

高等学校无损检测本科专业系列教材
山东瑞祥模具有限公司独家资助出版

GONGYE WUSUN JIANCE JISHU

工业无损检测技术

(材料与加工工艺基础)

夏纪真 王 冰 编著



中山大学出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

高等学校无损检测本科专业系列教材
山东瑞祥模具有限公司独家资助出版

GONGYE WUSUN JIANCE JISHU

工业无损检测技术

(材料与加工工艺基础)

夏纪真 王 冰 编著



中山大学出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

· 广州 ·

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

工业无损检测技术. 材料与加工工艺基础/夏纪真, 王冰编著. —广州: 中山大学出版社, 2017. 6

高等学校无损检测本科专业系列教材

ISBN 978 - 7 - 306 - 06075 - 4

I. ①工… II. ①夏… ②王… III. ①无损检验 IV. ①TG115.28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 117279 号

出版人: 徐 劲

策划编辑: 廖丽玲

责任编辑: 廖丽玲

封面设计: 曾 斌

责任校对: 黄浩佳

责任技编: 何雅涛

出版发行: 中山大学出版社

电 话: 编辑部 020 - 84111996, 84113349, 84111997, 84110779

发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传 真: 020 - 84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: zdcbs@mail.sysu.edu.cn

印 刷 者: 广东省农垦总局印刷厂

规 格: 787mm × 1092mm 1/16 14.75 印张 4 彩插 365 千字

版次印次: 2017 年 6 月第 1 版 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发行部联系调换

作者 简介

夏纪真 (Xia Jizhen)

高级工程师，男，汉族，1947 年生于广州市，祖籍江苏高邮。

1960 年毕业于中山大学附属小学，1965 年毕业于广东省广雅中学，1970 年毕业于中国人民解放军军事工程学院空军工程系飞机电器专业（哈尔滨军事工程学院最后一期学员）。

1991 年获得航空航天工业部有突出贡献的中青年科技专家称号。

1992 年获得国务院授予的有突出贡献专家称号并终身享受国务院的政府特殊津贴。

2000 年创建并主持无损检测技术专业综合资讯网站——无损检测图书馆 (www.ndtinfo.net)。

从事过多种技术工作（锻造、电器、电子仪表、理化测试、无损检测、计算机等），曾长期在航空工业系统生产第一线（贵州安顺）工作，具有在高等院校（南昌航空大学、广州铁路职业技术学院、北京理工大学珠海学院）从事大专、本科无损检测专业教学，科研与科技开发以及在广州某大型国企从事质量管理和计算机技术工作等的实践经历。

历任工厂无损检测组组长、大学无损检测专业教研室副主任及高新技术开发总公司副总经理、国企集团公司的机械公司质量管理部副部长兼理化计量测试中心主任及集团公司计算机中心主任等职。曾任航空航天工业部无损检测人员技术资格鉴定考核委员会委员，中国机械工程学会无损检测专业委员会会刊《无损检测》杂志编委，广东省机械工程学会无损检测分会理事长，具有原航空航天工业部无损检测人员超声检测、磁粉检测和渗透检测的高级技术资格，原劳动部锅炉压力容器无损检测人员超声检测高级技术资格。自 1982 年起至今 30 多年来长期兼职从事无损检测人员的技术资格等级培训考核工作，1991—1993 年期间还担任闽台超声波检测、射线检测研讨班（对我国台湾地区无损检测人员进行中高级技术资格培训考核）的主讲教师和考核工作。

擅长于无损检测技术，尤其在超声波检测方面有较高造诣，在国际和全国性杂志与学术会议发表论文 30 多篇、译文 30 多篇，编写出版专业教材和专著 10 余本，从事科研课题及开发新产品多项，曾获国家科技进步一等奖，航空工业部与国防工业重大科技



成果一、二等奖等。

现任北京理工大学珠海学院“应用物理（无损检测方向）”本科专业责任教授，兼任中国机械工程学会无损检测专业委员会教育培训科普工作委员会委员、辽宁省无损检测学会会刊《无损探伤》杂志特邀编委等。2009年3月获中国机械工程学会无损检测分会第一届“百人奖”之“优秀工作者奖”，2013年获中国机械工程学会无损检测分会第二届“百人奖”之“特殊贡献奖”。

自1996年起陆续被收入《中国高级专业技术人员辞典》（中国人事出版社）、《中国专家大辞典》（国家人事部专家服务中心）、《数风流人物：广州市享受政府特殊津贴专家集》（广州市人事局）、《世界优秀专家人才名典》（香港中国国际交流出版社）、《中国设备工程专家库》（中国设备管理协会）、《广州市科技专家库》（广州市科技局）等等。

地址：广东省广州市海珠区新港西路中山大学园西区745号之一201室

邮编：510275

手机：13922301099 E-mail: xjz@ndtinfo.net

王冰 (Wang Bing)

