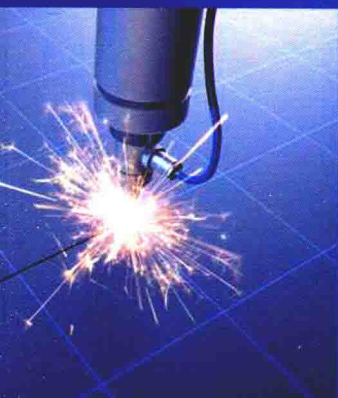


普通高等教育机电类规划教材



Mechanical Engineering Materials and
Heat Working Technology

机械工程材料与 热加工工艺

第②版

梁戈 时惠英 王志虎 © 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育机电类规划教材

机械工程材料与 热加工工艺

第2版

梁 戈 时惠英 王志虎 编
赵 康 审



机械工业出版社

为适应当前高等院校“机械工程材料与热加工工艺”课程学时压缩的教学要求，本书对原教学内容进行了必要的精简和调整，着重介绍各类工程材料的组织结构、热加工工艺及性能特点和应用范围，去掉过深的理论和繁冗的工艺细节，保留必要的原理和工艺技术，以使读者掌握必要的材料及热加工知识和有关的基本理论。本书包括：金属材料的力学性能、金属及合金的结构与结晶、铁碳合金相图、钢的热处理、工业用钢、有色金属及其合金、非金属材料及新型材料、铸造、金属压力加工、焊接共10章。本书主要供机械制造、设计类和管理工程类各专业大学本科学生使用，也可供从事机械制造和设计的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

机械工程材料与热加工工艺/梁戈，时惠英，王志虎编. —2版. —北京：机械工业出版社，2016.1

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 978-7-111-51570-8

I. ①机… II. ①梁… ②时… ③王… III. ①机械制造材料—高等学校—教材 ②热加工—高等学校—教材 IV. ①TH14 ②TG306

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第214328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：冯春生 责任编辑：冯春生 程足芬

责任校对：张薇 封面设计：张静

责任印制：李洋

三河市宏达印刷有限公司印刷

2015年11月第2版第1次印刷

184mm×260mm·15.25印张·373千字

标准书号：ISBN 978-7-111-51570-8

定价：34.00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：010-88379833

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-88379649

机工官博：weibo.com/cmp1952

教育服务网：www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网：www.golden-book.com

前 言

“机械工程材料及热加工工艺”课程是高等院校机械类、近机类专业的一门不可缺少的专业技术基础课。本书从专业特点出发，重点阐述了工程材料的基础理论，材料的成分、组织、结构、热加工工艺与性能之间的关系等。该课程的目的是使学生通过学习，在掌握工程材料的基础理论及热加工工艺基本知识的基础上，根据机械零件的使用条件和性能要求，具备对零件进行合理选材并制订合理的加工工艺方法、正确的加工工艺路线的能力。

本书主要内容包括：金属材料的力学性能，材料科学基础知识，热处理原理及各种热处理工艺方法，热处理在机械零件生产过程中的作用，工程材料的分类及编号，各种工程材料的成分、组织、性能特点及用途，材料热加工成形方法（包括铸造成形、压力加工成形和焊接成形）等。

本书在编写过程中力求理论与实际、原理与工艺密切结合，内容上力求少而精。对有关章节的顺序进行适当调整，如结合铸造工艺特点，介绍铸铁材料的分类、性能及生产工艺方法，使学生对铸铁材料的性质、生产及应用加深认识；结合压力加工工艺介绍金属材料的塑性变形及再结晶理论，使学生加深对形变强化原理及其在生产中应用的理解。本书采用最新国家标准，可作为高等院校机械类、近机类专业学生及有关工程技术人员的学习参考书。

本书在第1版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 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》、GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》、GB/T 4337—2008《金属材料 疲劳试验 旋转弯曲方法》、GB/T 231.1—2009《金属材料 布氏硬度试验 第1部分：试验方法》进行了修订。

2) 各种钢和铸铁的牌号、化学成分、力学性能等按照 GB/T 700—2006《碳素结构钢》、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 1222—2007《弹簧钢》、GB/T 18254—2002《高碳铬轴承钢》、GB/T 11352—2009《一般工程用铸造碳钢》、GB/T 1298—2008《碳素工具钢》、GB/T 24594—2009《优质合金模具钢》、GB/T 9943—2008《高速工具钢》、GB/T 18376.1—2008《切削工具用硬质合金牌号》、GB/T 1220—2007《不锈钢棒》、GB/T 1221—2007《耐热钢棒》、GB/T 5680—2010《奥氏体锰钢铸件》、GB/T 9439—2010《灰铸铁件》、GB/T 9440—2010《可锻铸铁件》、GB/T 1348—2009《球墨铸铁件》等新标准进行了修订。

3) 各种有色金属及合金的牌号、化学成分及力学性能等按照 GB/T 16474—2011《变形铝及铝合金牌号表示方法》、GB/T 1173—2013《铸造铝合金》、GB/T 5231—2012《加工铜

及铜合金牌号及化学成分》、GB/T 1176—2013《铸造铜及铜合金》等新标准进行了修订。

4) 焊条的型号按照 GB/T 5117—2012《非合金钢及细晶粒钢焊条》、GB/T 5118—2012《热强钢焊条》等新标准进行了修订。

5) 重新编写了第一章的内容，其余章节也进行了不同程度的改写。

6) 考虑到读者对材料新牌号尚不熟悉，因此保留了部分材料的旧牌号，在相关表格中用括号表明。例如不锈钢牌号 20Cr13 (2Cr13)、铝合金牌号 5A05 (LF5)，其中 20Cr13、5A05 为新牌号，2Cr13、LF5 为旧牌号。

