新工艺新技术

RH - MFB 精炼过程钢包内钢液流动与碳浓度分布的模拟研究

高爱民，梁 娟，艾立群，张 响

（河北理工大学冶金与能源学院，河北 唐山 063009）

摘 要：根据某厂 RH - MFB 的生产实际，采用 CFX 软件建立钢包内钢液流动与碳浓度分布的耦合数学模型，对钢液的流动特性以及碳浓度的分布情况进行研究，利用现场数据验证所建模型，分析了脱碳后期钢液碳浓度的分布情况，考察了工艺设备等因素对脱碳处理过程的影响，为超低碳钢的工艺优化提供理论依据和指导。

关键词：RH - MFB；数值模拟；钢液流动；碳浓度

中图分类号：TF769.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1004 - 7638(2007)04 - 0029 - 07

Numerical Simulation on Molten Steel Flow and Carbon Concentration Distribution in Ladle during RH Vacuum Degassing Process

Gao Aimin, Liang Juan, Ai Liqun, Zhang Xiang

(School of Metallurgy & Energy, Hebei Polytechnic University, Tangshan 063009, Hebei, China)

Abstract: According to the actual production condition of RH - MFB in one plant, the coupling mathematic model of molten steel flow and carbon concentration distribution in ladle is established by using the commercial code CFX. The flow characteristic of molten steel and variation of carbon concentration are investigated, and the validity of mathematic model is verified by comparing simulation results with measuring results. Carbon concentration distribution is analyzed at the last stage of decarburization, and the influence of process equipment on decarburization process is discussed. So some useful theoretical evidence instructions are put forward for ultra - low - carbon steel production.

Key words: RH - MFB; numerical simulation; molten steel flow; carbon concentration

0 引言

RH - MFB，即 RH 多功能喷嘴（Multi Function Burner），它的主要冶金功能是吹氧脱碳和钢液升温，在目前国内外生产低碳钢或超低碳钢工艺过程中起着十分重要的作用。

就宏观角度而言，影响 RH - MFB 精炼过程的关键在于钢液的循环流动，钢液成分和温度的均匀化以及脱碳反应的速度和效果都与其密切相关，因此，钢液的循环流动一直都是 RH 精炼技术研究的主要内容。笔者针对 RH - MFB 300 t 钢包，利用 CFX 软件建立钢液流动与碳浓度分布的耦合数学模型，对精炼过程中钢包内的钢液流动特性以及碳浓度分布情况进行研究，考察吹氩流量、浸渍管直径等因素对脱碳过程的影响，为超低碳钢生产工艺优化提供理论依据和指导。

收稿日期：2007 - 04 - 06

作者简介：高爱民（1966—），女，河北唐山人，河北理工大学副教授，工学硕士，主要从事冶金过程仿真模拟研究工作。

1 数学模型

1.1 基本假设

为了便于建立数学模型和研究,进行了以下假设:

(1)脱碳反应只发生在真空室及上升管与氩气接触的钢液中;

(2)不考虑温度对钢液物性参数的影响;

(3)钢液为不可压缩粘性流体,在精炼过程中钢液的流动为稳态;

(4)将钢液表面视为自由表面,不考虑熔渣对钢液流动的影响。

1.2 控制方程

对钢包内钢液的流动行为进行数值模拟,需要求解的控制方程包括连续性方程、动量方程及湍流 $\kappa-\varepsilon$ 模型,为描述钢液中碳浓度的变化过程,还需要采用浓度输运方程,各控制方程的具体形式参见文献[1]。

1.3 边界条件

(1)入口边界:将浸渍管的下降管下端出口作为钢包内钢液的入口,入口条件采用速度入口,钢液速度根据真空处理过程中钢液的循环流量确定。

(2)出口边界:将浸渍管的上升管下端入口作为钢包内钢液的出口,考虑到提升气体的抽吸作用、两浸渍管直径以及质量守恒原理,采用速度边界条件。

(3)钢包壁面:将钢包整个壁面设为无滑动(静止)壁面,对包壁附近的钢液采用 Scalable 壁面函数进行处理。

(4)钢液表面:忽略渣层的影响,假定钢液表面为平面,通过该表面的各物理量的通量为零。

1.4 网格划分与求解方法

如图1所示,将钢包内钢液所在空间作为计算域,浸渍管内径为750 mm,浸入深度为500 mm,两浸渍管中心距为1 600 mm。计算中采用四面体非结构化网格,如图2所示,网格总数为1 187 886个,网格节点总数为323 239个。计算区域采用静止参考系,差分格式使用一阶迎风,参差设置为 10^{-5}。利用 CFX 软件全隐式耦合求解技术和时间推进法进行求解。

