

# 典型阳极氧化工艺对 2A12-T4 铝合金 疲劳寿命的影响

宋雨键<sup>1,2</sup>, 秦海勤<sup>1\*</sup>, 张德跃<sup>2</sup>, 吉鹏程<sup>1</sup>, 刘坤<sup>1</sup>, 秦敏<sup>1</sup>

(1. 海军航空大学青岛校区, 山东 青岛 266041; 2. 中国人民解放军 95939 部队, 河北 沧州 061037)

**摘要:** **目的** 研究 4 种典型阳极氧化工艺对 2A12-T4 铝合金疲劳寿命的影响。**方法** 分别采用硫酸阳极氧化、硬质阳极氧化、硫酸-硼酸阳极氧化和微弧氧化等 4 种典型阳极氧化工艺对 2A12-T4 铝合金试件进行表面处理, 并开展 150、200 MPa 等 2 种最大应力下的疲劳试验, 对未经表面阳极化处理和不同阳极化处理试验件的疲劳寿命进行统计分析, 研究典型阳极氧化工艺对 2A12-T4 铝合金疲劳寿命的影响。**结果** 普通试件和 4 种阳极氧化试件疲劳寿命均服从对数正态分布。4 种阳极氧化工艺均对 2A12-T4 铝合金试件的疲劳寿命产生不利影响, 即分散系数变大, 安全寿命减小。同时发现, 应力水平增大时, 同一阳极氧化工艺处理试件的分散系数也会变大, 安全寿命相应减小。**结论** 经 4 种阳极氧化工艺处理后, 2A12-T4 铝合金的疲劳寿命仍服从对数正态分布, 但除最大应力为 150 MPa 下的硫酸-硼酸阳极氧化试件的疲劳寿命增加 0.4% 外, 其他试件的疲劳寿命均出现下降, 且下降幅度与分散系数均和应力水平成正相关。

**关键词:** 2A12-T4 铝合金; 阳极氧化; 疲劳试验; 表面处理; 疲劳寿命; 分散系数

**中图分类号:** V252.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2025)03-0026-07

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2025.03.004

## Influence of Typical Anodizing Process on Fatigue Life of 2A12-T4 Aluminum Alloy

SONG Yujian<sup>1,2</sup>, QIN Haiqin<sup>1\*</sup>, ZHANG Deyao<sup>2</sup>, JI Pengcheng<sup>1</sup>, LIU Kun<sup>1</sup>, QIN Min<sup>1</sup>

(1. Qingdao Campus of Naval Aviation University, Shandong Qingdao 266041, China;

2. Unit 95939, People's Liberation Army, Hebei Cangzhou 061037, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effects of four typical anodizing processes on the fatigue life of 2A12-T4 aluminum alloy. The surface of 2A12-T4 aluminum alloy specimens was treated with four typical anodizing processes: sulfuric acid anodizing, hard anodizing, sulfuric-boric acid anodizing, and microarc oxidation. Fatigue tests were conducted at two maximum stress levels of 150 MPa and 200 MPa. The fatigue life of anodized specimens and ordinary specimens was statistically analyzed to investigate the effects of typical anodizing processes on the fatigue life of 2A12-T4 aluminum alloy. The result showed that the fatigue life of both ordinary and anodized specimens followed a lognormal distribution. All four anodizing processes had an adverse effect on the fatigue life of 2A12-T4 aluminum alloy specimens, resulting in an increased dispersion coefficient and a

收稿日期: 2024-11-21; 修订日期: 2025-02-12

Received: 2024-11-21; Revised: 2025-02-12

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2021QE193)

Fund: Shandong Provincial Natural Science Foundation (ZR2021QE193)

引文格式: 宋雨键, 秦海勤, 张德跃, 等. 典型阳极氧化工艺对 2A12-T4 铝合金疲劳寿命的影响[J]. 装备环境工程, 2025, 22(3): 26-32.

SONG Yujian, QIN Haiqin, ZHANG Deyao, et al. Influence of Typical Anodizing Process on Fatigue Life of 2A12-T4 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(3): 26-32.

\*通信作者 (Corresponding author)

reduced safe life. It was also found that the dispersion coefficient of specimens treated with the same anodizing process increased, and the safe life correspondingly decreased, with the increase of stress level. In conclusion, the fatigue life of 2A12-T4 aluminum alloy treated with the four anodizing processes still follows a lognormal distribution. However, except for a 0.4% increase in fatigue life for sulfuric-boric acid anodized specimens under a maximum stress of 150 MPa, the fatigue life of other specimens decreased. There is a positive correlation between the decreasing amplitude and the dispersion coefficient.

