



先进实验方法与技术

王习术 编著

先进材料力学行为 实验指南

Experimental Guide on Mechanical
Behavior of Advanced Materials

清华大学出版社



先进实验方法与技术

王习术 编著

先进材料力学行为 实验指南

清华大学出版社
北京

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

先进材料力学行为实验指南/王习术编著.--北京:清华大学出版社,2010.9
(先进实验方法与技术)

ISBN 978-7-302-23278-0

I. ①先… II. ①王… III. ①材料力学—实验—指南 IV. ①TB301-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 147626 号

责任编辑:黎强 赵从棉

责任校对:赵丽敏

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170×230 印 张:11.75 字 数:222 千字

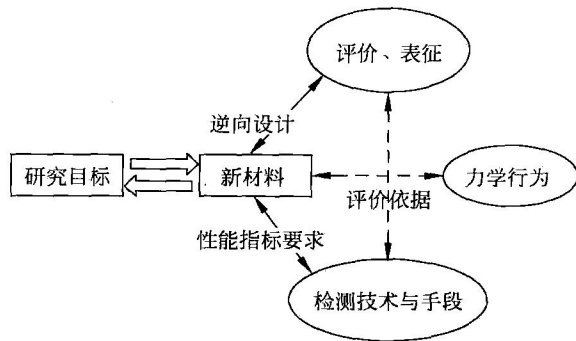
版 次:2010 年 9 月第 1 版 印 次:2010 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:25.00 元

产品编号:037123-01

随着国民经济的不断发展和社会进步,人们对与生活、生产密切相关的各类工程用材料或结构的安全和服役可靠性提出了更高、更苛刻的要求。人们对各种商品或产品的质量控制在越来越需要进行实验等综合评估,包括对商品或产品的各种性能进行检测。因此,获得这些商品或产品的各种性能参数的试验方法和检测技术就十分重要和必要。以新材料开发为例,材料试验检测与表征在研究中的相关路径如下图所示。可以看出:从新材料的开发到实际应用,其力学性能(行为)试验检测与表征在材料加工工艺力学参数的优化过程中具有重要的作用。各式各样的材料或结构,由于其使用环境、受力状态不同,相关的性能参数的试验方法和检测技术也因此而变化,同时,在试验过程中发现的新问题、新规律及相关的试验方法和技术对于促进材料及相关学科的发展也具有重要的指导作用。



本书从材料力学试验出发,分别介绍了静态、动态载荷下材料或结构的力学行为试验方法及检测技术。本书与普通试验指导书的最大区别是

在介绍试验材料的力学行为的同时,更注重其表征和原因分析,这就是试验研究中应该注重的“三新”,即发现新问题、探索新规律、解释新现象。例如,引进材料微结构、组分以及环境因素的影响评估,就可以得到试验数据的误差分析和重复试验数据的可靠性分析结果。全书既有宏观尺度下的材料力学行为检测技术,又有介观尺度下的材料力学行为检测手段介绍。因此,本指南可作为一般材料力学实验指导书,又可作为从事材料力学行为研究的参考用书。

本书主要内容来自于作者近 10 年来在材料力学行为试验研究中的认识和体会。限于作者水平,书中的见解和论述难免存在谬误和不当之处,敬请读者批评指正。还需要说明的是本书涉及材料拉压弯扭性能检测、疲劳小裂纹检测技术及寿命评估方法、断裂韧性试验、金属界面连接强度的检测与评价、SEM 检测案例等。这些研究内容分别得到了国家自然科学基金项目(50571047,10772091)、国家重点基础研究发展计划(2004CB619304,2007CB936803,2010CB631006)的资助。书中有关振动与磨损、光学检测部分内容则参考了其他研究书籍,所有引用内容均在相关处给出了参考来源。在此,谨对上述资助机构和被引用文献的作者一并表示诚挚的谢意。

