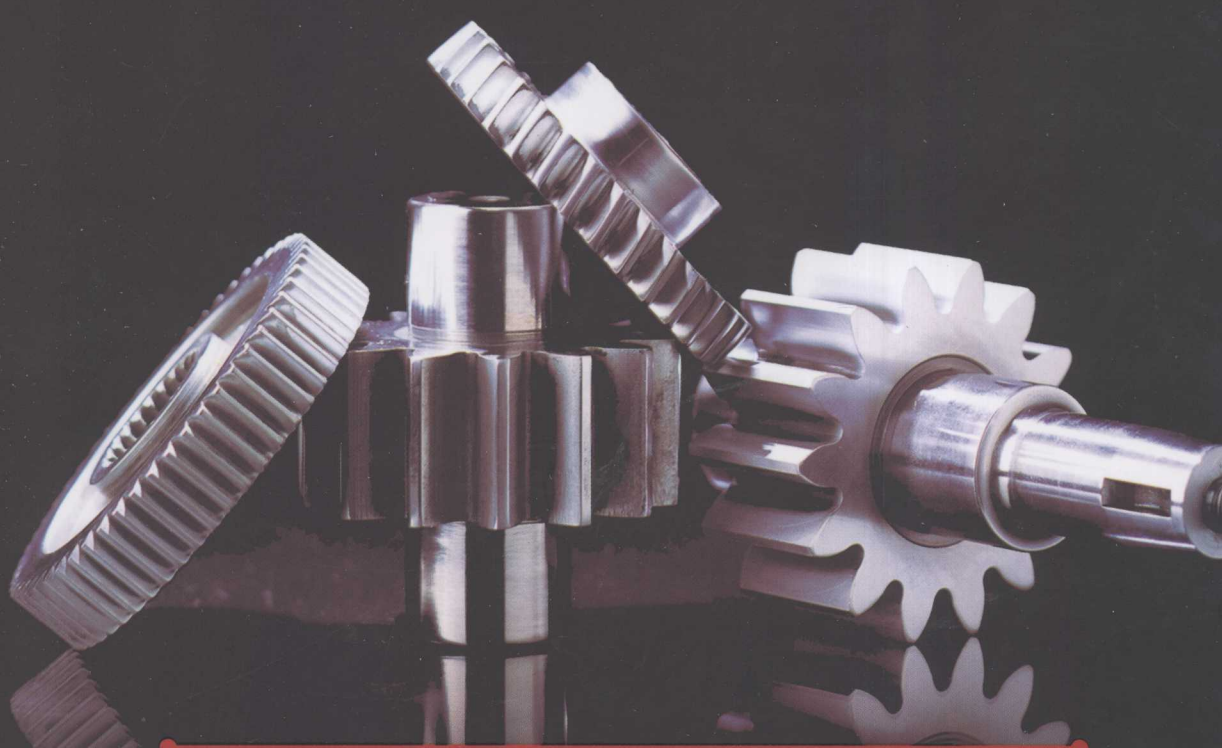




机械工程材料 与加工工艺

JIXIE GONGCHENG
CAILIAO YU JIAGONG GONGYI

马鹏飞 张松生 主 编 李美兰 路树宏 副主编



化学工业出版社

机械工程材料 与加工工艺



JIXIE GONGCHENG
CAILIAO YU JIAGONG GONGYI

马鹏飞 张松生 主 编 李美兰 路树宏 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书分十二章介绍了机械工程材料的力学性能,金属学基础知识,热处理工艺及其发展趋势,常用机械工程材料,金属材料的热加工工艺知识,非金属材料的成形工艺,材料的冷加工工艺知识,材料的数控加工技术及现代制造技术,最后结合实例阐述了典型零件机械加工工艺过程。

在阐述方式上,从基本理论和基本技术两方面展开叙述,注重理论与技能操作的紧密结合。在内容安排上,既保留了有价值的经典理论和技术,又反映了近年来机械工程材料与加工工艺的新知识、新理论、新工艺及新技术等方面的内容。突出了新颖和实用的特点。

本书可供机械工程类的工程技术人员参考,也可作为大专院校机械类专业的教学用书,还可作为机械技术工人考评技师以上职称的培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程材料与加工工艺/马鹏飞,张松生主编. —北京:
化学工业出版社, 2008.1
ISBN 978-7-122-01691-1

I. 机… II. ①马…②张… III. ①机械制造材料②机械
加工-工艺 IV. TH14 TG5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 195262 号

责任编辑: 陈 丽 程树珍
责任校对: 李 林

文字编辑: 袁海燕
装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 458 千字 2008 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

为满足机械工程专业高级技能人才的培养,以及广大从事机械制造行业工程技术人员业务学习的需要,我们编写了本书。

本书在内容选择上既体现机械工程材料与加工工艺的发展,又适应制造工程的实际需要,阐述了现代机械工程专业高级技能人才必备的工程材料与加工工艺的基本理论和知识。在重点剖析结构材料的同时,适当地介绍功能材料;在重点分析工业上广泛使用的金属材料的同时,适量地介绍非金属材料、新型材料;在重点阐述常用的工程材料成形技术、传统的机械加工方法的同时,新增了快速成形、数控加工、特种加工等新技术、新工艺方面的有关知识,尽可能体现本书内容的科学性、先进性、适用性和系统性。

本书注重理论和实践的紧密结合,学以致用,加强对培训对象实际工程技术能力的培养。在内容安排上,从机械工程应用的角度出发,既保留了机械工程材料与加工工艺的经典理论和知识,认识材料的成分、加工工艺、组织、结构与性能之间的关系,介绍常用的机械工程材料及其应用、加工工艺、零件的选材等基本知识,又反映了近年来的新理论、新材料、新技术、新工艺等“四新”内容。全书内容较全面、系统,突出了“新颖”和“实用”的特点。本书共十二章,内容包括机械工程材料与金属学基本知识、钢的热处理、金属材料、非金属材料与新型功能材料、铸造成型、锻压成型、焊接成型、非金属材料成型、金属切削加工基础知识、表面加工方法、数控加工技术、机械零件的选材及加工工艺等。

本书是职业技术学院、技师学院、继续教育学院机械类专业的优选教材,是机械工程专业高级技能人才职业技能培训、考评的合适教材,也是中、高等职业技术学校及企业内部中长期培训的适用教材。同时也可供从事机械制造工程的技术人员参考。

