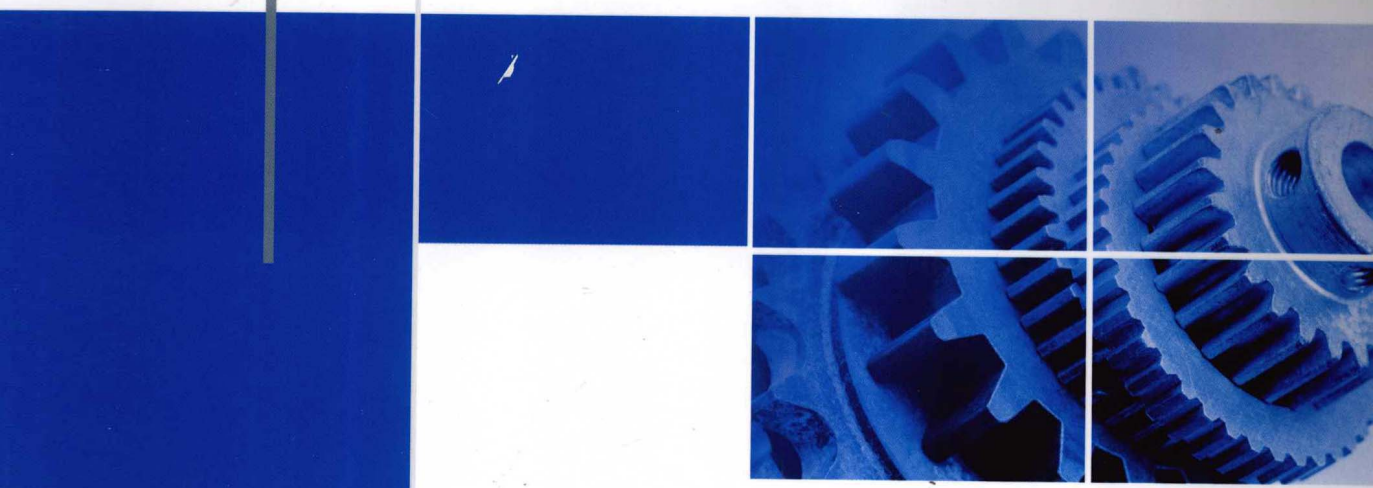


普通高等教育“十二五”规划教材



制造技术基础 实习教程

朱建军 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书内容包括常用机械工程材料、金属材料的热处理、铸造、锻压、焊接、钳工、车削加工、铣削加工、刨削加工、磨削加工、数控加工、电火花加工、测量工具。各章均有复习思考题。

本书作为高等工科院校金工实习、实训教材，可供机械专业及部分非机械类专业师生使用，也可供中专、职校、技校教学人员及有关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

制造技术基础实习教程/朱建军主编 —北京：机械工业出版社，2012.2

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-37059-8

I ①制… II. ①朱… III. ①机械制造工艺—高等学校—教材
IV ①TH16

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 002984 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：刘小慧 责任编辑：刘小慧 沈 荣 任正一

版式设计：霍永明 封面设计：张 静 责任印制：乔 宇

北京机工印刷厂印刷（三河市南杨庄国丰装订厂装订）

2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·16 75 印张·410 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-37059-8

定价：29.90 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

社 服 务 中 心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

根据教育部关于高等工程教育要强化主动服务国家战略需求,我国的高等教育正在创新高校与行业企业联合培养人才的机制,改革工程教育人才培养模式,提升学生的工程实践能力、创新能力和国际竞争力,构建布局合理、结构优化、类型多样、主动适应经济社会发展需要的、具有中国特色的社会主义现代高等工程教育体系方面进行着大量工作,以加快我国向工程教育强国迈进的步伐。

近年来,我国的制造业飞速发展,作为培养制造业人才必不可少的制造技术基础实习、实训课程,我们在多年的实际教学和工程实践过程中累积了许多经验。为了应对市场的不断变化,让学生达到实训要求,对课程及教材进行重新编制。本次编写的教材既突出传统基础制造内容,又对该内容做了较为深入的介绍,同时重点介绍传统的制造技术加工的典型案例。本书在章节设计上增加了各工种典型零件的操作案例,力求使学生通过典型零件的加工工艺分析及工艺编制来掌握各工种的基本操作过程。

本书可作为高等工科院校金工实习、实训教材,可供机械专业及部分非机械类专业师生使用,也可供中专、职校技校教学人员及有关工程技术人员参考。

本书由朱建军任主编,顾蓓、杨珍任副主编,徐新成教授级高级工程师担任主审。参加编写的人员有唐佳、张帆。本书在编写过程中承蒙上海工程技术大学工程实训中心金工实训部许多指导教师的鼎力相助,谨此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加上制造技术的不断发展,本书难免有不妥之处,恳请读者指正。

编 者

2011 年 8 月

目 录

前言

第一章 常用机械工程材料	1
第一节 常用机械工程材料分类	1
第二节 金属材料的力学性能	7
复习思考题	12
第二章 金属材料的热处理	13
第一节 钢铁材料的火花鉴别法	13
第二节 钢的热处理	14
复习思考题	22
第三章 铸造	23
第一节 砂型铸造	23
第二节 造型方法	25
第三节 浇注系统、冒口和冷铁	30
第四节 合箱	31
第五节 合金的熔炼及设备	32
第六节 浇注、落砂和清理	33
第七节 铸件的热处理	34
第八节 铸件的缺陷分析	35
第九节 典型砂型铸造件实例	37
第十节 常用铸造工艺方法比较	40
第十一节 快速精密铸造	43
第十二节 艺术铸造	50
复习思考题	52
第四章 锻压	53
第一节 塑性加工的特点	53
第二节 坯料的加热与锻件的冷却	54
第三节 锻造设备	58
第四节 自由锻的主要工序	59
第五节 模锻	62
第六节 板料冲压	63
第七节 锻压新技术简介	67
复习思考题	71
第五章 焊接	72
第一节 焊条电弧焊	73
第二节 其他常用电弧焊方法	82
第三节 气焊与气割	84
第四节 压力焊	86