作 者

2010.6

第 1 章 绪论	1
1.1 材料力学行为试验的一般方法	2
1.1.1 疲劳与断裂检测技术	2
1.1.2 理化检测技术	3
1.1.3 无损检测技术	3
1.1.4 先进材料力学行为试验的主要技术	3
1.2 材料力学行为试验的热点问题	4
1.2.1 材料力学测试技术研究	4
1.2.2 汽车及零部件的力学测试	6
1.2.3 航空及宇航材料的力学试验	7
1.2.4 生物材料及结构的力学测试	8
1.2.5 土木工程材料的力学试验	9
1.2.6 先进工程系统的力学试验	10
参考文献	11
第 2 章 拉压、弯扭、冲击行为试验方法	12
2.1 拉伸压缩试验	12
2.1.1 拉伸压缩试验机原理与试验方法	13
2.1.2 典型材料的拉伸试验与力学性能检测技术	17
2.2 弯曲试验	19
2.2.1 三点弯曲试验	19
2.2.2 四点弯曲试验	21

2.2.3	平面弯曲试验	22
2.2.4	旋转弯曲试验	24
2.3	扭转试验	24
2.3.1	扭转试验机的原理	25
2.3.2	数控扭转试验机	28
2.4	冲击试验	28
	参考文献	30
第3章	先进材料的疲劳小裂纹试验方法与寿命预测	31
3.1	概述	31
3.2	疲劳试验与工程应用	33
3.3	疲劳小裂纹的检测方法与数据处理	36
3.3.1	疲劳裂纹的常用检测方法	36
3.3.2	疲劳裂纹扩展评价方法	40
3.4	影响材料疲劳强度的主要因素	47
3.4.1	缺口效应	48
3.4.2	几何尺寸	49
3.4.3	腐蚀条件影响	50
3.4.4	高低温环境试验	54
3.4.5	接触疲劳影响	56
3.5	提高疲劳强度的常见措施	58
	参考文献	59
第4章	断裂韧性试验与分析	61
4.1	概述	61
4.2	断裂韧性 K_{IC} 的典型试验方法与设备简介	63
4.3	K_{IC} 的测定结果与分析	65
4.4	弹塑性断裂韧性试验方法	67
4.5	冲击韧性试验方法	77
	参考文献	80
第5章	先进材料的界面力学行为试验与分析	82
5.1	概述	82
5.2	划痕试验	84



5.2.1	纳米划痕试验机原理	85
5.2.2	微/纳米划痕试验结果的评价	88
5.3	涂层粘附强度与剥离试验	94
5.4	界面力学行为试验技巧	96
5.5	细微观尺度下的界面力学行为试验	97
5.5.1	超高强度钢中夹杂物界面的力学行为	97
5.5.2	纳米纤维与微纳米颗粒添加物在基体中的力学行为	100
	参考文献	105
第 6 章	材料力学行为的先进测试技术	109
6.1	概述	109
6.2	红外检测技术	109
6.3	云纹测试技术	114
6.3.1	均匀单向加载下的应变测试方法	114
6.3.2	双向载荷作用下的 ϵ_x 、 ϵ_y 、 γ_{xy} 测量	114
6.4	电子散斑检测技术	118
6.4.1	电子散斑原理	118
6.4.2	激光散斑计量技术的分类	121
6.4.3	电子散斑干涉术	122
6.5	电子扫描技术	125
6.5.1	SEM 的主要特点	126
6.5.2	断口 SEM 分析与应用	128
6.6	原子力显微镜技术	132
	参考文献	135
第 7 章	振动与磨损试验	137
7.1	概述	137
7.2	振动试验设备	138
7.3	振动试验结果与分析	139
7.4	磨损及磨损力学行为试验	144
7.5	磨损试验方法	148
7.6	典型磨损试验数据与处理	149
	参考文献	151



第 8 章 加速寿命试验方法与分析	152
8.1 概述	152
8.2 寿命试验分类	153
8.3 可靠性试验技术的研究现状	154
8.4 加速寿命试验与分析	157
8.5 加速疲劳寿命结果的可靠性分析	162
参考文献.....	169
附录 A 中外常见试验标准对照	172
附录 B 典型条件下的应力强度因子表达式	175
参考文献.....	179

