

高等学校机械基础系列课程

工 程 材 料

主 编 倪红军 黄明宇
副主编 张福豹 何红媛
参 编 张华丽 万晓峰 钱爱平



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

• 南京 •

前 言

工程材料课程是高等院校机械类和近机械类本科专业一门十分重要的技术基础课。该课程讲授的工程材料基础理论、基本知识和工程应用等内容是机械类和近机械类工程技术人员必须掌握的基础知识。该课程的教学目的是从机械工程的应用角度出发,阐明工程材料的基本理论,介绍常用的工程材料及其应用的基本知识,使学生了解材料的化学成分、加工工艺、微观组织结构及性能之间的关系。

本书根据“教育部高等学校机械基础课程教学指导分委员会”于2012年颁布的《高等学校机械基础系列课程现状调查分析报告暨机械基础系列课程教学基本要求》编写。在结构设计上,按照工程材料基本理论—工程材料基本知识—材料工程应用的课程体系,以工程材料的成分、组织结构、工艺、性能与应用的基本理论及其相互关系为主线,致力于科学性、系统性和实用性相结合,既体现教材的理论特点,又尽可能使其具有工程参考价值;在教材内容上,密切结合工程设计的实际需要,简化了工程材料的基本理论,突出了工程材料的性能及其在工程实践中的应用,列举了许多在实际生产过程中具有较大参考价值和借鉴意义的应用实例,介绍了工程材料领域的新材料和新进展,以培养学生对新材料技术的兴趣,开拓学生的创新潜力。

本书在编写过程中收集的数据和资料尽可能采用当前最新的信息,名词、概念和计量单位都采用最新的国家标准与计量单位,以便于教师和学生掌握最新技术信息。附录部分节选了工程实践中常用的相关资料,供读者在学习和应用时参考。

本书可作为普通高等学校或独立学院机械类和近机类专业学生学习工程材料课程的教材,也可供有关工程技术人员学习、参考。

本书内容共9章。第1章为工程材料的性能,第2章为材料的结构与组织,第3章为工程材料的塑性变形与强化,第4章为钢的热处理,第5章为钢铁材料,第6章为有色金属材料,第7章为非金属材料,第8章为复合材料及特殊性能材料,第9章为工程材料的选用。

参加本书编写的有南通大学倪红军(第4章),南通大学黄明宇(第7章、第8章复合材料部分),南通大学张福豹(第3章、第6章、附录),东南大学何红媛(第5章),南通大学万晓峰(第2章),南通大学张华丽(第1章、第8章特殊性能材料部分),南通大学钱爱平(绪论、第9章)。

本书在编写过程中参阅了许多文献资料,在此向相关文献的作者表示感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

第 0 章 绪论	1
0.1 材料概述	1
0.2 材料与机械工程	2
0.3 本课程的内容、学习目的和要求	3
第 1 章 工程材料的性能	5
1.1 材料的力学性能	5
1.1.1 材料的静态力学性能	5
1.1.2 材料的动态力学性能	10
1.1.3 材料的高、低温性能	13
1.2 材料的物理化学性能	14
1.2.1 材料的物理性能	14
1.2.2 材料的化学性能	15
1.3 材料的工艺性能	16
第 2 章 材料的结构与组织	18
2.1 材料的结构	18
2.1.1 晶体结构的基本概念	18
2.1.2 常见的晶体结构类型	19
2.1.3 实际晶体与缺陷	21
2.2 金属的凝固与结晶组织	25
2.2.1 金属的结晶	25
2.2.2 金属的结构与组织	28
2.3 铁碳合金	38
2.3.1 纯铁与铁碳合金中的相	39
2.3.2 铁碳合金相图	41
2.3.3 铁碳合金成分、组织与性能的关系及应用	48
第 3 章 工程材料的塑性变形与强化	52
3.1 单晶体的塑性变形	52
3.1.1 滑移	52
3.1.2 孪生	55

3.2 多晶体的塑性变形	56
3.3 塑性变形对材料组织与性能的影响	57
3.3.1 冷塑性变形对金属组织与性能的影响	57
3.3.2 冷塑性变形金属加热时的组织与性能变化	59
3.3.3 金属的热加工	62
3.4 金属材料的强化机制	63
3.4.1 固溶强化	63
3.4.2 细晶强化	63
3.4.3 沉淀强化(弥散强化)	64
3.4.4 位错强化	64
第4章 钢的热处理	65
4.1 钢的热处理概述	65
4.2 钢在加热和冷却时的组织转变	66
4.2.1 钢在加热时的组织转变	66
4.2.2 钢的冷却及组织转变	70
4.3 钢的普通热处理	80
4.3.1 钢的退火与正火	80
4.3.2 淬火	83
4.3.3 钢的淬透性	86
4.3.4 回火	89
4.4 钢的表面热处理	91
4.4.1 钢的表面淬火	91
4.4.2 钢的化学热处理	94
4.4.3 钢的激光热处理	98
4.5 钢的热处理新工艺	100
4.5.1 深冷处理	100
4.5.2 可控气氛热处理	102
4.5.3 真空热处理	103
4.5.4 形变热处理	104
4.5.5 钢铁材料组织超细化处理	106
4.5.6 计算机控制热处理	107
4.5.7 高能表面热处理	107
4.6 钢的热处理缺陷与防止	108
4.6.1 氧化和脱碳	108
4.6.2 过热和过烧	109
4.6.3 回火缺陷	109
4.6.4 减少变形及防止裂纹的措施	109

