

内 容 简 介

本书以培养技术应用型人才为目标,从工程实际出发,注重培养学生的工程能力创新思维,着重培养学生分析问题、解决问题的能力。

本书主要包括工程材料基础、铸造成型、塑性成形、焊接成形、非金属材料的成形、机械零件材料及毛坯的选择、金属切削加工基础、机械加工工艺流程基础、特种加工与现代制造技术九个模块。每个模块又分为若干个学习情境,全书循序渐进地介绍了机械制造的相关知识,并且在每个模块后面都设有“拓展训练”模块,通过具体实例,使学生掌握相关知识。

本书可供高职高专机械类专业使用,也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械制造基础/李红主编. -- 北京:北京邮电大学出版社,2012.5(2022.10重印)

ISBN 978-7-5635-3045-8

I. ①机… II. ①李… III. ①机械制造—高等职业教育—教材 IV. ①TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 096338 号

策划编辑:马子涵 责任编辑:于伟蓉 封面设计:刘文东

出版发行:北京邮电大学出版社

社 址:北京市海淀区西土城路 10 号

邮政编码:100876

发 行 部:电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销:各地新华书店

印 刷:大厂回族自治县聚鑫印刷有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:16.5

字 数:408 千字

版 次:2012 年 5 月第 1 版

印 次:2022 年 10 月第 9 次印刷

ISBN 978-7-5635-3045-8

定 价:49.80 元

· 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

服务电话:400-615-1233



绪 论

一、机械制造与材料的地位及作用

机械制造是指使用各种材料通过不同的工艺使之成为产品的生产活动。在此过程中材料和成形工艺是非常重要的两个方面。

材料是指那些能够用于制造结构、器件或其他有用产品的物质,是人类生产和生活所必需的物质基础。从日常生活中使用的器具到高技术产品,简单的手工工具,复杂的航天器、机器人,都是用各种材料制作或由其加工的零件组装而成的。

材料同时又是人类技术与文明进步的基石和先导。历史学家按照人类所使用材料的种类将人类历史划分为石器时代、青铜器时代和铁器时代。现代工业技术与人类文明的发展,同样与材料特别是新型材料的发展紧密相关。20世纪70年代以来,人们把材料、能源和信息技术列为发展现代科学技术的三大支柱,而材料又是后两者的基础。例如,没有半导体材料的工业化生产,就不可能有目前的计算机技术;没有高温高强度的结构材料,就不可能有今天的航空航天工业;没有光导纤维,也就没有现代的光纤通信。进入21世纪,新型材料技术、信息技术和生物技术并列为现代文明的三大支柱,由此可见材料对于人类发展的重要性。

材料固然重要,但是如果不把它们加工生产成人们所需要的产品,这些材料也就失去了存在的意义,所以,材料与制造加工是密不可分的。任何装备都是由许多不同的零部件构成的,而这些零部件又可能是由不同的材料制成的,所以材料选用与材料成形技术是机械制造加工过程的重要组成部分。

通过改变和控制材料的外部形状和内部组织结构,将材料制造成为人类社会所需要的各种零部件和产品的过程称为材料成形,也称为材料加工。把材料加工制造成产品的方法可分为两大类。



(1)热加工。热加工,如液态浇注成形加工(铸造)、塑性变形加工、连接加工、粉末冶金、热处理和表面加工等,在加工制造过程中,不仅材料的外部形状和表面状态发生改变,而且材料的内部组织和性能也发生巨大变化。加工制造的目的不只是赋予材料一定的形状、尺寸和表面状态,而且改变材料的内部组织和性能。这一类加工制造方法称为材料成形或材料加工。又因为这类加工制造一般都需要将材料加热到一定的温度下才能进行,故称为热加工。

(2)冷加工。冷加工,如传统的车、铣、镗、刨、磨等切削加工,以及直接利用电能、化学能、声能、光能等进行的特殊加工,如电火花加工、电解加工、超声加工、激光加工等,在加工制造过程中通过去除一部分材料来使材料成形。加工制造的目的主要是赋予材料一定的形状、尺寸和表面状态,尤其是尺寸精度和表面粗糙度,而一般不改变材料的内部组织与性能。这类加工方法称为切削加工或去除加工。由于这种加工一般在常温下甚至往往是强制冷却到常温下进行,故又称为冷加工。

材料种类繁多,加工方法也不止一种,材料及成形工艺的选择就成为机械零件获得所需性能的关键。原材料本身的性质是机械零件的使用性能达到设计要求的基本保证,因此对于不同性能要求的零件(产品),显然首要的问题是应选用不同的材料;另外,材料的成形技术是制造加工业的关键技术之一,它不仅是使零件或毛坯获得一定形状和尺寸的制造加工方法,也是最终使零件或毛坯获得一定内部组织和性能的重要途径。例如,通过铸造成型的金属铸件,其形状尺寸是否符合设计要求,当然是由铸造成型工艺决定的,而金属铸件的性能除与所使用的合金类型、成分有关外,在很大程度上也取决于铸造成型的工艺方法。通过塑变成形的金属制件,通过粉末冶金成形的制品,通过热塑性成形的高分子材料产品,乃至焊接构件的局部组织和性能也是如此。因此,材料的选用及成形工艺的选择是保证产品质量的前提。

工程材料及其成形技术还与人类社会有密不可分的关系。工程材料及其加工技术的地位和作用早已超出了技术经济的范畴。高新技术的发展、资源和能源的有效利用、通信技术的进步、工业产品质量和环境保护的改善、人民生活水平的提高等都与材料及其加工密切相关。

二、本课程的性质和任务

“机械制造基础”是机械类专业一门重要的专业基础课。在机械行业中,作为一名技术人员,无论其工作性质侧重哪一方面,都必然要面对工程材料以及成形加工方法的选择、使用等问题。这主要是由于设计、选材、加工三者之间是有机关联的,不能单独简单处理,在设计时就要考虑选择哪种材料来满足使用性能要求,而材料的性能又是可以通过一些方法改变的,并且所选用的材料及所使用的加工工艺方法应与零件具有的结构特征相适应。因此,零件结构的设计、材料的选用、加工工艺方法的选择就成了相互关联的综合性的技术问题,不能把它们割裂开来。

所以,对于机械行业的从业人员来讲,掌握工程材料及成形工艺的基本理论、基本专业知识是必不可少的。

三、本课程的基本要求

(1)基本理论方面。基本理论方面要求掌握材料的成分、改性工艺及成形工艺对零件结



构、微观组织、性能影响的规律。这些规律是制造、开发材料及确定改性与成形工艺的理论基础。

(2)基本知识方面。基本知识方面要求掌握各类工程材料的特点及选用;材料改性工艺的过程及特点,主要是热处理工艺及表面改性工艺;各种成形工艺过程及特点,以金属材料的铸造、塑性加工及焊接工艺为主;选材和零件毛坯的选用原则;零件失效的种类及分析方法;金属切削的基础知识;机械加工的工艺过程。

(3)工程应用方面。工程应用方面要求熟悉各类工程材料的应用;各类成形工艺的应用;合理安排材料改性与成形工艺在工艺流程中的位置;熟悉材料及其加工中图样和技术要求的标注方法;了解各种成形零件的结构工艺性;了解材料质量的检验方法与分析方法;具有对工程材料及改性与成形工艺的分析能力;熟悉常见表面的加工方法;熟悉典型零件的加工工艺。

学习本课程前,学生应先学习完工程力学,参加过金工实习,对机械工程材料的加工过程及其应用有一定的感性认识。本课程理论性和实践性都很强,基本概念较多,与生产实际联系密切。学习时应注意联系其他相关课程内容,注重分析、理解前后知识的整体联系及综合应用。要注意理论联系实际,特别要重视综合实验与生产实践。



模块一



工程材料基础

知识目标

- 熟悉工程材料的种类、性能指标和牌号表示方法；
- 熟悉金属晶体结构；
- 掌握铁碳合金相图的相关知识；
- 熟悉热处理的理论基础，掌握常见的热处理工艺方法。

技能目标

- 根据零件的使用条件，选择力学性能指标；
- 根据材料的牌号，判断其所属种类、性能特点、应用场合；
- 根据材料的性能要求，选择合适的热处理工艺。



任务描述

减速器是机械设备中的常用装置，它是原动机和工作机之间的独立的闭式传动装置，用来降低转速和增大转矩，以满足工作需要。

减速器主要由传动零件(齿轮或蜗杆)、轴、轴承、箱体及其附件(轴承盖、定位销、螺栓、螺钉等)组成。试确定这些零部件都是由哪些材料制作而成的。



任务分析

减速器的各零部件在工作时受力情况各不相同,对材料的性能要求也有所差异,需要区别对待。



相关知识

学习情境一 材料的分类和金属材料的性能

一、材料的分类

现代材料种类繁多,据粗略统计,目前世界上的材料已有 40 余万种,并且还在以每年约 5% 的速度增加。

工程材料是指在机械、船舶、化工、建筑、车辆、仪表、航空航天等工程领域中用于制造工程构件和机械零件的材料。按材料的组成和结合键的特点,可将工程材料分为金属材料、陶瓷材料、高分子材料和复合材料。

(1)金属材料。金属材料具有良好的导电性、导热性、塑性和金属光泽,是目前用量最大、应用最广泛的工程材料。金属材料分为黑色金属和有色金属两类,铁及铁基合金称为黑色金属,除黑色金属以外的金属及其合金称为有色金属。

(2)陶瓷材料。陶瓷材料的性能特点是熔点高、硬度高、耐蚀性好、脆性大。陶瓷材料分为普通陶瓷、特种陶瓷和金属陶瓷。

(3)高分子材料。高分子材料具有塑性、耐蚀性、电绝缘性、减振性好及密度小等特点。工程上使用的高分子材料主要包括塑料、橡胶及合成纤维等。

(4)复合材料。复合材料是把两种或两种以上不同性质或不同结构的材料以微观或宏观的形式组合在一起而形成的材料,通过这种组合可达到进一步提高材料性能的目的。复合材料分为金属基复合材料、陶瓷基复合材料、石墨基复合材料和聚合物基复合材料。

二、金属材料的性能

工农业生产中所使用的各种机械大部分是由金属材料与非金属材料制成的。其中金属材料应用得更为广泛,主要是由于金属材料本身具有优良的性能,能够满足各种机械加工和使用要求。

金属材料的性能通常可分使用性能和工艺性能。使用性能是指机械零件在正常工作情况下应具备的性能,包括力学性能和物理、化学性能;工艺性能是指机械零件在冷、热加工过程中应具备的性能,包括铸造性、可锻性、焊接性和切削加工性等。

1. 使用性能

1) 力学性能

力学性能是指材料在载荷(外力)作用下所表现出的抵抗产生塑性变形或断裂的能力。衡量材料力学性能的主要指标有强度、塑性、硬度、疲劳强度、冲击韧性、断裂韧性和耐磨性

等。材料的力学性能是零件设计、材料选择及工艺评定的主要依据。

(1) 弹性和刚度。金属材料受外力作用时产生变形,当外力去掉后能恢复其原来形状的性能称为弹性。这种随外力消除而消除的变形,称为弹性变形。

材料力学性能的指标是通过拉伸试验测定的。根据国家标准 GB/T 228.1—2010《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》中的相关规定制作标准拉伸试样,如图 1-1 所示。

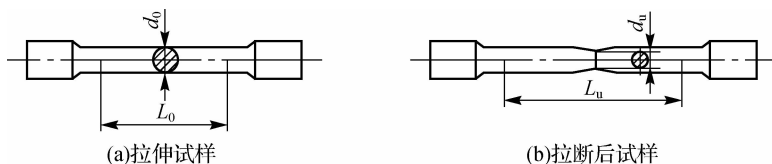


图 1-1 标准拉伸试样

在拉伸试验机上夹紧试样两端,缓慢施加轴向载荷,使之发生变形直至断裂。通过试验可以得到拉伸力与试样伸长量之间的关系曲线(即拉伸曲线)。为消除试样几何尺寸对试验结果的影响,将拉伸过程中试样所受的拉伸力转化为试样单位面积上所受的力(称为应力),试样伸长量转化为试样单位长度上的伸长量(称为应变),得到应力—应变曲线,其形状与拉伸曲线完全一致。低碳钢的应力—应变曲线如图 1-2 所示。

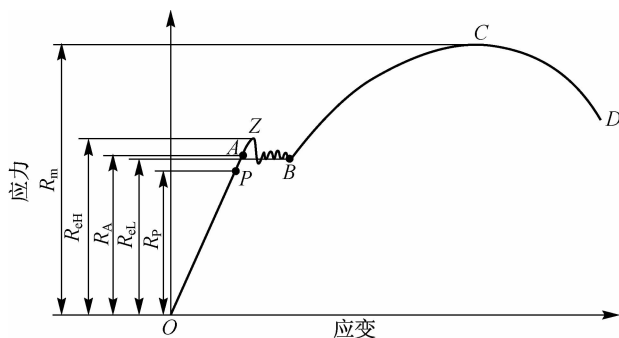


图 1-2 低碳钢的应力—应变曲线

由图 1-2 可知,应力—应变曲线中 OP 段为一条倾斜直线,此时应力和应变成比例关系, P 点所对应的应力为保持这种比例关系的最大应力,称为比例极限,用 R_p 表示。

材料在弹性范围内,应力与应变成正比,其比值称为弹性模量,用 E 表示,单位为 MPa 。弹性模量 E 标志着材料抵抗弹性变形的能力,用来表示材料的刚度。弹性模量越大,材料产生一定量的弹性变形所需的应力就越大,表明材料越不易产生弹性变形,即材料的刚度大。如果材料的刚度不足,则易发生过大的弹性变形而产生失效。弹性模量的大小主要取决于材料的本性,一些处理方法(如热处理、合金化、冷热加工等)对它影响很小。常见金属的弹性模量见表 1-1。

表 1-1 常见金属的弹性模量

金 属	弹性模量 E/MPa	金 属	弹性模量 E/MPa
铝(Al)	72 000	铁(Fe)	214 000
铜(Cu)	132 400	镍(Ni)	210 000
镁(Mg)	45 000	钛(Ti)	118 010



小提示

材料的刚度不等于零件的刚度。零件的刚度不仅取决于材料的弹性模量,还与零件的形状和尺寸有关,可以通过增加横截面积或改变截面形状来提高其刚度。

(2)强度。工程材料在外力作用下抵抗永久变形和破坏的能力称为强度。根据外力性质不同,强度可分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。当承受拉力时,强度特性指标主要表现为屈服强度和抗拉强度。

①屈服强度。在图 1-2 中,当曲线超过 A 点后,若卸去外加载荷,则试样会留下不能恢复的残余变形,这种不能随载荷去除而消失的残余变形称为塑性变形。在金属材料呈现屈服现象时,在试验期间发生塑性变形而力不增加的应力点称为屈服点,其所对应的强度称为屈服强度,应区分为上屈服强度 R_{eH} 和下屈服强度 R_{eL} ,单位为 MPa。

对没有明显屈服现象的材料,国家标准规定用试样标距长度产生 0.2% 的塑性变形时的应力值作为该材料的屈服强度,用 $R_{p0.2}$ 表示。

机械零件在使用时,一般不允许发生塑性变形,所以屈服强度是大多数机械零件设计时选材的主要依据,也是评定金属材料承载能力的重要力学性能指标。

②抗拉强度。材料在断裂前所承受的最大应力值称为抗拉强度或强度极限,用 R_m 表示,单位为 MPa。在图 1-2 中的 C 点所对应的应力值即为 R_m 。屈服强度与抗拉强度的比值称为屈强比。其值越大,越能发挥材料的潜力,减小结构的自重;其值越小,零件工作时的可靠性越高;其值太小,材料强度的有效利用率就会降低。因此,低合金结构钢的屈强比一般取 0.65~0.75。

(3)塑性。塑性是指材料在断裂前发生永久变形的能力。常用的塑性指标有断后伸长率和断面收缩率,在拉伸试验中,可以通过把试样拉断后将其对接起来进行测量而得到。

①断后伸长率。断后伸长率是指试样拉断后标距长度的伸长量与原始标距长度的百分比,用 A 表示,即

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中, L_0 为试样原始标距长度(mm); L_u 为试样拉断后最终标距长度(mm)。

断后伸长率的数值和试样标距长度有关。短试样的断后伸长率大于长试样的断后伸长率,所以相同试样的断后伸长率才能进行比较。

②断面收缩率。断面收缩率是指断后试样横截面积最大缩减量与原始横截面积的百分比,用 Z 表示,即

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100\% \quad (1-2)$$

式中, S_0 为试样原始横截面积(mm^2); S_u 为试样拉断后最终截面积(mm^2)。

断后伸长率 A 和断面收缩率 Z 越大,材料的塑性越好。两者相比,用断面收缩率表示塑性比断后伸长率更接近真实变形。

金属材料具有一定的塑性才能进行各种变形加工。另一方面,材料具有一定的塑性,可以提高零件的使用可靠性,防止零件突然断裂破坏。

(4) 硬度。硬度是反映材料软硬程度的一种性能指标,它表示材料表面局部区域内抵抗其他物体压入的能力。测量硬度的常用指标有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等。使用不同方法所测得的硬度值不能直接比较,可通过硬度对照表换算。

硬度试验设备简单,操作方便,一般不需要破坏零件或构件,而且对于大多数金属材料,硬度与其他的力学性能(如强度等)以及工艺性能(如切削加工性、焊接性等)之间存在着一定的对应关系。因此,在工程上,硬度被广泛地用以检验原材料和热处理件的质量,鉴定热处理工艺的合理性以及作为评定工艺性能的参考。

① 布氏硬度。布氏硬度的试验原理如图 1-3 所示。用一定的载荷 F 将直径为 D 的硬质合金球压入被测材料的表面,保持一定时间 t 后卸去载荷,测量被测试样表面上所形成的压痕直径 d ,由此计算压痕的球缺面积 S ,其单位面积所受的载荷称为布氏硬度,用符号 HBW 表示。因此,布氏硬度值 $HBW = F/S$ 。在测定材料的布氏硬度时,应根据材料的种类和试样的厚度选择球体材质、球体直径 D 、施加载荷 F 和载荷保持时间等。

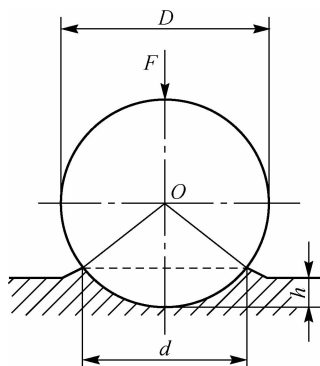


图 1-3 布氏硬度试验原理图

布氏硬度的优点是测量误差小,数据稳定,与强度之间有良好的对应关系,可用于硬度较低的退火钢、正火钢、调质钢、铸铁及有色金属的原料和半成品的硬度测量;缺点是压痕大,不能用于较薄工件(试样厚度至少应为压痕深度的 8 倍)、成品件及硬度大于 650 HBW 的材料。

② 洛氏硬度。洛氏硬度的试验原理如图 1-4 所示。用一定规格的压头(金刚石圆锥体或硬质合金球),在一定试验力的作用下,将压头压入试样表面,保持规定的时间后,卸除主试验力,然后测定压痕的深度,计算硬度值。洛氏硬度用符号 HR 表示。

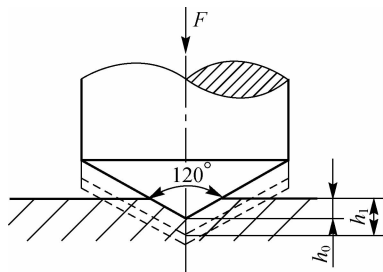


图 1-4 洛氏硬度试验原理图

为了能用同一台硬度计测定不同材料的硬度,常采用不同的压头类型和载荷以获得不同的洛氏硬度标尺。常用洛氏硬度标尺、试验规范及应用举例见表 1-2。

表 1-2 常用洛氏硬度试验的标尺、试验规范及应用举例

标尺	硬度符号	压头类型	初始试验力 F_0/N	主试验力 F_1/N	总试验力 F/N	测量硬度范围	应用举例
A	HRA	金刚石圆锥	98.07	490.3	588.4	20~88	硬质合金钢、硬化薄钢板、表面薄层硬化钢
B	HRB	$\phi 1.5875\text{ mm}$ 硬质合金球		882.6	980.7	20~100	低碳钢、铜合金、铁素体可锻造铁
C	HRC	金刚石圆锥		1 373	1 471	20~70	淬火钢、高硬度铸件、珠光体可锻铸铁



洛氏硬度试验操作简便、迅速,测量硬度值范围大,压痕小,可直接测量成品和较薄工件。但由于试验载荷较大,洛氏硬度试验不宜用来测定极薄工件及氮化层、金属镀层等的硬度。而且由于压痕小,对内部组织和硬度不均匀的材料,其测定结果波动较大,故需在不同位置测试多点的硬度值,最后取其算术平均值。洛氏硬度无单位,各标尺之间没有直接的对应关系。

③维氏硬度。维氏硬度的试验原理与布氏硬度相同,但维氏硬度试验所用压头是相对面夹角为 136° 的金刚石四棱锥体,所加载荷为 $5\sim 120\text{ kgf}(49.03\sim 1\,176.80\text{ N})$ 。维氏硬度试验原理图如图 1-5 所示。用规定的压力 F 将金刚石压头压入被测试件表面并保持一定时间后卸去载荷,测量压痕投影的两对角线的平均长度 d ,据此计算出压痕的表面积 S ,最后求出压痕表面积上的平均压力,即维氏硬度 $HV=F/S$ 。

维氏硬度试验对试样表面质量要求较高,测试方法较为麻烦,但因所施加的试验载荷小,压入深度较浅,故可测定较薄或表面硬度值较大的材料的硬度。维氏硬度试验测定的硬度为 $0\sim 1\,000\text{ HV}$,且连续性好,准确性高,弥补了布氏硬度因压头变形不能测高硬度材料及洛氏硬度受试验载荷与压头直径比的约束而硬度值不能换算的不足。

(5)冲击韧性。强度、塑性、硬度都是在静载荷作用下测量的静态力学性能指标。许多零部件和工具在使用中要受到冲击载荷的作用,冲击载荷就是以很大的速度作用于工件上的载荷。

材料抵抗冲击载荷而不被破坏的能力称为冲击韧性,用 a_k 表示。一般采用一次冲击弯曲试验测定材料的冲击韧性。由于在冲击载荷作用下材料的塑性变形得不到充分发展,为了灵敏地反映出材料的冲击韧性,通常采用带缺口的试样进行试验。标准冲击试样有两种,一种是 U 型试样,另一种是 V 型试样。同一条件下同一材料制作的两种试样,其 U 型试样的冲击韧性明显大于 V 型试样的冲击韧性,所以这两种试样的冲击韧性不能相互比较。国家标准规定的一次冲击弯曲试样的尺寸及加工要求如图 1-6 所示。

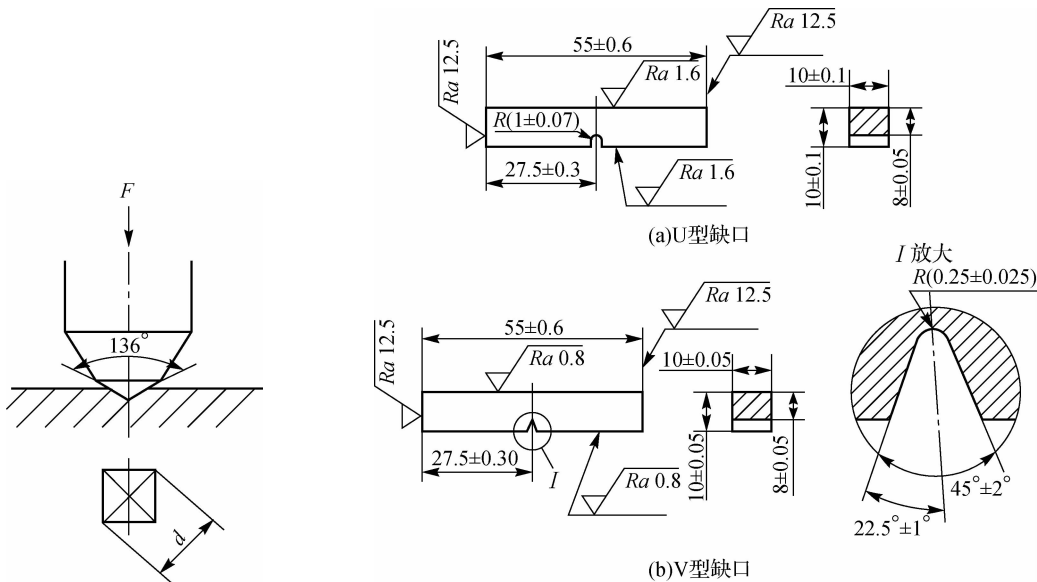


图 1-5 维氏硬度试验原理图

图 1-6 一次冲击弯曲试验试样

冲击韧性试验原理如图 1-7 所示。试验时,将试样放在试验机两支座上。将质量为 m 的摆锤升至一定高度 H_1 ,使它获得的位能为 mgH_1 ;再将摆锤释放,冲断试样后摆锤在另一边的高度为 H_2 ,相应位能为 mgH_2 。冲断试样前后的能量差即为摆锤对冲击试样所做的功,称为冲击吸收功 A_k ,即 $A_k = mgH_1 - mgH_2$,单位为 J。试验时,冲击吸收功的数值可从冲击试验机的刻度盘上直接读出。冲击韧性是指冲断试样时,在缺口处单位面积上所消耗的冲击吸收功,即 $a_k = A_k/S_0$,单位为 J/cm^2 或 kJ/m^2 。

