

航空材料 力学性能检测

MECHANICAL TESTING OF
AERONAUTICAL MATERIALS

依据国内外现行标准 实践与理论并重

中国航发北京航空材料研究院 编
郭广平 丁传富 主编



航空材料力学性能检测

中国航发北京航空材料研究院 编

主 编 郭广平 丁传富

参 编 (以姓氏笔画为序)

马少俊 王 泓 王海鹏 王 翔 韦廷立 邓立伟
宁淑燕 杜正荣 李纪涛 李 骋 李 影 吴安民
何存利 陈 勃 陈新文 金 磊 胡本润 钟 斌
洪 力 郭子静 黄玉华



机械工业出版社

本书是航空工业力学性能检测人员的培训教材。全书共4篇17章：基础知识篇包括航空材料基础知识、金属的变形、金属的断裂与断口分析和数据统计分析基础知识；短时力学性能篇包括金属的拉伸、硬度、冲击、压缩、弯曲、扭转、剪切和工艺性能试验以及复合材料的短时力学性能试验；疲劳断裂力学性能篇包括金属的高周疲劳、低周疲劳、断裂韧度和裂纹扩展速率试验以及非金属材料的疲劳、断裂和冲击性能试验；长时力学性能篇包括金属的持久和蠕变性能及氢脆试验。

本书主要适用于航空工业力学性能检测人员资格鉴定与认证培训，也可作为冶金、机械、兵器、船舶、航天、核能等行业从事力学性能试验与研究的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目（CIP）数据

航空材料力学性能检测/中国航发北京航空材料
研究院编；郭广平，丁传富主编. —北京：机械工业
出版社，2017. 12

ISBN 978-7-111-58451-3

I. ①航… II. ①中… ②郭… ③丁… III. ①航空
材料—力学性能—性能检测—技术培训—教材
IV. ①V250.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 276671 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：吕德齐 责任编辑：吕德齐 章承林

责任校对：肖琳 封面设计：鞠杨

责任印制：张博

三河市宏达印刷有限公司印刷

2018 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 25.75 印张 · 621 千字

0001—3000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-58451-3

定价：89.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网：www.golden-book.com

编辑热线：010-88379779

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

编审委员会名单

主 任 李 伟

副主任 李 莉 陶春虎

成 员 (以姓氏笔画为序)

于 浩	王宇魁	王 斌	尹泰伟	叶 勇
史亦韦	吕 健	刘昌奎	刘晓燕	刘 嘉
闫秀芬	李秀芬	李 泽	李 剑	杨国腾
杨春晟	杨胜春	何玉怀	何 军	宋晓辉
张世林	张田仓	张学军	张晓艳	张银东
武振林	苗蓉丽	欧阳小琴	季 忠	金冬岩
胡成江	侯丽华	徐友良	郭广平	郭子静
黄玉光	章菊华	熊 瑛		

编审委员会秘书处

主 任 宋晓辉

成 员 任学冬 刘高扬 李 轩 李 彦 张文扬
赵 梦 周静怡 盖依冰 谢文博 焦泽辉
程 琴

序 言

3000 多年前的《汉谟拉比法典》，就提出了对制造有缺陷产品的工匠给予严厉的处罚，当然，在今天的以人为本的文明世界看来是不能予以实施的。即使在当时，《汉谟拉比法典》在总体上并没有得到真正有效的实施，其主要原因在于没有理化检测及评定的技术和方法来评价产品的质量以及责任的归属。从公元前 2025 年到世界工业革命前，对产品质量问题处罚的重要特征是以产品质量造成的后果和负责人为对象的，而对产品制造过程和产品质量的辨识只能靠零星、分散、宏观的经验世代相传。由于理化检测和评估技术的极度落后，《汉谟拉比法典》并没有解决如何判别造成质量问题和失效的具体原因的问题。

近代工业革命给人类带来了巨大的物质文明，也不可避免地给人类带来了前所未有的灾难。约在 160 多年前，人们首先遇到了越来越多的蒸汽锅炉爆炸事件，在分析这些失效事故的经验教训中，英国于 1862 年建立了世界上第一个蒸汽锅炉监察局，把理化检测和失效分析作为仲裁事故的法律手段和提高产品质量的技术手段。随后在工业化国家中，对产品进行检测和分析的机构相继出现。材料和结构的检测开始受到重视则是近半个世纪的事情。第二次世界大战及后来的大量事故与故障，推动了力学检测、无损检测、物理分析、化学分析和失效分析的快速发展，如断裂力学、损伤力学等新兴学科的诞生以及扫描电镜、透射电镜、无损检测、化学分析等大量的先进分析设备等的應用。

毋庸置疑，产品的质量可靠性要从设计入手。但就设计而言，损伤容限设计思想的实施就需要由无损检测和力学性能作为保证，产品从设计开始就应考虑结构和产品的可检性，需要大量的材料性能数据作为设计输入的重要依据。

就材料的研制而言，首先要检测材料的化学成分和微观组织是否符合材料的设计要求，性能是否达到最初的基本设想，而化学成分、组织结构与性能之间的协调关系更是研制高性能材料的基础，对于材料中可能存在的缺陷更需要无损检测的识别并通过力学损伤的研究提供判别标准。

就构件制造而言，一个复杂或大型结构需要通过焊接来实现，要求在结构设计时就对材料的焊接性和工艺可实施性进行评估，使选材具有焊接性、焊接结构具有可实施性、焊接接头缺陷具有可检测性，焊接操作者具有相应的技能水平，这样才能获得性能可靠的构件。