4.6.5 零件的结构工艺性	111
第5章 钢铁材料	113
5.1 钢	113
5.1.1 钢的分类与牌号	114
5.1.2 钢的主要成分及其对组织和性能的影响	118
5.2 铸铁	164
5.2.1 概述	164
5.2.2 常用铸铁	166
5.2.3 合金铸铁	176
第6章 有色金属材料	180
6.1 铝及其合金	180
6.1.1 纯铝	180
6.1.2 铝合金	181
6.1.3 铝合金热处理	184
6.2 铜及其合金	186
6.2.1 纯铜	186
6.2.2 铜合金	186
6.2.3 铜合金热处理	193
6.3 轴承合金	197
6.4 其他有色金属及其合金	199
6.4.1 钛及其合金	199
6.4.2 镁及其合金	201
6.4.3 锌及其合金	201
第7章 非金属材料	203
7.1 高分子材料	203
7.1.1 概述	203
7.1.2 高分子材料的性能	204
7.1.3 常用高分子材料	206
7.2 陶瓷材料	218
7.2.1 概述	218
7.2.2 陶瓷材料的结构和性能	218
7.2.3 陶瓷的生产工艺与粉末冶金简介	219
7.2.4 常用陶瓷材料	222

第 8 章 复合材料及特殊性能材料	228
8.1 复合材料	228
8.1.1 概述	228
8.1.2 增强材料及复合增强原理	230
8.1.3 常用复合材料	232
8.2 特殊性能材料	238
8.2.1 梯度功能材料	238
8.2.2 纳米材料	240
8.2.3 形状记忆合金	243
8.2.4 非晶态合金	244
8.2.5 阻尼合金	245
8.2.6 未来材料的发展	247
第 9 章 工程材料的选用	249
9.1 零件失效分析	249
9.1.1 零件失效的基本形式	249
9.1.2 零件失效的原因	250
9.2 选用材料的一般原则	250
9.2.1 使用性能原则	250
9.2.2 工艺性原则	251
9.2.3 经济性原则	252
9.3 材料选择的一般过程	252
9.4 典型零件的选材及工艺分析	253
9.4.1 轴类零件	253
9.4.2 齿轮类零件	255
9.4.3 箱体类零件	258
9.4.4 其他常用机械零件选材	259
9.4.5 材料选择趋势	261
附录	262
参考文献	266

第0章 绪论

0.1 材料概述

世界是由物质组成的,材料是人类一切生产和生活活动的物质基础,是人类社会经济地制造有用器件的物质。人类的衣食住行都离不开材料,交通运输、医疗卫生、机械制造、国防建设、科学研究等各行各业都在大量使用各种材料。

在人类发展的历史长河中,材料是人类社会进步的里程碑。材料的发展引起时代的变迁,推动人类文明和社会进步。历史学家把人类社会的发展按其使用的材料类型划分为石器时代、青铜器时代、铁器时代,目前社会正处于铁器时代向人工合成材料、新材料过渡的时代。因此,从某种意义上说,人类文明史也可以称之为世界材料发展史。中华民族在人类历史上为材料的发展和应用作出过重大贡献。

材料的发展为近代科学技术的发展做出了卓越的贡献。每一种新材料的发现和每一种新材料技术的应用,都给社会生产和人类生活带来巨大改变,人类也因此而有了今天丰富多彩、璀璨夺目的世界与文化。没有半导体单晶硅材料,便不可能有今天的微电子工业。因为有了低损耗的光导纤维,当今世界蓬勃发展的光纤通信才得以实现。在知识经济新时代,材料与能源和信息并列为现代科学技术的三大支柱。

材料的种类很多,可按其化学性质、使用性能及应用领域进行分类,见表0-1。

表 0-1 材料的分类

分类方法	内 容		
按化学性质分类	金属材料	黑色金属	主要包括钢和铸铁
		有色金属	指黑色金属以外的金属材料。按照特性不同,可分为轻金属、重金属、贵金属、稀有金属和放射性金属等
	非金属材料	高分子材料:包括塑料、橡胶、合成纤维、胶黏剂、涂料等	
		陶瓷材料:属于无机非金属材料。按其原料可分为:普通陶瓷(硅酸盐材料)和特种陶瓷(人工合成材料)	
	复合材料	指由两种或两种以上在物理和化学上不同的物质结合起来而得到的一种多相固体材料。按其基体材料可分为:树脂基复合材料、金属基复合材料、陶瓷基复合材料及其他类型复合材料等	
按使用性能分类	结构材料	指工程上要求具有较高力学性能,用来制造承受载荷、传递动力的零件和构件的材料,如机器结构材料、建筑工程结构材料等	
	功能材料	以光、电、声、磁、热等物理性能为指标,用来制造具有特殊性能的元件的材料,如大规模集成电路材料、信息记录材料、充电材料、激光材料、超导材料、传感器材料、储氢材料等	
按应用领域分类	可分为机械工程材料、建筑工程材料、电子工程材料、航空材料等		