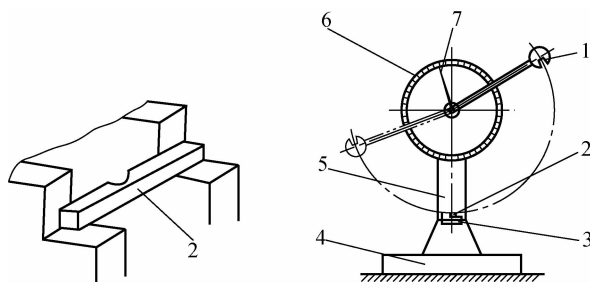


图 1-7 冲击韧性试验原理图

1—摆锤; 2—试样; 3—支座; 4—底座; 5—机身; 6—刻度盘; 7—指针



小提示

实践表明,冲击韧性对材料的一些缺陷很敏感,能够灵敏地反映出材料品质、宏观缺陷和显微组织方面的微小变化,是生产上用来检验冶炼、热加工得到的半成品和成品质量的有效方法之一。

材料的 a_k 值越大,韧性就越好;材料的 a_k 值越小,脆性就越大。研究表明,材料的 a_k 值随试验温度的降低而减小。当温度降至某一数值或范围时, a_k 值会急剧下降,材料则由韧性状态转变为脆性状态,这种转变称为冷脆转变,相应的温度称为冷脆转变温度。材料的冷脆转变温度越低,说明其低温冲击性能越好,允许使用的温度范围越大。因此,对于寒冷地区的桥梁、车辆等机件所用材料,必须进行低温(一般为 $-40\text{ }^\circ\text{C}$)冲击弯曲试验,以防止低温脆性断裂。

(6)疲劳。关于疲劳的内容介绍如下。

①疲劳的概念。许多机械零件(如齿轮、轴、弹簧)是在重复或交变载荷下工作的。交变载荷是指大小或方向随时间而变化的载荷。在交变载荷作用下,即使零件所承受的应力远低于其屈服强度,长时间作用后也会产生裂纹或突然断裂,这种现象称为材料的疲劳。疲劳断裂一般是突然发生,难以观察,危险性大。机械零件的失效 80% 以上属于疲劳破坏。

疲劳断裂的过程是一个损伤积累的过程。起初,在零件的表面或内部存在一些薄弱环节(如微裂纹),随着交变载荷循环次数的增加,裂纹沿零件的某一截面向深处扩展,至某一时刻剩余截面承受不了所受的应力,便会突然断裂。即零件的疲劳断裂过程可分为裂纹产生、裂纹扩展和瞬间断裂三个阶段。

②疲劳强度。在测定材料的疲劳强度时要用较多的试样,在不同循环应力作用下进行试验,作出疲劳曲线(材料所受交变应力 S 与其断裂前的应力循环次数 N_f 的关系曲线),如

图 1-8 所示。

由图 1-8 可以看出, 交变应力值越低, 断裂前的循环次数越多; 当应力降低到某一值后, 曲线近乎水平直线, 这表示当应力低于此值时, 材料可经受无数次应力循环而不断裂。试样承受无数次应力循环或达到规定的循环次数才断裂的最大应力称为材料的疲劳强度。在疲劳强度的试验中, 循环次数不可能无穷大, 因此规定以一定的循环次数作为基数, 超过这个基数就认为不再发生疲劳破坏。常用钢材的循环基数为 10^7 , 有色金属和某些超高强度钢材的循环基数为 10^8 。影响疲劳强度的因素很多, 除设计时在结构上注意减小零件应力集中外, 改善零件表面粗糙度和进行热处理(如高频淬火、表面形变强化、化学热处理以及各种表面复合强化等)也是提高疲劳强度的方法。钢的疲劳强度约为抗拉强度的 40%~50%, 有色金属的疲劳强度约为抗拉强度的 25%~50%。

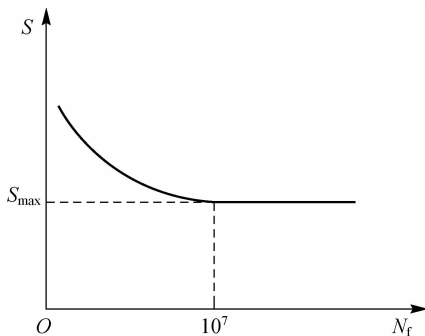


图 1-8 疲劳曲线示意图

2) 物理性能和化学性能

材料的物理、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) 物理性能。工程材料的物理性能包括密度、熔点、导热性、导电性、热膨胀性和磁性等。各种机械零件由于用途不同, 对材料的物理性能要求也有所不同。

① 密度。材料单位体积的质量称为密度。密度是工程材料特性之一, 工程上通常用密度来计算零件毛坯的质量。材料的密度直接关系到由它所制成的零件或构件的重量或紧凑程度, 这对于要求减轻机件自重的航空和宇航工业制品(如飞机、火箭)具有特别重要的意义。用密度小的铝合金制作的零件质量比钢材制作的同样零件的质量轻 $1/4 \sim 1/3$ 。

② 熔点。材料由固态转变为液态时的温度称为熔点。金属都有固定的熔点, 而合金的熔点取决于成分, 例如钢是铁和碳组成的合金, 含碳量不同, 熔点也不同。对于热加工材料, 熔点是制定热加工工艺的重要依据之一, 如铸铁和铸铝熔点不同, 它们的熔炼工艺有较大区别。

③ 导热性。导热性是材料传导热量的性能。导热性是工程上选择保温或热交换材料的重要依据之一, 也是确定机件热处理保温时间的一个参数。如果热处理件所用材料的导热性差, 则在加热或冷却时, 表面与心部会产生较大的温差, 造成不同程度的膨胀或收缩, 进而导致机件破裂。一般来说, 金属材料的导热性远高于非金属材料, 而合金的导热性比纯金属差。

④ 热膨胀性。热膨胀性指材料随温度变化体积发生膨胀或收缩的特性。一般材料都具有热胀冷缩的特点。在工程实际中, 许多场合要考虑热膨胀性。制定热加工工艺时, 应考虑材料热膨胀的影响, 尽量减小工件的变形和开裂等。

⑤ 导电性。材料的导电性常用电阻率来表示, 电阻率表示单位长度、单位面积导体的电阻。电阻率越低, 材料的导电性越好。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。



(2)化学性能。金属及合金的化学性能指它们在室温或高温时抵抗各种介质化学侵蚀的能力,主要有耐蚀性和抗氧化性。

①耐蚀性。腐蚀是材料在外部介质作用下发生失效现象的主要原因。材料抵抗各种介质腐蚀破坏的能力称为耐蚀性。一般来说,非金属材料的耐蚀性高于金属材料。在金属材料中,碳钢、铸铁的耐蚀性较差,而不锈钢、铝合金、铜合金、钛及其合金的耐蚀性较好。

②抗氧化性。材料抵抗高温氧化的能力称为抗氧化性。抗氧化性强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,这类材料的氧化随时间的变化一般遵循抛物线规律,而多孔疏松或挥发性氧化物材料的氧化则遵循直线规律。

耐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。在高温下工作的热能设备(如锅炉、汽轮机、喷气发动机等)上的零件应选择热稳定性好的材料制造;在海水、酸、碱等腐蚀环境中工作的零件,必须采用化学稳定性良好的材料,如化工设备通常采用不锈钢来制造。

2. 工艺性能

工艺性能是指材料适应加工工艺要求的能力。按加工方法的不同,可分为铸造性、可锻性、焊接性、切削加工性及热处理工艺性能等。在设计零件和选择工艺方法时,都要考虑材料的工艺性能,以降低成本,获得质量优良的零件。

(1)铸造性。铸造性是指浇注铸件时,材料能充满比较复杂的铸型并获得优质铸件的能力。对于金属材料而言,评价铸造性好坏的主要指标有金属液体的流动性、收缩率、偏析倾向等。流动性好、收缩率小、偏析倾向小的材料其铸造性也好。一般来说,共晶成分的合金铸造性好。

(2)可锻性。可锻性是指材料是否易于进行压力加工的性能。可锻性的好坏主要以材料的塑性和变形抗力来衡量。

(3)焊接性。焊接性是指材料是否易于焊接在一起并能保证焊缝质量的性能,一般用焊接接头出现各种缺陷的倾向来衡量。低碳钢具有优良的焊接性,而铸铁和铝合金的焊接性很差。

(4)切削加工性。切削加工性是指材料是否易于切削加工的性能。它与材料种类、成分、硬度、韧性、导热性及内部组织状态等许多因素有关。适于切削的材料硬度为160~230 HBW。切削加工性好的材料,切削容易,刀具磨损小,加工表面光洁。



小提示

在金属材料的性能中,力学性能往往是选材的主要标准。但对于某些有特殊性能要求的零件,物理、化学性能又可能成为主要考虑的因素。材料的工艺性能往往也会影响到材料的选择,故在选材时要综合考虑。

学习情境二 金属的晶体结构与结晶

一切物质都是由原子组成的,根据原子在物质内部排列的特征,固态物质可分为晶体与非晶体两类。晶体内部的原子在空间呈一定的规则排列,具有固定的熔点和各向异性。非晶体内部的原子是无规则地堆积在一起的,没有固定的熔点,且具有各向同性。在自然界

中,除少数物质(如普通玻璃、松香、石蜡等)是非晶体外,绝大多数固态无机物都是晶体。

一、晶体结构的基本概念

晶体结构就是晶体内部原子排列的方式及特征。只有研究金属的晶体结构,才能从本质上说明金属性能的差异及变化的实质。

1. 晶格

如果把组成晶体的原子(或离子、分子)看做刚性球体,那么晶体就是由这些刚性球体按一定规律周期性地堆积而成,如图 1-9(a)所示。不同晶体的堆积规律不同。为了研究方便,假设将刚性球体视为处于球心的点,称为结点,用假想的直线将这些结点连接起来所形成的三维空间格架称为晶格,如图 1-9(b)所示。晶格能够直观地表示晶体中原子(或离子、分子)的排列规律。

2. 晶胞

从微观上看,晶体是无限大的。为了便于研究,常从晶格中选取一个能代表晶体原子排列规律的最小几何单元来进行分析,这个最小的几何单元称为晶胞,如图 1-9(c)所示。晶胞在三维空间中重复排列便可构成晶格和晶体。

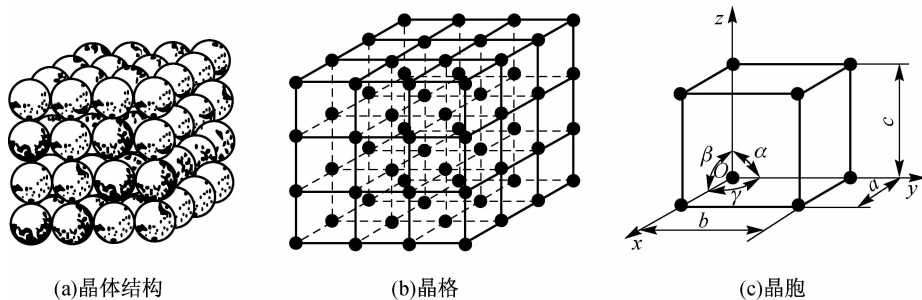


图 1-9 简单立方晶体示意图

3. 常见纯金属的晶格类型

在工业上使用的金属元素中,除了少数具有复杂的晶体结构外,绝大多数都具有比较简单的晶体结构,其中最常见晶体结构有体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格三种类型。

1) 体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞示意图如图 1-10 所示,晶胞的三个棱边长度相等,三个轴间夹角均为 90° 。在立方体的 8 个顶角上各有 1 个与相邻晶胞共有的原子,立方体中心还有 1 个原子。具有体心立方晶格的金属有 α -Fe、Cr、V、W、Mo、Nb 等。

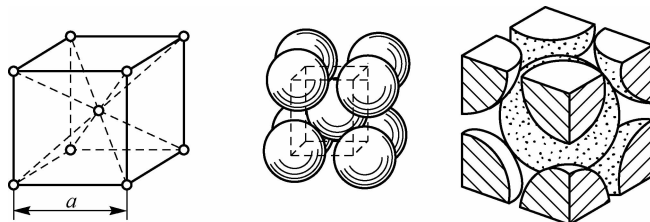


图 1-10 体心立方晶胞示意图



2) 面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞示意图如图 1-11 所示,在晶胞的 8 个顶角上各有 1 个原子,在立方体 6 个面的中心各有 1 个原子。属于这类晶格的金属有 γ -Fe、Al、Cu、Ni、Au、Ag、Pb 等。

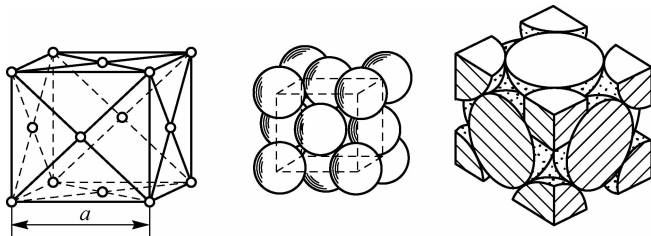


图 1-11 面心立方晶胞示意图

3) 密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞示意图如图 1-12 所示,是一个正六棱柱体,在晶胞的 12 个顶角上各有 1 个原子,上底面和下底面中心各有 1 个原子,晶胞内还有 3 个原子。属于这类晶格的金属有 Mg、Zn、Be、Cd 等。

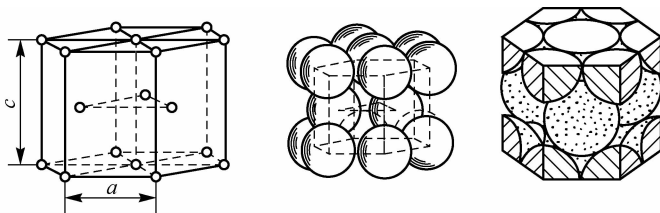


图 1-12 密排六方晶胞示意图

二、纯金属的晶体结构

1. 单晶体和多晶体

在研究金属的晶体结构时,是把晶体看成由原子按一定几何规律作周期性排列而成,晶体内部的晶格位向是完全一致的,这种晶体称为单晶体。在工业生产中,只有经过特殊制作才能获得,如半导体工业中的单晶硅。

实际的金属都是由很多小晶体组成的,这些外形不规则的颗粒状小晶体称为晶粒。晶粒内部的晶格位向是均匀一致的,晶粒与晶粒之间的晶格位向却彼此不同。每一个晶粒相当于一个单晶体。晶粒与晶粒之间的界面称为晶界。这种由许多晶粒组成的晶体称为多晶体,如图 1-13 所示。

多晶体的性能在各个方向是基本一致的,这是由于多晶体中,虽然每个晶粒都是各向异性的,但它们的晶格位向彼此不同,晶体的性能在各个方向相互补充和抵消,再加上晶界的作用,因而表现出各向同性。这种各向同性被称为伪各向同性。

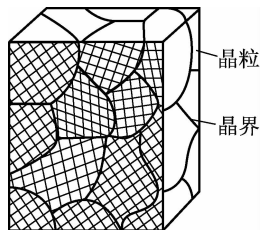


图 1-13 多晶体结构示意图

2. 晶体缺陷

实际金属的晶体结构不像理想晶体那样排列有规则和完整。由于各种因素的作用,晶

体中不可避免地存在着许多偏离规则排列的不完整区域,即晶体缺陷。按晶体缺陷的几何形状,可将晶体缺陷分为点缺陷、线缺陷和面缺陷三种。

1) 点缺陷

点缺陷是指在三维方向上尺寸都很小的,不超过几个原子直径的缺陷。常见的点缺陷有空位、间隙原子和置换原子,如图 1-14 所示。

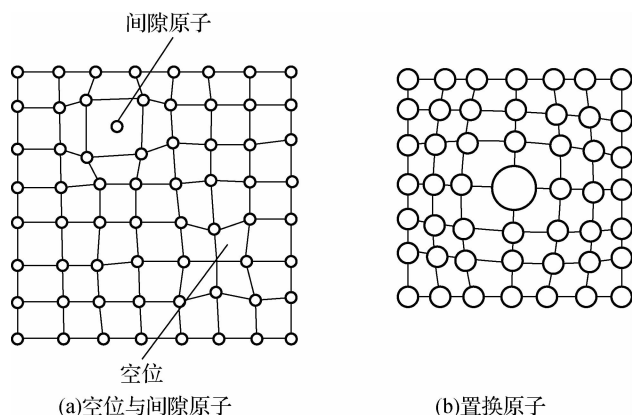


图 1-14 点缺陷示意图

(1)空位。空位是指晶格中某个原子脱离了平衡位置,形成空结点,见图 1-14(a)。

(2)间隙原子。间隙原子是指在晶格节点以外存在的原子,见图 1-14(a)。

(3)置换原子。置换原子是指杂质元素占据金属晶格的结点位置。当杂质原子的半径与金属原子的半径相当或较大时,容易形成置换原子,见图 1-14(b)。

点缺陷的存在破坏了原子的平衡状态,使晶格发生畸变,从而引起性能变化,使金属的电阻率增加,强度、硬度升高,塑性、韧性下降。

2) 线缺陷

线缺陷是指晶体内沿某一条线附近原子的排列偏离了完整晶格所形成的线形缺陷区。常见的线缺陷是线位错。位错是在晶体中某处有一列或若干列原子发生了有规律的错排现象,包括刃型位错和螺型位错两种。刃型位错的示意图如图 1-15 所示。从图中可以看出, $ABCD$ 晶面上沿处像刀刃一样多插入了一层原子面 $EFGH$,使上下层原子不能对准,产生错排,因而称刃型位错。多余原子面的底边 EF 线称为位错线。在位错线附近晶格发生畸变,形成一个应力集中区。在 $ABCD$ 晶面以上一定范围内的原子受到压应力;相反,在 $ABCD$ 晶面以下一定范围内原子受到拉应力。离 EF 线越远,晶格畸变越小。

位错对金属的塑性变形、强度与断裂有很大的影响,增加金属强度的根本原理是想办法阻碍位错的运动。

3) 面缺陷

面缺陷包括晶界和亚晶界。晶界是晶粒与晶粒之间的接触界面,晶界原子由于需要同时适应相邻两个晶粒的位向,故而必须从一种晶粒位向逐步过渡到另一种晶粒位向,成为不同晶粒之间的过渡层,所以晶界上的原子多处于无规则状态或两种晶粒位向的折中位置,如图 1-16 所示。另外,晶粒内部也不是理想晶体,而是由尺寸很小、位向差很小的相互镶嵌的小块组成,称为亚晶粒,尺寸为 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ cm。相邻亚晶粒的交界称为亚晶界,如图 1-17 所示。

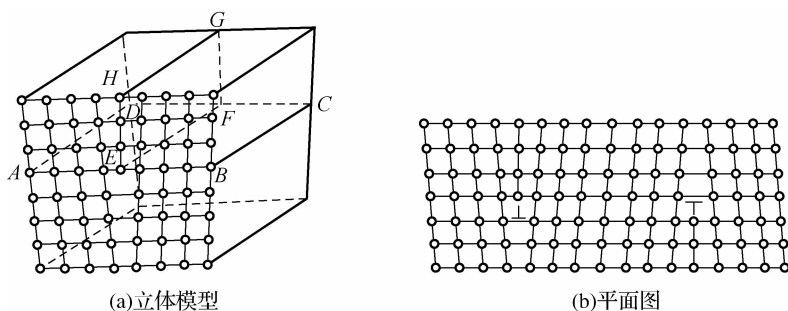


图 1-15 刃型位错示意图

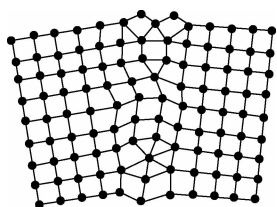


图 1-16 晶界示意图

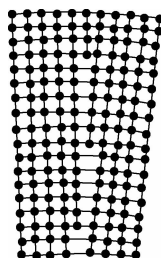


图 1-17 亚晶界示意图

面缺陷是晶体中的不稳定区域,原子处于较高能量状态,它能提高材料的强度和塑性。同时,它对晶体的性能及许多过程均有极其重要的作用。细化晶粒,增大晶界总面积是强化晶体材料力学性能的有效手段。

三、纯金属的结晶

金属自液态经冷却转变为固态的过程是原子从排列不规则的液态转变为排列规则的晶态的过程,此过程称为金属的结晶过程。

纯金属在缓慢冷却时,由于结晶时放出的结晶潜热补偿了冷却时向外散失的热量,故冷却过程中温度不变化,此时的温度称为理论结晶温度。

在实际生产中,金属结晶的冷却速度都很快。因此,金属液的实际结晶温度总是低于理论结晶温度,这种现象称为过冷,两者的温度之差称为过冷度。试验研究证明,金属结晶时的过冷度并不是一个恒定值,与其冷却速度有关。冷却速度越大,过冷度就越大,金属的实际结晶温度就越低。在实际生产中,金属都是在过冷情况下结晶的,过冷是金属结晶的必要条件。

金属的结晶都要经历晶核形成和晶核长大两个过程。

四、合金及合金中的相结构

由两种或两种以上的金属元素或金属元素和非金属元素组成的具有金属特性的物质称为合金。

1. 合金的基本概念

1) 组元

组成合金最基本的、独立的单元称为组元,简称为元。一般来说,组元就是组成合金的



元素或稳定的化合物。例如,黄铜的组元是铜和锌,碳钢的组元是铁和碳,或者是铁和金属化合物 Fe_3C 。由两个组元组成的合金称为二元合金,由三个组元组成的合金称为三元合金。

2) 相

固态合金中的相是合金组织的基本组成部分,它具有一定的晶体结构和性质,具有均匀的化学成分。

合金的组织可以由一种或多种相组成,相与相之间由界面隔开,越过界面,结构与性质都会发生突变。如铁碳合金在固态下有铁素体、奥氏体和渗碳体等基本相。

3) 合金系

由给定的组元可以配制成一系列成分不同的合金,这些合金组成一个合金系统,称为合金系。

4) 组织

组织是指用肉眼或借助各种不同放大倍数的显微镜所观察到的金属材料内部的情景,包括晶粒的大小、形状、种类以及各种晶粒之间的相对数量和相对分布。

合金的性质取决于它的组织,而组织的性质又首先取决于其组成相的性质。因此,由不同相组成的组织具有不同的性质。为了解合金的组织与性能,有必要首先了解合金的固态相结构及其性质。

在液态下,大多数合金的组元均能相互溶解,成为均匀的液体,因而只有液相。在凝固以后,由于各组元的晶体结构、原子结构等不同,各组元之间的相互作用也不同,因此,在固态合金中就可能出现不同的相结构。

2. 固态合金中的基本相

按晶格结构的基本属性,固态合金中的相可以分为固溶体和金属化合物两大类。

1) 固溶体

合金结晶时,组元之间相互溶解所形成固相的晶体结构与组成合金的某一组元相同,这种固相称为固溶体。保持原有晶格的组元称为溶剂,而其他组元称为溶质。

在一定的温度和压力下,溶质在固溶体中的极限浓度称为溶解度。溶解度一般与温度和压力有关。根据溶质原子在溶剂晶格中位置的不同,固溶体可分为置换固溶体和间隙固溶体。

一般说来,固溶体的强度、硬度总比组成它的纯金属的平均值高,随着溶解度的增加,固溶体的强度、硬度也随之提高。固溶体的塑性和韧性指标(如伸长率、断面收缩率和冲击韧度等)比组成它的纯金属的平均值稍低,但比一般化合物高得多。因此,固溶体具有比纯金属和化合物更为优越的综合力学性能。各种金属材料大多是以固溶体作为基体的。通过溶入溶质原子形成固溶体而使金属的强度、硬度升高的现象称为固溶强化。

2) 金属化合物

金属化合物是合金组元按一定比例发生相互作用而形成的一种新相,又称为中间相,其晶格类型及性能均不同于任一组元。

金属化合物一般具有熔点高、硬度高、脆性大的性能特点,当合金中存在金属化合物时,将使合金的强度、硬度及耐磨性提高,塑性降低。因此,金属化合物是结构材料及工具材料的重要组成相。

根据形成条件及结构特点,金属化合物可分为正常价化合物、电子化合物和间隙化合物。

3. 合金相图的基础知识

合金结晶后得到何种组织与合金的成分、结晶过程等因素有关。与纯金属的结晶相比,合金的结晶有如下特点:一是合金的结晶在很多情况下是在一个温度范围内完成的;二是合金的结晶不仅会发生晶体结构的变化,还会伴有成分的变化。