检测和焊接技术在材料工程应用中的作用更加重要。失效分析作为服役行为和对材料研制的反馈作用已被广泛认识，材料成熟度中也已经考虑了材料失效模式是否明确；完善的力学性能是损伤容限设计的基础，材料的焊接性、无损检测和失效模式不仅是损伤容限设计的保证，也是产品安全和可靠使用的保证。

因此理化检测作为对材料的物理化学特性进行测量和表征的科学，焊接作为构件制造的重要方法，在现代军工产品质量控制中具有非常重要的地位和作用，是武器装备发展的重要基础技术。理化检测和焊接技术涉及的范围极其广泛，理论性与实践性并重，在军工产品制造和质量控制中发挥着越来越重要的作用。近年来，随着国防工业的快速发展，材料和产品的复杂程度日益提高，对产品安全性的保证要求越来越严格；同时，理化检测和焊接新技术



日新月异，先进的检测和焊接设备大量应用，对理化检测和焊接从业人员的知识、技能水平和实践经验都提出了更高的要求。

为贯彻《军工产品质量管理条例》和 GJB《理化试验质量控制规范》，提高理化检测及焊接人员的技术水平，加强理化实验室的科学管理和航空产品及科研质量控制，中国航空工业集团公司成立了“中国航空工业集团公司检测及焊接人员资格认证管理中心”，下设物理冶金、分析化学、材料力学性能、非金属材料性能、无损检测、失效分析和焊工七个专业人员资格鉴定委员会，负责组织中航工业理化检测和焊接人员的专业培训、考核与资格证的发放工作。为指导培训和考核工作的开展，中国航空工业集团公司检测及焊接人员资格认证管理中心组织有关专家编写了中航工业检测及焊接人员资格鉴定与认证系列培训教材。

这套教材由长期从事该项工作的专家结合航空工业的理化检测和焊接技术的需求和特点精心编写而成，包括了上述七个专业的培训内容。这套教材全面、系统地体现了航空工业对各级理化检测和焊接人员的要求，力求重点突出，强调实用性而又注意保持教材的系统性。

这套教材的编写得到了中航工业质量安全部领导的大力支持和帮助，也得到了行业内多家单位的支持和协助，在此一并表示感谢。

中国航空工业集团公司
检测及焊接人员资格认证管理中心

前言

力学性能是指材料在外加载荷作用下或载荷与环境温度的联合作用下所表现的行为。材料承受载荷的力学状态一般采用各种力学参量（如应力、应变、冲击吸收能量、应力强度因子等）表示，而表征材料力学行为参量的临界值或规定值则称为材料的力学性能指标（如屈服强度、塑性应变、断裂韧性、蠕变强度、疲劳极限、疲劳裂纹扩展门槛值等）。这些性能指标不仅是评定和选用材料及确定加工工艺的基本依据，而且是工程应用、结构强度设计、寿命预测和结构完整性评估的不可或缺的重要基础数据，是连接材料及工艺研究、结构设计和工程应用的桥梁。

现代飞行器的承载能力是指在特定的服役时间和服役条件下（复杂交变载荷、高温、高速和腐蚀环境等）飞行器运行的安全性、可靠性、舒适性、经济性和维修性等方面的保障能力。承载能力取决于工程装备的结构设计和材料的力学特性。航空装备相对其他工程装备而言，对材料性能的要求更加严格，性能指标更加先进，而且对不同类型的飞行器而言，设计对材料性能要求的关注重点也有所不同。因此对航空材料力学性能的检测、表征和评价提出了更高的要求。

检测数据的真实、有效和可靠是航空工业对材料力学性能检测提出的基本要求。然而影响材料力学性能检测数据真实性、有效性和可靠性的因素很多，主要涉及测试设备、测试方法、测试环境、测量溯源、试样状态及测试人员等方面。其中测试人员既是从事测试工作的主体，也是保证检测数据真实性、有效性和可靠性的第一因素，更是控制其他五个方面因素的实践者。测试人员对检测设备的掌握程度、对测试标准和方法的认知程度等，对检测工作的质量会产生重大的影响。因此编写一套统一、完整的力学性能培训教材，有组织地对测试人员进行系统培训和从业资格取证就显得尤为重要。

原航空工业金属力学性能检测人员资格鉴定委员会于1993年编制的内部培训教材，至今已使用20余年，为航空工业乃至社会各界的力学性能检测人员的技术培训与资格鉴定发挥了重要作用。随着航空工业的发展和科学技术的进步，新材料、新工艺、新结构不断涌现，材料测试技术与表征方式持续更新，对力学性能检测人员的培训与资格鉴定提出了新的要求。本书在原内部培训教材的基础上进行了更新、补充和完善，使之与时俱进，以期更好地服务于航空工业及其他行业广大从事力学性能检测工作的同行们。

本书编写的整体思路是力求使力学检测人员不仅熟悉试验操作的步骤，而且知道为什么这样做，如何做得更好、更为准确到位，因此本书体现出实践与理论并重的特色。在内容上，在充分论述基本概念和基本原理的基础上，详细描述了试样、试验设备、测试环境、测试方法和试验操作要点等试验细则，特别强调对关键测试技术和测试方法要点的重点描述。希望此书能为从事航空材料力学性能检测的工程技术人员提供一本既含基本原理表述，又具实际工作指导作用的培训教材或参考书。同时，也希望读者，特别是工作在一线的检测人员对本书存在的问题和不足给予指正，使之不断改进完善。

