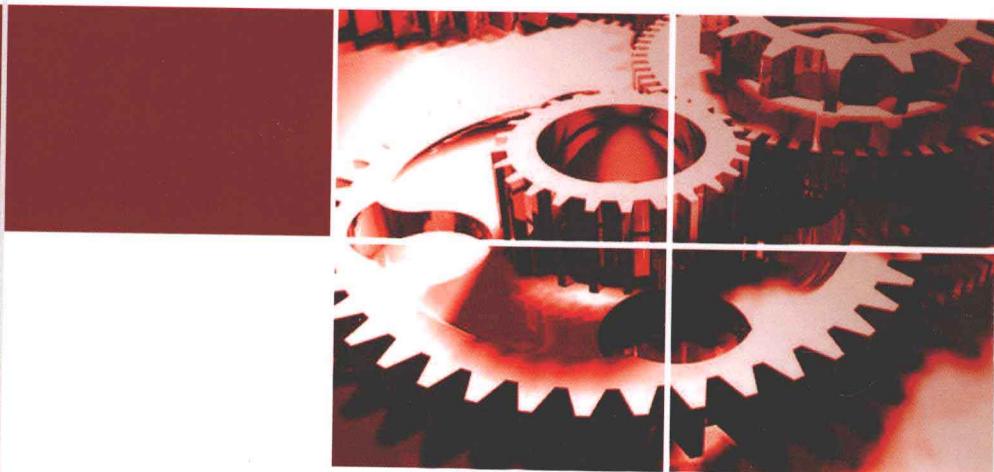


普通高等教育“十二五”工程训练系列规划教材
国家级精品课程
国家级精品资源共享课程



制造技术工程训练

主 编 朱华炳 田 杰

副主编 李小蕴 胡友树 曹 斌



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”工程训练系列规划教材

制造技术工程训练

主 编	朱华炳	田 杰		
副主编	李小蕴	胡友树	曹 斌	
参 编	王连超	席 赟	张文祥	周建峰
	陶泽柳	阚绪平	蒋全胜	左延红
	吴 炜	贾明浩	彭 婧	张 晔



机械工业出版社

本书共分为 18 章,分别介绍了材料成形、切削加工及机械装配和拆卸的基本方法和基本原理,重点突出实践性和创新性。

本书旨在帮助学生正确掌握材料的加工方法,了解机械制造的工艺过程和新工艺、新技术的应用;指导学生实际操作,获得初步操作技能,进而树立大工程意识,学习科学研究的基本方法;培养学生分析和解决实际问题的能力,养成团结协作的工作作风和严谨的科学态度,使学生在知识、能力和素质等方面都得到较全面的训练和提高。

图书在版编目 (CIP) 数据

制造技术工程训练/朱华炳,田杰主编. —北京:机械工业出版社,2014.1
普通高等教育“十二五”工程训练系列规划教材
ISBN 978-7-111-45160-0

I. ①制… II. ①朱… ②田… 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 (2013) 第 302989 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:丁昕祯 责任编辑:丁昕祯 程足芬 邓海平
版式设计:霍永明 责任校对:闫玥红
封面设计:张 静 责任印制:张 楠

北京玥实印刷有限公司印刷
2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
184mm×260mm·18.25 印张·496 千字
标准书号:ISBN 978-7-111-45160-0
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

社 服 务 中 心:(010) 88361066

教 材 网:<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部:(010) 68326294

机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部:(010) 88379649

机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前 言

近年来,我国的工程实践教学取得了可喜的进步,合肥工业大学的工程训练课程在长期实践的基础上,建立了四大教学模块,即机械制造基础模块、现代制造技术模块、电工电子模块及综合创新教学模块。针对不同专业特点,课程进行分类教学,按单元设课,每单元4小时,共开设工程训练A(面向机械类专业学生,60单元)、工程训练B(面向近机械类专业学生,40单元)、工程训练C(面向其他工科类学生,20单元)和工程训练D(面向人文艺术类学生,10单元)四大类必修课,几乎将全校所有学生都纳入到工程训练体系中。本课程于2010年被评为国家级精品课程,2012年入选国家级精品资源共享课。为进一步适应课程改革的新形势和国家级精品课程的教学要求,深化我校工程实践教学的内涵建设,特编写了本书。

本书为工程训练机械类及近机械类的实习教材,是根据《普通高等学校工程材料及机械制造基础系列课程教学基本要求》,并结合培养应用型高级工程技术人才的需要,结合实践教学的特点编写而成的。在编写过程中,保留了传统的车、铣、刨、磨、钳、铸造、锻压和焊接等基本实习科目,添加了快速成形、数控技术、特种加工和综合创新等内容,力求使教材内容具有综合性、实践性、科学性和先进性等特点。

本书旨在帮助学生正确掌握材料的加工方法,了解机械制造的工艺过程和新工艺以及新技术的应用,指导学生实际操作,获得初步操作技能,进而树立大工程意识,学习科学研究的基本方法,培养分析和解决实际问题的能力,养成团结协作的工作作风和严谨的科学态度,在知识、能力和素质等方面都得到较全面的训练和提高。

本书由合肥工业大学朱华炳、田杰担任主编,参加编写的有王连超(第1章),席赞(第2章),吴炜(第3章),李小蕴(第4章及第5章),张晔(第6章),胡友树(第7章),周建峰(第8章),阚绪平(第9章及第10章),巢湖学院蒋全胜(第11章),张文祥(第12章),安徽建筑工业学院左延红(第13章),贾明浩、彭婧(第14章),曹斌(第15章),陶泽柳(第16章及第17章),朱华炳、田杰(第18章)。在成书过程中,从策划、组织到统稿,桂贵生教授都全程参与,并做了大量的工作,全书由清华大学傅水根教授主审。他们认真细致的态度和严谨的科学作风给全体编写人员留下了深刻的印象,为本书的编写和修改提出了许多宝贵的意见。在此向他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不妥或错误之处,敬请各高校师生在使用本教材和读者阅读本教材时能及时批评指正,以便再版时修改。

