

# 某新型航空材料加速腐蚀当量关系试验研究

刘治国, 刘旭, 陈川

(海军航空大学 青岛校区, 山东 青岛 266041)

**摘要:** **目的** 编制某新型航空材料加速腐蚀试验环境谱。**方法** 开展该材料试件电化学腐蚀试验, 利用极化曲线分析法得出该材料于典型 NaCl 溶液浓度、温度下的开路电位和腐蚀电流, 并结合当量折算法, 利用腐蚀电流比值, 得到其于典型 NaCl 溶液条件下的当量关系。**结果** 新型合金钢材料的腐蚀电流在 35 °C 条件下随着 NaCl 浓度的升高而升高, 在 3.5%NaCl 浓度的条件下随着温度的升高而升高。**结论** 以不同环境条件为基准, 当量关系具体数值有变化。

**关键词:** 合金钢材料; 电化学试验; 极化曲线; 腐蚀电流; 当量关系

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.02.004

**中图分类号:** TG172 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)02-0020-05

## Experiment Research on Accelerated Corrosion Equivalent Relationship of a New Type of Aeronautical Material

LIU Zhi-guo, LIU Xu, CHEN Chuan

(Qingdao Branch of Naval Aeronautical University, Qingdao 266041, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to compile environment spectrum of accelerated corrosion test of a new type of aeronautical material. The electrochemical corrosion experiment of the material under different NaCl solution conditions was carried out, and the open circuit potential and corrosion current of different condition test was analyzed through polarization curve. Combined with equivalent algorithm, the equivalent relationship between different NaCl solution condition was computed. At 35 °C, the corrosion current of the new type of aeronautical material increased with the concentration increase of sodium chloride. At 3.5% sodium chloride, the corrosion current increased with the increase temperature. The specific value of equivalent relationship is different with different environment conditions.

**KEY WORDS:** alloy steel material; electrochemical test; polarization curve; corrosion current; equivalent relation

航空装备金属结构材料在服役过程中易受环境作用而产生腐蚀损伤, 腐蚀损伤会随着航空装备服役年限的增加而逐渐加重<sup>[1-3]</sup>, 直至影响其寿命期可靠性, 因而在装备进行立项研究、研制过程中, 耐环境腐蚀试验是考核航空装备及其结构材料日后环境适应性的重要环节。航空装备的日历寿命大都超过 20 年, 大修的周期一般是 5~10 年。由此, 若以真实服

役环境对航空装备金属结构材料的耐环境腐蚀性进行研究, 无论从时间、费用、人力, 还是技术上都很难实现。目前航空装备的环境适应性试验主要通过两种方式, 对普通装备而言, 主要采用相关军用标准, 如 GJB 150 等开展考核试验。对于重要装备, 如邻海、舰载等航空装备等, 主要依托加速腐蚀试验方法开展考核试验。此试验方法需获得相关金属材料在不同环

收稿日期: 2019-08-01; 修订日期: 2019-09-04

Received: 2019-08-01; Revised: 2019-09-04

作者简介: 刘治国 (1976—), 男, 辽宁人, 博士, 主要研究方向为飞机结构腐蚀疲劳寿命分析。

**Biography:** LIU Zhi-guo (1976—), Male, from Liaoning, Ph. D., Research focus: aircraft structure corrosion fatigue life analysis.