本书由基础知识、短时力学性能、疲劳断裂力学性能、长时力学性能4大篇组成，涵盖



了主要航空结构材料（包括金属、非金属和复合材料）所需力学性能的主要测试技术和方法，突出了航空结构设计对材料力学性能的特殊要求，如环境或变幅载荷下的疲劳断裂性能、高可靠性的统计性能数据等。本书的编写以现行的国家标准、国家军用标准、航空工业行业标准和相应的美国 ASTM 等试验方法标准为依据。本书在内容上覆盖面广，既详细描述了基本的力学性能测试方法，又清晰地介绍了更多复杂、先进的测试技术和测试方法，如疲劳裂纹扩展门槛值和小裂纹测试方法，腐蚀环境及变幅载荷下的疲劳与裂纹扩展试验方法，高温疲劳、热机械疲劳和蠕变疲劳试验等。在基础知识方面，除了介绍金属与复合材料的基础知识、金属的变形外，还介绍了金属的断裂与断口分析、数据统计分析基础、取样与试样制备、试验方案设计等方面的内容。在非金属和复合材料方面，除了介绍几种常用的静态力学性能试验方法外，还重点介绍了疲劳、冲击、断裂性能的测试方法。此外，需要特别说明的是，由于部分试验方法的现行国家标准和航空标准存在术语、符号上的差异，为便于读者使用，本书对单一章节的术语、符号进行了统一，并在附录 D 和附录 E 中罗列了金属材料性能测试国家标准与航空标准之间以及复合材料性能测试美国 ASTM 标准与国家标准之间有差异的术语和符号。

本书由中国航发北京航空材料研究院（以下简称“航材院”）检测中心力学性能研究室组织，由中航工业、中国航发的相关厂所以及部分高等院校参加编写。参加编写的人员从事力学性能检测研究工作多年，积累了扎实的专业基础理论和丰富的实践经验。北京航材院检测中心力学性能研究室集航空材料力学行为研究与专业化材料性能测试于一体，具有 120 余人的专业团队和近亿元的设备资产，综合实力国际先进，不仅是我国飞机、航空发动机设计用材料性能数据的主要提供者，更是中国航发材料数据中心的挂靠单位。

本书由中航工业力学性能检测人员资格鉴定委员会主任郭广平负责全书总体策划、组织与协调；621 所丁传富负责全书内容构思、编制教材编写大纲、全书统稿和校审；621 所焦泽辉、钟斌、李骋参与全书的组织 and 协调工作；西北工业大学王泓老师承担部分章节的校审。第 1 章~第 3 章由 621 所丁传富编写；第 4 章由 621 所马少俊编写；第 5 章由 430 厂郭子静编写；第 6 章由 172 厂何存利、3007 厂杜正荣和 621 所钟斌编写；第 7 章由 120 厂宁淑燕、132 厂李纪涛编写；第 8 章由 5713 厂洪力编写；第 9 章由 122 厂黄玉华、410 厂韦廷立编写；第 10 章由 621 所陈新文、王海鹏和邓立伟编写；第 11 章由 621 所胡本润编写；第 12 章由 621 所李影、金磊编写；第 13 章由 621 所陈勃、丁传富编写；第 14 章由 621 所马少俊编写；第 15 章由 621 所陈新文、王海鹏和王翔编写；第 16 章和第 17 章由 621 所李骋、吴安民编写；附录由 621 所马少俊编写。本教材在编写过程中得到了全体委员的鼎力支持和配合，在此谨表示诚挚的感谢。

中航工业力学性能检测人员资格鉴定委员会
中国航发力学性能检测人员资格鉴定委员会

2016 年 8 月 10 日

目 录

序言

前言

第1篇 基础知识

第1章 航空材料基础知识	1	2.1.1 外力与内力	25
1.1 材料性能	1	2.1.2 变形的形式	26
1.1.1 材料性能的分类	1	2.1.3 应力与应变	26
1.1.2 材料性能与其成分、组织、工艺及 结构设计的关系	2	*2.1.4 应力状态的柔性系数	28
1.2 飞机设计思想的发展及对材料性能的要求	3	2.2 金属的弹性变形	29
1.3 航空主要金属结构材料的分类及应用	5	2.2.1 弹性变形的特点	29
1.3.1 结构钢和不锈钢	5	2.2.2 胡克定律	29
1.3.2 高温合金	7	2.3 弹性模量	30
1.3.3 铝合金	9	2.3.1 弹性模量的物理意义	30
1.3.4 钛合金	11	2.3.2 影响弹性模量的因素	31
1.4 复合材料概述	12	2.3.3 金属的弹性与弹性比功	32
1.4.1 复合材料的定义	12	2.4 金属的塑性变形	33
1.4.2 复合材料的组成	13	2.5 金属的形变强化	34
1.4.3 复合材料的主要特点	13	2.5.1 形变强化的工程意义	34
1.4.4 复合材料的分类	14	2.5.2 形变强化曲线和形变强化指数	34
1.4.5 复合材料的应用	15	2.5.3 影响形变强化的因素	35
1.4.6 复合材料的基本力学性能	16	思考题	36
1.5 力学性能试验取样与制备	16	第3章 金属的断裂与断口分析	37
1.5.1 取样类型及取样原则	16	3.1 断裂的类型	37
1.5.2 试样轴线的标识方法	18	3.1.1 韧性断裂与脆性断裂	37
1.5.3 试样的制备	20	3.1.2 穿晶断裂与沿晶断裂	38
1.5.4 试样包装与防护	20	3.1.3 剪切断裂与解理断裂	39
1.6 力学性能试验方案设计	21	3.1.4 按受力状态和环境介质分类	40
1.6.1 试验方案策划	21	3.2 断口分析	41
1.6.2 试验方法与步骤	22	3.2.1 断口分析的内容	41
1.6.3 试验质量控制	23	3.2.2 断口分析的基本方法	42
1.6.4 数据处理方法及结果表达	23	3.3 断口的宏观形貌特征	43
1.6.5 试验结果评估	23	3.3.1 静载荷下断口的宏观形貌特征	43
思考题	24	3.3.2 冲击断口的宏观形貌特征	47
第2章 金属的变形	25	3.3.3 疲劳断口的宏观形貌特征	47
2.1 基本概念	25	3.3.4 沿晶断裂的宏观形貌特征	50
		3.3.5 实际构件断口的宏观分析	50
		3.4 疲劳断裂的微观形貌特征	51



