



普通高等教育材料科学与工程“十二五”规划教材

工程材料 及热成形技术

GONGCHENG CAILIAO
JI RECHENGXING JISHU

张新平 颜银标 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育材料科学与工程“十二五”规划教材

工程材料及热成形技术

张新平 颜银标 主编
朱和国 徐跃 江金国 副主编

国防工业

· 北京 ·

内 容 简 介

工程材料是用于各工业部门中制造结构件的材料,这些部门包括机械、电子、建筑、化工、仪器仪表、航空航天、军工等所有工业部门。本书是从工程应用角度出发,阐明工程材料的基本理论及工程材料的成分、加工工艺、组织、结构与性能之间的关系,介绍了金属材料、高分子材料、陶瓷材料、复合材料等常用工程材料及热成形工艺与应用基本知识,使广大工程技术人员和学生具备根据零件的使用条件和性能要求合理选用工程材料的能力,根据所选材料合理设计零件结构和制订零件工艺路线的能力。

本书根据高等工科院校机械类专业的“工程材料及机械制造基础”课程相关教学大纲和教学基本要求编写,可作为高等院校机械类专业教材,也可供有关工程技术人员学习、参考。

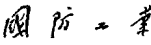
图书在版编目(CIP)数据

工程材料及热成形技术 / 张新平, 颜银标主编. —北京:
国防工业出版社, 2011. 12
普通高等教育材料科学与工程“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 118 - 07814 - 5

I. ①工... II. ①张... ②颜... III. ①工程材料-
热成型-工艺-高等学校-教材 IV. ①TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 257006 号

※

 国防工业出版社 出版发行
(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本 710 × 960 1/16 印张 22 字数 413 千字
2011 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 39.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

普通高等教育材料科学与工程“十二五”规划教材 编委会

主任委员 朱运田

副主任委员 崔 崇 吴 鏊

委 员 (按姓氏拼音排序)

陈 光 丁锡锋 杜宇雷 黄洁雯 刘 瑛

王 雄 熊党生 颜银标 杨 森 张新平

赵 军 赵永好 朱和国 邹友生

前 言

材料是用于制造各种有用物品的物质,是人类生产和生活必需的物质基础。材料是人类进化的重要标志、人类文明的基础和支柱。材料科学的日益发展也是人类幸福生活的源泉之一。纵观人类利用材料的历史,可以清楚地看到每一种重要的新材料的发现和应用,都将人们根据自然规律发展生产的能力提高到一个新的水平。从钻木取火到炼金术,从蒸汽机到电子技术,从计算机到航天登月,这些人类进化史上各个阶段的标志,早已载入史册。如今,材料科学与信息科学、能源科学已经并列为现代人类文明的三大基础和支柱。一方面,信息、能源科学的发展依赖于材料的发展;另一方面,信息、能源的创新又使材料的生产和利用达到更高的水平。各种新型材料伴随着高科技的发展而不断涌现,对世界经济和社会结构产生重大影响,从而使人类社会向高级阶段推进!

“工程材料及热成形工艺”课程是高等院校机械类专业的一门综合性技术基础课。工程材料是用于各工业部门中制造结构的材料。这些工业部门包括机械、电子、建筑、化工、仪器仪表、航空航天、军工等所有工业部门。热成形工艺是将处于一定温度的工程材料加工成合乎要求的形状结构件的制造工艺与技术。本书是从工程应用角度出发,阐明工程材料的基本理论及工程材料的成分、加工工艺、组织、结构与性能之间的关系,介绍常用工程材料及其热成形工艺与应用等基本知识。本课程的目的是使学生通过学习,在掌握工程材料的基本理论及基本知识的基础上,初步具备根据零件的使用条件和性能要求合理选用工程材料的能力、根据所选材料合理设计零件结构和制订零件工艺路线的能力。

