

环境效应与防护

两种典型大气环境下 7A85 铝合金的
腐蚀行为研究赵全成^{1,2}, 罗来正¹, 黎小锋³, 苏艳¹(1.中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039; 2.甘肃敦煌大气环境材料腐蚀国家野外科学观测
研究站, 736200; 3.重庆电子工程职业学院, 重庆 401331)

摘要: **目的** 研究湿热海洋、干热沙漠两种典型大气环境对 7A85 铝合金腐蚀行为的影响。**方法** 在万宁、敦煌两种典型环境中开展 7A85 铝合金大气暴露试验, 利用金相显微镜分析 7A85 铝合金在我国两种典型大气环境中的腐蚀特征, 定期测试该材料的拉伸强度和腐蚀深度。**结果** 暴露 3 a, 7A85 铝合金湿热海洋、干热沙漠两种典型大气环境中的最大腐蚀深度分别为 254、90 μm , 抗拉强度分别下降了 18% 和 5%, 断后伸长率分别下降了 72% 和 22%。**结论** 7A85 铝合金暴露于相对湿度较低的干热沙漠环境, 表面形成的腐蚀产物膜会阻止腐蚀的进一步发生; 暴露于湿热海洋大气环境, 随暴露时间的延长, 7A85 铝合金腐蚀逐渐加深。

关键词: 7A85 铝合金; 大气腐蚀; 湿热海洋大气环境; 干热沙漠大气环境

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.07.013

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)07-0070-06

Corrosion Behavior of 7A85 Aluminum Alloy in Two Typical
Atmospheric EnvironmentsZHAO Quan-cheng^{1,2}, LUO Lai-zheng¹, LI Xiao-feng³, SU Yan¹

(1. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China; 2. Dunhuang Gansu Materials Corrosion in Atmospheric Environment, National Observation & Research Station, Dunhuang 736200, China; 3. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China)

ABSTRACT: The paper aims to research influences of two typical atmospheric environments of damp hot ocean and dry-heat desert on corrosion behavior of 7A85 aluminum alloy. Atmospheric exposure tests of 7A85 aluminum alloy were carried out in Wanning and Dunhuang. The corrosion characteristics of 7A85 aluminum alloy in two typical atmospheric environments were investigated by metallographic microscope. The tensile strength and corrosion depth of the material were tested regularly. After 7A85 aluminum alloy was exposed for 3 years in damp hot ocean atmospheric environment and dry heat desert atmospheric environment, the maximum corrosion depth was 254 μm and 90 μm respectively; the tensile strength was reduced by 18% and 5% respectively; and the elongation after fracture was reduced by 72% and 22% respectively. If 7A85 aluminum alloy is exposed in dry-heat desert environment with low relative humidity, the further corrosion would be prevented by the corrosion product film

收稿日期: 2020-03-22; 修订日期: 2020-04-09

Received: 2020-03-22; **Revised:** 2020-04-09

作者简介: 赵全成 (1987—), 男, 工程师, 主要研究方向为环境试验。

Biography: ZHAO Quan-cheng (1987—), Male, Engineer, Research focus: environmental test.

通讯作者: 罗来正 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为环境试验与环境适应性评价。

Corresponding author: LUO Lai-zheng (1983—), Male, Master, Senior engineer, Research focus: environmental test and environmental adaptability evaluation.

formed on the surface. The corrosion of 7A85 aluminum alloy exposed to the damp hot ocean environment will be gradually deepened with the extension of the exposure time.

