

材料科学与工程专业系列教材

材料力学性能

王吉会 郑俊萍 刘家臣 黄定海 编

**Mechanical Behavior
of Materials**



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

材料科学与工程专业系列教材

材料力学性能

Mechanical Behavior of Materials

王吉会 郑俊萍 刘家臣 黄定海 编



内 容 提 要

本书主要介绍材料在外加载荷或载荷和环境因素(温度、介质和加载速率等)联合作用下表现的变形与断裂的行为规律及其物理本质和评定方法,体现了加强基础、拓宽专业面、注重能力与素质培养的目标和原则。内容包括材料力学性能概论,材料的静载拉伸力学性能,其他载荷下的力学性能(扭转、弯曲、压缩、剪切、硬度、缺口效应、冲击、低温脆性),断裂韧性,变动载荷下的力学性能,环境条件下的力学性能,高温条件下的力学性能,摩擦与磨损性能,纳米材料的力学性能等。每章后附有复习思考题,以便课后的复习、巩固与提高。

本书可作为高等理工院校材料科学与工程本科专业本科基础课程的教材,同时也可供材料科学与工程专业的研究生及从事材料研究、生产和应用的专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料力学性能/王吉会等编. —天津:天津大学出版社,
2006.9
ISBN 7-5618-2341-X

I. 材... II. 王... III. 材料力学 IV. TB301

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 098437 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
印 刷 河北省迁安万隆印刷有限责任公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 23.5
字 数 602 千
版 次 2006 年 9 月第 1 版
印 次 2006 年 9 月第 1 次
印 数 1 - 3.000
定 价 35.00 元

前 言

材料的力学性能是关于材料在外加载荷(外力)作用下或载荷和环境因素(温度、介质和加载速率等)联合作用下表现的变形、损伤与断裂的行为规律及其物理本质和评定方法的学科。材料的力学性能与材料的物理性能、材料的化学性能一样,是材料科学与工程四大基本要素——材料性能的重要组成部分,是各类材料在实际应用中都必须涉及的共性问题。

从课程的历史看,材料力学性能原是金属材料专业继金属学、固态相变之后的专业课程;在无机非金属材料专业中,无机材料的力学性能仅是无机材料物理性能课程中一章的内容;在高分子材料专业中,聚合物的力学性能则分散在高分子物理课程的有关章节中,内容相对较少。

随着高等教育改革与发展的深化、学科间的重组与优化,金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料等专业重组为材料科学与工程这一一级学科专业。材料力学性能课程,则成为材料科学与工程专业的学科基础课程。因此作为金属材料专业的材料力学性能课程,显然不能适应材料科学与工程专业的需要。于是,迫切需要编写出既能兼顾金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料等专业方向中力学性能的共性,又能适当反映各自材料力学性能的特殊性的《材料力学性能》教材,以适合材料科学与工程一级学科专业教学的需要。

本教材根据材料科学与工程一级学科专业的特点,本着加强基础、拓宽专业面、注重能力与素质培养的原则,试图在分析金属材料、无机非金属材料、高分子材料、复合材料、纳米材料等力学性能的基础上,总结归纳出材料力学性能的共性并兼顾各类材料的个性,以便真正实现各类材料在材料力学性能课程中的交叉与融合。因此,在教材编写过程中,我们调整了原有的教学体系,从材料力学性能概论出发,遵循材料力学性能的定义(材料在外加载荷与环境因素联合作用下的力学行为与机理),按照材料的承载方式和环境因素,将课程分为静载拉伸力学性能、其他载荷下的力学性能(扭转、弯曲、压缩、剪切、硬度、缺口效应、冲击、低温韧性)、断裂韧性、变动载荷下的力学性能、环境条件下的力学性能、高温条件下的力学性能、摩擦与磨损性能、纳米材料的力学性能等内容。与此同时,优化了教学的内容,不再将陶瓷、高分子、复合材料的力学性能单列成章,而是以材料的力学性能为主线,将三大材料有机地融合到每一章中,并将各类材料的共性与特性进行总结与归纳。另外,还打通与前期材料力学、材料科学基础等课程的联系,并注重建立与同期或后期学习课程间的联系及其在生产实际中的应用等,为学生今后在实际工作中全面、合理地选用、设计、改造和开

