

普通高等教育“十三五”规划教材

金属材料学 (第3版)

Metallic Materials (3rd Edition)

李云凯 薛云飞 ◎ 编著

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

校外借

普通高等教育“十三五”规划教材

金属材料学

(第3版)

Metallic Materials (3rd Edition)

李云凯 薛云飞 © 编著



内 容 简 介

本书为高等学校金属材料专业教材,全书共分两篇16章。第一篇包括第一章至第九章的内容,讲述了黑色金属材料,简要介绍了钢铁材料的生产、铸铁材料,重点介绍了钢合金化的基本原理,首次引入了电子结构理论关于合金钢成分设计和性能分析的内容;此外对工程构件用钢、机器零件用钢、工模具用钢、不锈钢、耐热钢和高温合金做了必要介绍。第二篇包括第十章至第十六章的内容,主要讲述了有色金属材料,如铝及其合金、铜及其合金、钛及其合金、镁及其合金、钨合金、非晶合金和高熵合金等。

本书可作为高等学校金属材料专业本科生教材,也可以作为金属材料领域的科研人员、研究生、工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

金属材料学/李云凯,薛云飞编著.—3版.—北京:北京理工大学出版社,2019.1

ISBN 978-7-5682-6639-0

I. ①金… II. ①李… ②薛… III. ①金属材料—高等学校—教材 IV. ①TG14

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第008906号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/三河市华骏印务包装有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/18

字 数/423千字

版 次/2019年1月第3版 2019年1月第1次印刷

定 价/49.00元

责任编辑/陈莉华

文字编辑/陈莉华

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前言

金属材料学是研究金属材料的成分、工艺、组织结构与力学性能之间关系的一门科学，它对金属材料的研究、应用和发展起着重要作用。因此，金属材料学是金属材料专业一门主要的、必修的专业课。随着教学改革的不深入，本课程也进行了适当调整，我们根据新的教学大纲和学时的要求，编著了本教材。本教材也可作为相关工程技术人员及研究生的参考资料。

本教材着重介绍了钢合金化的基本概念和基础理论，首次引用了电子结构理论解释、分析钢材的电子结构与其力学性能的关系。同时，对合金钢、铸铁、有色合金的成分、工艺、组织结构、性能及应用做了介绍。特别增加了非晶合金和高熵合金的内容。

本教材的第2版出版以后，深受广大读者的欢迎，根据需求修订再版。本版由李云凯教授和薛云飞教授编著，除了对上一版的内容进行适当的修改外，主要增加了价电子结构理论方面的内容和目前研究的先进非合金材料、高熵合金材料等内容。

由于编著者水平有限，书中难免存在不足之处，恳请读者指正。

借此致谢在本教材编著过程中所参考和引用的图书、文章、资料的作者。

作者

目 录

CONTENTS

第一篇 钢铁材料

第一章 钢铁材料的生产	002
第一节 铁的冶炼	002
第二节 钢的冶炼	005
第二章 铸铁	009
第一节 铸铁中碳的石墨化	009
第二节 各种铸铁的基本特征及性能	012
第三节 铸铁的合金化及热处理	016
第三章 钢的合金化基本原理	020
第一节 钢中的合金元素	020
第二节 合金钢中的相组成	024
第三节 合金钢中的相变	030
第四节 合金元素对钢的强韧性和工艺性能的影响	043
第五节 微量元素在钢中的作用	053
第四章 固体与分子经验电子理论	058
第一节 简介	059
第二节 铁基合金的价电子结构	063
第三节 EET 应用实例	099
附录 EET 理论中元素的杂化双态	103
第五章 工程结构钢	118
第一节 工程结构钢的合金化	119
第二节 铁素体-珠光体钢	123
第三节 低碳贝氏体和马氏体钢	127