21 世纪以来,随着科学技术和现代工业的迅猛发展,对材料提出了更为严格的要求,新材料是材料科学发展的新趋势。新材料是指新出现的或正在发展中的,具有传统材料所不具备的优异性能和特殊功能的材料;或采用新技术(工艺、装备),使传统材料性能有明显提高或产生新功能的材料。新材料,如纳米材料、超导材料、新能源材料、智能材料、生物医用材料、形状记忆合金、光学材料、航空材料等,是发展信息、航空、生物、能源等高新技术的重要物质基础。

在世界范围内,新材料技术的发展已成为高科技发展的一个关键领域。《中国制造 2025》在强调要大力推动重点领域突破发展时指出:“瞄准新一代信息技术、高端装备、新材料、生物医药等战略重点,引导社会各类资源集聚,推动优势和战略产业快速发展”。新材料技术的发展具有重要战略意义。苏通长江公路大桥是世界著名的双塔拉索桥(图 0-1),它的建成创造了当时基础



图 0-1 苏通长江公路大桥

最深、桥塔最高、铁索最长、跨度最大的四项世界纪录。其 272 根斜拉索的材料由宝钢集团独立研制和生产,创造了中国桥梁史上的又一个第一,标志着中国在新材料的研发和应用方面取得了历史性突破。新材料是高新技术进步的关键,是 21 世纪人类文明的物质基础。

0.2 材料与机械工程

机械工程是一个广泛的概念,它几乎涉及国民经济各个领域中的所有机械产品。优质的机械产品是合理的材料、优良的设计及正确的加工工艺这三者的互相配合。

合理的材料为产品提供了必要的基本功能,是产品质量的重要保证。许多工程设计人员依据经验来套用或是盲目地随意取用材料,由此而造成的产品质量与寿命问题,已被大量的产品事故所证实。

优良的设计是实现产品造型及其使用功能的重要前提。在设计某一具体产品时,设计者首先进行的是功能设计和结构设计,通过精确的计算和必要的实验,以确定决定产品功能的技术参数和整机及零件的形状、尺寸,设计结果及设计质量如何,往往比较直观且容易评定和校检。

制造是将材料经济地加工成最终产品的生产过程,正确的加工工艺是设计和制造的桥梁。所谓加工工艺,是工件或零件制造加工的步骤,即指采用机械加工的方法,直接改变毛坯的形状、尺寸和表面质量等,使其成为合格成品或半成品的加工过程。机械产品一般都是由多种不同性能的材料加工成的零件组装而成的,每个零件的制造又是一个独立的过程,其加工工艺过程一般如图 0-2 所示。

下料→毛坯成形→预备热处理→机械粗加工、半精加工→最终热处理→机械精加工→成品零件

图 0-2 零件加工工艺过程图

毛坯成形方法主要有铸造成形、锻造成形、焊接成形等。机械加工指采用各种切削(如车、铣、刨、磨、钻、镗等)加工方法直接改变毛坯的形状、尺寸、表面粗糙度,使之成为合格零件的生产过程。按加工阶段的不同,机械加工可分为粗加工、半精加工和精加工。热处理是指将零件在固态下进行加热、保温、冷却,以改变其整体或表面组织,从而获得所需性能的一种工艺,包括整体热处理(如退火、正火、淬火、回火等)和表面热处理。根据热处理的目的和在加工过程中的工序位置,可分为预备热处理和最终热处理两大类。

设计的可行性往往会受到加工工艺的制约,不是所有设计的产品都能加工出来,也不是所有设计的产品通过加工都能达到预定的技术性能要求,工艺往往会成为“瓶颈”。材料与工艺的关系更加紧密,不同的材料有着各自适宜的加工工艺,而材料加工的难易程度(即工艺性能)既受材料性能的影响,反过来加工过程又会不同程度地影响到零件的内部组织,进而影响材料的使用性能。因此,机器零件的设计不单是结构设计,还应该包括材料与工艺的设计。

0.3 本课程的内容、学习目的和要求

“工程材料”是高等院校机械类及近机类专业必修的技术基础课,它是以研究材料的成分—组织—性能—应用之间关系及其变化规律为目的的一门学科。

本课程内容:本书以金属材料为重点,着重介绍了金属材料及热处理的基础知识,同时介绍了一些常用的有色金属材料、非金属材料,以及机械零件选材与失效分析方面的知识和方法。全书共9章,主要内容及关键知识点见表0-2。

表 0-2 本课程主要内容

课程模块	章 节	关键知识点
材料科学 基础理论	第1章 工程材料的性能	力学性能及其应用;材料的工艺性能
	第2章 材料的结构与组织	晶体结构与缺陷理论;金属凝固与结晶;铁碳合金相图
	第3章 工程材料的塑性变形与强化	材料的塑性变形;回复与再结晶;金属强化理论及方法
热处理	第4章 钢的热处理	热处理的原理;普通热处理;表面热处理
常用材料	第5章 钢铁材料	常用材料的牌号、性能及应用
	第6章 有色金属材料	
	第7章 非金属材料	
	第8章 复合材料及特殊性能材料	
材料选用	第9章 工程材料的选用	零件失效的概念;材料选用的原则;典型零件的选材及工艺分析

