

# 钢和硬铝的加速腐蚀试验研究

李星<sup>1</sup>, 周人歌<sup>2</sup>, 陈津虎<sup>1</sup>, 朱曦全<sup>1</sup>

(1. 北京强度环境研究所 北京 100076; 2. 北京航天长征飞行器研究所 北京 100076)

**摘要:** 目的 研究45号钢和12号硬铝的温、湿度加速腐蚀情况。方法 在不同的温、湿度环境下开展45号钢和12号硬铝的加速腐蚀试验,并将不同条件下的试验结果进行对比。结果 得到了45号钢和12号硬铝的腐蚀速度与温、湿度条件的关系,获得了45号钢和12号硬铝分别在“40℃,RH为85%”和“70℃,RH为85%”2种温、湿度环境下的“腐蚀速度-时间”函数关系。结论 45号钢和12号硬铝在温、湿度环境下的加速因子与贮存时间呈逆幂率关系。

**关键词:** 钢; 铝; 温湿度环境; 加速腐蚀试验

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2013.06.002

**中图分类号:** TG172.3 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2013)06-0005-04

## Study on Accelerated Corrosion Testing of Steel and Duralumin

LI Xing<sup>1</sup>, ZHOU Ren-ge<sup>2</sup>, CHEN Jin-hu<sup>1</sup>, ZHU Xi-quan<sup>1</sup>

(1. Beijing Institute of Structural Strength and Environmental Engineering, Beijing 100076, China;

2. Beijing Institute of Space Long March Vehicle, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT: Objective** To discuss the accelerated corrosion of No.45 steel and No.12 duralumin based on different temperature-humidity environments. **Methods** Accelerated corrosion test of No.45 steel and No.12 duralumin was done under different temperature-humidity environments, and the test results based on different conditions were compared. **Results** The relationships between corrosion velocity and temperature-humidity environment of the two kinds of metal materials were obtained. Besides, the "corrosion-time" relationships of No.45 steel and No.12 duralumin under conditions of "40℃, 85%RH" and "70℃, 85%RH" were built. **Conclusion** The acceleration factor of No.45 steel and No.12 duralumin based on temperature-humidity environment and storage time fitted the anti-power law model.

**KEY WORDS:** steel; duralumin; temperature-humidity environment; accelerated corrosion test

钢和铝是许多产品结构件的基本金属材料,其在温、湿度环境下的腐蚀会造成结构件寿命的缩短,研究钢和铝在温、湿度环境下的腐蚀规律可以评价结构件的安全寿命。国内外学者对钢和铝在全球典

收稿日期: 2013-06-14; 修订日期: 2013-07-09

Received: 2013-06-14; Revised: 2013-07-09

作者简介: 李星(1982—),男,湖南衡阳人,硕士,工程师,主要研究方向为可靠性试验和加速贮存试验技术。

Biography: LI Xing(1982—), Male, from Hengyang, Hunan, Master, Engineer, Research focus: reliability test and accelerated storage test.

型大气环境下的腐蚀规律研究较多<sup>[1-2]</sup>。文献[3-4]研究了钢在氯化物污染环境下的大气腐蚀规律;文献[5]研究了桥梁耐候钢在海洋环境下的腐蚀规律;文献[6-8]研究了多种铝及其合金在干湿循环、海洋等大气环境下的腐蚀行为。这些研究结果可以用于评价一些结构件的使用寿命。大气暴露腐蚀试验是测定金属材料在大气环境下腐蚀性的一种较可靠的方法,试验结果较真实,但试验周期很长。几十年来,工程研究人员一直在努力研究实验室加速腐蚀试验方法。在实验室模拟典型大气加速腐蚀试验研究中,硫化物及氯化物是被研究得最多的大气腐蚀性物质<sup>[9-10]</sup>。对于航天产品,一般保存在防护良好的环境中,例如对温度和湿度控制严格的库房,基本接触不到大气环境中的酸性腐蚀性物质,在这些环境下对结构件腐蚀起作用的一般仅有温度和湿度。国内外对在仅有温度和湿度2种环境应力下金属材料的腐蚀规律研究较少,因此,有