本书是根据高等工科院校机械类专业的“工程材料及机械制造基础”课程相关教学大纲和教学基本要求,在参考了大量相关教材和科技著作的基础上编写而成的,在课程体系上做了较大的调整。全书由四部分组成:第一部分为工程材料基础,由第1章到第4章组成,介绍了有关工程材料的基本概念和基本理论,其内容包括工程材料性能与指标,构成材料的结构、组织和性能以及之间的关系,工程材料材料化与改性;第二部分为工程材料,包括第5章到第8章,介绍了常用金属材料、高分子材料、陶瓷材料及复合材料的成分、组织、性能及应用范围;第三部分为工程材料热成形工艺,即第9章,介绍了常用金属材料、高分子材料、陶瓷材料零件的热成形工艺过程及其结构工艺性要求;第四部分为工程材料的选用,即第10

章,介绍了机械零件的失效方式、分析方法与选材原则、常用机械零件的选材。

本书在第一版(颜银标. 工程材料及热成型工艺. 北京:化学工业出版社, 2004)的基础上做了必要的修订,包括:

(1) 力学性能指标符号按照 GB/T 228—2002 金属材料室温拉伸试验、GB/T 229—2007 金属材料夏比摆锤冲击试验方法进行了修订。

(2) 各种钢的牌号、化学成分、力学性能等按照 GB/T 1222—2007 弹簧钢, GB 1298—2008 - T 碳素工具钢, GB 1299—2000 - T 合金工具钢, GB 9943—2008 - T 高速工具钢, GB 24594—2009 - T 优质合金模具钢, GB/T 16270—2009 高强度合金结构钢板, GB / T 9440—2010 可锻铸铁件, GB / T 18254—2002 高碳铬轴承钢, GB/T 20878—2007 不锈钢耐热钢牌号化学成分, GB/T 221—2008 钢铁产品牌号表示方法, GB/T 1348—2009 球墨铸铁件, GB/T 1591—2008 低合金高强度结构钢, GB/T 8731—2008 易切削结构钢, GB/T 9437—2009 耐热铸铁件, GB/T 9439—2010 灰铸铁件, GB/T 700—2006 碳素结构钢等新标准进行了修订。

(3) 各种有色合金牌号、化学成分、力学性能等按照 GB/T 16475—2008 变形铝及铝合金状态代号、GB/T 25745—2010 铸造铝合金热处理等新标准进行了修订。

(4) 全部改写了第 5 章金属材料、第 8 章复合材料、第 9 章热成形工艺,其余章节也进行了不同程度的改写。

(5) 删除了原第 9 章功能材料。

本书编写分工为:第 1 章由张新平编写,第 2、3、4 章由张新平、徐跃编写,第 5 章由朱和国、张新平编写,第 6 章由徐跃编写,第 7 章由朱和国、江金国编写,第 8、9 章由朱和国编写,第 10 章由颜银标编写。另外,侯怀宇、刘瑛、朱荣、尹德良等老师也参加了部分内容的编写。

全书由张新平、颜银标主编。在本书编写过程中,国防工业出版社给予了热情的帮助和指导;全书参考了国内外有关教材、科技著作及论文,并引用了有关教材和文献的资料和插图,在此特向有关作者和单位致以诚挚的感谢。