首先对钢包内钢液的流动行为进行稳态模拟,然后在此基础上模拟精炼过程中的碳浓度分布及变化情况。对钢包内碳浓度分布进行求解,可根据 Kato 等[2]以及 Yamaguchi 等[3]的研究结果,得出钢包内平均碳浓度(C_L)以及真空室内平均碳浓度(C_V)随时间变化的关系式:

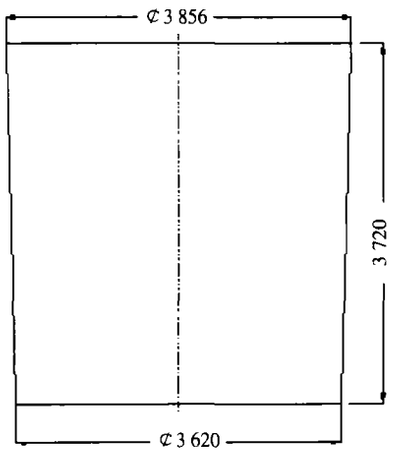


图1 钢包示意

Fig.1 Diagrammatic sketch of ladle

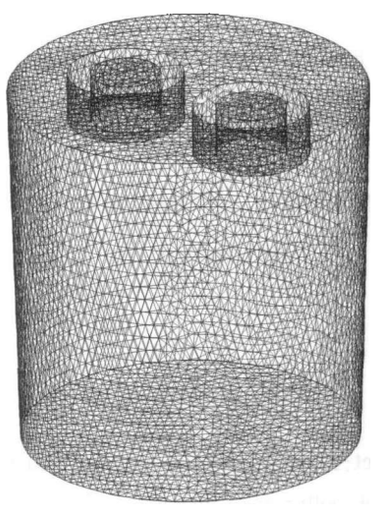


图2 网格划分

Fig.2 Grid arrangement of mathematic model

$$C_L = C_{L,0}\exp(-K_C t) \tag{1}$$

$$C_V = C_L(1 - K_C W / Q) \tag{2}$$

$$K_C = \frac{1}{W(1/Q + 1/\alpha k_C \rho)} \tag{3}$$

式中:$C_{L,0}$为钢包内钢液的初始碳浓度;K_C 为脱碳反应速率的表观常数,s^{-1};W 为钢包内钢液量,kg;Q 为钢液循环流量,kg/s;ρ 为钢液密度,kg/m^3;αk_C 为脱碳反应容积传质系数,m^3/s。

在实际的 RH-MFB 脱碳反应过程中,αk_C 的准确值很难确定,因此,笔者通过对不同炉次脱碳过程中钢液碳浓度的现场实测数据进行拟合,确定出了现有条件下的 αk_C,即 $\alpha k_C = 0.18$ m^3/s。由此,可根据公式(1)~公式(3)确定出钢包内平均碳浓度(C_L)以及真空室内平均碳浓度(C_V)随时间变化的关系式,从而得到相关的计算结果。

利用 CFX 软件中的 CEL(CFX Expression Lan-

guage)语言描述脱碳反应过程中碳浓度的变化情况,对精炼过程中的碳浓度分布进行瞬态模拟,得到脱碳过程中不同时刻钢包内的碳浓度分布情况,进而求得钢包内平均碳浓度(C_L)的模拟结果。

2 数值模拟结果与讨论

2.1 钢包内钢液的流动行为

由模拟结果(图 3)可以看出,在现有条件下,钢包内钢液的主要流线是:下降管—包底—包壁—上升管。从下降管流出具有较大动能的钢液为钢包中钢液的流动提供了主要能量,在钢包内形成了一些回流区,这些回流区决定了钢液的混合传质特性。从图 3(a)可以看到两个明显的回流区,一个是上升管到下降管之间形成的主回流区,即从下降管流到钢包底部的钢液沿钢包壁上升过程中,一部分钢液流向上升管,由于受到提升气体的抽吸作用,速度有所增大;一部分钢液在钢包中下部流向下降流股从而形成回流区;还有一小部分钢液继续沿钢包壁上升,速度逐渐减小。另一个钢液回流区形成于下降管和钢包壁之间,该区域较为独立,钢液成分变化通过下降管流股的扩散传质实现。从模拟结果来看,该区域靠近液面处的钢液速度较小,因此会影响钢液成分的均匀化。

