

氧气转炉炼钢过程理论

〔苏〕B. И. 巴普基兹曼斯基 著

曹兆民 译 汪 显 校

氧气转炉炼钢过程理论

〔苏〕B. И. 巴普基兹曼斯基 著

曹兆民 译 汪显校

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

本书由上海发行所发行 上海新华印刷厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 11.75 字数 260,000

1979年9月第1版 1979年9月第1次印刷

印数 1—6,000

书号: 15119·1987 定价: 1.10 元

目 录

前 言

第一章 氧气顶吹转炉炼钢的现状	1
一、现状及主要工艺特点	1
二、氧气顶吹转炉炼钢法的发展及其前景	5
第二章 气体流股与熔池的相互作用	7
一、供氧制度和氧气的喷射	7
(一) 氧气的喷射	8
(二) 喷枪的计算	13
(三) 氧气流股的气体动力学	18
(四) 多孔喷枪	23
二、顶吹氧流与熔池相互作用的特点及熔池水力学	26
第三章 氧气转炉炼钢过程中热工方面的问题	41
一、熔池热平衡的特点	41
二、熔池温度的变化	51
三、一次反应区的温度	53
四、灰尘和烟尘的析出	59
五、减少烟尘析出的措施	65
第四章 熔池吹氧时氧化过程的机理	71
一、问题的现状	71
二、氧化过程的机理	78
三、传氧方式	84
四、炉渣氧化性及其影响因素	85
第五章 顶吹转炉熔池的状态和搅拌特点	92

一、熔池的搅拌特点和它的宏观结构	92
二、熔池的上涨	106
三、飞溅、飞溅及其防止	122
第六章 熔池中的传质及有关的现象	132
一、熔池中的传质	132
二、氧气转炉炼钢中造渣的规律及改善造渣的途径	143
(一) 炉渣形成的机理和规律以及石灰的溶解	144
(二) 改善造渣过程的途径	161
三、废钢的熔化	167
第七章 各种杂质的行为	185
一、氧气转炉中反应的热力学	185
二、硅和锰的氧化	191
三、硅、锰和磷氧化的动力学基础	199
四、磷的氧化	207
五、碳氧化的特点和熔池沸腾	217
六、脱硫	233
第八章 吹炼过程中炉渣的乳化和钢的沾污	240
一、沾污现象的产生和沾污物的来源	240
(一) 炉渣和夹杂的破碎	241
(二) 炉渣液滴和非金属夹杂物的聚合	245
(三) 气泡的浮选作用	248
二、转炉金属沾污程度的研究	253
第九章 转炉钢中的氮、氢和氧	267
一、钢中氮及氢含量变化的机理和动力学基础	267
二、氧气顶吹转炉钢中的氮和氢	284
(一) 氮	285
(二) 氢	290
三、金属氧化性	293
第十章 氧气顶吹转炉炼钢的工艺潜力	307

一、过程的强化	307
二、氧气顶吹转炉炉衬使用条件的特点和提高炉衬寿命的途径	316
三、转炉合理的炉体尺寸的确定	332
四、底吹氧气转炉的展望	344
文献资料	353

第一章 氧气顶吹转炉炼钢的现状

一、现状及主要工艺特点

辩证法的规律——矛盾的斗争与统一和新陈代谢的法则始终贯穿在炼钢生产方法的发展之中，也贯穿在所有的其他工艺的发展之中。它们使炼钢方法的发展具有了循环的和极值的特性：新的炼钢方法不断出现；老的炼钢方法不断地被取代。在图1上列举了从钢水大生产（1855年，贝塞麦炼钢法）问世后的百年来，全世界各种炼钢方法所占比重的变化情况。

广泛采用工业纯氧是炼钢生产中一场科学技术革命。转炉用氧具有特别重大的意义。如果平炉炼钢中氧主要是作为强化剂的话，则在转炉生产中，吹氧是作为提高金属质量的最有效的手段。

尽管人们知道转炉生产要比平炉优越（投资和生产费用较少、生产率高及操作简便等），然而，在本世纪50年代之前，转炉钢的生产不仅没有增加，反而有所减少（见图1），这主要是由于转炉钢的质量低劣所致。

