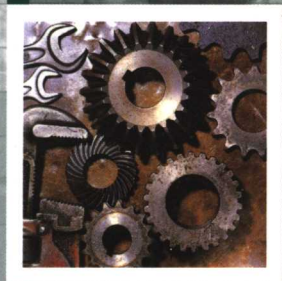


21

世纪高职高专系列规划教材·机电类



主编 王彩霞 魏康民

机械制造基础



西北大学出版社
NORTHWEST UNIVERSITY PRESS

机械制造基础

JIXIEZHIZAOJICHU

主 编 王彩霞 魏康民

西 北 大 学 出 版 社

【内容提要】 本书是根据教育部数控技术应用专业教学改革指导方案的具体要求编写的。为使学生在掌握一定的机械制造基础知识的同时,提高综合运用知识的能力,本书以机械制造工艺为主线,把《工程材料及热处理》、《公差测量技术》、《金属切削刀具》、《机械制造工艺学》、《机床夹具设计》等课程的内容揉合在一起,形成新的教学思路,突出了综合性和实用性。

本书可作为数控类、机械类和近机械类高职高专相关专业,也可供相应专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础 / 王彩霞主编. —西安: 西北大学出版社, 2005. 8

ISBN 7-5604-1988-7

I. 机... II. 王... III. 机械制造 - 高等学校 - 教材 IV. TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 083426 号

书 名	机械制造基础
主 编	王彩霞 魏康民
出版发行	西北大学出版社
通信地址	西安市太白北路 229 号 邮编: 710069 电话: 029 - 88302590
经 销	新华书店经销
印 刷	陕西向阳印务有限公司
开 本	787mm × 960mm 1/16
印 张	23.5
字 数	390 千字
版 次	2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5604-1988-7/TH · 10
定 价	32.00 元

前言

本书是根据教育部数控技术应用专业教学改革指导性计划的具体要求编写的。编者吸收了高职高专教学改革的经验,将原教学体系中的《工程材料及热处理》、《公差测量技术》、《金属切削刀具》、《机械制造工艺学》、《机床夹具设计》等课程内容进行整合,使相关内容有机的结合在一起,形成一种新的教材体系。

本书在内容的筛选、把握上,尽量注重实用性、连贯性、易懂性,以适应数控技术应用专业的培养目标的要求,并符合高职高专教育的特点。

本书适用于数控类、机械类和近机械类高职高专相关专业,也可供相应专业的工程技术人员参考。

参加本书编写的有西安航空职业技术学院李明行(第一章)、西安航空职业技术学院张晓军(第九章、第十一章)、西安理工大学高等技术学院张立新(第二章)、西安武警学院高东(第三章)、西安航空技术高等专科学校王彩霞(第四章)、陕西工业职业技术学院魏康民(第五、七、八、十章、附录)。本书由王彩霞、魏康民担任主编。

本教材在编写过程中参考了同行院校教师编写的有关教材及其他资料,受益不少,在此表示衷心的感谢!

由于时间紧迫,编者水平有限,书中难免有欠妥之处,敬请读者批评指正。

编者

2005年2月

目 录

第1章 机械工程金属材料性能及热加工	/1
1.1 金属材料力学性能	/1
1.2 金属物理性能、化学性能和工艺性能	/3
1.3 工程常用的金属材料	/4
1.4 钢的热处理	/8
1.5 热加工工艺知识	/17
习题与思考题	/27
第2章 金属切削的基本知识	/28
2.1 概述	/28
2.2 刀具的几何角度及材料	/30
2.3 金属切削过程	/45
习题与思考题	/65
第3章 技术测量基础	/67
3.1 测量基础	/67
3.2 形位公差及表面粗糙度的测量	/72
3.3 螺纹和齿形的测量	/94
习题与思考题	/104
第4章 机械加工工艺基础	/105
4.1 概述	/105
4.2 基准与工件定位	/110
4.3 六点定位原则和定位基准的选择	/117

