



高等学校教材

////////// JINSHU CAILIAO SHIYAN JICHU //////////

金属材料 实验基础

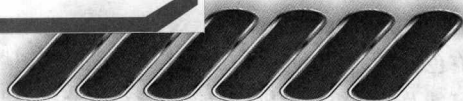
杨明波 主编 李晖 杨惠 副主编



化学工业出版社

TG115/8

2008



高等学校教材

金属材料 实验基础

杨明波 主编 李晖 杨惠 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书为高等学校实验用教材, 主要介绍金属材料制备、组织分析和性能检测的实验理论、实验方法和实验手段。全书共分4章, 其中第1章为金属材料制备实验基础, 内容涉及钢铁材料和有色金属材料的基本知识介绍、合金配制和熔铸工艺; 第2章为金属材料组织分析实验基础, 内容涉及金相组织分析、扫描电镜组织分析、电子探针显微分析、透射电镜组织分析、X射线衍射组织分析、化学成分分析和材料热分析技术; 第3章为金属材料性能检测实验基础, 内容涉及拉伸性能检测、硬度测试、疲劳性能检测、摩擦磨损性能检测以及耐腐蚀性能检测; 第4章为金属材料成形基础实验, 内容涉及与铸造、焊接、塑性成形及热处理有关的一些基础实验的仪器设备、原理、方法及实施步骤。

本书可作为高等院校材料科学与工程、金属材料、材料成型与控制工程等相关专业的实验用教科书和主要参考书, 也可供有关专业的老师和工程技术人员自学与参考。

图书在版编目(CIP)数据

金属材料实验基础/杨明波主编. —北京: 化学工业出版社, 2008.1
ISBN 978-7-122-01862-5

I. 金… II. 杨… III. 金属材料-实验 IV. TG115

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第002237号

责任编辑: 陶艳玲

装帧设计: 尹琳琳

责任校对: 蒋宇

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张12¼ 字数304千字 2008年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888(传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 22.00元

版权所有 违者必究

前 言

实验教学作为理论联系实际的重要环节,其对于大学生工程意识和创新思维的培养,以及动手能力和分析问题解决问题能力的培养都具有非常重要的作用。由于材料科学属于实践性比较强的学科,因此发挥实验教学的作用对于材料科学与工程专业学生的能力培养更显紧迫。众所周知,材料科学与工程专业实验教学涉及的内容比较广泛,涉及材料制备、组织分析、性能检测和工艺控制等,但传统实验教学中这些内容大多被分散到各个独立的实验项目中,因而非常不利于学生系统了解和掌握材料研究、开发及应用过程中的实验手段和实验方法,从而极大地影响了材料科学与工程专业创新人才的培养。为了充分发挥实验教学在人才培养上的作用,使实验教学与理论教学保持紧密联系的同时又具有相对的独立性和针对性,并能满足现代开放实验室对实验教学的要求,我们编写了本书。本书以材料科学与工程四大要素涉及的实验为基础,系统和全面介绍了金属材料研究开发过程中与材料制备、组织分析和性能检测有关的实验理论、实验方法和实验手段。在内容选择上,我们尽可能安排以全面提高学生实验技能为主的常用实验理论和实验方法,并按照金属材料熔炼制备、显微组织分析、性能检测和成型工艺基础实验进行分模块排序,以实现内容编写的系统性和科学性。此外,本书在强调传统组织分析和性能检测方法的同时,还对一些先进实验方法的应用也进行了介绍,以保持本书的先进性。本书由重庆工学院杨明波教授任主编,重庆工学院的杨惠和李晖副教授任副主编。其中第一章和第四章由重庆工学院的杨明波、唐丽文和张春艳编写,第二章由重庆工学院的杨惠、张春艳和赵玮霖编写,第三章由重庆工学院的李晖、陈建和唐丽文编写,全书由重庆大学张丁非教授主审。

由于条件所限,本书未能将所有参考文献一一列出,在此对所有参考文献的作者表示衷心的感谢。此外,本书在编写过程中得到了武汉理工大学孙智富教授的大力指导,并得到了重庆工学院材料科学与工程学院及教务处的大力支持,在此也表示感谢。

由于新材料研发及材料制备新工艺、新技术的发展日新月异,以及材料制备、分析和检测方法的不断更新,加之编者学识有限,书中难免有不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

2007年12月

目 录

第 1 章 金属材料制备实验基础	1
1.1 黑色金属介绍及其制备	1
1.1.1 钢铁材料介绍	1
1.1.1.1 碳钢和合金钢	1
1.1.1.2 铸铁和铸钢	3
1.1.2 钢铁材料制备	5
1.1.2.1 钢铁材料的配料	5
1.1.2.2 铸钢的熔炼	8
1.1.2.3 铸铁的熔炼	8
1.2 有色金属材料介绍及制备	9
1.2.1 有色金属材料介绍	9
1.2.1.1 铝及其合金	9
1.2.1.2 镁及其合金	12
1.2.1.3 铜及其合金	15
1.2.1.4 钛及其合金	17
1.2.2 有色金属材料制备	18
1.2.2.1 铸造有色合金的配料	19
1.2.2.2 铝合金的熔炼	20
1.2.2.3 镁合金的熔炼	32
1.2.2.4 典型铜合金的熔炼工艺	40
第 2 章 金属材料组织分析实验基础	42
2.1 金相组织分析	42
2.1.1 概述	42
2.1.2 金相显微镜的原理及使用	42
2.1.3 金相试样的制备	47
2.1.4 显微摄影与暗室技术	50
2.1.5 定量金相分析	52
2.1.6 彩色金相分析	55
2.1.7 典型金相组织分析实验	58
2.2 扫描电镜 (SEM) 组织分析	76
2.2.1 概述	76
2.2.2 扫描电镜使用介绍	77
2.2.3 扫描电镜 (SEM) 组织分析实验	80
2.3 电子探针 X 射线显微分析	83