本书第一、二章由李美兰编写,第三、四、五、六章由马鹏飞编写,第七、八章由路树宏、王德鸿、凌勤编写,第九章由张松生、冯伟玲、王德鸿编写,第十、十一章由张松生编写,第十二章由张松生、马鹏飞编写。本书由马鹏飞、张松生任主编,并对全书进行统稿、定稿,由李美兰、路树宏任副主编。在编写过程中,参阅了有关教材、资料和文献,在此对有关专家、学者和作者表示衷心感谢。

在本书的编写过程中,江苏大学工业中心各位领导和教师给予了精心的指导和热情的帮助,提出了许多宝贵的意见。全书由江苏大学工业中心王维新高级工程师担任主审。在此谨向他们表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中缺点和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2007年6月

目 录

第一章 机械工程材料与金属学基本知识	1	三、影响过冷奥氏体等温转变曲线的因素	46
第一节 机械工程材料的分类	1	四、过冷奥氏体的连续冷却转变	47
一、金属材料	1	第四节 钢的退火与正火	48
二、高分子材料	1	一、退火	48
三、陶瓷材料	2	二、正火	50
四、复合材料	2	三、退火与正火的选择	50
五、新材料的发展趋势	2	第五节 钢的淬火	51
第二节 机械工程材料的性能	2	一、淬火的基本概念及目的	51
一、机械工程材料的力学性能	2	二、淬火加热温度的选择	51
二、材料的物理和化学性能	8	三、淬火冷却介质	52
三、材料的工艺性能	9	四、常用淬火方法	52
第三节 金属的结构与结晶	9	五、钢的淬透性	53
一、金属的晶体结构	9	六、淬火缺陷	55
二、金属的实际结构与晶体缺陷	11	第六节 钢的回火	56
三、金属的结晶	14	一、回火的基本概念及目的	56
四、金属的同素异构转变	16	二、淬火钢在回火时的组织及性能的变化	56
五、金属铸锭	17	三、回火的分类及应用	57
第四节 合金的相结构与二元合金相图	18	四、回火脆性	58
一、合金的相结构	18	第七节 钢的表面淬火	58
二、二元合金相图	19	一、感应加热表面淬火	58
第五节 铁碳合金	22	二、火焰加热表面淬火	59
一、铁碳合金中的基本相与基本组织	22	第八节 钢的化学热处理	60
二、Fe-Fe ₃ C 相图	23	一、化学热处理的目的与基本过程	60
三、碳对铁碳合金平衡组织和性能的影响	30	二、渗碳	60
四、铁碳合金相图的应用	31	三、渗氮	61
第六节 金属的塑性变形和再结晶	31	四、碳氮共渗	61
一、金属的塑性变形	31	五、其他化学热处理方法	61
二、塑性变形对金属组织和性能的影响	33	第九节 热处理零件的技术要求	62
三、回复与再结晶	35	一、热处理技术条件及其标注	62
四、金属的热加工	37	二、热处理工艺位置的安排	62
第二章 钢的热处理	39	第十节 热处理新技术	63
第一节 概述	39	一、可控气氛热处理	63
一、热处理及其作用	39	二、真空热处理	63
二、钢的临界温度	39	三、离子渗扩热处理	65
第二节 钢在加热时的组织转变	40	四、形变热处理	65
一、奥氏体的形成	40	五、激光表面改性技术	66
二、奥氏体的晶粒大小及其影响因素	41	六、离子注入	66
第三节 钢在冷却时的组织转变	42	七、气相沉积技术	67
一、过冷奥氏体等温转变图	42	八、计算机在热处理技术中的应用	67
二、过冷奥氏体等温转变产物的组织与性能	44	第三章 金属材料	69

第一节 碳素钢	69	六、超导材料	124
一、碳素钢中常存杂质对其性能的影响	69	第五章 铸造成形	126
二、碳素钢的分类	69	第一节 概述	126
三、碳素钢的牌号及主要用途	70	第二节 砂型铸造	126
第二节 合金钢	73	一、砂型铸造生产过程	126
一、合金元素在钢中的作用	73	二、造型材料	127
二、合金钢的分类及牌号	75	三、铸型的组成	127
三、合金结构钢	76	四、造型方法	127
四、合金工具钢	83	五、砂型铸造工艺方案的选择	129
五、特殊性能钢	89	六、浇注系统	130
第三节 铸铁	92	七、冒口和冷铁	131
一、铸铁的分类	92	八、铸件的浇注、落砂和清理	132
二、铸铁的石墨化过程及影响因素	93	第三节 特种铸造	132
三、灰铸铁	94	一、熔模铸造	132
四、可锻铸铁	96	二、金属型铸造	133
五、球墨铸铁	97	三、压力铸造	134
六、蠕墨铸铁	100	四、离心铸造	134
七、合金铸铁	100	五、消失模铸造	135
第四节 非铁金属及其合金	101	六、半固态金属铸造	136
一、铝及铝合金	101	第四节 快速成形技术(RPT)及其应用	137
二、铜及铜合金	105	一、激光立体光刻成形技术(SLA)	137
三、钛及钛合金	107	二、分层叠纸制造成形工艺(LOM)	137
四、镁及镁合金	108	三、激光粉末选区烧结成形技术(SLS)	138
五、轴承合金	108	四、熔丝沉积成形工艺(FDM)	138
第五节 粉末冶金材料	110	五、直接制壳生产铸件的工艺(DSPC)	139
一、粉末冶金机器零件材料	110	第六章 锻压成形	140
二、粉末冶金工具材料	111	第一节 概述	140
第四章 非金属材料与新型功能材料	113	第二节 锻造加热和冷却	140
第一节 高分子材料	113	一、锻造加热设备	140
一、高分子材料基础知识	113	二、锻造温度范围	141
二、工程塑料	113	三、锻件冷却	141
三、工业橡胶	114	四、锻后热处理	141
第二节 陶瓷材料	116	第三节 自由锻	142
一、陶瓷的性能	116	一、自由锻设备	142
二、陶瓷的分类及应用	116	二、自由锻基本工序	142
第三节 复合材料	117	第四节 模锻	144
一、复合材料的基本概念	117	一、胎模锻	144
二、复合材料的命名	117	二、锤上模锻	145
三、复合材料的分类	117	第五节 板料冲压	145
四、复合材料的性能	118	一、板料冲压的特点及应用	145
五、复合材料的应用	118	二、冲压设备及冲模	145
第四节 新型功能材料	119	三、板料冲压的基本工序	146
一、纳米材料	119	第六节 其他锻压加工方法	147
二、功能梯度材料	121	一、精密模锻	147
三、形状记忆合金	121	二、超塑性模锻	147
四、阻尼合金	122		
五、非晶态合金	123		