编 者

目 录

前言

第 1 篇 材料成形篇

第 1 章 工程材料及金属热处理	1	2.3 铸造工艺设计及实例	35
1.1 概述	1	2.3.1 分型面的选择	35
1.2 金属材料	1	2.3.2 铸造工艺参数	36
1.2.1 金属材料的力学性能	1	2.3.3 铸造工艺图	37
1.2.2 金属材料的工艺性能	5	2.3.4 实例：支承台零件铸造工艺 制定	37
1.2.3 金属材料的物理和化学性能	5	2.4 特种铸造	38
1.3 常用金属材料	5	2.4.1 熔模铸造	38
1.3.1 钢	6	2.4.2 压力铸造	38
1.3.2 铸铁	8	2.4.3 消失模铸造	39
1.3.3 铜及其合金	9	2.4.4 离心铸造	40
1.3.4 铝及其合金	10	2.5 铸造安全操作规程	40
1.4 常用非金属材料及复合材料	10	复习思考题	41
1.4.1 高分子材料	10	第 3 章 锻压成形	42
1.4.2 工业陶瓷	12	3.1 概述	42
1.4.3 复合材料	12	3.2 坯料的加热和锻件的冷却	42
1.5 热处理与表面处理	13	3.2.1 加热目的和锻造温度范围	42
1.5.1 常用热处理方法	13	3.2.2 加热缺陷及其预防措施	43
1.5.2 常用热处理设备	15	3.2.3 加热方法与加热设备	44
1.5.3 常用零件表面处理	16	3.2.4 锻件的冷却	44
1.5.4 热处理新技术、新工艺简介	18	3.3 自由锻	44
复习思考题	19	3.3.1 自由锻工具与设备	44
第 2 章 铸造成形	20	3.3.2 自由锻工序	46
2.1 概述	20	3.3.3 自由锻锻件常见缺陷	47
2.2 砂型铸造	20	3.4 模锻	48
2.2.1 砂型、砂芯的材料	21	3.4.1 锤上模锻	48
2.2.2 型砂与芯砂的制备	22	3.4.2 胎模锻	49
2.2.3 砂型结构及浇冒口	23	3.4.3 模锻件常见缺陷	50
2.2.4 手工造型方法	24	3.5 板料冲压	51
2.2.5 机器造型	29	3.5.1 冲压设备	51
2.2.6 制芯	30	3.5.2 冲模	52
2.2.7 合型	30	3.5.3 冲压基本工序	53
2.2.8 铸铁的熔炼与浇注	31	3.5.4 冲压件常见缺陷	54
2.2.9 铸件的落砂与清理	32	3.6 其他压制方法	55
2.2.10 常见铸造缺陷	32		

3.6.1 轧制	55	4.7 常见焊接缺陷及焊接变形	76
3.6.2 挤压	56	4.7.1 常见焊接缺陷	76
3.6.3 拉拔	56	4.7.2 焊接变形	77
复习思考题	56	复习思考题	78
第4章 焊接成形	58	第5章 其他材料成形	79
4.1 概述	58	5.1 概述	79
4.1.1 焊接的定义及分类	58	5.2 粉末冶金材料成形	79
4.1.2 焊接的特点	58	5.2.1 粉末冶金材料成形过程	79
4.1.3 焊接的应用领域	59	5.2.2 粉末冶金零件的结构工艺性	83
4.2 焊条电弧焊	59	5.3 非金属材料成形	84
4.2.1 焊条电弧焊的焊接过程	59	5.3.1 高分子材料成形	84
4.2.2 焊条电弧焊常用的设备	59	5.3.2 陶瓷材料成形	85
4.2.3 焊条	61	5.4 复合材料成形	87
4.2.4 焊条电弧焊工艺及规范	62	5.4.1 树脂基复合材料的成形	87
4.2.5 焊条电弧焊实训操作	65	5.4.2 金属基复合材料的成形	88
4.3 气焊	67	5.4.3 陶瓷基复合材料的成形	90
4.3.1 气焊设备	67	复习思考题	90
4.3.2 焊丝和焊剂	68	第6章 快速成形	91
4.3.3 气焊火焰	68	6.1 概述	91
4.3.4 气焊的实训操作	69	6.1.1 快速成形加工的主要特点	91
4.4 其他常用焊接方法	69	6.1.2 快速成形加工的分类	91
4.4.1 CO ₂ 气体保护焊	69	6.2 快速成形的基本原理	92
4.4.2 氩弧焊	70	6.3 FDM（熔融沉积成形）工艺	93
4.4.3 埋弧焊	70	6.3.1 FDM 工艺方法	93
4.4.4 电阻焊	71	6.3.2 FDM 系统组成	93
4.4.5 激光焊	72	6.3.3 FDM 工艺过程	95
4.4.6 钎焊	73	6.3.4 FDM 工艺特点	98
4.5 切割	73	6.3.5 FDM 工艺应用	98
4.5.1 氧气切割	73	6.4 SLS（选择性激光烧结）工艺	99
4.5.2 等离子弧切割	74	6.4.1 SLS 工艺方法	99
4.5.3 激光切割	74	6.4.2 SLS 系统组成	99
4.5.4 水射流切割	75	6.4.3 SLS 工艺过程	100
4.6 机器人焊接	75	6.4.4 SLS 工艺特点	101
4.6.1 焊接机器人	75	6.4.5 SLS 工艺应用	101
4.6.2 弧焊机器人	75	复习思考题	102
4.6.3 点焊机器人	76		

第2篇 切削加工篇

第7章 切削加工基础知识	103	7.1.3 切削运动	104
7.1 概述	103	7.1.4 切削用量	106
7.1.1 切削加工的分类	103	7.2 金属切削刀具	107
7.1.2 零件表面的构成	104	7.2.1 金属切削刀具的结构	107