全书共分 10 章，编者分工如下：绪论、第二章、第三章、第四章第一节至第四节、第七章由时惠英编写；第一章、第四章第五节至第七节、第五章、第六章、第八章由王志虎编写；第九章、第十章由梁戈编写。全书由梁戈统稿，赵康审阅。

在本书编写过程中得到了西安理工大学罗启文、葛利玲高工以及西安科技大学张菊梅副教授的大力支持，他们提出了许多宝贵意见和建议，葛利玲老师提供了书中的金相照片，在此一并表示感谢。

在本书编写过程中，机械工业出版社给予了热情的帮助和指导；全书参考了国内有关教材及文献，并引用了有关的资料和插图，在此特向有关作者和单位致以诚挚的感谢。

由于编者水平有限，本书难免存在一些疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

编者
于西安

目 录

前言	
绪论	1
第一章 金属材料的力学性能	3
第一节 刚度、强度、塑性	3
一、刚度	4
二、强度	4
三、塑性	6
第二节 冲击韧性	6
第三节 疲劳强度	8
第四节 硬度	9
一、布氏硬度	9
二、洛氏硬度	10
三、维氏硬度	11
第二章 金属及合金的结构与结晶	13
第一节 金属的结构与结晶	13
一、金属键与金属的特性	13
二、金属的晶体结构	13
三、金属的实际晶体结构与晶体缺陷	15
四、金属的结晶	17
第二节 合金的结构与相图	20
一、合金的概念	20
二、固态合金中的相结构	20
三、二元合金相图	22
第三章 铁碳合金相图	27
第一节 铁碳合金的组元及基本相	27
一、纯铁及其同素异构转变	27
二、铁碳合金中的基本相	28
第二节 Fe-Fe ₃ C 相图	29
一、Fe-Fe ₃ C 相图分析	29
二、典型铁碳合金的结晶过程	31
第三节 含碳量对碳钢组织与性能的影响	35
一、含碳量对碳钢组织的影响	35
二、含碳量对碳钢性能的影响	36
第四章 钢的热处理	37
第一节 钢在加热时的转变	38
一、奥氏体的形成	38
二、奥氏体晶粒的长大及影响因素	39
第二节 钢在冷却时的转变	40
一、过冷奥氏体的等温转变	40
二、过冷奥氏体连续冷却转变	46
第三节 钢的退火与正火	47
一、退火	47
二、正火	48
三、退火与正火的选用	49
第四节 钢的淬火与回火	49
一、淬火	49
二、回火	53
第五节 钢的淬透性与淬硬性	56
一、钢的淬透性	56
二、钢的淬硬性	59
第六节 钢的表面热处理	59
一、钢的表面淬火	59
二、钢的化学热处理	60
第七节 其他热处理工艺简介	64
一、形变热处理	65
二、真空热处理	65
三、离子轰击热处理	66
四、可控气氛热处理	66
五、激光热处理	67
第五章 工业用钢	68
第一节 概述	68

一、钢中的常存杂质	68	第四节 复合材料	132
二、合金元素在钢中的作用	69	一、复合材料的分类	132
三、钢的分类和编号原则	73	二、复合材料的性能	132
第二节 结构钢	75	三、常用复合材料及其应用	133
一、碳素结构钢	75	第五节 纳米材料	134
二、优质碳素结构钢	77	一、纳米科学与技术	135
三、低合金高强度结构钢	78	二、纳米材料的定义	135
四、合金结构钢	81	三、纳米材料的结构与性能	136
五、易切削结构钢	85	四、纳米材料的制备	137
六、合金弹簧钢	86	五、纳米材料的应用	139
七、滚动轴承钢	87	第六节 超导材料	140
八、铸钢	88	一、超导材料的分类及特点	140
第三节 工具钢	89	二、超导材料的应用	141
一、碳素工具钢	89	第七节 贮氢合金	143
二、合金工具钢	90	一、金属贮氢原理	143
三、高速工具钢(简称高速钢)	96	二、贮氢合金的分类	143
四、硬质合金	98	三、贮氢合金的应用	144
第四节 特殊性能钢	100	第八节 形状记忆材料	145
一、不锈钢	100	第九节 非晶态合金	147
二、耐热钢	103	一、力学性能	147
三、耐磨钢	106	二、软磁特性	147
第六章 有色金属及其合金	107	三、耐蚀性能	147
第一节 铝及其合金	107	四、高的电阻率	148
一、工业纯铝	107	五、超导电性	148
二、铝合金	108	第八章 铸造	149
第二节 铜及其合金	114	第一节 合金的铸造性能	149
一、工业纯铜	114	一、合金的流动性	149
二、铜合金	114	二、影响合金流动性的因素	150
第三节 滑动轴承合金	118	三、合金的凝固	150
一、轴承合金的性能与组织	118	四、合金的收缩	151
二、常用轴承合金	119	五、铸造内应力、变形和裂纹	153
第七章 非金属材料及新型材料	121	第二节 常用铸造合金	156
第一节 高分子材料的基本知识	121	一、灰口铸铁	156
一、基本概念	121	二、铸钢	164
二、高分子化合物的合成	122	三、有色金属的铸造	166
三、高分子材料的分类与命名	124	第三节 砂型铸造	167
第二节 高分子材料	125	一、手工造型的特点和应用	167
一、工程塑料	125	二、机器造型及其工艺特点	169
二、橡胶	128	三、制芯	170
第三节 工业陶瓷	130	第四节 铸件工艺的制订原则及结构	
一、工业陶瓷的性能	130	工艺性	171
二、常用工业陶瓷	131	一、铸件浇注位置和分型面的选择	171

