

普通高等工科教育机电类规划教材

机械工程学

丁树模 主编

第3版



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等工科教育机电类规划教材

机 械 工 程 学

第 3 版

主 编 丁树模

副主编 丁问司

主 审 彭炎荣



机 械 工 业 出 版 社

本书第3版是普通高等工科教育机电类规划教材。内容包括机械工程材料和金属热加工基础、机械传动、液压与气压传动、机械加工基础四部分。全书突出传动这一主线,着重基本原理的阐述,并加强了与电气控制联系较为密切的内容的介绍。书中多采用简明易懂的插图,如立体图、结构示意图等,并且各章均附有复习题,便于复习思考与练习。全书严格执行了新的国家标准,并加强了对科学技术新成果的介绍。本书主要用做应用型本科、高职高专电气类专业教材,各大专院校相关专业亦可选用。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程学/丁树模主编. —3版. —北京:机械工业出版社,
2003.1
普通高等工科教育机电类规划教材
ISBN 7-111-05148-3
I. 机… II. 丁… III. 机械工程-高等学校:技术学校-教材
IV. TH

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第004869号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:韩雪清 版式设计:张世琴 责任校对:姚培新
王玉鑫

封面设计:张静 责任印制:闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003年7月第3版·第2次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·19印张·470千字

定价:25.00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)68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是普通高等工科教育机电类规划教材,第1、2版的出版时间分别是1984年11月和1996年10月,现为第3版。

本书作为应用型本科、高职高专电气工程类专业的技术基础课教材,其内容包括以下四个部分:机械工程材料与金属热加工基础、机械传动、液压与气压传动、机械加工基础。对于“机械工程学”这一门综合性课程来说,还应包括机械制图、工程力学等更为宽广的内容,但鉴于该两门课程另有教材,本书就不再将此编入。

通过本书在教学中的使用,学生可达到如下要求:①了解机械工程材料及金属热加工基本知识;②了解机械传动中各种常用机械和通用零部件的基本结构原理、特点和应用;③初步掌握液压传动与气压传动中常用元件及典型回路的工作原理、特点和应用,并初步具备阅读一般液压与气动系统图的能力;④了解一般金属切削加工(车、铣、钻、刨、磨)的工艺特点,熟悉几种典型通用机床的用途、组成、运动和传动系统,了解机床与电气控制有关的典型操纵机构工作原理,并初步具备阅读一般机床传动系统图的能力;⑤了解数控机床的组成、类型、工作特点及应用与发展概况;⑥了解特种加工技术基本原理及其适用范围。

本书着重电气类专业所需要的机械工程基础知识,并加强了与电气控制联系较为密切的内容的介绍;书中多采用简明易懂的插图,如立体图、结构示意图等,便于学生对教材内容的理解;各章均附有复习题,便于复习思考和练习;全书严格执行了新的国家标准。本书除具有上述特色外,还在较大程度上介绍与反映了现代科学技术的新成果。

本书除可作为应用型本科、高职高专工业电气自动化、电子技术、计算机应用等专业的教材外,还适用于电类其他相关专业,工厂电气技术人员亦可参阅。

本书第1版的编写人员是王旭东、丁树模、赵春久。第2版的编写人员是陈文军、丁树模、赵春久。这次修订工作由丁树模(第一、二章、第十四~十八章及附录)、丁问司(第三~九章、第十三章)、张红(第十~十二章)、黄麓升(第十九~二十一章)完成,丁树模为主编,丁问司为副主编,彭炎荣教授担任主审。

由于编者水平所限,书中难免存在不少缺点和错误,敬希广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪言 1

第一篇 机械工程材料与金属热加工基础

第一章 机械工程材料 2	第二章 铸造、锻压与焊接 21
第一节 金属材料的主要性能 2	第一节 铸造生产 21
第二节 常用金属材料 6	第二节 锻压生产 28
第三节 钢的热处理 10	第三节 焊接生产 39
第四节 非金属工程材料 18	复习题 48
复习题 20	

第二篇 机械传动

第三章 常用机构 50	复习题 85
第一节 基本概念 50	第五章 轮系 87
第二节 平面连杆机构 52	第一节 轮系的功用和分类 87
第三节 凸轮机构 59	第二节 定轴轮系速比的计算 87
第四节 螺旋机构 64	第三节 周转轮系速比的计算 89
第五节 间歇运动机构 67	复习题 93
复习题 69	第六章 轴、轴承、联轴器、离合器、 制动器 95
第四章 常用机械传动装置 71	第一节 轴 95
第一节 带传动 71	第二节 轴承 97
第二节 链传动 74	第三节 联轴器、离合器、制动器 104
第三节 齿轮传动 75	复习题 109
第四节 蜗杆传动 84	

第三篇 液压与气压传动

第七章 液压传动概述 111	第二节 液压马达 123
第一节 液压传动的原理和组成 111	第三节 液压缸 124
第二节 液压传动的优缺点 113	复习题 127
第三节 液压传动的两个基本参数—— 压力、流量 114	第九章 液压控制阀 129
第四节 液压油的选用 116	第一节 方向阀 129
复习题 117	第二节 压力阀 135
第八章 液压泵、液压马达和 液压缸 118	第三节 流量阀 140
第一节 液压泵 118	第四节 比例阀、插装阀和数字阀 142
	第五节 液压伺服阀和电液伺服阀 145
	复习题 149

第十章 液压辅件	150
第一节 过滤器	150
第二节 蓄能器	151
第三节 压力计和压力计开关	152
第四节 油管和管接头	152
第五节 阀类连接块	153
第六节 油箱	154
复习题	155
第十一章 液压基本回路	156
第一节 压力控制回路	156
第二节 速度控制回路	158
第三节 多缸动作回路	163
复习题	165

