

研究生案例教学用书

YANJIUSHENG ANLI JIAOXUE YONGSHU

炼钢过程典型案例分析

朱 荣 张延玲 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

用书

炼钢过程典型案例分析

朱 荣 张延玲 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2017

内 容 提 要

本书为研究生案例教学用书之一。全书分为上、下两篇。上篇介绍当今钢铁冶金行业的主要炼钢工艺技术,包括:转炉高效冶炼、电炉炼钢节能技术、钢的炉外精炼与炼钢除尘技术。下篇介绍特殊钢冶炼,围绕不锈钢、管线钢、轴承钢和汽车板四种钢种,对其性能和用途、冶炼原理及技术及冶炼工艺进行了详细介绍。本书注重实践与经典案例相结合,既具有一定的理论性,又有具有较强的实用性和指导性。

本书可作为高等院校冶金工程相关专业的全日制研究生及工程硕士的教学用书,也可作为钢铁企业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

炼钢过程典型案例分析/朱荣,张延玲编著. —北京:
冶金工业出版社, 2017. 7
研究生案例教学用书
ISBN 978-7-5024-7499-7

I. ①炼… II. ①朱… ②张… III. ①炼钢学—
研究生—教材 IV. ①TF7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 098927 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 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 常国平 美术编辑 彭子赫 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7499-7

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2017 年 7 月第 1 版, 2017 年 7 月第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16; 10.25 印张; 247 千字; 155 页

43.00 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

研究生教育注重理论与实践并重，当今冶金学科教育的基础理论知识体系相对完善，本书旨在进一步拓宽在校研究生对当今冶金行业的具体冶炼流程及工艺的认识，提高学生将来在相关岗位上的实践能力，加深在校研究生对冶金学科理论知识的深入理解。

本书分上、下两篇。上篇为炼钢工艺技术典型案例分析，由朱荣教授编写，介绍了钢铁行业关注度较高的转炉高效冶炼、电炉炼钢节能技术、钢的炉外精炼与炼钢除尘技术四个方面，并分析比较了新工艺技术在各钢铁企业的应用效果。下篇为典型钢种冶炼案例分析，由张延玲教授编写，内容涵盖了特殊钢领域极具代表性的不锈钢、管线钢、轴承钢和汽车板四种钢种，并对这四种钢种的各自特点及冶炼工艺进行了详细介绍。本书以现有钢铁企业实际生产应用为基础，对最新技术的应用状况和使用效果进行了分析比较。本书不仅可以作为在校研究生教材，还可以作为钢铁企业工程技术人员的参考资料，供技术交流使用。

参与本书编写及校稿的人员还有刘洋、李文双、庞宗旭、安卓卿、王云、郭文明、田冬东、姚柳洁、刘崇等，在此表示衷心的感谢！

由于作者水平所限，书中如有疏漏、不妥之处，敬请读者批评、指正。

作 者

2017年5月

目 录

上篇 炼钢工艺技术典型案例分析

1 转炉高效化冶炼技术	3
1.1 转炉炼钢技术进展	3
1.2 转炉强化供氧技术	4
1.2.1 氧枪喷头的设计	5
1.2.2 氧气射流研究	7
1.2.3 转炉强化供氧技术典型案例分析	8
1.3 转炉高效脱磷技术	10
1.3.1 转炉脱磷原理	10
1.3.2 转炉双联工艺	13
1.3.3 转炉高效脱磷技术典型案例分析	15
参考文献	17
2 电炉炼钢节能技术	19
2.1 电弧炉炼钢节能的技术方向	19
2.1.1 电弧炉炼钢的发展	19
2.1.2 电弧炉炼钢流程能量状况	20
2.1.3 电弧炉炼钢流程节能技术	21
2.2 电弧炉供电技术	24
2.2.1 电气运行技术发展	25
2.2.2 现代炼钢电弧炉电气特性	26
2.2.3 现代电弧炉的供电制度	28
2.2.4 电弧炉优化供电研究实例	30
2.3 电弧炉供氧技术及实例	35
2.3.1 炉壁氧枪	35
2.3.2 炉门氧枪	36
2.3.3 EBT 氧枪	38
2.3.4 集束射流氧枪	39
2.4 电炉炼钢多尺度节能的技术内容	40
2.4.1 多尺度方法	40
2.4.2 冶金过程的多尺度结构分析	41