相图是表示合金系中合金的状态与温度、成分之间关系及变化规律的图解,是表示合金系在平衡条件下,在不同温度和成分时各相关系的图解。因此,相图又称为状态图或平衡图。所谓平衡,也称为相平衡,是指合金在相变过程中,原子能充分扩散,各相成分的相对质量保持稳定,不随时间改变的状态。在实际的加热或冷却过程中,控制得十分缓慢的加热或冷却速度,就可以认为接近相平衡条件。

相图是研究合金材料十分重要的工具。相图可以表示不同成分的合金在不同温度下的相的组成,以及合金在加热或冷却过程中可能发生的转变等。相图有二元合金相图、三元合金相图和多元合金相图,其中应用最广的是二元合金相图。

下面介绍二元合金相图的相关知识。

1) 二元匀晶相图

两组元在液态和固态下均能无限互溶时所构成的相图称为二元匀晶相图。二元匀晶相图是最简单的二元相图,Cu-Ni、Ag-Au、Fe-Cr、Fe-Ni、Cr-Mo、Mo-W 等合金都形成二元匀晶相图。在这类合金中,结晶时都由液相结晶出单相的固溶体。这种从液相中结晶出单一固相的过程称为匀晶转变或匀晶反应。Cu-Ni 二元匀晶相图如图 1-18 所示。

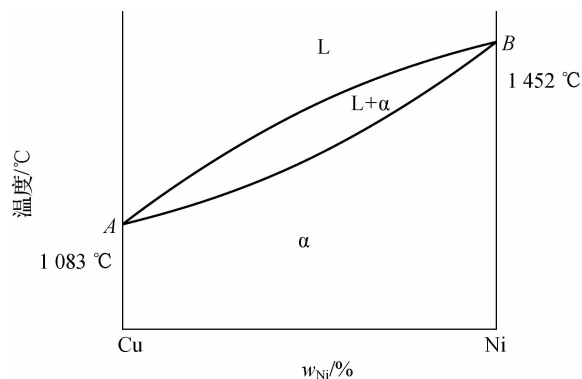


图 1-18 Cu-Ni 二元匀晶相图

2) 二元共晶相图

组成合金的两组元在液态时无限互溶,固态时有限互溶,结晶时发生共晶转变的合金系所形成的二元合金相图称为二元共晶相图。Pb-Sn、Pb-Sb、Ag-Cu、Al-Si 合金相图均属于这类相图。Pb-Sn 二元共晶相图如图 1-19 所示。

图 1-19 中, t_A 为 Pb 的熔点, t_B 为 Sn 的熔点, E 点为共晶点。 AEB 线为液相线, $ACEDB$ 线为固相线, CED 线为共晶线。 CF 线为 Sn 在 Pb 中的溶解度曲线, DG 线为 Pb 在 Sn 中的溶解度曲线,这两条曲线也称为固溶线。

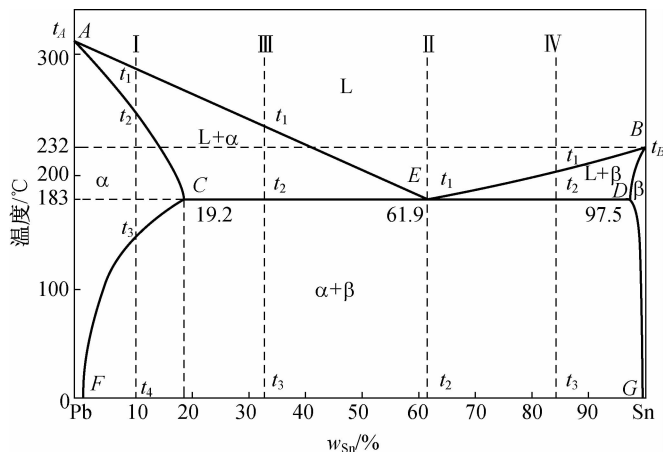
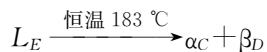


图 1-19 Pb-Sn 二元共晶相图

Pb-Sn 合金系有 3 个基本相, L 是 Pb 与 Sn 两组元形成的均匀液相, α 是 Sn 溶于 Pb 的固溶体, β 是 Pb 溶于 Sn 的固溶体。Pb-Sn 二元共晶相图中有 3 个单相区, 即 L、 α 、 β 相区。在这些单相区之间, 相应的有 3 个两相区, 即 L+ α 、L+ β 、 α + β 相区。在 3 个两相区之间有一段水平线 CED, 是 L+ α + β 三相并存区。

成分位于 E 点的合金, 在温度达到水平线 CED 所对应的温度($t_E = 183\text{ }^\circ\text{C}$)时, 将同时结晶出成分为 C 点的 α 相及成分为 D 点的 β 相。其转变式为



这种在一定温度下, 由一定成分的液相同时结晶出一定成分的两个固相的转变过程, 称为共晶转变或共晶反应。共晶转变的产物 $\alpha_C + \beta_D$ 是由两个固相组成的机械混合物, 称为共晶组织。

成分在 C 点至 D 点之间的所有合金在共晶温度时都要发生共晶反应。成分位于 E 点以左、C 点以右的合金称为亚共晶合金, 成分位于 E 点以右、D 点以左的合金称为过共晶合金。

此外, 二元合金在冷却过程中还可能发生其他类型的转变, 如共析转变、包晶转变等。

学习情境三 铁碳合金

铁碳合金相图是研究钢铁材料的理论基础。钢铁材料是现代机械制造工业中应用最广泛的金属材料, 它们是由铁和碳为主构成的铁碳合金。为了合理地选用这些材料, 必须掌握铁碳合金的成分、组织结构与性能之间的关系。铁碳合金相图是研究铁碳合金最基本的工具。熟悉铁碳合金相图, 对于研究碳钢和铸铁的成分、组织及性能之间的关系, 钢铁材料的使用, 各种热加工工艺的制定及工艺废品产生原因的分析等, 都具有重要的指导意义。

一、纯铁的同素异构转变

铁在结晶后继续冷却至室温的过程中, 将发生两次晶格转变, 其转变过程如图 1-20 所示。从图 1-20 可以看出, 液态纯铁在 $1\ 538\text{ }^\circ\text{C}$ 开始结晶形成具有体心立方晶格的 δ -Fe。 δ -Fe 继续冷却到 $1\ 394\text{ }^\circ\text{C}$ 发生同素异构转变, 形成具有面心立方晶格的 γ -Fe。 γ -Fe 再继续冷却到 $912\text{ }^\circ\text{C}$ 时又发生同素异构转变, 形成具有体心立方晶格的 α -Fe。

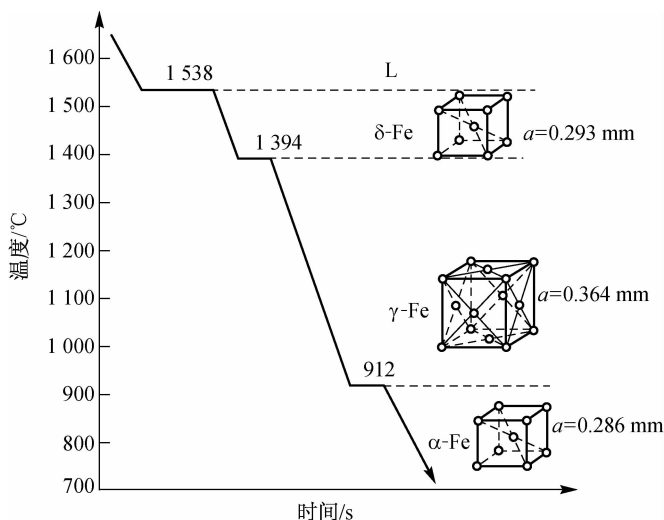


图 1-20 纯铁的同素异构转变冷却曲线

二、铁碳合金的基本组织

铁碳合金在液态时铁和碳可以无限互溶；在固态时根据含碳量的不同，碳可以溶解在铁中形成固溶体，也可以与铁形成化合物，或者形成固溶体与化合物组成机械混合物。铁碳合金在固态下会出现以下几种基本组织。

1. 铁素体

铁素体是碳溶于 $\alpha\text{-Fe}$ 中形成的间隙固溶体，用 F 或 α 表示。铁素体中碳的质量分数很低，在 727 °C 时，其碳的质量分数达到最大，为 0.021 8%，随着温度的降低，其溶解度逐渐减小，室温时，碳的质量分数约为 0.000 8%。

铁素体在室温时的力学性能与纯铁极相近，即塑性、韧性好 ($A=30\%\sim 50\%$)，强度、硬度很低 ($R_{\text{eH}}=180\sim 280\text{ MPa}$)。

2. 奥氏体

奥氏体是碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的间隙固溶体，用 A 或 γ 表示。奥氏体中碳的质量分数较高，在 1 148 °C 时，其碳的质量分数为 2.11%。随着温度降低，其溶解度也减小，在 727 °C 时，碳的质量分数为 0.77%。

奥氏体的强度、硬度低，塑性、韧性好。在铁碳合金处于平衡状态时，奥氏体为高温下存在的基本相，也是绝大多数钢种进行锻压、轧制等压力加工所要求的组织。

3. 渗碳体

渗碳体是铁与碳形成的间隙化合物，用 Fe_3C 表示，属于斜方晶格，其碳的质量分数为 6.69%，熔点为 1 227 °C，硬度很高，塑性、韧性几乎为零，极脆。渗碳体是碳钢中的主要强化相，它的数量、形状、大小和分布对钢的性能有很大的影响。

渗碳体是亚稳定化合物，在一定的条件下，可以分解而形成石墨状态的自由碳。

4. 珠光体

珠光体是铁素体与渗碳体的机械混合物，用 P 表示，其碳的质量分数为 0.77%。珠光



体由渗碳体片和铁素体片相间组成,其性能介于铁素体和渗碳体之间,强度较高,硬度适中,脆性不大。

5. 莱氏体

莱氏体是奥氏体和渗碳体的机械混合物,用 L_d 表示,其含碳量为 4.3%。高温莱氏体是由碳的质量分数为 4.3% 的金属液体在 1 148 °C 时发生共晶反应的产物,在室温时变为低温莱氏体,用 L_d' 表示。莱氏体硬度很高,塑性很差。

三、Fe-Fe₃C 相图

铁碳合金相图是研究铁碳合金的基础。 $w_c > 6.69\%$ 的铁碳合金脆性极大,没有使用价值,而 Fe₃C 可以作为一个独立的组元,因此,所研究的铁碳合金相图实际上是简化的 Fe-Fe₃C 相图,如图 1-21 所示。

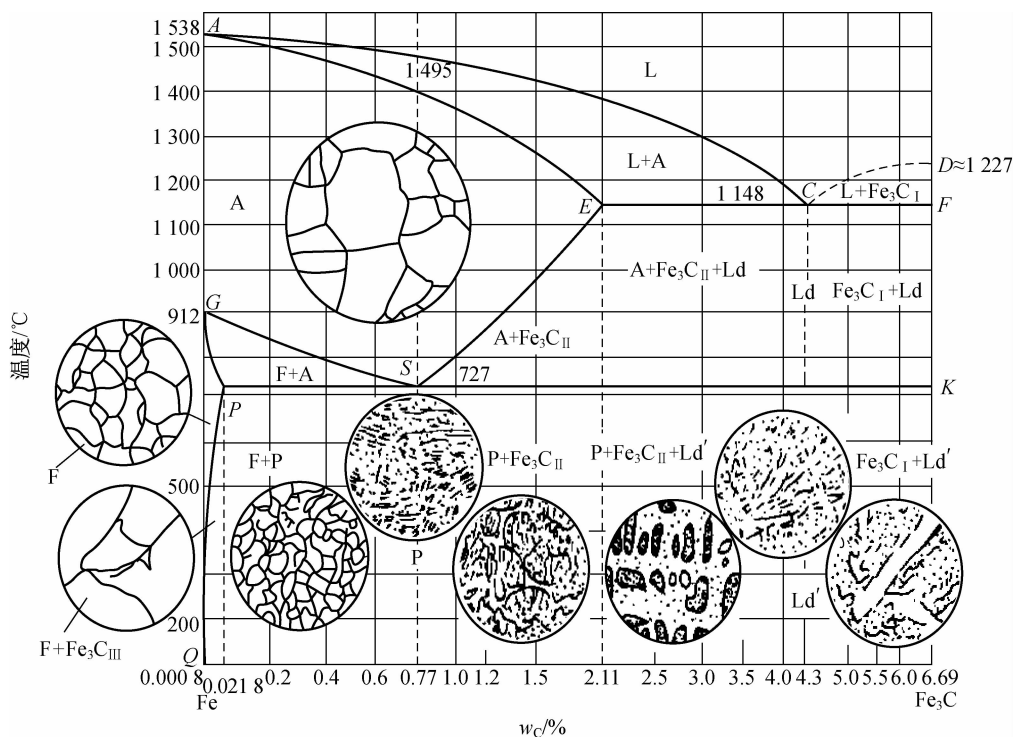


图 1-21 简化后的 Fe-Fe₃C 相图及其室温组织图

1. Fe-Fe₃C 相图中的特征点

Fe-Fe₃C 相图中的特征点见表 1-3。

表 1-3 Fe-Fe₃C 相图的特征点

特征点	温度/°C	含碳量 w_c /%	含 义
A	1 538	0	纯铁的熔点
C	1 148	4.3	共晶点

续表

特征点	温度 $t/^\circ\text{C}$	含碳量 $w_{\text{C}}/\%$	含 义
<i>D</i>	1 227	6.69	渗碳体的熔点
<i>E</i>	1 148	2.11	碳在 $\gamma\text{-Fe}$ 中的最大溶解度点
<i>F</i>	1 148	6.69	共晶渗碳体成分点
<i>G</i>	912	0	纯铁的同素异构转变点
<i>P</i>	727	0.021 8	碳在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的最大溶解度点
<i>S</i>	727	0.77	共析点

2. Fe-Fe₃C 相图的特征线

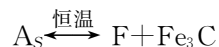
(1) *ACD* 线。*ACD* 线为液相线,该线以上的合金为液态,合金冷却至该线以下便开始结晶。其中 *AC* 为液相转变成奥氏体的开始线,*CD* 为液相析出一次渗碳体的开始线。

(2) *AECF* 线。*AECF* 线为固相线,该线以下合金为固态,加热时温度达到该线,合金开始熔化。其中 *AE* 线为液相转变成奥氏体的终了线;*ECF* 线为共晶线,即具有共晶成分 ($w_{\text{C}}=4.3\%$) 的液相在 1 148 $^\circ\text{C}$ 时,发生共晶反应,析出奥氏体与渗碳体,其反应方程式为



凡碳的质量分数大于 2.11% 而小于 6.69% 的铁碳合金在 *ECF* 线上都发生共晶反应,其中的渗碳体称为共晶渗碳体。

(3) *PSK* 线。*PSK* 线为共析线,也称为 *A₁* 线,即具有共析成分 ($w_{\text{C}}=0.77\%$) 的奥氏体在共析温度 727 $^\circ\text{C}$ 时,要同时析出铁素体和渗碳体的机械混合物,其反应方程式为



凡碳的质量分数大于 0.021 8% 的铁碳合金在 *PSK* 线上都发生共析反应,其中的渗碳体称为共析渗碳体。

(4) *ES* 线。*ES* 线为碳在奥氏体中的固溶线,通常称为 *A_{cm}* 线。从该线可以看出,奥氏体的最大溶碳量在 1 148 $^\circ\text{C}$ 时为 2.11%,而在 727 $^\circ\text{C}$ 时仅为 0.77%。因此,凡碳的质量分数大于 0.77% 的铁碳合金从 1 148 $^\circ\text{C}$ 冷却到 727 $^\circ\text{C}$ 时,就有渗碳体从奥氏体中析出,称为二次渗碳体(用 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$ 表示)析出。

(5) *GS* 线。*GS* 线是冷却时由奥氏体析出铁素体的开始线,通常称为 *A₃* 线。

(6) *GP* 线。*GP* 线是冷却时奥氏体转变成铁素体的终了线。

(7) *PQ* 线。*PQ* 线是碳在铁素体中的固溶线。从该线可看出,铁素体的最大溶碳量在 727 $^\circ\text{C}$ 时为 0.021 8%,而在室温下仅为 0.000 8%,几乎不溶碳。因此,凡铁碳合金从 727 $^\circ\text{C}$ 冷却到室温时,均会从铁素体中析出渗碳体,称为三次渗碳体(用 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{III}}$ 表示)。因为其数量很少,所以一般不考虑。

3. Fe-Fe₃C 相图中的特征相区

Fe-Fe₃C 相图由上述的特征线分成了若干个相区。

(1) 三个单相区。*ACD* 以上为液相区,*AESGA* 为奥氏体区,*GPQG* 为铁素体区。

(2) 五个两相区。*AECA* 为液相加奥氏体区,*CFDC* 为液相加渗碳体区,*GSPG* 为奥氏体加铁素体区,*ESKF* 为奥氏体加渗碳体区,*PQKS* 为铁素体加渗碳体区。

1. 共析钢的结晶过程分析

图 1-22 中,合金 I 是共析钢($w_C=0.77\%$),其结晶过程如图 1-23 所示。S 点成分的液态钢合金缓冷至点 1 温度时,其成分垂线与液相线相交,于是从液体中开始结晶出奥氏体。在 1~2 点温度间,随着温度的下降,奥氏体量不断增加,其成分沿 AE 线变化,而液相的量不断减少,其成分沿 AC 线变化。当温度降至点 2 时,合金的成分垂线与固相线相交,此时合金全部结晶成奥氏体,在 2~3 点温度之间是奥氏体的简单冷却过程,合金的成分、组织均不发生变化。当温度降至点 3(727 °C)时,将发生共析反应。

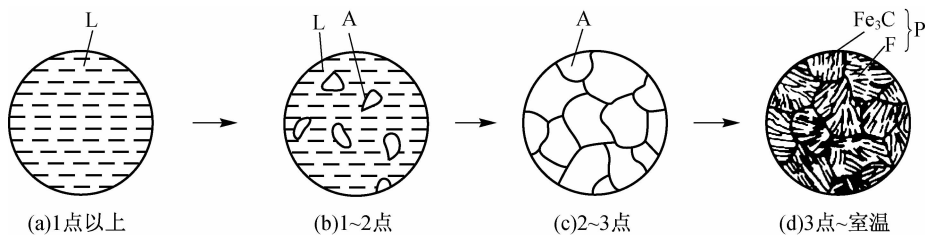


图 1-23 共析钢结晶过程示意图

随着温度的继续下降,铁素体的成分将沿着溶解度曲线 PQ 变化,并析出三次渗碳体(数量极少,可忽略不计)。因此,共析钢的室温平衡组织全部为珠光体,其显微组织如图 1-24 所示。

2. 亚共析钢的结晶过程分析

亚共析钢为图 1-22 中的合金 II,其结晶过程如图 1-25 所示。亚共析钢在 1~2 点温度间按匀晶转变结晶出奥氏体。含碳量为 0.09%~0.53% 的亚共析钢冷却到 2 点温度时,在恒温下发生包晶反应,产生奥氏体。包晶反应结束时还有剩余的液相存在,冷却至 2~3 点温度间液相继续变为奥氏体,所有的奥氏体成分均沿 AE 线变化。在 3~4 点温度间,组织不发生变化。当缓慢冷却至 4 点时,此时由奥氏体析出铁素体。随着温度的下降,奥氏体和铁素体的成分分别沿 GS 和 GP 线变化。当温度降至 4 点(727 °C)时,铁素体的成分变为 P 点成分($w_C=0.0218\%$),奥氏体的成分变为 S 点成分($w_C=0.77\%$),此时,剩余奥氏体发生共析反应转变成珠光体,而铁素体不变化。从 4 点温度继续冷却至室温,可以认为合金的组织不再发生变化。因此,亚共析钢的室温组织为铁素体和珠光体(F+P)。碳的质量分数为 0.4% 的亚共析钢的显微组织如图 1-26 所示,其中白色块状为铁素体,暗色的片层状为珠光体。



图 1-24 共析钢的室温平衡组织(500×)

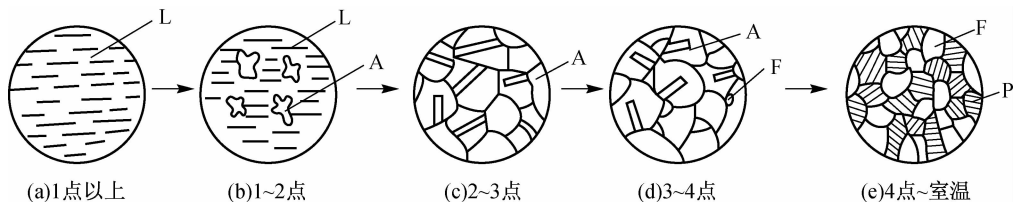


图 1-25 $w_C=0.4\%$ 的亚共析钢的结晶过程示意图

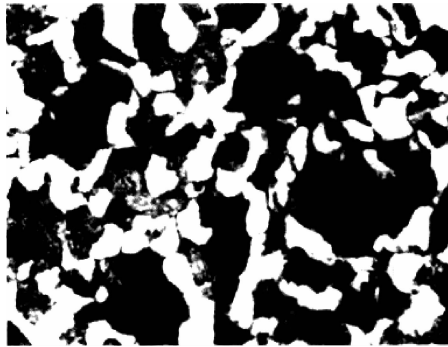


图 1-26 亚共析钢的室温平衡组织(500×)

3. 过共析钢的结晶过程分析

过共析钢为图 1-22 中的合金 III，其结晶过程如图 1-27 所示。过共析钢在 1~3 点温度间的结晶过程与共析钢相似。当缓慢冷却至 3 点时，合金的成分垂线与 ES 线相交，此时由奥氏体开始析出二次渗碳体。随着温度的下降，奥氏体成分沿 ES 线变化，且奥氏体量越来越少，二次渗碳体的相对量不断增加。当温度降至 4 点(727 °C)时， $w_C=0.77\%$ 的奥氏体的成分变为 S 点成分，此时，剩余奥氏体发生共析反应转变成珠光体，而二次渗碳体不变化。从 4 点温度继续冷却至室温，合金的组织不再发生变化。因此，过共析钢的室温组织为二次渗碳体和珠光体($Fe_3C_{II} + P$)。

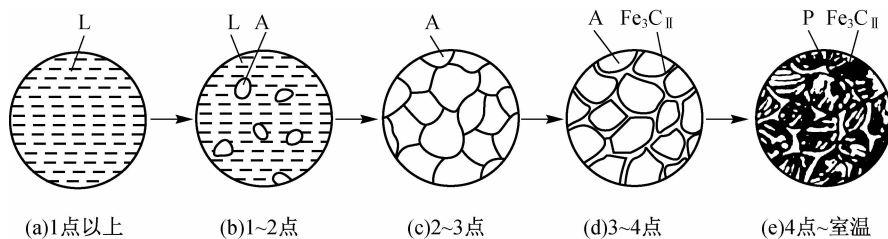


图 1-27 过共析钢的结晶过程示意图

图 1-28 所示为 $w_C=1.2\%$ 的亚共析钢的显微组织，其中 Fe_3C_{II} 呈白色的细网状，它分布在片层状珠光体的周围。

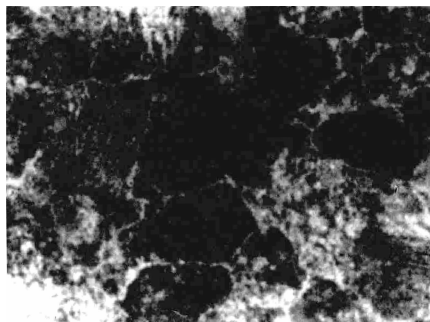


图 1-28 $w_C=1.2\%$ 的过共析钢的室温平衡组织(400×)

4. 共晶白口铸铁的结晶过程分析

共晶白口铸铁合金为图 1-22 中的合金 IV, 其结晶过程如图 1-29 所示。共晶铁碳合金冷却至 1 点共晶温度 ($1\ 148\ ^\circ\text{C}$) 时, 将发生共晶反应生成莱氏体 Ld, 在 1~2 点温度间, 随着温度降低, 莱氏体中的奥氏体成分沿 ES 线变化, 并析出二次渗碳体 (它与共晶渗碳体连在一起, 在金相显微镜下难以分辨)。随着二次渗碳体的析出, 奥氏体的含碳量不断下降, 当温度降至 2 点 ($727\ ^\circ\text{C}$) 时, 莱氏体中的奥氏体中碳的质量分数达到 0.77%, 此时, 奥氏体发生共析反应转变为珠光体, 于是莱氏体也相应地转变为低温莱氏体 $\text{Ld}'(\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}} + \text{Fe}_3\text{C})$ 。因此, 共晶白口铸铁的室温组织为低温莱氏体。