转炉用氧炼钢能根本地改变它的技术经济指标，改变它

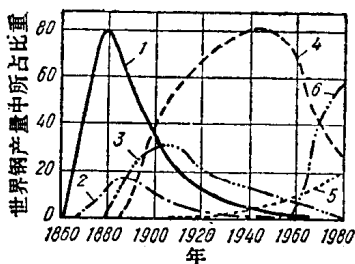


图1 炼钢方法发展的动态
1—贝塞麦法；2—酸性平炉法；
3—托马斯法；4—碱性平炉法；
5—电炉炼钢法；6—氧气顶吹
转炉炼钢法

的工艺灵活性及其发展前景。

许多国家的试验都曾表明，采用垂直水冷喷枪及顶部供氧吹炼铁水是合宜的。高枪令的氧枪的制作成功在氧气转炉炼钢法的产生、使用及从半工业性试验向大生产的推广中起了决定性的作用。

在 1952~1953 年间，在奥地利的林茨和顿纳维茨，第一批氧气转炉车间的投产获得成功。

甚至在此炼钢法刚诞生不久及在工业中进行试生产时，此新过程就显示了它的巨大的优越性，超过了当时所运用的各种炼钢方法，其中也包括平炉炼钢法，从而使氧气顶吹转炉炼钢法能在许多国家里，特别是工业发达的国家里迅速地扎根和蓬勃地发展(见图 1)。

氧气顶吹转炉炼钢法又名 L-D 法(由德文 Linzer Düsenverfahren 而得)。在苏联的文献资料中名为氧气转炉炼钢过程。最初转炉的炉容量为 25~30 吨；而现在已达 300~350 吨。

氧气顶吹转炉与底吹转炉的差别在于它采用了封闭的炉底(图 2)，炉体形状也有所不同。氧气通过水冷喷枪，以 $0.8 \sim 1.5$ 百万牛顿/米² (8~15 大气压) 的氧压输入炉内。喷枪是从炉口插入的(图 3)。氧气纯度通常为 99~99.7%。为了保证金属脱磷和脱硫的条件，转炉采用碱性炉衬。✓

改变枪位和氧压，可在很宽的范围内灵活地调节一次反应区的位置及深度，相应地也调节了渣中氧化铁的含量。在必要时，氧气顶吹转炉炼钢法能保证在吹炼的前期及所有的冶炼期里保持较高的炉渣氧化性——这是它的一个重要特点。这一情况以及反应区的高温作用，熔池上方所形成的火焰(在氧气流股表面上，逸出的一氧化碳气体所发生的完全燃

烧)和通常的冶炼热行等因素均会加速石灰在渣中的溶解,因而能更早、更快地形成活性的铁质碱性炉渣,相应也提早了脱磷和脱硫的开始时间,并使之以较高的速度进行。

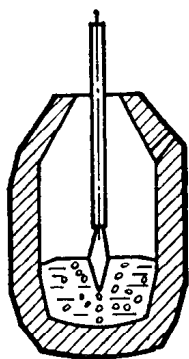


图2 氧气顶吹转炉示意图

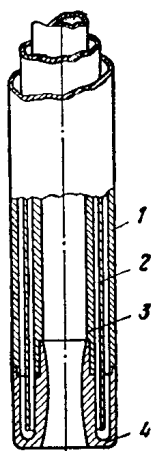


图3 氧气转炉的水冷喷枪

1—外管; 2—分隔管; 3—内管(输氧); 4—喷头

在氧气顶吹转炉炼钢中,可以顺利进行冶炼的铁水成分的范围是很宽的: $0 \sim 1.5\% \text{ Si}$; $0.1 \sim 8.0\% \text{ Mn}$; $0.05 \sim 2.0\% \text{ P}$; $0.0 \sim 0.5\% \text{ V}$ 等。

在国外的和苏联的生产实践中,氧气顶吹转炉主要是使用平炉铁水,即硅和磷含量均有所限制的铁水。对于这种工艺方案将在本书中作详细的论述。在碱性氧气转炉上吹炼平炉铁水时,金属和炉渣中的成分变化情况示于图4和图5。

在氧气转炉炼钢的各个冶炼方案中,按其生产比重计算,高磷铁水的顶吹冶炼占了第二位。这种冶炼方案在西欧国家里得到了较广泛的推广(西德、法国和比利时等),而且,现在正取代着托马斯炼钢法。

