

飞机结构铝合金材料腐蚀行为和腐蚀速率研究

穆志韬 金 平

(海军航空工程学院青岛分院 山东 青岛 266041)

摘要:本文针对海军飞机的使用腐蚀环境特点,对飞机结构高强度铝合金材料的腐蚀行为进行了研究,并用飞机大修时结构件在不同使用日历年限下的腐蚀损伤数据,建立了机场环境中腐蚀深度与飞机使用日历年限的函数关系,得到了机场环境条件下飞机结构铝合金材料的腐蚀扩展速率。

关键词:飞机结构;腐蚀;腐蚀损伤;最大腐蚀速率

STUDY OF CORROSION BEHAVIOR AND RATE OF ALUMINUM ALLOY FOR AIRCRAFT STRUCTURE

Mu Zhitao Jin Ping

(Naval Aeronautical Engineering Academy Qingdao Branch)

Abstract:The effect of corrosive environment on the service life of an aircraft structure has become a severe problem to the military aircrafts in our country at present and in the future. In this paper, According to the study on the service environment and the corrosion failure behavior for the major structural materials of the naval aircrafts, based on the maximum corrosion depth of the aircraft structure obtained in the regular maintenance, which led to a resolution about the statistical study of the maximum corrosion depth of the high strength aluminum alloy. The distribution functions for evaluating the maximum corrosion depth of aircraft structure were established. The results showed that the maximum corrosion depth for the high strength aluminum alloy in the service environment was in conformity to normal distribution. The functions, that between the maximum corrosion depth and the service years, had been established by using the corrosion data obtained from those aircrafts which were used in the coast area. According to the corrosion dynamics law obtained in this research, the corrosion rate of the structural materials were determined.

Key words:aircraft structure;corrosion;corrosion damage;maximum corrosion rate

1.引言

当飞机使用一定年限后,其结构件表面防腐涂层会逐渐变质,失去与基体表面的结合力而脱落,于是,构件就发生腐蚀。对海军现役机种主体结构的金属材料而言,腐蚀使得结构的强度和刚度受到严重的削弱。腐蚀的初期腐蚀部位不易探测到,而当腐蚀萌生后,若不加以控制,它将比疲劳损伤发展得更快、更严重。腐蚀的速率取决于许多因素,但主要取决于所采用的材料种类、飞机所处的环境和为延缓腐蚀过程所采取的防腐蚀措施等因素。

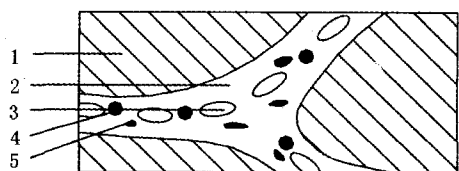
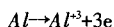
2.铝合金结构材料的腐蚀行为分析

海军机场的大气环境为海洋盐雾环境,含有 Cl^- 及 SO_4^{2-} 等腐蚀性粒子的存在,这种环境容易引起铝合金型材等承力结构件的腐蚀。(如图 1)



图 1 某型飞机翼梁缘条的剥蚀外貌特征

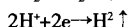
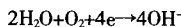
LY12CZ 铝合金在自然时效处理时,主要强化相 s 相 (Al_2CuMg)、 θ 相 ($CuAl_2$) 和少量 $MnAl_6$ 在晶界析出,晶界周围形成一个无沉淀带即贫铜区,如图 2 所示。晶界区成为一个多相体系,在含 Cl^- 离子的腐蚀介质中将发生选择性阳极溶解,产生晶间腐蚀及剥蚀。其中晶内基体和正电性的相(如 $CuAl_2$)作为阴极,而负电性的相如晶界贫铜区作为阳极,组成腐蚀微电池,并在大阴极小阳极情况下加速了阳极溶解,形成沿晶界的阳极溶解通道而发生晶间腐蚀。即腐蚀电池的阳极区主要发生金属铝的溶解,不断有溶解出来的 Al^{3+} 离子而转入电解质液膜中:



1—晶粒内部 2—晶界贫铜区 3— s 相 4— θ 相 5— $MnAl_6$

图 2 LY12CZ 热处理后的晶界区结构示意图

释放出的电子迁移到微电池的阴极区 ($CuAl_2$ 区),腐蚀电池的阳极区主要发生氧或氢离子的还原反应,即吸氧或析氢反应:



在腐蚀微电池电场力的作用下,腐蚀孔外的 Cl^- 等阴离子不断向蚀孔内迁移、富集,使得溶液的腐蚀性增强;腐蚀孔内金属 Al^{3+} 离子的浓度随腐蚀反应的进行而不断增加,并且发生水解反应:



反应的结果使蚀孔内 H^+ 离子浓度升高,溶液酸性增强,进一步加速蚀孔内金属铝的溶解。腐蚀孔口因阴极析氢反应而使阴极区溶液的 PH 值升高,形成的腐蚀产物(铝的氢氧化物及杂质)堵塞在孔口,阻碍了蚀孔内与孔外的离子扩散和腐蚀溶液对流,蚀孔内溶液得不到稀释形成“闭塞电池”^[1],使蚀孔内腐蚀过程成为一个自催化过程,持续不断地自发进行下去,在蚀孔坑内,腐蚀将优先沿晶界扩展,在晶界形成连续的阳极溶解通道,即发生晶间腐蚀。

