



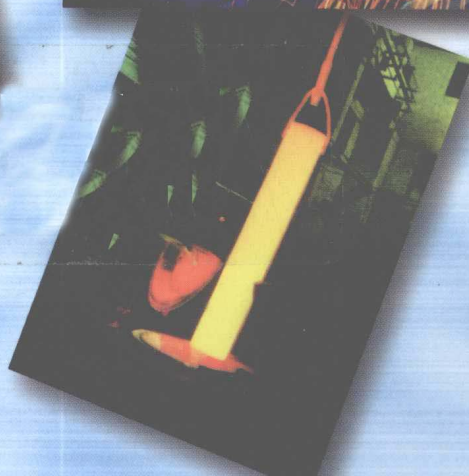
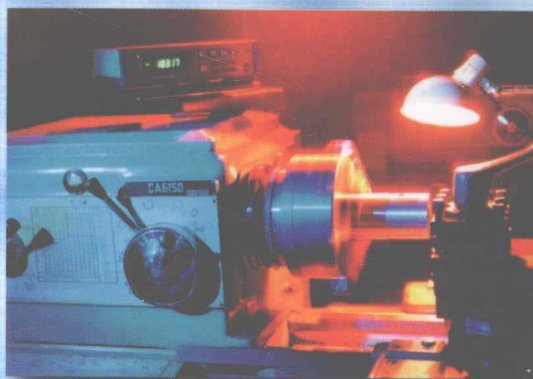
高等学校“十一五”规划教材 / 机电工程系列

金属工艺学

(第2版)

JINSHU GONGYIXUE

邢忠文 张学仁 主编
陈洪勋 主审



哈尔滨工业大学出版社

机电工程系列丛书

金属工艺学

(第2版)

邢忠文 张学仁 主编

陈洪勋 主审

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

本书分上、下两编。上编共六章:金属结构、金属的工艺性能、金属材料的改性方法、铸造、塑性加工、焊接;下编共八章:金属切削加工基础、外圆内孔平面加工、螺纹和齿形加工、精密加工、特种加工、机械加工工艺过程的制定、零件结构工艺性、数控加工。全书较系统地介绍了金属材料的工艺性能及各种加工方法的原理、特点、工艺过程和零件结构设计原则。同时对有关的新技术、现代加工方法也作了简要介绍。

本书可作为高等工科院校相关专业的教材,也可供有关的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属工艺学/邢忠文主编. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2003.8

ISBN 978 - 7 - 5603 - 1437 - 2

I .金… II .邢… III .金属加工 - 工艺学 - 高等学校 - 教材 IV .TG

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 040207 号

责任编辑 黄菊英

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451 - 86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 肇东粮食印刷厂

开 本 787mm × 1092mm 1/16 印张 15 字数 364 千字

版 次 1999 年 10 月第 1 版 2003 年 8 月第 2 版

2007 年 2 月第 5 次印刷

书 号 ISBN 978 - 7 - 5603 - 1437 - 2

定 价 18.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

再版前言

本书是以 1999 年版《金属工艺学》(邢忠文、张学仁主编)为基础,根据 2002 年教育部机械基础课程教学指导分委员会关于《工程材料及机械制造基础系列课程教学基本要求》(修订稿)和《工程材料及机械制造基础系列课程教学改革指南》(修订稿)的精神,结合本书第 1 版 3 年多的使用经验和哈尔滨工业大学的实际教学需要而改编的。

本次修订主要进行了以下几方面的工作:

(1) 结合国家有关最新标准,对原版中过时的名词、术语、符号、量纲等进行修正。

(2) 改正原版中的文字错误和插图错误。

(3) 对原版的部分内容进行调整。

(4) 为了适应多媒体教学的需要,本次修订增加了与本书相配套的电子版教材,采用了大量的图片、三维动画和反映实际生产过程的视频影像,信息量大,便于学生自学和教师授课。

本书共分上、下两编。上编修订由邢忠文担任主编,下编修订由张学仁担任主编,参加修订工作的有邢忠文(上编第一、二、三、四、五、六章),张学仁(下编第七、十一、十四章),韩秀琴(下编第八、九、十二、十三章),王少纯(下编第十章)。杜丽娟、胡秀丽、包军参与了上编的修订工作,杨洪亮、蔡志刚参与了下编的修订工作。全书由陈洪勋主审。

与本书配套的电子版教材由胡秀丽、邢忠文、杨洪亮主编,教学软件及动画由杨楠、刘明霞制作,韩秀琴、杜丽娟也参加了制作工作,张学仁主审。

由于编者水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2003 年 6 月

前 言

金属工艺学是研究金属零件加工工艺方法的综合性很强的技术基础学科,是现代工程材料和机械制造高等工科教育中不可缺少的部分。尤其在培养学生的工程意识、创新思想、运用规范的工程语言和技术信息解决工程实际问题的能力方面,更具有其他学科所不能替代的重要作用。

本书内容力求全面反映前国家教委《工程材料及机械制造课程教学基本要求》和工程材料及机械制造基础课程指导组《工程材料及机械制造基础系列课程改革指南》的精神,结合哈尔滨工业大学多年的教学改革经验,在介绍传统工艺方法的同时,更加注重了新方法、新技术及其发展趋势的介绍。在内容安排上,打破传统的内容体系,将各种工艺方法中基础、共性的知识综合在一起,放在前面首先介绍,为后续内容奠定基础。