第六章 机械制造结构钢	130
第一节 机械制造结构钢的强度与韧性	130
第二节 机械制造结构钢的淬透性	131
第三节 调质钢	135
第四节 低温回火状态下使用的结构钢	137
第五节 高合金超高强度结构钢	141
第六节 轴承钢	143
第七节 渗碳钢和氮化钢	145
第八节 其他机械制造结构钢	148
第七章 工具钢	151
第一节 碳素及低合金工具钢	151
第二节 高速工具钢	152
第三节 冷作模具钢	159
第四节 热作模具钢	162
第八章 不锈钢	165
第一节 金属常见的腐蚀形式及原理	166
第二节 合金元素对不锈钢组织和性能的影响	171
第三节 不锈钢的强化与脆化	174
第九章 耐热钢	178
第一节 概论	178
第二节 铁素体型耐热钢	185
第三节 奥氏体型耐热钢	186
第四节 工业炉用耐热钢	188
第五节 镍基耐热合金	190
第六节 新型耐热合金	192

第二篇 有色金属及其合金

第十章 铝及其合金	196
第一节 概述	196
第二节 铝合金中的合金元素	197
第三节 变形铝合金	200
第四节 铸造铝合金	203

第十一章 铜及其合金	206
第一节 概述	206
第二节 黄铜	207
第三节 青铜	209
第四节 白铜	213
第十二章 钛及钛合金	214
第一节 钛及钛合金概述	214
第二节 钛的合金化	217
第十三章 镁及其合金	221
第十四章 高密度钨合金	224
第一节 W-Ni 合金	224
第二节 高密度钨合金的牌号、成分、性能和应用	230
第十五章 非晶合金	238
第一节 非晶合金概述	238
第二节 非晶合金的形成机制	239
第三节 非晶合金的微观结构	244
第四节 非晶合金的力学性能	245
第五节 常见的几种非晶合金	248
第十六章 高熵合金	263
第一节 高熵合金的发展历程	263
第二节 高熵合金的结构	265
第三节 高熵合金的性能	269
第四节 高熵合金的设计及组织调控	271
第五节 高熵合金的制备	275
参考文献	277

第一篇 钢铁材料

通常将金属材料分成两大类，一类为黑色金属，铁、铬、锰属于此类；另一类为有色金属，即除铁、铬、锰之外的金属，如铜、铝、锌等。本篇主要介绍钢铁材料的生产及其工艺、性能和使用等方面的一些知识。

第一章 钢铁材料的生产

第一节 铁的冶炼

一、原料

(一) 铁矿石

铁矿石是由一种或几种含铁矿物和脉石组成。含铁矿物是具有一定化学成分和结晶结构的化合物，脉石也是由各种矿物如石英、长石等组成并以化合物形态存在的物质。所以，铁矿石实际是由各种化合物所组成的机械混合物。

1. 铁矿石的种类

冶金工业常用的铁矿石有四种：赤铁矿石、磁铁矿石、褐铁矿石和菱铁矿石。

1) 赤铁矿石

赤铁矿石中的 Fe 是以不含水的 Fe_2O_3 形式存在的，其理论含铁量为 70%。自然界开采的赤铁矿石，实际含铁量一般为 30% ~ 60%。赤铁矿石多为暗红色，也有浅灰色和黑色的，密度为 $5.0 \sim 5.3 \text{ g/cm}^3$ ，质地较松，还原性很好，S 和 P 的含量都很少，是最主要的工业铁矿石。

2) 磁铁矿石

磁铁矿石中的 Fe 是以 Fe_3O_4 的形式存在的，其理论含铁量为 72.4%。自然界开采的磁铁矿石含铁量为 40% ~ 70%，矿石中脉石为石英和各种盐类，也有少量的黏土、黄铁矿、磷灰石、黄铜矿等，S 和 P 的含量较高。磁铁矿石最显著的特点是具有磁性，其颜色从灰色到黑色，并有较暗的金属光泽。其密度为 $4.9 \sim 5.2 \text{ g/cm}^3$ ，组织致密，颗粒微小，质地坚实，比较难还原。

3) 褐铁矿石

褐铁矿石中的 Fe 是以 $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 的形式存在的，其理论含铁量为 59.8%。在自然界中分布很广，是由其他铁矿石风化而成的，很少成为富矿。它常与黏土及石英等杂质混在一起，含铁量为 37% ~ 55%，含较多的 P，有时还含有 S、As 等杂质。褐铁矿石呈黄褐色，密度为 $3.0 \sim 4.2 \text{ g/cm}^3$ ，质地比较松软，易于开采，在高炉中受热后组织变得很松软，还原性好。

