

基于双参数威布尔分布的高强度铝合金材料 腐蚀损伤分布动力学规律研究

张登, 李孟思

(中国特种飞行器研究所 结构腐蚀防护与控制航空科技重点实验室, 湖北 荆门 448035)

摘要: **目的** 研究高强度铝合金材料腐蚀损伤分布的动力学规律。**方法** 通过统计高强度铝合金材料的蚀坑深度和直径, 采用双参数威布尔分布进行拟合, 提出以双参数威布尔分布中的两个参数 α 、 β 作为高强度铝合金材料腐蚀损伤分布的表征量, 建立 α 、 β 随腐蚀时间增长的多种数学模型。**结果** α 随腐蚀时间的增长而减小, β 随腐蚀时间的增长而增大, 并且分布参数均能很好地符合一阶指数函数模型。**结论** 与实际蚀坑分布增长物理现象比较, α 、 β 的变化趋势能够揭示出蚀坑分布随时间增长的变化过程, 并且腐蚀损伤分布动力学规律能很好地符合一阶指数函数模型。

关键词: 铝合金; 双参数威布尔分布; 腐蚀损伤

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.07.006

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2019)07-0027-05

Dynamic Law of Corrosion Damage Distribution of High Strength Aluminum Alloy Based on Two-parameter Weibull Distribution

ZHANG Deng, LI Meng-si

(Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Structural Corrosion Prevention and Control China Special Vehicle Research Institute, Jingmen 448035, China)

ABSTRACT: Objective To study the distribution kinetics of corrosion damage in high strength aluminum alloy. **Methods** By calculating the corrosion pit depth and diameter of high-strength aluminum alloy materials and fitting the two-parameter Weibull distribution, two parameters α and β in the two-parameter Weibull distribution were proposed as the characterization quantities of the corrosion damage distribution of high-strength aluminum alloy materials, and a variety of mathematical models of α and β with the increase of corrosion time were established. **Results** α decreased with the increase of corrosion time, while β increased with the increase of corrosion time, and the distribution parameters can well conform to the first-order exponential function model. **Conclusion** Compared with the physical phenomenon of actual pit distribution growth, the change trend of α and β can reveal the change process of pit distribution growth with time, and the dynamic law of corrosion damage distribution can well conform to the first-order exponential function model.

KEY WORDS: aluminum alloy; two-parameter Weibull distribution; corrosion damage

随着我军现役飞机使用日历年限的增长, 飞机机体结构件的腐蚀越来越严重。由于腐蚀或腐蚀疲劳造成机体结构件的破坏现象更是频繁发生, 对飞机的飞

行安全构成了严重威胁, 严重地影响了飞机的正常使用寿命^[1]。飞机结构材料 70%以上是高强度铝合金, 作为飞机结构的主要承力件, 发生腐蚀的现象很普遍^[2]。

因此,有必要对高强度铝合金材料腐蚀损伤动力学规律进行研究,以便建立合适的监测、检查机制。

蚀坑一般是疲劳裂纹成核的基础。目前,主要采用最大蚀坑深度、平均蚀坑深度^[3]、95%置信度95%可靠度的蚀坑深度作为铝合金材料腐蚀损伤表征量,然后进一步研究铝合金材料腐蚀损伤的动力学规律^[4-6]。然而,上述表征方法不能全面地反映铝合金材料的腐蚀损伤状态,并且有报道^[7-9]指出,最大蚀坑并不总是疲劳裂纹成核的原因,蚀坑分布是蚀坑与疲劳裂纹成核及扩展关系的重要纽带。文中通过统计高强度铝合金材料的蚀坑深度和直径,用双参数威布尔分布进行拟合,提出了以双参数威布尔分布中的两个参数 α 、 β 作为高强度铝合金材料腐蚀损伤分布的表征量,并揭示了高强度铝合金材料腐蚀损伤分布随腐蚀时间增长的动力学变化规律。

