

■ 国家科技支撑计划课题资助



铝合金结构

腐蚀损伤研究与评价

吕胜利 张有宏 吕国志 著

西北工业大学出版社

国家科技支撑计划课题资助

铝合金结构腐蚀损伤研究与评价

吕胜利 张有宏 吕国志 著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是关于铝合金结构腐蚀损伤研究的专著,涉及材料、结构、腐蚀和疲劳等专业知识。全书共分7章,内容包括铝合金腐蚀损伤的实验模拟及对疲劳寿命影响的观测、航空铝合金腐蚀损伤评价标准及形貌研究、试件腐蚀损伤的演化规律及剩余强度分析、点蚀损伤的计算机模拟、LY12CZ含紧固孔构件腐蚀疲劳裂纹扩展研究及分析、广布腐蚀损伤分析模型、全寿命腐蚀损伤监控与管理體系等部分。

本书介绍的研究成果可用于老龄飞机结构剩余强度和剩余寿命评估、飞机机体日历寿命的评定、在役飞机的寿命管理和维修以及新型飞机的设计。本书也可作为工程结构设计、维护等领域的工程设计人员、科研人员和管理人员的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

铝合金结构腐蚀损伤研究与评价/吕胜利,张有宏,吕国志著.
西安:西北工业大学出版社,2009.2

ISBN 978-7-5612-2533-2

I. 铝… II. ①吕…②张…③吕… III. 铝合金—腐蚀—损伤—研究 IV. TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 034826 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029) 88493811 88491757

网 址:www.nwpu.edu.cn

印刷者:陕西向阳印务有限责任公司

开 本:850 mm×1 168 mm 1/32

印 张:12.125

字 数:306 千字

版 次:2009 年 2 月第 1 版 2009 年 2 月第 1 次印刷

定 价:25.00 元

前 言

腐蚀是飞机结构的一种主要损伤形式,它不仅使结构的剩余强度降低,甚至影响飞机结构的完整性,威胁飞行安全从而造成飞行故障和灾难。例如,1981年,台湾一架波音747客机因机身下部结构腐蚀,蒙皮变薄,产生孔洞和裂纹,在压力作用下导致在空中解体;还有,1988年美国 Aloha 航空公司的一架波音737客机的空中事故。这些事故的发生引起了人们对受腐蚀损伤影响的老龄飞机飞行安全的极大关注。尤其在沿海地区服役的老龄飞行器,机体结构腐蚀更为严重。开展对机体结构腐蚀损伤的研究对于老龄飞机的定寿、延寿十分重要,而且对于新型飞机的设计、技术改进和寿命管理也有很重要的指导意义。

机体结构腐蚀损伤是影响老龄飞行器疲劳寿命的主要因素,因此对采用何种指标来评估腐蚀损伤对机体结构剩余强度和剩余寿命的影响显得更为重要和迫切。通过现场调研发现,在老龄飞机结构上,主要存在剥蚀和坑蚀两种腐蚀形式,其中,坑蚀一般表现为由金属表面向厚度方向深入发展的一种局部破坏形式。这种腐蚀危害性大,部位一般难以预测,易形成腐蚀疲劳裂纹源,成为降低飞机结构剩余强度的一个主要因素,从而也成为腐蚀损伤结构分析中的热点。在对腐蚀环境下的老龄飞机进行常规检测时发现,结构面上存在大量随机分布的腐蚀坑,不论从位置上还是空间尺寸上一般都无序可寻,这样就为对受坑蚀损伤结构进行可靠性分析带来了新的困难。

针对以上问题,作者进行了十余年的研究,主要集中在以下几个方面:

- (1) 铝合金腐蚀损伤的实验模拟及对其影响疲劳寿命的观测;
- (2) 航空铝合金结构腐蚀损伤评价标准及形貌研究;
- (3) 试件腐蚀损伤的演化规律及剩余强度分析;
- (4) 点蚀损伤的计算机模拟;
- (5) LY12CZ 含紧固孔构件腐蚀疲劳裂纹扩展研究及分析;
- (6) 广布腐蚀损伤分析模型;
- (7) 全寿命腐蚀损伤监控与管理体糸。