除了普通的氧气转炉外,还有一些旋转的转炉(卡尔多炉

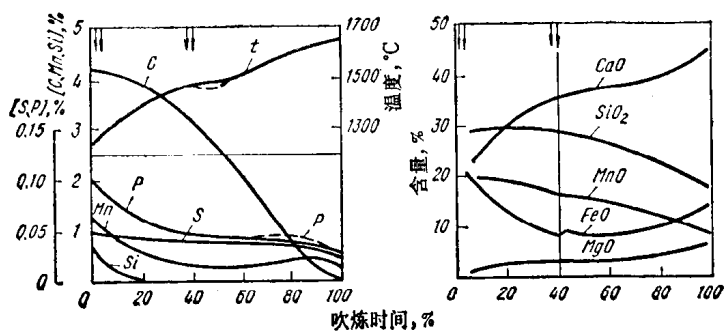


图4 氧气顶吹转炉使用平炉铁水冶炼低碳钢时金属成分和炉渣成分的一般变化情况 (采用矿石作冷却剂; 箭头为加入散状料)

a—金属成分; b—炉渣成分

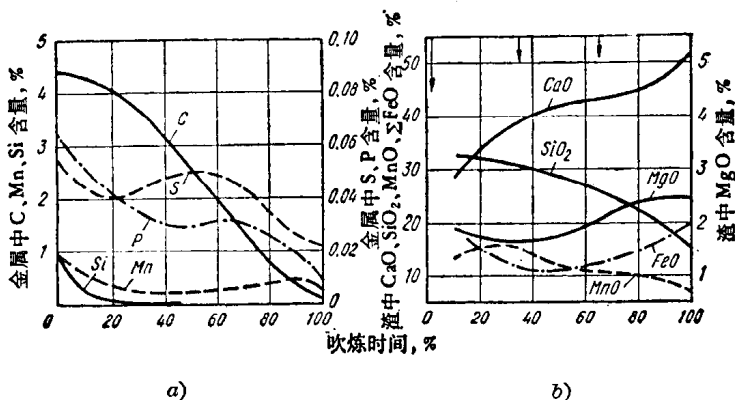


图5 130吨氧气顶吹转炉使用平炉铁水冶炼低碳钢时金属成分和炉渣成分的一般变化情况 (供氧强度为3米³/吨·分; 采用废钢作冷却剂, 用量为240~250公斤/吨钢; 箭头为加入散状料)

a—金属成分; b—炉渣成分

和回转炉)冶炼平炉铁水或高磷铁水,这种炼钢法有时也用于生产半成品(铁水脱硅)。

在国外,近几年来新的底吹氧气转炉的方法也得到了推广(如 Q-BOP、LWS、OBM 等过程)。这种炼钢法的特点是采用特殊的喷枪结构,喷枪由两根管子组成:中心的铜管输送氧气,以吹炼金属;而在内管与外管间的环缝中通入燃料(天然气、重油等)或蒸汽。所使用氧压在 1 百万牛顿/米² (10 个表压)之内。由于燃料(或蒸汽)的吸热分解反应的进行,高温反应区与炉底的距离拉开了,从而保证了较高的炉底寿命。

与现代的托马斯法相比,底吹氧气转炉炼钢工艺的特点如下:有可能多用废钢(铁水重量的 30% 或更多些);较高的金属收得率;吹炼平稳和炉底寿命较高。但是,如果不采用专门的措施来改善造渣,则杂质的氧化顺序几乎是与托马斯炼钢法相同的,且钢中氢含量一般会有所提高。

根据文献资料的数据,平炉车间改建为底吹氧气转炉车间所需的投资要比顶吹少一些。然而,至今氧气顶吹转炉炼钢法仍以较大的生产灵活性为其特色,而优于底吹氧气转炉炼钢法。

二、氧气顶吹转炉炼钢法的发展及其前景

氧气转炉炼钢法的产生和发展促进了近几年来平炉炼钢法的迅速完善,而且平炉炼钢法基本上是朝着接近于氧气转炉的方向进行发展的(强化熔池的吹氧、采用双床平炉等)。同时,各种氧气转炉炼钢法(顶吹的、底吹的和旋转炉的)本身也在不断地完善。在现阶段里,氧气转炉炼钢法的优越性已远远地超过了平炉,这已是无可争辩的事实了。

在估价氧气转炉炼钢法的发展前景时,必须考虑到,目前

已取得的很高的技术经济指标并未达到它的限度，还可以进一步提高。关于此问题，作者将在下文给予详述。此外，还存有很大可能性来提高氧气转炉钢的质量，扩大其品种，增加金属料中的废钢比（至 30% 或更多些），提高它的生产率（50~100%）、金属收得率（1~3%）、炉衬寿命（至 1200 炉或更多些）和降低原材料的消耗系数。为了实现这些可能性，需要采用更大型的转炉（500 吨或更大些），寻找更合理的炉体形状，广泛采用连续铸钢，改进造渣制度，提高炉料的质量，首先是铁水和石灰的质量，提高氧气纯度及耐火材料质量，改进综合砌炉方法，采用特殊的复合助熔剂（高碱度烧结矿、球团等），改善脱氧工艺，采用液态的和发热的铁合金，采用真空处理，采用液态合成渣和特殊混合物的钢水处理等。