3.4.1 疲劳裂纹扩展断口的微观形貌特征	51	4.2.4 χ^2 分布及其应用	68
3.4.2 近门槛值扩展区断口的微观形貌特征	53	4.2.5 F 分布及其应用	68
3.4.3 低周疲劳断口的微观形貌特征	54	4.3 回归分析简介	70
3.4.4 腐蚀疲劳断口的微观形貌特征	55	4.3.1 回归分析的基本概念	70
*3.5 应力腐蚀与氢脆断口	56	4.3.2 一元线性回归分析	70
3.5.1 应力腐蚀断口的形貌特征	56	4.4 数据基值简介	71
3.5.2 氢脆断口的形貌特征	57	4.4.1 -3σ 基值	71
思考题	57	4.4.2 A 基值和 B 基值	72
第4章 数据统计分析基础知识	59	4.4.3 S 基值	72
4.1 基本概念	59	4.4.4 典型基值	73
4.1.1 母体、个体和子样	59	4.4.5 数据基值表达设计许用值的使用原则	73
4.1.2 平均值和中值	59	4.5 数值修约	73
4.1.3 方差和标准差	60	4.5.1 数值修约规则	73
4.1.4 变异系数	61	4.5.2 修约间隔为非 10^n 单位的修约	74
4.1.5 随机变量和概率密度函数	61	4.5.3 界限数值的修约	74
4.1.6 分布函数和可靠度	62	4.6 试验结果的测量不确定度简介	75
4.2 常用分布函数及其应用	63	4.6.1 测量不确定度的基本概念	75
4.2.1 正态分布及其应用	63	4.6.2 测量不确定度的评定方法	76
4.2.2 威布尔分布及其应用	65	4.6.3 测量不确定度的评定步骤	76
4.2.3 t 分布及其应用	66	4.6.4 测量不确定度的评定实例	77
		思考题	80
第2篇 短时力学性能			
第5章 金属的拉伸试验	81	5.5 强度指标的测定	94
5.1 基本概念	81	5.5.1 上、下屈服强度的测定	94
5.1.1 拉伸图和应力-应变曲线	81	5.5.2 规定塑性延伸强度的测定	96
5.1.2 拉伸过程的物理现象及性能指标	83	5.5.3 规定总延伸强度的测定	97
5.1.3 拉伸试验标准的分析与比较	86	5.5.4 规定残余延伸强度的测定	97
5.2 试验设备	88	5.5.5 抗拉强度的测定	99
5.2.1 拉力试验机	88	5.6 塑性指标的测定	99
5.2.2 引伸计	88	5.6.1 断面收缩率 Z	99
5.2.3 高、低温试验装置	89	5.6.2 断后伸长率 A	99
5.3 拉伸试样	91	5.6.3 断裂总延伸率 A_t	100
5.3.1 比例试样	91	5.6.4 最大力总延伸率和最大力塑性延伸率	100
5.3.2 试样的形状和尺寸	91	5.6.5 屈服点延伸率 A_e	101
5.3.3 试样的加工要求	92	5.7 弹性模量及泊松比的测定	101
5.4 试验前的准备工作	93	5.7.1 弹性模量的测定	102
5.4.1 测量试样原始横截面积 S_0	93	5.7.2 泊松比的测定	103
5.4.2 标记原始标距 L_0	94	5.8 应变硬化指数 n 值的测定	104
5.4.3 选择试验机和引伸计	94	5.8.1 真应力和真应变	104
5.4.4 确定试验速率	94	5.8.2 试验原理	104