1 腐蚀损伤统计特征

腐蚀损伤可以用多种特征量来表征,例如蚀坑深度、面积、体积等,选取腐蚀深度和直径作为腐蚀损伤的表征量。一般采用威布尔分布来表征各种腐蚀分布^[10-11],特别是蚀坑分布^[12-13]。文中采用双参数威布尔累积分布函数(见式(1), d 表示蚀深度或直径)进行高强度铝合金材料腐蚀损伤的分布动力学规律研究。形状参数 α 和位置参数 β 影响蚀坑分布,如图1所示。可以看出, α 越小,蚀坑分布范围越广; β 越大,会使分布曲线右移,大多数的蚀坑深度/直径增大。因此,可以通过参数 α 和 β 的变化情况来反映蚀坑总体的变化趋势。

$$F(d) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{d}{\beta}\right)^\alpha\right) \quad (1)$$

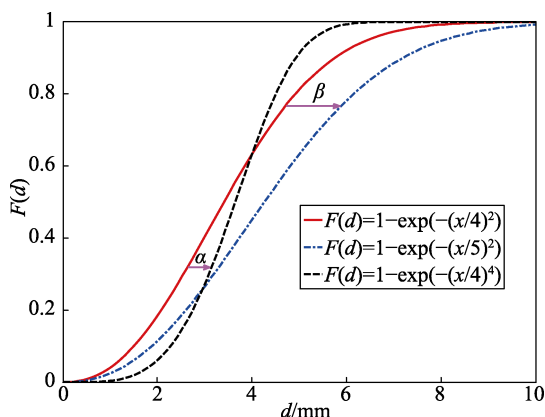


图1 双参数威布尔累积分布函数随参数 α 和 β 的变化趋势

2 实验

针对飞机常用的材料,将试验件浸泡在预先配置好的溶液中,检测试验件不同时间(1、3、5、7、9、

11、13天)LS方向的蚀坑深度和直径。试验件是立方体块,材料为7075-T651,边长为1.3cm,立方体块LS面用1200#砂纸打磨,其余5个面涂漆。试验溶液由NaCl、H₂SO₄以及去离子水组成,其中NaCl浓度为0.6mol/L,pH为6,溶液温度为35℃恒温。利用光学轮廓测定仪KH-77000检测蚀坑深度和直径,每个时间点下一般检测至少100个蚀坑,并且至少随机检测3个位置。

3 试验结果分析

3.1 蚀坑分布形貌

在同一倍率下观察蚀坑的分布情况,典型形貌如图2所示。可以看出,腐蚀1天后,蚀坑的深度和直径都很小,有的蚀坑甚至尚未形成;腐蚀7天后,已经有明显地蚀坑,并且有的蚀坑已经长大,深度和直径都变大。

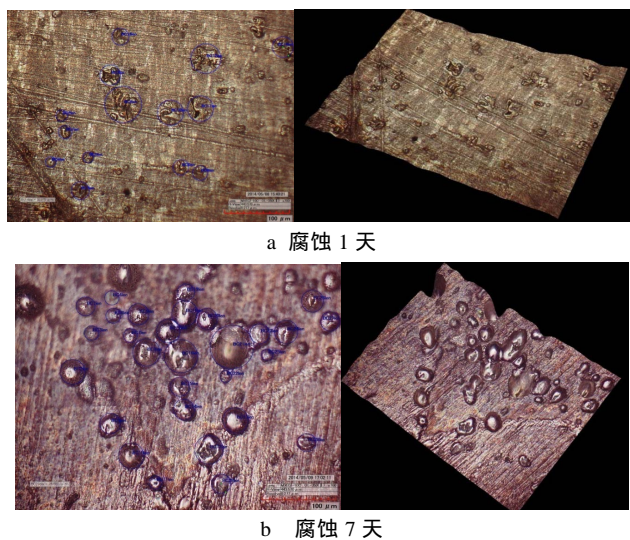


图2 蚀坑分布形貌

3.2 蚀坑分布参数计算

对蚀坑深度和直径进行数理统计,采用双参数威布尔分布函数对不同腐蚀时间下的蚀坑深度和直径进行拟合。腐蚀1、7天后,蚀坑深度和直径分布的拟合如图3所示。各个腐蚀时间点蚀坑的分布拟合结果参数和相关系数见表1。