本书力求简洁明了、重点突出。对传统内容作了较大的压缩和调整,并尽量避免与金工实习的内容重复,使之更适应学科调整后的学时安排。

本书尽可能贯彻新国标及标准名词术语。

本书共分上、下两编。上编由邢忠文主编;下编由张学仁主编。上编第一、二、三、五、六章由邢忠文编写,第四章由齐秀梅编写;下编第一、五、八章由张学仁编写,第二、三、六、七章由韩秀琴编写,第四章由王少纯编写,杨洪亮参与第六章的编写。全书由陈洪勋主审。

由于作者水平所限,书中难免有疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

作 者

1999 年 6 月

目 录

上 编

第一章 金属结构

- 1.1 晶格类型 (1)
- 1.2 金属的同素异构转变 (2)
- 1.3 实际金属的晶体结构 (3)
- 1.4 铁碳合金 (4)

第二章 金属的工艺性能

- 2.1 金属的加热 (8)
- 2.2 金属的冷却 (11)
- 2.3 金属的塑性变形 (17)
- 2.4 金属的工艺性能 (20)

第三章 金属材料的改性方法

- 3.1 整体热处理方法 (26)
- 3.2 表面热处理方法 (30)

第四章 铸造

- 4.1 铸造工艺规程制定 (33)
- 4.2 铸造方法 (39)
- 4.3 铸造合金 (49)
- 4.4 铸件结构设计 (53)

第五章 塑性加工

- 5.1 锻造成形 (60)
- 5.2 板料冲压成形 (71)
- 5.3 挤压成形 (79)
- 5.4 轧制成形 (80)
- 5.5 拉拔成形 (82)
- 5.6 特种塑性加工方法 (83)
- 5.7 塑性加工零件的结构设计 (92)

第六章 焊接

- 6.1 电弧焊 (97)
- 6.2 其他常用焊接方法 (108)
- 6.3 常用金属材料的焊接 (116)
- 6.4 焊接结构设计 (119)

下 编

第七章 金属切削加工基础

7.1 刀具的几何形状及刀具材料	(126)
7.2 金属切削过程及其伴生的物理现象	(131)
7.3 加工质量及生产率	(139)
7.4 切削用量的合理选择	(141)
7.5 工件材料的切削加工性	(142)
7.6 几个名词术语及六点定位原理	(143)
7.7 C6136 型卧式车床传动系统分析	(145)

第八章 外圆、内孔、平面加工

8.1 外圆表面加工	(149)
8.2 内圆表面加工	(154)
8.3 平面加工	(165)

第九章 螺纹和齿形加工

9.1 螺纹加工	(172)
9.2 齿形加工	(175)

第十章 精密加工

10.1 磨料精密加工	(183)
10.2 刀具精密加工	(187)

第十一章 特种加工

11.1 电火花加工	(189)
11.2 电火花线切割加工	(190)
11.3 电解加工	(191)
11.4 超声加工	(193)
11.5 激光加工	(194)

第十二章 机械加工工艺过程的制定

12.1 制定机械加工工艺过程的基本知识	(196)
12.2 典型零件加工工艺	(203)

第十三章 零件结构工艺性

13.1 零件结构工艺性的概念	(212)
13.2 零件结构的切削加工工艺性举例	(212)
13.3 零件结构的装配工艺性举例	(220)

第十四章 数控加工

14.1 数控加工的基本原理	(223)
14.2 数控机床的分类	(225)
14.3 计算机数控机床	(227)
14.4 柔性自动化加工	(229)

参考文献	(233)
------------	-------

上 编

第一章 金属结构

1.1 晶格类型

固态金属的原子彼此靠金属键结合在一起,表现出有规则排列的特征。即固态金属具有晶体结构。

为了便于说明晶体中原子排列的规律,用假想直线将各原子的振动中心连接起来,构成空间格架。这种用以描述原子在晶体中排列形式的空间格架称为晶格(图 1.1(a))。

晶格中原子组成的平面称为晶面,故晶格或晶体可以看成是由层层晶面堆砌而成的结构。晶格中通过两个以上原子振动中心的直线称为晶向。它能表示晶格或晶体的空间方位。而晶格中最简单、最基本、最典型的空间几何体称为晶胞(图 1.1(b))。它代表着晶格的结构形式。整个晶格就是由许多个大小、形状和位向相同的晶胞重复堆集而成的。晶胞的棱边长度称为晶格常数,其大小用 $\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$) 来度量。

固态纯金属的晶格有多种形式,90% 以上的金属晶体属于以下三种基本类型:

一、体心立方晶格

体心立方晶格的晶胞如图 1.2(a)所示。8 个原子组成一个立方体,立方体的中心处

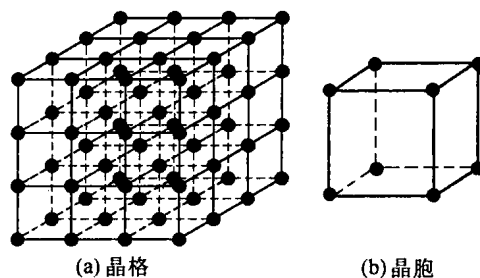


图 1.1 原子规则排列示意图

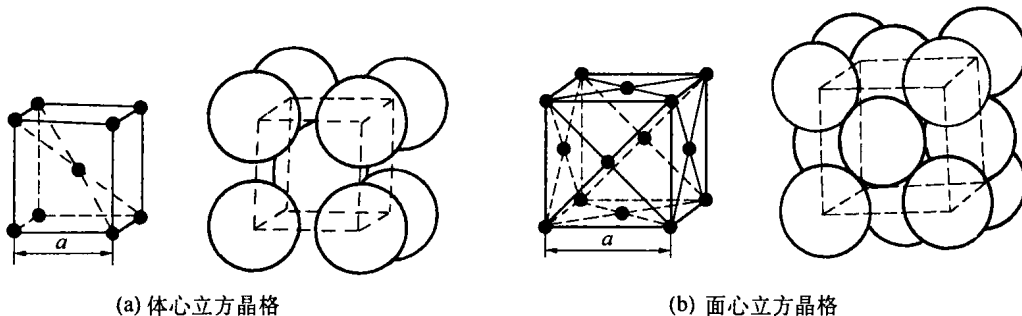


图 1.2

还分布有 1 个原子。这种晶胞所占有的实际原子数为 2,各棱边长度相等,用一个晶格常数表示。具有这种晶格的金属有 α -Fe、Cr、Mo、W、V 及 β -Ti 等。

二、面心立方晶格

面心立方晶格的晶胞如图 1.2(b)所示。8 个原子组成一个立方体,立方体各面的中心处还分布有 1 个原子。这种晶胞所占有的实际原子数为 4,各棱边长度相等,用一个晶格常数表示。具有这种晶格的金属有 γ -Fe、Cu、Al、Ni、Pb 及 β -Co 等。

三、密排六方晶格

密排六方晶格的晶胞如图 1.3 所示。

12 个原子组成一个六棱柱体,上下两个六边形中心处各有 1 个原子,六棱柱体的心部还分布有 3 个原子。这种晶胞所占有的实际原子数为 6,用两个晶格常数(六边形的一个边长和棱柱长度)表示。具有这种晶格的金属有 Mg、Be、Cd、Zn、 α -Ti 及 α -Co 等。

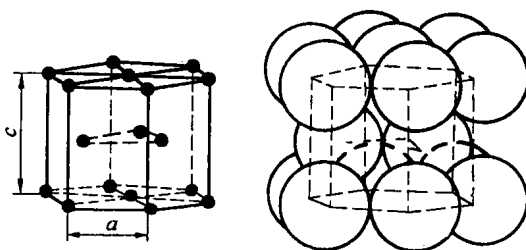


图 1.3 密排六方晶格

金属的晶格类型和大小不同,晶格中原子排列的密度不同,都必将造成金属性能的很大差异。同一种金属在不同方向上的性能也会有所不同,即表现出金属的性能具有方向性。因此在选用金属材料 and 制定工艺规程中,要考虑这个特性,以保证能充分发挥材料的作用,保证金属零件的质量。

1.2 金属的同素异构转变

多数固态纯金属的晶格类型不会改变。但有些金属(如铁、锰、锡、钛、钴等)的晶格会因温度的改变而发生变化。固态金属在不同温度区间具有不同晶格类型的性质,称为同素异构性。发生晶格改变的过程称为同素异构转变。而这种转变的实质是原子进行重新排列。

图 1.4 所示为纯铁的冷却曲线。液态纯铁冷却到 1538℃ 转变成为固态纯铁,它具有体心立方晶格,称为 δ -Fe。继续冷却到 1394℃ 时发生同素异构转变,晶格类型转变成为面心立方晶格,称为 γ -Fe。温度降至 912℃ 时

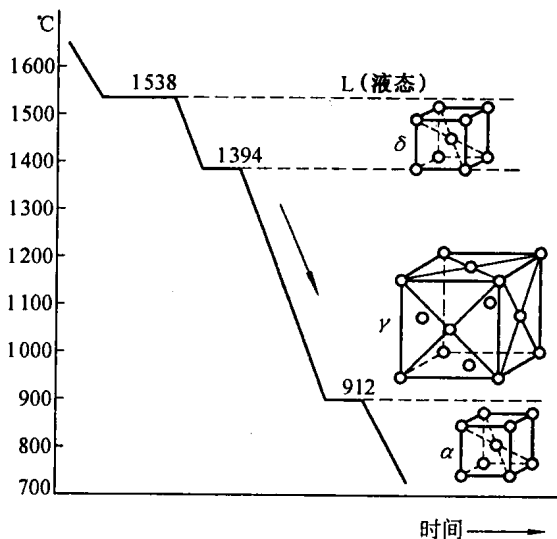


图 1.4 纯铁的冷却曲线

再次发生同素异构转变,获得体心立方晶格的 α -Fe。直至室温,纯铁的晶格类型不再发生变化。

冷却曲线上的水平段,说明同素异构转变是恒温转变。即同素异构转变中,金属内部有能量变化,放出潜热平衡所散失的热量,使整个系统的温度不发生改变。

同素异构转变前后,因晶格类型不同,将引起金属体积的变化。如 γ -Fe转变为 α -Fe时,纯铁的体积增大。这种体积变化的现象会对热加工产品的质量产生一定的影响,应加以注意。