第十二章 典型液压系统	168
第一节 组合机床动力滑台液压系统	168
第二节 数控车床液压系统	170
第三节 外圆磨床液压系统	172
第四节 液压机液压系统	177
复习题	180
第十三章 气压传动	181
第一节 气压传动的工作原理、组成及优缺点	181
第二节 气动元件	182
第三节 气动基本回路及系统实例	192
复习题	198

第四篇 机械加工基础

第十四章 金属切削加工概述	199
第一节 切削运动和切削用量	199
第二节 金属切削刀具	201
第三节 切削力、切削热和切削液	206
第四节 机床的分类与型号	207
第五节 机床传动系统的基本概念	211
复习题	213
第十五章 车床及车削加工	214
第一节 车床的加工范围和车削加工特点	214
第二节 CA6140 型卧式车床	217
第三节 其他车床	226
复习题	229
第十六章 铣床及铣削加工	230
第一节 铣床的加工范围和铣削加工特点	230
第二节 X6132 型万能升降台铣床	232
第三节 其他铣床	238
复习题	239
第十七章 钻床、镗床、刨床及其加工	240
第一节 钻床及钻削加工	240
第二节 镗床及镗削加工	242
第三节 刨床及刨削加工	245
复习题	248
第十八章 磨床及磨削加工	249
第一节 磨床的加工范围和磨削	

加工特点	249
第二节 常用磨床	250
复习题	253
第十九章 组合机床	254
第一节 组合机床概述	254
第二节 组合机床的几种通用部件	257
第三节 组合机床自动线	262
复习题	263
第二十章 数控机床	264
第一节 数控机床的组成和工作过程	264
第二节 数控机床的特点	265
第三节 数控机床的类型	266
第四节 数控机床的发展概况	270
复习题	272
第二十一章 特种加工	273
第一节 概述	273
第二节 电火花加工	274
第三节 电解加工	277
第四节 超声波加工	278
第五节 激光加工	279
复习题	280
附录	281
附表 A 机构运动简图符号 (摘自 GB4460—84)	281
附表 B 常用液压与气动元件图形符号 (摘自 GB786.1—1993)	291
参考文献	298

绪 言

一、机械的作用及机械工业在国民经济中的地位

机械是一种人为的执行机械运动的实物装置,是人类从事物质生产的重要手段。人类很早就利用斜面、杠杆、滑动与滚动等原理制造了机械,促进了社会生产力的提高。同时,机械自身也不断得到发展。当今,由于利用了电气、电子、核能、激光、计算技术等,使机械得到了飞速的发展。机械广泛地应用于工农业生产、科学研究、文化教育、医疗卫生、国防建设和人们的日常生活中,并越来越多地进入人类社会的各个领域。机械不仅可以减轻人的劳动强度,提高生产率,还能完成用人力无法达到的生产要求。机械已成为社会生产力飞速发展的一个重要因素。

各种机械都是机械工业部门生产的,机械工业是重要的基础工业,是国民经济发展的主要支柱工业和先导部门。没有机械工业提供质量优良、技术先进的技术装备,信息技术、新材料技术、海洋工程技术、生物工程技术以及空间技术等新技术的发展就会受到制约。所以,一个国家机械工业发展的水平,在很大程度上标志着这个国家工业生产能力和科学技术发展的水平。显然,机械工业在国民经济现代化建设中占有十分重要的地位。

二、本课程的内容、教学目的和学习方法

“机械工程学”作为电类专业的一门技术基础课,其内容涉及机械学科的范围比较宽阔,主要是传授四方面的基础知识:一是机械工程材料与金属热加工基础,概括介绍机电工业产品所常用的原材料及金属铸造、锻压、焊接等生产知识;二是机械传动基础,简要介绍常用传动机构及通用零部件的一般知识;三是液压与气压传动基础,主要介绍液压与气动元件及常用回路的工作原理和应用实例;四是机械加工基础,概括介绍金属切削加工、特种加工及常用加工设备。

随着现代科学技术的发展,特别是微电子技术、计算机技术、信息技术的飞速发展,工业产品和生产加工方式正在日新月异地走向技术密集型,生产企业迫切需要大量既懂“机”又懂“电”的复合型技术人才。为此,工科院校对电专业的学生必须加强机械知识教育,以便他们在走上工作岗位后,能更好地完成各自的任务。本课程教学的主要目的就在于此。希望学生通过本课程的学习能尽多地获得有益的机械工程基础知识,并通过必要的实践教学训练,培养一定的技术应用能力。

本课程的内容涉及知识面较广,实践性较强。为了保证教学的顺利进行,在学习本课程前,学生应先通过金工教学实习,获得一定的感性知识。在教学过程中,应加强实践性教学环节,以便完好地达到学习课程的目的。

第一篇 机械工程材料与金属 热加工基础

对于机电工业产品的生产制造，机械工程技术需要解决的主要问题是选用什么材料和用什么方法进行制造。本篇将从生产技术工作的需要出发，对常用的机械工程材料和金属热加工知识作一基本介绍。

第一章 机械工程材料

用以制造各种机械零件的材料统称为机械工程材料。一般将其分为两大类：金属材料和非金属材料。在机械工业生产中，普遍使用钢铁、铜、铝等金属材料；此外，工程塑料、橡胶、陶瓷等非金属材料的应用也日趋广泛，并展示出良好的发展前景。

第一节 金属材料的主要性能

在生产实际中，不同的材料有不同的性能和用途。同一种金属材料通过不同的热处理方法，也可以得到不同的性能。因此，在选择机械零件的材料时，熟悉材料的性能是十分必要的。金属材料的性能包括力学性能、物理性能、化学性能和工艺性能。一般机械零件常以力学性能作为设计和选材的依据。