5.8.3 试验程序	105	6.5.2 试样及试验仪器	131
5.9 高、低温拉伸试验	105	6.5.3 试验操作要点	132
5.9.1 高温拉伸试验	105	6.5.4 试验结果处理	132
5.9.2 低温拉伸试验	106	6.5.5 应用范围及优缺点	132
*5.10 管材、丝材及薄板的拉伸试验	107	思考题	132
5.10.1 金属线材拉伸试验	107	第7章 金属的冲击试验	134
5.10.2 金属管材拉伸试验	108	7.1 概述	134
5.11 试验结果的分析处理表达	108	7.1.1 加载速度与变形速度	134
5.11.1 试验数据的分析处理	108	7.1.2 冲击载荷下金属变形与断裂的 特点	135
5.11.2 试验结果的数值修约	109	7.1.3 冲击韧度的意义	136
5.11.3 试验结果的表达	109	7.1.4 冲击试验的应用	137
5.12 影响拉伸试验结果的主要因素	109	7.2 夏比摆锤冲击试验	138
5.12.1 试样形状、尺寸及表面粗糙度的 影响	109	7.2.1 试验原理	138
5.12.2 试样装夹的影响	109	7.2.2 冲击试验方法标准	139
5.12.3 试验速度的影响	110	7.2.3 试样设计与制备	140
思考题	110	7.2.4 试验设备	141
第6章 金属的硬度试验	112	7.3 室温冲击试验	143
6.1 布氏硬度	112	7.3.1 试验前的准备工作	143
6.1.1 试验原理	112	7.3.2 试验操作步骤	143
6.1.2 试验规范及相似原理的应用	114	7.3.3 试验结果的处理及表达	144
6.1.3 试样及试验仪器	116	7.3.4 影响冲击试验结果的主要因素	144
6.1.4 技术要求和试验操作要点	117	7.4 高温和低温冲击试验	145
6.1.5 试验结果处理	118	7.4.1 高温和低温试验装置	146
6.1.6 应用范围及优缺点	118	7.4.2 试样定位	146
6.2 洛氏硬度	118	7.4.3 试样保温时间	147
6.2.1 试验原理	119	*7.4.4 温度补偿	147
6.2.2 试样及试验仪器	121	7.5 其他冲击试验方法	147
6.2.3 技术要求和试验操作要点	123	7.5.1 艾氏冲击试验方法	147
6.2.4 试验结果处理	124	7.5.2 落锤试验方法	148
6.2.5 表面洛氏硬度	124	思考题	149
6.2.6 应用范围及优缺点	125	第8章 金属的压缩、弯曲、扭转和 剪切试验	150
6.3 维氏硬度	125	8.1 金属压缩试验	150
6.3.1 试验原理及特点	126	8.1.1 压缩试验的特点	150
6.3.2 试样及试验仪器	127	8.1.2 压缩试验原理	150
6.3.3 技术要求和试验操作要点	128	8.1.3 试样及设备	151
6.3.4 试验结果处理	128	8.1.4 压缩力学性能测定	153
6.3.5 应用范围及优缺点	129	8.1.5 压缩试验的破坏特征	157
6.4 显微硬度测定法	129	8.2 金属弯曲力学性能试验	158
6.4.1 维氏显微硬度	129	8.2.1 弯曲试验的工程应用及特点	158
6.4.2 努氏显微硬度	130	8.2.2 弯曲试验原理	158
*6.5 肖氏硬度	130		
6.5.1 试验原理	130		



8.2.3 弯曲力学性能的测定	162	9.7.1 金属管扩口试验	190
8.3 金属扭转试验	167	9.7.2 金属管弯曲试验	191
8.3.1 扭转试验的特点及应用	167	9.7.3 金属管卷边试验	192
8.3.2 扭转试验的原理	167	9.7.4 金属管压扁试验	193
8.3.3 扭转力学性能的测试	169	思考题	194
8.3.4 扭转力学性能指标的测定	170	第 10 章 复合材料的静态力学性能	
8.3.5 扭转试样的断裂分析	172	试验	195
8.4 金属剪切试验	172	10.1 拉伸性能试验	195
8.4.1 剪切试验的特点及应用	172	10.1.1 试验原理	195
8.4.2 剪切试验的原理	173	10.1.2 标准试验方法	195
8.4.3 剪切力学性能的测试	173	10.1.3 试样	195
思考题	178	10.1.4 试验设备和夹具	196
第 9 章 金属的工艺性能试验	179	10.1.5 试验过程	197
9.1 金属弯曲工艺性能试验	179	10.1.6 试验数据处理与表达	198
9.1.1 试样与试验装置	179	10.2 压缩性能试验	199
9.1.2 试验程序	181	10.2.1 试验原理	199
9.1.3 试验报告	181	10.2.2 标准试验方法分析	200
9.2 金属杯突工艺性能试验	181	10.2.3 试样	202
9.2.1 试样	181	10.2.4 试验设备和夹具	204
9.2.2 试验设备	182	10.2.5 试验程序	204
9.2.3 试验程序	183	10.2.6 试验数据处理与表达	205
9.2.4 试验报告	183	10.3 弯曲性能试验	206
9.3 金属丝材扭转工艺性能试验	183	10.3.1 试验原理	206
9.3.1 试样	184	10.3.2 标准试验方法	206
9.3.2 试验设备	184	10.3.3 弯曲试样	206
9.3.3 试验程序	184	10.3.4 试验设备和夹具	207
9.3.4 试验报告	185	10.3.5 试验程序	207
9.4 金属顶锻工艺性能试验	185	10.3.6 试验数据处理与表达	208
9.4.1 试样	185	10.4 面内剪切性能试验	210
9.4.2 试验设备	186	10.4.1 试验原理	210
9.4.3 试验程序	186	10.4.2 标准试验方法	210
9.4.4 试验报告	186	10.4.3 面内剪切试样	211
9.5 金属反复弯曲工艺性能试验	186	10.4.4 试验机和应变测量装置	212
9.5.1 试样	186	10.4.5 试验程序	212
9.5.2 试验设备	187	10.4.6 试验数据处理与表达	212
9.5.3 试验程序	188	10.5 层间剪切性能试验	213
9.5.4 试验报告	189	10.5.1 试验原理	213
9.6 金属线材缠绕工艺性能试验	189	10.5.2 标准试验方法	213
9.6.1 试样	189	10.5.3 层间剪切试样	214
9.6.2 试验设备	189	10.5.4 试验设备和夹具	215
9.6.3 试验程序	190	10.5.5 试验程序	215
9.6.4 试验报告	190	10.5.6 试验数据处理与表达	215
9.7 金属管材工艺性能试验	190	思考题	216