由图3(b)、(c)可以看出,从下降管流出的钢液

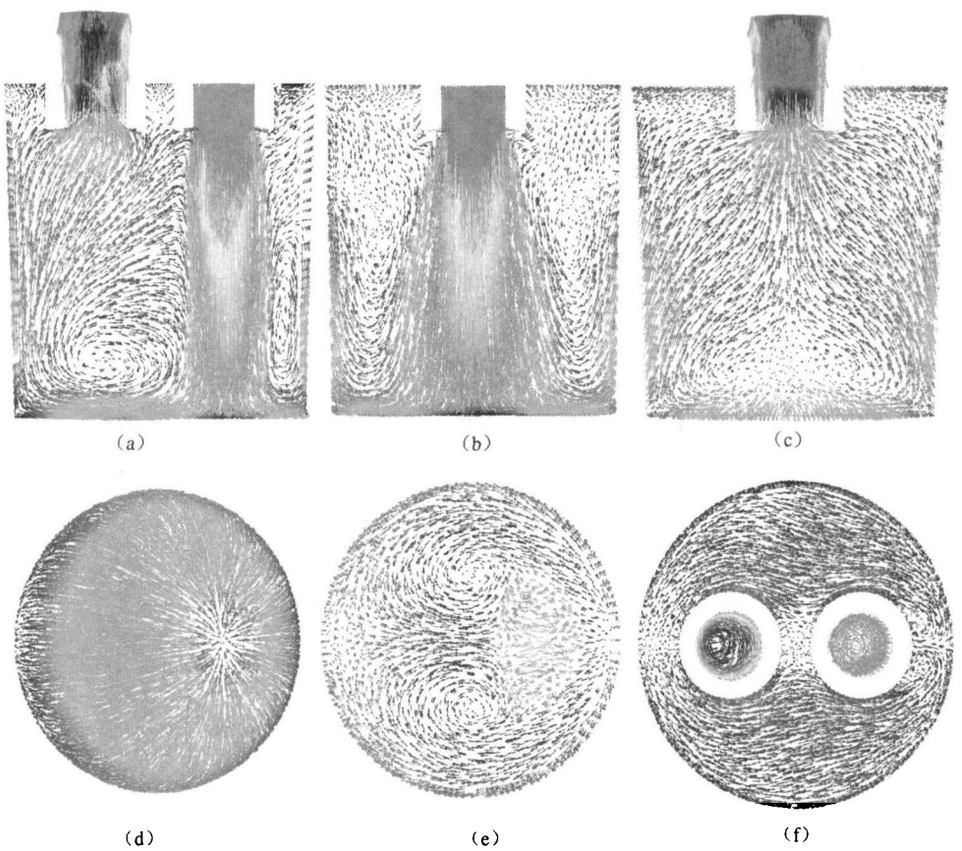


图 3　钢包不同截面处钢液速度矢量

Fig.3　Velocity vector diagrams of molten steel at different cross - sections

流股周围形成了两个明显的循环区,该流股与其周围钢液之间存在一个界面层,为典型的液 - 液两相流。在上升管下部所对应的回流区中心,钢液速度较小,从而影响钢液成分的均匀化。

图 3(d)、(e)、(f)分别为钢包底部附近、钢包中部以及钢液面附近的钢液流动状态,可以看出,钢液流股以较强的冲击力撞击钢包底部之后,呈辐射状向四周分散,在钢包底和钢包侧壁交界处钢液流速较小。钢包中部位于两浸渍管中心所在直线的两侧,分别存在一个钢液回流区。此外,沿钢包壁上升到钢包中部的钢液会流向下降流股,对其产生一定的冲击作用。钢液表面处的钢液速度很小,说明钢液面波动较小,不会产生"卷渣"现象。

2.2 RH - MFB 精炼过程中钢液碳浓度变化及分布情况

利用所建立的数学模型,分别对炉次 1 和炉次

2的脱碳过程进行模拟，其初始碳含量分别为 287×10^{-6} 和 314×10^{-6}，吹氩流量取平均值为3 000 L/min，模拟结果如图4所示。从图4可以看出，脱碳处理前10 min，钢包内平均碳浓度降低很快，随着脱碳反应进行，脱碳速率逐渐降低。大约在18 min，炉次1和炉次2的钢包内平均碳浓度均达到 10×10^{-6} 以下。通过公式(2)计算得到各个时刻碳浓度平均值、由数值模拟得到的结果以及钢液碳浓度在不同时刻的实测数据，这三者在总体上吻合较好，证明了数学模型的合理性。