7.2.2 金属切削刀具的分类	107	9.2 铣床及其附件	144
7.2.3 刀具材料及应具备的性能	108	9.2.1 铣床的组成及功能	145
7.3 机械加工零件的技术要求	109	9.2.2 铣床常用附件	146
7.3.1 加工精度	110	9.3 铣刀	148
7.3.2 表面粗糙度	111	9.3.1 铣刀的组成及分类	148
7.4 常用量具	111	9.3.2 铣刀的安装	149
7.4.1 钢直尺	111	9.4 工件的安装	151
7.4.2 卡钳	112	9.5 铣削方式及铣削用量	152
7.4.3 游标卡尺	112	9.5.1 铣削方式	152
7.4.4 外径千分尺	114	9.5.2 铣削用量	153
7.4.5 内径百分表	116	9.6 基本铣削工作	154
7.4.6 量规	117	9.6.1 铣平面、斜面及台阶面	154
复习思考题	117	9.6.2 铣沟槽	156
第8章 车削加工	118	9.6.3 铣成形面	157
8.1 概述	118	9.7 齿面加工	158
8.2 车床	119	9.7.1 成形法	158
8.2.1 车床的型号	119	9.7.2 展成法	159
8.2.2 车床的组成	119	复习思考题	160
8.2.3 车床的传动系统	121	第10章 磨削加工	161
8.3 车刀	123	10.1 概述	161
8.3.1 车刀的种类、用途和组成	123	10.2 砂轮	161
8.3.2 车刀的材料	124	10.2.1 砂轮的磨料与特性	162
8.3.3 车刀的主要几何角度	124	10.2.2 砂轮的形状与用途	162
8.3.4 车刀的安装	125	10.2.3 砂轮的安裝、平衡与修整	163
8.4 切削液	126	10.3 基本磨削工作	164
8.4.1 切削液的功能	126	10.3.1 外圆磨床与外圆磨削	164
8.4.2 切削液的成分	126	10.3.2 内圆磨床与内圆磨削	166
8.5 工件的安装	126	10.3.3 平面磨床与平面磨削	167
8.5.1 卡盘装夹	127	10.4 精整和光整加工	168
8.5.2 顶尖装夹	128	10.4.1 研磨	168
8.5.3 花盘、弯板及压板装夹	128	10.4.2 珩磨	168
8.5.4 中心架或跟刀架装夹	129	10.4.3 抛光	169
8.6 基本车削工作	129	10.4.4 砂带磨削	169
8.6.1 车外圆及端面	129	复习思考题	170
8.6.2 切槽与切断	131	第11章 其他切削加工	171
8.6.3 圆柱内孔的加工	133	11.1 刨削加工	171
8.6.4 车锥面	136	11.1.1 刨床	171
8.6.5 车螺纹	137	11.1.2 基本刨削工作	173
8.6.6 其他车削加工	140	11.2 镗削加工	173
8.7 车削加工示例	141	11.2.1 镗削加工设备	174
复习思考题	142	11.2.2 基本镗削工作	175
第9章 铣削加工	144	11.3 拉削加工	175
9.1 概述	144	11.3.1 拉削加工设备	176

11.3.2 拉刀	176	13.5.1 铤削工具	208
11.3.3 基本拉削工作	177	13.5.2 铤削基本操作方法	208
复习思考题	177	13.6 刮削	209
第12章 数控加工	178	13.6.1 刮削工具	210
12.1 概述	178	13.6.2 刮削方法	211
12.1.1 数控加工的技术原理	178	13.7 钻孔、扩孔和铰孔	212
12.1.2 数控加工的特点	178	13.7.1 钻床	213
12.1.3 数控机床的分类	179	13.7.2 钻孔	214
12.1.4 数控机床的组成	180	13.7.3 扩孔	215
12.2 数控机床编程基础	180	13.7.4 铰孔	216
12.2.1 数控机床编程的方法	180	13.8 攻螺纹与套螺纹	217
12.2.2 坐标系	181	13.8.1 攻螺纹	217
12.2.3 编程方式	182	13.8.2 套螺纹	218
12.2.4 程序结构	183	复习思考题	219
12.3 数控车削加工	185	第14章 特种加工	220
12.3.1 数控车床主要结构	185	14.1 概述	220
12.3.2 数控车床坐标系	186	14.2 电火花加工	221
12.3.3 数控车床对刀	186	14.2.1 电火花加工的原理	221
12.3.4 数控车床手工编程	187	14.2.2 电火花加工机床	222
12.3.5 数控车床编程实例	190	14.2.3 电火花加工的特点及应用	223
12.4 数控铣削加工	190	14.3 线切割加工	224
12.4.1 数控铣床主要结构	190	14.3.1 线切割加工的原理	224
12.4.2 数控铣床对刀	191	14.3.2 数控线切割机床	224
12.4.3 数控铣床手工编程	191	14.3.3 线切割加工工艺	225
12.4.4 数控铣床编程实例	195	14.3.4 线切割编程及应用	226
复习思考题	196	14.4 电解加工	229
第13章 钳工	197	14.4.1 电解加工的原理	229
13.1 概述	197	14.4.2 电解加工机床	229
13.1.1 钳工的工作范围	197	14.4.3 电解液	230
13.1.2 钳工的工作特点	197	14.4.4 电解加工的特点及应用	230
13.1.3 钳工的常用设备	197	14.5 激光加工	231
13.2 划线	198	14.5.1 激光加工的原理	231
13.2.1 划线工具	199	14.5.2 激光加工设备	231
13.2.2 划线基准与基准的选择	201	14.5.3 激光加工的特点及应用	231
13.2.3 划线工作	201	14.6 超声波加工	232
13.3 锯削	202	14.6.1 超声波加工的原理	232
13.3.1 锯削工具	202	14.6.2 超声波加工设备	233
13.3.2 锯削工作	203	14.6.3 超声波加工的特点及应用	233
13.4 锉削	204	14.7 电子束和离子束加工	233
13.4.1 锉刀	205	14.7.1 电子束加工	233
13.4.2 锉削基本操作方法	205	14.7.2 离子束加工	234
13.5 铤削	208	复习思考题	235