第五节 钎焊	88
第六节 焊接质量分析	89
第七节 焊接结构工艺性	91
第八节 焊接新技术简介	93
复习思考题	97
第六章 钳工	98
第一节 概述与工艺特点	98
第二节 划线	99
第三节 锯削	104
第四节 锉削	106
第五节 銼削	109
第六节 钻削	110
第七节 扩孔、铰孔、铰孔	113
第八节 攻螺纹与套螺纹	114
第九节 刮削	116
第十节 研磨	118
第十一节 装配	119
第十二节 典型零件	122
第十三节 钳工安全操作规程	126
复习思考题	127
第七章 车削加工	128
第一节 切削用量选择	129
第二节 卧式车床的手柄操作	131
第三节 车刀的刃磨与安装	136
第四节 工件安装	140
第五节 车削的基本操作	144
复习思考题	158
第八章 铣削加工	160
第一节 铣削基础知识	162
第二节 分度头	166
第三节 铣削操作实训	169
复习思考题	179
第九章 刨削加工	180
第一节 刨削加工概述	180
第二节 牛头刨床	181
第三节 刨刀及其安装	184
第四节 牛头刨床的刨削方法	185

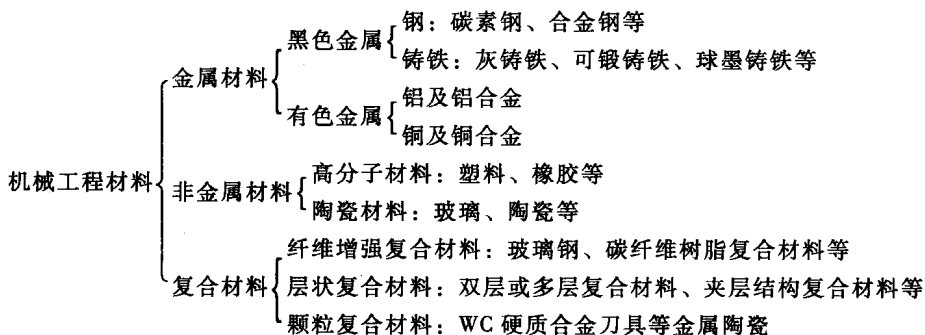
第五节 其他刨削类机床	188	第十二章 电火花加工	232
第六节 典型刨削零件的加工	191	第一节 电火花加工概述	232
复习思考题	192	第二节 电火花成形加工	232
第十章 磨削加工	193	第三节 电火花线切割加工	239
第一节 磨削基础知识	193	复习思考题	247
第二节 磨具的特性与选用	197	第十三章 测量工具	248
第三节 磨削操作	200	第一节 游标卡尺	248
第四节 典型磨削件操作实例	205	第二节 深度游标卡尺和高度游标卡尺	249
第五节 先进磨削技术	207	第三节 千分尺	250
复习思考题	209	第四节 百分表	251
第十一章 数控加工	210	第五节 极限量规	252
第一节 数控车床编程	210	第六节 游标万能角度尺	252
第二节 数控车床操作	214	第七节 其他测量工具	254
第三节 数控车床电脑仿真操作	218	第八节 现代测量技术	255
第四节 数控铣床编程	221	第九节 测量工具的维护与保养	258
第五节 数控铣床操作	224	复习思考题	258
第六节 数控铣床电脑仿真操作	227	参考文献	259
复习思考题	231	读者信息反馈表	

第一章 常用机械工程材料

材料是人类社会生存和发展的必要物质条件，是人类文明发展史的重要标志。用于生产制造机械工程构件、零件及工具的材料统称为机械工程材料。常用机械工程材料可以分为金属材料、非金属材料和复合材料三大类，其中尤以金属材料的应用最为广泛。本章主要介绍常用金属材料的成分、组织、性能及其应用方面的基本知识。

第一节 常用机械工程材料分类

常用机械工程材料可按下列方法分类：



一、金属材料

(一) 金属材料的性能

金属材料具有很多优良的性能，它是用于制造各种机床、矿山机械、农业机械和运输机械等的最主要材料。从事机械工程的设计人员或工艺人员必须首先熟悉金属材料的各种主要性能，才能根据机件的技术要求合理地选用所需的金属材料。

金属材料的性能一般分为使用性能和工艺性能两大类，使用性能是指材料在使用过程中所表现出来的性能，主要包括力学性能、物理性能和化学性能；工艺性能是指材料在加工过程中所表现出来的性能，包括热处理性能、可锻性、焊接性和切削加工性等。

力学性能是指金属材料在各种不同性质的外力作用下所表现出来的抵抗能力，如弹性、塑性、强度、硬度和韧性等，这些性能指标是机械设计、材料选择、工艺评定及材料检验的主要依据。

(二) 金属材料的分类方法及应用

1. 黑色金属

钢铁是应用最为普遍的黑色金属材料，它主要包括碳素钢、合金钢和铸铁。碳素钢和铸铁均为铁碳合金，在冶炼时人为地加入合金元素就成为合金钢或合金铸铁。

(1) 碳素钢 碳素钢又称为碳钢，是指以铁和碳为主要成分的碳的质量分数小于 2.11% 的铁碳合金，并含有少量 S、P、Si、Mn 等元素。碳钢具有较好的力学性能和工艺性

能,且价格较为低廉,故应用很广。对碳钢性能影响最大的是钢中碳的质量分数 w_c 。

1) 碳钢的分类。碳钢的常用分类方法有以下几种:

① 按碳钢中碳的质量分数不同可分为低碳钢 ($w_c \leq 0.25\%$)、中碳钢 ($0.25\% < w_c \leq 0.60\%$)、高碳钢 ($w_c > 0.60\%$)。

② 按碳钢的质量分类,通常以钢中有害元素 S、P 的含量不同来划分,可分为普通碳素钢 ($w_s \leq 0.050\%$ 、 $w_p \leq 0.045\%$)、优质碳素钢 ($w_s \leq 0.035\%$ 、 $w_p \leq 0.035\%$) 和高级优质碳素钢 ($w_s \leq 0.025\%$ 、 $w_p \leq 0.030\%$,如 T8A、T10A 等,在牌号后加“A”)。