KEY WORDS: 7A85 aluminum alloy; atmospheric corrosion; damp hot ocean atmospheric environment; dry heat desert atmospheric environment

7A85 铝合金是铝-锌-镁-铜系可热处理强化的高强度变形铝合金，是我国研制出的与美国 7085 性能相当的铝合金，属于第 4 代航空铝合金^[1]。由于其独特的淬透性能，已成为航空工业大规格高强铝合金锻件主要用材^[2-6]。目前，关于 7A85 铝合金腐蚀行为的研究主要集中于热处理和表面处理等对 7A85 铝合金腐蚀影响^[7-9]。柏璠等^[10]研究了时效工艺对 7A85 铝合金力学和晶间腐蚀性能的影响，对比分析了 4 种时效工艺对合金抗晶间腐蚀影响。姚晓红等^[11]研究了多种时效制度对 7A85 铝合金耐晶间腐蚀的影响，研究结果表明，7A85 铝合金晶间腐蚀敏感性随时间的延长而降低。李重阳等^[12]研究了微弧氧化与稀土铈盐封孔处理后 7A85 铝合金的耐腐蚀性能和耐摩擦磨损性能，发现微弧氧化陶瓷膜和稀土铈盐封孔能够进一步提高合金的耐蚀性能。

7A85 铝合金作为我国新型飞机重要承力结构材料^[13-14]，服役过程中会遭遇海洋大气、干热沙漠等多

种严酷使用环境，大气环境中湿度、腐蚀介质等因素势必对合金造成腐蚀影响。目前，关于 7A85 铝合金大气环境中腐蚀行为的研究鲜见报道，为摸清 7A85 铝合金在大气环境中的腐蚀行为，文中针对 7A85 铝合金分别在在我国湿热海洋大气环境的海南万宁试验站和干热沙漠大气环境的甘肃敦煌试验站开展了大气环境试验，研究掌握了 7A85 铝合金在我国两种典型大气环境中的腐蚀特征及规律。研究结果将为 7A85 铝合金在航空、航天等装备的工程应用提供重要的参考。

1 试验

1.1 样品

试验样品为 7A85 铝合金，其化学成分见表 1。试验样品包括腐蚀质量损失样品（100 mm×50 mm×3 mm）及棒材拉伸样品。

表 1 7A85 铝合金化学成分
Tab.1 Chemical composite of 7A85 Aluminum alloy

成分	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Zr	Al	杂质含量	
											单个	合计
质量分数/%	0.05	0.08	1.2~2.0	0.10	1.2~2.0	0.05	7.0~8.2	0.05	0.08~0.16	余量	0.05	0.15

1.2 自然环境暴露试验

1) 试验环境：试验环境为湿热海洋大气环境的海南万宁试验站，以及干热沙漠大气环境的甘肃敦煌试验站，所有样品均采用户外暴露试验方式。

2) 试验方法：样品朝南并与水平成 45°倾角，所有样品均参照 GB/T 14165—2008《金属和合金 大气腐蚀试验 现场试验的一般要求》进行投试。

1.3 样品检测与分析

1) 金相显微分析：将试验前后样品垂直剖开，对其断面进行抛光，使用 Observe.A1m 型金相显微镜对样品断面进行金相显微观察。

2) 力学性能：样品的力学性能测试参照 GB/T 228—2002《金属材料 室温拉伸试验方法》执行。

2 分析与讨论

2.1 腐蚀特征分析

7A85 铝合金暴露于湿热海洋、干热沙漠两种典

型大气环境下的宏观腐蚀特征变化情况见表 2，两种典型大气环境的环境参数见表 3，7A85 铝合金两种典型大气环境暴露 1.5 a 的宏观腐蚀形貌如图 1 所示。

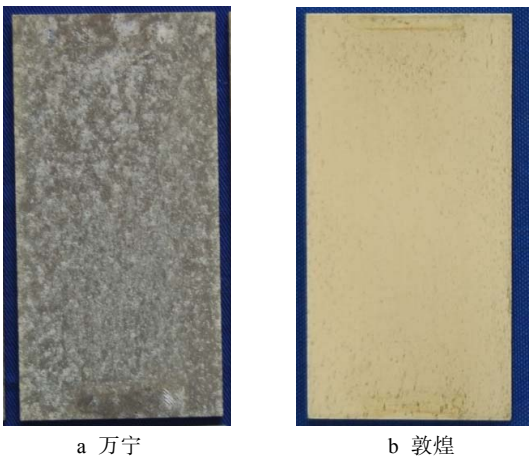


图 1 7A85 铝合金在两种典型大气环境中暴露 1.5 a 的宏观腐蚀形貌
Fig.1 Macro corrosion morphology of 7A85 aluminum alloy exposed for 1.5 years in two typical atmospheric environments: a) Wanning; b) Dunhuang