必要开展温度和湿度环境应力下钢和铝的加速腐蚀试验研究。

文中对45号钢和12号硬铝(2A12)在温、湿度环境下的加速腐蚀试验进行了研究。通过试验给出了它们在不同温、湿度环境下的“腐蚀速度-时间”函数关系,得到了45号钢和12号硬铝在温、湿度环境下加速因子的求取方法,为开展由钢和铝等金属材料构成的航天产品结构件的贮存安全寿命评估提供了依据。

## 1 试验设计

### 1.1 试样

试样材料为45号钢和12号硬铝,2种材料的化学组成见表1。试样尺寸分别为:90 mm × 70 mm × 2 mm(45号钢)和90 mm × 70 mm × 4 mm(12号硬铝)。试样表面干净、平整。

表1 45号钢和12号硬铝的化学组成

Table 1 Chemical composition of No.45 steel and No.12 duralumin

45号钢	杂质	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	P	S
	质量分数/%	0.42~0.50	0.17~0.37	0.5~0.8	≤0.2	≤0.3	≤0.25	≤0.035	≤0.035
12号硬铝	杂质	Si	Fe	Cu	Mn	Mg			
	质量分数/%	<0.5	<0.5	3.8~4.9	0.3~0.9	1.2~1.8			

### 1.2 金属腐蚀试验的评定方法

金属材料的腐蚀可分为全面腐蚀与局部腐蚀2类,其中局部腐蚀又可以分为点蚀、缝隙腐蚀、电偶腐蚀和晶间腐蚀等<sup>[11]</sup>。对应不同的腐蚀类型有不同的腐蚀评定方法,45号钢和12号硬铝的温、湿度加速腐蚀试验可以用质量法来评定,公式为:

$$V = \frac{m_1 - m_0}{At} \quad (1)$$

式中:A是试样面积;t是试验时间; $m_0$ 是试样初始质量; $m_1$ 是腐蚀试验后带有腐蚀产物的试样质量;V是试样腐蚀速度, $g/(m^2 \cdot h)$ 。

## 2 温、湿度腐蚀规律

### 2.1 试验条件

试验取4个温度等级:40,50,60,70℃。每个温

度下又取4个相对湿度等级:80%,85%,90%,95%。温、湿度的组合共16组。

### 2.2 试验结果

取16组试样,每组试样包括3块钢板和3块铝板,分别放在16组不同的温、湿度条件下进行腐蚀试验,每组样本的测试间隔时间为24 h。通过试样的质量变化 $\Delta m$ (生锈的质量)来表征45号钢和12号硬铝的腐蚀程度。45号钢和12号硬铝在40~70℃下质量的平均增量随相对湿度的变化情况如图1和图2所示。

研究认为<sup>[12-14]</sup>,金属材料在自然环境下腐蚀所形成的锈层会阻碍氧气的进一步渗入,从而对腐蚀的加深具有一定的阻碍作用。对45号钢,一定湿度条件下,腐蚀量随温度的增加而增大;一定温度条件下,腐蚀量随湿度的增加先增大后减少;在试验条件“70℃,RH为85%”下的腐蚀量远大于其他试验条

件下的腐蚀量。

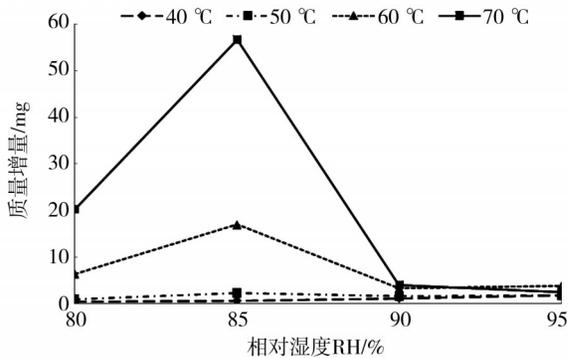


图1 45号钢在不同温、湿度条件下质量的平均增量曲线  
Fig. 1 Weight increase of No.45 steel under each temperature and humidity condition

