

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

梁 戈 时惠英 编

TH14
21

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

梁戈 时惠英 编
赵康 审



机械工业出版社

为适应当前高等学校“机械工程材料与热加工工艺”课程学时压缩的教学要求,本教材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。本书另配有习题集和实验指导书,并配有用PowerPoint编写的教学课件。本书主要供机械制造、设计类和管理工程类专业大学本科生使用,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,时惠英编. —北京:
机械工业出版社, 2006.8
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-19244-3

I. 机… II. ①梁…②时… 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.
①TH14②TG306

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第056408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:董连仁 版式设计:张世琴 责任校对:程俊巧

封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006年7月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·13.75印张·335千字

定价:21.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294
编辑热线电话(010)88379711
封面无防伪标均为盗版

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定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、原理与工艺紧密结合，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，使学生加深了形变强化原理及其在生产中应用的理解。本书在编写过程中，采用最新国家标准。本书可作为高等院校机械类、近机类专业的教材及有关工程技术人员的学习参考书。

全书共分 10 章，第一至第七章由时惠英编写，第八至第十章由梁戈编写，全书由梁戈统稿，赵康审阅。本书另配有习题集、实验指导书及教学课件。

在本书编写过程中得到了银建民、葛利玲老师的大力支持，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。

由于编者水平有限，加之编写时间仓促，对书中存在的缺点及错误，恳请各位读者批评指正。

编者 2006 年 2 月于西安

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	5	
第二节 冲击韧性	5	
第三节 疲劳强度	6	
第四节 硬度	7	
一、布氏硬度	7	
二、洛氏硬度	8	
三、维氏硬度	8	
第二章 金属及合金的结构与结晶	10	
第一节 金属的结构与结晶	10	
一、金属键与金属的特性	10	
二、金属的晶体结构	10	
三、金属的实际晶体结构与晶体缺陷	12	
四、金属的结晶	14	
第二节 合金的结构与相图	16	
一、合金的概念	16	
二、固态合金中的相结构	17	
三、二元合金相图	18	
第三章 铁碳合金相图	23	
第一节 铁碳合金的组元及基本相	23	
一、纯铁及其同素异构转变	23	
二、铁碳合金中的基本相	23	
第二节 Fe—Fe ₃ C 相图	24	
一、Fe—Fe ₃ C 相图分析	25	
二、典型铁碳合金的结晶过程	27	
第三节 含碳量对碳钢组织与性能的影响	30	
一、含碳量对碳钢组织的影响	30	
二、含碳量对碳钢性能的影响	31	
第四章 钢的热处理	32	
第一节 钢在加热时的转变	32	
一、奥氏体的形成	33	
二、奥氏体晶粒的长大及影响因素	34	
第二节 钢在冷却时的转变	35	
一、过冷奥氏体的等温转变	35	
二、过冷奥氏体连续冷却转变	40	
第三节 钢的退火与正火	41	
一、退火	42	
二、正火	43	
三、退火与正火的选用	43	
第四节 钢的淬火与回火	43	
一、淬火	44	
二、回火	47	
第五节 钢的淬透性与淬硬性	50	
一、钢的淬透性	50	
二、钢的淬硬性	52	
第六节 钢的表面热处理	52	
一、钢的表面淬火	52	
二、钢的化学热处理	54	
第七节 其他热处理工艺简介	57	
一、形变热处理	57	
二、真空热处理	58	
三、离子轰击热处理	58	
四、可控气氛热处理	59	
五、激光热处理	59	
第五章 工业用钢	61	
第一节 概述	61	
一、钢中的常存杂质	61	
二、合金元素在钢中的作用	62	
三、钢的分类和编号原则	66	
第二节 结构钢	67	
一、碳素结构钢	67	
二、优质碳素结构钢	69	
三、低合金高强度结构钢	70	
四、合金结构钢	72	
五、易切削结构钢	75	