表2 7A85 铝合金两种典型大气环境下宏观
腐蚀特征变化情况

Tab.2 Macro corrosion characteristics of 7A85 aluminum alloy in two typical atmospheric environments

试验时 间/月	试验环境	
	万宁站	敦煌站
1	表面布满大量点蚀	无变化
3	表面布满大量点蚀， 伴有大量白色腐蚀产物	表面出现少量麻点
6	表面布满大量点蚀， 伴有大量白色腐蚀产物	表面出现少量麻点
12	表面布满大量点蚀， 伴有大量白色腐蚀产物	表面出现点蚀
18	表面布满大量点蚀， 伴有大量白色腐蚀产物， 出现腐蚀产物堆积现象	表面出现点蚀
24	表面布满大量点蚀， 伴有大量白色腐蚀产物， 出现腐蚀产物堆积现象	表面出现点蚀
36	表面布满大量点蚀， 伴有大量白色腐蚀产物， 出现腐蚀产物堆积现象	表面出现点蚀

由表2得知，7A85 铝合金暴露于万宁站1个月，表面布满大量点蚀坑；暴露3个月，表面出现大量白色腐蚀产物；暴露18个月，表面出现腐蚀产物堆积

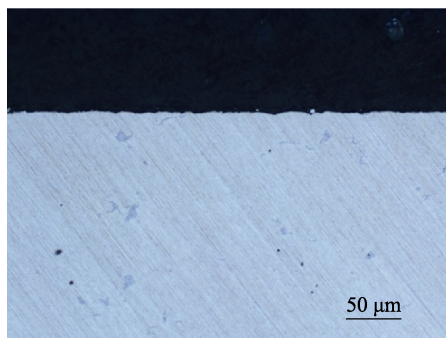


表3 两个试验站的环境参数

Tab.3 Environmental parameters of two test sites

试验站	环境类型	年均相对 湿度/%	年平均海盐离子沉积 量/(mg·100 cm ⁻² ·d ⁻¹)
万宁	海洋大气环境	86	0.35
敦煌	干热沙漠环境	41	0.06

现象。7A85 铝合金暴露于敦煌站3个月，表面出现少量麻点；暴露12个月，表面出现点蚀。随着暴露时间进一步延长，表面腐蚀未出现特别明显的变化。可以看出，两种环境下7A85 铝合金腐蚀情况存在较大程度的区别，湿热海洋大气环境下7A85 铝合金的腐蚀程度明显大于干热沙漠大气环境。

由表3环境参数数据得知，敦煌站的平均相对湿度特别低，仅为41%。该相对湿度远小于铝合金的临界相对湿度（65%），正是因为这个原因，铝合金表面难以形成有效的连续薄膜。一旦铝合金表面生成腐蚀产物膜，由于相对湿度低，腐蚀产物膜对基体具有一定的保护作用，会阻止腐蚀的进一步发生。因此，7A85 铝合金在干热沙漠环境的腐蚀程度小于湿热海洋大气环境。

7A85 铝合金的原始金相显微组织如图2所示。由图2可知，7A85 铝合金原始表面光滑、无腐蚀，金相组织为α-Al强化相，原始α晶粒粗大，在原始晶界分布着细小的再结晶晶粒。

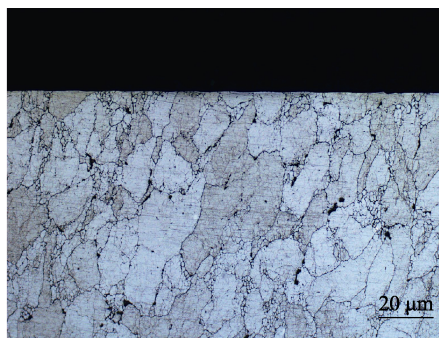


图2 7A85 铝合金的原始金相显微组织

Fig.2 Original metallographic microstructure of 7A85 aluminum alloy

7A85 铝合金在湿热海洋、干热沙漠两种典型大气环境中暴露3a的金相显微形貌如图3所示，其最大腐蚀深度如图4所示。由图3得知，7A85 铝合金在两种典型大气环境中的腐蚀特征基本一致，均为点蚀和晶间腐蚀的混合腐蚀。湿热海洋大气环境下7A85 铝合金的腐蚀程度远大于干热沙漠大气环境。由图4得知，7A85 铝合金在湿热海洋大气环境中，随着暴露时间的延长，沿晶网状裂纹向基体内部不断延伸，腐蚀深度逐渐增大。暴露0.5a，最大腐蚀深度为192 μm；暴露1a，最大腐蚀深度为231 μm；暴露3a，最大腐蚀深度为254 μm。7A85 铝合金在干热沙漠大气环境中暴露0.5a，未检出腐蚀；暴露1a，

最大腐蚀深度为95 μm；暴露3a，最大腐蚀深度为90 μm。可以看出，随着暴露时间的进一步延长，干热沙漠大气环境下7A85 铝合金的最大腐蚀深度并没有明显的增加。该结果印证了宏观腐蚀特征结果，表明铝合金腐蚀的发生与扩展需要较高的相对湿度和海盐离子。

7A85 铝合金暴露于两种典型大气环境的腐蚀机制如下所述^[15-18]。

第一阶段，大气相对湿度对铝合金腐蚀影响。海洋大气环境和干热沙漠环境下7A85 铝合金表面结露形成电解液膜，发生式（1）—（3）的电化学反应^[19]：



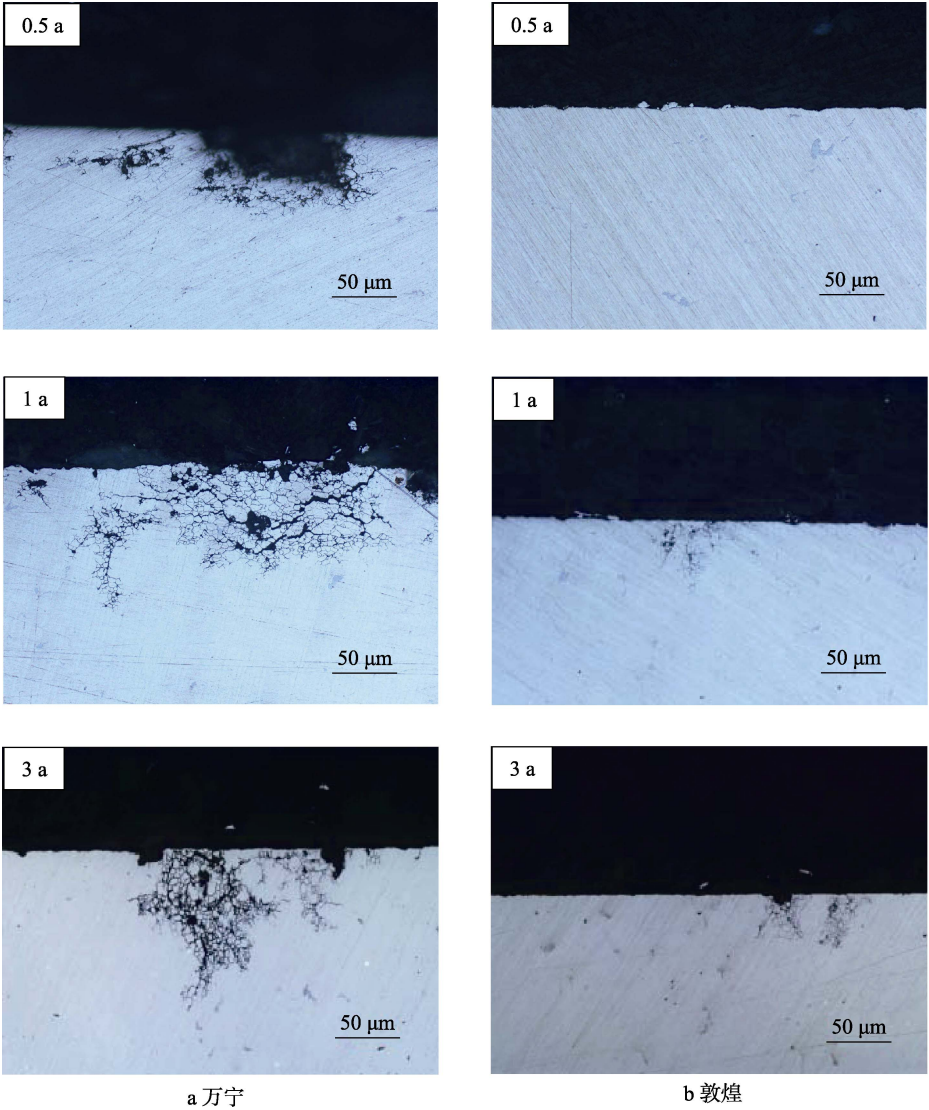


图 3 7A85 铝合金在两种典型大气环境中暴露 3 a 的金相显微形貌
Fig.3 Metallographic micrograph of 7A85 aluminum alloy exposed for 3 year in two typical atmospheric environments: a) Wanning; b) Dunhuang

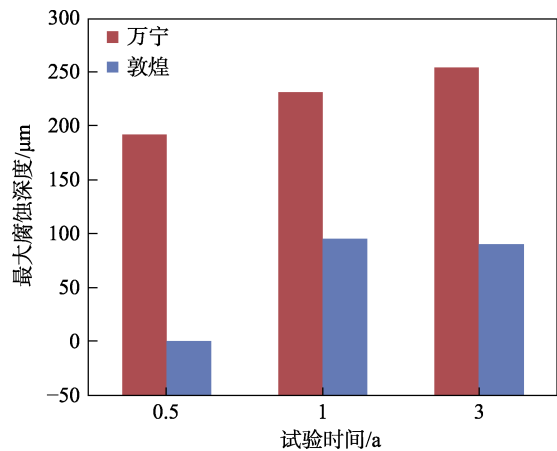


图 4 7A85 铝合金在两种典型大气环境中暴露 3 a 的最大腐蚀深度变化
Fig.4 Histogram of maximum corrosion depth of 7A85 aluminum alloy exposed for 3 year in two typical atmospheric environments

$$\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{OH}^- \quad (2)$$
$$\text{Al}^{3+} + 3\text{OH}^- \rightarrow \text{Al}(\text{OH})_3 \quad (3)$$
上述反应表明，由于海洋大气环境的相对湿度远大于干热沙漠大气环境，7A85 铝合金暴露于海洋大气环境中上述电化学反应越容易发生，铝合金腐蚀的速率越快。

第二阶段，空气中 Cl^- 的竞争吸附^[20]。空气中 Cl^- 通过竞争吸附，与第一阶段生成的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 发生反应， Cl^- 取代 OH^- ，生产可溶性的 AlCl_3 ，反应方程式为：

$$\text{Al}(\text{OH})_3 + 3\text{Cl}^- \rightarrow \text{AlCl}_3 + 3\text{OH}^- \quad (4)$$

由于海洋大气环境 Cl^- 含量高，上述竞争吸附反应较容易发生，进一步加速了 7A85 铝合金的腐蚀速率。

2.2 腐蚀规律分析

7A85 铝合金在湿热海洋、干热沙漠两种典型大气环境中暴露 3 a 的拉伸性能变化曲线如图 5 所示。

由图 5 a 可知, 在湿热海洋大气环境中, 7A85 铝合金的抗拉强度随暴露时间的延长逐渐降低。暴露 0.5 a, 抗拉强度下降 8%; 暴露 1 a, 抗拉强度下降 13%; 暴露 2 a, 抗拉强度下降 14%; 暴露 3 a, 抗拉强度下降 18%。7A85 铝合金在干热沙漠大气环境中暴露 0.5 a, 抗拉强度未发生下降; 暴露 1 a, 抗拉强度下降 5%; 暴露 2~3 a, 抗拉强度下降值与暴露 1 a 一致, 均为 5%。可以看出, 随着暴露时间进一步延长, 干热沙漠大气环境下 7A85 铝合金的抗拉强度未发生进一步下降, 该结果与前述结果一致。由图 5b 可知, 7A85 铝合金在湿热海洋大气环境暴露初期, 断后伸长率急剧下降。暴露 0.5 a, 断后伸长率下降 61%; 暴露 1~2 a, 断后伸长率均下降 67%, 暴露 3 a, 断后伸长率下降 72%。7A85 铝合金在干热沙漠大气环境中暴露 0.5 a, 断后伸长率下降 17%; 暴露 1~3 a, 断后伸长率下降均为 22%。

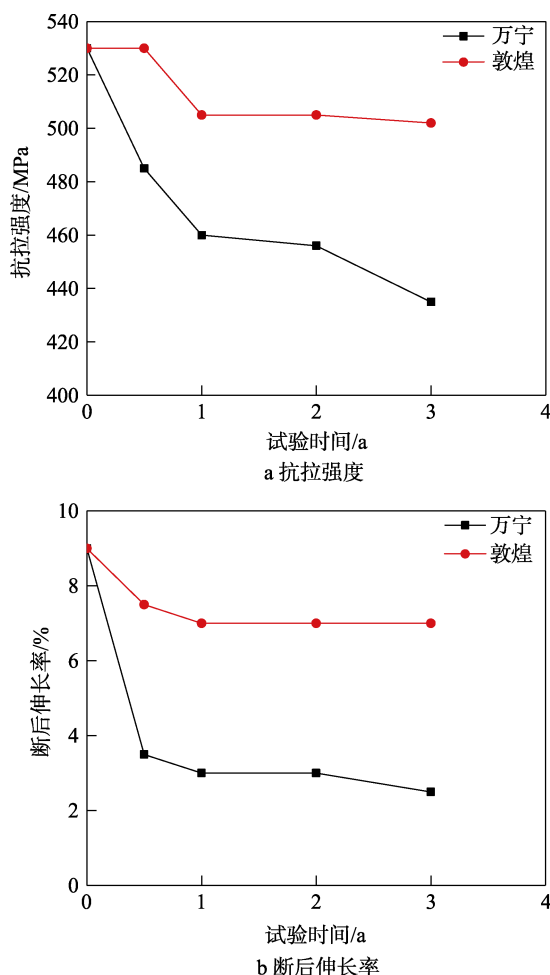


图 5 7A85 铝合金在两种典型大气环境中暴露 3 a 的拉伸性能变化曲线

Fig.5 Changing curve of tensile property of 7A85 aluminum alloy exposed for 3 year in two typical atmospheric environments: a) tensile strength; b) elongation after fracture

3 结论

1) 7A85 铝合金暴露于相对湿度较低的干热沙漠

环境, 表面形成的腐蚀产物膜会阻止腐蚀的进一步发生; 在湿热海洋大气环境中, 随暴露时间的延长, 7A85 铝合金的腐蚀逐渐加深。

2) 由于干热沙漠大气环境的相对湿度 (41%) 远小于铝合金的临界相对湿度 (65%), 铝合金表面生成具有保护作用的腐蚀产物膜, 阻止了腐蚀的进一步发生。

3) 7A85 铝合金在湿热海洋、干热沙漠两种典型大气环境中暴露 3 a 的最大腐蚀深度分别为 254 μm 和 90 μm 。

4) 7A85 铝合金在湿热海洋、干热沙漠两种典型大气环境中暴露 3 a 的抗拉强度分别下降 18% 和 5%, 断后伸长率分别下降 72% 和 22%。

参考文献:

- [1] 胡晓青, 王艳娟, 盛光英, 等. 固溶处理温度对 7A85 航空铝合金微观组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(9): 157-160.
HU Xiao-qing, WANG Yan-juan, SHENG Guang-ying, et al. Influence of Solution Treatment Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of 7A85 Aerospace Aluminum Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(9): 157-160.
- [2] 贾逢博, 易幼平, 黄施全, 等. 7A85 铝合金热压缩流变行为与本构方程研究[J]. 热加工工艺, 2010, 39(16): 19-21.
JIA Feng-bo, YI You-ping, HUANG Shi-quan, et al. Study on Flow Behavior and Constitutive Equation of 7A85 Aluminum Alloy During hot Compression[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(16): 19-21.
- [3] 罗国云, 易幼平, 崔金栋. 7A85 铝合金大锻件多向锻造均匀性研究[J]. 热加工工艺, 2014(9): 147-150.
LUO Guo-yun, YI You-ping, CUI Jin-dong. Research on Uniformity of Multi-directional Forging for 7A85 Aluminum Alloy Large-sized Forgings[J]. Hot Working Technology, 2014(9): 147-150.
- [4] 王洪, 付高峰, 孙继红, 等. 超高强铝合金研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(2): 58-60.
WANG Hong, FU Gao-feng, SUN Ji-hong, et al. Present Research and Developing Trends of Ultra High Strength Aluminum Alloys[J]. Materials Review, 2006, 20(2): 58-60.
- [5] 李恒, 王永红, 鄂孔元, 等. 热处理参数对超高强铝合金硬度的影响[J]. 重庆文理学院学报, 2012, 31(5): 20-23.
LI Heng, WANG Yong-hong, E Kong-yuan, et al. The Influence of Heat Treatment Parameters on Hardness of Super-high Strength Aluminum Alloy[J]. Journal of Chongqing University of Arts and Sciences, 2012, 31(5): 20-23.
- [6] DENG Y L, WAN L, ZHANG Y Y, et al. Influence of Mg Content on Quench Sensitivity of Al-Zn-Mg-Cu Alumi-

- num Alloys[J]. Journal of Alloys & Compounds, 2011, 509(13): 4636-4642.
- [7] 王洪斌, 黄进峰, 杨滨. Al-Zn-Mg-Cu 系超高强度铝合金的研究现状与发展趋势[J]. 材料导报, 2003, 17(9): 1-4.
- WANG Hong-bin, HUANG Jin-feng, YANG Bin. Current Status and Future Directions of Ultrahigh Strength al-zn-mg-cu Aluminum Alloys[J]. Mater Rev, 2003, 17(9): 1-4.
- [8] CHEN K H, LIU H W, ZHANG Z, et al. The Improvement of Constituent Dissolution and Mechanical Properties of 7055 Aluminum Alloy by Stepped Heat Treatments[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142: 190-196.
- [9] 肖代红, 陈康华. 固溶处理对 AA7A85 铝合金组织及力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(9): 494-497.
- XIAO Dai-hong, CHEN Kang-hua. Effect of Solution Heat Treatment on Microstructure and Properties of aa7085 Aluminum Alloys[J]. Rare and Metal Materials and Engineering, 2010, 39(9): 494-497.
- [10] 柏璠, 高文理, 何正林, 等. 失效工艺对 7A85 铝合金力学和晶间腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(5): 957-963.
- BAI Fan, GAO Wen-li, HE Zheng-lin, et al. Effect of Ageing Processes on Mechanical Properties and Intergranular Corrosion of 7A85 Aluminum Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(5): 957-963.
- [11] 姚晓红, 张林, 高文理, 等. 时效状态对 7A85 高强铝合金力学性能和晶间腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(12): 2581-2585.
- YAO Xiao-hong, ZHANG Lin, GAO Wen-lin, et al. Effect of Aging Treatment on Mechanical and Intergranular Corrosion Properties of 7A85 High Strength Aluminum Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(12): 2581-2585.
- [12] 李重阳, 刘道新, 叶作彦. 微弧氧化与稀土铈盐封孔对 7A85 新型铝合金耐蚀和耐磨性能的影响[J]. 材料科学, 2019, 44(9): 157-160.
- LI Chong-yang, LIU Dao-xin, YE Zuo-yan. Effect of the Micro-arc Oxidation and Cerium Salt Sealing on the Corrosion and Wear Resistance of New 7A85[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 44(9): 157-160.
- [13] 高岩, 丛大鹏, 于春鹏, 等. 7A85 航空铝合金热加工过程的本构变形行为及组织演变[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(5): 225-231.
- GAO Yan, CONG Da-peng, YU Chun-peng, et al. Constitutive Deformation Behavior and Microstructure Evolution of 7A85 Aerospace Aluminum Alloy During Hot Forming Process[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(5): 225-231.
- [14] 胡晓青, 王艳娟, 盛光英, 等. 固溶处理温度对 7A85 航空铝合金微观组织及力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2019, 44(9): 157-160.
- HU Xiao-qing, WANG Yan-juan, SHENG Guang-ying, et al. Influence of Solution Treatment Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of 7A85 Aerospace Aluminum Alloy[J]. Heat Treatment of Metals, 2019, 44(9): 157-160.
- [15] 罗来正, 肖勇, 苏艳, 等. 7050 高强铝合金在我国四种典型大气环境下腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 49-53.
- LUO Lai-zheng, XIAO Yong, SU Yan, et al. Research on Corrosion Behavior of 7050 High Strength Aluminum Alloy in Our Four Typical Atmospheric Environment[J]. Equipment Environment Engineering, 2015, 12(4): 49-53.
- [16] 罗来正, 肖勇, 陈志君, 等. 海洋大气环境中航空用 2D12 铝合金腐蚀行为研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 39-41.
- LUO Lai-zheng, XIAO Yong, CHEN Zhi-jun, et al. Research on Corrosion Behavior of 2D12 Aluminum Alloy Used for Aircraft in Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environment Engineering, 2012, 9(4): 39-41.
- [17] PYUN S I, MOOS S M, AHN S H, et al. Effects of Cl^- and SO_4^{2-} Ions on Anodic Dissolution of Pure Aluminum in Alkaline Solution[J]. Corrosion Soc, 1999, 41: 653-667.
- [18] ELOLA A S, OTERO T F, PORRO A. Evolution of the Pitting of Aluminum Exposed to the Atmosphere[J]. Corrosion, 1992, 48(10): 854-863.
- [19] 周和荣, 李晓刚, 董超芳. 铝合金及其氧化膜大气腐蚀行为与机理研究进展[J]. 装备环境工程, 2006, 3(1): 1-9.
- ZHOU He-rong, LI Xiao-gang, DONG Chao-fang. Review of Atmospheric Corrosion Behavior and Mechanism of Aluminum Alloys and Its Anodic Film[J]. Equipment Environment Engineering, 2006, 3(1): 1-9.
- [20] 马腾, 王振尧, 韩薇. 铝和铝合金的大气腐蚀[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(3): 155-161.
- MA Teng, WANG Zhen-yao, HAN Wei. A Review of Atmospheric Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2004, 16(3): 155-161.