

顶吹转炉水模型渣金边界组织的分维数

陈 韧, 邹宗树

(东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 依据相似定理, 通过二维水模型模拟顶吹转炉吹炼过程. 利用数码相机进行摄影, 通过对图像的计算机处理, 研究了顶吹过程中炉渣与钢液母相边界的变化. 应用分形理论对其边界的结构分维数及无量纲长度进行了计算. 结果表明, 吹炼过程中枪位、吹气流量及渣金比对炉渣与钢液母相边界的结构分维数影响较大, 其中流量为主要影响因素. 得出了三者对结构分维数的影响及结构分维数对无量纲长度影响的经验关系式, 渣金母相边界结构分维数是评价二维渣金母相边界长度的重要依据. 分形理论可以为转炉吹炼过程中渣金母相边界的量化计算提供一种有效的方法.

关键词: 炼钢转炉; 水模型; 渣金边界; 结构分维数

中图分类号: TF7 文献标识码: A 文章编号: 1009-606X(2005)01-0103-04

1 前言

顶吹转炉吹炼中, 反应过程与反应界面面积有很大关系. 反应界面面积除了连续相(钢液或炉渣)中分散相(渣滴或钢液滴)的表面积外, 还应包括渣金母相界面面积. 在以往的研究中, 为了对界面面积进行定量计算, 都假定母相的边界维数为整数维. 由于受统计理论的影响, 不论是数值计算还是实验获得的等浓度(或等温度)线, 几乎都被描绘成连续的光滑曲线, 其理论基础是建立在欧几里得几何学基础之上的^[1-3]. 然而, 正如自然界的线面并不都是光滑的一样, 在转炉吹炼过程中由于湍流的产生使渣金母相界面往往是粗糙、破碎的, 其二维边界曲线处处连续但不可微, 数学上称其为“病态曲线”. 20世纪70年代Mandelbrot提出的分形几何学正是用来描述这些形态极不规则或极为破碎的几何对象^[4,5]. 本工作利用水模型对转炉顶吹过程进行实验室模拟, 在不同边界条件下, 从分形理论出发, 对炉渣与钢液母相二维边界曲线的分维数进行模拟计算.

2 实验设备及分析方法

2.1 实验设备

采用有机玻璃模型模拟转炉的纵向断面, 实验装置见图1. 由空气压缩机、储气罐、流量计提供稳定气源. 以水模拟钢液、油模拟炉渣, 利用数码相机进行图像采集(分辨率为0.277 mm×0.277 mm), 对得到的准二维图像进行计算机处理, 对渣金母相边界的分维数进行计算. 实验参数见表1.

表1 实验主要参数

Table 1 Main parameters of experiment

Parameter	Converter	Water model
Height (mm)	4800	800
Diameter (width) (mm)	3000	500
Thickness (mm)	-	50
Bath depth (mm)	708	118
Blowing mode	Top-blowing	Top-blowing
Blowing gas (Nm ³ /h)	Tonnage oxygen	Air
Density of melt (kg/m ³)	7000	1000
Density of converter slag (kg/m ³)	3200	808
Diameter of throat (mm)	38	6.3
Angle of throat	12	12
Number of throat	4	4
Throat circle diameter (mm)	140	23.3