本书对作者十多年来的研究成果进行了总结,并综合了国家科技支撑计划重点项目“海洋工程结构浪花飞溅区腐蚀控制技术及应用”的课题六“海洋工程结构腐蚀损伤数据库与数字仿真系统(2007BAB27B06)”的部分研究成果。

全书由吕胜利承担主要的撰写工作,其中第3~6章及附录由吕胜利、吕国志撰写,第1、2、7章由张有宏撰写。参加本书研究工作的还有任克亮、陈跃良、王慧、石伯妹、李仲、沈海军、张伟、安国锋等研究生。

本书介绍的研究成果可用于老龄飞机结构剩余强度和剩余寿命评估、飞机机体日历寿命的评定、在役飞机的寿命管理和维修,以及新型飞机的设计。本书也可作为工程结构设计、维护等领域的工程设计人员、科研人员和管理人员的参考资料。

作 者

2009 年 1 月

目 录

第 1 章 铝合金腐蚀损伤的实验模拟及其疲劳寿命影响的观测	1
1.1 引言	1
1.2 试验介绍	9
1.3 试验设计.....	10
1.4 试验结果及讨论.....	19
1.5 试验数据处理及结果分析.....	26
1.6 本章小结.....	37
参考文献	37
第 2 章 航空铝合金腐蚀损伤评价标准及形貌研究	39
2.1 腐蚀试验及腐蚀损伤数据的获取.....	39
2.2 腐蚀损伤形貌演化分析.....	40
2.3 腐蚀损伤评价指标研究.....	44
2.4 不同环境下 LY12CZ 铝合金表面腐蚀损伤演化观测	47
2.5 腐蚀评价指标中的损伤度和深度与寿命之间的关系	77
2.6 有限元分析.....	78
2.7 本章小结.....	84
参考文献	84

第 3 章 试件腐蚀损伤的演化规律及剩余强度分析	86
3.1 腐蚀损伤对结构寿命的影响	86
3.2 腐蚀损伤对结构寿命影响的研究进展	91
3.3 腐蚀坑的试验观测	95
3.4 腐蚀坑引起结构失效的全过程	106
3.5 坑蚀影响下的剩余强度分析	115
3.6 本章小结	125
参考文献	125
第 4 章 点蚀损伤的计算机模拟	127
4.1 引言	127
4.2 元胞自动机法	137
4.3 金属腐蚀的物理模型	142
4.4 金属腐蚀的元胞自动机模型	143
4.5 模拟结果	150
4.6 点蚀萌生的模拟	162
4.7 本章小结	165
参考文献	166
第 5 章 LY12CZ 含紧固孔构件腐蚀疲劳裂纹扩展研究及分析	
.....	169
5.1 腐蚀疲劳机理及对机体结构寿命的影响	169
5.2 腐蚀疲劳试验	181
5.3 腐蚀疲劳裂纹的虚拟扩展方法研究	192
5.4 腐蚀疲劳作用下紧固孔构件剩余强度	201
5.5 本章小结	203
参考文献	204

第 1 章 铝合金腐蚀损伤的实验模拟及对其疲劳寿命影响的观测

1.1 引言

金属材料在使用过程中,由于受周围环境的影响,会遭受到不同形式的损伤,其中腐蚀是较为常见的一种损伤形式。腐蚀是指材料在周围环境的作用下引起的破坏或变质。对于金属腐蚀来说,腐蚀可具体定义为金属与周围环境(介质)之间发生化学或电化学反应而引起的破坏或变质^[1]。