**KEY WORDS:** 2A12-T4 aluminum alloy; anodizing; fatigue test; surface treatment; fatigue life; dispersion coefficient

2A12 铝合金由于具有高强度、高性价比、良好的力学性能和可加工性能等优点,在工业领域特别是航空工业中被广泛使用<sup>[1-2]</sup>。2A12 铝合金疲劳性能的研究对于确保结构安全性和延长使用寿命具有重要意义。国内外学者针对 2A12 铝合金疲劳裂纹萌生与扩展机制、疲劳寿命预测模型以及微观组织对疲劳性能的影响等方面开展了广泛研究。魏小琴等<sup>[3]</sup>采用预腐蚀后的腐蚀-疲劳协同试验和腐蚀与疲劳交替试验 2 种方法,重点分析了试样断口的腐蚀特征、元素分布及化学价态变化,揭示了 2A12-T4 铝合金在不同试验条件下的腐蚀疲劳机制。崔仁浩等<sup>[4]</sup>针对 2A12 铝合金,在 175 °C 环境下,采用实心圆棒试样,通过拉扭复合加载方式,系统探讨了该材料在高温多轴应力状态下的疲劳失效特性。然而,由于飞机服役环境恶劣,特别是在高温高湿的环境中,2A12 铝合金容易发生晶间腐蚀和应力腐蚀,这严重影响了 2A12 铝合金部件的正常使用,甚至可能进一步影响飞机的安全服役,导致重大安全事故的发生<sup>[5-7]</sup>。因此,在实际环境中,通常需要采用电泳、电镀、阳极氧化、喷漆等技术工艺对 2A12 铝合金进行处理,从而增强铝合金的性能。其中,阳极氧化作为一种广泛采用的表面处理技术,对铝合金材质具有显著的提升效果,在表面防护技术领域得到了深入的应用和推广<sup>[8-11]</sup>。

顾琳等<sup>[12]</sup>采用 L9(33)设计正交实验,开展了低温 2A12 铝铜合金硬质阳极氧化工艺研究,并对氧化膜的厚度、硬度和耐腐蚀性进行了检测。魏士钧等<sup>[13]</sup>对 2A12 铝合金进行了硫酸-硫酸铝体系下的阳极氧化处理,探索了不同电压条件下氧化膜的微观特征、组成、孔隙特性、微观硬度和抗腐蚀性能的不同。刘志扬等<sup>[14]</sup>使用了微弧氧化技术,结合双向脉冲电源,

在含有 Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> 和 KOH 的电解质溶液中,于 2A12 铝合金表面形成了微弧氧化层,并使用多种方法测试了其耐蚀性。时春燕等<sup>[15]</sup>采用多种手段,全面分析了经由轧制和挤压 2 种工艺成形的 2A12 铝合金的微观结构、氧化膜形态、化学成分、硬度、耐腐蚀和耐磨性能。孟莉莉等<sup>[16]</sup>深入研究了阳极氧化处理对 SP700 钛合金与 2A12 铝合金构成的电偶对腐蚀行为和机理的影响。可以发现,目前研究主要集中在采用典型阳极氧化工艺在 2A12 铝合金表面制备的氧化膜的物理特征和耐腐蚀性,对 2A12 铝合金疲劳性能的研究相对较少。

然而在航空领域的实际使用中,不仅需要考虑到阳极氧化工艺处理后的 2A12 铝合金结构件的耐腐蚀性等特性,更需要考虑其疲劳性能<sup>[17]</sup>。因此,本文分别采用硫酸阳极氧化、硬质阳极氧化、硫酸-硼酸阳极氧化和微弧氧化等 4 种典型阳极氧化工艺<sup>[18-20]</sup>,对 2A12-T4 铝合金试件进行表面处理,并开展 2 种应力水平下的疲劳试验,对未经表面阳极氧化处理和不同阳极氧化处理试验件的疲劳寿命进行统计分析,研究典型阳极氧化工艺对 2A12-T4 铝合金疲劳寿命的影响。

## 1 试验

### 1.1 试验件

试验材料为航空领域中广泛使用的 2A12-T4 铝合金,其化学成分见表 1。按照 GB/T 228.1—2021 设计 2A12-T4 铝合金中心孔板试件(如图 1 所示),可作为简化的飞机结构连接件<sup>[21]</sup>。全部试件都利用线切割方法从轧制板中切取,试件的长度方向与轧制方向保持一致。

