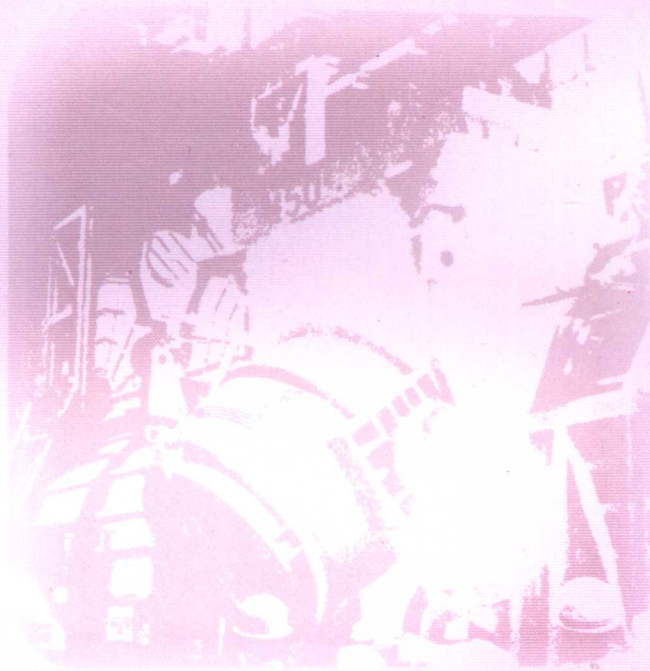


高等学校规划教材

GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

炼钢工艺学

高泽平 编



冶金工业出版社

<http://www.cnmp.com.cn>

高等学校规划教材

炼钢工艺学

高泽平 编

北 京
冶金工业出版社
2006

内 容 提 要

本书主要包括:炼钢用原材料、气体射流及其与熔池的相互作用、转炉炼钢方法及其冶金特点、转炉炼钢冶炼工艺、转炉炉衬与转炉长寿技术、电弧炉炼钢设备、电弧炉炉衬及维护、电弧炉炼钢冶炼工艺、特种冶金、炼钢二次资源的综合利用。系统阐述了各种炼钢方法的冶金特点、工艺制度,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。书中突出了应用性和新颖性的特点,力求内容全面、实用,注重理论与实际的结合,着力反映现代炼钢新工艺。

本书可作为高等学校教材(本科、高职高专),也可供从事钢铁生产的工程技术人员及管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

炼钢工艺学/高泽平编. —北京:冶金工业出版社, 2006. 8

高等学校规划教材

ISBN 7-5024-3574-3

I. 炼… II. 高… III. 炼钢—工艺学—高等学校—
教材 IV. TF7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 054061 号

出 版 人 曹胜利 (北京沙滩嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009)

责任编辑 宋 良 美术编辑 李 心

责任校对 王贺兰 李文彦 责任印制 丁小晶

北京兴华印刷厂印刷; 冶金工业出版社发行; 各地新华书店经销

2006 年 8 月第 1 版, 2006 年 8 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 22.75 印张; 605 千字; 351 页; 1—4000 册