2.3.1	概述	83
2.3.2	电子探针在材料成分分析上的应用	84
2.4	透射电子显微镜 (TEM) 组织分析	87
2.4.1	概述	87
2.4.2	透射电镜的结构及工作原理	87
2.4.3	透射电镜的主要性能参数及测定	90
2.4.4	透射电镜的选区电子衍射及成像原理	91
2.4.5	透射电镜的制样	93
2.4.6	透射电镜 (TEM) 组织分析实验	95
2.5	X 射线衍射 (XRD) 组织分析	97
2.5.1	概述	97
2.5.2	X 射线衍射仪的原理和构造	98
2.5.3	样品制备及测定过程	100
2.6	金属材料化学成分分析简介	104
2.7	材料热分析 (DTA/DSC/TG) 技术	104
2.7.1	概述	104
2.7.2	热分析的原理、仪器及使用	105
2.7.3	材料热分析试验过程	109
2.7.4	材料热分析实验	112
第 3 章	金属材料性能检测实验基础	116
3.1	材料拉伸性能检测试验	116
3.1.1	概述	116
3.1.2	拉伸试验机的构造及使用	116
3.1.3	材料的拉伸试验	121
3.2	材料硬度测试试验	124
3.2.1	概述	124
3.2.2	典型压入法硬度测试原理及硬度计的构造	125
3.2.3	硬度测量试验	129
3.3	材料的疲劳性能试验	130
3.3.1	概述	130
3.3.2	疲劳试验的方法及设备	130
3.3.3	疲劳试验过程 (单点法)	134
3.4	材料的摩擦磨损试验	134
3.4.1	概述	134
3.4.2	摩擦磨损试验机构造及使用	134
3.4.3	典型材料的磨损性能测试实验	138
3.5	材料耐腐蚀性能测试试验	140
3.5.1	概述	140
3.5.2	盐雾试验箱和电化学测试仪的构造及使用	140
3.5.3	盐雾腐蚀试验和金属材料恒电位法极化曲线测定	144

第4章 金属材料成形基础实验	146
4.1 铸造成形基础实验	146
4.1.1 实验一: 铸件动态凝固曲线的测定	146
4.1.2 实验二: 振动条件下结晶与铸件宏观组织的观察	147
4.1.3 实验三: 合金熔炼及液态成型	148
4.1.4 实验四: 凝固——定向凝固	149
4.1.5 实验五: 铝硅合金的细化 and 变质处理	151
4.2 焊接基础实验	155
4.2.1 实验一: 焊条综合实验	155
4.2.2 实验二: 焊缝金属中扩散氢的测定	160
4.2.3 实验三: 焊接接头金相组织分析	163
4.2.4 实验四: 不锈钢焊接接头的晶间腐蚀实验	168
4.2.5 实验五: 焊接应力与变形分析	171
4.3 塑性成形基础实验	174
4.3.1 实验一: 圆环镦粗法测定摩擦系数	174
4.3.2 实验二: 圆柱体镦粗时接触面上的正应力分布	176
4.3.3 实验三: 金属塑性成型性能综合实验	179
4.3.4 实验四: 金属塑性成型操作综合实验	181
4.3.5 实验五: 金属塑性成型件质量检验综合实验	183
4.4 材料组织及热处理工艺基础实验	185
4.4.1 实验一: 工程材料的金相显微组织的鉴别	185
4.4.2 实验二: 材料的热处理工艺的制订与操作	186
4.4.3 实验三: 材料热处理后的显微组织观察	188
参考文献	190

第1章 金属材料制备实验基础

1.1 黑色金属介绍及其制备

1.1.1 钢铁材料介绍

1.1.1.1 碳钢和合金钢

(1) 钢的分类和编号

a. 钢的分类 钢的分类方法很多,下面分别介绍几种。

按照钢中所含合金元素多少分成碳钢和合金钢两大类。碳钢中含一些 Si、Mn、P 和 S,其他合金元素可忽略。P 和 S 是有害元素,普通钢中含量较高,优质钢中含量较低。合金钢中根据合金元素总量分为低合金钢 ($<5\%$)、中合金钢和高合金钢 ($>10\%$),用量最大的是低合金钢。

按照用途分为结构钢(低合金结构钢、易切削钢、渗碳钢、调质钢、弹簧钢、滚动轴承钢等)、工具钢(刀具钢、模具钢和量具钢等)及其他特殊性能钢(不锈钢、耐热钢、耐磨钢等)。

按照钢中含碳量的多少分为低碳钢 ($<0.25\%$)、中碳钢和高碳钢 ($>0.6\%$)。

钢的力学性能与其含碳量关系最大,热处理工艺也与含碳量的关系最大,如低碳钢主要用于渗碳,渗碳后进行淬火和低温回火,中碳钢属于调质钢,进行淬火+高温回火,高碳钢采用淬火+低温回火。基于上述原因,本节按该分类方法介绍一些典型钢种。

b. 钢的编号

优质碳钢 对低碳和中碳用含碳量的万分数表示:20、25、30、40、45、50、60等。高碳碳素钢用字母 T 加含碳量的千分数表示:T7、T8、T9、T10、T11、T12。

优质合金钢 对低碳和中碳合金结构钢,前两位数字表示含碳量(万分数)+合金元素符号(合金元素含量小于 1.5%的不加数字,否则加上整数数字):20CrMnTi、40Cr、42CrMo等。对高碳合金钢,含碳量 $>0.95\%$ 不加标注,否则前面加含碳量(千分数表示),如 9SiCr、W18Cr4V、Cr12MoV、CrWMn等。热作模具钢用千分数表示含碳量,如 5CrMnMo、5CrNiMo。滚动轴承钢前面加 G, Cr 含量用万分数表示,如 GCr15、GCr9、GCr15SiMn等。