大专学历, 工程师和高级技师, 现任山东瑞祥模具有限公司质管部部长。

1987 年 9 月进入山东济宁模具厂工作至今, 先后从事机械加工和钳工技术工作, 先后任生产调度员、车间副主任、车间主任生产科长、质管部部长。

2009 年 4 月从事质量检验、无损检测及质量管理工作, 同时承担研制新品开发、无损检测试块项目研究工作。在做好日常质量管理的同时, 先后配合知名专家为电力行业、冶金行业、管道检测、钢构检测的无损检测专业机构培训考核研制开发了十几种标准与模拟试块产品。

具有中国机械工程学会无损检测学会 PT/MT 二级资质、特种设备 UT 二级资质、华东电网无损检测资格考核委员会 UT 二级资质。

2010 年, 受命组建 350mm - TOFD 用焊缝模拟试块国产化研制工作组, 全面负责 350mm - TOFD 焊缝模拟试块的生产、协调和检验等管理工作, 制定了相应的管理制度和检测验收细则, 为此产品的加工、检验的质量及交付提供了强有力的保证, 这一模式一直沿用至今。

在质管部任职期间, 参与电力行业《电网在役支柱瓷绝缘子及瓷套超声波检测》《高温紧固螺栓超声检测技术导则》《汽轮发电机合金轴瓦超声波检测》三个标准的制定和《钢焊缝手工超声波探伤方法和探伤结果分级》(GB/T 11345)、《无损检测 超声检测用钢参考试块的制作与检验方法》(GB/T 11259)、《承压设备无损检测》(NB/T 47013.3—2015) 标准的研讨、制定, 以及以上标准中试块的研发制作。

在无损检测试块项目研究中依据 ASTM E428 标准和 GB/T 11259 标准撰写《超声波探伤试块及覆型膜制作分析》论文, 在 CCATM 国际冶金及材料分析测试学术报告会上发表, 并获得优秀论文奖。在电力行业无损检测试块项目研究中依据《高温紧固螺栓超声检测技术导则》编写和整理《高温紧固螺栓的超声波检测试验研究》论文, 在电力行业第十二届无损检测学术会议论文集上发表。专项研究项目“在线无损检测试验研究”被济宁市科学技术奖励委员会评为科技进步一等奖。

在 TOFD 标准试块和模拟试块的研发中, 负责无损检测和产品的质量检验。对焊接自然缺陷在焊接热影响区的形成的因素和制造技巧做了大量的数据收集和拍摄 X 光片做比对, 并对缺陷部位进行剖解及低倍检验和验证, 这对焊接技术和超声检测技术的提高非常有利, 对这类产品的批产起到了积极的指导作用。

自 2008 年校企合作共建以来, 先后被南昌航空大学、西安工程大学等院校聘请为兼职教授和兼职教师, 负责无损检测专业的实习教学工作。



地址: 山东省济宁经济技术开发区瑞祥路东首

邮编: 272400

手机: 13515379330 E-mail: 13515379330@163.com

前言

本书是无损检测本科专业课程的教材之一。本课程的目的是使无损检测本科专业的学生具备材料与加工工艺的基础知识,以便能更清晰理解无损检测技术在工业领域中的应用以及有助分析判断无损检测结果。

无损检测技术的应用对象包括金属材料、无机非金属材料、复合材料、有机高分子材料(聚合物)等,涉及的材料、制造加工知识是非常广泛而且深入的,为了不断提高无损检测技术水平,无损检测人员必须结合自己的具体工作情况深入地、广泛地学习有关材料、制造与加工工艺方面的知识,才能将无损检测技术推向更高的层次和更广的范围。

本书对大学本科的“金属材料与热处理”“理化试验”“锻造工艺学”“铸造工艺学”“焊接工艺学”等专业课程内容都有涉及,但只是围绕无损检测专业的实际应用需要而做简练的阐述。

本书适合用作无损检测本科专业的专业基础课程(推荐为48课时)教材以及各行业领域无损检测技术人员的工作参考书,对报考初、中、高级无损检测技术资格等级的人员也有重要的参考价值。

本书由山东瑞祥模具有限公司独家资助出版,并由山东瑞祥模具有限公司质管部部长王冰先生参与编写,在此谨向山东瑞祥模具有限公司董事长魏忠瑞先生表示衷心感谢。

夏纪真

2016年11月于广州

目 录

第1章 金属材料的基础知识	(1)
1.1 金属材料的结构	(1)
1.2 金属材料的性能	(15)
1.3 金属材料的常规理化试验方法	(30)
1.4 金属材料的分类	(59)
第2章 金属制造与加工工艺的基础知识	(75)
2.1 金属冶炼工艺的基础知识	(75)
2.2 金属压力加工的基础知识	(87)
2.3 金属铸造加工的基础知识	(113)
2.4 金属热处理的基础知识	(126)
2.5 金属焊接工艺的基础知识	(137)
2.6 粉末冶金的基础知识	(179)
2.7 三维打印技术的基础知识	(182)
2.8 金属材料使用过程中产生缺陷的基础知识	(184)
2.9 断裂力学与损伤容限设计概念的基础知识	(193)
第3章 非金属材料与复合材料的基本知识	(197)
3.1 非金属材料	(197)
3.2 胶接结构	(212)
3.3 复合材料	(213)
主要参考文献	(218)