限于编者的水平,本书难免存在一些疏漏,诚恳地希望读者予以指正。

目 录

第 1 章 工程材料的种类及其性能指标	1
1.1 工程材料的种类.....	1
1.2 工程材料的力学性能及指标.....	3
1.2.1 静载荷下的材料力学性能	3
1.2.2 动载荷下的力学性能	9
1.2.3 高温下的力学性能.....	11
1.3 工程材料的理化性能	12
1.4 工程材料的工艺性能	14
第 2 章 工程材料的结构	16
2.1 固体材料中质点的结合形式	16
2.1.1 金属晶体中质点间的结合.....	16
2.1.2 离子晶体中质点间的结合.....	16
2.1.3 共价晶体中质点间的结合.....	17
2.1.4 分子晶体中质点间的结合.....	17
2.2 金属的晶体结构	18
2.2.1 理想金属的晶体结构.....	18
2.2.2 实际金属的晶体结构.....	20
2.2.3 合金的晶体结构.....	23
2.3 高分子材料的结构	24
2.3.1 高分子聚合物的结构、组成与形态	24
2.3.2 高分子材料的结构.....	31
2.4 陶瓷材料的结构	33
2.4.1 陶瓷材料的键合类型.....	33
2.4.2 陶瓷材料的组织.....	34
第 3 章 工程材料材料化过程	36
3.1 工程材料材料化	36

3.1.1	金属材料材料化过程	36
3.1.2	高分子材料材料化过程	38
3.1.3	陶瓷材料材料化过程	38
3.2	金属材料的结晶和组织	39
3.2.1	纯金属的结晶和组织	39
3.2.2	二元合金的结晶和组织	44
3.2.3	铁碳合金的结晶	51
3.3	聚合物的合成及结构	58
3.3.1	连锁聚合反应机理	58
3.3.2	逐步聚合反应	62
3.4	陶瓷材料材料化过程	64
3.4.1	陶瓷的烧成过程	64
3.4.2	陶瓷烧成机理简介	65
3.4.3	陶瓷烧成后的组织影响因素	67
第4章	工程材料的改性	69
4.1	金属材料的改性	69
4.1.1	钢的热处理改性	70
4.1.2	有色金属的热处理改性	94
4.1.3	金属材料的合金化改性	99
4.1.4	金属材料其它改性	100
4.2	聚合物的改性	101
4.2.1	化学改性	101
4.2.2	物理改性	102
4.2.3	纳米材料粒子改性	103
4.3	陶瓷材料的改性	104
4.3.1	陶瓷增韧	104
4.3.2	表面残余应力与强化	106
第5章	金属材料	107
5.1	碳钢	107
5.1.1	碳钢的分类及编号	107

5.1.2	碳钢中的常存元素	108
5.1.3	普通碳素结构钢	109
5.1.4	优质碳素结构钢	110
5.1.5	碳素工具钢	110
5.1.6	铸钢	114
5.2	合金钢	115
5.2.1	合金钢的分类及编号	115
5.2.2	合金元素在钢中的作用	117
5.2.3	合金结构钢	119
5.2.4	合金工具钢	127
5.2.5	特殊性能用钢	136
5.3	铸铁	142
5.3.1	铸铁的石墨化	142
5.3.2	灰铸铁	146
5.3.3	球墨铸铁	148
5.3.4	可锻铸铁	151
5.3.5	蠕墨铸铁	153
5.3.6	特殊性能铸铁	153
5.4	有色金属	156
5.4.1	铝及其合金	156
5.4.2	铜及铜合金	168
5.4.3	镁及镁合金	174
5.4.4	钛及钛合金	180
5.4.5	滑动轴承合金	183
第6章	高分子材料	186
6.1	工程塑料	186
6.1.1	塑料的组成和分类	186
6.1.2	工程塑料的分类和性能特征	189
6.1.3	常见工程塑料	192
6.2	合成橡胶	200
6.2.1	橡胶的配方组成和分类	200