金属腐蚀现象遍及国民经济和国防建设各个领域,危害十分严重。首先,腐蚀会造成重大的直接或者间接的经济损失。据美国 2000 年公布的调查结果,腐蚀引起的损失约占其国民经济总产值的 4.7%。我国 2002 年由于腐蚀引起的损失约为 4 000 亿元。其次,腐蚀也是飞机结构的一种主要损伤形式,随着服役年限的增加,飞机结构受环境腐蚀的问题日益突出,已成为当前世界各国军用和民用飞机所面临的严峻问题^[2]。用于飞机结构修理的费用十分昂贵,而通常用于腐蚀检查和修理的费用大约占飞机总维护 / 修理费用的 1/4^[3]。此外,飞机在服役过程中,由于所处环境和飞行强度的不同会产生不同程度的损伤,由这些腐蚀损伤引起的结构失效事故是屡见不鲜的。1981 年,台湾一架波音 747 客机因机身下部结构腐蚀,蒙皮变薄,产生孔洞和裂纹,在压力作用下导致在空中解体。1988 年 4 月, Aloha 航空公司一架波音 737 客机因腐蚀疲劳

导致飞行中机身壁板脱落。2000年5月27日,台湾华航一架波音747客机执行最后一次航班任务从台湾飞往香港进行大修,由于金属腐蚀疲劳造成尾翼裂纹,飞机坠入南中国海,225人丧生^[3]。与民用飞机相比,军用飞机飞行强度要低很多,特别是对于我国军用飞机来说,服役的绝大部分时间处于停放状态,因此地面停放环境的腐蚀作用更为严重。苏联安—24飞机在远未达到设计寿命时,机身壁板因腐蚀严重,被迫在大修中更换。我国一批杜—4飞机因结构严重腐蚀,提前1000多飞行小时退役。我国的运七飞机在湖北使用7年后,机身下蒙皮出现了面积 $(250 \times 70) \text{ mm}^2$ 、深2.8 mm的腐蚀区。轰×飞机是腐蚀最为严重的机种之一,1994年的统计资料表明,结构件腐蚀严重的飞机约占80%。2001年,我空军部门发现了207架歼×飞机42框下半框腹板腐蚀断裂问题,并陆续发现多架歼×系列飞机在该部位存在不同程度的腐蚀裂纹,有的机种腐蚀深度甚至达到了4 mm,造成了大量飞机停飞甚至提前退役,严重影响了部队战斗力。大量的飞机失效、破坏、灾难的实例表明,腐蚀是造成机体损伤破坏的极其重要的一个原因。

环境腐蚀已经对飞机安全使用及军用机的战斗力发挥构成了严重的威胁。腐蚀损伤会引起机体结构材料的断裂韧性降低,加快裂纹的形成与扩展,从而严重降低飞机结构的剩余强度和寿命,甚至产生无预兆的突然断裂,严重威胁着飞机及机组人员的安全。如何来评测飞机结构的腐蚀损伤,如何评价腐蚀损伤对飞机结构剩余强度及寿命的影响,以及如何对飞机机体结构的腐蚀损伤及遭受腐蚀损伤后的寿命进行管理是摆在飞机结构工程师们面前亟待解决的重大课题。

飞机机体上使用了大量铝合金材料,用铝合金材料制造的机体结构强度高、质量小,但是在环境介质作用下对腐蚀却是相当敏感的^[2]。这是因为铝合金与氧有很强的亲和能力,在空气或水中其

表面能自然形成一层氧化物膜。这层氧化物膜的存在使得铝及其合金在普通大气环境下表现出优良的耐蚀性^[4]。但是,一些离子,尤其是自然界中广泛存在的卤化物,则会破坏铝合金表面的致密防护层,引发腐蚀。因此,特别是在沿海、多雨、潮湿高温和工业发达地区使用的飞机,机体关键铝合金构件极易被腐蚀。在腐蚀萌生后,若不加以控制,在腐蚀与疲劳载荷的交互作用下,将比单一疲劳损伤发展得更快、更严重,不仅影响飞机的飞行安全及出勤率,还会带来昂贵的维修费用和经济损失。所以,在结构设计及飞机服役过程中对腐蚀因素的考虑,以及对腐蚀、腐蚀疲劳引起铝合金结构性能下降的研究,成为一种必然。