境条件下的等腐蚀损伤当量折算关系<sup>[4-7]</sup>，依据该当量折算关系编制加速腐蚀试验环境谱，可对航空装备服役环境进行当量折算与加速。通过加速腐蚀试验环境谱开展加速腐蚀试验，把航空装备金属材料在服役环境中的腐蚀损伤等效地折算成实验室内的当量加速腐蚀环境谱下的腐蚀损伤。上述当量折算理论及加速腐蚀试验考核方法对于保障航空装备环境适应性以及飞行安全具有重要的军事意义和经济效益。

文中以某新型航空合金钢材料为研究对象，该材料为 CrNiMo 系列合金钢，目前开始作为新型发动机冷部件结构材料，主要用于制造附件机匣以及压气机静子叶片。据统计，发动机冷部件结构在服役过程中的腐蚀与飞机机体结构腐蚀类似，主要为电化学腐蚀<sup>[8-11]</sup>。为研究该材料在服役环境下的腐蚀演变规律，需编制该新型材料加速腐蚀试验环境谱，继而开展加速腐蚀试验，上述工作前提是需要获得该新型材料于典型加速腐蚀溶液环境下的腐蚀当量关系。为此，开展该材料试件的电化学腐蚀试验，利用极化曲线，获得其在典型 NaCl 浓度与温度条件下的腐蚀电流密度，进而根据等腐蚀损伤当量关系理论，进行该材料试件于不同典型环境条件下的当量折算系数计算，由此为该材料后续服役环境谱及加速腐蚀试验环境谱的编制提供数据分析基础。

## 1 当量关系理论

当量关系被认为是评定航空装备日历寿命的常用理论和方法，该关系的建立和确定是对航空装备金属结构件和模拟件进行加速腐蚀试验的关键所在。其定义为：航空装备金属结构材料在自然腐蚀环境下和加速腐蚀环境下达到相同程度的腐蚀时，自然环境作用时间  $T$ （单位通常为年）与加速腐蚀环境下作用的时间  $t$ （通常为小时数）之间的比值。表达形式为：

$$T = kt \quad (1)$$

式中： $k$  通常叫做当量关系系数，或称为当量折算系数。该系数表示加速腐蚀 1 个单位时间（小时）相当于机场环境腐蚀  $k$  年的腐蚀损伤程度，即加速试验 1 h 相当于地面停放  $k$  年。

当前，由于腐蚀度量标准的选择不同，当量关系的确定方法通常有当量折算法、腐蚀程度对比法、疲劳强度对比法三种<sup>[4-8]</sup>。结合三种当量关系定义和确定方法、实验室试验设备状况，以及材料在服役环境下相关数据缺乏的情况，文中选择当量折算法，即通过腐蚀电流进行所选新型航空合金钢材料于典型环境下腐蚀的当量关系计算与分析。选择该方法的依据是发动机 CrNiMo 系列合金钢作为发动机冷部件在服役过程中的腐蚀类型为电化学腐蚀<sup>[8-11]</sup>，电化学腐蚀过程中遵循法拉第定律，即腐蚀损伤量与腐蚀电流相关，具体如式（2）所示，即：

$$\Delta W = \varepsilon \cdot Q = \varepsilon \cdot I_c \cdot t = \varepsilon \cdot J_c \cdot S \cdot t \quad (2)$$

式中： $\Delta W$  为腐蚀损伤量； $\varepsilon$  为电化当量； $Q$  为腐蚀电量； $I_c$  为腐蚀电流； $S$  为金属腐蚀区域的表面积； $J_c$  为电流密度。

由式（2）可知，同一材料在不同环境中，当其腐蚀损伤量相同时，可以建立其不同环境下电流密度的关系式，由此即可推导出当量关系系数<sup>[12-13]</sup>。

## 2 电化学腐蚀试验

试验材料为某新型航空合金钢材料，是 CrNiMo 系列合金钢，其用作新型航空发动机附件机匣和静子叶片主体结构材料。静子叶片选材初始状态如图 1 所示。因后续试验件制作需要，需对其进行线切割，得到半径为 6 mm、高为 9.8 mm 的规则圆柱体，如图 2 所示。对其进行清洗后，使用环氧树脂、三乙烯四胺、铜导线、10 mm 的 PVC 管等，将其制成用于电化学试验的试件，如图 3 所示。