六、合金弹簧钢	76	五、纳米材料的应用	122
七、滚动轴承钢	77	第六节 超导材料	123
八、铸钢	78	一、超导材料的分类及特点	123
第三节 工具钢	79	二、超导材料的应用	125
一、碳素工具钢	79	第七节 贮氢合金	126
二、合金工具钢	80	一、金属贮氢原理	126
三、高速工具钢(简称高速钢)	84	二、贮氢合金的分类	126
四、硬质合金	87	三、贮氢合金的应用	127
第四节 特殊性能钢	88	第八节 形状记忆材料	128
一、不锈钢	88	第九节 非晶态合金	129
二、耐热钢	90	一、力学性能	130
三、耐磨钢	92	二、软磁特性	130
第六章 有色金属及其合金	93	三、耐蚀性能	130
第一节 铝及其合金	93	四、高的电阻率	130
一、工业纯铝	93	五、超导电性	130
二、铝合金	93	第八章 铸造	132
第二节 铜及其合金	98	第一节 合金的铸造性能	132
一、工业纯铜	98	一、合金的流动性	132
二、铜合金	99	二、影响合金流动性的因素	132
第三节 滑动轴承合金	102	三、合金的凝固	133
一、轴承合金的性能与组织	103	四、合金的收缩	133
二、常用轴承合金	103	五、铸造内应力、变形和裂纹	136
第七章 非金属材料及新型材料	105	第二节 常用铸造合金	138
第一节 高分子材料的基本知识	105	一、铸铁	138
一、基本概念	105	二、铸钢	144
二、高分子化合物的合成	106	三、有色金属的铸造	146
三、高分子材料的分类与命名	107	第三节 砂型铸造	148
第二节 高分子材料	108	一、手工造型的特点和应用	148
一、工程塑料	108	二、机器造型及其工艺特点	150
二、橡胶	111	三、制芯	151
第三节 工业陶瓷	113	第四节 铸件工艺的制定原则及结构	
一、工业陶瓷的性能	113	工艺性	152
二、常用工业陶瓷	114	一、铸件浇注位置和分型面的选择	152
第四节 复合材料	115	二、铸造工艺图举例	154
一、复合材料的分类	115	三、铸件结构工艺性	155
二、复合材料的性能	115	第五节 特种铸造	158
三、常用复合材料及其应用	116	一、熔模铸造	158
第五节 纳米材料	117	二、金属型铸造	159
一、纳米科学与技术	118	三、压力铸造	160
二、纳米材料的定义	118	四、低压铸造	161
三、纳米材料的结构与性能	119	五、离心铸造	162
四、纳米材料的制备	120	六、各种铸造方法的比较	162

第九章 金属压力加工	164	二、焊接接头金属组织与性能的变化	190
第一节 金属塑性成形	164	三、焊接应力与变形	191
一、金属塑性变形	164	第二节 电弧焊	194
二、金属的冷变形	165	一、焊条电弧焊	194
三、金属的热变形	166	二、埋弧焊	197
四、金属的可锻性	167	三、气体保护焊	198
第二节 锻造	168	第三节 其他焊接方法	199
一、自由锻	168	一、等离子弧焊接	199
二、模锻	172	二、电渣焊	200
第三节 板料冲压	180	三、压焊	201
一、冲压基本工序	181	四、钎焊	203
二、冲模简介	183	第四节 常用金属材料的焊接	204
三、冲压件的结构工艺性	184	一、金属材料的焊接性	204
第四节 其他特种压力加工简介	185	二、常用钢材的焊接	205
一、精密模锻	186	三、铸铁的焊接	206
二、零件的轧制	186	四、有色金属及其合金的焊接	206
三、零件的挤压	186	第五节 焊接结构设计	207
第十章 焊接	189	一、焊件的选材原则	207
第一节 金属熔焊	189	二、焊件的结构工艺性	208
一、熔焊的冶金特点	189	参考文献	211

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作出贡献。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教材。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，合理的选用材料及热加工工艺，科学地制定加工工艺规范，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作出新的贡献。

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。本教材内容包括有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作一般了解。

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、制定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。

第一章 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、锻压性能、焊接性能和切削加工性等。

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。这些性能指标是通过试验测定的。

第一节 刚度、强度、塑性

刚度、强度和塑性是根据试验测定出来的。将材料制成标准试样（图 1-1a），然后把试样装在试验机上施加静拉力，随着拉力的增加试样逐渐变形，直到拉断为止（图 1-1b）。将试样从开始到拉断所受的力 F 及所对应的伸长量 ΔL 绘制在 $F-\Delta L$ 坐标上，得出力—伸长曲线。低碳钢的力—伸长曲线如图 1-2 所示。