第1章 金属材料的基础知识

1.1 金属材料的结构

（一）金属材料的晶体结构

金属材料是以金属元素为基本成分的材料，包括纯金属与合金。不同的金属材料有不同的性能，甚至同一种金属在不同条件下（例如受力、受热及不同加工状态等），其性能也不相同，这与金属及合金的内部结构和引起内部结构各种变化的外因有关。

金属是由原子（离子）在空间呈有规则排列的集合体即晶体构成的，晶体的构成是基于各原子之间的相互吸引力与排斥力相平衡。晶体有一定的熔点并具有各向异性（晶体在不同方向上原子排列的密度不同，在不同方向受力时表现出不同的力学性能，例如不同方向上对超声波有不同的传播速度或不同的衰减特性，或者对放射线表现不同的吸收或衍射等）。

大多数的金属和合金都属于多晶结构，亦即由许多方位不同的晶粒组成，称为多晶体，由于各向异性被相互抵消而表现为各向同性（在各个方向上的机械性能，或者对超声波的传播速度，或者对放射线的吸收或衍射等有相同的表现），即所谓的“伪等向性”。

在金属学研究中，为了便于说明和分析各种晶体的原子排列规律，把原子看成一个点，并用假想的直线将各点连接起来，就构成了一个假想的空间格子。这种用以描述原子在晶体中排列的空间格子称为晶格。组成晶格的最基本几何单元称为晶胞。晶胞各边尺寸及夹角称为“晶格常数”。

主要的晶格形式有体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格，如图1-1所示。

① 体心立方晶格：通常是在912℃以下的铁（称为 α -Fe）和1394℃~1538℃（铁的熔点）的铁（称为 δ -Fe），以及室温下的铬、钨、

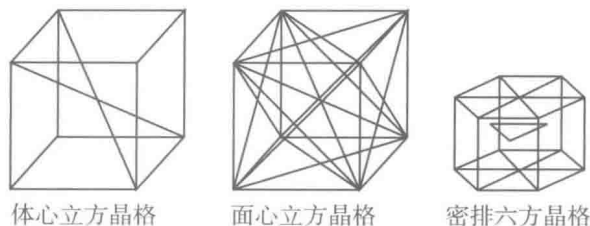


图1-1 金属主要的三种晶格形式



钼、钒、 β -钛等金属的晶格形式。

②面心立方晶格：通常是 $912^{\circ}\text{C} \sim 1394^{\circ}\text{C}$ 的铁（称为 γ -Fe，与前面所述的 α -Fe和 δ -Fe称为铁的同素异构转变），以及室温下的铜、镍、金、银、铝、铅、 β -钴等金属的晶格形式。

③密排六方晶格：例如镁、锌、镉、铍、钛、 α -钛、 α -钴等金属的晶格形式。

不同晶格的原子排列规则与紧密程度不同，因而使不同金属的塑性、强度、热处理、合金化效果以及其他物理化学性能等有明显的不同，即使在相同晶格类型的情况下，由于元素的原子直径大小和原子间的中心距离（称为晶格常数）不同，而且不同元素的原子包含的电子数不同，其性能仍有很大差别。

晶体的形成是在金属从液态转变到固态的凝固过程中进行的，在此过程中，金属原子由无规则运动状态转变为按一定几何形状做有序排列的状态，这种由液态金属转变为晶体的过程称为金属的结晶。结晶过程不同（例如冷却速度不同），形成的晶体结构不同，因而将有不同的性能。

金属的结晶过程可以分为三个步骤：晶核的形成—围绕晶核的长大与晶粒形成—各单独的小晶体长大至相互接触，最终联结成整体（固体形成）。由于各晶粒虽然内部晶格方位一致，但是各晶粒的空间方位彼此不同，在接触面附近的原子排列不会像晶体内部那样完整规则和方位一致，因而接触面上的组织和性能与晶体内部的组织和性能将有明显的不同。各个不同方位小晶体间的交界接触面（晶粒与晶粒之间的界面）称为晶界，被晶界包围的各小晶体则称为晶粒。如果一个晶体内部的晶格方位完全一致，则称为单晶体。单晶体一般具有明显的各向异性，而多晶体一般没有明显的各向异性表现。

（二）铁碳平衡图

在铸铁、碳钢和合金钢的研究中，很重要的方法是利用铁碳平衡图（iron-carbon equilibrium diagram，又称铁碳合金相图、铁碳相图、铁碳合金平衡图或铁碳状态图，见图1-2），它是通过实验方法建立起来，表示铁碳合金在不同成分和温度下的组织、性能以及它们之间相互关系的图形，是研究铁碳合金在加热和冷却时的结晶过程和组织转变的图解。

铁碳平衡图中绝大多数的线是根据实验测得的数据绘制的，有些线，例如 Fe_3C 的液相线、碳在奥氏体中的溶解度等则是由热力学计算得出的。

铁碳平衡图以温度为纵坐标，碳含量为横坐标，表示在接近平衡条件（铁-碳，表示为F-C）和亚稳条件（铁-碳化三铁，表示为Fe- Fe_3C ）下（或极缓慢的冷却条件下）以铁、碳为组元的二元合金在不同温度下所呈现的相和这些相之间的平衡关系。通过铁碳平衡图可以了解在特定化学成分和温度下的材料显微组织，根据显微组织则可以了解其相应的力学性能。