发新材料打下良好的基础。

本教材是天津大学材料科学与工程专业系列教材之一,初稿于2004年9月完成。经过在天津大学材料科学与工程专业材料力学性能课程教学的两次试用后,于2006年3月完成修改稿。全书内容共分9章,第1、3、6、8章由王吉会编写;第2、7章由郑俊萍编写;第4、5章由刘家臣编写;第9章由黄定海、王吉会编写。全书由王吉会统稿定稿。教材的编写,得到了教育部世行贷款21世纪初高等教育教学改革项目“材料科学与工程类人才培养方案的综合改革与实践”、21世纪初天津市高等院校教育与教学改革项目“材料科学与工程专业课程设置与教学模式的研究与实践”、天津大学“材料科学与工程示范专业”建设项目、天津大学“十五规划”第二批课程建设项目“材料力学性能优秀课程建设”、天津大学“十五规划”第二批本科教育教学改革项目“专业课中渗透素质教育和创新能力的途径探索”等项目的资助。特此向所有支持、帮助和关心本课程建设和教材编写工作的各级领导、专家和同仁表示衷心的感谢。

由于材料力学性能涉及的内容和应用领域十分广泛,而编者的专业范围和知识水平有限,书中难免存在错误和不当之处,敬请读者、教师和同学们批评指正,以便今后及时地进行修改和弥补。

编者

2006年3月

目 录

前 言

第1章 概论	(1)
1.1 材料与材料的性能	(1)
1.1.1 材料的概念与分类	(1)
1.1.2 材料科学与工程的基本要素	(2)
1.1.3 材料的性能	(3)
1.2 材料性能的分析方法	(4)
1.2.1 黑箱法	(4)
1.2.2 相关法(灰箱法)	(5)
1.2.3 过程法(白箱法)	(5)
1.2.4 环境法	(5)
1.3 材料的力学性能	(6)
1.3.1 材料力学性能的概念与分类	(6)
1.3.2 材料力学性能的研究内容	(7)
1.3.3 材料力学性能的研究目的和意义	(8)
1.3.4 材料力学性能的应用举例	(8)
1.4 本书的特点、编写思路与教学安排	(10)
1.4.1 材料力学性能课程的现状与发展趋势	(10)
1.4.2 本书的编写思路	(10)
1.4.3 材料力学性能课程的教学安排	(11)
复习思考题	(12)
第2章 材料的静载拉伸力学性能	(13)
2.1 静载拉伸试验	(13)
2.1.1 应力—应变曲线	(13)
2.1.2 拉伸性能指标	(18)
2.1.3 塑性指标及其意义	(20)
2.2 弹性变形	(22)
2.2.1 弹性变形及其物理本质	(22)
2.2.2 弹性性能的工程意义	(26)
2.2.3 弹性不完整性	(30)
2.3 塑性变形	(34)
2.3.1 金属材料的塑性变形机制与特点	(35)
2.3.2 屈服现象及其本质	(36)
2.3.3 真实应力—应变曲线及形变强化规律	(37)

2.3.4 陶瓷材料的塑性变形	(40)
2.4 材料的断裂	(43)
2.4.1 金属材料的断裂	(44)
2.4.2 陶瓷材料的断裂	(51)
2.4.3 高分子材料的断裂	(51)
复习思考题	(56)
第3章 材料在其他载荷下的力学性能	(58)
3.1 应力状态系数和力学状态图	(58)
3.1.1 应力状态系数	(59)
3.1.2 力学状态图	(60)
3.2 材料的扭转、弯曲、压缩和剪切	(61)
3.2.1 材料的扭转	(61)
3.2.2 材料的弯曲	(64)
3.2.3 材料的压缩	(67)
3.2.4 材料的剪切	(69)
3.2.5 几种静载试验方法的比较	(70)
3.3 材料的硬度	(71)
3.3.1 硬度的概念与分类	(71)
3.3.2 布氏硬度	(71)
3.3.3 洛氏硬度	(75)
3.3.4 维氏硬度	(78)
3.3.5 显微硬度	(79)
3.3.6 肖氏硬度	(80)
3.3.7 莫氏硬度	(80)
3.3.8 常用材料的硬度	(81)
3.3.9 硬度与其他力学性能指标的关系	(82)
3.4 缺口试样的力学性能	(83)
3.4.1 缺口效应	(83)
3.4.2 缺口试样的力学性能	(87)
3.5 材料在冲击载荷下的力学性能	(92)
3.5.1 加载速率与应变速率	(92)
3.5.2 冲击载荷的能量性质	(92)
3.5.3 冲击载荷下材料变形与断裂的特点	(93)
3.5.4 缺口试样的冲击试验和冲击韧性	(94)
3.5.5 冲击试样断裂过程分析	(97)
3.5.6 冲击试验的应用	(99)
3.6 材料的低温脆性	(100)
3.6.1 低温脆性现象	(100)
3.6.2 低温脆性的本质	(101)
3.6.3 低温脆性的评定	(101)