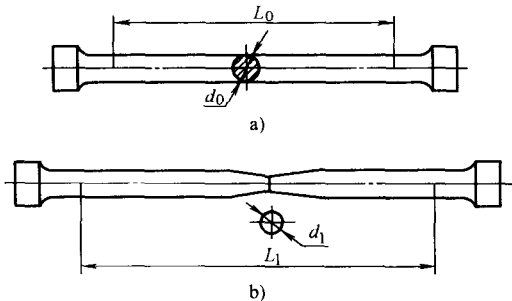


图 1-1 拉伸试样
a) 拉伸前 b) 拉断后

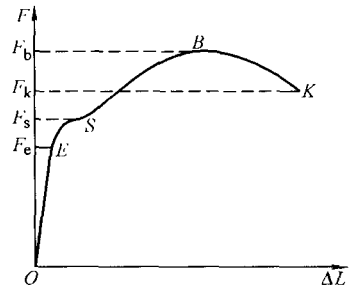


图 1-2 低碳钢的力—伸长曲线

从图 1-2 可知，在 OE 阶段，试样的伸长量随拉力成比例增加，若去除拉力后试样恢复原状，这种变形称为弹性变形。超过 E 点后，若去除拉力试样不能完全恢复原状，尚有一部分伸长量保留下来，这部分保留下来的变形称为塑性变形。当拉力增加到 F_s 时，力—伸长曲线在 S 点呈现水平台阶，即表示外力不再增加而试样继续伸长，这种现象称为屈服，该平台称为屈服台阶。屈服以后，试样又随拉力增加而逐渐均匀伸长。达到 B 点，试样的某一局部开始变细，出现缩颈现象。由于在缩颈部分试样横截面积迅速减小，因此使试样继续伸长所需的拉力也就相应减小。当达到 K 点时，试样在缩颈处断裂。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。

$F-\Delta L$ 曲线与试样尺寸有关。为了消除试样尺寸的影响，把拉力 F 除以试样原始横截

面积 A_0 。得出试样横截面积上的应力， $\sigma = \frac{F}{A_0}$ ；同时把伸长量 ΔL 除以试样原始标距 L_0 ，得到试样的应变 $\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$ 。 $\sigma - \epsilon$ 曲线与 $F - \Delta L$ 曲线形状一样，只是坐标不同。

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，即力—伸长曲线上的 OE 阶段， σ 与 ϵ 的关系为直线 OE ，这表示应力 σ 与应变 ϵ 成正比，可写成 $\sigma = E\epsilon$ ，式中的 E 为与材料有关的常数，称为弹性模量，单位为 GPa (10^9Pa)。弹性模量 E 表示引起单位变形时所需的应力。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点、屈服强度和抗拉强度。

1. 屈服点、屈服强度

屈服点、屈服强度表征金属材料对产生明显塑性变形的抗力。

对具有明显屈服现象的材料，如低碳钢，用屈服点来表征材料对产生明显塑性变形的抗力。所谓屈服点，是指材料产生屈服时的应力，即屈服力 F_s (N)除以试样原始横截面积 A_0 (mm^2)所得的商，用 σ_s 表示，单位为 MPa ，即

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0}$$

对无明显屈服现象的材料，如高碳钢、铜合金、铝合金等，用屈服强度来表征材料对产生明显塑性变形的抗力。国家标准规定，以对应于规定残余伸长率为 0.2% 的应力 ($\sigma_{r0.2}$)，或者以对应于规定非比例伸长率为 0.2% 的应力 ($\sigma_{p0.2}$)作为屈服强度。

2. 抗拉强度

在试样拉伸过程中的最大拉力所对应的应力，即最大力 F_b (N)除以试样原始横截面积 A_0 (mm^2)所得的商，称为抗拉强度，用 σ_b 表示，单位为 MPa ，即

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0}$$

对于塑性材料（如低碳钢），由图1-2可知，拉力达到 F_b 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（缩颈）的抗力。对于脆性材料（如灰铸铁），拉伸过程不出现缩颈现象， F_b 就是断裂负荷，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 σ_s 或 $\sigma_{p0.2}$ ($\sigma_{r0.2}$)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 σ_b 来设计计算。因此， σ_s 、 $\sigma_{p0.2}$ ($\sigma_{r0.2}$)和 σ_b 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 δ 表示，即

$$\delta = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中， L_0 为试样原始标距 (mm)； L_1 为试样拉断后的标距 (mm)。

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 ψ 表示，即

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\%$$

式中， A_0 为试样的原始横截面积 (mm^2)； A_1 为拉断后试样缩颈处的最小横截面积 (mm^2)。

断后伸长率 δ 与试样原始标距 L_0 有关， L_0 越长则 δ 越小。常用圆形截面试样的试样原始标距 L_0 为直径 d_0 的 10 倍 (长试样) 和 5 倍 (短试样) 两种，其断后伸长率分别用 δ_{10} (或 δ) 和 δ_5 表示。断面收缩率与试样尺寸无关，故能更可靠地反映材料的塑性。