第3篇 疲劳断裂力学性能

第11章 金属的高周疲劳试验	217	第12章 金属的低周疲劳试验	238
11.1 基本概念	217	12.1 基本概念	238
11.1.1 疲劳破坏的特征	217	12.1.1 滞后回线	239
11.1.2 循环载荷	218	12.1.2 循环硬化和循环软化	240
11.1.3 循环应力参数	218	12.1.3 循环应力-应变曲线	241
11.1.4 疲劳试验的分类	219	12.1.4 应变-寿命曲线	242
11.1.5 疲劳 $S-N$ 曲线	219	12.1.5 低周疲劳的特点	243
11.1.6 疲劳极限	220	12.2 低周疲劳性能的测试	243
11.1.7 高周疲劳标准试验方法简介	220	12.2.1 标准试验方法	243
11.2 试验设备	220	12.2.2 试验设备	244
11.2.1 试验机类型及特点	220	12.2.3 试样与制备	245
11.2.2 疲劳试验机	221	12.2.4 测试技术要点	247
11.3 疲劳试样	221	12.2.5 低周疲劳试验的特点	249
11.3.1 应力集中与应力集中系数	221	12.3 循环应力-应变曲线的测定	249
11.3.2 试样类型及设计原则	222	12.3.1 单试样法	249
11.3.3 试样制备	224	12.3.2 多试样法	250
11.4 疲劳 $S-N$ 曲线的测试方法	224	12.3.3 增级试验法	250
11.4.1 单点试验法	224	12.4 试验数据的获得、处理及表达	250
11.4.2 成组试验法	225	12.4.1 试验数据的获得	250
11.4.3 升降法	226	12.4.2 试验数据的处理	250
11.5 试验数据处理及表达	228	12.4.3 试验结果的表达	252
11.5.1 疲劳 $S-N$ 曲线的数学模型	228	* 12.5 金属的热疲劳	252
11.5.2 疲劳试验记录	228	12.5.1 热疲劳现象	252
11.5.3 疲劳 $S-N$ 曲线的绘制	228	12.5.2 热疲劳试验方法	253
* 11.5.4 等寿命曲线图	229	* 12.6 金属的热-机械疲劳	254
* 11.6 成组对比试验结果的显著性 检验	230	12.6.1 热-机械疲劳现象	254
11.6.1 F 检验	230	12.6.2 试验原理及力学行为模型	254
11.6.2 t 检验	230	12.6.3 热-机械疲劳试验方法	255
11.6.3 疲劳对比试验	230	* 12.7 金属的疲劳-蠕变试验	256
* 11.7 $P-S-N$ 曲线	232	思考题	256
11.7.1 基本概念	232	第13章 金属的断裂韧性试验	257
11.7.2 $P-S-N$ 曲线的绘制	232	13.1 基本概念	258
* 11.8 金属的腐蚀疲劳试验	234	13.1.1 断裂韧性及其表征参量	258
11.8.1 腐蚀疲劳及特点	234	13.1.2 裂纹的基本形式	258
11.8.2 测试技术要点	235	13.1.3 线弹性断裂力学的几个基本 概念	259
11.9 影响疲劳极限的因素	235	13.1.4 线弹性断裂韧性参量: K_{Ic} , K_{R} 、 K_c 和 K_{app}	262
11.9.1 合金成分与组织结构	235	* 13.1.5 裂纹扩展能量释放率 G_I	264
11.9.2 表面状态与尺寸因素	236	* 13.1.6 弹塑性状态下的断裂韧性	266
思考题	236		



13.1.7 断裂韧度的测试方法	267	14.2.2 疲劳裂纹扩展速率 da/dN	296
13.1.8 断裂韧度的测试意义	268	14.2.3 疲劳裂纹扩展 $da/dN-\Delta K$ 曲线和门槛值 ΔK_{th}	297
13.2 金属平面应变断裂韧度 K_{Ic} 的 测定	268	14.2.4 描述 $da/dN-\Delta K$ 曲线的公式	297
13.2.1 试验原理	268	14.3 疲劳裂纹扩展速率的主要影响 因素	298
13.2.2 试样	269	14.3.1 微观织构的影响	298
13.2.3 试验设备	270	14.3.2 应力比的影响	299
13.2.4 试验程序	272	14.3.3 加载频率的影响	300
13.2.5 试验数据的处理及表达	273	14.3.4 厚度的影响	301
13.3 金属平面应力断裂韧度 K_{Ic} 及 $K_{R}-\Delta a$ 曲线的测定	274	14.3.5 超载的影响	302
13.3.1 试验原理	274	14.3.6 环境的影响	302
13.3.2 试样	275	14.4 疲劳裂纹扩展的阻滞	304
13.3.3 试验装置	275	14.4.1 裂纹闭合阻滞	304
13.3.4 有效裂纹尺寸的获取方法	275	14.4.2 载荷相互作用阻滞	306
13.3.5 试验程序	277	14.5 疲劳裂纹扩展速率试验	308
13.3.6 试验数据的处理及表达	277	14.5.1 疲劳裂纹扩展速率试验分类	308
13.4 金属延性断裂韧度 J_{Ic} 及 $J_R-\Delta a$ 曲线的测定	278	14.5.2 试样及试验设备	308
13.4.1 试验原理	279	14.5.3 裂纹长度测量方法	311
13.4.2 试样	279	14.5.4 试验方法要点	313
13.4.3 试验装置	280	14.5.5 试验数据的处理及测试报告	315
13.4.4 试验程序	280	14.6 疲劳裂纹扩展门槛值 ΔK_{th} 的测定	318
13.4.5 试验数据的处理及表达	282	14.6.1 试验原理	318
* 13.5 金属板材表面裂纹断裂韧度 K_{IE} 的测定	286	14.6.2 降 K 试验	319
13.5.1 试验原理	286	14.6.3 增 K 试验	321
13.5.2 试样	286	14.6.4 门槛值 ΔK_{th} 的确定及测试 报告	321
13.5.3 试验装置	286	* 14.7 谱载疲劳裂纹扩展速率试验	321
13.5.4 试验程序	288	14.7.1 试验方法要点	321
13.5.5 试验数据的处理与表达	288	14.7.2 试验结果表达	322
思考题	289	* 14.8 腐蚀疲劳裂纹扩展速率试验	323
第 14 章 金属的疲劳裂纹扩展速率 试验	290	14.8.1 试样	323
14.1 疲劳裂纹的形成与扩展	290	14.8.2 腐蚀试验装置	323
14.1.1 疲劳破坏的特点	290	14.8.3 试验方法要点	325
14.1.2 疲劳裂纹的形成和断裂过程	291	14.8.4 试验结果表达	325
* 14.1.3 疲劳裂纹萌生机制	291	* 14.9 疲劳小裂纹扩展速率试验	326
14.1.4 疲劳裂纹扩展的微观特征	293	14.9.1 小裂纹效应	326
14.2 疲劳裂纹扩展速率 $da/dN-\Delta K$ 曲线	295	14.9.2 试样	327
14.2.1 应力强度因子 K 和应力强度 因子幅 ΔK	296	14.9.3 小裂纹长度监测方法	328
		14.9.4 试验方法要点	329
		14.9.5 试验结果表达	329
		14.9.6 小结	329
		思考题	330

