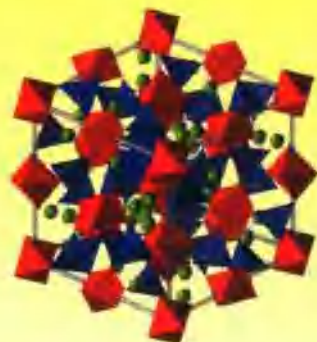


普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

WUTP

材料力学性能

高建明 主编



武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材

材料力学性能

主 编 高建明

副主编 程晓敏 余新泉

武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

【内容简介】

本书系统地阐述了材料在静荷载、动荷载作用下的力学性能,材料的断裂和断裂韧性,材料的摩擦与磨损,材料的蠕变及高温下材料其他的力学性能。在此基础上,还分别阐述了陶瓷材料、高分子材料、复合材料、水泥混凝土材料的力学性能。

本书可作为高等院校材料科学与工程类专业教材,也可供从事材料研究与开发的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学性能/高建明主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2004.8

ISBN 7 5629-2137-7

I. 材… II. 高… III. 材料力学性质-高等学校-教材 IV. TB303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 005297 号

【主编简介】

高建明 东南大学教授。1978年10月考入南京工学院(现东南大学)土木工程系无机非金属材料专业学习,1982年8月毕业留校任教,1988年获无机非金属材料专业硕士学位。1990年8月至1992年2月及1996年11月至1997年11月作为访问学者赴日本爱知工业大学学习。1993年起享受政府特殊津贴。

长期以来,主要从事无机非金属材料的教学、研究、产品开发及建筑材料的检验和试验等工作。主讲《混凝土科学》、《混凝土工程》、《建筑材料》等课程。研究领域涉及高性能水泥混凝土材料及制品、新型墙体材料、纤维水泥与纤维混凝土、环境友好混凝土、高强度轻量混凝土、建材企业质量管理技术等方面。作为项目负责人和主要参加者完成国家自然科学基金项目、国家攻关项目、省部委项目10余项。在CCR、CCC、ACI等国内外杂志和学术会议上发表学术论文30余篇。先后获得国家发明三等奖、教育部科技进步二等奖、江苏省科技进步二、三等奖等。

E-mail:jmgao@scu.edu.cn

出版发行:武汉理工大学出版社(武汉市珞狮路122号 邮政编码:430070)

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

E-mail:tiandq@mail.whut.edu.cn

印 刷:武汉理工大印刷厂
开 本:787×1092 1/16
印 张:12.5
字 数:316千字
版 次:2004年8月第1版
印 次:2004年8月第1次印刷
印 数:1~3000册
定 价:18.00元

前 言

由于国家教育部调整了本科专业目录,大部分高校开始按材料科学与工程一级学科设置本科专业,原有的教材难以满足宽口径的材料科学与工程专业的需求。因此,为了适应材料科学与工程专业课程教学的要求,本书根据普通高等学校材料科学与工程类专业本科层次新编系列教材大纲的要求,结合编者多年从事材料力学性能的教学和实践经验,并在国内外相关教材的基础上进行编写。在内容上力求体现金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料的共同的力学基础,旨在整合成一门宽口径的材料科学与工程学的学科基础课。

本书由东南大学高建明教授担任主编,武汉理工大学程晓敏教授、东南大学余新泉教授担任副主编。参加编写的人员有:绪论、第8章由高建明(东南大学)编写;第1章、第3章由余新泉(东南大学)编写;第2章、第4章由程晓敏(武汉理工大学)编写;第5章由李敏(东南大学)编写;第6章、第7章由袁华(同济大学)编写。

编者在编写过程中引用了一些单位和同志的成果、资料以及图表和照片,在此致以谢意!

本书主要适用于材料科学与工程专业,并可供从事材料设计、研究人员学习参考。由于时间仓促,加上编者学识水平有限,书中的不妥之处甚至错误在所难免,衷心希望广大读者批评指正!