三、高速锤锻造	147	二、切削加工工件上形成的表面	170
四、冷锻	148	第二节 刀具几何形状	171
五、辊锻和楔横轧	148	一、车刀的组成	171
六、摆动碾压	148	二、确定车刀切削角度的辅助平面	171
七、粉末锻造	149	三、车刀的主要角度和作用	172
八、液态模锻	149	第三节 刀具材料	172
第七章 焊接成形	150	一、刀具切削部分材料的要求	172
第一节 概述	150	二、常用的刀具材料	173
第二节 焊条电弧焊	151	第四节 金属的切削过程	175
一、焊条电弧焊基础知识	151	一、切屑的形成	175
二、焊条电弧焊的设备	151	二、切削力	176
三、电焊条	152	三、影响切削力的因素	177
四、焊条电弧焊操作技术	153	第五节 刀具的磨损与寿命	178
五、焊条电弧焊焊接工艺	154	一、刀具的磨损类型	178
第三节 气焊与气割	155	二、刀具磨损的原因	179
一、气焊	155	三、刀具磨损过程	179
二、气割	156	四、刀具耐用度定义	180
第四节 其他焊接工艺方法	157	五、影响刀具耐用度的因素和合理的耐用度	180
一、气体保护焊	157	第六节 切削用量的合理选择	180
二、埋弧自动焊	159	一、切削用量三要素	180
三、电阻焊	160	二、选择切削用量的基本原则	181
四、电子束焊	160	三、切削用量的选择方法	182
五、激光焊	161	第七节 切削热和切削液	182
六、钎焊	161	一、切削热的产生和传导	182
第八章 非金属材料成形	163	二、切削热对工件、刀具和切削过程的影响	183
第一节 概述	163	三、切削液	183
第二节 工程塑料的成形	163	第八节 工件材料的切削加工性	185
一、注射成形	163	第九节 常用量具	185
二、挤出成形	164	一、游标卡尺	186
三、压制成形	164	二、千分尺	186
四、吹塑成形	164	三、游标高度尺	187
五、压延成形	165	四、百分表	187
第三节 橡胶材料的成形	165	五、万能游标量角器	188
一、压制成形	165	六、块规	188
二、传递成形	165	七、塞规和卡规	188
三、注压成形	166	第十章 表面加工方法	190
第四节 陶瓷材料的成形	166	第一节 外圆表面加工	190
一、可塑性成形	166	一、车外圆	190
二、注浆成形	167	二、磨外圆	193
三、压制成形	167	第二节 内圆表面加工	195
第五节 复合材料的成形	167	一、钻孔	195
一、树脂基复合材料成形方法	168	二、铰孔	197
二、金属基复合材料的成形方法	169	三、镗孔	197
三、陶瓷基复合材料的成形方法	169	四、拉孔	198
第九章 金属切削加工基础知识	170	五、磨孔	199
第一节 金属切削加工概述	170		
一、切削运动	170		

六、孔的光整加工	200
第三节 平面加工	202
一、平面铣削	203
二、平面刨削	205
三、平面磨削	206
四、刮研平面	207
第四节 螺纹加工	207
一、攻螺纹和套螺纹	207
二、车螺纹	208
三、铣螺纹	208
四、滚压螺纹	208
五、磨螺纹	209
第五节 齿轮加工	209
一、铣齿	210
二、插齿和滚齿	210
三、齿面精加工	213
第十一章 数控加工技术	216
第一节 数控机床的组成与分类	216
一、数控机床的组成	216
二、数控系统的分类	218
第二节 数控编程基础	220
一、基本工作过程	220
二、数控机床坐标系与工件坐标系	220
三、程序的结构与格式	221
四、数控机床的基本功能指令	222
第三节 数控加工工艺	226
一、加工方法的确定	226
二、加工工序的划分	226
三、工件的安装与夹具的选择	227

四、刀具的选择及加工路线的确定	227
第四节 特种加工	228
一、数控电火花加工	229
二、电解加工	234
三、激光加工	237
四、超声加工	238
第五节 现代制造技术	240
一、概述	240
二、CAD/CAM/CAPP	241
三、工业机器人	241
四、柔性制造系统	242
五、计算机集成制造系统 (CIMS)	243
第十二章 机械零件的选材与加工工艺	245
第一节 机械零件的选材方法	245
一、机械零件选材的一般原则	245
二、机械零件选材的基本步骤	247
第二节 工艺规程的制定步骤与方法	247
一、机械零件的图样及工艺分析	247
二、机械零件的毛坯选择	247
三、拟定工艺过程	248
四、工序设计	249
五、填写工艺文件	250
第三节 典型机械零件的选材及工艺分析	251
一、汽车、拖拉机的齿轮	251
二、机床主轴	253
三、机架和箱体类零件	256
参考文献	260

第一章 机械工程材料与金属学基本知识

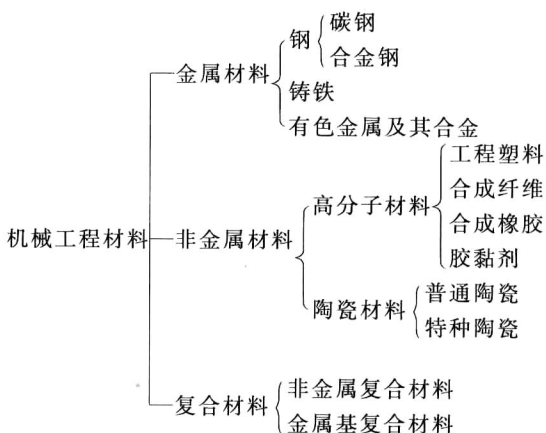
第一节 机械工程材料的分类

材料是现代文明的三大支柱之一，也是发展国民经济和机械工业的重要物质基础。材料作为生产活动的基本投入之一，对生产力的发展有深远的影响。历史上曾把当时使用的材料当作历史发展的里程碑，如“石器时代”、“青铜器时代”、“铁器时代”等。我国是世界上最早发现和使用金属的国家之一。周朝是青铜器的极盛时期，到春秋战国已普遍应用铁器。直到 19 世纪中叶大规模炼钢工业兴起，钢铁才成为最主要的工程材料。