图 1 CrNiMo 系列合金钢静子叶片  
Fig.1 CrNiMo series alloy stator vane



图 2 材料试样  
Fig.2 Material samples

测量腐蚀电流数据的仪器为普林斯顿 4000（PARSTA 4000），以电化学试件为工作电极（Work Electrode，简称 WE），以饱和甘汞电极为参比电极（Reference Electrode，简称 RE），以铂电极为对电极（Counter Electrode，简称 CE），按照经典三电极体系接入 PARSTAT 4000 电化学工作站。测试方法为稳态极化法中的动电位扫描，其中采样间隔为 1 mV/s，扫描电压为 -0.8~0.4 V，静置时间为 1~2 h。

在试验过程中，典型环境条件下做 5 次重复试验，用于后续数据统计。试验溶液浓度分别为质量分数 1%、3.5%、5%、7% 的 NaCl 溶液以及蒸馏水。选择 20、35、40 °C 三组典型温度值，以 35 °C、3.5% NaCl

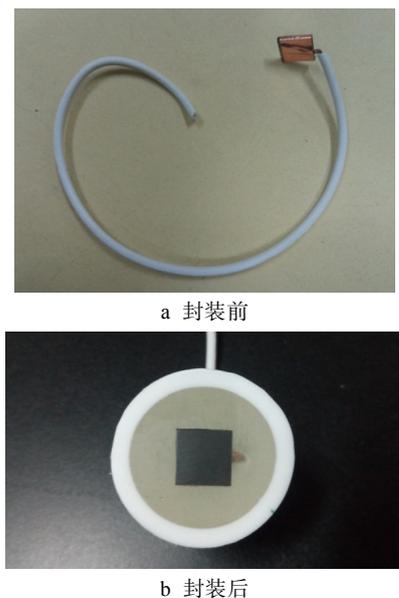


图3 与铜导线连接后的CrNiMo系列合金钢电化学试件  
Fig.3 CrNiMo series alloy steel electrochemical specimens after being connected with copper wires: a) before packaging; b) after packaging

浓度下的腐蚀数据作为当量关系计算基准。腐蚀后试件形貌如图4所示。



图4 腐蚀后的试件  
Fig.4 Specimens after corrosion

### 3 结果及分析

温度为35℃时,不同NaCl浓度下的开路电位和自腐蚀电流密度见表1。NaCl质量分数为3.5%时,不同温度下的开路电位和自腐蚀电流密度见表2。对表1和表2中数据进行统计处理,得到所测材料在不同条件下的腐蚀电流试验均值,见表3和表4。

表1 不同浓度NaCl溶液下的开路电位和自腐蚀电流密度(35℃)

Tab.1 Open circuit potential and self-corrosion current density under different concentration of NaCl solution (35℃)

NaCl 质量分数/%	开路电位/mV			自腐蚀电流密度/( $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ )		
	1组	...	5组	1组	...	5组
0 (纯 H <sub>2</sub> O)	-208.325	...	-210.262	0.403	...	0.442
1	-260.787	...	-242.337	0.713	...	0.617
3.5	-285.369	...	-293.415	1.932	...	2.000
5	-207.615	...	-293.779	1.235	...	2.384
7	-265.289	...	-274.577	1.685	...	1.461

表2 不同温度下的开路电位和自腐蚀电流密度(3.5% NaCl 溶液)

Tab.2 Open circuit potential and self-corrosion current density at different temperature (3.5% NaCl solution)

温度/℃	开路电位/mV			自腐蚀电流密度/( $\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$ )		
	1组	...	5组	1组	...	5组
20	-198.876	...	-218.215	0.986	...	0.665
35	-264.375	...	-244.697	1.312	...	1.269
40	-280.067	...	-290.302	1.969	...	1.614

表3 35℃时不同浓度NaCl溶液下的腐蚀电流统计值

Tab.3 Corrosion current statistics under different concentration of NaCl solution at 35℃

NaCl 溶液 质量分数/%	0 (纯 H <sub>2</sub> O)	1	5	3.5	7
腐蚀电流/ $\mu\text{A}$	0.418	0.636	2.209	1.507	2.598

表4 NaCl溶液质量分数为3.5%时不同温度下的腐蚀电流统计值

Tab.4 Corrosion current statistics at different temperature of the 3.5% NaCl

温度/℃	20	35	40
腐蚀电流/ $\mu\text{A}$	1.150	1.303	1.768

依据当量折算法计算原理,根据腐蚀电流的比值来确立当量关系。选择3.5% NaCl溶液在35℃下的腐蚀电流为基准,参考文献[12-15]中方法,计算确立该材料不同环境条件下的当量折算系数,计算结果见表5和表6。

表5 35℃时不同浓度NaCl溶液间的当量折算系数

Tab.5 The equivalent conversion coefficient between different concentration NaCl solution at 35℃

NaCl 溶液 质量分数/%	0 (纯 H <sub>2</sub> O)	1	5	3.5	7
腐蚀电/ $\mu\text{A}$	0.224	0.463	1.280	1.000	1.606

表 6 NaCl 溶液质量分数为 3.5% 时不同温度下的当量折算系数

Tab.6 The equivalent conversion coefficient at different temperature of the 3.5% NaCl

温度/℃	20	40	35
腐蚀电流/ $\mu\text{A}$	0.702	1.079	1.000

## 4 结论

文中开展某新型航空合金钢试件于典型 NaCl 溶液浓度、温度环境条件下电化学腐蚀试验, 得到该材料于典型 NaCl 溶液浓度、温度下的开路电位和腐蚀电流, 并结合当量折算法, 计算出该材料于典型 NaCl 溶液条件下的当量关系。

1) 在 35 ℃ 条件下, 新型合金钢材料的开路电位随着 NaCl 浓度的升高而降低, 在 3.5% NaCl 条件下, 随着温度的升高而降低。

2) 在 35 ℃ 条件下, 新型合金钢材料的腐蚀电流随着 NaCl 浓度的升高而升高, 在 3.5% NaCl 条件下, 随着温度的升高而升高。

3) 新型合金钢材料在不同 NaCl 溶液浓度和温度条件下的当量折算系数见存在差异, 在 40 ℃、7% NaCl 溶液环境中的当量折算系数最大。说明在此环境条件下, 其腐蚀加速效果明显。

## 参考文献:

- [1] 李旭东, 穆志韬, 刘治国, 等. 预腐蚀铝合金材料裂纹萌生寿命评估[J]. 装备环境工程, 2012, 9(5): 24-28.  
LI Xu-dong, MU Zhi-tao, LIU Zhi-guo, et al. Evaluation of Fatigue Initial Life for Aluminum Alloy with Pre-corrosion[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(5): 24-28.
- [2] 孙辽, 姚卫星. LC4CS 铝合金预腐蚀形貌与剩余寿命评估[J]. 机械强度, 2014, 36(2): 273-279.  
SUN Liao, YAO Wei-xing. Corrosion Morphology and Residual Life Prediction of Corroded LC4CS Aluminum Alloy[J]. Journal of Mechanical Strength, 2014, 36(2): 273-279.
- [3] 刘治国, 穆志韬, 边若鹏. LD2 铝合金加速腐蚀坑演化的 ARIMA 模型研究[J]. 机械强度, 2012, 34(4): 608-614.  
LIU Zhi-guo, MU Zhi-tao, BIAN Ruo-peng. Study on Arima Model of LD2 Aluminum Alloy Accelerated Corrosion Pit Evolution[J]. Journal of Mechanical Strength, 2012, 34(4): 608-614.
- [4] 陈群志, 李喜明, 周希沅, 等. 飞机结构典型环境腐蚀当量关系研究[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 414-418.  
CHEN Qun-zhi, LI Xi-ming, ZHOU Xi-yuan, et al. Investigation of Corrosion Equivalent Relationships between the Accelerated Environment and the Typical Service Environments of Aircraft Structures[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1998, 19(4): 414-418.
- [5] 刘治国, 李旭东, 穆志韬. 基于腐蚀等级的航空铝合金腐蚀当量关系[J]. 腐蚀与防护, 2013, 34(5): 403-406.  
LIU Zhi-guo, LI Xu-dong, MU Zhi-tao. Equivalent Relation of Aero Aluminum Alloy Corrosion Based on Corrosion Grade[J]. Corrosion & Protection, 2013, 34(5): 403-406.
- [6] 刘元海, 任三元. 典型海洋大气环境当量加速试验环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 48-52.  
LIU Yuan-hai, REN San-yuan. Study on Equivalent Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Typical Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 48-52.
- [7] 刘海龙, 王克强, 唐琳皓, 等. 湿热和盐雾试验对航空装备腐蚀的对比解析[J]. 环境技术, 2019, 37(3): 146-150.  
LIU Hai-long, WANG Ke-qiang, TANG Lin-hao, et al. Comparison and Analysis on Corrosion of Aviation Equipment Between Humidity and Salt Fog Test[J]. Environmental Technology, 2019, 37(3): 146-150.
- [8] 刘成臣, 鲁国富, 张金奎, 等. 30CrMnSiA 合金钢当量加速腐蚀试验[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(4): 369-372.  
LIU Cheng-chen, LU Guo-fu, ZHANG Jin-kui, et al. Equivalent Accelerated Corrosion Test of 30CrMnSiA Alloy Steel[J]. Corrosion and Protection, 2015, 36(4): 369-372.
- [9] 柳文林, 徐可君, 段成美. 军用航空发动机的腐蚀及腐蚀控制[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2005, 17(2): 116-118.  
LIU Wen-lin, XUN Ke-jun, DUAN Cheng-mei. Corrosion and Corrosion Control for Aeroengine Used for Military Plane[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2005, 17(2): 116-118.
- [10] 隋育松, 杨英炎. 海上飞机发动机叶片的腐蚀失效与防护层[J]. 科技信息, 2007(18): 23-24.  
SUI Yu-song, YANG Ying-yan. Maritime Aircraft Engine Blade Corrosion Failure and Protective Layer[J]. Science & Technology Information, 2007(18): 23-24.
- [11] 马明昭, 郑震山. 海军航空发动机腐蚀防护与控制工程设计[J]. 航空维修工程, 2009, 4: 53-55.  
MA Ming-zhao, ZHENG Zhen-shan. Engineering Design Specifications of Corrosion Prevention and Control Used in Navy Aircraft Engine[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2009, 4: 53-55.
- [12] 周希沅. 飞机结构的当量环境谱与加速试验谱[J]. 航空学报, 1996, 17(5): 613-616.  
ZHOU Xi-yuan. Equity Environmental Spectrum and Speed Test Spectrum for Aircraft Structure[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 1996, 17(5): 613-616.

- [13] 刘治国, 贾明明, 王晓刚, 等. 某型复合材料加速腐蚀与大气腐蚀当量关系分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(1): 66-71.  
LIU Zhi-guo, JIA Ming-ming, WANG Xiao-gang, et al. Equivalent Relation between Accelerated Corrosion and Atmospheric Corrosion of Composite Material[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(1): 66-69.
- [14] 穆志韬. 海军飞机结构腐蚀损伤规律研究及使用寿命研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2002.  
MU Zhi-tao. Study on Naval Aircraft Structure Corrosion Damage Law and the Service Life[D]. Beijing: Beihang University, 2002.
- [15] 朱做涛. 基于腐蚀等级的直升机铝合金动部件寿命评定技术研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2011.  
ZHU Zuo-tao. Research of Helicopter Aluminum Alloy Parts Life Assessment Technology Based on Corrosion Grades[D]. Yantai: Naval Aeronautical University, 2011.