编 者

2003年7月

普通高等学校材料科学与工程类专业 新编系列教材编审委员会

顾 问：郭景坤 袁润章 范令惠 杨南如
胡道和 王民权 岳文海 曹文聪

主任委员：张联盟

副主任委员：徐德龙 郑治祥 雷绍锋

委 员：（以姓氏笔画为序）

万发荣	马保国	王国梅	王培铭	文梓芸
叶卫平	叶枝荣	叶 菁	田道全	曲祖元
刘亚云	刘 军	孙成林	吴建青	陈 文
杨长辉	钱觉时	钱春香	高建明	徐秋林
黄佳木	黄学辉	程晓敏	程 新	谢峻林
曾令可	葛 勇	潘 伟	薛理辉	

秘 书 长：田道全

总责任编辑：徐秋林

出版说明

材料是社会文明和科技进步的物质基础和先导,材料科学与能源科学、信息科学一并被列为现代科学技术的三大支柱,其发展水平已成为一个国家综合国力的主要标志之一。教育部颁布重新修订的《普通高等学校本科专业目录》后,为适应 21 世纪人才培养需要,及时组织并实施了面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划、世界银行贷款 21 世纪初高等理工科教育教学改革项目,部分高等学校承担了其中材料科学与工程专业教学改革项目的研究与实践。已经拓宽了专业面的材料科学与工程专业,相应的业务培养目标、业务培养要求、主干学科、主要课程、主要实践性教学环节等都有了不同程度的变化。原有的教材已经不能适应新专业的培养目标和教学要求,组织一套新的材料科学与工程专业系列教材已成为众多院校的翘首之盼。武汉理工大学出版社在教育部高等学校材料科学与工程专业教学指导委员会的指导和支持下,经过大量的调研,组织国内几十所大学材料科学与工程学科的知名教授组成“普通高等学校材料科学与工程专业新编系列教材编审委员会”,共同编写了这套系列教材。

本套教材的主、参编人员及编委会顾问,遵照教育部材料科学与工程专业教学指导委员会的有关会议及文件精神,经过充分研讨,决定首批编写出版 14 种主干课程的教材,以尽快满足全国众多院校的教学需要,以后再根据专业方向的需要逐步增补。本套新编系列教材的编写具有以下特色:

教材体系体现人才培养目标 本套系列教材的编写体现了高等学校材料科学与工程专业的人才培养目标和教学要求,从整体上考虑材料科学与工程专业课程设置和各门课程的内容安排,按照教学改革方向要求的学时统一协调与整后合,组成一套完整的、各门课程有机联系的系列化教材。本套教材的编写除正文以外,还增加了本章内容提要、本章小结、思考题与习题等内容,以使教材既适合于教学需要,又便于学生自学。

教材内容反映教改成果 本套系列教材的编写坚持“少而精”的原则,紧跟教学内容和课程体系改革的步伐,教材内容注重更新,反映教学改革的阶段性成果,以适应 21 世纪材料科学与工程专业人才的培养要求。本套系列教材的编写中,凡涉及材料科学与工程学科的技术规范与标准,全部采用国家最新颁布实施的技术规范和标准。

教材出版实现立体化 本套教材努力使用和推广现代化的教学手段,实现立体化出版,凡具备条件的课程都将根据教学需要,及时组织编写、制作和出版相应的电子课件或教案,以适应教育方式的变革。

本套教材是在教育部颁布实施重新修订的本科专业目录后,组织全国多所高等学校材料科学与工程学科的具有丰富教学经验的教授们共同编写的一套面向新世纪、适应新专业的全新的系列教材。能够为新世纪我国材料科学与工程专业教材建设贡献微薄之力,自是我们应尽的责任和义务,我们感到十分欣慰。然而,正因其为一套开创性的系列教材,尽管我们的编审者、编辑出版者夙兴夜寐、尽心竭力,不敢稍有懈怠,它仍然还会存在缺点和不足。嚶其鸣矣,求其友声,我们诚恳希望选用本套教材的广大师生在使用过程中给我们多提宝贵的意见和建议,以便我们不断修改、完善全套教材,共同为我国高等教育事业的发展作出贡献。

目 录

绪论	(1)
1 静载荷下材料的力学性能	(3)
1.1 应力-应变曲线	(3)
1.2 弹性变形阶段	(4)
1.2.1 弹性模量	(4)
1.2.2 弹性比功	(6)
1.2.3 滞弹性	(7)
1.2.4 包辛格(Bauschinger)效应	(7)
1.3 塑性变形阶段	(8)
1.3.1 屈服现象	(8)
1.3.2 形变强化	(10)
1.3.3 颈缩现象	(12)
1.3.4 塑性度量	(14)
1.4 材料的断裂	(15)
1.4.1 断裂类型	(15)
1.4.2 解理断裂	(18)
1.4.3 微孔聚集断裂	(19)
1.5 其他加载方式下的力学性能	(21)
1.5.1 应力状态软性系数	(21)
1.5.2 压缩	(22)
1.5.3 弯曲	(23)
1.5.4 扭转	(25)
1.5.5 硬度	(26)
思考题与习题	(30)
2 动载荷下材料的力学性能	(32)
2.1 缺口效应	(32)
2.1.1 缺口试样的应力分布	(32)
2.1.2 缺口试样的静拉伸和偏斜拉伸	(34)
2.2 冲击韧性	(36)
2.2.1 冲击载荷下的变形与断裂	(36)
2.2.2 冲击韧性试验	(37)
2.3 低温脆性	(39)
2.3.1 低温脆性现象	(39)
2.3.2 冷脆转变温度及落锤试验	(40)

