# AF1410高强度钢大气腐蚀试验研究

# 张兴华, 骆晨, 刘明, 孙志华, 陆峰, 汤智慧

(中国航空工业集团公司北京航空材料研究院,北京 100095)

摘要:目的研究AF1410高强度钢在北京地区大气环境中腐蚀特点和腐蚀规律。方法 通过 AF1410高强度钢的自然大气暴露试验,利用质量损失分析、断面分析、表面分析和电化学分析等方 法分析试样。结果 AF1410高强度钢在北京大气环境中腐蚀速率在腐蚀初期随腐蚀产物厚度的增 加而逐步减小;随着暴露时间的延长,腐蚀产物由于厚度增加,以及其它环境因素的综合作用,导 致其开裂直至脱落,腐蚀速率增加;之后又随腐蚀产物厚度增加,腐蚀速率减小。试样在暴露5年 后,腐蚀产物厚度增加,腐蚀开裂、脱落现象明显加重。结论 AF1410高强度钢在北京大气环境中 腐蚀速率呈现反复升降的过程。

关键词:大气腐蚀;高强钢;腐蚀行为

**DOI**: 10.7643/issn.1672-9242.2013.06.005

中图分类号: TG174.3 文献标识码: A

文章编号:1672-9242(2013)06-0019-04

## Atmospheric Exposure Test of AF1410 High-strength Steel

ZHANG Xing-hua, LUO Chen, LIU Ming, SUN Zhi-hua, LU Feng, TANG Zhi-hui (AVIC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the atmospheric corrosion characteristics and rules of AF1410 high-strength steel. **Methods** Through the study of natural atmospheric exposure test, the samples were analyzed using the weight loss analysis, image processing, section analysis, electrochemical methods and so on. **Results** The corrosion rate of AF1410 high-strength steel decreased as the thickness of corrosion products increased in the initial corrosion stage. As the exposure time increased, the internal stress of the rust layer increased because of the thickness of corrosion products increased at this point. Later the corrosion rate decreased with the increase in the thickness of the corrosion products. For the samples exposed

收稿日期: 2013-07-06; 修订日期: 2013-11-04

Received: 2013-07-06; Revised: 2013-11-04

作者简介: 张兴华(1985—),男,山西人,硕士,主要从事环境试验与观测、腐蚀检测等研究。

Biography: ZHANG Xing-hua(1985-), Male, from Shanxi, Master, Research focus: materials environmental test and corrosion test.

for 5 years, the thickness of corrosion products increased, and the phenomenon of corrosion cracking and local falling off increased. **Conclusion** The corrosion rate of AF1410 high–strength steel showed an undulation process. **KEY WORDS**: atmospheric corrosion; high–strength steel; corrosion behavior

超高强度钢是指屈服强度大于700 MPa,抗拉强 度大于1200 MPa的钢材。研究表明,美国20世纪80 年代研制的AF1410高强钢不仅具有高强度、高韧性 等优异的力学性能,同时还具有良好的焊接性能且 价格低,被广泛用于高性能航空结构材料领域<sup>III</sup>,用 于制造长寿命高强度结构件、轴类零件、紧固件、起 落架。该材料对腐蚀环境相当敏感,它的腐蚀性能 和规律直接关系到飞机的日历寿命<sup>II</sup>,因此有必要重 视其在实际大气环境中的腐蚀特点和腐蚀规律。

## 1 试验

### 1.1 试验材料与试样规格

试样采用AF1410高强度钢,其化学组成见表1, 规格为100 mm×50 mm×4.5 mm。

#### 表1 AF1410钢的化学成分及其质量分数

Table 1 Chemical composition of AF1410 alloy

成分 С Mn  $\operatorname{Si}$  $\mathbf{S}$ Р S+P  $\mathbf{Cr}$ 质量分数 0.15~0.19 ≤0.10 ≤0.10 ≤0.005 ≤0.008 ≤0.010 1.80~2.0 成分 Ni CoMo Ti Al 0 Ν 质量分数 9.50~10.50 13.50~14.50 0.90~1.10 ≤0.015 ≤0.015 ≤0.0020 ≤0.0015

#### 1.2 自然大气环境暴露试验

#### 1.2.1 试验环境特点

试验选在北京大气环境实验站进行。北京大气 环境试验站气温适中,日照辐射强度偏弱,具有典型 暖温带亚湿润内陆性气候特征<sup>13</sup>。

#### 1.2.2 试验条件和试验周期

试验方法参见 GB/T 14165—2008<sup>44</sup>的规定。试 验的检测周期为1,2,3,5年。每次取试样4件,进行 质量损失分析、形貌观测和成分测试。