十分重要的课题为：改进废钢的准备和加速装料；缩短加料和辅助操作时间，以缩短冶炼周期；提高供氧的分散程度（采用多孔喷枪）来提高供氧强度；掌握低锰铁水的冶炼；采用自动化控制炼钢操作和车间生产；改善除尘系统和排气系统，寻找降低转炉烟尘逸出的合理方法；探讨供氧及旋转转炉的新方法和研究工艺过程的新方案。

提高氧气转炉炉料中废钢比的现成办法如下：用燃气-氧气喷嘴预热废钢；在转炉炉膛中采用特殊结构的喷枪进行一氧化碳的完全燃烧；熔池中加入碳、碳化硅和碳化钙等。应该指出，金属料中废钢比增至 40~45% 和 CO 完全燃烧成 CO_2 等均需在旋转的转炉上才能得到完全解决。

氧气转炉炼钢理论的研究正需要特别注意这些方面的问题，要力求弄清此过程的气体动力学、水力学和物理化学的规律，这样才能实现吹炼进程的科学预报和过程的完善，而不是用根据不足的设想和概念，凭“感觉”去进行摸索。

第二章 气体流股与 熔池的相互作用

一、供氧制度和氧气的喷射

转炉供氧的喷枪一般是由三根钢管按同一圆心互套而成的(见图3)。此图上亦表示了喷枪的供氧和输水系统,中心管道是用于供氧的,而外面两层的管道是用于输水冷却的。喷头(喷枪的顶端)是由紫铜制成,采用螺纹或焊接等方式与钢管连接。

喷枪是沿着转炉轴心线垂直安置的。冷却喷枪的水压一般为6~8大气压,因为只有这样的水压才能保证出水温度不超过40°C。冷却水的总流量与转炉容量和喷枪的尺寸有关。

喷孔前的氧压低于车间输氧管的氧压(1.0~1.5百万牛顿/米²或10~15大气压),约为0.5~0.8百万牛顿/米²(5~8大气压)。供氧强度,即每分钟,每吨钢的氧气流量,波动在2.5~4.0米³/吨·分的范围内。每分钟的氧气流量取决于转炉容量、工艺特点及其他因素。例如,100~130吨转炉的氧气流量平均为300米³/分,在加散状料和喷溅时氧气流量应有所减少。

喷头和出口直径(孔径)的尺寸取决于氧气总流量及喷枪结构。例如,100~130吨转炉在采用单孔喷头时,喷孔的出口直径为80~85毫米,而采用四孔喷头时,它为38~39毫米。

(一) 氧气的喷射

喷头和喷孔的结构对氧气流股特性、炼钢过程及其主要经济指标均有很大的影响。以前, 曾经使用过以下几种单孔喷头: 直筒型的, 收缩型的, 拉瓦尔型的和带螺纹的等。现在, 在生产上已普遍采用拉瓦尔型的多孔喷头。

在喷孔内的气体膨胀过程接近于绝热过程, 即它与周围介质之间几乎不发生热交换。所以, 氧气在喷孔(与大储气罐相接的情况下)出口处的流速可按已知的方程式进行计算:

$$w_0 = \varphi \sqrt{2g \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \text{ 米/秒,} \quad (1)$$

式中 k ——绝热指数, 对氧气和其他双原子气体来说, 它为 1.4;

R ——气体常数;

P_1, T_1 ——分别为喷出气体在容器(即氧气管道)内的压力和绝对温度;

P_2 ——喷头周围的介质压力, 即转炉炉内压力, 一般是接近于 0.1 百万牛顿/米²(1 大气压);

φ ——系数, 它与摩擦的因素及偏离绝热过程的程度有关(一般是接近于 1)。

对于直筒型和收缩型的喷孔来说, 仅在 $P_2/P_1 \geq 0.528$ 时, 上述方程式才可适用(对于双原子气体而言)。因为当 $P_2/P_1 = 0.528$ 时, 已达到了临界(极限)流速, 等于音速:

$$w_{0\text{临界}} = \sqrt{2g \frac{k}{k+1} RT_1} = 3.38 \sqrt{RT_1}。 \quad (2)$$

对于 $T_1^* = 293\text{K}$ 的氧气来说, $w_{\text{临界}}$ 值为 298 米/秒。在采用直筒型和收缩型的喷孔时, 进一步提高氧压 P_1 仅能提高

