

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.04.006

盐雾环境下 6061-T6 铝合金腐蚀疲劳失效机理研究

王 飞*, 宋 奕, 何佰毅

(国家管网集团西北公司, 宁夏 银川 750001)

摘要: 结构件在服役过程中受到交变载荷和腐蚀因素的影响, 会加快其腐蚀疲劳失效过程, 大幅缩短其服役寿命。本文针对 6061-T6 铝合金, 通过盐雾环境下的腐蚀疲劳试验, 结合微观形貌观测、元素成分分析、晶粒结构表征等方法, 研究盐雾浓度以及加载频率对其腐蚀疲劳性能的影响, 分析其失效机理。结果表明: 在 3.5 wt.%~5.0 wt.% 盐雾浓度区间, 材料的疲劳寿命下降了 52.43%~66.32%, 在低浓度区间, 腐蚀产物和 NaCl 结晶颗粒阻塞裂纹尖端延缓裂纹扩展速率, 材料疲劳寿命呈上升趋势; 随着盐雾浓度进一步升高, 腐蚀反应速率加快, 试样表面腐蚀加重, 应力集中现象明显, 加剧了裂纹源形成, 材料疲劳寿命逐渐下降。在 3.5 wt.% 盐雾环境中, 加载频率从 5 Hz 上升至 10 Hz, 增加了材料的位错密度, 促进腐蚀介质渗透, 加快了腐蚀进程, 导致材料腐蚀疲劳寿命下降了 15.13%。

关键词: 盐雾腐蚀疲劳; 6061-T6 铝合金; 微观形貌表征; 加载频率

中图分类号: TB31

文献标识码: A

Studies on corrosion fatigue failure mechanism of 6061-T6 aluminum alloy in salt spray environment

Wang Fei*, Song Yi, He Baiyi

(Pipe China North West Company, Yinchuan 750001, China)

Abstract: Structural components are subjected to alternating loads and corrosive factors during service, which accelerate their corrosion fatigue failure process and significantly shorten their service life. This study focuses on 6061-T6 aluminum alloy, conducting corrosion fatigue tests in the salt spray environment, combined with methods such as microstructural observation, elemental composition analysis, and grain structure characterization, to investigate the effects of salt spray concentration and loading frequency on its corrosion fatigue performance and analyze the failure mechanism. The results indicate that within the salt spray concentration range of 3.5 wt.% to 5.0 wt.%, the fatigue life of the material decreased by 52.43% to 66.32%. At lower concentrations, corrosion products and NaCl crystal particles obstruct the crack tip, slowing the crack propagation rate and leading to an increase in material fatigue life. As the salt spray concentration further increases, corrosion reaction rate accelerates. The corrosion on the sample surface intensifies, and stress concentration becomes more pronounced. This exacerbates the formation of crack sources, gradually reducing the fatigue life of the material. Under a 3.5 wt.% salt spray environment, increasing the loading frequency from 5 Hz to 10 Hz, increased the

收稿日期: 2024-09-05

修回日期: 2024-10-29

通信作者: 王飞(1981—), 学士, 工程师, email: 67611961@qq.com

引用信息: 王飞, 宋奕, 何佰毅. 盐雾环境下 6061-T6 铝合金腐蚀疲劳失效机理研究[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 33-41, 57.

Wang Fei, Song Yi, He Baiyi. Studies on corrosion fatigue failure mechanism of 6061-T6 aluminum alloy in salt spray environment[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 33-41, 57.

dislocation density of the material, and promoted the penetration of corrosive media. It also accelerated the corrosion process, and resulted in a 15.13% decrease of the material corrosion fatigue life.

Keywords: salt spray corrosion fatigue; 6061-T6 aluminum alloy; microscopic morphology characterization; loading frequency

6061-T6铝合金材料有高强度、高韧性、强耐腐蚀的特性,在工程中常被作为结构材料,可以满足较为严苛的使用环境^[1-2]。铝合金在海洋环境下服役,大气中分散的大量氯离子易吸附在金属表面,进而在金属表面形成电解液层,导致点蚀、剥蚀和晶间腐蚀的发生^[3],严重影响结构件的疲劳性能^[4-5]。因此,研究盐雾环境下铝合金的腐蚀疲劳行为具有重要意义。

Lei Fu等^[6]研究表明,试样表面的点蚀坑与剥蚀坑所造成的应力集中在晶间腐蚀产物附近产生疲劳裂纹,同时腐蚀环境导致多个疲劳裂纹源的产生,但裂纹扩展速率基本未受影响。Li Hui等^[7]研究了预腐蚀条件下2A70-T6铝合金的低周疲劳失效机理,同样发现预腐蚀在试样表面形成的深坑是促进裂纹多源萌生缩短疲劳寿命的主要原因。SCHÖNBAUER^[8]和Stanzl-Tschegg等^[9]提出,在点-裂纹转变过程中,较深的腐蚀坑主导了裂纹成核,同时引起多源裂纹萌生,并表明裂纹扩展速率不一定随腐蚀程度的增加而增加。Wang等^[10]的研究结果表明,预腐蚀产生的腐蚀坑使7075-T6铝合金的超高周疲劳寿命降低了10~100倍。Walde等^[11]研究了点蚀起始与晶体结构尺寸、位置和形状之间的关系。通过对裂纹萌生、早期裂纹扩展动力学和点蚀转变的研究,建立了广泛的疲劳损伤模型,从而形成了完整的疲劳损伤评估体系。Arriscorreta等^[12]评估了预腐蚀时间与应力水平两个变量对7075-T6铝合金的疲劳寿命影响。采用方差分析(ANOVA)方法对失效数据进行分析,最后分析结果表明,与腐蚀时间相比,应力水平对试样疲劳寿命的影响更大。近些年电化学测试手段逐渐应用于腐蚀疲劳失效机理研究中,Engler等^[13]通过负载同步电化学和电化学噪声测试研究了腐蚀疲劳试验中的活化和再钝化过程,并得出结论,基于裂纹萌生时间的确定,S-N曲线可以通过裂纹扩展的持续时间来改变。