为了能够更好地实现超低碳钢生产，有必要对脱碳后期钢包内的碳浓度分布情况进行分析。图5为炉次1和炉次2分别在1 090 s和1 120 s时刻，钢包内平均碳浓度达到 10×10^{-6} 时钢包内碳浓度的分布情况。从图5可以看出，脱碳后期，尽管下降管与钢包壁之间以及钢液面附近的碳浓度相对较高，但是整个钢包内的碳浓度梯度很小，钢液成分基本均匀。

2.3 工艺设备因素对脱碳过程的影响

2.3.1 吹氩流量对钢液流场及碳浓度场的影响

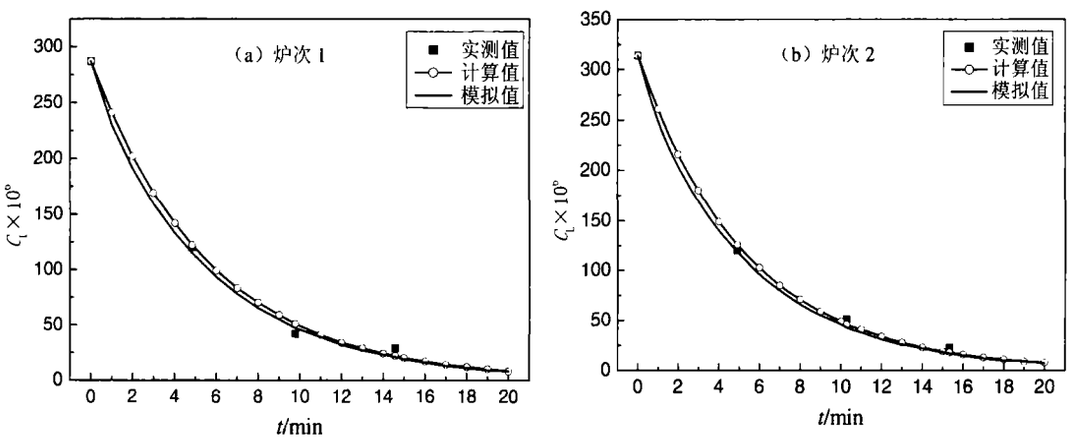


图4 模拟结果与实测值、公式计算值的比较

Fig.4 Comparison among simulation results, calculated results and measured value

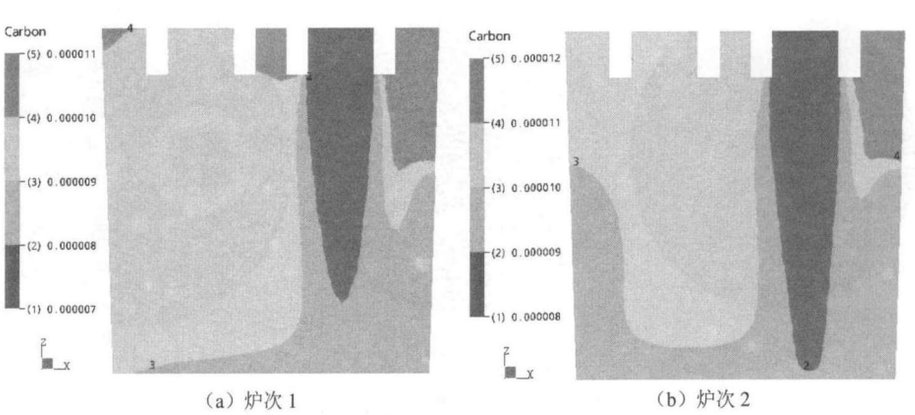


图5 脱碳后期碳浓度分布情况

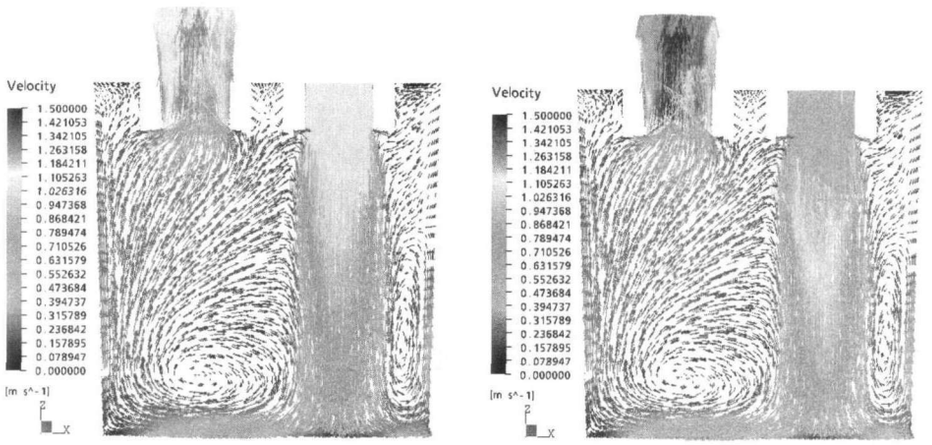
Fig.5 Carbon concentration distribution at last stage of decarburization

对上升管直径均为750 mm，初始碳含量均为 314×10^{-6}，吹氩流量分别为3 000 L/min和3 500 L/min时的条件进行数值模拟。图6是不同吹氩流量下的钢液流场，图7是脱碳处理过程中钢液平均碳浓度随时间的变化情况，图8是15 min时钢包内的碳浓度分布情况。