二、铸造工艺图举例	174	第一节 金属熔焊	209
三、铸件结构工艺性	174	一、熔焊的冶金特点	209
第五节 特种铸造	177	二、焊接接头金属组织与性能的变化	210
一、熔模铸造	177	三、焊接应力与变形	211
二、金属型铸造	179	第二节 电弧焊	214
三、压力铸造	180	一、焊条电弧焊	214
四、低压铸造	181	二、埋弧焊	217
五、离心铸造	182	三、气体保护焊	219
六、各种铸造方法的比较	182	第三节 其他焊接方法	220
第九章 金属压力加工	184	一、等离子弧焊接	220
第一节 金属塑性成形	184	二、电渣焊	221
一、金属塑性变形	184	三、压焊	221
二、金属的冷变形	185	四、钎焊	224
三、金属的热变形	186	第四节 常用金属材料的焊接	225
四、金属的可锻性	187	一、金属材料的焊接性	225
第二节 锻造	189	二、常用钢材的焊接	225
一、自由锻	189	三、铸铁的焊接	227
二、模锻	193	四、有色金属及其合金的焊接	227
第三节 板料冲压	200	第五节 焊接结构设计	228
一、冲压基本工序	201	一、焊件的选材原则	228
二、冲模简介	203	二、焊件的结构工艺性	228
三、冲压件的结构工艺性	205	附录	232
第四节 其他特种压力加工简介	206	附录 A 金属材料室温拉伸试验方法新旧标	
一、精密模锻	206	准性能名称与符号对照表	232
二、零件的轧制	206	附录 B 常用钢的临界点	232
三、零件的挤压	207	参考文献	234
第十章 焊接	209		

绪 论

材料是制造生产工具的物质，材料的发展反映了劳动力发展的水平，反映了人类认识自然、改造自然的能力。材料的发展也反映了人类社会科学技术的发展水平，历史上任何一次科学技术的创新和突破，都是以材料的发展为前提的：18世纪60年代由于蒸汽机的出现，引发了以蒸汽机为动力的工业机械化；19世纪70年代由于电磁场理论的发展，发电机、发动机的被采用，出现了以电为动力的工业电气化；20世纪中叶由于大规模集成电路和计算机技术的出现，带动了工业自动化发展。所有这些，都是借助于各种钢铁材料、有色金属材料以及各种新型功能材料、复合材料、陶瓷材料的发展，否则，这一切都是难以实现的。

科学技术的发展记录了材料对人类社会所做出的贡献。材料是人类赖以生存的物质基础，随着人类文明和生产的发展，对材料的要求将不断提高。在近代技术的推动下材料的品种日益增多，不同效能的新材料不断涌现，原有材料的性能也有所改善与提高，以满足各种实用要求。

有了材料这一物质基础，如何把材料转变成为我们所需的生产工具，即各种机械设备，这就要求我们必须去了解和掌握材料的性能、材料的基础知识以及对材料进行各种加工的工艺方法。

机械工程材料及热加工工艺是研究材料科学基础、材料热处理、各种工程材料、零件（毛坯）热加工生产工艺等综合性的技术基础课程。其主要内容是论述常用金属材料的成分、组织、性能之间的关系及其变化规律，改善和提高材料性能的各种热处理方法，铸造、压力加工、焊接等加工工艺特点及其各种加工常用设备的工作原理和大体结构，工程中常用的非金属材料及功能材料等方面的基础知识。其目的是使学生在学习本课程后，达到对原材料生产及产品设计、制造工艺等生产过程及其相互间关系能有一个较全面的、系统的、综合性的认识。实践表明，在生产过程中，合理地选用材料及热加工工艺，科学地制订加工工艺规范，妥善安排工艺路线，对提高产品质量、延长使用寿命、节省材料、缩短生产周期、降低成本等方面都起着重大作用，而这些又正是本教材所要论述的主要内容，也是机械类专业学生不可缺少的一门专业基础课程。由此可见，这门课程在培养各类机械设计及管理人才方面占有重要的地位。

近20年来，新材料、新工艺、新设备以及现代检测手段的不断出现及应用，推动着现代工业和科学技术的发展。例如，钢材强韧化热处理新工艺的应用，在发挥材质性能潜力方

面取得明显的效果；高分子材料及复合材料等的应用已取代了某些金属材料。所有这些都取得了明显的技术与经济效果。因此，对于从事机械设计和制造的专业技术人员来说，应重视不断吸收新知识，以便扩大视野，丰富知识，更经济有效地进行设计和制造，为推动机械工业的发展做出新的贡献。

为适应高等工科院校机械设计和制造、工程管理专业的需要，本教材力求理论与实践、工艺与原理密切结合，以利于培养学生综合分析问题和解决一般工程实际问题的初步能力。本教材内容包括工程材料性能及应用、材料科学基础、材料热处理、工程材料、热加工工艺等几个方面。其基本要求如下：