以上三种矿石均为含铁的氧化物，是炼铁的主要矿石。

4) 菱铁矿石

菱铁矿石中的 Fe 是以 FeCO_3 形式存在的，其理论含铁量为 48.3%，密度为 3.9 g/cm^3 。在

自然界中常见的菱铁矿石坚硬，带有黄褐色的灰色，杂质较多，必须经过焙烧才用于炼铁。

2. 对铁矿石的要求

为保证炼铁的质量和经济性，对铁矿石有一定的要求：含铁量越高越好（富矿含铁量大于45%，贫矿含铁量小于45%）；脉石的含量应尽量少；矿石中的杂质要少；还原性要好。

3. 冶炼前铁矿石的处理

自然开采的铁矿石，无论是在化学成分、物理状态等各方面，都很难满足高炉冶炼的要求，必须经过各种处理才能更经济、更合理地用于高炉生产。铁矿石的混匀是铁矿石冶炼前很重要的准备工作。铁矿石在冶炼前的处理，常为机械处理和热处理两种。机械处理包括破碎、筛分及选矿；热处理包括焙烧和烧结造块等。

（二）熔剂

铁矿石中的脉石和燃料中的灰分，都含有一些熔点很高的化合物（如 SiO_2 的熔点为 $1\,625\text{ }^\circ\text{C}$ ， Al_2O_3 的熔点为 $2\,050\text{ }^\circ\text{C}$ ），它们在高炉冶炼的温度下，不能熔化成液体，因而不能使它们很好地与铁液分离，同时也使炉子的操作发生困难。加入熔剂的目的在于使其与这些高熔点的化合物形成低熔点的炉渣，以便在高炉冶炼温度下完全液化，并保持较好的流动性，以达到很好地与铁液分离之目的，保证生铁的质量。

根据熔剂的性质，熔剂可分为碱性熔剂和酸性熔剂。采用哪一种熔剂要根据铁矿石中脉石和燃料中灰分的性质来决定。由于天然铁矿石中脉石大多数为酸性，焦炭灰分也都是酸性的，所以通常都使用碱性熔剂，如石灰石，酸性熔剂很少使用。

（三）燃料

高炉冶炼所需要的热量，主要是依靠燃料的燃烧而获得，同时燃料在燃烧过程中，还起着还原剂的作用，所以燃料是高炉冶炼的主要原料之一，常用的燃料主要是焦炭，还有无烟煤和半焦等。

二、高炉的构造及附属设备

高炉是近似于圆柱形的炉子，它的外面包以钢板，内壁砌以耐火砖，整个炉子建筑在很深的混凝土基础上。高炉是由炉喉、炉身、炉腰、炉腹、炉缸等部分组成的，如图1-1所示。

炉料自炉喉处加入，其上部设有炉顶加料机构，两侧有煤气导出管。炉身为一向下扩大的圆锥体，这样的形状可使受热膨胀后的炉料容易下降，它是高炉最长的部分，铁矿石在其中逐渐被还原。生铁和炉渣在炉腰和炉腹区域形成并熔化，炉腰是很矮的圆柱体，它砌在铁制圆环上（圆环架在若干个支柱上）；炉腹为一向上扩大的倒截圆锥体，它能支持其上面所有炉料的重量，炉腹上部包围着环形风管，它能将热风通过风嘴送入炉内。炉缸是积聚液态铁水和炉渣的地方，其上部有6~20个风口向炉内送进热风，风口下面有1个或2个出渣口，炉底面上有1个或2个出铁口。高炉的附属设备主要包括装料设备、热风炉、铸铁机和

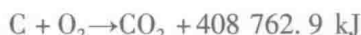
混铁炉、除尘器等。

三、高炉冶炼的理化过程

高炉冶炼的目的，就是把铁从铁矿石中还原出来，同时去除其中所含的杂质。所以整个冶炼过程中，最主要的是进行铁的还原反应以及造渣反应。除此之外，还伴随着其他一系列复杂的物理化学反应，如水分及挥发物的蒸发、碳酸盐的分解、铁的碳化和熔化以及其他各种元素的还原等，而这一系列的反应，都只有在一定的温度下才能实现。因此，冶炼过程还需要有燃料的燃烧来作为必要的条件。