(2) 合金元素在钢中的作用

碳钢的价格低廉,容易加工,因而在机械工业中得到了广泛使用。但是,随着现代工业的发展,碳钢往往很难满足使用性能方面的要求,需要在碳钢的基础上加入合金元素形成合金钢以满足使用性能的更高要求。

① 合金元素的分类 把除 Fe、C 以外有意加入到钢中的元素叫做合金元素。根据合金元素与 C 亲和力大小,将合金元素分成非碳化物形成元素、弱碳化物形成元素和强碳化物形成元素三类。

a. 非碳化物形成元素 这类合金元素与 C 的亲合力非常弱, 不与 C 形成碳化物。钢中常加的这类合金元素有 Si、Ni、B、Al、Cu 和 Co 等, 它们在钢中主要以置换固溶原子形式存在。

b. 弱碳化物形成元素 这类合金元素与 C 的亲合力较弱, 主要是 Mn 元素。弱碳化物形成元素首先固溶在基体中, 含量高时一部分溶入渗碳体 (Fe_3C) 中置换 Fe 原子形成合金渗碳体 ($\text{Fe, Mn})_3\text{C}$ 。

c. 强碳化物形成元素 这类合金元素与 C 的亲合力较强, 如 Cr、W、Mo、V、Ti 等。当其含量较低时置换渗碳体中的 Fe 原子形成合金渗碳体 ($\text{Fe, Me})_3\text{C}$ (Me 代表合金元素)。当其含量较高时, 除形成合金渗碳体外还形成合金碳化物, 如 Cr_7C_3 、 Cr_{23}C_6 、 $\text{Fe}_4\text{W}_2\text{C}$ 、WC、 W_2C 、VC、MoC 等, 它们的热稳定和耐磨性比渗碳体高。

② 合金元素的作用 合金元素加入到钢中可能起到多方面的作用, 但是, 对一种钢来说, 加入合金元素的目的可能只利用其中的一个或几个作用。下面对合金元素在钢中的作用概括性归纳总结。

a. 固溶强化和韧化 凡溶于铁素体的元素都能使其硬度和强度提高, Mn、Cr、Ni 还能使其韧性提高。

b. 形成碳化物提高强度和耐磨性 合金元素溶入渗碳体或形成合金碳化物在起到第二相强化的同时能显著提高钢的耐磨性。合金元素, 尤其是强碳化物形成元素含量越高, 其耐磨性越高。高速钢 W18Cr4V 的回火组织中, 在马氏体基体上均匀分布大量碳化物, 具有优良的耐磨性。

c. 细化晶粒 强碳化物形成元素 W、Mo、V、Ti 等与 C 形成特殊碳化物, 熔点高、硬度高, 在加热时不容易溶解。形成的特殊碳化物呈细小、颗粒状的质点弥散分布在钢中, 这些碳化物对奥氏体晶界起钉扎作用, 强烈阻碍奥氏体晶粒长大, 故合金钢在淬火加热时易获得细小的奥氏体晶粒+未溶的碳化物质点, 淬火后可获得在硬度高、强韧性好的细小马氏体的基体上弥散分布着碳化物质点的组织, 从而使合金钢具有高的硬度、强韧性和耐磨性。

d. 提高钢的淬透性 钢的淬透性指钢淬火时获得马氏体的能力。钢经加热形成奥氏体后以大于某一临界速度进行冷却可以获得马氏体组织, 通过回火再调整其力学性能满足使用要求。而工件的冷却速度由工件尺寸和冷却介质决定, 如果工件尺寸大, 冷却速度慢, 达不到临界冷却速度, 结果得不到马氏体。怎么办? 在钢中加入合金元素, 减小钢的临界冷却速度。这样, 即使冷却速度慢, 也超过了临界冷却速度, 也能得到马氏体。除 Co 以外的合金元素都能提高钢的淬透性, 并且合金元素含量越高, 淬透性越好。当然, 合金元素必须溶入奥氏体中才能提高淬透性。如果以碳化物形式存在, 不仅不能提高淬透性, 还可能降低淬透性。

e. 提高回火稳定性 合金元素能推迟淬火钢在回火过程中的马氏体分解和残余奥氏体的转变, 提高了铁素体的再结晶温度, 使碳化物不易聚集长大。因此, 合金元素提高了钢对回火的软化抗力, 即提高了回火稳定性。

f. 产生二次硬化 钢中含有较多的强碳化物形成元素 (如 W、Mo、V 等) 时, 淬火后的残余奥氏体十分稳定, 加热至 $500\sim 600^\circ\text{C}$ 仍不分解, 尔后在回火冷却过程中部分转变成马氏体, 反而使钢的硬度上升; 此外, 在此温度下回火钢中将沉淀析出这些元素的特殊碳化物并呈弥散分布, 致使回火后钢的硬度不但不降反而再增加, 即“二次硬化”, 具有红硬性。

高速钢是典型的二次硬化钢。

g. 抑制第二类回火脆性 钢在 250~350℃与 550~650℃两个温度范围内回火时使钢的韧性显著降低的现象称为回火脆性。前者称为第一类回火脆性，后者称为第二类回火脆性。第一类回火脆性在各种钢中都不同程度的存在，而第二类回火脆性主要出现在加有 Cr、Mn、Ni、Si 等合金元素的合金结构钢中。产生回火脆性的原因是回火后慢冷时，Cr、Mn 等合金元素以及钢中的杂质元素 P、Sb、Sn 等向原奥氏体晶界偏聚。防止第二类回火脆性的方法有二：回火后快速冷却或在钢中加入 W、Mo 等合金元素抑制这些元素向奥氏体晶界偏聚。对多数淬透性较低的合金钢采用快冷的方法防止第二类回火脆性，而对于淬透性好的钢采用加入合金元素的方法抑制第二类回火脆性，因为大型零件即使在水中冷却，冷却速度也慢，不足以防止第二类回火脆性。

