



普通高等教育“十三五”规划教材

PUTONG GAODENG JIAOYU “13·5” GUIHUA JIAOCAI

钢冶金学

主编 高泽平



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn



普通高等教育“十三五”规划教材

钢冶金学

主 编 高泽平

副主编 张 波

北 京

机械工业出版社

地址：北京市西城区

邮编：100044

电话：(010) 68995100

内 容 提 要

本书为冶金工程专业主干课程“钢冶金学”的配套教材,系统地阐述了炼钢过程基础理论与工艺。主要内容包括:炼钢过程基本理论、炼钢用原材料、铁水预处理、转炉炼钢方法及其冶金特点、转炉炼钢工艺、转炉炉衬与长寿技术、电弧炉炼钢设备、电弧炉炼钢冶炼工艺、特种冶金、炼钢二次资源的综合利用。重点介绍了铁水预处理、顶吹与复吹转炉炼钢工艺、溅渣护炉技术、现代电炉炼钢工艺。本书内容突出了应用性和新颖性的特点,力求全面、实用,注重理论与实际相结合,着力反映现代炼钢新工艺。

本书可作为高等院校冶金工程专业的教学用书,也可供从事钢铁生产的工程技术人员、管理人员及相关专业的学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢冶金学/高泽平主编. —北京:冶金工业出版社,
2016. 6

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5024-7243-6

I. ①钢… II. ①高… III. ①炼钢学—高等学校—教材
IV. ①TF7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 149720 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

责任编辑 杨 敏 美术编辑 吕欣童 版式设计 杨 帆

责任校对 禹 蕊 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7243-6

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;固安华明印业有限公司印刷

2016 年 6 月第 1 版,2016 年 6 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 21.25 印张; 513 千字; 327 页

49.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

钢铁工业已进入了一个新的发展时期，中国钢铁材料设计与制造技术将向绿色化、智能化、质量-品牌化的方向发展，以高品质、高附加值的钢铁产品作为钢铁制造的发展目标。未来钢铁产业发展的关键不是量而是质，而实现低成本炼钢，提高综合竞争力是各个钢铁厂追寻的目标。

为了适应钢铁工业的快速发展，更好地满足教学与生产的需要，按照普通高等教育“十三五”教材建设规划，根据冶金工程专业教学大纲的要求，我们编写了本书。

全书共分为 11 章，主要内容包括：概述、炼钢过程基本理论、炼钢用原材料、铁水预处理、转炉炼钢方法及其冶金特点、转炉炼钢工艺、转炉炉衬与长寿技术、电弧炉炼钢设备、电弧炉炼钢冶炼工艺、特种冶金、炼钢二次资源的综合利用。系统地阐述了炼钢过程基本理论与工艺，重点介绍了铁水预处理、顶吹与复吹转炉炼钢工艺、溅渣护炉技术、现代电炉炼钢工艺。本书编写思路清晰，内容全面，简洁流畅，新颖实用，注重理论与实际相结合，着力反映现代炼钢新工艺。

本书由湖南工业大学冶金工程学院的教师编写。高泽平任主编，张波任副主编。苏振江、贺道中、胡洵璞、王建丽老师参与了部分章节的编写工作。全书由高泽平统编、定稿。

本书由武汉科技大学薛正良教授担任主审，薛正良教授提出了许多宝贵意见，在此表示诚挚的感谢。在编写过程中，得到了苏州大学王德永教授、衡阳华菱钢管有限公司首席专家周维汉的大力支持，在此表示衷心的感谢。编写本书时参阅了有关炼钢方面的文献，在此谨向所有参考文献的作者致以深深的谢意。

本书可作为高等院校冶金工程专业的教学用书，也可供从事钢铁生产的工程技术人员、管理人员及相关专业的学生参考。

限于作者水平，书中难免有不妥之处，恳请同行和读者批评指正。

高泽平

2016 年 3 月

目 录

1 概述	1
1.1 炼钢的基本任务	2
1.1.1 去除杂质	2
1.1.2 调整钢的成分	5
1.1.3 调整钢液温度	6
1.2 钢的性能	7
1.2.1 钢的力学性能	7
1.2.2 钢中元素对钢性能的影响	10
1.2.3 夹杂物对钢性能的影响	11
1.2.4 新一代钢铁材料主要特征	14
1.3 钢的分类	15
1.3.1 钢种的分类	15
1.3.2 钢材的分类	17
1.4 现代炼钢法的发展历程	17
1.5 现代钢铁生产工艺流程	19
1.5.1 长流程与短流程	19
1.5.2 炼钢过程工序功能的分解与集成	19
1.6 炼钢技术经济指标	20
1.6.1 生产率	20
1.6.2 质量	21
1.6.3 品种	21
1.6.4 消耗	21
1.6.5 成本与利润	22
1.7 我国钢铁工业的发展	22
1.7.1 近代钢铁工业状况	22
1.7.2 钢铁工业的发展战略	22
思考题	23
2 炼钢过程基本理论	24
2.1 钢液的物理性质	24
2.1.1 钢液的密度	24
2.1.2 钢的熔点	24