**第 15 章 非金属材料的疲劳、断裂和****冲击性能试验** 332

15.1 复合材料的疲劳试验 332

15.1.1 复合材料疲劳断裂的基本
概念 33215.1.2 复合材料疲劳试验的标准试验
方法 334

15.1.3 复合材料的拉伸疲劳试验 334

15.2 有机玻璃的疲劳试验 336

15.2.1 有机玻璃疲劳试验的特点 336

15.2.2 有机玻璃疲劳的标准试验
方法 336

15.2.3 有机玻璃的拉伸疲劳试验 337

15.3 复合材料的层间断裂韧性试验 339

15.3.1 层间断裂韧性试验基础 339

15.3.2 I 型层间断裂韧性试验 339

15.3.3 II 型层间断裂韧性试验 340

15.4 复合材料的冲击后压缩
试验 (CAI) 342

15.4.1 试验原理 342

15.4.2 CAI 标准试验方法 342

15.4.3 试样 342

15.4.4 试验设备和夹具 344

15.4.5 试验程序 344

15.4.6 试验数据的处理与表达 345

思考题 345

第 4 篇 长时力学性能**第 16 章 金属的持久和蠕变性能****试验** 346

16.1 基本概念 346

16.1.1 蠕变的定义 346

16.1.2 蠕变曲线 347

16.1.3 蠕变曲线数学表达式 348

16.1.4 持久和蠕变性能的表征参量 349

16.1.5 金属蠕变的变形和断裂机制 351

16.2 金属持久和蠕变性能的测试方法 354

16.2.1 标准试验方法分析与比较 354

16.2.2 试验方案设计 355

16.2.3 持久性能的测定 356

16.2.4 蠕变性能的测定 360

16.3 影响持久和蠕变性能的主要因素 363

16.3.1 金属内部组织结构的影响 363

16.3.2 工艺因素的影响 365

16.3.3 试验因素的影响 366

16.4 持久和蠕变寿命的预测方法 367

16.4.1 寿命预测方法 367

16.4.2 持久和蠕变热强综合参数曲线
方程的选择 370

16.5 试验数据的处理及表达 371

16.5.1 试验数据的处理 371

16.5.2 试验数据的表达 373

思考题 375

第 17 章 金属的氢脆试验 37717.1 氢脆试验航标与美国 ASTM 标准的
比较 377

17.2 氢脆试验方法 378

附录 380附录 A 金属材料国内外常用力学性能及
工艺性能试验标准方法目录 380附录 B 有机玻璃国内力学性能试验
标准方法目录 382附录 C 复合材料国内外力学性能试验
标准方法目录 383附录 D 金属材料性能测试国家标准与航空
标准相关术语、符号差异表 384附录 E 复合材料性能测试美国 ASTM 标准和
国家标准相关术语、符号差异表 386

附录 F 标准正态分布函数数值表 388

附录 G F 分布单侧分位数表 ($\alpha/2 =$
 0.05 和 $\alpha/2 = 0.025$) 389附录 H t 分布单侧分位数表 393附录 I χ^2 分布单侧分位数表 394附录 J 置信度 $\gamma = 95\%$ 和 $\gamma = 90\%$ 的最少
有效试样个数表 (可靠度 $P = 50\%$,
误差限度 $\delta = \pm 5\%$) 395

附录 K 相关系数检验表 396

参考文献 397

注意：章节序号前面的“*”表示非重点培训内容。

第1篇 基础知识

第1章 航空材料基础知识

航空材料基础知识主要描述材料性能及与其成分、结构、工艺的关系，航空主要结构材料的分类与应用，航空结构设计的发展及对材料性能的要求、复合材料概述、力学性能试验取样与制备、力学性能试验方案设计等方面的基础知识。它是从事航空材料力学性能测试、评价与表征人员应具备的专业基础理论知识，了解和掌握这些基础知识可以为检测人员选择试验方法、制订试验方案、分析评定试验结果提供基础依据。

