

全国第五届冶金过程物理化学 年会论文集

下 册

PROCEEDINGS OF THE FIFTH SYMPOSIUM ON THE
PHYSICAL CHEMISTRY OF PROCESS METALLURGY

VOLUME II

1984

中国金属学会冶金过程物理化学学术委员会编

中国 西安
CHINA XIAN

76.1031
1-17
:1987
2:1

中国金属学会冶金过程物理化学学术委员会
第五届全国冶金过程物理化学学术年会

论 文 集

(下 册)

36432/13

主 办：中国金属学会冶金过程物理化学学术委员会

论文评审：中国金属学会冶金过程物理化学学术委员会

论文评审小组



目 录

(下 册)

四、冶金过程动力学及反应工程学

1. 喷吹钢包中渣金间脱氧和再氧化速度的研究
..... (北东工学院) 肖泽强 (瑞典冶金研究所) P. 利增卡里 1
2. 顶吹气体射流冲击下熔池流场的数学模型
..... (北京钢铁学院) 张家芸 杜嗣深 魏寿昆 11
3. 化学反应及传质模型对工业规模电渣重熔过程的应用
... (西安冶金建筑学院) 魏季和 (加拿大不列颠哥伦比亚大学) A. 米切尔 30
4. GH132合金真空电弧重熔过程中锰挥发动力学
...(北京钢铁学院) 傅杰 胡尧和 赵俊华 (上铜五厂) 赵玉才 诸建忠 39
5. 铝土矿浸出动力学研究
..... (中南矿冶学院) 刘今 吴若琼 李普尧 47
6. 氧化铜矿物疏速度率及其硫化矿相的研究
..... (昆明工学院) 刘纯鹏 华一新 58
7. 镍黄铁矿氧化动力学研究
... (冶金部长沙矿冶研究院) 吴丰秋 黄健康 (中南矿冶学院) 陈新民 70
8. 二价金属萃取动力学研究 (I) ——单液滴法研究HDEHP萃取
Ni(II)的速率与机理..... (山东大学) 沈静蓝 盖会法 高自立 孙恩修 80
9. 强化溶出水合铝酸钙动力学研究
..... (山东铝厂研究所) 仇振琢 蔡洪寿 89
10. 金属硫化物浸出过程的电化学机理
..... (中南矿冶学院) 钟廷科 裴晓宾 李仕雄 94
11. 用空气氧化As(III)为As(V)时 Cu^{2+} 的催化机理
..... (贵阳冶炼厂) 李世平 107
12. $\text{MgCl}_2\text{-NaCl-CaCl}_2\text{-KCl}$ 熔盐体系中锰(II)的电极过程动力学研究
..... (冶金部长沙矿冶研究院) 杨列太 周忠华 姚吉升 112
13. 稀土在炮钢中的作用机理
..... (北京钢铁学院) 李文超 林勤 叶文 晁晓琪 周如琪 124
14. 铁矾法沉铁动力学研究
..... (冶金部长沙矿冶研究院) 王乾坤 马荣骏 谭沮曾 134
15. 铁矿石还原机理探讨
..... (武汉钢铁学院) 罗廷和 143
16. 盐酸浸出攀枝花钛铁矿生成金红石机理的研究
..... (冶金部长沙矿冶研究院) 肖雅琴 刘玉霞 黄辉枢 周忠华 152

17. 钢液脱碳去氢的某些探讨
..... (上海工业大学) 顾荣发 167
18. 电炉冶炼结构钢铝脱氧产物的形态变化及排毒规律
..... (东北工学院) 隋智通 176
19. 铁液中铈的传质系数的测定——渣钢之间铈的还原动力学研究之一
..... (冶全部钢铁研究总院) 王来华陈永定 唐仲和 184
20. 关于喷射冶金中气粉射流与熔体相互作用的二点探讨
..... (湖南冶金材料研究所) 何旭初 193
21. 顶底复合吹炼熔池氧含量传质模型的研究
..... (冶全部钢铁研究总院) 刘浏 郭征 杜挺 202
22. 铁矿石移动床还原动力学研究
..... (北京钢铁学院) 秦民生 张郁亭 谢涌坤 212
23. 脱碳动力学随机数学模型的研究
..... (北京钢铁学院) 秦明达 杜才难 曲英 224
24. 冶金熔体中的传输过程
..... (西安冶金建筑学院) 魏孝和 234
25. 传输过程原理在移动床中的应用
..... (中国科学院化工冶金研究所) 谢裕生 车秀珍 李琪 283
26. 还原铜氨溶液反应机理的研究
..... (中国科学院化工冶金研究所) 柯家骏 涂桃枝 295
27. VOD过程混合特性的模型实验研究
(中国科学院化工冶金研究所) 马恩祥 蔡志鹏 钱占民 杨剑青 梁云 300
28. 硫化钼矿氧化焙烧过程反应机理研究
..... (中国科学院化工冶金研究所) 储绍彬 闻秀金 付玉珍 柯家骏 307