39.00 元

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100711) 电话: (010)65289081

(本社图书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

冶金工业出版社部分图书推荐

书 名	作 者	定价 (元)
中国冶金百科全书·钢铁冶金	编委会 编	187.00
炼焦学 (第3版) (本科教材)	姚昭章 主编	39.00
现代冶金学——钢铁冶金卷 (本科教材)	朱苗勇 主编	36.00
钢铁冶金原理 (第3版) (本科教材)	黄希祜 编	40.00
冶金物理化学 (本科教材)	张家芸 主编	39.00
冶金工程实验技术 (本科教材)	陈伟庆 主编	39.00
自动检测和过程控制 (第3版) (本科教材)	刘元扬 主编	36.00
烧结矿与球团矿生产 (高职高专规划教材)	王悦祥 主编	29.00
冶金技术概论 (高职高专规划教材)	王庆义 主编	28.00
冶炼基础知识 (职业技术学院教材)	马 青 主编	36.00
铁合金生产 (职业技术学院教材)	刘 卫 主编	26.00
炼铁原理与工艺 (职业技术学院教材)	王明海 主编	38.00
炼钢原理及工艺 (职业技术学院教材)	刘根来 主编	40.00
转炉炼钢实训 (职业技术学院教材)	冯 捷 主编	35.00
连续铸钢实训 (职业技术学院教材)	冯 捷 主编	45.00
冶金过程检测与控制 (职业技术学院教材)	郭爱民 主编	20.00
冶金通用机械与冶炼设备 (职业技术学院教材)	王庆春 主编	45.00
炼焦化学产品回收技术 (职业技能培训教材)	何建平 等编	59.00
铁矿粉烧结生产 (职业技能培训教材)	贾 艳 主编	23.00
高炉炼铁基础知识 (职业技能培训教材)	贾 艳 主编	32.00
高炉喷煤技术 (职业技能培训教材)	金艳娟 主编	19.00
高炉炉前操作技术 (职业技能培训教材)	胡 先 主编	25.00
高炉热风炉操作技术 (职业技能培训教材)	胡 先 主编	25.00
炼钢基础知识 (职业技能培训教材)	冯 捷 主编	39.00
转炉炼钢生产 (职业技能培训教材)	冯 捷 主编	58.00
连续铸钢生产 (职业技能培训教材)	冯 捷 主编	45.00
冶金液压设备及其维护 (职业技能培训教材)	任占海 主编	35.00
冶炼设备维护与检修 (职业技能培训教材)	时彦林 主编	49.00
冶金建设工程技术	李慧民 主编	28.00
炼铁计算	那树人 著	38.00
冶金中单元过程和现象的研究	肖泽强 等著	96.00
钢铁冶金及材料制备新技术	蒋国昌 等著	28.00
炼铁生产自动化技术	刘 玠 主编	46.00
冶金原燃料生产自动化技术	刘 玠 主编	58.00

前 言

中国经济的繁荣和旺盛的市场需求，促进了中国钢铁工业的迅速发展，同时也促进了炼钢技术的不断进步。我国是钢铁大国，我国的钢铁工业正朝着技术升级、结构优化、淘汰落后的方向发展。

为了适应炼钢技术的快速发展，更好地满足教学与生产的需要，特编写了《炼钢工艺学》一书。

本书主要内容包括：炼钢用原材料、气体射流及其与熔池的相互作用、转炉炼钢方法及其冶金特点、转炉炼钢冶炼工艺、转炉炉衬与长寿技术、电弧炉炼钢设备、电弧炉炉衬及维护、电弧炉炼钢冶炼工艺、特种冶金、炼钢二次资源的综合利用。系统阐述了各种炼钢方法的冶金特点、工艺制度，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先进性的特点。力求内容全面、实用，注重理论与实际的结合，着力反映现代炼钢新工艺。

作者长期主讲炼钢工艺学课程。在教学过程中不断地整改内容和凝练思路，形成了一定的体系和特点，更加注重于培养学生分析问题和解决问题的能力，侧重于培养学生的创新思维。本书是在自编讲义的基础上，补充新的内容；结合多年的教学经验，调整书的体系和框架；并参考国内外有关文献编写而成。

在编写过程中，承蒙武汉科技大学薛正良教授的指导，企业专家组的审定，以及同行的帮助，在此表示诚挚的感谢。编写中，还参考了许多文献资料，在此谨向所有参考文献的作者致以深深的谢意。

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

2006年5月

目 录

1 概述	1
1.1 炼钢的基本任务	1
1.1.1 去除杂质	1
1.1.2 调整钢的成分	7
1.1.3 调整钢液温度	8
1.2 钢的分类及其对性能的要求	8
1.2.1 钢的分类	8
1.2.2 对钢的性能要求	9
1.2.3 新一代钢铁材料主要特征	12
1.2.4 钢铁工业在国民经济中的重要地位与作用	12
1.3 现代炼钢法的发展历程	13
1.4 炼钢炉内的主要反应	14
1.5 现代钢铁生产工艺流程	15
1.5.1 长流程与短流程	15
1.5.2 炼钢过程工序功能的分解与集成	16
1.6 炼钢技术经济指标	17
1.6.1 生产率	17
1.6.2 质量	19
1.6.3 品种	19
1.6.4 消耗	19
1.6.5 成本与利润	20
1.7 我国钢铁工业的发展	21
1.7.1 近代钢铁工业状况	21
1.7.2 中国钢铁工业的发展战略	21
思考题	23
2 炼钢用原材料	24
2.1 金属料	24
2.1.1 铁水	24
2.1.2 废钢	26
2.1.3 生铁	28
2.1.4 直接还原铁	29
2.1.5 碳化铁	30
2.1.6 铁合金	30