1.1.1.2 铸铁和铸钢

(1) 铸铁

铸铁是碳含量大于 2.11%的铁碳合金。工业上常用的铸铁成分中一般都含有 C、Si、Mn、P、S 等元素。为了提高铸铁的性能，有时添加一定量的 Cr、Ni、Cu、Mo 等合金元素。铸铁生产工艺简单，成本低廉，并且具有优良的铸造性能、切削加工性能、耐磨性能和消振性能，因此，铸铁广泛应用于机床、汽车、拖拉机等机械制造领域和冶金、矿山行业及交通运输部门。

① 铸铁的成分、组织和性能特点 与碳钢相比，铸铁的化学成分中除了含有较高的 C、Si 等元素外，而且含有较多的 P、S 等杂质，在特殊性能铸铁中，还含有一些合金元素，这些元素含量的不同，将直接影响铸铁的组织 and 性能。

铸铁中的碳主要以石墨 (G) 形式存在，所以铸铁的组织是由基体和石墨组成。铸铁的基体有铁素体、珠光体、铁素体加珠光体三种，它们都是钢中的基体组织。因此，铸铁的组织特点，可以看作是在钢的基体上分布着不同形态的石墨。

铸铁的力学性能主要取决于基体组织及石墨的数量、形状、大小和分布。石墨的硬度仅为 3~5HBS，抗拉强度约为 20MPa，伸长率接近于零，故分布于基体上的石墨可视为空洞或裂纹。由于石墨的存在，减少了铸件的有效承载面积，且受力时石墨尖端处产生应力集中，大大降低了基体强度的利用率。因此，铸铁的抗拉强度、塑性和韧性都比碳钢低。

另一方面，石墨的存在使铸铁具有了一些碳钢所没有的性能，如良好的耐磨性、消振性、低的缺口敏感性以及优良的切削加工性能。此外，铸铁的成分接近共晶成分，因此铸铁的熔点低（约为 1200℃左右），液态流动性好，且石墨结晶时产生体积膨胀，从而导致铸铁在铸造时收缩率低，其铸造性能优于碳钢。

② 铸铁中石墨的形成 铸铁中的碳主要有两种存在形式，即渗碳体 (Fe_3C) 和石墨 (G)。渗碳体是亚稳定相，在一

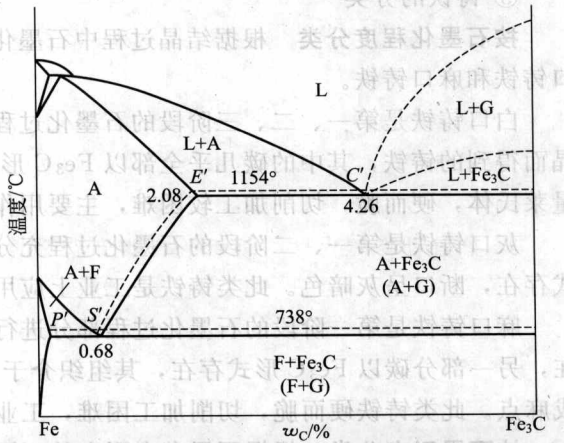


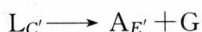
图 1-1 铁碳合金双重相图

定条件下可分解为铁和石墨，而石墨是稳定相。因此，由于条件的不同，实际上铁碳合金存在两种相图，即亚稳定的 Fe-Fe₃C 相图和稳定的 Fe-G 相图，放在一起就得到铁碳合金双重相图（图 1-1）。

在铁碳合金双重相图中，实线所示为亚稳定的 Fe-Fe₃C 相图，虚线所示为稳定的 Fe-C 相图。二者的主要区别为：Fe-C 相图中的 EC 线和 PS 线均上移，对应温度分别为 1154℃ 和 738℃（原来为 1148℃ 和 727℃）；E、C、S 点碳含量均相应减小，分别为 2.08%、4.26%、0.68%（原来为 2.11%、4.30%、0.77%）。

铸铁组织中石墨的形成过程称为石墨化过程。碳含量为 2.5%~4.0% 的铸铁石墨化过程可分为三个阶段。

第一阶段是在 1154℃ 时通过共晶反应形成石墨：



第二阶段是在 1154~738℃ 范围内冷却过程中自奥氏体中不断析出二次石墨。

第三阶段是在 738℃ 时通过共析反应形成石墨：



由于高温下原子的扩散能力强，所以第一阶段和第二阶段的石墨化过程较易进行，而第三阶段的石墨化过程，因温度较低，扩散条件差，有可能部分或全部被抑制，于是铸铁结晶后可得到三种不同的组织，即 F+G、F+P+G、P+G。

铸铁石墨化程度受许多因素影响，其中铸铁的化学成分和浇注时的冷却速度是两个主要的因素。

铸铁中的 C 和 Si 是促进石墨化的元素，它们的含量越高，石墨化过程越容易进行，析出的片状石墨越多越粗大；反之，石墨越少越细小。除了 C 和 Si 外，铸铁中的 Al、Cu、Ni、Co 等合金元素也会促进石墨化，而 S 及 Mn、Cr、W、Mo、V 等碳化物形成元素则会阻止石墨化。