2.1.3 钢液的黏度	25
2.1.4 钢液的表面张力	25
2.1.5 钢的导热能力	26
2.2 熔渣相图	27
2.2.1 CaO-SiO_2 系相图	28
2.2.2 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 系相图	28
2.2.3 $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3$ 系相图	29
2.2.4 $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO}$ 渣系相图	30
2.3 熔渣的物理化学性质	32
2.3.1 熔渣的作用、来源与组成	32
2.3.2 熔渣的化学性质	33
2.3.3 熔渣的物理性质	35
2.4 炼钢基本反应	39
2.4.1 硅、锰的氧化反应	39
2.4.2 脱碳反应	40
2.4.3 脱磷反应	43
2.4.4 脱硫反应	47
思考题	51
3 炼钢用原材料	52
3.1 金属料	52
3.1.1 铁水	52
3.1.2 废钢	53
3.1.3 生铁	55
3.1.4 直接还原铁	56
3.1.5 铁合金	56
3.2 造渣材料	58
3.2.1 石灰	58
3.2.2 萤石	60
3.2.3 白云石	61
3.2.4 合成造渣剂	61
3.2.5 菱镁矿	61
3.2.6 火砖块	61
3.3 氧化剂、冷却剂和增碳剂	62
3.3.1 氧化剂	62
3.3.2 冷却剂	62
3.3.3 增碳剂	63
思考题	63

4 铁水预处理	64
4.1 铁水预脱硫工艺	64
4.1.1 脱硫剂的选择	64
4.1.2 脱硫方法	68
4.1.3 典型的铁水预脱硫工艺	72
4.2 铁水预脱硅工艺	76
4.2.1 铁水脱硅的目的	76
4.2.2 脱硅剂	76
4.2.3 脱硅基本反应	77
4.2.4 脱硅渣	77
4.2.5 铁水预脱硅方法	78
4.3 铁水预脱磷工艺	79
4.3.1 脱磷剂	79
4.3.2 铁水预脱磷的方法	80
4.3.3 铁水同时脱硫脱磷	82
4.4 铁水预处理提钒	84
4.4.1 铁水提钒原理	84
4.4.2 提钒方法	85
4.5 铁水预处理提铌	86
思考题	87
5 转炉炼钢方法及其冶金特点	88
5.1 氧气顶吹转炉炼钢法	89
5.1.1 吹炼过程操作工序	89
5.1.2 转炉吹炼过程中金属成分的变化规律	90
5.1.3 熔渣成分的变化规律	96
5.1.4 熔池温度的变化规律	97
5.1.5 炉内反应特征	97
5.2 氧气底吹转炉炼钢法	98
5.2.1 氧气底吹转炉设备	98
5.2.2 熔池反应的基本特点	99
5.3 氧气顶底复吹转炉炼钢法	103
5.3.1 顶底复吹转炉炼钢工艺类型	103
5.3.2 复吹转炉的底吹气体和供气元件	104
5.3.3 复吹转炉内的冶金反应	109
5.3.4 冶金特点	112
思考题	113

6 转炉炼钢工艺	114
6.1 装入制度	114
6.1.1 装入量的确定	114
6.1.2 装入制度	115
6.1.3 装料次序	115
6.1.4 “一罐到底”技术	115
6.2 供氧制度	116
6.2.1 顶吹氧射流与熔池的相互作用	116
6.2.2 供氧参数	124
6.2.3 氧枪操作	126
6.3 底吹工艺	129
6.3.1 底吹气体对熔池的作用	129
6.3.2 底吹供气强度的确定	130
6.3.3 底部供气模式	131
6.4 造渣制度	132
6.4.1 熔渣的形成	133
6.4.2 成渣路线	135
6.4.3 泡沫渣	136
6.4.4 造渣方法	137
6.4.5 白云石造渣	139
6.4.6 渣料加入量与加入时机	139
6.4.7 吹损与喷溅	141
6.5 温度制度	142
6.5.1 热量来源和热量消耗	142
6.5.2 出钢温度的确定	144
6.5.3 冷却剂的种类及其冷却效应	144
6.5.4 温度控制	146
6.6 终点控制	147
6.6.1 终点控制的内容	147
6.6.2 终点经验控制	147
6.6.3 自动控制	149
6.6.4 出钢	164
6.7 脱氧及合金化制度	168
6.7.1 不同钢种的脱氧	168
6.7.2 脱氧方法	169
6.7.3 合金的加入原则	169
6.7.4 脱氧操作	171
6.7.5 合金加入量的确定	171