目前国内对于盐雾环境下铝合金材料的腐蚀

行为进行了以下研究:赵起越分析了阳极氧化6061-T6铝合金在工业海洋大气环境中长周期暴晒时的表面截面形貌、质量损失、腐蚀产物力学性能和断口情况,发现海洋大气中的氯离子会侵蚀铝合金表面的氧化膜,穿透氧化膜并造成点蚀,同时证明6061-T6铝合金进行阳极氧化处理可以有效降低平均腐蚀速率及减少力学性能损失^[14]。拓晓颖通过研究6061-T6铝合金在盐雾环境下的腐蚀行为,采用静态拉伸试验研究盐雾腐蚀行为对6061-T6铝合金力学性能的影响,研究发现6061-T6铝合金盐雾环境下主要发生以点蚀为主的局部腐蚀,并伴随晶间腐蚀和剥落腐蚀,此外随腐蚀时间增加,6061-T6铝合金极化电阻减小从而导致腐蚀速率加快^[15]。

目前,针对6061-T6铝合金盐雾腐蚀的研究,主要集中于铝合金预腐蚀以及对耐蚀性能、疲劳性能的单因素研究,针对铝合金受疲劳载荷-腐蚀环境多因素共同影响下的失效行为的研究相对较少。因此本文通过开展6061-T6铝合金盐雾腐蚀疲劳试验,对比空气以及盐雾两种环境下材料疲劳寿命的差异,进一步分析盐雾浓度、载荷加载频率等对6061-T6铝合金腐蚀疲劳寿命的影响,结合微观形貌观测、元素成分分析、晶粒结构表征等方法,综合探究材料腐蚀疲劳失效机理。

1 实验

1.1 材料及设备

本文使用厚度为2 mm的6061-T6铝合金薄板作为试验材料,通过日立Hitachi S-3400N电子扫描显微镜对腐蚀形貌进行观察,利用EDS能谱仪(型号UMETEK Octane Prime)对物相成分进行分析,采用OXFORD生产的EBSD(型号Symmetry S3)设备分析晶体成分变化,使用Instron-5982电子万能材料试验机测试材料基础力学性能,使用Instron-8803型疲劳试验机完成疲劳相关试验。其中,6061-T6铝合金化学成分如表1所示。

表1 6061-T6 铝合金化学组成成分

Tab.1 6061-T6 aluminum alloy chemical composition

成分	Cu	Ti	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Al
质量分数/%	0.21	0.07	0.56	0.23	0.07	0.99	0.12	0.08	Balance

参照ASTM-E8拉伸实验标准,测试了6061-T6铝合金薄板的基础力学性能,结果如图1所示,实验采用应变控制,加载速率分别为0.015 %/s (应变 $\leq 1\%$)、0.2 %/s (应变 $> 1\%$),加载方向与材料轧制方向一致;材料沿轧制方向的各项力学性能参数如表2所示。

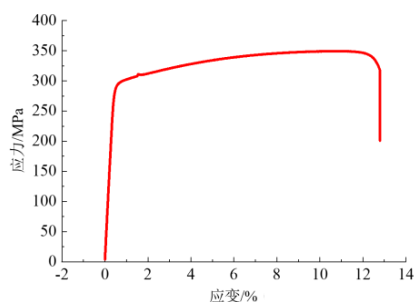


图 1 6061-T6 应力应变曲线

Fig.1 6061-T6 stress-strain curve

表 2 6061-T6 铝合金基础力学性能参数

Tab.2 6061-T6 aluminum alloy basic mechanical property parameters

弹性模量 /GPa	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	延伸率 /%
68.4	294.8	349.4	10.1

根据美国材料实验协会制定的ASTM E466-15疲劳试验标准设计了如图2所示的试样,试样厚度为2.0 mm。

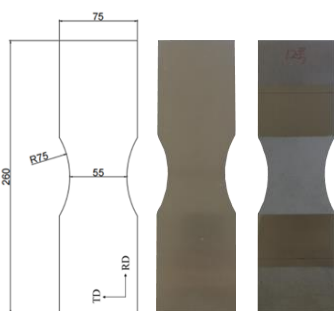


图 2 腐蚀疲劳试样

Fig.2 Corrosion fatigue specimen

1.2 盐雾腐蚀疲劳平台的开发

盐雾腐蚀疲劳平台主要包括盐雾生成模块、半开放式盐雾舱、盐雾排出模块,平台整体如图3所示。空气压缩机通过限压阀与盐雾喷嘴连接,NaCl溶液通过虹吸原理被引流至盐雾喷嘴处形成盐雾,通过盐雾喷嘴处的流量阀与流速阀控制盐雾浓度,生成盐雾经过盐雾格栅流入半开放式盐雾舱,疲劳