6.2.2	常用合成橡胶的性能及应用	201
6.3	合成纤维	204
6.3.1	合成纤维的组成和分类	205
6.3.2	常用合成纤维的性能及应用	206
6.4	胶黏剂	208
6.4.1	胶黏剂的组成和分类	208
6.4.2	常用胶黏剂的性能及应用	209
第7章	陶瓷材料	212
7.1	传统陶瓷	212
7.1.1	普通日用陶瓷	212
7.1.2	普通工业陶瓷	213
7.2	先进陶瓷	213
7.2.1	氧化物陶瓷	213
7.2.2	碳化物陶瓷	217
7.2.3	氮化物陶瓷	219
7.2.4	二硅化钼陶瓷	221
7.3	玻璃	222
7.4	耐火材料	223
7.4.1	常见耐火砖	223
7.4.2	耐火纤维	224
7.4.3	耐火混凝土	224
第8章	复合材料	225
8.1	复合材料的命名与分类	225
8.2	复合材料的性能特点	226
8.3	复合材料的增强机理	227
8.3.1	纤维增强复合材料	227
8.3.2	颗粒增强相复合材料	228
8.4	常用复合材料及应用	228
8.4.1	金属基复合材料	228
8.4.2	聚合物基复合材料	231

8.4.3	陶瓷基复合材料	233
8.5	复合材料的最新发展	234
第9章	工程材料的热成形工艺	236
9.1	铸造	236
9.1.1	铸造工艺基础	236
9.1.2	砂型铸造	244
9.1.3	铸件的结构工艺性	253
9.1.4	特种铸造	255
9.2	压力加工	259
9.2.1	金属塑性变形基础	260
9.2.2	压力加工的方式	265
9.2.3	自由锻造	265
9.2.4	胎模锻	268
9.2.5	模型锻造	268
9.2.6	板料冲压	274
9.2.7	其它压力加工方法简介	279
9.3	焊接	281
9.3.1	焊接概述	282
9.3.2	常见焊接方法	287
9.3.3	典型金属材料的焊接	296
9.3.4	焊接工艺	302
9.3.5	先进焊接技术与发展趋势	309
第10章	工程材料的选用	311
10.1	零件的失效分析	311
10.1.1	失效的概念	311
10.1.2	失效的类型	311
10.1.3	失效原因与失效分析方法	314
10.2	选材的原则和一般方法	315
10.2.1	选材原则	316
10.2.2	零件选材的一般方法	318

10.3 零件的选材及其热成型工艺	319
10.3.1 齿轮类零件选材与热成型工艺	319
10.3.2 轴类零件的选材与热成型工艺	325
10.3.3 弹簧类零件的选材和热成型工艺	330
10.3.4 机架、箱体类零件	332
10.3.5 枪、炮管类零件	333
参考文献	337

第1章 工程材料的种类及其性能指标

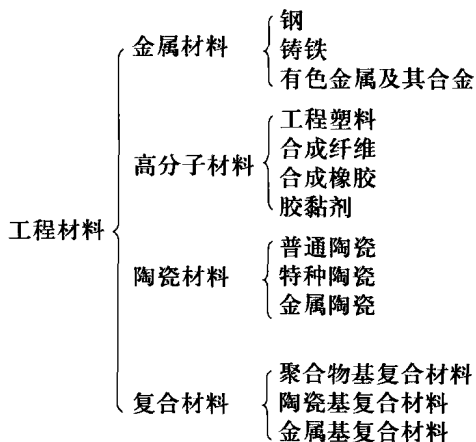
设计机械零件时,零件的结构、形状和尺寸与所选工程材料性能指标密切相关。要设计出理想的零件,必须选择合理的材料,以满足零件所要实现的功能(承受载荷、耐冲击、耐腐蚀等)。因此,首先了解工程材料具有的性能及其性能指标,对了解材料组织和性能之间的关系、合理选择材料,都是必要的。

材料的性能通常分为使用性能和工艺性能。使用性能是材料在使用过程中表现出的各种性能,它包括物理性能(密度、熔点、导热性、导电性等)、化学性能(耐腐蚀性、抗氧化性等)、力学性能(强度、塑性、冲击性能、疲劳强度等)。工艺性能是材料在加工成形过程中表现出的性能,它包括可铸性、可焊性、可锻性、可切削性和热处理性能等。