铸件的冷却速度主要取决于浇注温度、铸型材料和铸件壁厚，对石墨化有很大影响。浇注温度越高，采用砂型铸造，铸件壁厚越大时，冷却速度越慢，即过冷度越小，越有利于原子的扩散，对石墨化越有利。反之，当铸件冷却速度较快时，不利于石墨化过程的进行，碳可能以渗碳体的形式存在，甚至出现白口。

③ 铸铁的分类

按石墨化程度分类 根据结晶过程中石墨化过程进行的程度，铸铁可分为白口铸铁、灰口铸铁和麻口铸铁。

白口铸铁是第一、二、三阶段的石墨化过程全部被抑制，完全按照 Fe-Fe₃C 相图进行结晶而得到的铸铁，其中的碳几乎全部以 Fe₃C 形式存在，断口呈银白色。此类铸铁中含有大量莱氏体，硬而脆，切削加工较困难，主要用作炼钢原料。

灰口铸铁是第一、二阶段的石墨化过程充分进行而得到的铸铁，其中的碳主要以石墨形式存在，断口呈灰暗色。此类铸铁是工业上应用最多最广的铸铁。

麻口铸铁是第一阶段的石墨化过程部分进行而得到的铸铁，其中一部分碳以石墨形式存在，另一部分碳以 Fe₃C 形式存在，其组织介于白口铸铁和灰口铸铁之间，断口黑白相间构成麻点。此类铸铁硬而脆，切削加工困难，工业上使用较少。

按石墨形态分类 根据石墨存在形态的不同，铸铁可分为灰铸铁、可锻铸铁、球墨铸铁和蠕墨铸铁。

灰铸铁中的石墨呈片状,其力学性能较差,但生产工艺简单,成本低廉,工业上应用最广。

可锻铸铁中的石墨呈团絮状,其力学性能好于灰铸铁,但生产工艺较复杂,成本高,故只用来制造一些重要的小型铸件。

球墨铸铁中的石墨呈球状,其力学性能较好,生产工艺比可锻铸铁简单,故得到广泛应用。蠕墨铸铁中的石墨呈短小的蠕虫状,其强度和塑性介于灰铸铁和球墨铸铁之间,但铸造性、耐热疲劳性比球墨铸铁好,因此可用来制造大型复杂的铸件以及在较大温度梯度下工作的铸件。

(2) 铸钢

铸钢是含碳量少于2.11%的铁碳合金。钢中硅、锰、磷、硫等元素一般较铸铁少。铸钢的主要优点是力学性能高,特别是塑性和韧性比铸铁高得多,焊接性能良好,适于铸焊联合工艺制造重型机械。但铸造性能、减震性和缺口敏感性都比铸铁差。

铸钢主要用于制造承受重载荷及冲击载荷的零件,如铁路车辆上的摇枕、侧架、车轮及车钩,重型水压机横梁,大型轧钢机机架、齿轮等。铸钢产量占铸件总产量的15%。

常用铸钢有碳素铸钢、合金铸钢、高合金铸钢。

碳素铸钢 在我国早期的国家标准中,以钢的含碳量作为分级的标准,根据含碳量不同,碳素铸钢分为三类:含碳量小于0.25%的为低碳钢,含碳量在0.25%~0.60%的为中碳钢,含碳量大于0.60%的为高碳钢。

1989年颁布的“一般工程用铸造碳钢的标准(GB 5676—1989)”将铸造碳钢按室温力学性能分为5个牌号,即ZG200-400、ZG230-450、ZG270-500、ZG310-570和ZG340-640。对钢中的基本化学成分只规定其质量分数的上限,对钢中残余合金元素的限制比较宽。

合金钢铸钢 为了改善和提高铸钢的某些性能,在铸钢中加入一种或几种合金元素,即成为合金铸钢。按照加入合金元素的含量不同,合金铸钢可分为三类:合金元素含量低于5%的为低合金铸钢,合金元素含量在5%~10%之间的为中合金铸钢,合金元素含量大于10%的为高合金铸钢。在机械制造中,常用的合金元素有Mn、Cr、Ni、Si、Mo。

1.1.2 钢铁材料制备

金属熔炼是钢铁材料制备的主要工艺过程之一,钢铁零件的质量和性能与该过程密切相关。其主要内容包括配料、熔炼设备、冶金原理及熔炼工艺等方面。

1.1.2.1 钢铁材料的配料

(1) 感应炉炼钢配料的计算

感应炉炼钢,多半采用不氧化法熔炼,配料计算多参照电弧炉不氧化法配料计算方法进行。

① 配料注意事项 a. 根据铸钢牌号和性能要求,确定合理控制值; b. 根据炉料质量和炉子实际情况,合理的确定回收率。通常各元素的回收率见表1-1; c. 主要金属炉料化学成分必须明确,回炉料只知道牌号时,各元素均按照中上限计算; d. 含C量按中限配入,炉料中C不计烧损; e. S、P含量控制:碱性炉熔炼,S、P含量不大于标准规定值;酸性炉熔炼,S、P含量应比标准规定值低0.005~0.01。

表 1-1 中频炉炼钢元素回收率

元素符号	铁合金名称	加入时间	回收率/%	
			酸性炉	碱性炉
C	碳块	装料时	80	80
Mn	锰铁	装料时	60~70	80~90
Si	硅铁	出炉前	90	95
		装料时	90~100	60~70
Ni	镍板	出炉前	100	95
		装料时	100	100
Mo	钼铁	装料时	98	100
Cr	铬铁	装料时	95	97~98
W	钨铁	装料时	98	100
V	钒铁	出炉前>10min	92~95	95~98
Cu	电解铜	装料时	100	100
Al	铝块	出炉前 3~5min		93~95
Ti	钛铁	终脱氧后出钢前		85~92