2.3.3	影响冲击韧性和冷脆转变温度的因素	(13)
2.4	疲劳现象及其一般规律	(15)
2.4.1	变动载荷与疲劳失效	(15)
2.4.2	疲劳曲线及疲劳抗力	(17)
2.5	疲劳裂纹的形成和扩展	(51)
2.5.1	疲劳裂纹的形成	(51)
2.5.2	疲劳裂纹的扩展	(52)
2.5.3	影响疲劳强度的因素	(53)
	思考题与习题	(58)
3	断裂力学与断裂韧度	(59)
3.1	材料的断裂理论	(60)
3.1.1	理论断裂强度	(60)
3.1.2	格里菲斯(Griffith)断裂理论	(61)
3.1.3	奥罗万(Orowan)的修正	(62)
3.1.4	裂纹扩展的能量判据	(63)
3.2	材料的断裂韧度	(64)
3.2.1	线弹性条件下的断裂韧度	(64)
3.2.2	弹塑性条件下的断裂韧度	(73)
3.3	断裂韧度 K_{IC} 的测试	(76)
3.3.1	试样形状、尺寸及制备	(76)
3.3.2	测试方法	(77)
3.3.3	试验结果的处理	(78)
3.4	影响断裂韧度的因素	(79)
3.4.1	外部因素	(79)
3.4.2	内部因素	(80)
3.4.3	断裂韧度与常规力学性能指标之间的关系	(82)
	思考题与习题	(84)
4	材料的其他力学性能	(86)
4.1	摩擦与磨损	(86)
4.1.1	摩擦与磨损现象	(86)
4.1.2	磨损类型及耐磨性	(87)
4.2	磨损机理	(87)
4.2.1	粘着磨损	(87)
4.2.2	磨粒磨损	(89)
4.2.3	腐蚀磨损	(92)
4.2.4	微动磨损	(93)
4.3	磨损试验	(93)
4.3.1	磨损试验方法	(93)
4.3.2	提高耐磨性的途径	(95)

4.4	蠕变	(96)
4.4.1	蠕变现象	(96)
4.4.2	蠕变变形与断裂机理	(97)
4.4.3	蠕变极限与持久强度	(99)
4.5	其他高温力学性能	(103)
4.5.1	高温短时拉伸性能	(103)
4.5.2	高温硬度	(103)
4.5.3	高温疲劳	(103)
	思考题与习题	(105)
5	陶瓷材料的力学性能	(106)
5.1	弹性性能	(106)
5.1.1	弹性及弹性模量	(106)
5.1.2	温度对弹性模量的影响	(108)
5.1.3	孔隙率对弹性模量的影响	(108)
5.2	硬度	(109)
5.2.1	维氏硬度	(109)
5.2.2	显微硬度	(110)
5.2.3	劳克维尔硬度	(110)
5.2.4	硬度与其他性能之间的关系	(111)
5.3	强度	(112)
5.3.1	理论强度	(112)
5.3.2	陶瓷材料的断裂强度	(113)
5.3.3	陶瓷材料的抗弯强度	(113)
5.3.4	影响强度的因素	(114)
5.4	断裂韧性	(119)
5.4.1	陶瓷材料的断裂韧性	(119)
5.4.2	陶瓷材料断裂韧性的测定	(120)
5.5	陶瓷材料的抗热震性	(120)
5.5.1	抗热震断裂	(120)
5.5.2	抗热震损伤	(121)
	思考题与习题	(121)
6	高分子材料的力学性能	(122)
6.1	高分子材料的变形	(123)
6.1.1	形变行为和描述力学行为的基本物理量	(123)
6.1.2	形变性能分类	(124)
6.2	高分子材料的断裂与强度	(138)
6.2.1	高分子材料的断裂模式	(138)
6.2.2	高聚物的强度	(139)
	思考题与习题	(142)