五、电化学

29. Ni电积新型阳极的电化学行为与节能
..... (中南矿冶学院) 刘业翔 吴良蕙 袁炳年 313
30. NaOH溶液中固体 $PbSO_4$ 电化学还原机理的研究
..... (东北工学院) 孟锡泉 王彭年 319
31. 硫离子阳极氧化电化学行为的研究
..... (中南矿冶学院) 舒余德 曾振欧 331
32. 关于电积锑阳极电流密度的讨论
..... (中南矿冶学院) 赵瑞荣 339
33. 熔盐电解中的阳极反应
..... (东北工学院) 邱竹贤 张明杰 346
34. Al_2O_3 在熔融 Na_3AlF_6 中的溶解机理与电解 $Na_3AlF_6-Al_2O_3$ 熔
体时两极反应机构..... (东北工学院) 狄鸿利 354
35. 氧浓差电池参比电极的极化超电位

- (上海冶金仪表计量厂) 汪南猛 362
36. K_3MoCl_6 在KSCN熔盐中的电化学反应
 (中国科学院长春应用化学研究所) 杜森林 (美国塞利尔理工学院)
 R.A.贝利 370

六、其 它

37. 稀土在低硫16Mn钢中的物理化学行为
 (北京钢铁学院) 叶文 林勤 李文超 378
38. “无机热化学数据库”剖析简述
 (中南矿冶学院) 常强三 陈峰 白水富 391
39. 冶金热力学数据库
 (北京钢铁学院) 程述武 396
40. 无机热化学数据库中复氧化物热力学性质的计算和预报
 (中国科学院上海冶金研究所) 陈念貽 朱建华 徐桦 缪强 张未名 415
 (中国科学院化工冶金研究所) 许志宏 王乐珊 戚其平 415
 (西安冶金建筑学院) 陈斌 415
 (同济大学) 章永浩 毛慧真 415
 (中南矿冶学院) 常强三 陈峰 白水富 415
41. 低泥渣的预处理与物相分析以及含铈铁水的钠盐处理初步试验
 (北京钢铁学院) 佟亭 王刚 魏彦林 张圣弼 魏寿昆 421
42. 利用钢液冒花现象判断20MnNb钢的脱氧度
 (唐钢研究所) 徐国伦 赵爱玲 436
43. 非晶态Fe—P合金的研究
 (北京钢铁学院) 王俭 姜荣跃 骆辑 王健民 446
44. 氮化钒铁的平衡及动力学
 (东北工学院) 张显鹏 黄祖安 455
45. $Mo-Al_2O_3$ 金属陶瓷在NaCl熔盐中的腐蚀行为
 (东北工学院) 王魁汉 李荣久 赵宝泽 郭树梅 463
46. 冶金动力学词汇(中英对片)表
 冶金过程物理化学学术委员会冶金动力学组(中南矿冶学院 刘今起等) 472

喷吹钢包中渣金间脱氧和 再氧化速度的研究

肖泽强 P.利塔卡里

(东北工学院) (瑞典冶金研究所)

摘 要

钢包喷吹精炼中,包内顶渣对精炼效果具有重要意义,这是由于气体搅动下渣一金间具有良好的传质条件。直接研究这一界面传质现象有许多困难。本工作利用“KA”传质速度常数直接研究了6吨喷吹钢包内渣一金间的传质(脱氧)过程。实验获得,金→渣的传氧速度常数 k_1 和渣→金间的传氧速度常数 k_2 分别为 0.36秒^{-1} 和 $1.4\sim 2.7\text{秒}^{-1}$ 。据此建立了6吨钢包喷吹下的脱氧方程,用于预示顶渣再氧化能力与实测结果相等。这一实验初步定量地证实了控制顶渣的重要性,可以推测,采用硫容量足够的顶渣和吹氩搅拌可以实现与喷粉相接近的脱硫效率。

一、引 言

钢包喷射冶金已被承认为一种有效的精炼手段,特别在脱氧和脱硫方面,其效率高于真空处理^[1]。利用包内喷粉,可以在几分钟内将钢液中溶解氧降到1ppm以下,将钢中硫降至5ppm左右。但是,许多因素影响着钢包喷吹的精炼效率。其中顶渣是影响钢包喷吹精炼效率的重要因素之一。

本文所介绍的研究课题,是研究喷吹钢包中渣—金界面精炼过程的速率。通过在6吨钢包内作热态下的直接脱氧和再氧化速度的测定,建立各种条件下的脱氧速度方程,来定量地分析顶渣对钢液精炼过程的影响及鉴别各影响因素的作用。

曾经在6吨钢包内,在喷吹条件下利用突然加入氧化剂的方式,进行钢液通过顶渣的再氧化和喷吹钢液脱氧的显示性预试验。在开喷后2分钟(此时,钢中总氧已降低到20ppm以下,人工加入49公斤 Fe_2O_3 于渣面,在加前加后连续(每15~20秒取样一次)取钢样分析全氧,取渣样分析($\text{MnO}+\text{FeO}$),所得结果示于图1。由图1可见,加入 Fe_2O_3 后极短时间内,钢中氧含量急剧上升,全氧由15ppm左右剧增到接近100ppm,渣中($\text{FeO}+\text{MnO}$)当然以可理解的速度增大。但是,由于喷吹的强烈搅拌和钢液中脱氧元素的作用,钢中全氧在达到峰值(由15ppm达到峰值耗时20~30秒钟)后又迅速下降,1.5~2.0分钟又降至原有水平(见图1 ΣO_1),可见再氧化和脱氧的速度都很大。 ΣO_1 (图1)在这一试验炉次中的变化特征,指出了喷吹钢包内顶渣和金属熔池之间具有良好的传质条件。