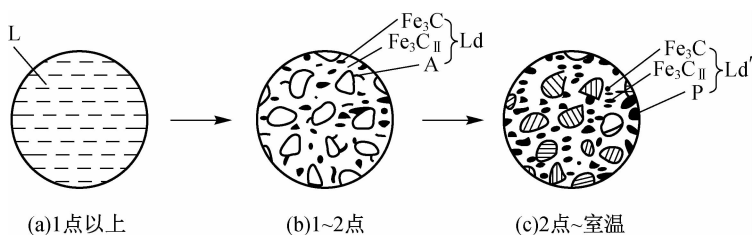


图 1-29 共晶白口铸铁的结晶过程示意图

图 1-30 所示为共晶白口铸铁的显微组织, 其中珠光体呈黑色的斑点状或条状, 渗碳体呈白色的基体。

5. 亚共晶白口铸铁的结晶过程分析

亚共晶白口铸铁合金为图 1-22 中的合金 V, 其结晶过程如图 1-31 所示。1 点温度以上为液相, 当合金冷却至 1 点温度时, 从液体中开始结晶出初生奥氏体。在 1~2 点温度间, 随着温度的下降, 奥氏体不断增加, 液体的量不断减少, 液相的成分沿 AC 线变化, 奥氏体的成分沿 AE 线变化。当温度至 2 点 ($1\ 148\ ^\circ\text{C}$) 时, 剩余液体发生共晶反应生成 Ld ($\text{A} + \text{Fe}_3\text{C}$), 而初生奥氏体不发生变化。2~3 点温度间, 随着温度降低, 奥氏体的含碳量沿 ES 线变化, 并析出二次渗碳体。当温度降至 3 点 ($727\ ^\circ\text{C}$) 时, 奥氏体发生共析反应转变为珠光体 P, 从 3 点温度冷却至室温, 合金的组织不再发生变化。因此, 亚共晶白口铸铁室温组织为 $\text{P} + \text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}} + \text{Ld}'$ 。如图 1-32 所示, 黑色带树枝状特征的是 P, 分布在 P 周围的白色网状的是 $\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$, 具有黑色斑点状特征的是 Ld' 。

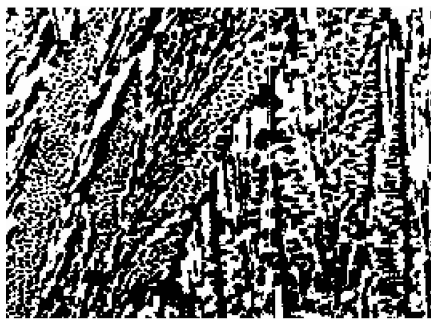


图 1-30 共晶白口铸铁的显微组织 (250×)

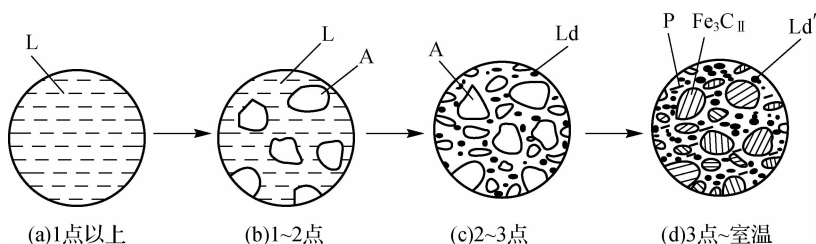


图 1-31 $w_{\text{C}} = 3.0\%$ 的亚共晶白口铸铁的结晶过程示意图

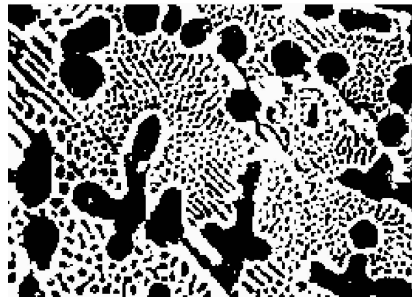


图 1-32 $w_C=3.0\%$ 的亚共晶白口铸铁的室温平衡组织(200×)

6. 过共晶白口铸铁的结晶过程分析

过共晶白口铸铁为图 1-24 中的合金 VI，结晶过程如图 1-33 所示。1 点温度以上为液相，当合金冷却至 1 点温度时，从液体中开始结晶出一次渗碳体。在 1~2 点温度间，随着温度的下降，一次渗碳体不断增加，液体的量不断减少，当温度至 2 点(1 148 °C)时，剩余液体的成分变为 C 点成分($w_C=4.3\%$)，发生共晶反应生成 Ld(A+Fe₃C)，而一次渗碳体不发生变化。在 2~3 点温度间，莱氏体中的奥氏体的含碳量沿 ES 线变化，并析出二次渗碳体。当温度降至 3 点(727 °C)时，奥氏体中碳的质量分数达到 0.77%，发生共析反应转变为珠光体 P，从 3 点温度冷却至室温，合金的组织不再发生变化。因此，过共晶白口铸铁的室温组织为 Fe₃C_I+Ld'。图 1-36 所示为过共晶白口铸铁的显微组织，图中白色带状的是 Fe₃C_I，具有黑色斑点状特征的是 Ld'。

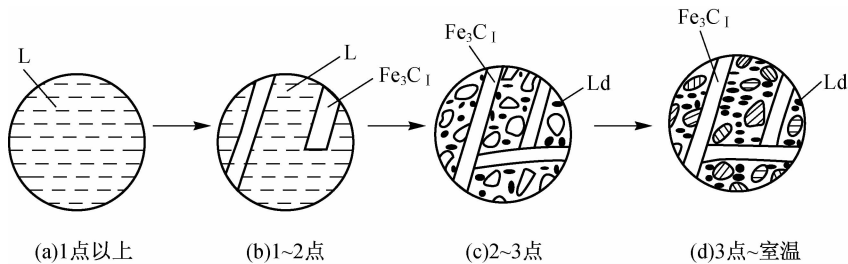


图 1-33 $w_C=5.0\%$ 的过共晶白口铸铁的结晶过程示意图



图 1-34 $w_C=5.0\%$ 的过共晶白口铸铁的室温平衡组织

五、含碳量对铁碳合金组织和性能的影响

1. 含碳量对铁碳合金组织的影响

从图 1-21 可以看出,随着碳的质量分数的增加,铁碳合金平衡组织成分发生了相应的变化。其变化规律为铁素体—铁素体+珠光体—珠光体—珠光体+二次渗碳体—珠光体+二次渗碳体+低温莱氏体—低温莱氏体—低温莱氏体+一次渗碳体。

除了平衡组织发生变化外,随着碳的质量分数的增加,铁碳合金的组织形态也发生了变化。例如铁素体 F,从奥氏体 A 中析出的铁素体 F 一般呈块状;而经共析转变形成的珠光体 P 中的铁素体 F 则呈片状。又如渗碳体 Fe_3C ,一次渗碳体 Fe_3C_I 直接从液相 L 中析出,呈长条状;二次渗碳体 Fe_3C_{II} 从奥氏体 A 中析出,沿边界呈网状;三次渗碳体 $\text{Fe}_3\text{C}_{III}$ 从铁素体 F 中析出,沿边界呈小片状或粒状;共晶渗碳体在莱氏体 Ld 中为连续的基体;共析渗碳体同铁素体 F 交互形成,呈交替片状。铁碳合金这种复杂的组织形态决定了其性能变化也具有复杂性。

2. 含碳量对力学性能的影响

铁碳合金的力学性能受含碳量的影响很大,含碳量的多少直接决定着铁碳合金中铁素体和渗碳体的相对比例。含碳量越高,渗碳体的相对质量越大。由于铁素体是软韧相,而渗碳体是硬脆的强化相,所以渗碳体含量越大,分布越均匀,材料的硬度和强度越高,塑性和韧性越低;但当渗碳体以网状形态分布在晶界或作为基体存在时,会使铁碳合金的塑性和韧性大为下降,且强度也随之降低。这就是平衡状态的过共析钢和白口铸铁脆性高的原因。

3. 含碳量对工艺性能的影响

1) 铸造性

铸铁的流动性比钢好,易于铸造,特别是靠近共晶成分的铸铁,其结晶温度低,流动性好,铸造性最好。从相图上看,结晶温度越高,结晶温度区间越大,越容易形成分散缩孔和偏析,铸造性就越差。

2) 可锻性

低碳钢比高碳钢可锻性好。由于钢加热到呈单相奥氏体状态时,塑性好、强度低,便于塑性变形,所以一般锻造都在奥氏体状态下进行。

3) 焊接性

含碳量越低,钢的焊接性越好,因此,低碳钢比高碳钢更容易焊接。

4) 切削加工性

含碳量过高或过低,都会降低钢的切削加工性能。一般认为中碳钢的塑性适中,硬度为 160~230 HBW 时,切削加工性最好。

学习情境四 钢的热处理

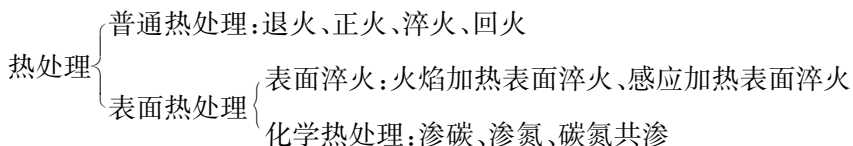
在机床制造中,60%~70%的零件需要进行热处理。在汽车、拖拉机制造中,需要经过热处理的零件占 70%~80%。至于刀具、量具、模具和滚动轴承等,则要 100%进行热处理。随着工业和科技的发展,热处理在改善和强化金属材料、提高产品质量、节省材料和提高经



济效益等方面将发挥更大的作用。

钢的热处理是指将钢在固态下进行加热、保温和冷却,以改变其内部组织,从而获得所需性能的一种工艺方法。热处理的主要目的是改善钢的工艺性能和提高钢的使用性能,因此,机械制造业中大多数的机器零件都要经过热处理,以提高产品的质量和使用寿命。

钢的热处理的种类很多,根据加热和冷却方法不同,大致分类如下。



热处理的种类虽然很多,但一般是由加热、保温和冷却三个阶段组成。因此,要了解各种热处理方法对钢的组织性能的影响,必须研究钢在加热(包括保温)和冷却过程中的相变规律。

研究钢在加热和冷却时的相变规律是以 Fe-Fe₃C 相图为基础的。Fe-Fe₃C 相图的临界点 A₁、A₃、A_{cm}是碳钢在极其缓慢地加热或冷却的情况下测定的。但在实际生产中,加热和冷却并非如此,因此,钢的相变过程不可能在平衡临界点进行,即存在过冷过热现象。相变温度升高和降低的幅度随加热和冷却速度的增大而增大。

通常实际加热时各临界点标下角 c,即 A_{c1}、A_{c3}、A_{cm};冷却时标下角 r,即 A_{r1}、A_{r3}、A_{rcm},如图 1-35 所示。

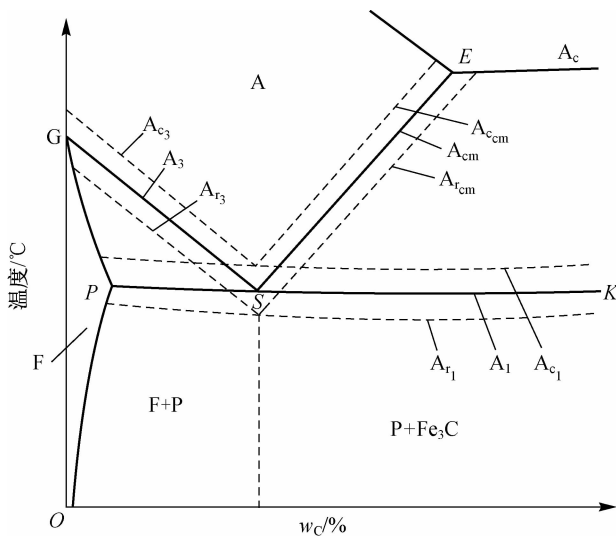


图 1-35 铁碳合金实际加热或冷却时转变温度变化图

一、钢在加热时的转变

钢加热到 A_{c1} 以上时会发生珠光体向奥氏体的转变,加热到 A_{c3} 和 A_{cm} 以上,保温足够时间便会全部转变为奥氏体。热处理加热的目的是获得均匀的奥氏体组织,因此,这种加热转变的过程称为钢的奥氏体化。

1. 奥氏体化过程

钢加热时奥氏体的形成遵循形核和长大的基本规律。以共析钢(碳的质量分数为 0.77%)为例,奥氏体的转变过程可分为四个阶段,即奥氏体晶核形成、奥氏体晶核长大、残余渗碳体溶解以及奥氏体成分均匀化,如图 1-36 所示。

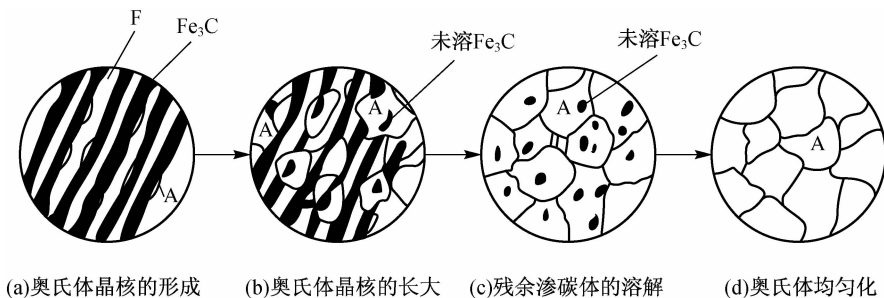


图 1-36 共析钢的奥氏体化过程示意图

珠光体是由铁素体和渗碳体两相片层交替组成的,奥氏体优先在铁素体和渗碳体的界面处形成晶核;通过原子的扩散奥氏体晶粒不断向铁素体和渗碳体两边长大,直至铁素体全部转变为奥氏体为止;铁素体优先转变为奥氏体后,还有一部分渗碳体残留下来,被奥氏体包围,这部分残余的渗碳体在保温过程中,通过碳的扩散继续溶于奥氏体,直至全部消失;渗碳体刚全部溶解时,奥氏体中原先属于渗碳体的部位含碳量较高,属于铁素体的部位含碳量较低,随着保温时间的延长,通过碳原子的扩散,奥氏体的含碳量逐渐趋于均匀。

亚共析钢和过共析钢的奥氏体的形成过程与共析钢基本相同,但其完全奥氏体化的过程则有所不同。亚共析钢加热到 A_{c1} 以上时还存在着自由铁素体,这部分铁素体只有继续加热到 A_{c3} 以上时,才能全部转变为奥氏体;过共析钢则只有加热到 A_{cm} 以上时,才能获得单一的奥氏体组织。

2. 影响奥氏体晶粒长大的因素

奥氏体晶粒的大小对后续的冷却转变以及转变产物的性能有重要的影响。影响奥氏体晶粒大小的因素主要有以下几个方面。

1) 加热温度、保温时间和加热速度

奥氏体晶粒长大的速度与原子扩散密切相关。加热温度越高,保温时间越长,奥氏体晶粒越粗大。加热速度越快,过热度越大,形核率越高,奥氏体晶粒越细。但当快速加热时,若保温时间过长,会造成奥氏体晶粒迅速长大而使晶粒粗大。

2) 含碳量

在碳的一定质量分数范围内,随着奥氏体中含碳量的增加,碳在奥氏体中的扩散速度增大,使奥氏体晶粒长大的倾向增大。但当碳的质量分数超过其在奥氏体中的溶解度后,残余渗碳体就会产生机械阻碍作用,使奥氏体晶粒长大的倾向变小。

3) 化学成分

钢中的大多数合金元素(除 Mn 以外)都有阻碍奥氏体晶粒长大的作用。其中能形成稳定的碳化物的元素(如 Cr、W、Mo、Ti、Nb 等)和能生成氧化物、氮化物、有阻碍晶粒长大作用的元素(如适量的 Al),其碳化物、氧化物、氮化物在晶界上弥散分布,强烈地阻碍了奥氏体晶粒的长大,使晶粒保持细小。

因此,为了控制奥氏体的晶粒度,一般都会合理选择加热温度和保温时间,以及采取加入一定的合金元素等措施。

二、钢在冷却时的转变

冷却过程是热处理的关键工序,其冷却转变温度决定了冷却后的组织和性能。实际生产中采用的冷却方式主要有等温冷却(如等温淬火)和连续冷却(如炉冷、空冷、水冷等),两种冷却方式的示意图如图 1-37 所示。

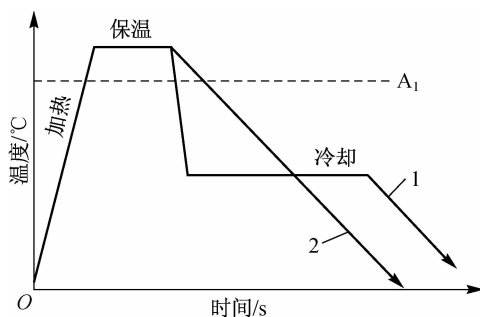


图 1-37 两种冷却方式示意图

1—等温冷却; 2—连续冷却

(1)等温冷却。等温冷却是指将奥氏体化的钢件迅速冷却至临界转变温度 A_1 以下的某一温度并保温,使其在该温度下发生组织转变,然后再冷却至室温,见图 1-37 中的曲线 1。

(2)连续冷却。连续冷却则是将奥氏体化的钢件连续冷却至室温,并在连续冷却过程中发生组织转变,见图 1-37 中的曲线 2。

当温度在临界转变温度 A_1 以上时,奥氏体是稳定的。当温度降到临界转变温度以下后,在热力学上处于不稳定状态,要发生转变,奥氏体即处于过冷状态,这种奥氏体称为过冷奥氏体。钢在冷却时的组织转变实质是过冷奥氏体的组织转变。

1. 过冷奥氏体的等温冷却转变

在不同的过冷度下,反映过冷奥氏体转变产物与时间关系的曲线称为过冷奥氏体等温转变曲线。由于该曲线形状像字母 C,故称为 CCT 曲线或 TTT 曲线,简称为 C 曲线。图 1-38 所示为共析钢的 C 曲线。图中左边一条曲线为等温转变开始线,右边一条曲线为等温转变终了线, M_s ($\approx 230\text{ }^\circ\text{C}$) 线、 M_f ($\approx -50\text{ }^\circ\text{C}$) 线分别为马氏体转变开始线和转变终了线, A_1 以上是奥氏体稳定区,两曲线之间是转变过渡区(过冷奥氏体+转变产物), M_s 线和 M_f 线之间为马氏体转变区。

从图 1-38 可以看出,过冷奥氏体在各个温度等温时,都要在该温度下经过一段时间后才能发生转变。金属及合金在一定过冷度条件下等温转变时,从等温停留开始至转变开始之间的时间称为“孕育期”(以转变开始线上的各点与温度坐标的距离表

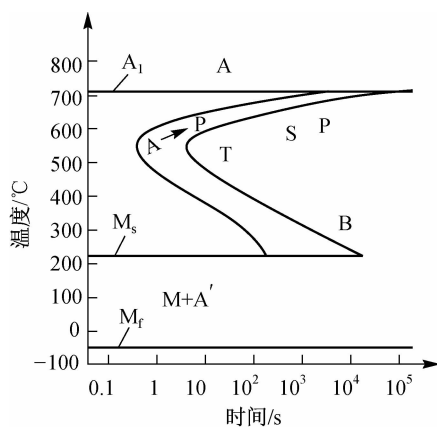


图 1-38 共析钢的 C 曲线



示)。孕育期的长短反映了过冷奥氏体稳定性的大小。孕育期最短处,过冷奥氏体最不稳定,转变最快,孕育期最短处称为C曲线的“鼻尖”。对于碳钢,“鼻尖”处的温度为 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。过冷奥氏体的稳定性取决于等温转变和扩散这两个因素。在“鼻尖”温度以上,过冷度越小,等温转变也越小;在“鼻尖”温度以下,温度越低,原子扩散越困难,两者都使奥氏体稳定性增加,孕育期增长,转变速度减慢。

1) 过冷奥氏体等温转变产物的组织和性能

根据过冷奥氏体不同温度(A_1 线以下)下转变产物的不同,奥氏体的变化可分为三种不同类型的转变,即高温珠光体转变、中温贝氏体转变和低温马氏体转变。

(1) 高温珠光体转变($550\text{ }^{\circ}\text{C}\sim A_1$)。共析成分的奥氏体过冷到 $550\text{ }^{\circ}\text{C}\sim A_1$ 高温区等温停留时,将发生共析转变,转变产物为珠光体。由于过冷奥氏体向珠光体转变的温度不同,所以珠光体中铁素体和渗碳体片厚度也不同。温度在 $650\text{ }^{\circ}\text{C}\sim A_1$ 时,铁素体和渗碳体的片间距较大,称为珠光体;温度在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,铁素体和渗碳体的片间距较小,称为索氏体,用符号S表示;温度在 $550\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,片间距很小,称为托氏体,用T表示。

(2) 中温贝氏体转变($M_s\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$)。共析成分的奥氏体过冷到 $M_s\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的中温区停留时,将发生过冷奥氏体向贝氏体的转变,形成贝氏体,用符号B表示。

按组织形态和转变温度,贝氏体组织可分为上贝氏体(B_U)和下贝氏体(B_L)两种。上贝氏体是在 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 形成的,由于脆性较高,基本无使用价值;下贝氏体是在 $M_s\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 形成的,下贝氏体由含过饱和的细小针片状铁素体和铁素体片内弥散分布的碳化物组成,因而它具有较高的强度、硬度及较好的塑性、韧性。在实际生产中常采用等温淬火来获得下贝氏体。

(3) 低温马氏体转变(M_s 以下)。当过冷奥氏体被快速冷却到 M_s 点以下时,便发生马氏体转变,形成马氏体,用符号M表示,马氏体实质上是碳溶于 $\alpha\text{-Fe}$ 中的过饱和间隙固溶体。

马氏体的强度和硬度主要取决于马氏体中碳的质量分数。当碳的质量分数小于 0.2% 时,可获得呈一束束尺寸大体相同的平行条状马氏体,称为板条状马氏体。当钢的组织为板条状马氏体时,钢具有较高的硬度和强度、较好的塑性和韧性。当马氏体中碳的质量分数大于 1.0% 时,得到片状马氏体。片状马氏体具有很高的硬度,但塑性和韧性很差,脆性大。当碳的质量分数为 $0.2\%\sim 1.0\%$ 时,低温转变得到板条状马氏体与片状马氏体混合组织。随着碳的质量分数的增加,板条状马氏体的量减少而片状马氏体的量增加。

与前两种转变不同的是,马氏体的转变冷却只进行到室温,这时奥氏体不能全部转变为马氏体,还有少量的奥氏体未发生转变而残留下来,称为残余奥氏体。过多的残余奥氏体会降低钢的强度、硬度和耐磨性,而且因为残余奥氏体是不稳定组织,在钢件使用过程中易发生转变而导致工件产生内应力,引起变形、尺寸变化,从而降低工件精度。因此,生产中对于硬度要求高或精度要求高的工件,常在淬火后将其迅速置于接近 M_f 的温度下,促使残留奥氏体进一步转变成马氏体,这一工艺过程称为“冷处理”。

亚共析钢和过共析钢的C曲线与共析钢的C曲线相比,它们的C曲线分别多出一条先析出铁素体的析出线或先析出渗碳体的析出线。

2) 影响C曲线的因素

(1) 含碳量。在正常加热条件下,亚共析钢的C曲线随含碳量的增加而右移,过共析钢的C曲线随含碳量的增加而左移。奥氏体中的含碳量越高, M_s 点越低。

(2) 合金元素。除Co、Al以外的几乎所有合金元素溶入奥氏体后,都会增加奥氏体的稳定性,使C曲线不同程度地右移。当某些合金元素达到一定量时,还会改变C曲线的形状。



绝大多数合金元素均会使 M_s 温度降低。

(3) 加热温度和保温时间。随着加热温度的提高和保温时间的延长, 奥氏体晶粒长大, 晶界面积减小, 奥氏体成分更加均匀, 这些都不利于过冷奥氏体的转变, 但提高了奥氏体的稳定性, 使 C 曲线右移。

对于过共析钢与合金钢, 影响其 C 曲线的主要因素是奥氏体的成分。

2. 过冷奥氏体的连续冷却转变

1) 过冷奥氏体的连续冷却转变曲线

在实际生产中, 大多数热处理工艺都是在连续冷却过程中进行的, 因此, 钢的连续冷却转变曲线(也称为 CCT 曲线)更有实际意义。CCT 曲线是由实验方法测定的, 图 1-39 所示为共析钢的 CCT 曲线, 它与 C 曲线的区别在于 CCT 曲线位于曲线的右下侧, 且没有等温转变曲线的下部分, 即共析钢在连续冷却转变时得不到贝氏体组织。

图 1-39 中 P_s 和 P_f 分别为过冷奥氏体转变为珠光体的转变开始线和转变终了线, 两线之间为转变的过渡区, KK' 线为转变的终止线, 当冷却到 KK' 线时, 过冷奥氏体便终止向珠光体的转变, 一直冷却到 M_s 线又开始发生马氏体转变。共析钢在连续冷却转变的过程中, 不发生贝氏体转变。这是因为共析钢贝氏体转变的孕育期很长, 当过冷奥氏体连续冷却尚未发生贝氏体转变时就已过冷到 M_s 线而发生马氏体转变, 所以不会出现贝氏体转变。