2.2 造渣材料	34
2.2.1 石灰	34
2.2.2 萤石	37
2.2.3 白云石	37
2.2.4 合成造渣剂	37
2.2.5 菱镁矿	38
2.2.6 火砖块	38
2.3 氧化剂、冷却剂和增碳剂	38
2.3.1 氧化剂	38
2.3.2 冷却剂	39
2.3.3 增碳剂	39
2.4 铁水预处理	39
2.4.1 铁水预脱硫工艺	39
2.4.2 铁水预脱硅工艺	48
2.4.3 铁水预脱磷工艺	51
2.4.4 铁水预处理提钒	55
2.4.5 铁水预处理提铌	57
2.5 合理钢铁料结构	57
2.5.1 转炉钢铁料结构	57
2.5.2 电炉钢铁料结构	57
思考题	58
3 气体射流及其与熔池的相互作用	59
3.1 气体射流的状态与特征	59
3.1.1 顶吹供氧的射流	59
3.1.2 底吹供气的射流	64
3.2 气体射流与熔池之间的相互作用	66
3.2.1 顶吹氧射流与熔池的相互作用	66
3.2.2 底吹气体对熔池的作用	73
思考题	77
4 转炉炼钢方法及其冶金特点	78
4.1 氧气顶吹转炉炼钢法	79
4.1.1 吹炼过程操作工序	79
4.1.2 转炉吹炼过程中金属成分的变化规律	80
4.1.3 熔渣成分的变化规律	86
4.1.4 熔池温度的变化规律	87
4.1.5 氧气顶吹转炉炼钢法的特点	88
4.2 氧气底吹转炉炼钢法	89
4.2.1 氧气底吹转炉设备	90
4.2.2 熔池反应的基本特点	91

4.2.3 “底吹转炉”与“顶吹转炉”的比较	94
4.3 氧气顶底复吹转炉炼钢法	94
4.3.1 顶底复吹转炉炼钢工艺类型	95
4.3.2 复吹转炉的底吹气体和供气元件	95
4.3.3 复吹转炉内的冶金反应	105
4.3.4 冶金特点	109
思考题	110
5 转炉炼钢冶炼工艺	111
5.1 装入制度	111
5.1.1 装入量的确定	111
5.1.2 装入制度	112
5.1.3 装料次序	112
5.2 供气制度	112
5.2.1 供氧制度	112
5.2.2 复合吹炼的底部供气	119
5.3 造渣制度	123
5.3.1 炉渣的形成	123
5.3.2 造渣方法	130
5.3.3 白云石造渣	131
5.3.4 渣料加入量确定	132
5.3.5 渣料加入时间	133
5.3.6 吹损与喷溅	133
5.4 温度控制	135
5.4.1 出钢温度的确定	136
5.4.2 热量来源和热量消耗	137
5.4.3 冷却剂的种类及其冷却效应	138
5.4.4 温度控制	139
5.5 终点控制和出钢	142
5.5.1 终点的标志	142
5.5.2 终点经验控制与判断	143
5.5.3 自动控制	147
5.5.4 出钢	159
5.6 脱氧及合金化制度	162
5.6.1 不同钢种的脱氧	162
5.6.2 脱氧方法	164
5.6.3 合金的加入原则	165
5.6.4 脱氧操作	166
5.6.5 合金加入量的确定	166
5.6.6 钢的微合金化	168
5.7 复吹转炉少渣冶炼与强化冶炼	177