一、金属材料的力学性能

金属材料的力学性能是指金属材料在外加载荷（外力）作用下表现出来的特性。载荷按其作用形式的不同，分为静载荷、冲击载荷和交变载荷等。因此，金属材料表现出的抵抗外力能力的特性也各不相同。通常所研究的力学性能主要是指强度、塑性、硬度、冲击韧度和疲劳强度等。

1. 强度

强度是指材料在外力作用下抵抗破坏的能力。抵抗破坏的能力越大，则强度越高。根据受力状况的不同，材料的强度可分为抗拉、抗压、抗弯、抗扭和抗剪强度等。一般以抗拉强度作为最基本的强度指标。

为了测定金属材料的强度，现广泛地采用拉伸试验。拉伸试验是将按国家标准规定的形状和尺寸制作的被测金属试棒（如图 1-1a 所示）装卡在材料试验机上，对其两端施加轴向静拉力。试

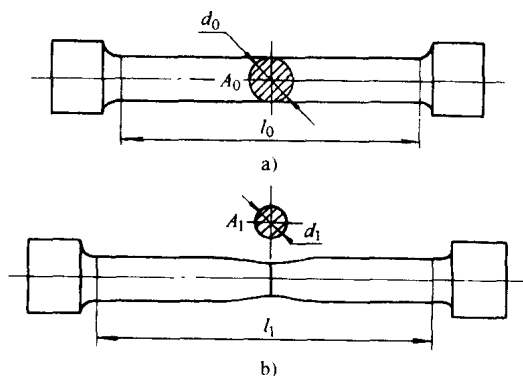


图 1-1 拉伸试棒

a) 标准试棒 b) 拉断后的试棒

棒受力后开始变形,并随着外加载荷的增加,其变形量也增大,直至把试棒拉断。在试验过程中,试验机自动记录每一瞬间施加在试棒上的载荷 F 和试棒发生相应的伸长变形量 Δl ,并绘制出它们之间的关系曲线——拉伸曲线。

图 1-2 为低碳钢拉伸曲线。曲线说明:当载荷 F 小于 F_e 时,变形与载荷成正比线性关系。此时,若去除载荷,变形将立即完全消失,试棒恢复原长度,这是一种暂时变形,称为弹性变形。弹性变形反映了材料弹性的大小。通过热处理或加工硬化方法均可提高金属材料的弹性。当载荷大于 F_e 后,变形与载荷不再保持正比线性关系。此时,试棒除发生弹性变形外,还发生部分不能消失的永久变形,称为塑性变形。若去除载荷,试棒不再恢复其原来长度。当载荷继续增加到 F_s 时,拉伸曲线开始出现水平线段,它表示载荷虽未增加,但试棒仍在继续伸长,此现象称为“屈服”。引起试棒产生屈服的最小载荷 F_s 称为屈服载荷。试棒屈服以后,随着载荷的增大,塑性变形急剧增加。当载荷增大到最大值 F_b 后,试棒的某一部分急剧变细,此现象称为“缩颈”。由于缩颈处横截面积的缩小,继续变形所需的载荷减小,但变形仍继续增加,试棒很快就被拉断,如图 1-1b 所示。

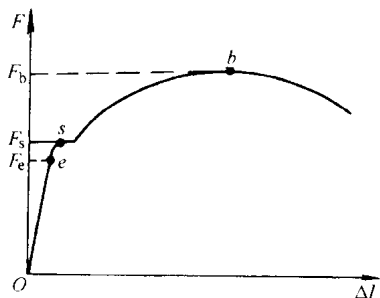


图 1-2 低碳钢拉伸曲线

应当强调,屈服标志着金属材料在外力作用下发生明显的塑性永久变形, F_s 是材料出现明显塑性变形前所承受的最大载荷;缩颈的出现,预示着金属材料将要发生断裂, F_b 是材料在断裂前所承受的最大载荷。

利用拉伸曲线可以求得金属材料的强度指标。为了对不同材料的强度进行比较,强度指标以应力表示。当材料受载荷作用而不破坏时,其内部相应产生与载荷相平衡的抵抗力,称为内力,其数值大小与载荷大小相等。单位截面积上所承受的内力称为应力,即

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

式中 σ ——应力 (N/mm^2 或 MPa);

F ——载荷 (N);

A ——试棒的横截面积 (mm^2)。

拉伸曲线对应于 F_s 、 F_b 的应力分别称为材料的屈服点和抗拉强度,它们是金属材料的主要强度指标。

(1) 屈服点 屈服点是指金属材料开始产生屈服时的应力,即拉伸曲线中 s 点的应力,表示为

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_0} \quad (1-2)$$

式中 σ_s ——屈服点 (N/mm^2 或 MPa);

F_s ——屈服载荷 (N);

A_0 ——试棒原始截面积 (mm^2)。

有些金属材料,如铸铁、高碳钢等,在拉伸曲线中没有明显的水平线段,它们的屈服点很难测定。通常规定,以试棒原始标距长度 (l_0) 部分产生 0.2% 塑性变形时的应力值作为条件屈服点,称为屈服强度,以 $\sigma_{0.2}$ 表示。

(2) 抗拉强度 抗拉强度是指金属材料在断裂前所能承受的最大拉应力，即拉伸曲线中 b 点的应力，表示为

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_0} \quad (1-3)$$

式中 σ_b —— 抗拉强度 (N/mm² 或 MPa)；

F_b —— 试棒能承受的最大载荷 (N)；

A_0 —— 试棒原始截面积 (mm²)。

屈服点和抗拉强度是设计机械、选用材料的重要依据。因为机械零件不能在超过其材料 σ_s 的条件下工作，否则会引起零件的永久变形；机械零件更不能在超过其材料 σ_b 的条件下工作，否则将导致零件的断裂破坏。