当共析钢以大于 v_k 的速度冷却时, 可得到的组织为马氏体和残留奥氏体。冷却速度 v_k 称为上临界冷却速度, v_k 越小, 越容易得到马氏体。冷却速度小于 v'_k 时, 过冷奥氏体将全部转变为珠光体, v'_k 称为下临界冷却速度。 v'_k 越小, 退火所需的时间越长。冷却速度为 $v'_k \sim v_k$ (如油冷) 时, 在到达 KK' 线之前, 奥氏体部分转变为珠光体; 从 KK' 线到 M_s 线, 剩余奥氏体停止转变, 直到 M_s 线以下, 才开始马氏体转变, 到 M_f 线, 马氏体转变完成, 得到的组织为马氏体和托氏体。若冷却到 M_s 和 M_f 之间, 则得到的组织为马氏体、托氏体和残余奥氏体。

2) 共析钢 CCT 曲线和 C 曲线的比较和应用

将相同条件下测得的共析钢 CCT 转变曲线和 C 曲线叠加在一起, 如图 1-40 所示。从图 1-40 可以看出, 连续冷却时, 过冷奥氏体的稳定性增加, 奥氏体完成珠光体转变的温度更低, 时间更长。

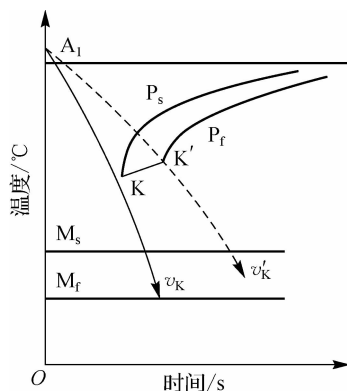


图 1-39 共析钢的 CCT 曲线

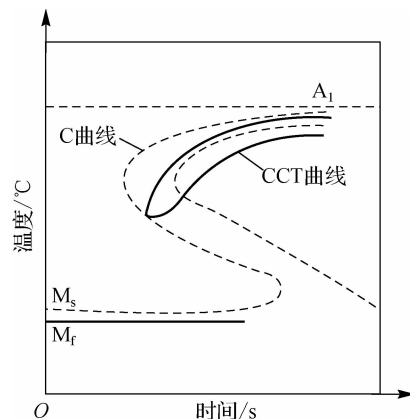


图 1-40 共析钢 CCT 曲线和 C 曲线的叠加

由于 CCT 曲线的测定比较困难, 目前这方面的资料还很欠缺, 所以常用 C 曲线较粗略



地估计转变产物和性能。若以炉冷时的冷却的速度连续转变,与C曲线相交于 $650\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 700\text{ }^{\circ}\text{C}$,估计奥氏体转变为珠光体,硬度为 $170\sim 220\text{ HBW}$;以空冷时的冷却速度连续转变,与C曲线相交于 $600\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$,估计奥氏体将转变为索氏体,硬度为 $25\sim 35\text{ HRC}$;以油中淬火的速度冷却,大约在 $570\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右与C曲线相交,部分奥氏体转变为托氏体,剩余的奥氏体转变为马氏体,最终获得托氏体+马氏体+残余奥氏体的混合组织,硬度约为 $45\sim 55\text{ HRC}$;以水淬时的速度冷却,它不与C曲线相交,奥氏体一直过冷到 M_s 以下转变为马氏体,最终组织为马氏体+少量残留奥氏体,硬度为 $55\sim 65\text{ HRC}$ 。

根据C曲线也可以估计临界冷却速度 v_k 的大小。与C曲线“鼻尖”相切的临界冷却速度用 v'_k 表示,一般 $v'_k=1.5v_k$ 。

三、钢的退火与正火

为了改善钢的力学性能,机械零件在加工过程中往往要安排不同目的的各种热处理,一般机械零件的热处理工艺过程为毛坯(铸件、锻件)—预备热处理—切削加工—最终热处理。最终热处理的目的是使零件达到所要求的力学性能,如强度、硬度、耐磨性、冲击韧性等。预备热处理的目的是消除毛坯在铸造或锻造过程中产生的某些缺陷(如晶粒粗大、枝晶偏析、硬度过高或不均匀等),同时为下道工序以及最终热处理做好组织准备。退火和正火就是钢材经常采用的预备热处理。如果零件的力学性能要求不高,退火和正火可以作为最终热处理。

1. 钢的退火

退火是将工件加热到临界点以上或在临界点以下某一温度保温一定时间后,以十分缓慢的冷却速度(一般为随炉冷却)进行冷却的一种方法。

根据钢的成分、组织状态和退火目的的不同,退火可分为完全退火、等温退火、球化退火、均匀化退火和去应力退火等。

1) 完全退火

完全退火又称为重结晶退火,是将工件加热到 A_{c3} 以上 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温一定时间后,随炉缓慢冷冷却到约 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$,然后在空气中冷却。完全退火用于亚共析钢成分的碳钢和合金钢的铸件、锻件及热轧型材,有时也用于焊接件。

完全退火的目的是细化晶粒,降低硬度,改善工件的切削加工性能,但完全退火比较费时。为克服这一缺点,可采用等温退火工艺。

2) 等温退火

等温退火是将亚共析钢加热到 A_{c3} 以上,过共析钢加热到 A_{c1} 以上,保温一定的时间,再快速冷却至稍低于 A_{r1} 的某一温度等温停留,使过冷奥氏体完成向珠光体的转变,随后出炉或冷却至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时出炉。等温退火与普通退火相比可大大缩短时间。

3) 球化退火

球化退火是将钢件加热到 A_{c1} 以上 $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温一定时间后随炉缓慢冷却至 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后出炉空冷。同样为缩短退火时间,生产上常采用等温球化退火,它的加热工艺与普通球化退火相同,只是冷却方法不同。通过球化退火,使层状渗碳体和网状渗碳体变为球状渗碳体,球化退火后的组织是由铁素体和球状渗碳体组成的球状珠光体;这样可降低工件硬度,改善切削加工性,并为以后淬火做准备。



球化退火主要用于共析或过共析成分的碳钢及合金钢。对于有网状二次渗碳体存在的过共析钢,在球化退火之前应先进行正火来打碎渗碳体网状化组织。

4) 均匀化退火

均匀化退火是把钢加热到略低于固相线(固相线以下 $100\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$)的温度,长时间保温(10~15 h),然后缓冷至室温的工艺。其目的是消除晶内偏析,使成分均匀化。均匀化退火的实质是使钢中各元素的原子在奥氏体中进行充分扩散。

工件经扩散退火后,奥氏体的晶粒十分粗大,因此,必须进行完全退火或正火处理来细化晶粒,消除过热缺陷。

5) 去应力退火(低温退火)

去应力退火是把钢加热到低于 A_{c1} 的某一温度,通常为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温后随炉缓冷的工艺。其主要目的是消除铸件、锻件、焊接件、冷冲压件(或冷拔件)及机加工件的残余内应力。这些应力若不消除会导致随后的切削加工或使用中钢的变形开裂,降低机器的精度,甚至会发生事故。在去应力退火中不发生组织转变。

2. 钢的正火

将工件加热到 A_{c3} 或 A_{cm} 以上 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,使钢转变为奥氏体,保温后从炉中取出在空气中冷却的热处理工艺称为正火。正火与退火的差别是冷却速度不同,正火的冷却速度较快,获得的珠光体类组织较细,因而强度与硬度也较高。

正火后的力学性能和生产效率都较高,成本也低,因而一般情况下尽可能地用它来代替退火。正火主要应用于以下方面。

- (1) 正火用于普通结构零件,作为最终热处理,细化晶粒,提高力学性能。
- (2) 正火用于低、中碳钢,作为预备热处理,获得合适的硬度,便于切削加工。
- (3) 正火用于过共析钢,消除网状 Fe_3C_{II} ,有利于球化退火的进行。

综上所述,为改善切削加工性能,中、低碳钢宜用正火;高碳结构钢则宜用退火;过共析钢用正火消除网状渗碳体后,因硬度偏高,还需球化退火。中、低碳钢进行冷挤、冷铆、冷镦以前,为获得良好的塑性,也要采用退火。

四、钢的淬火

淬火就是将钢件加热到 A_{c3} 或 A_{c1} 以上 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温一定时间,然后快速冷却($>v_k$,一般为油冷或水冷),从而使奥氏体转变为马氏体(或下贝氏体)的一种操作。

淬火的目的是获得马氏体或贝氏体,提高钢的力学性能。淬火是钢最重要的热处理工艺,也是热处理中应用最广泛的工艺之一。但淬火必须和回火相配合,否则淬火后虽然得到了高硬度、高强度,但韧性、塑性低,不能得到优良的综合力学性能。

1. 淬火工艺

1) 淬火温度

通常亚共析钢的淬火温度应在 A_{c3} 以上 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,淬火后可得到细小均匀的马氏体组织,碳的质量分数超过 0.5%时,还伴有少量残留奥氏体出现。如在 A_{c3} 以下淬火,在淬火组织中将出现铁素体,造成硬度与强度不足。

共析钢和过共析钢的淬火温度为 A_{c1} 以上 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$,淬火后得到的是细小均匀的马

氏体、粒状二次渗碳体和少量残留奥氏体的混合组织,粒状渗碳体可提高淬火马氏体的硬度和耐磨性,如果加热温度超过 $A_{c_{cm}}$,则淬火后会获得粗大片状马氏体和较多的残留奥氏体,这不仅会降低钢的硬度、耐磨性和韧性,还会增大淬火变形、开裂的倾向。

除了 Mn 外的大多数合金元素都会阻碍奥氏体晶粒长大,为了使合金元素充分溶入奥氏体中,淬火温度应稍高于根据临界点所确定的加热温度。各种钢的具体加热温度可查有关热处理手册。

2) 保温时间

为了使工件各部分均完成组织转变,需要在淬火加热温度下保温一定的时间,通常将工件升温和保温所需的时间计算在一起统称为加热时间。影响加热时间的因素很多,如加热介质、钢的成分、炉温、工件的形状及尺寸、装炉方式及装炉量等。生产中往往要通过试验确定合理的加热及保温时间,以保证工件质量。

3) 淬火冷却

淬火冷却是决定淬火质量的关键,为了使工件获得马氏体组织,淬火冷却速度必须大于临界冷却速度 v_k ,而快速冷却会产生很大的内应力,容易引起工件的变形和开裂。因此,淬火工艺中最重要的一问题是既要保证淬火钢件获得马氏体组织,又要使钢件减小变形和防止开裂。为此,合理选择冷却介质和冷却方法是十分重要的。

(1) 理想淬火冷却速度。淬火冷却速度既不能过大又不能过小。经研究发现,要获得马氏体并非在整个冷却过程中都要快速冷却,理想的淬火冷却速度如图 1-41 所示。在 C 曲线“鼻尖”附近($550\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$)的过冷奥氏体最不稳定区域要快速冷却,使奥氏体不发生珠光体转变,而在 $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到淬火温度之间,以及 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,特别是 $200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 不需要快速冷却,否则会因淬火应力引起工件变形与开裂。

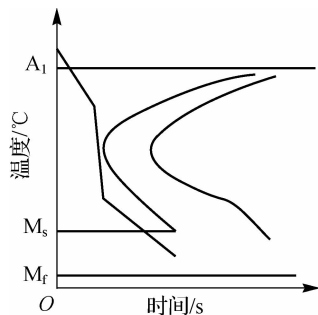


图 1-41 钢的理想淬火冷却速度

(2) 常用的淬火冷却介质。到目前为止还没有找到十分理想的冷却介质能符合上述理想淬火冷却速度的要求。实际生产中常用的冷却介质是水、水溶性盐类和碱类、有机物的水溶液,以及油、熔盐、空气等。

水是目前应用最广泛的淬火冷却介质。水在 $550\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 具有很大的冷却速度,可防止发生珠光体的转变。但是,水在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冷却速度仍然很快(约为 $270\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$),这时正发生马氏体转变,如此高的冷却速度必然会引起淬火钢的变形和开裂。若在水中加入 10% 的盐(NaCl)或碱(NaOH),可将 $550\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷却速度提高到 $1\ 100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$,但在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时冷却速度基本不变。因此,水及盐水或碱水常被用做碳钢的淬火冷却介质,但都容易引起材料变形和开裂。

各种矿物油也是应用很广泛的淬火冷却介质。油在 $200\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷却速度(约为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$)较慢,可减少钢在淬火时的变形和开裂倾向。但油在 $550\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冷却速度(约为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$)不够大,不易使碳钢淬火成马氏体。因此,生产中用油作为淬火冷却介质,只适用于过冷奥氏体稳定性较大的合金钢淬火冷却,不适用于碳钢淬火冷却。

熔化的 NaNO_3 、 KNO_3 等液体也可作为淬火冷却介质,以减少工件淬火时的变形,主要

用于贝氏体等温淬火冷却、马氏体分级淬火冷却。其特点是沸点高,冷却能力介于水和油之间,常用于处理形状复杂、尺寸较小和变形要求严格的工件。



阅读材料

以上介绍的几种淬火冷却介质与理想淬火冷却的要求都存在一定的差距。国内近年来在试制新型淬火冷却介质方面,已取得了较大进展。使用效果较好的新型淬火冷却介质有水玻璃-碱(或盐)水溶液、过饱和硝酸盐水溶液、聚乙烯醇水溶液等。

2. 淬火方法

为保证淬火效果,减少淬火变形和开裂,应根据钢的材料、大小和种类,合理选择淬火方法。常用的淬火方法有单介质淬火法、双介质淬火法、分级淬火法和等温淬火法四种,如图 1-42 所示。

1) 单介质淬火法

单介质淬火法是将奥氏体化后的工件放入一种淬火介质中连续冷却获得马氏体组织的淬火方法,如碳钢在水中淬火,合金钢在油中淬火。这种方法操作简单,生产率高,成本低,易于实现自动化;但不符合理想淬火冷却速度的要求,水淬容易产生变形和裂纹,油淬容易产生硬度不足或硬度不均匀等缺陷。

2) 双介质淬火法

双介质淬火法是将奥氏体化的钢先在冷却能力强的介质中冷却至 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$,跳过等温转变曲线“鼻尖”部分后,再在另一种冷却能力较弱的介质中冷却,发生马氏体转变的淬火方法,如水淬油冷、油淬空冷。其优点是产生的内应力小,有利于减少变形和开裂;缺点是不容易掌握两种介质的转换时间。这种方法多用于形状复杂的碳钢件及大型合金碳钢件。

3) 分级淬火法

分级淬火法是将奥氏体化后的钢先浸入温度在马氏体点附近的盐浴或碱浴中,保温 $2\sim 5\text{ min}$,待工件内外温度均匀后,再取出空冷的淬火方法。这种方法可以减少工件内外的温差和减慢马氏体转变时的冷却速度,从而有效地减少内应力,防止产生变形和开裂。但由于盐浴或碱浴的冷却能力低,分级淬火法只能适用于零件尺寸较小、要求变形小、尺寸精度高的工件,如模具、刀具等。

4) 等温淬火法

等温淬火法是将奥氏体化后的工件放入温度稍高于 M_s 温度的盐浴或碱浴中,等温冷却以获得下贝氏体组织的淬火方法。这种淬火方法能显著降低内应力,淬火变形小。得到的下贝氏体与回火马氏体相比,在含碳量相近、硬度相当的情况下,前者比后者具有较高的塑性与韧性,而且等温淬火后一般不需进行回火。等温淬火法适用于尺寸较小、形状复杂、要求变形小、具有高硬度和强韧性的工具、模具等。

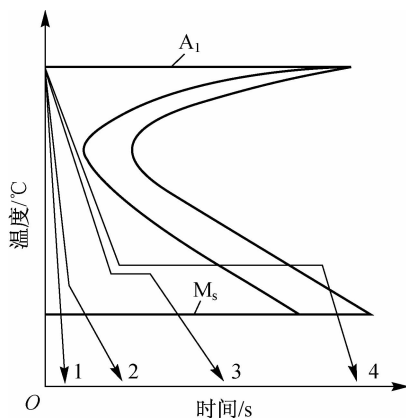


图 1-42 常用淬火方法

1—单介质淬火法; 2—双介质淬火法;
3—分级淬火法; 4—等温淬火法



3. 钢的淬透性和淬硬性

淬透性是钢热处理的重要工艺性能,也是合理选材和正确制定热处理工艺的重要依据之一。

钢在一定的冷却条件下淬火时获得马氏体组织的能力称为钢的淬透性。它是钢材本身固有的一个属性。淬透性的大小反映了钢在淬火后转变为马氏体的能力,通常用规定条件下得到淬透层(淬硬层)的深度来表示。

淬透性与实际工件的淬透层深度是完全不同的,淬透性是钢的一种工艺性能,它是在规定条件下得到的淬透层深度,对于一种钢来说它是确定的。而实际淬透层深度是在某种具体条件下淬火得到马氏体层的厚度,它是可变的,与淬透性及许多外界因素有关。淬透性与淬硬性也是两个不同的概念,淬硬性是指钢淬火时能够达到的最高硬度,主要取决于马氏体中碳的质量分数。淬透性好,淬硬性不一定好;同样淬硬性好,淬透性也不一定好。

钢的淬透性实质上取决于过冷奥氏体的稳定性,也就是临界冷却速度 v_k 。 v_k 愈小,过冷奥氏体愈稳定,则钢的淬透性愈好,因此,凡影响奥氏体稳定的因素都会影响钢的淬透性。

五、钢的回火

回火是将淬火钢重新加热到 A_1 点以下的某一温度,保温一定时间后,冷却到室温的一种操作。

1. 回火的目的

(1)改善淬火钢的性能,达到要求的力学性能。例如,工具要求有高硬度、高耐磨性,轴类零件要求有良好的韧性,弹簧要求有较高的弹性极限和屈服强度及一定的塑性、韧性等。

(2)稳定工件尺寸。由于淬火钢硬度高,脆性大,存在着淬火内应力,且淬火后的组织马氏体和残留奥氏体都处于非平衡状态,是一种不稳定的组织,在一定条件下,经过一定的时间后,组织会向平衡组织转变,导致工件的尺寸形状改变,性能发生变化。为克服淬火组织的这些缺点而采取回火处理,使淬火组织充分转变为稳定组织,就可保证钢件在使用过程中不再发生尺寸和形状的变化。

(3)消除或减小淬火内应力,降低马氏体脆性,防止工件的变形和开裂。钢淬火后必须立即进行回火,以防止工件在放置过程中变形与开裂。淬火钢不经回火一般是不能使用的,所以淬火一回火处理是钢热处理工艺中最重要的复合热处理方法。

2. 回火的分类

淬火钢回火后的组织与性能由回火温度决定,钢的回火按回火温度不同可分为以下三种。

1) 低温回火

低温回火的回火温度为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 250\text{ }^{\circ}\text{C}$,回火后的组织为回火马氏体。内应力和脆性有所降低,但保持了马氏体的高硬度和高耐磨性。低温回火主要应用于高碳钢或高碳合金钢制造的工具、模具、滚动轴承及渗碳和表面淬火的零件。回火后的硬度一般为 $58\sim 64\text{ HRC}$ 。

2) 中温回火

中温回火的回火温度为 $350\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$,回火后的组织为回火托氏体,硬度为 $35\sim 45\text{ HRC}$,具有一定的韧性和较高的弹性极限及屈服强度。中温回火主要应用于各类弹簧和



模具等。

3) 高温回火

高温回火的回火温度为 $500\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，回火后的组织为回火索氏体，其硬度为 25~35 HRC，具有较高的强度和硬度、较好的塑性和韧性。高温回火广泛应用于汽车、拖拉机、机床等机械中的重要结构零件，如轴、连杆、螺栓、齿轮等。

通常在生产上将淬火与高温回火相结合的热处理称为调质处理。应当指出，工件回火后的硬度主要与回火温度、回火时间有关，而与回火后的冷却速度关系不大。因此，在实际生产中回火件出炉后通常采用空冷。

淬火钢回火时，总的变化趋势是随着回火温度的升高，碳钢的硬度、强度降低；随着回火温度的升高，塑性提高，但回火温度太高，塑性会有所下降；冲击韧性随着回火温度的升高而增大，但在 $250\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $450\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ 回火，会出现冲击韧性显著降低的现象，这种随回火温度的升高而冲击韧性下降的现象称为回火脆性。

六、钢的表面热处理

在实际生产中，对于一些在弯曲、扭转、冲击载荷、摩擦条件下工作的齿轮等机器零件，要求具有表面硬、耐磨，而心部韧，抗冲击的特性，仅从选材方面和采用前述的普通热处理方法去考虑是很难满足此要求的。若用高碳钢，虽然硬度高，但心部韧性不足；若用低碳钢，虽然心部韧性好，但表面硬度低，不耐磨。因此，工业上广泛采用表面热处理来满足上述要求，使零件达到“表硬心韧”的效果。

仅对钢件表层进行热处理，以改变其组织和性能的工艺，称为表面热处理。常用的表面热处理工艺可分为两类：一类是只改变表面组织而不改变表面化学成分的表面淬火；另一类是同时改变表面化学成分和组织的表面化学热处理。

1. 钢的表面淬火

仅对工件表层进行淬火的工艺称为表面淬火。它是利用快速加热使工件表面奥氏体化，而中心尚处于较低温度时即迅速予以冷却，表层被淬硬为马氏体，而中心仍保持原来退火、正火或调质状态的组织。

表面淬火一般适用于中碳钢 ($w_{\text{C}}=0.4\%\sim 0.5\%$) 和中碳低合金钢 (40Cr、40MnB 等)，也可用于高碳工具钢、低合金工具钢 (如 T8、9Mn2V、GCr15 等) 及球墨铸铁等。

根据加热方法的不同，表面淬火方法大致可分为火焰加热表面淬火、感应加热表面淬火、电接触加热表面淬火、电解加热表面淬火等。目前生产中应用最广泛的是感应加热表面淬火和火焰加热表面淬火。

1) 感应加热表面淬火

感应加热表面淬火是在工件中引入一定频率的感应电流 (涡流)，使工件表面层快速加热到淬火温度后立即喷水冷却的方法。

感应加热透入工件表层的深度主要取决于电流频率。电流频率越高，感应加热深度越浅，即淬硬层越浅。根据电流频率的不同，感应加热表面淬火可分为以下三类。

(1) 高频感应加热。电流频率范围为 $200\sim 300\text{ kHz}$ ，淬硬层深度一般为 $0.5\sim 2\text{ mm}$ ，高频感应加热适用于要求淬硬层较浅的中小型零件，如小模数齿轮的表面淬火。

(2) 中频感应加热。电流频率范围为 $2.5\sim 8\text{ kHz}$ ，淬硬层深度一般为 $2\sim 10\text{ mm}$ ，中频



感应加热适用于要求淬硬层较深的大中型零件,如直径较大的轴和大中型模数的齿轮的表面淬火。

(3)工频感应加热。工频感应加热是用工业频率(50 Hz)电流通过感应器加热工件。工频感应加热的淬硬层深度可达10~15 mm,适用于要求深淬硬层的大型零件,如直径大于300 mm的轧辊及轴类零件的表面淬火等。

感应加热表面淬火的优点是加热速度快,生产率高;淬火后表面组织细,硬度高(比普通淬火高2~3 HRC);加热时间短,氧化脱碳少;淬硬层深度易控制,变形小,产品质量好;生产过程易实现自动化。其缺点是设备昂贵、维修和调整困难、形状复杂的感应圈不易制造,不适于单件生产。另外,工件在感应加热前需要进行预备热处理,一般为调质或正火,以保证工件表面在淬火后得到均匀细小的马氏体和改善工件心部硬度、强度、韧性及切削加工性,并减少淬火变形。工件在感应表面淬火后需要进行低温回火(180 °C~200 °C),以降低内应力和脆性,获得回火马氏体组织。感应加热表面淬火最适宜的钢种是中碳钢和低合金中碳钢,如40钢、45钢、40Cr和40MnB等。在某些条件下,感应加热表面淬火也可应用于高碳工具钢、低合金工具钢以及铸铁等零件。

感应加热表面淬火的一般工艺路线为锻造—退火或正火—粗加工—正火或调质—精加工—感应加热表面淬火—低温回火—磨削加工。

2) 火焰加热表面淬火

火焰加热表面淬火是用乙炔—氧或煤气—氧的混合气体燃烧的火焰喷射至零件表面,快速加热,当达到淬火温度时立即喷水冷却,从而获得预期的硬度和淬硬层深度的一种表面淬火方法。

火焰加热表面淬火零件的选材,常用中碳钢(如35钢、45钢)及中碳合金结构钢(如40Cr、65Mn)等。如果含碳量太低,则淬火后硬度较低;若碳和合金元素含量过高,则易淬裂。火焰加热表面淬火法还可用于对铸铁件如灰铸铁、合金铸铁进行表面淬火。火焰加热表面淬火的淬硬层深度一般为2~6 mm,若要获得更深的淬硬层,往往会引起零件表面严重过热,且易产生淬火裂纹。

火焰加热表面淬火方法因其简便,无需特殊设备,故适用于单件或小批生产的大型零件和需要局部淬火的工具和零件,如大型轴类、大模数齿轮、锤子等。但火焰加热表面淬火容易过热,淬火质量往往不够稳定,工作条件差,因此,限制了它在机械制造业中的广泛应用。