1.1 材料性能

1.1.1 材料性能的分类

材料性能是表征材料在给定外界条件（如电、磁、光、声、热、力、环境等）下的行为参量。它包括物理性能、化学性能、力学性能、工艺性能和功能性能等。按材料性能的属性，可以分为材料固有性质和材料使用性能两大类。材料固有性质通常也称为材料基本性能，它是指材料对电、磁、光、声、热、机械载荷的反应，这些性质主要取决于材料的组成与结构，是材料使用的基本依据。材料使用性能是指材料在使用状态下表现出的行为，它与设计、工程环境密切相关。它虽不是材料物质所固有的，但材料一旦使用后其使用过程的变化（如疲劳断裂、腐蚀、辐射等）往往是材料应用成败的关键。有些材料的实验室性能很好，但在复杂的使用条件下，如氧化与腐蚀疲劳及其他复杂载荷下，就不能令人满意。因此材料使用性能应包括可靠性、耐久性、寿命预测及延寿措施等。有的材料可能不尽如人意，但通过优化设计可以得到解决，如脆性很大的陶瓷材料，有可能通过设计而得到广泛应用。图 1-1 所示为材料性能分类示意图。应该指出的是，本书所描述的材料性能是以力学性能为主。

材料承受载荷的力学状态一般采用各种力学参量（如应力、应变、冲击吸收能量、应力强度因子等）表示，而材料在外加载荷作用下或载荷与环境温度的联合作用下所表现出的各种力学参量之间的对应关系，称为材料的力学行为，通常以曲线或方程的形式表征。这些曲线或方程的特征值（斜率、拐点、极值、渐近线和终点等）通常就是材料力学性能的表征点。表征材料力学行为参量的临界值或规定值则称为材料的力学性能指标（如屈服强

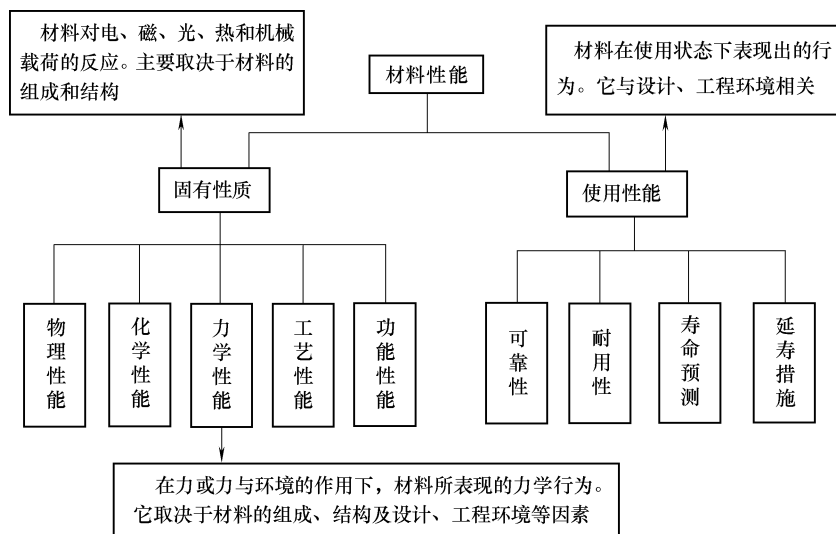


图 1-1 材料性能分类示意图

度、塑性应变、硬度、断裂韧性、蠕变强度、疲劳极限、疲劳裂纹扩展门槛值等)。这些性能指标都是在一定的变形或断裂条件下测定的，其中多数性能指标都是表征金属的变形抗力和变形能力的，可归纳成强度、塑性和韧性三大类。这些性能不仅是评定和选用材料及确定加工工艺的基本依据，而且是工程应用中结构强度设计、结构完整性评估的基础依据。

1.1.2 材料性能与其成分、组织、工艺及结构设计的关系

材料的各种基本性能和使用性能既是表征和评价材料理化、力学行为的主要指标，又是工程结构设计与包括强度计算、寿命预测等结构完整性评估的前提条件。对于一个产品而言，设计是核心，材料是基础，工艺是关键，而材料性能则是连接材料研制、工艺研究与工程结构设计的桥梁。材料科学研究材料的成分、组织、工艺与性能的关系，以促进新型材料的不断发展。但要使材料从实验室走向商品化，必须进行材料的工程化应用研究，以满足结构设计的安全性、可靠性、耐久性和经济性的要求。为实现上述目标，需要设计、材料、工艺和性能四方面科学工作者的共同合作，使材料不断改进、成熟。对设计者来说，一方面通过对材料性能的深化认识和理解，充分利用和发挥材料的应用潜力，合理选用材料，使结构达到优化设计；另一方面，根据结构的设计思想、构件的使用条件和材料在使用中暴露的问题，提出对材料基本性能和使用性能的要求，以促进先进材料发展。材料和工艺研究者通过对材料结构、工艺与性能关系的研究，改进工艺制备过程，进而达到提高和改善材料性能的目的。而材料性能研究与测试工作者则一方面利用现有的标准试验方法或发展新的测试技术获取材料性能数据；另一方面对材料在给定外界条件下的行为从现象到机理、从宏观到微观的不同层次进行系统深入的理论研究，揭示其内在规律，发展新的材料性能表征与评价技术，从而为结构设计、选材、强度计算、寿命预测、结构完整性评定以及为材料和工艺的研制与应用，提供可靠的材料性能数据和科学理论依据。因此材料性能表征与测试技术的创新，反过来又会推动材料科学与工程装备的技术进步。图 1-2 所示为材料性能与其成分、组织、工艺及结构设计的关系示意图。