本章主要介绍材料种类、材料的力学、理化和工艺性能指标,要求重点掌握常用力学性能指标的物理意义、实用意义及应用场合,了解测试与表示方法。

1.1 工程材料的种类

材料种类繁多,通常按其组成特点、结构特点或性能特点进行分类。根据使用性能,材料分为结构材料和功能材料。工程材料主要是指结构材料,是用于机械、车辆、建筑、船舶、化工、仪器仪表、航空航天、军工等各工程领域中制造结构件的材料,主要利用材料的力学性能,如强度、硬度及塑韧性等。工程材料按组成特点可分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料四大类:



1. 金属材料

金属材料是最重要的工程材料,包括纯金属及其合金(以纯金属为基,加入其它纯金属或非金属元素所构成的金属材料),作为工程材料使用的主要是合金。元素周期表中共有 80 多种金属元素,其中以铁、铝、铜、钛、镍等为基构成的合金作为工程材料使用。工业上把金属及其合金分为两大部分。

黑色金属:铁和以铁为基的合金,包括钢、铸铁和铁合金。

有色金属:黑色金属以外的所有金属及其合金。

其中黑色金属应用最广,90%以上的金属结构材料和工具材料是以铁为基的合金。黑色金属具有优良的工程性能,价格也比较低。

按照性能特点,有色金属分为轻金属、易熔金属、难熔金属、贵金属、铀金属、稀土金属和碱土金属等,这些金属及其合金一般用于特殊场合。

2. 高分子材料

以高分子化合物或高分子聚合物为主要组分所构成的材料称为高分子材料,它分为有机高分子材料和无机高分子材料,这里主要介绍有机高分子材料。有机高分子材料分为天然高分子材料和人工合成高分子材料两大类,工程上主要使用人工合成高分子材料。高分子聚合物是指分子量为 $10^4 \sim 10^6$ 、分子结构呈链状、链上有重复的化学结构单元的化合物。高分子材料种类很多,工程上通常根据力学性能和使用状态将其分为四大类。

塑料:指室温下呈玻璃态的高分子聚合物,具有较高的强度、韧性和耐磨性。

合成纤维:指高分子聚合物通过机械处理所获得的纤维材料,具有高的强度。

橡胶:指室温下呈高弹态的高分子聚合物,具有优良的弹性性能。

胶黏剂:指室温下呈黏流态的高分子聚合物。

3. 陶瓷材料

陶瓷材料属于无机非金属材料(由金属元素与非金属元素如氧、氮、硼等形成的化合物所构成的材料),是无机非金属材料的典型代表,由不含碳氢结合的化合物构成;工程上应用最广的是工业陶瓷材料;近年来出现的高温结构陶瓷、导体和半导体陶瓷、生物陶瓷等都是新型陶瓷材料。按照成分和用途,工业陶瓷材料可分为:

普通陶瓷材料(又称传统陶瓷):主要为硅、铝氧化物构成的硅酸盐材料。

特种陶瓷材料(又称新型陶瓷):主要为高熔点的氧化物、碳化物、氮化物、硅化物等经烧结而成的材料。

金属陶瓷材料:指用陶瓷生产方法获得的金属与化合物粉末所构成的材料。

4. 复合材料

复合材料是由几种材料通过复合工艺组合而成的新型材料,它既能保留原组成材料的主要特性,又能通过复合效应获得原组分所不具备的性能,还可以通过材

料设计使各组分的性能互相补充并彼此关联,从而使材料具有新的优越性能。按照构成基体材料的不同,复合材料分为金属基复合材料、陶瓷基复合材料和聚合物基复合材料。它在强度、刚度和耐蚀性方面比单一的金属、陶瓷和聚合物都优越,是一类特殊的工程材料,一直是材料科学与工程学科研究的热点之一,该类材料具有广阔的应用与发展前景。