影响飞机结构腐蚀的主要因素有结构的防腐设计水平、制造工艺水平和材料的抗腐蚀能力,这几个因素直接决定了飞机的抗腐蚀能力。一般来说,美国等一些西方国家的飞机要比俄罗斯和中国的飞机抗腐蚀能力好,这与他们的防腐、防水和材料的制造工艺水平是一致的^[5]。飞机使用的地域是各不相同的,在污染严重的地方、沿海地带及温热潮湿的地方,腐蚀更为严重。一般来说,海军飞机大修的平均费用要比空军高 10% 左右。另外,飞机使用日历寿命越长,腐蚀损伤程度也越严重。

金属(铝合金)结构由于使用环境和服役年限的不同,发生腐蚀的部位和腐蚀类型也不同,按照腐蚀形态的不同,腐蚀损伤可以分为以下 3 类:

(1) 均匀腐蚀。这是一种常见的腐蚀形态。其特征是腐蚀分布于金属整个表面,腐蚀结果使金属变薄。均匀腐蚀的电化学过程特点是腐蚀电池的阴、阳极面积非常小,甚至在显微镜下也难以区分,而且微阴极和微阳极的位置变换不定,整个金属表面在溶液中都处于活化状态,金属表面各点随时间有能量起伏,因而使得整个金属表面都受到腐蚀。

(2) 局部腐蚀。这是相对全面腐蚀而言的。其特点是腐蚀仅局限或集中在金属的某一特定部位。局部腐蚀有多种不同的形式,具体包括电偶腐蚀、坑蚀、缝隙腐蚀、晶间腐蚀、剥蚀、选择性腐蚀和丝状腐蚀。

(3) 应力腐蚀。包括了腐蚀疲劳、应力腐蚀断裂、氢脆、磨损腐蚀、空泡腐蚀以及微振腐蚀。

统计调查结果表明,在所有的腐蚀中腐蚀疲劳、全面腐蚀和应力腐蚀引起的破坏事故所占比例最高,分别为 23%, 22% 和 19%, 其余各种腐蚀共占 36%。

铝合金材料或者结构件发生腐蚀相关破坏的形式取决于材料的成分和组织、构件的构造形式以及所处的环境条件和受力状态等因素。上述几种腐蚀破坏形式之间彼此有一定的内在联系,如晶间腐蚀、剥蚀往往由坑蚀发展而来,各类局部腐蚀形成的坑、孔、缝隙等缺陷又往往成为腐蚀疲劳或应力腐蚀的裂纹源。飞机结构腐蚀的部位一般集中在机体结构内部、机身蒙皮铆接处、机翼、尾翼、起落架,以及可检性较差的承力件、框架、机身密封舱等容易积水的部位。总结起来,对飞机结构来说,腐蚀环境会产生如下 4 个方面的作用:① 单纯的腐蚀(或老化)作用引起结构疲劳品质不断下降,使疲劳寿命缩短;② 服役环境与静拉应力(如停放应力、加工与装配中产生的附加应力或残余应力等)的联合作用导致结构产生应力腐蚀损伤;③ 腐蚀环境与疲劳载荷的共同作用产生的腐蚀疲劳,加剧疲劳损伤的发展,降低结构的飞行使用寿命;④ 腐蚀引起操纵机构阻力增大、卡滞或失灵^[2]。这几方面作用的结果,将导致飞机结构功能退化或失效,甚至危及飞行安全。随着飞机服役使用年限的增加,这 4 个方面的作用也日益突出。

1993 年由部队、院校、设计所和生产厂家组成的联合小组,对我军现役的部分机种的腐蚀情况进行了普查。在抽查的 18 架歼 × 型飞机中发现,各部队使用的歼 × 型飞机都有不同程度的腐蚀损

