

文章编号:1000-582X(2012)01-076-05

描述底吹氩钢包内钢液混合效果的特征数方程

韩建军¹, 李士琦², 吴 龙²

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘 要:首先对钢包底吹氩气搅拌钢液系统进行分析, 确定对搅拌效果有影响的诸多因素。采用量纲分析方法, 得到描述底吹氩钢包内钢液混合效果的特征数方程模型。以某钢厂 LF 炉钢包为原型, 应用广义相似原理进行水力学模拟实验研究。实验结果经逐步回归分析得出适用于描述与研究几何相似的钢包炉内钢液受搅拌后混合效果的特征数方程。研究表明, 本研究考虑的 4 个决定性特征数对被决定性特征数 H_0 均有显著性影响, 其中最为显著的是气液密度比 π_ρ ; 进行钢包底吹氩搅拌钢液的水力学模拟研究时, 若采用某种常规气体代替原型中的氩气, 模型与原型间被决定性特征数的值会产生较大的差异。

关键词:炼钢; 精炼; 钢包; 搅拌; 混合

中图分类号:TF769.2

文献标志码:A

Characteristic number equation about describing mixing effect of steel stirred by argon in the ladle

HAN Jian-jun¹, LI Shi-qi², WU Long²

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China; 2. Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China)

Abstract: By analyzing the system of argon stirring molten steel in ladle, many affecting factors are determined. The model of characteristic number about describing mixing effect of steel stirred by argon in the ladle is gotten by dimensional analysis. Taking a ladle furnace of some steel plant as prototype, hydraulics simulation experiment is designed by generalized similarity principle. The equation for characteristic number about the mixing effect of steel in the ladle is gotten by stepwise regression, which is suitable for ladles whose geometric structure are similar to the ladle in this study. The results could be gotten as follows. The four decisive characteristic numbers that are considered are all significantly effective to H_0 . And gas-liquid density ratio π_ρ is the most remarkable among them. When doing some hydraulics experiment to simulate the phenomenon of molten steel stirred by argon from the bottom of ladle, using some conventional gas instead of argon could result in a great difference between the decided characteristic numbers of model and prototype.

Key words: steelmaking; refining; ladle; stir; mixing

收稿日期:2011-08-04

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2007BAF08B01-03)

作者简介:韩建军(1982-),男,汉,北京科技大学博士,清华大学博士后,主要从事钢铁冶金及节能减排的研究,
(E-mail)hanjianjun@139.com。

钢包精炼过程中,包内钢液的流动状况对钢液成分及温度的均匀性、钢液内夹杂物的上浮以及钢渣截面反应的动力学条件具有非常重要的影响^[1-4]。钢包底吹氩气搅拌钢液是一个高温、多变量、内部过程无法描述的复杂系统^[5-7]。钢包内钢液流动的驱动力主要来源于钢包底吹氩气的搅拌,搅拌效果受多种因素的影响,包括熔池的几何参数、钢包精炼过程的工艺参数以及气液两相的物理特性等。

国内外诸多学者^[8-13]采用传统相似理论,对钢包底吹氩气搅拌熔池的现象进行了研究。传统相似理论^[14,15]以相似三定理为必要条件,要求模型与原型间要服从几何相似、定解条件相似、独立的相似特征数个数及形式相同且数值相等。较多学者^[8,11,13]在处理相似模拟的特征数问题上,多采取回避的方法。在实验过程中,只做到了模型与原型的几何相似和修正弗劳德数相等,忽略了其他影响因素。

本研究采用量纲分析法,推导出描述钢包底吹氩气搅拌钢液现象的特征数方程模型。以某钢厂 180 t LF 钢包为原型,应用广义相似原理,采用水力学模拟实验方法,同时考虑多个决定性特征数,对钢包内钢液混合效果进行研究。

1 钢包底吹氩过程的系统分析

钢包底吹氩气搅拌钢液是目前钢铁冶金行业广泛应用且较为成熟的技术。氩气由包底透气砖进入熔池,形成气泡群;气泡群上浮过程带动钢液的流动,对包内钢液形成搅拌。底吹氩气对钢液的搅拌效果,受钢包的几何参数、包内气液两相的物理特性以及钢包精炼过程的工艺参数等因素的影响。其中,几何参数包括钢包底面内径 D 、包壁与底面夹角 θ 、透气砖位置 w 以及透气砖有效透气面积的当量直径 d_n 等;气液两相的物理特性包括气体密度 ρ_g 、液体密度 ρ_l 、重力加速度 g 等;工艺参数包括吹气流量 Q 、液面高度 H 等。