(1) 材料性能及应用 了解机械工业产品常用材料及热加工方法与性能之间的关系。了解材料的强度、塑性、硬度、冲击韧性等主要力学性能及其测试方法。

(2) 材料科学基础 了解金属和合金的组织结构、结晶过程及二元合金相图的基本理论，从而掌握金属和合金的成分、组织与性能之间的关系及其变化规律。它是学习后续课程内容的理论基础。

(3) 钢的热处理 了解常用钢铁材料热处理的基本原理和工艺方法，掌握各类热处理方法的目的、应用及其在零件加工过程中的地位与作用，以便能根据零件的技术要求正确选定热处理工艺方法和合理安排工艺路线。

(4) 工程材料 掌握常用金属材料（碳钢或非合金钢、合金钢、铸铁、铝合金、铜合金及轴承合金等，其中以钢铁为主）的成分、组织、性能和用途的基本知识，以便能合理选用金属材料。对常用非金属材料、复合材料、纳米材料以及功能材料等的性能及应用等基本知识也能做一般了解。

(5) 热加工工艺 掌握铸造、锻压、焊接等主要热加工方法的实质、工艺特点、设备能力及工作原理、零件结构工艺性等方面的基本知识，以便能正确进行零件（毛坯）结构设计和选材、制订和选择合理的生产工艺路线和方法，设计并制造出技术先进、生产成本低廉的机械设备。

学习本课程注意的问题：

由于这门课程是一门综合性和工艺性较强的技术基础课，学生学习本课程必须在有关知识的基础上进行，并需要与有关课程相互配合，因此要求在学习本课程前，学生应学完化学、物理学、工程制图、材料力学等课程。本课程概念、名词术语较多，且又相互紧密联系，要在理解的基础上加强记忆。

本课程与材料制备和加工紧密相连，学习前应经过热加工方面的教学实习，对主要热加工工艺过程和设备应有一定的感性认识。同时还要重视实验环节，练习查阅材料和热处理手册，阅读有关技术杂志。特别要注意联系生产实际，运用所学知识练习解决实际问题，这不仅能够培养学生分析问题、解决问题的能力，还能进一步明确学习目的和意义，增强学习自觉性，激发学习积极性。只要坚持这样做，必能掌握课程内容，达到基本要求，取得良好的学习效果。

金属材料的力学性能

机械制造中使用的材料品种很多。为了正确使用材料，并把它加工成合格的工件，必须掌握材料的使用性能和工艺性能。使用性能是指为保证工件正常工作材料应具备的性能，包括力学性能、物理和化学性能等。工艺性能是指材料在加工过程中所表现出来的性能，包括铸造性能、锻造性能、焊接性能和切削加工性能等。

本章介绍金属材料的力学性能。所谓力学性能，是指材料在外力作用下所表现出来的性能，主要有强度、塑性、硬度、冲击韧性、疲劳强度等，是设计机械零件时选材的重要依据。这些力学性能指标是通过力学性能试验测定出的。

第一节 刚度、强度、塑性

刚度、强度和塑性是根据 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》测定出来的。将材料制成标准试样，然后把试样装在拉伸试验机上施加静拉力 F ，随着拉力的增加试样逐渐沿轴向伸长，直到拉断为止。为消除试样尺寸大小的影响，将拉力 F 除以试样原始截面积 S_0 ，即得到拉应力 R ；将伸长量 ΔL 除以试样原始标距 L_0 ，即得到伸长率，又称应变 ε 。以 R 为纵坐标， ε 为横坐标，则可画出应力应变图 ($R-\varepsilon$ 曲线)，如图 1-1 所示。从 $R-\varepsilon$ 曲线中可获得被测材料的一些力学性能信息，如弹性、强度、塑性等。

从图 1-1 可知，在 OE 阶段，试样的伸长率随应力成比例增加，若去除载荷后试样恢复原状，这种变形称为弹性变形。超过 E 点后，若去除载荷试样不能完全恢复原状，尚有一部分伸长量保留下来，这部分遗留下来的变形称为塑性变形。当应力增加到 H 时，曲线略下降而转为近似水平段，即应力不增加而变形继续增加，这种现象称为屈服，该平台称为屈服台阶。当试样产生屈服以后，试

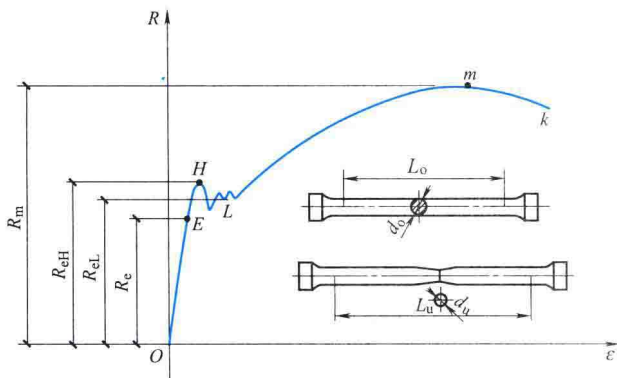


图 1-1 拉伸试样及低碳钢的 $R-\varepsilon$ 曲线

样又随载荷力增加而逐渐均匀伸长。达到 m 点，试样的某一局部开始变细，出现颈缩现象。由于在颈缩部分试样横截面积迅速减小，因此使试样继续伸长所需的载荷也就相应减小。当达到 k 点时，试样在颈缩处断裂。低碳钢在拉伸过程中经历了弹性变形、弹-塑性变形和断裂三个阶段。