纯金属具有同素异构性,在掺入其他元素后,其结构会有多种类型。这样,就可以采用热处理工艺来改变金属的性能,自然也就扩大了该种金属的使用范围。

1.3 实际金属的晶体结构

金属内所有原子排列的形式和方位都完全一致的结构,称为单晶体。具有单晶体结构的金属,其性能表现出明显的方向性,但其获得非常困难。而实际固体金属是由许许多多的小晶体所组成,称为多晶体。

图 1.5 所示为固体金属的多晶体结构。其中每一个外形不规则的小晶体称为晶粒。晶粒间的界面称为晶界。实际金属的结构基本都是多晶体结构,每个晶粒的尺寸约为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ mm。由于各晶粒的位向不同,各晶粒性能的方向性彼此抵消,因而多晶体结构的金属,在性能上没有方向性。

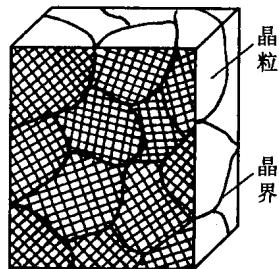


图 1.5 多晶体

另外,实际金属的晶体结构中都存在有缺陷,这些缺陷对金属的性能有很大影响。

1. 点缺陷

实际金属的晶格中并非所有原子都处在正常位置上。在外界条件的干扰下,某些原子会脱离其平衡位置,使该处成为空位状态。同时,在晶格的间隙中也可以滞留多余原子(图 1.6)。这些情况都使晶格的规则性受到破坏,形成晶格的缺陷。

晶格中有空位和间隙原子时,使其周围原子间的作用力不再平衡,这些原子也将被迫偏离原平衡位置,致使该局部晶格的形状和晶格常数都发生改变,即产生了晶格畸变。

2. 线缺陷

线缺陷是指晶格中某一系列或若干列原子出现有规律的错排(称为位错),破坏了晶格的规则性而形成的缺陷(图 1.7)。

位错类型有许多种,图 1.7 所示刃型位错是最简单的一种。图中的 EF 线称为位错线。通常以单位体积内位错线的总长度来表示位错密度,其单位为 cm/cm^3 (或 cm^{-2})。实际金属中位错密度在 $10^4 \sim 10^{12} \text{cm}/\text{cm}^3$ 范围内。对金属进行不同的工艺处理,位错密度将明显改变,金属的力学性能也随之有较大的变化。

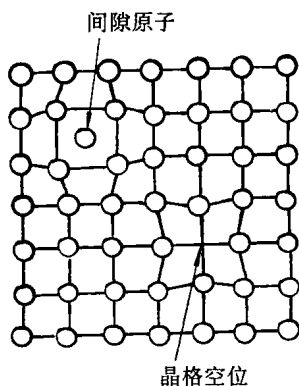


图 1.6 晶格点缺陷

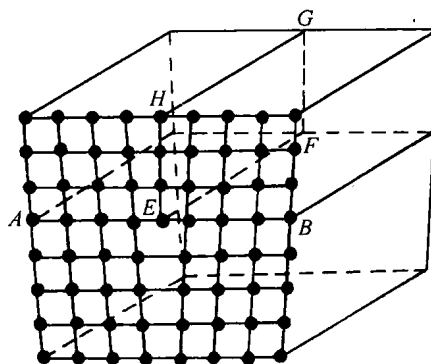


图 1.7 刃型位错示意图

3. 面缺陷

由于实际金属是多晶体结构,故有晶界存在,晶界的存在就是晶体面缺陷的一种。晶界有一定的厚度,它是不同位向晶粒间原子不规则排列的过渡层,晶界厚度的不同,晶界处的状态(如存在杂质或为平面形等)不同,都直接改变着金属的性能。

当晶粒内部存在一系列刃型位错时,就会形成所谓的亚晶界(图 1.8),此亦属晶体的面缺陷。

在实际金属的晶体结构中,还会存在非金属氧化物等颗粒状物质,也可能有微细裂纹或孔洞类缺陷。这些可视为晶体的体缺陷。

上述缺陷的存在,既可能降低金属的性能,也可能改善和提高金属的某些性能。正确处理好缺陷的形式或数量,就可以控制金属件的品质,从而满足各种条件对零件性能的要求。

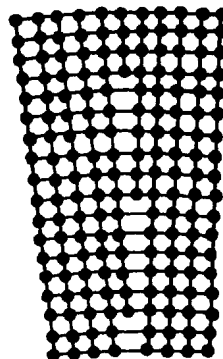


图 1.8 亚晶界图

1.4 铁碳合金

一、合金及其结构

两种或两种以上的元素(组元)组成的金属物质称为合金。合金是金属,因而合金的组元中必有金属元素,且含量应占较大比例。而其他含量少的元素可以是金属元素,也可以是非金属元素。如黄铜是铜锌合金,黄铜的组元都是金属元素。而钢是铁、碳等元素组成的合金,所含铁、锰等元素是金属元素,但碳、硅等则是非金属元素。其中铁元素的含量最大。

合金中各组元之间相互影响、相互作用,因而可组成各种不同的结构。

1. 固溶体

固态合金中,各组元相互溶解而形成的均匀物质称为固溶体。固溶体的晶格类型与其中某一组元的晶格类型相同,而其他组元则以原子形态存在于固溶体的晶格中。固溶体中保持原有晶格的组元(该组元含量较大)称为溶剂,而以原子形态存在于固溶体中的