2 量纲分析及特征数方程

描述熔池混匀效果的优劣常采用混匀时间 τ 进行评价。根据经典相似理论白金汉 π 定理^[14]可知,混匀时间 τ 与上述各影响因素间关系的方程式可表示为:

$$\varphi(\tau) = f(D, \theta, W, d_n, \rho_g, \rho_l, g, u, H), \quad (1)$$
式中: W 为透气砖位置 w 量化的量纲为 1 的“权”值; θ 为包壁与底面夹角,是一个量纲为 1 的量;其他各物理量的基本量纲包括:长度 $L[L]$,时间 $t[T]$ 和质量 $m[M]$ 。上式各物理量的量纲如表 1 所示。

表 1 各物理量的量纲

	τ	D	θ	W	d_n	ρ_g	ρ_l	g	u	H
单位	s	m	1	1	m	kg/m ³	kg/m ³	m/s ²	m/s	m
量纲	T	L	1	1	L	ML ⁻³	ML ⁻³	LT ⁻²	LT ⁻¹	L

式(1)中涉及的物理量有 10 个,其中有 3 个物理量的量纲是独立的。各物理量之间可导出 7 个量纲为 1 的特征数,分别为:谐时性特征数 $H_0 = \frac{u\tau}{D}$,修正弗劳德数 $Fr' = \frac{u^2 \rho_g}{gD\rho_l}$,气液密度比 $\pi_\rho = \frac{\rho_l}{\rho_g}$,径深比 $\pi_H = \frac{H}{D}$,吹位 W , $\pi_{d_n} = \frac{D}{d_n}$, θ 。其中, u 为特征速度,本研究取底吹气体进入钢包内的初始速度。则式(1)可表示为:

$$\varphi(H_0) = f[Fr', \pi_\rho, \pi_H, \pi_{d_n}, W, \theta]. \quad (2)$$

对于某个钢包而言, $\frac{d_n}{D}$ 和 θ 通常无变化,可不作考虑。依据量纲和谐的原理^[15,16],式(2)可以表示为:

$$H_0 = K(Fr')^a (\pi_\rho)^b (\pi_H)^c (W)^d. \quad (3)$$

其中, K, a, b, c, d 为待定系数。式(3)即为钢液流动的特征数方程。 H_0 为被决定性特征数,对应的物理量为混匀时间 τ ; Fr' 、 π_ρ 、 π_H 和 W 为决定性特征数,对应的物理量为吹气流量 Q 、气体密度 ρ_g 、熔池深度 H 和透气砖位置 w 。

式(3)两边同时取对数可将特征数模型线性化,即:

$$\lg H_0 = k + a \lg Fr' + b \lg \pi_\rho + c \lg \pi_H + d \lg W, \quad (4)$$

其中, $k = \lg K$ 。

3 模拟实验

3.1 原型工况条件

本研究中 LF 炉钢包公称容量为 180 t,钢包上口内径为 3 082 mm,钢包下口内径为 2 590 mm,内部总高度为 4 340 mm,液位深度为 3 640 mm,透气砖有效透气面积为 95 mm²。钢包内部尺寸结构示意图如图 1 所示。透气砖的拟安装位置如图 2 所示,其中,位置③为现用工况,图中的其他透气砖位置为本研究中拟评的吹气位置。各安装位置的具体内容分别为:①、⑤为 0.5R;②、⑦为 0.6R;③、⑥为 0.7R;④、⑧为 0.75R。

