

装备关重件腐蚀-疲劳环境/载荷试验谱 编制方法研究

赵朋飞¹, 辛燕¹, 孙颀², 魏小琴³, 王刚¹

(1. 航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854; 2. 北京机电工程研究所, 北京 100074;
3. 西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究装备关重件大气腐蚀-动态疲劳协同加载的环境/载荷试验谱编制方法。**方法** 依据装备构件服役寿命-环境剖面, 分析腐蚀环境与疲劳应力协同作用的特点, 归纳出腐蚀-疲劳环境/载荷谱的设计原则和编制方法。**结果** 利用环境/载荷谱编制方法制定了某装备结构件腐蚀环境与疲劳载荷协同作用的加速试验谱。**结论** 建立的腐蚀-疲劳协同作用的环境/载荷谱编制方法及当量加速试验谱, 可用于研究装备关重件的腐蚀-疲劳协同环境效应及加速试验评价方法等工作。

关键词: 装备关重件; 腐蚀-疲劳; 环境/载荷试验谱

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.10.002

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)10-0008-06

Study on Compiling Method of Corrosion-fatigue Environment & Load Test Spectrum for Materiel Key Structure

ZHAO Peng-fei¹, XIN Yan¹, SUN Jie², WEI Xiao-qin³, WANG Gang¹

(1. Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R&T Center, Beijing 100854, China;
2. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology, Beijing 100074, China;
3. Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: To study on compiling method of atmospheric corrosion and dynamic fatigue co-loading environment & load test spectrum for materiel key structure. The synergistic-action characteristics of corrosion environment and fatigue stresses were analyzed according to the materiel structure life-environment profile in service. The design principle and compilation methods of corrosion-fatigue environment & load spectrum for materiel structure were concluded. Synergistic and accelerated test spectrum of corrosion environment-fatigue load for certain materiel structure was established using the environment & load spectrum compilation methods. The established environment & load spectrum compilation methods and accelerated test spectrum of corrosion-fatigue synergistic-action could be utilized to study on corrosion-fatigue synergistic environmental effect and accelerated testing evaluation methods for materiel key structure and so on.

KEY WORDS: materiel key structure; corrosion-fatigue; environment & load test spectrum

收稿日期: 2020-07-18; 修订日期: 2020-08-03

Received: 2020-07-18; **Revised:** 2020-08-03

基金项目: 技术基础科研项目 (JSHS2016204B002)

Fund: Technical Basic Scientific Research Projects (JSHS2016204B002)

作者简介: 赵朋飞 (1985—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为装备环境与可靠性工程技术、环境-力学耦合失效研究。

Biography: ZHAO Peng-fei (1985—), Male, Ph. D., Senior engineer, Research focus: environment and reliability technology of materiel, environmental-mechanical coupling failure.

近年来,随着飞机及机载装备在沿海、岛礁及舰载平台部署和服役时间的不断增长,在使用过程中发现由腐蚀和腐蚀疲劳作用造成的破坏现象越来越多^[1-3]。例如,某舰载装备腐蚀和老化问题严重,陀螺、高度表、驾驶仪、雷达及伺服机构等产品均出现各种功能失灵和性能故障;某机载装备出现螺钉锈蚀、舱体涂层脱落、紧固件及关重承力构件(如吊挂结构)出现腐蚀疲劳裂纹等。由于这些地区气候环境条件恶劣,常年高温、高湿、高盐雾、光照强、雨量充沛,部署于这些地区的机载装备经常面临潮湿空气、海水和盐雾等气候环境的侵袭。同时,机载装备战备值班时间延长及周期不固定等要求的新变化,给装备结构带来更为严酷的诱发力学环境和动态载荷。装备结构件在存放腐蚀环境与值班交变载荷的交互、协同作用下,必然加速防护涂层失效,抗疲劳能力降低,腐蚀疲劳寿命显著缩短。研究表明^[1,4-5],大气腐蚀效应影响着疲劳裂纹的起始及扩展,而交变应力等动态载荷又能加速结构裂纹表面的腐蚀进程。因此,应特别注意装备腐蚀环境侵蚀与动态疲劳载荷联合作用引发的腐蚀疲劳破坏。针对装备关重件服役经历的腐蚀-疲劳协同效应,开展环境/载荷谱设计及腐蚀-疲劳加速试验方法研究,为装备结构件的耐久性分析、损伤容限设计及日历寿命评定等工作提供技术支撑,不断提升我国武器装备的环境适应性及服役寿命评价水平。