组元(含量较小)称为溶质。根据溶质原子在固溶体中所处位置不同,固溶体分为两种:

(1) 置换式固溶体。溶质原子替代溶剂的部分原子占据着晶格的正常位置,仍结合成溶剂的晶格类型所形成的固体,称为置换式固溶体(图 1.9)。形成置换式固溶体的基本条件是溶质原子直径与溶剂原子直径相差较小。如果溶质与溶剂的晶格类型又相同时,溶质原子替代溶剂原子的数量可以很大(即溶解度很大)。

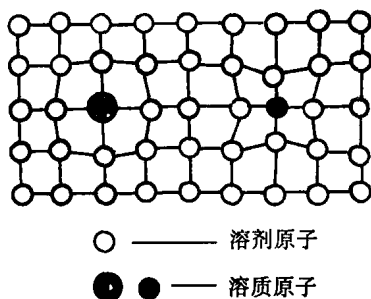


图 1.9 置换式固溶体

(2) 间隙式固溶体。溶质原子存在于溶剂晶格间隙处所形成的固溶体,称为间隙式固溶体(图 1.10)。通常条件下,溶质原子直径与溶剂原子直径相差较大,两直径之比小于 0.59 时易形成此类固溶体。其溶解度是有限的。

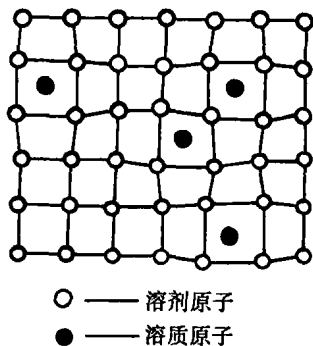


图 1.10 间隙式固溶体

无论哪种固溶体,由于溶质原子的掺入,固溶体的晶格都存在畸变现象,从而改变了合金性能,表现为强度指标升高。因而可利用此现象获取高强度合金材料,称为固溶强化。

2. 化合物

合金的组元按固定比例经化合而形成的物质称为化合物。在合金中,化合物分为金属化合物(如 Fe_3C 、 CuZn 、 Cr_7C_3 ...) 和非金属化合物(如 FeS 、 MnS ...) 两种。非金属化合物不是金属键结合,也不具有金属特性,故属合金中的夹杂物。金属化合物的晶格类型完全不同与组元的晶格类型,一般都属于复杂晶格结构。因此,金属化合物都表现出熔点高、硬度大、比较脆等特点。合金中金属化合物增多,则合金的强度、硬度和耐磨性提高,而塑性和韧性会明显下降。

3. 机械混合物

合金中的组元以各自的晶格类型相互掺杂在一起的结构,称为机械混合物。机械混合物可以是纯元素、固溶体或化合物各自存在的混合物,也可以是三者兼有的混合物结构(后者是最常见的结构)。合金的性能随混合物中各种结构的比例不同而在较大范围内变化。

二、铁碳合金

现代工业中广泛使用的碳钢和铸铁就是以铁和碳为主要元素组成的合金。当加入某些元素(称为合金元素)后,更加扩大了钢铁材料的品种。目前在我国普遍使用的钢铁材料品种不下百余种。这与铁碳合金在结构上的多样性和易改变性有密切关系。

1. 铁碳合金的基本组织

(1) 铁素体。铁素体是碳溶解在 $\alpha\text{-Fe}$ 中的固溶体,用符号 F 表示。铁素体具有体心立方晶格,属间隙式固溶体,溶碳量很有限。室温时仅可溶解 0.006% 的碳,727℃ 时溶

碳量可达 0.021 8%。铁素体的性能与纯铁相近,强度较低,布氏硬度值约为 80,而塑性和韧性较好。

(2) 奥氏体。奥氏体是碳溶解在 γ -Fe 中的固溶体,用符号 A 表示,奥氏体具有面心立方晶格,属间隙式固溶体。奥氏体溶解碳的能力较强,温度在 1 148℃时溶碳质量分数可达 2.11%。随着温度的降低,其溶碳能力下降,727℃时溶碳质量分数为 0.77%。奥氏体属高温组织,无磁性。只有当某些合金元素含量较多时,奥氏体才能保持到室温。奥氏体的强度不高,而塑性很好,适合于塑性加工成形。

(3) 渗碳体。渗碳体是铁与碳形成的金属化合物,用 Fe_3C 表示。其含碳质量分数为 6.69%,具有复杂的晶格结构。渗碳体的硬度高($\text{HB} = 800$),塑性和韧性很差,是一种脆性组织。铁碳合金的性能在很大程度上与渗碳体的数量、形状和分布状态有关。同时,渗碳体在一定条件下会发生分解,使铁碳合金具有石墨组织。

(4) 珠光体。珠光体是奥氏体在恒温条件下分解而获得的机械混合物,由铁素体和渗碳体组成,用符号 P 表示。珠光体的含碳质量分数为 0.77%,呈层片状结构。珠光体的力学性能介于铁素体和渗碳体的性能之间。中等强度,布氏硬度值约为 180,具有一定的塑性和韧性。

