

军队“2110工程”系列教材

军用飞机的 腐蚀与防护

JunYong
FeiJi de
FuShi yu FangHu

汪定江 潘庆军 夏成宝 著

JunYong FeiJi
de FuShi yu FangHu

航空工业出版社

军队“2110 工程”系列教材

军用飞机的腐蚀与防护

汪定江 潘庆军 夏成宝 著

航空工业出版社

内 容 提 要

本书重点阐述了军用飞机腐蚀机理及防护技术。主要包括:金属腐蚀的机理、军用飞机腐蚀分类及主要特点、军用飞机腐蚀的检查方法、军用飞机常用材料的腐蚀特性、军用飞机涡喷发动机的高温腐蚀与防护、军用飞机电子设备的腐蚀与防护、军用飞机表面的防腐蚀涂层系统、预防军用飞机腐蚀的外场维护方法、军用飞机腐蚀的修复等,并给出了大量可供部队借鉴的飞机腐蚀与防护实例。

本书力求突出军用飞机特色,力求理论联系实际,体系新,内容全面、实用,由浅入深,重点突出。

本书不仅可作为军队院校相关专业的教材和参考书,同时可供部队和地方从事飞机设计、制造及维修的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

军用飞机的腐蚀与防护/汪定江,潘庆军著. —北京:
航空工业出版社, 2006. 5
ISBN 7-80183-784-3

I. 军... II. ①汪...②潘... III. 军用飞机—防腐
IV. V271.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第088680号

军用飞机的腐蚀与防护 Junyong Feiji de Fushi yu Fanghu

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话: 010-64919539 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2006年5月第1版

2006年5月第1次印刷

开本: 787×1092 1/16

印张: 10

字数: 249千字

印数: 1—2000

定价: 20.00元

序

腐蚀是一种自然现象，它遍及国民经济和国防建设的各个领域，给人类带来巨大的损失。资料表明，每年因腐蚀造成的经济损失占世界生产总值的2%~4%，我国每年因腐蚀造成的经济损失至少也要高达200亿人民币。腐蚀给航空领域带来的损失也相当惊人，在世界范围内，因腐蚀问题造成的飞行事故屡屡发生，这不仅直接影响到飞机的飞行安全，影响军用飞机的战斗力，还给飞机机务维修工作带来沉重负担，同时还带来巨大的维修费用，降低了飞机的服役期限。

发达国家的空军和民用航空公司对飞机腐蚀问题早已相当重视，花费了大量的人力和物力进行研究，总结出了很多经验和教训，编写出版了不少资料、手册和规范。但我军对飞机腐蚀问题的研究起步较晚，重视不够，飞机的腐蚀问题频频发生，直接影响了飞机的完好率。为了保证我军各类飞机结构的完整性、可靠性、安全性，为了提高我军飞机的完好率和战斗力，我们必须高度重视飞机腐蚀的防护工作，加强飞机腐蚀防护技术的研究，将飞机腐蚀防护工作科学化、规范化、制度化、系统化，使我军飞机腐蚀的防护工作尽快与国际接轨，为建设创新型国家做贡献。

《军用飞机的腐蚀与防护》一书的出版，为我们了解军用飞机腐蚀、控制飞机腐蚀提供了很好的帮助。作为国内第一本介绍军用飞机腐蚀与防护的专著，本书不仅比较系统地介绍了军用飞机腐蚀的机理、腐蚀的类型、影响腐蚀的因素、产生腐蚀的表面特征、军用飞机常用材料的腐蚀特性、航空涡喷发动机的高温腐蚀、军用飞机电子设备的腐蚀，而且还重点介绍了军用飞机腐蚀的检查方法、军用飞机表面的防腐蚀涂层系统、预防军用飞机腐蚀的外场维护方法、军用飞机腐蚀的修复等内容。

本书内容丰富，素材翔实，层次分明，颇具特色。可作为从事军用飞机设计、制造和维修的工程技术人员参考书，也可供大专院校相关专业的师生参考。

我相信，本书的出版对于我军飞机腐蚀控制与防护工作将起到积极的推动作用。

中国工程院院士

徐德士

2006. 5

目 录

第 1 章 金属腐蚀的机理	(1)
1.1 金属腐蚀的定义	(1)
1.2 研究军用飞机腐蚀及防护的重要性	(1)
1.3 金属化学腐蚀和电化学腐蚀	(2)
1.4 金属电化学腐蚀的原理	(3)
1.5 电极电位和腐蚀倾向	(6)
1.6 军用飞机的腐蚀环境	(8)
第 2 章 军用飞机腐蚀的分类及主要特点	(11)
2.1 均匀腐蚀	(11)
2.2 电偶腐蚀	(11)
2.3 牺牲性腐蚀	(12)
2.4 缝隙腐蚀	(12)
2.5 小孔腐蚀	(13)
2.6 丝状腐蚀	(14)
2.7 剥蚀	(15)
2.8 应力腐蚀开裂	(15)
2.9 微生物腐蚀	(20)
2.10 磨蚀(磨振腐蚀)	(20)
2.11 冲蚀	(20)
2.12 水银腐蚀	(21)
2.13 军用飞机结构腐蚀实例分析	(21)
第 3 章 军用飞机腐蚀的检查方法	(26)
3.1 飞机腐蚀的重点检查部位	(26)
3.2 腐蚀的检查方法	(27)
第 4 章 军用飞机常用材料的腐蚀特性	(47)
4.1 概述	(47)
4.2 金属材料的腐蚀特性	(48)
4.3 非金属材料的腐蚀特性	(82)