铁碳平衡图总结了铁碳合金的成分、组织、性能之间的变化规律，其许多基本特点即使对于复杂合金钢也具有重要的指导意义，如在简单二元Fe-C系中出现的各种相，往往在复杂合金钢中也存在，在需要考虑合金元素对这些相的形成和性质的影响、钢铁的组成和组织问题时，就必须从铁碳平衡图入手。因此，铁碳平衡图是研制新材料，指

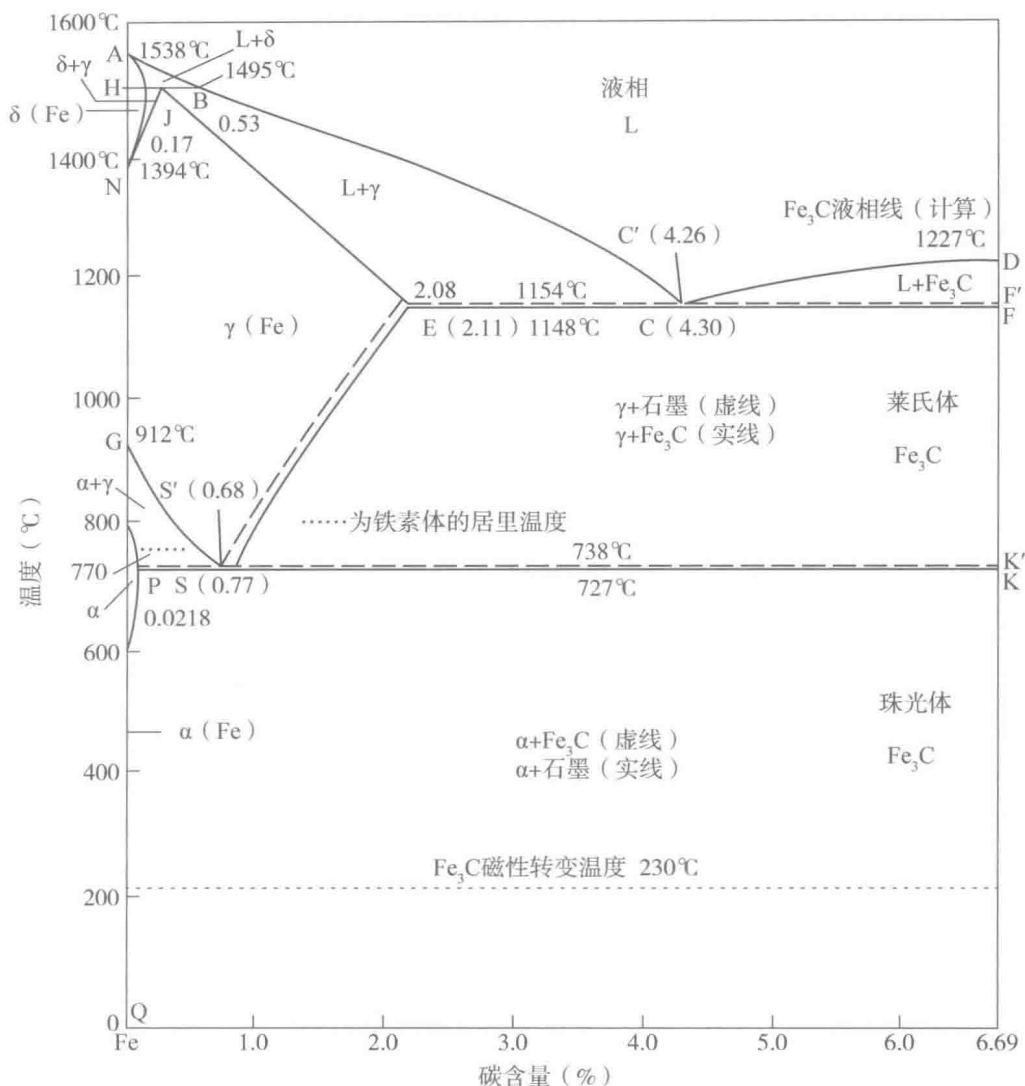


图 1-2 Fe-Fe₃C 铁碳平衡图

导制定合金熔炼、铸造、压力加工和热处理等工艺的重要工具，也是重要依据之一。

在工程材料学上依据 Fe-Fe₃C 铁碳平衡图把铁碳合金分为三类，即工业纯铁（含碳量 ≤ 0.021%）、钢（含碳量为 0.021% ~ 2.11%）和铸铁（含碳量为 2.11% ~ 6.69%）。

金属在固态下晶体结构随温度发生变化的现象称为同素异晶转变。纯铁有两种同素异构体，在 912℃ 以下为体心立方晶格的 α-Fe，在 912℃ ~ 1394℃ 为面心立方晶格的 γ-Fe，在 1394℃ ~ 1538℃（熔点）又呈体心立方晶格的 δ-Fe。