4.4 定位误差分析与计算	/133
4.5 工件的夹紧	/142
4.6 专用夹具设计方法	/152
习题与思考题	/157
第5章 机械加工工艺规程的制订	/159
5.1 概述	/159
5.2 零件的工艺分析	/162
5.3 毛坯的选择	/163
5.4 工艺路线的拟订	/166
5.5 加工余量的确定	/175
5.6 工序尺寸及其公差确定	/179
5.7 机械加工的生产率及技术经济分析	/187
习题与思考题	/193
第6章 轴类零件加工工艺和常用工艺装备概述	/195
6.1 概述	/195
6.2 外圆表面的加工方法和加工方案	/197
6.3 外圆表面加工常用工艺装备	/206
6.4 典型轴类零件加工工艺分析	/216
习题与思考题	/219
第7章 套筒类零件的加工和常用工艺装备概述	/221
7.1 概述	/221

目 录

7.2 套筒类零件内孔表面的加工	/223
7.3 孔的精密加工	/229
7.4 套筒类零件加工的刀具	/232
7.5 典型套筒类零件的加工工艺分析	/236
习题与思考题	/239
第8章 箱体类零件的加工和常用工艺装备概述	/241
8.1 概述	/241
8.2 平面加工	/244
8.3 平面的精密加工	/251
8.4 箱体类零件的孔系加工	/253
8.5 钻床、镗床及铣床夹具	/256
8.6 典型箱体零件加工工艺分析	/272
习题与思考题	/277
第9章 圆柱齿轮加工和常用工艺装备概述	/278
9.1 概述	/278
9.2 齿轮的材料、热处理和毛坯	/280
9.3 圆柱齿轮齿形加工方案	/283
9.4 常用齿轮刀具	/284
9.5 圆柱齿轮的齿形加工方法	/287
9.6 典型齿轮加工工艺分析	/297

习题与思考题	/301
第 10 章 先进加工工艺和工艺装备	/303
10.1 先进加工工艺	/303
10.2 可调夹具、组合夹具	/309
10.3 数控机床夹具	/313
习题与思考题	/318
第 11 章 机械装配工艺基础	/319
11.1 概述	/319
11.2 装配尺寸链	/320
11.3 装配方法及其选择	/327
11.4 装配工作方法和典型部件装配	/332
习题与思考题	/334
附录 机械加工工艺规程设计方法	/335
一、机械加工工艺规程设计	/335
二、机械加工工艺规程设计实例	/342
参考文献	/365

第 1 章 机械工程金属材料性能及热加工

机械工程需要大量的金属材料,生产实践中一个主要的技术问题是选材问题,往往由于选择材料不当造成达不到技术要求。因此,为了正确合理地选择使用材料,必须了解其性能。

金属材料的性能包括:力学性能、物理性能、化学性能、工艺性能,在机械零件制造中常以力学性能作为设计和选材的依据。

1.1 金属材料力学性能

金属材料的力学性能是指金属材料在外力作用下所表现出来的性能,由于所受力不同,金属材料表现出的抵抗外力能力的特性也各不相同。常用的力学性质主要指:强度、硬度、塑性、韧性和疲劳强度。

1.1.1 强度

强度是指在外力作用下材料抵抗破坏的能力。此能力越大,则强度越高。由于受力状况不同,材料的强度也不同。按其受力形式强度可分为抗拉、抗压、抗弯、抗剪、抗扭强度等。一般机械零件常以抗拉强度作为最基本的强度指标。强度指标一般可通过金属拉伸试验来测定。

1.1.2 塑性

弹性是材料在外力作用下发生变形,而在去掉外力后恢复原始形状的性能。塑性是材料在外力作用下产生永久变形,而不被破坏的能力。为了衡量金属塑性的好坏,需要有一种数量上的指标,称为塑性指标。塑性指标一般可通过金属拉伸实验来测定。