2.4.3 炼钢过程多尺度研究情况	42
参考文献	44
3 炉外精炼技术	49
3.1 脱硫工艺及案例	49
3.1.1 管线钢 LF 脱硫	49
3.1.2 SPHC 钢 LF 脱硫	52
3.2 脱氧工艺及案例	54
3.2.1 真空精炼碳脱氧	54
3.2.2 CaC_2 精炼脱氧工艺	56
3.2.3 硅钙钡合金的脱氧工艺	57
3.2.4 重轨钢非铝脱氧工艺	58
3.3 夹杂物控制案例	59
3.3.1 帘线钢夹杂物控制	59
3.3.2 ER70S-6 焊丝钢夹杂物控制技术	61
3.3.3 无取向硅钢夹杂物控制	62
参考文献	64
4 炼钢除尘技术	66
4.1 国内外炼钢除尘技术概况	66
4.1.1 国内外炼钢除尘技术发展	66
4.1.2 转炉炼钢除尘主要设备	67
4.1.3 电炉炼钢除尘主要设备	71
4.2 转炉炼钢除尘典型案例	75
4.2.1 转炉湿法除尘工艺	75
4.2.2 转炉干法除尘工艺	77
4.2.3 转炉半干法除尘工艺	78
4.3 电弧炉炼钢除尘典型案例	80
4.3.1 交、直流型电炉除尘系统	80
4.3.2 炉外预热型电炉除尘系统	80
4.3.3 双炉座型电炉除尘系统	82
4.3.4 竖式电炉除尘系统	82
4.3.5 Consteel 型电炉除尘系统	82
参考文献	84

下篇 典型钢种冶炼案例分析

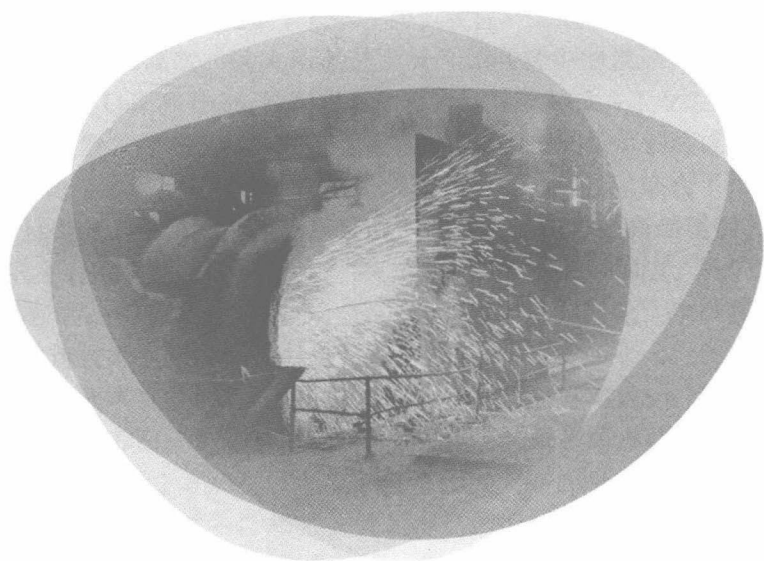
5 不锈钢	89
5.1 不锈钢及其性能	89

5.1.1	不锈钢发展概况	89
5.1.2	不锈钢分类	89
5.1.3	不锈钢特性	91
5.2	不锈钢冶炼的关键技术	95
5.2.1	化学成分的严格控制	95
5.2.2	不锈钢钢液“脱碳保铬”	95
5.2.3	低成本冶炼工艺控制	95
5.2.4	较高的表面质量要求	96
5.3	典型不锈钢冶炼工艺	96
5.3.1	全废钢电炉不锈钢生产流程	97
5.3.2	全铁水转炉不锈钢冶炼流程	99
5.3.3	铁水+废钢不锈钢生产流程	103
	参考文献	106
6	管线钢	108
6.1	管线钢及其性能	108
6.1.1	管线钢发展概述	108
6.1.2	管线钢性能要求	109
6.1.3	管线钢牌号	113
6.2	关键控制技术及原理	114
6.2.1	碳的控制	114
6.2.2	硫的控制	115
6.2.3	磷的控制	116
6.2.4	氧的控制	117
6.2.5	锰的控制	118
6.2.6	铜的控制	119
6.2.7	氢的控制	119
6.2.8	铌、钛、钒、硼等元素的控制	119
6.2.9	夹杂物的控制	120
6.3	典型冶炼工艺	121
6.3.1	铁水预处理	121
6.3.2	转炉顶底复合吹炼	121
6.3.3	炉外精炼	122
6.3.4	连铸	122
6.3.5	控轧控冷	123
6.3.6	采用 LF (CAS、钢包喷粉) 处理法	123
6.3.7	采用 RH 处理法	124
6.3.8	RH 和 LF 双联法	124
6.3.9	电炉钢厂管线钢生产工艺	125