③ 按钢的用途不同可分为碳素结构钢(用于制造各类工程构件、桥梁、船舶和轴、齿轮等机械零件,一般属于中、低碳钢)、碳素工具钢(主要用于制造各种刀具、量具和模具等,一般属于高碳钢,牌号首字为“T”)。

2) 碳钢的牌号及用途,见表 1-1。

表 1-1 碳钢的牌号及用途

类 别	牌号举例	牌号说明	用 途
碳素结构钢	Q235AF (屈服强度为 235MPa、质量为 A 级的沸腾钢)	牌号由代表屈服强度的字母、屈服强度的数值、质量等级符号、脱氧方法等四个部分按顺序组成 Q 为“屈”字的汉语拼音首字母;数字为屈服强度 (MPa);质量分为四个等级 (A、B、C、D,自左至右依次升高);F、Z、TZ 依次表示沸腾钢、镇静钢、特殊镇静钢	常用牌号有 Q215、Q235A、Q275 等,主要用于制造开口销、螺母、螺栓及桥梁结构件等普通机械零件
优质碳素结构钢	45 (平均碳的质量分数为 0.45%) 65Mn	牌号用二位数表示,数字为钢中碳的质量分数的平均万分数。硫、磷含量符合优质钢的要求 化学元素符号 Mn 表示钢的含锰量较高	常用牌号有 20、35、45、65、75 钢等,用于制造轴、齿轮、连杆等重要零件
碳素工具钢	T10、T10A (平均碳的质量分数为 1.0%, A 表示高级优质钢)	牌号由字母 T + 数字组成。“T”为“碳”字的汉语拼音首字母;数字为钢中碳的质量分数的名义千分数;含硫、磷量合乎优质钢的要求,有“A”则应达到高级优质钢的要求	常用牌号有 T8、T10、T12 等,主要用于制造低速切削刀具、量具、模具及其他工具
铸造碳钢	ZG230-450 (屈服强度为 230MPa、抗拉强度为 450MPa 的碳素铸钢件)	“ZG”为“铸钢”二字的汉语拼音首字母;后面的数字,第一组代表屈服强度 (MPa),第二组代表抗拉强度 (MPa)	常用来铸造形状复杂而需要一定强度、塑性和韧性的零件

(2) 合金钢 在碳钢中有意识地加入一种或几种合金元素,以改善和提高其性能,这种钢称为合金钢。合金钢中常加入的合金元素有锰 (Mn)、硅 (Si)、铬 (Cr)、镍 (Ni)、钼 (Mo)、钨 (W)、钒 (V)、钛 (Ti)、铌 (Nb)、锆 (Zr)、稀土元素 (RE) 等。合金钢具

有优良的力学性能，多用于制造重要的机械零件、工具、模具和工程构件，以及特殊性能工件，虽然其价格较高，但仍占有重要的使用地位。

按合金元素含量的不同，合金钢可分为以下几种：①低合金钢：合金元素总的质量分数小于5%；②中合金钢：合金元素总的质量分数为5%~10%；③高合金钢：合金元素总的质量分数大于10%。

按用途不同，合金钢可分为：①合金结构钢：用于制造机械零件和工程构件；②合金工具钢：用于制造各种刀具、量具、模具等；③特殊性能钢：具有特殊物理性能和化学性能的钢，如耐热钢、不锈钢、耐磨钢等。

1) 合金结构钢。合金结构钢的牌号表示方法为“二位数字”+“元素符号及数字”。“二位数字”为钢中碳的质量分数的平均万分数；“元素符号”表示所加入的主要合金元素，其后面的“数字”为该合金元素质量分数的名义百分数，当合金元素的平均质量分数小于1.5%时，此数字省略，只标合金元素符号，如12Cr1MoV等。高级优质合金钢在牌号后面加“A”，如18Cr2Ni4WA等。

常用的合金结构钢牌号有20CrMnTi、40Cr、42SiMn等，主要用于制造承载较大、力学性能要求较高的机械零件和工程构件。

2) 合金工具钢。合金工具钢的牌号表示方法为“一位数字”+“元素符号及数字”。“一位数字”为钢中碳的质量分数的名义千分数，当平均碳的质量分数大于等于1%时，不标注平均含碳量；“元素符号及数字”的含义与合金结构钢相同，如刀具钢9SiCr的 $w_c = 0.9\%$ 、 $w_{Si, Cr} < 1.5\%$ （Si和Cr的质量分数都小于1.5%）；Cr12表示 $w_c \geq 1.0\%$ 、 $w_{Cr} = 12\%$ 的冷作模具钢。

常用的合金工具钢牌号有9Mn2V、9SiCr、CrWMn、Cr12MoV等，主要用于制造形状复杂、尺寸较大的模具，以及高速切削的刀具和量具等。

3) 特殊性能钢，主要有不锈钢、耐热钢、耐磨钢等。不锈钢和耐热钢的牌号表示方法与合金工具钢相同。06Cr18Ni11Ti、10Cr17、30Cr13等是常用的不锈钢，主要用于制造耐蚀性要求较高的器件，如吸收塔的零部件、管道、容器及医疗器械等。

耐热钢常用牌号有45Cr14Ni14W2Mo、12Cr5Mo等，主要用于汽轮机叶片、发动机进气和排气阀门及蒸汽和气体管道等。

耐磨钢的牌号不标注平均含碳量，最重要的是高锰钢，如ZGMn13等，主要用于制造车辆履带、挖掘机铲齿、破碎机颚板和铁路道叉等。

(3) 铸铁 铸铁是指碳的质量分数大于2.11%的铁碳合金，并含有较多的（一般比钢多）S、P、Si、Mn等元素。按碳的存在形式不同，铸铁可分为以下几种：

1) 白口铸铁。白口铸铁中的碳全部以渗碳体形式存在，断口呈银白色，性能脆而硬，一般用做炼钢或铸铁生产的原料。

2) 灰口铸铁。灰口铸铁中的碳全部或大部分以游离的石墨形式存在，断口呈暗灰色。与钢相比，铸铁的抗拉强度、塑性和韧性较差，但有良好的铸造性、减摩性、减振性、切削加工性和对缺口的低敏感性，而且价格低廉，故应用广泛。

灰口铸铁的组织相当于由钢的基体和石墨组成，石墨的力学性能很低，对铸铁的性能影响很大。按石墨的形态不同，灰口铸铁又可分为灰铸铁、可锻铸铁和球墨铸铁等，它们的牌号、性能及用途见表1-2。

表 1-2 灰口铸铁的牌号、性能及用途

类 别	牌号举例	编号说明	用 途
灰铸铁	HT200 ($R_m \geq 200\text{MPa}$)	“HT”为“灰铁”二字的汉语拼音首字母,其后的数字表示最低抗拉强度(MPa)	石墨呈片状,对基体的割裂破坏作用较大,故力学性能较差,但对抗压性能影响不大。生产工艺简单,价格低廉,在工业上的应用最为广泛。常用的牌号有 HT150、HT200、HT350 等,主要用于制造结构复杂的受压件,如机床床身、机座、导轨、箱体等
可锻铸铁	KTH350-10 ($R_m \geq 350\text{MPa}$, $A = 10\%$, 黑心可锻铸铁)	“KT”为“可铁”二字的汉语拼音首字母,“H”表示“黑心”基体(“Z”表示“珠光体”基体)。两组数字分别表示最低抗拉强度(MPa)和伸长率(%)	石墨呈团絮状,对基体的割裂破坏作用比片状小些,故力学性能比灰铸铁好,有一定强度和塑性,但仍不可锻造。常用牌号有 KTH330-08、KTH370-12、KTZ650-02 等,主要用于制造形状复杂承受冲击载荷的薄壁中小型零件,如汽车后桥齿轮箱体等
球墨铸铁	QT400-15 ($R_m \geq 400\text{MPa}$, $A = 15\%$)	“QT”为“球铁”二字的汉语拼音首字母,其后两组数字分别表示最低抗拉强度(MPa)和伸长率(%)	石墨呈球状,对基体的割裂破坏作用最小,故强度和塑性都较好。常用牌号有 QT700-2、QT600-3、QT900-2 等,主要用于制造要求综合力学性能好、形状复杂的零件,如凸轮轴、柴油机曲轴、齿轮等零件

2. 有色金属

如上所述,通常把铁及其合金称为黑色金属,而把 Cu、Al、Zn、Mg、Ti 等非铁金属及其合金称为有色金属。有色金属具有优良的性能,虽产量不高,价格也贵,但仍是机械制造和工程上不可缺少的材料。有色金属品种繁多,在生产中常用来制造有特殊性能要求的零件和构件。常用的有铝、铜及其合金。纯铝、防锈铝、硬铝、超硬铝等的密度小,在航空航天工业中得到了广泛应用。黄铜(Cu-Zn 合金)具有一定的强度、塑性和耐蚀性,主要用于制造垫圈、螺钉、衬套、管路零件及对海水的耐蚀件等。ZCuSn10Pb1 等铸造铜合金的减摩性及耐蚀性好,主要用于制造减摩、耐蚀的零件,如轴瓦、涡轮等。纯铜(T1、T2、T3)的电导率和热导率仅次于银,广泛用于制作导电及导热器材。纯铜在大气、海水和某些非氧化性酸(盐酸、稀硫酸)、碱、盐溶液及多种有机酸(醋酸、柠檬酸)中均有良好的耐蚀性,广泛用于化学工业。另外,纯铜具有良好的焊接性,可经冷、热塑性加工制成各种半成品和成品。

二、非金属材料

非金属材料泛指除金属材料之外的材料,主要有塑料、橡胶、陶瓷、合成纤维、涂料和粘结剂等。它们具有金属材料所没有的特性,应用也越来越广泛。

塑料是以合成树脂为主体,加入添加剂以改善使用性能和工艺性能的高分子材料。塑料的密度小,具有良好的耐蚀性、电绝缘性、减摩性和成型工艺性,缺点是强度低、耐热性差、易老化。塑料的应用很广,我国目前年需用量达 1800 万 t 以上。日常生活及包装中用的塑料称为通用塑料,如聚乙烯、聚氯乙烯等;在工程构件和机械零件中用的塑料称为工程塑料,它们的力学性能较好,或具有某些突出的性能,见表 1-3,主要有聚酰胺、ABS、聚

甲醛、聚碳酸酯、有机玻璃、聚四氟乙烯、环氧树脂等。

表 1-3 常用工程塑料的性能及应用

名 称	性能特点	应 用
聚甲醛 (POM)	耐疲劳性能高, 自润滑性和耐磨性好, 但耐热性差, 收缩性较大	耐磨传动件, 如齿轮、轴承、凸轮、运输带等
聚酰胺 (PA)	减摩耐磨性、耐蚀性及韧性好, 但耐热性不高 ($<100^{\circ}\text{C}$), 吸水性高, 成 (俗称尼龙) 型收缩率大	耐磨及耐蚀的承载和传动件, 如齿轮、蜗轮、密封圈、轴承、螺钉螺母、尼龙纤维布等
聚碳酸酯 (PC)	冲击韧性高, 耐热耐寒稳定性好 ($-60 \sim 120^{\circ}\text{C}$), 但自润滑和耐磨性较差	受冲击载荷不大但要求尺寸稳定性较高的零件, 如轻载齿轮、心轴凸轮、螺栓、铆钉、风窗玻璃、头盔、高压绝缘器件等
ABS	综合性能良好, 吸水性低, 表面易电镀金属。原料易得, 价格便宜	小型泵叶轮, 仪表罩壳, 轴承, 汽车零件如挡泥板、扶手、热空气调节导管等, 小轿车车身, 纺织器材, 电信器材等

橡胶突出的特性是高弹性, 还具有良好的吸振、耐磨和电绝缘性能。橡胶由天然橡胶或合成橡胶加入配合剂经硫化处理制成, 也属于高分子材料。常用的合成橡胶有丁苯橡胶、顺丁橡胶、丁腈橡胶、氯丁橡胶等, 常用于制造轮胎、密封圈、减振器、管路及电绝缘包皮等。

陶瓷是无机非金属材料, 具有高的耐热、耐蚀、耐磨、抗压等性能, 但硬而脆, 抗拉强度低。陶瓷分为普通和特种两种陶瓷, 普通陶瓷由粘土和石英等为原料制成, 主要用于日常用品、电气绝缘器件、耐蚀管道或容器等; 特种陶瓷是以高纯度人工化合物 (如氧化铝等) 为原料制成的, 如高强度陶瓷、压电陶瓷、化工陶瓷、耐酸陶瓷等。

三、复合材料

复合材料是指将两种或两种以上物理和化学性质不同的物质, 通过人工方法结合而成的工程材料。它由基体和增强相组成, 基体起粘结剂作用, 具有粘结、传力、缓裂的功能; 增强相起提高强度 (或韧性) 的作用。复合材料能充分发挥组成材料的优点, 改善或克服它们的缺点, 所以优良的综合性能是其最大优点, 已成为新兴的工程材料。复合材料按增强相形状可分为纤维增强复合材料、层压增强复合材料及颗粒增强复合材料, 目前应用最多的是纤维增强复合材料。纤维增强复合材料的纤维起增强相作用, 是承受载荷的主要部分, 常用的有玻璃纤维、碳纤维、硼纤维、芳纶纤维等。基体可用各种合成树脂, 如环氧树脂等。玻璃钢是玻璃纤维/树脂的复合材料, 应用较早。碳纤维树脂增强复合材料的密度小, 比强度和比模量高, 耐蚀和耐热性好, 应用最为广泛。碳纤维增强复合材料常用于制作飞机、导弹、卫星的构件, 以及轴承、齿轮等耐磨零件和化工器件等。

四、材料选择设计

材料选择是由设计人员和工程师共同完成的。针对某个设计, 进行材料选择时需要满足一系列的性能要求, 这些要求有时是相互矛盾的, 很难找到某种材料能够满足所有性能要求, 设计人员必须进行综合考虑。

1. 零件失效分析

各种机械零件都有一定的功能,如承受载荷、传递能量、完成某种动作等。当机械零件丧失它应有的功能时,称为零件失效。

零件失效的原因包括以下几个方面:

- 1) 设计和选材的问题。
- 2) 加工、热处理或材质的问题。
- 3) 装配的问题。
- 4) 操作和维护不当的问题。

下面举例说明某吉普车变速箱齿轮的崩齿失效问题。

(1) 原始情况 40Cr 钢制模数为 3 的齿轮,热处理工艺是 $850 \sim 860^{\circ}\text{C}$ 气体氰化,炉冷至 830°C 后油淬,然后 200°C 回火,在汽车爬坡时发生崩齿。

(2) 观察分析 对三个不同程度崩齿的齿轮观察分析,发现断口已锈蚀,清洗后也分不清楚,大致像细瓷断口,有放射状条纹,与脆断断口相似。

硬度测量和金相组织观察结果显示马氏体和贝氏体量的比例不同,夹杂物在 1.5 级以下,晶粒度、氰化层正常,化学成分光谱分析符合要求。

齿轮材料的断裂性能无法用齿轮试样实测,但从硬度值 ($\geq 52\text{HRC}$) 来看,此时材料的 K_{Ic} 值比较低,由一般结构钢淬火回火到 52HRC 时, K_{Ic} 约为 $31\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

(3) 结论 这三个齿轮是由于材料的抗压能力太低,发生了低应力脆断。由三个齿轮的化学成分计算淬透性,结果分别为 49HRC 、 45HRC 和 48HRC ,齿根位置的冷却条件相当于 $42 \sim 45\text{HRC}$,故淬火后得到现在的硬度。从耐疲劳又不脆断考虑,齿根部硬度应控制在 $36 \sim 46\text{HRC}$ 范围内才合适,显然 40Cr 钢的淬透性有些高。

(4) 改进措施 为了解决眼前的生产问题,经研究决定,把 40Cr 钢碳的质量分数控制在成分下限,即相当于 38Cr 钢,效果良好,避免了此类事故的再次发生。

2. 材料选择原则

为了防止零件失效,在设计过程中材料的选择异常重要,应符合以下选择原则:

- 1) 满足功能要求原则。
- 2) 可获得性原则。
- 3) 经济性原则。
- 4) 环境保护性原则。

3. 材料选择方法

(1) 几何选择方法 对于某个实际应用,理想材料以规则多边形表示,每一条由多边形中心向其各个顶点的连线表示材料的一项特性。例如,用一个正五边形表示材料的强度、韧性、电导率、耐蚀性和成本,每一项特性值定义为 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 、 Y_5 ,它们到多边形中心的距离相等。对于每一种候选材料,其相应的特性指标记为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 。很显然,候选材料能否满足要求可以从以下三个因素来进行衡量:

- 1) 候选材料形成的多边形与理想多边形的形状最接近。
- 2) 候选材料形成的多边形与理想多边形的大小最接近。
- 3) 候选材料与理想材料的偏差程度最小。

(2) 数学选择方法 从材料库中选择材料,最直接的方法是按候选材料特性单位偏差和最小原则进行选择。如果要求材料特性用 Y_i 表示,候选材料特性用 X_i 表示,各个特性的权

重为 α_i ，则评价公式为

$$\text{Min}Z = \sum_{i=1}^n \left| \alpha_i \frac{X_i}{Y_i} - 1 \right|$$

在材料选择过程中，通常规定材料的特性最大和最小值，但是允许材料的某些特性高于要求的最大值或低于要求的最小值。在某些特殊条件下，如材料的失效强度或热膨胀性能等，允许在要求值的左右一定范围内适当变动。

(3) 面向生命周期的选择方法 产品在其生命周期的许多阶段对环境具有不良影响，如产品使用的材料、连接方式、能源消耗、可循环利用性以及产品的报废方式等都对环境产生着一定的影响，这些都是通过设计决策确定的。材料选择在产品开发过程中是最早最重要的设计决策，因此也是考虑环境问题最主要的设计决策。

材料选择需要考虑很多因素，如工程需要、可制造性、性能、环境影响和费用等，但所有这些都必须与产品的可靠性、性能、可维修性以及环境保护性同时考虑，协调一致，使产品在整个生命周期内的费用以及对环境的影响降至最低。

第二节 金属材料的力学性能

金属材料经过热处理后，可以发挥其潜力，提高使用性能，改善工艺性能并延长使用寿命。

金属材料在外力作用下所表现出来的性能称为力学性能，它包括强度、硬度、塑性、冲击韧性及疲劳强度等。材料的这些力学性能指标可以通过试验来测定，并以数据来反映，它们是工程设计和选用材料的重要依据。

一、强度和塑性

1. 强度

强度是指金属材料在外力作用下抵抗塑性变形和断裂的能力。

强度大小可通过拉伸试验来测定，试验时将符合国家标准规定的试样的两端夹在试验机的两个夹头上，如图 1-1 所示，随着负荷的缓慢增加，试样逐步变形并伸长，直至被拉断为止。

根据载荷 (F) 和变形量 (ΔL) 的变化关系绘制的曲线称为拉伸曲线。低碳钢的拉伸曲线如图 1-2 所示，在拉伸曲线的 Oe 阶段，载荷与伸长量呈线性关系，当载荷除去后，试样恢复原来的形状和尺寸，这是金属材料的弹性变形阶段， e 点应力为材料的弹性极限。当载荷超过 e 点后，试样开始产生塑性变形。

(1) 屈服强度 当负荷增加到 F_s 时，如果载荷不再增加，而塑性变形量明显增加，这段曲线几乎保持水平，这种现象称为屈服， s 点称为屈服点。这一阶段的最大和最小应力分别称为上屈服强度和下屈服强度。由于下屈服强度的数值较为稳定，因此通常以它作为材料抗力的指标，用 σ_s 表示。

有些钢材如高碳钢无明显的屈服现象，通常以发生微量塑性变形 (0.2%) 时的应力作为该钢材的屈服强度，称为条件屈服强度，用 $\sigma_{0.2}$ 来表示。

因为机械零件在正常工作时是不允许产生塑性变形的，所以设计零件都以 $\sigma_{0.2}$ 或 R_{eL} 作为选用金属材料的依据。

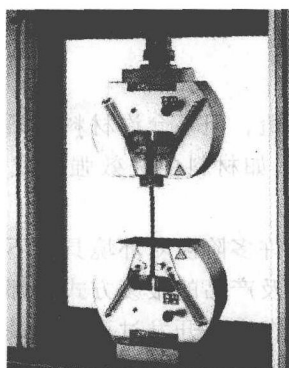


图 1-1 拉伸试验机夹持部分

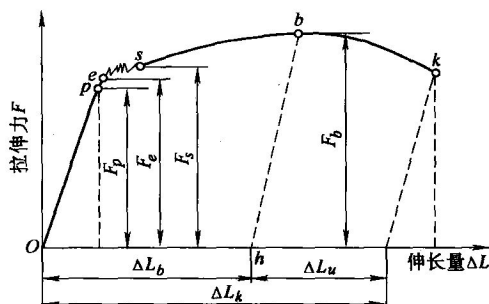


图 1-2 低碳钢拉伸曲线图

(2) 抗拉强度 试样在拉断前所能承受的最大应力称为抗拉强度，通常用 R_m 来表示。

当材料屈服到一定程度后，由于内部晶粒重新排列，其抵抗变形的能力重新提高，此时变形虽然发展很快，但是只能随着应力的提高而提高，直至应力达到最大值。此后，材料抵抗变形的能力明显降低，并在最薄弱环节处发生较大的塑性变形，此时试样截面迅速缩小，出现缩颈现象，直至断裂破坏。材料断裂前的最大应力称为强度极限，即抗拉强度。

显然，材料必须在强度极限以下的载荷下工作，这样才不会导致金属构件和零件的破坏，因此抗拉强度也是设计和选材的重要依据。

2. 塑性

塑性是指金属材料在外力作用下产生塑性变形而不断裂的能力。

工程中常用塑性指标有断后伸长率和断面收缩率。断后伸长率是指试样拉断后的伸长量与原来长度之比的百分率，用符号 A 表示；断面收缩率是指试样拉断后断面缩小的横截面积与原来横截面积之比的百分率，用符号 Z 表示。

断后伸长率和断面收缩率越大，材料的塑性越好；反之，塑性越差。良好的塑性是金属材料进行压力加工的必要条件，也是保证机械零件工作安全、不发生突然脆断的必要条件。一般断后伸长率达到 5% 或断面收缩率达到 10% 即能满足大多数零件的使用要求。

二、硬度

硬度是指金属材料表面抵抗硬物压入的能力，或者说是指金属表面对局部塑性变形的抗力。硬度指标是检验毛坯或成品件、热处理件的重要性能指标，常用的有布氏硬度和洛氏硬度两种。

1. 布氏硬度

布氏硬度的测定原理是：用一定大小的试验力 F ，把直径为 D 的硬质合金球压入被测金属的表面，如图 1-3 所示，保持规定时间后卸除试验力，用读数显微镜测出压痕平均直径 d ，然后按公式求出布氏硬度 HBW 值，或者根据 d 从已备好的布氏硬度表中查出 HBW 值。

由于金属材料有硬有软，被测工件有厚有薄、有大有小，如果只采用一种标准的试验力 F 和压头直径 D ，就会出现对某些工件和材料不适应的现象。因此，在生产中进行布氏硬度试验时，要求能使用不同大小的试验力和压头直径。对于同一种材料采用不同的 F 和 D 进行试验时，能否得到同一布氏硬度值，关键在于压痕几何形状的相似，即可建立 F 和 D 的

某种选配关系，以保证布氏硬度的不变性。

(1) 布氏硬度的特点 一般来说，布氏硬度值越小，材料越软，其压痕直径越大；反之，布氏硬度值越大，材料越硬，其压痕直径越小。布氏硬度测量的优点是具有较高的测量精度，压痕面积大，能在较大范围内反映材料的平均硬度，测得的硬度值也较准确，数据重复性强。

(2) 布氏硬度的应用 布氏硬度测量法适用于铸铁、非铁合金、各种退火及调质的钢材，不宜测定太硬、太小、太薄和表面不允许有较大压痕的试样或工件。

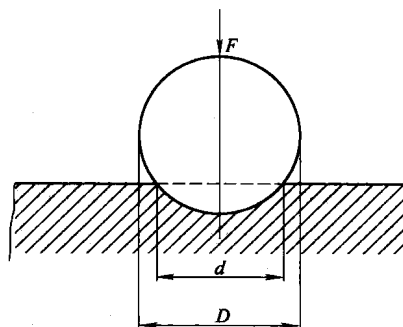


图 1-3 布氏硬度的测定原理图

布氏硬度试验常用的 $0.102F/D^2$ 的比率为 30、10、2.5 三种，根据金属材料的种类、试样硬度范围和厚度的不同来选择试验压头的直径、试验力及保持时间，见表 1-4。

表 1-4 布氏硬度试验规范

材料种类	布氏硬度 适用范围	球直径 D/mm	$0.102F/D^2$ / (N/mm^2)	试验力 F/N	试验力保持 时间/s	注
钢、铸铁	≥ 140	10 5 2.5	30	29420 7355 1839	10	压痕中心距试样边缘距离不应小于压痕平均直径的 2.5 倍 两相邻压痕中心距离不应小于压痕平均直径的 4 倍 试样厚度至少应为压痕厚度的 10 倍 试验后，试样支撑面无可见变形痕迹
	< 140		10	9807 2452 613	10 ~ 15	
非铁金属	> 200		30	29420 7355 1839	30	
	35 ~ 200		10	9807 2452 613	30	
	< 35		2.5	2452 613 153	60	

2. 洛氏硬度

当被测样品尺寸过小或者布氏硬度大于 450 时，就改用洛氏硬度 (HR) 计量。图 1-4 所示为洛氏硬度机。其试验方法是，在一定载荷下将金刚石圆锥压头或淬硬钢球压头压入被测材料表面，由压痕深度求出材料的硬度。根据试验材料硬度的不同，可采用三种不同标度来表示：

(1) HRA 采用 60kg 载荷和金刚石圆锥压头求得的硬度，用于硬度极高的材料，如硬质合金等。

(2) HRB 采用 100kg 载荷和淬硬钢球压头求得的硬度，用于硬度较低的材料，如退火

钢、铸铁等。

(3) HRC 采用 150kg 载荷和金刚石圆锥压头求得的硬度, 用于硬度很高的材料, 如淬火钢、回火钢、调质钢和部分不锈钢, 是金属加工行业应用最多的硬度试验方法。

实践证明, 金属材料的各种硬度值之间、硬度值与强度值之间具有近似的相应关系。因为硬度值是由起始塑性变形抗力和继续塑性变形抗力决定的, 材料的强度越高, 塑性变形抗力越高, 硬度值也就越高, 但各种材料的换算关系并不一致。

三、冲击韧性

前面讨论的是在静载荷作用下的力学性能指标, 但是许多机械零件还经常受到各种冲击动载荷的作用, 例如, 蒸汽锤的锤杆、柴油机上的连杆及曲轴等在工作时都受到冲击载荷的作用。承受冲击载荷的工件不仅要求其有高的硬度和强度, 还必须要具有抵抗冲击载荷的能力。

冲击韧性常用一次摆锤冲击缺口试样测定, 即把被测材料做成标准冲击试样, 用摆锤一次冲断, 测出冲断试样所消耗的冲击功 A_k , 然后用试样缺口处单位截面积上所消耗的冲击功 a_k (冲击韧度) 来表示冲击韧性。

a_k 值越大, 则材料的韧性越好, a_k 值低材料叫做脆性材料, 反之叫做韧性材料。 a_k 值取决于材料及其状态, 同时与试样的形状、尺寸有很大关系。 a_k 值对材料的内部结构缺陷、显微组织的变化很敏感, 如夹杂物、偏析、气泡、内部裂纹、钢的回火脆性、晶粒粗化等都会使 a_k 值明显降低。同种材料的试样, 其缺口越深、越尖锐, 缺口处应力集中程度越大, 越容易变形和断裂, 冲击功越小, 材料表现出来的脆性越高。因此, 不同类型和尺寸的试样, 其 a_k 或 A_k 值不能直接比较。

材料的 a_k 值随温度的降低而减小, 且在某一温度范围内急剧降低, 这种现象称为冷脆, 此温度范围称为“韧脆转变温度 (T_k)”。

冲击韧性指标的实际意义在于揭示了材料的变脆倾向。很多零件如齿轮、连杆等, 在工作时受到很大的冲击载荷, 就要选用 a_k 值高的材料制造; 铸铁的 a_k 值很低, 不能用来制造承受冲击载荷的零件。

四、疲劳强度

机械零件, 如轴、齿轮、轴承、叶片、弹簧等, 在工作过程中其上各点的应力随时间作周期性的变化, 这种随时间作周期性变化的应力称为交变应力 (也称为循环应力)。在交变应力的作用下, 虽然零件所承受的应力低于材料的屈服强度, 但经过较长时间的工作后会产生裂纹或突然发生完全断裂, 这种现象称为金属的疲劳。

疲劳强度是指金属材料在无限多次交变载荷作用下而不破坏的最大应力, 称为疲劳强度或疲劳极限。实际上, 金属材料并不可能作无限多次交变载荷试验, 一般试验时规定, 钢在经受 10^7 次、非铁 (有色) 金属材料经受 10^8 次交变载荷作用而不产生断裂时的最大应力称为疲劳强度。当施加的交变应力是对称循环应力时, 所得的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。

疲劳破坏是机械零件失效的主要原因之一。据统计, 在机械零件失效中有 80% 以上属于疲劳破坏, 而且疲劳破坏前没有明显的变形, 所以疲劳破坏经常造成重大事故, 承受交变

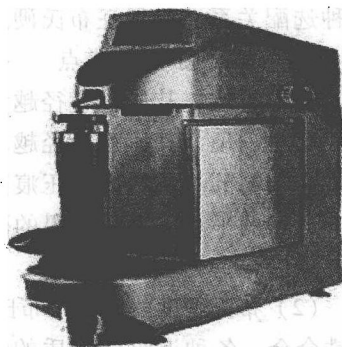


图 1-4 洛氏硬度机

载荷的零件要选择疲劳强度较好的材料来制造。

1. 疲劳强度的影响因素

这里以弹簧为例来说明疲劳强度的各种影响因素。

(1) 屈服强度 材料的屈服强度和疲劳强度之间有一定的关系,一般来说,材料的屈服强度越高,疲劳强度也越高。因此,为了提高弹簧的疲劳强度应设法提高弹簧材料的屈服强度,或采用屈服强度和抗拉强度比值较高的材料。对同一种材料来说,细晶粒组织比粗晶粒组织具有更高的屈服强度。

(2) 表面状态 最大应力多发生在弹簧材料的表层,所以弹簧的表面质量对疲劳强度的影响很大。弹簧材料在轧制、拉拔和卷制过程中造成的裂纹、疵点和伤痕等缺陷往往是造成弹簧疲劳断裂的主要原因。

材料表面粗糙度值越低,应力集中越小,疲劳强度也就越高,随着表面粗糙度的增加,疲劳强度下降。在同一粗糙度的情况下,不同的钢种及不同的卷制方法其疲劳强度降低程度也不同,如冷卷弹簧的降低程度就比热卷弹簧低,这是因为钢制热卷弹簧在热处理加热时,由于氧化使弹簧材料表面变粗糙并产生脱碳现象,这样就降低了弹簧的疲劳强度。对材料表面进行磨削、强压、抛丸和滚压等,都可以提高弹簧的疲劳强度。

(3) 尺寸效应 材料的尺寸越大,由于各种冷热加工工艺所造成的缺陷可能性越大,产生表面缺陷的可能性也就越大,这些原因都会导致疲劳性能下降。因此,在计算弹簧的疲劳强度时要考虑尺寸效应的影响。

(4) 冶金缺陷 冶金缺陷是指材料中的非金属夹杂物、气泡、元素的偏析等。存在于表面的夹杂物是应力集中源,会导致夹杂物与基体界面之间过早地产生疲劳裂纹。采用真空冶炼、真空浇注等措施,可以大大提高钢材的质量。

(5) 腐蚀介质 弹簧在腐蚀性介质中工作时,由于表面产生点蚀或表面晶界被腐蚀而成为疲劳源,在交变应力作用下就会逐步扩展而导致断裂。例如在淡水中工作的弹簧钢,其疲劳强度仅为空气中的10%~25%。腐蚀对弹簧疲劳强度的影响不仅与弹簧受交变载荷的作用次数有关,而且与工作寿命有关。所以设计计算受腐蚀影响的弹簧时,应将工作寿命考虑进去。

在腐蚀性条件下工作的弹簧,为了保证其疲劳强度,可采用耐蚀性能高的材料,如不锈钢、非铁金属,或者表面加保护层,如镀层、氧化、喷塑、涂漆等。实践表明,镀镉可以大大提高弹簧的疲劳强度。

(6) 温度 碳钢的疲劳强度从室温到120℃时下降,从120℃到350℃又上升,温度高于350℃以后又下降,在高温时没有疲劳极限。在高温条件下工作的弹簧,要考虑采用耐热钢。在低于室温的条件下,钢的疲劳强度有所增加。

2. 提高疲劳强度的方法

疲劳破坏的分析表明,裂纹源通常是在有应力集中的部位产生。因此,设法避免或减弱应力集中,可以有效提高构件的疲劳强度,可以从以下几个方面来考虑:

(1) 合理设计构件的外形 构件截面改变越激烈,应力集中系数就越大,因此工程上常采用改变构件外形尺寸的方法来减小应力集中。例如,采用较大的过渡圆角半径,使截面的改变尽量缓慢,如果圆角半径太大而影响装配时,可采用间隔环,既降低了应力集中又不影响轴与轴承的装配;此外还可采用凹圆角或卸载槽以达到应力平缓过渡。

设计构件外形时,应尽量避免带有尖角的孔和槽。在截面尺寸突然变化处(如阶梯轴),当结构需要直角时,可在直径较大的轴段上开卸载槽或退刀槽以减小应力集中;当轴与轮毂采用静配合时,可在轮毂上开减荷槽或增大配合部分轴的直径,并采用圆角过渡,以缩小轮毂与轴的刚度差距,减缓配合面边缘处的应力集中。

(2) 提高构件的表面加工质量 一般来说,构件表层的应力都很大,例如在承受弯曲和扭转的构件中,其最大应力均发生在构件的表层。同时由于加工的原因,构件表层的刀痕或损伤处又将引起应力集中。因此,对疲劳强度要求高的构件应采用精加工方法,以获得较高的表面质量,特别是对高强度钢等对应力集中比较敏感的材料,其加工更需要精细。

(3) 提高构件的表面强度 常用表面热处理和表面机械强化两种方法来提高构件的表面强度。表面热处理通常采用高频感应淬火、渗碳、氰化、氮化等措施,以提高构件表层材料的疲劳强度。表面机械强化通常采用对构件表面进行滚压、喷丸等,使构件表面形成预压应力层,以降低最容易形成疲劳裂纹的拉应力,从而提高表层强度。

复习思考题

1. 碳钢按质量分类,可划分为哪些类别?
2. 锤子、锯条、锉刀等常用工具主要要求哪些力学性能?请选用适合的钢的牌号,并指出该牌号的名称、主要成分及采用的热处理方法。
3. 说明以下牌号属于哪类钢及用途举例:
Q235AF、45、T12A、20CrMnTi、40Cr、65Mn、GCr15、W18Cr4V、9SiCr、06Cr18Ni11Ti。
4. 按石墨形态灰口铸铁如何分类?各举一个牌号说明其编号意义和特点及应用举例。
5. 列出常用工程塑料的名称、主要特性及应用举例。