(5) 莱氏体。莱氏体是液态合金在恒温条件下结晶后获得的机械混合物,由奥氏体和渗碳体组成,用符号 Ld 表示。莱氏体的含碳质量分数为 4.3%。温度低于 727℃的莱氏体是由珠光体与渗碳体组成的机械混合物,用符号 Ld' 表示。由于渗碳体在莱氏体中所占比例较大,故莱氏体属脆性组织。

2. 铁碳合金状态图

说明合金成分、温度和组织三者关系的图形称为状态图。它是通过一系列实验测出不同成分合金在缓慢冷却过程中的冷却曲线和组织转变后,在成分-温度坐标图中标定相应的转变点,把同性点连成线所构成的完整图形。

图 1.11 所示为铁碳合金状态图。图中各线段的名称和含意如下:

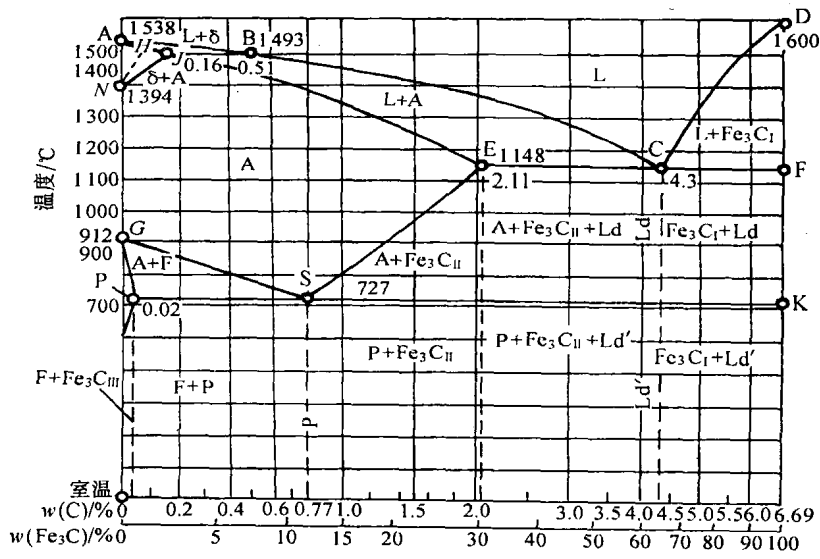


图 1.11 铁碳合金状态图

ABCD 线——液态线。合金温度高于此线温度必处于液体状态。当冷却到此线温度时,合金开始由液态向固态转变(结晶)。铁碳合金采用液态成形工艺获取金属制品时,浇注温度必须高于此线温度。

AHJECF 线——固态线。合金的温度低于此线温度则处于固体状态。铁碳合金采用固态塑性变形工艺获取产品或进行改变性能的处理工艺时,加热温度绝对不能高于该线温度。否则,会因出现局部熔化而造成废品。

其中的 **ECF 线**称为共晶线。它表示含碳质量分数超过 2.11%的铁碳合金冷却到该线温度必发生共晶转变。即液态金属在该温度同时结晶出奥氏体和渗碳体的机械混合物(莱氏体)。该线上的点 **C** 称为共晶点。

GS 线——铁碳合金在冷却时,从奥氏体中析出铁素体的起始线。习惯上也用 A_3 线来表示。其实质,析出铁素体的过程,就是面心立方晶格的 $\gamma - \text{Fe}$ 向体心立方晶格的 $\alpha - \text{Fe}$ 转变,并有碳原子向奥氏体内集中的过程。温度不断降低,铁素体的数量增多,也使奥氏体的含碳量不断增高。合金冷却到 727°C 时,奥氏体的含碳质量分数达到 0.77%,随后将发生奥氏体向珠光体的转变,这种转变亦称共析转变。

ES 线——铁碳合金在冷却时,从奥氏体中析出二次渗碳体($\text{Fe}_3\text{C}_{\text{II}}$)的开始线。习惯上也用 A_{cm} 线来表示。其实质,该线是表示 $\gamma - \text{Fe}$ 溶碳能力随温度而变化的曲线,即碳在奥氏体中的饱和溶解度曲线。随着温度的降低, $\gamma - \text{Fe}$ 溶碳能力减弱,多余碳原子以渗碳体形式析出,并使奥氏体的含碳量减少。冷却到 727°C 时,奥氏体的含碳质量分数降至 0.77%,随后就发生共析转变,得到珠光体。为区别于其他条件下得到的渗碳体,把从奥氏体中析出的 Fe_3C 称为二次渗碳体。

PSK 线——共析线。习惯上也用 A_1 线来表示。铁碳合金冷却到该线温度必将发生共析转变,即含碳质量分数为 0.77%的奥氏体转变成铁素体与渗碳体的机械混合物(珠光体)。该线上的点 **S** 称共析点。

铁碳合金在不同温度区间的内部组织结构标示在状态图中。因该图把 Fe_3C 视为合金的一个组元,故成分坐标也可以表示 Fe_3C 在铁碳合金中的含量。所以也把该图称为 $\text{Fe} - \text{Fe}_3\text{C}$ 状态图。

铁碳合金状态图中的每一点,都表示确定成分的合金(该点在横坐标上的数据即为该合金的成分)在确定的温度(该点在纵坐标上的数据即为合金的温度)下所具有的内部组织。通过在状态图上选定合金作冷却分析,即可了解和掌握该合金内部组织的变化情况,并定性了解其大致性能。从而为零件设计时的选材、确定成形方法和制定热加工工艺规程提供依据。