2. 塑性

塑性是材料在外力作用下产生塑性变形而不断裂的能力。常用的塑性指标有伸长率和断面收缩率，分别以 δ 和 ψ 表示，计算公式如下 (参阅图 1-1)

$$\delta = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \times 100\% \quad (1-4)$$

$$\psi = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中 δ 、 ψ —— 分别为伸长率和断面收缩率 (%)；

l_0 、 l_1 —— 分别为试棒的原始标距长度和断后标距长度 (mm)；

A_0 、 A_1 —— 分别为试棒的原始截面积和断后截面积 (mm²)。

δ 或 ψ 愈大，表示材料的塑性愈好。良好的塑性是金属材料进行压力加工的必要条件，机器零件也须具备一定的塑性。

3. 硬度

硬度是指金属材料抵抗更硬物体压入的能力，它是衡量材料软硬的一个指标。材料的硬度高，其耐磨性就好。

根据测定硬度方法的不同，有布氏硬度、洛氏硬度、维氏硬度等多种硬度指标，工业生产中常用的是布氏硬度和洛氏硬度。

(1) 布氏硬度 布氏硬度的测试原理如图 1-3 所示。它是以直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球作为压头，用规定的载荷 F 将压头垂直压入被测材料表面，经规定的保持载荷时间后卸除载荷，在被测材料表面留下了直径为 d 的压痕，用读数放大镜测量出压痕直径数值，并用此值查表，即可得布氏硬度值。材料越软，压痕直径越大，则布氏硬度值越低。

布氏硬度指标用符号 HB 表示。当用淬火钢球为压头时，写成 HBS，适用于测量布氏硬度值在 450 以下的金属材料；当用硬质合金球为压头时，写成 HBW，适用于测量布氏硬度值在 450

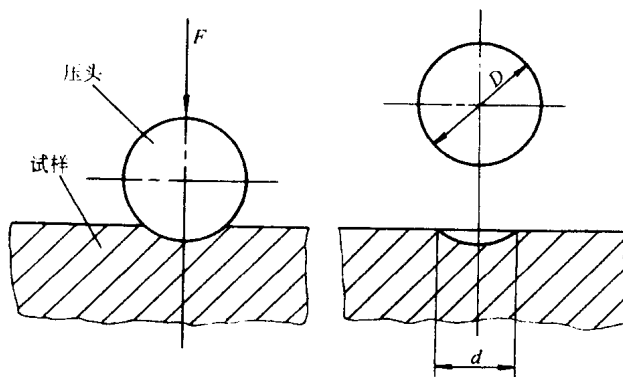


图 1-3 布氏硬度的测试原理

以上的金属材料。硬度数值均标写在布氏硬度符号之前，例如 230HBS、500HBW。

(2) 洛氏硬度 洛氏硬度的测试也是用规定的载荷将压头垂直压入被测材料的表面，但它是以压痕深度来确定硬度值的。洛氏硬度值可从洛氏硬度计刻度盘上直接读出。洛氏硬度用符号 HR 表示。为了扩大硬度的测定范围，在洛氏硬度计上，可变换不同类型的压头（金刚石圆锥压头或淬火钢球压头），并按规定施加不同的载荷，从而出现三种洛氏硬度符号：HRA、HRB 和 HRC。其中，HRA 用于表示特硬材料（如硬质合金、渗碳钢件等），HRB 用于表示较软材料（如供应状态的钢材、铜合金、铝合金等），HRC 用于表示较硬材料（如一般淬火钢件）。

与布氏硬度相比，洛氏硬度测定范围较宽，测试操作简便，且由于压痕较小，几乎不损伤工件表面，故应用普遍，但硬度测定的准确性较差。布氏硬度与洛氏硬度的近似数值关系为

$$1\text{HRC} \approx 1/10\text{HBS} \quad (1-6)$$

4. 冲击韧度

以上讨论的是静载荷下的力学性能指标，但机器中有很多零件要承受冲击载荷，我们不能用金属材料在静载荷下的性能，来衡量材料抵抗冲击的能力。冲击载荷比静载荷的破坏力要大得多。在冲击载荷作用下，金属材料抵抗破坏的能力称为冲击韧度，其值以 a_K 来表征。 a_K 值越大，材料的韧性就越好，在受到冲击时越不容易断裂。

当用冲击试验方法测定冲击韧度时， a_K 值就等于冲断试样单位截面积所消耗的冲击吸收功的大小，数值可从冲击试验机的刻度盘上直接读出。

5. 疲劳强度

许多机器零件，如轴、齿轮、连杆、弹簧等，在工作中承受的载荷不是静止不变的，而是反复改变大小或同时改变大小和方向的交变载荷。在这种交变载荷作用下，虽然零件所受的应力比材料的抗拉强度小，甚至还低于屈服点，但经过长期使用，零件往往会突然断裂，这种现象称为疲劳破坏。

疲劳破坏的原因，一般认为是由于材料表面有划痕，或内部有夹杂物等缺陷，在交变应力的反复作用下，使材料产生了微裂纹。这种微裂纹随应力循环次数的增加而逐渐扩展，致使零件不能承受所加载荷而突然断裂。

金属材料在无限次交变应力作用下而不破坏的最大应力称为疲劳强度。当应力呈对称循环时，疲劳强度以符号 σ_{-1} 表示。实际上，无限次交变载荷的试验是永远都不能完成的，所以工程上规定，钢在经受 10^7 次、有色金属在经受 10^8 次交变应力作用下不发生破坏时的应力作为材料的疲劳强度。