顶渣对钢中硫含量的影响,也作了几次显示性热态预试验,连续取样的分析结果表明,顶渣渣面加入 Cu_2S (9.5公斤)和 Fe_2O_3 (50公斤)后,钢中硫均在瞬间开始上升,在几十秒时间内达到最大值(见图2),这充分说明渣钢间在吹气搅动条件下的良好传质条件。

上述两次显示性实验指出喷吹钢中渣一金的传质过程是很快的,这就有理由认为,如喷吹时顶渣控制不好(如含氧高、碱度低、含硫高等),采用喷吹后,顶渣将首先污染钢液(如钢液再氧化、增硫、夹杂物量增大等),此时钢液的质量可能比不喷吹精炼的钢液还差。相反,也可以认为,如顶渣质量良好,控制合理,单纯采用吹氩,也可以实现对钢液的快速和深度脱氧或脱硫。

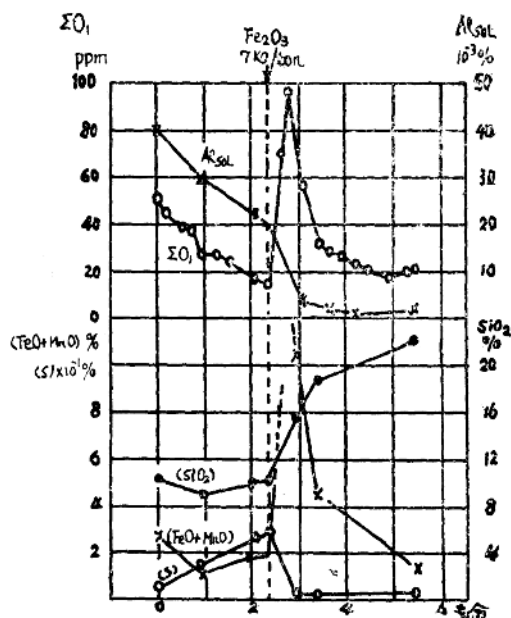


图1 6t钢包内顶渣与金属间传质现象的显示性试验炉次中成分变化

研究这一界面的传输现象,确定影响这一传输过程速率的因素,对正确控制这一精炼工艺是有意义的。由于对渣—金间接接触现象尚未有充分的研究,本次实验中利用“KA”作为传质速度常数 k ,研究了6吨喷吹钢包内的传质过程。

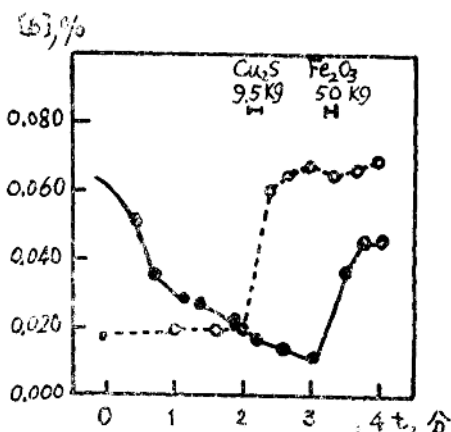


图2 渣面加入 Cu_2S 和 Fe_2O_3 后钢中硫含量的变化

在研究活金界面传质时,应首先了解喷吹包内的流动特征。利用图3所示之全浮力模型(plume model) [4]可以说明钢包吹气搅动下熔池的运动特征。气体流出喷口后成泡上浮,驱动周围钢液跟随何上流动,形成喷嘴正上方的气液区,上升流股达到顶面以后,气体溢向大气,钢液向四方流开,形成水平流动层,这一水平流在靠近包壁处拐弯向包下部,形成一种对流循环运动。图3所示模型已经为许多研究工作者所接受,对这一模型的详细讨论可参改文献 [4] [6] [7] [8] [9] [10]。全浮力模型的定量计算指出,气泡抽引钢水的效率,用液/气体积比表示时可达50~200 [4]。流量很大的钢液流经渣面下方时,可达到0.1~1.0米/秒的速度 [4] [10]。在这种速度条件下,渣钢间接触面积及传质过程的速度都比平静面显著加大。喷吹钢包内渣—金界面的传输现象就是以这种接触条件为基础的。

已知, $O_2^* = \alpha O_2$ (5)

故 $\frac{dO_2}{dt} = \frac{1}{\alpha} \frac{dO_2^*}{dt}$ (6)