② 配料计算步骤 为了简化运算，以炉料总量代替钢液量。

计算铁合金加入量

铁合金加入量(%) =
$$\frac{\text{炉料总量(kg)} \times \text{控制值(\%)} \div \text{回收率(\%)} - \text{回炉料含该元素量(kg)}}{\text{铁合金中该元素含量(\%)}}$$

计算碳素废钢（或原料纯铁）预加量

碳素废钢预加量(kg) =
$$\text{炉料总量(kg)} - \text{回炉料重量(kg)} - \text{铁合金总量(kg)}$$

核算炉料中 C、Si、Mn 平均含量

平均含量(%) =
$$\frac{\sum \text{各种炉料质量(kg)} \times \text{元素含量(\%)}}{\text{炉料总量(kg)}} \times 100\%$$

计算生铁、硅铁、锰铁加入量

加入量 =
$$\frac{\text{炉料总量(kg)} \times [\text{控制值(\%)} \div \text{回收率(\%)} - \text{炉料中平均含量(\%)}]}{\text{生铁含 C 量(或硅铁、锰铁中 Si、Mn 含量)(\%)}}$$

注意：使用高碳锰铁配料时，因为锰铁要带人较多的碳，生铁的加入量应比实际计算结果适当减少。

碳素钢实际加入量

加入量(kg) =
$$\text{碳素废钢预加量(kg)} - \text{生铁加入量(kg)} - \text{硅铁加入量(kg)} - \text{锰铁加入量(kg)}$$

验算硫、磷含量

$$\frac{\sum \text{各种炉料质量(kg)} \times \text{各种炉料 S、P 含量(\%)}}{\text{炉料总量(kg)}} \times 100\%$$

$$\leq \text{炉料中 S(P) 允许含量(\%)}$$

(2) 铸铁冲天炉熔化配料计算

① 根据铸铁成分要求和冲天炉实际情况，计算炉料中各元素的要求含量：

$$x_{\text{炉料}} = x_{\text{铁液}} / (1 \pm \eta)$$

式中， $x_{\text{炉料}}$ 为炉料中某元素的要求含量； $x_{\text{铁液}}$ 为铸件（铁液）中某元素的要求含量； η 为熔化过程中元素增减率。冲天炉熔化。通常五元素的增减率为：碳，+（5~15）%；硅，-（10~20）%；锰，-（15~25）%；硫，+（60~30）%；磷，±0。

② 计算钢铁比

$$\text{生铁加入量}(\%) = \frac{C_{\text{炉}} - C_{\text{钢}}}{C_{\text{铁}} - C_{\text{钢}}} \times 100\% \times (1 - H_y)$$

$$\text{回炉铁加入量}(\%) = \frac{C_{\text{炉}} - C_{\text{钢}}}{C_{\text{回}} - C_{\text{钢}}} \times 100\% \times H_y$$

$$\text{废钢加入量}(\%) = 1 - \text{生铁加入量}(\%) - \text{回炉铁加入量}(\%)$$

式中, $C_{\text{炉}}$ 为炉料要求含碳量, %; $C_{\text{钢}}$ 为废钢含碳量, %; $C_{\text{回}}$ 为回炉铁含碳量, %; $C_{\text{铁}}$ 为生铁含碳量, %; H_y 为回炉铁预加量, %。 H_y 根据回炉铁数量确定。因为算出的实际加入量比预加量要低一些, 确定预加量时应该略高一些。

③ 计算铁合金加入量 铁合金加入量(%) = $\{[x_{\text{炉料}} - \sum \text{炉料加入量}(\%) \times \text{炉料中元素含量}(\%)] \div \text{铁合金中元素含量}(\%)\} \times 100\%$

计算硅铁加入量时, 应从 X_{Si} 中扣除孕育剂带入硅。

④ 验算硫(磷)的含量 验算结果必须保证: $\sum \text{炉料加入量}(y) \times \text{炉料中硫(磷)含量}(\%) < \text{炉料允许硫(磷)含量}(\%)$ 。

(3) 铸铁感应炉熔化配料计算

① 计算铁合金加入量

$$\text{铁合金加入量}(\text{kg}) = \text{新料含量}(\text{kg}) \times x_{\text{炉}} / \text{铁合金中元素含量}(\%)$$

式中, $x_{\text{炉}}$ 为炉料中某元素的要求含量, %。

计算硅铁、锰铁时, 应从炉料要求的硅、锰含量中扣除生铁和废钢中的硅、锰含量。使用含有 V、Ti、B 和 P 等易氧化元素的回炉铁时, 应补加适量铁合金。

$$\text{回炉铁补加量}(\text{kg}) = \frac{\text{回炉铁质量}(\text{kg}) \times [1 - \text{收得率}(\%)]}{\text{铁合金中元素含量}(\%) \times \text{收得率}(\%)}$$

② 计算生铁预加量

$$\text{生铁预加量}(\text{kg}) = [\text{新料量}(\text{kg}) \times C_{\text{炉}} - \sum \text{铁合金带入量}(\text{kg})] / C_{\text{铁}}$$

式中, $C_{\text{炉}}$ 为炉料要求含碳量, %; $C_{\text{铁}}$ 为铁含碳量, %。

③ 计算废钢预加量

$$\text{废钢预加量}(\text{kg}) = \text{炉料量}(\text{kg}) - \text{铁合金量}(\text{kg}) - \text{生铁预加入量}(\text{kg}) - \text{炉铁铁合金补加量}(\text{kg})$$

④ 核算炉料中碳、硅、锰实际含量, 适当调整生铁和废钢加入量。必要时计算硅(锰)铁调整量和碳块加入量。

a. 实际含硅过高时, 适当降低生铁使用量

$$\text{生铁降低量}(\text{kg}) = \text{料量}(\text{kg}) \times (C_{\text{Si算}} - C_{\text{Si炉}}) / (C_{\text{Si铁}} - C_{\text{Si钢}})$$