伤。沿海地区海军型飞机的腐蚀损伤最为严重,使用4年以上的飞机中94%出现了不同程度的腐蚀,腐蚀较重的占20%,而10%的飞机需要立即返厂大修。其中,机翼前梁腹板腐蚀最为严重,部分飞机的前梁腹板腐蚀坑直径50 mm,深度2~3 mm,同时42框出现大面积腐蚀疲劳裂纹;另有72%的飞机平尾翼尖配重发生腐蚀;机翼、机身连接头和机翼下蒙皮螺钉及孔边也存在不同程度的腐蚀。从安×飞机检查的结果中发现,结构腐蚀件有162项,占故障总数的42%,是所有系统故障中比例最高的一项^[6]。图1.1和图1.2给出了服役飞机的若干典型腐蚀损伤形态图。

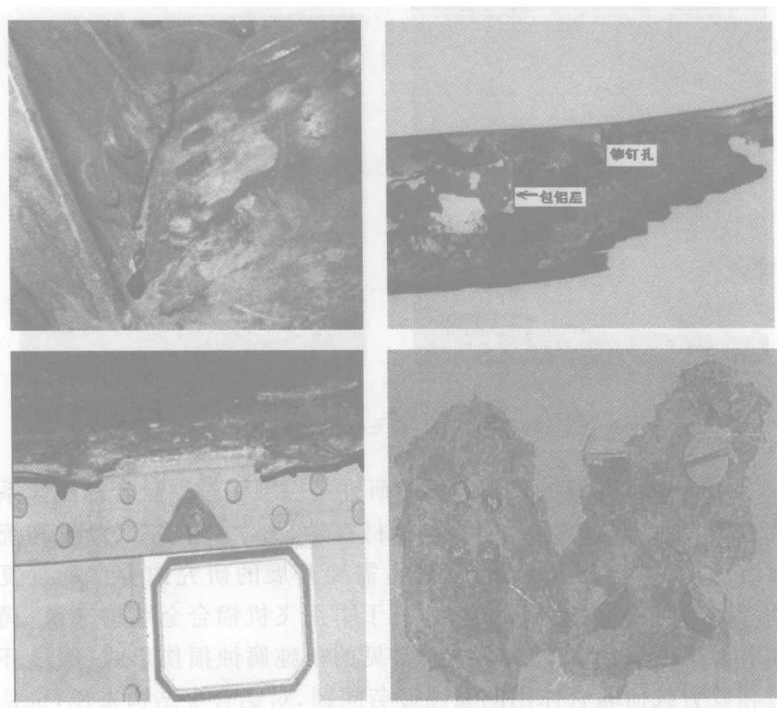


图 1.1 某型飞机结构腐蚀照片

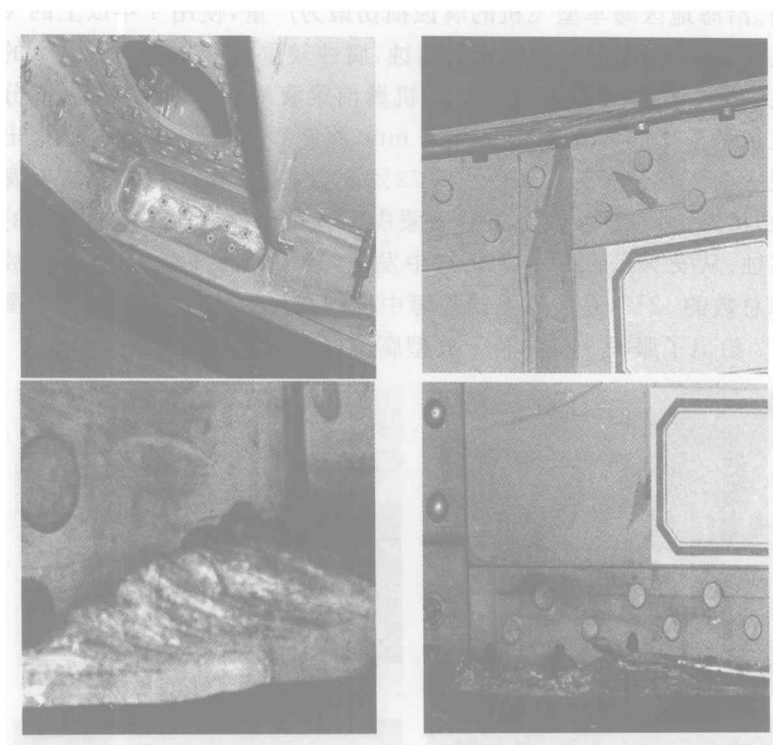