由公 (6) 和 (4), 得,

$$-\frac{dO_2^*}{dt} = -\alpha k_2 (O_2^* - O_1) \quad (7)$$

移项,

$$\frac{dO_2^*}{O_2^* - O_1} = \alpha k_2 dt \quad (8)$$

积分。初始条件 $t=0$, $O_2^* = O_{2,0}^*$, 故

$$O_2^* = O_1 + (O_{2,0}^* - O_1)e^{-\alpha k_2 t} \quad (9)$$

将式 (9) 代入式 (3):

$$\frac{d\Sigma O_1}{dt} = \frac{m_{渣}}{m_{金}} \cdot k_2 \cdot (O_{2,0}^* - O_1)e^{-\alpha k_2 t} - k_1 (\Sigma O - O_1) \quad (10)$$

$$\frac{d\Sigma O_1}{dt} + k_1 \Sigma O_1 = \frac{m_{渣}}{m_{金}} \cdot k_2 \cdot (O_{2,0}^* - O_1)e^{-\alpha k_2 t} + k_1 O_1 \quad (11)$$

已知,

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\Sigma O_1 \cdot e^{k_1 t}) &= \frac{d\Sigma O_1}{dt} e^{k_1 t} + k_1 \Sigma O_1 e^{k_1 t} \\ &= \left(\frac{d\Sigma O_1}{dt} + k_1 \Sigma O_1 \right) e^{k_1 t} \end{aligned} \quad (12)$$

(12) 等于式 (11) 乘以 $e^{k_1 t}$, 故

$$\begin{aligned} \Sigma O_1 \cdot e^{k_1 t} &= \frac{m_{渣}}{m_{金}} \cdot \frac{k_2}{k_1 - \alpha k_2} (O_{2,0}^* - O_1) e^{(k_1 - \alpha k_2)t} \\ &\quad + O_1 \cdot e^{k_1 t} + C \end{aligned} \quad (13)$$

可以肯定, $k_1 = \alpha k_2$ 故可对式 (13) 积分:

$$\begin{aligned} \Sigma O_1 \cdot e^{k_1 t} &= \frac{m_{渣}}{m_{金}} \cdot \frac{k_2}{k_1 - \alpha k_2} (O_{2,0}^* - O_1) e^{(k_1 - \alpha k_2)t} \\ &\quad + O_1 \cdot e^{k_1 t} + C \end{aligned} \quad (14)$$

$$\Sigma O_1 = \frac{m_{渣}}{m_{金}} \cdot \frac{k_2}{k_1 - \alpha k_2} (O_{2,0}^* - O_1) e^{-\alpha k_2 t} + O_1 + C e^{-k_1 t} \quad (15)$$

初始条件, $t=0$ 时, $\Sigma O_1 = \Sigma O_{1,0}$, 故

$$\Sigma O_{1,0} = \frac{m_{\text{渣}}}{m_{\text{金}}} \cdot \frac{k_2}{k_1 - \alpha k_2} (O_{2,0}^* - O_1) + O_1 + C \quad (16)$$

即

$$C = (\Sigma O_{1,0} - O_1) - \frac{m_{\text{渣}}}{m_{\text{金}}} \cdot \frac{k_2}{k_1 - \alpha k_2} (O_{2,0}^* - O_1) \quad (17)$$

将式 (17) 代入式 (15) 得:

$$\begin{aligned} \Sigma O_1 = O_1 + \frac{m_{\text{渣}}}{m_{\text{金}}} \cdot \frac{k_2}{k_1 - \alpha k_2} \cdot (O_{2,0}^* - O_1) e^{-\alpha k_2 t} \\ + \left[(\Sigma O_{1,0} - O_1) - \frac{m_{\text{渣}}}{m_{\text{金}}} \cdot \frac{k_2}{k_1 - \alpha k_2} (O_{2,0}^* - O_1) \right] e^{-k_1 t} \quad (18) \end{aligned}$$

式 (18) 右边第一项表示钢液中与氧元素平衡的溶解氧量, 第二项表示再氧化供氧, 第三项表示脱氧。如果能够通过实验求得传氧速度常数 k_1 和 k_2 , 则可求得给定条件 (给定 $\Sigma O_{1,0}$, O_1 , $m_{\text{渣}}, m_{\text{金}}, O_{2,0}^*$) 下钢中总氧量随喷吹时间而变化的情况。

三、实验条件和数据

实验是在 6 吨半工业性试验钢包上进行的, 为防止大气和包衬参与传氧过程 (或尽可能减少这两个因素的影响), 钢包衬采用高氧化铝砖 (文献介绍其传氧速度为 1ppm/秒, 远能于实验供氧速度) 并加盖隔绝大气。图 5 为 6 吨钢包上的实验条件。

1. 脱氧过程: 靠还原渣下吹氩和喷吹脱氧剂来实现。

2. 再氧化过程由加入氧化铁粉来控制, 其组成和粒度为:

粒度: $<0.8\text{mm}$ 95%

$<0.1\text{mm}$ 15%

成分: Fe_3O_4 92%

Fe_2O_3 2%

(相当 O_2) 26%

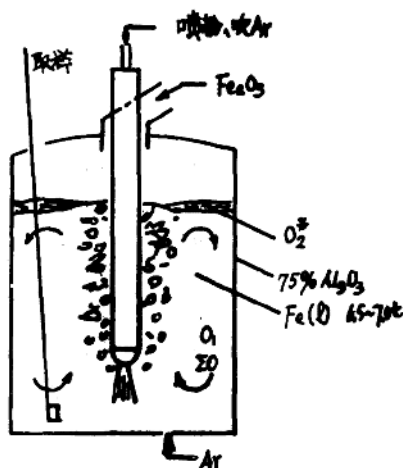


图5 6吨钢包喷吹脱氧和再氧化试验条件

3. 顶渣由加入的 CaO 、 CaF_2 调整, 加入量为钢水量的 0.5~1.0%, 具体配比可参考表 1 和 2。

4. 吹氩量为 200~768 标升/分钟, 氧化铁粉加入速度为 100 公斤/分钟至 350 公斤/分钟, 喷粉炉次的喷入粉剂以 CaO/CaF_2 为基, 分不加铁合金、加 FeS175 和 Al1 三种类型。

试验共进行 10 次炉次, 分两组;

——实验 1045: 5炉 吹氩、渣面加氧化铁粉

——实验 1046: 5炉 喷粉、渣面加氧化铁粉

喷吹时间四分钟左右。取20个钢样, 取样部位靠近包底(见图6)。每隔一分钟取一次渣样, 喷前喷后测温定氧。

表1和表2分别列出1045和1046两组实验的有关数据。

吹氩、加入氧化铁实验记录(1045) 表1

炉 次		1045—2	1045—3	1045—4	1045—5	1045—6
喷 粉		未	未	未	未	未
出钢加入顶渣	公 斤	CaO59	CaO59	CaO56	CaO56	CaO56
		CaF ₂ 14	CaF ₂ 14	CaF ₂ 14	CaF ₂ 14	CaF ₂ 14
钢 水 量 m _金	吨	7.2	6.9	6.8	7.0	7.0
喷吹时间, t	分	3.3	4.0	4.0	3.9	3.9
吹氩量, V _A	升/分	200	500	500	500	500
喷粉量, m _p	公斤/分	—	—	—	—	—
加氧化铁量, m _{氧化铁}	公斤/分	24	23	25	12.5	10
单位供氧量, m _(o) /m _金	克/吨·秒	14.4	14.4	15.9	7.7	6.2
C	%	0.15	0.15	0.21	0.24	0.32
Si	%	0.23	0.07	0.10	0.08	0.44
Mn	%	0.24	0.24	0.55	0.44	0.80
P	%	0.032	0.028	0.029	0.029	0.032
S	%	0.033	0.030	0.029	0.025	0.013
Al _总	%	0.007	0.024	0.009	0.013	0.135
Al _熔	%	—	0.005	0.005	0.008	0.123
ΣO ₁ *	ppm	205	128	125	43	27
温度	C	1594/1552	1620/1585	1585/1540	1588/1550	1585/1552
α _o	ppm	59/50	4.6/72	30/71	17/23	2.3/1.8
CaO	%	45.1	39.6	41.9	47.0	50.2
K ₂ O	%	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
SiO ₂	%	23.5	18.1	19.2	15.8	8.6
Al ₂ O ₃	%	16.2	27.9	19.7	25.9	32.8
MnO	%	2.8	3.5	8.1	2.6	0.5

续上表

FeO	%	7.7	5.8	6.5	3.1	2.5
B		1.5	1.2	1.4	1.6	1.9
f_0		0.80	0.83	0.77	0.75	0.45
O ₁	ppm	62	86	92	31	4.0
O ₂ *	ppm	385	403	289	149	46

喷粉、加入氧化铁实验记录(1046)

表2

炉次		1046—1	1046—2	1046—3	1046—5	1046—6
喷粉	%	80CaO 20CaO	62CaO 15CaF ₂ 23FeSi75	62CaO 15CaF ₂ 23CaF ₂	66CaO 16CaF ₂ 18Al	66CaO 16CaF ₂ 18Al
出钢加顶渣	公斤	CaO28 CaF ₂ 7	CaO28 CaF ₂ 7	CaO28 CaF ₂ 7	CaO28 CaF ₂	CaO28 CaF ₂
钢水量, m _金	吨	6.5	6.8	6.4	5.8	5.6
喷吹时间, t	分	4.2	4.1	2.8	4.1	4.1
吹氩量, V _{Ar}	升/分	768	648	690	672	648
喷粉量, m _p	公斤/分	23	23	24	23	22
加氧化铁量, m _{氧化铁}	公斤/分	25	25	25	25	35
单位供氧量, $\frac{m(o)}{m_{金}}$	克/吨·秒	16.7	15.9	16.9	18.7	27.1
C	%	0.53	0.61	0.19	0.24	0.20
Si	%	0.13	0.50	0.26	0.19	0.19
Mn	%	0.55	0.71	0.54	0.48	0.48
P	%	0.049	0.051	0.049	0.050	0.051
S	%	0.015	0.014	0.013	0.012	0.013
Al _总	%	0.010	0.023	0.018	0.054	0.084
Al _溶	%	—	—	—	0.048	0.079
ΣO ₁ *	ppm	62	71	53	78	96
温度	°C	1590/1520	1585/1535	1594/1520	1620/1572	1630/1426
a ₀	ppm	3.3/17.5	10.5/12.4	4.3/16.4	205/3.6	5.4/14.1