2. 钢的化学热处理

化学热处理是将工件置于活性介质中加热和保温,使介质中的活性原子渗入工件表层,以改变其表面层的化学成分、组织结构和性能的热处理工艺。根据渗入元素的类别,化学热处理可分为渗碳、渗氮、碳氮共渗等。

化学热处理不仅可以改变钢的组织,还可以改变它的成分,因而使钢表面获得特殊的力学性能和物理、化学性能,这对提高产品质量、满足特殊要求、发挥材料潜能、节约贵重金属具有重要意义。由于化学热处理不受工件形状的限制,所以化学热处理的应用也越来越广泛,各种新工艺、新技术也相继涌现。

1) 钢的渗碳

将低碳工件放在渗碳介质中加热、保温,使其表面层渗入碳原子的一种化学热处理工艺称为渗碳。



(1) 渗碳的目的及渗碳用钢。渗碳的目的是提高工件表层含碳量。经过渗碳及随后的淬火和低温回火,可提高工件表面的硬度、耐磨性和疲劳强度,而心部仍保持良好的塑性和韧性。工业生产中渗碳钢一般是碳的质量分数为 0.10%~0.25% 的低碳钢和低碳合金钢,如 15 钢、20 钢和 20Cr 等。渗碳层深度一般为 0.5~2.5 mm。

(2) 渗碳方法。根据所采用的渗碳剂不同,渗碳可分为气体渗碳、液体渗碳、固体渗碳。目前常用的是气体渗碳,其次是固体渗碳。不论是气体渗碳还是固体渗碳,渗碳后的零件都要进行淬火和低温回火处理,只有这样才能达到所要求的使用性能。

近年来,渗碳工艺有了很大的进展,出现了高温渗碳、真空渗碳、高频渗碳等,有的已经开始用于生产,渗碳过程也在逐渐采用自动化和机械化来控制。

2) 钢的渗氮

向钢件表面渗入氮原子,形成含氮硬化层的化学热处理过程称为渗氮。渗氮实质就是利用含氮的物质分解产生活性氮原子,渗入工件的表层,以提高工件表层硬度、耐磨性、耐腐蚀性及疲劳强度。

渗氮处理有气体渗氮、离子渗氮等。目前应用较广泛的是气体渗氮。渗氮用钢通常是含 Al、Cr、Mo 等合金元素的钢,如 38CrMoAlA 是一种比较典型的渗氮用钢,此外 35CrMo、18CrNiW 等也经常作为渗氮用钢。渗氮层由碳、氮溶于 α -Fe 的固溶体和碳、氮与铁的化合物组成,还含有高硬度、高弥散度的稳定的合金氮化物如 AlN、CrN、MoN、TiN 和 VN 等,这些氮化物的存在对渗氮钢的性能变化起着主要的作用。

与渗碳相比,渗氮工件具有以下特点。

(1) 渗氮前需经调质处理,以使心部组织具有较高的强度和韧性。

(2) 表面硬度、耐磨性、疲劳强度及热硬性均高于渗碳层。

(3) 渗氮表面形成由致密氮化物组成的连续薄膜,具有一定的耐蚀性。

(4) 渗氮处理温度低,渗氮后不需再进行其他热处理,因此工件变形小。

渗氮处理适用于耐磨性和精度都要求较高的零件或要求耐热、耐蚀、耐磨的工件,如发动机的气缸、排气阀、高精度传动齿轮等。

3) 碳氮共渗

碳氮共渗是向钢的表面同时渗入碳和氮,并以渗碳为主的化学热处理工艺,习惯上又称为氰化。目前以中温气体碳氮共渗和低温气体碳氮共渗(即气体软氮化)应用较为广泛。

中温气体碳氮共渗的主要目的是提高钢的硬度、耐磨性和疲劳强度;低温气体碳氮共渗以渗氮为主,其主要目的是提高钢的耐磨性和抗咬合性。

学习情境五 常用金属材料

一、碳钢

工业用钢按化学成分分为碳素钢(简称为碳钢)和合金钢两大类。碳钢为碳的质量分数小于 2.11% 的铁碳合金,而合金钢是指为了提高钢的性能,在碳钢的基础上有意加入一定量合金元素所获得的铁基合金。

目前工业上使用的钢铁材料中,碳钢占有很重要的地位。由于碳钢容易冶炼和加工,并



具有一定的力学性能,在一般情况下,它能够满足工农业生产的需要,并且价格低廉,所以应用非常广泛。

1. 碳钢的分类

碳钢的分类方法很多,下面只介绍几种常用的分类方法。

1) 按照冶炼时脱氧程序的不同

根据冶炼时脱氧程序的不同,碳钢可分为沸腾钢、半镇静钢、镇静钢和特殊镇静钢。

2) 按碳的质量分数分类

(1) 低碳钢。低碳钢中碳的质量分数小于 0.25%。

(2) 中碳钢。中碳钢中碳的质量分数为 0.25%~0.60%。

(3) 高碳钢。高碳钢中碳的质量分数大于 0.60%。

3) 按钢的用途分类

(1) 碳素结构钢。碳素结构钢主要用于制造各类工程构件(如桥梁、船舶、建筑物等)及各种机器零件(如齿轮、螺钉、螺母、连杆等)。它多属于低碳钢和中碳钢。

(2) 碳素工具钢。碳素工具钢主要用于制造各种刀具、量具和模具。这类钢中碳的含量较高,一般属于高碳钢。

(3) 特殊性能钢。特殊性能钢包括不锈钢、耐磨钢、耐热钢等。

4) 按钢中有害杂质的含量分类

碳钢主要按钢中有害杂质硫、磷含量分为以下几种。

(1) 普通碳素钢。普通碳素钢中硫的质量分数不大于 0.055%,磷的质量分数不大于 0.045%。

(2) 优质碳素钢。优质碳素钢中硫和磷的质量分数均为 0.035%~0.040%。

(3) 高级优质碳素钢。高级优质碳素钢中硫的质量分数为 0.020%~0.030%,磷的质量分数为 0.030%~0.035%。

2. 碳钢的牌号、性能及主要用途

我国钢的牌号一般采用汉语拼音字母、化学元素符号和数字相结合的方法表示。

1) 普通碳素结构钢

这类钢主要保证力学性能,故其牌号体现其力学性能。牌号用“Q+阿拉伯数字”表示,其中,“Q”为屈服强度,是“屈”字的汉语拼音首字母,数字表示屈服强度值。例如,Q275 表示屈服强度为 275 MPa。若牌号后面标注字母 A、B、C、D,则表示钢材质量等级不同,即硫、磷质量分数不同。其中,A 级钢,硫、磷质量分数最高,A、B、C、D 表示钢材质量依次提高。若在牌号后面标注字母“F”则为沸腾钢,标注“Z”为镇静钢,标注“TZ”为特殊镇静钢。如 Q235AF 即表示屈服强度为 235 MPa 的 A 级沸腾钢。

普通碳素结构钢一般在钢厂供应状态(即热轧状态)下直接使用。Q195、Q215 的含碳量低,焊接性好,塑性、韧性好,易于加工,有一定的强度,常用于制造普通铆钉、螺钉、螺母等零件和轧制成薄板、钢筋等,用于桥梁、建筑、农业机械等结构。Q255、Q275 具有较高的强度,塑性、韧性较好,可进行焊接,并可轧制成工字钢、槽钢、角钢、条钢和钢板及其他型钢作结构件以及用于制造简单机械的连杆、齿轮、联轴节和销等零件。Q235 既有较高的塑性,又有适中的强度,因此,既可用做较重要的建筑构件,又可用于制造一般的机器零件,是应用最



广的普通碳素结构钢。

2) 优质碳素结构钢

优质碳素结构钢必须同时保证化学成分和力学性能。其硫、磷的含量较低,质量分数均控制在 0.01% 以下;非金属夹杂物也较少,质量级别较高。

优质碳素结构钢的牌号用两位数字表示,这两位数字表示钢中碳的质量分数,以万分之几计。例如,45 钢中碳的质量分数为 0.45%,08 钢中碳的质量分数为 0.08%。当钢中锰的质量分数为 0.7%~1.2% 时,应在牌号后面加上元素符号,如 50Mn。若为沸腾钢,则在数字后加“F”,如 08F 表示碳的质量分数为 0.08% 的沸腾钢。

随牌号的数字增加,优质碳素结构钢中碳的质量分数增加,组织中的珠光体量增加,铁素体量减少。因此,钢的强度也随之增加,而塑性随之降低。

优质碳素结构钢一般都要经过热处理,以提高力学性能。根据碳的质量分数不同,优质碳素结构钢有不同的用途,主要用于制造机器零件。其牌号及用途见表 1-4。

表 1-4 优质碳素结构钢的牌号及用途

牌 号	用 途
10	用于制造锅炉管、油桶顶盖、钢带、钢丝、钢板和型材及机械零件
10F	
20	用于制造承受较小应力而要求韧性好的各种机械零件,如拉杆、轴套、螺钉、起重钩;也用于制造在 6.0 MPa、450 °C 以下非腐蚀介质中使用的管子等;还可以用于制造心部强度不大的渗碳与碳氮共渗零件,如轴套或链条的滚子、轴以及不重要的齿轮、链轮等
15F	
35	用于制造热锻的机械零件、冷拉和冷锻的钢材、钢管以及机械零件,如转轴、曲轴、轴销、拉杆、连杆、横梁、星轮、套筒、轮圈、钩环、垫圈、螺钉、螺母等;还可用来制造汽轮机机身、轧钢机机身、飞轮等
40	用于制造机器的运动零件,如辘子、轴、曲柄销、传动轴、活塞杆、连杆、圆盘等
45	用于制造蒸汽涡轮机、压缩机、泵的运动零件;还可以用来代替渗碳钢制造齿轮、轴、活塞销等零件,但零件须经高频感应加热或火焰加热表面淬火,并可用做铸件
55	用于制造齿轮、连杆、轮圈、轮缘、扁弹簧及轧辊等,也可用做铸件
65	用于制造气门弹簧、弹簧圈、轴、轧辊、各种垫圈、凸轮及钢丝绳等
70	用于制造弹簧

3) 碳素工具钢

碳素工具钢中 $w_C=0.65\% \sim 1.35\%$, $w_S \leq 0.35\%$, $w_{Mn} \leq 0.4\%$ (T8Mn 中, $w_{Mn}=0.40\% \sim 0.60\%$)。碳素工具钢中 S、P 的含量均较少,属于优质钢。碳素工具钢的牌号以“T+数字+字母”表示,钢号前面的“T”表示碳素工具钢,其后的数字为碳的质量分数,以千分之几计。如 $w_C=0.8\%$ 的碳素工具钢,其钢号为“T8”。如为高级优质碳素工具钢,则在其钢号后加“A”,如“T10A”。

碳素工具钢经热处理(淬火+低温回火)后具有高硬度,用于制造尺寸较小,要求耐磨性好的量具、刀具、模具等。这类钢的钢号有 T7, T7A, T8, T8A, …, T13A, 共 8 个钢种、16 个牌号。含碳量越高,则碳化物含量越多,耐磨性就越高,但韧性就越差。因此,受冲击的工具应选用含碳量低的工具钢。一般冲头、凿子要选用 T7、T8 等,车刀、钻头可选用 T10 钢,而精车刀、锉刀则选用 T12、T13 等。



4) 铸钢

许多形状复杂的零件不便通过锻压等方法加工成形,用铸铁时性能又难以满足需求,此时常常选用铸钢,因此,铸钢在机械制造尤其是重型机械制造业中应用非常广泛。根据 GB/T 5613—1995《铸钢牌号表示方法》中的规定,铸钢的牌号有两种表示方法。以强度表示的铸钢牌号是由铸钢两字的汉语拼音首字母“ZG”与表示力学性能的两组数字组成,第一组数字代表最低屈服强度,第二组数字代表最低抗拉强度。例如,ZG200-400 表示屈服强度不小于 200 MPa,抗拉强度不小于 400 MPa。

二、合金钢

碳钢具有冶炼工艺简单、易加工、价格低等优点,因而得到了广泛的应用。但是碳钢具有淬透性低、回火稳定性差、基本组成相强度低等缺点,因而其应用受到了一定的限制。为了克服碳钢的不足,在冶炼优质碳钢的同时可以有目的地加入一定量的一种或一种以上的金属或非金属元素,这类元素统称为合金元素,这类含有合金元素的钢统称为合金钢。

1. 合金钢的分类

合金钢种类繁多,为了便于生产、选材、管理及研究,根据某些特性,从不同角度出发可以将其分成若干种类。

1) 按用途分类

(1) 合金结构钢。合金结构钢可分为机械制造用钢和工程结构用钢等,主要用于制造各种机械零件、工程结构件等。

(2) 合金工具钢。合金工具钢可分为刀具钢、模具钢、量具钢三类,主要用于制造刀具、模具、量具等。

(3) 特殊性能钢。特殊性能钢可分为抗氧化用钢、不锈钢、耐磨钢、易切削钢等。

2) 按合金元素含量分类

(1) 低合金钢。低合金钢合金元素的质量分数小于 5%。

(2) 中合金钢。中合金钢合金元素的质量分数为 5%~10%。

(3) 高合金钢。高合金钢合金元素的质量分数大于 10%。

2. 合金结构钢

合金结构钢按用途可分为工程用钢和机器用钢两大类。

工程用钢主要用于制造各种工程结构,它们大都是用普通低合金钢制造。这类钢冶炼简便、成本低,满足工程用钢批量大的要求,使用时一般不进行热处理。

而机器用钢一般都经过热处理后使用,主要是用于制造机器零件,它们大都是合金结构钢制造。按其用途和热处理特点,机器用钢又分为调质钢、渗碳钢、易切削钢、弹簧钢、轴承钢、耐磨钢等。

1) 合金结构钢的牌号

我国规定合金结构钢的牌号由“两位数字+元素符号+数字+…”组成。前两位数字表示碳的平均质量分数(以万分之几计)。元素符号后面的数字为该元素平均质量分数(以百分之几计),当其平均质量分数小于 1.5%时,只标出元素符号,而不标明数字;当其平均质量分数为 1.5%~2.49%、2.5%~3.49%时,相应标注为 2、3。如 18Cr2Ni4W 表示碳的平均



质量分数为 0.18%，铬的质量分数为 2%，镍的质量分数为 4%，钨的质量分数为 1.5%。若 S、P 含量达到高级优质钢时，则在钢号后加“A”，如 38CrMoAlA。

易切削钢在钢号前加“Y”（“易”字声母）字，如 Y12、Y40Mn、Y40CrSCa，其含碳量和合金元素含量均与结构钢编号一样，如 Y40CrSCa，表示易切削钢的成分为： $w_C=0.4\%$ ， $w_{Cr}<1.5\%$ ，S、Ca 为易切削元素，一般情况下 $w_S=0.05\%\sim 0.3\%$ ， $w_{Ca}<0.015\%$ 。

滚动轴承钢的编号是在钢号前加“G”（“滚”字声母），其后数字为铬的平均质量分数（以千分之几计），碳的平均质量分数 $w_C\geq 1.0\%$ 时不标出，如 GCr15、GCr9 等钢中含铬的质量分数 w_{Cr} 分别为 1.5% 和 0.9%。

2) 普通低合金结构钢

普通低合金结构钢是在碳素结构钢的基础上，加入少量的合金元素发展起来的。从成分上看其为低碳低合金钢种，满足大型工程结构（如大型桥梁、压力容器及船舶等）减轻结构重量，提高可靠性及节约材料的需要。

与低碳钢相比，低合金结构钢不但具有良好的塑性、韧性及焊接工艺性，而且具有较高的强度、较低的冷脆转变温度和良好的耐蚀性。因此，用低合金结构钢代替低碳钢可以减少材料和能源的损耗，减轻工程结构件的自重，增加可靠性。

普通低合金结构钢主要用来制造各种要求强度较高的工程结构，如船舶、车辆、高压容器、输油输气管道、大型钢结构等，在建筑、石油、化工、铁道、造船、机车车辆、锅炉容器、农机农具等许多方面都得到了广泛的应用。

Q345(16Mn)钢是应用最广、用量最大的低合金高强度结构钢，其综合性能好，广泛用于制造石油化工设备、船舶、桥梁、车辆等大型钢结构，我国的南京长江大桥就是用 Q345 制造的。Q390 含有 V、Ti、Nb 等元素，强度高，可用于制造高压容器等。Q460 含有 Mo 和 B，正火后组织为贝氏体，强度高，可用于制造石化工业中的中温高压容器等。

3) 合金渗碳钢

渗碳钢是经渗碳后使用的钢种，主要用于制造要求高耐磨性、承受高接触应力和冲击载荷即要求“表硬心韧”的重要零件，如汽车、拖拉机的变速齿轮，内燃机的凸轮轴、活塞销等。

渗碳钢中碳的质量分数一般为 0.10%~0.25%，经过渗碳后，零件的表面变为高碳，而心部仍为低碳，因而零件心部有足够的塑性和韧性抵抗冲击载荷。

为了改善切削加工性，渗碳钢的预先热处理一般采用正火工艺，渗碳钢件的最终热处理应为渗碳后淬火加低温回火。具体的淬火工艺根据钢种而定。合金渗碳钢一般都是渗碳后直接淬火，而渗碳时易过热的钢种，如 20 钢和 20Cr 等，在渗碳之后直接空冷（正火），以消除过热组织，而后再进行加热淬火和低温回火。热处理后的组织是：表层为高碳回火马氏体和碳化物及少量残留奥氏体，硬度为 58~62 HRC；心部为低碳回火马氏体（完全淬透时），硬度为 40~50 HRC，但多数情况下，心部为少量低碳回火马氏体和屈氏体与铁素体的混合组织，硬度为 25~35 HRC，从而使心部具有高韧性。

常用渗碳钢按照淬透性大小可分为三类。

(1) 低淬透性渗碳钢。低淬透性渗碳钢有 20Cr、20Mn2 等，典型钢种为 20Cr。这类钢合金元素的质量分数较低，淬透性差，零件水淬临界直径小于 25 mm，渗碳淬火后，心部韧性较低，只适于制造受冲击载荷较小的耐磨零件，如活塞销、凸轮、滑块、小齿轮等。

(2) 中淬透性渗碳钢。中淬透性渗碳钢有 20CrMnTi、20CrMn、20CrMnMo、20MnVB



等,典型钢种为 20CrMnTi。这类钢合金元素的质量分数较高,淬透性较好,零件油淬临界直径为 25~60 mm,渗碳淬火后有较高的心部强度,主要用于制造承受中等载荷、要求足够冲击韧性和耐磨性的汽车、拖拉机齿轮等零件,如汽车变速齿轮、花键轴套、齿轮轴等。

(3)高淬透性渗碳钢。高淬透性渗碳钢有 18Cr2Ni4WA、20Cr2Ni4A 等,典型钢种为 20Cr2Ni4A。这类钢合金元素的质量分数更高,淬透性很高,零件油淬临界直径大于 100 mm,淬火和低温回火后心部有很高的强度,主要用于制造大截面、高载荷的重要耐磨件,如飞机、坦克中的曲轴、大模数齿轮等。

4)合金调质钢

合金调质钢是指经调质处理后使用的合金结构钢,广泛用于制造汽车、拖拉机、机床和其他机器上的各种重要零件,如齿轮、轴类件、连杆、螺栓等。这些零件工作时大多承受多种工作载荷,受力情况比较复杂,常承受较大的弯矩,还可能同时传递扭矩;受力是交变的,因而常发生疲劳破坏;有较大冲击;有些轴类零件与轴承配合时还会有摩擦磨损。所以合金调质钢要求有高的综合力学性能,即要求有高的强度及良好的塑性和韧性。

中碳合金钢($w_c=0.25\% \sim 0.5\%$)在调质处理后能够达到强韧性的最佳配合,因此,合金调质钢一般是指中碳合金钢。

调质钢零件的热处理主要是毛坯料的预备热处理(退火或正火)以及粗加工工件的调质处理。调质后组织为回火索氏体。合金调质钢淬透性较高,一般都用油淬,淬透性特别高时甚至可以空冷,这能减少热处理缺陷。要求表面耐磨而心部韧性高的零件调质后还可进行表面淬火和低温回火,使表面硬度达 55~58 HRC,心部硬度为 250~350 HBW。若耐磨性要求更高,可选专用氮化钢 38CrMoAl,调质后再进行渗氮。

按淬透性的高低,合金调质钢大致可以分为以下三类。

(1)低淬透性合金调质钢。低淬透性合金调质钢包括 40Cr、40MnB、40MnVB 等,典型钢种是 40Cr。这类钢的合金元素总的质量分数较低,淬透性不高,油淬临界直径为 30~40 mm,广泛用于制造一般尺寸的重要零件,如轴、齿轮、连杆螺栓等。

(2)中淬透性调质钢。中淬透性调质钢包括 35CrMo、38CrMoAl、40CrNi 等,典型钢种为 40CrNi,这类钢的合金元素总的质量分数较高,油淬临界直径为 40~60 mm,用于制造截面较大、承受较重载荷的重要件,如内燃机曲轴、变速箱主动轴、连杆等。加入 Mo 不仅可以提高淬透性,还可防止出现第二类回火脆性。

(3)高淬透性调质钢。高淬透性调质钢包括 40CrNiMoA、40CrMnMo、25Cr2Ni4WA 等,典型钢种为 40CrNiMoA。这类钢的合金元素总的质量分数最高,淬透性也高,零件油淬临界直径为 60~100 mm,多为铬镍钢。高淬透性调质钢用于制造大截面、承受重载荷的重要零件,如汽轮机主轴、叶轮、压力机曲轴、航空发动机曲轴等。

5)合金弹簧钢

弹簧是广泛应用于交通、机械、国防、仪表等行业及日常生活中的重要零件,用来制造各种弹性零件如板簧、螺旋弹簧、钟表发条等的钢称为弹簧钢。

弹簧主要工作在冲击、振动、扭转、弯曲等交变应力下,要求制造弹簧的材料具有高的弹性极限和强度、高的疲劳强度和屈强比、足够的塑性和韧性。

弹簧钢中碳的质量分数为 0.45%~0.70%。含碳量过低,强度不够,易产生塑性变形;含碳量过高,塑性和韧性降低,疲劳极限也下降。合金弹簧钢可加入的合金元素有锰、硅、



铬、钼和钨等,以硅、锰为主加元素。

有代表性的弹簧钢有以下几种。

(1)65Mn、70 钢。这两种钢可用于制造截面直径小于 15 mm 的小型弹簧,如坐垫弹簧、发条、弹簧环、刹车弹簧、离合器簧片等。

(2)55Si2Mn、60Si2Mn。这类钢中加入了 Si、Mn 元素,提高了钢的淬透性,可用于制造直径为 20~25 mm 的弹簧,如汽车、拖拉机、机车上的减振板簧和螺旋弹簧、汽缸安全阀簧(工作温度小于 230 ℃)。

(3)50CrVA。50CrVA 不仅淬透性高,还有较高的热强性,适于制造工作温度在 350 ℃~400 ℃下的重载大型弹簧,如阀门弹簧、气门弹簧。

6) 滚动轴承钢

用来制造各种滚动轴承零件如轴承内外套圈、滚动体(滚珠、滚柱、滚针等)的专用钢称为滚动轴承钢。

根据其工作条件,要求滚动轴承钢具有高而均匀的硬度、高的弹性极限和接触疲劳强度、足够的韧性和淬透性,此外,还要求在大气和润滑介质中有一定的耐蚀性和良好的尺寸稳定性。

为了保证马氏体中有足够的含碳量及足够的弥散碳化物,满足高硬度高耐磨要求,轴承钢中的碳含量较高,一般碳的质量分数为 0.95%~1.15%。铬为基本合金元素,主要是为了提高钢的淬透性,使淬火、回火后整个截面上获得较均匀的组织,适宜的铬的质量分数为 0.40%~1.65%。



小提示

从化学成分看,滚动轴承钢属于工具钢范畴,所以这类钢也经常用于制造各种精密量具、冷冲模具、丝杠、冷轧辊和高精度的轴类等耐磨零件。

我国滚动轴承钢分为铬轴承钢和无铬轴承钢。目前以铬轴承钢应用最广,其中用量最大的是 GCr15,除用于中、小轴承外,还可以制作精密量具、冷冲模具和机床丝杠等。在制造大型和特大型轴承时,为了提高淬透性,常在铬轴承钢中加入 Si、Mn,如 GCr15SiMn 等。为了节省 Cr,加入 Si、Mn、Mo、V 等合金元素可得到无铬轴承钢,如 GSiMnMoV、GSiMnMoVRe 等,其性能与 GCr15 相近,但是脱碳敏感性较大且耐蚀性较差。

7) 易切削钢

易切削钢是指在钢中加入一种或几种易切削元素,使其切削加工性能得到明显改善的结构钢,简称为易切钢。易切削钢能降低切削力和切削热,减少刀具磨损,提高工件、刀具的寿命,改善排屑性能,提高切削速度。