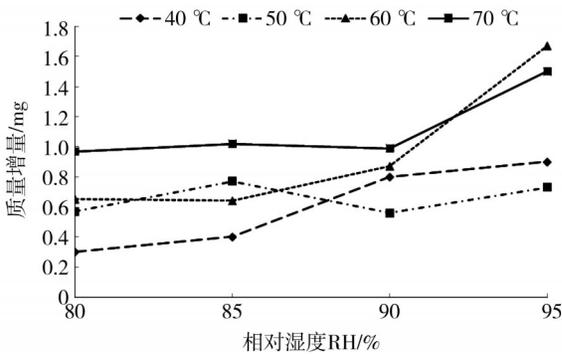


图2 12号硬铝在不同温、湿度条件下质量的平均增量曲线  
Fig. 2 Weight increase of No.12 aluminum under each temperature and humidity condition

### 3 加速因子的求取方法

#### 3.1 试验条件

对有较好防护措施的航天产品,一般其贮存温、湿度环境条件不高于“40℃,RH为85%”。为了评价45号钢和12号硬铝在此环境条件下的贮存寿命,设计的试验选取温、湿度条件为“70℃,RH为85%”,分别得到了45号钢和12号硬铝在2种温、湿度环境条件下的“腐蚀量-时间”函数关系,进而可以得到45号钢和12号硬铝在这2种温、湿度环境条件下的加速因子。

#### 3.2 试验结果

取2组试样,每组包括5块钢板和5块铝板。2组试样分别置于“40℃,RH为85%”和“70℃,RH为85%”的温、湿度条件下进行试验,试样的质量平均增量见表2和表3。

表2 45号钢的质量平均增量  
Table 2 Average weight increase of No.45 steel

试验条件	测量1	测量2	测量3	测量4	测量5
40℃,RH为85%	83.06	143.48	181.23	203.89	211.44
70℃,RH为85%	302.05	521.04	649.41	762.68	838.20

表3 12号硬铝的质量平均增量

Table 3 Average weight increase of No.12 duralumin

试验条件	测量1	测量2	测量3	测量4	测量5
40℃,RH为85%	43.15	64.73	64.73	79.11	86.30
70℃,RH为85%	57.53	100.69	122.26	143.84	158.22

根据表2和表3,可以得到2种试样单位面积的质量增量随时间的关系曲线,如图3所示。

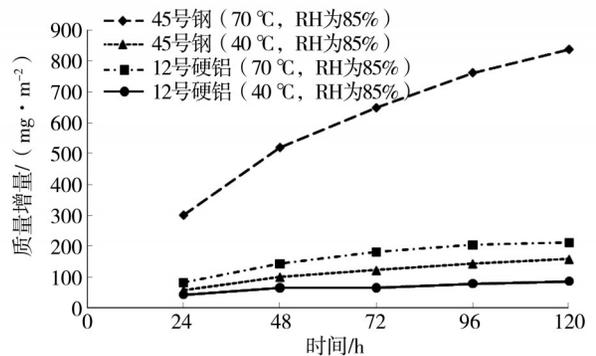


图3 45号钢和12号硬铝的质量增量与时间关系  
Fig. 3 Relationship between time and weight increase of No.45 steel and No.12 aluminum

文献[15]将金属的腐蚀发展用幂函数规律表征,金属材料的平均腐蚀质量增量与时间的关系可以采用如下回归公式:

$$\Delta W = kt^n \tag{2}$$

式中:  $\Delta W$ 是质量增量,  $g \cdot m^{-2}$ ;  $t$ 是时间;  $k, n$ 是与环境和材料有关的常数。

计算可以得到45号钢和12号硬铝2种金属材料在“40℃,RH为85%”和“70℃,RH为85%”2个温、湿度环境条件下的“腐蚀质量增量-时间”函数关系式。其中,对45号钢:在条件“40℃,RH为85%”下, $\Delta W=0.1749 \times t^{0.5999}$ ,相关系数 $r=0.981$ ;在条件“70℃,RH为85%”下, $\Delta W=0.5544 \times t^{0.6354}$ ,相关系数 $r=0.994$ 。对12号硬铝:在条件“40℃,RH为85%”下, $\Delta W=0.1681 \times t^{0.4097}$ ,相关系数 $r=0.974$ ;在条件“70℃,RH为85%”下, $\Delta W=0.115 \times t^{0.6257}$ ,相关系数 $r=0.992$ 。