学习目的和要求:学习本课程可使学生获得相关工程材料的基础理论知识,掌握并运用常用工程材料的结构、性能、应用和改性方法,使学生初步具有合理选用材料、正确选用热处

理工艺方法、妥善安排加工工艺路线的能力,且为后续有关课程的学习奠定必要的材料学基础。

本课程是一门理论和实践性均很强的课程,学习课程前学生应经过金工实习方面的基本训练,在工程材料方面有一定的感性认识。教师在讲授过程应结合生产应用实例,配合实验及多媒体教学手段,辅以课堂讨论,加深学生对课程内容的理解。学生在学习时应把握重点、理清思路、善于归纳。应抓住材料成分→加工工艺→组织结构及性能变化的规律这条主线,建立相关知识的横向联系,在理解的基础上记忆,避免死记硬背。

第 1 章 工程材料的性能

工程材料的性能主要包括使用性能和工艺性能。使用性能是指材料的力学性能、物理性能和化学性能；工程材料使用性能的好坏，决定了它的使用范围和寿命。对绝大多数工程材料来说，其力学性能是最重要的使用性能。工艺性能是指材料的可加工性，包括锻造性能、铸造性能、焊接性能、热处理性能及切削加工性能等。

1.1 材料的力学性能

1.1.1 材料的静态力学性能

静载是指对试样缓慢加载。最常用的静载试验有拉伸、压缩、硬度、弯曲、扭转等，利用这些试验方法，可以测得各种力学性能指标，这里主要讨论强度、塑性和硬度指标。

1) 强度

(1) 应力-延伸率曲线

材料在载荷作用下抵抗变形和破坏的能力称为强度。因材料受载方式和变形形式不同，可将强度分为抗拉强度、抗压强度和剪切强度等。不同材料抵抗载荷作用和变形方式的能力是不同的。因此，可以有不同的强度指标，并且不同材料的强度差别很大。

材料在载荷作用下的形状和尺寸变化称为变形。材料变形随载荷的增加一般发生弹性变形、塑性变形和断裂。图 1-1 为低碳钢缓慢加载单向静载拉伸曲线，从图中可以看出，曲线主要分为以下几个阶段：

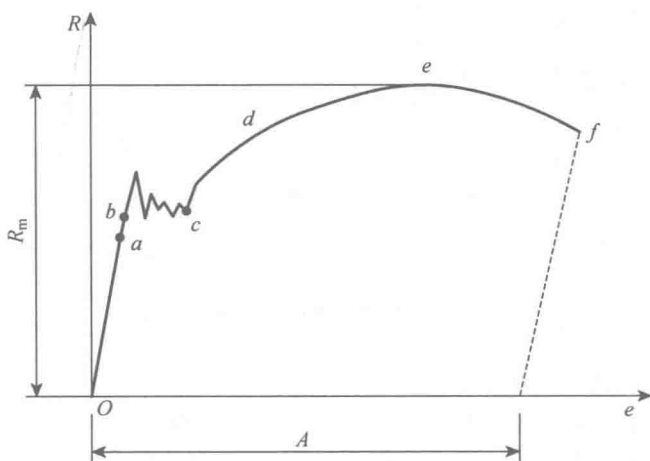


图 1-1 低碳钢的应力-延伸率曲线

Oab ：弹性变形阶段。拉伸曲线 Oa 段为直线，即当载荷不超过 a 点对应载荷时，载荷与

伸长量成正比,试样产生弹性变形,当外力卸载后,试样恢复到原来的尺寸;当载荷超过 a 点载荷而不大于 b 点对应载荷时,载荷与伸长量已不再成正比关系,试样发生极微量塑性变形 ($0.001\% \sim 0.005\%$),但仍属于弹性变形阶段。

bc :屈服阶段。当载荷超过 b 点对应载荷后,此时,试样不仅发生弹性变形,还发生了塑性变形。在拉伸曲线上出现了水平的或锯齿形的线段,这种现象称为“屈服”。

cde :强化阶段。随着载荷的不断增大,塑性变形增大,材料的变形抗力也逐渐增加。 e 点对应的载荷为材料所能承受的最大载荷,材料所承受的最大应力称为抗拉强度 (R_m)。

ef :颈缩阶段。当载荷超过最大载荷后,试样的局部截面缩小,产生所谓的“颈缩”现象。由于试样的局部截面的逐渐缩小,载荷也逐渐降低,当达到拉伸曲线的 f 点时,试样随即断裂。