1 腐蚀-疲劳协同作用的特点

装备构件大多数在使用过程中,除了受到环境的腐蚀作用外,还要经历使用载荷的协同作用,并对构件性能及使用寿命产生强烈的影响。例如,吊挂结构处于机身和装备结构连接/过渡的界面位置,将直接承受机身和装备之间的诱发载荷和复杂应力的传递,并且振动和冲击能量很可能在吊挂连接界面处得到有效放大,属于飞机-装备系统结构强度设计的薄弱环节。同时,部分类型吊挂结构处于非密闭机舱内,无论是地面停放和空中挂飞都将受到大气腐蚀因素的侵蚀。尤其是装备挂机反复值班和高难度训练等使用过程,吊挂构件将经受恶劣的交变载荷和环境腐蚀的综合作用。结构的腐蚀疲劳破坏直接关系到飞机以及挂载装备的飞行安全,一旦损坏,引发的后果将是致命性的。

根据 GB/T 10123—2001 中有关术语和定义^[6],腐蚀是金属与环境间的物理-化学相互作用,其结果使金属的性能发生变化,并常可导致金属、环境或由它们作为组成部分的技术体系的功能受到损伤。腐蚀环境效应是指装备产品处于腐蚀体系的任何部分因腐蚀作用而引起的变化。疲劳定义引用美国试验与材料协会有关标准(ASTM E206-72)的表述^[7-9]:在某

点或某些点承受扰动应力,且在足够多的循环扰动作用之后,形成裂纹或完全断裂的材料中所发生的局部的、永久结构变化的发展过程。根据载荷因素类型的不同,一般可分为应力腐蚀和腐蚀疲劳。应力腐蚀可看作是腐蚀范畴的局部腐蚀破坏,对敏感材料-特定环境-拉伸应力的组合条件要求较为苛刻;而腐蚀疲劳是由交变应力和腐蚀环境协同或联合作用引起构件提前开裂或断裂失效,一般具有如下特征^[10-12]。

1) 金属材料腐蚀环境下抗疲劳性能的降低。相同应力水平作用下,腐蚀疲劳寿命远比常态疲劳寿命要短,在干疲劳极限附近,寿命会缩短至10%以下。

2) 材料腐蚀疲劳曲线没有水平段。腐蚀疲劳情况下只能测定条件疲劳极限,不会出现与应力水平完全无关的水平线段。

3) 腐蚀疲劳性能与载荷循环加载的频率和波形强烈相关。在相同循环次数下,频率越高,腐蚀疲劳强度越高。加载频率越低,每一循环内与腐蚀环境共同作用的时间越长,腐蚀疲劳破坏就越严重。

4) 腐蚀疲劳断裂的裂纹形态也具有特殊性。腐蚀疲劳由许多腐蚀损伤而发展的原始裂纹,断口上有多个断裂源,且裂纹多为穿晶型裂纹发展为沿晶断裂或穿晶和沿晶的混合断裂,而常态干疲劳损伤源通常只有一个,多为穿晶裂纹发展为穿晶断裂。

5) 腐蚀疲劳受尺寸效应影响与常态干疲劳不同。常态干疲劳下碳钢、低合金钢、铝合金和钛合金的疲劳极限均随试样截面尺寸增加而降低,这种尺寸效应在腐蚀疲劳条件下出现相反的现象。