碳溶于 α-Fe 时形成的固溶体称为铁素体（用英文大写字母 F 表示）。

碳溶于 γ-Fe 时形成间隙固溶体，呈面心立方晶格，称为奥氏体（用英文大写字母



A 表示), 也简称 γ 固溶体。 γ 铁晶格中的间隙较大, 在 727°C 时能溶解 0.77% 碳, 在 1148°C 时, 碳的最大溶解度能达到 2.11% 。奥氏体存在于 727°C 以上的高温区间, 具有一定的强度和硬度以及很好的塑性, 是绝大多数钢在高温进行锻造或轧制时所要求的组织。

超过铁对碳的溶解度后, 富余的碳可能以稳定态的石墨形式存在, 也可能以亚稳态渗碳体 (碳化三铁, 亦即 Fe_3C) 形式存在。 Fe_3C 有可能分解成铁和石墨稳定相, 这个过程在室温下是极其缓慢的, 即使加热到 700°C , Fe_3C 分解成稳定相也需要几年的时间 (合金中含有硅等促进石墨化元素时, Fe_3C 的稳定性减弱, 分解时间有可能缩短), 石墨在含碳量为 $2\% \sim 4\%$ 的铸铁中是大量存在的, 但是在一般的钢 ($0.03\% \sim 1.5\% \text{C}$) 中却较难形成这种稳定相。

在铁碳平衡图上习惯以英文大写字母 A 表示铁碳平衡图上的临界点, 英文小写字母 c 表示加热, 英文小写字母 r 表示冷却, 因此, 符号 A_c 表示加热时的临界点, 而符号 A_r 则表示冷却时的临界点。在实际加热时, 钢铁的临界点往往高于 $\text{Fe}-\text{Fe}_3\text{C}$ 铁碳平衡图上的临界点, 而冷却时则低于铁碳平衡图的临界点。

铁碳平衡图中一般包括包晶、共晶、共析三个基本反应:

在 1495°C (图 1-2 中的 HJB 线) 发生包晶反应, 此时液相 ($0.53\% \text{C}$)、 δ 铁素体 ($0.09\% \text{C}$) 和奥氏体 ($0.17\% \text{C}$) 三相共存, 冷凝时的反应结果形成奥氏体。

在 1148°C (图 1-2 中的 ECF 线) 发生共晶反应, 此时液相 ($4.30\% \text{C}$)、奥氏体 ($2.11\% \text{C}$) 和渗碳体 ($6.69\% \text{C}$) 三相共存, 冷凝时的反应结果形成奥氏体与渗碳体的机械混合物, 通称为莱氏体 (硬度高、脆性大), 其形态是呈颗粒状的奥氏体分布在渗碳体的基体上。

在 727°C (图 1-2 中的 PSK 线) 发生共析反应, 此时奥氏体 ($0.77\% \text{C}$)、铁素体 ($0.0218\% \text{C}$) 和渗碳体 ($6.69\% \text{C}$) 三相共存。冷却时的反应结果形成铁素体与渗碳体的两相弥散混合组织 (呈层片状), 通称为珠光体。共析反应温度常标为 A_1 温度。

根据铁碳平衡图考虑温度与显微组织关系的参数常用代号如下。

A_0 温度: 渗碳体的磁性转变线, 在此温度以下渗碳体呈铁磁性, 一般以 230°C 水平线表示渗碳体的磁性转变温度 (居里温度), 转变时不发生晶体结构的变化。

A_1 温度: 发生平衡相变 $\gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 的临界温度, 共析钢在加热和冷却过程中经过铁碳平衡图 A_1 线时, 发生珠光体与奥氏体之间的相互转变。

A_2 温度: $\alpha-\text{Fe}$ 磁性转变线, 在此温度以下铁素体呈铁磁性, 一般以 770°C 水平线表示铁素体的磁性转变温度 (居里温度)。

A_3 温度: 在平衡条件下亚共析钢 $\gamma + \alpha$ 两相平衡的上限温度 (上临界点), 亚共析钢经过图 1-2 中的 A_3 线时, 发生铁素体与奥氏体之间的相互转变 (奥氏体中开始析出铁素体或铁素体全部溶入奥氏体)。 α 铁加热到 A_3 以上就变成为 γ 铁, 如果再冷却到 A_3 以下又变为 α 铁, 此温度即称为 A_3 转变温度, 例如对于碳含量为 0.77% 时的铁碳合金, 910°C 即称为 A_3 转变温度。对于碳含量小于 0.77% 的铁碳合金, 该转变温度随碳含量的增加而降低。

A_4 温度: 奥氏体开始转变为 δ 铁素体或 δ 铁素体全部转变成奥氏体的温度, 纯铁

为 1394℃，随碳含量增加而提高。如图 1-2 中的 NJ 线。

室温至 A2 温度之间保持稳定的相为 α 铁；A2 ~ A3 之间为 β 铁；A3 以上为 γ 铁，A4 至熔点间为 δ 铁。

Acm 温度：在平衡条件下过共析钢 $\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$ 两相平衡的上限温度（上临界点），亦即碳在 γ 相（奥氏体）中的溶解限度，称 Acm 温度。过共析钢经过图 1-2 的 Acm 线时，发生 Fe_3C 与奥氏体之间的相互转变。在 1148℃ 时，碳在奥氏体中的最大溶解度为 2.11%，而在 727℃ 时仅为 0.77%，碳含量大于 0.77% 的铁碳合金在 Acm 温度以下时，奥氏体中将析出渗碳体，称为二次渗碳体，以区别于从液态中析出的一次渗碳体，该转变温度随碳含量的增加而升高。如图 1-2 中的 ES 线。