图 1-2 为不同类型材料的拉伸曲线(应力-延伸率关系曲线)。

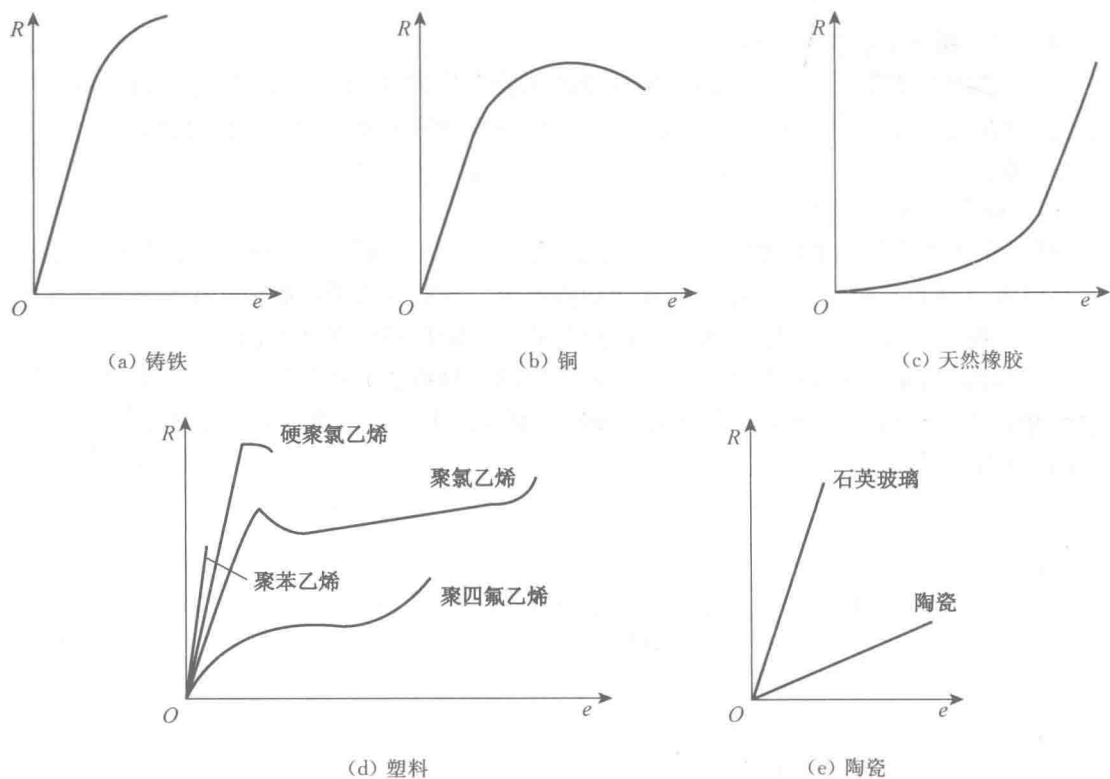


图 1-2 几种材料的应力-延伸率曲线

(2) 屈服强度

屈服强度是指当金属材料呈现屈服现象时,在试验期间达到塑性变形发生而力不增加的应力点,区分为上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} ,如图 1-3 所示。它表示材料抵抗微量塑性变形的能力,是设计和选材的主要依据之一。上屈服强度 R_{eH} 为试件发生屈服而力首次下降前的最大应力。下屈服强度 R_{eL} 指在屈服期间,不计初始瞬间效应时的最小应力。屈服强度越大,其抵抗塑性变形的能力越强,越不容易发生塑性变形。

当金属材料在拉伸试验过程中没有明显屈服现象发生时,用塑性延伸率等于规定的引伸计标距百分率时的应力,即规定塑性延伸强度 R_p 表示材料的屈服强度。如 $R_{p0.2}$ 表示规定塑性延伸率为 0.2% 时的应力。

影响材料屈服强度的内在因素主要有结合键、组织和结构等。金属材料的屈服强度与陶瓷、高分子材料相比,可看出结合键的影响是根本性的。固溶强化、形变强化、沉淀强化、弥散强化、晶界强化和亚晶强化是工业合金中提高材料屈服强度的常用手段。温度、应变速率和应力状态是影响材料屈服强度的外在因素。随着温度的降低与应变速率的增高,材料的屈服强度也升高,尤其是体心立方金属对温度和应变速率特别敏感,这导致了钢的低温脆化。应力状态不同,屈服强度值也不同。通常给出的材料屈服强度一般是指在单向拉伸时的屈服强度。三向应力状态下的材料屈服强度会提高。

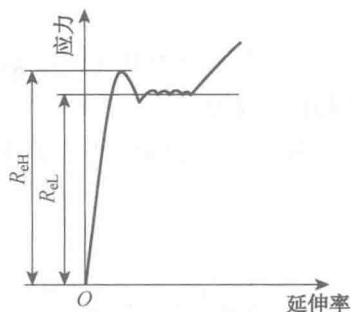


图 1-3 拉伸曲线的上屈服强度和下屈服强度

(3) 抗拉强度

材料在常温和载荷作用下发生断裂前的最大应力称为抗拉强度,用符号 R_m 表示, $R_m = P_b/S_0$, 单位为 N/mm^2 或 MPa (P_b 为试样拉断时所承受的最大力, S_0 为试样原始横截面积)。它表示材料抵抗断裂的能力。 R_m 越大,材料抵抗断裂的能力越强。

抗拉强度和屈服强度是材料在常温下的强度指标。如零件工作所受应力不大于屈服强度,则不会发生塑性变形;不大于 R_m ,则不会引起断裂。此外,常温下强度指标根据不同的试验还有抗压强度、抗弯强度和剪切强度。