表 1 2A12-T4 铝合金板材的化学成分(质量分数,%)

Tab.1 Chemical composition of 2A12-T4 aluminum alloy sheet (mass fraction, %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ni	Zn	Ti	Al
0.10	0.23	4.60	0.62	1.60	0.01	0.14	0.04	余量

### 1.2 阳极氧化工艺

采用硫酸阳极氧化、硬质阳极氧化、硫酸-硼酸阳极氧化以及微弧氧化等 4 种典型阳极氧化工艺各处理 20 件 2A12-T4 铝合金试件,工艺主要参数见表

2 和表 3。

### 1.3 疲劳试验

设置 2 种不同应力水平,开展未经表面处理的普通试件以及按 4 种阳极氧化工艺标准处理过的 2A12-T4

铝合金试件的疲劳试验,每类试件在2种应力水平下各进行10次疲劳试验。为便于试验记录,将普通试件、硫酸阳极氧化试件、硫酸-硼酸阳极氧化试件、硬质阳极氧化试件以及微弧氧化试件记为S0、S1、S2、S3和S4。试验设备为MTS-810型液压伺服疲劳试验机,试验条件:室温,应力比 $R=0.04$ ,频率 $f=10$  Hz,最大应力 $\sigma_{\max}$ 分别为150、200 MPa。试验现场如图2所示。

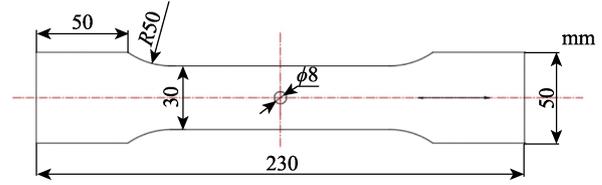


图1 试验件的形状及尺寸(厚度为2.8 mm)  
Fig.1 Shape and size of specimen (thickness is 2.8 mm)

表2 阳极氧化工艺参数  
Tab.2 Anodizing process parameters

工艺	溶液成分	质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	温度/℃	时间/min
硫酸阳极氧化	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	170	20	45
硼酸-硫酸阳极氧化	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	35	25	20
	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	6		
硬质阳极氧化	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	200	-3	50

表3 微弧氧化工艺参数  
Tab.3 Process parameters of micro arc oxidation

溶液成分	正电压/V	正电流密度/(A·dm <sup>-2</sup> )	负电压/V	负电流密度/(A·dm <sup>-2</sup> )	温度/℃	时间/min
Na <sub>2</sub> O·nSiO <sub>4</sub> , NaOH	500	4	-250	-4	25	40



图2 疲劳试验  
Fig.2 Fatigue test

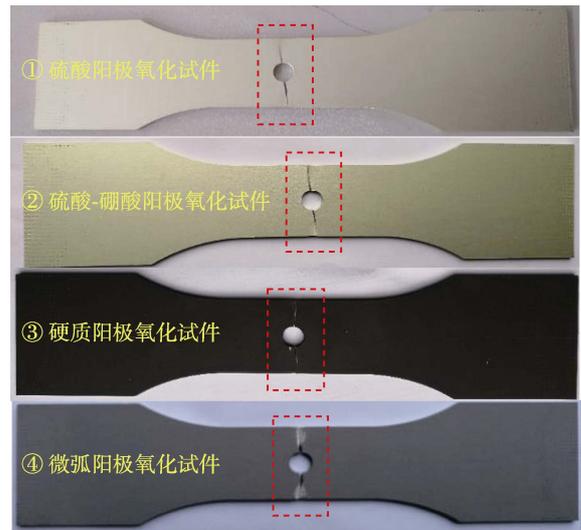


图3 试验件形貌  
Fig.3 Morphology of specimen

## 2 结果与讨论

### 2.1 疲劳试验结果

试验后试件形貌如图3所示。经观察发现,所有试样的疲劳破坏形貌均相似,疲劳裂纹均在垂直于拉力方向孔边处萌生并扩展。可以发现,微弧阳极氧化试件断口附近的氧化膜出现了大面积脱落。

统计试件疲劳寿命,表4的疲劳数据表明,当最大应力为150 MPa时,相较原试件,硫酸和硬质阳极氧化试件疲劳寿命减少幅度较小,分别为4.3%和6.6%;微弧阳极氧化试件疲劳寿命减少的幅度较大,