第5章 军用飞机涡喷发动机的高温腐蚀与防护	(89)
5.1 影响高温腐蚀的因素	(89)
5.2 高温氧化腐蚀	(91)
5.3 高温热腐蚀	(94)
5.4 防护措施	(97)
第6章 军用飞机电子设备的腐蚀与防护	(100)
6.1 概述	(100)
6.2 军用飞机电子设备腐蚀的环境条件	(100)
6.3 军用飞机电子设备腐蚀的控制与防护	(102)
第7章 军用飞机表面的防腐蚀涂层系统	(105)
7.1 军用飞机防腐蚀涂层系统的主要作用	(105)
7.2 军用飞机防腐蚀涂料的要求和主要品种	(106)
7.3 军用飞机整机的防腐蚀涂装	(109)
7.4 军用飞机镁合金零件的防腐蚀涂装	(120)
7.5 军用飞机机载设备的防腐蚀涂装	(125)
7.6 军用飞机涂层的去除与返修	(126)
第8章 预防军用飞机腐蚀的外场维护方法	(132)
8.1 定期冲洗去除飞机表面的污染物	(132)
8.2 确保飞机排水、防潮和通风良好	(134)
8.3 保持飞机涂层和密封剂的完整	(134)
8.4 加强润滑	(135)
8.5 保持飞机表面光洁	(135)
8.6 去除整体油箱中微生物沉积物	(136)
第9章 军用飞机腐蚀损伤的修复	(138)
9.1 军用飞机腐蚀损伤修复的原则	(138)
9.2 军用飞机腐蚀损伤修复的一般工作程序	(140)
9.3 某型轰炸机腐蚀损伤修复的工艺规程	(147)
参考文献	(151)

第1章 金属腐蚀的机理

1.1 金属腐蚀的定义

由于金属具有很多优异的特性,如较高的强度、可塑性、耐磨性、导热性、导电性以及良好的加工成形性能,因此,尽管在非金属材料异军突起的今天,金属材料仍不失为当代各领域应用中应用最广泛的一种重要工程材料,特别是现代军用飞机和其他武器装备主要由各种金属材料制造。

大家知道,除了极少数的贵金属,绝大多数金属在通常条件下都会遭受到不同程度的变质或损坏。为了延长金属构件的使用寿命,创造更大的经济效益和军事效益,在结构材料的各种破坏形式中,腐蚀问题越来越引起人们的重视。“腐蚀”这个术语起源于拉丁文“correre”,意思是“损坏、腐烂”,关于腐蚀的定义许多著名学者都有自己的表述,下面是人们从不同的角度出发对金属腐蚀冠以的各种定义:

金属在周围介质的作用下被氧化成金属阳离子的过程;

金属在周围介质的作用下所发生的化学作用或电化学作用;

金属在周围介质的作用下发生化学作用或电化学作用而引起的破坏;

金属在周围介质的作用下失去电子的过程。

综合起来看,比较确切的定义应当是上面第三条所述。在这里需要强调以下两点:

(1) 金属或合金的腐蚀主要是由于电化学或化学的作用引起的破坏,有时还伴有机械、物理或生物的作用。例如应力腐蚀开裂就是应力和化学物质共同作用的结果。严格说来,所有的疲劳都属于腐蚀疲劳,因为这种破坏绝非在真空中进行。

(2) 有人习惯地将金属的腐蚀狭义地理解为“生锈”,这是不妥当的。“生锈”这个俗语常用于描述铁及铁基合金以水合氧化铁为主要腐蚀产物时的腐蚀现象,但非铁基金属受腐蚀并不生锈,往往形成可溶的金属氧化物、氢氧化物或较复杂的配合物。

20世纪50年代以前,腐蚀的定义只局限于金属,随着科学技术的不断发展和进步,非金属材料在国防、工农业、宇航等许多领域中日益得到广泛应用,由于这种材料在工作环境苛刻时,同样出现了许多腐蚀现象,有些甚至很严重,因而目前对“腐蚀”的定义就不只局限于金属了,但本章仅讨论金属腐蚀的有关理论和问题。

1.2 研究军用飞机腐蚀及防护的重要性

军用飞机使用的特殊性在于要确保飞机的战斗力、可靠性、安全性和经济性。平时若不对腐蚀的征兆进行及时的检查并采取积极的维修措施,“防患于未然”,轻者停飞待修,重者由于突发事故还会带来惨痛的损失甚至造成机毁人亡,严重降低部队战斗力,这种损失是难以用经济损失来估量的。例如:

1983年一架美国F-18飞机,由于不锈钢油管接头发生晶间腐蚀,造成飞机坠毁的恶性事故;

1980 年一架前苏联苏-27 机飞机, 由于机身腐蚀引起结构破坏导致机毁人亡;

1981 年一架波音 737-200 飞机, 由于机身腐蚀引起结构破坏导致机毁人亡;

1999 年一架波音 747 客机, 因发动机涡轮盘腐蚀而降低了抗疲劳性能, 引起了断裂, 击穿发动机着火, 导致机毁人亡。

我军的某型飞机由于设计时考虑防腐蚀因素不全面, 采取的防腐蚀措施不当, 在飞机大批量装备部队后, 发生了机群性的腐蚀问题, 造成了大量飞机因为腐蚀问题而不得不停飞待修, 直接影响了战斗力。

国内外大量事实证明, 飞机的腐蚀问题比疲劳问题更为严重, 因腐蚀问题造成的飞行事故频频发生, 不仅直接影响到了飞行安全, 还给部队机务维修工作带来了沉重的负担, 同时还带来维修费用的提高和飞机服役期限的降低。美国空军每年用于与腐蚀有关的检查、维修的费用占总维修费用的 25%, 我军的有关费用也是十分可观的。

在实际情况下, 致使飞机腐蚀的频繁发生, 主要有以下几个原因:

(1) 腐蚀是一个缓慢的自发过程, 往往不为人们所重视。

(2) 部队对飞机腐蚀防护的意义、重要性和控制要领不了解、不掌握或不重视, 简单地认为腐蚀就是钢铁生锈。

(3) 不注意将实践中存在的飞机腐蚀问题及时反馈给飞机设计制造部门。

(4) 飞机腐蚀的防护与控制是一个系统工程。其设计、选材、加工、装配、使用、维护等方面的任何一个不合理因素都是造成腐蚀的原因。

(5) 飞机使用和维护过程中很难避免的人为因素造成对飞机防护层或材料的表面损伤。

(6) 实际存在的腐蚀程度并不是都可以预测出来的。

至于飞机机载电子产品等的腐蚀因其具有独特之处, 就更不为人们所注意, 因腐蚀问题而导致的重大事故和损失经常让人们始料不及。

腐蚀和疲劳是造成军用飞机和民用飞机结构破坏的两大重要因素, 如前所说, 纯粹的疲劳破坏是没有的, 大多是在周围介质影响下的腐蚀疲劳。著名专家 B. Cohen 指出“最大限度地减少腐蚀和它对飞机结构和零件的有害作用, 是今天空军面临的主要问题之一”。

为了控制飞机的腐蚀, 降低飞机维修费用, 提高安全可靠, 延长使用周期, 许多国家投入了大量人力物力进行研究。例如, 美国空军每年投入的经费高达 30 亿美元, 仅美国洛克希德公司用于腐蚀与防护方面的研究费用每年大约为数百万美元。在我国, 腐蚀对军机和民航领域所造成的危害正在被愈来愈多的人所认识, 腐蚀在军事上、经济上、安全上, 甚至政治上的影响和带来的损失常常给人们敲响警钟。随着我军老龄飞机的日益增多及国外先进飞机的不断引入, 研究飞机的腐蚀和行之有效的腐蚀防护技术就显得越发重要了。

1.3 金属化学腐蚀和电化学腐蚀

在大气、水溶液和许多腐蚀介质中, 绝大多数金属及其合金在热力学上是不稳定的, 有自发腐蚀的倾向, 腐蚀的结果是金属原子从金属晶体点阵中转变为离子状态。按照这种转变过程的性质不同, 可将金属腐蚀分为化学腐蚀和电化学腐蚀两类。

1.3.1 化学腐蚀

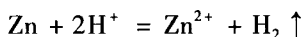
金属和非电解质(如酒精、石油)或干燥的气体相互作用产生的腐蚀属于化学腐蚀, 它

的特点是化学作用过程中没有腐蚀电流产生。最重要的化学腐蚀形式是金属的气体腐蚀,即金属与活性气态介质(二氧化硫、硫化氢、卤素、水蒸气和二氧化碳等)在高温时的化学作用。飞机结构中的许多重要零件由于气体腐蚀而遭到严重的破坏。例如,飞机喷气发动机的燃烧室、导向叶片、涡轮叶片等。飞机整体油箱的微生物腐蚀可视为化学腐蚀(若燃油中不含水)。

1.3.2 电化学腐蚀

电化学腐蚀是金属在导电的液体(电解质溶液)中由于电化学作用而导致的腐蚀。其特点是在腐蚀过程中有腐蚀电流产生。大气腐蚀、海水腐蚀、土壤腐蚀等都属于电化学腐蚀。

需要指出的是:在实际应用中,有时很难把化学腐蚀和电化学腐蚀严格地区分开来。例如,铁在水蒸气中一般发生电化学腐蚀,但在高温时却转化为化学腐蚀,而且很难确定温度的转换界限。又如,锌在稀盐酸中的溶解过程是个腐蚀进行的过程,腐蚀过程中既有电化学作用又有化学作用。电化学腐蚀是最常见的腐蚀形式,以锌在稀盐酸中的腐蚀为例,将一粒工业粗锌投入稀盐酸中,可明显观察到有大量氢气放出。锌溶解并产生氯化锌溶液,其离子反应方程式为:

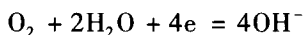


上式可分为两个反应:



铁和铝投入到稀盐酸中,也会发生类似的反应。这些产生氢气的电化学腐蚀称为析氢腐蚀,它常发生在酸洗或用酸浸蚀某种较活泼金属的加工过程中。当钢铁制件暴露于潮湿空气中时,由于表面的吸附作用,就使钢铁表面覆盖一层极薄的水膜。在工业发达地区的空气中含有大量的二氧化碳、二氧化硫等酸性气体(例如,一个十万千瓦火力发电站,每昼夜从烟囱中排放出的二氧化硫就有10t之多。上海地区二氧化硫污染较严重,空气中的含量达 $0.02 \sim 0.04 \text{mg/m}^3$ 。这些气体溶于水膜中,离解出氢离子,可能发生析氢腐蚀。

在中性或碱性溶液中,其阴极反应为:



因为阴极发生吸氧作用,所以称为吸氧腐蚀。由于任何水溶液与空气接触就能产生上述阴极反应,所以大多数金属都可能产生吸氧腐蚀,甚至在酸性较强的溶液中,金属发生析氢腐蚀的同时,也有吸氧腐蚀的产生。

1.4 金属电化学腐蚀的原理

1.4.1 电极电位

金属是一种特殊的晶体,其中总是含有一定数量的金属阳离子和自由电子。当把一种较活泼的金属,如镍,浸入到镍盐溶液中时,由于 Ni^{2+} 在溶液中的能级比在金属晶体中的能级低,因此金属镍中的 Ni^{2+} 将从金属转入溶液中,而电子仍然留在金属上,这个过程称为金属镍的水化溶解(氧化)过程。另一方面,与 Ni^{2+} 不断脱离金属表面进入溶液中的同时,溶液中的 Ni^{2+} 也有可能再沉积到金属表面上,这个过程称为沉积结晶(还原)过程。溶解过程和沉积结晶过程是同时进行的。随着时间的推移,水化溶解速度不断下降,而沉积结晶速度在不断上升,最后可达到一个状态:正逆两过程的速度相等。这时,在金属表面附近

的溶液中，维持着一定数量的 Ni^{2+} ，而在金属镍表面上，则保留着相应数量的自由电子（见图 1-1 (a)）。金属镍表面带负电，溶液带正电，这两种相反的电荷构成的整体，就叫做双电层，双电层在宏观上能反映出一个稳定的电位差，这个电位差就叫做金属镍的电极电位。

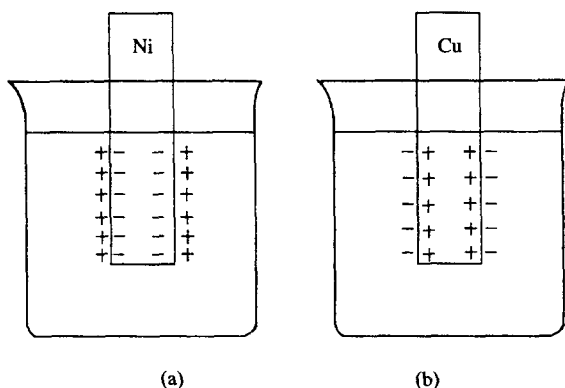


图 1-1 双电层简单示意图

另外还有一种情况，把一种较不活泼的金属，如铜，浸入到铜盐水溶液中时，由于 Cu^{2+} 在金属上的能级反而比在溶液中低，即它存在于金属上比在溶液中更稳定些。溶液中的 Cu^{2+} 会自发地沉积到金属铜上，当然金属铜的溶解过程也在同时进行着。在某一状态下，当这两个相反的过程速度达到相等时，就形成了与金属镍电荷符号相反的双电层（见图 1-1 (b)）。

4

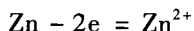
1.4.2 腐蚀电池和微电池

金属在电解质溶液中的电化学腐蚀，是由于腐蚀电池和微电池的作用而引起的。

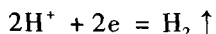
1.4.2.1 腐蚀电池

前面已经讲过，将单个金属放在金属盐溶液中以后，就会产生电极电位，由于金属本性不同，各种金属的电极电位也不同。

如果把两种电极电位不同的金属同时放在同一种电解液中，并把它们用导线连接起来，便组成了一个腐蚀原电池。例如，把铜和锌同时放在稀硫酸中，由于金属锌的电极电位较负，所以发生氧化反应