6.7.6 钢的微合金化	172
6.8 低成本炼钢关键工艺技术	181
6.8.1 少渣炼钢技术	181
6.8.2 石灰石造渣技术	183
6.8.3 氧化物矿直接合金化技术	184
6.8.4 高碳出钢控氧技术	188
思考题	190
7 转炉炉衬与长寿技术	191
7.1 转炉炉衬	191
7.1.1 转炉内衬用砖	191
7.1.2 转炉出钢口用砖	192
7.1.3 复吹转炉底部供气用砖	193
7.1.4 对炉衬砖的砌筑要求	193
7.2 炉衬寿命	193
7.2.1 炉衬损坏的原因	193
7.2.2 炉衬砖的蚀损机理	193
7.2.3 提高转炉炉龄的措施	194
7.3 溅渣护炉技术	196
7.3.1 溅渣护炉的机理	197
7.3.2 溅渣层的蚀损机理	199
7.3.3 溅渣护炉工艺	200
思考题	209
8 电弧炉炼钢设备	210
8.1 电弧炉的机械设备	210
8.1.1 电弧炉炉体装置	210
8.1.2 电炉倾动机构	214
8.1.3 电极升降机构	215
8.1.4 炉顶装料系统	215
8.2 电弧炉的电气设备	216
8.2.1 电弧炉的主电路	216
8.2.2 电弧炉电控设备	222
8.2.3 电弧炉运行的电气特性	223
8.2.4 供电制度的确定	226
思考题	228
9 电弧炉炼钢冶炼工艺	229
9.1 电弧炉炼钢概述	229

9.2 电弧炉冶炼方法	229
9.3 传统电弧炉炼钢冶炼工艺	230
9.3.1 补炉	230
9.3.2 装料	232
9.3.3 熔化期	234
9.3.4 氧化期	237
9.3.5 还原期	240
9.4 现代电弧炉炼钢冶炼工艺	247
9.4.1 现代电弧炉炼钢工艺流程	247
9.4.2 废钢预热	247
9.4.3 超高功率电弧炉	250
9.4.4 直流电弧炉	264
9.4.5 高阻抗电弧炉	269
思考题	271
10 特种冶金	272
10.1 感应熔炼法	272
10.1.1 感应炉的冶炼设备	272
10.1.2 中频感应炉熔炼工艺	277
10.2 真空感应熔炼法	279
10.2.1 真空感应炉	279
10.2.2 熔炼操作	280
10.2.3 熔炼特点	282
10.3 电渣重熔法	282
10.3.1 设备组成	282
10.3.2 冶金特点	284
10.3.3 工艺过程	285
10.3.4 优质大钢锭制备	289
10.3.5 冶金质量	290
10.4 真空电弧重熔法	290
10.4.1 设备组成	291
10.4.2 熔炼过程	292
10.5 电子束熔炼法	293
10.5.1 工作原理	293
10.5.2 设备组成	293
10.5.3 熔炼工艺	294
10.6 等离子弧熔炼法	294
10.6.1 等离子弧和等离子枪	294
10.6.2 等离子熔炼炉	295

思考题.....	297
11 炼钢二次资源的综合利用.....	298
11.1 绿色冶金的概念.....	298
11.2 炼钢过程“三废”处理与综合利用	299
11.2.1 烟气、烟尘处理与利用	299
11.2.2 钢渣处理与利用	314
11.2.3 污水处理与利用	320
思考题.....	324
参考文献.....	325

1 概 述

钢铁材料实质上是铁碳合金，图 1-1 所示为 Fe-Fe₃C 相图。碳具有间隙固溶强化作用，可形成各种碳化物（最典型的是 Fe₃C，引入其他合金后可以成为合金渗碳体）。碳的加入使铁的固态相变复杂多变，由此导致钢的性能变化范围大幅度扩大。