根据状态图,将含碳质量分数小于 2.11%的铁碳合金称为钢,含碳质量分数大于 2.11%的铁碳合金称为生铁。按室温时的组织,把含碳质量分数小于 0.77%的铁碳合金称为亚共析钢,含碳质量分数为 0.77%的铁碳合金称为共析钢,含碳质量分数在 0.77% ~ 2.11%的铁碳合金称为过共析钢。当钢中的常存杂质(如 Si、Mn)的含量较多或含有特殊元素(如 Cr、Ni、W、Mo、V...)时,则称为合金钢。生铁中,含碳质量分数小于 4.3%的铁碳合金称为亚共晶生铁,含碳质量分数等于 4.3%的铁碳合金称为共晶生铁,含碳质量分数大于 4.3%的铁碳合金称为过共晶生铁。

第二章 金属的工艺性能

金属的工艺性能是一种综合性能,是金属材料在工艺过程中所具有和表现出来的性能。它与金属的物理性能、化学性能、力学性能等有关,也与环境条件(如温度、受力状态、成形条件等)有关。金属材料工艺性能的优劣,不仅影响工艺过程的繁简难易程度,也影响金属制品质量的高低粗精。深入理解、掌握和运用金属的工艺性能及其影响因素,就能创造出更新的高水平工艺,获得既合理、又经济的优质产品,推动生产技术的进一步发展。

目前工业中的金属制品,尤其是机械零件,仍以钢铁为主要材料,因此本章就钢铁的工艺性能进行说明。

2.1 金属的加热

金属的热加工工艺过程,多数情况是通过改变温度使金属具有确定的工艺性能,然后再改变金属的宏观形态和微观结构,从而制得所需金属物件。

对金属进行加热的手段有很多种,如火焰加热、电阻加热、高频加热、超声波加热等。从加热状态看,可分为平衡加热和非平衡加热两种。

一、平衡加热

对金属进行平衡加热是指加热速度缓慢、金属发生的变化(如组织转变)时间足够、不受约束(如体积膨胀)、周围介质不参与变化(如无氧化)的加热状态。

整体金属受热,其温度达到该金属状态图的液态线温度后,就转变为液体状态。温度低于该金属状态图的固态线时,金属内部就有组织转变过程发生。

以钢为例,当其温度超过铁碳合金状态图的 A_3 或 A_{cm} 线后,内部结构应是单一奥氏体组织。这样,在钢加热过程中,将首先在 727°C 时发生珠光体向奥氏体的转变,随后有铁素体向奥氏体转变或者二次渗碳体的溶解过程。

珠光体转变为奥氏体的过程,是由形成奥氏体晶核、奥氏体晶核的长大、残余渗碳体的溶解和奥氏体成分均匀化等阶段构成的(图 2.1)。

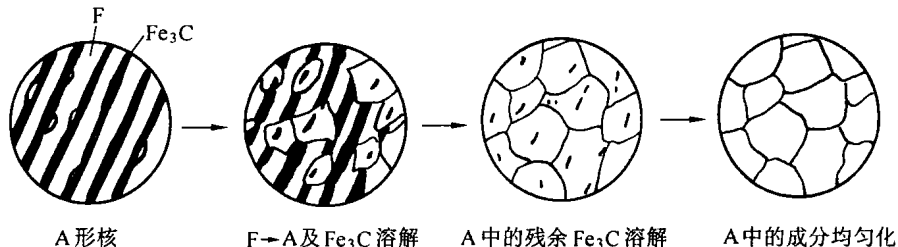


图 2.1 奥氏体形成过程示意图

正常珠光体是层片状结构,铁素体与渗碳体间隔排列。由于两者原子排列的形式差异很大,致使在交界面上的原子分布处于紊乱状态。交界面处的碳原子浓度比渗碳体中的浓度低,却比铁素体中的浓度高。当温度达到 727℃时,处于紊乱状态的原子极容易排列成该温度时的晶格类型。即铁原子组成面心立方晶核,并溶解较高浓度的碳,从而形成了奥氏体的小晶体(奥氏体晶核)。随后该晶核不断长大,奥氏体的界面不断向铁素体和渗碳体的内部推进,使珠光体的数量不断减少。由于铁素体的晶格类型与奥氏体的晶格类型相近,铁原子移动距离较小,故其转变速度较快。而渗碳体的转变除了应改变铁原子的排列形式外,同时伴随有大量碳原子的长距离扩散过程,所需能量多,消耗时间长,出现残余渗碳体的溶解阶段。当全部残余渗碳体溶解后,仍需一定的时间,使碳原子充分扩散,形成成分均匀一致的奥氏体组织。此时的奥氏体具有细晶粒结构。

随着保温时间的增长(或者把温度继续升高)、原子的动能增大,则位向相差不大的相邻晶粒有取向一致的倾向,相互吞并形成粗大的奥氏体晶粒,即奥氏体晶粒会长大。温度越高,长大速度越快。粗晶粒结构使钢的力学性能变差。