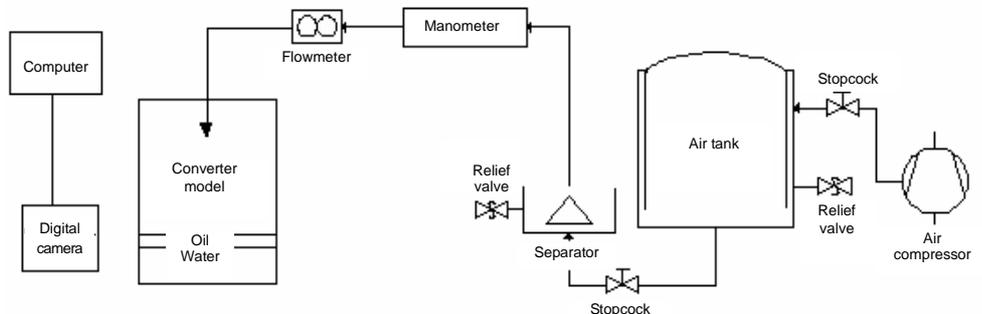


图1 实验装置图

Fig.1 Experimental apparatus

收稿日期: 2004-03-23, 修回日期: 2004-04-28

作者简介: 陈韧(1970-), 男, 辽宁省本溪市人, 博士研究生, 研究方向: 分形理论在钢铁冶金中的应用; 邹宗树, 通讯联系人, Tel: 024-83687724, E-mail: zouzs@mail.neu.edu.cn.

为保证模型和原型的动力相似,主要保证模型的修正 Froude 准数 Fr_m 与原型的修正 Froude 准数 Fr'_m 相等:

$$Fr_m = Fr'_m = \frac{\rho_g V^2}{\rho_s g d} \quad (\text{修正的弗罗德准数}),$$

$$\frac{\rho_a V_m^2}{\rho_w g d_m} = \frac{\rho_{O_2} V_{O_2}^2}{\rho_s g d_f}$$

$$\frac{V_m}{V_{O_2}} = \left(\frac{\rho_{O_2} \rho_w}{\rho_a \rho_s} \right)^{1/2} \left(\frac{d_m}{d_f} \right)^{1/2} = \left(\frac{1.43 \times 1000}{1.20 \times 7000} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{6} \right)^{1/2} = 0.1684.$$

又:

$$Q_m = V_m \left(\frac{\pi}{4} n d_m^2 \right) \times 3600,$$

$$Q_{O_2} = V_{O_2} \left(\frac{\pi}{4} n d_f^2 \right) \times 3600,$$

$$Q_m/Q_{O_2} = (V_m/V_{O_2}) (d_m/d_f)^2 = 0.1684 \times (1/6)^2 = 0.444678.$$

2.2 图像的数字化处理

由数码相机得到不同边界条件下的数码图像,编制程序提取渣金母相边界图像,并对其分维数进行计算.

渣金母相边界分维数的计算应用“数盒子”(Box counting)法,在图像分析程序中应用直径为 ε 的圆分割分形图像进行空间量子化,然后利用分形计算程序对所研究的形状中所含圆的个数 $N(\varepsilon)$ 进行计数,即计算出含有分形图像像素(至少 1 个)的所有圆的个数. 由分维的数学定义:假定 $D > 0$,用直径为 ε 、个数为 $N(\varepsilon)$ 的圆覆盖集合 S ,则 D 维测度 M_D 表示为

$$M_D = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \gamma(D) N(\varepsilon) \varepsilon^D \quad (1)$$

式中 $\gamma(D)$ 为几何因子,对于圆 $\gamma(D) = \pi/4$. 测量渣金边界的码尺为 ε ,覆盖图像中全部渣金边界的码数为 $N(\varepsilon)$,由式(1)有:

$$N(\varepsilon) \propto \varepsilon^{-D}, \quad (2)$$

这样由渣金边界长度 $L(\varepsilon) = N(\varepsilon)\varepsilon$ 就可得到:

$$L(\varepsilon) \propto \varepsilon^{1-D}. \quad (3)$$

因此,改变 ε 的大小得到 1 组 $\varepsilon-L(\varepsilon)$ 值,将 $L(\varepsilon)$ 或 $N(\varepsilon)$ 与 ε 绘制在双对数坐标上,利用线性回归方法确定的直线斜率即为分维数 D . 表 2 为应用该方法得到的 $N(\varepsilon)-\varepsilon$ 及对应双对数直线的斜率值即分维数. 由于实验中渣-金(油-水)母相边界为动态界面,因此在实验中控制顶吹强度达到稳定值后,利用数码相机连续自动拍摄 10 幅,抓拍时间为每幅 0.04 s. $N(\varepsilon)-\varepsilon$ 直线斜率取 10 幅数码图像提取边界的平均值.