试样位于半开放式盐雾舱中部(图4(a)),流场控制原理如图4(b)所示,盐雾管路末端对准试样背侧区域,由于试样正面是开放式设计,试样正面区域空气与后面区域盐雾会同时被引入涵道风扇管道,防止盐雾弥散到试样前侧区域。随后盐雾通过铝箔管道引出室外。



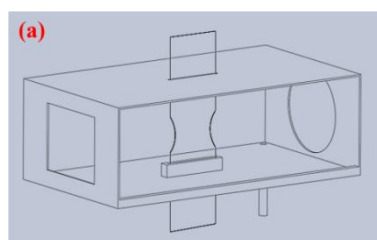
(a) 盐雾腐蚀疲劳平台理论图



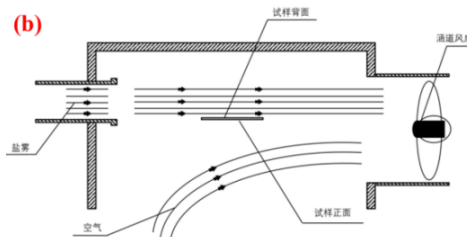
(b) 盐雾腐蚀疲劳平台操作台

图 3 盐雾腐蚀疲劳平台

Fig.3 Salt Spray Corrosion Fatigue Platform



(a) 半开放式盐雾舱



(b) 流场控制原理图

图 4 半开放式盐雾舱设计图及流场控制原理示意图

Fig.4 Semi-open salt spray chamber design and flow field control principle schematic diagram

1.3 试验方法及方案

为了分析盐雾环境对材料疲劳寿命的影响,设置如表3所示的试验方案。1~4组试验用以获取材料在3.5 wt.%盐雾浓度和无腐蚀环境下的寿命结果,2、5组试验用于研究载荷加载频率对材料腐蚀疲劳寿命的影响,2、6~9组试验用于研究盐雾浓度对材料腐蚀疲劳寿命影响。所述盐雾溶液为中性,pH=7,上述每种参数下均进行5次重复实验。在此,“3.50/0”表示该组实验条件应用于盐雾环境与无腐蚀环境两种情况,其中“/”前的数值代表盐雾环境下的盐雾浓度。

表3 盐雾腐蚀疲劳试验参数

Tab.3 Parameters of salt spray corrosion fatigue test

序号	σ_{\max}/MPa	频率/Hz	盐雾浓度/(wt.%)	R
1	210	10	3.50/0	0.1
2	230	10	3.50/0	0.1
3	250	10	3.50/0	0.1
4	270	10	3.50/0	0.1
5	230	5	3.50	0.1
6	230	10	2.00	0.1
7	230	10	2.75	0.1
8	230	10	4.25	0.1
9	230	10	5.00	0.1

2 试验结果

2.1 盐雾环境对材料腐蚀疲劳寿命影响

材料在两种环境下的局部应力-寿命曲线如图5所示,随着载荷水平逐渐上升,两种环境下材料疲劳寿命呈逐渐下降趋势。载荷水平从210 MPa上升至270 MPa,空气环境中,材料疲劳寿命从100万周下降至6万周,在3.5 wt.%盐雾环境中疲劳寿命从7万周下降至2万周。从图5两条应力-寿命曲线可以看出,四种载荷水平下的材料疲劳寿命分别下降93.0%、64.9%、70.4%、61.5%,腐蚀环境大幅降低了材料疲劳寿命。

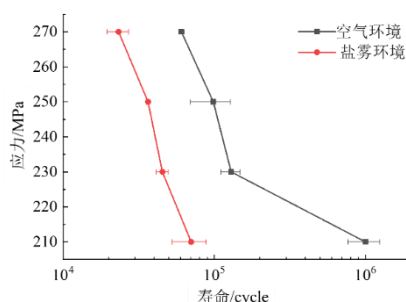


图5 空气与盐雾环境下 6061-T6 铝合金应力-寿命曲线

Fig.5 Stress-life curve of 6061-T6 aluminum alloy under air and salt spray environment

2.2 盐雾腐蚀疲劳寿命

无腐蚀条件下,材料在230 MPa和10Hz加载条件下疲劳寿命为98 000次,在2.0 wt.%、2.75 wt.%、3.5 wt.%、4.25 wt.%和5.0 wt.%盐雾浓度下材料的腐蚀疲劳寿命均出现不同幅度下降,如图6所示,疲劳寿命下降为52.43%~66.32%。具体来说,盐雾浓度在2.0~3.5 wt.%区间疲劳寿命呈逐渐上升趋势,3.5~5.0 wt.%区间疲劳寿命呈下降趋势。盐雾浓度为2.0 wt.%时对材料疲劳寿命影响最大,疲劳寿命的均值减少了64 720次,下降幅度为66.32%;盐雾浓度在3.5 wt.%时对材料疲劳寿命影响最小,疲劳寿命的均值减少了51 000次,下降幅度为52.43%。