δ 和 ψ 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 $\varphi > 5\%$ 的材料为塑性材料，如低碳钢； $\psi < 5\%$ 的为脆性材料，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， δ 和 ψ 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，许多机器零件，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—1994 金属夏比 (U 形缺口) 冲击试验方法》测定的，其原理如图 1-3 所示。

首先将被测材料制成带有 U 形缺口的标准试样 (图 1-3a)，然后把试样安放在试验机上 (图 1-3b)，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 A_{KU} 值。而

$$A_{\text{KU}} = W(H - h)$$

式中， W 为摆锤重力 (N)； H 、 h 分别为摆锤冲断前的高度和冲断后的高度 (m)； A_{KU} 为冲击吸收功 (J)。

标准冲击试样有 U 型缺口和 V 型缺口两种。冲击吸收功的大小代表了材料的冲击韧性高低。

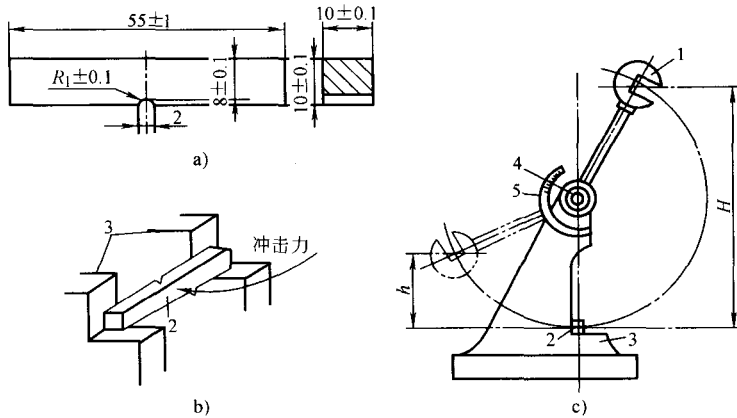


图 1-3 摆锤冲击试验示意图

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

冲击吸收功的大小还与试验温度有关。一些材料的冲击吸收功随温度降低而减小，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 1-4 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会发生脆性断裂，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，能够灵敏地显示材料的宏观缺陷和组织微小变化，因此在生产中常用它来检验材料质量是否合格。

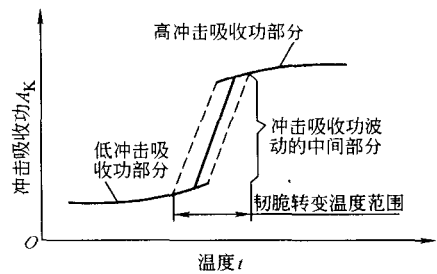


图 1-4 温度对冲击吸收功的影响

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作周期性变化的。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 σ 却是随时间 t 作周期性的变化，如图 1-5 所示。这种应力称为交变应力。从图 1-5 还可看出，应力 σ_2 与应力 σ_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

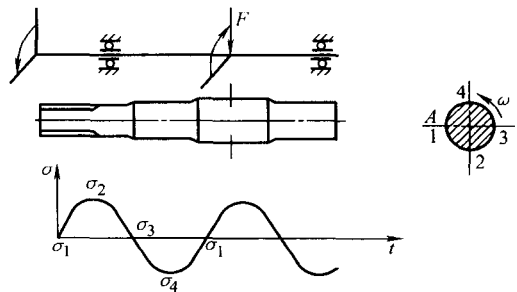


图 1-5 轴上 A 点处应力 σ 随时间 t 的变化

的应力不仅低于抗拉强度，甚至低于屈服强度；再有，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。

疲劳强度是指金属材料经无穷多次应力循环而不发生疲劳破坏的最大应力值。它表征材料对疲劳破坏的抗力。金属材料的疲劳强度，一般是用旋转弯曲疲劳试验方法测定的。工程上一般规定应力循环次数，钢铁材料为 10^7 次、有色金属为 10^8 次，用 σ_{-1} 或 $\sigma_{-1(N)}$ 表示。符号中的“-1”代表对称循环，“N”代表试样断裂前经受的应力循环次数，单位为 MPa。例如，40Cr 钢经受 10^7 次应力循环而不断裂时的最大应力为 570MPa。经测定钢的 σ_{-1} 只有 σ_b 的 50% 左右。