铝合金型材在轧制、挤压或模锻加工时,使晶粒沿受力方向变形,成为平行于金属表面的扁平晶粒,具有高度方向性的组织结构,在构件中必然存在沿挤压或轧制方向的残余张应力,使腐蚀沿平行于型材表面的晶间发展。

另一方面,对腐蚀产物的分析表明,在腐蚀过程中生成的 $Al(OH)_3$ 这种不溶性的腐蚀产物,因为金属 Al 的原子量为 27,密度为 $2.7g/cm^3$; $Al(OH)_3$ 的原子量为 78,密度为 $2.42g/cm^3$,所以可以计算出由金属 Al 转化为 $Al(OH)_3$ 时,每消耗 1 体积的金属 Al ,就会产生 3.2 体积的 $Al(OH)_3$ 。由于生成的不溶性腐蚀产物的体积大于所消耗的金属的体积,从而产生“楔入效应”,形成晶界内张力,使被破坏了结合力的晶粒翘起,撑开了上面未被腐蚀的金属层,导致沿晶裂纹的形成和扩大,出现层片状的剥蚀外貌。

3.铝合金型材的腐蚀动力学函数及腐蚀速率

3.1 飞机结构铝合金材料的腐蚀损伤状况

选择构件为某飞机翼梁缘条(材料:LY12CZ+阳极化+H06-2),每架飞机的翼梁缘条热处理工艺、防护涂层一致,总体与局部腐蚀环境相同。由于飞机上很难得到同一个腐蚀部位随日历年限发展的变化数据,因此,把每架飞机在不同使用年限腐蚀大修时翼梁缘条的腐蚀损伤数据作为一个总体样本考虑。外场腐蚀检查得到的腐蚀损伤测量数据见表 1。

3.2 腐蚀损伤数据的统计处理

腐蚀数据样本服从什么分布规律与结构材料的腐蚀失效机理和失效模式有很大关系^[2]。根据表 1 中的腐蚀损伤数据,对日历年限为 6a、7a、8.5a、10a、12.5a 的腐蚀损伤数据分别进行分布规律拟合及检验,取检验水平 $\alpha=0.05$,用利尔福斯法检验证明,翼梁缘条腐蚀深度

(D)较好的符合正态分布规律^[4]。其拟合计算结果见表 2。

表 1 飞机铝合金翼梁缘条的日历年限(a)与腐蚀深度值(mm)统计

6a	7a	8.5a	10a	12.5a
1.7	0.8	0.9	1.8	1.1
0.6	1.2	1.9	1.7	0.8
0.3	0.7	2.1	1.5	2.0
0.6	1.1	2.2	1.8	1.9
1.3	1.7	1.4	1.0	1.7
0.4	1.9	1.6	1.6	3.0
1.5	1.3	2.0	1.4	1.8
0.9	2.4	2.4	1.3	1.6
0.3	1.6	1.2	0.6	1.8
0.2	1.4	2.9	2.6	2.9
0.4	0.9	2.0	2.4	3.0
.....
0.6	0.8	0.6	1.2	0.9
1.2	1.0	1.0	0.8	1.2
0.4	1.6	0.9	1.9	2.8
0.7	0.6	0.8	2.4	2.3
0.8	0.9	1.8	3.0	3.1
0.7	1.0	1.9	3.0	2.7

表 2 不同日历使用年限时腐蚀损伤数据的正态检验拟合结果

日历年限/a	拟合方程	相关系数/R	统计量计算值/D ₀	统计量临界值/D _α
6	Z = 68.099 · D - 6.872	0.9870	0.1317	0.2183
7	Z = 51.971 · D - 18.375	0.9918	0.0910	0.2342
8.5	Z = 41.818 · D - 17.859	0.9833	0.1373	0.2804
10	Z = 36.721 · D - 20.869	0.9963	0.0839	0.2417
12.5	Z = 33.988 · D - 19.336	0.9917	0.1047	0.2417

根据翼梁缘条腐蚀数据的拟合结果，飞机使用 6a、7a、8.5a、10a、12.5a 后，其腐蚀损伤深度(D)较好的服从正态分布规律。即 $D \sim (\mu_1, \sigma_1^2)$ 。故可计算推断出飞机使用到 6a、7a、8.5a、10a、12.5a 时的最大腐蚀损伤尺寸见表 3。

表 3 不同日历使用年限腐蚀部位深度统计推断结果

使用年限 Y/a	腐蚀深度 D/mm (置信条件 50%)	腐蚀深度 D/mm (置信条件 95%)	变异系数 C	方差 σ
6	0.84	1.52	0.4947	0.4131
7	1.32	2.21	0.4124	0.5426
8.5	1.62	2.72	0.4092	0.6640
10	1.93	3.20	0.3993	0.7707
12.5	2.04	3.41	0.4062	0.8286