续上表

CaO	%	47.0	42.4	45.6	41.5	38.4
MgO	%	1.8	1.5	1.4	1.8	2.0
SiO ₂	%	18.5	23.4	22.2	19.9	20.8
Al ₂ O ₃	%	23.1	21.4	22.2	25.0	24.8
MnO	%	2.0	2.4	1.9	4.0	5.5
EeO	%	3.8	5.6	2.8	5.6	5.9
B		1.6	1.3	1.4	1.3	1.2
f _o		0.59	0.48	0.75	0.65	0.62
O ₁	ppm	30	26	22	5.5	23
O ₂ *	ppm	151	127	79	231	285

四、实验结果和讨论

1. k_1 和 k_2 值的确定

根据1045和1046两组实验炉次取得的数据,按 $(\text{FeO}+\text{MnO})-(\Sigma\text{O}_1^*)$,
 $(m_{0,-1}/m_{\text{金}})-(\Sigma\text{O}_1^*-\text{O}_1)$ 和 $(\text{O}_2^*-\text{O}_1)-(\Sigma\text{O}_1^*-\text{O}_1)$ 三个关系作图,即可求出 k_1 和
 k_2 之值。本试验条件下得出 k_1 , k_2 值如表3所示

脱氧和再氧化速度常数 k_1 和 k_2

表3

炉次	处理方式	处 理 参 数			脱氧、再氧化速度常数		
		$V_{\text{A},}$ 升/分钟	$m_{\text{金}}$,吨	$m_{\text{渣}}/m_{\text{金}}$	k_1 ,秒 ⁻¹	k_2 ,秒 ⁻¹	k_2/k_1
1045-2	吹氩	200	7.2	0.023	0.10	1.7	17
1045-3~6	吹氩	500	6.9	0.023	0.36	1.4	3.9
1046-1~5	喷粉	684	6.2	0.031	0.36	2.7	7.4

2. 实验结果与计算值的比较:

现在考虑图1所示之试验炉次 R1012~4所测得的结果与计算值的对比。

R1012—4炉次的实验条件为:

$$V_{\text{A},}=450\text{升/分钟}$$

$$m_{\text{金}}=7.0\text{吨}$$

$$\Sigma\text{O}_{10}=15\text{ppm}$$

$$\text{O}_1=10\text{ppm}$$

$$O_2^* = 750 \text{ ppm}$$

$$\alpha = 0.0057$$

$$k_1 = 0.36 \text{ 秒}^{-1}$$

$$k_2 = 2.0 \text{ 秒}^{-1}$$

将有关数据代入式 (18)，即可得出 $\Sigma O_1 - t$ 关系曲线，图 6 所示计算值与实测值相符合的情况令人满意，这就证实喷吹钢包中渣——金间的反应受传氧过程限制，脱氧和再氧化均以相当大的速度进行。

可以推论，渣——金间的脱硫也将以相似的规律、相近的速率进行，顶渣脱硫 60%~80% 所需的时间可以控制在几分钟之内，这对于从传质机理来论证顶渣吹氩脱硫工艺的合理性和效率，是很有启发性的，图 2 吸硫数据也说明了这一点。

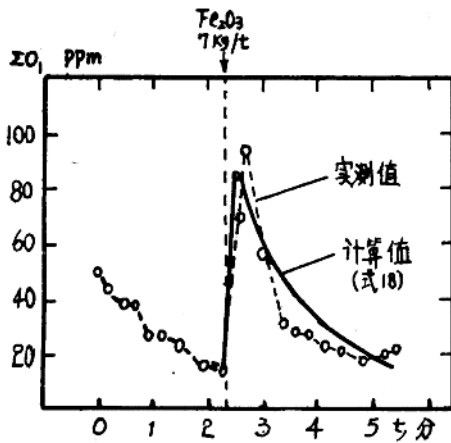
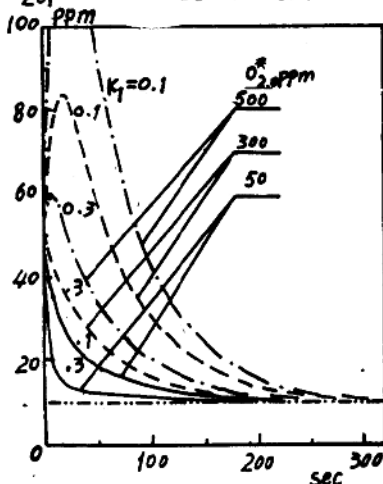


图6 传氧过程的计算值与实测值的对比 (计算条件: $k_1 = 0.36$, $k_2 = 2.0$, $\alpha = 0.0057$, $O_1 = 10 \text{ ppm}$, $O_2 = 750 \text{ ppm}$, $m_{\text{渣}}/m_{\text{金}} = 0.02$)