A1、A3 和 Acm 常常和退火及其他热处理工艺有密切关系。钢在实际加热和冷却时温度转变不可能非常缓慢，因此，钢中的相转变不能完全符合铁碳合金相图中的 A1、A3 和 Acm 线，而有一定的滞后现象，即出现加热时过热（温度过高）或冷却时过冷（冷却速度过快）现象。加热或冷却时的速度越大，组织转变偏离平衡临界点的程度也越大。为区别它们，把冷却时的临界点记作 Ar1 、 Ar3 、 Arcm ，加热时的临界点记作 Ac1 、 Ac3 、 Accm 。

Ac1 温度：钢加热时开始形成奥氏体的下临界点温度（钢加热时的实际转变温度）。

Ar1 温度：钢由高温冷却时奥氏体开始分解为 $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ 的下临界点温度（钢冷却时的实际转变温度）。

Ac3 温度：亚共析钢加热时铁素体全部消失的上临界点温度（钢加热时的实际转变温度）。

Ar3 温度：亚共析钢由单相奥氏体状态冷却时开始发生 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变的上临界点温度（钢冷却时的实际转变温度）。

Accm 温度：过共析钢加热时渗碳体全部消失的上临界点温度（钢加热时的实际转变温度）。

Arcm 温度：过共析钢由单相奥氏体状态冷却时开始发生 $\gamma \rightarrow \text{Fe}_3\text{C}$ 转变的上临界点温度（钢冷却时的实际转变温度）。

如果铁中含碳量少，则在 690℃ 或 710℃ 左右将出现临界点，即 Ar1 ，标志在此温度以上时碳溶解在铁中，而低于此温度时，碳以渗碳体形式由固溶体中分解出来。随着铁中含碳量提高， Ar3 下降，下降至含碳量为 0.8% ~ 0.9% 时将与 Ar1 合为一点。

铁碳平衡图上的不同区域表示不同的组织。图 1-2 中的字母代表的意义如下。

A 点：纯铁的熔点（1538℃）。

B 点：包晶转变时液相的成分（1495℃）。

C 点：共晶点（1148℃）。

D 点：渗碳体的熔点（1227℃）。

E 点：碳在 $\gamma - \text{Fe}$ （奥氏体）中的最大溶解度（1148℃）。

F 点：共晶渗碳体的成分点（1148℃）。

G 点： $\alpha - \text{Fe}$ 和 $\gamma - \text{Fe}$ 的同素异构转变点（A3）。

H 点：碳在 δ 固溶体中的最大溶解度（1495℃）。



J 点: 包晶点 (1495°C)。

K 点: 共析渗碳体的成分点 (727°C)。

N 点: γ -Fe 和 δ -Fe 同素异构转变点 (A_4 , 1394°C)。

P 点: 碳在 α -Fe (铁素体) 中的最大溶解度 (727°C)。

Q 点: 室温时碳在 α -Fe (铁素体) 中的最大溶解度。

S 点: 共析点 (727°C)。

图 1-2 中其他线条的表示意义如下。

AB: δ 相的液相线。

BC: γ 相的液相线。

ABCD 线: 液相线, 液相冷却至此开始析出, 加热至此全部转化。

AH: δ 相的固相线。

JE: γ 相的固相线。

AHJECF 线: 固相线, 液态合金至此线全部结晶为固相, 加热至此开始转化。

HN: 碳在 δ 相中的溶解度线。

JN: ($\delta + \gamma$) 相区与 γ 相区分界线。

GP: 温度高于 A_1 时, 碳在 α 相中的溶解度线。

GS: 奥氏体中开始析出铁素体或铁素体全部溶入奥氏体的转变线, 称为 A_3 温度线。

PQ: 低于 A_1 时, 碳在 α 相 (铁素体) 中的溶解限度线。在 727°C 时, 碳在铁素体中最大溶解度为 0.0218% , 600°C 时为 0.0057% , 400°C 时为 0.00023% , 200°C 以下时小于 0.0000007% 。碳含量大于 0.0218% 的合金, 在 PQ 线以下均有析出渗碳体的可能性。通常称此类渗碳体为三次渗碳体。

HJB: $\gamma\text{J} \rightarrow \text{LB} + \delta\text{H}$ 包晶转变线 ($80.09 + \text{L}0.53 \rightarrow \text{A}0.17$)。

ECF: $\text{LC} \rightarrow \gamma\text{E} + \text{Fe}_3\text{C}$ 共晶转变线, 简称共晶线 ($\text{L}4.30 \rightarrow \text{A}2.11 + \text{Fe}_3\text{C}$), 含碳量为 $2.11\% \sim 6.69\%$ 的铁碳合金至此发生共晶反应, 结晶出奥氏体与 Fe_3C 混合物——莱氏体。