而铜电极由于电极电位较正，在稀硫酸中发生还原反应，溶液中的 H^+ 与从锌电极中流过来的电子相结合，生成氢气



由于锌的氧化反应不断进行，电子不断从锌电极流向铜电极，而电子在铜电极上被氢离子的还原所消耗，于是整个电池就构成了一个回路，回路中的电子流动就会使电极电位较负的金属锌不断溶解而进入溶液，即金属锌遭到了腐蚀。其原理见图 1-2。

在电化学中，把发生氧化反应的电极叫做阳极，而把发生还原反应的电极叫做阴极，阳极被腐蚀，阴极被保护。前面已经介绍过，由于阴极反应的不同，主要有

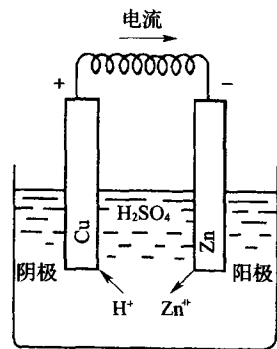
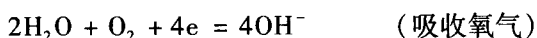


图 1-2 铜—锌腐蚀电池



两类,因而分别称为析氢腐蚀和吸氧腐蚀,一般钢铁在大气中的腐蚀主要是吸氧腐蚀。

实际上,在电解液中的两种金属,不一定非要有导线连接才能组成腐蚀电池,两种金属直接接触也能组成腐蚀电池。例如,在大气条件下,铜与铁直接接触,如果在它们的表面上凝聚了一层水膜,也就组成了一个腐蚀电池,如图1-3所示。

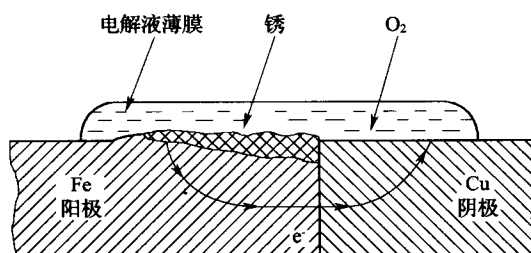
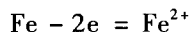
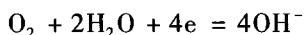


图1-3 铜与铁直接接触组成的腐蚀电池

在该腐蚀电池中,铁电极电位较负为阳极,发生氧化反应



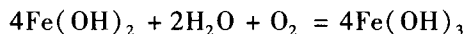
而铜的电极电位较正为阴极,存在于水膜中的氧吸收由阳极流过来的电子,发生还原反应



阳极反应生成的 Fe^{2+} 离子与阴极反应生成的 OH^- 离子在水膜中相遇,产生 $\text{Fe}(\text{OH})_2$,附着在铁的表面上,铁很快被腐蚀,其反应过程如下



$\text{Fe}(\text{OH})_2$ 在空气中被氧化为 $\text{Fe}(\text{OH})_3$



$\text{Fe}(\text{OH})_3$ 脱水后生成红褐色的 Fe_2O_3 , Fe_2O_3 是铁锈的主要成分。

在该腐蚀电池中,电子不是通过导线传递,而是通过铁和铜直接接触(短路连接)来传送电子的,结果使金属铁遭到腐蚀。在自然界中,由不同金属直接接触的构件在海水、大气或酸、碱、盐水溶液中所发生的接触腐蚀,就是由于这种腐蚀电池作用而产生的,由这种形式产生的腐蚀往往称为电偶腐蚀。

上面所谈到的腐蚀电池又叫做宏观腐蚀电池。分析宏观腐蚀电池的工作原理,我们可以归纳出,电池要连续工作,必须满足以下三个条件:

- (1) 不同的金属之间要存在电位差;
- (2) 具有不同电位的金属要相互接触;
- (3) 相互接触的金属共存于电解液中。

这三个条件是造成电化学腐蚀的充分必要条件,缺一不可。

军用飞机上常见的腐蚀介质有:

- (1) 酸碱性物质。如清洗剂、清洁剂、脱漆剂、腐蚀产物去除剂、腐蚀抑制剂、酸性和碱性蓄电池的电解液等。
- (2) 盐。如沿海和近海区域的大气中含有较高的盐分。

- (3) 大气。特别是工业污染大气，因为含有许多污染性气体和尘埃。
- (4) 水。大部分水溶液都会导致对飞机金属结构的腐蚀，即使是天然水也是如此。

1.4.2.2 腐蚀微电池

实际上，有许多金属在大气和海水等介质中，不与其他金属接触也会发生腐蚀，这是由于腐蚀微电池作用而引起的。

在上节中所谈到的有关粗锌溶于稀盐酸一例就是腐蚀微电池的作用结果。粗锌中基体为锌，同时含有一些电极电位比锌高的杂质相，又共存于稀盐酸电解液中，满足了几个组成腐蚀原电池的条件，于是就组成了腐蚀电池。这种腐蚀电池与前面所讲的宏观腐蚀电池的区别，仅仅在于阴极和阳极非常细小，因此，把这种腐蚀电池称为腐蚀微电池，或简称微电池。粗锌在稀盐酸中的溶解是由于无数个腐蚀微电池作用的总结果（如图 1-4 所示）。