3.6.4 低温脆性的影响因素	(107)
复习思考题	(112)
第4章 材料的断裂韧性	(114)
4.1 理论断裂强度	(114)
4.2 Griffith 断裂理论	(115)
4.3 裂纹扩展的能量判据	(117)
4.4 裂纹顶端的应力场	(118)
4.4.1 三种裂纹类型	(118)
4.4.2 I型裂纹顶端的应力场	(119)
4.4.3 应力强度因子 K_I	(119)
4.4.4 断裂判据	(120)
4.4.5 几种常见裂纹的应力强度因子	(121)
4.5 应力强度因子的塑性区修正	(124)
4.5.1 裂纹顶端的塑性区	(124)
4.5.2 应力强度因子的塑性区修正	(126)
4.6 断裂韧性 K_{IC} 的测试	(127)
4.6.1 三点弯曲法	(127)
4.6.2 紧凑拉伸法	(129)
4.6.3 Vicker 压痕法	(129)
4.7 材料强度的统计性质	(130)
4.7.1 材料强度波动的分析	(130)
4.7.2 强度的统计分析	(130)
4.7.3 求应力函数的方法及韦伯模数分布	(131)
4.7.4 韦伯模数中 m 及 σ_0 的求法	(132)
4.7.5 有效体积的计算	(132)
4.7.6 韦伯统计的应用及实例	(133)
4.8 影响断裂韧性 K_{IC} 的因素	(134)
4.8.1 外因(板厚和实验条件)	(134)
4.8.2 内因(材料因素)	(135)
4.8.3 K_{IC} 与静载力学性能指标的关系	(136)
4.8.4 提高陶瓷材料断裂韧性的常用方法	(137)
4.9 R 曲线	(140)
4.10 弹塑性条件下的断裂韧性概述	(141)
4.10.1 J 积分	(142)
4.10.2 裂纹顶端张开位移(COD)	(143)
复习思考题	(145)
第5章 材料在变动载荷下的力学性能	(146)
5.1 变动载荷(应力)和疲劳破坏的特征	(146)
5.1.1 变动载荷(应力)及其描述参量	(146)

5.1.2	疲劳破坏特征和断口形式	(147)
5.2	高周疲劳	(147)
5.2.1	$S-N$ 曲线和疲劳极限	(148)
5.2.2	循环应力特性对 $S-N$ 曲线的影响	(152)
5.2.3	表面几何因素对高周疲劳特性的影响	(153)
5.2.4	应力变动和累积损伤	(154)
5.3	低周疲劳	(155)
5.3.1	滞后回线	(156)
5.3.2	循环硬化和循环软化	(157)
5.3.3	循环应力—应变曲线	(157)
5.3.4	应变—寿命曲线	(158)
5.4	热疲劳	(159)
5.5	疲劳裂纹扩展	(160)
5.5.1	应力、裂纹长度与疲劳裂纹扩展的关系	(160)
5.5.2	疲劳裂纹扩展寿命的估算	(161)
5.6	疲劳裂纹萌生和扩展机理	(163)
5.6.1	疲劳裂纹的萌生	(163)
5.6.2	疲劳裂纹扩展的方式和机理	(165)
5.7	改善疲劳强度的方法	(166)
5.8	聚合物的疲劳	(166)
5.8.1	聚合物的 $S-N$ 曲线和疲劳极限	(166)
5.8.2	聚合物的疲劳裂纹扩展	(167)
5.9	陶瓷材料的疲劳	(167)
5.9.1	静疲劳	(167)
5.9.2	循环应力疲劳	(168)
	复习思考题	(168)
第6章	材料在环境条件下的力学性能	(170)
6.1	应力腐蚀断裂	(171)
6.1.1	应力腐蚀断裂的特点	(171)
6.1.2	典型材料的应力腐蚀	(172)
6.1.3	应力腐蚀断裂的测试方法与评价指标	(173)
6.1.4	应力腐蚀断裂的影响因素	(179)
6.1.5	应力腐蚀断裂的机理	(180)
6.1.6	应力腐蚀断裂的防护措施	(182)
6.2	氢致断裂	(183)
6.2.1	金属中的氢	(183)
6.2.2	氢致断裂的类型和特点	(184)
6.2.3	氢致滞后断裂的机理	(186)
6.2.4	氢致断裂与应力腐蚀断裂的关系	(187)
6.2.5	氢致断裂的测试与评价	(188)