1.1.3 硬度

金属材料的硬度主要是用压入法试验得到。压入法的硬度是指金属材料抵抗

更硬物质压入其表面的能力。材料的硬度越高,耐磨性越好。各种金属切削刀具都必须具备足够的硬度。

材料的硬度是通过硬度试验测得。硬度试验方法较多,生产中常用的是布氏硬度和洛氏硬度。

1. 布氏硬度

布氏硬度试验原理如图 1-1 所示。

用直径为 D 的淬火钢球或硬质合金球做压头,以相应的试验力 F 将压头压入试件表面,经规定的保持时间后,去除试验力,在试件表面出现一直径为 d 的压痕。用读数放大镜测出压痕最终数值,并以此查表,即可得出硬度值。硬度用 HB 表示。

布氏硬度计主要用来测量灰铸铁、有色金属以及经退火、正火和调质处理的钢材等材料。因压痕较大,所以它不适宜检验薄件或成品。

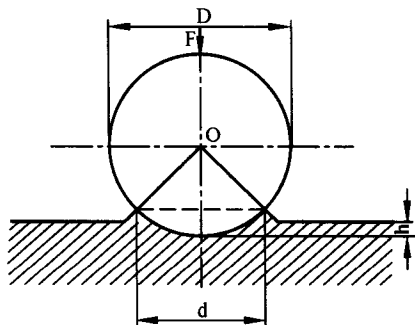


图 1-1 布氏硬度试验原理

2. 洛氏硬度

洛氏硬度试验是用顶角为 120° 的金刚石圆锥体或直径为 $\Phi 1.588\text{mm}$ 的淬火钢球作为压头。试验前应把试件表面脱碳层去掉,试验时先施加初载荷,目的是压头与试件接触良好,保证准确的测量结果,然后再加主载荷。洛氏硬度是以压痕深度来确定硬度值的,硬度值可以从表盘上直接读出,用 HR 表示硬度。

由于测量时压痕比较小,几乎不损伤表面,可直接测量成品或薄工件,又由于它可直接读数字,所以工作中洛氏用的比较普遍。但由于它测痕小,所以硬度测量的准确性没有布氏测量的准确。布氏与洛氏两硬度的近似值关系为 $1\text{HRC} \approx 10\text{HB}$ 。

1.1.4 冲击韧度

有许多零件,如冲压机床的冲头、活塞等,是在冲击力作用下工作的,它不能用以上讲的静载荷下力学指标来衡量材料抵抗冲击的能力。冲击载荷比静载荷破坏能力大。金属材料抵抗冲击载荷而不被破坏的能力称冲击韧度。其值用 α_k 表示, α_k 值越大表示韧度越好,在冲击力作用下越不易断裂。作冲击试验时,其韧度值可直接在试验机表盘上读出。

1.1.5 疲劳强度

许多机器零件如轴、齿轮、链轮、弹簧等所受的应力较小,远低于材料的屈服点,但这些零件工作中所承受的是反复改变大小或同时改变大小和方向的交变载荷。在这种交变载荷长期作用下零件会突然断裂,这种破坏过程称疲劳断裂。

工程上规定,材料经无限次重复交变动载荷作用而不被破坏的最大应力称疲劳强度。无限次交变载荷的试验是永远也无法完成的,所以工程上规定,黑色金属经受 10^7 次,有色金属和某些高强度钢经受 10^8 次交变应力作用下而不发生破坏时的应力作为材料的疲劳强度。

1.2 金属物理性能、化学性能和工艺性能

1.2.1 物理性能

工程材料的物理性能包括密度、熔点、导电性、导磁性、导热性等。由于机械零件的用途各不相同,对其物理性能方面的要求也不尽相同。如铜导电性能好,用来作导电零件;飞机、火箭等要求重量轻,用密度小的铝合金制造。各种切削刀具需硬度和耐磨,选用淬火的工具钢。