5.7.1 复吹转炉少渣冶炼	177
5.7.2 复吹转炉强化冶炼工艺技术	178
思考题	180
6 转炉炉衬与长寿技术	181
6.1 转炉炉衬	181
6.1.1 转炉内衬用砖	181
6.1.2 转炉出钢口用砖	182
6.1.3 复吹转炉底部供气用砖	182
6.1.4 对炉衬砖的砌筑要求	183
6.2 炉衬寿命	183
6.2.1 炉衬损坏的原因	183
6.2.2 炉衬砖的蚀损机理	183
6.2.3 提高转炉炉龄的措施	184
6.3 溅渣护炉技术	186
6.3.1 溅渣护炉的机理	187
6.3.2 溅渣层的蚀损机理	189
6.3.3 溅渣护炉工艺	191
6.4 转炉停炉与开新炉	198
6.4.1 转炉停炉操作	198
6.4.2 开新炉前的准备工作	198
6.4.3 炉衬的烘烤	199
6.4.4 开新炉操作	200
思考题	201
7 电弧炉炼钢设备	202
7.1 电弧炉的机械设备	202
7.1.1 电弧炉炉体装置	202
7.1.2 电炉倾动机构	205
7.1.3 电极升降机构	206
7.1.4 炉顶装料系统	207
7.2 电弧炉的电气设备	208
7.2.1 电弧炉的主电路	208
7.2.2 电弧炉电控设备	219
7.2.3 电弧炉电气特性与供电优化	221
思考题	225
8 电弧炉炉衬及维护	226
8.1 电弧炉炉衬结构与砌筑	226
8.1.1 炉底的结构与砌筑	226
8.1.2 炉壁的结构与砌筑	227

8.1.3 炉盖的结构与砌筑	227
8.2 水冷炉衬	227
8.2.1 水冷挂渣炉壁	228
8.2.2 水冷炉盖	230
8.3 炉衬的维护	231
8.3.1 影响炉衬寿命的主要因素	231
8.3.2 炉衬的正常维护	232
8.4 烘炉与补炉	233
8.4.1 烘炉	233
8.4.2 补炉	235
思考题	237
9 电弧炉炼钢冶炼工艺	238
9.1 电弧炉炼钢概述	238
9.1.1 电弧炉炼钢特点	238
9.1.2 电弧炉炼钢的发展	239
9.2 电弧炉冶炼方法	240
9.2.1 氧化法	240
9.2.2 返回吹氧法	242
9.2.3 不氧化法	242
9.3 传统电弧炉炼钢冶炼工艺	243
9.3.1 装料	243
9.3.2 熔化期	245
9.3.3 氧化期	250
9.3.4 还原期	261
9.4 现代电弧炉炼钢冶炼工艺	273
9.4.1 现代电弧炉炼钢工艺及其流程	273
9.4.2 强化冶炼技术概述	273
9.4.3 废钢预热	275
9.4.4 超高功率电弧炉	279
9.4.5 直流电弧炉	294
9.4.6 新型电弧炉	304
思考题	307
10 特种冶金	308
10.1 真空感应熔炼法	308
10.1.1 真空感应炉	308
10.1.2 熔炼操作	308
10.1.3 熔炼特点	310
10.2 电渣重熔法	310
10.2.1 设备组成	311

10.2.2	冶金特点	312
10.2.3	工艺过程	313
10.2.4	优质大钢锭制备	317
10.2.5	冶金质量	318
10.3	真空电弧重熔法	318
10.3.1	设备组成	318
10.3.2	熔炼过程	319
10.4	电子束熔炼法	320
10.4.1	工作原理	320
10.4.2	设备组成	320
10.4.3	熔炼工艺	321
10.5	等离子弧熔炼法	321
10.5.1	等离子弧和等离子枪	321
10.5.2	等离子熔炼炉	322
	思考题	324
11	炼钢二次资源的综合利用	325
11.1	绿色制造的主要概念	325
11.2	炼钢生产过程的排放与综合利用	326
11.2.1	烟气净化及回收利用	326
11.2.2	钢渣处理及利用	338
11.2.3	污水处理及利用	343
	思考题	348
	参考文献	349

1 概 述

钢和生铁的区别可从表 1-1 中看出。由于钢具有很好的物理化学性能与力学性能，可以进行拉、压、轧、冲、拔等深加工，因此钢比生铁的用途广泛。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% 的炼钢生铁要进一步冶炼成钢，以满足国民经济各行业的需要。

表 1-1 钢和生铁的区别

名 称	含碳量/%	熔点/℃	特 性
生 铁	2.0~4.5	1100~1200	脆而硬，无韧性，不能锻、轧，铸造性能好
钢	<2.0 (工业上实用的钢中一般 $w[C] < 1.4\%$)	1450~1500	强度高，塑性好，韧性大，可以锻、压、铸