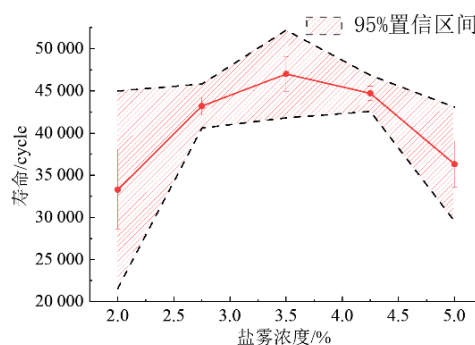


图6 腐蚀条件不同盐雾浓度下材料疲劳寿命

Fig.6 Fatigue life of materials under corrosion conditions with different salt spray concentrations

材料在发生腐蚀疲劳失效过程中,腐蚀环境会在不同程度上影响裂纹源萌生。在盐雾浓度较低时,腐蚀产物及NaCl结晶会堵塞裂纹尖端,使裂纹上下表面提前接触,导致裂纹闭合效应^[16]。腐蚀产物和NaCl结晶颗粒阻塞裂纹尖端,出现裂纹闭合效应,延缓裂纹扩展速率,材料疲劳寿命呈上升趋势;随着盐雾浓度超过3.5 wt.%,整个腐蚀体系反应速率加快,试样表面腐蚀加重,应力集中现象明显,加剧了裂纹源形成,导致材料的腐蚀速率加快,腐蚀疲劳寿命出现下降趋势。

2.3 加载频率影响下腐蚀疲劳寿命

在3.5 wt.%盐雾环境中,材料腐蚀疲劳平均寿命从55 387降低为47 005次,下降了15.13%,如表4所示。主要在于更高频循环加载导致了位错密度增加、晶粒细化等现象,材料微观结构发生变化,使得材料更易于发生腐蚀行为,从而降低腐蚀疲劳寿命。关于此推论将分别通过微观形貌表征以及微观结构分析进行论证。

表 4 加载频率影响下材料腐蚀疲劳寿命

Tab.4 Corrosion fatigue life of materials under the influence of loading frequency

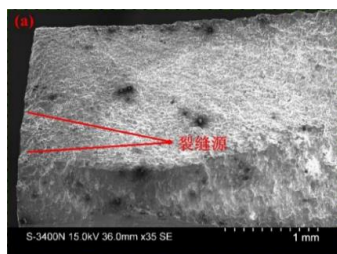
频率/Hz	疲劳寿命/次			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	平均寿命
5	56 132	57 374	52 654	55 387
10	45 948	49 416	45 651	47 005

3 分析与讨论

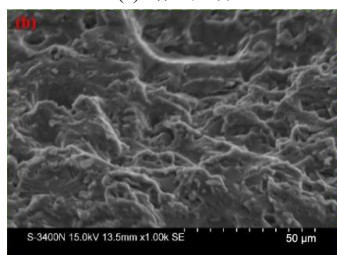
3.1 微观形貌表征

3.1.1 不同浓度盐雾环境断口形貌分析

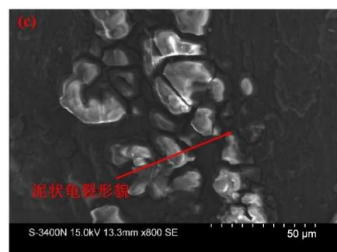
以2.0 wt.%盐雾浓度破坏为例,分析盐雾环境对试样失效行为影响。从图7(a)可以看到多个裂纹源,裂纹发展方向呈河流状向试件内部延伸,并最终在瞬断区汇合。对裂纹源区绿色虚线区域放大观察如图7(b)所示,可发现表面附着有腐蚀产物的解理特征形貌。同时发现腐蚀产物的泥状龟裂形貌如图7(c)所示,推测此部分存在铝合金氧化物。当试样受到循环载荷时,晶间腐蚀产物的强度远低于基体材料,因此晶间夹杂物的腐蚀产物优先引发微裂纹^[17],降低了材料的抗疲劳性能。图7(d)为试件裂纹扩展区的疲劳辉纹形貌,在该区域也可观察到部分NaCl结晶及结合面分离而产生的空穴区域。



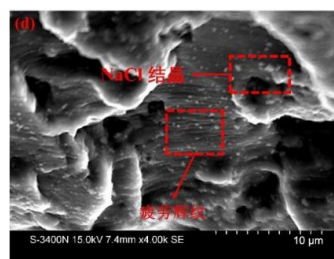
(a) 断口区域



(b) 解理特征形貌



(c) 泥状腐蚀产物



(d) 疲劳辉纹

图 7 盐雾浓度 2.0 wt.%条件下断口微观形貌

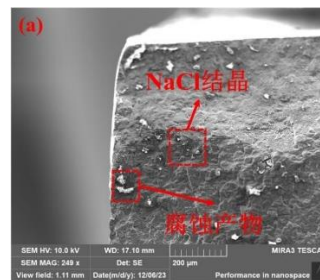
Fig.7 Microscopic morphology of the fracture under salt spray concentration of 2.0 wt. %