除上述工程材料外,还有功能材料。功能材料是用于制造功能元件(磁性器件、光敏元件、各种传感器等)的材料,主要使用材料的特殊物理、化学性能,如电、磁、光、声、热等。

另外,根据材料的具体用途,又可将材料分为航空航天材料、信息材料、电子材料、能源材料、机械工程材料、建筑材料、生物材料、农用材料等。有时也将材料分为传统材料和新型材料。传统材料一般是指需求量和生产规模大的材料;而新型材料是建立在新思路、新概念、新工艺的基础上,以材料的优异性能为主要特征的材料。严格讲,两者并无严格区别,因为传统材料也在不断提高质量降低成本、扩大品种,在工艺及性能方面不断更新。而新材料经过长期应用又变成了传统材料。如钢铁材料刚出现的时候是新材料,但是现在钢铁材料则是一种传统材料,而钢铁材料经过细晶化获得超级钢则又是一种新材料。

本书主要介绍工程结构材料。下面各章按上述工程材料的分类进行讨论。

1.2 工程材料的力学性能及指标

材料在外力作用下所表现出的各种性能称为力学性能,常用强度、塑性、硬度、韧性、疲劳强度、断裂韧性和高低温力学性能等表征。

在各种工作状态下的工程构件和机械零件,都要承受载荷。有的零件所受载荷的大小或方向不随时间变化,或随时间变化非常缓慢,这种载荷称为静载荷;有的零件所受载荷的大小或方向随时间变化非常快,这种载荷称为动载荷。在不同类型载荷作用下,构成零件的材料将表现出不同的力学行为。因此,应根据受力情况,选用不同的性能指标,来评价材料力学性能的好坏。

1.2.1 静载荷下的材料力学性能

1. 材料强度与塑性的测试

强度和塑性是材料最重要、最基本的力学性能指标,由拉伸试验法测定。按国标 GB/T 228—2002 将材料制成标准拉伸试样;装于拉伸试验机后,缓慢地施加拉力,试样逐渐伸长、直至断裂;拉伸过程中,自动记录拉力 P 和伸长量 ΔL 的关系曲线——拉伸曲线;将拉力 P /试样原始横截面积 F_0 即得应力 σ (MPa)、伸长量 $\Delta L/L$

试样原始长度 L_0 即得应变 $\varepsilon(\%)$, 消除试样几何尺寸的影响, 得到应力—应变曲线, 如图 1-1 所示。

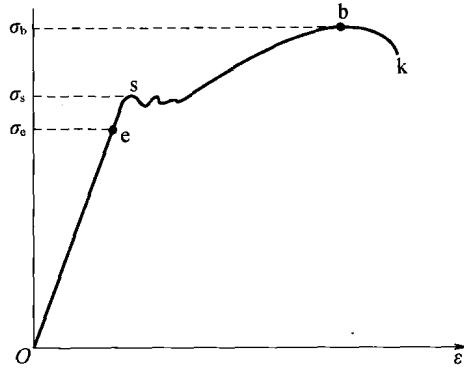


图 1-1 低碳钢的应力—应变曲线

图 1-1 中, O_e 为直线段, 应力与应变为线性关系, 该直线段的斜率称为弹性模量 (E); 如果卸去载荷, 伸长的试样立即恢复原状, 这种可恢复原状的变形叫弹性变形。其应力与应变的比值 $E = \sigma/\varepsilon$ 称为材料的弹性模量, 是衡量材料抵抗弹性变形能力的指标。 E 越大, 材料的刚度就越大。超过该点后, 如果卸除载荷, 试样的形状不能完全恢复, 这种不能恢复的永久变形称为塑性变形。 s 点为曲线上的—平台, 表明此时应力不变, 而应变仍在增加, 这种现象称为“屈服”。材料屈服后, 要使应变继续进行, 必须提高应力; 变形至 b 点, 应力达到最大值, 此时, 试样局部截面变细, 出现“颈缩”现象。颈缩后, 应力开始下降, 变形主要集中在颈缩区域, 最后在颈缩处断裂。由拉伸试验可测得强度和塑性指标。