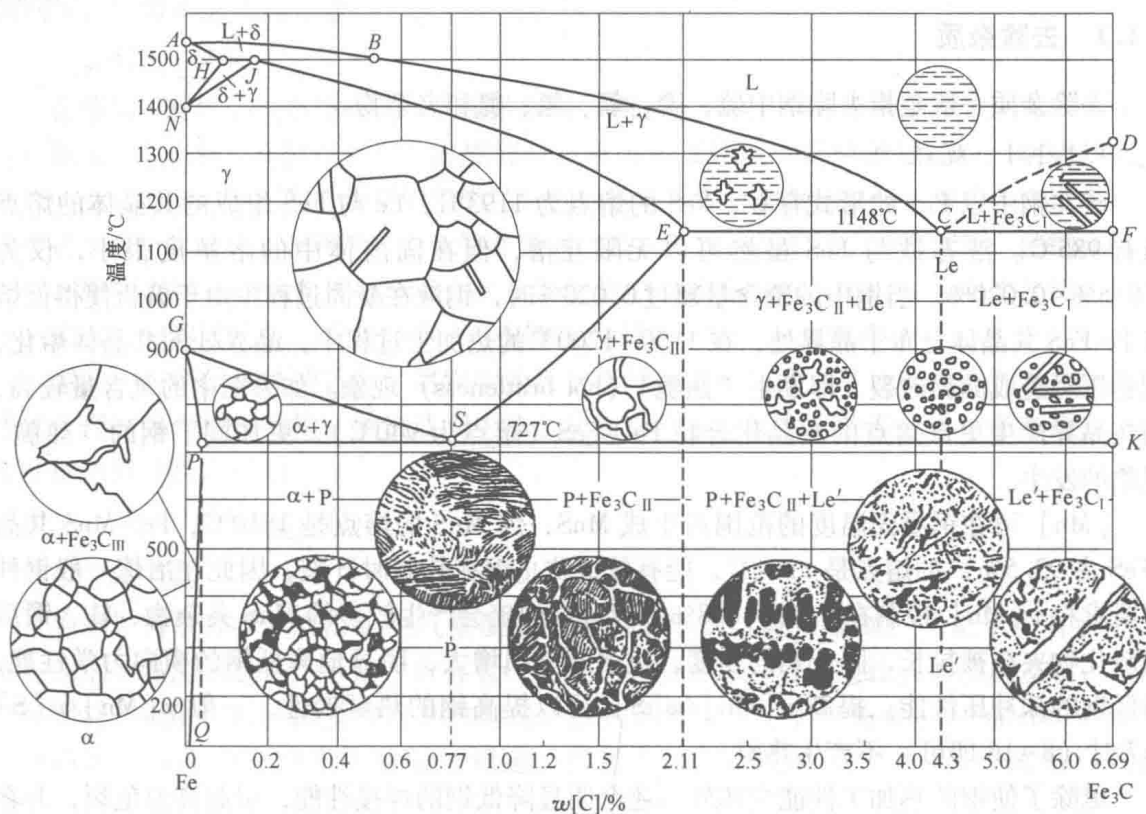


图 1-1 Fe-Fe₃C 相图

钢和生铁的区别可从表 1-1 中看出。钢具有强度高、韧性好、易于加工和焊接等特性，改变钢中的合金元素及其数量可以获得各种不同性能的合金钢。除约占生铁总量 10% 的铸造生铁用于生产铁铸件外，约占生铁 90% 的炼钢生铁需要进一步冶炼成钢，以满足国民经济各部门的需要。

表 1-1 钢和生铁的区别

名称	碳含量/%	熔点/℃	特性
生铁	2.11~4.5	1100~1200	脆而硬，无韧性，不能轧、锻、焊，铸造性能好
钢	<2.11 (工业上实用的钢中一般 $w[C] < 1.2\%$)	1450~1500	强度高，塑性好，韧性大，可以轧、锻、焊、铸造及拉、冲、拔

在现代化建设中,钢的需求涉及所有部门,而且需用的品种和数量都很大。现代农业、机械工业、化学工业、建筑业、电子工业、兵器工业、宇航工业以及人民日常生活都离不开钢。钢铁工业是工业经济和人民生活改善的支柱产业。展望未来,钢铁仍将是最主要的结构材料和产量最大的功能材料。