7	复合材料的力学性能	(143)
7.1	复合材料的变形	(144)
7.2	连续纤维增强复合材料的强度	(145)
7.2.1	各向异性材料的应力-应变关系	(145)
7.2.2	单层板的应力-应变关系	(149)
7.2.3	单层板强度理论	(151)
7.2.4	单向复合材料的微观力学性能	(153)
7.3	短纤维增强复合材料的强度	(155)
7.3.1	短纤维增强复合材料的应力传递	(156)
7.3.2	短纤维增强复合材料的工程弹性常数	(158)
7.3.3	短纤维增强复合材料的强度	(159)
7.4	纤维增强复合材料的断裂与疲劳	(160)
7.4.1	纤维复合材料的断裂	(160)
7.4.2	复合材料的疲劳	(161)
	思考题与习题	(165)
8	普通混凝土的力学性能	(167)
8.1	普通混凝土的结构	(168)
8.2	普通混凝土的强度	(169)
8.2.1	混凝土立方体抗压强度	(169)
8.2.2	混凝土立方体抗压标准强度与强度等级	(170)
8.2.3	混凝土的轴心抗压强度	(170)
8.2.4	混凝土的抗拉强度	(171)
8.2.5	混凝土的抗折强度	(171)
8.3	影响普通混凝土强度的因素	(172)
8.3.1	水泥强度等级和水灰比	(172)
8.3.2	粗集料与浆集比	(174)
8.3.3	养护温度与湿度	(174)
8.3.4	龄期的影响	(176)
8.3.5	提高混凝土强度和促进强度发展的主要措施	(176)
8.4	普通混凝土的脆性断裂	(178)
8.4.1	混凝土材料的理论强度与实际强度	(178)
8.4.2	混凝土的裂缝扩展过程	(178)
8.4.3	混凝土的强度理论	(180)
8.5	普通混凝土的变形	(180)
8.5.1	物理化学因素引起的变形	(180)
8.5.2	在短期荷载作用下的变形	(182)
8.5.3	长期荷载作用下的变形——徐变	(184)
	思考题与习题	(185)
	参考文献	(187)

绪 论

任何一种零件和构件,都是由材料制成的。而任何一种工程材料,不管是金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料,还是其他特殊材料,能否在工程中得到实际应用,取决于该材料是否具有良好的使用性能,包括材料的物理性能、化学性能、工艺性能和力学性能。对结构材料来说,材料的力学性能是最重要的。

材料的力学性能主要指材料在外加荷载作用下或荷载与环境因素联合作用下所表现出的力学行为,这种行为宏观上一般表现为材料的变形和断裂。当材料对变形和断裂的抵抗力与服役条件不适应时,则材料将失去预期的使用功能。材料的力学性能通常用材料的弹性、塑性和强度等来描述。弹性是指材料在外力作用下保持固有形状和尺寸的能力,以及在外力除去后材料可恢复原有的形状和尺寸的能力。塑性是材料在外力作用下发生不可逆的永久变形的能力。强度是材料对塑性变形和断裂的抵抗力。此外,力学性能还包括材料在外力长期或重复的作用下以及材料在外力和环境双重因素作用下,抵抗损伤和失效的能力。

材料的力学性能主要与材料的化学组成和组织结构、材料的制备工艺、材料表面和内部缺陷等内在因素有关,同时又与材料的外荷载性质、荷载谱、应力状态以及温度、环境介质等外在因素有关。了解影响材料力学性能的内在因素和外在因素,对于理解材料力学性能的变化规律、正确选用材料以及明确改进材料性能的方向是十分重要的。

《材料力学性能》一书是按普通高等学校材料科学与工程类专业新编系列教材大纲的要求编写的,是材料科学与工程类专业一门主要的技术基础课程。学习本课程的目的是使学生能够从工程应用中各种材料最常见的服役条件和失效现象出发,了解材料在外荷载作用下,或外荷载与环境因素的共同作用下,材料的失效过程、失效现象的微观机理和力学模型,理解和掌握衡量材料失效的力学性能指标;掌握各种力学性能指标的物理概念、实用意义,以及基本力学性能的测试原理与技术;理解它们之间的相互关系;学会分析各种内在因素和外在条件对材料力学性能指标的影响规律。从而使学生掌握如何在工程中正确选择和合理使用材料的科学方法,并为研制新材料、改进和创新工艺、充分发挥材料性能潜力指明方向。

本书共分8章,系统地阐述了材料在静荷载、动荷载作用下的力学性能,材料的断裂和断裂韧度,材料的摩擦与磨损,材料的蠕变及高温下材料其他的力学性能。在阐述材料力学性能共性的基础上,还分别阐述了陶瓷材料、高分子材料、复合材料、水泥混凝土材料的力学性能,这些材料是目前我国工程中正在或即将大量使用的工程结构材料。