6.2.6 氢致断裂的防护措施	(189)
6.3 腐蚀疲劳断裂	(190)
6.3.1 腐蚀疲劳断裂的特点	(190)
6.3.2 腐蚀疲劳断裂的机制	(191)
6.3.3 腐蚀疲劳裂纹的扩展速率	(192)
6.3.4 腐蚀疲劳的影响因素	(193)
6.3.5 腐蚀疲劳的防护措施	(195)
6.4 腐蚀磨损脆性	(196)
6.4.1 腐蚀磨损脆性的现象和特点	(196)
6.4.2 腐蚀磨损脆性的机制	(197)
6.4.3 典型材料的腐蚀磨损脆性	(198)
6.4.4 腐蚀磨损脆性的测试方法与评价指标	(203)
6.4.5 腐蚀磨损脆性与应力腐蚀、氢脆、腐蚀疲劳的关系	(205)
6.4.6 腐蚀磨损脆性的防护措施	(206)
6.5 辐照脆性	(207)
6.5.1 辐照损伤	(207)
6.5.2 辐照效应	(208)
6.5.3 辐照致脆机理	(210)
6.5.4 辐照损伤的回复与控制	(212)
6.6 液(固)态金属脆性	(213)
6.6.1 金属脆性的现象和特点	(213)
6.6.2 典型材料的金属脆性	(214)
6.6.3 金属脆性的机制	(217)
6.7 无机材料的环境脆性	(219)
6.7.1 无机材料环境脆性的现象和特点	(219)
6.7.2 玻璃和陶瓷材料的环境脆性	(220)
6.7.3 无机材料环境脆性的裂纹扩展速率	(222)
6.7.4 无机材料环境脆性的机制	(223)
6.8 高聚物的环境脆性	(224)
6.8.1 水性介质中聚合物的脆性	(225)
6.8.2 有机溶剂体系中聚合物的应力开裂	(226)
复习思考题	(228)
第7章 材料在高温条件下的力学性能	(231)
7.1 材料的蠕变	(232)
7.1.1 蠕变曲线	(232)
7.1.2 蠕变机制	(233)
7.1.3 蠕变的影响因素	(235)
7.2 蠕变极限及持久强度	(238)
7.2.1 蠕变极限	(238)
7.2.2 持久强度	(238)

7.2.3 蠕变极限和持久强度的影响因素	(240)
7.3 应力松弛	(241)
7.3.1 金属材料的应力松弛	(241)
7.3.2 高分子材料的应力松弛	(242)
7.4 高温疲劳及疲劳与蠕变的交互作用	(243)
7.4.1 基本加载方式和 $\sigma-\epsilon$ 曲线	(243)
7.4.2 高温疲劳的一般规律	(244)
7.4.3 疲劳和蠕变的交互作用	(246)
7.5 高温热暴露	(248)
7.5.1 热暴露评定指标	(248)
7.5.2 热暴露的特点	(248)
7.5.3 热暴露的影响因素	(249)
7.5.4 热暴露机理	(250)
7.6 陶瓷材料的抗热震性	(250)
7.6.1 抗热震断裂	(251)
7.6.2 抗热震损伤	(251)
7.6.3 陶瓷涂层的热震寿命	(251)
7.7 温度对聚合物力学性能的影响	(252)
复习思考题	(254)
第8章 材料的摩擦与磨损性能	(255)
8.1 材料的表面形态与接触	(255)
8.1.1 表面形貌参数	(255)
8.1.2 材料的表面结构和表面性质	(259)
8.1.3 粗糙表面的接触	(261)
8.2 材料的摩擦	(264)
8.2.1 摩擦的概念与分类	(264)
8.2.2 经典摩擦理论	(265)
8.2.3 分子—机械摩擦理论	(266)
8.2.4 黏着摩擦理论	(268)
8.3 材料的磨损	(271)
8.3.1 磨损的概念与分类	(271)
8.3.2 磨损过程	(273)
8.3.3 黏着磨损	(275)
8.3.4 磨粒磨损	(278)
8.3.5 疲劳磨损	(283)
8.3.6 腐蚀磨损	(286)
8.3.7 冲蚀磨损与微动磨损	(288)
8.4 摩擦磨损的测试方法	(292)
8.4.1 摩擦磨损测试仪器	(292)
8.4.2 摩擦磨损的测量与评定	(294)