现场底吹搅拌钢液用的气体为氩气,吹气流量为 18~27 m³/h。

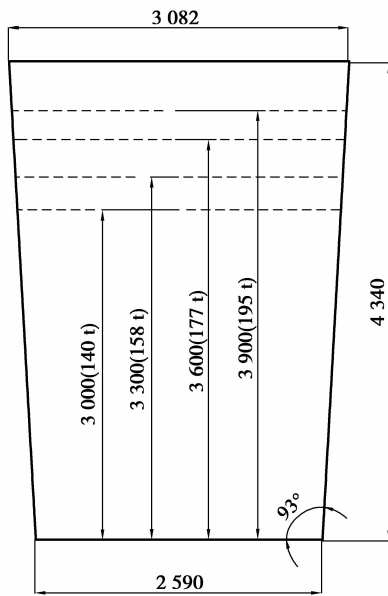


图 1 钢包内部尺寸结构示意图

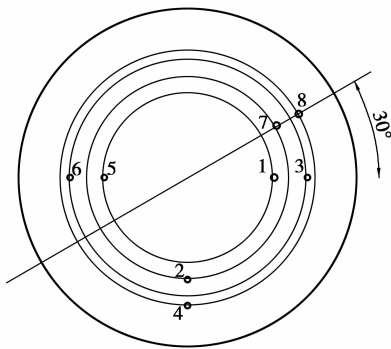


图 2 大包透气砖的拟安装位置

3.2 实验方法及原理

钢包底吹氩气搅拌钢液是一个高温且复杂的过程,进行高温工业实验研究难度大且成本高。本研究采用水力学模拟实验,对此现象进行研究。

模拟研究的基础是相似原理,传统相似原理在要求几何相似和定解条件相似外,还需服从独立的相似特征数个数及形式相同且数值相等。应用传统相似原理对钢包底吹氩气搅拌钢液的现象进行研究,难以实现原型和模型间多个相似特征数的均对应相等的条件。李士琦、季淑娟^[16,17]研究现象的广义相似时提出,特征数取值存在着一定宽度的区间,在线性关系显著的区间内可用“覆盖”取代“特征数对应相等”。

本实验以广义相似原理为理论基础,采用水力学模拟方法进行模拟研究。研究中以 H_0 为被决定性特征数, Fr' 、 π_p 、 π_H 和 W 为决定性特征数。各个

决定性特征数在取值范围上做到对原型的决定性特征数的覆盖。

水力学模拟实验过程中,采用“刺激-响应”实验方法测得模型的混匀时间;即待熔池流场稳定后向熔池内加入一定量的示踪剂(200 mL 饱和 KCl 溶液);示踪剂加入的同时,在熔池中几何最远处的两点测量水溶液的电导率随时间的变化规律。数据采集仪器为多功能监测系统 DJ800;混匀时间根据监测点的电导率波动不超过稳定值的 5% 来确定。实验装置示意图如图 3 所示。

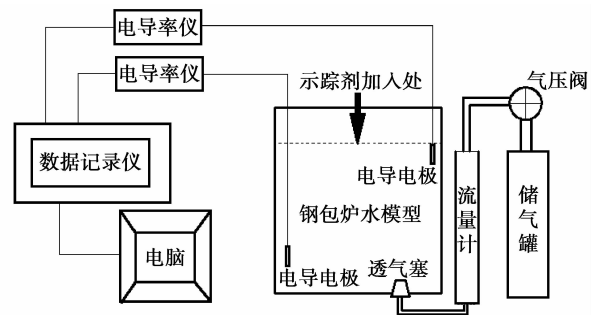


图 3 实验装置示意图

3.3 实验设计及方案

本研究模型与原型的几何相似比例定为 1 : 3.5。各决定特征数的取值如表 2 所示。其中,特征数 π_p 的 4 个取值对应的气体分别氢气、氮气、氧气和氩气。

表 2 各决定性特征数的取值

水平	决定性特征数			
	W	$Fr' (\times 10^{-4})$	π_p	π_H
1	①	173	11 200	1.158
2	②	308	800	1.274
3	③	693	700	1.404
4	④	1 559	560	1.505
5	①+⑤			
6	③+⑥			
7	②+⑦			
8	④+⑧			
原型	③	173~1 553	3 993	1.158~1.505

按照正交表安排实验,根据选定的因子数及其对应的水平数,选用由标准正交表 $L_{32}(2^{31})$ 通过变列

处理得到的 $L_{32}(8 \times 4^3 \times 2^{15})$ 表, 正交表及表头设计从略。每组方案各进行 3 次实验, 共进行实验 96 次。

4 模拟实验结果分析

4.1 吹气位置的量化

由于影响因子吹气位置为非数值量, 回归分析时应将其转化为数值量。本研究采用作图法将吹气位置进行量化(具体变换方法可见文献[5])。各吹气位置对应的“权”值见表 3。

4.2 特征数方程

由各组实验的混匀时间平均值可得对应方案的

表 3 各吹位方案所对应的吹位权值

吹位方案	1	2	3	4	5	6	7	8
$\lg H_0$	3.085	3.112	3.146	3.161	3.147	3.167	3.150	3.209
$\lg W$	0.100	0.253	0.443	0.530	0.451	0.566	0.467	0.800
W	1.260	1.790	2.774	3.387	2.823	3.684	2.931	6.315