3.3 腐蚀损伤的动力学速率函数

对表 3 中不同日历年限下推断出的腐蚀深度(D)进行拟合分析。通过拟合对比计算，腐蚀深度与飞机使用年限的自然对数 $\ln(Y)$ 线性

关系最佳， $D \sim \ln(Y)$ 拟合的曲线相关系数 $R=0.9730$ 。腐蚀深度(D)与飞机使用年限的自然对数 $\ln(Y)$ 拟合的关系图见图 3。拟合得到的铝合金翼梁型材腐蚀发展的动力学速率函数如下：

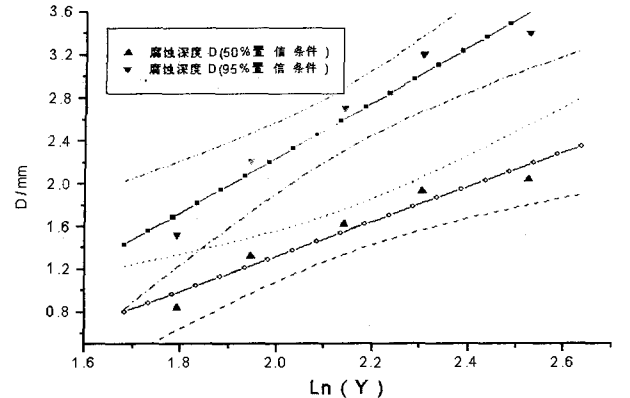
$$\begin{cases} D=2.58 \cdot \ln(Y)-2.915 & (95\% \text{ 置信条件}) \\ D=1.632 \cdot \ln(Y)-1.947 & (50\% \text{ 置信条件}) \end{cases}$$


图 3 飞机结构铝合金型材腐蚀深度与使用年限关系曲线

由图 3 及拟合得到的腐蚀动力学速率函数可知，铝合金翼梁缘条腐蚀坑深度随飞机服役年限的增加而增大，且具有线性关系较好的半自然对数关系。当然，腐蚀速率函数是在真实的环境条件下飞机结构件的腐蚀测量数据拟合得到的，该式包括有一定的涂层防护失效期(防护漆层失效)，一般认为基体材料表面开始腐蚀发生时的腐蚀面积为零^[4]，根据机场腐蚀统计的数据来看，飞机使用 4~5 年后结构型材表明防护涂层部分开始失效，基体材料开始出现点状腐蚀，因此，拟合得到的腐蚀动力学速率函数在使用时应考虑结构防护体系的有效寿命期。

4. 结论
- (1) 高强度铝合金型材构件机场环境中随飞机服役年限的增加，在经历点蚀、晶间腐蚀、剥蚀其发展历程后，腐蚀损伤深度较好的服从正态分布规律。
- (2) 通过对飞机铝合金构件腐蚀损伤数据的拟合分析，得到了高强度铝合金型材在机场环境中的腐蚀动力学速率函数。即腐蚀深度与飞机服役使用年限的自然对数呈线性关系。
- (3) 利用本文拟合得到腐蚀损伤动力学速率函数可预测飞机结构的腐蚀损伤随服役年限的发展状况，但要考虑铝合金结构件的防护体系有效寿命期。

参考文献

[1] 穆志韬. 军用飞机的腐蚀检测及监控技术[J]. 航空工程与维修, 2002(1):38.

[2] A.K.Sheikh and J.K.Boah, Statistical Modeling of Pitting Corrosion and Pipeline Reliability[J]. Corrosion, 1990,46(3):190-197.

[3] 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):14-16.

[4] 谢伟杰, 李获. LY12CZ 和 7075T7351 铝合金在 EXCO 溶液中腐蚀动力学的统计研究[J]. 航空学报, 1999,20(1):34-38.

[5] 张福洋. 金属机件腐蚀日历寿命的计算模型和确定方法[J]. 航空学报, 1999,20(1):75.

参考文献

[1] 张岱年, 程宜山著. 中国文化与文化论争. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.

[2] 张立文等主编. 传统文化与现代化. 北京: 中国人民大学出版社, 1987.

[3] 杨叔子等编. 中国大学人文启思录. 武昌: 华中理工大学出版社, 1996.

[4] 张岂之著. 应当着力提高大学教师的人文素养. 中国高等教育, 2000(4).

[5] 杨叔子著. 科学与人文: 融则利离则弊. 中国高等教育, 2000(7).

(上接第 183 页)格境界。

中国传统文化是我们从前人那继承下来，又必须由我们转给后人的文化遗产。它不应也决不能埋没断送在我们手里，我们现在所做的工作也不能只是简单的传递，而应将其深入发掘、系统整理并使其发扬光大，这正是我们这一代人的使命。对青年一代大学生进行中国传统文化教育，正是我们的使命使然；学生作为中国龙的传人，接受了解中国传统文化则是他们的责任和义务。因此对大学生系统开设传统文化课，已经是当前摆在我们面前十分紧迫的课题。