1.2.2 化学性能

金属材料的化学性能主要是指材料在常温或变温时抵抗各种化学侵蚀的能力。主要包括耐腐蚀性、抗氧化和化学稳定性。例如,医疗器件等可采用不锈钢制作,飞机发动机选用热稳定性好的材料。

1.2.3 工艺性

金属材料的工艺性能是物理、化学和力学性能的综合,也就是指材料对各种工艺加工适应的难易程度。金属材料变成零件的常用的五种基本方法是:铸造、锻造、焊接、切削加工和热处理。材料的工艺性能的好坏直接影响产品的质量、生产率和成本,如铸铝、铸铁、焊接性能不好,焊接件最好不选择铸铁、铸铝。

1.3 工程常用的金属材料

1.3.1 钢

钢的种类繁多,分类方法也不相同。一般常用的方法是,铁中含碳量多少来划分钢的种类;铁中含碳量在 0.0218% ~ 2.11% 的铁碳合金为钢,含碳量少于 0.0218% 的为纯铁,大于 2.11% 的为铸铁。 $W_c < 0.25\%$ 为低碳钢, $W_c = 0.25\% \sim 0.65\%$ 为中碳钢, $W_c > 0.65\%$ 为高碳钢。

1. 碳素钢(非合金钢)

碳钢是指 $W_c \leq 1.35\%$ 的铁碳合金。碳钢具有一定的力学性能和良好的工艺性能,并且价格低廉,在机械工程中应用广泛。

碳素结构钢一般用来制造工程构件。如轴套类、拉伸及弯曲件等。

(1) 普通碳素结构钢 普通碳素结构钢指 $W_c = 0.06\% \sim 0.38\%$ 之间,杂质硫磷含量比较高,由于磷可提高钢的强度、硬度,但使塑性、韧性急剧下降。低温时会产生冷脆现象。硫不溶于铁,温度高时会导致钢开裂,出现热脆现象。由于冷脆和热脆现象,所以这种碳素钢一般在供货状态下使用,不需进行热处理。适于制作钢筋、钢板等建筑用材和一般不重要的机械零件。按照 GB700—88 规定:碳素钢结构的牌号由屈服点“屈”字汉语拼音字首 Q、屈服点数值、质量等级和脱氧方法四部分按左右顺序组成。如普通碳素钢具体牌号是 Q235—A·B,屈服点 $\sigma_s = 235\text{MPa}$,A 级,半镇静碳素钢。

(2) 优质碳素结构钢 这类钢有害杂质硫磷受到严格控制(都小于 0.035%),塑性、韧性较好。主要制作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,表示钢中平均含碳量的百分数,如 40 钢,表示 $W_c = 0.40\%$ 的优质碳素结构钢。钢中含锰量较高($W_{Mn} = 0.7\% \sim 1.2\%$)时,在数字后面加锰元素符号 Mn,如 65Mn,50Mn,15Mn 等,常用来制作弹簧和易磨损件,如汽车板簧、弹性垫圈等。

(3) 碳素工具钢 碳素工具钢是 $W_c = 0.7\% \sim 1.4\%$ 的高碳钢。牌号 T(“碳”字汉语拼音字首)和数字左右顺序组成,数字表示钢的平均含碳量的千分数。如 T7 钢表示 $W_c = 0.7\%$ 的碳素工具钢,若尾部加“A”,则表示高级优质。如 T8A, T10A,

T12A 等。

由于碳素工具钢热硬性差,热处理变形大,故仅适用于切削速度不高、不太精密的切削刀具。

如 T7A, T8A 制作不精密的凹(凸)模、木工锯条等。T10A ~ T12A 制作手用锉刀、手用绞刀、丝锥、钢锯条等。

2. 合金钢

钢中加入适量合金元素,如硅、锰、铬、镍、铝、钼、钒等,形成铁基合金,称合金钢。按用途又可分为:

(1) 合金结构钢 由于在碳素结构钢中加入了适量的合金元素,提高了强度和韧性。合金结构钢常用来制造各种重要的机械零件和构件,如 40Cr 常用作机床主轴;30CrMnSiA 常用制作重要的工程结构件等。

合金结构钢的牌号是在碳素结构钢数字后面加元素符号、加数字。前面数字表示碳的平均万分含量,元素后面的数字表示合金元素的平均百分含量(元素含量少于 1.5% 时不用数字表示)。

如 20Cr2Ni4 表示铬镍合金结构钢,其 $W_c = 0.2\%$, $W_{Cr} = 2\%$, $W_{Ni} = 4\%$ 。

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

(2) 合金工具钢 合金工具钢是在碳素工具钢的基础上加入适量的合金元素(Si, V, Mn, W 等)制成。由于合金元素的加入,提高了材料的综合性能,特别是提高了材料的热硬性、组织稳定性和耐蚀性,改善了热处理性能。

合金工具钢也是指制造各种刀具、模具和量具用钢的总称。合金工具钢牌号由数字+元素符号+数字左右顺序组成。例如:9CrSi, 表示 $W_c = 0.9\%$, $W_{Cr} \approx 1\%$, $W_{Si} \approx 1\%$ 。

这种合金钢主要用于制造变形小的薄刃低速切削刀具(如丝锥、板牙、绞刀、麻花钻等),当含碳量大于 1% 时一般不标出。

3. 高速钢

机械切削刀具常用高速钢(也称锋钢、白钢)制作。它有很高的热硬性、耐磨性。切削温度在 600℃ 左右时,硬度仍无明显变化。主要是因为钢中加入了 Wc, Vc, 从而提高了热硬性和耐磨性。淬火硬度为 63 ~ 65HRC。常用的牌号有 W18Cr4V, W6Mo5Cr4V2 等。

4. 特殊性能钢

特殊性能的钢指具备某些特殊化学性能和物理性能的钢。常用的有不锈钢、耐蚀钢、耐热钢等。

(1) 不锈钢、耐蚀钢 不锈钢、耐蚀钢是抵抗大气或其他介质腐蚀的钢。它主要的合金元素是铬、镍。常用的有 1Cr17, 2Cr13, 3Cr13 等。

(2) 耐热钢 耐热钢是指在高温下具有热化学稳定性和热强性, 在高温下也不会发生氧化并且具有较高强度的钢。用来制作在高温下工作的零件, 如加热炉管、燃烧室筒体、焊芯、内燃机气阀等。常用的耐热钢有: 1Cr18Ni9Ti, 15CrMo, 1Cr11MoV, 4Cr14Ni14W2Mo 钢等。

5. 铸钢

铸钢指可以铸造的碳钢、合金钢, 以铸造碳钢最多。在生产中, 铸钢是用来制造形状复杂, 不便切削加工零件的重要材料。

铸造碳钢的牌号以“铸钢”二字汉语拼音字首“ZG”和两组数字按左右顺序组成。第一组数字为屈服点, 第二组数字为抗拉强度。例如, ZG235—400, 即表示 $\sigma_s = 235\text{MPa}$, $\sigma_b = 400\text{MPa}$ 。

1.3.2 铸铁

铸铁指 $W_c > 2.11\%$ 的铁碳合金, 通常使用的是 $W_c = 2.5\% \sim 4.0\%$ 的铸铁。铸铁有良好的减振、减磨作用, 良好的铸造性和加工性, 价格低廉。根据碳在铸铁中存在的形式, 铸铁可分为白口铸铁、灰口铸铁等。

1. 白口铁

这种铸铁中的碳主要以 Fe_3C 形式存在。因断面呈白色, 故称白口铸铁。其性能硬而脆, 加工性能特差, 不能进行切削加工, 一般不制造零件, 主要作炼钢的原料。可制作不需切削加工, 但要求硬度高、耐磨性好的零件。如: 轧辊、犁铧等。