科学技术的进步推动了材料工业的发展，使新材料不断涌现。石油化学工业的发展促进了合成材料的兴起和应用；20 世纪 80 年代特种陶瓷材料又有很大进展。因此，现代材料种类繁多。据粗略统计，目前世界上的材料已达 40 余万种，并且每年约以 5% 的速率增加。材料有许多不同的分类方法，机械工程中使用的材料按其结合键的性质常分为以下三大类。

按零件在机械或机器中实现的功能，又将制造零件的材料分为结构材料 and 功能材料。用于制造实现运动和传递动力的零件的材料称为结构材料，用于制造实现其他功能的零件的材料称为功能材料。功能材料是利用物质的各种物理和化学特性及其对外界环境敏感的反应，从而实现各种信息处理和能量转换。主要有弹性材料、膨胀材料、形状记忆合金和磁性材料等。机械工程中大量使用各类结构材料。

上述三大类工程材料在性能上各有其优缺点。复合材料则集中了各种材料的优异性能于一体，可充分发挥各类材料的潜力。



一、金属材料

金属材料是由金属元素或以金属元素为主，其他金属或非金属元素为辅构成的，并具有金属特性的工程材料，包括纯金属和合金。金属材料原子间的结合键基本上为金属键。工业上通常把金属及其合金分为两大部分。

1. 黑色金属：包括铁、铬、锰三种。但后两种在实际工程上很少单独使用，故黑色金属就泛指铁或以铁为基的合金，如：钢、铸铁等。

2. 有色金属：黑色金属以外的所有金属及其合金，如：铜、铝和镁等。

黑色金属应用最为广泛。以铁为基的合金材料占整个结构材料和工具材料的 90% 以上。黑色金属的工程性能比较优越，价格也比较便宜，是最重要的工程材料。

二、高分子材料

高分子材料为有机合成材料，亦称聚合物。它有良好的塑性，较强的耐腐蚀性能，很好的绝缘性以及重量轻等优良性能，但强度较低，是工程上发展最快的一类新型结构材料。

高分子材料由大量分子量特别大的大分子化合物组成。大分子内的原子之间由很强的共价键结合,而大分子与大分子之间的结合力为较弱的范德瓦尔斯力。由于大分子链很长,大分子之间的接触面比较大,特别当分子链交缠时,大分子之间的结合力可以很大。

工程上通常根据力学性能和使用状态将高分子材料分为四类:工程塑料、合成纤维、合成橡胶、胶黏剂。

三、陶瓷材料

陶瓷是一种或多种金属元素与一种非金属元素(如氧、碳、氮等)构成的化合物。在氧化物中尺寸较大的氧原子组成陶瓷的基本结构,较小的金属(或半导体材料如硅等)原子处于氧原子之间的空隙里。氧原子同金属原子化合时形成很强的离子键,同时也存在有一定成分的共价键,但离子键是主要的。也有一些特殊陶瓷以共价键为主。陶瓷的硬度很高,但脆性很大。

按照成分和用途,工业陶瓷材料可分为三类:普通陶瓷(或传统陶瓷)、特种陶瓷(或新型陶瓷)和金属陶瓷。

四、复合材料

复合材料就是两种或两种以上不同材料的组合材料,其性能优于它的组成材料。复合材料可以由各种不同种类的材料复合组成,所以它的结合键非常复杂。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,具有广阔的发展前景。

五、新材料的发展趋势

随着社会的发展和科学技术的进步,新材料的研究、制备和加工应用层出不穷。每一种重要的新材料的发现和运用,都把人类改造自然的能力提高到一个新的水平。工程材料正朝高强度(单位密度的强度)、高比模量(单位密度的模量)、耐高温、耐腐蚀的方向发展。目前新材料主要在以下几方面获得发展。

① 先进复合材料 由基体材料(高分子材料、金属或陶瓷)和增强材料(纤维、晶须、颗粒)复合而成的具有优异性能的新型材料。

② 光电子信息材料 光电信息处理材料包括量子材料、生物光电子材料、非线性光电子材料等。

③ 低维材料 指超微粒子(零维)、纤维(一维)和薄膜(二维)材料,这是近年来发展最快的材料领域。

④ 新型金属材料 如镍基高温合金、非晶态合金、微晶合金、Al-Li合金、金属间化合物等。

本书将分别介绍各类工程材料。但由于金属材料是应用最广泛、最重要的工程材料,因此本书将进行重点讨论。

第二节 机械工程材料的性能

机械工程材料的性能对零件的使用和加工有十分重要的作用,一般可分为使用性能和工艺性能两大类。使用性能是指材料在工作条件下所必须具备的性能,包括物理性能、化学性能和力学性能,它反映材料在使用过程中表现出来的特点,决定了材料的应用范围、安全可靠性及使用寿命。工艺性能是反映材料在制造加工过程中的各种性能,如铸造性能、焊接性能、锻压性能、切削加工性能及淬透性等。

一、机械工程材料的力学性能

机械工程材料最主要的使用性能是力学性能。材料在加工和使用过程中都要承受不同形式外力的作用,当外力达到或超过某一限度时,材料就会发生变形,以至断裂。材料的力学性能

是指材料在外力作用下所表现出来的特性，也就是材料抵抗外力作用的能力。根据外加载荷的性质和材料表现的特性不同，力学性能的指标有强度、塑性、硬度韧性及疲劳强度等多种，下面介绍常用的几项力学性能指标。

1. 强度

强度是材料在外加载荷作用下，抵抗其永久变形和断裂的能力。材料抵抗外加载荷的能力越大，则强度越高。强度的大小通常用应力来表示。根据载荷作用的方式不同，强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度和抗扭强度等。它们是通过拉伸试验和其他力学性能试验测定的。

拉伸试样的是用静拉伸力对标准试样（如图 1.1 所示）进行轴向拉伸，测量试验力和相应的伸长，一般拉至断裂，从而测定其力学性能的试验。

在进行拉伸试验时，载荷 F （拉伸力）和试样伸长量 ΔL 之间的关系曲线称为力-伸长曲线，也称拉伸图。图 1.2 是低碳钢的力-伸长曲线，图中纵坐标表示力 $F(N)$ ；横坐标表示绝对伸长量 $\Delta L(m)$ 。图 1.2 中表现出以下 4 个变形阶段。