一、刚度

刚度是表征金属材料抵抗弹性变形的能力。在弹性变形阶段，即 $R-\varepsilon$ 曲线上的 OE 阶段， R 与 ε 为直线关系，直线的斜率 E 称为弹性模量，可写成 $R = E\varepsilon$ 。弹性变形阶段对应的最大应力称为弹性极限，用 R_e 表示。

弹性模量 E 表示引起单位弹性变形时所需的应力。工程上常用 E 作为衡量材料刚度的指标。 E 值越大，在一定应力作用下产生的弹性变形越小，则刚度越大。

弹性模量主要取决于金属材料的种类，即金属的本性（晶格类型、晶格常数等）。通常强化金属的一些方法，如淬火、冷作硬化等对 E 值影响很小。常用材料的 E 值，碳钢为 $196 \sim 216\text{GPa}$ 、灰铸铁为 $78 \sim 157\text{GPa}$ ，铜合金为 $72 \sim 128\text{GPa}$ ，铝合金为 70GPa 。

一般机械零件大都在弹性状态下工作，对刚度有一定要求，如机床主轴、起重机臂架等，在使用时不允许产生过量的弹性变形。

二、强度

强度是金属材料在外力作用下抵抗塑性变形和破坏的能力。常用的强度指标有屈服强度和抗拉强度。

1. 屈服强度

屈服强度表征金属材料对产生明显塑性变形的抗力。

具有明显屈服现象的材料，如低碳钢，用屈服强度来表征材料对产生明显塑性变形的抗力。屈服强度包括上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} 。上屈服强度 R_{eH} 是指试样发生屈服而力首次下降前的最大应力。下屈服强度 R_{eL} 是指试样在屈服期间，不计初始瞬时效应时的最小应力。不同类型曲线的上屈服强度和下屈服强度如图 1-2 所示。

无明显屈服现象的材料，如高碳钢、铜合金、铝合金等，用规定塑性延伸强度 R_p 或规定残余延伸强度 R_r 作为该材料的条件屈服强度。如 $R_{p0.2}$ ，表示规定残余延伸率为 0.2% 时的应力； $R_{p0.2}$ ，表示规定塑性延伸率为 0.2% 时的应力。

不同材料的 $R-\varepsilon$ 曲线形状不同，图 1-3 所示为铜和铸铁的 $R-\varepsilon$ 曲线。铜是塑性材料，曲线塑性变形阶段较长，且没有明显的屈服阶段。铸铁属脆性材料，曲线上没有明显的塑性变形阶段。

2. 抗拉强度

如图 1-1 所示，当应力增加到 m 点时，试样开始局部变细，出现缩颈现象。此后由于试样截面积显著减小而不足以抵抗外力的作用，在 k 点发生断裂。断裂前的最大应力称为抗拉强度，以 R_m 表示。它反映了材料产生最大均匀变形的抗力。抗拉强度 R_m 可用下式计算