比强度(强度与密度之比)是度量材料承载能力的一个重要指标,比强度愈高,同一零件的自重愈小。铝、钛合金的比强度高于钢材,因而在飞机、火箭等结构中得到广泛应用。

2) 刚度

材料受载荷作用时立即引起变形;当载荷去除,变形立即消失而恢复至原来状态的性质称为弹性。弹性变形是指去除载荷后,形状和尺寸能恢复至原来的变形。在弹性变形范围内,施加载荷与它所引起变形量成正比关系,其比例常数

$$E = R/e \quad (1-1)$$

称为弹性模量。弹性模量 E 仅与材料本身有关,反映了材料抵抗弹性变形能力即刚度的大小。 E 愈大,则弹性越小,刚度愈大;反之, E 愈小,则弹性越大,刚度愈小。

材料的弹性模量主要取决于结合键和原子间的结合力,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。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。

零件的刚度与材料的刚度不同,它除了取决于材料的刚度外,还与零件的截面尺寸、形状以及载荷作用的方式有关。如材料的刚度不够,只有增加截面尺寸或改变截面形状以提高零件的刚度。当既要提高零件刚度,又要求减轻零件的质量时,就要以零件的比刚度来评定。零件的比刚度依载荷形式而定,杆件拉伸时,其比刚度以 E/ρ 来度量, ρ 为材料的密度。

3) 塑性

材料在载荷作用下产生塑性变形而不被破坏的能力,称为塑性。材料塑性好坏可通过拉伸试验来测定。

塑性大小用断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 来表示,即

$$A = \frac{l_u - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中: l_0 为试件拉伸前的初始长度; l_u 为试样拉断后最终标距长度。

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中: S_0 , S_u 分别为试样加载前、断裂后的断面面积。

工程上通常根据材料断裂时塑性变形的大小来确定材料类型。将 $A \geq 5\%$ 的材料称为塑性材料,将 $A < 5\%$ 的材料称为脆性材料。良好的塑性可使材料顺利地实现成型。金属材料应具有一定的塑性才能进行各种变形加工;另一方面,材料具有一定塑性,可以提高零件使用的可靠性,防止突然断裂。

4) 硬度

材料抵抗其他物体压入其表面的性能,称为硬度。材料硬度愈高,其他物体压入其表面愈困难。硬度是材料的重要力学性能之一,它表示材料表面抵抗局部塑性变形和破坏的能力。因此,硬度又是材料强度的又一种表现形式。常用的硬度有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度。

(1) 布氏硬度

布氏硬度的测定原理是在直径为 D 的球形压头上施加一定负荷,压入被试金属的表面(如图 1-4 所示),保持规定的时间后卸除负荷,根据金属表面压痕的直径,计算硬度值。根据 GB/T 231.1—2009 规定,布氏硬度值的符号以 HBW(硬质合金球压头)来表示,取消了旧国标中的 HBS(钢球压头)。

$$HBW = \frac{2P/g}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-4)$$

式中: P 为载荷(N); D 为球体直径(mm); d 为压痕平均直径(mm); g 为重力加速度。

由上式可知,在 P 和 D 一定时,硬度值的高低取决于 h 的大小,二者呈反比。 h 大说明金属形变抗力低,故硬度值小,反之则硬度值大。

布氏硬度值一般采用“硬度值+硬度符号(HBW)+数字/数字/数字”的形式来标记。硬度符号后的数字依次表示球形压头直径、载荷大小及载荷保持时间等试验条件,如 280HBW10/3000/30 表示试验力为 3 000 N 保持时间为 30 s,采用的硬质合金球直径为

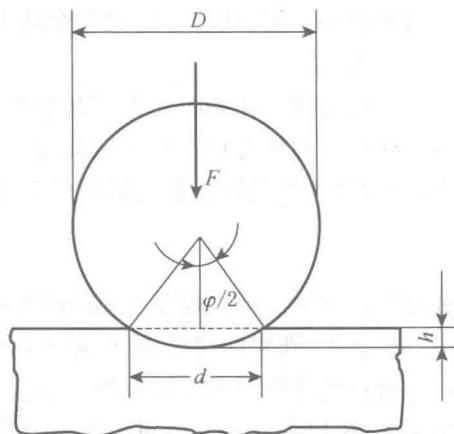


图 1-4 布氏硬度试验方法示意图

10 mm, 试件的布氏硬度为 280。

布氏法优点是测定结果较准确, 缺点是压痕大, 不适于成品检验。目前布氏硬度一般均以硬质合金球为压头, 主要用于测量较软的金属材料, 如未经淬火的钢、铸铁、有色金属或质地轻软的轴承合金。

(2) 洛氏硬度

洛氏硬度试验原理和布氏硬度类似, 它是以顶角为 120° 的金刚石圆锥体(如图 1-5 所示)或直径 1.588 mm 的淬火钢球作为压头, 以一定的压力压入材料表面, 与布氏硬度不同的是, 洛氏硬度是通过测量压痕深度来确定其硬度的。压痕愈深, 材料愈软, 洛氏硬度值愈低; 反之, 洛氏硬度值愈高。被测材料硬度, 可直接由硬度计的刻度盘读出。