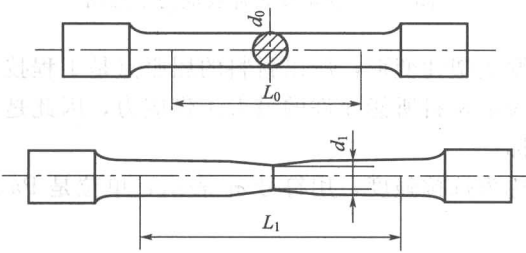


图 1.1 圆形拉伸试样

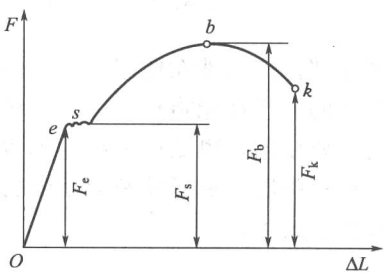


图 1.2 低碳钢力-伸长曲线

Oe ——弹性变形阶段。此阶段内试样变形是弹性变形。 F_e 是保持弹性变形的最大拉伸力。

es ——屈服阶段。当载荷超过 F_e 时，若此时卸载，试样的伸长只能部分恢复，而保留一部分残余变形，即产生塑性变形。当载荷增加到 F_s 时，图上出现平台或锯齿状，产生屈服现象，此时的载荷 F_s 为屈服载荷。屈服后，材料将残留较大的塑性变形。

sb ——均匀变形阶段。在屈服阶段以后，欲使试样继续伸长，必须不断加载，直到所加载荷为最大载荷 F_b 。在此过程中，随着塑性变形增大，试样变形抗力也逐渐增加，产生形变强化（或称加工硬化）。 F_b 为拉伸试验时试样所能承受的最大载荷。

bk ——缩颈阶段（局部塑性变形阶段）。当载荷达到最大值 F_b 时，试样的直径发生局部收缩，称为“缩颈”。由于截面变小，截面所能承受的载荷也随之降低，当载荷达到 F_k 时，试样被拉断。

一般情况下，判断材料强度高低的判据有屈服点、规定残余伸长应力和抗拉强度等。

(1) 屈服点和规定残余伸长应力 试样在拉伸过程中，载荷不增加而应变仍能继续增大时的应力称为屈服点，也叫屈服强度。用符号 σ_s 表示，单位是 Pa 或 MPa。计算公式为：

$$\sigma_s = \frac{F_s}{S_0} \quad (1-1)$$

式中， σ_s 为屈服点，MPa； F_s 为试样屈服时的载荷，N； S_0 为试样原始横截面积， mm^2 。

对于塑性很低的材料，如铸铁，不仅没有明显的屈服现象，而且也不产生缩颈。图 1.3 为铸铁的力-伸长曲线。

对于在拉伸过程中屈服现象不明显的材料，一般测定其规定残余伸长应力值，用 σ_r 表示。

规定残余伸长应力是指试样卸除拉伸力后，其标距部分的残余伸长达达到规定的原始标距百分比时的应力。表示此应力的符号，应附以下角标说明其规定的残余伸长率。例如， $\sigma_{r_{0.2}}$ (MPa) 表示规定残余伸长率为 0.2% 时的应力，图 1.4 为规定残余伸长应力示意图。



图 1.3 铸铁的力-伸长曲线

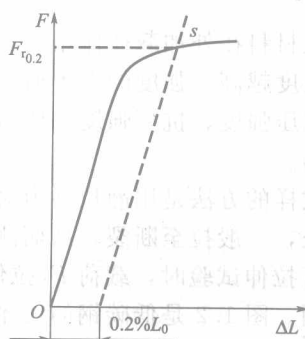


图 1.4 规定残余伸长应力示意图

机械零部件或构件在使用过程中一般不允许发生塑性变形，所以材料的屈服点是工程技术上极为重要的力学性能指标之一。材料的屈服点表示材料所能允许的最大工作应力，因此是机械设计的主要依据，也是评定材料优劣的重要指标。

(2) 抗拉强度 试样拉断前承受的最大应力称为抗拉强度，用符号 σ_b 表示，单位是 Pa 或 MPa。计算公式为：

$$\sigma_b = \frac{F_b}{S_0} \quad (1-2)$$

式中， σ_b 为抗拉强度，MPa； F_b 为试样承受的最大载荷 N； S_0 为试样原始横截面积， mm^2 。

抗拉强度也是零部件设计和评定材料时极为重要的指标之一。对于脆性材料，由于拉伸时没有明显的屈服现象，这时一般用抗拉强度指标作为设计依据。另外，材料的抗拉强度与密度之比称为比强度，它也是零件选材的重要指标之一。

2. 塑性

塑性是指材料在载荷作用下产生塑性变形而不破坏的能力。塑性指标是用材料在断裂时的最大相对塑性变形来表示的，它们也是通过拉伸试验测定的。评定材料常用的塑性指标有伸长率 (δ) 和断面收缩率 (ψ)，这是工程上广泛应用的表征材料塑性好坏的两个力学性能指标。

(1) 伸长率 试样拉断后，标距的伸长与原始标距的百分比称为伸长率，用符号 δ 表示。计算公式为：

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中， l_0 为试样的原始标距长度，mm； l_1 为试样拉断后的标距长度，mm； δ 为伸长率，%。

这里必须指出，同一材料的试样长度不同，测得的伸长率是不同的。因此，在材料手册中常常还可以看到 δ_5 和 δ_{10} 两种符号，它们分别表示用 $l_0 = 5d$ 和 $l_0 = 10d$ 两种不同长度试样测定的伸长率。

(2) 断面收缩率 试样拉断后，缩颈处横截面积的最大收缩量与原始横截面积的百分比称为断面收缩率，用符号 ψ 表示。计算公式为：

$$\psi = \frac{S_0 - S_1}{S_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中, S_0 为试样原始横截面面积, mm^2 ; S_1 为试样拉断后缩颈处的横截面面积, mm^2 ; ψ 为断面收缩率, %。

材料的断后伸长率 (δ) 和断面收缩率 (ψ) 数值越大, 表示材料的塑性越好。塑性好的材料可以发生大量塑性变形而不破坏, 便于通过塑性变形加工成复杂形状的零件; 同时塑性好的材料在受力过大时, 能首先产生塑性变形而不至于发生突然断裂, 安全性好, 因此对于重要的受力零件, 还应要求具有一定的塑性, 以防止超载时发生突然断裂。