图 1.1(续) 某型飞机结构腐蚀照片

铝合金结构腐蚀损伤方面的研究是一项多学科融合的庞大系统工程,涉及多个学科领域,包括材料学、力学、化学、气象学和统计学等,交叉性和互动性非常强,需要开展的研究内容广泛且复杂。经过具体的外场调研可知,对于军用飞机铝合金结构来说,局部腐蚀中的坑蚀和剥蚀是最为常见的单纯腐蚀损伤形式。服役环境和疲劳载荷联合作用的腐蚀疲劳问题,对铝合金结构来说,也是普遍存在的。

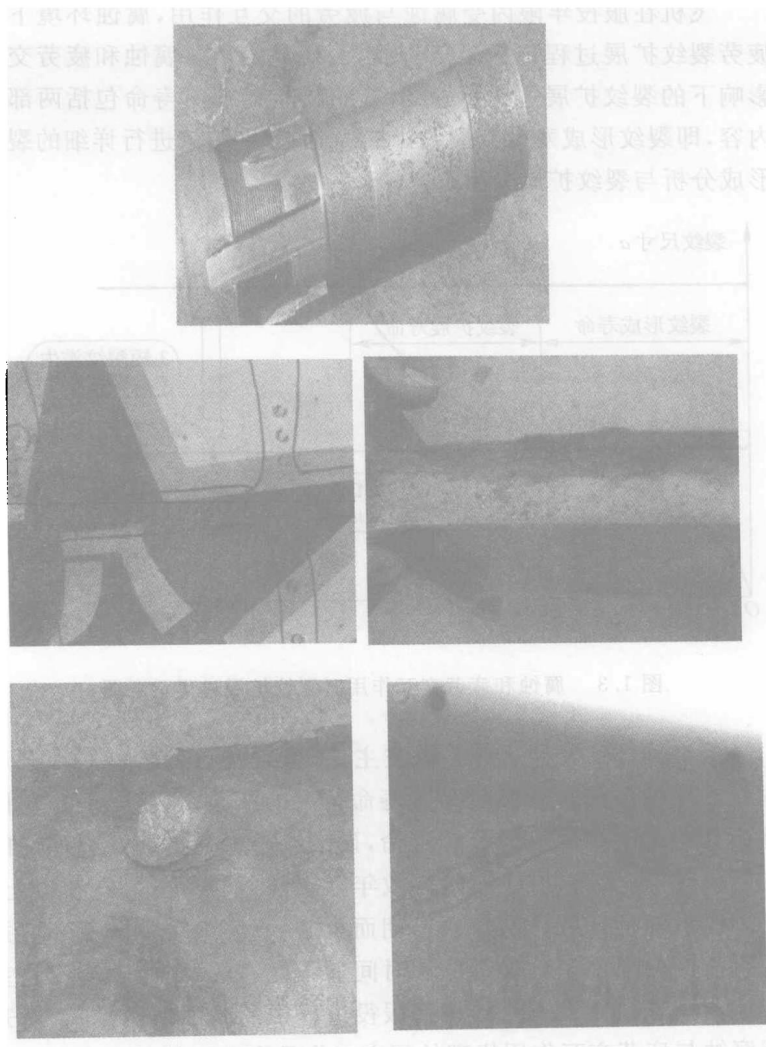


图 1.2 某型歼击机部分腐蚀照片

飞机在服役年限内受腐蚀与疲劳的交互作用,腐蚀环境下的疲劳裂纹扩展过程包括多个阶段,图 1.3 给出了腐蚀和疲劳交互影响下的裂纹扩展过程示意图。飞机结构的疲劳寿命包括两部分内容,即裂纹形成寿命和裂纹扩展寿命,分别应该进行详细的裂纹形成分析与裂纹扩展分析。