以3.5 wt.%盐雾浓度失效试样为例,分析盐雾浓度上升对试样疲劳寿命的影响机理。如图8(a)所示,由于盐雾浓度升高,在裂纹源区的腐蚀产物以及断口处形成的NaCl结晶颗粒要明显多于盐雾浓度为2.0 wt.%条件下的腐蚀疲劳试样。在裂纹扩展区,疲劳辉纹上也发现了NaCl结晶颗粒脱落而产生的空穴区域,如图8(b)所示。此外,由于盐雾浓度的上升,疲劳辉纹上也发现了腐蚀产物,如图8(c)所示。所发现的腐蚀产物及NaCl结晶会堵塞裂纹尖端,使裂纹上下表面提前接触,导致裂纹闭合效应。

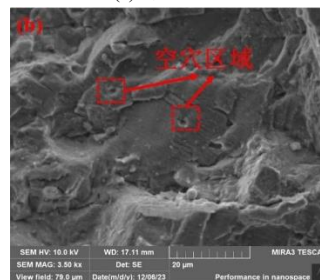
裂纹扩展的驱动力可以用应力强度因子的范围(ΔK)来描述,它是裂纹尖端最大和最小应力强度因子之差,其可以表示为:

$$\Delta K = F \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

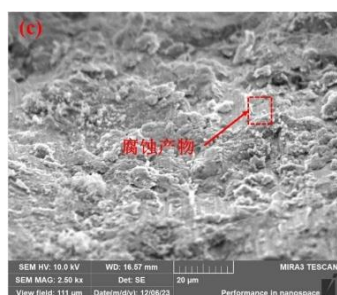
式中: F 为形状因子,与试样和裂纹的形状有关; a 为裂纹长度; $\Delta \sigma$ 为试样所承受的应力幅值。有研究表明,裂纹闭合期间的载荷不会驱动裂纹的扩展,有效应力幅值定义为裂纹开启期间所对应的应力范围^[18]:



(a) 断口区域



(b) 疲劳辉纹



(c) 絮状腐蚀产物

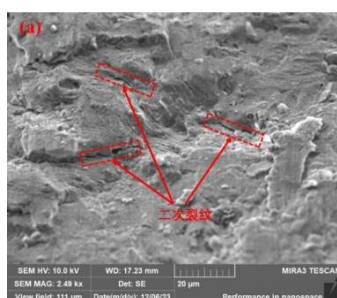
图8 盐雾浓度 3.5 wt.%条件下试样断口微观形貌

Fig.8 Microscopic morphology of the fracture under salt spray concentration of 3.5 wt.%

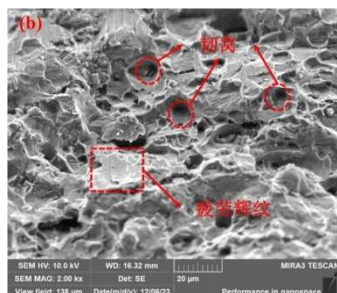
$$\Delta\sigma_{\text{eff}} = \sigma_{\text{max}} - \sigma_{\text{cl}} \quad (2)$$

式中: σ_{max} 为疲劳载荷峰值; σ_{cl} 表示在卸载后裂纹闭合时的应力。裂纹尖端的闭合效应实际上降低了裂纹在一个循环载荷下的有效应力强度因子范围, 因此减缓了裂纹的扩展速率, 延长了材料的疲劳寿命。

随着盐雾浓度进一步升高, 试验结果表明材料的腐蚀疲劳寿命呈现下降趋势。这是因为随着盐雾浓度升高, 试样表面腐蚀加剧, 多处出现腐蚀坑, 使得应力集中现象更加明显, 加剧了裂纹源的形成。此外, 疲劳辉纹之间还出现了二次裂纹, 如图9(a)所示, 说明材料的性能发生下降。图9(b)展现了裂纹扩展阶段与瞬断阶段之间的过渡区域, 这一区域的显著特征是韧窝形态与少量疲劳辉纹的共存。



(a) 二次裂纹



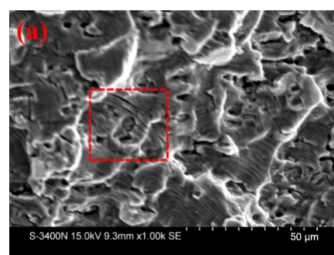
(b) 韧窝形貌

图9 盐雾浓度 5.0 wt.%条件下试样断口微观形貌

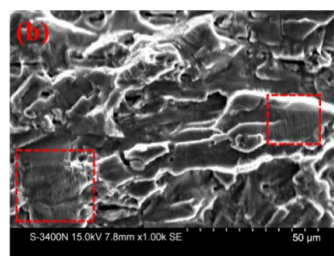
Fig.9 Microscopic morphology of specimen fracture under salt spray concentration of 5.0 wt.%

3.1.2 不同加载频率断口形貌差异性分析

分别对不同加载频率的腐蚀疲劳试样断口进行微观形貌表征, 如图10(a)所示为5 Hz加载频率下的断口裂纹扩展区的疲劳辉纹, 可以看到较为稀疏疲劳辉纹, 只观测到少量韧窝存在。放大后观测发现在疲劳辉纹附近有絮状腐蚀产物存在。相对于5 Hz条件下, 10 Hz频率下疲劳辉纹密集性更加突出, 如图10(b)所示。