* 原文误为 T_0 。——译注

出口压力和喷出气体的密度,后者可按式计算:

$$\rho_0 = B \frac{P_1}{RT_1}, \quad (3)$$

式中 B ——常数。

压缩的气体由于在喷孔后的膨胀,会获得进一步的加速。这时流股的最大流速可由下式表示:

$$\begin{aligned} \frac{w_{\max}}{w_{\text{临界}}} &= \frac{1}{k} \left[1 - \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \frac{P_2}{P_1} \right] + 1 \\ &= 1.715 - 1.353 \frac{P_2}{P_1}. \end{aligned} \quad (4)$$

众所周知,在生产中所常用的高压下,在喷孔后的较短的路程上,流股的急剧扩张会产生流股轴心的明显的负压(流股的过分膨胀)。然后,流股在10~15倍于喷孔直径 d_0 的路程上,发生时间上和空间上周期性的正负压的更替(见图6)。当气体流过这个压力更替的区域时,流股的大量机械能被转

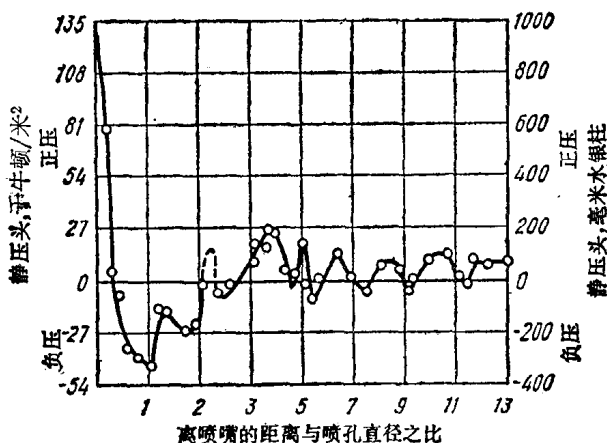


图6 压力为0.6百万牛顿/米²(6大气压)时从直筒型喷孔喷出的气体流股轴心静压头的变化

变成热能,从而缩短了流股的射程。压缩流股的扩张也改变了它的外形,增加了流股的扩张角,改变了流股的速度场的分布(最大速度向边界移动)。在按捷帕列(Теплер)方法摄影得到的照片上能很清楚地看到流股运动的这种不均匀脉动的特性。

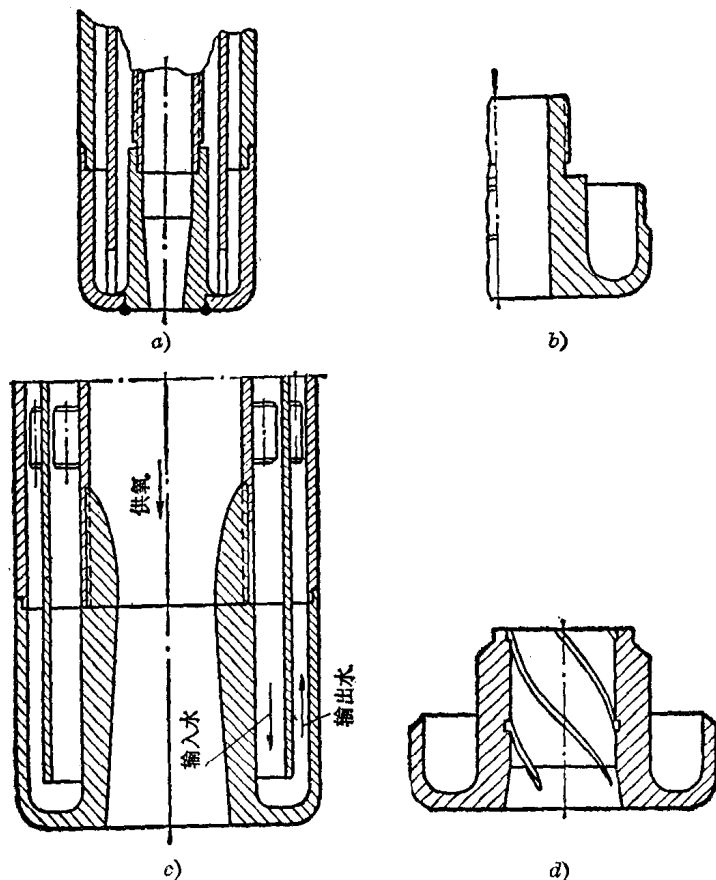


图7 单孔喷嘴

a—收缩型; b—直筒型; c—拉瓦尔型; d—螺纹型

很有可能, 这种流股的脉动会在一定程度上传递给熔池, 从而会引起飞溅、气体析出、熔池运动和喷溅的不均匀性。

采用扩张型喷孔来代替直筒型喷孔, 氧气流速能获得显著的提高。近几年在生产中, 已广泛地运用拉瓦尔型喷孔 (见图 7c, 8), 它能获得超音速的流速和最大的流股动能。假如喷孔是在设计氧压下工作的, 则氧气流速在任何压力范围内均可按方程式 (1) 进行计算。流速 w_0 与压力的

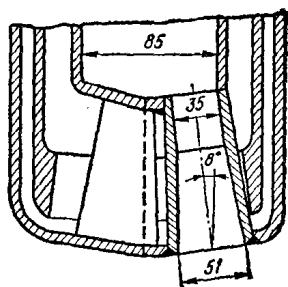


图 8 拉瓦尔型的多孔喷头

关系示于图 9。由图 9 可见, 在一般条件下, 拉瓦尔型喷孔的气体出口流速可达 450~500 米/秒。拉瓦尔型喷孔的尺寸是根据喷孔前压力等参数进行计算的。

当拉瓦尔型喷孔在设计氧压工作时, 喷孔出口压力基本

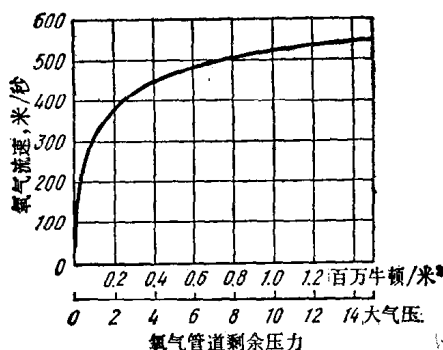


图 9 拉瓦尔型喷孔的出口流速与压力 P_1 的关系 ($T_1=300\text{K}$, $P_2=0.1$ 百万牛顿/米² 即 1 大气压)

上等于炉内压力。在这种情况下,不会发生正负压力更替的膨胀-压缩波及流股的脉动,从而有利于吹炼的平稳性和减少飞溅量和喷溅。有时拉瓦尔型喷孔不按设计氧压工作,如果喷孔前氧压大于设计值,被压缩的流股在出口后也会形成脉动和过多的能量损失;而当喷孔前气压小于设计值时,在喷孔形状不对的情况下,流股将脱离喷孔的内壁而造成喷孔内的负压,从而会发生喷枪周围的金属-炉渣乳状液被此负压所抽引,以致加剧了喷孔的烧损,流股变形,有时甚至烧坏了喷头,这些情况不仅影响生产,而且有时会发生危险。上述两种情况(过分膨胀或膨胀不足)的流股均更快地(与按设计氧压工作的相比较)与周围介质相混合,增大了它的扩张角,减小了流股的稳定性和射程,多孔喷枪的相邻流股的汇合情况也加剧了。这些现象都将给工艺操作带来不良的影响,即喷溅和飞溅量的加剧,有时也会恶化造渣过程。故近年来,这个问题引起了冶金工作者的普遍重视。

实际使用氧压与设计氧压的偏离程度可按喷孔的实际出口压力(P_3)与炉内压力(P_2)之比来表示,即 $n = \frac{P_3}{P_2}$ 。在实际生产中,发生这种偏离的主要原因可能有:拉瓦尔型喷孔的尺寸和形状的选择或计算有问题;由于工艺的需要,改变了供氧量和氧压 P_1 ;熔池液面的变动而引起炼钢过程中压力 P_2 的变化;由于转炉开炉座数的增加或车间、工厂其他单位的用氧情况而引起的氧气管道上压力变化[一般为 $0.2 \sim 0.4$ 百万牛顿/米² ($2 \sim 4$ 大气压) 或更多些]。因此,为了保证喷枪和喷头的正常工作,应尽量减少输氧管中的压力变化(为此需设置储氧罐和严格遵守用氧单位的使用分配制度)以及正确地计算喷孔尺寸及其断面,应采用合理的吹炼参数,使压力 P_2 和