## 1.3 试样检查与分析

#### 1.3.1 断面分析

制备腐蚀产物层的断面试样,用Quanta600型环境扫描电子显微镜和牛津EI350型能谱仪观察,并进行元素分析。

#### 1.3.2 外观检查与分析

外观检查包括目视检查和 Quanta600 型环境扫描电子显微镜观察试样表面,以及高像素单反相机拍摄试样的腐蚀宏观形貌。

## 1.3.3 质量损失分析

按照HB 5257—83<sup>15</sup>规定的方法进行。

#### 1.3.4 电化学阻抗分析

电化学阻抗谱用 PAR Potentiostat/Galvanostat M273A 恒电位仪进行测量,后用 ZSimpWin 对电化学 阻抗谱进行拟合分析<sup>16</sup>。

## 2 结果与讨论

## 2.1 腐蚀样品断面分析

图1展示了AF1410高强度钢在北京大气暴露 1,2,3,5年后的锈层断面形貌。由图1可知,在北京 大气暴露1年后,锈层较薄,且疏松多孔;2年后,锈 层变厚,内部出现裂纹;3年后,锈层变为很薄的较致 密层;5年后,锈层开裂明显加重。锈层断面形貌的 变化反映出锈层开始生长,内部有孔洞,后来随锈层 厚度增加,受内应力和各种环境因素影响,最终导致 外部锈层开裂、脱落。

表2显示了AF1410高强度钢暴露5年后锈层断面的元素组成。由表2可知,高强度钢的锈层基本上由Fe和O元素组成,说明腐蚀产物主要为铁的氧化物,相关数据说明锈层内部含氧量略低。由于长期暴露,锈层表面无法清除的积灰是造成含C的原

%

%



a 暴露1年后的锈层断面 b 暴露2年后的锈层断面



c 暴露3年后的锈层断面

d 暴露5年后的锈层断面

#### 图1 AF1410钢在北京大气暴露后的锈层断面

Fig.1 Corrosion fracture appearance of AF1410 steel after atmospheric exposure in Beijing

#### 表2 暴露5年的锈层(EDX)元素成分及含量

Table 2 Chemical composition of rust (EDX) after 5-year exposure

5年后锈层表面元素含量			5年后锈层内部元素含量			
元素	质量分数	原子分数	元素	质量分数	原子分数	
C K	2.14	5.11	O K	28.67	58.13	
0 K	34.72	62.31	SK	2.14	2.16	
S K	1.41	1.27	Cr K	0.54	0.34	
Ca K	0.28	0.20	Fe K	51.69	30.02	
Fe K	43.64	22.43	Co K	9.08	5.00	
Co K	11.38	5.55	Ni K	7.87	4.35	
Ni K	6.42	3.14				
总量	100.00	100.00	总量	100.00	100.00	

因之一,也是造成含氧量增加的原因之一。

## 2.2 腐蚀宏观形貌分析

对在北京大气环境中的AF1410高强度钢样品进行外观检查,腐蚀形貌照片如图2所示。由图2可知,AF1410高强度钢在腐蚀初期,锈层疏松,表面颜色较深;随暴露时间延长,锈层疏松层面积变小,颜

色变灰;暴露至3年,锈层又变平整;暴露至5年,锈 层颜色变深,表面粗糙度加大。一般认为,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为 黄褐色,Fe 的羟基化合物和Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>为黑褐色<sup>[7]</sup>。据此 判断,AF1410高强度钢腐蚀产物初期内部以Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>和  $\beta$ -FeOOH为主,结合层较致密,在阳光暴晒下逐渐 变为Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和 $\alpha$ -FeOOH,变得疏松<sup>[7]</sup>。结合图1说明, 锈层在达到一定厚度以后表面疏松层很容易产生脱 落现象。





Fig.2 Corrosion appearance of AF1410 high-strength steel after atmospheric exposure in Beijing

结合电镜形貌图(图3)可看出,腐蚀1年的试样 锈层表面开始有裂纹,随着腐蚀时间增加,裂纹逐步 增多,表面在腐蚀3年时变平整,5年后试样表面裂 纹扩大,腐蚀程度严重。



图 3 AF1410高强度钢在北京大气暴露后的表面形貌(SEM) Fig.3 SEM image of surface morphology of AF1410 high-strength steel after atmospheric exposure