1. 燃料的燃烧

燃料燃烧的反应式为：



2. 炉料的分解

炉料的分解包括水分蒸发和结晶水分解；挥发物的排除；碳酸盐的分解。

3. 高炉内的还原反应

1) 铁的还原

在高炉中，铁并不是直接从高价氧化物中还原出来的，而是要经过一个由高价氧化物还原成低价氧化物，再由低价氧化物还原出铁的过程：



铁的还原，主要依靠一氧化碳气体和固体碳作为还原剂来实现。通常把一氧化碳的还原称为间接还原，把固体碳的还原称为直接还原。

间接还原总反应式为：



直接还原总反应式为：



2) 铁的碳化

从铁矿石中还原出来的铁，是固体海绵状的，它的含碳量极低，通常不超过1%。由于一氧化碳在较低的温度下分解，而分解出的碳具有很强的活性，当它与铁接触时，很容易形成铁碳合金。因此，固态海绵状铁在较低的温度下（400℃～600℃）就开始了渗碳作用。其化学反应式如下：

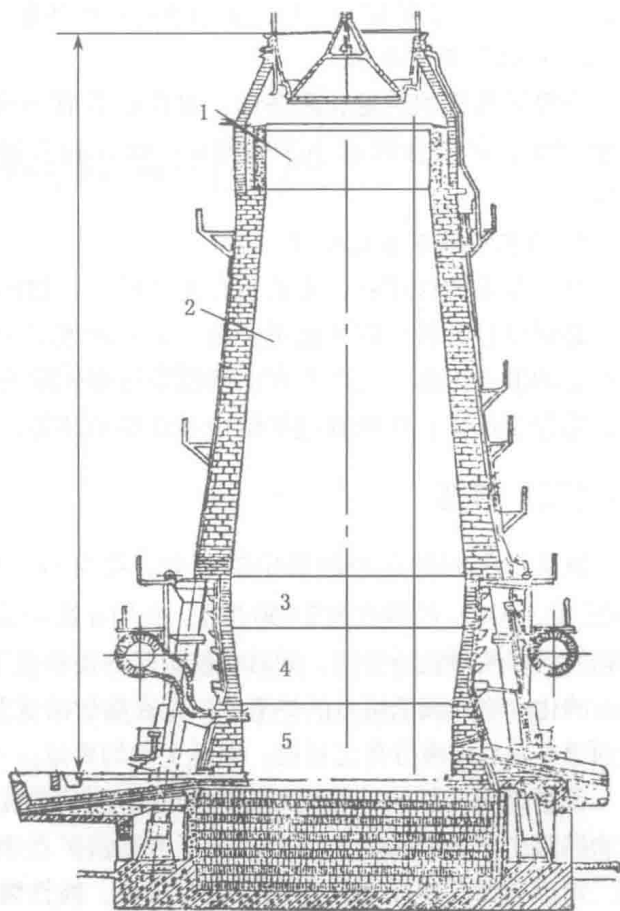


图 1-1 高炉的构造

1—炉喉；2—炉身；3—炉腰；4—炉腹；5—炉缸



4. 造渣过程

造渣过程就是矿石中的脉石和燃料中的灰分与熔剂混合在一起，从高炉中被清除出去的过程。高炉中的成渣情况常见的有以下两种：

(1) 用普通酸性矿石冶炼时，熔剂以石灰石形态装入高炉，熔剂中的 CaO 并不能与矿石中的酸性氧化物密切接触，因此最初形成的渣，主要是 SiO_2 、 Al_2O_3 与一部分已还原的 FeO 生成的 Fe_2SiO_4 。由于渣中有 FeO 存在，降低了炉渣的熔点，并有较好的流动性，在它往下降落的过程（同时也是温度升高的过程）中，所含的 FeO 逐渐被还原而失去，而 CaO 的含量随之增多，最后形成末渣流入炉缸。