1.1 炼钢的基本任务

所谓炼钢，就是将废钢、铁水等炼成具有所要求化学成分的钢，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℃，Fe 与 FeS 组成的共晶体的熔点只有 985℃。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%~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的 Fe-FeS 共晶体分布于晶界处，在 1150~1200℃ 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”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℃），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 和少量的 FeS。纯 MnS 的熔点为 1610℃，FeS-MnS 共晶（FeS 占 93.5%）的熔点为 1164℃，它们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 $w[Mn]$ 控制在 0.4%~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机械性能和深冲压性能。在实际生产中，还将 $w[Mn]/w[S]$ 作为一个指标进行控制。钢中的 $w[Mn]/w[S]$ 对钢的热塑性影响很大，从低碳钢高温下的拉伸实验结果发现，提高 $w[Mn]/w[S]$ 可以提高钢的热延展性。一般 $w[Mn]/w[S] \geq 7$ 时（在实际钢中锰硫含量比为 8~16 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。

不同钢种对硫含量有着严格的规定：非合金钢中普通质量级钢要求 $w[S] \leq 0.045\%$ ，优质级钢 $w[S] \leq 0.035\%$ ，特殊质量级钢 $w[S] \leq 0.025\%$ ，超低硫钢 $w[S] \leq 0.001\%$ 。

易切削钢常以 $[S]$ 作为产生硫化物的介质，在切削过程中，含硫化物的钢车削时易断，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，要求含硫量为 $0.08\% \sim 0.20\%$ 。

1.1.1.2 脱磷

通常认为，磷在钢中以 $[Fe_3P]$ 或 $[Fe_2P]$ 形式存在，为方便起见，均用 $[P]$ 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，可略微增加钢的强度。 $[P]$ 的突出危害是产生“冷脆”，在低温下， $w[P]$ 越高，冲击性能（冲击功 A_K ，单位为 J）降低就越大。磷是降低钢液表面张力的元素，易析集结晶于边界处，随着其含量的增加，表面张力 σ 值降低很多，从而降低了钢的抗热裂纹性能。

为减少 $[P]$ 的危害，提高钢的品质，必须尽量降低磷含量。可采用炉内氧化法脱磷或炉外喷粉还原法脱磷。为取得良好的效果，应先用铁水预处理脱硫、脱磷后再进行冶炼。钢中 $[C]$ 有促进磷降低冲击韧性的作用，所以在冶炼高碳钢时，应将磷控制得更低些。

钢中的 $[P]$ 含量允许范围：非合金钢中普通质量级钢 $w[P] \leq 0.045\%$ ，优质级钢 $w[P] \leq 0.035\%$ ，特殊质量级钢 $w[P] \leq 0.025\%$ 。普通低磷钢 $w[P] \leq 0.010\%$ ，超低磷钢 $w[P] \leq 0.005\%$ ，极低磷钢 $w[P] \leq 0.002\%$ 。但有些钢种如炮弹钢、耐腐蚀钢等，则需要加入磷元素。

1.1.1.3 脱氧

炼钢是氧化还原过程。在吹炼过程中，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，将影响其后的浇注操作。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，降低钢的塑性和冲击韧性，使钢变脆。为此，要将钢水按不同钢种要求脱氧。

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）；在钢锭坯、材中取样时是全氧样。

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。在钢的各类标准中，对氢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。

白点是钢的致命缺陷，标准中规定有白点的钢材不准交货。在 100mm 的坯上取样打断口样，在纵断口上呈圆形或椭圆形的白色亮点（ $\phi=1 \sim 10\text{mm}$ 不等）称为白点，实为交错的细小裂纹。它产生的主要原因是钢中 $[H]$ 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，相变应力也最大。生产铁素体钢、奥氏体钢等无相变钢时不易产生白点。在生产实践中发现，高速钢（有相变）也不易产生白点，因为它需进行多火锻造，加热过程中氢扩散到大气中，致使氢含量降低。产生白点的另一重要原因是浇注后钢锭凝固过程中产生了偏析，使局部地区或中心地区氢含量很高，降低了钢的塑性和韧性。

脱氢量和加热温度有关。但在没有脱气设备进行真空处理的情况下，对一些断面比较大的白点敏感性强的钢件，可用扩散退火的方法处理，但这种脱氢方法是不经济的。

钢坯中氢气向外扩散的数量和钢中成分有关，与氢亲和力大的 Ti、Zr 等元素含量增高时，析出的氢就少。

因此，冶炼易产生白点等缺陷的钢种时，要特别注意原材料（尤其是石灰）的干燥清洁，冶炼时间要短，要求严格的钢种应充分发挥炉内脱碳的去气作用，再经炉外吹 Ar 或真空处理，甚至采用真空熔炼的方法，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。当钢材从高温较快冷却时，过剩的氮由于来不及析出便溶于铁素体中。随后在 200~250℃ 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。这种现象称之为蓝脆。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）。