第3篇 机械拆、装与综合训练篇

第15章 机械装配基础知识	236	16.6 自动化装配简介	262
15.1 概述	236	复习思考题	262
15.2 机械联接	236	第17章 机械拆卸	263
15.2.1 固定联接	236	17.1 概述	263
15.2.2 螺纹联接	239	17.1.1 拆卸基本要求	263
15.2.3 键联接	240	17.1.2 拆卸方法	263
15.2.4 销联接	242	17.2 常用联接的拆卸	266
15.2.5 轴、轴承和孔	242	17.2.1 螺纹联接的拆卸	266
15.3 公差与配合	244	17.2.2 键联接的拆卸	266
15.3.1 尺寸公差与配合性质	244	17.2.3 销联接的拆卸	267
15.3.2 尺寸公差的标注形式	245	17.3 轴、轴承和壳体的拆卸	268
复习思考题	246	17.3.1 轴的拆卸	268
第16章 机械装配	247	17.3.2 轴承的拆卸	268
16.1 概述	247	17.3.3 壳体的拆卸	269
16.1.1 装配基本要求	247	复习思考题	269
16.1.2 装配流程	247	第18章 综合训练	270
16.2 常用联接件的装配	248	18.1 机电产品的基本要求	270
16.2.1 螺纹联接件的装配	248	18.2 产品的设计	270
16.2.2 键联接件的装配	254	18.2.1 产品的需求分析	271
16.2.3 销联接件的装配	255	18.2.2 产品的方案设计	271
16.3 轴、轴承和壳体的装配	256	18.2.3 产品的详细设计	271
16.3.1 滑动轴承的装配	256	18.3 产品的制造	274
16.3.2 滚动轴承的装配	257	18.4 产品的装配和调试	274
16.4 齿轮轴部件的装配	259	复习思考题	280
16.4.1 齿轮传动机构的装配要求	259	参考文献	281
16.4.2 圆柱齿轮传动机构的装配	260		
16.5 装配示例	261		

第 1 篇 材料成形篇

第 1 章 工程材料及金属热处理

【实训目的与要求】

- 1) 熟悉常用金属材料的种类、牌号、性能及应用。
- 2) 了解常用非金属材料的种类、性能及应用。
- 3) 了解金属材料热处理的主要方法和热处理设备。
- 4) 掌握金属材料热处理的主要工艺过程和应用。
- 5) 掌握本工种安全要领。

1.1 概述

工程材料是指制造工程构件和机器零件用的材料。现代工程材料种类繁多,据粗略统计,目前世界上的材料已有 40 余万种,并且每年约以 5% 的速度在增加。按照材料的组成、结合键的特点,可将工程材料分为金属材料、高分子材料、无机非金属材料(陶瓷)和复合材料四类,如图 1-1 所示。

按零件在机械或机器中实现的功能,又可将制造零件的材料分为结构材料 and 功能材料。结构材料主要是利用其力学性能,用以制造实现运动和传递动力的零件,或以受力为主的构件。例如,齿轮、轴、自行车链条、飞机起落架和建筑物承载梁等。功能材料主要是利用物质独特的物理性质(如热学、光学、电学、声学、磁学等)和化学性质(如溶蚀性、耐蚀性、抗渗入性、抗氧化性、催化性能、离子交换性能以及吸收、吸附等性能),以及生物功能等而制成的一类材料。功能材料主要有弹性材料、膨胀材料、形状记忆合金、光电和磁性材料、生物材料等。机械工程中大量使用各类结构材料。

金属材料、高分子材料和陶瓷材料在性能上各有其特点,集各类材料的优异性能于一体,充分发挥各类材料的潜力,则制成了各种复合材料。

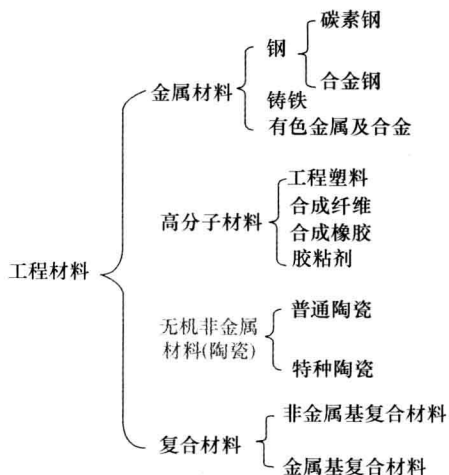


图 1-1 工程材料的分类

1.2 金属材料

1.2.1 金属材料的力学性能

金属材料在外力作用下所表现出的各项性能指标,统称为金属材料的力学性能。其主要指标

有：强度、硬度、塑性、冲击韧度和疲劳强度等。力学性能是零件设计计算、选择材料、工艺评定以及材料检验的主要依据。

1. 强度

评价材料强度和塑性最简单有效的方法是测定材料的拉伸曲线，一般通过拉伸试验测得。拉伸试验是用静拉伸力对标准拉伸试样进行缓慢地轴向拉伸，直至试样被拉断的一种试验方法。采用国家标准（GB/T 228.1—2010）规定的标准试样在试验机上进行，试样的形状和尺寸取决于被试验的金属产品的现状与尺寸，试样的横截面可以是圆形、矩形、环形、多边形等。其中，圆形横截面机加工试样如图 1-2 所示。

在拉伸试验中和拉伸试验后可测量力的变化与相应的伸长，从而测出材料的强度与塑性。测定试样对外加试验力的抗力，可求出材料的强度值；测定试样在拉断后塑性变形的大小，可求出材料的塑性值。