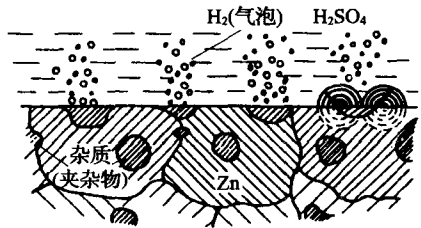


图 1-4 腐蚀微电池示意图

1.5 电极电位和腐蚀倾向

在上节中介绍了电极电位的概念，金属与它的离子活度为 1 的溶液接触时的平衡电极电位称作该金属的标准电极电位。将各种金属的标准电极电位按照其代数值增大的顺序排列起来，就叫做标准电位序，或简称为电化序，如表 1-1 所示。

表 1-1 在 25℃的水溶液中，某些金属和气体电极反应的标准电极电位（电化序）

电极反应	标准电极电位 / V	电极反应	标准电极电位 / V
$\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}$	3.02	$\text{In} \rightarrow \text{In}^{3+} + 3\text{e}$	0.34
$\text{Cs} \rightarrow \text{Cs}^+ + \text{e}$	-3.02	$\text{Tl} \rightarrow \text{Tl}^+ + \text{e}$	-0.336
$\text{Rb} \rightarrow \text{Rb}^+ + \text{e}$	-2.99	$\text{Co} \rightarrow \text{Co}^{2+} + 2\text{e}$	-0.227
$\text{K} \rightarrow \text{K}^+ + \text{e}$	-2.92	$\text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+} + 2\text{e}$	-0.25
$\text{Sr} \rightarrow \text{Sr}^{2+} + 2\text{e}$	-2.89	$\text{Sn} \rightarrow \text{Sn}^{2+} + 2\text{e}$	-0.136
$\text{Ca} \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{e}$	-2.87	$\text{Pb} \rightarrow \text{Pb}^{2+} + 2\text{e}$	-0.126
$\text{Na} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{e}$	-2.71	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{3+} + 3\text{e}$	-0.036
$\text{La} \rightarrow \text{La}^{3+} + 3\text{e}$	-2.37	$\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}$	0.000
$\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}$	-2.34	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}$	0.345
$\text{Ti} \rightarrow \text{Ti}^{2+} + 2\text{e}$	-1.75	$4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}$	0.401
$\text{Be} \rightarrow \text{Be}^{2+} + 2\text{e}$	-1.70	$\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^+ + \text{e}$	0.522
$\text{Al} \rightarrow \text{Al}^{3+} + 3\text{e}$	-1.670	$2\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}$	0.798
$\text{Mn} \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{e}$	-1.05	$\text{Ag} \rightarrow \text{Ag}^+ + \text{e}$	0.799
$\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}$	-0.762	$\text{Pd} \rightarrow \text{Pd}^{2+} + 2\text{e}$	0.83
$\text{Cr} \rightarrow \text{Cr}^{3+} + 3\text{e}$	-0.71	$\text{Hg} \rightarrow \text{Hg}_2^{2+} + 2\text{e}$	0.854
$\text{Ga} \rightarrow \text{Ga}^{3+} + 3\text{e}$	-0.52	$\text{Pt} \rightarrow \text{Pt}^{2+} + 2\text{e}$	1.2
$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$	-0.44	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^{3+} + 3\text{e}$	1.42
$\text{Cd} \rightarrow \text{Cd}^{2+} + 2\text{e}$	-0.40	$\text{Au} \rightarrow \text{Au}^+ + \text{e}$	1.68

上述的电化序，指出了在一定条件下金属活泼的次序。标准电极电位负值大的金属，比较容易失去电子进行氧化反应，是比较活泼的金属，容易发生腐蚀，反之则不易发生腐蚀。因此，可以利用电化序大体来判断金属腐蚀的热力学可能性，而且在许多情况下是可以得到正确的结果的。但是在有些情况下，当外部条件变化时，金属的电极电位也会随之而改变，在不同的介质条件下，金属电极电位的次序也会发生一些变化。

例如， Al/Al^{3+} 电极的标准电位是 -1.67V ， Zn/Zn^{2+} 电极的标准电位 -0.76V ，按电化序来推测，锌—铝电偶中的铝应遭到加速腐蚀，锌得到保护。但在大多数实际环境中，其结果完全相反，遭到加速腐蚀的不是铝而是锌。要解释这种腐蚀倾向，需要用到电偶序的概念。

金属在给定环境中测得的真实电位，称为腐蚀电位。由于金属的成分、表面状态及实际环境千差万别。腐蚀电位变化很大。因此，腐蚀电位不可能像标准电极电位那样，是一个不变的常数。按腐蚀电位大小排列的顺序表称为电偶序。由于金属在不同的电解质中有不同的腐蚀电位，因此不同环境中的电偶序也不相同。在各种电解质中，人们对金属在海水中的电偶序进行过大量的研究，例如，某些金属在 3% NaCl 溶液中的电偶序如表 1-2 所示。