材料科学的不断发展促使各种各样的先进材料面世。所谓先进材料(advanced materials, 也称现代材料)是指那些已经出现或正在发展的, 具有优异性能的, 在信息、电子、航空航天、海洋、能源、生物医药等众多领域有着广泛应用前景和巨大应用价值的各种新型固体材料。它们包括轻金属材料(多孔金属)、粉末冶金超高强度钢材料、有机合成材料、无机非金属材料 and 纳米材料等。这些先进材料是否能满足现代工业需求、是否能从实验室走向实际应用? 对这些问题的探索, 又为新的材料研究课题注入了丰富的内容; 同时, 也促进相关的试验技术不断发展和进步。例如, 近年来由于高温燃气轮机、火力发电站、核反应堆发电站、航天飞行器、火箭、卫星、地面轨道车辆、深井钻探及高压储罐的市场需求, 带动了超级合金(超高强度钢)、复合材料、功能材料、陶瓷材料的不断完善和发展。另一方面, 随着材料逐渐在复杂、恶劣的环境中应用, 对材料的性能又提出了更高的要求。如满足超高压、超高温、超低温、超真空、超高纯、超高速、超高强、耐辐射、耐腐蚀、轻、小、好、廉等近似苛刻的条件要求。此外, 对材料试验技术也提出了高标准要求: 如快速省力, 准确可靠, 安全经济, 多能而善变。以航空材料为例: 航空材料要求较高的比强度和比刚度, 要求耐疲劳和耐腐蚀, 要求能反复使用、长寿命和安全可靠。因此对航空材料力学行为和性能的测试研究也就复杂得多、严格得多。材料力学行为(behavior)与性能(performance)间的差别如图 1-1 所示, 通过比较它们的异同在试验研究中可以正确选择试验手段和评价方法^[1]。

由此可见, 二者之间既有联系, 又有区别, 而且是相互依存, 相互影响的。例如, 材料在特定条件下, 可以发生韧脆性能的转化, 这些条件包括

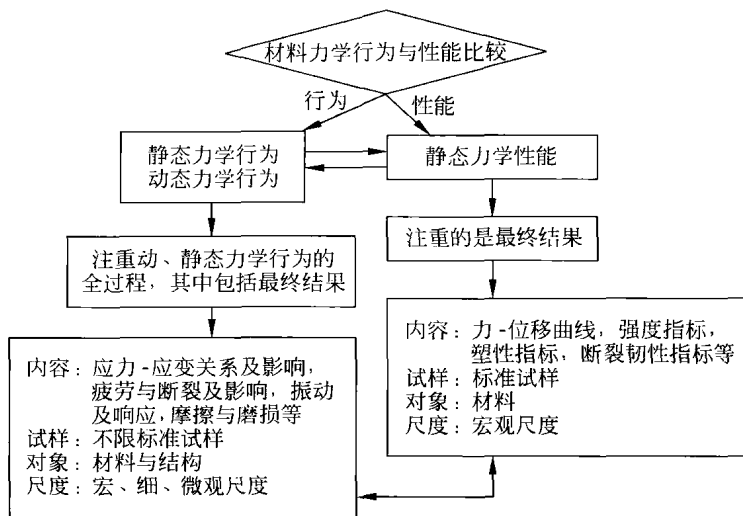


图 1-1 材料力学行为与性能试验的异同

温度、应力状态等。也就是说,材料的性能是很容易变化的,这就需要研究材料在各种环境下,发生行为变化的特征和表征方法。

1.1 材料力学行为试验的一般方法

1.1.1 疲劳与断裂检测技术

疲劳与断裂是航空机械设备中的零部件最常见的失效形式,也是影响飞机及其发动机寿命和可靠性的重要因素。航空零部件的破坏有 90% 以上源于疲劳,如飞机的梁、框、起落架、发动机的压气机盘和叶片以及蜗轮盘和叶片等均因工作中高应力和高温、复杂的环境介质、频繁的起动和停机以及零件的表面完整性和应力集中等因素而引起疲劳失效。