奥氏体晶粒长大的趋势与钢种有关。钢液经 Si、Mn 脱氧后再用 Al 脱氧或钢中含有 Al、Ti、W、V、Mo 等元素时,加热至 930℃,奥氏体仍能保持细晶粒结构,称此类钢为“本质细晶粒钢”。仅用 Si、Mn 脱氧又不含有上述合金元素的钢,奥氏体晶粒在 930℃之前就会迅速长大形成粗晶粒结构,称此类钢为“本质粗晶粒钢”。对于重要零件或承受重载荷又需进行热处理的零件,应优先选用“本质细晶粒钢”来制造,否则使用性能和零件寿命将受影响。

平衡加热中的严重缺陷是出现过热现象。由于奥氏体晶粒有长大倾向,当金属长时间处于高温状态,特别是温度超过 1 100℃后,无论哪种钢的奥氏体晶粒都会迅速长大,形成粗晶粒结构。再冷却至室温,钢的力学性能下降,韧性的变化尤为明显。此现象称为“过热”。因此,在热加工工艺过程(如塑性加工、热处理)中,对金属加热必须保证不出现过热。

二、非平衡加热

不具备平衡加热条件的升温都是非平衡加热。表现为加热速度快、温度分布不均匀,存在局部金属温度过高,工件各部分之间或表层与心部之间温差大。当周围介质再参与热过程时,必将使加热结果极不理想,影响零件(或毛坯)的最终质量。实际生产中,非平衡加热是最普遍的加热状况。

1. 金属组织转变

金属非平衡加热时,其内部温度的分布很不均衡,因而金属组织的变化大大不同于平衡加热时的组织转变结果。显然,此时金属组织的转变是一个与温度和时间有关的动态过程。组织转变结果主要取决于各层金属所能达到的最高温度。据此,可以依据最高温度、参照平衡加热转变的结果加以分析。

以焊接接头为例,焊接及附近金属各层最高温度的分布如图 2.2 所示。金属件成分为图(b)中所标示的 A。各层金属达最高温度时,内部组织可由该合金的状态图来决定。两图温度坐标的比例相同,将成分线与状态图各线交点的温度引到图(a)中,就可看到各

层的组织结构。

超过 1 点温度的金属完全处于液体状态,冷却下来,因冷却速度快,会形成以柱状晶粒为主的形态。

处于 1、2 两点对应温度范围内的金属是一种半熔化状态的结构,称为熔合区。该区金属冷却至室温时具有过热和铸态组织,性能差,容易产生裂纹,并可能迅速扩展,使整个构件断裂。

处于 1 100℃ 以上至 2 点温度范围内的金属,具有粗晶粒奥氏体组织。冷却后常形成铁素体分布于晶界处,并可呈针状横穿珠光体的结构,使金属的塑性和韧性急剧下降。此区称为过热区。

处于 4 点以上至 1 100℃ 温度范围内的金属,具有细晶粒奥氏体组织。冷却后金属的力学性能很好,相当于进行了热处理中的正火处理,故将该区称为正火区。

在 4、5 两点对应温度范围内的金属,具有铁素体和奥氏体组织。因温度较高,铁素体晶粒明显长大,而奥氏体晶粒较细但数量少。冷却至室温后,粗晶粒铁素体与细晶粒珠光体混杂在一起,也会降低金属的性能。该层金属中只有部分组织发生转变,故称部分组织转变区(或称部分相变区)。

在 5 点对应温度以下的金属,内部组织不会因温度的变化而发生转变,其性能与原金属性能相同。

上述情况是熔焊焊接金属构件时引起金属性能变化的典型状态。全部熔化的金属冷却凝固形成焊缝,而焊缝两侧发生组织和性能变化的区域称为热影响区。此区的宽窄和状态都对焊接构件质量和使用性能有很大影响。

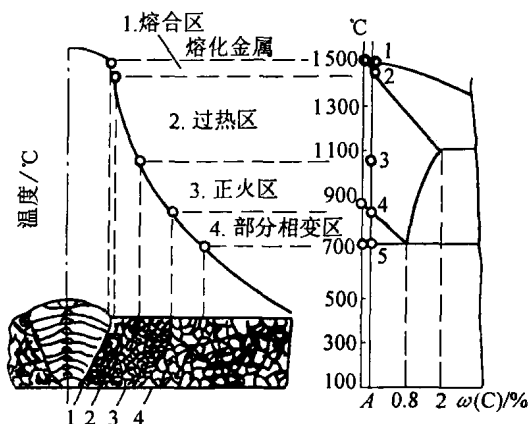
金属工件在热处理或塑性加工过程中,加热速度快、加热不均匀或保温时间过长,同样会发生上述不理想变化,势必影响产品性能。

2. 加热缺陷

(1) 过热和过烧。平衡加热中产生的过热现象,在非平衡加热中同样存在。

由于实际金属材料中不可避免地有杂质存在,同时,在非平衡加热中周围介质一定参与反应,极易产生过烧缺陷。过烧是指加热温度尚未到达该金属的熔点时,金属内部出现液态物质的现象。这是由于金属杂质多以低熔点共晶体存在于晶界处,降低了该处物质的熔点所致。

过烧的另一种表现是晶界被氧化。高温状态下,金属极易被氧化。金属表层氧化物中的氧原子有能力沿晶界向金属内部渗透,使晶粒间的联系被脆性氧化物所割裂开来。这种结构极脆,使材料失去了使用价值,显然过烧是一种无法补救的永久性缺陷,故在加



(a) 最高温度分布曲线 (b) 铁碳合金状态图及金属组织

图 2.2 低碳钢的热影响区