学习《材料力学性能》需要学生具备材料科学基础、材料力学方面的基本理论知识。学生学习时,应注意应用先修课程中学过的知识来解释材料的结构与力学性能间的关系。材料力学性能是一门实用性很强的课程,书中相当多的力学性能指标是根据工程实用要求定义的。因此,学习本课程时,要求学生在掌握所学知识的同时,注意理论联系实际。这就是说,学生在学习理解一些重要的力学定理和公式时,应充分理解这些定理、公式在实际工程中的适用范围。

实验课是本课程重要的教学环节,通过实验可使学生掌握材料力学性能的测试原理、测试

方法；了解测试设备及基本操作规范；并培养学生对实验数据和实验结果进行正确分析和判断的能力，培养科学认真的态度和实事求是的工作作风。通过实验还可进一步帮助学生理解力学指标的物理概念与实用意义。为了加深对所学知识的理解，巩固所学的知识，本书每章均附有一定的习题，学生可选择其中一部分进行思考练习。

1 静载荷下材料的力学性能

本章提要

静载荷下材料的力学性能包括材料的拉伸、压缩、扭转、弯曲及硬度等性能。拉伸试验常采用标准的光滑圆柱试样,在确定的试验条件(温度、应力状态、加载速率和环境)下,测定材料的弹性、强度、塑性、应变硬化等许多重要力学性能指标,并揭示材料在静载荷下常见的三种失效形式,即过量弹性变形、塑性变形、断裂。采用压缩、扭转和弯曲试验方法的目的在于许多机件或工具在实际服役时常承受轴向压缩、扭转或弯曲作用,有必要测定制造这类机件或工具的材料在相应承载条件下的力学性能指标;同时,不同加载方式在试样中将产生不同的应力状态,不同应力状态下材料的失效行为不完全相同。硬度试验方法在工业生产和科研等方面应用极为广泛。但是“硬度”并不是材料独立的力学性能指标,其物理意义随试验方法而不同。本章将分别介绍拉伸、压缩、扭转、弯曲及硬度等试验方法的特点、应用范围及其所测定的力学性能指标的物理概念与实际意义。

1.1 应力-应变曲线

拉伸试验是指在室温大气中,光滑试样在缓慢施加的单向载荷作用下,测定材料的力学性能的方法。拉伸试验机通常带有自动记录或绘图装置,用以记录或绘制试样所受载荷与伸长量之间的关系,这种曲线称为拉伸图或力-伸长曲线。图 1.1(a)即为退火低碳钢的拉伸图,将图 1.1(a)中的纵、横坐标分别用拉伸试样的原始截面积和原始标距长度去除,得到应力-应变曲线,即图 1.1(b)。比较图 1.1(a)和图 1.1(b),可以看出,两者具有相同或相似的形状,但坐标刻度不同,意义不同。

对退火的低碳钢,在拉伸的应力-应变曲线上,出现平台,即在应力不增加的情况下材料可继续变形,这一平台称为屈服平台,见图 1.1(b);平台的拉伸长度随钢中的含碳量增加而减少,当含碳量增至 0.6%以上,平台将消失。低碳钢在拉伸过程中可分为:弹性变形,不均匀塑性变形,均匀塑性变形,不均匀集中塑性变形四个阶段。图 1.2 还给出了不同类型材料的几种典型的拉伸应力-应变曲线。对多数金属材料,其拉伸应力-应变曲线如图 1.2(a)所示,该图所绘的虽是一铝合金,但铜合金和中碳合金结构钢(经淬火及中高温回火处理)也是如此,与图 1.1(b)不同的是,材料由弹性变形连续过渡到塑性变形,塑性变形时没有锯齿平台,而变形时总伴随着加工硬化;对高分子材料,如聚氯乙烯,在拉伸开始时应力和应变就不成直线关系,见图 1.2(b),即不服从虎克定律,而且变形表现为粘弹性。图 1.2(c)为苏打石灰玻璃的应力-应变曲线,图中只显示弹性变形,没有塑性变形就立即断裂,这是完全脆断的情形。工程结构陶瓷材料像 Al_2O_3 和 SiC 等均属这种情况,淬火态的高碳钢、普通灰铸铁也属这种情况。