自动机床加工的零件大多选用低碳易切削钢,对切削性能要求高的可选用含硫较高的 Y15,需要焊接的可选低硫的 Y12,对强度要求较高的可选用 Y20 或 Y30,车床丝杠可选用 Y40Mn。Y12Pb 广泛用于精密仪表行业,如制造手表、照相机齿轮、轴类等。新研制的 Y40CrSCa 适于高速切削,具有良好的切削加工性能。

2. 合金工具钢

主要用于制造各种加工和测量工具的钢称为工具钢。工具钢按其加工用途分为刀具、量具和模具用钢,按成分不同也可分为碳素工具钢和合金工具钢。在碳素工具钢的基础上

加入一定种类和数量的合金元素,用来制造各种刀具、模具、量具等的钢称为合金工具钢。与碳素工具钢相比,合金工具钢的硬度和耐磨性更高,而且合金工具钢还具有更好的淬透性、红硬性和回火稳定性。因此,合金工具钢常被用来制作截面尺寸较大、几何形状较复杂、性能要求更高的工具。

合金工具钢按用途可分为合金刀具钢、合金模具钢和合金量具钢。

1) 合金工具钢的牌号

合金工具钢牌号的表示方法与合金结构钢相似,基本组成为“一位数字(或无数字)+元素符号+数字+…”,其平均含碳量是用质量分数的千倍表示,当碳的质量分数 $w_C \geq 1.0\%$ 时,钢号中不标出。例如,9SiCr 的成分为 $w_C = 0.9\%$, $w_{Si} < 1.5\%$, $w_{Cr} < 1.5\%$;CrWMn 的成分分别为 $w_C \geq 1.0\%$, w_{Cr} 、 w_W 、 w_{Mn} 均小于 1.5% 。高速钢如 W18Cr4V、W6Mo5Cr4V2 等,碳的质量分数均小于 1.0% ,但不标明其数字;合金元素含量与合金工具钢的标注方法相同,如 W18Cr4V 的成分为 $w_C = 0.7\% \sim 0.8\%$, $w_W = 18\%$, $w_{Cr} = 4\%$, $w_V < 1.5\%$ 。合金工具钢均属于高级优质钢,但钢号后不加“A”字。属于这一编号方法的钢种还有不锈钢、奥氏体型和马氏体型耐热钢。

2) 合金刀具钢

刀具钢主要用于制造各种金属切削刀具,如车刀、铣刀、刨刀及钻头等。刀具钢经热处理之后应具有高硬度、高耐磨性、高红(热)硬性、高淬透性、足够的韧性和塑性。

合金刀具钢有两类:一类是低合金刀具钢,用于低速切削,其工作温度低于 $300\text{ }^\circ\text{C}$;另一类是高速钢,用于高速切削,工作温度高达 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(1) 低合金刀具钢。低合金刀具钢的典型牌号为 9SiCr 和 CrWMn。9SiCr 的淬透性高,油中淬火最大直径为 60 mm ,经 $230\text{ }^\circ\text{C} \sim 250\text{ }^\circ\text{C}$ 回火后硬度仍不低于 60 HRC ,常用于制造薄刃刀具和冷冲模等,工作温度小于 $300\text{ }^\circ\text{C}$ 。CrWMn 含有较多的碳化物,有较高的硬度和耐磨性,淬透性也较高,淬火后有较多残留奥氏体,工件变形很小,但其热硬性不如 9SiCr,常用于制造截面较大、切削刃受热不高、要求变形小、耐磨性高的刀具,如长丝锥、长铰刀、拉刀等,也常用做量具钢和冷作模具钢。

(2) 高速钢。高速钢主要有两种,一种为钨系 W18Cr4V(简称 18-4-1),另一种为钨-钼系 W6Mo5Cr4V2(简称 6-5-4-2)。前者的热硬性高,过热倾向小;后者的耐磨性、热塑性和韧性较好,适于制造要求耐磨性与韧性配合良好的薄刃细齿刀具。

3) 合金模具钢

模具是机械、仪表等工业部门中的主要加工工具。专门用于制造各种模具的钢材称为模具钢。根据使用状态,模具钢可分为两大类:一类是用于冷成形的冷作模具钢,工作温度不超过 $300\text{ }^\circ\text{C}$;另一类是用于热成形的热作模具钢,模具表面温度可达 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 。

(1) 冷作模具钢。冷作模具钢适用于制作在室温下对金属进行变形加工的模具,包括冷冲模、冷镦模、冷挤压模、拉丝模、落料模等。冷作模具应具有高的硬度和耐磨性,以承受很大的压力和强烈的摩擦;具有较高的强度和韧性,以承受很大的冲击和载荷,保证尺寸的精度并防止崩刃。截面尺寸较大的模具要求具有较高的淬透性,而高精度模具则要求热处理变形小。

根据冷作模具的工作条件可选用碳素工具钢,如 T8A、T10A、T12A 等,制造载荷大、尺寸小、形状简单的模具。合金工具钢,如 9SiCr、CrWMn、GCr15 等,可制造载荷、尺寸较大,形状较复杂,批量不很大的模具。而载荷大、形状复杂、变形要求小的大型冷作模具应选用



Cr12 型钢,如 Cr12MoV 等。

(2)热作模具钢。热作模具钢适用于制造在受热状态下对金属进行变形加工的模具,包括热锻模、压铸模、热镦模、热挤压模、高速锻模等。

在热作模具钢工作时经常会接触炽热的金属,型腔表面温度高达 $400\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因此,热作模具钢的主要性能要求是优异的综合力学性能、抗热疲劳性和高的淬透性等。

热作模具钢中,最常用的是 5CrMnMo 和 5CrNiMo,制造中、小型热锻模(模具有效高度小于 400 mm)一般选用 5CrMnMo,制造大型热锻模(模具有效高度大于 400 mm)多选用 5CrNiMo,5CrNiMo 的淬透性和抗热疲劳性比 5CrMnMo 好。热挤压模和压铸模冲击载荷较小,但因模具与热态金属长时间接触,对热硬性和热强性要求较高,常选用 3Cr2W8V、4Cr5MoSiV、4Cr3Mo3V 等钢种。其中 4Cr5MoSiV 是一种空冷硬化的热模具钢,广泛应用于制造模锻锤的锻模和热挤压模以及铝、铜及其合金的压铸模等。

4)合金量具钢

用于制造各种测量工具如游标卡尺、千分尺、块规、塞规等的合金钢称为合金量具钢。

量具在使用过程中必须保持自身尺寸的稳定性,因此,量具钢必须具有高硬度、高耐磨性、较高的尺寸稳定性、良好的耐蚀性。

一般非精密量具可选用碳素工具钢(如 T10A、T12A),对于精密量具,应选用 CrWMn、GCr15 等。如 CrWMn 其淬透性较高,淬火变形小,可用于制作高精度且形状复杂的量规及块规;GCr15 耐磨性及尺寸稳定性好,可用于制作高精度块规、千分尺。在腐蚀性介质中使用的量具可使用铬不锈钢(如 4Cr13、9Cr18 等)制造。

3. 特殊性能钢

特殊性能钢是指具有特殊物理和化学性能的专用钢,如不锈钢、耐热钢、耐磨钢、低温钢等。这些钢往往用在特殊工况条件下,故应具有某些特殊的性能。

1)不锈钢

不锈钢是指在大气和一般介质中具有很高耐蚀性的钢种。不锈钢主要包括两类,即耐大气腐蚀的钢(称为不锈钢)和耐化学介质(如酸类)腐蚀的钢(称为耐酸不锈钢)。前者不一定耐酸性介质,而耐酸不锈钢在大气中也有良好的耐蚀性。

金属腐蚀是指金属与周围介质发生作用而引起金属破坏的现象。按腐蚀机理的不同,金属腐蚀一般分为化学腐蚀和电化学腐蚀两类。金属腐蚀大多数是电化学腐蚀。提高金属抗电化学腐蚀性能的主要途径是合金化。

不锈钢常用两种方法分类:一种是按钢中的主要合金元素,不锈钢分为铬不锈钢和铬镍不锈钢;另一种是按正火态即经轧、锻、空冷后的组织形态,不锈钢分为马氏体不锈钢、铁素体不锈钢和奥氏体不锈钢。

2)耐热钢

在发动机、化工、航空等设备中有很多零件是在高温下工作,制造这些零件所用的要求具有高耐热性的钢称为耐热钢。

钢的耐热性包括高温抗氧化性和高温强度两个方面。金属的高温抗氧化性是指金属在高温下对氧化作用的抗力,而高温强度是指钢在高温下承受机械载荷的能力。因此,耐热钢是高温抗氧化性好、高温强度高的钢。

3)耐磨钢

从广泛的意义上讲,表面强化结构钢、工具钢和滚动轴承钢等具有高耐磨性的钢种都可



称为耐磨钢,但这里所指的耐磨钢主要是指在强烈冲击载荷或高压力的作用下发生表面硬化而具有高耐磨性的高锰钢,如车辆履带、挖掘机铲斗、破碎机颚板和铁轨分道叉等。

常用高锰钢的牌号有 ZGMn13(ZG 是“铸钢”两字的汉语拼音首字母)等。为了使高锰钢具有良好的韧性和耐磨性,必须对其进行水韧处理,即将钢加热到 $1\ 000\ ^\circ\text{C}\sim 1\ 100\ ^\circ\text{C}$,保温一定时间,使碳化物全部溶解,然后在水中快速冷却,碳化物来不及析出,即可在室温下获得均匀单一的奥氏体组织。此时钢的硬度很低(约为 210 HBW),而韧性很高。当工件在工作中受到强烈冲击或强大压力而变形时,高锰钢表面层的奥氏体会产生变形而出现加工硬化现象,并且还发生马氏体转变及碳化物沿滑移面析出,使硬度显著提高,能迅速达到 450~550 HBW,耐磨性也大幅度增加,而心部仍然是奥氏体组织,保持原来的高塑性和高韧性状态。需要指出的是,高锰钢经水韧处理后不可再回火或在高于 $300\ ^\circ\text{C}$ 的温度下工作,否则碳化物又会沿奥氏体晶界析出而使钢脆化。

三、铸铁

铸铁是碳的质量分数大于 2.11%(一般为 2.5%~5.0%),并且含有较多的 Si、Mn、S、P 等元素的多元铁碳合金。它与钢相比,抗拉强度、塑性、韧性较低,但具有优良的铸造性。

铸铁可以分为以下几类。

- (1)普通灰铸铁。普通灰铸铁中石墨呈片状。
- (2)可锻铸铁。可锻铸铁中石墨呈团絮状。
- (3)球墨铸铁。球墨铸铁中石墨呈球状。
- (4)蠕墨铸铁。蠕墨铸铁中石墨呈蠕虫状。

有时为了提高铸铁的力学性能或物理、化学性能,还可以加入一定量的合金元素,得到合金铸铁。

1. 灰铸铁

灰铸铁的牌号由“HT+数字”组成,其中,“HT”是“灰铁”二字汉语拼音的首字母,用以表示灰铸铁,其后的数字表示铸铁的最低抗拉强度。例如,HT250 表示抗拉强度 $R_m \geq 250\ \text{MPa}$ 的普通灰铸铁。

热处理只能改变铸铁的基体组织,而不能改变石墨的形状和分布。石墨片对基体连续性的破坏严重,因而灰铸铁易产生应力集中,所以热处理对灰铸铁的强化效果不大,其基体强度利用率只有 30%~50%。

2. 球墨铸铁

在浇注前向铁液中加入一定量的球化剂(如镁、稀土或稀土镁合金等)和少量的孕育剂(硅铁合金和硅钙合金)进行球化处理和孕育处理,在浇注后可获得具有球状石墨的结晶铸铁,称为球墨铸铁,简称为“球铁”。

球墨铸铁牌号由“QT”和两组数字组成。其中,“QT”是“球铁”二字的汉语拼音首字母,代表球墨铸铁。两组数字分别表示其最低抗拉强度和最低伸长率。例如,QT400-18 表示最低抗拉强度为 400 MPa,最低伸长率为 18%的球墨铸铁。

在球墨铸铁中,球形石墨对金属基截面削弱作用较小,使得基体比较连续;而且在拉伸时,应力集中明显减弱,从而使基体强度利用率可达 70%~90%。故球墨铸铁的强度、塑性和韧性都超过灰铸铁,刚度也比灰铸铁好。球墨铸铁不仅具有远远超过灰铸铁的力学性能,



还具有灰铸铁的一系列优点,如良好的铸造性、减摩性、切削加工性及低的缺口敏感性等;甚至在某些性能方面可与锻钢相媲美,如疲劳强度大致与中碳钢相近,耐磨性优于表面淬火钢等。但球墨铸铁的减振能力要比灰铸铁低很多。

由于球墨铸铁中金属基体是决定球墨铸铁力学性能的主要因素,所以球墨铸铁可通过合金化和热处理强化的方法来进一步提高其力学性能。因此,球墨铸铁可以在一定条件下代替铸钢、锻钢等,用以制造受力复杂、载荷较大和要求耐磨的铸件。

铁素体球墨铸铁具有较高的塑性和韧性,常用于制造阀门、汽车后桥壳、机器底座。珠光体基体球墨铸铁具有中高强度和较高的耐磨性,常用于制作拖拉机或柴油机的曲轴、凸轮轴、部分机床的主轴、轧辊等。贝氏体球墨铸铁具有高的强度和耐磨性,常用于制造汽车上的齿轮、传动轴及内燃机曲轴、凸轮轴等。

3. 蠕墨铸铁

蠕墨铸铁是近年来发展起来的一种新型工程材料。它是由铁液经变质处理和孕育处理冷却凝固后所获得的一种铸铁。通常采用的变质元素(又称为蠕化剂)有稀土硅铁镁合金、稀土硅铁合金、稀土硅铁钙合金或混合稀土等。铁液经变质处理后加入少量的孕育剂(硅铁合金)以促进其石墨化,使铸铁中的石墨具有介于片状和球状之间的形态。

蠕墨铸铁的牌号是以“蠕”字的汉语拼音“Ru”和“铁”字的汉语拼音首字母“T”作为代号,后面的一组数字表示其最低抗拉强度值。

与片状石墨相比,蠕虫状石墨的长厚比值明显减小,尖端变钝,因而对基体的割裂程度减小,其引起的应力集中也减小。因此,蠕墨铸铁的强度、塑性和抗疲劳性优于灰铸铁,其力学性能介于灰铸铁与球墨铸铁之间,常用于制造承受热循环载荷的零件,如钢锭模、玻璃模具、柴油机汽缸、汽缸盖、排气阀以及结构复杂、强度要求高的铸件,如液压阀的阀体、耐压泵的泵体等。

4. 可锻铸铁

可锻铸铁是由白口铸铁在固态下经长时间石墨化退火而获得的一种具有团絮状石墨的高强度铸铁,又称为马铁。由于可锻铸铁中的石墨呈团絮状,所以明显减轻了石墨对基体金属的割裂。与灰铸铁相比,可锻铸铁的强度和韧性有明显提高,但可锻铸铁并不能用锻造方法制成零件。

可锻铸铁牌号以“KT+字母+两组数字”表示,其中,“KT”是“可铁”二字汉语拼音的首字母,表示可锻铸铁;其后加汉语拼音字母“H”表示黑心可锻铸铁,加“Z”表示珠光体基体可锻铸铁;随后的两组数字分别表示最低抗拉强度和最低伸长率的百分值。

可锻铸铁中的团絮状石墨对基体的割裂程度及引起的应力集中比灰铸铁小,因而其力学性能优于灰铸铁,接近于同类基体的球墨铸铁。可锻铸铁最大的特点是具有一定的塑性和韧性,弹性模量比较高,刚度可达到钢材的范围,强度利用率可达到基体的40%~60%。由于经过长时间的退火处理,可锻铸铁的组织高度均匀,性能较好,而且具有良好的切削加工性。

可锻铸铁的力学性能介于灰铸铁与球墨铸铁之间,有较好的耐蚀性,但由于退火时间长,生产效率极低,其使用受到限制,故可锻铸铁一般用于制造形状复杂、承受冲击载荷且壁厚小于25 mm的铸件(如汽车、拖拉机的后桥壳、轮毂)。可锻铸铁也适用于制造在潮湿空气、炉气和水等介质中工作的零件,如管接头、阀门等。



由于球墨铸铁的迅速发展,加之可锻铸铁退火时间长、工艺复杂、成本高,不少可锻铸铁件已被球墨铸铁件所代替。

5. 合金铸铁

在普通铸铁的基础上加入一定量的合金元素所制成的特殊性能的铸铁,称为合金铸铁。它与特殊性能钢相比,熔炼简便,成本较低。但其脆性较大,综合力学性能不如钢。合金铸铁具有一般铸铁不具备的耐高温、耐腐蚀、抗磨损等特性。常见的合金铸铁有以下几类。

1) 耐磨铸铁

耐磨铸铁按其工作条件和磨损形式的不同可分为两大类:一是减磨铸铁,二是抗磨铸铁。

(1)减磨铸铁。减磨铸铁通常是在润滑条件下经受黏着磨损作用,如机床导轨、汽缸套、活塞环等,既要求磨损小,也要求摩擦系数小。其组织一般是软基体上分布硬强化相,软基体磨损后形成沟槽,可保持油膜,有利于润滑。符合这一要求的是珠光体基体的灰铸铁,其中铁素体是软基体,渗碳体是硬强化相,石墨片可起储油润滑作用。常用的减磨铸铁有高磷铸铁、磷铜钛铸铁和铬钼铜铸铁等。

(2)抗磨铸铁。抗磨铸铁是在干摩擦条件下经受各种磨粒的作用,例如轧辊、杂质泵叶轮、破碎机锤头、球磨机的衬板、磨球等,要求有高而均匀的硬度。白口铸铁是一种很好的抗磨铸铁,我国很早就用它制作犁铧等耐磨铸件,但普通白口铸铁因其脆性大不能制作承受冲击载荷的零件。普通白口铸铁中加入 Cr、Mo、Cu、V、B 等元素,可促进白口化,提高淬透性。目前,抗磨铸铁主要有抗磨白口铸铁、激冷铸铁、中锰耐磨铸铁等。

2) 耐热铸铁

普通灰铸铁的耐热性较差,只能在低于 400 °C 的环境下工作。耐热铸铁是指在高温下具有良好的抗氧化和抗热生长能力的铸铁。所谓热生长,是指氧化性气氛沿石墨片边界和裂纹渗入铸铁内部形成内氧化以及因渗碳体分解成石墨而引起体积的不可逆膨胀,结果将使铸件失去精度和产生显微裂纹。

耐热铸铁按其成分可分为硅系、铝系、硅铝系及铬系等。其中铝系耐热铸铁脆性较大,而铬系耐热铸铁的价格较贵,所以我国多采用硅系和硅铝系耐热铸铁。

3) 耐蚀铸铁

在铸铁中加入硅、铝、铬等合金元素能在铸铁表面形成一层连续致密的保护膜,可有效地提高铸铁的耐蚀性。另外,通过合金化还可获得单相金属基体组织,减少铸铁中的微电池,从而提高其耐蚀性。

目前应用较多的耐蚀铸铁有高硅铸铁(STSi15RE)、高硅钼铸铁(STSi15Mo3RE)、铝铸铁(STAl5)、铬铸铁(STCr28)、抗碱球铁(STQNiCrRE)等。

四、铝及铝合金

铁碳合金以外的其他金属及合金,如铝、铜、镁、钛、锡、铅、锌等金属及其合金称为有色金属。有色金属具有许多特殊性能,在机电、仪表,特别是在航空、航天及航海等工业中具有重要的应用。

铝是地壳中储量最多的一种元素,占地壳总质量的 8.2%。为了满足工业迅速发展的需要,铝及其合金是我国优先发展的重要有色金属。

1. 纯铝

纯铝是一种银白色的轻金属,熔点为 $660\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有面心立方晶格,没有同素异构转变。它的密度(2.72 g/cm^3)小,除镁和铍外,铝在工程金属中最轻,具有很高的比强度和比刚度;导电性、导热性好,仅次于金、铜和银。室温时,铝的导电能力约为铜的 62%;若按单位质量材料的导电能力计算,铝的导电能力为铜的 2 倍。纯铝的化学性质活泼,在大气中极易氧化,在表面形成一层牢固致密的氧化膜,有效地隔绝铝和氧的接触,从而阻止铝表面的进一步氧化,使它在大气和淡水中具有良好的耐蚀性。纯铝在低温下,甚至在超低温下都具有良好的塑性($A=80\%$)和韧性,这与铝具有面心立方晶格结构有关。铝的强度($R_m=80\sim 100\text{ MPa}$)低,冷变形加工硬化后强度可提高到 $R_m=150\sim 250\text{ MPa}$,但其塑性却降低到 $A=50\%\sim 60\%$ 。

纯铝具有许多优良的工艺性能,易于铸造、切削,也易于通过压力加工。上述这些特性决定了纯铝适合制造电缆以及要求具有导热性和抗大气腐蚀性而对强度要求不高的一些用品。

纯铝按纯度可分为三类。

(1)工业纯铝。工业纯铝中铝的质量分数为 $98.0\%\sim 99.0\%$,牌号有 1070、1060、1050、1035、1200 等。1070A、1060、1050A 用于高导体、电缆、导电机件和防腐机械,1035、1200、8A06 用于器皿、管材、棒材、型材和铆钉等。

(2)工业高纯铝。工业高纯铝中铝的质量分数为 $98.85\%\sim 99.90\%$,用于制造铝箔、包铝及冶炼铝合金的原料。

(3)高纯铝。高纯铝中铝的质量分数为 $99.93\%\sim 99.99\%$,主要用于制造特殊化学机械、电容器片和科学研究等。

2. 铝合金

纯铝的强度和硬度很低,不适宜作为工程结构材料使用。向铝中加入适量 Si、Cu、Zn、Mn 等主加元素和 Cr、Ti、Zr、B、Ni 等辅加元素组成铝合金,可提高强度并保持纯铝的特性。

1) 铝合金的分类

铝合金一般具有图 1-43 所示的相图。从图 1-43 可以看出,以 D 点成分为界可将铝合金分为变形铝合金和铸造铝合金两大类。 D 点以左的合金为变形铝合金,其特点是加热到固溶线 DF 以上时为单相 α 固溶体,具有塑性好的特点,适用于压力加工; D 点以右的合金为铸造铝合金,其组织中存在共晶体,适用于铸造。在变形铝合金中,成分在 F 点以左的合金其固溶体成分不随温度变化而变化,不能通过热处理强化,为不可热处理强化的铝合金;成分在 F 、 D 两点之间的合金其固溶体成分随温度变化而变化,可通过热处理强

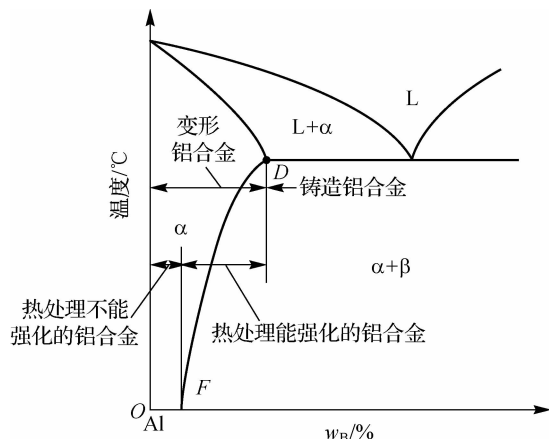


图 1-43 铝合金分类相图



化,为可热处理强化的铝合金。

2) 铝合金的代号、牌号表示方法

(1) 变形铝合金的分类和牌号。按性能特点和用途不同,变形铝合金可分为防锈铝合金、硬铝合金、超硬铝合金及锻铝合金。

根据国家标准 GB/T 16475—2008《变形铝及铝合金牌号表示方法》中的规定,变形铝合金命名有两种体系牌号,即国际四位数字体系牌号和四位字符体系牌号。国际四位数字体系牌号是由四位数字或四位数字后缀英文大写字母 A、B 或其他数字组成的,如 3004、2017A、6101B 等;四位字符体系牌号表示法的第一、三、四位是数字,第二位是大写英文字母 A、B 或其他字母,如 7C04、2D70 等。

两种表示方法中,第一位数字均表示变形铝合金的组别,具体见表 1-5。第二位的数字或字母表示铝合金的改型情况,字母 A 或数字 0 表示原始合金,B~Y 或 1~9 表示原始合金改型情况。牌号最后两位数字用以标识同一组中不同的铝合金,纯铝则表示铝的最低百分含量。

表 1-5 变形铝合金的组别

组 别	牌号系列
纯铝(铝含量不小于 99.00%)	1×××
以铜为主要合金元素的铝合金	2×××
以锰为主要合金元素的铝合金	3×××
以硅为主要合金元素的铝合金	4×××
以镁为主要合金元素的铝合金	5×××
以镁和硅为主要合金元素并以 Mg ₂ Si 相为强化相的铝合金	6×××
以锌为主要合金元素的铝合金	7×××
以其他合金元素为主要合金元素的铝合金	8×××
备用合金组	9×××