## 2.3 腐蚀质量损失随时间的变化规律

图 4 是 AF1410 高强度钢在北京的大气腐蚀质 量损失数据曲线。对1,2,3,5年4个采样点的单位 面积腐蚀质量损失进行计算,从质量损失数据图的 变化趋势看,AF1410高强度钢腐蚀质量损失持续增 加,AF1410高强度钢表面连续腐蚀。根据数据变化 趋势看出,AF1410高强度钢在北京的大气环境中, 第1年腐蚀质量损失为84.8702 g/m<sup>2</sup>,第1年到第2年 腐蚀质量损失为41.801 g/m<sup>2</sup>,第2年到第3年腐蚀质 量损失为34.901 g/m<sup>2</sup>,第3年到第5年平均年腐蚀质 量损失为43.8014 g/m<sup>2</sup>。



图4 单位面积质量损失--时间函数关系曲线 Fig.4 relationship between weight loss and exposure time

腐蚀初期,由于锈层逐渐变厚、变致密,对钢基体的保护作用逐渐增强,造成腐蚀速率降低。在腐蚀2年到3年之间达到最慢。结合断面分析得知,随着腐蚀产物厚度增加,内应力变化、温度变化、雨水冲刷等因素导致锈层开裂,直至脱落,锈层的保护作用减弱,使得腐蚀速率在腐蚀3年时开始增加。3年

后,腐蚀产物继续增加,锈层又开始形成保护层。

#### 2.4 电化学交流阻抗分析

AF1410高强度钢模拟电路如图 5a 所示。图中 W<sub>1</sub>为 Warburg 阻抗; *R*<sub>2</sub>为锈层电阻; *R*<sub>3</sub>为溶液电阻; CPE<sub>1</sub>和 CPE<sub>2</sub>为常相位角元件。暴露 1,2,3,5 年的样 品锈层较为疏松,存在弥散效应,因此选用常相位角 元件。

由图 5b高频段得知,暴露1,2,3,5年的样品展现出的是压缩变形的容抗弧;由低频段可知,锈层样品在3.5%(质量分数)NaCl溶液中的电极反应受扩散过程控制。通过图 5b和5c以及表3带锈试样交流阻抗拟合后的数据结果中的R。值的大小可以看出,锈层电阻在3年时达到最小值,因为此时锈层最薄; 由R。可以看到电极阻力也是在3年时最小,锈层最薄,耐蚀性能最差。



# 表3 暴露不同时间的AF1410高强度钢拟合数据

Table 3 D	ata of AF1410	samples after	1, 2, 3 and 5	years of exposure
-----------	---------------	---------------	---------------	-------------------

腐蚀时间/a	$R_{ m s}/(\Omega \cdot { m cm}^2)$	$R_{\rm r}/(\Omega \cdot {\rm cm}^2)$	$CPE_1/(\Omega^{-1} \cdot cm^{-2})$	$n_1$	$R_{\rm c}/(\Omega\cdot{\rm cm}^2)$	$CPE_2/(\Omega^{-1} \cdot cm^{-2})$	$n_2$	$W_1$
1	0.01	48.5	1.71E-8	0.96	102.3	1.38E-3	0.22	1.24E-3
2	10	105.7	7.21E-8	0.85	218.8	1.20E-3	0.30	1.43E-3
3	0.01	31.6	1.94E-8	1	78.3	2.00E-3	0.26	1.67E-3
5	10	92.8	1.07E-7	0.83	162.7	3.57E-3	0.23	1.45E-3

## 3 结论

1)腐蚀初期,AF1410高强度钢在北京大气中的 腐蚀速率随着锈层厚度增加逐渐减小;在2年到3年 间,由于锈层的脱落,导致腐蚀速率增加;3年后,腐 蚀速率随锈层厚度增加而逐渐减小。

2)在北京大气暴露2年后,AF1410高强度钢样 品锈层厚度较大,且锈层底层较致密,因此锈层阻抗 (下转第28页)

(1):31-34.

Materials[J]. China Elastomerics, 2009, 19(4):60-63.