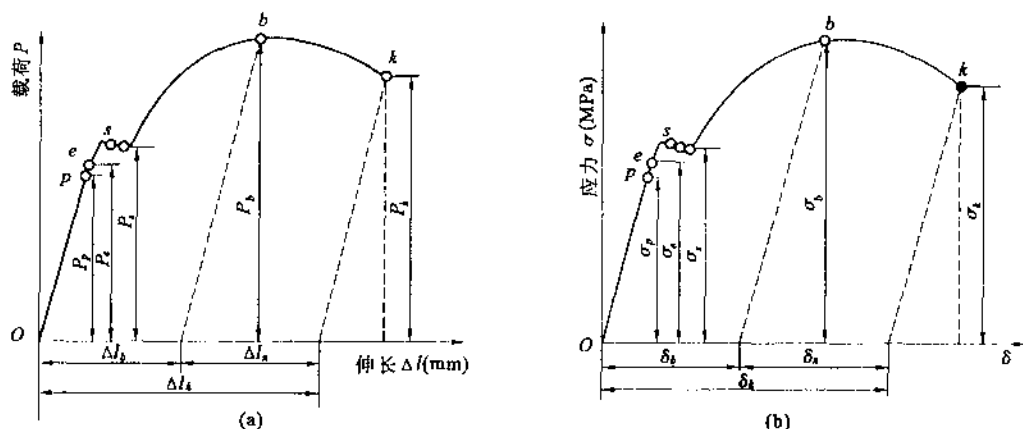


图 1.1 低碳钢的拉伸图和应力-应变曲线

(a) 拉伸图; (b) 应力-应变曲线

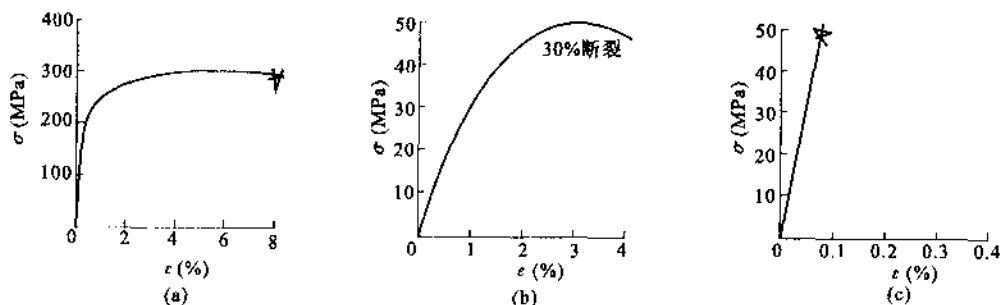


图 1.2 几种典型材料的应力-应变曲线

(a) 铝合金(5454-H34); (b) 聚氯乙烯; (c) 苏打石灰玻璃

1.2 弹性变形阶段

1.2.1 弹性模量

在弹性变形阶段,大多数金属的应力与应变之间符合虎克定律的正比关系,如拉伸时 $\sigma = E\varepsilon$,剪切时 $\tau = G\gamma$,其中 E 和 G 分别为拉伸杨氏模量和剪切模量。工程上又把弹性模量 E 、 G 称为材料的刚度,它表示材料在外载荷下抵抗弹性变形的能力。在机械设计中,有时刚度是第一位的。精密机床的主轴如果不具有足够的刚度,就不能保证零件的加工精度。若汽车拖拉机中的曲轴弯曲刚度不足,就会影响活塞、连杆及轴承等重要零件的正常工作;若扭转刚度不足,则可能会产生强烈的扭转振动。曲轴的结构和尺寸常常由刚度决定,然后作强度校核。通常由刚度决定的尺寸远大于按强度计算的尺寸。

不同类型的材料,其弹性模量可以差别很大,因而在给定的载荷下,产生的弹性挠曲变形也就会相差悬殊。例如一个悬臂结构,在梁长度和截面尺寸相同的情况下,如选用钢、铝合金和聚苯乙烯这三种材料进行比较,当外加载荷是 98N,如钢梁的弹性挠曲变形为 1cm,则铝合金为 3cm,而聚苯乙烯则为 60cm。材料的弹性模量主要取决于结合键的本性和原子间的结合

力,而材料的成分和组织对它的影响不大,所以说它是一个对组织不敏感的性能指标,这是弹性模量在性能上的主要特点。改变材料的成分和组织会对材料的强度(如屈服强度、抗拉强度)有显著影响,但对材料的刚度影响不大。从大的范围说,材料的弹性模量首先决定于结合键。共价键结合的材料弹性模量最高,所以像 SiC、Si₃N₄ 陶瓷材料和碳纤维的复合材料有很高的弹性模量。而主要依靠分子键结合的高分子,由于分子键力弱,其弹性模量最低。金属键有较强的键力,材料容易塑性变形,其弹性模量适中,但由于各种金属原子结合力不同,也会有很大的差别,例如铁(钢)的弹性模量为 210GPa,是铝(铝合金)的 3 倍($E_{Al} \approx 70\text{GPa}$),而钨的弹性模量又是铁的两倍($E_w \approx 410\text{GPa}$)。弹性模量是与材料的熔点成正比的,越是难熔的材料其弹性模量也越高。表 1.1 列出几种工程材料的弹性模量。