8.5 摩擦磨损的控制	(296)
8.5.1 润滑剂的使用	(296)
8.5.2 摩擦副材料的选择	(298)
8.5.3 材料的表面改性与强化	(299)
复习思考题	(300)
第9章 纳米材料的力学性能	(302)
9.1 纳米材料与纳米科技	(302)
9.1.1 纳米材料的定义	(302)
9.1.2 纳米材料的分类	(302)
9.2 纳米材料力学性能概述	(303)
9.3 纳米金属材料的力学性能	(306)
9.3.1 纳米金属的强度	(306)
9.3.2 纳米金属的塑性	(307)
9.4 纳米非金属材料的力学性能	(310)
9.4.1 纳米陶瓷材料的力学性能	(310)
9.4.2 Y-TZP 陶瓷断裂表面的超塑性变形	(311)
9.5 碳纳米材料的力学性能	(313)
9.5.1 纳米碳管力学性能的理论研究	(313)
9.5.2 纳米碳管的 Stone-Wales 变形	(315)
9.5.3 纳米碳管断裂的理论分析	(317)
9.5.4 纳米碳管力学性能的实验研究	(318)
9.6 纳米复合材料的力学性能	(327)
9.6.1 金属纳米复合材料	(327)
9.6.2 陶瓷纳米复合材料	(331)
9.6.3 碳纳米管复合材料	(332)
9.6.4 聚合物纳米复合材料	(337)
9.7 纳米材料的蠕变与超塑性	(343)
9.7.1 纳米材料的蠕变	(343)
9.7.2 纳米材料的超塑性	(347)
复习思考题	(349)
附录	(351)
附录 1 材料力学性能中的常用单位换算表	(351)
附录 2 常用材料的力学性能	(352)
附录 3 部分材料的平面应变断裂韧性 K_{IC}	(353)
附录 4 部分工程材料的疲劳门槛值 ΔK_{th}	(354)
参考文献	(355)

第 1 章 概 论

在人类历史发展的进程中,“材料”一直占有十分重要的地位。历史学家曾用材料来划分时代,如石器时代、陶器时代、青铜器时代、铁器时代以及聚合物时代、半导体时代、复合材料时代等,可见材料对人类文明发展的重要作用。每一种重要的新材料的发现和运用,都使人类支配自然的能力提高到一个新的水平,给社会生产和人们生活带来巨大的变化,从而将人类物质文明推向前进。这充分说明材料是人类赖以生存和发展、征服自然和改造自然的物质基础与先导,是人类社会进步的里程碑。

在科学技术迅猛发展的今天,材料仍然是现代文明的一个重要标志。20世纪70年代人们把信息、材料和能源誉为当代文明的三大支柱。80年代以高技术群为代表的新技术革命,又把新材料、信息技术和生物技术并列为新技术革命的重要标志。这主要是因为材料尤其是新型材料或先进材料的研究、开发与应用反映了一个国家的科学技术与工业的水平,密切关系到与国民经济建设、国防建设和人民的生活。可以说,人类生活在材料的世界中,无论是经济活动、科学技术、国防建设,还是人们的衣食住行都离不开材料。如果没有半导体材料,就不会有今天的信息社会;没有高温、高比强(刚)度的材料,就不会有今天的航空航天技术等。

总之,材料对社会发展的作用和重要性,任何时候都不会下降;相反,随着科学技术的不断进步,材料的种类越来越丰富,材料的性能逐步得到提高,材料的应用越来越广泛,因此可以说人类进入了一个材料革命的新时代。

1.1 材料与材料的性能

1.1.1 材料的概念与分类

1. 材料的概念

虽然“材料”这个名词早已存在,但很难给它下一个确切的定义,或者说可以用多种不同的表达方式来说明材料。如:材料是用来制造器件的物质;材料是经过工业加工的劳动对象等等。但目前普遍接受的定义是由肖纪美先生提出的观点:材料是人类社会所能接受的、经济地制造有用器件的物质。

由材料的定义可见,材料是物质,但不是所有的物质都可以称为材料。如燃料和化学原料、工业化学品、食物和药物,一般都不算是材料。但是这个定义并不那么严格,如炸药、固体火箭推进剂,一般称为“含能材料”,因为它属于火炮或火箭的组成部分。材料这种物质与其他类物质的差异在于以下三方面。