6) 与应力腐蚀损伤相比,腐蚀疲劳损伤没有明显的合金-环境组合要求。即金属的腐蚀疲劳没有环境选择性,几乎所有金属在任何腐蚀环境下都会发生腐蚀疲劳效应。

2 腐蚀-疲劳协同作用的环境/载荷谱编制方法

2.1 腐蚀环境谱

某装备在交付部队使用后,除了经受地-空-地循环重复载荷外,长时间遭受着气候环境和诱发化学、热环境的联合侵袭。大量研究及外场数据表明^[3-4,13-14],腐蚀损伤会显著破坏装备结构的完整性,并降低材料的疲劳强度,缩短其服役寿命。建立与装备对应的使用环境谱,是做好腐蚀设计与控制、腐蚀环境下结构寿命评定及耐久性分析等工作的关键。使用环境谱一般指装备各个部位经历的无差别环境或户外环境,主要包括地面存放环境谱和空中飞行环境谱。局部环境是造成装备结构具体腐蚀损伤的决定性因素,从而引起装备各个部位的腐蚀程度不尽相同。利用自然环境谱研究装备环境效应和腐蚀寿命的时间是漫长的,需

要利用当量加速等效关系将自然环境谱转化为加速腐蚀试验谱进行试验,以快速获得装备的腐蚀行为与性能退化规律。使用环境谱和当量加速腐蚀试验谱的编制原则及一般方法可参考文献[13-17]研究内容。

2.2 疲劳载荷谱

对于装备关重件结构地面耐久性试验,载荷谱是一项很关键的输入内容和前提条件,直接影响到试验时间的长短和试验结果的可信性。编制的疲劳载荷谱应合理可行、符合结构件实际承载历程,且尽可能与其预期使用工况一致,这对装备构件的耐久性分析及试验验证具有十分重要的意义。疲劳试验原则上应尽可能模拟构件载荷历程的实际状况,但由于受到地面模拟试验能力或试验成本等因素的限制,疲劳试验谱一般需要进行简化以达到便于实施的目的。结构实测载荷数据通常首先需要进行简化和加重处理,然后按照损伤等效方法对载荷谱进行合并和排序,即可得到结构件的疲劳载荷试验谱(如程序块谱),具体数据处理方法和编制原则可参考文献[9,18-19]内容。

2.3 环境/载荷谱编制原则

编制环境/载荷谱的目的是在实验室条件下模拟和加速装备结构使用过程中经历的腐蚀-疲劳协同作用环境效应。腐蚀-疲劳试验的模拟性与加速性较好,确保结构失效机理与装备实际使用情况保持一致。编制装备腐蚀-疲劳环境/载荷谱一般包括以下基本考虑和原则^[9,18,20]。

1) 推荐按照“环境服从载荷”的原则编制,以疲劳载荷精确设计为主,粗略考虑腐蚀环境因素。交变载荷是造成结构损伤和开裂的主导因素,环境的作用是“雪上加霜”。

2) 载荷幅值、载荷作用顺序及加载频率是载荷谱编制的重要参数,对装备结构疲劳损伤起到了关键作用。

3) 腐蚀环境对结构造成的损伤取决于环境因素强度及环境谱作用时间的长短,作用时间短,环境谱造成腐蚀破坏作用就非常有限。

4) 地面环境条件严酷,腐蚀介质浓度高,且存放时间长,该腐蚀过程对装备腐蚀损伤起到了主导作用。空中环境量值较低,腐蚀介质浓度随高度增加而逐渐降至非常低的水平,同时单次飞行暴露时间短暂(相对于地面存放时间),对装备腐蚀的贡献比例从工程意义上通常可以忽略不计。

5) 应严格保证疲劳载荷的大小、作用顺序、频次按照典型任务剖面的载荷顺序进行排列,然后将地面环境和空中环境合理地匹配和组合,从而保证了载荷作用的顺序效应及与环境作用的叠加、协同效应,在机理上贴合装备实际使用的客观事实。

2.4 环境/载荷谱编制方法

装备结构件的环境/载荷谱通常以装备的典型任务剖面为基础,遵循载荷谱细化及环境谱覆盖的原则,采用环境谱和载荷谱按照“地—空—地”顺序组合的方式进行编制。按照装备环境谱和载荷谱各自的幅值变化和组成形式,一般可分为恒载单一常环境型、恒载组合常环境型、变载单一常环境型、变载单一环境型、变载组合常环境型和变载组合变环境型等类型环境/载荷谱^[9,18]。以编制变载组合变环境型环境/载荷谱为例,一般包括如下步骤。