2. 强度指标

弹性极限:指材料由弹性变形过渡到弹—塑性变形的最大应力, 它表征材料开始塑性变形的抗力。在工作过程中不允许发生塑性变形的零件, 如弹簧, 设计时应根据弹性极限来选材和设计, 保证工作应力不超过材料的弹性极限。

屈服强度:指材料产生明显塑性变形时的应力, 它表征材料产生明显塑性变形时的抗力。可以分为上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} 。机械零件经常因过量的塑性变形而失效, 一般来说不允许发生明显的塑性变形。由于下屈服点的数值较为稳定, 因此以它作为材料抗力的指标, 称为屈服点或屈服强度。工程中常根据下屈服强度确定材料的许用应力。屈服强度不仅有直接的使用意义, 在工程上也是材料的某些力学行为和工艺性能的大致度量。例如材料屈服强度增高, 对应力腐蚀和氢脆就敏感; 材料屈服强度低, 冷加工成型性能和焊接性能就好等。因此, 屈服强度是材料性能中不可缺少的重要指标。

屈服现象发生在退火或热轧的低碳钢和中碳钢等材料中,其它金属材料在拉伸时,无明显的屈服现象产生。因此,国标 GB 228—87 规定:发生 0.2% 残余伸长的应力作为屈服点,此时的强度值即为屈服强度。在 GB 228—2002 中用 $R_{p0.2}$ 表示,如图 1-2 所示,铸铁不发生明显塑性变形,属于脆性材料,因而定义其残余塑性变形为 0.2% 时的应力值为屈服强度。

抗拉强度 R_m ($R_m = P_b/F_0$, MPa):也叫强度极限,指试样在拉伸时所能承受的最大应力,它表征材料对最大均匀变形时的抗力。一般来说,在静载荷作用下,只要工作应力不超过材料的抗拉强度,零件就不会发生断裂。因此,它也是设计和选材的主要依据。

四大类工程材料都可用拉伸试验法测量它们的强度性能;但陶瓷材料更多地采用三点弯曲试验法(图 1-3)测量抗弯强度,以该强度作为陶瓷材料的强度性能指标。另外,陶瓷的抗拉强度很低,而抗弯强度较高,抗压强度更高,因此要充分考虑与设计陶瓷应用的受力状态。

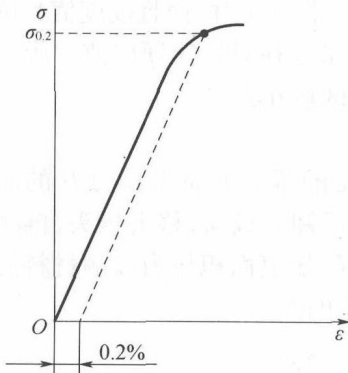


图 1-2 铸铁的应力—应变曲线

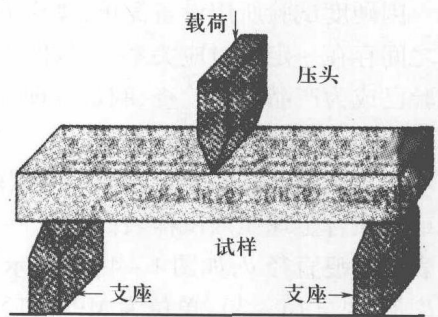


图 1-3 三点弯曲试验示意图

3. 塑性指标

塑性:材料在外力作用下产生永久变形的能力,它表征材料在外力作用下产生永久变形而不发生破坏的能力,可用伸长率 A 和断面收缩率 Z 来表示。

$$A = (L_1 - L_0)/L_0 \times 100\% \quad (1-1)$$

式中 A ——伸长率(%);

L_1 ——试样断裂时的长度(m);

L_0 ——试样的原始长度(m)

$$Z = (F_0 - F_1)/F_0 \times 100\% \quad (1-2)$$

式中 Z ——断面收缩率(%);