由图6~8可以看出，吹氩流量增大，钢包内钢液循环流量增大，从下降管流出的钢液速度相应增大，整个钢液的循环流动增强，因而钢液的脱碳速率有所提高。增大循环流量后，钢包内的平均碳浓度在17 min时达到 10×10^{-6}，与原有条件相比缩短了70 s。

2.3.2 浸渍管直径对钢液流场及碳浓度场的影响

上升管直径分别为750 mm和800 mm，初始碳含量均为 314×10^{-6}，吹氩流量均为3 000 L/min时



(a) 吹氩流量 3 000 L/min　　(b) 吹氩流量 3 500 L/min

图 6　不同吹氩流量时的钢液流速对比

Fig.6　Comparison on molten steel velocity at different argon blowing flow

的条件进行数值模拟。图 9 是不同浸渍管直径下的钢液流场,图 10 是脱碳处理过程中钢液平均碳浓度随时间的变化情况,图 11 是 15 min 时钢包内的碳浓度分布情况。

由图 9 ~ 11 可以看出,浸渍管直径增大,钢液循环流量明显增大,尽管从下降管流出的钢液速度有所降低,但整个钢液循环流动增强,因此,钢液的脱碳速率提高。增大浸渍管直径后,钢包内的平均碳浓度在 16 min 时达到 10×10^{-6},与原有条件相比缩短了 130 s。与增大吹氩流量相比,增大浸渍管的直径能更有效地提高钢液的脱碳速度,从而有利于缩短脱碳处理时间。

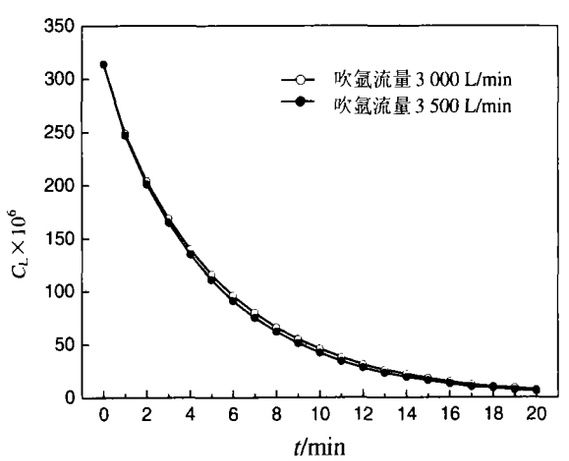
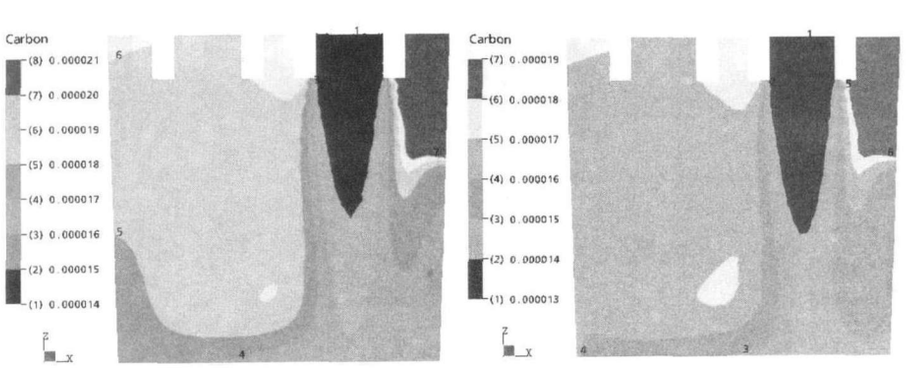