随着疲劳研究的深入和发展,航空等领域中结构已由静强度设计发展到按疲劳强度极限进行安全寿命设计。而随着断裂力学的发展,又进一步发展到损伤容限设计,即利用断裂韧性 K_{IC} 、裂纹扩展速率 da/dN 、塑性值 ϵ_p 、应力腐蚀条件下的断裂韧性 K_{ISCC} 等进行防断裂设计;在无损检测技术的可探测范围内,确定安全裂纹的萌生和达到一定工程裂纹长度的寿命,估算其剩余寿命并开展延寿研究;同时应用弹塑性力学、位错理论和先进的理化测试技术进一步阐明材料及其构件在疲劳断裂过程中的损伤行为和物理化学变化机制。

在飞机结构材料方面,正在研究材料在接近使用条件下的疲劳断裂行为,包括过载效应、随机加载、多轴加载以及温度、环境介质、表面状态的综合影响等;在发动机材料方面,着重研究材料的低周疲劳、热疲劳、蠕变/疲劳交互作用和腐蚀疲劳等;在试验技术方面,以宏观与微观相结合的方式探索材料中疲劳裂纹的萌生、扩展和断裂的全过程。不仅要解决工程中的疲劳失效问题,而且要做好材料的定寿和零部件的延寿工作,使之在零部件设计、延寿与失效分析中发挥更大的作用。

1.1.2 理化检测技术

作为材料和加工工艺技术的质量保证和评价手段,应充分采用各种先进的测试技术,诸如扫描断口技术、能谱及表面俄歇谱仪分析技术、高压透射电镜薄膜观察技术、原子力显微镜技术、场离子显微镜技术、声学显微镜技术、干涉金相技术、定量金相分析技术、电子探针及离子探针微区分析技术、原子吸收光谱和激光增强电离光谱等微量元素分析技术、X射线荧光光谱分析及电感耦合等离子发射光谱等主要元素分析技术。通过这些技术检测材料内部组织、元素、第二相、能谱大小以及组织结构形状、大小等材料微结构特性,这些特性对材料的力学行为如裂纹萌生、变形机制等影响显著。

1.1.3 无损检测技术

作为质量控制的重要手段,无损检测具有内外缺陷探伤、理化性能材质检验、各种厚度测量等几何量度以及结构安全性的动态监视等功能。复合材料、金属粉末冶金及高温陶瓷等先进的航空材料及工艺技术的应用,对无损检测提出了更为严格的要求。一些先进材料的加工残留的一些缺陷特征量将影响对其使用中力学行为的变化,这种变化程度必须定量检测与表征,以便对这些先进材料的改性起到直接指导作用,这个过程体现了材料的逆向设计思想,同时无损检测技术的发展对先进材料的安全使用具有不可估量的积极作用。

1.1.4 先进材料力学行为试验的主要技术

先进材料力学行为试验技术主要体现在以下方面。

(1) 液压伺服技术应用于力学行为试验:可以满足材料的疲劳与断裂行为的几乎所有试验领域,是最主要、适应性最广的一项试验技术。目前国内的伺服式技术——疲劳试验机的控制器、作动器及关键控制阀还主要依靠进口。最早由Instron公司开发的闭环伺服控制器,使得疲劳试验机广泛地被工程试验所接受。

(2) 环境模拟技术:一些大型工程结构如飞机为确保安全使用,必须对整机全天候模拟试验,海洋平台受海潮冲击也必须进行模拟试验,地震等的防控也应该

进行重要结构模拟试验。环境模拟技术在工程中的应用对充分认识材料力学行为试验中环境的各项影响是极为重要的。

(3) 自动化: 使用计算机, 用程序来操控与记录试验可以实现许多以前人工操作不可能完成的试验。

(4) 各种附件: 复杂的、精密的引伸仪、裂纹观测装置、夹头以及数据采集装置等可有效地保证现代材料力学行为试验的完成。

随着对材料性能和力学行为测试要求的不断更新, 出现了各种功能的试验设备; 但无论什么类型的试验机, 一般可分成下列三个独立的子系统。

(1) 机械-动力系统(mechanical and dynamic system): 这是试验设备的主要工作部分。机械部分包括机架(frame)、试件夹持机构等固定装置(grips and fixtures); 动力部分包括原动机及其控制元件(如液压源 hydraulic power supply、伺服阀 servovalve、液压作动器 hydraulic actuator、压电晶体及其联络电路), 这是设备的核心。