达到15.6%;而硫酸-硼酸阳极氧化试件的疲劳寿命与原试件基本相同。当最大应力为200 MPa时,相较原试件,硫酸、硫酸-硼酸、硬质和微弧阳极氧化试件疲劳寿命分别减少为16.1%、4.2%、16.7%和29.7%。可以发现,不同阳极氧化工艺处理后,2A12-T4铝合金试件的疲劳寿命基本均出现明显下降,同时下降幅度与应力水平呈正相关。

分析认为,硫酸和硬质阳极氧化处理后,2A12-T4铝合金试件疲劳寿命减少的原因可能是,硫酸和硬质阳极氧化生成的氧化膜较厚,较厚的氧化膜产生的应力相对较大,致使试件表面产生新的微小缺陷,最终导致疲劳裂纹易生,疲劳寿命减少。硼酸-硫酸阳极

表 4 疲劳试验数据  
Tab.4 Fatigue test data

编号	S0		S1		S2		S3		S4	
	150 MPa	200 MPa								
A-1#	67 365	55 329	69 315	42 239	66 354	43 229	63 235	49 624	57 426	42 760
A-2#	65 035	49 346	55 318	38 621	67 432	55 306	57 426	48 438	50 349	31 845
A-3#	64 094	60 489	66 678	40 563	70 326	55 326	55 764	40 753	61 328	33 934
A-4#	70 632	53 698	64 935	49 934	69 852	48 065	61 326	46 362	48 523	47 893
A-5#	66 315	54 320	63 876	47 832	65 943	53 216	60 785	41 330	59 168	41 328
A-6#	67 880	56 953	65 748	48 532	66 798	59 652	62 547	37 843	53 605	42 649
A-7#	69 023	54 532	61 567	44 570	69 257	53 744	58 343	54 953	58 830	35 738
A-8#	65 534	49 754	66 383	50 307	62 934	51 206	59 354	45 348	64 054	43 953
A-9#	69 062	56 798	64 732	48 063	68 425	52 575	61 034	47 076	55 824	36 380
A-10#	65 248	53 505	62 934	46 587	65 275	49 653	59 036	42 074	62 634	26 407
平均值	67 019	54 472	64 149	45 725	67 260	52 197	59 885	45 380	57 174	38 289
变化/%	/	/	-4.3	-16.1	0.4	-4.2	-6.6	-16.7	-15.0	-29.7

氧化处理后, 2A12-T4 铝合金试件疲劳寿命减少幅度较小, 甚至略微提高的原因可能是, 其氧化膜较薄, 而且在硫酸-硼酸阳极氧化过程中会将试件表面的微小缺陷去除, 从而提高试件的疲劳寿命。微弧氧化试件的疲劳寿命下降显著的原因可能是, 微弧氧化膜表面相对其他阳极氧化膜更为粗糙, 从而更易萌生裂纹。同时, 国内外相关研究表明, 阳极氧化工艺参数对铝合金表面处理效果具有显著影响<sup>[20]</sup>, 因此对电解液成分、氧化电压、电流密度、处理温度和时间等工艺参数进行优化, 可有助于改善阳极氧化膜性能, 增加 2A12-T4 铝合金疲劳寿命。

## 2.2 分布检验

本节对疲劳试验数据进行 S-W 检验, 计算结果见表 5。由表 5 中数据可知, 各组试件对数寿命的  $p$

值均大于 0.05, 说明 4 种典型阳极氧化工艺处理后, 试件在 2 种不同应力水平下的疲劳寿命均服从对数正态分布。由此可以得到结论, 经 4 种典型阳极氧化工艺处理后, 2A12-T4 铝合金试件的疲劳寿命仍服从对数正态分布<sup>[22]</sup>。

## 2.3 疲劳寿命分析

中值寿命  $N_{50}$  是用于评估结构疲劳性能的重要参数之一<sup>[23]</sup>。用  $\mu$  表示对数寿命的样本均值, 则试件的中值寿命  $N_{50}$  可式 (1) 计算而得。

$$N_{50} = 10^{\mu} \quad (1)$$

按照 (1) 计算中值寿命  $N_{50}$ , 2 种应力水平下, 普通试件和不同阳极氧化工艺试件的中值寿命如图 4 所示。可以发现, 最大应力为 150 MPa 时, 疲劳寿命由大到小依次为硫酸-硼酸阳极氧化试件、普通试件、