式中, $C_{\text{Si算}}$ 为计算出的炉料实际含硅量, %; $C_{\text{Si炉}}$ 为炉料要求含硅量, %; $C_{\text{Si铁}}$ 为生铁含硅量, %; $C_{\text{Si钢}}$ 为废钢含硅量, %。

b. 生铁实际加入量(kg) = 生铁预加量(kg) - 生铁降低量(kg)。

c. 废钢实际加入量(kg) = 废钢预加量(kg) + 生铁降低量(kg) ± 硅、锰铁调整量(kg)。

$$\text{d. 碳块加入量}(\text{kg}) = \frac{\text{炉料总量}(\text{kg}) \times C_{\text{炉}} - C_{\text{总}}}{C_{\text{综}}}$$

式中, $C_{\text{总}}$ 为各种铁合金带入碳量, kg; $C_{\text{炉}}$ 为炉料要求含碳量, %; $C_{\text{综}}$ 为碳块综合收得率, %。

e. 验算炉料中硫(磷)含量

$$\frac{\sum \text{炉料带入硫(磷)总量(kg)}}{\text{炉料总量(kg)}} \times 100\% \leq \text{炉料中硫(磷)允许含量(\%)}$$

1.1.2.2 铸钢的熔炼

(1) 铸钢熔炼的目的和要求

铸钢熔炼的目的和要求包括以下四个方面：①降低钢液中的有害元素硫和磷，使其含量降低到规定限度以下；②清除钢液中的非金属夹杂物和气体，使钢液纯净；③将钢液中的硅、锰和碳（冶炼合金钢时，还包括有合金元素）的含量，控制在规定范围以内；④将炉料熔化成钢液，并提高其过热温度，保证浇注的需要。

(2) 铸钢熔炼的方法

铸钢熔炼主要用电弧炉，电弧炉冶炼的主要方法有氧化法、不氧化法和返回吹氧法三种。一般以有无氧化期来区分氧化法和不氧化法。而返回吹氧法是介于两者之间的一种冶炼方法。该法既有氧化期，但又不具有氧化期的全部任务，同时要预还原才进入还原期。

① 氧化法 氧化法是指包含熔化期、氧化期、还原期三个阶段的冶炼方法，其主要特点是具有氧化期和还原期的全部任务。其任务分述如下。

熔化期 熔化期的主要任务是使炉料迅速熔化。

在通电至炉料全部熔化的过程中，还要接松电极、吊换渣包、清理修补出钢槽、堵塞出钢口，准备各种工具和材料及打扫场地等工作。熔化期占整个冶炼时间的一半以上。

氧化期 氧化期的主要任务是脱磷、去气、去夹杂。

当炉料全部熔化，温度合适（一般为1570℃时），通过供氧脱碳，使钢水沸腾，气体和夹杂上浮，并使钢液中的磷下降。同时要升温至出钢温度以上，控制好终点碳及对部分合金元素进行调整。

还原期 还原期的主要任务是脱氧、脱硫、调整温度、调整成分。

氧化法冶炼的钢水质量最好，且适用范围最广，几乎所有钢种都可以用氧化法冶炼。

② 不氧化法 不氧化法是一种没有氧化期，而只有熔化期、还原期的一种冶炼方法。其主要特点是没有氧化期，一般不供氧，因此不能脱磷。装料时各元素成分配入规格下限或略低于下限，炉料全部熔化后，只要达到温度要求，就可还原，调整成分出钢。

不氧化法适宜冶炼合金成分较高的合金钢，含铝、钛、硼等易氧化元素成分较高的钢种必须采用不氧化法冶炼。

③ 返回吹氧法 返回吹氧法是一种利用返回料回收合金元素并通过吹氧脱碳来去气、去夹杂，从而保证钢的性能要求的冶炼方法。

返回吹氧法一般适用于不锈钢和高速钢等。

1.1.2.3 铸铁的熔炼

熔炼铁液是生产铸铁件的重要环节。铸件质量包括内在质量、外观质量以及是否形成缺陷等，这些都与铁液方面的因素有直接的关系。

铁液的流动性、薄壁和结构复杂铸件的成型性以及冷隔缺陷等受铁液温度的影响，而熔炼的铁液化学成分是否符合要求，则对铸件的机械性能有直接的影响。铁液中的气体和非金属夹杂物含量不仅影响铸铁的强度和铸件的致密度，而且还与铸件形成气孔、裂纹等缺陷有关。

(1) 冲天炉熔炼

在冲天炉底焦燃烧产生炉气的作用下,炉料熔化形成金属液滴和炉渣,金属液滴在下落过程中与炉气、焦炭、炉渣相互作用,金属的化学成分也发生变化。熔炼过程的核心是焦炭燃烧,因此,控制焦炭的燃烧反应是冲天炉熔炼的关键。

在熔炼较高要求铸铁时,常采用冲天炉-电弧炉双联熔炼法或冲天炉-感应电炉双联熔炼法,以充分利用冲天炉熔化效率较高、电弧炉和感应电炉对铁液过热能力强及化学成分控制容易的优点。

(2) 感应电炉熔炼

与冲天炉熔炼相比,感应电炉熔炼的优点是熔炼过程中不会有增碳和增硫现象,而且熔炼过程可以造渣覆盖铁液,在一定程度上能防止铁液中硅、锰及合金元素的氧化,并减少铁液从炉气中吸收气体,从而使铁液比较纯净。这种熔炼方法的缺点是电能耗费大。