钢中氮能使强度略微增加，可用氮代替镍生产耐热钢。高质量的高铬钢（如 27%Cr）中 $w[N+C] < 0.02\%$ 时，才能在常温下具有高的韧性，利于冷加工。因此，降低钢中氮含量是提高钢性能的主要途径之一。

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，使氮容易析集在晶界，降低了钢的抗热裂纹的性能。

降低钢中 $[N]$ 的方法靠脱碳沸腾，吹氩搅拌去气，真空下去气。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 $[N]$ 可用 Ti、Nb、V、Al 结合生成氮化物，以消除影响。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”的应用，这种技术已被人们接受，由此开发了许多含氮钢种，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。

通过铁水预处理和炼钢过程控制，再结合炉外精炼，可使钢的洁净度达到较高的水平。按钢材使用的具体要求，采用不同洁净度的钢质水平，如 D 级高强度造船钢板，一般质量水平就可安全使用，X70 级以下的管线用钢要求洁净钢水平，而汽车用 IF 钢板则应达到超洁净钢的水平（见表 1-2）。

表 1-2 现代钢的洁净度控制水平

水 平	$w[S]/\%$	$w[P]/\%$	$w[N]/10^{-6}$	$w[O]/10^{-6}$	$w[H]/10^{-6}$	$\Sigma/10^{-6}$
一般质量水平(通用型)	≤ 0.005	≤ 0.010	60	40	2	≤ 250
洁净钢水平(经济型)	≤ 0.002	≤ 0.005	40	10	1	≤ 120
超洁净钢水平(超级型)	≤ 0.0005	≤ 0.001	20	5	0.2	≤ 50

1.1.1.5 控制残余有害元素

Cu、Sn、As、Sb 等残余有害元素对钢的质量和性能所造成的危害主要有：恶化钢坯及钢材的表面质量，增加热脆倾向；使低合金钢发生回火脆性；降低连铸坯的热塑性，在含氢气中引起应力腐蚀；严重降低耐热钢持久寿命及引起热应力腐蚀；严重恶化 IF 钢深冲性能等。

国内外一些钢厂对钢中残存有害元素含量的限制“标准”见表 1-3。

表 1-3 钢中残存元素的实际含量和允许含量 (w/%)

元 素	“工业纯”钢实际含量	“高纯”钢实际含量	允 许 含 量	
			一般用途钢	深冲和特殊用途钢
Cu	0.08~0.21	0.018	0.250	0.100
Sn	0.010~0.021	0.001	0.050	0.015
Sb	0.002~0.004	0.001		0.005
As	0.010~0.033	0.002	0.045	0.010
Pb			0.0014~0.0021	
Bi			0.0001~0.00015	
Ni	<0.06			0.100

现代化高性能新钢种对钢中有害元素的控制已不只限于 S、P、O、H、N，还必须考虑 Ni、Cu、Pb、Sn、As 等残余有害元素的影响。首先要针对其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。

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、SiO₂、Al₂O₃、Cr₂O₃ 等简单的氧化物，FeO-Fe₂O₃、FeO-Al₂O₃、MgO-Al₂O₃ 等尖晶石类和各种钙铝的复杂氧化物，以及 2FeO-SiO₂、2MnO-SiO₂、3MnO-Al₂O₃-2SiO₂ 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 FeS、MnS 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 SiO₂ 含量超过 70% 的硅酸盐、CaS、钙的铝硅酸盐等。

国际标准化组织 (ISO)、美国材料试验协会 (ASTM) 和我国国家标准 GB 10561—89 将

高倍金相夹杂物分为4类,即A类:硫化物类(如MnS);B类:氧化铝类(包括刚玉、尖晶石、 Cr_2O_3);C类:硅酸盐类(低熔点硅酸盐);D类:球状(或点状)氧化物、硫化钙、铝酸钙、石英、硅酸铝等。标准评级图谱的图片直径80mm,相当于被检金相试样直径0.8mm的视场放大100倍后的尺寸。A、B、C和D类夹杂物按其厚度或直径不同又分为细系和粗系两个系列,每个系列按夹杂物沿钢材轧制方向的长度分成5个级别,JK法分为1~5级,ASTM法分为0.5~2.5级,后者用于评定高纯度钢。