①从材料与环境(资源、能源、环保)的关系看,材料是人类社会所能接受的物质,即材料

的生产和应用需要受到材料资源、能源和环境保护等方面的约束和限制,也即资源判据、能源判据和环保判据。

②在进行材料的生产和应用之前,必须先进行成本分析和经济核算,以提高社会的经济效益(经济判据)。

③从技术的角度来看,材料能用来制造有用的器件(质量判据),即材料应具有良好的工艺性能(制造)和具有能为人类服役的使用性能(有用)。

因此作为材料的物质,必须具备以下特点。

①一定的组成和配比。因为制品的使用性能,主要取决于组成的化学物质及各成分之间的配比。

②成型加工性。作为制品应具有一定的形状和结构特征,而形状和结构特征需要通过成型加工来获得。因此,作为材料必须在具备一定温度和一定压力下可对其进行成型加工,并塑制成某种形状的能力。不具备成型加工性,就不能成为有用的材料。

③形状保持性。任何制品都是以一定的形状出现,并在该形状下使用。因此,应有在使用条件下,保持既定形状并可供实际使用的能力。

④经济性。制得的制品应质优价廉,富有竞争性,必须在经济上易于为社会和人们接受。

⑤回收和再生性。这是作为绿色产品、符合人类持续发展战略所必需的,并应满足已经确定的社会规范、法律等。随着资源的枯竭、环境的破坏,对材料制品的回收并再利用是必需的。这是材料的开发者在研究中必须首先加以注意并考虑的。严重污染环境、不能回收再生的制品,一开始就不能生产。

2. 材料的分类

目前,世界上材料已有几十万种,而材料的新品种正以每年大约 5% 的速率在增长。由于材料的多样性,其分类方法也没有一个统一的标准。如按材料的来源,可分为天然材料(石料、木料等)和人造材料(钢铁、合成纤维等)两类;如按用途来分,可分为电子材料、航空航天材料、核材料、建筑材料、能源材料、生物材料等。另外,材料还可分为传统材料与新型材料。传统材料是指那些已经成熟且在工业中已批量生产并大量应用的材料,如钢铁、水泥、塑料等;新型材料(先进材料)是指那些正在发展,且具有优异性能和应用前景的一类材料等。

通常,材料是按化学组成和结构特点进行分类的,故可分为金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料等四大类。每一类又可分为若干小类,如金属材料又可分为黑色金属材料、有色金属材料和特种金属材料等;无机非金属材料又可分为陶瓷、玻璃、水泥和耐火材料等;高分子材料又可分为塑料、橡胶、纤维等。

1.1.2 材料科学与工程的基本要素

随着各类材料的大规模应用与发展,对材料本身(如材料的制备、结构与性能)以及它们之间的相互关系的研究愈来愈深入;同时随着物理学、化学、冶金学、金属学、陶瓷学、高分子化学等基础学科理论体系的完善和交叉融合,也使得人们对材料的本质和共性有了更深层次的理解。于是在 20 世纪 60 年代初,针对材料发展的需要和共性问题,提出了“材料科学”的概念,随后又提出了“材料科学与工程”。

材料科学与工程是关于材料成分、结构、制备工艺与材料性能和用途之间相互关系的知

识开发和应用的学科。换言之,材料科学与工程是研究材料组成、结构、生产过程、材料性能与使用性能以及它们之间的关系。因而常把组成/结构 (composition/structure)、合成/加工 (synthesis/processing)、性质 (properties) 及使用效能 (performance), 称为材料科学与工程的四个基本要素。把四要素连接在一起, 便形成一个四面体, 如图 1-1(a) 所示。

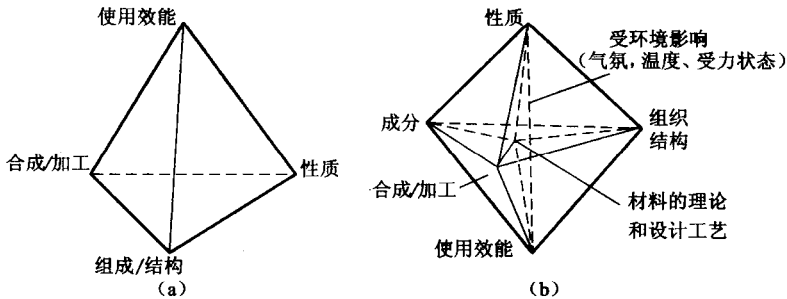


图 1-1 材料科学与工程的基本要素

(a)材料科学与工程四要素图 (b)材料科学与工程五要素图

在四要素的基础上, 又有人将材料的成分和组织结构分开, 提出了五要素模型, 即成分 (composition)、合成/加工 (synthesis/processing)、组织结构 (structure)、性质 (properties) 和使用效能 (performance)。如果把它们连接起来, 并考虑到材料的理论和设计工艺, 则形成一个六面体 (图 1-1(b))。