表 5 分布检验计算结果  
Tab.5 Distribution test calculation results

最大应力/MPa	类型	对数寿命均值 $\mu$	对数寿命标准差 $s$	统计量	显著性 $p$
150	普通试件	4.826 002 081	0.013 687	0.957 0	0.751 5
	硫酸阳极氧化试件	4.806 478 459	0.026 490	0.870 8	0.102 0
	硫酸-硼酸阳极氧化试件	4.827 527 077	0.014 842	0.964 2	0.832 6
	硬质阳极氧化试件	4.777 019 506	0.017 008	0.974 2	0.926 8
	微弧阳极氧化试件	4.755 577 426	0.039 862	0.948 0	0.644 7
200	普通试件	4.735 452 25	0.026 471	0.946 5	0.627 7
	硫酸阳极氧化试件	4.658 555 697	0.039 634	0.902 7	0.234 7
	硫酸-硼酸阳极氧化试件	4.725 172 163	0.038 552	0.957 3	0.755 1
	硬质阳极氧化试件	4.654 481 358	0.047 882	0.980 4	0.967 3
	微弧阳极氧化试件	4.576 983 982	0.078 061	0.944 1	0.599 6

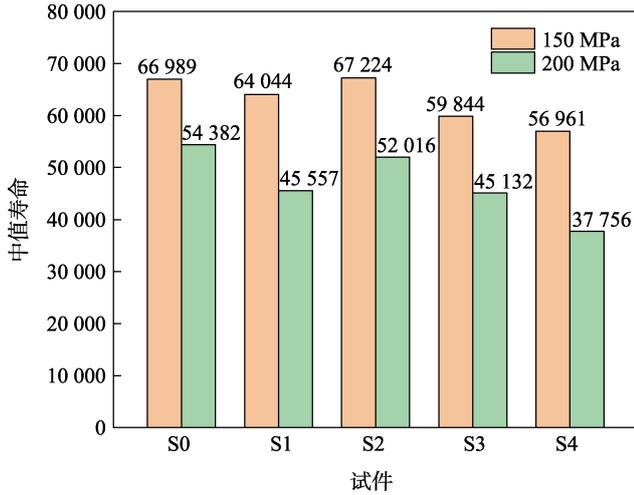


图4 不同阳极氧化工艺试件的中值寿命  
Fig.4 Median lifespan of specimens subject to different anodizing processes

硫酸阳极氧化试件、硬质阳极氧化试件和微弧阳极氧化试件；最大应力为 200 MPa 时，疲劳寿命由大到小依次为普通试件、硫酸-硼酸阳极氧化试件、硫酸阳极氧化试件、硬质阳极氧化试件和微弧阳极氧化试件。

结构疲劳寿命分析是一项重要的工程技术工作，不仅要考虑对数寿命标准差  $s$  和中值寿命，还需进一步考虑分散系数、安全寿命等指标<sup>[24]</sup>。在对数寿命母体的标准差和数学期望都未知的条件下，根据疲劳寿命的定义可计算出疲劳分散系数  $L_f$ ，计算公式为<sup>[25]</sup>：

$$L_f = 10 \left( \frac{u_\gamma - u_p}{\sqrt{n}} \right) ks \quad (2)$$

式中： $\mu_p$  为标准正态分布上  $P$  分位数； $\mu_\gamma$  为标准

正态分布上  $\gamma$  分位数，由选用的置信度  $(1-\gamma)$  确定； $n$  为试件的数量； $k$  为标准差修正系数。

$k$  可表示为：

$$k = \sqrt{\frac{n-1}{2}} \frac{\Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)} \quad (3)$$

当结构寿命服从对数正态分布时，目前常用 99.9% 可靠度和 90% 置信度对应的寿命作为安全寿命，因此安全寿命  $N_p$  的计算公式为<sup>[26]</sup>：

$$N_f = \frac{N_{50}}{L_f} \quad (4)$$

将疲劳试验数据按照式 (3) 和式 (4) 进行计算，可以得到普通试件和不同阳极氧化工艺处理后的试件在不同应力水平下的分散系数和安全寿命。由计算结果（如图 5 所示）可知，当最大应力为 150 MPa 时，普通试件和 4 种典型阳极氧化试件的分散系数依次为 1.119 9、1.245 1、1.130 7、1.151 1 和 1.390 7，安全寿命依次为 59 816、51 439、59 455、51 988 和 40 958；当最大应力为 200 MPa 时，普通试件和 4 种典型阳极氧化试件的分散系数依次为 1.244 9、1.388 1、1.375 7、1.486 1 和 1.907 7，安全寿命依次为 43 685、32 820、37 810、30 369 和 19 792。由此可知，4 种阳极氧化工艺对 2A12-T4 铝合金的疲劳寿命均产生不利影响，即分散系数变大，安全寿命减小。同时可以发现，在所研究的 2 种应力水平下，应力水平增大时，同工艺试件的分散系数也会变大，安全寿命会减小。