(2) 传感器系统(transducer system): 材料力学试验用试验机中力和位移检测都是用阻抗式传感器测量的, 例如载荷传感器(load transducer cell)、引伸仪(extensometer)和线性位移传感器(linear voltage differential transducer, linear variable differential transformers, LVDT)等。在一些新的试验系统中也用上了光学和电视图像装置。

(3) 控制-数据采集-分析系统(control-data acquisition-analysis system): 集成电路、微处理机及模拟技术等方面的成就促进了试验设备这方面的发展。控制系统在一般试验设备中有两套: 一是固定功能, 简单手控系统, 一是多功能、复杂的计算机控制系统。

1.2 材料力学行为试验的热点问题^[2]

1.2.1 材料力学测试技术研究

这方面包括金属、塑料、复合材料承受静、动载的力学试验。

如纳米压痕试验测试材料力学性能参数: 通过图 1-2 所示的 MTS 公司生产的纳米压痕仪对一些先进材料特别是局部力学性能的认识具有重要作用。纳米压痕设备的工作原理如图 1-3 所示, 其中, 图 1-3(a)为纳米压痕系统简图, 图 1-3(b)为系统的动力学模型。图中, A 为试样; B 为压杆, 质量为 m ; C 为加载线圈; D 为支承弹簧, 刚度为 K_s, K_i ; E 为电容位移传感器; 阻尼系数为 D_i ; F 为加载框。试样光滑表面在压头的外力作用下, 会由于压头的离开而留下残余痕迹, 如图 1-4 所示。