ES 线: Acm 线, 碳在奥氏体中的溶解度曲线。

PSK: $\gamma\text{S} \rightarrow \gamma\text{F} + \text{Fe}_3\text{C}$ 共析转变线, 简称共析线 ($\text{A}0.77 \rightarrow \text{F}0.0218 + \text{Fe}_3\text{C}$), Fe-C 合金的下临界点 (A_1), 含碳量为 $0.0218\% \sim 6.69\%$ 的铁碳合金至此发生共析反应, 产生珠光体, 又称 A_1 线。

ACD: 液相线, 液相线以上的金属为液态 (固相加热至此全部转化为液相), 金属冷却到液相线时开始结晶 (析出固相), 在液相线 AC 线以下结晶出奥氏体, 在 CD 线 (Fe_3C 的液相线) 以下结晶出渗碳体。

AHJE: 合金的固相线。

AECF: 固相线, 液态合金至此线全部结晶为固相, 固相加热至此开始转化。

铁碳平衡图的应用是很广的, 例如, 需要选用塑性、韧性好的钢铁材料时, 可以考虑选择低碳钢 (碳质量分数为 $0.10\% \sim 0.25\%$); 需要选用强度、塑性及韧性都较好的钢铁材料时, 则应该选择中碳钢 (碳质量分数为 $0.25\% \sim 0.60\%$); 需要选用硬度高、



耐磨性好的钢铁材料时,则要选择高碳钢(碳质量分数为 $0.60\% \sim 1.3\%$)。一般低碳钢和中碳钢主要用来制造建筑结构或制造机器零件,高碳钢用来制造各种刀具、工具。

例如,根据铁碳平衡图可以为制定钢的熔炼和浇注以及铸造、熔化焊接工艺提出基本数据,如根据铁碳平衡图上合金的熔化—凝固温度区(液—固相线)以及固液双相区的相组成,确定从熔炼炉出炉液态钢的合适温度、铸造模型开箱时间控制以及合理的浇注温度与速度。浇注温度一般选在液相线以上 $50^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 为宜。共晶成分以及接近共晶成分的铁碳合金的结晶范围最小,流动性最好,所以铸造性能好。因此,在实际铸造生产中,铸铁的化学成分总是选在共晶成分附近。

又例如奥氏体强度低,塑性好,便于零件成型,因此热压力加工(例如热锻造与热轧制)应选择奥氏体状态(γ 相区,单相奥氏体区)并适当低于固相线的温度区内进行,通常选择的原则是开始锻造或轧制温度(始锻温度)不能过高,以免钢材严重氧化和发生奥氏体晶界熔化,而终止变形的温度(终锻温度)也不能太低,以免钢材因温度低而塑性差,导致产生裂纹。一般始锻温度多控制在固相线以下 $100^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 范围内。

在焊接过程中,高温熔融焊缝与母材各区域的距离不同会使各区域受到焊缝热影响的程度不同,可以根据铁碳平衡图来分析不同温度的各个区域在随后的冷却过程中可能会出现组织和性能变化情况,从而采取措施,保证焊接质量。此外,一些焊接缺陷往往可以采用焊后热处理的方法加以改善,从而为焊接和焊后对应的热处理工艺提供了依据。

热处理是通过对钢铁材料进行加热、保温和冷却来改善和提高钢铁材料力学性能的一种工艺方法,利用铁碳平衡图可以了解何种成分的铁碳合金可以进行何种热处理,以及各种热处理方法的加热温度是多少,了解相变温度范围,为确定热处理工艺参数提供依据。

(三) 合金组元结构

在金属的实际结晶过程中,由于金属材料受不同条件的加工、冶炼、熔化、浇铸或其他加工、处理以及杂质的影响,实际晶体中的某些原子可能会离开正常的晶格结点位置,造成“空穴”,或者某些原子或杂质进入晶格原子的间隙中成为“间隙原子”,可能产生“点缺陷”,同一晶粒中的某些晶体小块也可能因排列方位不一致而形成“线缺陷”,还有在多晶体的晶界上可能因各晶粒的取向、方位不同,在晶界附近表现为晶格混乱,而且杂质也多,形成“面缺陷”,这种缺陷表现为晶界上的化学成分、组织结构、性能等都与晶粒内部存在较大的差异。

工业上使用的金属材料绝大多数采用合金(由两种以上的金属和金属、金属和非金属元素组成的具有金属特性的物质),因为合金的许多优越性能是纯金属达不到的。组成合金的最基本的独立单元称为“组元”或“元”。组元可以是金属元素或非金属元素,或者由稳定的化合物组成,而合金中成分、性能和组织状态均匀一致的部分则称为“相”。