8 图8 搅拌强度 (k_1 值分别为 0.1 和 0.3) 对传氧过程的影响

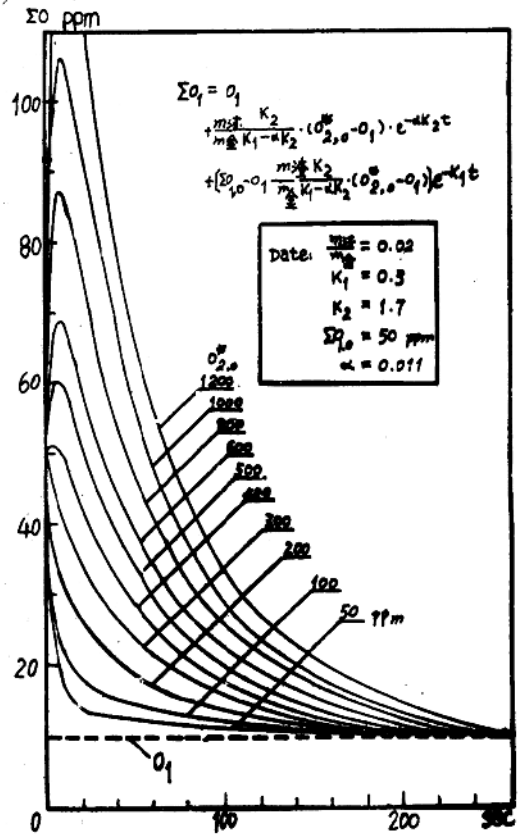


图7 利用脱氧方程计算钢中总氧量与顶渣氧化性的关系

在钢包喷吹精炼中, 操作者最易于控制但又最易于忽视的是顶渣控制, 即顶渣氧化性和碱度(或硫容量)。不少情况下的喷吹失效, 往往是顶渣控制不当(如让炉内氧化渣流出过多, 又未采取渣脱氧措施等)所引起的。式(18)可以定量地描述顶渣氧位对钢中总量的影响。图7示出在给定渣量为2%、钢中原始总氧50ppm、溶解氧10ppm、 $k_1=0.3$ 、 $k_2=1.7$ 、 $\alpha=0.011$ 条件下, 改变炉渣氧化性对钢中总氧量的影响。可以看出, 当渣中介面氧位差大于某一程度(上述条件下, O_2^* 约为350ppm)时, 喷吹初始将出现钢中总氧增大, 这是因为再氧化量大于脱除量, 增长时间只有几秒或十几秒, 然后下降, 直至4~6分钟后都趋于平衡值 O_1 (此处为10ppm)。在 O_2^* (界面氧位)等于 $\Sigma O_{1,0}$ 时(“50”所示之曲线), 炉渣的再氧化远小于脱氧速度, 故钢中总氧可在20秒以内降低到15ppm左右。

利用式(18)检验一下搅拌强度的影响, 也是很有意义的。搅拌强度大, 渣金混合面积加大, 即 A_1 加大, 这将反映在式(18)之 k_1 值中, 假定用1045—2炉次的 k_1 值代替其余炉次的值, 则钢中氧量变化曲线将有显著改变。图8对比了三个不同 O_2^* (500、300、50ppm)下 $k_1=0.3$ 和 $k_1=0.1$ 两种情况, 发现搅拌强度对脱氧过程具有重要影响, 例如, 在已喷吹100秒时刻, 钢中氧量(前者, $k_1=0.3$, 后者 $k_1=0.1$)前者比后者低一倍以上。

结 论

- 一、实验证实了顶渣与钢液间在搅拌下存在强烈的传质过程。
- 二、工业钢包内的热态实验所提供的数据可以用来预示喷吹钢包中全氧的变化规律。
- 三、渣中氧、搅拌强度是决定钢脱氧速度的重要因素。
- 四、本实验间接证实, 在严格控制顶渣下进行钢包吹氧, 可以获得接近于喷CaSi粉的良好脱硫效果。

参考文献

- (1) SCANINJECT I (1977), II (1980), III (1983)
- (2) 钢中非金属夹杂物的控制, 文集, 1982, 东北工学院印
- (3) Theo Lehner 等: Pilot Studies of the Oxygen Level during secondary Refining of Liquid Steel. SKW Symposium. May 8—9, 1980
- (4) Hsiao Tse-Chiang 等: Fluid Flow in Ladles, Scan. J of Metallurgy 1980. No 3, 105—110.
- (5) P. Ritakallio, Hsiao Tse-Chiang: Toppslaggens inverkan på Desoxidation vid Gasspolning och Pulveinjektion—Pilotforsök, MF 79013 E, Sweden, 1979
- (6) R. L. L. Gulhrie: Met. Trans. 13B June 1982, 193—211
- (7) 森一美: 铁と钢, 1982, No 16, 2451—2460
- (8) T. Lehner: Scandinavian Journal of Met. 10(1981) 157—162
- (9) F. Oeters: 1982年10月北京钢铁学院讲课讲义
- (10) J. Szekely: SCANINJECT III, 1983, Sweden

Study on Deoxidation and Reoxidation Rate of
Melt by Top Slag in Ladle Refining
Hsiao Tse-Chiang* P. Ritakallio**
(*Northeast university of Technology)
(**MEFOS, Sweden)