材料在拉断前所承受的最大力为 F_m ，材料在拉断前所承受的最大拉应力称为抗拉强度，用 R_m 表示。其计算公式为

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

式中 R_m ——抗拉强度，单位为 MPa；

F_m ——试样断裂前所承受的最大力，单位为 N；

S_0 ——试样原始横截面积，单位为 mm^2 。

R_m 越大，说明材料抵抗破坏的能力越强，所以说 R_m 是一个重要的强度指标。

2. 塑性

金属材料在外力的作用下产生永久变形（塑性变形）而不断裂的能力称为塑性。金属材料在受拉伸时，长度和横截面都会发生变化，因此，金属的塑性可以用断后伸长率 A 和截面收缩率 Z 来评定。其计算公式为

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

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

式中 L_0 ——试样原始标距，单位为 mm；

L_u ——试样断后标距，单位为 mm；

S_0 ——试样平行长度的原始横截面积，单位为 mm^2 ；

S_u ——试样断后最小横截面积，单位为 mm^2 。

断后伸长率和截面收缩率越大，表示材料的塑性越好，即材料承受较大的塑性变形而不被破坏。一般把断后伸长率大于 5% 的金属称为塑性材料（如低碳钢等），而把断后伸长率小于 5% 的金属称为脆性材料（如灰铸铁等）。塑性好的材料可以顺利进行某些成形工艺加工，如冲压、冷拔、校直等。因此，选择金属材料作为机械零件时，必须满足一定的塑性指标。一般 A 达到 5%， Z 达到 10% 能满足大多数零件的要求。

3. 硬度

金属材料抵抗其他更硬的物体压入其表面的能力称为硬度。硬度反映金属材料表面抵抗局部

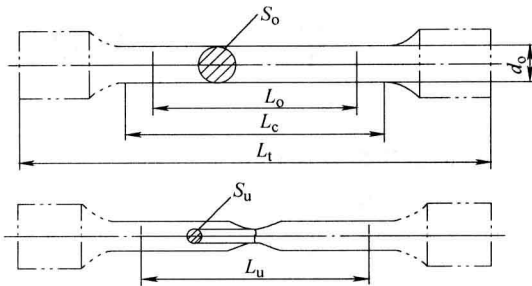


图 1-2 圆形横截面机加工试样

塑性变形、压痕或划痕的能力。由于大多数常用钢材的强度和硬度之间有一个近似比例关系，根据硬度可以近似估计材料的抗拉强度。另外，材料抗磨性能与硬度有密切的关系，所以硬度是衡量金属材料的一个重要指标。目前，用于测量材料硬度的方法有三种，布氏硬度法、洛氏硬度法和维氏硬度法。

(1) 布氏硬度 测量布氏硬度用的硬质合金球直径为1mm、2.5mm、5mm和10mm四种。根据被测材料的种类、硬度范围和试样厚度的不同，选择不同直径的硬质合金球、试验力、保持时间等参数。

布氏硬度试验原理如图1-3所示，对一定直径的硬质合金球施加试验力压入试样表面，经规定保持时间后，卸除试验力，测量试样表面压痕的直径，计算得出布氏硬度值。试验所测得的硬度值按下式计算

$$\text{布氏硬度} = \text{常数} \times \frac{\text{试验力}}{\text{压痕表面积}} = 0.102 \times \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

式中 F ——试验力，单位为 N；

D ——球直径，单位为 mm；

d ——压痕平均直径， $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ ，单位为 mm。

布氏硬度用 HBW 表示，符号前面为硬度值，后面是按照如下顺序表示试验条件的指标：球直径（mm）、试验力值、与规定时间不同的试验力保持时间。

例如 350HBW5/750，表示直径为 5mm 的硬质合金球在 7.355kN 试验力下保持 10 ~ 15s 测定的布氏硬度值为 350；600HBW1/30/20，表示直径为 1mm 的硬质合金球在 294.2N 试验力下保持 20s 测定的布氏硬度值为 600。

布氏硬度的特点是测量误差小，数据稳定；缺点是压痕直径大，太薄或成品零件不宜采用布氏硬度。金属表面的损伤较大，不宜测定太小或太薄的试样，所以，布氏硬度试验主要用来测定原材料，如铸铁、非铁金属、经退火或正火处理的钢材及其半成品的硬度。布氏硬度试验范围上限为 650HBW。

(2) 洛氏硬度 洛氏硬度试验原理如图1-4所示。将压头（金刚石圆锥、硬质合金球）按图1-4分两个步骤压入试样表面，经规定保持时间后，卸除主试验力，测量在初试验力下的残余压痕深度 h 。

根据 h 值及常数 N 和 S （有表可查），用公式计算洛氏硬度。计算公式如下

$$\text{洛氏硬度} = N - \frac{h}{S}$$

实际操作中，洛氏硬度值可以直接在硬度试验机的表盘上读出。由于压头和施加的试验力不同，洛氏硬度有多种标尺，常用的有 HRA、HRC、HRB。各种洛氏硬度标尺的试验条件和应用范围见表 1-1。

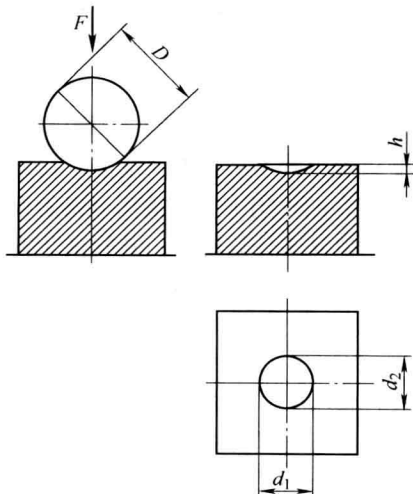


图 1-3 布氏硬度试验原理示意图

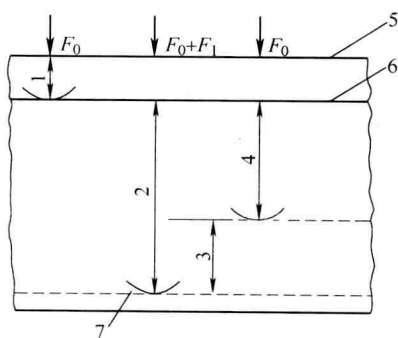


图 1-4 洛氏硬度试验原理示意图

- 1—在初试验力 F_0 下压入的深度
- 2—由主试验力 F_1 引起的压入深度
- 3—卸除主试验力 F_1 后的弹性恢复深度
- 4—残余压入深度 h 5—试样表面
- 6—测量基准面 7—压头位置