感应电炉适用于熔炼高质量灰铸铁、合金铸铁、球墨铸铁及蠕墨铸铁等。无芯感应电炉能够直接熔化固体炉料,而且开炉及停炉比较方便,适合于间断性生产条件。有芯感应电炉开炉及停炉不便,适合于连续性生产。这种炉子熔化固体炉料的热效率低,而对过热铁液的热效率高,故适于与冲天炉配合使用。目前这两种形式的感应电炉在铸铁生产上都得到应用。

(3) 电弧炉熔炼

电弧炉熔炼的优点是熔化固体炉料的能力强,而且铁液是在熔渣覆盖条件下进行过热和调整化学成分的,故在一定程度上能避免铁液吸气和元素的氧化。这为熔炼低碳铸铁和合金铸铁创造了良好的条件。

电弧炉的缺点是耗电多,从熔化的角度看不如冲天炉经济,故铸铁生产上常采用冲天炉-电弧炉双联法熔炼。由于碱性电弧炉炉衬耐急冷急热性差,在间歇式熔炼条件下,炉衬寿命短,导致熔炼成本高,故多采用酸性电弧炉与冲天炉相配合。

1.2 有色金属材料介绍及制备

1.2.1 有色金属材料介绍

非铁(有色)金属的种类很多,但工业上应用较多的主要有铝合金、铜合金、镁合金、钛合金、轴承合金以及近年来发展起来的一些新型及特种用途材料。与钢铁相比,非铁(有色)金属及其合金具有许多特殊的力学、物理和化学性能,因而成为航空航天、汽车制造、船舶制造、电器仪表等现代工业、国防和科学研究领域中不可缺少的工程材料。

1.2.1.1 铝及其合金

(1) 概述

① 铝及其合金的性能特点

a. 密度小,比强度高 纯铝的密度为 2.7g/cm^3 , 大约是钢铁材料的三分之一,铝合金的密度也很小。采用各种强化手段后,铝合金的强度可以接近低合金高强度钢,因此其比强度(强度与密度之比)比一般的高强度钢高得多。

b. 加工性能良好 铝及其合金(退火状态)的塑性很好,能通过冷、热压力加工制成各种型材,如丝、线、箔、片、棒、管等。气切削加工性能也很好。高强铝合金在退火状态

下加工成型后,经过适当的热处理工艺,可以达到很高的强度。铸造铝合金铸造性能优良,例如,硅铝明(一种铝硅合金)可适用于多种铸造方法。

c. 具有优良的物理、化学性能 铝的导电性和导热性好,仅次于银、铜和金,居第四位。室温时,铝的导电能力约为铜的62%;若按单位重量材料的导电能力计算,铝的导电能力为铜的二倍。纯铝及其合金有相当好的抗大气腐蚀的性能,这是因为在铝的表面能生成一层致密的氧化铝薄膜,它能有效地隔绝铝与氧的接触,从而阻止铝的进一步氧化。

② 纯铝 纯铝是一种具有银白色金属光泽的金属,晶体结构为面心立方,无同位素异构转变。纯铝在大气和淡水中具有良好的耐蚀性,但在碱和盐的水溶液中表面的氧化膜易破坏,使铝很快被腐蚀,纯铝具有良好的低温性能,在 $-253\sim 0^{\circ}\text{C}$ 之间塑性和冲击韧性不降低。

纯铝的铝含量不低于99.00%,此外还含有少量的杂质,主要杂质为铁和硅。一般说来,随着杂质含量的增加,纯铝的导电性和耐蚀性均降低。

纯铝的强度很低,虽然可通过冷作硬化的方式强化,但不宜直接用作结构材料。一般应在铝中加入适当的合金元素形成铝合金,按照生产工艺的不同,可分为铸造铝合金和变形铝合金。

(2) 铝合金的强化

提高铝的强度的基本途径是在铝中加入适当的合金元素,通过固溶强化、弥散强化来实现。如果再配合热处理和其他措施,铝合金的强度和韧性可得到进一步的改善。

① 时效强化 将含有4%Cu的铝合金加热到 α 相区中的某一温度,经过一段时间保温,获得单一的 α 固溶体组织,而后投入水中快冷,使次生相来不及析出,从而在室温下获得过饱和 α 固溶体,这种处理称为固溶处理。经过固溶处理的铝合金,强度和硬度升高并不多,但在放置一段时间(4~5d)后,强度和硬度显著升高。这种淬火后铝合金的强度和硬度随时间延续而显著升高的现象称为时效强化。如果时效是在室温下进行,称为自然时效;在一定加热条件下进行,称为人工时效(温度较低或时间较短的称为不完全时效)。人工时效可以加快时效速度,但比自然时效的强化效果差。

② 细晶强化

a. 改善冷却条件,增大冷却速度 铝合金特别是变形镁合金的塑性较好,在铝合金结晶过程中,若采取一些强冷措施,如在连续浇注铸锭时向结晶器中通水冷却、向热的铸锭上多次喷水激冷等,可以提高铸造的冷却速度,增大结晶的过冷度,结晶时一般不会开裂,还可以有效的细化晶粒,改善合金的性能。

b. 铝合金的变质处理 铝硅系铸造合金具有优良的流动性,并具有很小的收缩率,铸造性能很好,但二元铝硅合金不能进行有效的时效强化,固溶强化效果也不好,铸态组织很粗,合金强度很低。若在浇注前向液态合金中加入变质剂,进行变质处理,则可以细化晶粒,提高力学性能。传统变质剂是钠盐的混合物,加入量一般为合金液的2%~3%。

目前,在各类变形铝合金的连续铸造中,已广泛采用变质处理细化基体组织。生产应用表明,以钛和硼同时加入,变质效果最好,其中钛的加入量为0.0025%~0.05%,硼的加入量为0.0006%~0.01%。

(3) 铝合金的种类