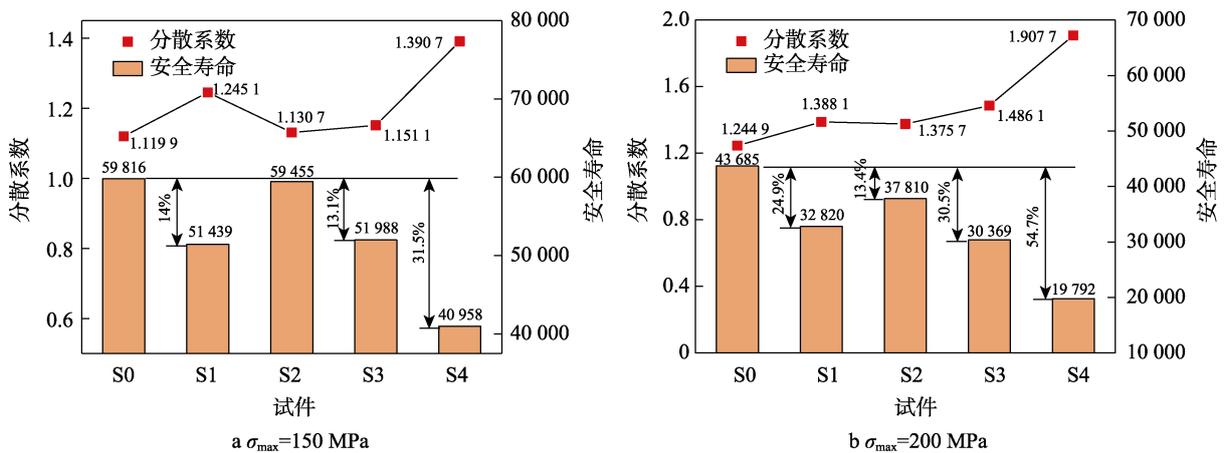


图5 不同阳极氧化工艺试件的疲劳寿命分散性及安全寿命  
Fig.5 Dispersion of fatigue life and safety life of specimens with different anodizing processes

### 3 结论

1) 4 种典型阳极氧化工艺处理后，2A12-T4 铝合金试件在 2 种应力水平下的疲劳寿命均服从对数正

态分布，且除最大应力为 150 MPa 下的硫酸-硼酸阳极氧化试件的疲劳寿命基本不变外，其他试件均出现下降，下降幅度与应力水平呈正相关。

2) 4 种阳极氧化工艺对 2A12-T4 铝合金的疲劳

寿命均产生不利影响, 即分散系数变大, 安全寿命减小。同时可以发现, 在所研究的 2 种应力水平下, 应力水平增大时, 同工艺试件的分散系数也会变大, 安全寿命相应减小。

本文研究成果可为阳极氧化工艺的参数优化和工程应用中的选择提供一定参考。在下一步研究中, 分析研究阳极化试验件的疲劳损伤机理以及多种应力状态下的疲劳分散性变化规律, 将有助于进一步揭示典型阳极氧化工艺对 2A12-T4 铝合金疲劳寿命的影响。