(2) 用自熔性矿石冶炼时，由于矿石中含有较多的 CaO ，并且它与酸性的 SiO_2 能很好地接触，所以在冶炼开始时 CaO 就立即参加了造渣反应。尤其是采用自熔性烧结矿石冶炼时，在烧结过程中 CaO 就和 SiO_2 、 Al_2O_3 等形成了炉渣，因此在这种矿石的初成炉渣中 CaO 的含量就较高，在下降过程中炉渣的成分变化也较小。

四、高炉产品

高炉冶炼的产品主要是生铁、铁合金，副产品有炉渣、炉气和炉尘等。

1. 生铁

生铁是含碳量在 2.08% 以上的铁碳合金，其中还含有 Si 、 Mn 、 S 、 P 等杂质。根据用途和成分，可将生铁分成两大类：一类是炼钢生铁，这种生铁中的碳以化合物形态存在，其断面为银白色，也称为白口铁；另一类是铸造生铁，碳以石墨的形态存在，可直接用来制造机器零部件。

2. 铁合金

铁与任何一种金属或非金属的合金都称为铁合金（有的也称为合金生铁）。铁合金的种类很多，有硅铁、锰铁、铬铁、钼铁、钨铁等。

3. 炉渣、炉气和炉尘

炉渣、炉气和炉尘是高炉的副产品，以前作为废物而被抛弃，现在已经广泛用于建筑材料。

第二节 钢的冶炼

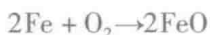
直接用矿石冶炼而得的生铁，含碳量较高（大于 2.08%），而且含有许多杂质（如硅、锰、磷、硫等）。因此，生铁缺乏塑性和韧性，力学性能差，除熔化浇铸外，无法进行压力加工，因而限制了它的用途。

为了克服生铁的这些缺点，使它在工业上能起到更大的作用，还必须在高温下利用各种来源的氧，把它里面的杂质氧化清除到一定的程度，以得到一定成分和一定性质的铁碳合金——钢。这种在高温下氧化清除生铁中杂质的方法称为炼钢。

一、炼钢的基本原理

在高温下,生铁中的各种杂质,在不同程度上都与氧有较大的亲和力。因此可以利用氧化的方法使它们成为液体、固体或气体氧化物,液体和固体氧化物在高温下与炉衬和加入炉内的熔剂起作用,结合成炉渣,并在扒渣时被排除炉外,气体也在钢水沸腾时被一氧化碳带到炉外。

在炼钢炉内,杂质的氧化主要是依靠 FeO 的存在而实现的。在各种炼钢炉内,杂质氧化反应如下:



Si 与 O 有较大的亲和力,因此 Si 的氧化很迅速,它在冶炼初期就已经完全被氧化而生成 SiO_2 ,同时 SiO_2 又和 FeO 反应形成硅酸盐:



这种盐是炉渣中很重要的一部分,它与 CaO 作用生成稳定化合物 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 和 FeO,前者牢固存在于炉渣中,后者变成了渣中的游离成分,使渣中 FeO 的含量增加,对促进杂质的氧化是比较有利的。其反应如下:



Mn 也是易氧化的元素,它所生成的 MnO 有较高的熔点, MnO 在金属液中并不溶解,但是它与 SiO_2 形成的化合物浮在液体金属表面,成为炉渣的一部分:



Si、Mn 的氧化反应放出大量的热,可以使炉温迅速提高(这一点对转炉炼钢特别重要),大大加速了碳的氧化过程。

C 的氧化需要吸收大量的热能,所以必须在较高的温度下才能进行。C 的氧化又是炼钢过程中很重要的一个反应,由于碳氧化时生成了一氧化碳气体,它从液体金属中逸出时起强烈的搅拌作用,这种作用称为“沸腾”。产生沸腾的结果,可以促使熔池成分和温度均匀,加速金属与炉渣界面的反应,同时也有利于去除钢中气体和夹杂物。

P 的氧化在不太高的温度下即可发生,去磷过程由几个反应组合而成,其反应如下:



当在碱性炉渣中有足够的 CaO 时会发生如下反应:



所生成的 $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 是稳定的化合物,它牢固地保持在炉渣中,因而达到了去磷的目的。