3. 硬度

硬度是表示材料抵抗其他更硬物体压入其表面的能力, 是衡量材料软硬程度的重要指标。实际上硬度是材料力学性能的一个综合物理量, 也就是说, 在一定程度上, 硬度高低也同时反映了材料的强度、塑性的大小。硬度是各种零件和工具必备的性能指标, 硬度试验设备简单, 操作方便, 并不破坏被测试工件, 因此广泛用于产品质量的检验。常用的硬度表示法有布氏硬度 (HB)、洛氏硬度 (HRA、HRB、HRC) 和维氏硬度 (HV) 等三种。

(1) 布氏硬度 布氏硬度试验是在布氏硬度计上, 用规定直径 D 的淬火钢球或硬质合金球, 以一定大小的试验力 F 压入试样表面, 保持规定的时间后, 卸除试验力, 测量试样表面的压痕直径 d , 求出压痕面积。计算出试样压痕面积上所承受的平均压力, 也就是所加试验力与压痕面积的比值, 即为试样的布氏硬度值。图 1.5 为布氏硬度试验原理图。

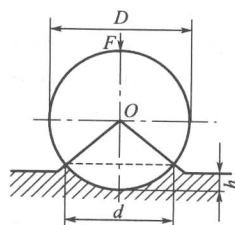


图 1.5 布氏硬度试验原理图

布氏硬度值用符号 HBS(W) 表示。计算公式为:

$$\text{HBS(HBW)} = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1-5)$$

式中, HBS(HBW) 表示用淬火钢球或硬质合金球试验时的布氏硬度值; F 为试验力, N; D 为球体直径, mm; d 为压痕平均直径, mm。

由式(1-5)可见, 当试验力 (F)、压头球体直径 (D) 一定时, 压痕直径 (d) 越小, 布氏硬度值越大, 也就是硬度越高。在实际应用中, 布氏硬度值不用计算, 而是采用专用的刻度放大镜测出压痕直径 (d) 的大小, 再从专门的硬度表中查出相应的布氏硬度值。

布氏硬度的表示方法规定为: 当试验的压头为淬火钢球时, 其硬度符号用 HBS 表示; 当试验压头为硬质合金球时, 其硬度符号用 HBW 表示。符号 HBS 或 HBW 之前的数字为硬度值, 符号后面按球体直径、试验力、试验力保持时间 (10~15s 不标注) 的顺序表示试验条件。

例如, 190HBS10/1000/30 表示用直径 10mm 的淬火钢球, 在 9807N(1000kgf) 的试验力作用下, 保持 30s 时测得的布氏硬度值为 190。550HBW5/750 表示用直径 5mm 的硬质合金球, 在 7355N(750kgf) 的试验力作用下, 保持 10~15s 时测得的布氏硬度值为 550。

布氏硬度适用于铸铁、有色金属及其合金、各种退火及调质的钢材, 特别对软金属, 如铝、铅、锡等更为适宜。布氏硬度试验由于压痕较大, 故测得的值比较精确, 但也正是这个原因, 它不适于测定成品及薄片类件的硬度值。

(2) 洛氏硬度 洛氏硬度试验是实际生产中应用最为广泛的硬度测定方法之一。它的原理是用 $\phi 1.588\text{mm}$ (即 1/16in) 的淬火钢球或锥顶角为 120° 的金刚石圆锥体为压头, 先加上初试验力 F_0 , 以消除工件表面粗糙度对所测硬度值的影响, 再加上主试验力 F_1 , 垂直压入试样表面, 经规定保持时间后, 随后卸除主试验力 F_1 , 在保留初试验力的情况下, 用所测得的主试

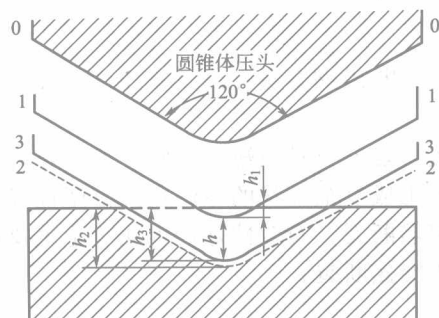


图 1.6 洛氏硬度试验原理

硬度愈高的概念，故采用一个常数 K 减去 h 来表示硬度大小，并规定每 0.002mm 的压痕深度为一个硬度单位，由此获得的硬度值称为洛氏硬度值，用符号 HR 来表示。

$$HR = \frac{K - h}{0.002} \quad (1-6)$$

式中， K 为常数。当用金刚石圆锥体压头时， $K = 0.2\text{mm}$ ；用钢球作压头时， $K = 0.26\text{mm}$ 。洛氏硬度没有单位，在试验时 HR 值均从硬度计的刻度盘上直接读出。

为了用同一洛氏硬度试验计测定软硬不同材料的洛氏硬度，可采用不同的压头与不同的试验力，从而组成了几种不同的洛氏硬度标尺，如表 1.1 所示。生产中常用的是 A、B、C 三种标尺的洛氏硬度，A 和 C 标尺的压头用的是 120° 金刚石圆锥体，试验力分别为 588.4N (60kgf) 和 1471.0N (150kgf)；而 B 标尺的压头则用 $1/16\text{in}$ 或 $1/8\text{in}$ 的淬火钢球，试验力为 980.7N (100kgf)。分别用 HRA 、 HRB 、 HRC 表示，其中 HRC 应用最广泛。

洛氏硬度的表示方法规定为： HR 前面的数字表示硬度值， HR 后面的字母表示所使用的标尺。例如， $52HRC$ 表示用 C 标尺测定的洛氏硬度值为 52。

表 1.1 常用的洛氏硬度标尺试验条件和使用范围

硬度标尺	压头类型	总试验力/N	硬度值有效范围	应用举例
HRC	120° 金刚石圆锥体	1471.0	20~67HRC	一般淬火钢、高强度调质钢等
HRB	$\phi 1/16\text{in}$ 钢球	980.7	25~100HRB	软钢、退火钢、铜合金等
HRA	120° 金刚石圆锥体	588.4	60~85HRA	硬质合金、表面淬火钢等