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 $w(\text{T}[\text{O}])$ 来表示钢的洁净度,也就是钢中夹杂物水平。钢中 $w(\text{T}[\text{O}])$ 越低,则钢就越“干净”。川崎Mizushima把中间包 $w(\text{T}[\text{O}])$ 作为钢水洁净度标准,生产试验表明:中间包钢水总氧含量 $w(\text{T}[\text{O}]) < 0.003\%$,冷轧薄板不检查,用户接受; $w(\text{T}[\text{O}]) = 0.003\% \sim 0.0055\%$,冷轧薄板需检查; $w(\text{T}[\text{O}]) > 0.0055\%$,冷轧薄板降级使用。产品质量缺陷不仅与钢中总氧 $w(\text{T}[\text{O}])$ 有关,还与夹杂物种类、尺寸、形态和分布有关。

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。

A 改变夹杂物类别

(1) 钙处理

1) 连铸用铝脱氧的镇静钢,生成高熔点的 Al_2O_3 (约2020℃)夹杂物易粘结在中间包的水口上,产生堵塞。通过向钢中喷吹适量的Si-Ca粉剂或喂入适量的Si-Ca线,产生液态脱氧产物($12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$,熔点1455℃),可避免水口结瘤。

2) 热加工后的带状硫化物(MnS)使横向冷弯和横向冲击性能显著降低,用钙处理后硫化物(CaS)呈球形(MnS部分或全部改性成CaS),提高了横向性能。

(2) 稀土处理

1) 稀土处理可改变夹杂物的变形能力。如钢中的 Al_2O_3 (高硬度)对弹簧钢疲劳寿命有不良影响,加入适量的稀土元素时(喂稀土线),转变成硬度较低的稀土铝酸盐(稀土硅铝酸盐 $\text{RE}(\text{Al}, \text{Si})_{11}\text{O}_{18}$ 、 $\text{RE}(\text{Al}, \text{Si})\text{O}_3$ 具有较好的变形能力),可提高疲劳寿命。

2) 稀土处理还可控制硫化物的形态。在钢中加入适量的稀土,能使氧化物、硫化物夹杂转变成细小分散的球状夹杂,热加工时也不会变形,从而消除了MnS等夹杂的危害性。

(3) 低碳钢中生成的AlN可使奥氏体高温延性显著降低,加Ti时可生成TiN,消除AlN的影响。

B 改变夹杂物颗粒尺寸和分布

(1) 大而集中的夹杂物降低钢的强度,当在轧锻后夹杂物小到一定尺寸且分布均匀时,就能改善性能。

(2) 改变钢锭和钢坯的冷却速度,在同样的 $[\text{O}]$ 、 $[\text{S}]$ 含量下,快冷时夹杂物的颗粒小,且分布均匀,对性能影响不大;反之偏析加大,夹杂物粗大,对性能有更大的危害。

从上述情况看,研究改变钢中夹杂物的数量、组成、尺寸大小、分布状态是提高钢质、改善钢的性能的主要方法之一。

C 氧化物冶金的概念

人们已经做了大量的工作来开发有效的方法与技术(如二次精炼等)以生产纯净钢,但过度地追求钢的纯净度以生产极低夹杂物含量的钢是困难的和不经济的。事实上,夹杂物不可能从钢液中完全去除,少量的不可避免的残余夹杂物仍会显著影响炼钢工艺与钢的使用性能。但

是, 非金属夹杂物有二重性, 在一定条件下, 它也可以对钢产生积极的影响, 如阻止晶粒长大, 提高钢的强度等。

氧化物冶金技术是 20 世纪 90 年代以来受到国际冶金材料学术界和产业界广为关注的前沿技术。这一技术在改善高强度低合金钢种 (HSLA) 的焊接热影响区 (HAZ) 韧性、推动超细晶粒钢种开发上有非常重要的意义, 可望得到大规模产业化应用。