必须注意,钢水在脱氧过程中,要加入硅铁、锰铁等脱氧剂,因而常常在脱氧以后,炉渣呈现酸性,而使 $3\text{FeO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 遭到破坏,从中还原出 P_2O_5 ,而 P_2O_5 是不稳定的氧化物,

它在高温下易被碳还原，产生回磷现象。这也说明了在酸性炉内去磷是十分困难的。为了防止这种现象的产生，必须适当地增加炉渣碱度和渣量，提高炉渣氧化性等。

S 是以 FeS 的形式存在。当炉渣中有足够的 CaO 时，同样也能将 S 去除，反应如下：

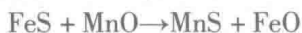


生成的 CaS 并不溶于钢水中，而形成了炉渣浮在钢水表面。上面这个反应是可逆反应，而且是在含有 FeO 的炉渣中进行的，当 FeO 与 CaS 发生作用时，会使 S 重新回到钢水中，所以去硫效率随渣中 FeO 的含量减少而增高。而渣中含有足够的 C 时，反应就不同了：



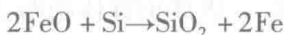
由于 C 夺去了 FeO 中的 O，失去了 CaS 与 FeO 作用的可能性，使反应不能逆向进行，这就是为什么电炉炼钢时去硫要比其他两种方法来得完全的原因。

在去硫的过程中，Mn 也起了促进去硫的作用，其过程如下：



生成的 MnS 几乎不溶于钢水而进入渣中。因此，去硫的作用随 Mn 的氧化而加大。

通过上述一系列氧化反应以后，虽然杂质被氧化了，达到了去除的目的，但是也由于氧化的结果，使钢水中含有较多的 FeO，也就是说钢水中存在着大量的氧，给钢带来很大的危害，一方面使钢带有大量气泡；另一方面也使钢出现热脆和冷脆现象，而且危害性随含碳量的增加而加大。因此，在炼钢过程的最后，还必须设法去除钢水中大量存在的氧。通常采用的方法是在钢水中加入一些脱氧剂，如锰铁、硅铁、铝等，它们强烈地从 FeO 中夺取氧而达到脱氧的目的，其反应如下：



综上所述，整个炼钢过程是由氧化和还原两个过程所组成的，所以通常把碳、硅、锰、磷的氧化称为氧化期内的反应，而把脱硫和脱氧称为还原期内的反应。从以上各项反应式中可以看到，为了清除金属中的杂质，必须考虑多方面的因素，但是其中最主要的因素就是造渣和除渣。所以炼钢工人常说：“炼钢就是炼渣，炼好渣一定出好钢。”炉渣在炼钢过程中具有下列重要作用：

(1) 炉渣应保证炼钢过程按一定反应方向来进行（氧化或还原）。

(2) 炉渣应保证最大限度地去除金属中的有害杂质（P 和 S），以及防止炉气中的气体（N₂ 和 H₂）进入到金属中。

(3) 炉渣应保证操作过程中铁和其他有价值的元素损失最小。

二、炼钢的基本方法

1. 转炉炼钢

转炉炼钢法就是利用空气或氧气，采取底吹、侧吹和顶吹的方式，使铁水中的元素氧化到规定限度，从而得到成分合格的钢的一种炼钢方法。

2. 电炉炼钢

电炉是利用电能转变成热能来炼钢的，常用的电炉有两种：电弧炉和感应电炉。电弧炉

用得最广, 宜于冶炼优质钢和合金钢; 感应电炉用于冶炼高级合金钢和有色合金。

3. 平炉炼钢

随着工业的发展, 金属加工工业中积累了大量废钢。当时无法用转炉将它重新吹炼成钢, 因此炼钢工作者们就寻找了一种用废钢作为原料的炼钢方法。1864 年法国人马丁发明了平炉炼钢法。

氧气顶吹转炉炼钢法的迅速发展, 将要取代平炉炼钢法, 我国新建的炼钢车间大都是氧气顶吹转炉和电炉。

随着科学技术的进步, 新的炼钢方法不断出现, 例如, 钢水的真空处理、电渣炉熔炼、真空感应电炉熔炼等方法, 这些在此就不详细介绍了。

三、钢锭

铸锭是炼钢生产过程中很重要也很复杂的一道工序。从炼钢炉出来的钢水质量可能很好, 但由于浇铸不良而生产出带有各种缺陷的钢锭来, 而这种钢锭在轧制过程中又不可避免地要产生或多或少的废品, 所以必须十分重视浇铸工作。