1) 根据装备结构组成及自然环境暴露情况,选取遭受疲劳载荷作用和腐蚀环境影响严重的关键部位和典型结构件。

2) 依据装备结构使用载荷谱,确定所选结构载荷作用点的局部载荷谱(或应力谱)。

3) 将选定结构部位的局部载荷谱转化为相应构件的试验载荷谱。

4) 根据装备结构型式及使用环境谱,确定所选结构部位的局部环境谱。

5) 将所选结构部位的局部环境谱当量转化为加速腐蚀环境谱,并包括地面存放加速环境谱和空中加速环境谱。

6) 地面存放加速环境谱主要用于结构试件预腐蚀和疲劳试验间隙的交替腐蚀作用,空中加速环境谱用于结构试件疲劳试验过程中腐蚀环境应力的协同加载。

7) 将疲劳载荷谱与加速腐蚀环境按照任务剖面顺序组成“地—空—地”或程序块谱的环境/载荷谱,并确定空中腐蚀疲劳试验间隙(两个疲劳加载周期之间)对试件施加何种环境(空中加速环境谱、地面存放环境谱或干燥空气条件),以用于装备结构试件的腐蚀疲劳试验。

在上述步骤中,第3)步试验载荷谱的编制和第5)步加速腐蚀环境谱的编制是关键环节,直接关系到结构试件腐蚀-疲劳试验的模拟性与加速效果,将对装备结构耐久性设计和寿命评定工作产生重要影响。

3 装备关重件腐蚀-疲劳环境/载荷试验谱实例

3.1 装备寿命-环境剖面分析

某型装备的服役寿命历程一般包括地(舰)面库房存放、测试维护、待命准备、战备值班、挂飞等主要事件,大致可以划分为地(舰)面存放—空中飞行—地面存放(即“地—空—地”)的周期循环过程。其中地(舰)面存放及测试维护时间占据大部分的服役

日历寿命（约占 95%以上），并经受地面存放大气环境的腐蚀作用，其余时间主要为装备战备值班的挂飞过程，经受载机挂飞振动引起的交变载荷与空中腐蚀环境的协同作用。环境/载荷谱表示装备结构件经受环境-载荷作用的时间历程，典型地—空—地环境/载荷-时间历程如图 1 所示。

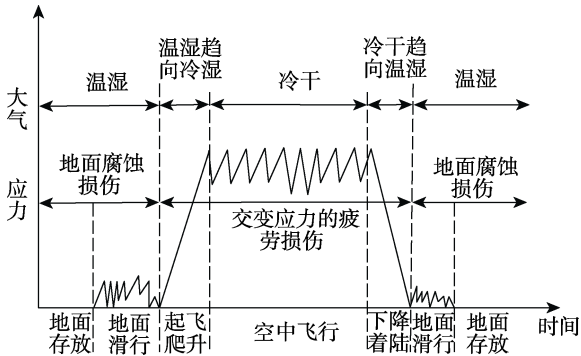


图 1 装备结构件典型地—空—地环境/载荷时间历程
Fig.1 Typical time period of ground-sky-ground environment & load spectrum for materiel structure

3.2 腐蚀环境试验谱

以装备服役期面临的岛礁或舰面海洋大气环境为例，按照腐蚀环境试验谱的设计方法，由环境因素数据经过统计分析和当量腐蚀加速得到的地面存放大气环境谱^[15]及加速腐蚀试验谱见表 1。目前，加速腐蚀试验谱一般包括盐溶液周期浸润试验和盐雾喷淋试验等类型，文中采用一种典型的酸性盐雾干湿循环试验方法进行说明，以便于实现腐蚀应力与疲劳载荷的原位交替或协同施加。

表 1 加速腐蚀试验谱（酸性盐雾干湿循环）
Tab.1 Accelerated corrosion test spectrum (dry and wet cycle of acidic salt mist)