在材料科学与工程的基本要素中, 材料的成分与结构是指材料的原子类型和排列方式; 合成与加工是指实现特定原子排列的演变过程; 材料的性质是指对材料功能特性和效用 (如电、磁、光、热、力学等性质) 的定量度量 and 描述; 使用效能是指材料性质在使用条件 (如受力状态、气氛、介质与温度等) 下的表现。各要素之间的关系, 材料的性质和使用效能取决于材料的成分和结构, 而材料的成分和结构则受到材料合成与加工的控制。当然, 材料的性质和使用效能反过来又能促进材料成分和结构的设计以及材料合成与加工工艺的选择。材料的理论和设计工艺就是通过理论模型进行材料设计或工艺设计, 即通过优化材料配方, 采用最佳工艺, 制备出符合要求的材料或器件, 以达到提高材料的性能及使用效能的目标。

1.1.3 材料的性能

人类之所以对材料感兴趣, 首先是因为材料具有对人类有用的性能。因此, 作为材料科学与工程的整体, 必须十分重视对材料性能的研究, 否则材料将会被淘汰。

1. 材料性能的概念

材料的性能是一种参量, 用于表征材料在给定外界条件下的行为, 即: 作为材料最基本条件的性能必须定量化; 需要从行为的过程去深入理解性能; 重视环境对性能的影响。

(1) 行为 行为是从一个状态到另一状态的过程。材料的性能, 有些只与状态有关, 而与达到这个状态的过程无关, 如力学中的势能和热学中的熵等; 而另一些性能则与达到这个状态的过程有关, 如力学中的功和热学中的热量等。它们分别称为状态性能 (或性质) 和过程性能 (或性质)。通过对材料行为的研究, 可以理解材料的性能、定义材料的性能指标。如通过对材料在外力作用下室温拉伸行为中的应力—应变曲线, 采用屈服、颈缩和断裂等行为的判断, 定义出材料的屈服强度、抗拉强度和断裂强度等力学性能。又如可通过对材料在外

磁场下磁化和退磁行为中的磁滞回线,定义材料的矫顽力、剩余磁感和导磁率等磁学性能。

(2)外界条件 在不同的外界条件(应力、温度、化学介质、磁场、电场、辐照等)下,同一材料也会有不同的性能。如对材料在断裂时的力学性能——断裂强度而言,在高温下的蠕变断裂强度、交变载荷下的疲劳断裂强度和化学介质中的应力腐蚀断裂强度是大不相同的。

(3)参量化 性能必须参量化,即材料的性能需要定量地加以表述。多数的性能都有单位,通过对单位的分析,可以加深对性能的理解。如材料强度的单位为 $\text{MPa}(\text{N}/\text{m}^2)$,表示单位面积上能承受的力;又如冲击韧性的单位为 J/cm^2 ,表示缺口试样在冲击载荷下单位截面积(cm^2)上所消耗的功(J)。

2. 材料性能的分类

由于材料种类、结构和制备工艺的不同,材料的性能也有很大的区别。通常,将材料的性能分为简单性能和复杂性能。简单性能又分为物理性能、力学性能和化学性能;复杂性能可分为复合性能、工艺性能和使用性能,如图 1-2 所示。

与材料性能的分类相呼应,还可按材料的性能区分材料,如以力学性能为主的材料称为结构材料;而以物理和化学性能为主的材料叫做功能材料。其中的物理性能包括声学、热学、光学、电学、磁学、辐照等性能。

