微观组织结构对铝及铝合金腐蚀行为的影响[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009.
Wei L Y. The effect of microstructures on the corrosion behaviors of aluminum and aluminum alloy[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. (in Chinese)
- [14] 殷士焜. 2198 铝锂合金激光焊接接头的腐蚀行为及机理研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
Yin S K. Corrosion behavior and mechanism of laser beam welded joint of 2198 aluminium-lithium alloy[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (in Chinese)
- [15] 李云涛, 李晓宁, 包俊成, 等. 2024 铝合金盐雾腐蚀评估及腐蚀形貌分析[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(9): 864-868.
Li Y T, Li X N, Bao J C, et al. Corrosion evaluation and morphology analysis of 2024 aluminum alloy in salt spray[J]. Corrosion & Protection, 2015, 36(9): 864-868. (in Chinese)
- [16] 张仁群, 王斌, 岳涛, 等. 浅析国军标 GJB150 与美军标 MIL-STD-810F 盐雾试验[J]. 环境技术, 2008, 26(5): 42-45,26.
Zhang R Q, Wang B, Yue T, et al. Analysis of the salt fog test between GJB 150 and MIL-STD-810F[J]. Environmental Technology, 2008, 26(5): 42-45,26. (in Chinese)
- [17] 程文礼, 杨慧, 任德杰, 等. 表面处理对铝合金盐雾环境下的腐蚀特性试验研究[J]. 航空制造技术, 2020, 63(12): 92-96.
Cheng W L, Yang H, Ren D J, et al. Experimental study on corrosion characteristics of aluminum alloy in salt spray environment[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(12): 92-96. (in Chinese)
- [18] Zhang Y, Yin X Y, Wang J Z, et al. Influence of microstructure evolution on tribocorrosion of 304SS in artificial seawater[J]. Corrosion Science, 2014, 88: 423-433.

(编辑 罗敏)