2. 灰口铸铁

灰口铸铁断面呈灰色, 故称灰口铸铁。在铸铁中碳主要以石墨的形式析出。此类铸铁性能脆软, 铸造性、切削加工性、耐热性和减振性好。而且生产设备及熔炼工艺简单, 成本低廉。因而机械工业上常用来制造各种机床床身、工作台、床头和底座、带轮、齿轮等, 是目前应用最多的一种铸铁。灰铸铁的牌号, 有汉字“灰、铁”拼音字首“HT”及表示最低抗拉强度的数字组成。例如: HT300 即表示最低抗拉强度

为300MPa的灰铸铁。灰铸铁按石墨状态不同又分为可锻铸铁(如KTZ650—02)、球墨铸铁(如QT800—2)等,第一组数字表示最低抗拉强度MPa,第二组数字表示延伸率。

1.3.3 有色金属

通常把钢铁材料称黑色金属,把其他金属材料称有色金属。有色金属与钢铁材料相比,具有某些特殊的性能,如铝、镁、钛及其合金密度小,银、铜、铝导电性好,镍、钼及其合金耐高温等。因而成为现代工艺不可缺少的材料。被广泛用在机械制造、电器制造、航空、航天、电子及国防等部门。

1. 铝及铝合金

工艺中使用的纯铝是银白色轻金属。纯铝密度小、导电性好、热导性好、塑性好,并具有良好的耐蚀性,但强度、硬度低。纯铝一般作导电材料或耐蚀材料,不宜制作承受载荷的结构件。工业纯铝纯度为 $W_{Al}=98.0\%$ 其编号为1070,1060,1050…(对应的旧编号为 $L_1, L_2, L_3 \dots$)

2. 铜及铜合金

纯铜因颜色为紫色又称紫铜,也称电解铜。纯铜导电性、导热性和耐蚀性好,并且具有良好的塑性,但硬度低。主要用来制作导电材料、器皿及配制铜合金。工业纯铜代号为 T_1, T_2, T_3, T_4 四种。序号越大,纯度越低。

机械工业中常用铜合金。按其所加元素不同又分为黄铜(铜锌合金)代号“H”(“黄”字汉语拼音字首)加含铜百分数。主要制作散热片、冷凝器、冷冲压件、弹簧片等;青铜(除黄铜、白铜以外的铜合金)代号为“Q”(“青”字汉语拼音字首)加元素符号及平均含量的百分数、其他元素平均含量百分数组成。

1.3.4 硬质合金

硬质合金属粉末冶金,它是以难熔金属碳化物粉末(碳化钨、碳化钛等)为基体,以铁、钴、镍等为粘接剂加压成型,经高温烧结而成的一种合金材料,其硬度远高于其他金属,硬度可达69~81HRC、热硬性可达900~1000℃,而且具有高耐磨性和较高抗压强度。一般用它制造切削刀具、冷冲模、拉丝模、量具测量面等高耐磨零件。代号“Y”(“硬”字汉语拼音字首)加元素汉拼字首及元素含量百分数。表示常用的牌号有:

- ①钨钴类 YG(YG3, YG6, YG8)后面数字表示钴的百分含量;
- ②钨钛钴类 YT(YT5, YT15, YT30)后面数字表示碳化钛百分含量;
- ③钨钛钴钼类 YW。