表 1-1 各种洛氏硬度标尺的试验条件和应用范围

洛氏硬度	压头类型	总试验力/N	测量范围	应用举例
HRA	120°金刚石	588.4	20 ~ 88HRA	高硬度表面
HRB	直径 1.588mm 球	980.7	20 ~ 100HRB	软钢、灰铸铁、有色金属
HRC	120°金刚石圆锥	1471	20 ~ 70HRC	淬火回火钢

实际测量时, 硬度值可以从洛氏硬度计的表盘上直接读出。洛氏硬度的优点是操作简单、压痕很小、适用范围广, 缺点是测量结果分散大。

在中等硬度情况下, 洛氏硬度 HRC 与布氏硬度 HBW 之比约为 1 : 10, 例如, 40HRC 相当于 400HBW 左右。

(3) 维氏硬度 (HV) 维氏硬度试验原理与布氏硬度试验相似, 也是以压痕单位表面积所承受试验力大小来计算硬度值。它是用一个相对面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体压头, 在规定载荷 F 的作用下压入被测金属表面, 保持一定时间后卸除载荷, 然后再测压痕的两对角线长度的平均值 d 来计算硬度, 其测试原理如图 1-5 所示。

维氏硬度用符号 HV 表示, 计算公式如下

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

式中 HV——维氏硬度;

F ——试验力, 单位为 N;

d ——压痕对角线长度算术平均值, 单位为 mm。

符号前面的数字为硬度值, 后面的数字按顺序分别表示试验力及试验力保持时间。一般用于测量深氮层等硬度。

维氏硬度试验所用载荷小, 压痕深度浅, 适用于零件薄的表面硬化层、金属镀层及薄片金属硬度的测量。因压头为金刚石四棱锥, 载荷可调范围大, 故对软、硬材料均适用, 测定范围为 0 ~ 1000HV。

4. 冲击韧度

许多机械零件、构件或工具在服役时, 会受到冲击载荷的作用, 如冲模、锻模等。材料抵抗冲击载荷作用的能力称为冲击韧度。一般用材料单位横截面积的冲击消耗能量 a_k 作为冲击韧度指标。测定冲击韧度常用的方法为夏比摆锤冲击试验, 夏比摆锤冲击试验机如图 1-6 所示。

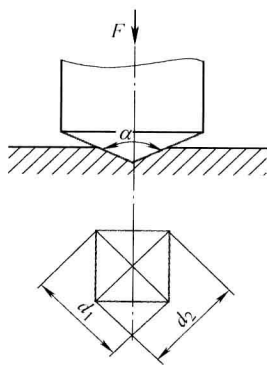


图 1-5 维氏硬度的测试原理示意图

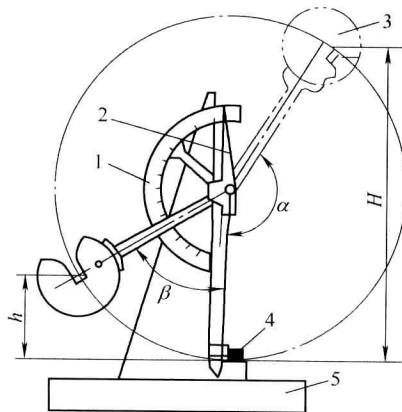


图 1-6 夏比摆锤冲击试验机

1—刻度盘 2—指针 3—摆锤 4—试验 5—底座

试样冲击韧度的计算公式为

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

式中 a_k ——冲击韧度, 单位为 J/cm^2 ;

A_k ——冲击吸收能量, 单位为 J ;

S_0 ——试样缺口处最小横截面积, 单位为 cm^2 。

材料的冲击韧度除了取决于材料本身之外, 还与环境温度及缺口的状况密切相关。所以, 冲击韧度试验除了用来测量材料的韧度大小外, 还用来测量金属材料随环境温度下降由塑性状态转变为脆性状态的韧脆转变温度, 也用来考查材料对于缺口的敏感性。

1.2.2 金属材料的工艺性能

金属材料通过各种加工方法被制造成零件或产品, 材料对各种加工方法的适应性称为材料的工艺性能。按工艺方法不同有:

(1) 铸造性能 铸造性能指金属材料通过铸造方法制成优质铸件的难易程度。其影响因素主要包括材料的流动性和收缩性, 材料的流动性越高, 收缩性越小, 则铸造性能越好。

(2) 锻压性能 锻压性能指金属材料在锻压加工过程中获得优良锻压件的难易程度。它与金属材料的塑性及变形抗力有关。材料的塑性越高, 变形抗力越小, 则锻压性能越好。

(3) 焊接性能 焊接性能指金属材料在一定焊接工艺条件下, 获得优质焊接接头的难易程度, 其影响因素包括材料的成分、焊接方法、工艺条件等。

(4) 热处理性能 热处理性能是指金属材料在改变温度和冷却时获得所需要的结构和性能的能力。对钢而言常指淬透性、淬硬性、回火脆性及产生裂纹的倾向性等。

(5) 切削加工性能 切削加工性能指用刀具切削加工金属材料的难易程度。材料切削加工性能的好坏主要体现在切削速度、已加工表面质量、切屑的控制、断屑的难易以及切削力等。影响材料切削加工性的主要因素是材料的物理性能、化学成分和金相组织等。