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

式中， F_m 为试样在断裂前承受的最大力； S_0 为试样标距内原始横截面积。

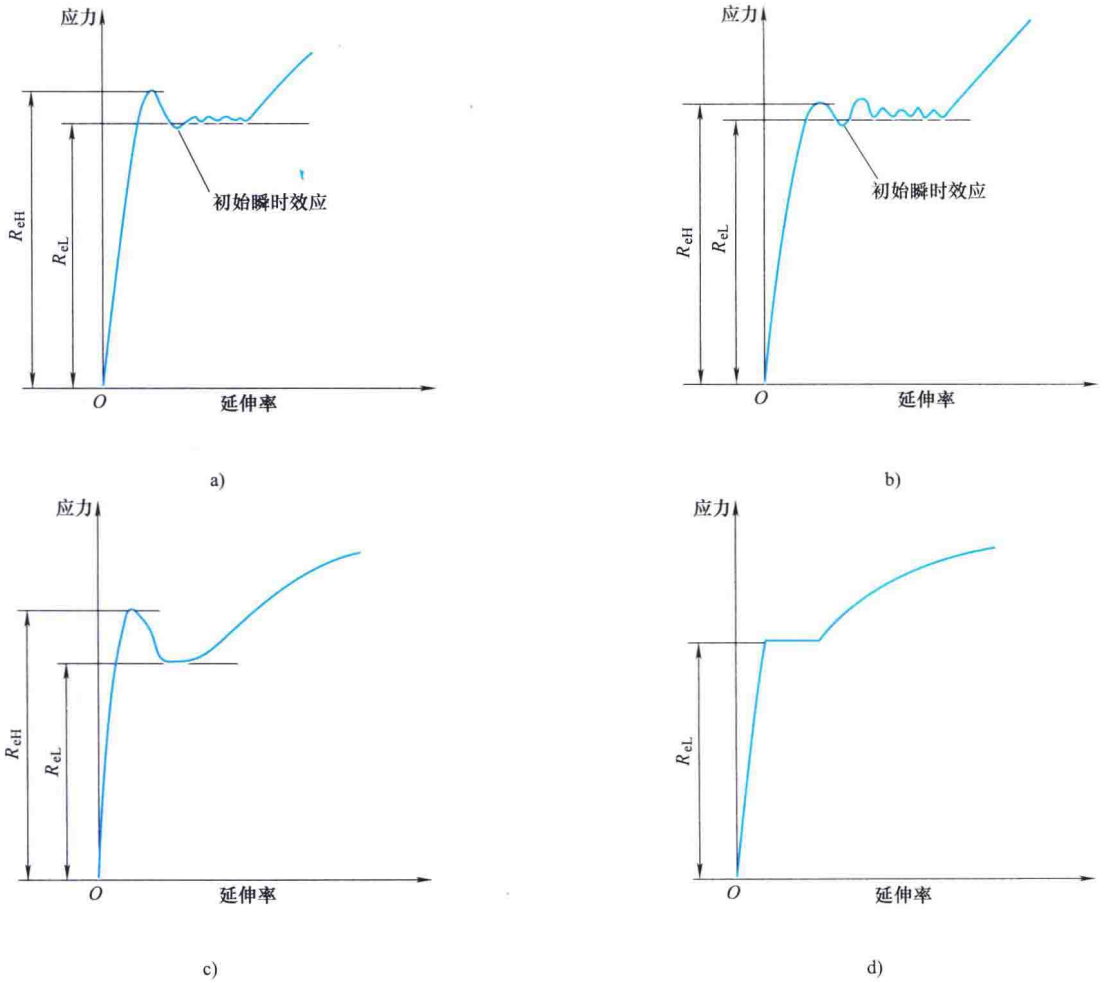


图 1-2 不同类型曲线的上屈服强度和下屈服强度

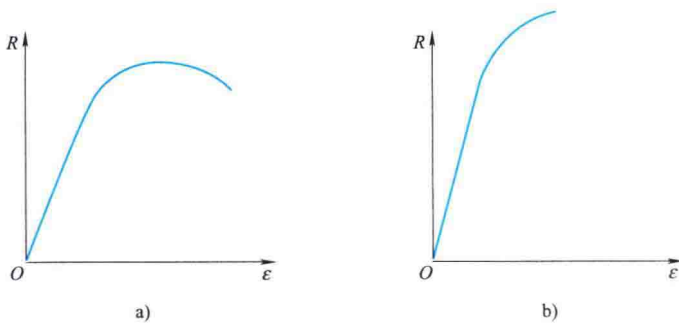


图 1-3 铜和铸铁的 $R-\epsilon$ 曲线

a) 铜 b) 铸铁

对于塑性材料（如低碳钢），由图 1-1 可知，应力达到 R_m 时试样出现缩颈。因此，抗拉强度是表征材料对产生局部伸长（颈缩）的抗力。对于脆性材料（如灰铸铁），拉伸过程不出现缩颈现象， R_m 就是断裂强度。因此，抗拉强度是表征材料对断裂的抗力。

若零件在使用时不允许产生过量塑性变形,应以材料的 R_{eH} 或 $R_{p0.2}$ ($R_{\sigma.2}$) 进行设计计算。若零件在使用时只要求不发生破坏,则以材料的 R_m 来设计计算。因此, R_{eH} 、 $R_{p0.2}$ ($R_{\sigma.2}$) 和 R_m 是机械零件设计计算的主要依据。

三、塑性

在外力作用下金属材料在断裂前产生不可逆永久变形的能力称为塑性。塑性的大小通常用拉伸试验测定的断后伸长率和断面收缩率来衡量。

1. 断后伸长率

断后伸长率是指试样拉断后标距的伸长量与原始标距的百分比,用 A 表示,即

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中, L_0 为试样原始标距; L_u 为试样拉断后的标距。

2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断后缩颈处横截面积的最大缩减量与原始横截面积的百分比,用 Z 表示,即

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\%$$

式中, S_0 为试样的原始横截面积; S_u 为拉断后试样缩颈处的最小横截面积。

断后伸长率 A 与试样原始标距 L_0 有关。 L_0 越长则 A 越小。对于比例试样,若原始标距 L_0 不为 $5.65\sqrt{S_0}$ ($L_0 \neq 5d_0$),符号 A 应附以下脚注说明所使用的比例系数,例如 $A_{11.3}$ 表示原始标距为 $11.3\sqrt{S_0}$ ($L_0 = 10d_0$) 的断后伸长率。对于非比例试样,符号 A 应附以下脚注说明所使用的原始标距,以毫米 (mm) 表示,例如 $A_{80\text{mm}}$ 表示原始标距为 80mm 的断后伸长率。断面收缩率 Z 与试样尺寸无关,故能更可靠地反映材料的塑性。

A 和 Z 是用来判断材料在断裂前所能产生的最大塑性变形量大小。一般认为, $A > 5\%$ 的材料为塑性材料,如低碳钢; $A < 5\%$ 的材料为脆性材料,如灰铸铁。塑性是金属材料进行压力加工的必要条件。此外,零件也要求具有一定的塑性,因为零件在工作时万一超载,也会由于塑性变形使材料强化而避免突然断裂。但必须指出, A 值和 Z 值的大小与负荷大小是无关的。

第二节 冲击韧性

前面讨论的刚度、强度和塑性是在静拉力作用下的力学性能。但是,许多机械零件,如锻锤锤杆、发动机曲轴等,在工作过程中往往受冲击力作用。这种急速施加的冲击力将促使金属材料产生突然脆断,具有很大危险性。因此,为确保零件安全工作,还必须了解金属材料在冲击力作用下所表现的性能。

金属材料在冲击力作用下,抵抗断裂的能力称为冲击韧性(简称韧性)。金属材料在常温下的韧性指标是用 GB/T 229—2007《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》测定的,其原理如图 1-4 所示。