(a) 5 Hz 下试样断口微观形貌表征



(b) 10 Hz 下试样断口微观形貌表征

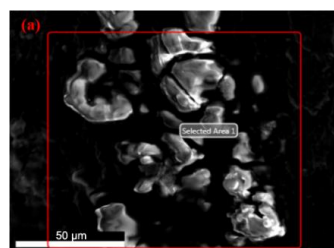
图10 不同加载频率下试样断口微观形貌表征

Fig.10 Characterization of fracture micro-morphology of specimen under different loading frequencies

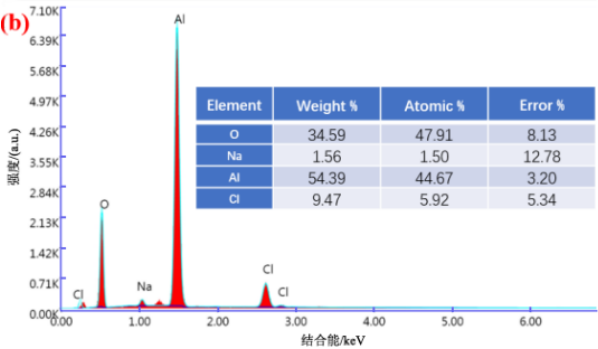
3.2 元素成分分析

如图11(a)所示为材料在2.0 wt.%盐雾浓度下、230 MPa疲劳载荷下的裂纹扩展区微观形貌, 对此区域进行EDS点扫描结果如图11(b)所示, 可以明显得出此区域主要是Al元素与O元素, 其中也有少量Na元素和Cl元素, 是由于腐蚀介质在断口表面的少量残留, 推测其主要成分为铝的氧化物或氯化物。

图11(a)为材料在3.5 wt.%盐雾浓度下、230 MPa疲劳载荷下的裂纹扩展区微观形貌, 可以看到腐蚀产物和裂纹扩展区有明显分界, 同时在腐蚀产物区



(a) 腐蚀产物微观形貌

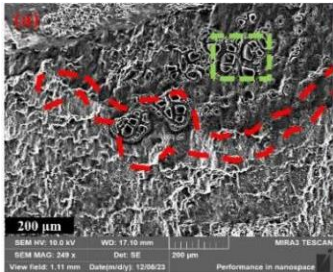


(b) 裂纹扩展区 EDS 能谱图

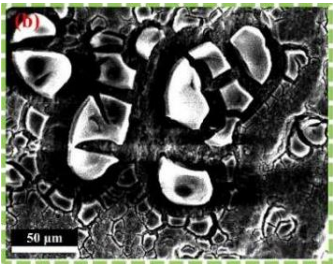
图 11 腐蚀产物微观形貌及 EDS 能谱图

Fig.11 Corrosion product microscopic morphology and EDS energy spectra

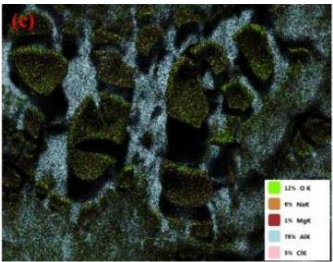
形成了泥状龟裂形貌，图12(a)中绿色虚线区域放大后如图12(b)所示，对此区域进行EDS面扫得出其表面的元素分布如图12(c)所示。Al和O元素含量占比为88%，推测腐蚀产物主要为Al的氧化物。图12(e)和图12(g)分别代表Na和Cl元素的分布情况，两元素的占比为1：1，说明腐蚀产物堆积处还有部分NaCl结晶。以上检测结果说明在裂纹尖端的基体材料与腐蚀介质发生电化学反应所生成的腐蚀产物会影响裂纹扩展进程。



(a) 微观形貌



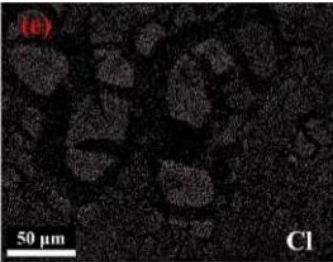
(b) 放大图



(c) 元素分布全谱



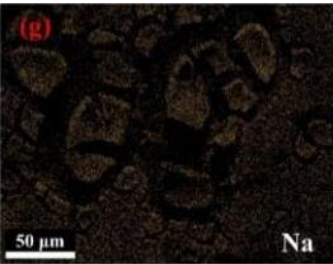
(d) O 谱



(e) Cl 谱



(f) Al 谱



(g) Na 谱

图 12 腐蚀产物微观形貌及元素分布

Fig.12 Corrosion product microscopic morphology and element distribution

3.3 晶粒结构表征

图13(a)和(b)分别为5Hz与10Hz加载频率下试样断口区域的晶粒分布图，明显看出10Hz加载频率下晶粒尺寸更小，晶粒细化程度更高。图13(c)和(d)分别为两种加载频率下晶粒大小排列统计结果，图13(c)中晶粒计数为183，晶粒面积加权均值为685.6 μm^2 ，而图13(d)中晶粒计数为344，晶粒面积加权均值为415.1 μm^2 。在铝合金的高周疲劳过程中，加载频率的提高会导致更多的塑性变形，能量