6.3.10 管线钢生产的典型工艺流程.....	125
参考文献.....	126
7 轴承钢	128
7.1 轴承钢的用途及对性能要求	128
7.1.1 轴承钢的纯净度	129
7.1.2 轴承钢的均匀性	130
7.2 关键控制技术及原理	130
7.2.1 钢中氧含量的控制	130
7.2.2 精炼炉渣对轴承钢夹杂物的影响	133
7.2.3 钢液中微量元素 (Ca、Mg) 的控制	135
7.2.4 钢液中氮与钛的控制	135
7.2.5 钢中氢含量的控制	136
7.2.6 钢中硫含量的控制	136
7.2.7 钢中碳化物缺陷的控制	137
7.3 典型冶炼工艺	138
7.3.1 国外轴承钢典型冶炼工艺	138
7.3.2 国内主要轴承钢生产工艺	139
7.3.3 电渣重熔 (ESR) 工艺	139
参考文献.....	140
8 汽车板	141
8.1 汽车板的性能和用途	142
8.1.1 汽车板的性能要求	142
8.1.2 典型钢种及其特点	143
8.1.3 汽车板用钢的牌号	146
8.2 汽车板用钢的冶炼工艺	147
8.2.1 宝钢 IF 钢生产工艺	147
8.2.2 40CrMo 汽车用钢生产工艺实践	150
8.2.3 高品质深冲钢的关键冶金技术	151
参考文献.....	154

上 篇

炼钢工艺技术 典型案例分析



1 转炉高效化冶炼技术

转炉炼钢作为目前最主要的炼钢方法，其技术上的进步对我国炼钢生产的发展有着巨大的推动作用。针对传统的转炉生产工艺存在冶炼周期及设备维护时间较长的问题，本章致力于研究转炉高效冶炼技术，使转炉冶炼周期与连铸周期相匹配，改善各项经济指标，提高生产率。转炉高效冶炼是缩短冶炼时间、加快生产节奏、提高转炉作业率、充分发挥转炉生产能力、提高钢产量的有效手段。本章主要介绍了转炉强化供氧技术和高效脱磷技术。

1.1 转炉炼钢技术进展

1856 年，英国人 H. Bessemer 发明了酸性底吹转炉炼钢法，开启了转炉炼钢的先河，由于贝氏转炉对铁水中硫、磷等有害杂质去除困难，只能在生产高品位矿石的地方实施，目前已不再采用；1878 年，Thomas 发明了碱性底吹转炉炼钢法，以碱性耐火材料砌筑炉衬，加石灰造渣，能够有效地去除铁水中的硫磷等杂质，但存在钢水中氮含量高、钢的加工性能差的缺点；由于制氧技术的限制，氧气炼钢一直难以实现，直至 20 世纪 20 年代进行了富氧鼓风试验，取得了良好的冶金效果，但存在炉底风眼侵蚀严重等问题，进而发展了采用 $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ 或 $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$ 等混合气体进行试验，但效果不理想，此外也进行了侧吹转炉炼钢的试验，为后来转炉炼钢技术的发展奠定了基础；第二次世界大战以后，由于氧气分离技术的进步，可获得大量廉价的氧气，极大地促进了氧气顶吹转炉的发展，直至 1952 年和 1953 年奥地利钢铁公司在 Linz 和 Donawitz 建成了氧气顶吹转炉并投入工业生产，标志着炼钢工艺取得了革命性的进展，此后，世界钢产量迅速增长，氧气转炉炼钢法成为最主要的炼钢法；20 世纪 70 年代，转炉顶底复合吹炼技术兴起与发展，该技术综合了顶吹及底吹转炉炼钢法的优势。这些方法可以高效地生产低硫、低磷及低氮等的高品质钢。LD 法、底吹纯氧转炉法及顶底复合吹氧法目前已成为世界上最主要的转炉炼钢法，转炉炼钢产量占炼钢总产量的 70% 左右。随着技术的进步，转炉已逐步实现大型化，生产控制水平不断提高，高效低成本冶炼技术不断发展^[1~4]。

由于社会对钢材质量及价格的要求日益增高，炼钢技术重点体现在长寿高效、计算机全自动控制及高洁净钢系统生产技术方面。长寿命炉衬技术的发展，特别是溅渣护炉技术的开发与应用，使转炉寿命提高到 1 万~2 万炉次以上，不仅可以大大降低耐火材料的消耗，更重要的是改变传统“三吹二”、“二吹一”模式，大大提高转炉利用率，实现转炉高效化生产。在科学控制炼钢的基础上，成熟应用静态模型、副枪及动态模型，加之吹炼过程防喷溅动态枪位、加料控制以及终点磷、硫预报快速出钢技术，使转炉炼钢实现全过程自动控制，终点碳、温双命中率可稳定保持在 90% 以上，同时能降低终点钢水氧含量，为转炉高效低成本生产打下良好基础。由于提高钢的洁净度可以明显改善钢材性能，因此洁净钢的需求日趋扩大，然而洁净钢不能单纯依靠某一工序的技术改进而获得，因而

“分阶段精炼”的洁净钢系统技术得到迅速发展，形成了新的能大规模廉价生产洁净钢的生产体系，典型的“分阶段精炼”流程为：铁水“三脱”——转炉少渣冶炼——多功能炉外精炼——连铸保护浇铸和中间包冶金^[5]，如图 1-1 所示。