洛氏硬度试验的优点是操作简便迅速，可直接从刻度盘上读出硬度值，由于压痕小，可测定成品及薄工件，并且测定的硬度值范围广。其缺点是由于压痕较小，当材料的内部组织不均匀时，硬度数据波动大，测量不够精确，故需在被测工件表面上的不同部位测试三点，取其算术平均值，作为所测洛氏硬度值。

(3) 维氏硬度 维氏硬度试验法采用了与布氏硬度试验法相同的原理，只是所用压头锥角不同而已，因此维氏硬度值也是用棱锥形压痕单位面积上所承受的平均压力来表示的，图 1.7 为维氏硬度试验原理图。维氏硬度是采用一个相对面夹角为 136° 的正四棱锥体的金刚石压头，用一定的试验力（可选定）压入试样的表面，保持一定时间后，卸除试验力，测量压痕对角线长度，计算出压痕表面积，试验力除以压痕表面积的商再乘以 0.102 即为维氏硬度值。用符号 HV 来表示。

在实际生产中，维氏硬度值一般不进行计算，只需测出对角

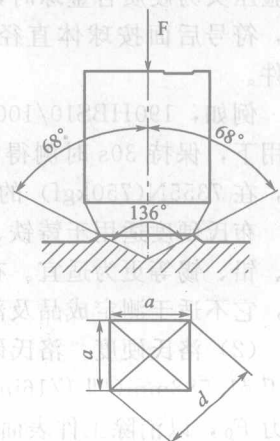


图 1.7 维氏硬度试验原理图

线的长度 d ，再通过查表求出相应的硬度值。维氏硬度可测定 5~1000HV 的硬度范围。

维氏硬度的表示方法规定为：HV 前面为硬度值，HV 后面的按“试验力/试验力保持时间（10~15s 不标注）”的顺序用数值表示试验条件。例如，600HV30/20 表示用 294.21N（30kgf）试验力保持 20s 测定的维氏硬度值为 600。

维氏硬度试验是一种较为精确的硬度试验方法，广泛用于研究工作。在热处理工件的质量检验中，主要利用其低载荷来测定不适于用布氏硬度和洛氏硬度来测定的薄工件和工件上薄的硬化层的硬度。这是维氏硬度应用方面的主要特点。

布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度之间没有直接换算公式，但可以通过查表进行换算，也可以通过近似关系来计算：布氏硬度在 200~400 时，1HRC=10HB；维氏硬度在 200~400 时，1HB=1HV、1HRC=10HV。

4. 韧性

韧性是指在冲击载荷作用下，材料在断裂前吸收能量和进行塑性变形的能力。材料的韧性通常随加载速度的提高、温度的降低、应力集中程度的加剧而减小。冲击韧性是衡量材料韧性的常用指标之一。目前，工程上常用夏比冲击试验（即一次摆锤冲击试验）来测定材料的冲击韧性。

冲击韧性是指冲击试样缺口底部单位横截面积上的冲击吸收功，用符号 α_k 表示，计算公式为：

$$\alpha_k = \frac{A_k}{S} \quad (1-7)$$

式中， α_k 为冲击韧性，J/cm²； A_k 为冲击吸收功，J； S 为试样缺口底部横截面积，cm²。

冲击韧性越大，表示材料的韧性越好。实践表明，冲击韧性值 α_k 对材料的内部结构、缺陷等具有较大的敏感性，在冲击试验中很容易揭示出材料中的某些物理现象，如晶粒粗化、冷脆、热脆和回火脆性等，故目前常用冲击试验来检验冶炼、热处理以及各种加工工艺的质量。此外，冲击试验过程迅速方便，所以在生产和科研中得到广泛应用。

应当指出，生产实际中，机械零件很少因一次大能量冲击而损坏，大多数是在小能量多次冲击作用下而破坏的，如凿岩机风镐上的活塞、冲模的冲头等。对于这类零件，应采用小能量多次冲击的抗力指标作为评定材料质量及选材的依据。

5. 疲劳强度

许多机械零件，如轴、齿轮、弹簧等，在工作过程中各点所受的应力往往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循环应力或交变应力。材料在这种应力作用下发生的断裂现象称为疲劳断裂。疲劳断裂可以在应力低于材料的屈服强度时发生，断裂前无明显的塑性变形及其他任何先兆，因此疲劳断裂的后果是十分严重的。

材料所受的交变应力与断裂循环次数之间的关系可以用图 1.8 所示的材料疲劳曲线（也称 $\sigma-N$ 曲线）描述。从 $\sigma-N$ 曲线可以看出，应力幅度 σ 愈小，循环周数 N 愈大。当应力低于某数值时，经无数次应力循环也不会发生疲劳断裂，此应力称为材料的疲劳极限，通常用 σ_r 表示（ r 是应力循环对称系数），单位为 MPa。如果采用对称的循环应力，材料的疲劳强度用 σ_{-1} 表示。

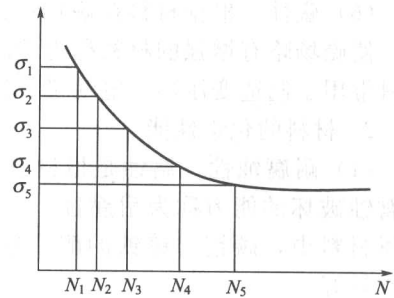


图 1.8 材料的疲劳曲线

由于疲劳试验时不可能进行无限循环周次，而且有些材料的疲劳曲线上没有水平部分，因此规定一个应力循环基数，对应的应力作为该材料的疲劳极限。一般钢铁的循环基数为 10⁷，

有色金属和某些超高强度钢的循环基数为 10^8 。

一般钢铁材料的 σ_{-1} 值约为其 σ_b 的一半，而非金属材料的疲劳极限一般远低于金属材料。

在机械零件的断裂中，80%以上都属于疲劳断裂。影响疲劳强度的因素很多，其中主要有应力循环特性、材料的本质、残余应力和表面质量等。在生产中常采用各种材料表面强化处理技术，使材料的表层获得有利于提高材料疲劳强度的残余压应力分布。这些表面强化技术包括喷丸、滚压、渗碳、渗氮和表面淬火等。此外，减小零件表面的粗糙度也可以显著地提高材料的疲劳极限。

二、材料的物理和化学性能

物理、化学性能虽然不是结构件设计的主要参数，但在某些特定情况下却是必须加以考虑的因素。

1. 材料的物理性能

(1) 密度 单位体积材料的质量称为材料的密度。对于运动构件，材料的密度越小，消耗的能量越少，效率越高。在航空航天领域，选用高比强度的材料就显得尤为重要。元素周期表中原子序数越小的元素，其密度越小。