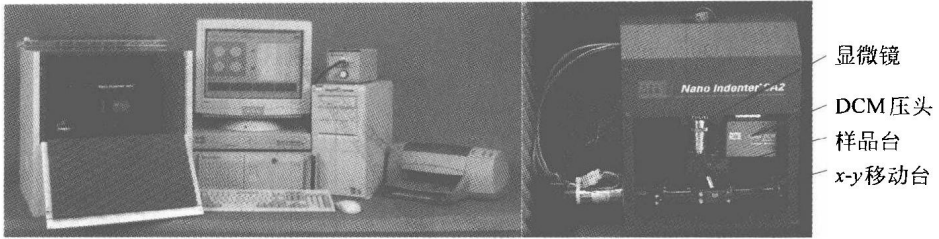


图 1-2 纳米压痕试验测试材料局部力学性能参数

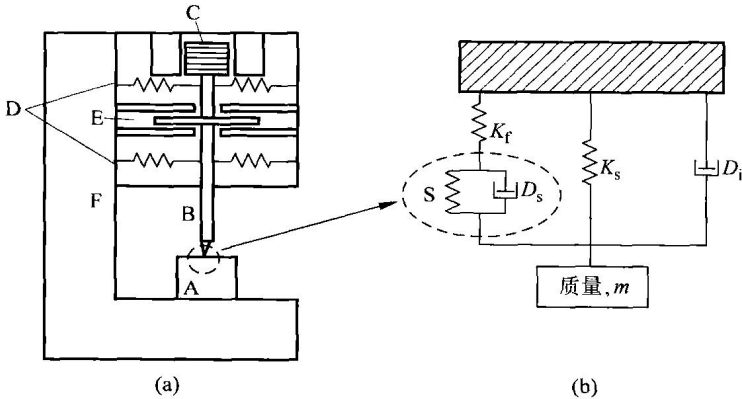


图 1-3 纳米压痕试验设备的工作原理

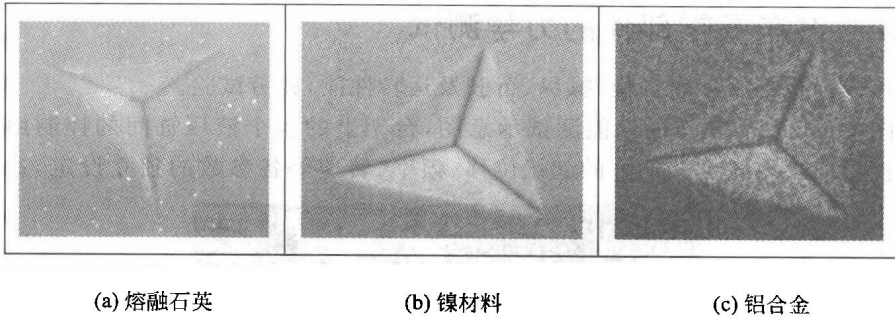


图 1-4 典型材料的纳米压痕痕迹

图 1-4 所示的压头痕迹对不同的材料有较大的几何形状、大小方面差别。如图 1-4(a) 是典型的熔融石英, 图 1-4(b) 是镍基合金, 比较这两个痕迹, 无论是压痕深度还是痕迹面积都有不同, 这两种材料的“软硬程度”差别很大, 所以“软”的材料在相同外载荷作用下留下的痕迹会比“硬”的材料痕迹大得多, 这就是材料的硬度或局部韧性能力的大小差别。材料的微观尺度范围的力学行为特征值可以通过图 1-5 所示

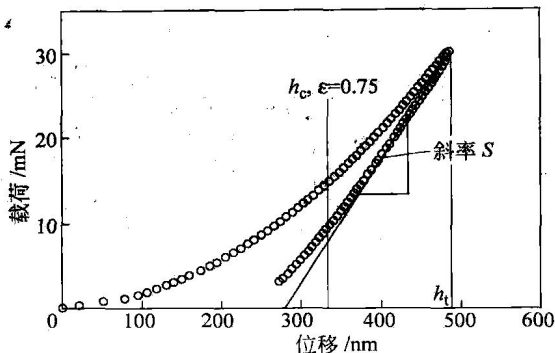


图 1-5 典型材料的压痕试验曲线

的压痕力学行为曲线获得。压痕试验尤其是纳米压痕试验最为重要的是回弹特性曲线段，即外加载荷-压头位移曲线中的回线斜率 S 和位置 h_t 。 S 即为材料压头局部弹性模量， h_t 代表材料的硬度程度。纳米压痕试验的压痕点周边的组织结构对材料的压痕试验曲线影响很大，一般的选点决定了试验结果的可靠性程度，因为它们是具有统计意义的结果，一直受到研究者的关注。不正确的试验方法包括选点会导致不同研究者对同一材料的不同结论，尤其是多晶体材料或其他特殊结构材料如母材与第二相的硬度差别较大时，压痕试验结果往往统计意义更突出，而统计意义的明确性仍然不唯一。

1.2.2 汽车及零部件的力学测试

这方面包括汽车耐久性，操纵、行驶及运转性能，疲劳试验。

图 1-6 是一台整车的性能测试示意图，台架上的各个液压缸间的控制由实际路况模拟四个车轮支撑油缸的起伏位移、频率、转速等各参数的独立设定，达到对



图 1-6 整车模拟试验示意图

汽车的底架、悬挂系统、电器系统等进行汽车整体性能的可靠性试验,所有试验数据均由计算机记录分析。表 1-1 所示为三种情况下的比较试验结果,表明其各种汽车试验的参数选择依据。

表 1-1 车辆试验比较

试验参数	零件试验	整机试验	实际车辆运行
试验的机构	单个零件	较大的系统	整个车辆
输入载荷形式	简单的	复杂的	复杂的
输入载荷波形	简单的	接近实际运行的	实际的
试验的准确性	有限	好	好
需要试验次数	多	少	少
需要试验时间	长	短	长
每次试验成本	低	中	高