首先将被测材料制成带有 U 型(或 V 型)缺口的标准试样(图 1-4a),然后把试样安

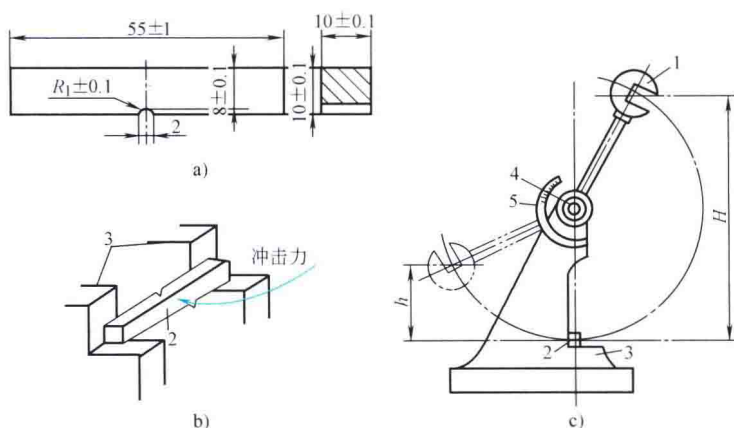


图 1-4 摆锤冲击试验示意图

a) 冲击试样 b) 试样安放 c) 冲击试验机

1—摆锤 2—试样 3—支座 4—指针 5—刻度盘

放在试验机上 (图 1-4b), 呈简支梁状态, 再将摆锤从一定高度落下, 冲断试样。从试验机的刻度盘上可读出冲击吸收功 KU 值。其中

$$K = W(H - h)$$

式中, W 为摆锤重 (N); H 、 h 分别为摆锤冲断前的高度和冲断后的高度 (m); K 为吸收能量 (J)。

吸收能量的大小代表了材料冲击韧性的 高低, 可由刻度盘直接读出。冲击韧度 (单位为 J/cm^2) 为

$$a_k = \frac{K}{S_0}$$

式中, S_0 为缺口处截面积 (cm^2)。

标准冲击试样有 U 型缺口和 V 型缺口两种, 摆锤刀刃半径应为 2mm 和 8mm 两种, 则吸收能量的表示符号为: KU_2 、 KU_8 、 KV_2 、 KV_8 , 如 KU_2 表示 U 型缺口试样在 2mm 摆锤刀刃下的吸收能量。对于低能量的冲击试验, 一些材料用 2mm 和 8mm 摆锤刀刃试验测定的结果明显不同, 2mm 摆锤刀刃的结果可能高于 8mm 摆锤刀刃的结果。

吸收能量的大小还与试验温度有关。一些材料的吸收能量随温度的降低而减小, 且在某一温度范围发生急剧下降, 这种现象称为冷脆, 该温度范围称为韧脆转变温度, 如图 1-5 所示。在韧脆转变温度以下, 材料由韧性状态转变为脆性状态。材料的韧脆转变温度越低, 说明低温冲击性能越好。

韧性指标可用来估计零件在使用时是否发生脆性断裂, 但仅具有对比的相对意义, 不能用于设计计算, 只能根据零件失效分析积累的资料来确定。此外, 韧性指标对材料的缺陷反映很敏感, 能够灵

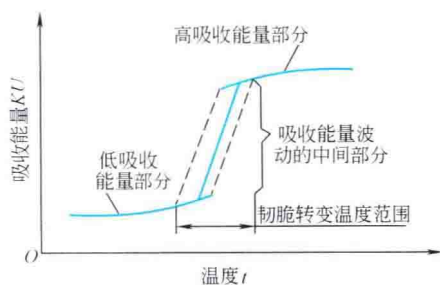


图 1-5 温度对吸收能量的影响

敏地显示材料的宏观缺陷和组织微小变化，因此在生产中还用它来检验材料质量是否合格。

第三节 疲劳强度

许多零件在工作时所承受的应力是随时间做周期性变化的。例如，传动轴在旋转时虽然外力 F 不变，但轴上 A 点处的应力 R 却是随时间 t 做周期性的变化，如图 1-6 所示。这种应力称为交变应力。从图 1-6 还可看出，应力 R_2 与应力 R_4 大小相等符号相反，这种应力循环称为对称循环。金属材料在交变应力作用下会产生局部累积损伤，经长期应力循环后，这种损伤逐步发展成为裂纹或断裂，这种现象称为疲劳破坏。金属材料在交变应力下的疲劳破坏与静拉力下的破坏完全不同，其特点是：疲劳破坏的应力低，其应力不仅低于抗拉强度，甚至低于屈服强度；并且，疲劳破坏时无明显的塑性变形，即使是塑性材料，在断裂前也不呈现明显的塑性变形，而是脆性断裂，因此，具有较大的危险性。

大量试验表明，金属材料所受的最大交变循环应力越大，则断裂前所受的循环次数 N_f （定义为疲劳寿命）就越少。这种交变循环应力与循环次数 N_f 的关系曲线称为疲劳曲线，如图 1-7 所示。