盐溶液	5%NaCl+0.05%Na ₂ SO ₄ +0.05%CaCl ₂ 的混合溶液，pH=4
盐雾喷淋	温度(40±1)℃，持续 4 h，盐溶液沉降率为 (1~3) mL/(80 cm ² ·h)
表面干燥	温度(60±1)℃，RH<30%，持续 4 h
试验时间	单次循环 8 h，干湿过程转换时间不大于 15 min

由于空中大气环境及腐蚀介质数据随飞行高度变化的规律复杂，且实时监测数据缺乏，在实验室条件下进行试验模拟和加速等效较为困难。空中挂飞总时间相对于地面存放时间较短，并且腐蚀环境与疲劳载荷的协同效应是一个缓慢的促进过程。从便于工程实施的角度考虑，偏冒险设计时，可以忽略空中腐蚀时间及腐蚀作用效果，即在结构试件挂飞疲劳加载期间不叠加腐蚀环境。偏安全设计时，可以在结构试件疲劳加载期间叠加与地面腐蚀模拟相同的试验条件，以对试件腐蚀-疲劳协同效应进行加严考核。

3.3 疲劳试验载荷谱

以装备吊挂结构件为例，按照疲劳试验载荷谱的设计方法，由结构设计及实测载荷数据编制的疲劳试验载荷谱见图 2 和表 2。载荷谱根据飞机典型飞行任务剖面，给出地面滑行、离场机动、爬升突风、平飞突风、平飞机动、下滑突风、进场机动和着陆撞击共 8 种任务段，并按任务段组合了吊挂结构载荷作用点的疲劳载荷值及施加次数。

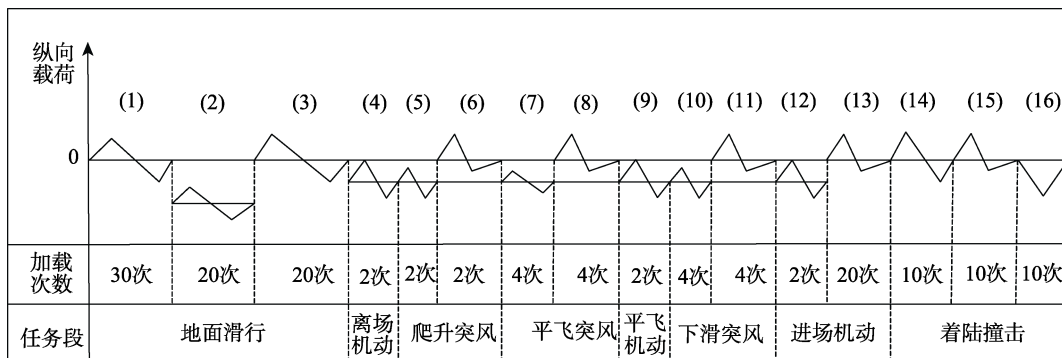


图 2 吊挂结构疲劳载荷施加示意
Fig.2 Schematic drawing of hanging structure fatigue load imposed

3.4 腐蚀-疲劳环境/载荷试验谱

基于编制的腐蚀环境试验谱及疲劳试验载荷谱，利用腐蚀-疲劳协同作用环境/载荷谱的编制原则和方法，结合某装备服役寿命-环境剖面，按照“地—空—地”的周期循环过程对环境谱和载荷谱进行组合和编排，即可得到装备吊挂结构试件的腐蚀-疲劳环境/载

荷试验谱（如图 3 所示），也称为试验剖面。试验时，吊挂结构试件需要循环执行如图 3 所示的环境/载荷试验谱（试验剖面），直至试件发生失效或达到其它试验终止条件。

在图 3 所示参数中，地面存放腐蚀试验持续时间 $t_1 = t_m/a$ 。a 为加速腐蚀试验谱对于目标存放环境的加速系数， t_m 为实际地面存放时间平均值。空中挂飞疲

劳试验谱施加次数 $N=(N_0 \cdot t_0)/L$, N_0 为拟验证的装备挂飞次数, $t_0=(t_m+t_2) \cdot a$, 表示执行完1次“地—空”应力加速试验所等效的实际使用时间, L 为拟验证的装备设计使用寿命。空中挂飞腐蚀试验持续时间 t_2 等同于执行完 N 次疲劳试验谱的时间。

表2 吊挂结构疲劳载荷谱数据

Tab.2 Fatigue load spectrum data of hanging structure

任务段	载荷情况		载荷值/N	加载次数
地面滑行	(1)	峰	1 9846.8	30
	航向引起	谷	1 5487.6	
...				
离场机动	(4)	峰	5 8147.2	2
	纵向引起	谷	1 2912	
爬升突风	(5)	峰	2 2168.8	2
	纵向引起	谷	-2 7884.8	
...				
平飞突风	(7)	峰	2 3836	4
	纵向引起	谷	-3 0797.6	
...				
平飞机动	(9)	峰	2 1049.6	2
	纵向引起	谷	-2 8010.8	
下滑突风	(10)	峰	3 2123.2	4
	纵向引起	谷	-2 0476	
...				
进场机动	(12)	峰	5 4518.8	2
	纵向引起	谷	1 5955.2	
...				
着陆撞击	(14)航向	峰	3 4406.8	10
	引起	谷	3 1209.2	
...				

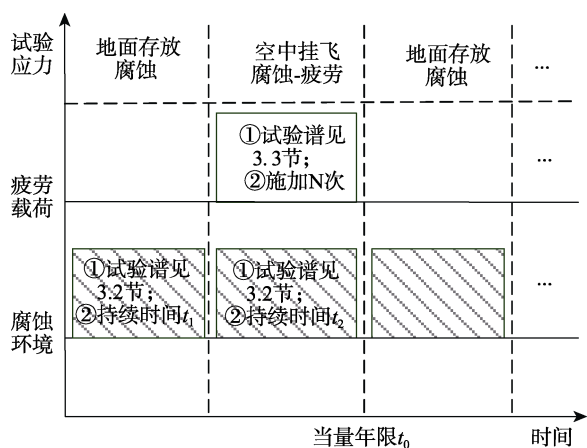


图3 吊挂结构试件腐蚀-疲劳环境/载荷试验谱 (试验剖面)

Fig.3 Corrosion-fatigue environment & load test spectrum of hanging structure specimen (test section)

4 结语

文中针对某装备关重件在服役过程中经历的大气腐蚀与动态疲劳综合应力,分析了腐蚀环境与疲劳载荷的协同作用过程与环境效应特点,归纳出基于腐蚀-疲劳协同作用的环境/载荷试验谱编制原则及一般方法,并给出吊挂结构件腐蚀-疲劳环境/载荷谱及当量加速试验谱的编制实例。装备相关耐腐蚀及腐蚀-疲劳性能试验研究表明,该环境/载荷试验谱激发的结构损伤规律与外场失效过程大致相近,可用于研究装备关重件的腐蚀-疲劳协同环境效应及加速试验评价方法等工作。

参考文献:

- [1] 穆志韬. 飞机结构材料环境腐蚀与疲劳分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
MU Zhi-tao. Environmental Corrosion and Fatigue Analysis of Aircraft Structural Materials[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2014.
- [2] 李晓刚. 海洋大气环境腐蚀寿命[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
Li Xiao-gang. The Corrosion Life of The Oceanic Atmosphere Environment[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [3] 胡建军, 陈跃良, 卞贵学, 等. 飞机结构加速腐蚀与自然腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2011, 32(11): 900-904.
HU Jian-jun, CHEN Yue-liang, BIAN Gui-xue, et al. Corrosion of Aircraft Structures Material in Accelerate Simulating Environment and Service Environment[J]. Corrosion and Protection, 2011, 32(11): 900-904.
- [4] 刘文斑, 蒋冬滨. 飞机结构关键危险部位加速腐蚀试验环境谱研究[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 434-438.
LIU Wen-ban, JIANG Dong-bin. Study on Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum for Critical Area[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 1998, 19(4): 434-438.
- [5] 李晓刚. 西沙海洋大气环境下典型材料腐蚀/老化行为与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
LI Xiao-gang. The Behavior and Mechanism of Corrosion/aging of Typical Materials in The Atmospheric Environment of Xisha Ocean[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [6] GB/T 10123—2001, 金属和合金的腐蚀 基本术语和定义[S].
GB/T 10123—2001, Corrosion of Metals and Alloys Basic Terms and Definitions[S].
- [7] ASTM E206-72, 疲劳测试和疲劳数据统计分析的相关术语的定义[S].
ASTM E206-72, Definition of Terms Related to Fatigue Testing and Statistical Analysis of Fatigue Data[S].
- [8] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
CHEN Chuan-yao. Fatigue and Fracture[M]. Wuhan:

- Huazhong University of Science and Technology Press, 2009.
- [9] 穆志韬. 直升机结构疲劳[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- MU Zhi-tao. Helicopter Structural Fatigue[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2009.
- [10] PETER S P. Corrosion Fatigue Failure[M]. ASM Metals Handbook, 1986-1987, 11:252-262.
- [11] 何建平. 环境与力学因素协同作用下的航空铝合金性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2001.
- HE Jian-ping. The Investigation of the Properties of Aeronautic Aluminum Alloys under Synergistic Action of Environmental and Mechanical Factors[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2001.
- [12] 毋玲. 环境腐蚀及其应力耦合的损伤力学方法与结构性能预测研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.
- WU ling. The mechanical method sorority and structural performance prediction of environmental corrosion and stress coupling[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006.
- [13] 陈群志, 李喜明, 周希沅, 等. 飞机结构典型环境腐蚀当量关系研究[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 414-418.
- CHEN Qun-zhi, LI Xi-ming, ZHOU Xi-yuan, et al. Investigation of Corrosion Equivalent Relationships between the Accelerated Environment and the Typical Service Environment of Aircraft Structures[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 1998, 19(4): 414-418.
- [14] 刘元海, 任三元. 典型海洋大气环境当量加速试验环境谱研究[J]. 装备环境工程, 2011, 8(1): 48-52.
- LIU Yuan-hai, REN San-yuan. Study on Equivalent Accelerated Corrosion Test Environment Spectrum of Typical Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(1): 48-52.
- [15] 赵朋飞, 苏晓庆, 吴俊升. 典型岛礁大气环境室内加速腐蚀试验谱研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 14-21.
- ZHAO Peng-fei, SU Xiao-qing, WU Jun-sheng. Study on Accelerated Corrosion Test Spectrum of Typical Reef Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12): 14-21.
- [16] 栗晓飞, 张琦, 傅耘. 依托特定地域气象资料编制环境谱的尝试[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3): 63-66.
- LI Xiao-fei, ZHANG Qi, FU Yun. The Attempt of Establishing the Environment Spectrum Based on the Meteorological of Special Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3): 63-66.
- [17] 杨晓华, 金平. 飞机使用环境谱的编制[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 99-102.
- YANG Xiao-hua, JIN Ping. Compile of Aircraft Operation Environment Spectrum[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 99-102.
- [18] 陈跃良, 郁大照. 飞机载荷/环境谱编制研究及应用[J]. 海军航空工程学院学报, 2007, 22(1): 114-118.
- CHEN Yue-liang, YU Da-zhao. Research and Application of Compilation of Load/Environment Spectrum for Aircraft[J]. Journal of the Naval Academy of Aeronautical Engineering, 2007, 22(1): 114-118.
- [19] 强宝平. 飞机结构强度地面试验[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
- QIANG Bao-ping. Ground test of aircraft structure strength [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014.
- [20] 刘文宾, 韩金铃. 飞机典型部位载荷环境谱编制及其应用[J]. 工程力学, 1995(增刊): 291-295.
- LIU Wen-bin, HAN Jin-ling. The Compilation and Application of the Typical Load Environment of the Aircraft[J]. Engineering Mechanics. 1995(Supplement): 291-295.