1.2.3 航空及宇航材料的力学试验

这方面包括飞机整机、复合材料、陶瓷等先进材料的试验。

近年来,航空及宇航材料力学行为试验受国家大力发展大飞机、火箭及宇航等工业发展的带动和需求,已经有了飞速发展,逐渐形成一批专业研究队伍,试验技术不断发展与完善。飞机相关材料的力学行为主要指材料强度、韧度、疲劳以及冲击行为的试验研究或环境下力学试验研究。图 1-7 所示为飞机的整机在实验室内的力学行为试验现场,从图中的设备、检测方式可以推断出,为了模拟实际载荷,在机舱内放置了大量的沙袋,飞机各个关键受力点由液压油缸中的活塞施加外力作

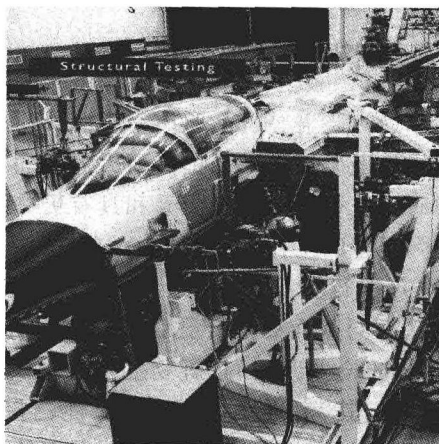


图 1-7 飞机整机试验现场

用在飞机的侧面,而施加的载荷必须与实际工况基本一致,如随机载荷谱如图 1-8(a)所示,但是这给试验设备的伺服加载增加了很大的难度,目前尚不能完全模拟飞行实际工况,只能在现有试验条件下简化模拟条件,如图 1-8(b)所示。这种简化与实际飞机工况相差还是较大。试验的关键问题是受试验设备所能提供的加载能力和加载类型的限制,因此,要尽可能地发展与实际工况相当的专用试验设备和试验技术,使试验设备提供的加载谱尽可能地类似实际工况,以便能提高飞机的整机可靠性能力,尽早发现设计,加工制造中遗留的问题,较少或者降低发生坠机事故的概率。

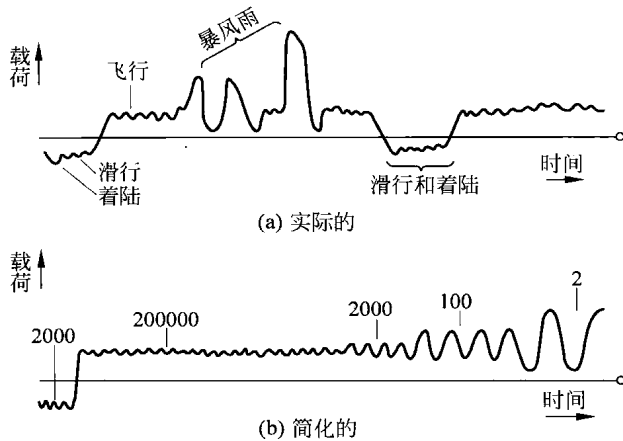


图 1-8 飞机实际载荷工况和简化载荷谱曲线(载荷, kN; 时间, s)

1.2.4 生物材料及结构的力学测试

这方面包括人工关节、臀、膝盖、腿部、躯体组织、牙齿等试验。

由于人对生命的期望值随生活水平的提高而大大增加,延缓人体器官的衰竭、老化以及寻找替代物的研究变得更有发展前景和具有更广阔的市场。替代人体器官的生物材料必须与实际器官的工作行为,如力学行为一致或近似一致。所以对人体或其他动物器官的力学行为研究带动了相关试验设备和技术蓬勃发展。图 1-9 所示的人体腿骨在不同截面处的穿孔强度试验和图 1-10 所示的人体脊椎骨的替代物压缩-扭转疲劳试验告诉我们,研究生物材料及仿生至实际使用,必须进行相关力学行为试验,确定其替代物的成本、可靠性、剩余寿命等定量参数。在确定这些参数的同时,会发现相当多的科学问题,如界面的摩擦磨损、疲劳强度、替代物与母材的相容程度再生及自我修复等。