根据 GB/T 230.1—2009 规定, 洛氏硬度常用三种标尺, 分别以 HRA、HRC、HRD 表示, 如表 1-1 所示。洛氏硬度的表达方法为硬度值+符号 HR+使用的标尺(+使用球形压头的类型), 如 70HR30NW 表示用总试验力为 294.2 N 的 30 N 标尺测得的表面洛氏硬度值为 70, 使用的球形压头为硬质合金球; 压头为钢球时用 S 表示。

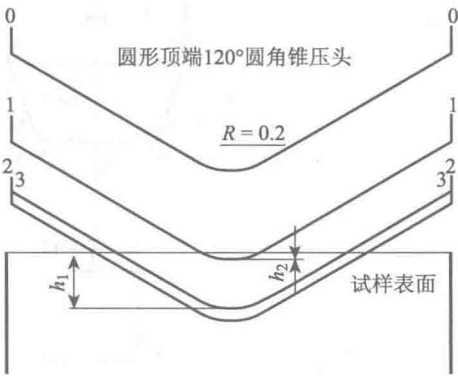


图 1-5 洛氏硬度试验方法示意图

表 1-1 洛氏硬度常用的三种标尺

洛氏硬度标尺	硬度符号	压头类型	总试验力/N	适用范围
A ^a	HRA	金刚石圆锥	558	20~88 HRA
C ^b	HRC		1 471	20~70 HRC
D	HRD		980.7	40~77HRD

注: a. 试验允许范围可延伸至 94 HRA。

b. 如果压痕具有合适的尺寸, 试验允许范围可延伸至 10 HRC。

洛氏硬度试验避免了布氏硬度试验所存在的缺点。其优点首先是适于各种不同硬质材料的检验, 不存在压头变形问题; 其次是压痕小, 基本不损伤工件表面, 且操作简单, 能立即得出数据, 效率高, 适用于大量生产中的成品检验。其缺点是用不同标尺的硬度值是不可比的; 此外, 在粗大组成相(如灰铸铁中的石墨片)或粗大晶粒的材料中, 因压痕小, 可能正好落在个别组成相上, 使得硬度数据缺乏代表性。

(3) 维氏硬度

测定维氏硬度的原理和上述两种硬度的测量方法类似, 其区别在于压头采用锥面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体, 压痕是四方锥形(如图 1-6 所示), 以压痕的对角线长度来衡量硬度值的大小。维氏硬度用 HV 表示, 单位为 N/mm^2 , 一般不予标出。维氏硬度值的表示为“数字+HV+数字/数字”的形式。HV 前的数字表示硬度值, HV 后的数字表示试验所用的载荷和持续时间, 如 640HV30/20 表示试验力为 30 kgf(294.2 N), 保持 20 s, 得到的硬度值为 640。

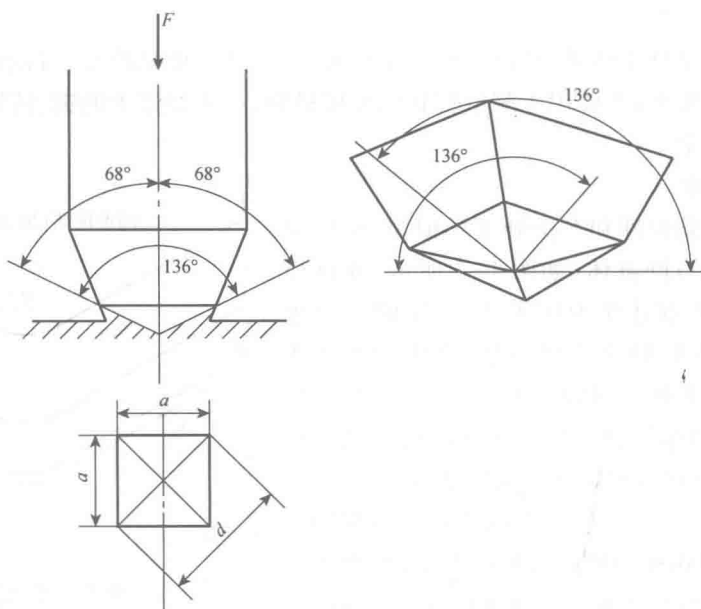


图 1-6 维氏硬度试验示意图

维氏硬度试验法所用载荷小,压痕深度浅,适用于测量薄壁零件的表面硬化层、金属镀层及薄片金属的硬度,这是布氏法和洛氏法所不及的。此外,因压头是金刚石角锥,载荷可调范围大,故对软、硬材料均适用。应当指出,各硬度试验法测得的硬度值不能直接进行比较,必须通过硬度换算表换算成同一种硬度值后,方可比较其大小。

1.1.2 材料的动态力学性能

1) 冲击性能

材料抵抗冲击载荷的能力称为材料冲击性能。冲击载荷是指以较高的速度施加到零件上的载荷,当零件在承受冲击载荷时,瞬间冲击所引起的应力和变形比静载荷时要大得多。因此,在制造承受冲击载荷的零件时,就必须考虑到材料的冲击性能。