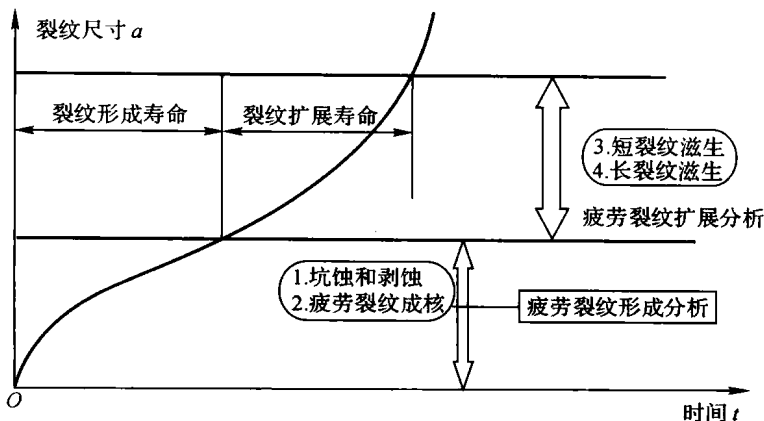


图 1.3 腐蚀和疲劳交互作用时裂纹扩展过程示意图

要准确评定腐蚀条件下航空主体结构的使用寿命,必须开展大量的腐蚀环境影响飞机结构寿命情况的试验研究,以测定不同地面停放时间腐蚀后的疲劳寿命,研究剩余寿命与腐蚀损伤之间的相关规律。然而,由于飞机停放年限较长,最长可达 30 年以上,实际服役环境和载荷的作用长期而缓慢,真实地模拟服役环境并进行长期的环境试验是经济和时间所不允许的,因此通过实验室加速模拟试验再现飞机结构在服役过程中的腐蚀损伤模式,对开展腐蚀与疲劳交互作用机理的研究工作具有重要的现实意义。

本章将介绍在实验室环境下进行的 LY12CZ 铝合金预腐蚀损伤试验,以及对预腐蚀试件进行的疲劳试验。对试件的腐蚀损伤形

貌及疲劳试验断口利用光学显微镜和扫描电镜进行观测,对疲劳裂纹在腐蚀坑处的成核行为进行分析,并对预腐蚀损伤试件的断裂特性进行讨论。对于遭受腐蚀损伤的试件来说,其疲劳性能的影响因素是很多的,有必要对各种影响因素进行详细的试验分析,建立各个影响因素与腐蚀损伤及腐蚀疲劳寿命之间的关系。本章选取了几个关键的因素(腐蚀时间、腐蚀温度和应力水平)进行数学分析和试验验证,讨论这些因素对试件疲劳寿命的影响情况。

1.2 试验介绍

试件采用 LY12CZ 铝合金板材制成,沿轧制方向截取狗骨状试件,其尺寸如图 1.4 所示。LY12CZ 铝合金板材的化学成分及组成见表 1.1。材料的力学性能:抗拉强度为 447.86 MPa,屈服强度为 342.02 MPa,伸长率为 11%,弹性模量为 69 580 MPa。

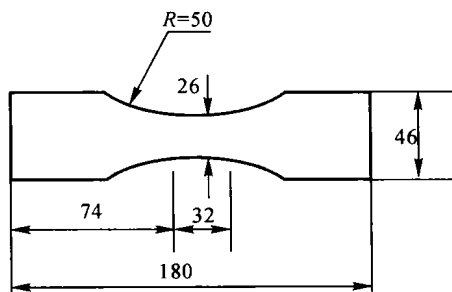


图 1.4 试件几何尺寸(厚度为 3.5 mm)

表 1.1 LY12CZ 材料化学成分及组成

化学成分	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Al
质量分数 / 10^{-2}	4.5	1.42	0.74	0.26	0.19	0.13	0.05	92.5