低合金高强度钢是一种广泛应用的结构钢, 在大多数情况下要求优良的焊接性。其焊接性主要包括两个方面, 一是裂纹敏感性, 即要求钢材具有足够的韧性; 二是焊接热影响区的力学性能。在焊接时, 焊缝金属要发生局部重熔, 焊后冷却过程中熔合线附近晶粒将粗化形成粗晶热影响区 (CGHAZ), 粗晶组织导致局部强度和韧性降低。因此, HAZ 成为钢铁构件的脆弱区域。近半个世纪以来, 通过微合金化、纯净化冶炼和控轧控冷等技术的应用, 低合金高强度钢种母材和 HAZ 的强度和韧性均得到很大的提高。特别是采用 Ti 微合金化使钢中形成了 TiN 粒子, 可以有效抑制焊接过程 HAZ 奥氏体晶粒的长大, HAZ 的韧性降低幅度大大减小。这项被称为 TiN 冶金的技术目前已经在低合金高强度钢中广泛应用。但近年来, 随着管线、桥梁、海上采油平台、高层建筑钢结构、压力容器越来越多地采用大规格、高强度钢板, 这要求钢板可以采用大幅度提高焊接效率的单面埋弧焊、气电焊或电渣焊等大线能量焊接技术进行焊接, 焊接线能量输入从原来较低的手弧焊 ($\leq 25\text{kJ/cm}$)、自动焊 ($\leq 35\text{kJ/cm}$) 提高到 $50\sim 150\text{kJ/cm}$ 甚至更高, 峰值温度将达到甚至超过 1400°C , 使 CGHAZ 晶粒粗化倾向更加明显, 即使 TiN 粒子本身, 在 1200°C 以上的高温下, 也将因发生 Ostwald 熟化过程而长大、重熔而减弱和失去对奥氏体晶粒的抑制作用。这样就给传统的低合金高强度钢带来了新的课题, 即焊接热影响区 (HAZ) 的性能 (强度、韧性) 恶化, 易产生焊接冷裂纹等问题。众所周知, 大型桥梁、管线、压力容器等工作负荷 (压力、承重及工作条件) 越来越大, 对焊接结构钢的止裂性能的要求也愈来愈高, 除了要考虑钢的韧—脆性转变温度外, 提高延性断裂的止裂性能显得更为重要, 因此进一步改善高强度低合金钢材 HAZ 韧性非常迫切。

1990 年, 在日本名古屋召开的国际钢铁大会上, 新日铁的研究人员首次提出了氧化物冶金技术的概念, 其基本原理是在钢中加入细小弥散的 Ti_2O_3 夹杂物。 Ti_2O_3 比 TiN 稳定。这些 Ti_2O_3 夹杂物在焊接后的冷却过程中 ($660\sim 610^\circ\text{C}$) 起到非均匀形核质点的作用, 在奥氏体晶粒内部诱发针状铁素体组织 (IGF 或者 AF), 即原始奥氏体晶粒被分割成多个针状铁素体晶粒, 从而起到细化 HAZ 组织的效果。氧化物冶金技术的关键是在凝固前沿通过精确控制钢水冶炼和凝固条件对夹杂物种类、大小和形态进行控制。

氧化物冶金 (Oxide Metallurgy) 作为一种细化焊接热影响区晶粒的新技术, 对于高强度、大线能量焊接钢种有非常重要的意义。自从新日铁提出这一概念以来, 各主要产钢国均致力于其机理和应用研究。制约氧化物冶金技术应用的主要因素是其工艺复杂, 由于这一技术由新日铁等少数厂家所垄断, 在目前对于晶内针状铁素体的形成机理尚难达成一致的情况下, 在冶炼过程对有利夹杂物的形态控制要求也因此难以确定, 再加上夹杂物控制技术长久以来是钢铁冶炼中的难点问题, 有关氧化物冶金技术的机理及其工艺开发进展比较缓慢。

随着我国新一代钢铁材料在生产中的推广, 对细晶粒低合金高强度钢焊接过程中焊接热影响区晶粒长大行为及其对性能影响的研究广为开展, 特别是在晶内铁素体形成机理方面的研究比较深入, 但从化学冶金角度开展氧化物冶金技术的研究基本空白。为尽快推动这一技术实现工业应用, 需要在基本掌握晶内针状铁素体形成规律基础上进行关键工艺研究开发, 特别是进行复杂的热力学分析及精确的冶炼过程和凝固过程控制。