从表1可知,拟合相关系数均很高,说明蚀坑深度和直径分布在各个腐蚀时间下均能很好地符合双参数威布尔分布。另外,随着腐蚀时间的增长,蚀坑深度/直径分布参数 α 逐渐降低,说明蚀坑深度/直径范围越来越广;而蚀坑深度/直径分布参数 β 逐渐增大,说明蚀坑深度/直径整体趋势在增大。在实际情况中,随着腐蚀时间的增长,原有的大多数蚀坑深度/直径会增长(β 增大),并且其他部位会陆陆续续出

现新的小蚀坑 (α 减小)。通过拟合得到的分布参数变化趋势与实际的物理现象完全吻合,说明通过双参

数威布尔分布的参数变化趋势,能够揭示出蚀坑分布随时间增长的变化过程。

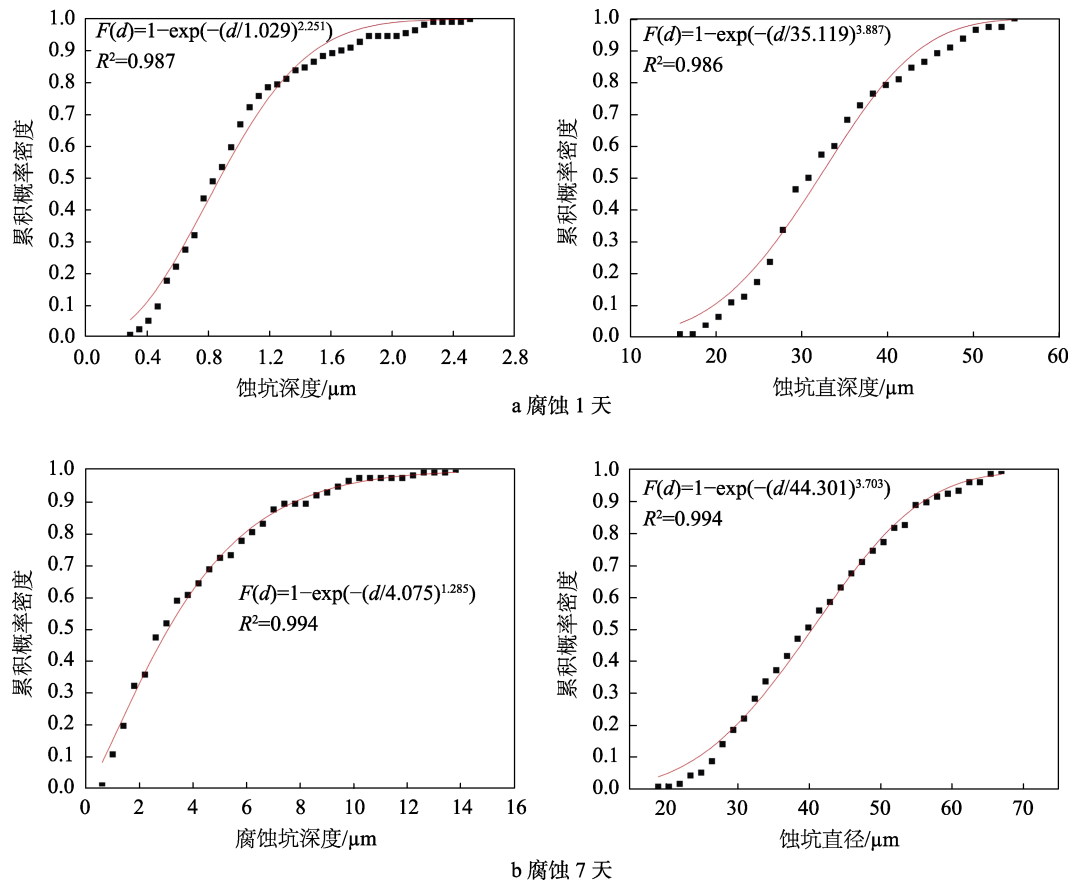


图 3 蚀坑深度和直径的概率分布

表 1 蚀坑深度/直径分布参数及拟合相关系数

腐蚀时间 /d	蚀坑深度			蚀坑直径		
	分布参数 α	分布参数 β	相关系数	分布参数 α	分布参数 β	相关系数
1	2.251	1.029	0.987	3.887	35.119	0.986
3	1.527	2.379	0.992	3.802	40.466	0.985
5	1.394	3.412	0.989	3.788	41.569	0.982
7	1.285	4.075	0.994	3.703	44.301	0.994
9	1.272	4.291	0.993	3.547	46.657	0.986
11	1.256	4.785	0.987	3.324	49.354	0.984
13	1.234	5.392	0.988	3.114	52.788	0.987

3.3 蚀坑分布动力学规律研究