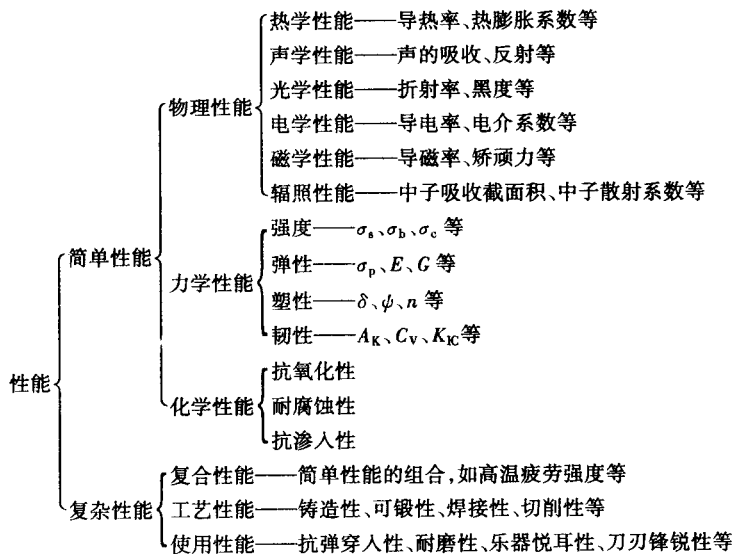


图 1-2 材料性能的分类

1.2 材料性能的分析方法

由于材料的性能取决于材料的成分和结构,并受到外界条件的影响,因而对材料性能的分析,会有如下四种不同的方法。若不知材料的结构,材料是黑箱,则用黑箱法;若材料的结构部分已知或全部已知,则用相关法(灰箱法)和过程法(白箱法);如考虑外界环境条件的作用,则用环境法。

1.2.1 黑箱法

由于不知道或不需知道材料内部的结构,认为它是一个“黑箱”,可从输入和输出信息

的实验关系来定义或理解性能。假设输入量为 X , 输出量为 Y , 可由实验规律 $Y = K \cdot X$ 来确定材料的性能 K 。熟悉的实例有弹性模量 E 、电阻 R 和热膨胀系数 α 等, 如表 1-1 所示。

表 1-1 黑箱法分析材料性能的实例

现象	输入	输出	关系式	K	性能
弹性变形	σ	ϵ	$\epsilon = \sigma/E$	$1/E$	E
电阻	V	I	$I = V/R$	$1/R$	R
热膨胀	T	L	$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$	$\alpha \alpha L_0$	α

应用黑箱法所确定的关系式, 要注意它们的适用范围, 因为这些关系式是用归纳法获得的。如表述应力—应变关系的胡克定律, 只适用于弹性变形范围。

黑箱法只能表象地解释客观世界, 它能提供输入与输出之间的定量关系, 而不能改造世界。因为它不能提出传递系数及性能的物理意义及影响因素, 更不能提出改变性能的措施。

1.2.2 相关法(灰箱法)

随着对材料结构的不断认识以及对材料实验数据的不断积累, 可用统计的方法建立起性能与结构之间相关性的经验方程。例如, 在 20 世纪 50 年代初期, 建立了低碳钢的室温屈服强度(σ_s)与晶粒平均直径(d)之间的 Hall-Petch 关系式:

$$\sigma_s = \sigma_0 + k_y d^{-1/2} \quad (1-1)$$

式中 σ_0 和 k_y 只是实验中的经验系数, 并没有物理意义。

由式(1-1)可以看出, 通过细化晶粒(减少晶粒的直径 d)能提高材料的屈服强度。

1.2.3 过程法(白箱法)

由材料性能的定义可见, 材料的性能可由材料的行为过程去理解。因而只有在深入了解材料内部结构的本质并掌握材料的行为过程机制的情况下, 才能加深对相关经验规律的认识, 真正理解和控制材料的性能。

如用黑箱法建立了应力与应变之间线性关系的胡克定律(表 1-1), 当应力增大与胡克定律偏离时, 可以定义屈服强度。用相关法建立了屈服强度与晶粒尺寸的 Hall-Petch 关系式; 而只有用过程法, 在屈服过程的位错理论指导下, 才能从材料的屈服过程出发求出式(1-1)中实验系数的表达式:

$$\sigma_0 = m\tau_0 \quad (1-2)$$

$$k_y = m^2 \tau^* r^{1/2} \quad (1-3)$$

式中: m 是取向因子, 滑移系越多, 则 m 越小; τ_0 是基体对位错运动的摩擦阻力; τ^* 是启动位错源所需的切应力, 受位错钉扎效应的影响; r 是位错源与位错塞积处的距离。

利用过程法推导的结果, 较深入而全面地解释和启示了各种强化措施的机制, 包括晶体结构(m)、固溶强化(τ_0)、细化晶粒(d)、加工强化(r)、弥散强化(r)、沉淀强化(r, τ^*)。有了上面的关系式, 就可以从结构参量去计算或预测材料的各种性能。

1.2.4 环境法

材料的性能除与材料的成分和结构有关外, 还与外界的环境条件有关。环境对材料性