1.1 炼钢的基本任务

所谓炼钢 (steelmaking),就是将废钢、铁水等炼成具有一定化学成分的钢,并使钢具有一定的物理化学性能和力学性能。为此,必须完成下列基本任务。

1.1.1 去除杂质

去除杂质一般是指去除钢中硫、磷、氧、氢、氮和夹杂物。

1.1.1.1 脱硫

硫在钢中以 FeS 的形式存在,FeS 的熔点为 1193°C ,Fe 与 FeS 组成的共晶体的熔点只有 985°C 。液态铁与 FeS 虽然可以无限互溶,但在固溶体中的溶解度很小,仅为 $0.015\%\sim 0.020\%$ 。当钢中的硫含量超过 0.020% 时,钢液在凝固过程中由于偏析使得低熔点 Fe-FeS 共晶体分布于晶界处,在 $1150\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 的热加工过程中,晶界处的共晶体熔化,钢受压时造成晶界破裂,即发生“热脆”(hot brittleness)现象。如果钢中的氧含量较高,则在晶界产生更低熔点的共晶化合物 FeO-FeS (熔点为 940°C),更加剧了钢的“热脆”现象的发生。

[Mn] 可在钢凝固温度的范围内生成 MnS,纯 MnS 的熔点是 1610°C ,FeS-MnS 共晶 (FeS 占 93.5%) 的熔点是 1164°C ,能有效地防止钢在轧制时开裂,因此在冶炼一般钢种时要求将 $w[\text{Mn}]$ 控制在 $0.4\%\sim 0.8\%$ 。但过高的硫会产生较多的 MnS 夹杂物,轧、锻后的硫化物夹杂被拉长,降低钢的强度,使钢的磨损增大,明显地降低钢的横向力学性能,降低钢的深冲压性能。提高 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}]$ 可以提高钢的热延展性,一般 $w[\text{Mn}]/w[\text{S}] \geq 7$ 时 ($8\sim 16$ 即可) 不产生热脆。

硫除了使钢的热加工性能变坏外,还会明显降低钢的焊接性能,引起高温龟裂,并在金属焊缝中产生许多气孔和疏松,从而降低焊缝的强度。硫含量超过 0.06% 时,会显著恶化钢的耐蚀性。硫是连铸坯中偏析最为严重的元素,从而增加了连铸坯内裂纹的产生倾向。

不同钢种对硫含量有着严格的规定:非合金中普通质量级钢要求 $w[\text{S}] \leq 0.045\%$,优质级钢 $w[\text{S}] \leq 0.035\%$,特殊质量级钢 $w[\text{S}] \leq 0.025\%$,有的钢种如管线钢要求 $w[\text{S}] \leq 0.005\%$,甚至更低。但对有些钢种,如易切削钢,[S] 作为产生硫化物的介质加入 (在切削过程中车屑易断),要求硫含量为 $0.08\%\sim 0.20\%$ 。易切削钢常作为易加工的螺钉、螺帽、纺织机零件、耐高压零件等的材料,我国常用的易切削钢有:Y12、Y20、Y30。

1.1.1.2 脱磷

通常认为,磷在钢中以 $[\text{Fe}_3\text{P}]$ 或 $[\text{Fe}_2\text{P}]$ 形式存在,为方便起见,均用 $[\text{P}]$ 表

示。在一般情况下,磷是钢中有害元素之一。通常,磷使钢的韧性降低,磷可略微增加钢的强度。磷的突出危害是产生“冷脆”(cryogenic brittleness),即从高温降到 0°C 以下,钢的塑性和冲击韧性降低,并使钢的焊接性能与冷弯性能变差。在低温下, $w[\text{P}]$ 越高,冲击性能降低就越大。磷是降低钢液表面张力的元素,随着其含量的增加表面张力降低显著,从而降低了钢的抗热裂纹性能。磷是仅次于硫在钢的连铸坯中偏析度高的元素,在铁固溶体中扩散速率很小,因而磷的偏析很难消除,严重影响钢的性能。

为减小磷的危害,提高钢质,必须尽量降低磷含量。钢中的磷含量允许范围:非合金钢中普通质量级钢 $w[\text{P}] \leq 0.045\%$,优质级钢 $w[\text{P}] \leq 0.035\%$,特殊质量级钢 $w[\text{P}] \leq 0.025\%$,有的钢种甚至要求 $w[\text{P}] \leq 0.010\%$ 。但有些钢种如炮弹钢、易切削钢、耐腐蚀钢等,则需要加入磷元素。

1.1.1.3 脱氧

在炼钢过程中,向熔池吹入了大量的氧气,到吹炼终点,钢水中含有过量的氧,如果不进行脱氧,在出钢、浇注过程中,温度降低,氧溶解度降低,促使碳氧反应,钢液剧烈沸腾,使浇注困难,得不到合理凝固组织结构的连铸坯;而且在钢的凝固过程中,氧以氧化物的形式大量析出,钢中也将产生氧化物非金属夹杂,降低钢的塑性、冲击韧性,使钢变脆。