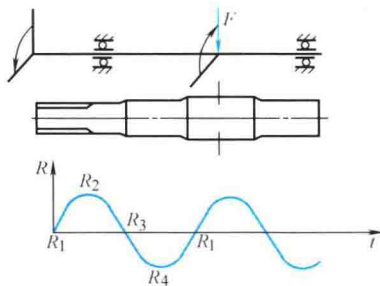


图 1-6 轴上 A 点处应力 R 随时间 t 的变化

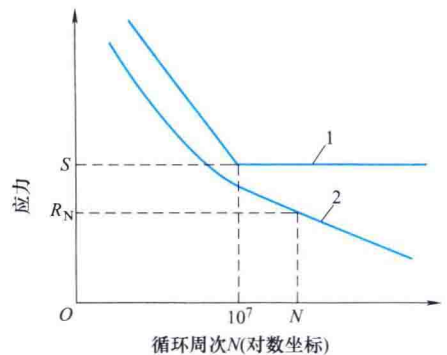


图 1-7 疲劳曲线示意图

从曲线上可以看出，循环应力 R 越低，则断裂前的循环次数 N_f 越多。当应力降到某一值后，曲线趋于水平，如图 1-7 中的曲线 1 所示，这说明当应力低于此值时，材料可经无限次应力循环而不断裂。被测能承受无限次的应力周期变化时应力振幅的极限称为疲劳极限。在指定寿命下使试样失效的应力水平称为疲劳强度，用 S 表示。金属材料的疲劳强度，是根据 GB/T 4337—2008《金属材料 疲劳试验 旋转弯曲方法》测定的。一般钢铁材料的应力循环次数为 10^7 次时，能承受的最大循环应力振幅作为其疲劳强度。

一般非铁金属、高强度钢及腐蚀介质作用下的钢铁材料，其疲劳曲线如图 1-7 中曲线 2 所示，其特征是循环次数 N 随所受应力的增大而减少，但不存在水平线段。因此，对具有图 1-7 中曲线 2 所示特征的金属，以在规定的应力比下，使试样的寿命为 N 次循环的应力振幅值为疲劳强度，称为 N 次循环后的疲劳强度，用 R_N 表示。一般规定：对于非铁合金， N 取 10^6 次；对于腐蚀介质作用下的钢铁材料， N 取 10^8 次。

金属的疲劳强度与抗拉强度之间存在以下近似的比例关系：

(1) 碳素钢 $S \approx (0.4 \sim 0.55) R_m$ 。

(2) 灰铸铁 $S \approx 0.4R_m$ 。

(3) 非铁金属 $S \approx (0.3 \sim 0.4)R_m$ 。

实际零件的疲劳强度不仅与材料有关，而且还受零件尺寸形状、表面质量等因素的影响。零件上槽、孔等结构形状的突然变化，以及加工造成的刀痕，都会引起应力集中，使疲劳强度降低。而采用表面强化工艺，如表面淬火、喷丸等，都会提高疲劳强度。因此，不能把光滑圆形截面试样测定的材料疲劳强度，误认为就是零件的疲劳强度。

第四节 硬 度

硬度试验方法很多，在机械制造中广泛采用压入法。压入法的硬度是指金属材料抵抗比它更硬的物体压入其表面的能力。硬度试验方法简便易行，试验时不破坏工件，且硬度值与其他力学性能指标（如 R_m 、 S ）有一定的关系。因此，在生产中广泛用硬度作为产品图样的技术要求，来控制成批生产的零件质量。常用的硬度试验方法有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。

一、布氏硬度

布氏硬度试验原理如图 1-8 所示，用一定的试验力 F (kgf°)，将直径为 D (mm) 的硬合金球压入金属表面，保持一定时间 (s) 后卸去试验力，然后测出金属表面的压痕直径 d (mm)。布氏硬度值是试验力 F 除以压痕球形表面积 A 所得的商，计算公式为

$$\text{HBW} = \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

布氏硬度值一般是根据测得的压痕直径 d 通过查表得出的。布氏硬度值越大，表示材料越硬。

布氏硬度试验测得的压痕直径 d 必须在 $0.24D \sim 0.6D$ 之间，否则硬度值不准确，测值无效。为了使布氏硬度试验适用于各种材料，并获得准确而有效的硬度值，GB/T 231.1—2009《金属材料 布氏硬度试验 第 1 部分：试验方法》对试验所用的压头、试验力、试验力保持的时间等试验规范做了具体规定。本版标准只允许使用硬质合金球压头，试验范围上限为 650HBW。球体直径有 10mm、5mm、2.5mm 和 1mm 四种，以适用于不同尺寸的材料。标准规定试验力 $F = KD^2$ ， K 为常数，其值有 30、15、10、5、2.5、1 等，用来满足各种材料的硬度测定，以保证测值有效。

当试样尺寸允许时，应优先选用直径为 10mm 的球压头进行试验。不同材料的试验力-

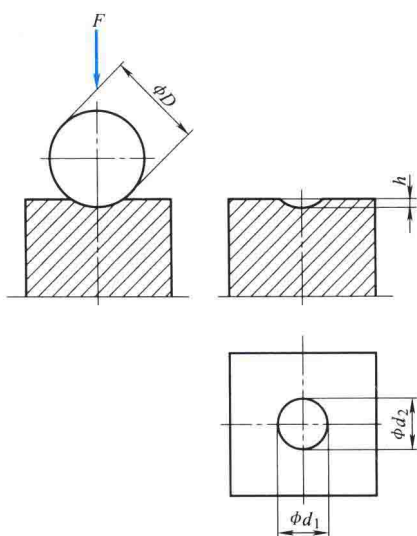


图 1-8 布氏硬度试验原理图

° 1kgf = 9.80665N。