累积在材料内部促进了位错的运动和增殖, 出现更多的位错交互和缠结, 形成位错结构和亚晶界, 而

亚晶界的形成和演化最终会引发动态再结晶过程, 动态再结晶过程会导致新的细小晶粒的形成^[19]。

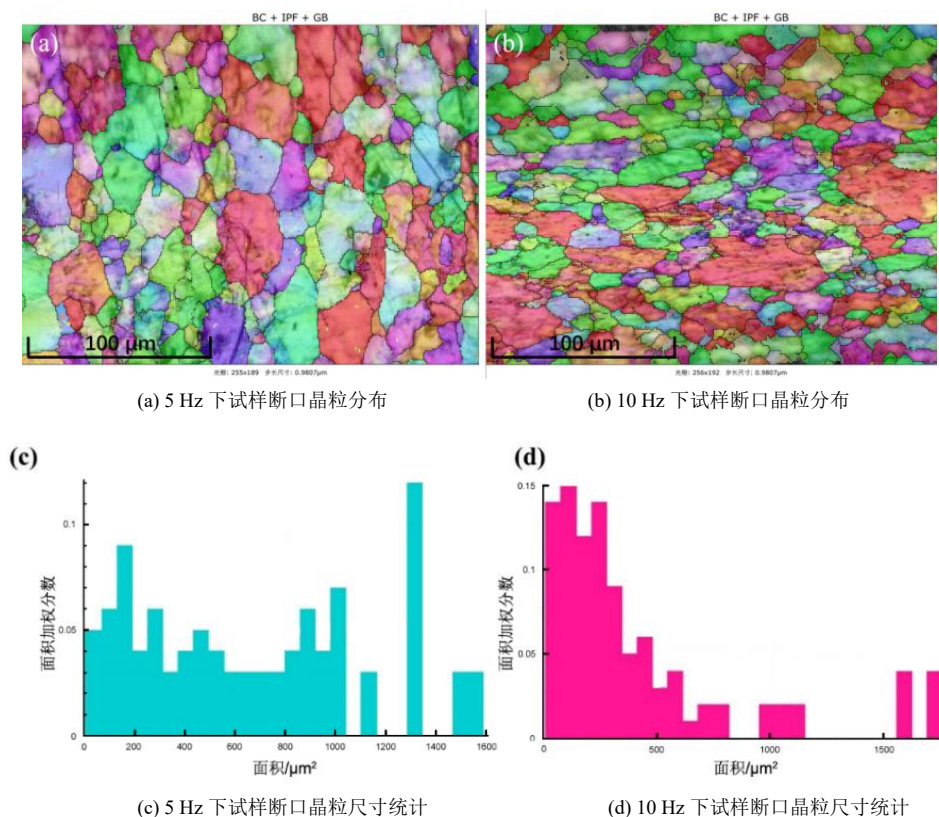


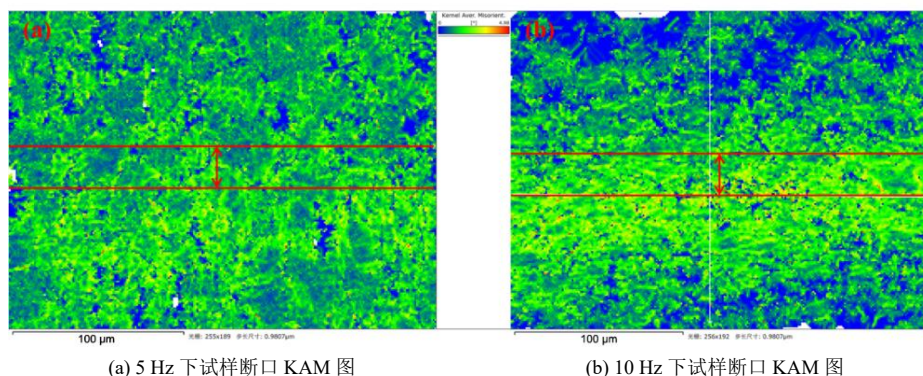
图 13 试样断口晶粒分布图与晶粒尺寸统计数据

Fig.13 Specimen fracture grain distribution and grain size statistics

图14(a)和(b)分别为5 Hz与10 Hz加载条件下试样断口区域KAM (Kernel Average Misorientation)即核平均取向差的分布图, 分别对图中划线区域进行几何必需位错密度(geometry need location density, GND)测量, 结果如图14(c)和(d)所示。可以看出10 Hz加载条件下的GND要明显高于5 Hz加载条件, 同时KAM分布云图也表明加载频率越高, 断口区域晶粒位错密度越大。高位错密度在晶粒内部和晶界附近引起材料内部应力的增加, 会促进腐蚀介质的