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及加工造成的刀痕，都会引起应力集中，使疲劳强度降低。若采用表面强化工艺，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，在机器制造中广泛采用的是压入法。压入法测定的硬度，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 σ_b 、 σ_{-1} ）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 1-6 所示。用一定的试验力 $F(N)$ ，将直径为 $D(mm)$ 的钢球或硬质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

$$\text{布氏硬度 HBS(W)} = 0.102 \frac{F}{A} = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

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—1984 对试验所用的压头、试验力、试验力保持的时间等试验规范作了具体规定。压头有钢球和硬质合金球两种。钢球适用于布氏硬度值小于 450 的材料，用 HBS 符号表示；硬质合金球适用于布氏硬度值小于 650 的材料，用 HBW 符号表示。一般常用钢球压头。球体直径有 10mm，5mm，2.5mm，2mm，1mm 五种，以适用于不同尺寸的材料。国标规定试验力 $F = KD^2$ ， K 为常数，其值有 30、

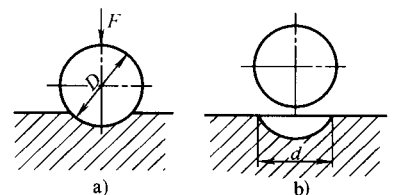


图 1-6 布氏硬度试验原理图

a) 压入 b) 压痕

⊖ 当试验力单位为 kgf 时，0.102 可删去。

15、10、5、2.5、1.25、1 等，用来满足各种材料的硬度测定，以保证测值有效。

布氏硬度值的表示方法，是依次标出硬度数值、布氏硬度符号 HB、压头类型（钢球用 S、硬质合金球用 W）、试验规范（球体直径 mm、试验力 N、保持时间 s）。例如，120HBS_{10/1000/30}表示用直径 10mm 钢球，在 9800N(1000kgf)下保持 30s 测得的布氏硬度值为 120。若试验力保持时间为 10~15s，可以不标出，如 229HBS_{10/3000}。布氏硬度值不标出单位。习惯上布氏硬度值不标出试验规范，如 170HBS。

布氏硬度所测的压痕面积大，能反映较大范围内金属的平均性能，故测值重复性强、准确。布氏硬度值由于压痕面积较大，所以检验成品件有困难。目前，一般用淬火钢球作压头，故不能测淬火钢件的硬度，常用于测小于 450HBS 的原材料或零件毛坯的硬度。

二、洛氏硬度

洛氏硬度试验原理如图 1-7 所示。它是用金刚石圆锥或直径为 1.588mm 钢球作为压头。在测定硬度时，先加预试验力，将压头压至 *b* 点，然后再加主试验力，进一步把压头压至 *c* 点。最后卸除主试验力，在弹性作用下使压痕深度从 *c* 点回到 *d* 点。这时，*bd* 之间的距离 *h* 即由主试验力所引起的压痕深度。用 *h* 来衡量金属的硬度，压痕深度越浅，金属越硬；反之亦然。为了适应人们习惯上数值越大越硬的概念，规定一常数 *K* 减去压痕深度 *h* 的值作为洛氏硬度值，并规定每 0.002mm 为一个洛氏硬度单位。洛氏硬度用符号 HR 表示，即

$$HR = \frac{K - h}{0.002}$$

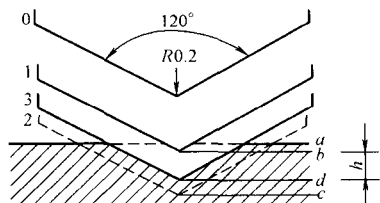


图 1-7 洛氏硬度试验原理图

根据所用的压头和试验力的不同，洛氏硬度分为

HRA、HRB、HRC 等硬度标度。HRA、HRC 都是用金刚石圆锥作压头，分别施加 588N、1470N 总试验力，其硬度值计算公式中的常数 *K* 为 0.2，用于测量硬材料或工件的硬度。HRB 是用钢球作压头，施加 980N 的总试验力，计算公式中的常数 *K* 为 0.26，主要用于测定软材料或毛坯的硬度。

洛氏硬度值的表示方法，是依次标出洛氏硬度数值、符号 HR 和标度 (A、B、C)。例如，55HRC 表示 C 标度测定的洛氏硬度为 55。洛氏硬度是一个无名数，无单位。