采用双参数威布尔分布来描述蚀坑分布,分布参数 α 和 β 决定了蚀坑分布状况。研究蚀坑分布动力学规律,就要研究分布参数 α 和 β 随腐蚀时间的变化规律。参考最大蚀坑深度动力学变化规律以及根据表 1 中数据特点,采用 $y=kt^b$ 和一阶指数函数 $y=y_0+Ae^{-x/t}$ 对分布参数进行计算分析。其中, t 表示腐蚀时间, y 表示参数 α 或 β 。前 6 组数据 (1—11

天)用于拟合,最后一组数据 (13 天)用于检验拟合效果。拟合结果见表 2 和图 4,根据已建立的模型,腐蚀第 13 天预测值及相对误差见表 3。

表 2 蚀坑分布随腐蚀时间的变化规律

	$y=kt^b$ 函数模型	相关系数	一阶指数函数模型	
			函数模型	相关系数
蚀坑深度	α $y=2.195t^{-0.264}$	0.951	$y=1.269+1.826e^{-x/1.604}$	0.993
分布参数	β $y=1.299t^{0.557}$	0.972	$y=5.310-5.233e^{-x/5.040}$	0.994
蚀坑直径	α $y=3.968t^{-0.05}$	0.57	$y=3.923-0.043e^{x/4.177}$	0.988
分布参数	β $y=34.521t^{0.137}$	0.948	$y=63.475-29.617e^{-x/15.416}$	0.962

表 3 腐蚀第 13 天预测值及与真实值的相对误差

	$y=kt^b$ 函数模型预测值	相对误差 /%	一阶指数函数模型预测值	
			模型预测值	相对误差 /%
蚀坑深度 α	1.115	9.64	1.270	2.92
分布参数 β	5.421	0.54	4.913	8.88
蚀坑直径 α	3.49	12.07	2.957	5.04
分布参数 β	49.056	7.07	50.731	3.90