一般测定的钢中氧含量是全氧,包括氧化物中的氧和溶解的氧;在使用浓差法定氧时才测定钢液中溶解的氧(氧的活度);在铸坯或钢材中取样是全氧样。

因此,应根据具体的钢种,将钢中的氧含量降低到所需的水平,以保证钢水在凝固时得到合理的凝固组织结构;使成品钢中非金属夹杂物含量最少,分布合适,形态适宜,以保证钢的各项性能指标。

1.1.1.4 去气(氢、氮)

A 钢中氢

炼钢炉料带有水分或由于空气潮湿,都会使钢中的含氢量增加。氢是钢中有害的元素。在钢的热加工过程中,钢中含有氢气的气孔会沿着加工方向被拉长而形成发裂,从而引起钢材的强度、塑性以及冲击韧性降低,这种现象称为氢脆(hydrogen embrittlement)。在钢的各类标准中一般不作数量上规定,但氢会使钢产生白点(发裂)、疏松和气泡缺陷。

在钢材的纵向断面上,呈现出的圆形或椭圆形的银白色斑点称为白点,实为交错的细小裂纹。它产生的主要原因是钢中的氢在小孔隙中析出的压力和钢相变时产生的组织应力的综合力超过了钢的强度,产生了白点。一般白点产生的温度小于 200°C ,低温下钢中氢的溶解度很低,相变应力最大。

在高温高压下,氢与钢中的碳形成甲烷并在晶界聚集,产生网络状裂纹,甚至开裂鼓泡,这种现象称为氢蚀。

因此,要特别注意原材料的干燥清洁,冶炼时间要短,应充分发挥炉内脱碳的去气作用,甚至采用真空精炼的方法使钢中氢降到很低的水平。

B 钢中氮

氮由炉气进入钢中。氮在奥氏体中的溶解度较大,而在铁素体中的溶解度很小,且随温度的下降而减小。当钢材由高温较快冷却时,过剩的氮由于来不及析出便溶于铁素体

中。随后在 250~450℃ 加热, 将会发生氮化物的析出, 使钢的强度、硬度上升, 塑性大大降低, 这种现象称为蓝脆。钢中的氮以氮化物的形式存在, 氮化物的析出速度很慢, 逐渐改变着钢的性能。氮含量高的钢种, 若长时间放置, 将会变脆, 这一现象称为“老化”或“时效”(即时效脆性)。

在低碳钢中增大氮含量会降低冲击韧性, 产生老化现象, 碳含量越低, 影响的值就越大。氮是表面活性物质, 因此降低了钢液的表面张力, 降低了钢的抗热裂纹的性能。氮含量增加, 钢的焊接性能变坏。

降低钢中氮的方法是炉内脱碳沸腾, 炉外真空去气。由于氮的原子半径比较大, 在铁液中扩散较慢, 所以不如 [H] 的去除效果好。钢中残余的氮可用 Ti、Nb、V、Al 结合生成稳定的氮化物, 以消除影响 (压抑 Fe_4N 的生成和析出)。细小的氮化物有调整晶粒、改善钢质的作用。

氮作为一种“合金元素”应用于开发含氮钢, 不仅对于生产钒氮合金化的Ⅲ级钢筋是一种节省钒铁的途径, 也是使不宜控轧控冷的低碳长条钢发挥钒的强化作用的方法。在冶炼铬钢、镍铬系钢或铬锰系等高合金钢时, 加入适量的氮, 能够改善钢的塑性和高温加工性能。

1.1.1.5 控制残余有害元素

控制钢中残余有害元素, 是当前国际纯净钢发展的要求。钢中有害元素指 Cu、P、S、As、Sn、Pb、Sb、Bi 等元素, 其中 As、Sn、Pb、Sb、Bi 简称五害元素。

铜的熔点较低, 钢中铜含量高, 钢在加热过程中铜在晶界析出, 易造成裂纹缺陷。As、Sn、Pb、Sb、Bi 几种元素易在晶界附近偏聚, 导致晶界弱化, 降低钢的蠕变塑性; 还有可能造成钢的表面裂纹缺陷。

国内残余元素控制标准: (1) 薄板坯钢材中残余元素总量应控制在 0.20% 以下。(2) 不同薄板产品所允许的最大残余元素值 (Cu、Ni、Cr、Mo 与 Sn 的总含量): 饮料罐板材为 0.18%; 深冲板材为 0.26%; 低碳板材为 0.30%; 普通板材为 0.315%。