表 2 $\ln(\varepsilon)$ 与 $\ln N(\varepsilon)$ 关系举例

ε	$\ln(\varepsilon)$	$\ln N(\varepsilon)$			
1	0	7.967	7.932	7.878	7.981
2	0.693	7.261	7.210	7.166	7.251
3	1.099	6.841	6.774	6.706	6.782
4	1.386	6.537	6.438	6.399	6.469
5	1.609	6.304	6.209	6.161	6.225
6	1.792	6.100	6.011	5.940	6.004
D	-	1.040	1.077	1.080	1.103
R	-	1.000	1.000	1.000	1.000

原始图像及图像处理过程见图 2,曲线为渣金母相边界.

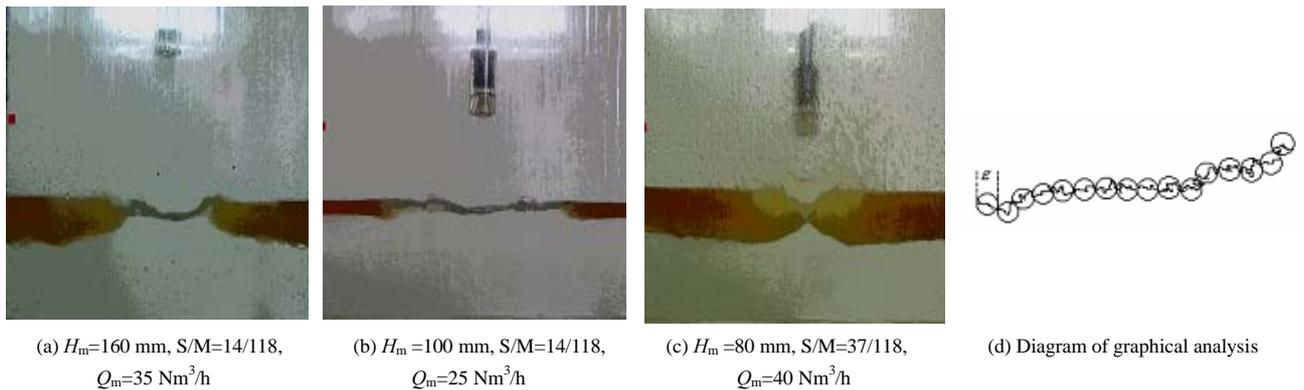


图 2 原始实验数码图像及图像处理示意

Fig.2 Original digital photos and diagram of graphical analysis [(a), (b) and (c) are original digital photos]

3 实验结果与分析

3.1 吹炼条件对渣金母相边界结构分维数的影响

实验在 20~160 mm 范围内选取 8 个枪位, 20~40 Nm^3/h 范围内选取 5 个流量, 选取(14~45)/118 五个不同

渣金比测定了渣金母相边界结构分维数 D_T 与枪位、流量及渣金比的关系, 见图 3. 在一定流量及渣金比条件下, 随枪位降低, 顶吹射流强度增加, 渣金母相边界粗糙度增加, D_T 增加, 渣金比越大, D_T 增加的趋势越小, 即渣金边界抵抗变形的能力越强, 则渣金母相边界提供

的反应界面越小. 因此在吹炼过程中还应综合考虑以分散相形式存在于炉渣(钢液)中的钢液滴(渣滴)的数量及

分布, 以便判断反应面积是否增加. 同理, 在一定枪位条件下, 随流量的增加织构分维数 D_T 变大.