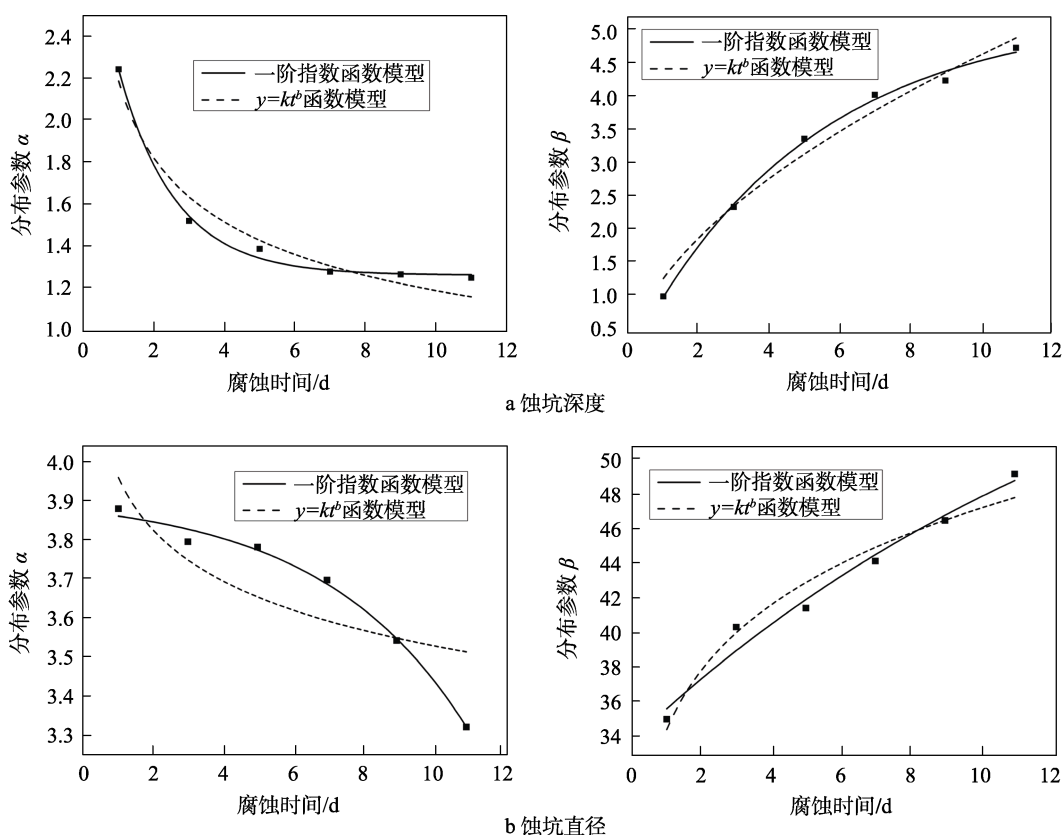


图4 分布参数 α 和 β 随腐蚀时间的变化规律

1) 从表2中比较两种拟合函数的拟合相关系数,发现一阶指数函数拟合相关系数很高,均比 $y=kt^b$ 函数的高。从表3可知,一阶指数函数模型预测值的相对误差均较低,说明蚀坑深度/直径分布动力学的变化规律符合一阶指数函数关系式。另外蚀坑直径分布参数 α 采用 $y=kt^b$ 函数拟合的相关系数只有0.57,说明 $y=kt^b$ 函数模型并不能真实反映出蚀坑深度/直径分布动力学的变化规律。

2) 蚀坑深度分布参数 α 和 β 采用一阶指数函数模型拟合的相关系数比蚀坑直径分布参数高,原因有可能是蚀坑直径分布参数的动力学变化规律仅仅是基本符合一阶指数函数关系,还有可能是由于蚀坑并不是标准的圆形,有的蚀坑是由好几个蚀坑交联在一起,蚀坑轮廓各式各样,检测时画一个圆形将轮廓刚好包括进去,测定的圆形直径作为蚀坑的直径,这样会出现检测误差,导致最终的结果不能很好地符合一阶指数函数关系。

3) 假设腐蚀时间足够长,采用一阶指数函数模拟的蚀坑深度分布参数 α 会趋近于下限值1.269,蚀坑深度范围不会一直变大,蚀坑深度分布参数 β 会趋近于上限值5.310,绝大部分蚀坑深度不会一直持续增长,并会趋于同一水平。在实际情况中,蚀坑深度不会一直增长,腐蚀产物会阻碍蚀坑增长的速度,另外许多个蚀坑增长一定时间后,会变成均匀腐蚀。蚀

坑深度范围也不会无限变大,通过一阶指数函数反映的蚀坑深度分布动力学变化规律与实际现象基本一致。采用一阶指数函数模拟的蚀坑直径分布参数 α 会趋近于0,蚀坑直径范围会无限变大,蚀坑直径分布参数 β 会趋近于上限值63.475,与实际情况并不完全吻合,其原因跟第2)条分析原因一样。

4) 从图4a拟合的一阶指数函数变化可以看出,蚀坑深度分布参数 α 的减小速率越来越小,蚀坑深度分布参数 β 的增长速率也越来越小。说明随着时间的增长,新增的蚀坑会越来越小,整体的蚀坑深度增长速率会越来越小,与实际情况一致。从图4b拟合的一阶指数函数变化可以看出,蚀坑直径分布参数 α 的减小速率越来越大,蚀坑直径分布参数 β 的增长速率越来越小。说明随着时间的增长,蚀坑直径分布范围的增大会越来越快。主要是因为随着蚀坑的增长,多个蚀坑交联在一起的概率会变大,但是大部分单个蚀坑直径的增长速率会越来越小,与实际情况一致。

4 结语

综上所述,蚀坑深度分布动力学变化规律能很好地符合一阶指数函数关系式,蚀坑直径分布动力学变化规律能基本符合一阶指数函数关系式。能够反映出高强度铝合金材料蚀坑增长过程中,新蚀坑陆续出现,蚀坑相互交联,蚀坑增长越来越慢,蚀坑不会无限增大,

最后出现均匀腐蚀等现象,而 $y = kt^b$ 函数模型并不能真实反映出蚀坑深度/直径分布动力学变化规律。

参考文献:

- [1] 张丹峰, 谭晓明, 戚佳睿. 飞机结构件腐蚀监测研究[J]. 环境技术, 2017, 35(4): 32-34.
- [2] 穆志韬, 熊玉平. 高强度铝合金的腐蚀损伤分布规律研究[J]. 机械工程材料, 2002, 26(4): 14-17.
- [3] 李旭东, 穆志韬, 刘治国. 航空高强度 LY12CZ 铝合金腐蚀剩余强度预测[J]. 装备环境工程, 2013, 10(6): 1-4.
- [4] 陈定海, 穆志韬, 朱做涛, 等. 腐蚀坑对疲劳裂纹扩展的影响分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 4-7.
- [5] 李旭东, 张黎明, 汪振兴, 等. 预腐蚀 LD2 铝合金腐蚀坑向裂纹转化研究[J]. 环境技术, 2013(6):10-13.
- [6] 李旭东, 刘治国, 贾明明, 等. 基于可靠度的 LY12CZ 铝合金预腐蚀剩余强度预测[J]. 环境技术, 2013(2): 19-22.
- [7] CAVANAUGH M K, BUCHHEIT R G, BIRBILIS N. Modeling the Environmental Dependence of Pit Growth Using Neural Network Approaches[J]. Corrosion Science, 2010(9): 3070-3077.
- [8] PAGLIA C S, BUCHHEIT R G. A Look in the Corrosion of Aluminum Alloy Friction Stir Welds[J]. Scripta Materialia, 2008(3): 383-387.
- [9] CRESCENTE De M A, BORNSTEIN N S. Formation and Reactivity Thermodynamics of Sodium Sulfate With Gas Turbine Alloys[J]. Corrosion, 1968, 24(5): 127-133.
- [10] TURNBULL A. Modeling of the Chemistry and Electrochemistry in Cracks[J]. Corrosion, 2001, 57(2): 175-189.
- [11] TURNBULL A, ZHOU S. Electrochemical Crack Size Effect in Stress Corrosion Cracking and Corrosion Fatigue[J]. Corrosion, 2017(3): 26-30
- [12] GENEL K. The Effect of Pitting on the Bending Fatigue Performance of High-strength Aluminum Alloy[J]. Scripta Materialia. 2007(8): 297-300
- [13] CAIN T, BLAND L G, BIRBILIS N, et al. A Compilation of Corrosion Potentials for Magnesium Alloys[J]. Corrosion, 2014, 70(10): 1043-1051.