二、金属材料的物理性能、化学性能和工艺性能

1. 物理性能

金属材料的主要物理性能包括密度、熔点、膨胀系数、导电性和导热性等。由于机械零件的用途不同，对其物理性能方面的要求也不尽相同。例如飞机零件要用密度小的铝合金制造，而电线、电缆的材料应具备良好的导电性等。

金属材料的某些物理性能对热加工工艺也有一定的影响。例如高速钢的导热性差，在锻造时应以较低的速度进行加热，以保证工件均匀受热，否则会产生裂纹；又如铸钢和铸铁的熔点不同，在铸造时选择的浇注温度也不相同等。

2. 化学性能

化学性能是金属材料在常温或高温时抵抗各种化学作用的能力。金属材料的主要化学性能是耐腐蚀性。为了制造能在具有腐蚀性介质中工作的设备，应采用耐腐蚀性好的材料。例如化工设备、医疗器械等，可采用具有抵抗空气、水、酸、碱类溶液或其他介质腐蚀能力的不锈钢制作。

3. 工艺性能

金属材料的工艺性能是指材料加工成形的难易程度。金属材料加工成为零件，常用的四种基本加工方法是：铸造、锻压、焊接和切削加工（通常称前三种加工方法为热加工，而称切削加工为冷加工）。各种加工方法对材料都有不同的工艺性能要求，将在以后有关章节中具体介绍。

第二节 常用金属材料

一、钢

生产中应用的钢种类繁多，分类方法也不尽相同。按碳的含量分，有低碳钢（ $w_c < 0.25\%$ ）、中碳钢（ $w_c = 0.25\% \sim 0.6\%$ ）和高碳钢（ $w_c > 0.6\%$ ）；按化学成分分，有碳素钢和合金钢；按质量分，有普通钢、优质钢和高级优质钢；按用途分，有结构钢、工具钢和特殊性能钢等。

（一）结构钢

结构钢是制造一般机械零件和工程结构件所用的钢。

1. 碳素结构钢

碳素结构钢中的碳的质量分数在 $0.06\% \sim 0.38\%$ 之间，硫磷含量较高，一般在供应状态下使用，不需进行热处理。这类钢的塑性、韧性好，适于制作钢筋、钢板等建筑用材和一般机械构件。

碳素结构钢的牌号由字母 Q、数字、质量等级符号、脱氧方法符号等四部分顺序组成，如 Q235-A·F，各项的具体含义是：

Q——钢材屈服点“屈”字汉语拼音首位字母；

数字——屈服点 σ_s 的数值，单位为 MPa；

质量等级符号——用 A、B、C、D 表示四个等级，其中 A 级质量最差，D 级质量最好；

脱氧方法符号——用 F、b、Z、TZ 表示，F 为沸腾钢，是不脱氧钢；b 为半镇静钢，是半脱氧钢；Z 和 TZ 分别为镇静钢和特殊镇静钢，是完全脱氧钢（Z、TZ 通常省略不写）。

2. 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢是按力学性能和化学成分供应的。钢中的硫、磷等有害杂质含量较少，常用于制造比较重要的机械零件，一般要进行热处理。牌号由两位数字组成，表示钢中碳的质量分数的平均万分数，如 45 钢表示 $w_c = 0.45\%$ 。含锰量较高的优质碳素结构钢在牌号后面附以锰元素符号 Mn，例如 15Mn、20Mn 等。

$w_c < 0.25\%$ 的优质碳素结构钢，其塑性、韧性很好，焊接性能优良，易于冲压加工，但强度较低，主要用于制造各种冲压件和焊接件。

$w_C = 0.3\% \sim 0.5\%$ 的优质碳素结构钢，其强度较高，塑性、韧性稍低。要求表面有高的硬度和耐磨性时，要进行表面热处理。它主要用于制造齿轮、轴类零件及重要的销子、螺栓等。

$w_C > 0.55\%$ 的优势碳素结构钢，有高的强度和良好的弹性，主要用来制造弹簧和耐磨损的零件。

3. 合金结构钢

在碳素结构钢的基础上加入一定量的合金元素，如硅、锰、铬、镍、钼、钒等，即构成合金结构钢。钢中加入适量的合金元素，改善了热处理性能，提高了强度和韧性。合金结构钢常用于制造各种重要的机械零件和工程结构件。例如，40Cr 常用作传动轴的材料。

合金结构钢的牌号用“数字+元素符号+数字”表示。前面的数字表示碳的平均万分含量；元素符号表示所含合金元素的名称；后面的数字表示合金元素的平均百分含量（元素的质量分数小于 1.5% 时不用数字表示）。例如 60Si2Mn 表示硅锰合金结构钢，其 $w_C = 0.6\%$ ， $w_{Si} = 2\%$ ， $w_{Mn} < 1.5\%$ 。

滚动轴承钢是制造滚动轴承的专用合金结构钢，其牌号如 GCr15，前面的“G”（“滚”字汉语拼音首字）代表钢的种类，后面的数字表示合金元素的平均千分含量，即 $w_{Cr} = 1.5\%$ 。

（二）工具钢

工具钢是用来制造各种刀具、量具和模具的材料。它应满足工具在硬度、耐磨性、强度和韧性等方面的要求。例如，在金属切削过程中，随温度的升高，机床刀具不仅要求在常温时具有高的硬度，而且要求在高温时仍保持切削所需硬度的性能，即热硬性。

1. 碳素工具钢

碳素工具钢是 $w_C = 0.7\% \sim 1.3\%$ 的高碳钢。牌号用“T”表示钢的种类，后面的数字表示碳的质量分数的平均千分数。常用的碳素工具钢有 T8、T10、T10A、T12A（A 表示高级优质）等。由于碳素工具钢的热硬性较差，热处理变形较大，故仅适用于制造不太精密的模具、木工工具和金属切削的低速手用刀具（锉刀、锯条、手用丝锥）等。