(2) 熔点 熔点是指材料的熔化温度。一般来说，材料的熔点越高，材料在高温下保持高强度的能力越强。在设计高温条件下工作的构件时，需要考虑材料的熔点。金属中，汞的熔点为 -38.8°C ，而钨的熔点则高达 3410°C 。

(3) 热膨胀性 大部分固体材料在加热时都发生膨胀，材料的热膨胀性通常用线膨胀系数表示。它是指温度升高 1°C 时单位长度材料的伸长量。对于特别精密的仪器，应选择热膨胀系数低的材料，或在恒温条件下使用。在材料热加工过程中更要考虑其热膨胀行为，如果表面和内部热膨胀不一致，就会产生内应力，导致材料变形或开裂。常用金属的热膨胀系数为 $5 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

(4) 导热性 材料的导热性常用热导率表示。热导率是指在单位温度梯度下，单位时间内通过垂直于热流方向单位面积上的热流量，单位为 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。材料的导热性越差，在加热和冷却时表面和内部的温差越大，内应力越大，越容易发生变形和开裂。金属中，导热性最好的是银，铜和铝次之。

(5) 导电性 材料的导电性与材料的电阻密切相关，常用电阻率表示。金属通常具有较好的导电性，其中最好的是银，铜和铝次之。金属具有正的电阻温度系数，即随温度升高，电阻增大。含有杂质或受到冷变形会导致金属的电阻上升。

(6) 磁性 根据材料在磁场中的行为可将其分为三类：使磁场减弱的材料称为抗磁性材料；使磁场略有增强的材料称为顺磁性材料；使磁场强烈增强的材料称为铁磁性材料。铁磁性材料常用于制造变压器、电动机、仪器仪表等，抗磁性材料常用作磁屏蔽或防磁场干扰材料。

2. 材料的化学性能

(1) 耐腐蚀性 腐蚀是指材料在外部介质作用下发生逐渐破坏的现象。材料抵抗各种介质腐蚀破坏的能力称为耐腐蚀性。一般来说，非金属材料的耐腐蚀性要高于金属材料。在金属材料中，碳钢、铸铁的耐腐蚀性较差，而不锈钢、铝合金、铜合金、钛及其合金耐腐蚀性较好。

(2) 抗氧化性 材料抵抗高温氧化的能力称为抗氧化性。抗氧化的金属材料常在表面形成一层致密的保护性氧化膜，阻碍氧的进一步扩散，这类材料的氧化一般遵循抛物线规律，而形成多孔疏松或挥发性氧化物材料的氧化则遵循直线规律。

耐腐蚀性和抗氧化性统称为材料的化学稳定性。高温下的化学稳定性称为热化学稳定性。在高温下工作的设备或零部件，如锅炉、汽轮机和飞机发动机等应选择热化学稳定性高的材料。

三、材料的工艺性能

材料的工艺性能是指在经济条件下,完成各种加工的难易程度。也就是指材料是否易于加工成形的性能。因此选择材料时,不仅要考虑其使用性能,还要考虑其工艺性能。如果所选用的材料制备工艺复杂或难以加工,必然带来生产成本提高或材料无法使用的后果。

根据材料种类的不同,材料的加工工艺也大不相同。金属材料是机械工业中使用最多的材料,其工艺性能主要包括铸造性能、锻压性能、焊接性能、热处理性能及切削加工性能等。

1. 金属材料的工艺性能

(1) 铸造性能 铸造性能是金属在铸造成形过程中获得外形准确、内部健全的铸造能力。衡量金属材料铸造性能的指标有:流动性、收缩率和偏析倾向等。金属材料中,灰铸铁和青铜的铸造性能较好。

(2) 锻压性能 金属材料在压力加工(锻造、轧制)下成形的难易程度称为锻压性能。它与材料的塑性及塑性变形抗力有关。金属材料的塑性越好,变形抗力越小,其锻压性能就越好。例如,低碳钢的锻压性能比中、高碳钢好,而碳钢的锻压性能又比合金钢好。而铸铁是脆性材料,不能进行锻压加工。

(3) 焊接性能 焊接性能是指金属材料在限定的施工条件下焊接成按规定设计要求的构件,并满足预定服役要求的能力。也就是在一定的条件下,获得优良焊接接头的难易程度。一般低碳钢的焊接性能好于高碳钢。

(4) 热处理性能 热处理是改变材料性能的重要手段。在热处理过程中。材料的成分、组织、结构发生变化,从而引起了材料力学性能的变化。热处理性能是指金属材料热处理的难易程度和产生热处理缺陷的倾向,其衡量的指标或参数很多,如淬透性、淬硬性、耐回火性、氧化与脱碳倾向及热处理变形与开裂倾向等。

(5) 切削加工性能 金属材料接受切削加工的难易程度称为切削加工性能。当金属材料具有适当的硬度和足够的脆性时较易切削。切削性能好的材料切削时消耗的动力小,切屑易于排除,刀具寿命长,切削后表面光洁度好。需切削加工的材料,硬度要适中,太高则难以切削,且刀具寿命短;太软则切屑不易断,表面光洁度差。故通常要求材料的硬度为180~250HB。一般情况下,铸铁比钢的切削加工性能好,碳钢比高合金钢的切削加工性能好。

2. 高分子材料和陶瓷材料的加工性能

塑料工业包含树脂生产和塑料制品生产(即塑料成型加工)两个系统。塑料制品的加工方法有注射、挤出、压延等,也就是塑料通过加热、熔融、冷却的过程而成为制品。与其他材料相比,高聚物容易成形,其加工性能很好。

大多数陶瓷材料都采用粉末原料配制、室温预成型、高温常压或高压烧结制成。陶瓷材料硬度高,脆性大,不能进行机械切削加工。

第三节 金属的结构与结晶

不同的金属材料具有不同的力学性能,即使是同一种金属材料,在不同条件下其力学性能也是不一样的。金属材料这种性能上的差异,从本质上讲,是由其内部组织结构所决定的。因此掌握金属材料内部组织结构及对力学性能的影响,对于合理选用和加工金属材料,具有重要的意义。

一、金属的晶体结构

1. 晶体与非晶体

自然界中的固态物质,根据其内部原子排列的方式不同,可以分为晶体和非晶体两大类。