若以 $\Delta W$ 增至某一临界值为金属材料腐蚀失效的判据,可以得到45号钢在“70℃,RH为85%”与“40℃,RH为85%”2个环境条件下的加速因子,结果如下:

$$AF_{45号钢} = \frac{t_{贮存}}{t_{加速}} = 6.146 \times t_{贮存}^{0.0559} \quad (3)$$

12号硬铝在“70℃,RH为85%”与“40℃,RH为85%”2种环境条件下的加速因子为:

$$AF_{12号硬铝} = \frac{t_{贮存}}{t_{加速}} = 0.545 \times t_{贮存}^{0.3452} \quad (4)$$

得到了加速因子的表达式,便可以在加速条件“70℃,RH为85%”下开展45号钢和12号硬铝的加速腐蚀试验,从而评估45号钢和12号硬铝在贮存条件“40℃,RH为85%”下的腐蚀寿命。

## 4 结语

研究得到了温、湿度环境对45号钢和12号硬铝的腐蚀效用,揭示了2种金属材料在温、湿度作用下的腐蚀规律,为其加速腐蚀试验提供了基础。另外,设计了45号钢和12号硬铝在2种特定温、湿度环境条件下的加速腐蚀试验,得到了材料的“腐蚀质量增量-时间”函数,从而获得了在这2种特定温、湿度环境条件下的加速因子,为45号钢和12号硬铝的加速腐蚀试验提供了方法。

### 参考文献:

- [1] SYED S. Atmospheric Corrosion of Carbon Steel at Marine Sites in Saudi Arabia[J]. *Material Corrosion*, 2010, 61(3): 238—244.
- [2] CASTAN O J G, BOTERO C A, RESTREPO A H, et al.

Atmospheric Corrosion of Carbon Steel in Colombia[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(1): 216—223.

- [3] WEI J, FU X X, DONG J H, et al. Corrosion Evolution of Reinforcing Steel in Concrete under Dry/Wet Cyclic Conditions Contaminated with Chloride[J]. *Journal of Materials Science and Technology*, 2012, 28(10): 905—912.
- [4] BHASKAR S, GETTU R, BHARATKUMAR B H, et al. Studies on Chloride Induced Corrosion of Reinforcing Steel in Cracked Concrete[J]. *Structural Durability and Health Monitoring*, 2011, 7(4): 231—251.
- [5] GAO Xing-liang, ZHU Miao-yong, FU Gui-qin, et al. Corrosion Behavior of Bridge Weathering Steels in Environment Containing Cl[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, 47(5): 520—527.
- [6] ZHANG Dan-feng, TAN Xiao-ming, CHEN Yue-liang. Distribution Rule of Corrosion Damage Morphology Parameters for Aluminum Alloy[C]// *Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics*, 2011: 358—361.(余不详)
- [7] 蔡健平, 范林. 7A04铝合金在周浸试验中的腐蚀行为研究[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(1): 53—69.
- CAI Jian-ping, FAN Lin. Study of 7A04 Aluminum Corrosion Behavior in Alternate Immersion Test[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2011, 8(1): 53—69.
- [8] 罗来正, 肖勇, 陈智君, 等. 航空用2D12铝合金在海洋大气环境中的腐蚀行为研究[J]. *装备环境工程*, 2012, 9(4): 39—51.
- LUO Lai-zheng, XIAO Yong, CHEN Zhi-jun, et al. Research on Corrosion Behavior of 2D12 Aluminum Alloy for Aircraft in Marine Atmospheric Environment[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2012, 9(4): 39—51.
- [9] FELIU S. The Prediction of Atmospheric Corrosion from Meteorological and Pollution Parameters[J]. *Corrosion Science*, 1993, 34(3): 403—414.
- [10] MA Y T, LI Y, WANG F H. Corrosion of Low Carbon Steel in Atmospheric Environment of Different Chloride Content[J]. *Corrosion Science*, 2009, 51(5): 997—1006.
- [11] 王玲, 宣卫芳, 牟献良. 2A11铝合金/碳钢偶接件在强化自然环境条件下的腐蚀特性[J]. *表面技术*, 2011, 40(5): 1—4.
- WANG Ling, XUAN Wei-fang, MU Xian-liang. Corrosion Performance of 2A11 Aluminum Alloy Coupled with Carbon

Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel in Seawater under Industrial Applications[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012.

[4] 侯健,王伟伟,邓春龙. 海水环境因素与材料腐蚀相关性研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 175—178.

HOU Jian, WANG Wei-wei, DENG Chun-long. Study on Relation between Environmental Factors and Corrosion in Seawater[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 175—178.

[5] 汪俊英,孔小东. 两种铝合金在3%NaCl溶液中的腐蚀特性[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2011, 23(1): 45—48.

WANG Jun-ying, KONG Xiao-dong. Electrochemical Corrosion Behavior of Two Al-based Alloys in 3%NaCl Solution [J]. Corrosion Science & Protection Technology, 2011, 23(1): 45—48.

[6] 王国凡,牛玉超,刘喜俊,等. 2Cr13Mn9Ni4 钢管硫腐蚀应

力腐蚀裂纹分析[J]. 表面技术, 2004, 33(4): 77—78.

WANG Guo-fan, NIU Yu-chao, LIU Xi-jun, et al. Analysis of Stress-corrosion Crack on 2Cr13Mn9Ni4 Steel Tube Induced by Sulphur Corrosion[J]. Surface Technology, 2004, 33(4): 77—78.

[7] 乔立杰. 应力腐蚀机理[M]. 北京: 科学技术出版社, 1993: 20—21.

QIAO Li-jie. Mechanism of Stress Corrosion[M]. Beijing: Science and Technology Press, 1993: 20—21.

[8] 邵暘洋,王斌,周冬梅. 316L 不锈钢在含氯离子乙二醇中的腐蚀行为[J]. 表面技术, 2011, 40(4): 45—47.

SHAO Yang-yang, WANG Bin, ZHOU Dong-mei. Corrosion Behavior of 316L Stainless Steel in High Chloride Ion Ethylene Glycol[J]. Surface Technology, 2011, 40(4): 45—47.



(上接第 8 页)

Steel in Accelerated Natural Environment Condition[J]. Surface Technology, 2011, 40(5): 1—4.

[12] 胡章枝,周学杰,吴军,等. Q235 碳钢在石化大气环境中初期腐蚀行为[J]. 装备环境工程, 2011, 8(3): 30—33.

HU Zhang-zhi, ZHOU Xue-jie, WU Jun, et al. Initial Corrosion Behavior of Carbon Steel Q235 in Petrochemical Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(3): 30—33.

[13] 郑利云,曹发和,刘文娟,等. Q235 碳钢在模拟自然环境下失效行为的电化学研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(4): 8—15.

ZHENG Li-yun, CAO Fa-he, LIU Wen-juan, et al. Corrosion Behavior of Q235 in Simulated Natural Environment by Electrochemical Technology[J]. Equipment Environmental

Engineering, 2011, 8(4): 8—15.

[14] 肖葵,董超芳,李晓刚,等. 碳钢和耐候钢加速腐蚀实验研究[J]. 装备环境工程, 2007, 4(3): 5—8.

XIAO Kui, DONG Chao-fang, LI Xiao-gang, et al. Study on Accelerated Corrosion Tests for Carbon Steels and Weathering Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(3): 5—8.

[15] 王刚,金平,谭晓明,等. 海洋环境下 7B04 铝合金腐蚀损伤演化规律研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(4): 338—342.

WANG Gang, JIN Ping, TAN Xiao-ming, et al. Research on Corrosion Damage Evolvement Rule of 7B04 Aluminum Alloy under Ocean Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(4): 338—342.