Abstract

The control of the top slag in the ladle stirred by gas or treated by powder injection is of great importance, it is due to the existence of a good mass transfer condition at the interfacial layer between the interfacial layer between the top slag and the metallic bath. Not many references on this phenomena were published due to difficulties during direct investigation in melt. In the present work the mass transfer (deoxidation) process was studied by using rate constant of mass transfer (KA) in a 6 ton steel ladle. It has been found that the melt $\rightarrow$ slag mass transfer constant (k_1) and the slag $\rightarrow$ melt mass transfer constant (k_2) were 0.36 sec^{-1} and $1.4-2.7 \text{ sec}^{-1}$ respectively. A deoxidation equation of this 6 ton ladle during gas stirring has been deduced based on the results obtained by present work, good agreement between experimental and predicted data was obtained. Experimental results evidenced the importance of the top slag control in ladle metallurgy, and it is reasonable to note a deep desulphurization of liquid steel could be obtained in gas stirred ladle with top slag of high sulphur capacity.

顶吹流体射流冲击下熔池 流场的数学模型

张家芸 杜嗣琛 魏寿昆

北京钢铁学院

摘 要

本文将湍流运动方程和Harlow-Nakayama的k-e湍流双方程模型结合,提出了顶吹气体射流冲击下流场的数学模型。对这一数模,采用Spalding等人提出的方法进行了计算,得到了流场的涡量、流函数、速度、湍动能及湍动能耗散率等的分布。在此基础上,对流场的性质及特点进行了分析研究。

由于在湍流模型的使用,及边界条件和计算方法上的若干改进,使我们的计算结果比前人的相应结果更符合实际,并适用于大气体流量射流冲击下液体流场的计算。因此我们的工作可以认为是Szekely和李有章等人相应研究的继续和深入。

引言

自六十年代中期起,对顶吹气体射流作用下熔池内液体流场的研究开始受到人们普遍的重视。当时,氧气顶吹炼钢技术的应用和迅速发展对基础研究提出了进一步要求,此外,实验技术的进步及大型数字的电子计算机的出现,也为这项研究的发展提供了条件。

这方面的早期工作主要是在水模型中,用实验方法观察液体流场的流动现象,研究气体射流参数与液面凹陷部分几何参数的关系。如Wakelin^[1]曾用示踪粒子照相方法获得的结论,推算了模型中流场的速度分布。

1974年,Szekely和Asai^[2]用Spalding等^[3]推荐的方法,提出了顶吹气体射流冲击下熔池流场的数学模型。这一数学模型由流函数和涡量表示的湍流运动方程,Prandtl-Kolmogorok-1湍流单方程模型及相应的边界条件构成。他们曾把计算所得的速度分布与Wakelin的实验结果比较,两者达到一定程度的符合。作为氧气顶吹炼钢工艺过程数学模拟的初次尝试,Szekely等^[2]采用了看来过于简单的处理方法,如顶吹气体射流造成的凹陷液面处理为圆锥面等。李有章和李顶宜^[4]对Szekely等提出的数学模型做了某些改进,如将凹陷面处理为二次抛物面,在液体自由表面的边界条件里,考剥了自由表面上存在摩擦引起的动量传速。计算结果与他们用激光测速方法得到的结果基本一致。

我们认为,在前人的工作中仍存在某些问题和不足之处,有待改进。如李有章等曾用更接近实际形状的抛物线形凹陷边界线代替了Szekely等所用的直线形凹陷边界,但是,在计算中,他们实际上采用缩小的凹陷边界尺寸参数,在对称轴处涡量的边界条件中引入了可调因子,来帮助达到收敛。另外,在Szekely和李有章的数学模型中,都包括一些参数,这些参数仅适用于低Reynolds数的流动。因此,他们的模型仅适用于气体射流流量较低的情况,为了发展喷射冶金技术及相应过程的动力学研究,为了不断地完善冶金过程数学模拟方法,有必要对这一课题做进一步研究。

在我们提出的数学模型中,Harlow-Nakaymak- ϵ 湍流模型^[5]代替了前人曾使用的k-1单方程湍流模型。在靠近固体壁的薄液层中,用壁函数方法^[6]决定剪应力与速度梯度、切向速度与到壁的距离之间的关系。为了便于与前人的工作比较,我们所用有机玻璃模型的尺寸和形状与李有章等人的模型(见图1)相同,并且用他们实验所用的工况条件观察了流场,在此基础上,对本文提出的模型作了计算。我们注意到,李有章等所用的凹陷边界尺寸比凹陷边界的实际尺寸小,因此,做了修正,在计算中使用实际凹陷边界尺寸。另外,在对称轴处涡量的边界条件中不采用人为引进的可调参数。数学模型的改进和合理的程序编排,使我们得到满意的收敛精度。数学模型计算的流场速度分布与李有章等的测光测量结果十分符合。我们还用这一数学模型预报了二个大气体射流冲击下的液体流场速度分布及湍流性质分布,这表明与前人的模型相比本文提出的模型有较强的适应性。由此可以做出结论,和前人的工作相比,我们的工作有所前进,有所突破。