合金的结构由组成合金的组元在结晶时彼此所起的作用决定,其基本结构如下。



(1) 固溶体

在液态下,合金呈均匀的液相,合金在转变成固态后,仍能保持组织结构的均匀性,这种合金结晶后所形成的固态相就称为固溶体,它只有一种晶格,晶格内可以有两种或两种以上的元素存在,保持晶格不变的元素称为溶剂,而其他元素称为溶质。溶质的原子溶入溶剂原子的晶格中或取代了某些溶剂原子的位置,根据溶质原子在溶剂原子晶格结点中所占的位置不同,可以把固溶体分为置换固溶体和间隙固溶体两种。

置换固溶体:溶质原子部分占据了溶剂原子晶格结点位置,即由溶质原子部分替换了原来结点位置上的溶剂原子所形成的固溶体。

间隙固溶体:溶质原子溶入溶剂原子晶格的间隙之中而形成的固溶体。

上述两种固溶体的共同特点是溶质在溶剂中有一定的溶解度,随着溶解度的增大,由于不同原子的直径不同,将使固溶体晶格发生膨胀或收缩,以及引起晶格畸变,这会导致固溶体强度提高、导电性下降,这种现象称为固溶强化,溶质原子的大小和数量多少,将决定固溶体的性能,这对合金钢及钢的热处理有重要意义。

(2) 金属化合物(亦称金属间化合物、中间相)

金属化合物具有一定的熔化(分解)温度,形成化合物的元素在某种条件下能溶解或者被其他元素替换形成新的化合物。化合物可以全部是金属元素,也可以由金属和非金属元素组成(例如碳化物、氮化物等)。金属化合物具有与各元素形成的晶格完全不同的特殊晶格,但各元素的原子呈有序排列。金属化合物的合金组元间按一定的原子数量之比相互化合,从而成为一种具有金属特性的新相。

金属化合物不能单独构成合金(单一化合物一般硬而脆,不能单独应用),而只能作为一个组元,弥散分布在固溶体或纯金属的基体组织中,使合金的塑性变形抗力增大,或者增强抗磨性等,能有效地改善合金的机械性能和热处理性能。

(3) 机械混合物

当构成合金的两个组元在固态下既不能相互溶解,又不能彼此反应形成化合物时,就构成了机械混合物。机械混合物中各组元各自保持自己的晶格和性能,其形状、大小、分布状况对合金的整体性能有明显影响。

机械混合物可由纯金属与纯金属构成,也可由纯金属和化合物、纯金属和固溶体、固溶体和固溶体以及固溶体和化合物构成。

铁碳合金的组织与性能和含碳量及温度有关,在常温下它的基本结构有以下几种。

①铁素体(Ferrite,常用代表符号F):碳与合金元素溶解于 α -Fe中形成的间隙固溶体,为体心立方晶格,含碳量低,因而铁素体组织具有良好的塑性和韧性,但是强度和硬度较低。

在显微镜下观察,亚共析钢中的慢冷铁素体呈块状,晶界比较圆滑,当碳含量接近共析成分时,铁素体会沿晶粒边界析出。见图1-3。

②渗碳体(Cementite,常用代表符号 Fe_3C):碳与铁的间隙型化合物(Fe_3C),含6.69%的碳,呈复杂的斜方晶格。渗碳体的熔点高,硬度高(HB约为800),脆性大,塑性与韧性很低。钢中含碳量增大时,渗碳体的数量也增大,从而增加钢的强度和硬度,但使钢的塑性和韧性下降。渗碳体形态有条块状、细片状、针状和球状



图 1-3 铁素体示意图

(粒状)等,是碳钢中的主要强化相,其形态、大小、数量、分布等对钢的性能有很大影响。

在显微镜下观察,在液态铁碳合金中首先单独结晶的渗碳体(一次渗碳体)为块状,边角不尖锐,共晶渗碳体则呈骨骼状。过共析钢冷却时沿 A_{cm} 线析出的碳化物(二次渗碳体)呈网结状,共析渗碳体则呈片状。铁碳合金冷却到 A_{r1} 以下时,由铁素体中析出渗碳体(三次渗碳体),在二次渗碳体上或晶界处呈不连续薄片状。见图 1-4。



图 1-4 钢中的渗碳体

③珠光体 (Pearlite, 常用代表符号 P): 奥氏体从高温冷却下来所形成的铁素体和渗碳体的两相共析组织,即铁素体与渗碳体的机械混合物,呈现铁素体和渗碳体相间排列的片层状组织。珠光体钢的强度较高,硬度适中,并有一定的塑性。

珠光体片层间的距离(疏密程度)取决于奥氏体分解时的过冷度。过冷度越大,所形成的珠光体片层间距越小(越细密),强度和硬度也越高。在 $A_1 \sim 650^\circ\text{C}$ 范围形成的珠光体片层较厚,在金相显微镜下放大 400 倍以上观察,可分辨出平行的宽条铁素体和细条渗碳体,称为粗珠光体、片状珠光体,简称珠光体。见图 1-5。

在 $650^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}$ 范围形成的珠光体,用金相显微镜放大 500 倍观察,珠光体的渗碳体上仅看到一条黑线,只有放大 1000 倍观察才能分辨到片层,片间距为 $80 \sim 150\text{nm}$ 时,其片层在光学显微镜下难以分辨,此时的片层称为索氏体 (sorbite)。见图 1-6。