1.2.3 金属材料的物理和化学性能

1. 物理性能

金属材料的物理性能是金属材料对自然界的各种物理现象, 如温度变化、地球引力等所引起的反应。主要包括密度、熔点、导热性、导电性、磁性、热膨胀性等。

2. 化学性能

金属材料的化学性能主要是指在常温或高温时, 抵抗各种活泼介质化学侵蚀的能力, 即金属材料的化学稳定性, 包含抗氧化性和耐蚀性。耐蚀性包含耐酸性和耐碱性。在腐蚀性介质中或在高温下服役的零部件比在正常室温条件下要腐蚀强烈。在设计这类零部件时应考虑选用化学稳定性比较好的合金钢。如化工设备、医疗用具等常采用不锈钢来制造, 而内燃机排气阀和火力发电设备常采用耐热钢制造。

1.3 常用金属材料

工程用金属材料以合金为主, 很少使用纯金属。原因是合金比纯金属具有更好的力学性能、物理性能、化学性能及工艺性能, 且价格低廉。最常用的合金是以铁为基体的铁碳合金, 如碳素钢、合金钢、灰铸铁、球墨铸铁等, 还有以铜为基体的黄铜、青铜, 以及以铝为基体的铝硅合金等。

金属材料一般分为四大类：

- 1) 工业纯铁 ($w_c \leq 0.0218\%$)，一般不用来制造机械零件。
- 2) 钢 ($0.0218\% < w_c \leq 2.11\%$)。
- 3) 铸铁 ($2.11\% < w_c \leq 6.69\%$)。
- 4) 有色金属，一般包括铝、铜及其合金等。

1.3.1 钢

1. 钢的分类

钢的分类方法有很多，分类依据有钢的化学成分、主要质量等级、主要性能及用途。常用的分类方法是以钢中碳的质量分数、冶金质量、炼钢时的脱氧方法、钢的热处理特点等作为分类依据。

(1) 按化学成分分类 钢可分为非合金钢，即碳素钢、低合金钢、合金钢三大类。

按碳的质量分数不同，碳素钢又可分为低碳钢 ($w_c \leq 0.25\%$)、中碳钢 ($0.25\% < w_c \leq 0.6\%$)、高碳钢 ($w_c > 0.6\%$)。

按合金元素的含量不同，合金钢又可分为低合金钢 (合金元素质量分数小于 5%)、中合金钢 (合金元素质量分数为 5% ~ 10%)、高合金钢 (合金元素质量分数大于 10%)。

(2) 按使用特性分类 钢可分为结构钢、工具钢和特殊性能钢。

1) 结构钢。结构钢主要用来制造各种工程构件 (如桥梁、船舶、建筑等的构件) 和机器零件，一般属于低碳钢和中碳钢。

2) 工具钢。工具钢主要用来制造各种刀具、量具、模具，这类钢中碳的质量分数较高，一般属于高碳钢。

3) 特殊性能钢。特殊性能钢指具有特殊物理、化学性能的钢，这类钢主要有不锈钢、耐热钢、耐磨钢，一般属于高合金钢。

2. 非合金钢 (碳素钢) 的牌号、主要性能及用途

常用非合金钢 (碳素钢) 的牌号、主要性能及用途见表 1-2。

表 1-2 常用非合金钢 (碳素钢) 的牌号、主要性能及用途

分 类	牌 号 及 含 义		性能与应用范围	应 用 举 例
	牌 号 举 例	含 义		
碳素结构钢	Q235AF	Q 表示“屈”字汉字拼音字首，235 表示屈服强度值，A 表示质量等级，F 表示沸腾钢	普通碳素结构钢由于焊接性能好而强度不高，一般用于制造受力不大的机械零件	钢筋、套环、桥梁、高压线塔、建筑构件
优质碳素结构钢	08 ~ 25	优质碳素结构钢的牌号是用两位数，表示平均碳的质量分数的万分比。45 钢表示碳的质量分数为 0.45%	塑性、韧性较好，主要用于制作较重要的机械零件。该类钢一般都要经过热处理，以提高其力学性能	壳体、容器
	30 ~ 50			轴、齿轮、连杆
	60 以上			轧辊、弹簧、钢丝绳、偏心轮
碳素工具钢	T7、T7A、T8、T8A	常用的碳素工具钢牌号中“T”是“碳”的汉语拼音字首，数字表示平均含碳量的千分之几。若为高级优质碳素工具钢，则在其牌号后加字母“A”	经淬火、低温回火后具有高的硬度、耐磨性；但塑性较低，淬透性低，易变形。碳素工具钢主要用于制造截面较小、形状简单的各种低速切削刀具、量具和模具	冲头、镊子、手钳、锤子
	T9、T9A、T10、T10A			板牙、丝锥、钻头、车刀
	T12、T12A、T13、T13A			刮刀、锉刀、量具

3. 低合金高强度结构钢的牌号、主要性能及用途

低合金高强度结构钢是一种合金元素含量较少、强度较高的工程用钢，价格与普通碳素结构钢相近，但强度比一般低碳结构钢高 10% ~ 30%，且具有良好的塑性（断面收缩率大于 20%）和焊接性能，便于冲压或焊接成形。低合金高强度结构钢主要用于各种受力的工程结构，大多为普通质量钢，冶炼简便，成本低。

低合金高强度结构钢的牌号表示方法与碳素结构钢相同，即以字母“Q”开始，后面以 3 位数字表示最低屈服强度，最后以符号表示其质量等级。如 Q345A 表示屈服强度不低于 345MPa 的 A 级低合金高强度结构钢。表 1-3 列出了常用低合金高强度结构钢的牌号、化学成分、力学性能及应用举例。