冲击试验是利用能量守恒原理,将具有一定形状和尺寸的带有 V 型或 U 型缺口的试样,在冲击载荷的作用下冲断,以测定其吸收能量的一种试验方法。冲击试验是试样在冲击试验力的作用下的一种动态力学性能试验。冲击试验对材料的缺陷很敏感,它能灵敏地反映出材料的宏观缺陷、显微组织的微小变化和材料的质量,因此冲击试验是生产上用来检验冶炼、热加工、热处理工艺质量的有效方法。

夏比冲击试验是一种常见的评定金属材料韧性指标的动态试验方法。试验中用一个带有 V 型或 U 型刻槽的标准试样(GB/T 229—2007),在摆锤式弯曲冲击试验机上弯曲折断,测定其所消耗的能量,如图 1-7 所示。试验时,把试样 2 放在试验机的两个支承 3 上,试样缺口背向摆锤冲击方向,将重量为 $W(\text{N})$ 的摆锤 1 放至一定高度 $H(\text{m})$,释放摆锤,并测量出击断试样后向另一方向升起至高度 $h(\text{m})$ 。根据摆锤重量和冲击前后摆锤的高度差,可算出击断试样所耗冲击吸收能量 K 。

$$K = W(H - h) \quad (\text{J}) \quad (1-5)$$

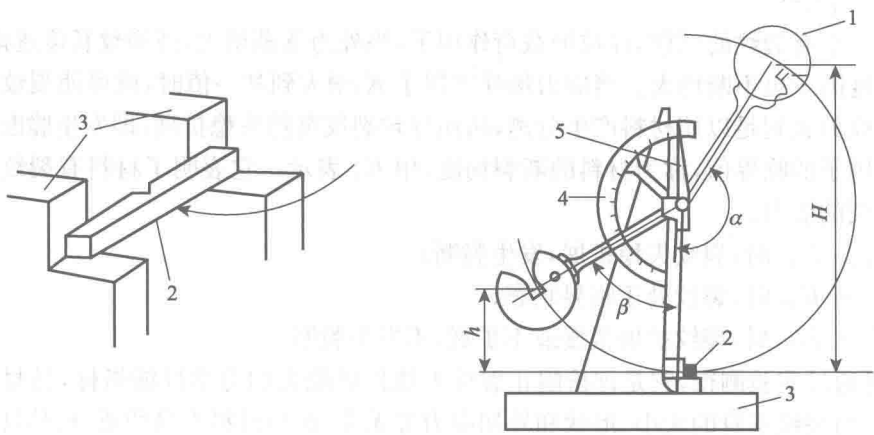


图 1-7 夏比摆锤冲击试验示意图

1—摆锤；2—试样；3—实验机；4—刻度盘；5—指针

试验中采用的试样缺口几何形状为 U、V 两种，用下标数字 2 或者 8 表示摆锤刀刃半径，如 K_{U8} 表示 U 型缺口试样在 8 mm 摆锤刀刃下的冲击吸收能量。

一些材料的冲击韧性对温度是很敏感的，如低碳钢或低合金高强度钢在室温以上时韧性很好，但温度降低至 $-20 \sim -40^{\circ}\text{C}$ 时就变为脆性状态，即发生韧性脆性的转变现象。通过系列温度冲击实验可得到特定材料的韧性脆性转变温度范围。

2) 断裂韧性

前面所述的力学性能，都是假定材料内部是完整、连续的（见图 1-8(a)），但是实际上，内部不可避免地存在各种缺陷（夹杂、气孔等）。由于缺陷的存在，使材料内部不连续，这可看成材料的裂纹，在裂纹尖端前沿有应力集中产生，形成一个裂纹尖端应力场（见图 1-8(b)）。

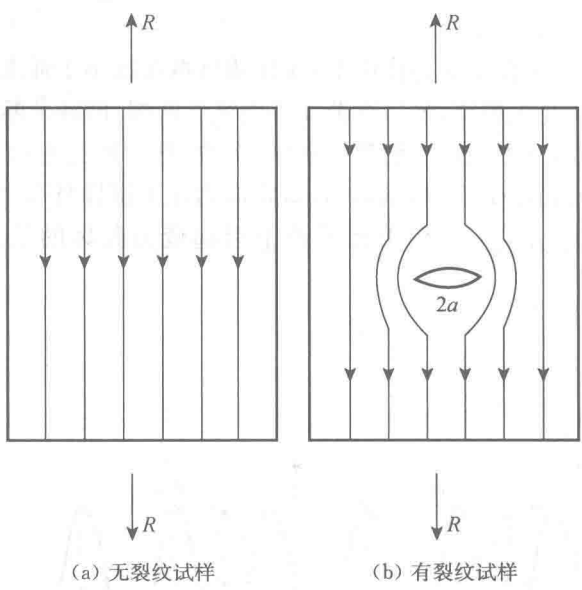


图 1-8 无裂纹和有裂纹试样的应力线

含裂纹构件的断裂控制参量取决于裂纹尖端区应力、应变场强度的参数，即应力强度因子。对于单位厚度，无限大平板中有一长度为 $2a$ 的穿透裂纹，外加应力为 R 时，应力强度因子 K_I 为

$$K_I = YRa^{\frac{1}{2}} \quad (1-6)$$

式中： K_I 为应力强度因子 ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{\frac{1}{2}}$)； Y 为零件中裂纹的几何形状因子； R 为应力 (MPa)；