表 1.1 几种材料的弹性模量

材料名称	E(GPa)	G(GPa)	ν
铝	70.3	26.1	0.345
铜	129.8	48.3	0.343
铁	211.4	81.6	0.293
镁	44.7	17.3	0.291
镍	199.5	76.0	0.312
铌	104.9	37.5	0.397
钽	185.7	69.2	0.342
钛	115.7	43.8	0.321
钨	411.0	160.6	0.280
钼	127.6	46.7	0.365
氧化铝	~415	—	—
金刚石	~965	—	—
玻璃	80.1	31.5	0.27
尼龙 66	1.2~2.9	—	—
聚碳酸酯	2.4	—	—
聚乙烯	0.4~1.3	—	—
聚苯乙烯	2.7~4.2	—	—
石英(熔融)	73.1	31.2	0.170
碳化硅	~470	—	—
碳化钨	534.5	219.0	0.22

零件的刚度与材料的刚度是不同的,它除了决定于材料的刚度外,还与零件的截面尺寸与形状以及载荷作用的方式有关。

当既要提高材料刚度,又要求减轻零件的自重时,就要以材料的比刚度来评定。材料的比刚度依载荷形式而定,拉伸试棒或杆件时,其比刚度以 E/ρ 来度量, ρ 为材料的密度;当零件或构件以梁的形式出现时,其比刚度以 $E^{1/2}/\rho$ 来度量;板受弯曲时材料的比刚度以 $E^{1/3}/\rho$ 来度量。表 1.2 列出几种典型材料的比刚度。可以看出,当零件是受拉伸的杆件,如以 E/ρ 作为选材判据,高强度钢、铝合金和玻璃纤维增强的复合材料三者没有多大差别。但如果是悬臂梁,最大刚度由 $E^{1/2}/\rho$ 决定,铝合金就比钢好得多,这就是为什么飞机的主框架选用铝合金的道理;而玻璃纤维复合材料并不比铝合金好多少。如为一大平板均匀受载时,最大刚度由

$E^{1/2}/\rho$ 决定,碳纤维复合材料的优点就很突出,虽然材料成本较高,但在战斗机或直升飞机的尾翼仍得到广泛采用。

表 1.2 几种材料的比刚度

材 料	密度 ρ ($g \cdot cm^{-3}$)	杨氏模量 E (GPa)	屈服强度 σ_s (MPa)	断裂韧性 K_{IC} ($MPa \cdot m^{1/2}$)	E/ρ	$E^{1/2}/\rho$	$E^{1/3}/\rho$	σ_s/ρ
复合材料: CFRP, 58% 单向碳 纤维在环氧树脂中	1.5	189	1050	32~15	126	9	3.8	700
GFRP, 50% 单向 玻璃纤维在聚酯中	2.0	48	1240	12~60	24	3.5	1.8	620
高强度钢	7.8	207	1000	100	27	1.8	0.76	128
铝合金	2.8	71	500	28	25	3.0	1.5	179

1.2.2 弹性比功

对于弹簧零件来说,不管弹簧的形状如何(是螺旋弹簧还是板弹簧),也不管弹簧的受力方式如何(是拉压还是弯扭),都要求其在弹性范围内(弹性极限以下)有尽可能高的弹性比功。弹性比功为应力-应变曲线下弹性范围内所吸收的变形功,即

$$a_e = \frac{1}{2} \sigma_s \epsilon_s = \frac{1}{2} \frac{\sigma_s^2}{E}$$

式中 a_e —— 弹性比功;

ϵ_s —— 材料最大弹性应变;

σ_s —— 材料的弹性极限,它表示材料发生弹性变形的极限抗力。

理论上弹性极限的测定应该是通过不断加载与卸载,直到能使变形完全恢复的极限载荷。实际上在测定弹性极限时是以规定某一少量的残留变形(如 0.01%)为标准,对应此残留变形的应力即为弹性极限。

弹簧在工作时,既要起缓冲和减震作用,又要传递动力,在一些仪表中它又是测力元件。不能单纯理解弹簧的作用就是为了缓冲和消震,否则我们应选取高阻尼性能的材料,如高分子塑料、软金属和橡胶。拿汽车板簧为例,它把车架所支承的汽车重量或载荷,传递给车桥和车轮,也把驱动的动力传递给车架,这就要求材料有尽可能高的弹性比功。几种金属材料的弹性比功如表 1.3 所示。