与布氏硬度比较，洛氏硬度试验操作简便迅速，可直接读出硬度值。由于压痕小，故可测成品件和较薄材料的硬度；但测值重复性差，通常需要在同一试件上的不同部位测量三次，取其平均值作为试件硬度值。目前，生产上常用洛氏硬度 HRC 来测定淬火钢制零件的硬度。

三、维氏硬度

维氏硬度试验原理如图 1-8 所示。它是用一定的试验力 *F*，将顶角为 136° 的金刚石四棱锥压入金属表面，保持一定时间后卸去试验力，然后测出压痕对角线长度 *d*₁、*d*₂ (mm)，并求出压痕对角线的平均值 *d*。维氏硬度值是试验力 *F* (N) 除以压痕表面积 *A* (mm²) 所得的商，用 HV 表示，为

$$HV = 0.1891 \frac{F}{d^2}$$

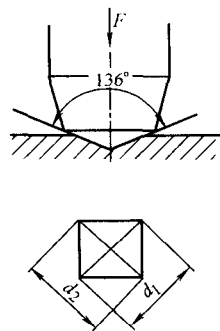


图 1-8 维氏硬度试验原理图

维氏硬度值的表示方法是依次标出硬度数值、维氏硬度符号 HV、试验规范（试验力 N、保持时间 s）。时间为 10 ~ 15s 不标注。例如，640HV30/20 表示用 294N（30kgf）试验力保持 20s 测定的维氏硬度值为 640。

维氏硬度试验使用金刚石四棱锥压头，由于可用较小的试验力 49N（5kgf），故可测较薄的硬化层；由于使用的试验力范围大 49 ~ 1176N，所以可测很软和很硬的材料，且具有统一的硬度值。但维氏硬度试验操作比较麻烦，在生产中当用洛氏硬度不能测定时（如钢件氮化层硬度）才用维氏硬度测定。

第二章 金属及合金的结构与结晶

第一节 金属的结构与结晶

一、金属键与金属的特性

金属具有良好的导电性、导热性和良好的塑性等特性。金属为什么具有这些特性呢？这主要是与金属原子间的结合方式有关。

金属原子的价电子数目很少，一般只有一个、二个，价电子与原子核之间的联系很弱。因此，当金属原子相互结合时，各原子大多会失去价电子变成为正离子；而从原子中脱落下来的价电子，在正离子间作自由运动，为整个金属所共有，这种电子称为自由电子。金属原子是依靠正离子与自由电子的相互吸引而结合起来的，这种结合方式称为金属键。

金属原子以金属键结合，其中有自由电子存在。因此，在外电场作用下，金属中的自由电子便会定向流动，形成电流，故具有良好的导电性。金属不仅依靠正离子振动，而且还依靠自由电子运动来传递热量，因此呈现良好的导热性。在外力作用下，金属中的原子面之间可作相对移动，即发生塑性变形，而正离子与自由电子间的结合不被破坏，使金属显示良好的塑性。

二、金属的晶体结构

1. 晶体的概念

固态物质可分为晶体和非晶体两大类。在晶体物质中，组成物质的质点在空间作有规则的排列；而在非晶体物质中，组成物质的质点是无规则地堆积起来的。金属原子是规则排列的，并以金属键结合，因此金属一般都是晶体（图 2-1a）。

为了便于研究晶体中原子排列的规律性，通常把原子抽象为质点，并用假想线将各个质点连接起来，形成一个空间格子。这种用来反映晶体中原子排列形式的假想空间格子称为晶格（图 2-1b）。晶体中原子排列具有周期性变化的特点，因此只要在晶格中取出最基本的几何单元进行分析，便能了解原子排列的规律。这种能够完全反映晶格特征的最小几何单元称为晶胞（图 2-1c）。

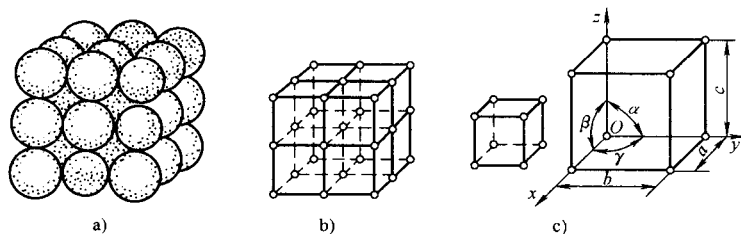


图 2-1 晶体结构

a) 晶体 b) 晶格 c) 晶胞