#### 参考文献:

- [1] 史贵山, 彭时勇, 张悦, 等. 2A12 铝合金圆铸锭疏松产生原因及防止措施[J]. 轻合金加工技术, 2023, 51(12): 1-5.  
SHI G S, PENG S Y, ZHANG Y, et al. Cause and Control Measures of 2A12 Aluminum Alloy Billet Porosity[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2023, 51(12): 1-5.
- [2] 丁清苗, 秦永祥, 崔艳雨. 飞机蒙皮 2A12 铝合金搅拌摩擦焊的数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2021, 50(7): 144-150.  
DING Q M, QIN Y X, CUI Y Y. Numerical Simulation Study on Friction Stir Welding of Aircraft Skin 2A12 Aluminum Alloy[J]. Hot Working Technology, 2021, 50(7): 144-150.
- [3] 魏小琴, 李晗, 蒲亚博, 等. 2A12 铝合金动态腐蚀-疲劳耦合失效机理研究[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 359-365.  
WEI X Q, LI H, PU Y B, et al. Study on the Failure Mechanism of 2A12 Aluminum Alloy under Dynamic Corrosion-Fatigue Coupling[J]. Surface Technology, 2021, 50(8): 359-365.
- [4] 崔仁浩, 张健萍, 贺元骅, 等. 高温环境 2A12-T4 铝合金多轴疲劳失效规律研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2021, 43(6): 33-41.  
CUI R H, ZHANG J P, HE Y H, et al. Study on the Multiaxial Fatigue Failure Law of 2A12-T4 Aluminum Alloy in High Temperature Environment[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2021, 43(6): 33-41.
- [5] 陈莉, 武英英, 许恒庭, 等. 阳极氧化后某 2A12 铝合金零件表面缺陷的成因[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(2): 114-118.  
CHEN L, WU Y Y, XU H T, et al. Causes of Surface Defects of 2A12 Aluminum Alloy Parts after Anodizing[J]. Corrosion & Protection, 2024, 45(2): 114-118.
- [6] 王贝, 陈旭立, 胡荣芳, 等. 不同状态 2A12 铝合金与 17-4PH 不锈钢间的摩擦磨损性能[J]. 机械工程材料, 2023, 47(2): 79-83.  
WANG B, CHEN X L, HU R F, et al. Friction and Wear Performance of 2A12 Aluminum Alloy in Different States Against 17-4PH Stainless Steel[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2023, 47(2): 79-83.
- [7] 谭娜, 孙世磊, 华磊. 腐蚀疲劳交替下 2A12-T4 航空铝合金的寿命分析研究[J]. 机械设计与制造, 2024(1): 107-112.  
TAN N, SUN S L, HUA L. Life Analysis of 2A12-T4 Aeronautical Aluminum Alloy under Alternating Mode of Corrosion Fatigue with Load Interaction[J]. Machinery Design & Manufacture, 2024(1): 107-112.
- [8] 王沙沙, 杨浪, 黄运华, 等. 硼硫酸阳极氧化 6061 铝合金在不同大气环境中的初期腐蚀行为研究[J]. 材料研究学报, 2017, 31(1): 49-56.  
WANG S S, YANG L, HUANG Y H, et al. Initial Corrosion Behavior in Different Atmospheric Environments of 6061 Al Alloy Anodized in Boron-Sulfuric Acid Solution[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2017, 31(1): 49-56.
- [9] 王业东, 蹇海根, 杨孝梅, 等. 阳极氧化工艺对冷热循环冲击后 2A12 铝合金耐腐蚀性能的影响[J]. 铝加工, 2022(2): 10-16.  
WANG Y D, JIAN H G, YANG X M, et al. Effect of Anodizing Process on Corrosion Resistance of 2A12 Aluminum Alloy after Temperature Shock[J]. Aluminium Fabrication, 2022(2): 10-16.
- [10] 肖可谋, 聂伟军, 蹇海根, 等. 阳极氧化时间对 2A12 铝合金剥落腐蚀性能的影响[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(4): 39-46.  
XIAO K M, NIE W J, JIAN H G, et al. Effects of Anodizing Time on Exfoliation Corrosion Properties of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36(4): 39-46.
- [11] 陈庚, 苗景国, 方琴, 等. 氧化时间对 2A12 铝合金微弧氧化膜层组织及耐腐蚀性能的影响[J]. 装备制造与教育, 2022(1): 14-17.  
CHEN G, MIAO J G, FANG Q, et al. Effect of Oxidation Time on Microstructure and Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation Coatings on 2A12 Aluminum Alloy[J]. Equipment Manufacturing and Education, 2022(1): 14-17.
- [12] 顾琳. 低温 2A12 铝铜合金硬质阳极氧化工艺研究[J]. 西华师范大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 184-189.  
GU L. Hard Anodic Oxidation Technology for 2A12 Aluminum-Copper Alloy[J]. Journal of China West Normal University (Natural Sciences), 2011, 32(2): 184-189.
- [13] 魏士钧, 汪鸿宇, 宋海鹏, 等. 不同阳极氧化电压对 2A12 铝合金表面性能的影响[J]. 有色金属工程, 2024, 14(3): 15-26.  
WEI S J, WANG H Y, SONG H P, et al. The Effect of Different Anodizing Voltages on the Surface Properties of 2A12 Aluminum Alloy[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(3): 15-26.
- [14] 刘志扬, 马国峰, 高美玉, 等. 2A12 铝合金的低压微弧氧化制备与性能研究[J]. 热加工工艺, 2023, 52(16): 104-110.  
LIU Z Y, MA G F, GAO M Y, et al. Research on Prepara-