从炼钢炉中得到的钢水, 除小部分浇成铸件以外, 绝大部分都浇成钢锭, 以便轧、压成材。只有良好的钢锭, 才能轧、压出合格的钢材。

用来铸锭的钢水一般有两种, 即镇静钢和沸腾钢。镇静钢是经过良好脱氧的钢水, 它在注入锭模时放出气体很少, 不沸腾, 凝固后可以得到坚实的钢锭, 缩孔集中于上部。沸腾钢在浇铸时放出大量的一氧化碳气体, 使钢水沸腾。沸腾钢锭中没有集中缩孔, 只有很多分散的和形状不同的气泡存在于钢锭内部, 因此钢锭体积的收缩是比较小的。

钢水的凝固过程可分为 3 个阶段: 表面形成细小等轴晶粒; 中部形成棒状 (或柱状) 结晶带; 形成心部较大、形状粗短的等轴晶粒。

钢锭各部分的冷速是不同的, 中心结晶比较慢, 而表面结晶比较快, 因而容易产生缩孔、偏析等缺陷。这些缺陷的来源可分成两类, 一类是钢水本身所带来的, 如非金属夹杂物等; 另一类是由浇铸工艺所产生的, 如缩孔、偏析等。

第二章 铸 铁

铸铁是以 Fe 和 C 为主的合金，其一般化学成分为： $w(\text{C}) = 2\% \sim 4\%$ ， $w(\text{Si}) = 1\% \sim 3\%$ ， $w(\text{Mn}) = 0.1\% \sim 1\%$ ， $w(\text{S}) = 0.02\% \sim 0.25\%$ ， $w(\text{P}) = 0.05\% \sim 1.0\%$ 。所以，铸铁实际上是一种以 Fe、C、Si 为主要成分且在结晶过程中具有共晶转变的多元铁基合金。

铸铁是人类使用最早的金属材料之一。到目前为止，铸铁仍是一种被广泛应用的金属材料。从整个工业生产中使用金属材料数量来看，铸铁的使用量仅次于钢材。例如，按重量统计，在机床中铸铁件占 60% ~ 90%，在汽车、拖拉机中，铸铁件占 50% ~ 70%。

铸铁之所以获得广泛的应用，主要是由于它的生产成本低廉和具有优良的铸造性、耐磨性和减震性。另外，随着铸造技术的进步，球墨铸铁和蠕墨铸铁的研制成功以及对铸铁进行合金化和热处理等强化手段的采用，已经可以制取各种性能优异的铸造合金。所以，尽管有来自其他新材料的激烈竞争，但铸铁仍不失为一种最经济、适用的材料。

第一节 铸铁中碳的石墨化

一、铸铁中石墨的形态与分类

1. 铸铁中 C 的存在形式及石墨的形态

铸铁中的 C 主要有下列 3 种分布形式：固溶于 Fe 中形成间隙固溶体，如铁素体和奥氏体中的 C；与 Fe 作用形成 Fe_3C ；以游离的石墨（G）形式析出。

2. 铸铁的分类

根据 C 在铸铁中存在的形式及石墨的形态，可将铸铁分为以下 5 类。

灰口铸铁：C 全部或大部以游离的片状石墨形态存在。断口处呈浅灰色。

可锻铸铁：C 全部或大部以游离的团絮状石墨形态存在。与灰口铸铁相比，有较好的韧性和塑性，因此而得名，但实际上并不可锻造。

蠕墨铸铁：C 全部或大部以游离的蠕虫状石墨形态存在。

球墨铸铁：C 全部或大部以游离的球状石墨形态存在。

白口铸铁：C 全部或大部以化合态的 Fe_3C 形式存在，断口呈白亮色，故称白口铸铁。

各类铸铁中石墨的形态如图 2-1 所示。为了保证铸件有一定的韧性，一般很少铸成全白口组织，而是采用表面激冷的办法，使铸件仅形成一定厚度的白口表面层，而心部仍保持为灰口组织，这种铸铁称为冷硬铸铁。

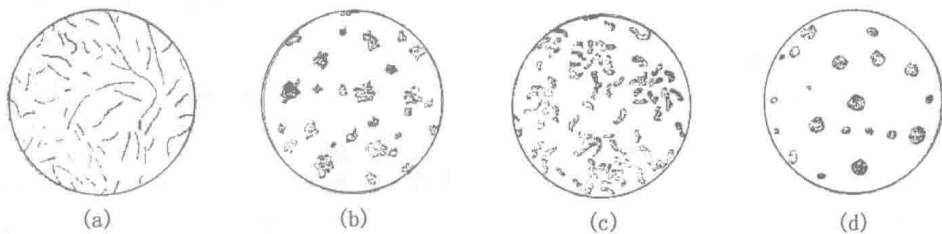


图 2-1 铸铁中石墨的形态

(a) 灰口铸铁; (b) 可锻铸铁; (c) 蠕墨铸铁; (d) 球墨铸铁

二、铸铁的石墨化

铸铁（除白口铸铁外）的组织都是由金属基体和石墨两部分组成的。石墨的形态、大小、数量和分布状态对铸铁的性能有着重要的影响。那么，铸铁中的石墨是怎样形成的呢？如何获得所需要的金属基体呢？这些都与铸铁的石墨化过程有关。

石墨化就是铸铁中碳原子析出和形成石墨的过程。究竟在什么情况下，C 以石墨形式析出？总的来说，石墨既可由铁液中析出，也可以由奥氏体中析出，还可以由渗碳体分解得到。灰口铸铁、球墨铸铁、蠕墨铸铁中的石墨都是由铁水冷却时通过结晶过程而得到的；而可锻铸铁中的石墨则是由白口铸铁中的 Fe_3C 在高温下的分解而得到的。

（一）热力学条件和动力学条件

1. 热力学条件

铸铁中各种组织的自由能随温度而变化的曲线如图 2-2 所示。由图 2-2 可以看出，在高于 T'_c ($1\,154\text{ }^\circ\text{C}$) 时，由于共晶液体的自由能 F_L 最低，因此不会发生任何相变。

当合金过冷到 $T'_c \sim T_c$ ($1\,148\text{ }^\circ\text{C}$) 范围时，由于共晶液体的自由能 F_L 高于奥氏体 + 石墨两相组成物的自由能 $F_{\gamma+G}$ ，而低于奥氏体 + 渗碳体两相组成物的自由能 $F_{\gamma+\text{Fe}_3\text{C}}$ ，因而此时只能发生 $L \rightarrow \gamma + G$ 的共晶转变，而不能发生由液态向莱氏体的共晶转变。

当合金过冷到 T_c ($1\,148\text{ }^\circ\text{C}$) 温度以下时，虽然共晶液体的自由能值均高于奥氏体 + 石墨和莱氏体的自由能值，但共晶液体与奥氏体 + 石墨之间自由能差值要大于它与莱氏体之间的自由能差值，因此，当共晶液体结晶时，从热力学条件来说，对石墨化过程总是有利的。

将白口铸铁在 $900\text{ }^\circ\text{C}$ 以上长期保温时，莱氏体中的渗碳体之所以能够自动分解成奥氏体 + 石墨的混合物，就是由于符合热力学条件，即在这种条件下渗碳体的自由能高于奥氏体 + 石墨的自由能。

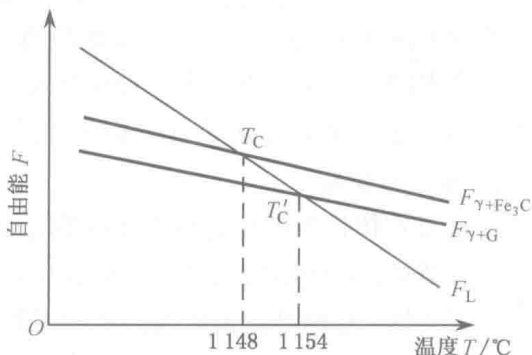


图 2-2 铸铁中各种组织的自由能与温度的关系