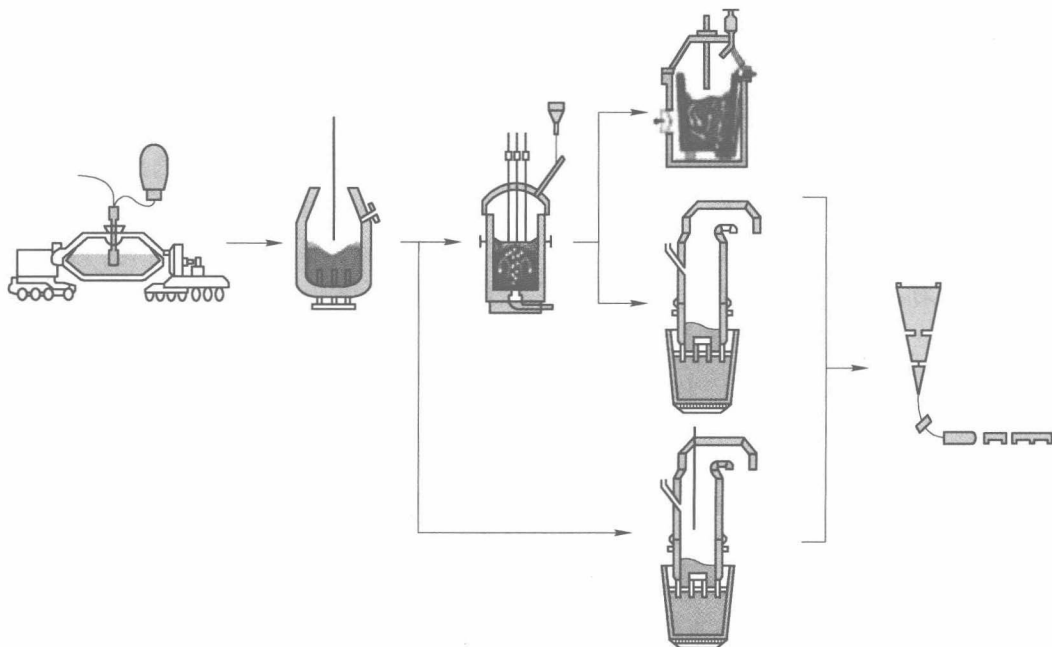


图 1-1 现代转炉炼钢典型工艺流程

1.2 转炉强化供氧技术

缩短转炉熔炼时间需要缩短供氧时间，因此，必须改善供氧强度和操作工艺。同时，要缩短出钢时间，改善挡渣工艺，以实现转炉的高效冶炼。在氧气转炉炼钢过程中，研究射流与熔池的相互作用，对于了解转炉的工作原理及指导生产具有重要的意义。

氧枪是氧气炼钢的供氧主要设备。氧枪性能的优劣直接影响钢产品的产量、质量、品种、原料消耗及成本等主要技术经济指标。而氧枪对吹炼的影响则是通过氧气射流流股与熔池的相互作用来实现的。因此关键在于研究氧气射流的性能特征，即射流的衰减及其分布。随着转炉大型化的发展，氧枪喷头经历了单孔向多孔的发展过程，孔型由直筒型向拉瓦尔型及螺旋型发展。

因为拉瓦尔孔型具有比较高的射流速度，所以氧枪喷头一般都采用拉瓦尔孔型。为了便于制作扩张段，均简化为圆锥形。除通常单孔氧枪，也出现了“突扩”、“旋转”等特殊孔型。为提高炉内二次燃烧水平，开发了双流氧枪，它可分为下列 4 种结构形式：（1）双流道氧枪。氧枪为四层管结构，主氧流和副氧流可以单独控制。（2）双流道双层氧枪。主氧流和副氧流虽然不能单独控制，但因结构简单，具有双流氧枪二次燃烧的优点。（3）分流氧枪。主氧流和副氧流不能单独控制，结构简单，具有双流氧枪二次燃烧的优点。（4）分流双层氧枪。主氧流和副氧流分布于两层平面，但不能单独控制^[6~10]。

1.2.1 氧枪喷头的设计

氧枪由喷头、枪身和尾部三部分组成。喷头常用紫铜材质，可由锻造紫铜经机加工或铸造等方法制成。枪身由无缝钢管做成的三层套管组成。枪尾可以是铸成的，也可以是加工成型的^[11]。尾部结构应该方便输氧管、进水和出水软管同氧枪的连接，保证三层套管之间密封及水流的畅通，以及便于吊装氧枪。设计氧枪的工作主要包括：喷头设计、水冷系统设计、枪身和尾部结构系统设计。其中喷头是氧枪的核心部分，所以喷头的设计是关键。一个好的喷头设计必须解决喷孔孔型、尺寸和个数；必须恰当控制水流和合理选择钢壁厚度，从而使喷头既有良好的氧气射流特性，又有高的耐用性。

喷头起到能量转换器的作用，它将氧气管道中的压力能转化为动能，并通过氧气射流完成对熔池的搅拌作用，与此同时氧气射流的参数主要由喷头参数所决定^[12~15]。典型氧枪喷头示意图如图 1-2 所示。

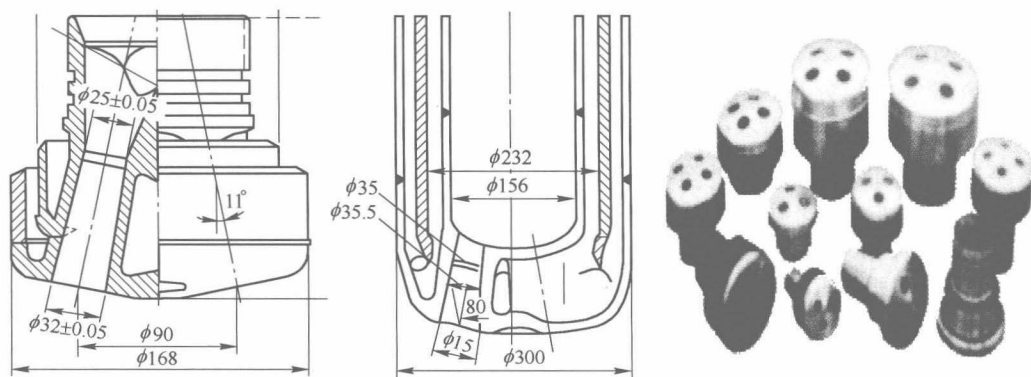


图 1-2 典型氧枪喷头示意图

1.2.1.1 喷头设计的主要要求

(1) 在一定的操作氧压和枪位条件下，为吹炼提供所需的供氧强度，使氧气射流获得较大的动能，以达到合适的穿透深度，对熔池搅拌均匀的同时又不致引起较大的喷溅。为此，要求正确设计工况氧压和喷孔的形状、尺寸，并要求氧气射流沿轴线的衰减应尽可能慢。

(2) 在合适的枪位下，氧气射流在熔池面上要形成合理的反应区，保证熔池反应均匀，对炉衬侵蚀小且均匀。尤其对多孔喷枪，要求各股氧气射流到达熔池面上时不汇合，能形成多个反应区。

(3) 氧枪喷头寿命要长，为此要求喷头的结构合理、简单，氧气射流沿着氧枪轴线不出现负压区和过强的湍流运动。

1.2.1.2 喷头主要参数的计算与确定

(1) 氧气流量，指单位时间内向熔池供氧的数量，其单位是 m^3/min （标态）。它是根据吹炼每吨金属的耗氧量、金属装入量和供氧时间来决定的。

氧气流量是氧枪设计的重要参数。当操作氧压选定后，喷头的喉口面积就取决于流量。氧气流量计算公式为：

$$\text{氧气流量} = \frac{\text{每吨钢耗氧量} \times \text{出钢量}}{\text{吹氧时间}}$$

吹氧时间一般为 12~20min, 小容量转炉取下限。

供氧强度: 指单位时间每吨金属的供氧量, 其单位是 $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ (标态)。

每吨金属所需氧量可以根据铁水成分、废钢比、所炼钢种、渣量、渣中 FeO 含量、矿石或铁皮加入量等已知条件由物料平衡计算得出。标准状态下, 一般每吨金属实际耗氧量为 $50 \sim 60 \text{m}^3$ 。每吨钢耗氧量, 若用低磷铁水约为 $45 \sim 55 \text{m}^3$ 左右, 采用高磷铁水为 $60 \sim 69 \text{m}^3$ 左右, 若用经预处理的铁水, 则可选取低限值。供氧时间是根据经验确定的。它与炉子容量、原料条件、冶炼钢种、造渣制度等因素有关。国内 90 t 转炉采用三孔喷枪, 供氧时间一般为 18~20min, 供氧强度为 $3.0 \sim 4.0 \text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ 。总的来讲, 顶吹氧气转炉炼钢的氧气流量和供氧强度, 主要决定于喷溅情况, 一般控制在基本上不产生喷溅的前提下尽量加大供氧强度来缩短冶炼时间。

(2) 喷头的孔数。除小容量转炉采用单孔喷头外, 现在转炉皆用多孔喷头, 现有 3、4、5 孔等。由于多孔喷头变集中供氧为分散供氧, 增大了氧射流同熔池的冲击面积, 取得了显著的吹炼效果。但是, 与单孔喷头相比, 多孔喷头氧射流衰减较快, 吹炼枪位较低, 从而对喷头的冷却要求更高, 结构更复杂。

(3) 喷头出口处马赫数 (Ma) 与设计工况氧压。设计工况氧压又称理论氧压, 它是指喷头进口处的氧气压力, 它近似等于滞止氧压 p_0 (绝对压力)。因为现场氧气测压点一般在快速切断阀之前, 从此处至喷头前还有压力损失, 测量难度较大, 因此就难以保证设计工况氧压的精确度。目前国内一些小型转炉工况压力为 $0.75 \sim 0.8 \text{MPa}$, 一些大型转炉则为 $0.85 \sim 1.1 \text{MPa}$ [16]。

马赫数 Ma 是喷头设计的又一重要参数。 Ma 值和设计工况氧压 p_0 与出口压力 p 的比值 (p/p_0) 有确定的函数关系, 而 p 值基本不变, 因此 p_0 的选取实质上就是马赫数 Ma 的选取。随着 Ma 值的增大, 喷头出口氧气射流速度 v 要提高。从提高转炉熔池的搅拌力出发, 希望选取更高的 Ma , 然而 p_0 也要相应提高, 当 $Ma > 2$ 以后, 氧气射流出口速度 v 的增加变慢, 而 p_0 提高更快, 这在经济上是不合适的。目前国内外氧枪喷头出口马赫数多选取 2.0 左右, 在总管氧压允许的条件下, 也有选取 2.1~2.3 的。选好 p_0 后一般是将炉役期的最低操作氧压定为设计氧压来进行喷头设计。根据实验数据, 当操作氧压低于设计工况氧压 (负偏离) 10%, 或不超过设计工况氧压 (正偏离) 50% 时, 产生的激波或膨胀波都不严重。一般测压点的压力可以偏离设计工况压力的 20% 左右。

(4) 炉膛压力。喷头出口的环境压力对氧枪喷头来讲是指炉膛压力, 它与喷头射流的出口压力的差异决定了氧气出口后的流动状态, 所以炉膛压力也是喷头设计的重要参数之一。在吹炼的过程中喷头周围的情况是复杂的, 炉膛压力也随之变化, 其影响还需专门研究。另外转炉容量不同, 炉膛压力也稍有差异。根据实测数据, 一般炉膛压力高于当地大气压 $1 \sim 2 \text{kPa}$ 。为了使氧气射流的展开和速度衰减变慢, 一般应选取喷头出口压力等于炉膛压力。

(5) 喷孔夹角和喷孔间距。多孔喷头的喷孔夹角是指喷孔几何中心线和喷头中轴线之间的夹角, 它是多孔喷头设计的重要参数之一。氧气射流沿喷孔向外喷射过程中, 多股射流之间发生相互卷吸而使射流向中心偏移。每股射流在同熔池作用处的最大冲击力点和喷头中轴线之间的距离称为冲击半径, 其大小主要决定于喷孔夹角和枪位, 同时也受马赫数、氧压、喷孔间距的影响。生产实践表明: 冲击半径 $R_{\text{冲}}$ 和熔池的半径 $R_{\text{熔}}$ 之比 (称为循环比 $R_{\text{比}}$) 是对转炉冶炼有重要影响的参数之一, 因为它影响着熔池的循环运动。多孔

喷头要求 $R_{\text{比}} = 0.1 \sim 0.2$ ，中小型转炉 $R_{\text{比}} = 0.1 \sim 0.15$ 。选取 $R_{\text{比}}$ 时还应参考熔池深度与熔池直径的比值大小，该比值大，则 $R_{\text{比}}$ 可小些，反之则 $R_{\text{比}}$ 大些。随着喷头孔数的增加，喷孔夹角应增大，它们之间的关系参考表 1-1。

表 1-1 多孔喷头的孔数与喷孔夹角之间的关系

孔 数	3	4	5	>5
夹角/(°)	9~11	10~13	13~15	15~17

喷孔间距 ($d_{\text{间}}$) 是指喷头出口中心线与喷头中轴线之间的距离，它对射流之间的相互作用也产生很大影响。其值大小常用喷孔分散度 m ($m = d_{\text{间}}/d_{\text{出}}$) 来表示。如果喷孔间距过小，会增大氧气射流之间的吸引程度。从降低喷孔之间的氧气射流汇交趋势的角度考虑，增大喷孔间距同增大喷孔夹角是一致的。因此，喷头设计时原则上应尽可能增大喷孔间距，而不应轻易增大喷孔夹角，但是增大喷孔间距又往往受喷头尺寸的限制。

根据三孔喷头的冷态测定实验表明，在喷头端面，当喷孔分散度 $m = 0.8 \sim 1.0$ 时，不会对氧气射流的速度衰减产生明显的影响。

(6) 喷孔端面形状。对于单孔喷头，其端面呈平面。对于多孔喷头由于每个喷孔与喷头中轴线呈一定夹角，如果整个喷头端面形状是平面，则每个喷孔出口断面将呈斜面形状，斜口超声速喷管射流处的边界条件是不对称的，这时射流流态必然受到边界几何条件的影响，产生射流沿斜口管壁流动的复杂情况。因此，喷头端面应设计成与喷头轴线的垂直平面相交的夹角圆锥面，而其夹角正相当于喷孔夹角，这样喷孔便成为正口拉瓦尔喷管。为了改善锥面受热情况，若喷头中心线处未设喷孔，可用一个垂直于喷头中心线的小平面代替尖锥顶较为合适。

(7) 喷孔的形状。现代转炉顶吹氧枪基本上都用拉瓦尔管来获得超声速，它由收缩段、喉口和扩张段三部分组成。设计一个气动特性良好的超声速喷管需要进行大量的计算，而且喷管内形是一个复杂的曲面，其喉口又是收缩段和扩张段曲面相接的一个面，其长度趋于零，加工比较困难。氧气喷孔的主要作用是将压力能转换为动能，使获得的氧气射流对熔池有较大的冲击能力。因此，要对喷管的设计进行简化，使喷管呈圆锥形，也便于加工制造。实践证明，这样做是可以满足冶炼要求的。圆锥形喷管的收缩段的半锥角可允许达到 30° 左右，收缩段入口处的直径一般希望大于喉口直径的两倍。若半锥角为 30° 时，则收缩段长度约相当于喉口直径的一倍。圆锥形喷管的喉口有一定的长度，其等截面长度应尽量短，一般取为 $2 \sim 10\text{mm}$ 。而且要求收缩段和扩张段与喉口直径成圆滑连接，不要出现棱角。这种喷管加工容易，可保证喉口尺寸精确。圆锥形喷管扩张段的半锥角一般为 $4^\circ \sim 6^\circ$ ，根据喉口直径选定半锥角后便可算出扩张段长度。

1.2.2 氧气射流研究

本节将从自由射流的角度描述了超声速射流结构，然而，转炉炉膛内部是一个复杂的高温多相体系，炉膛内氧气射流特性有别于理论的自由射流。氧气经氧枪喷头喷出，形成氧气射流，经过高温炉气冲击熔池，带动熔池运动，并发生化学反应。

转炉炼钢中通常采用高压氧气从多孔拉瓦尔型喷头喷出到自由空间内（炉膛直径与射流直径相比大得多，可近似认为是自由射流），马赫数在 $1.0 \sim 2.2$ 之间，是超声速湍流

射流。超声速射流结构如图 1-3 所示,可简单划分为三个区域,即势能核心区、超声速区、亚声速区。在势能核心区,各点速度都等于射流出口速度,也称等速段。在射流边界上,由于黏性作用射流与周围介质发生湍流混合,进行能量交换而减速,随着射流向前运动,达到一定距离后,射流中心轴线上的速度恰好等于声速,即马赫数 $Ma=1$ 。在此点以前的区域,包括等速段,构成了射流的超声速区。在超声速区域内,各点速度大于声速,边界上等于声速。超声速区的轴线长度大约是喷嘴出口直径的 6 倍。超声速区以外为亚声速区。

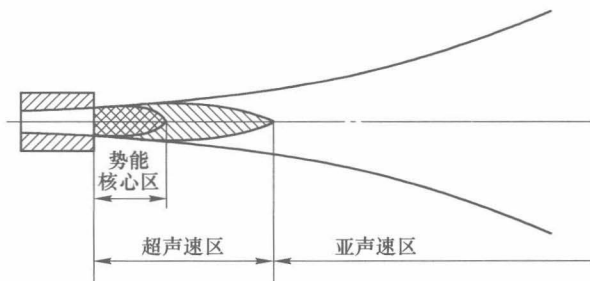


图 1-3 超声速射流结构示意图

射流具有抽引周围介质进入其内部的能力,结果使射流质量增加、宽度加大,射流本身速度逐渐减小,最后消失在周围介质中。对于多孔喷头,每股射流在靠近氧枪喷头轴线的那一侧,都要从喷头轴线的同一区域“抽吸”空气,这样就使多股射流之间的区域内压力下降,从而倾向于使射流发生相互牵引,表现出各股射流中心线向氧枪轴线偏移,偏转的程度与喷孔夹角、喷孔间距、马赫数等有关。

氧气射流经过高温炉气冲击熔池,引起熔池运动,并发生化学反应。氧气射流与金属熔池和炉渣间的相互作用,决定了转炉炼钢冶炼工艺的反应特征,如各元素的氧化速率、氧化放热、金属和炉渣的氧化性、造渣、炉气成分等,也影响到金属和炉渣的喷溅程度,进而影响金属收得率。

转炉吹炼过程中的大部分时间内(除吹炼开始和终了时期外),氧气射流与熔池的相互作用如图 1-4 所示。

图 1-4 在一定程度上反映了顶吹转炉内氧气射流与熔池相互作用的特点和炉内运动的状况。氧气射流冲击在熔池表面上,当被冲击的区域表面所受到的冲击力超过了冲击区以外熔池表面所受到的压力时,就会在熔池表面形成凹坑,氧气射流的冲击和 CO 气泡上浮的联合作用,使金属熔池产生强烈的搅拌。显然,凹坑的形状和深度取决于射流到达熔池表面处的速度分布。图 1-5 所示数值模拟结果显示,氧气射流冲击熔池使渣层与钢液产生运动,氧气射流因熔池影响,速度迅速减小,流动方向发生改变,此过程实现了氧气射流与熔池间的动量、能量传递。同时上层流动速度较高的钢液流受到炉壁和下层速度较低的钢液影响,流速与流向也发生改变。

1.2.3 转炉强化供氧技术典型案例析

转炉高效吹氧技术的关键是选择合理的喷头参数、制定正确的供氧、造渣制度。其技术特点是既缩短转炉吹氧时间提高钢产量,又能适当改善转炉的其他技术经济指标。

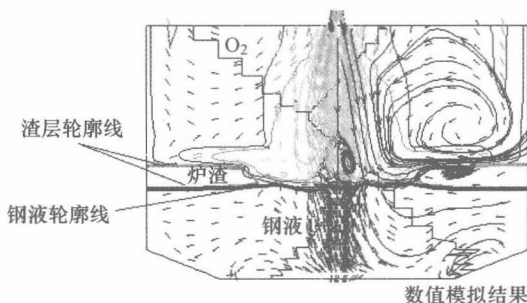
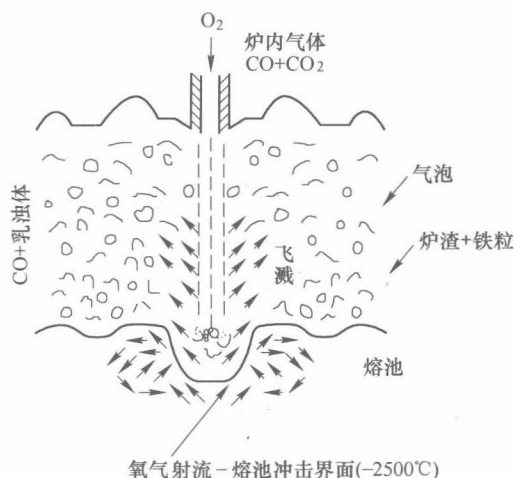


图 1-4 氧气射流与熔池相互作用的示意图 图 1-5 氧气射流与熔池相互作用数值模拟结果示意图

以包钢强化供氧优化设计^[17]为例进行说明,包钢新旧氧枪喷头设计参数对比见表 1-2。

表 1-2 包钢新旧氧枪喷头设计参数对比

孔 型	喉口直径/mm	出口直径/mm	中心夹角/(°)	马赫数	设计流量/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	工作氧压/MPa
5 孔拉瓦尔 (旧)	29.2	37.93	12.5	2.00	18500	0.9
5 孔拉瓦尔 (新)	32.6	43.3	12.5	2.05	22770	0.95

冶炼工艺的调整:

随着氧枪喷头参数的调整,冶炼过程与以前相比发生了变化,炉内炉渣变化较快,所以为适应这种变化,稳定操作,需要进行造渣工艺的调整。炉内炉渣的变化与氧枪的枪位、流量和渣量加入时机等有关。

(1) 氧枪的吹炼枪位。喷枪枪位高度是吹炼工艺的一个重要参数,确定枪位主要考虑两个因素:一是使氧气流股有一定的冲击面积,二是要使流股对金属熔池有一定的冲击深度。合适的喷枪高度对冶炼的过程和结果起到至关重要的作用。结合理论计算枪位,经过一段时间摸索,确定合理的枪位;降低了渣中的 TFe 含量。

(2) 造渣料加入的时间。炼钢能有效地去除磷,是因为其具有良好性能的炉渣。氧枪喷头改造后,有利于总供氧时间的缩短,相应地冶炼后期的时间也缩短,所以全部炉料入炉所经历的总时长相对于之前至少缩短 1min。从拉碳倒渣过程中可以看出,氧枪喷头改造前炉内时常会出现生料(未熔化的石灰)未完全熔化的现象,但将渣料提前加入炉内以后,观察发现转炉内基本不存在生料。如此一来,对于转炉炼钢而言,在相同的炉渣碱度情况下,更有利于铁水脱除磷、硫等元素。

(3) 提高一次拉碳命中率。某厂 120t 转炉冶炼采用一次拉碳法,2012 年一次拉碳出钢率为 74.9%,在装入量提高后,供氧强度提高到 $3.3 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ 以后,转炉冶炼过程火焰变化与以前不一样,转炉一次拉碳出钢率降低到了 67.8%,一次拉碳出钢率降低,直接影响到了转炉的产量。通过加强操作人员的理论知识和操作技能培训,转炉一次拉碳