- tion and Properties of 2A12 Aluminum Alloy by Low Pressure Microarc Oxidation[J]. Hot Working Technology, 2023, 52(16): 104-110.
- [15] 时春燕, 王春霞, 吴光辉, 等. 轧制成形与挤压成形 2A12 铝合金硬质阳极氧化膜性能对比研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 178-184.
- SHI C Y, WANG C X, WU G H, et al. Comparative Study on Properties of 2A12 Aluminum Alloy Hard Anodized Film by Roll Forming and Extrusion[J]. Surface Technology, 2019, 48(3): 178-184.
- [16] 孟莉莉, 樊伟杰, 朱彦海, 等. 阳极化对 SP700 钛合金/2A12 铝合金偶对电偶腐蚀影响研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(8): 37-44.
- MENG L L, FAN W J, ZHU Y H, et al. Effect of Anodizing on Couple Galvanic Corrosion of SP700 Titanium Alloy/2A12 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(8): 37-44.
- [17] 马存强, 曹海龙, 徐方涛, 等. 中-低温循环对 2A14 铝合金力学及疲劳性能的影响[J]. 有色金属材料与工程, 2023, 44(3): 49-55.
- MA C Q, CAO H L, XU F T, et al. Effect of Middle-Cryogenic Temperature Cycling on Mechanical and Fatigue Properties of 2A14 Aluminum Alloy[J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2023, 44(3): 49-55.
- [18] 许志龙, 何林玥, 于乃川, 等. 典型阳极氧化铝合金在热带海洋大气环境下的腐蚀行为研究[J]. 电镀与涂饰, 2023, 42(20): 48-57.
- XU Z L, HE L Y, YU N C, et al. Study on Corrosion Behavior of Typical Anodized Aluminum Alloys in Tropical Marine Atmosphere[J]. Electroplating & Finishing, 2023, 42(20): 48-57.
- [19] 李兴明, 赵盖, 胡清元, 等. 氧化石墨烯对铝合金微弧氧化膜层力学和摩擦学性能的影响[J]. 材料保护, 2023, 56(7): 1-9.
- LI X M, ZHAO G, HU Q Y, et al. Effects of Graphene Oxide on the Mechanical and Tribological Properties of Micro-Arc Oxidation Coatings on Aluminum Alloy[J]. Materials Protection, 2023, 56(7): 1-9.
- [20] NABAVI R, SARRAF S, SOLTANIEH M. Optimization of Hard Anodizing Process Parameters on 6061-T6 Aluminum Alloy Using Response Surface Methodology[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(19): 10048-10061.
- [21] SONG Y J, LIU X B, ZHANG D Y, et al. A Grating Coating Sensor for Quantitative Monitoring of Metal Structure Cracks under Varying Ambient Temperature[J]. Measurement, 2022, 192: 110919.
- [22] 何宇廷. 飞机结构寿命控制原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- HE Y T. Principle and Technology of Aircraft Structure Life Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [23] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- GAO Z T. Fatigue Applied Statistics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1986.
- [24] 宋雨键, 崔荣洪, 张腾, 等. 7B04 与 B95 超硬铝合金的裂纹扩展性能[J]. 机械工程材料, 2020, 44(10): 43-47.
- SONG Y J, CUI R H, ZHANG T, et al. Crack Growth Properties of 7B04 and B95 Superhard Aluminum Alloys[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2020, 44(10): 43-47.
- [25] 高潮, 何宇廷, 侯波, 等. 飞机结构疲劳寿命分散系数研究[J]. 机械强度, 2016, 38(5): 1076-1081.
- GAO C, HE Y T, HOU B, et al. On Fatigue Life Scatter Factor for the Aircraft Structure[J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(5): 1076-1081.
- [26] 何宇廷, 高潮, 张腾, 等. 飞机结构疲劳/耐久性安全寿命延寿方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015, 16(6): 1-6.
- HE Y T, GAO C, ZHANG T, et al. On Method of Fatigue/Durability Safe Life Extension of Aircraft Structure[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2015, 16(6): 1-6.