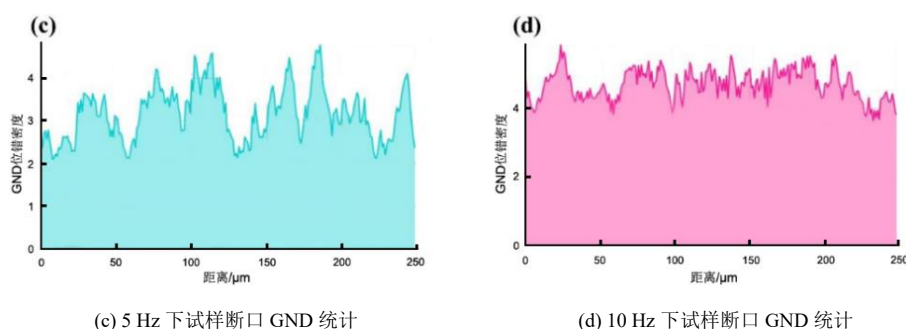
渗透, 加速腐蚀过程。特别是在腐蚀环境下, 疲劳载荷引起的塑性形变使晶界区域相对于晶内区域的电化学性质差异加大, 化学活性增加, 从而降低材料内部晶粒的耐蚀性^[20]。

综上所述, 高频载荷引起位错密度增加、晶粒细化等现象进一步促进腐蚀介质的渗透, 加速腐蚀过程。同时晶界与晶内区域的电化学性质差异加大, 从而加速局部腐蚀的发生, 导致裂纹生成速率加快, 降低材料疲劳寿命。



(a) 5 Hz 下试样断口 KAM 图

(b) 10 Hz 下试样断口 KAM 图



(c) 5 Hz 下试样断口 GND 统计

(d) 10 Hz 下试样断口 GND 统计

图 14 试样断口 KAM 分布图与 GND 统计数据

Fig.14 Specimen fracture KAM distribution with GND statistics

4 结 论

(1) 相比于空气环境,盐雾会大幅降低6061-T6铝合金的疲劳寿命,在210~270 MPa载荷区间疲劳寿命下降了90%~60%。盐雾环境下材料表面蚀坑引起的应力集中效应加快了裂纹成核速率,降低了材料在裂纹萌生阶段的疲劳寿命,导致材料在所有载荷水平下疲劳寿命都有不同程度的下降。

(2) 材料的腐蚀疲劳寿命随盐雾浓度升高呈先上升后下降趋势。在低浓度区间腐蚀疲劳寿命上升主要原因是腐蚀产物以及NaCl结晶阻塞裂纹尖端,裂纹闭合效应延缓了裂纹扩展速率。随着盐雾浓度进一步升高,试样表面腐蚀加剧,应力集中现象明显,加速了裂纹源形成,材料的腐蚀疲劳寿命呈下降趋势。

(3) 载荷加载频率由5 Hz升高至10 Hz,材料在3.5 wt.%盐雾环境中的腐蚀疲劳寿命下降了15.13%。材料表面氧化膜在高频载荷下对基体保护作用减弱,同时高频循环加载引起位错密度增加、晶粒细化等现象,晶粒面积加权均值由 $685.6 \mu\text{m}^2$ 下降为 $415.1 \mu\text{m}^2$,加快了腐蚀速率。

参考文献

- [1] 张丽娇. 航空航天高强铝合金材料应用及发展趋势研究[J]. 新材料产业, 2021(3): 7-11.
- [2] 何祯, 拜斌, 张小明, 等. 航空用 6061 铝合金恒载荷应力腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2023, 44(2): 64-69.
- [3] Chanyathunyaraj K, Phetchchai S, Laungsopapun G, et al. Fatigue characteristics of 6061 aluminum alloy subject to 3.5% NaCl environment[J]. International Journal of Fatigue, 2020(133): 105420.
- [4] Ma H, Zhao J, Fan Y, et al. Comparative study on corrosion fatigue behaviour of high strength low alloy steel and

simulated HAZ microstructures in a simulated marine atmosphere[J]. International Journal of Fatigue, 2020(137): 105666.

- [5] 吕嘉胤. 盐雾腐蚀条件下应力对铜铝复合板腐蚀行为的影响[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.
- [6] Fu L, Li H, Lin L, et al. Corrosion mechanism and fatigue behavior of 2A70-T6 aluminum alloy under alternating corrosion and fatigue[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2021, 68(5): 422-437.
- [7] Li H, Fu L, Lin L, et al. Low-cycle fatigue behavior and corrosion mechanism of pre-corroded 2A70-T6 aluminum alloy[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2020, 67(2): 228-239.
- [8] Schönbauer B M, Perlega A, Karr U P, et al. Pit-to-crack transition under cyclic loading in 12% Cr steam turbine blade steel[J]. International Journal of Fatigue, 2015(76): 19-32.
- [9] Schönbauer B M, Stanzl-Tschegg S E. Influence of environment on the fatigue crack growth behavior of 12% Cr steel[J]. Ultrasonics, 2013, 53(8): 1399-1405.
- [10] Wang Q, Kawagoishi N, Chen Q. Effect of pitting corrosion on very high cycle fatigue behavior[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(7): 711-716.
- [11] Van Der Walde K, Hillberry B M. Initiation and shape development of corrosion-nucleated fatigue cracking[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(7): 1269-1281.
- [12] Arriscorreta C A, Hoepfner D W. Effects of prior corrosion and stress in corrosion fatigue of aluminum alloy 7075-T6[J]. Corrosion, 2012, 68(10): 950-960.
- [13] T. Engler, G. Andersohn, M. Oechsner, F. D. de Araújo, H. Kaufmann, T. Melz. Electrochemical characterization of automotive aluminum alloys regarding their corrosion

下转 57 页