控制钢中残余有害元素要针对钢的具体用途和钢种制定不同标准, 合理安排组织生产。在资源条件及成本允许的情况下, 可用生铁、DRI 等废钢代用品对钢中残余元素进行稀释处理。在资金允许的前提下, 用废钢破碎、分离技术进行固态废钢预处理是明智的选择。钢液脱除技术是最适于大规模生产的残余有害元素处理方法, 可与炼钢过程同步进行, 简便易行, 但这一方法尚需进一步研究与探讨。

1.1.1.6 控制非金属夹杂

钢中非金属夹杂物 (nonmetallic inclusion) 来源如下:

(1) 脱氧脱硫产物, 特别是一些颗粒小或密度大的夹杂物没有及时排除。

(2) 随着温度降低, 硫、氧、氮等杂质元素的溶解度相应下降, 而以非金属夹杂物形式出现的生成物。

(3) 凝固过程中因溶解度降低、偏析而发生反应的产物。

(4) 固态钢相变溶解度变化生成的产物。

(5) 带入钢液中的炉渣和耐火材料。

(6) 钢液被大气氧化所形成的氧化物。

钢中的非金属夹杂物按来源分可以分成内生夹杂和外来夹杂。上述前四类夹杂称为内

生夹杂，后两类夹杂称为外来夹杂。外来夹杂系偶然产生，通常颗粒大，呈多角形；成分复杂，氧化物分布也没有规律。内生夹杂物类型和组成取决于冶炼和脱氧方法，对一些合金钢而言，钢成分的变化对夹杂组成的影响十分明显，如铝、锰含量对形成氧化物、硫化物影响很大，Ti、Zr、Ce、Ca 等元素存在时对夹杂物的影响十分突出。钢中大部分内生夹杂是在脱氧和凝固过程中产生的。

根据化学成分的不同，夹杂物可以分为：

(1) 氧化物夹杂，即 FeO 、 MnO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Cr_2O_3 等简单的氧化物， $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{FeO-Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 等尖晶石类和各种钙铝的复杂氧化物，以及 2FeO-SiO_2 、 2MnO-SiO_2 、 $3\text{MnO-Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$ 等硅酸盐。

(2) 硫化物夹杂，如 FeS 、 MnS 、 CaS 等。

(3) 氮化物夹杂，如 AlN 、 TiN 、 ZrN 、 VN 、 BN 等。

按照加工性能区分，夹杂物可分为：

(1) 塑性夹杂，它在热加工时沿加工方向延伸成条带状，如 MnS 、 $(\text{Mn}, \text{Fe})\text{S}$ 等。

(2) 脆性夹杂，它是完全不具有塑性的夹杂物，如尖晶石类型夹杂物、熔点高的氮化物。

(3) 点状不变性夹杂，如 SiO_2 含量超过 70% 的硅酸盐、 CaS 、钙的铝硅酸盐等。

低温下，钢中的氧基本上和元素反应全部生成夹杂物，实际上，除部分硫化物以外，钢中的非金属夹杂物绝大多数为氧化物系夹杂物。因此，可以用钢中总氧 $w(\text{T}[O])$ 来表示钢的洁净度，也就是钢中夹杂物水平。

根据我国国家标准 GB/T 10561—2005，高倍金相夹杂物分为：A 类（硫化物类）、B 类（氧化铝类）、C 类（硅酸盐类）、D 类（球状氧化物类）和 DS 类（单颗粒球状类，直径不小于 $13\mu\text{m}$ 的单颗粒夹杂物）。评级从 0.5 级到 3 级（0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3），随着夹杂物的长度或串（条）状夹杂物的长度（A、B、C 类），或夹杂物的数量（D 类），或夹杂物的直径（DS 类）的增加而递增。A、B、C 和 D 类夹杂物按其宽度或直径（D 类夹杂物的最大尺寸定义为直径）不同又分为细系和粗系两个系列。

由于非金属夹杂对钢的性能会产生严重影响，因此在炼钢、精炼和连铸过程中，应最大限度地降低钢液中夹杂物的含量，控制其成分、形态及尺寸分布。

1.1.2 调整钢的成分

为保证钢的物理、化学性能，应将钢的成分调整到规定的范围之内。

1.1.2.1 钢中碳

炼钢过程中要氧化脱除多余的碳，以达到规定的要求。碳被氧化成 CO ， CO 气泡的搅拌作用，有利于钢液中气体的排出。从钢的性质看，碳也是重要的合金元素之一，它可增加钢的强度、硬度。在不同的热处理条件下，碳改变了钢中各组织的比例，使强度增加的同时略微降低韧性指标。