(2) 铸造铝合金的分类和牌号。按主加元素的不同,铸造铝合金可分为 Al-Si 系铸造铝合金、Al-Cu 系铸造铝合金、Al-Mg 系铸造铝合金和 Al-Zn 系铸造铝合金。

铸造铝合金的代号由“ZL+三位数字”组成。其中,“ZL”是“铸铝”二字的汉语拼音首字母,其后第一位数字表示合金类别,如 1、2、3、4 分别表示铝硅、铝铜、铝镁、铝锌系列合金;第二、三位数字表示顺序号,顺序号不同,化学成分也不同。例如,ZL102 表示 2 号铝硅系铸造铝合金。优质合金在牌号后加“A”,压铸合金在牌号前面用字母“YZ”表示。

铸造铝合金的牌号是由“Z+基体金属的元素符号+合金元素符号+数字”组成的。其中,“Z”是“铸”字的汉语拼音首字母,合金元素符号后的数字表示该元素的质量分数。例如,ZAlSi12 表示硅的质量分数为 12%的铸造铝合金。

3) 常用的变形铝合金

(1) 不可热处理强化的铝合金。

① Al-Mn 系合金。Al-Mn 系合金,如 3A21,其耐腐蚀性和强度比纯铝高,有良好的塑性和焊接性,但因太软而切削加工性能不良。Al-Mn 系合金主要用于焊接件、容器、管道或需用深延伸、弯曲等方法制造的低载荷零件、制品以及铆钉等。



②Al-Mg 系合金。Al-Mg 系合金,如 5A05、5A11,其密度比纯铝小,强度比 Al-Mn 系合金高,具有高的耐蚀性和良好的塑性,焊接性良好,但切削加工性能差。Al-Mg 系合金主要用于焊接容器、管道以及承受中等载荷的零件及制品,也可用于制作铆钉。

③Al-Zn-Mg-Cu 系合金。Al-Zn-Mg-Cu 系合金抗拉强度较高,具有优良的耐海水腐蚀性、较高的断裂韧度及良好的成形工艺性能,适于制造水上飞机蒙皮及其他要求耐腐蚀的高强度钣金零件。

(2)可热处理强化的铝合金。

①硬铝合金(Al-Cu-Mg 系)。Cu 和 Mg 的时效强化可使抗拉强度达到 420 MPa。铆钉用硬铝合金典型牌号为 2A01、2A10,淬火后冷态下塑性极好,时效强化速度慢,时效后切削加工性能也较好,可利用孕育期进行铆接,主要用于制作铆钉。

标准硬铝的典型牌号为 2A11,强度较高,塑性较好,退火后冲压性能好,主要用于形状较复杂、载荷较轻的结构件。

高强度硬铝的典型牌号为 2A12,强度、硬度高,塑性及焊接性较差,主要用于高强度结构件,如飞机翼肋、翼梁等。

硬铝合金的耐蚀性差,尤其不耐海水腐蚀,所以硬铝板材的表面常包有一层纯铝,以提高其耐蚀性,包铝板材在热处理后强度降低。

②超硬铝合金(Al-Zn-Mg-Cu 系)。超硬铝合金是工业上使用的室温力学性能最高的变形铝合金,抗拉强度可达 600 MPa,既可通过热处理强化,又可采用冷变形强化,其时效强化效果最好。其强度、硬度高于硬铝合金,故称为超硬铝合金,但其耐蚀性、耐热性较差。超硬铝合金主要用于要求质量轻、受力较大的结构件,如飞机大梁、起落架、桁架等。

③锻铝合金(Al-Cu-Mg-Si 系)。锻铝合金的力学性能与硬铝合金相近,但热塑性及耐蚀性较高,适于锻造,故称为锻铝合金。锻铝合金主要用于制造形状复杂并能承受中等载荷的各类大型锻件和模锻件,如叶轮、框架、支架、活塞、气缸头等。

4)常用的铸造铝合金

(1)铝硅合金(Al-Si 系)。铝硅合金密度小,有优良的铸造性(如流动性好、收缩及热裂倾向小)、一定的强度和良好的耐蚀性,但塑性较差。在生产中对它采用变质处理,可显著改善其塑性和强度。例如,ZAlSi12 是一种典型的铝硅合金,属于共晶成分,通常称为简单硅铝明,致密性较差,且不能热处理强化。若在铸造铝合金中加入 Cu、Mg、Mn 等合金元素,可获得多元铝硅合金(也称为特殊硅铝明),经固溶时效处理后强化效果更为显著。铝硅合金适于制造质轻、耐蚀、形状复杂且有一定力学性能要求的铸件或薄壁零件。

(2)铝铜合金(Al-Cu 系)。铝铜合金的优点是室温、高温下力学性能都很高,加工性能好,表面粗糙度小,耐热性好,可进行时效硬化。在铸铝中,它的强度最高,但铸造性和耐蚀性差,主要用来制造要求较高强度或高温下不受冲击的零件。

(3)铝镁合金(Al-Mg 系)。铝镁合金密度小,强度和塑性均高,耐蚀性优良,但铸造性差,耐热性低,时效硬化效果甚微,主要用于制造在腐蚀性介质中工作的零件。

(4)铝锌合金(Al-Zn 系)。铝锌合金铸造性好,经变质处理和时效处理后强度较高,价格便宜,但耐蚀性、耐热性差。铝锌合金主要用于制造工作温度不超过 200 °C、结构形状复杂的汽车、仪表、飞机零件等。



5) 铝合金的强化

铝合金的强化方式主要有固溶强化和时效强化两种。

(1) 固溶强化。纯铝中加入合金元素形成铝基固溶体,造成晶格畸变,以阻碍位错的运动,起到固溶强化的作用,可使其强度提高。根据合金化的一般规律,形成无限固溶体或高浓度的固溶体型合金时,不仅能获得高的强度,还能获得优良的塑性与良好的压力加工性能。Al-Cu、Al-Mg、Al-Si、Al-Zn、Al-Mn 等二元合金一般都能形成有限固溶体,并且均有较大的溶解度,因此具有较明显的固溶强化效果。

(2) 时效强化。经过固溶处理的过饱和铝合金在室温下或加热到某一温度后放置一段时间,其强度和硬度随时间的延长而增高,但塑性、韧性则降低,这个过程称为时效。在室温下进行的时效称为自然时效,在加热条件下进行的时效称为人工时效。时效过程使铝合金的强度、硬度增高的现象称为时效强化或时效硬化。

五、铜及铜合金

在有色金属中,铜的产量仅次于铝。铜及铜合金在我国有着悠久的历史,并且使用范围很广。

1. 纯铜

纯铜呈玫瑰红色,但容易与氧反应,在表面形成氧化铜薄膜,外观呈紫红色。纯铜具有面心立方晶格,无同素异构转变,密度为 8.96 g/cm^3 ,熔点为 $1083 \text{ }^\circ\text{C}$ 。纯铜具有优良的导电、导热性,其导电性仅次于银,故主要用做导电材料。铜是逆磁性物质,用纯铜制作的各种仪器和机件不受外磁场的干扰,故纯铜适合制作磁导仪器、定向仪器和防磁器械等。

纯铜的强度很低,软态铜的抗拉强度不超过 240 MPa ,但是具有极好的塑性,可以承受各种形式的冷热压力加工。因此,铜制品多是经过适当形式的压力加工制成的。在冷变形过程中,铜有明显的加工硬化现象,并且导电性略微降低。加工硬化是纯铜的唯一强化方式。冷变形铜材退火时,也和其他金属一样,产生再结晶。再结晶的程度和晶粒的大小显著影响铜的性能,再结晶软化退火温度一般为 $500 \text{ }^\circ\text{C} \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

纯铜的化学性能比较稳定,在大气、水、水蒸气、热水中基本上不会被腐蚀。工业纯铜中常含有微量的杂质元素,降低纯铜的导电性,使铜出现热脆性和冷脆性。

纯铜中还有无氧铜,牌号有 TU1、TU2,它们的含氧量极低,不大于 0.003% ,其他杂质也很少,主要用于制作电真空器件及高导电性铜线。无氧铜制作的导线能抵抗氢的作用,不发生氢脆现象。

2. 铜合金的分类

纯铜的强度不高,用加工硬化方法虽可提高铜的强度,但却会使其塑性大大降低,因此,常用合金化的方法来获得强度较高的铜合金。常用的铜合金可分为黄铜、青铜、白铜三类。

1) 黄铜

以锌为唯一或主要合金元素的铜合金称为黄铜。黄铜具有良好的塑性、耐蚀性、变形加工性和铸造性,在工业中有很好的应用价值。按化学成分的不同,黄铜可分为普通黄铜和特殊黄铜两类。



(1)普通黄铜。铜锌二元合金称为普通黄铜,其牌号由“H+数字”组成。其中,“H”是“黄”字的汉语拼音首字母,数字表示铜的平均质量分数。

(2)特殊黄铜。为了获得更高的强度、耐蚀性和某些良好的工艺性能,在铜锌合金中加入铅、锡、铝、铁、硅、锰、镍等元素,形成各种特殊黄铜。

特殊黄铜的牌号由“H+主加元素符号(锌除外)+铜的平均质量分数+主加元素的平均质量分数”组成。特殊黄铜可分为压力加工黄铜(以黄铜加工产品供应)和铸造黄铜两类,其中铸造黄铜在牌号前加“Z”。例如,HSn70-1表示铜的质量分数为69.0%~71.0%,锡的质量分数为1.0%~1.5%,其余为Zn的锡黄铜;ZHPb59-1表示铜的质量分数为57.0%~61.0%,铅的质量分数为0.8%~1.9%,其余为Zn的铸造铅黄铜。

2)青铜

青铜是人类历史上应用最早的合金,它是Cu-Sn合金,因合金中有 δ 相,呈青白色而得名。它在铸造时体积收缩量很小,充模能力强,耐蚀性好,有极高的耐磨性,故得到广泛的应用。近几十年来由于采用了大量的含Al、Si、Be、Pb和Mn的铜合金,习惯上也将其称为青铜,为了区别起见,把Cu-Sn合金称为锡青铜,而其他铜合金分别称为铝青铜、硅青铜、铍青铜、铅青铜和锰青铜等。

青铜按生产方式分为压力加工青铜和铸造青铜两类。其牌号是用“Q+主加元素符号+主加元素平均含量(或+其他元素平均含量)”表示,“Q”是“青”字的汉语拼音首字母。例如,QA15表示铝的平均质量分数为5%的铝青铜,QSn4-3表示锡的平均质量数为4%、锌的平均质量分数为3%的锡青铜。铸造青铜的牌号前加“Z”,如ZQSn10-5表示Sn的平均质量分数为10%,Pb的平均质量分数为5%,其余为Cu的铸造锡青铜。此外,青铜还可以合金成分的名义百分含量命名。例如,ZCuSn10Pb5表示锡的平均质量分数为10%、铅的平均质量分数为5%的铸造锡青铜。

3)白铜

以镍为主要添加元素的铜基合金呈银白色,故称为白铜。白铜根据加入的合金元素种类不同可分为普通白铜和复杂白铜。铜镍二元合金(即二元白铜)称为普通白铜。加有锰、铁、锌、铝等元素的白铜合金称为复杂白铜(即三元以上的白铜),包括铁白铜、锰白铜、锌白铜和铝白铜等。

普通白铜的代号以“B+数字表示”,字母B表示镍的含量,如B5表示镍的含量约为5%,其余为铜的含量。复杂白铜的代号以“B+元素符号+数字-数字”表示,第一个数字表示镍的含量,第二个数字表示第二主加元素的含量。如BMn3-12表示镍的含量约为3%,锰的含量约为12%。

由于镍和铜能形成无限互溶的固溶体,在铜中加入镍元素可以显著提高其强度、硬度、电阻和热电性,并降低电阻率、温度系数,因此白铜较其他铜合金的力学性能、物理性能都异常良好,延展性好、硬度高、色泽美观、耐腐蚀、深冲性能好,被广泛用于造船、石油化工、电器、仪表、医疗器械、日用品、工艺品等领域,白铜还是重要的电阻及热电偶合金。白铜的缺点是主加元素镍属于稀缺的战略物资,价格比较昂贵。

六、滑动轴承合金

滑动轴承是用以支承轴进行工作的重要部件。与滚动轴承相比,滑动轴承具有承压面



积大、工作平稳、无噪声以及拆卸方便等优点,广泛作为机床主轴轴承、发动机轴承以及其他动力设备的轴承。

滑动轴承合金用于制造滑动轴承中的轴瓦及轴承衬。当轴旋转时,轴瓦和轴发生强烈的摩擦,并承受周期性载荷。由于轴的制造成本高,所以应首先考虑使轴的磨损最小,再尽量提高轴承的耐磨性。为此,滑动轴承合金应具备较高的抗压强度、疲劳强度、耐磨性,良好的磨合性,较小的摩擦系数,足够的塑性和韧性,良好的耐蚀性、导热性,较小的热膨胀系数和良好的工艺性。

滑动轴承合金是以锡或铅为基体的合金,一般称为巴氏合金。其牌号为“Z+基体元素符号+主加元素符号+主加元素的质量分数+辅助元素+辅助元素的质量分数”,其中,“Z”是“铸”的汉语拼音首字母。例如,ZSnSb11Cu6表示锡的平均质量分数为11.0%、铜的平均质量分数为6%的锡基轴承合金。常用的轴承合金除锡基轴承合金、铅基轴承合金外,还有铝基和铜基轴承合金。

1. 锡基轴承合金

锡基轴承合金是一种在软基体分布硬质点的轴承合金。它是以锡、锑为基础,并加入少量其他元素的合金。常用的牌号有ZSnSb11Cu6、ZSnSb8Cu4、ZSnSb4Cu4等。

锡基轴承合金热膨胀系数小,磨合性良好,抗咬合性、嵌藏性、耐蚀性、导热性和浇注性能也很好。锡基轴承合金的缺点是疲劳强度较低,工作温度也较低(一般不大于150℃),价格高。

2. 铅基轴承合金

铅基轴承合金是以Pb-Sb为基体的合金,但二元Pb-Sb合金有密度偏析,同时锑颗粒太硬,基体又太软,只适用于制造速度低、载荷小的次要轴承。为改善其性能,要在合金中加入其他合金元素,如Sn、Cu、Cd、As等。常用的铅基轴承合金为ZPbSb16Sn16Cu2,表示锡的质量分数为15%~17%,锑的质量分数为15%~17%,铜的质量分数为1.5%~2.0%,余量为铅的铅基轴承合金。

铅基轴承合金的硬度、强度、韧性都比锡基轴承合金低,但摩擦系数较大,价格便宜,铸造性好。铅基轴承合金常用于制造承受中、低载荷的轴承,但其工作温度不能超过120℃。

铅基、锡基巴氏合金的强度都较低,为了提高巴氏合金的疲劳强度、承压能力和使用寿命,常把它镶铸在钢的轴瓦(一般用08钢冲压成形)上形成薄而均匀的轴承衬,才能发挥作用。这种工艺称为挂衬,这种结构的轴承称为双金属轴承。

3. 铝基轴承合金

铝基轴承合金是以Al为基本元素,Sb或Sn等为主加元素的轴承合金。它具有密度小、导热性好、疲劳强度高和耐蚀性好等优点。铝基轴承合金原料丰富,价格便宜,广泛用于制造高速高载荷条件下工作的轴承。按化学成分将铝基轴承合金分为铝锡系、铝锑系和铝石墨系三类。

(1)铝锡系轴承合金是一种既有高疲劳强度,又有适当硬度、耐热性和良好耐磨性的轴承合金,在轧制成成品后,经退火使锡球化,获得在较硬的铝基体上弥散分布着较软的球状锡的组织。铝锡系轴承合金适用于制造高速、重载条件下工作的轴承。

(2)铝锑系轴承合金适用于载荷不超过2000MPa、滑动线速度不大于10m/s条件下工

作的轴承。

(3) 铝石墨系轴承合金具有优良的自润滑作用和减振作用以及耐高温性,适用于制造活塞和机床主轴的轴承。

铝基轴承合金的缺点是膨胀系数较大,抗咬合性低于巴氏合金。为此,常采用较大的轴承间隙,并采取降低轴与轴承表面的粗糙度值和镀锡的措施来改善其综合性,以减小启动时发生咬合的危险性。

4. 铜基轴承合金

铜基轴承合金是以 Pb 为基本合金元素的铜基合金,也称为铅青铜。由于固态下 Pb 不溶于 Cu,所以铅青铜在室温时的组织是在硬基体铜上均匀分布着软的铅颗粒,极有利于保持润滑油膜,使合金具有优良的耐磨性。此外,铅青铜比巴氏合金更能耐疲劳、抗冲击,承载能力也更强,所以铜基轴承合金可用于制造高速、高载荷下的发动机轴承和其他高速重载轴承。



拓展训练

一、训练内容

某小型汽油发动机结构如图 1-44 所示,其主要支承件是缸体和缸盖。缸体内有汽缸,汽缸内有活塞、连杆、曲轴及轴承,缸体的右侧面有凸轮轴,背面有离合器壳、飞轮(图中未画出),缸体底部为油底壳,缸盖顶部有进气门、排气门、挺杆、摇臂,右上部为配电器,左上部为化油器及火花塞。试为该小型汽油发动机各主要零件选定合适的材料。

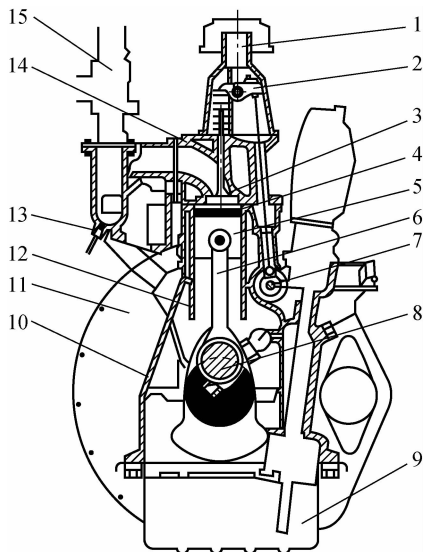


图 1-44 小型汽油发动机结构简图

- 1—油杯; 2—摇臂; 3—气门; 4—活塞环; 5—活塞; 6—连杆; 7—凸轮轴; 8—曲轴;
9—油底壳; 10—缸体; 11—离合器壳; 12—汽缸; 13—火花塞;
14—缸盖; 15—化油器



二、任务分析

发动机工作时,首先由配电系统控制化油器及火花塞点火,汽缸内的可燃气体燃烧膨胀,产生很大压力,使活塞下行,借助连杆将活塞的往复直线运动转变为曲轴的回转运动;同时通过曲轴上的飞轮储存能量,使其转动平稳连续;再通过离合器及齿轮传动机构,将发动机的动力用来驱动汽车行驶。发动机中的凸轮轴、连杆、摇臂系统用来控制进气门、排气门的实时开闭,周期性地实现进气、点火燃烧、膨胀、活塞下行推动曲轴回转、活塞上升、排气等步骤,连续不断地进行循环工作。

三、具体结果

1. 缸体、缸盖

缸体、缸盖形状复杂,为基础支承件,有减振性的要求,故选择 HT200 或 HT250。

2. 曲轴、连杆、凸轮轴

曲轴、连杆、凸轮轴由于对力学性能要求较高,故可选择 45 钢、40Cr 等调质钢,也可以选用 QT600-3 或 QT700-2。

3. 活塞

活塞选择铸造铝合金 ZL109。

4. 活塞环

活塞环是套在活塞外圆表面的环槽中,并与汽缸壁直接接触进行滑动摩擦的零件。要求其具有良好的减摩和自润滑特性,并应承受活塞头部点火燃烧所产生的高温和高压,故可采用 HT250。

5. 离合器壳、油底壳

离合器壳、油底壳属于薄壁件,其中离合器壳对力学性能有一定要求,可选用 QT400-15,油底壳对力学性能要求不高,可采用 HT200,要求质量轻时,可选用 10 钢。

6. 摇臂

摇臂形状较复杂,在工作时承受频繁摇摆及点击气门顶杆的作用力,应有一定的力学性能和疲劳强度,并且与顶杆接触的头部要求耐磨,可选用 ZG270-500。

7. 飞轮

飞轮工作时承受较大的转动惯量,要求有足够的强度,在低速发动机上可采用 QT600-3,高速发动机上采用 45 钢。

8. 进、排气门

进气门工作环境温度不高,采用 40Cr;排气门在 600 °C 以上的高温下工作,采用耐热钢 4CrNi9Si2。

9. 曲轴轴承及连杆轴承

曲轴轴承及连杆轴承均属于滑动轴承,可选用减磨性能优良的铸造铜合金 ZCuSn5Pb5Zn5。



10. 化油器

化油器为形状复杂的薄壁件,多采用铸造铝合金 ZL110。

另外,该小型汽油发动机还用到了一些非金属材料,如缸盖与缸体的密封垫采用石棉,密封圈采用橡胶,气门座圈采用粉末冶金材料,一些受热不大的零件可采用工程塑料等。

思考与练习

一、名词解释

固溶体、淬透性、时效强化、临界冷却速度、共晶转变、固溶强化、残留奥氏体、调质处理、过冷奥氏体

二、判断题

1. 细化晶粒虽能提高金属的强度,但增大了金属的脆性。 ()
2. 结构钢的淬透性随钢中碳的质量分数的增加而增强。 ()
3. 普通低合金结构钢不能通过热处理进行强化。 ()
4. 置换固溶体必是无限固溶体。 ()
5. 单晶体必有各向异性。 ()
6. 普通钢和优质钢是按其强度等级来区分的。 ()
7. 奥氏体耐热钢也就是奥氏体不锈钢。 ()
8. 马氏体的晶体结构和铁素体相同。 ()
9. 面心立方金属的塑性比体心立方金属好。 ()
10. 铁素体是置换固溶体。 ()
11. 晶界是金属晶体的常见缺陷。 ()
12. 渗碳体是钢中常见的固溶体。 ()
13. 金属的塑性变形主要通过位错的滑移进行。 ()
14. 金属在进行热加工时不会产生加工硬化现象。 ()
15. 钢经热处理后,其组织和性能必然会改变。 ()
16. 纯金属都是在恒温下结晶的。 ()
17. 白口铸铁是指碳全部以石墨形式存在的铸铁。 ()
18. 白口铸铁铁液凝固时不会发生共析转变。 ()
19. 铸件可用再结晶退火细化晶粒。 ()
20. 奥氏体的塑性比铁素体的高。 ()
21. 马氏体转变是通过切变完成的,而不是通过形核和长大来完成的。 ()
22. 金属中的固态相变过程都是晶粒的重新形核和长大过程。 ()
23. 位错的滑移可沿晶体中的任意面和任意方向进行。 ()
24. 对金属进行冷、热加工都会产生加工硬化。 ()
25. 在共析温度下,奥氏体的最低含碳量为 0.77%。 ()
26. 亚共析钢正火后组织中的珠光体含量高于其退火后组织中的珠光体含量。 ()



14. 对工件进行分级淬火的目的是()。
- A. 得到下贝氏体
B. 减少残留奥氏体量
C. 减少工件变形
D. 缩短生产周期
15. 钢获得下列()组织时有最佳的综合力学性能。
- A. M+K
B. P+F
C. B
D. M+P
16. 为了提高 45 钢的综合力学性能,应进行()。
- A. 正火
B. 调质
C. 退火
D. 淬火+中温回火
17. 等温退火相对于一般退火工艺而言,更能()。
- A. 减小工件变形
B. 消除应力
C. 细化晶粒
D. 缩短退火周期
18. 40Cr 中碳的质量分数约为()。
- A. 40%
B. 4%
C. 0.4%
D. 0.04%

四、简答题

1. 某过共析钢工件因终锻温度过高,其组织中出现了网状渗碳体,对工件的力学性能有何影响? 采用何种工艺可将其消除?
2. 某 T12 钢工件退火时,误将其当做 45 钢而进行了完全退火,其组织和性能会发生什么变化? 若该工件切削加工困难,应采用什么热处理工艺来改善?
3. 试说明淬火钢中出现残留奥氏体的原因。残留奥氏体对钢的性能有何影响? 采用什么工艺能将其消除?
4. 试说明为什么亚共析钢必须进行完全淬火,而过共析钢则只能进行不完全淬火。
5. 高碳高合金钢工件淬火时极易开裂,采取什么措施可有效防止其开裂?
6. 确定下列工件的退火工艺,并说明其原因。
 - (1) 冷轧 15 钢钢板要求降低硬度。
 - (2) 正火态的 T12 钢坯要求改善其切削加工性。
 - (3) 锻造过热的 60 钢锻坯要求细化晶粒。
7. 某 40MnB 主轴要求整体有足够的韧性,表面要求有较高的硬度和耐磨性,采用何种热处理工艺可满足要求? 简述理由。
8. 金属晶粒大小对金属的性能有何影响? 说明铸造时细化晶粒的方法及其原理。
9. T12 钢工件经正常淬火后其表面硬度比 60 钢低的原因是什么? 如何进一步提高其硬度?
10. 常见的合金结构钢有哪些? 写出其牌号,并说明其在一般使用时的热处理状态(即最终热处理)和用途。