- [9] 易平,何建新,杨秀清,等.3种高分子材料自然环境多角度暴露对比试验[J].表面技术,2007,36(2):18—20.
  YI Ping, HE Jian-xin, YANG Xiu-qing, et al. Natural Environment Multi-angel Exposure Contrast Test about Three Kinds of Polymer Materials[J]. Surface Technology, 2007,36(2):18—20.
- [10] 杨晓然,张伦武,张勇智. 自然环境加速试验技术[J]. 装备环境工程,2004,1(4):7—11.
  YANG Xiao-ran, ZHANG Lun-wu, ZHANG Yong-zhi, et al. Natrual Accelerated Environmental Test Technology[J]. Equipment Environmental Engineering,2004,1(4):7—11.
- [11] YOUMANS R A, MAASSEN G C. Correlation of Room Temperature Shelf Aging with Accelerated Aging[J]. Industry Engneering & Chemistry, 1955, 40(7):487—194.
- [12] 化工部合成材料研究院.聚合物防老化实用手册[K].北京:化学工业出版社,1999:1—446.
  Ministry of Chemical Industry Institute of Materials.
  Practical Handbook of Polymer Aging[K]. Beijing: Chemical Industry Press, 1999:1—446.

(上接第22页)

最大,对基体保护效果最为明显;暴露3年后, AF1410高强度钢样品锈层虽然较致密,但是由于其 厚度较薄,锈层阻抗最低,因此最容易腐蚀。

3) AF1410高强度钢在北京大气环境中,锈层开始生长得较为致密;2年后随着锈层厚度增加,锈层内应力也增加,加上雨水冲刷、温度变化等因素,导致锈层开裂、脱落;随后锈层又开始继续生长加厚,锈层阻抗则随着锈层厚度的变化而变化,腐蚀速率呈现反复升降的过程。

#### 参考文献:

 [1] 郝雪龙,刘建华,李松海.中性盐雾预腐蚀对AF1410高强 度钢疲劳寿命的影响[J].航空材料学报,2010,30(1):
 67—71.

HAO Xue-long, LIU Jian-hua, LI Song-hai. Effect of Neutral Salt Spray Precorrosion on Fatigue Life of AF1410 Steel[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2010, 30(1): 67-71.

- [2] WEI R P. Corrosion and Corrosion Fatigue of Airframe Materials[R]. 2000.
- [3] 刘明,汤智慧,蔡健平.30CrMnSiA 高强度钢在北京地区

- [13] 陈经盛. 橡胶老化 防护与监测(一)[J]. 化工标准与质量监督,1996(1):31—34.
  CHEN Jing-sheng. Rubber Aging Protection and Monitoring (1)[J]. Chemical Standard and Quality Supervision, 1996
- [14] GB/T 7759—1996,硫化橡胶、热塑性橡胶 常温、高温和 低温下压缩永久变形测定[S].
   GB/T 7759—1996, Rubber, Vulcanized or Thermoplastic– Determination of Compression Set at Ambient Elevated or Low Temperature[S].
- [15] 张录平,李晖,庞明磊,等. 特种氟橡胶耐油介质老化性能研究[J]. 世界橡胶工业,2011,38(1):27—30.
  ZHANG Lu-ping, LI Hui, PANG Ming-lei, et al. Study on the Aging Properties of Special Fluoroelastomers in the Oil Medium[J]. World Rubber Industry, 2011,38(1):27—30.
- [16] 胡宽,宋笔峰,张琳,等. 基于加速老化试验的橡胶贮存 寿命预测[J]. 理化检验-物理分册,2008,44(1):17—20.
  HU Kuan, SONG Bi-feng, ZHANG Lin, et al. Rubber Storage Life Forecast Based on Accelerative Aging Test[J].
  PTCA(Part: A Phys Test), 2008,44(1):17—20.

的大气腐蚀研究[J].装备环境工程,2010,7(4):17-21.

LIU Ming, TANG Zhi-hui, CAI Jian-ping.Study on Atmospheric Corrosion of 30CrMnSiA High Strength Steel in Beijing Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010,7(4):17-21.

- [4] GB/T 14165—2008,金属和合金大气腐蚀试验现场试验 的一般要求[S].
   GB/T 14165—2008, The General Requirements of Outfield
- for Atmospheric Corrosion Testing of Metals And Alloys[S]. [5] HB 5257—83,腐蚀试验结果的重量损失测定和腐蚀产物的清除[S].

HB 5257—83, The Weight Loss of Corrosion Test Measured and Corrosion Products Removed[S].

[6] 曹楚南.腐蚀电化学原理[M].北京:化学工业出版社, 2008.

CAO Chu-nan. Principles of Electrochemistry of Corrosion [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.

[7] 张全成,吴建生,郑文龙. 耐候钢表面稳定锈层形成机理的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术,2001,13(3):143—146.
ZHANG Quan-cheng, WU Jian-sheng, ZHENG Wen-long. Formation Mechanism of Protective Rust on Weathering Steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2001,13(3):143—146.