图 7　不同吹氩流量下钢包内平均碳浓度的变化

Fig.7　Variation of average carbon concentration in ladle with different argon blowing flow

3　结论

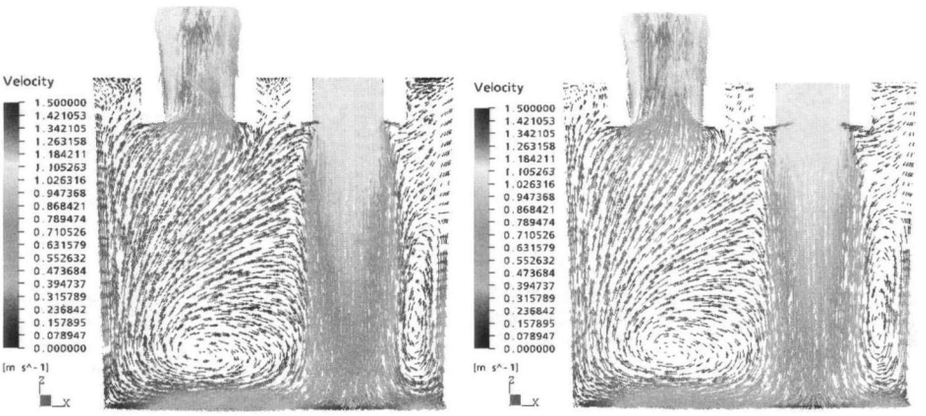
(1)RH - MFB 钢包内的钢液在流动过程中形成



(a) 吹氩流量 3 000 L/min　　(b) 吹氩流量 3 500 L/min

图 8　不同吹氩流量下的碳浓度分布情况对比

Fig.8　Comparison of carbon concentration distribution at different argon blowing flow



(a) 浸渍管直径 750 mm (b) 浸渍管直径 800 mm

图 9 不同浸渍管直径时的钢液流速对比

Fig.9 Comparison on molten steel velocity with different snorkel diameter

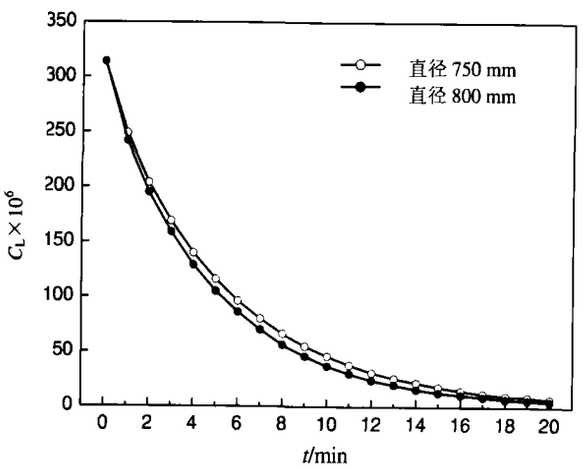


图 10 浸渍管直径对脱碳过程的影响

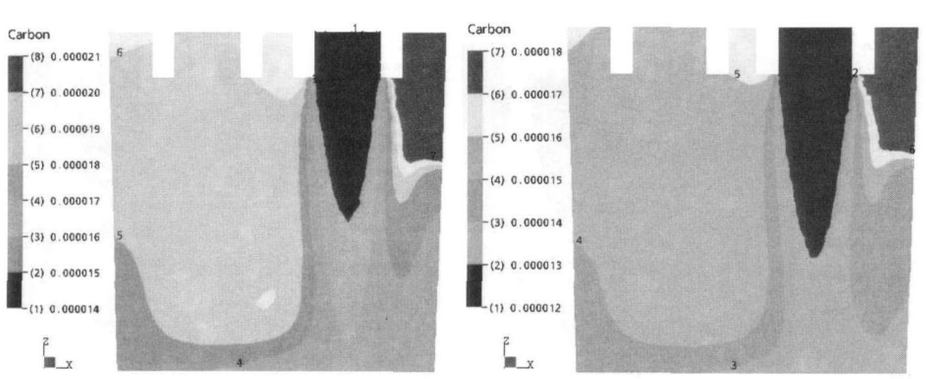
Fig.10 Influence of snorkel diameter on decarburization process