2. 合金工具钢

合金工具钢是在碳素工具钢的基础上加入少量合金元素（Si、Mn、Cr、W、V 等）制成的。合金元素的加入，提高了材料的热硬性，改善了热处理性能。合金工具钢常用来制造各种量具、模具或切削刀具等。

合金工具钢的牌号表示与合金结构钢相似，区别在于：牌号前面只用一位数字表示碳的质量分数的平均千分数；钢中 w_C 大于或等于 1% 时不予标出。例如，9CrSi 的 $w_C = 0.9\%$ ，而 Cr12 的 $w_C > 1\%$ ，故未予标出。

机床切削加工的刀具常用高速钢制造。高速钢是一种含钨、铬、钒等合金元素较多的合金工具钢。它有很高的热硬性，当切削温度高达 550°C 左右时，硬度仍无明显下降。高速钢具有足够的强度和韧性，可以承受较大的冲击和振动。此外，高速钢还具有良好的热处理性能和刃磨性能。常用的高速钢牌号有 W18Cr4V 和 W6Mo5Cr4V2 等。

（三）特殊性能钢

特殊性能钢是一种含有较多合金元素，并具有某些特殊物理性能和化学性能的钢。常用的有不锈钢、耐热钢及软磁钢等。

不锈钢中主要的合金元素是铬和镍，具有良好的耐蚀不锈钢性能，适用于制造化工设备、医

疗器械等。常用的不锈钢有 1Cr13、2Cr13、1Cr18Ni9Ti、1Cr18Ni9 等。

耐热钢是在高温下不发生氧化并具有较高强度的钢，适用于制造在高温条件下工作的零件，如内燃机气阀等。常用的耐热钢有 4Cr10Si2Mo、4Cr14Ni14W2Mo 等。

软磁钢又名硅钢片，它是在钢中加入硅并轧制而成的薄片状材料。硅钢片中含有一定数量的硅（目前采用的硅钢片， $w_{Si}=1\%\sim 4.5\%$ ），碳、硫、磷、氧、氮等杂质的含量极少，具有很好的磁性。硅钢片是制造变压器、电机、电工仪表等不可缺少的材料。

（四）铸钢

铸钢的种类很多，按照化学成分，可分为三类：铸造碳钢、铸造低合金结构钢和铸造高合金钢。其中，以铸造碳钢应用最广，约占铸钢总产量的 80% 以上。在生产中，铸钢是制作形状复杂零件的重要材料。

铸造碳钢的牌号以“铸钢”二字的汉语拼音字首“ZG”与其后的两组数字构成，第一组数字表示该牌号铸钢的屈服点，第二组数字表示抗拉强度。例如 ZG200-400，即表示 $\sigma_s=200\text{MPa}$ ， $\sigma_b=400\text{MPa}$ 的铸造碳钢。

二、铸铁

铸铁是 $w_c > 2.11\%$ 的铁碳合金，工业上使用的铸铁一般 $w_c = 2.5\%\sim 4.0\%$ 。根据碳在铸铁中存在形式的不同，常用铸铁有白口铸铁、灰铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁等。

1. 白口铸铁

白口铸铁中的碳以 Fe_3C 的形式存在，断面呈白色，故称白口铸铁。其性能硬而脆，不能进行切削加工，一般不用来制造机械零件，主要用作炼钢的原料。

2. 灰铸铁

灰铸铁中的碳主要以片状石墨的形式存在，断面呈灰色，故称灰铸铁。灰铸铁软而脆，铸造性能好，并具有良好的耐磨性、耐热性、减震性和切削加工性。因而工业上常用来制造各种机床床身、罩盖、支架、底座、带轮、齿轮和箱体等，是目前应用最多的一种铸铁。灰铸铁的牌号由“HT”及表示最低抗拉强度的数字组成。例如，HT200 即表示最低抗拉强度为 200MPa 的灰铸铁。

3. 可锻铸铁

可锻铸铁俗称玛钢或马铁，其中的碳大部或全部以团絮状石墨的形式存在。因此，材料的力学性能得到了改善，其强度、韧性都比灰铸铁高。可锻铸铁并不能锻造，常用于铸造承受冲击振动的薄壁零件，如汽车、拖拉机的后桥外壳、低压阀门、机床附件及农具等。

按照金相组织的不同，可锻铸铁分为黑心可锻铸铁、珠光体可锻铸铁和白心可锻铸铁等几种，白心可锻铸铁由于性能较差，目前在生产中应用较少。可锻铸铁的牌号由三个汉语拼音字母及两组数字构成，如 KTH350-10、KTZ550-04，汉语拼音字母表示黑心可锻铸铁和珠光体可锻铸铁，前一组数字表示其最低抗拉强度（单位为 MPa），后一组数字表示其最低伸长率（百分数）。

4. 球墨铸铁

在高温液态铸铁中加入球化剂（如纯镁或稀土镁合金）进行球化处理，使铸铁中的碳大部或全部以球状石墨的形式存在，便制成了球墨铸铁。球墨铸铁具有良好的力学性能，有些性能指标接近于钢，抗拉强度甚至高于碳钢，塑性、韧性和耐磨性等都比灰铸铁好，因此广泛用于机械制造、交通、冶金等工业部门。目前常用来制造气缸套、活塞、曲轴和机架等机

械零件。

球墨铸铁的牌号由“QT”及两组数字构成，这两组数字分别表示最低抗拉强度和最低伸长率，例如 QT600-3，其最低抗拉强度为 600MPa，最低伸长率为 3%。

三、有色金属

通常将钢铁材料称为黑色金属，而其他金属材料则称为有色金属。有色金属具有不同于钢铁的特性，如铝、镁、钛及其合金密度小，铜、铝及其合金导电性好，镍、钼及其合金能耐高温等。因此，在机械制造、电器制造、航空及国防等工业部门，除大量使用黑色金属外，有色金属也得到广泛的应用。