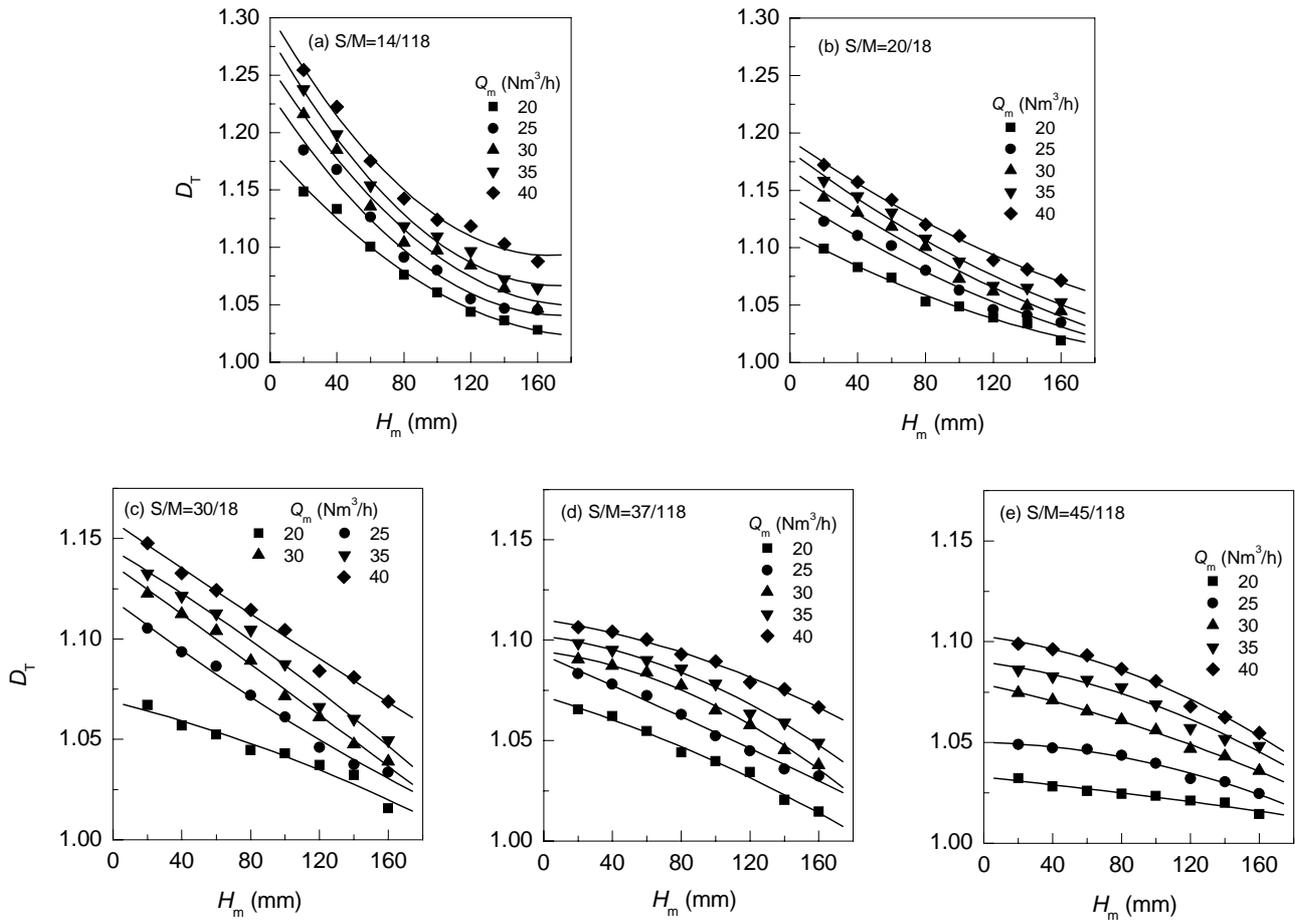


图 3 不同流量下枪位对渣金边界织构分维的影响

Fig.3 Variation of textural fractal dimension with lance position under various blowing rates

实验条件下枪位、流量及渣金比对渣金母相边界织构分维数影响的经验关系式为

$$D_{Tm} = 1 + \left[5.079 \times 10^{-3} + 9.163 \times 10^{-4} \ln(H_m^{-1} +) \right] \left[(3.916 \times 10^{-3}) \right] Q_{O_2}^{1.406} \left[1 - e^{-0.1065(S/M)^{-1}} \right], \quad (4)$$

(20 Q_m 40 Nm^3/h , 20 H_m 120 mm, 0.1186 S/M 0.3814).

需要说明的是, 由于对织构维数回归计算中保留 4 位有效数字, 因此对枪位、流量、渣量-织构分维的单一影响分别进行的数据优化中保留了 4 位有效数字. 按相似比可推导出实际转炉流量、枪位及渣金比与织构分维数的关系 [Q_{O_2} , H_f , S/M 范围同式(4)]:

$$D_{Tf} = 1 + \left[1.507 \times 10^{-5} + 4.861 \times 10^{-7} \ln(H_f^{-1} +) \right] \left[(2.274 \times 10^{-3}) \right] Q_{O_2}^{1.406} \left[1 - e^{-0.1065(S/M)^{-1}} \right]. \quad (5)$$

(4300 Q_{O_2} 8600 Nm^3/h , 1300 H_f 1900 mm, 0.1186 S/M 0.3814).

由式(4)和(5)可见, 流量 $Q_m(Q_{O_2})$ 是织构分维数变化的决定因素, 即流量为 0 时枪位 $H_m(H_f)$ 及渣金比 S/M 对织构分维数 D_T 的变化无贡献. 现讨论几种极限情况: 当流量 $Q_m(Q_{O_2})=0$ 时, $D_T=1$; 当流量 $Q_m(Q_{O_2}) \neq 0$ 而枪位 $H_m(H_f) \rightarrow \infty$ 时, $D_T \approx 1$. 这两种情况说明此时渣金边界近似为一平面, 反应面积为熔池截面积. 当渣金比 $S/M \rightarrow \infty$ 时, $D_T \approx 1$, 说明此时顶吹强度对渣金母相边界形变的影响较小, 渣金母相边界也近似为平面. 当 $D_T \approx 2$ 时, 说明渣金完全混合, 已不存在独立的渣、金母相, 渣、金互为分散相及连续相, 此时渣金反应面积最大.

3.2 渣金母相边界的无量纲长度计算

应用分形理论计算织构分维数的过程中, 把渣金母相边界长度和码尺分别除以参考长度而转变为无量纲形式, 即变量的标准化. 渣金母相边界上距离最大的两点间线段长定义为最大 Feret 直径, 即参考长度^[6]. 在改变分辨率标准化单位 ε 时, 可求出该曲线的织构分维数 D_T . 将在最大分辨率下(即最小步长 ε 时)得到的边界

长度 p 除以最大 Feret 直径, 从而使其无量纲化, 得到其二维边界的无量纲长度 L_T .

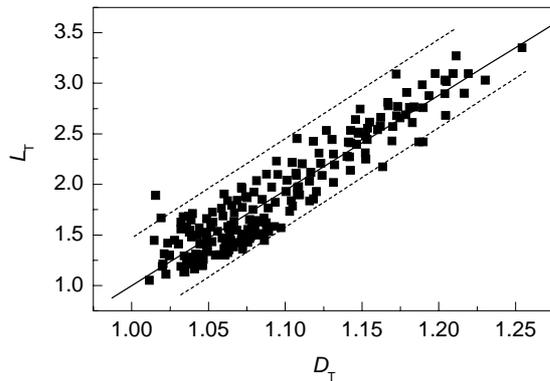


图4 D_T 与无量纲边界长度 L_T 的关系
Fig.4 Relationship between D_T and textural L_T

图4为实验获得的渣金母相边界结构分维数 D_T 与其无量纲边界长度 L_T 的关系. 由图可见, L_T 随 D_T 的增加而增加, 而 D_T 的大小由顶吹强度决定, 强度越大, 边界复杂程度增加. 图中 $D_T=1, L_T \approx 1$ 的点代表顶吹强度为0(枪位无限高或顶吹流量无限小)时渣金母相边界线近似为一条直线. 结构分维数 D_T 与无量纲长度 L_T 的经验关系式为

$$L_T = -8.428 + 9.428D_T \quad (6)$$

L_T 的区间估计值为^[7]:

$$L_T \mp 0.387 \times \sqrt{1.005 + (D_T - 1.095)^2 / 0.597}.$$

4 结论

枪位、流量及渣金比对渣金母相边界结构分维数影响的经验关系式为 $D_{Tf} = 1 + [1.507 \times 10^{-5} + 4.861 \times 10^{-7} \ln(H_f^{-1} + 2.274 \times 10^{-3})] Q_{O_2}^{1.406} [1 - e^{-0.1065(S/M)^{-1}}]$, 渣金母相边界结构分维数随顶吹流量的增加、枪位的降低、渣金比的减小而增加, 其中流量为决定因素.

(2) 渣金母相边界结构分维数 D_T 与无量纲长度 L_T 的经验关系式为 $L_T = -8.428 + 9.428D_T$, 因此渣金母相边界结构分维数是评价二维渣金母相边界长度的重要依据.

(3) 由模拟实验证明: 分形理论可以为顶吹转炉过程渣金边界的量化计算提供一种有效方法.

符号表:

d	喷枪出口直径 (mm)
d_f, d_m	模型和实际转炉的喷枪出口直径 (mm)
D	分维数
D_T	结构分维数
D_{Tm}, D_{Tf}	模型(油-水边界)和实际转炉(渣-金边界)结构分维数
Fr_m, Fr'_m	Froude 准数和修正 Froude 准数
g	重力加速度 (m/s^2)
H_m, H_f	模型与实际转炉枪位 (mm)
L_T	渣金边界无量纲长度
M_D	D 维测度
n	喷孔数目
Q_m, Q_{O_2}	模型与实际转炉顶吹流量 (Nm^3/h)
S	集合
S/M	渣金体积比
V	气体名义流速 (m/s)
V_m, V_{O_2}	模型和实际转炉喷枪出口的气流名义速度 (m/s)
$\gamma(D)$	几何因子
ε	步长 (pixel)
ρ_a	20 空气密度 (kg/m^3)
ρ_g	顶吹气体密度 (kg/m^3)
ρ_{O_2}	标态下氧气的密度 (kg/m^3)
ρ_s	钢液密度 (kg/m^3)
ρ_w	水的密度 (kg/m^3)

参考文献:

- [1] 舍克里 J. 冶金中的流体流动现象 [M]. 彭一川, 徐匡迪, 樊养颐, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1985. 307-308.
- [2] 奥特斯 F. 钢铁冶金学 [M]. 倪瑞明, 张圣弼, 项长祥, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1997. 246-273.
- [3] 黄真理. 湍流的分形特征 [J]. 力学进展, 2000, 30(4): 581-596.
- [4] Falconer K J. 分形几何—数学基础及其应用 [M]. 曾文曲, 刘世耀, 戴连贵, 等译. 沈阳: 东北大学出版社, 1991. 57-75.
- [5] 张济忠. 分形 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995. 42-72.
- [6] Kaye B H. 分形漫步 [M]. 徐新阳, 康雁, 陈旭, 等译. 沈阳: 东北大学出版社, 1994. 18-20.
- [7] 范金城. 工程数学概率论与数理统计 [M]. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2000. 265-280.

Textural Fractal Dimension of Slag-Metal Boundary in Top-blowing Converter with Water Modeling

CHEN Ren, ZOU Zong-shu

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China)

Abstract: Based on the law of similarity, a top-blowing converter is simulated with water modeling. A digital camera is used to take pictures. Digital image processing is carried out with computer. The length of slag-metal boundary in a top-blowing steelmaking converter is experimentally studied with fractal dimension theory, aiming to examine its variation with blowing parameters. The textural fractal dimensions and dimensionless length of the slag-metal boundary are calculated from the mixing images under various blowing conditions. The result shows that the lance position, gas flowrate and slag quantity have great influence on the transition of texture fractal. Furthermore, gas flowrate is primary factor. Experimental relationships between the transition textural fractal dimension and the blowing parameters are obtained. Empirical formulae for calculating the dimensionless length and fractal dimension are discussed. The experiment proves that textural fractal dimension is important basis for estimating dimensionless length of the slag-metal boundary. The fractal theory is one of effective ways used to quantitatively calculate the slag-metal boundary.

Key words: steelmaking converter; water model; slag-metal boundary; textural fractal dimension