1.1.2.2 钢中锰

锰的冶金作用主要是消除硫的热脆倾向，改变硫化物的形态和分布以提高钢质。钢中锰是一种弱脱氧元素，只有在碳含量非常低、氧含量很高时才有脱氧作用，主要是协助硅、铝脱氧，提高它们的脱氧能力和脱氧量。锰可略微提高钢的强度，锰含量每增加

1%，可使钢的抗拉强度提高 78.5MPa，并可提高钢的淬透性能。它可稳定并扩大奥氏体区，常作为合金元素制造奥氏体不锈钢（代 Ni）、耐热钢（和氮共同代 Ni）和无磁护环钢（大电机用）。当锰含量为 13%、碳含量为 1% 时，可制造耐磨钢，使用过程中可产生加工硬化，减少钢的磨损。

1.1.2.3 钢中硅

硅是钢中最基本的脱氧元素。普通钢中含硅 0.17%~0.37%，是冶炼镇静钢的合适成分，在 1450℃ 左右钢凝固时，能保证钢中与其平衡的氧量小于与碳平衡的氧量，从而抑制凝固过程中 CO 气泡的产生。硅能提高钢的力学性能，在 $w[\text{Si}] \leq 1\%$ 时，每增加 0.1% 的 $[\text{Si}]$ ，抗拉强度约提高 9MPa。硅还能增加钢的电阻和磁导性，是生产硅钢的重要元素。

1.1.2.4 钢中铝

炼钢生产中，铝是强脱氧元素，大部分钢均采用铝或含铝的复合脱氧剂脱氧。铝是强烈缩小 γ 相的元素，它与氮有很大的亲和力，首先表现为固氮作用，其次，当铝加入钢中时，奥氏体晶粒减小，抑制碳钢的时效，提高钢在低温下的韧性。

加入钢中的铝部分形成 Al_2O_3 或含有 Al_2O_3 的各种夹杂物，部分则溶入固态铁中，以后随加热和冷却条件的不同，或者在固态下形成弥散的 AlN ，或者继续保留在固溶体（奥氏体、铁素体）中。通常将固溶体中的铝（包括随后析出的 AlN ）称作酸溶铝（acid-soluble aluminium），而氧化铝则以大小不等的颗粒状夹杂形态存在于钢中，称作酸不溶铝。

$w[\text{Al}]$ 控制过低或过高，都会引起夹杂总量的增加。 $w[\text{Al}]$ 控制过低时，会增加溶解氧的含量，造成钢中氧化物的增加，影响钢的组织性能；随着 $w[\text{Al}]$ 的提高，一方面可以使溶解氧迅速地降低到较低水平，细化钢的晶粒，另一方面，浇注时较高的 $w[\text{Al}]$ 会增加钢液的二次氧化，产生滞留在钢中的 Al_2O_3 夹杂，且生成 AlN 在铸坯凝固时晶界析出易导致裂纹。

生产镇静钢时， $w[\text{Al}]$ 多在 0.005%~0.05% 范围内，通常为 0.01%~0.03%。不同钢种对 $w[\text{Al}]$ 的要求是有区别的。含锰合金结构钢易产生晶粒粗化，要求钢中残铝大于 0.02%，含 Cr、Ti、Nb 的合金钢铝含量也可适当高一点，而其他合金元素多的合金结构钢铝含量控制则可低一点。对于低碳钢，在能满足连铸要求的前提下，钢中 $w[\text{Al}]$ 可控制在 0.010%~0.020% 范围内，中、高碳钢则可适当再低一些，这样可以在有效地降低钢中夹杂总量的同时，提高钢材的性能。

炼合金钢时还需要加入其他合金元素，即需要进行合金化操作。

1.1.3 调整钢液温度

铁水温度，一般只有 1300℃ 左右，而钢水温度，必须高于 1500℃，才不至于凝固。钢水脱碳、脱磷、脱硫、脱氧、去气、去非金属夹杂等过程，都需在液态条件下进行。此外，为了将钢水浇注为铸坯（或钢锭），也要求出钢温度在 1600℃ 以上，才能顺利进行。为此，在炼钢过程中，需对金属料和其他原料加热升温，使钢液温度达到出钢要求。

钢水成分、温度合格后，将钢水铸成一定形状的铸坯（或钢锭），再轧成钢材。

还应指出，在完成炼钢基本任务的同时，也应注意维护炉体，提高炉子寿命，全面完