表 4 逐步回归分析结果

		回归系数	P 值
1	k	1.50	7.9×10^{-11}
	$\lg \pi_\rho$	0.52	6.7×10^{-12}
2	k	0.71	1.5×10^{-04}
	$\lg \pi_\rho$	0.52	3.6×10^{-16}
	$\lg(Fr' \times 10^4)$	0.30	7.8×10^{-07}
3	k	0.58	6.1×10^{-04}
	$\lg \pi_\rho$	0.52	2.7×10^{-17}
	$\lg(Fr' \times 10^4)$	0.30	9.4×10^{-08}
	$\lg \pi_H$	1.07	4.5×10^{-03}
4	k	0.50	1.5×10^{-03}
	$\lg \pi_\rho$	0.52	6.9×10^{-18}
	$\lg(Fr' \times 10^4)$	0.30	2.3×10^{-08}
	$\lg \pi_H$	1.07	2.2×10^{-03}
	$\lg W$	0.18	1.8×10^{-02}

将式(5)还原成乘积形式即可得本研究中 LF 炉钢包内钢液受搅拌后混合效果的特征数方程:

$$H_0 = 50.12 \pi_\rho^{0.52} Fr'^{0.30} W^{0.18} \pi_H^{1.07}. \quad (6)$$

式(6)适用于描述一类关于钢包底吹氩气搅拌钢液的现象, 钢包内腔壁面与包底夹角 θ 为 93° 。

谐时性特征数。采用 Origin 软件进行逐步回归分析, 分析结果见表 4。可以看出, 各决定性特征数的对数指标对被决定性特征数的对数指标的显著性均显著, 其显著性信度水准均较高 ($P > 0.05$)。各特征数的对数指标存在着如下关系:

$$\lg H_0 = 0.50 + 0.52 \lg \pi_\rho + 0.30 \lg(Fr' \times 10^4) + 0.18 \lg W + 1.07 \lg \pi_H$$

即

$$\lg H_0 = 1.70 + 0.52 \lg \pi_\rho + 0.30 \lg Fr' + 0.18 \lg W + 1.07 \lg \pi_H. \quad (5)$$

在钢包盛钢量为 180t (熔池深度 H 约为 3.65 m), 吹位方案为原工况吹位方案(实验中的方案 3, 对应权值 $W = 2.774$), 底吹气体为氩气 ($\pi_\rho = 3.993$) 条件下, 原型钢包内钢液的混匀时间 τ 与底吹气体流量 Q 之间关系可表示为:

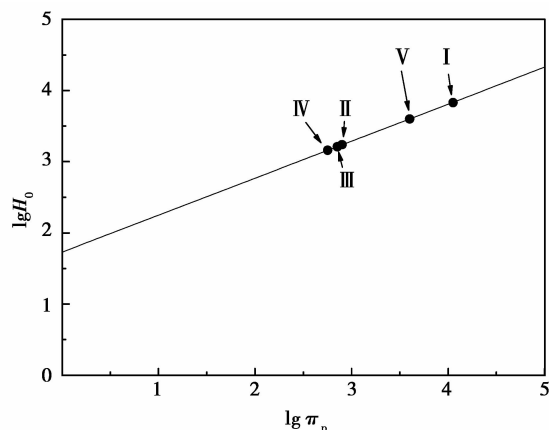
$$\tau = 31.79 Q^{-0.4}.$$

4.3 讨论

采用水力学模拟实验方法对钢包底吹氩气搅拌钢液的现象进行研究, 最难实现的是原型和模型间的气液密度比相等。应用传统的相似原理, 则必须保证原型与模型间各个特征数一一对应相等。由此使得诸多学者在应用传统相似原理研究钢包底吹氩气搅拌钢液的现象过程中, 回避了气液密度比这个重要的特征数。

由上述对实验结果的分析可知, 气液密度比 π_ρ 对谐时性特征数 H_0 的影响最为显著, 模拟研究过程中回避气液密度比 π_ρ , 势必导致原型和模型间物理特性的不相似。

取 $Fr' = 0.1553$, $\pi_H = 1.505$, $W = 2.774$, 可作出谐时性特征数 H_0 与气液密度比 π_ρ 间取对数值的关系图, 见图 4。图中编号为 I~IV 的 4 个点对应的是本研究实验中 4 个气液密度比, 编号为 V 的点对应的是原型的现行工况(即气液两相分别为氩气和钢液)。由图可知, 实验研究过程采用某种常规气体进行模拟, 模型与原型间被决定性特征数的值存在差异。