回流区,主要包括上升管到下降管之间形成的主回流区和下降管与钢包壁之间形成的回流区,它们决定了钢液的传质特性。

(2)在主回流区内,钢液从下降管流到钢包底部并沿钢包壁上升的过程中,主要分为三种运动形式:一部分钢液流向上升管,由于受到提升气体的抽吸作用,速度有所增大;一部分钢液在钢包中下部流向下降流股从而形成回流区;还有一小部分钢液继续沿钢包壁上升,速度逐渐减小。

(3)对两个炉次的脱碳过程进行数值模拟,得到的模拟结果与公式计算结果以及实测数值吻合较好,说明了所建立的数学模型的合理性。

(4)钢包内平均碳浓度达到 10×10^{-6}时,尽管钢包内下降管与钢包壁之间以及钢液面附近的碳浓



(a) 浸渍管直径 750 mm (b) 浸渍管直径 800 mm

图 11 不同浸渍管直径时的碳浓度分布情况对比

Fig.11 Comparison of carbon concentration distribution with different snorkel diameter

度相对较高,但是整个钢包内的碳浓度梯度很小,钢液成分基本均匀。

(5)吹氩流量从 3 000 L/min 增大到 3 500 L/min 时,钢液循环流量增大,从下降管流出的钢液速度增大,钢液的脱碳速率有所提高,钢包内的平均碳浓度在 17 min 时达到 10×10^{-6},与原有条件相比缩短了 70 s。

(6)上升管直径从 750 mm 增大到 800 mm 时,钢液循环流量明显增大,尽管从下降管流出的钢液速度有所降低,但是整个钢液循环流动增强,因此,钢液的脱碳速率提高,钢包内的平均碳浓度在 16 min 时达到 10×10^{-6},与原有条件相比缩短了 130 s。

参考文献:

[1] Cha Jinrong, Chen Jiayong. Principle of Transferring Process and Its Application[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997. 94 - 113.
(查金荣,陈家镛. 传递过程原理及应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1997.94 - 113.)

[2] Kato Y, Nakato H, Fujii T, *et al*. Fluid Flow in Ladle and Its Effect on Decarburization Rate in RH Degasser[J]. ISIJ International, 1993, 33(10): 1084 - 1088.

[3] Yamaguchi K, Kishimoto Y, Sakuraya T. *et al*. Effect of Refining Conditions for Ultra Low Carbon Steel on Decarburization Reaction in RH Degasser[J]. ISIJ International, 1992, 32(1): 126 - 135.

编辑　余文华

欢迎订阅 2008 年《铁合金》杂志

《铁合金》杂志是国家科委、国家新闻出版署批准公开发行的科技期刊,由中钢吉林铁合金股份有限公司主办,是我国铁合金行业唯一具有一定权威性的专业技术期刊,也是我国冶金工业类学科的全国中文核心期刊。本刊已连续多年入选为中国科技论文统计源期刊。

《铁合金》杂志主要介绍我国铁合金工业及其相关行业的生产技术、科学试验、理论研究、经营管理、市场信息,工艺、产品、设备的开发与更新,质量监督以及环境保护与综合利用、元素检测等方面的经验成果,并及时报道国内外先进技术和发展动态。

《铁合金》杂志为双月刊(大 16 开 48 版),双月月底出版,单价 10 元/本(过刊价格相同),全年每份订价 60 元(含邮费)。若需挂号,全年另加收挂号费 18 元。订户可通过邮局订阅或直接汇款至编辑部,汇款单和回执上请注明所订数量及收件人姓名、详细地址及邮编。未尽事宜请与编辑部联系。本刊常年订阅。邮发代号:12 - 309。

开户行:工行吉林市分行哈达支行
帐号:0802210609000037826
帐户:吉林铁合金集团科技咨询公司
《铁合金》编辑部地址:吉林市和平街 21 号
邮编:132002　电话:0432 - 2707586　传真:0432 - 2711665