表 1-2 某些金属在 3% NaCl 溶液中的电偶序

金属	稳定电位 / V	金属	稳定电位 / V
镁	-1.6	锡	-0.25
锰	-0.91	铋	-0.18
锌	-0.83	锑	-0.09
铝	-0.60	镍	-0.02
镉	-0.52	铜	0.05
铁	-0.50	银	0.20
钴	-0.45	铬	0.23
铅	-0.26		

要比较准确地判断金属在某种介质中腐蚀的热力学可能性，还是应该用电偶序来进行判断。例如上面提到的关于锌—铝电偶的极性问题。在海水中，铝的腐蚀电位约为 -0.6V ，锌的电位约为 -0.8V ，所以在该电偶中，锌是阳极，从而腐蚀加速了。

在绝大多数情况下，电偶序中位置相距越远的不同金属相互接触，发生电偶腐蚀的可能性越大，而相距越近的不同金属相互接触，发生电偶腐蚀的倾向性越小。从这个角度看来，要减缓腐蚀原电池的电动势，应尽量使电偶对（阳极和阴极）在电偶序中的位置相距越近越好。

我们知道，合金（或粗金属）的耐蚀性不如纯金属，这是由于当两个以上晶体共同存在时，在晶体间产生电位层。当晶体间的（腐蚀）电位差较大时，电位相对较低的一方就更容易遭受到加速腐蚀。如：铜—锌系合金往往产生脱锌现象；碳钢的含碳量越多，则越容易生锈；在铝合金上滚轧一层纯铝（包铝）可以提高其防腐蚀性能，其原因多在于此。表 1-3 列出了一些相容的金属组别。

表 1-3 可相容的金属组别

第一组	第二组	第三组	第四组
镁和合金	铝和合金	锌	铜和合金
铝 5052、5056、 5356、6061、6063	锌	镉	镍和合金
锡	镉	钢	铬
	锡	铅	不锈钢
	不锈钢	锡	金
	锡—铅焊料	不锈钢	银
		镍和合金	
		锡—铅焊料	

这里需要提及的是：把某一电位差值（例如 0.25V）定作为抑制电偶腐蚀的安全界限的提法是不妥当的。例如，在海水中，铝和不锈钢的电位差大于铝和铜的电位差，但不锈钢对铝的加速腐蚀却小于铜对铝的加速腐蚀。在一定环境中，电极电位只能决定电偶电流的方向，而其大小不仅仅由电位差来决定，还取决于电极的极化、电阻和阴阳极的面积比等因素。

1.6 军用飞机的腐蚀环境

8

1.6.1 腐蚀环境的概念

军用飞机在加工、装配、运输、飞行、停飞和修理中的任何一个环节都可能发生腐蚀。我们将整架飞机在各个环节中可能遭到的腐蚀环境条件，总称为腐蚀环境。

1.6.2 环境及其腐蚀作用

上面已经谈到总体腐蚀环境条件贯穿于多种连续环节之中。如果在某一环节发生问题，例如：选材不当，采取了不恰当的生产工艺，不恰当的保护涂层（或涂层由于本身的老化和外界条件的侵蚀而变质），不恰当的装配及维修，缺乏腐蚀控制措施等，都将会给腐蚀的产生创造条件。

从设计的观点看来，飞机制造过程中采用的材料和制造工艺对于结构件的耐久性起到重要的作用。在腐蚀的总体环境中，有许多环节是可以通过人为因素而得到控制的，而飞机在服役过程中（包括在机场的起落与停放）遇到的总体环境条件则不以人们的意志为转移。如在航空母舰上和近海位置边，在充满盐雾的大气环境或处于重工业区被严重污染的大气环境中飞行等等。

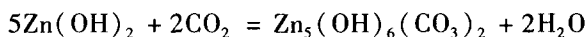
随着不同机型可能遇到的总体环境的不同，检查和腐蚀防护的周期就要随之而改变。以下是应予以考虑的一些总体腐蚀环境因素。

(1) 飞机在高速飞行中遭到的恶劣的气候条件

这里包括起飞和降落时遇到的砂土、灰尘的高速冲刷（很大的雨量和冰雹也可能破坏保护层）；由于气动摩擦所产生的气动力热（致使机身温度增高很快，当 $Ma = 2.7$ 时，温度将高达 204℃）等。

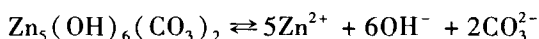
(2) 盐雾 (或盐水)

海水是含有一定盐分的强电解质溶液, 沿海和近海地域的大气中含有大量的盐分, 这是不言而喻的, 在沿海的机场氯离子可能达到 $0.02 \sim 0.2 \text{ ppm}$ 。在潮湿的含盐大气中, 很多金属都会遭到严重的腐蚀。例如, 目前飞机零件所采用的镀锌防蚀层在一般大气中有很好的抗蚀性, 但在盐雾环境下则差。其原因是: 锌在大气中的吸氧腐蚀产物主要是 $\text{Zn}(\text{OH})_2$, 它与空气中的 CO_2 进行反应, 生成碱式碳酸锌:



碱式碳酸锌可形成一种具有较高化学稳定性的致密的覆盖层, 使金属锌与外界隔离, 从而对基体金属起到了很好的保护作用。

但碱式碳酸锌的溶解反应为:



在潮润的含盐大气条件下, 除了加速碱式碳酸锌的溶解外, 生成的氯化锌容易溶解且使溶液的导电能力大大提高, 从而促使覆盖层的溶解, 加速锌的腐蚀。

这里还需强调, 盐雾或盐水对金属带来严重的腐蚀, 还与它的特殊作用有关。 Cl^- 离子的半径小, 穿透力强, 极易穿透溶液破坏金属表面的钝化膜 (钝化膜的修复较困难), 从而加速了金属的溶解。

此外, 在一些工艺或维修过程中, 稍有不慎, 也会带来 Cl^- 离子的污染。如: 用出汗的手接触工件的加工表面; 热处理后, 对残盐洗涤不干净等。

(3) 工业污染

在工业大气中含有许多腐蚀性气体, 如 H_2S 、 NH_3 、 Cl_2 和 HCl 等, 其最有危害的是 SO_2 和 H_2S 。它们可以直接参加阴极反应, 使阴极反应加快, 同时又可使金属表面的钝化膜溶解, 使阳极反应易于进行, 从而加快了飞机大气腐蚀的速率。 SO_2 对铁、锌、镉、铝、镍和铜等有加速腐蚀的作用。 H_2S 除了在潮湿大气中加速铜、镍、铁和镁的腐蚀外, 即使在比较干燥的大气中, 也会引起银、铜及铜合金的变色。

工业大气中经常含有砂土、煤烟和煤灰、金属氧化物和盐类的颗粒, 这些灰尘颗粒落在飞机金属表面上会加速腐蚀。这是因为: 这些颗粒可造成毛细凝聚的核心, 加速形成水膜, 从而对 SO_2 等有害气体的吸附作用增强。当颗粒比较大时, 还会与金属表面形成缝隙, 造成缝隙腐蚀。同时, 由于在有些颗粒占据的位置上, 氧气很难到达, 像不锈钢等依靠氧气保持钝态的金属, 这时就不容易保持钝态。

(4) 大气相对湿度

相对湿度表示大气的潮湿程度, 一般来说, 相对湿度越大, 则越可能形成水膜, 水膜保持的时间也越长, 因此大气腐蚀越易发生。严格说来, 对于不同的金属, 只有超过某一相对湿度时, 才会发生比较明显的大气腐蚀, 这一相对湿度叫临界相对湿度。临界相对湿度的大小与金属的本性、表面状态、腐蚀产物的吸水性以及空气的污染程度等因素有关。一般地说, 钢铁生锈的临界相对湿度大约为 75%。我国长江流域及东南沿海地区, 雨量多, 降雨时间长, 全年平均相对湿度大。如福州全年平均相对湿度为 81%, 广州为 78%, 武汉为 76%。同时沿海地区还受台风影响, 将大量海水带到沿海大陆空气中, 加速了金属零件的腐蚀过程。因此, 沿海地带服役的飞机腐蚀比较严重。

(5) 温度

环境温度和温度变化也是影响飞机腐蚀的重要因素。因为它影响着空气的相对湿度, 影

响着金属表面水膜的凝聚,影响着凝聚水膜中腐蚀性气体和盐类的溶解,影响着水膜的电阻以及腐蚀电池中阴、阳极反应过程的快慢。温度的影响一般要和湿度条件综合起来考虑。当湿度低于金属的临界相对湿度时,温度对腐蚀的影响很小,此时无论气温多高,金属也几乎不腐蚀。而当相对湿度在临界相对湿度以上时,温度的影响就会相应地增大。所以在雨季或湿热带,温度越高,生锈越严重,热带雨造成一个促进腐蚀的热、湿气候。在低温下高湿问题比较少,而理想状态是低温并有低的相对湿度。温度的变化还表现在凝露现象上。飞机停放机场白天和晚上的温度变化,飞行时高空和地面的循环温差,都会造成凝露。

(6) 飞行高度

飞机在较低高度上飞行比在较高高度上飞行受到大气中污染物的影响明显加剧。

(7) 航程

飞机的频繁起落要比长距离飞行遭受到更为不利的腐蚀条件。

(8) 跑道状况

在砂地、泥土或草地跑道上(或在用氯化钠进行过除冰处理的跑道上)起降的飞机将处于严重的腐蚀环境之中。

(9) 燃料、液压油、冷却剂、密封剂以及油类氧化产物和燃烧产物

这些物质含有对金属不利的化学成分,飞机长期与其接触,会遭受到不同程度的侵蚀。

(10) 电池液、材料经化学处理后没有及时清洗干净的残留酸或碱等

这些酸、碱性物质和含盐物质及污染性气体对飞机都会带来腐蚀。

(11) 非金属材料(含油漆)挥发出的气氛

如聚氯乙烯释放出的氯化氢、酚醛树脂漆等释放出的甲酸、乙酸等,均为有害气体。