图 4 $\lg H_0$ 与 $\lg \pi_p$ 的关系图

5 结 论

1) 本研究对钢包底吹氩气搅拌钢液过程进行了系统分析, 确定出对搅拌效果有影响的诸多因素。

2) 经量纲分析, 得出钢包内钢液流动的特征数方程模型。

3) 以某钢厂 180 t LF 炉钢包为原型, 广义相似原理为理论基础, 采用水力学模拟方法进行实验研究, 得出适用于钢包内腔壁面与包底夹角 θ 为 93° 的一类关于钢包内钢液受底吹气体搅拌后混合效果的特征数方程为:

$$H_0 = 50.12\pi_p^{0.52} Fr'^{0.30} W^{0.18} \pi_H^{1.07}.$$

4) 研究表明, 本研究考虑的 4 个决定性特征数对被决定性特征数 H_0 均有显著性影响, 气液密度比 π_p 的影响是最为显著。

5) 进行钢包底吹氩搅拌钢液现象的水力学模拟研究时, 若采用某种常规气体, 模型与原型间被决定性特征数的值将存在较大的差异。

参考文献:

- [1] NAKANISHI K, FUJII T, SZEKELY J. Quality and yield improvement using method of blowing Argon stirring[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 1995(2): 193-196.
- [2] 温德松, 李京社, 谢翠红, 等. 150t 钢包精炼过程的物理模拟[J]. *北京科技大学学报*, 2007, 29(S1): 101-103.
WEN DE-SONG, LI JING-SHE, XIE CUI-HONG, et al. Physical model of 150t ladle refining process[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, 29(S1): 101-103.
- [3] 朱苗勇, 萧泽强. 钢的精炼过程数学物理模拟[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1998.
- [4] KRISHNAKUMAR K, BALLAL N B. Effect of vacuum on mixing behavior in a ladle—a water model study[J]. *ISIJ International*, 1999, 39(11): 1120-1124

- [5] WARZECHA M, JOWSA J, MERDER T. Gas mixing and chemical homogenization of steel in 100 t ladle furnace[J]. *Metalurgija*, 2007, 46(4): 227-232.
- [6] 李士琦, 林纲, 庞永刚, 等. 150 吨桶型钢包吹氩制度的反应工程学[J]. *过程工程学报*, 2008, 8(S1): 27-30.
LI SHI-QI, LIN GANG, PANG YONG-GANG, et al. Reaction engineering research of argon blowing to 150 t vertical ladle furnace [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2008, 8(S1): 27-30.
- [7] CHATTOPADHYAY K, SENGUPTA A, AJMANI S K, et al. Optimisation of dual purging location for better mixing in ladle; a water model study [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2009, 36(7): 537-542.
- [8] WU L, VALENTIN P, SICHEN D. Study of open eye formation in an argon stirred ladle[J]. *Steel Research International*, 2011, 81(7): 508-515.
- [9] PATIL S P, SATISH D, PERANANDHANATHAN M, et al. Mixing models for slag covered, argon stirred ladles[J]. *ISIJ International*, 2010, 50(8): 1117-1124.
- [10] 郑淑国, 朱苗勇. 钢包内喷嘴与透气砖吹氩去夹杂水模型研究[J]. *金属学报*, 2006, 42(11): 1143-1148.
ZHENG SHU-GUO, ZHU MIAO-YONG. Water model study on removing inclusions in a ladle with argon injected through nozzle and porous plug[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2006, 42(11): 1143-1148.
- [11] 幸伟, 倪红卫, 沈巧珍, 等. 130t 钢包底吹氩喷嘴布置模式优化的水模型试验[J]. *特殊钢*, 2007(4): 13-15.
XING WEI, NI HONG-WEI, SHEN QIAO-ZHEN, et al. Experiment on optimum location of bottom nozzle in an 130 t argon stirred ladle by water model [J]. *Special Steel*, 2007(4): 13-15.
- [12] JONSON L. Modeling of fluid flow conditions around the slag/metal interface in a gas-stirred ladle[J]. *ISIJ International*, 1996, 36(9): 1127-1134.
- [13] WEI P, KOYAMA S. Cold model experiment on entrapment of inclusions in steel by inert gas bubble[J]. *Tetsuto-Hagane*, 1992, 78(8): 1369-1376.
- [14] 沈巧珍, 杜建明. 冶金传输原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [15] CHATTOPADHYAY K, SENGUPTA A, AJMANI S K, et al. Optimisation of dual purging location for better mixing in ladle; A water model study [J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2009, 36(7): 537-542.
- [16] 季淑娟. 现象广义相似的观察与研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2005.
- [17] 季淑娟, 李士琦. 熔池底吹搅拌的广义相似试验研究 [J]. *中国有色冶金*, 2005(2): 26-29.
JI SHU-JUAN, LI SHI-QI. Generalized similarity experimental investigation on bottom-blowing stirring in bath smelting [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2005(2): 26-29.