表 1.3 几种金属材料的弹性比功

材 料	E (MPa)	σ_s (MPa)	a_e ($MJ \cdot m^{-3}$)
中碳钢	210000	310	0.228
高碳弹簧钢	210000	965	2.217
硬 铝	72400	125	0.108
铜	110000	27.5	3.44×10^{-3}
铍青铜	120000	588	1.44
磷青铜	101000	450	1.0

1.2.3 滞弹性

理想的弹性体其弹性变形速度是很快的,相当于声音在弹性体中的传播速度。因此,在加载时可认为变形立即达到应力-应变曲线上的相应值,卸载时也立即恢复原状,也就是说应变与应力始终保持同步。但是在实际中,材料有应变落后于应力现象,这种现象叫滞弹性。对于多数金属材料,如果不是在微应变范围内精密测量,其滞弹性不是十分明显,而有少数金属特别像铸铁、高铬不锈钢则有明显的滞弹性。例如普通灰铸铁在拉伸时,其在弹性变形范围内应力和应变并不遵循直线 AC 关系,如图 1.3,而是加载时沿着直线 ABC,在卸载时不是沿着原途径,而是沿着 CDA 恢复原状。加载时试样储存的变形功为 ABCE,卸载时释放的弹性变形能为 ADCE,这样在加载与卸载的循环中,试样储存的弹性能为 ABCDA,即图中阴影线面积。这个滞后环面积虽然很小,但在工程上对一些产生振动的零件却很重要,它可以减小振动,使振动幅度很快地衰减下来,正是因为铸铁有此特性,故常被用来制作机床床身和内燃机的支座。汽轮机叶片除了考虑耐热和防锈的性能之外,也由于含 12%Cr 的铬钢有良好的消振性能,可以减小叶片材料自身振动和外载荷下的振动引起的共振,从而避免因共振造成叶片断裂。这是生产上利用了材料滞弹性的一面。但是滞弹性也有不好的一面,如在精密仪表中的弹簧、油压表或气压表的测力弹簧,要求弹簧薄膜的弹性变形能灵敏地反映出油压或气压的变化,因此不允许材料有显著的滞弹性。对于高分子材料,滞弹性表现为粘弹性并成为材料的普遍特性,这时高分子材料的力学性能都与时间有关了,其应变不再是应力的单值函数也与时间有关。高分子材料的粘弹性主要是由于大的分子质量使应变对应力的响应较慢所致。

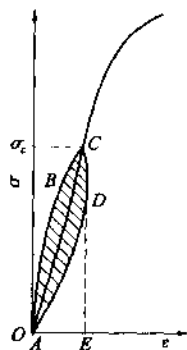


图 1.3 弹性滞后环

1.2.4 包辛格 (Baushinger) 效应

图 1.4 为退火轧制黄铜在不同加载条件下规定残余伸长应力的变化情况。曲线 1 为初始拉伸, $\sigma_r = 240\text{MPa}$; 曲线 2 为初始压缩, $\sigma_r = -176\text{MPa}$ 。

若将经初始压缩后的试样卸载,再进行第二次压缩加载,发现 $\sigma_r = 287\text{MPa}$ (曲线 3)。如果经过初始压缩的试样,卸载后进行第二次拉伸,则 $\sigma_r = 85\text{MPa}$ (曲线 4)。

金属材料经过预先加载产生少量塑性变形(残余应变小于 1%~4%),而后再同向加载,规定残余伸长应力增加;反向加载,规定残余伸长应力降低的现象,称为包辛格效应。对某些钢和钛合金,因包辛格效应可使规定残余伸长应力降低 15%~20%,所有退火状态和高温回火的金属与合金都有包辛格效应,因此,包辛格效应是多晶体金属所具有的普遍现象。

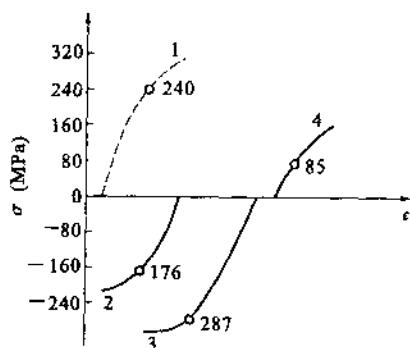


图 1.4 包辛格效应(图上数值为 σ_r 值)

包辛格效应可以用位错理论解释。第一,在原先加载变形时,位错源在滑移面上产生的位错遇到障碍,塞积后产生了背应力,这背应力反作用于位错源,当背应力(取决于塞积产生的应力集中)足够大时,可使位错源停止开动。背应力是一种长程(晶粒或位错胞尺寸范围)内应