1.3.5 机械零件材料选择原则

正确选择材料是关系到保证产品质量、提高生产率、降低加工使用成本的一个主要因素,对材料的选择要考虑的因素很多,这里只作原则性的说明。

(1)使用性原则 一是根据零件使用要求选择材料。二是以综合的力学性能为主选择材料:结构件强度要好;弹簧要求疲劳强度要好;切削刀具要求热硬性、耐磨性要好等。

(2)工艺性原则 工艺性是指选用的材料加工的难易程度。尽管能满足使用要求,但加工困难,甚至无法加工。如铸铁焊接性不好,不能用铸铁作焊接件。

(3)经济性原则 经济性原则是指选用的材料制造成本是否低廉。在满足以上两条原则的基础上,应尽量降低加工总成本,提高生产效率和经济效益。

1.4 钢的热处理

钢的热处理是将固态下的钢通过加热、保温和冷却,以改变其内部组织结构,从而获得所需性能的一种工艺方法。

钢的热处理是现代生产中,大多数重要机器零件和工具的重要工序,它不仅发挥了金属材料的潜力,提高了零件的使用性能,改善了材料的加工性能,而且还提高了零件的质量、降低了成本、延长了零件的使用寿命。

为了便于了解和掌握钢的热处理原理,先要对铁碳状态图及金属晶体结构作必要的了解。

1.4.1 金属结晶过程和同素异构转变

1. 金属结晶过程

液体金属降到一定温度时,原子开始由紊乱无序状态,逐渐转变为有规则有序排列状态,即由液态转变为固态的过程称为结晶。

纯金属的结晶是在一定温度下进行的,其结晶过程可通过冷却曲线图 1-2 来

表示。图 1-2a 表示用实验方法得到的纯金属冷却曲线图。

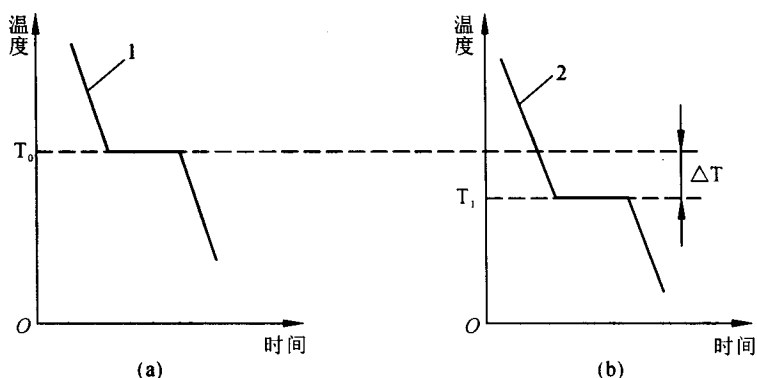


图 1-2

水平线段为结晶温度。当液态纯金属缓慢冷却,当温度降到 T_0 时开始结晶,称为理论结晶温度。但实际生产中,冷却速度不是缓慢的,而是具有一定速度。此时纯金属实际结晶温度 T_1 总是低于理论结晶温度 T ,这种现象称为过冷,其冷却曲线如图 1-2b 所示,两结晶温度差 ΔT 称为过冷度。冷却速度愈快,过冷度愈大。

在固体金属内部,由于结晶而形成的许多大小不一的小晶体,称为晶粒。晶粒愈细,其金属的硬度、强度、塑性和韧性愈高。机械零件在进行热加工及热处理后,凡是晶粒粗大的,都会造成机械性能明显下降。

细化晶粒的方法有:①增大过冷度;②在液体中加入难溶杂质;③在金属结晶过程中附加振动;④通过热处理加热,使之重结晶来细化晶粒;⑤通过反复锻打来细化组织。

2. 金属同素异构转变

可用 x 射线分析等方法测定各种晶体内部原子排列的规则。为了便于分析原子排列规则,通常把描述晶体中原子排列的空间格式称为晶格。故多数金属具有体心晶格、面心晶格和密排六方晶格,如图 1-3 所示。

多数金属结晶后的晶格保持不变。也有些金属如钴、钛、锰、铁等结晶后,其晶体结构随温度变化而变化。这种同一元素随温度的变化而发生晶格结构变化的现象称同素异构转变。由转变得到的晶体,称为同素异构晶体。常温下同素异构晶体用希腊字母 α 表示,较高温度下的同素异晶体用 γ, δ 等表示,如图 1-4