

磁场环境下铝合金腐蚀后疲劳试验研究



杨仁宇, 郭巧荣, 李顶河
中国民航大学, 天津 300300

摘要:飞机在服役期内处于海水、盐雾和复杂电磁场等环境中,会受到严重的腐蚀疲劳损伤,影响飞行安全。为了研究磁场环境下铝合金腐蚀行为,本文开展了磁场环境下剥层腐蚀(EXCO)溶液中铝合金的腐蚀试验,以及腐蚀后的单轴拉伸试验和疲劳试验。选用7075-T6铝合金作为研究对象,分析了试件表面腐蚀形貌,记录了试件每日增重结果情况,观察了疲劳断口形貌,分析了疲劳寿命。研究表明,在腐蚀初期,铝合金试件表面出现突起,随着腐蚀的进行,铝合金试件表面发生剥层腐蚀;随着磁场增大,铝合金试件腐蚀速率先增大后减小;同一应力水平下,磁场强度为2.8mT时疲劳寿命小于磁场强度为1.3mT时的疲劳寿命,疲劳破坏区特征明显,疲劳源区较光滑,试件断裂区断面粗糙。通过研究可以了解磁场对铝合金腐蚀行为的影响,对优化铝合金抗腐蚀性能、延长铝合金使用寿命有一定的参考意义。

关键词:铝合金; 磁场; 腐蚀; 疲劳; 断口

中图分类号: O346.2+1

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.03.011

7075-T6航空铝合金因其强度高、易于加工成形以及良好的耐腐蚀性等独特优势而广泛应用于航空领域^[1-5]。飞机在服役过程中会面临来自自然界和人类活动造成的各种电磁场环境的影响,电磁辐射环境对飞机的电气和电子系统可能造成危害,影响其正常运行^[6],同时也会对机身结构腐蚀产生影响。磁场对电化学腐蚀的影响主要体现在传质过程,当离子液体流经磁场时,其中的带电粒子受到顺磁梯度力、洛伦兹力和磁场梯度力的作用。磁场对腐蚀的影响较为复杂,机理有待进一步深入研究^[7]。

飞机结构在服役的过程中会发生多种形式的腐蚀破坏,其中主要的腐蚀类型包括全面腐蚀和局部腐蚀^[8]。全面腐蚀分为均匀腐蚀和不均匀腐蚀。局部腐蚀虽然只造成局部损伤,但其对结构件强度的影响通常远远超过均匀腐蚀。Shi Laixin等^[9]研究了实际海洋大气腐蚀行为及其对7075-T73铝合金疲劳性能的影响规律,发现铝合金试件出现局部点蚀、晶间腐蚀和剥层腐蚀。Li Ning等^[10]研究了热带海洋大气环境对7B04-T74铝合金腐蚀行为的影响,发现在热带海洋大气环境中,局部点蚀迅速发生,但在腐蚀后

期,铝合金的腐蚀并不严重。Zhao Jing等^[11]研究了2024铝合金在南海大气环境中的腐蚀规律和腐蚀机理,发现随着腐蚀的发展,铝合金表面由点蚀发展为全面腐蚀,自腐蚀电流密度先增大后减小再增大。Canepa等^[12]研究了7075-T651铝合金在帕塞罗角约3350m深的深海中的腐蚀行为,铝合金表面出现点蚀、缝隙腐蚀和剥落腐蚀。

磁场对腐蚀的影响到目前为止仍未有统一的观点,现有的研究中仍存在相互矛盾的观点,通常从磁场方向和磁场大小两个方面研究磁场对腐蚀的影响。姜超等^[13]研究了磁场对AZ31B镁合金在两种不同浓度的NaCl溶液中腐蚀行为的影响,发现在0.1mol/L的NaCl溶液中施加0.4T平行磁场后,镁合金腐蚀速率降低,在1mol/L的NaCl溶液中施加0.4T平行磁场后,镁合金腐蚀速率提高。李晨等^[14]研究了磁场对铁在0.2mol/L的NaCl溶液中阳极溶解速率的影响,发现在0.4T水平磁场环境下,铁表面出现局部加速腐蚀。Zhang Xin等^[15]研究了外加磁场对Al-3.0wt%Mg合金在3.5%的NaCl溶液中腐蚀行为的影响,发现水平磁场强度为0.4T时,点蚀形成时间延长。Kountouras等^[16]研究了

收稿日期: 2024-08-17; 退修日期: 2024-11-21; 录用日期: 2025-01-13

基金项目: 航空科学基金(20230038067002)

引用格式: Yang Renyu, Guo Qiaorong, Li Dinghe. Experimental research on fatigue of aluminum alloy after corrosion under magnetic field [J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(03): 86-94. 杨仁宇, 郭巧荣, 李顶河. 磁场环境下铝合金腐蚀后疲劳试验研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(03): 86-94.

外加磁场对锌-不锈钢电偶腐蚀行为的影响,发现水平磁场促进阳极腐蚀,垂直磁场抑制阳极腐蚀,随着水平磁场强度增强,阳极腐蚀加快。

在航空领域,铝合金腐蚀疲劳问题一直是飞机日历寿命研究中的重点关注对象。疲劳腐蚀机理主要有三种:(1)局部腐蚀理论、阳极溶解-膜破裂理论和表面吸附理论;(2)腐蚀疲劳环境的模拟主要通过腐蚀疲劳同步试验技术;(3)预腐蚀疲劳试验技术和腐蚀-疲劳交替试验技术^[17-19]。张胜等^[20]研究从初期点蚀到后期剥蚀的整个沿海大气腐蚀过程中腐蚀对2A12-T4铝合金板件疲劳特性的影响,预腐蚀初期,试件表面腐蚀不均匀,使得局部应力集中,疲劳寿命显著降低;随着预腐蚀时间的增加,腐蚀变得均匀,腐蚀最深区域为晶间腐蚀,疲劳寿命下降不再显著。翁硕等^[21]研究了预腐蚀损伤对AA7075-T651铝合金疲劳行为的影响,发现与未腐蚀试样的疲劳寿命相比,相同载荷条件下腐蚀损伤会使铝合金疲劳寿命降低,随着腐蚀进行,腐蚀损伤特征更加明显,而疲劳寿命却没有明显的变化。Rodriguez等^[22]研究了腐蚀对异种搅拌摩擦焊接AA6061和AA7050铝合金低循环疲劳性能的影响,发现铝合金表面出现点蚀、剥落腐蚀、凹坑集群和裂纹,铝合金疲劳寿命缩短;但是疲劳寿命几乎与腐蚀时间无关。

铝合金结构的剥层腐蚀(EXCO)是飞机服役过程中常见的一种腐蚀形式,EXCO溶液可用于研究7075-T6铝合金剥层腐蚀。EXCO溶液作为大气腐蚀损伤加速环境的试验溶液,合理性已得到了验证,某型飞机的日历寿命评定是通过EXCO加速腐蚀试验进行的^[23]。目前,电磁场环境下的金属腐蚀行为仍未有一致的观点,很少有学者考虑以EXCO为腐蚀溶液的长时效腐蚀后疲劳。本文以7075-T6铝合金为研究对象,开展磁场环境下腐蚀试验和腐蚀后疲劳试验,通过观察宏观形貌和每日增重,研究磁场对腐蚀行为的影响,通过分析疲劳数据和观察断口形貌,研究磁场环境下腐蚀对铝合金疲劳性能的影响规律。

1 试验概况

1.1 试验件

试件材料为7075-T6铝合金,其化学组分见表1。采用挤压成形板材,沿材料挤压方向数控加工试件。为了后续疲劳试验,参照ASTM E466-15标准加工为狗骨形试件,总长度为60mm,有效长度为19mm,圆角半径为5.53mm,总宽度为20mm,有效宽度为10mm,试件厚度为3mm,试件尺寸如图1所示。

表1 7075-T6铝合金元素质量分数(单位:wt%)

Table 1 Elemental mass fraction of 7075-T6 aluminum alloy (Unit: wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	其他	Al
0.4	0.5	2.0	0.3	2.9	0.28	6.1	0.2	0.15	余量

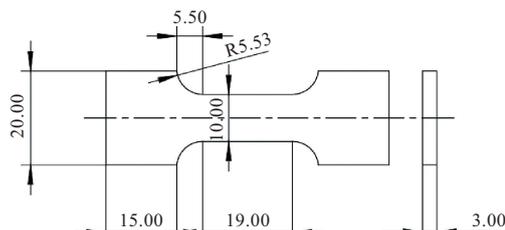


图1 预制狗骨形试件示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of prefabricated dog bone type specimen (Unit: mm)

1.2 腐蚀试验

按照ASTM G34-01配制EXCO腐蚀溶液,表2为EXCO溶液成分配比,配制的溶液所需溶剂为去离子水1L,溶质为NaCl、KNO₃、HNO₃。试验前对试件表面进行打磨和抛光,后用吹风机将铝合金试件表面的水吹干并称重,干燥状态下放入袋子中。采用单边腐蚀的方法,将试验件的非试验部分使用防水胶带进行保护并称重,密封时注意胶带与腐蚀区域的缝隙,防止产生缝隙腐蚀。将保护处理后的试件用无水乙醇擦拭腐蚀区域,清除表面污渍,用吹风机吹干并称重,但要防止无水乙醇使密封物析出。每个试件的预处理过程需保持一致,腐蚀作用范围大小相等。

表2 EXCO腐蚀溶液成分配比

Table 2 EXCO corrosion solution component ratio

成分	比例/(g/L)
NaCl	234
KNO ₃	50
HNO ₃	6.3

磁场装置如图2所示。功率放大器接通电源前先与一维亥姆霍兹线圈进行连接。将功率放大器的信号选择旋钮调至内接,输出调节旋钮调至最小,再连接电源。在高斯计未接通电源时,将霍尔探头与高斯计连接。霍尔探头的横向探头为扁平状,测量时,使扁平面与线圈轴线垂直,将连接霍尔探头的杆放置于所述支架的孔中,调节螺钉至霍尔探头完全固定。将霍尔探头伸入一维亥姆霍兹线圈中,测量其中心磁场强度。

准备三个烧杯,分别加入100mL的EXCO溶液,使用试

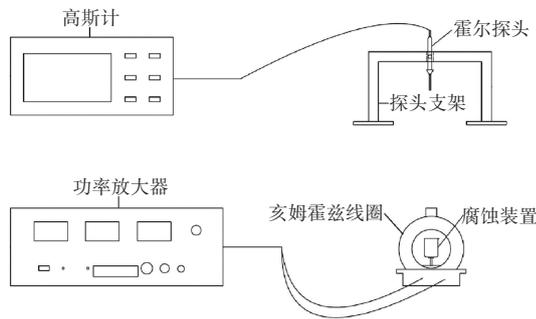


图2 磁场发生检测系统

Fig.2 Magnetic field generation detection system

件夹具固定试件后置于烧杯中,使用保鲜膜对烧杯进行密封。将三个烧杯置于远离磁场发生装置处、亥姆霍兹线圈中心位置处和磁铁对中心处,分别对应0、1.3mT、2.8mT垂直磁场环境下EXCO溶液中7075-T6铝合金腐蚀试验。腐蚀时间达到1~6天时取出试件,在流水下冲洗腐蚀样品,用去离子水冲洗并用吹风机干燥,测量并记录腐蚀后重量以及腐蚀形貌。

1.3 单轴拉伸试验

在进行铝合金腐蚀后疲劳试验前,需要对未腐蚀7075-T6铝合金进行单轴拉伸试验,确定铝合金抗拉强度,7075-T6铝合金位移载荷曲线如图3所示。根据金属材料拉伸试验标准GB/T228.1—2010进行单轴拉伸试验。将载荷施加模式设置为位移控制模式,将加载速率设置为2mm/min,记录载荷和位移,测得平均抗拉强度为572.587MPa,7075-T6铝合金抗拉强度见表3。

对0、1.3mT垂直磁场环境下EXCO溶液中腐蚀6天后的7075-T6铝合金试件进行拉伸试验,研究磁场和腐蚀对抗拉强度的影响。按照未腐蚀试验步骤进行腐蚀后试件拉

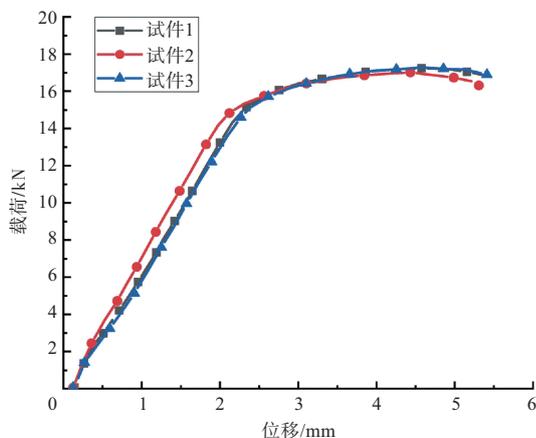


图3 7075-T6铝合金拉伸曲线

Fig.3 7075-T6 aluminum alloy tensile curve

伸试验,位移载荷曲线如图4所示,抗拉强度见表4。0、1.3mT垂直磁场环境下EXCO溶液中腐蚀6天后7075-T6铝合金试件抗拉强度基本相同。

表3 7075-T6铝合金抗拉强度

Table 3 7075-T6 aluminum alloy tensile strength

试件	最大载荷/kN	抗拉强度/MPa
1	17.279	575.978
2	17.002	566.735
3	17.251	575.048

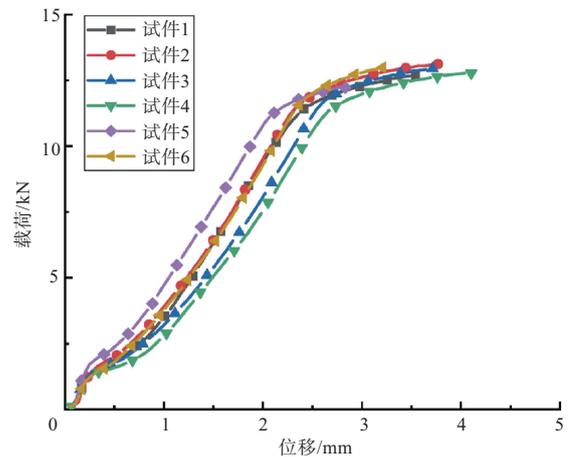


图4 7075-T6铝合金腐蚀后的拉伸曲线

Fig.4 Tensile curve of corrosive 7075-T6 aluminum alloy

表4 7075-T6铝合金腐蚀后的抗拉强度

Table 4 Tensile strength of corrosive 7075-T6 aluminum alloy

环境	最大载荷/kN	抗拉强度/MPa
1.3mT	12.688	422.917
	13.115	437.16
	12.944	431.461
无磁场	12.771	425.715
	12.224	407.46
	12.982	432.723

1.4 腐蚀后疲劳试验

在室温条件下,进行腐蚀后的疲劳试验,有效数量为9件,疲劳试验参数见表5。在不同磁场强度下腐蚀作用6天后,分别将试件从腐蚀溶液中取出,用流水冲洗试件5min,将腐蚀区域残留的腐蚀介质冲洗干净、吹干。去除防水胶带,使用无水乙醇擦拭试件表面、侧边及腐蚀区域,加速吹干。处理完毕后,在疲劳试验机进行疲劳试验,每个磁场强度取9个试件,疲劳试验机Instron 8801如图5所示。

表5 7075-T6 铝合金腐蚀后疲劳试验参数
Table 5 7075-T6 aluminum alloy post-corrosion fatigue test parameters

材料	加载波形	应力比	加载频率	试验环境
7075-T6	正弦波	0.1	10Hz	25°C



图5 Instron 8801 疲劳试验机
Fig.5 Instron 8801 fatigue tester

2 试验结果

2.1 腐蚀试验结果

将处理好的铝合金试件全部浸泡于腐蚀环境中,发现腐蚀初期试件表面开始产生微小气泡,并黏附在腐蚀区域的裸露面上。随着腐蚀作用的发生,沉积在腐蚀区域中的气泡的体积会变大,会覆盖腐蚀区域的整个表面,并且气泡开始脱落,浮在腐蚀溶液表面,腐蚀区域表面有腐蚀产物析出,光滑平面产生突起。随着腐蚀的不断进行,溶液表面出现体积较大的大量气泡,试件表面上的气泡数量减少,试件的侧边聚集大量的气泡。同时,试件表面开始生成大量的腐蚀产物,并且这些产物呈现出分层的现象。由于防水胶带的的作用,腐蚀产物未能脱落。

图6为无磁场环境下EXCO溶液中9个铝合金试件腐蚀3天和6天后的宏观腐蚀形貌。从图6中可以看出,试件腐蚀1天后,试件表面出现突起,试件腐蚀6天后,从试件侧面可以看出,试件表面腐蚀产物有较高的突起;从左到右第2张图为2号试件表面宏观形貌,试件表面产物出现断裂;从左到右第7张图、第8张图和第9张图分为7~9号试件拆除防水胶布后宏观形貌,随着腐蚀的进行,试件表面腐蚀产物突起高度逐渐增大,使得密封的试件两端产生腐蚀;其

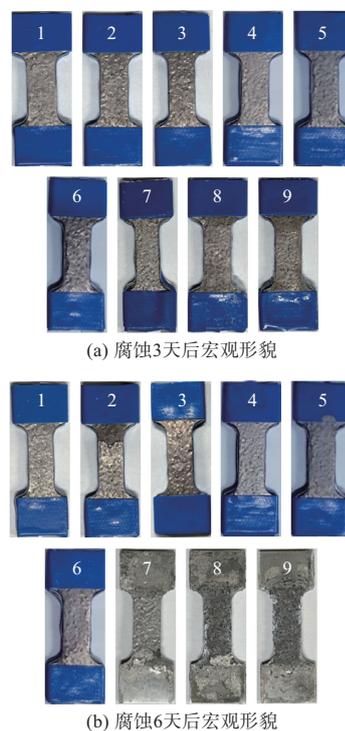


图6 无磁场环境下铝合金腐蚀形貌

Fig.6 Aluminum alloy corrosion morphology in a magnetic field-free environment

中,8号试件和9号试件上腐蚀产物由于防水胶布的拆除产生整体脱落。

图7为1.3mT垂直磁场环境下EXCO溶液中9个铝合金试件腐蚀3天和6天后的宏观腐蚀形貌。图7(a)中从左到右第1张图、第2张图和第3张图为1~3号试件腐蚀3天宏观形貌,其表面突起较少;从左到右第4张图、第5张图和第6张图为4~6号试件腐蚀3天宏观形貌,其表面突起较多。图7(b)中从左到右第1张图、第2张图和第3张图为1~3号试件腐蚀6天拆除防水胶带后宏观形貌,随着防水胶带的拆除,2号试件表面腐蚀产物一端出现断裂,3号试件表面腐蚀产物出现部分脱落。

图8为2.8mT垂直磁场环境下EXCO溶液中9个铝合金试件腐蚀3天和6天后的宏观腐蚀形貌。

试件上防水胶带重量通过试件密封后重量减去试件经过表面处理后重量获得,每日增重量通过腐蚀试件每日重量减去试件上防水胶带重量及试件密封后重量获得。图9为无磁场环境下EXCO溶液中9个铝合金试件每日增重结果,其中,4~6号试件相较于其他试件每日增重较大;4~6号试件在前4天每日增重速率大于其他试件,其他试件每日增重呈线性增长趋势。腐蚀6天后试件增重最大值为0.424g。



图7 1.3mT磁场环境下铝合金腐蚀形貌

Fig.7 Corrosion morphology of aluminum alloy in a magnetic field at 1.3mT



图8 2.8mT磁场环境下铝合金腐蚀形貌

Fig.8 Corrosion morphology of aluminum alloy in a magnetic field at 2.8mT

图10为1.3mT垂直磁场环境下EXCO溶液中9个铝合

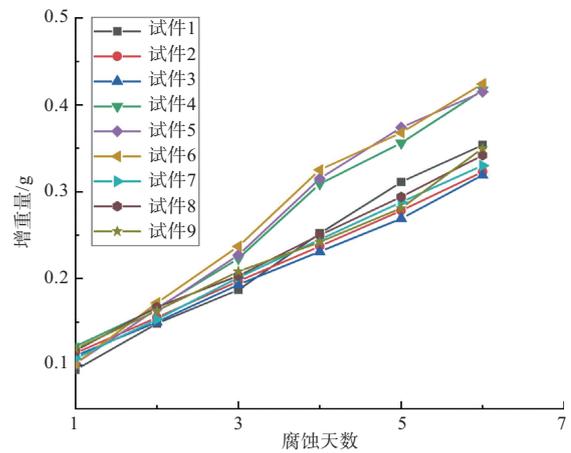


图9 无磁场环境下每日增重

Fig.9 Daily weight gain in a non-magnetic field environment

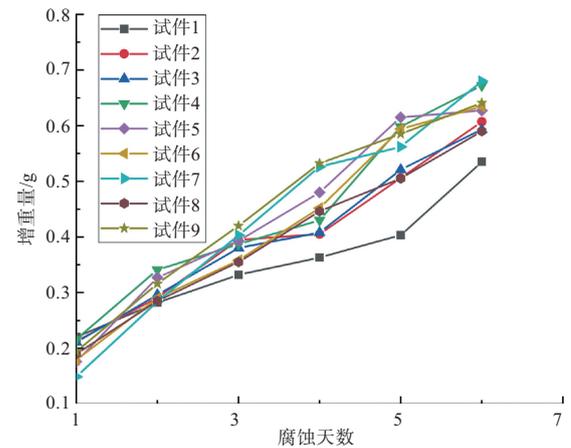


图10 磁场强度1.3mT每日增重

Fig.10 Magnetic field strength of 1.3mT with daily weight gain

金试件每日增重结果。磁场强度为1.3mT时腐蚀6天后试件增重最小值为0.535g,大于磁场强度为0时腐蚀6天后试件增重最大值,施加垂直磁场加速了铝合金腐蚀。

图11为2.8mT垂直磁场环境下EXCO溶液中9个铝合金试件每日增重结果。由于测量误差的存在,磁场强度为1.3mT时1号试件和磁场强度为2.8mT时5号试件每日增重与其他试件每日增重有较大区别,不考虑磁场强度为1.3mT时1号试件和磁场强度为2.8mT时5号试件,磁场强度为1.3mT时腐蚀6天后试件增重最小值大于磁场强度为2.8mT时腐蚀6天后试件增重最大值。随着垂直磁场增大,腐蚀速率下降,但仍大于无磁场环境试件腐蚀速率。

图12为不同磁场环境下EXCO溶液中铝合金每日增重对比图,不同磁场环境下各有9个铝合金试件。从图12中可以看出,垂直磁场加速腐蚀,影响腐蚀速率的比较如

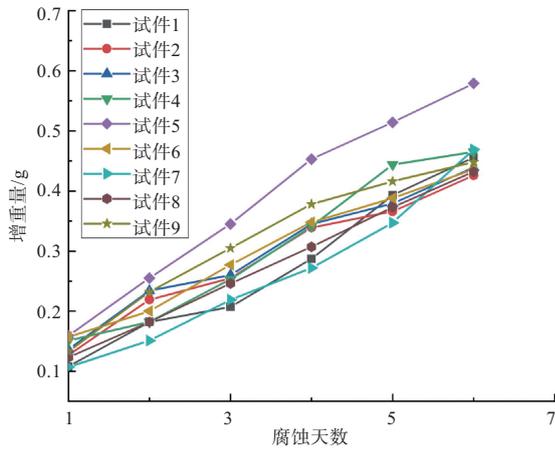


图 11 磁场强度 2.8mT 每日增重

Fig.11 Magnetic field strength 2.8mT daily weight gain

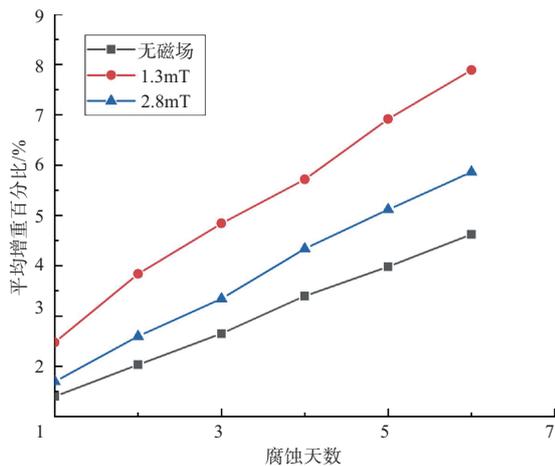


图 12 不同磁场环境下每日平均增重

Fig.12 Average daily weight gain in different magnetic fields

下:1.3mT>2.8mT>无磁场。

磁场梯度力使顺磁性离子向高磁感应强度区域移动,抗磁性离子向低磁感应强度区域移动。铝溶解过程中,首先铝失去电子成为活性中间离子,电子排布为 $1S^22S^22P^63S^13P^1$,3S和3P轨道上各有一个电子,活性中间离子为顺磁离子。随着磁场强度增大,顺磁梯度力使活性中间离子聚集在铝合金表面,因此铝合金表面活性中间离子浓度升高并阻碍反应进行。

2.2 疲劳试验结果

不同磁场环境下 EXCO 溶液中腐蚀 6 天后铝合金试件分别在最大应力为 129MPa、193.5MPa、236.5MPa 载荷作用下进行疲劳试验。表 6 为 1.3mT 垂直磁场环境下 EXCO 溶液中腐蚀 6 天后 9 个铝合金试件经过疲劳试验获得的疲劳寿命。通过计算,磁场强度为 1.3mT 磁场环境下腐蚀 6 天后试件在最大应力为 129MPa 载荷作用下平均寿命是 96415

表 6 磁场强度为 1.3mT 腐蚀后疲劳寿命

Table 6 Fatigue life after corrosion with a magnetic field strength of 1.3mT

最大应力/MPa	疲劳寿命	平均疲劳寿命
129	95447	96415
	84355	
	109444	
193.5	19231	18659
	15573	
	21173	
236.5	8673	8906
	6019	
	12026	

次,最大应力为 193.5MPa 载荷作用下平均寿命是 18659 次,最大应力为 236.5MPa 载荷作用下平均寿命是 8906 次。

表 7 为 2.8mT 垂直磁场环境下 EXCO 溶液中腐蚀 6 天后 9 个铝合金试件经过疲劳试验获得的疲劳寿命。通过计算,磁场强度为 2.8mT 磁场环境下腐蚀 6 天试件在最大应力为 129MPa 载荷作用下平均疲劳寿命是 69755 次,最大应力为 193.5MPa 载荷作用下平均疲劳寿命是 17156 次,最大应力为 236.5MPa 载荷作用下平均疲劳寿命是 8513 次。

最大应力为 129MPa 时,虽然磁场强度为 2.8mT 比磁场强度为 1.3mT 腐蚀 6 天后试件平均疲劳寿命减少了 27.7%,但是两者仍处于一个数量级上,且由于疲劳试验分散性的存在,故认为两者疲劳寿命差距不大;最大应力为 193.5MPa 时,磁场强度为 2.8mT 比磁场强度为 1.3mT 腐蚀 6 天后试样平均疲劳寿命仅减少了 8.1%;最大应力为 236.5MPa 时,磁场强度为 2.8mT 比磁场强度为 1.3mT 腐蚀 6 天后试样平均疲劳寿命仅减少了 4.4%。腐蚀损伤程度与铝合金试件腐蚀后疲劳寿命不呈负相关^[20-22],疲劳试验结果与腐蚀试验结果不矛盾。

表 7 磁场强度为 2.8mT 腐蚀后疲劳寿命

Table 7 Fatigue life after corrosion with a magnetic field strength of 2.8mT

最大应力/MPa	疲劳寿命	平均疲劳寿命
129	78904	69755
	65599	
	64761	
193.5	17239	17156
	21815	
	12414	
236.5	9901	8513
	6626	
	9011	

从图13中的S-N曲线可以看出,同一环境下,应力水平越高,疲劳寿命越低,并且同一应力水平下,2.8mT磁场环境下疲劳寿命低于1.3mT磁场环境下疲劳寿命,说明磁场增大对7075-T6铝合金疲劳性能产生不利影响。

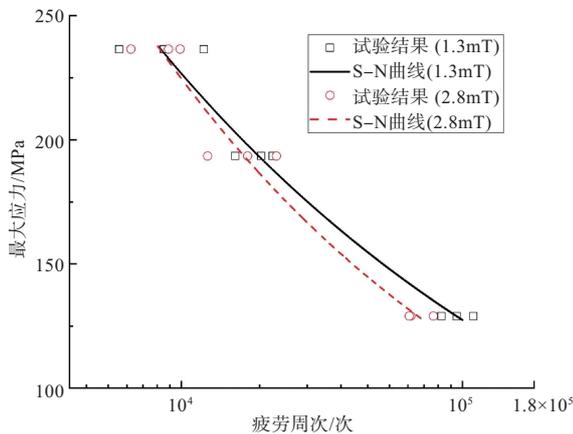


图13 疲劳试验结果

Fig.13 Fatigue test results

2.3 断口形貌分析

图14为1.3mT磁场环境下腐蚀6天后疲劳试件断口形貌。最大应力为129MPa时试件断口形貌如图14(a)所示,裂纹源位于断口右侧;最大应力为193.5MPa时试件断口形貌如图14(b)所示,裂纹源位于断口左侧;最大应力为236.5MPa时试件断口形貌如图14(c)所示,裂纹源位于断口右侧。不同应力下试件的裂纹源表面较为光滑,断裂区断面与拉伸方向呈一定角度,断面粗糙。

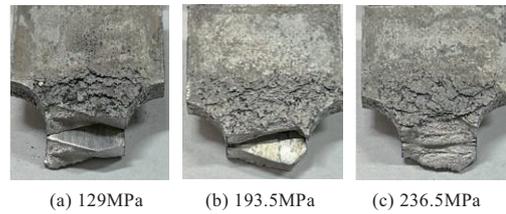


(a) 129MPa (b) 193.5MPa (c) 236.5MPa

图14 1.3mT不同应力试件断口形貌

Fig.14 Fracture morphology of 1.3mT specimens with different stresses

图15为2.8mT磁场环境下腐蚀6天后疲劳试件断口形貌。最大应力为129MPa时试件断口形貌如图15(a)所示,裂纹源位于断口右侧;最大应力为193.5MPa时试件断口形貌如图15(b)所示,裂纹源位于断口左侧;最大应力为236.5MPa时试件断口形貌如图15(c)所示,裂纹源位于断口左侧。不同应力下试件的裂纹源表面较为光滑,断裂区



(a) 129MPa (b) 193.5MPa (c) 236.5MPa

图15 2.8mT不同应力试件断口形貌

Fig.15 Fracture morphology of 2.8mT specimens with different stresses

断面与拉伸方向呈一定角度,断面粗糙。

腐蚀可能改变铝合金表面的形貌和化学性质,从而影响疲劳裂纹的起始和扩展。腐蚀使铝合金表面粗糙度增加、表面氧化物的形成等现象,这些变化对疲劳裂纹的起始和扩展产生影响。在EXCO溶液腐蚀环境中,腐蚀可能导致铝合金表面吸附或吸收氢气,从而增加了7075-T6铝合金的氢脆倾向,氢脆可能导致铝合金的脆性断裂,降低其疲劳强度和寿命。

3 结论

通过研究,可以得出以下结论:

- (1)开展有无磁场环境下EXCO溶液中7075-T6铝合金腐蚀试验,得到了相应的每日增重结果,腐蚀6天后增重量:1.3mT > 2.8mT > 无磁场。
- (2)开展了试件腐蚀后拉伸试验,不同磁场环境试件抗拉强度基本一致;观察试件每日腐蚀现象和腐蚀宏观形貌,试件表面形成突起,试件发生剥层腐蚀。
- (3)开展了不同磁场环境下EXCO溶液中腐蚀后疲劳试验,得到最大应力129MPa、193.5MPa、236.5MPa作用下的疲劳寿命,同一应力水平下磁场强度为1.3mT疲劳寿命大于磁场强度为2.8mT时疲劳寿命;试件疲劳破坏区特征明显,试件疲劳源区较光滑,试件断裂区断面粗糙。 **AST**

参考文献

- [1] 金帅, 罗丹青, 刘永华, 等. 航空新材料研究进展及发展趋势探析[J]. 机电产品开发与创新, 2023, 36(4): 29-33.
Jin Shuai, Luo Danqing, Liu Yonghua, et al. Research progress and development of new aviation materials[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2023, 36(4): 29-33. (in Chinese)
- [2] 熊柏青, 闫宏伟, 张永安, 等. 我国航空铝合金产业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2023, 25(1): 88-95.

- Xiong Baiqing, Yan Hongwei, Zhang Yongan, et al. Development strategy for the aviation-grade aluminum alloy industry in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2023, 25(1): 88-95. (in Chinese)
- [3] 臧金鑫, 陈军洲, 韩凯, 等. 航空铝合金研究进展与发展趋势 [J]. *中国材料进展*, 2022, 41(10): 769-777, 807.
- Zang Jinxin, Chen Junzhou, Han Kai, et al. Research progress and development tendency of aeronautical aluminum alloys[J]. *Materials China*, 2022, 41(10): 769-777, 807. (in Chinese)
- [4] 马野, 宋盛菊, 刘焱飞. 飞行器新结构技术展望[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(11): 63-74.
- Ma Ye, Song Shengju, Liu Yanfei. Prospect of new structure technology for flight vehicle[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(11): 63-74. (in Chinese)
- [5] 肖雨欣, 冯钰博, 王嘉禄, 等. 摩擦发光材料在航空航天设备破损监测领域的研究进展及展望[J]. *航空科学技术*, 2023, 34(10): 1-8.
- Xiao Yuxin, Feng Yubo, Wang Jialu, et al. Research progress and prospects of triboluminescence materials in the field of aerospace equipment breakage monitoring[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2023, 34(10): 1-8. (in Chinese)
- [6] 胡建军, 潘增寿. 机载电子设备高强度辐射场防护研究[J]. *通讯世界*, 2019, 26(8): 38-39.
- Hu Jianjun, Pan Zengshou. Research on high-intensity radiation field protection for airborne electronic equipment[J]. *Telecom World*, 2019, 26(8): 38-39. (in Chinese)
- [7] Mitre C I N, Tosin G, Colnago L A. In-operando analysis of the corrosion patterns and rates under magnetic fields using metallic film[J]. *NPJ Materials Degradation*, 2022, 6(1): 24.
- [8] 赵麦群, 雷阿丽. 金属的腐蚀与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- Zhao Maiqun, Lei Ali. Corrosion and protection of metals[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [9] Shi Laixin, Xiang Lin, Tao Jianquan, et al. Actual marine atmospheric pre-corrosion fatigue performance of 7075-T73 aluminum alloy[J]. *Metals*, 2022, 12(5): 874.
- [10] Li Ning, Zhang Weifang, Yan Xiaojun, et al. Effect of tropical marine atmospheric environment on corrosion behaviour of the 7B04-T74 aluminium alloy[J]. *Metals*, 2023, 13(5): 995.
- [11] Zhao Jing, Zhao Tongjun, Zhang Yazhou, et al. Corrosion behavior of the 2024 aluminum alloy in the atmospheric environment of the south china sea islands[J]. *Coatings*, 2024, 14(3): 331.
- [12] Canepa E, Stifanese R, Merotto L, et al. Corrosion behaviour of aluminium alloys in deep-sea environment: a review and the KM3NeT test results[J]. *Marine Structures*, 2018, 59(5): 271-284.
- [13] 姜超, 马保吉. 磁场对AZ31B镁合金在2种浓度NaCl溶液中腐蚀特性的影响[J]. *材料保护*, 2021, 54(1): 7-12, 35.
- Jiang Chao, Ma Baoji. Effect of magnetic field on the corrosion characteristics of AZ31B magnesium alloy in NaCl solutions with two different concentrations[J]. *Materials Protection*, 2021, 54(1): 7-12, 35. (in Chinese)
- [14] 李晨, 许鑫和, 宋晓娟, 等. 磁场对铁在氯化钠溶液中阳极溶解速率的影响[J]. *腐蚀与防护*, 2022, 43(6): 58-61, 96.
- Li Chen, Xu Xinhe, Song Xiaojuan, et al. Effect of magnetic field on anodic dissolution rate of iron in sodium chloride solution[J]. *Corrosion & Protection*, 2022, 43(6): 58-61, 96. (in Chinese)
- [15] Zhang Xin, Wang Zehua, Zhou Zehua, et al. Corrosion behavior of Al 3.0wt% Mg alloy in NaCl solution under magnetic field[J]. *Rare Metals*, 2017, 36: 627-634.
- [16] Kountouras D T, Vogiatzis C A, Tsouknidas A, et al. Preventing or accelerating galvanic corrosion through the application of a proper external magnetic field[J]. *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 2014, 49(7): 603-607.
- [17] 李斌, 董丽虹, 王海斗, 等. 航空航天铝合金腐蚀疲劳研究进展[J]. *表面技术*, 2021, 50(7): 106-118.
- Li Bin, Dong Lihong, Wang Haidou, et al. Research progress on corrosion fatigue of aerospace aluminum alloy[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(7): 106-118. (in Chinese)
- [18] Rokhlin S I, Kim J Y, Nagy H, et al. Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1999, 62(4-5): 425-444.
- [19] Beden S M, Abdullah S, Ariffin A K. Review of fatigue crack propagation models for metallic components[J]. *European Journal of Scientific Research*, 2009, 28(3): 364-397.
- [20] 张胜, 王长凯, 何宇廷, 等. 模拟沿海大气环境腐蚀对2A12-T4铝合金板件疲劳行为的影响[J]. *航空工程进展*, 2023, 14(5): 85-93, 100.
- Zhang Sheng, Wang Changkai, He Yuting, et al. Effect of

- coastal atmospheric corrosion on fatigue characteristics of 2A12-T4 aluminum alloy plate[J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2023, 14(5): 85-93, 100. (in Chinese)
- [21] 翁硕, 俞俊, 赵礼辉, 等. 腐蚀损伤对AA7075-T651铝合金疲劳行为影响的研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2022, 42(3): 486-492. Weng Shuo, Yu Jun, Zhao Lihui, et al. Effect of corrosion damage on fatigue behavior of AA7075-T651, Al-alloy[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 2022, 42(3): 486-492. (in Chinese)
- [22] Rodriguez R I, Jordon J B, Allison P G, et al. Corrosion effects on fatigue behavior of dissimilar friction stir welding of high-strength aluminum alloys[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2019, 742: 255-268.
- [23] 宋恩鹏, 刘文珽, 杨旭. 飞机内部腐蚀关键部位加速试验环境谱研究[J]. *航空学报*, 2006, 27(4): 646-649. Song Enpeng, Liu Wenting, Yang Xu. Study on accelerated corrosion test environment spectrum for internal aircraft structure [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2006, 27(4): 646-649. (in Chinese)
- [22] Rodriguez R I, Jordon J B, Allison P G, et al. Corrosion effects

Experimental Research on Fatigue of Aluminum Alloy After Corrosion Under Magnetic Field

Yang Renyu, Guo Qiaorong, Li Dinghe

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China

Abstract: Aircraft will be subjected to serious corrosion fatigue damage under service in seawater, salt spray and complex electromagnetic field environment. This damage would be affecting the flight safety. In order to explore fatigue of aluminum alloy after corrosion under magnetic field, the corrosion experiments on aluminum alloys in EXCO solution are carried out under magnetic fields, as well as uniaxial tensile and fatigue experiments after corrosion. The 7075-T6 specimens are employed in this research. The surface corrosion morphology of the specimens is analyzed. The daily weight gain of the specimens is recorded. The observation of fatigue fracture morphology is conducted on the failed area. The results indicate that, during the initial stages of corrosion, protrusions appear on the surface of the aluminum alloy specimens, and as the corrosion progresses, peeling corrosion occurs on the surface of the aluminum alloy specimens. With an increase in magnetic strength, the corrosion rate of the aluminum alloy specimens initially increases and then decreases. At the same stress level, the fatigue life at a magnetic field strength of 2.8mT is shorter than the fatigue life at a magnetic field strength of 1.3mT. The characteristics of the fatigue failure zone become apparent, with the fatigue source zone being relatively smooth and the fracture surface of the specimens being rough. This research can provide insights into the effect of magnetic fields on the corrosion behavior of aluminum alloys, offering valuable references for optimizing their corrosion resistance and extending their service life.

Key Words: aluminum alloy; magnetic field; corrosion; fatigue; fracture

Received: 2024-08-17; Revised: 2024-11-21; Accepted: 2025-01-13

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (20230038067002)