下面仅简单介绍工业常用的铝和铝合金、铜和铜合金。

1. 铝和铝合金

纯铝的显著优点是密度小（约为铁的 1/3），导电性能好（稍次于铜），塑性好，在空气中有良好的抗蚀性，但强度、硬度低。纯铝主要用作导电材料或制造耐蚀零件，一般不作结构材料。纯铝按其杂质含量编制代号，有 L1、L2、L3、L4、L5 等。编号越大，纯度越低。

工业上广泛使用铝合金。在铝中加入适量的硅、铜、镁、锰等合金元素，可提高其力学性能。根据合金成分和工艺特点的不同，铝合金可分为形变铝合金和铸造铝合金两大类。形变铝合金又分为防锈铝合金（代号为 LF）、硬铝合金（代号为 LY）、超硬铝合金（代号为 LC）和锻铝合金（代号为 LD）等。形变铝合金主要用作各类型材和结构件，如各式容器、发动机机架、飞机的大梁等。铸造铝合金又分为铝硅合金、铝铜合金、铝镁合金、铝锌合金及铝和若干其他金属元素的合金等。各类铸造铝合金的代号均以“ZL”加顺序号表示。铸造铝合金主要用于各种轻型铸件，如活塞、气缸体、泵壳、支架等。

2. 铜和铜合金

纯铜又称紫铜，因它是用电解法制得的，故又名电解铜。纯铜具有很高的导电性、导热性和耐蚀性，并具有良好的塑性，但其强度较低，主要用于各种导电材料和配制铜合金。工业纯铜的代号有 T1、T2、T3 等，编号越大，纯度越低。

机械制造生产中广泛使用铜合金。按合金成分的不同，铜合金可分为黄铜、白铜和青铜三大类。黄铜是铜和锌为主的合金（代号为 H）主要用于制造散热器、弹簧、垫片、衬套及耐蚀零件等。白铜是铜和镍为主的合金（代号为 B），它具有优良的塑性、耐蚀性、耐热性和特殊的电性能，是制造精密机械零件和电器元件不可缺少的材料。青铜是指除黄铜和白铜以外的铜合金（代号为 Q），如铜和锡的合金称为锡青铜，铜和铝的合金称为铝青铜，此外还有铍青铜、钛青铜、硅青铜、锰青铜等。青铜主要用于制造轴瓦、蜗轮及耐磨、耐蚀零件等。

四、硬质合金

硬质合金是以难熔的金属碳化物粉末（碳化钨、碳化钛、碳化钽等）为基体，以铁族元素（铁、钴、镍等）为粘结剂加压成型并经高温烧结而成的一种合金材料。在机械制造生产中，硬质合金主要用作金属切削刀具的材料。其硬度为 89~93HRA（相当于 74~81HRC），它有很高的热硬性（可耐 800~1000℃ 高温），因而可使切削速度大大提高。使用硬质合金刀具可以提高工作效率和加工质量，为高速切削创造了条件。常用硬质合金有以下三类：

（1）YG（钨钴）类 由碳化钨和钴组成。常用的牌号有 YG3、YG6、YG8。数字表示钴的百分含量，如 YG3 含钴 3%。YG 类硬质合金刀具适宜加工铸铁工件。含钴量越高，强度、韧性也越好，而耐磨性和硬度降低。YG3 适用于精加工，YG8 适用于粗加工，YG6 适用于半

精加工。

(2) YT (钨钴钛) 类 由碳化钨、碳化钛和钴组成。常用牌号为 YT5、YT15、YT30, 数字表示碳化钛的百分含量, 如 YT15 含碳化钛为 15%。由于碳化钛比碳化钨熔点更高, 故其热硬性比 YG 类好, 但强度比 YG 类差。YT 类硬质合金刀具适宜于加工钢件。YT5 适于粗加工, YT30 适于精加工, YT15 适于半精加工。

(3) YW (钨钴钛钽) 类 它是在 YT 类合金中加入部分碳化钽而制成的。碳化钽的加入, 改善了合金的切削性能, 可用以制作耐热钢、高锰钢及高合金钢等难加工材料的刀具。它既可加工铸铁, 又可加工钢, 故有通用合金或万能合金之称。常用牌号为 YW1 和 YW2。

目前, 工业生产中还出现一些新品种硬质合金, 例如, 钢结硬质合金就是一种很有特色的新型材料 (分类代号为 YE)。它具有与钢一样的切削加工性, 也可以接受锻造、热处理和焊接。经热处理后, 其硬度可达 70HRC, 具有高耐磨性、抗氧化和耐腐蚀等优点, 适于制造各种形状复杂的刀具, 如麻花钻、铣刀等, 也用来制造在高温下使用的模具和耐磨零件。

第三节 钢的热处理

钢的热处理是将钢在固体状态下通过加热、保温和以不同的方式冷却, 来改变钢的内部组织结构, 从而获得所需性能的工艺方法。

热处理是机器零件及工具制造过程中的重要工序, 对发挥金属材料的潜力、改善零件的使用性能、提高产品质量、延长使用寿命具有极其重要的意义。此外, 热处理还能改善毛坯的工艺性能, 为后续工序作组织准备, 以利于各种冷、热加工。据统计分析, 机床中要进行热处理的零件占 60%~70%; 而各种刀具、量具、模具等几乎占 100%。所以, 热处理在机械制造中占有十分重要的地位。