表 1-3 常用低合金高强度结构钢的牌号、化学成分、力学性能及应用举例

牌 号	相应旧牌号举例	化学成分（质量分数）（%）						力学性能		应用举例
		C	Mn	V	Nb	Ti	Ni	R_{el}/MPa	$A(\%)$	
Q345（A，B）	16Mn、12MnV	≤0.20	≤1.70	0.15	0.07	0.2	0.5	345	20	桥梁、船舶、压力容器、车辆等
Q390（A～E）	15MnV、15MnTi	≤0.20	≤1.70	0.2	0.07	0.2	0.5	390	20	桥梁、船舶、压力容器、起重机等
Q420（A～E）	15MnVN、15MnVTiRe	≤0.20	≤1.70	0.2	0.07	0.2	0.8	420	19	桥梁、船舶、高压容器等
Q460（C～B）		≤0.20	≤1.80	0.2	0.11	0.2	0.8	460	17	大型桥梁、大型船舶、高压容器等

4. 合金钢的分类及牌号

合金钢是指在碳钢的基础上加入某些合金元素，以便提高钢的某些性能。按合金钢的用途可分为合金结构钢、合金工具钢和特种性能钢。

合金结构钢包括合金渗碳钢、合金调质钢、合金弹簧钢和滚动轴承钢等。合金结构钢不仅具有较高的强度和韧度，而且具有较好的淬透性，主要用来制造工程构件和机械零件，属于优质钢或高级优质钢，一般都经过热处理后使用。

合金工具钢按用途分为刀具钢、模具钢和量具钢，其中合金刀具钢包括低合金刀具钢和高速钢，合金模具钢包括热作模具钢和冷作模具钢。对具体的钢种而言，实际应用界限并非是绝对的，而是以其性能特点作为首要的选材依据，如某些刀具钢也可制造冷模具或量具等。

特殊性能钢是指具有特殊物理、化学性能的钢。该类型的合金钢主要有不锈钢、耐热钢和耐磨钢。合金钢的牌号表示方法见表 1-4。

表 1-4 合金钢的牌号表示方法

分 类	牌号表示方法	举 例
合金结构钢	“数字” + “合金元素符号” + “数字”三部分组成。前两位数字表示钢中平均含碳量的万分之几，其后的数字表示该元素平均含量的百分之几，当其平均含量小于 1.5% 时，只需写出元素符号；高级优质钢在钢号后加“A”。易切削钢前面加“Y”，滚动轴承钢在钢号前面加“G”，铬的质量分数用千分数表示。其中低合金高强度钢牌号的新标准表示方法与普通碳素结构钢相同	渗碳钢：20Cr、20Mn2、20CrMnTi、20Cr2Ni4、18Cr2Ni4WA 合金调质钢：40CrMn、38CrMoAl、40CrNiMoA、25Cr2Ni4WA 合金弹簧钢：65Mn、60Si2Mn、55SiMnVB 滚动轴承钢：GCr15、GCr15SiMn

(续)

分 类	牌号表示方法	举 例
合金 工具钢	碳的平均质量分数小于1%时,用一位数字表示平均质量分数的千分数;如平均碳质量分数不小于1%时,则不标出其质量分数。合金元素含量的表示方法与合金结构钢相同	低合金刃具钢: 9SiCr、CrWMn、9Mn2V 高速钢: W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 冷作模具钢: Cr12MoV、Cr4W2MoV 热作模具钢: 5CrNiMo、3Cr2W8V 合金量具钢: CrWMn、GCr15、9Cr18
特殊 性能钢	牌号前面的两位数字表示平均碳含量的质量分数。但当其值不大于0.003%,用三位数表示(十万分之几表示)合金元素含量的表示方法与合金结构钢相同	不锈钢: 20Cr13、40Cr13、12Cr13、10Cr17Ni 耐热钢: 06Cr18Ni11Ti、14Cr11MoV 耐磨钢: ZGMn13

1.3.2 铸铁

铸铁是碳的质量分数大于2.11%的铁碳合金。一般含有硅、锰元素及磷、硫等杂质。铸铁在工业生产上的应用比较广泛,与碳素钢相比,其力学性能相对较差,但其具有优良的减振性、耐磨性、切削加工性和铸造性能,生产成本也比较低。

1. 铸铁的分类

(1) 根据碳在铸铁中存在的形式分类 可分为白口铸铁、灰铸铁和麻口铸铁

1) 白口铸铁中的碳完全以渗碳体的形式存在,断口呈银白色,硬而脆,难以进行切削加工。一般用于无需加工但需耐磨且有较高硬度的零件,如铰犁、球磨机的磨球、轧辊等。

2) 灰铸铁中的碳大部分以片状石墨形式存在,断口呈暗灰色,工业应用比较广泛。

3) 麻口铸铁中的碳以石墨和渗碳体的混合形式存在,断口呈灰白相间的麻点状,脆性较大。

(2) 根据石墨在铸铁中的形状分类 可分为普通灰铸铁、球墨铸铁和可锻铸铁。

1) 普通灰铸铁中的石墨呈片状,抗压强度明显大于抗拉强度,同时还具有良好的切削加工性、减振性、吸振性等特点。它还具有熔点低、流动性好、收缩量小等优点,因此铸造性能良好。

2) 球墨铸铁中的碳主要以球状石墨的形式存在,通过在铸铁液中加入球化剂进行球化处理获得。球墨铸铁既有灰铸铁的优点,又具有较高的强度和一定的塑性和韧性,因此,综合力学性能优越。

3) 可锻铸铁是由白口铸铁经过长时间石墨化退火而获得的,具有团絮状石墨的铸铁。它具有较好的强度、塑性和韧性。

2. 铸铁的牌号、性能及应用

常用铸铁的牌号、性能及应用见表1-5。

表 1-5 常用铸铁的牌号、性能及应用

分 类	牌 号		性 能	应用举例
	牌号举例	说 明		
灰铸铁	HT100 HT200 HT300 HT350	HT+数字。“HT”表示灰铸铁代号,数字表示最低抗拉强度	铸造性、减振性、耐磨性、切削加工性优异	机床床身、各种箱体、壳体、泵体、缸体等