为便于掌握钢的热处理原理, 先对金属及合金的晶体结构和铁碳合金状态图作必要的了解。

一、金属及合金的晶体结构

1. 金属的结晶

液态金属冷却到凝固温度时, 原子由无序状态转变为按一定的几何形状作有序排列。金属的这种由液体转变为晶体的现象称为结晶。在固态金属内部, 由于结晶而形成许多大小不一、外形不规则的小晶体, 称为晶粒。晶粒的大小对金属的力学性能有很大的影响。一般地说, 晶粒越细, 其强度、硬度、冲击韧度都越高, 塑性也越好。

纯金属的结晶是在一定的温度下进行的, 它的结晶过程可以用冷却曲线表示。图 1-4a 所示为用实验方法得到的纯金属凝固时的冷却曲线。使液态纯金属缓慢冷却, 当温度降到 T_0 时便开始结晶。由于放出的结晶潜热恰好补偿了热的散失, 故这时的温度不再下降, 在

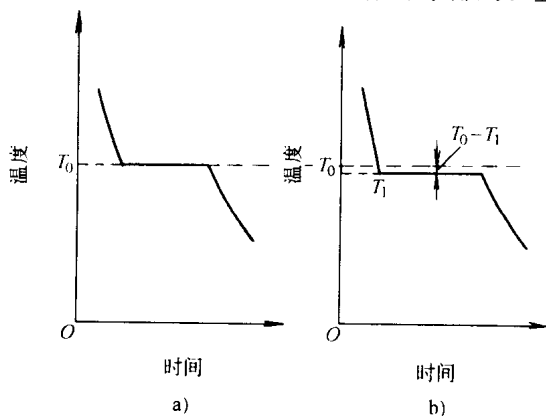


图 1-4 纯金属结晶时的冷却曲线

a) 理论曲线 b) 实际曲线

冷却曲线上表现为水平线段,它所对应的温度 T_0 便是纯金属的理论结晶温度。直至全部结晶成固态金属后,温度才继续下降。但在实际生产中,液态纯金属的冷却不是非常缓慢的,而是具有一定的冷却速度。此时纯金属的实际结晶温度 T_1 总是低于理论结晶温度 T_0 ,这种现象称为过冷,其冷却曲线如图1-4b所示。理论结晶温度与实际结晶温度之差 T_0-T_1 称为过冷度。冷却速度越快,过冷度也就越大。

2. 金属的同素异构转变

各种晶体内部原子的排列规则可用X射线分析等方法测定。为便于分析比较各种晶体中的原子排列规则,通常把描述原子在晶体中排列的空间格式称为晶格。金属的晶格有各种不同的形式,最常见的晶格有三种,即体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格,如图1-5所示。

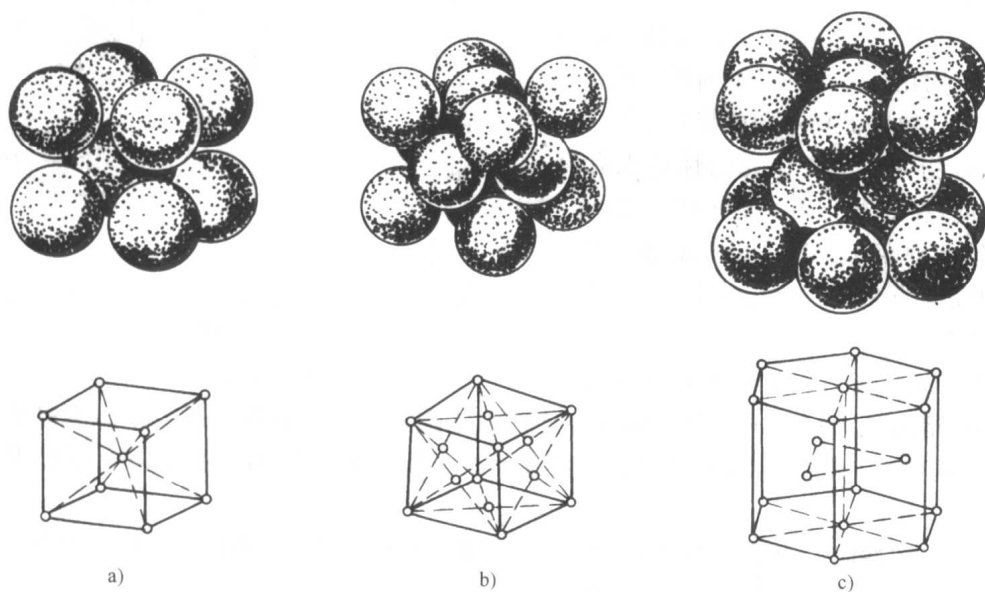


图 1-5 常见金属晶格的类型

a) 体心立方晶格 b) 面心立方晶格 c) 密排六方晶格

多数金属结晶后的晶格类型都保持不变。有些金属(铁、钴、锰等)在固态下,其晶体结构会随温度的变化而发生改变。金属在固态时改变其晶格类型的过程,称为金属的同素异构转变。由同素异构转变所得到的不同晶格的晶体,称为同素异晶体。在常温下的同素异晶体一般用希腊字母 α 表示,在较高温度下的同素异晶体用 γ 、 δ 等表示。

图1-6所示为纯铁的冷却曲线。由图可知,液态纯铁在 1538°C 时结晶成具有体心立方晶格的 $\delta\text{-Fe}$,继续冷却到 1394°C 时,发生同素异构转变,体心立方晶格的 $\delta\text{-Fe}$ 转变为面心立方晶格的 $\gamma\text{-Fe}$,再继续冷却到 912°C 时又发生同素异构转变,面心立方晶格的 $\gamma\text{-Fe}$ 转变为体心立方晶格的 $\alpha\text{-Fe}$ 。若再继续冷却,晶格的类型不再发生变化。

纯铁的同素异构转变可概括如下:

