

• 实用成型技术 Practical Shaping Technology •

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2019.05.020

基于分形理论研究钢包底吹过程夹杂物的分形维数

巨建涛, 安家良, 刘文果, 王 静, 棘广恒

(西安建筑科技大学 冶金工程学院, 陕西 西安 710055)

摘 要: 依据相似理论, 以 LF 精炼炉为研究对象, 在不同时间节点拍照, 采用图像分析软件 (Image Pro-Plus)、Matlab 软件和分形理论中计盒维数法, 对液相中的不规则单颗粒及团聚体的分形维数进行计算, 研究了不同流量下夹杂物粒子实际上浮速度与粒子边缘分形维数的关系。结果表明, 盒维数求斜率法均可精确地求出夹杂物的分形维数, 夹杂物的形貌越复杂, 分形维数越大; 增加吹气量, 有利于夹杂物的碰撞团聚, 使团聚体的分形维数变大; 夹杂物的分形维数与实际上浮速度呈正相关, 这与采用分形维数和动力直径计算的理论值基本一致, 说明该方法是准确可行的。

关键词: 分形理论; 盒维数法; 夹杂物; 分形维数; 上浮速度

中图分类号: TF741.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2019)05-0504-06

Fractal Dimension of Inclusion in Ladle Bottom Blowing Process Based on Fractal Theory

JU Jiantao, AN Jialiang, LIU Wenguo, WANG Jing, JI Guangheng

(School of Metallurgical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Based on the similarity theory and LF refining furnace as the research object, taking pictures at different time points and using professional image analysis software (Image Pro-Plus), Matlab and the method of the box dimension, the fractal dimension of single particles and aggregates were calculated. The relationship between floating velocity of the actual inclusion and particle edge fractal dimension under different flow rates were studied. The results show that the fractal dimension of inclusion can be accurately calculated by the method of box dimension, the more complex the morphology of inclusion, the larger the fractal dimension. The more complex the morphology of inclusion, the fractal dimension is more the larger. The increase of blowing volume is beneficial to the collision of inclusions and makes the fractal dimension of the aggregates larger. The fractal dimension of inclusion is positively correlated with the actual floating velocity, which is basically consistent with the theoretical value calculated by fractal dimension and dynamic diameter, which indicate that this method is accurate and feasible.

Key words: fractal theory; box dimension method; inclusion; fractal dimension; floatation velocity

钢液中有种类、尺寸和形状各不相同的夹杂物在不断地发生碰撞, 夹杂物之间的碰撞是诱发夹杂物发生团聚, 进而影响其在钢液中分布的原因^[1-3]。分形几何可以用来描述复杂的自然物体, 不管该物体的起源和构造模式如何, 都可通过分形维数来描述, 表达其不平度、复杂性或卷积度^[4], 所以应用分形理论可以研究不规则形貌的夹杂物, 其中分形维数为定量描述夹杂物的轮廓提供了有效的工具。近年来, 国内外一些冶金工作者开始尝试将分形理

论应用到钢中非金属夹杂物的研究中, 在研究非金属夹杂物形貌以及凝聚规律上取得了进展^[5-7]。李宏等^[8]采用分形理论的 DLA 模型探索大量夹杂物粒子的团聚过程, 结果表明钢中碰撞团聚所形成的复杂形貌的夹杂物具有分形特征。宁林新等^[9]利用 Photoshop 软件对夹杂物的轮廓线进行了提取, 基于分形理论, 定量的描述了钢中不同形貌夹杂物的分形维数。

这些研究大多采用数学模型模拟夹杂物, 本文通过水力学模拟实验, 使用 Image Pro-Plus、Matlab 软件提取了不规则夹杂物塑料粒子在钢包底吹过程中的轮廓线, 推导并求解出夹杂物的分形维数, 研究不同流量下夹杂物颗粒的实际上浮速度与粒子边缘分形维数的关系。采用不规则夹杂物团聚体的上浮速度与其边缘分形维数和动力直径的理论公

收稿日期: 2019-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51574190)

作者简介: 巨建涛(1973-), 陕西乾县人, 博士, 教授级高级工程师。

研究方向: 钢铁冶金。电话: 13659296763,

E-mail: 809322895@qq.com

式进行对比,验证了实验结果的正确性,以期为研究实际夹杂物碰撞团聚、以及夹杂物的去除提供参考依据。

1 实验原理和方法

1.1 实验装置

水力学模型实验装置如图 1 所示。

1.2 实验原理

在水力学模拟实验中,水力学原理满足弗鲁德准数相似^[10],下标 m 代表模型; p 代表原型,即 $(F'_r)_m = (F'_r)_p$,由 $F'_r = \frac{\rho g U^2}{\rho g H}$ 同时 $Q = u\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2$, 可得 $Q_m = \lambda^{\frac{5}{2}} \sqrt{\left(\frac{\rho_{gp}}{\rho_{gm}}\right) \left(\frac{\rho_{lm}}{\rho_{lp}}\right)} Q_p$, 即 $Q_m = 0.008\ 58 Q_p$; 容器几何相似比确定为 1:4,即 $L_m/L_p = \lambda = 1:4$; 采用 Sahai 和 Emi^[11]提出假设 1 600 °C 下钢液的运动粘度和室温下水的运动粘度基本相等,得到原型与模型夹杂物密度、尺寸和溶液密度之间的关系式:

$$\frac{R_{inc,m}}{R_{inc,p}} = \lambda^{0.25} \left[\frac{1 - \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{steel}}}{1 - \frac{\rho_{inc,p}}{\rho_{water}}} \right]^{0.5} \quad (1)$$

式中, R 夹杂物直径, m ; ρ 密度, kg/m^3 ; inc, steel, water 分别表示夹杂物、钢液和水,本实验采用高密度聚乙烯粒子($\rho=947\ kg/m^3$)模拟夹杂物,实验中原型和模型参数见表 1。

1.3 图像数字化处理

利用专业 Iamge Pro- Plus 软件对所拍摄的图片进行采集、处理、增强和粒子运动分析。在测量前先对图片进行校准,把图像转换为灰度图片,调节对

比度、亮度和矫正背景图,并且把粒子的运动时间嵌入软件中,观察粒子在钢包内的碰撞团聚情况。利用软件中的手动追踪功能对夹杂物粒子进行轨迹追踪,得到粒子的运动速度,同时提取粒子的轮廓线,得到夹杂物粒子的形貌变化情况。

为了准确计算夹杂物边缘轮廓线的分形维数,利用 Matlab 软件丰富的图像处理功能,对夹杂物的图像进行处理,由分形的数学定义^[12]:

$$D_B = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N}{\log r^{-1}} \quad (2)$$

式中, N 表示覆盖夹杂物所有包含 1 的子矩阵个数; r 表示所对应矩阵的阶数; D_B 表示分形维数。

采用像素点覆盖法计算夹杂物的盒维数,具体流程如图 2 所示。

2 实验结果与讨论

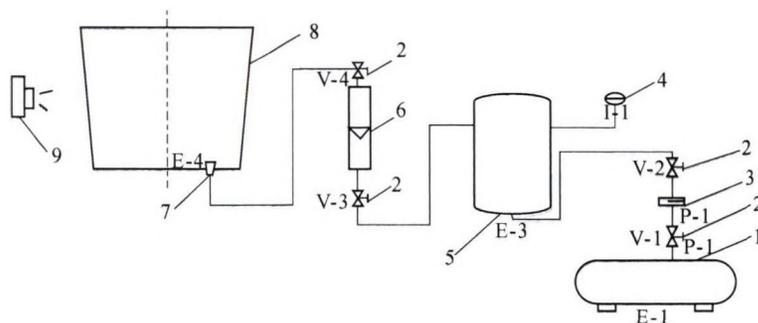
2.1 不同底吹流量对夹杂物分形维数的影响

表 2 为在流量 $0.04\ m^3/h$ 下单颗粒和团聚体夹杂物经 Iamge Pro- Plus 软件提取的轮廓线图以及对应下的运动速度。

从表 2 中可以看出,经过聚合后的夹杂物粒子 a3,其轮廓线较为复杂,对应的速度较单颗粒速度较小,为了便于对比,将图像轮廓线进行数字化。

图 3 为在对应条件下,通过最小二乘法拟合的单颗粒(a1、a2)和团聚体(a3)夹杂物的分形维数拟合曲线。

从图 3 中可以看出,不同的夹杂物实验数据的线性拟合相关指数均比较高,根据最小二乘法线性拟合直线的斜率可得到 $0.04\ m^3/h$ 流量下夹杂物的分形维数,如表 3 所示。



1-空气压缩机;2-截止阀;3-过滤器;4-压力表;5-储气罐;6-转子流量计;7-透气砖模型;8-钢包模型;9-高速摄像机

图 1 水力学模型实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device for hydraulic model

表 1 原型与模型的主要参数

Tab.1 The main parameters of the prototype and model

参数	钢包底部 直径/mm	钢包顶部 直径/mm	钢包高度 /mm	透气砖上部 直径/mm	透气砖下部 直径/mm	密度 kg/m^3		气体	气体流量 /(m^3/h)	夹杂物 直径/ μm
						液体	夹杂物			
原型	2 050	2 420	2 265	75	192	7 100(钢液)	2 800(SiO_2)	1.78(Ar)	4.66,9.32,11.66	34~107
模型	510	605	566	19	48	998(水)	947(PE)	1.2	0.04,0.08,0.10,0.14	105~355

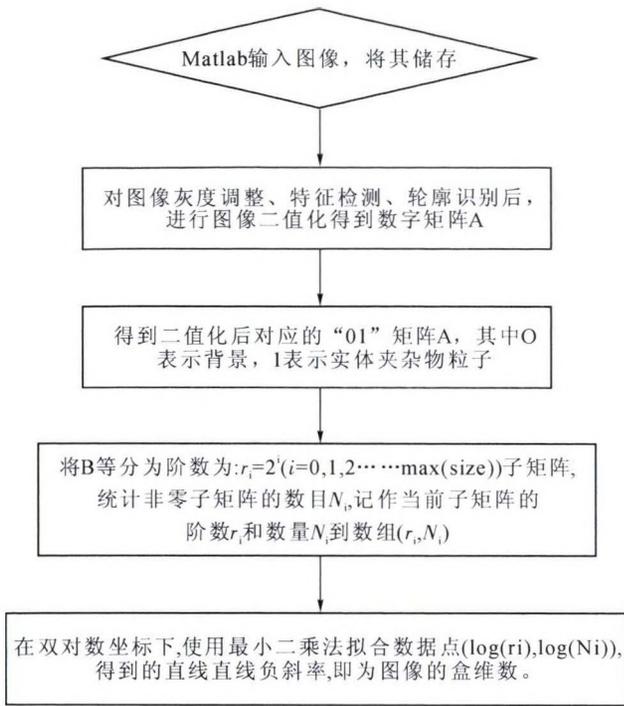


图2 使用 Matlab 计算夹杂物粒子轮廓分形维数的流程图
Fig.2 Flow chart of fractal dimension of inclusion particle contour calculated by Matlab

根据表 3 可以看出单颗粒夹杂物 a1 的分形维数为 1.617, 单颗粒夹杂物 a2 的分形维数为 1.653, 而经过碰撞后的团聚体 a3 的分形维数为 1.416。夹杂物的分形维数较之前分别减少了 12.43% 和 14.34%。在流量为 0.04 m³/h 条件下, 液体流速较小, 不能有效的带动液体向上运动, 搅拌作用较弱, 导致单颗粒夹杂物粒子碰撞频率减少、不能紧密的聚集在一起, 团聚体较为疏松且具有较相似的对称轮廓线, 所以, 团聚体的分形维数反而变小。

表 4 为在流量下 0.08 m³/h 单颗粒和团聚体夹杂物利用 IPP 软件进行提取夹杂物粒子轮廓线以及对应的运动速度。

依据表 4 看出经过聚合后的夹杂物粒子 b3, 其轮廓线较为复杂, 但是对应的速度较单颗粒速度较大, 为便于对比, 将图像轮廓线进行数字化。

图 4 为在对应条件下, 使用最小二乘法拟合的单颗粒 (b1、b2) 和团聚体 (b3) 夹杂物的分形维数拟合曲线。

从图 4 中看出, 不同的夹杂物实验数据的线性

表2 夹杂物粒子的轮廓图和上浮速度

Tab.2 Outline of the inclusion particles and floating velocity

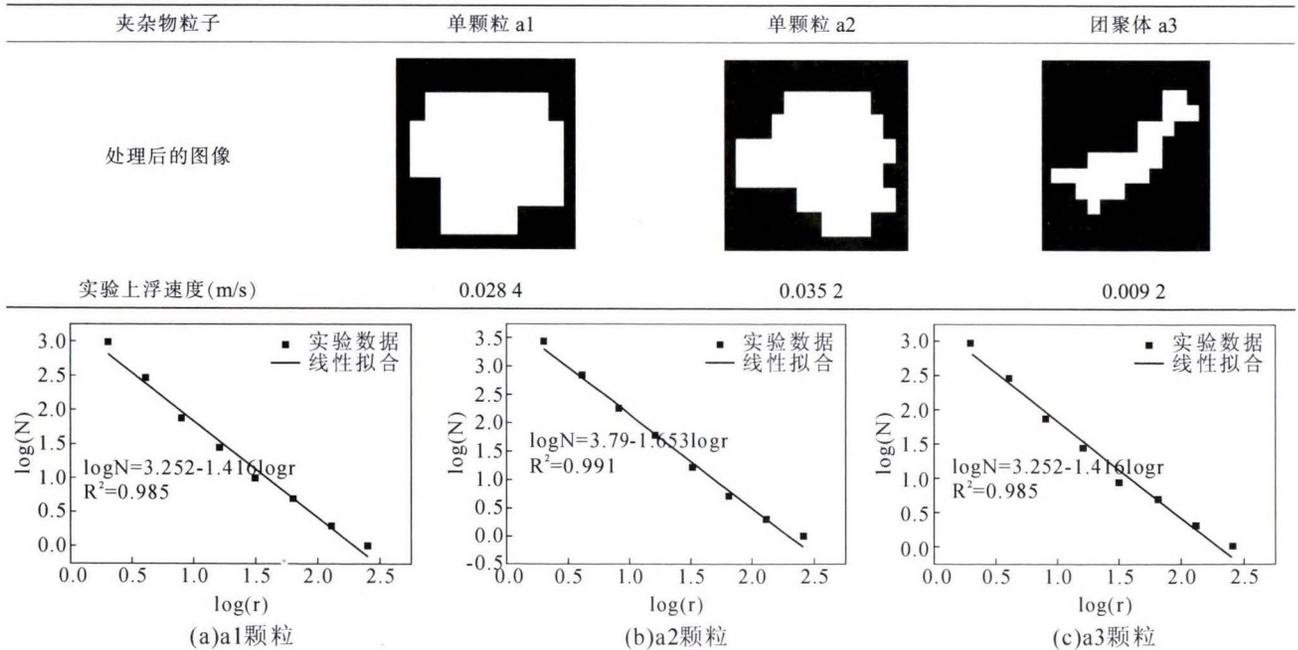


图3 单颗粒和团聚体夹杂物的分形维数拟合曲线
Fig.3 Fitting curve of fractal dimension of single particle and aggregate inclusion

表3 不同夹杂物粒子的分形维数
Tab.3 Fractal dimensions of different inclusion

夹杂物粒子	y=ax+b	分形维数 D _B	R ²
单颗粒 a1	logN=3.947-1.617logr	1.617	0.983
单颗粒 a2	logN=3.79-1.653logr	1.653	0.991
团聚体 a3	logN=3.252-1.416logr	1.416	0.985

拟合相关指数都比较高, 根据最小二乘法的线性拟

合直线的斜率可得到 0.08 m³/h 流量下夹杂物的分形维数, 如表 5 所示。

表 5 可以看出, 单颗粒夹杂物 b1 的分形维数为 1.611, 单颗粒夹杂物 b2 的分形维数为 1.623, 而经过碰撞后的团聚体 b3 的分形维数为 1.761, 夹杂物的分形维数较之前分别增加了 9.31% 和 8.51%。在流量为 0.08 m³/h 条件下, 夹杂物碰撞的剧烈程度

表4 夹杂物粒子的轮廓图和上浮速度
Tab.4 Outline of the inclusion particles and floating velocity

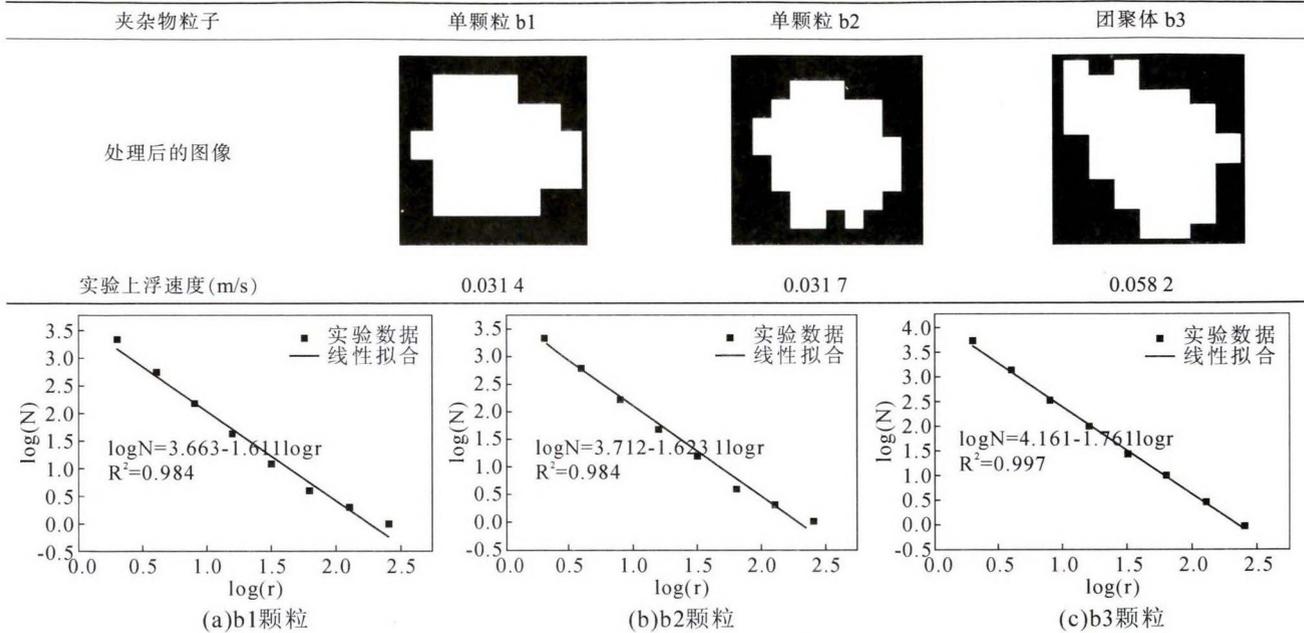


图4 单颗粒和团聚体夹杂物的分形维数拟合曲线
Fig.4 Fitting curve of fractal dimension of single particle and aggregate inclusion

表 5不同夹杂物粒子的分形维数
Tab.5 Fractal dimensions of different inclusion

夹杂物粒子	$y=ax+b$	分形维数 D_b	R^2
单颗粒 b1	$\log N=3.663-1.611\log r$	1.611	0.984
单颗粒 b2	$\log N=3.712-1.623\log r$	1.623	0.989
团聚体 b3	$\log N=4.161-1.761\log r$	1.761	0.997

较低,使团聚体夹杂物粒子轮廓线的复杂程度与单颗粒程度相差不大,但能够有效地紧密结合起来,所以团聚体的分形维数变大。

表6为在流量下 0.10 m³/h 单颗粒和团聚体夹杂物利用 IPP 软件进行提取夹杂物粒子轮廓线以及对应的运动速度。

表6可以看出,经过聚合后的夹杂物粒子 c3,其轮廓线较为复杂,对应的速度较单颗粒速度较大,为了便于对比,将图像轮廓线进行数字化。

图5为对应条件下,使用最小二乘法拟合的单颗粒(b1、b2)和团聚体(b3)夹杂物的分形维数拟合曲线。

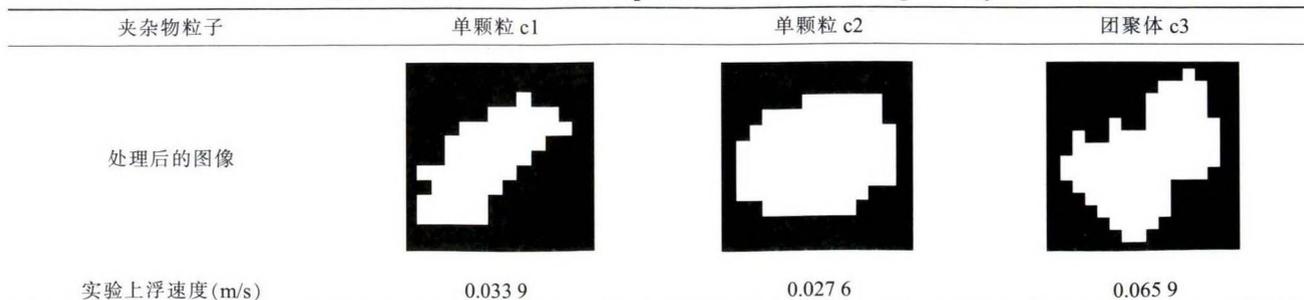
图5中可以看出,不同的夹杂物实验数据的线性拟合相关指数都比较高,根据最小二乘法的线性拟合直线的斜率可得到 0.10 m³/h 流量下夹杂物的分形维数,如表7所示。

表7可以看出,单颗粒夹杂物 c1 的分形维数为 1.652,单颗粒夹杂物 c2 的分形维数为 1.608,而团聚体 d3 的分形维数为 1.800,夹杂物的分形维数较之前分别增加了 8.22%和 11.94%,碰撞后的团聚体到达 1.800。这是由于在流量为 0.10 m³/h 条件下,夹杂物颗粒发生了剧烈的碰撞聚合作用,导致该形状比单颗粒形状比之前的更复杂、更加不规则且较致密,所以分形维数变化较大。

表8为在流量下 0.14 m³/h 单颗粒和团聚体夹杂物利用 IPP 软件进行提取夹杂物粒子轮廓线以及对应的运动速度

表8可以看出,经过聚合后的夹杂物粒子 d3,其轮廓线较为复杂,对应的速度较单颗粒速度较大,

表6 夹杂物粒子的轮廓图和上浮速度
Tab.6 Outline of the inclusion particles and their floating velocity



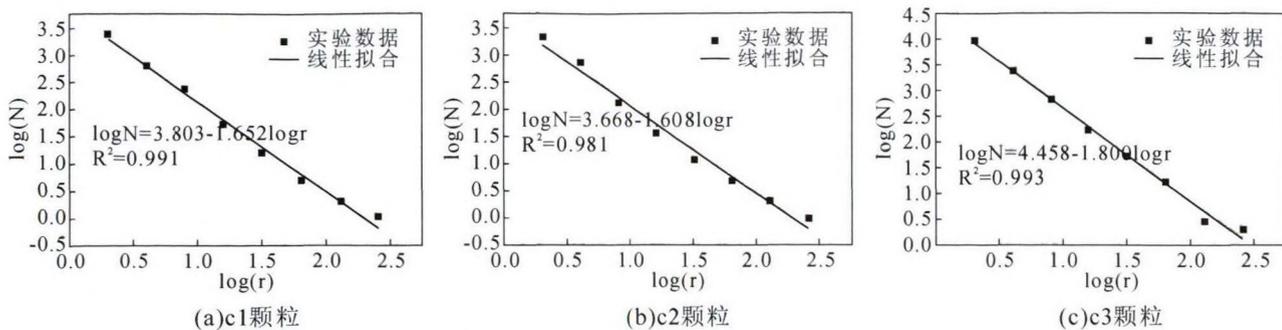


图5 单颗粒和团聚体夹杂物的分形维数拟合曲线

Fig.5 Fitting curve of fractal dimension of single particle and aggregate inclusion

表7 不同夹杂物粒子的分形维数
Tab.7 Fractal dimensions of different inclusion

夹杂物粒子	$y=ax+b$	分形维数 D_B	R^2
单颗粒 c1	$\log N=3.803-1.652\log r$	1.652	0.991
单颗粒 c2	$\log N=3.668-1.608\log r$	1.608	0.981
团聚体 c3	$\log N=4.458-1.800\log r$	1.800	0.993

为了便于对比,将图像轮廓线进行数字化。

图6为在对应条件下,使用最小二乘法拟合的单颗粒(d1、d2)和团聚体(d3)夹杂物的分形维数拟合曲线。

图6可以看出,不同的夹杂物实验数据的线性拟合相关指数都比较高,根据最小二乘法的线性拟合直线的斜率可得到0.14 m³/h流量下夹杂物的分形维数,如表9所示。

表9可以看出,单颗粒夹杂物d1的分形维数为1.618,单颗粒夹杂物d2的分形维数为1.641,而团聚体d3的分形维数为1.839,夹杂物的分形维数较

之前分别增加了12.02%和10.77%。这是由于在流量为0.14 m³/h条件下,夹杂物颗粒发生了剧烈的碰撞聚合作用,导致该形状比单颗粒形状更复杂、更加不规则且较致密,所以分形维数发生很大变化。

2.2 夹杂物的上浮速度与分形维数

不同尺寸的夹杂物粒子发生了碰撞聚合后,此时微小的夹杂物粒子因团聚而长大,随着夹杂物粒子的增加,上浮速度也会相应的增大,从而有利于夹杂物粒子的去除。

根据IPP软件对夹杂物粒子进行追踪,可得到夹杂物粒子轨迹的上浮位移。将时间嵌入软件中,计算出速度的平均值,即可得到实验的上浮速度,粒子分形维数和实验上浮速度的关系如图7。

图7可以看出,夹杂物分形维数从1.416变化至1.84,对应的实际上浮速度从0.0109 m/s增加至0.0785 m/s,说明粒子的分形维数与速度正相关。

对不规则复杂形貌夹杂物颗粒的上浮速度,采

表8 夹杂物粒子的轮廓图和上浮速度

Tab.8 Outline of the inclusion particles and their floating velocity

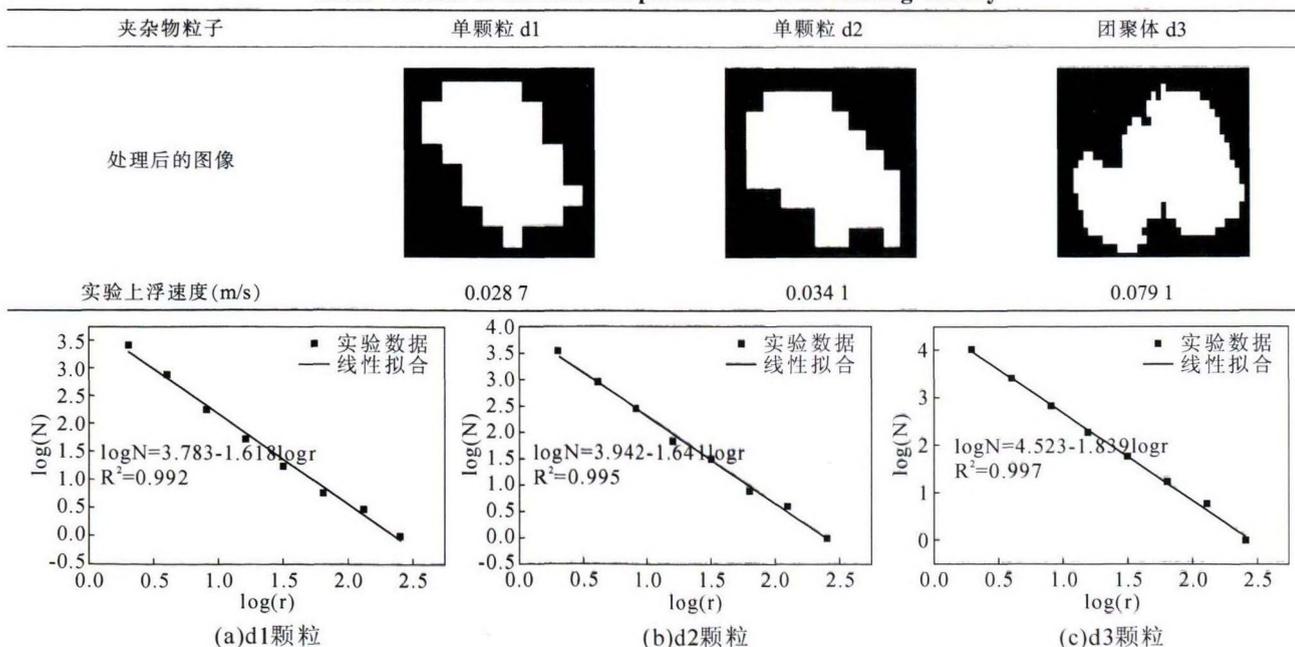


图6 单颗粒和团聚体夹杂物的分形维数拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of fractal dimension of single particle and aggregate inclusion

表9 不同夹杂物粒子的分形维数

Tab.9 Fractal dimensions of different inclusion

夹杂物粒子	$y=ax+b$	分形维数 D_B	R^2
单颗粒 d1	$\log N=3.783-1.618\log r$	1.618	0.992
单颗粒 d2	$\log N=3.942-1.640\log r$	1.640	0.995
团聚体 d3	$\log N=4.532-1.839\log r$	1.839	0.997

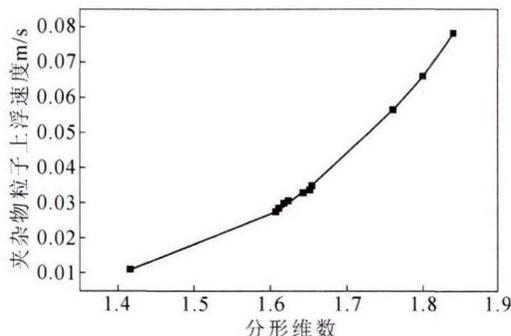


图7 夹杂物粒子分形维数与上浮速度关系图

Fig.7 Relationship between the fractal dimension and the floating velocity of inclusion particles

用夹杂物的分形维数和动力直径来定量计算,所对应的分形理论的上浮速度公式^[13]为式(3):

$$V = \sqrt{\frac{4(\rho_m \rho_s)gd}{3C_d \rho_m}} \times i^{\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{D_B}} \quad (3)$$

式(3)中,水力学模拟实验中雷诺数为 $1000 \leq Re \leq 2 \times 10^5$,那么上浮阻力系数 $C_d=0.45$ 。 d 为动力直径; C_d 为运动阻力系数; ρ_s, ρ_m 为聚乙烯、水的密度, kg/m^3 ; i 碰撞后夹杂物团聚体所需要单体聚乙烯粒子的个数。

为验证实验数据的准确性,根据式(3),计算聚乙烯夹杂物粒子的上浮速度,这样可以得到每组夹杂物粒子的理论上浮速度,然后根据采用IPP软件进行测量的实验数据进行对比。聚乙烯夹杂物粒子的理论与实际值对比,如图8所示。

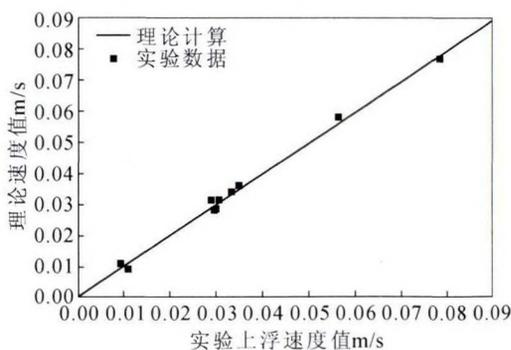


图8 夹杂物的理论计算值与实际实验值比较

Fig.8 Comparison between theoretical calculation and experimental value

图8可以看出,夹杂物粒子上浮的实验值与按照分形维数计算得到的理论值基本吻合,从而说明实验结果的正确性。这说明可以使用分形维数和动

力直径来描述不规则夹杂物粒子的运动速度的可行性,可定量描述实际夹杂物的上浮速度。

3 结论

(1)夹杂物颗粒形貌变化受吹气量影响,随着吹气量的增大,夹杂物的形貌越复杂、越致密,夹杂物的边缘分形维数越大。

(2)大部分碰撞前单个塑料粒子的外轮廓线分形维数较小,为1.6左右;碰撞后的团聚体与吹气量有关,吹气量较小时团聚体比较疏松,分形维数变小,随着流量增加分形维数大于单颗粒分形维数,为1.8左右。

(3)夹杂物粒子的分形维数和粒子的实验上浮速度呈正相关,分形维数越大,越有利于夹杂物上浮。

(4)采用分形维数和动力直径计算的夹杂物上浮速度与实验值基本一致,可定量描述不规则形貌夹杂物颗粒的上浮速度。

参考文献:

- [1] Miki Y, Thomas B G. Modeling of Inclusion Removal in a Tundish [J]. Metallurgical and Material Transactions B, 1999, 30(4):639-648.
- [2] Li H, Wang XH, Yasushi Sasaki, et al. Agglomeration Simulation of Chain-like Inclusion in Molten Steel Based on Fractal Cluster-Cluster Agglomeration[J]. Mater Trans, 2007, 48(8):2170-2173.
- [3] Yuji Miki, Brian G Thomas. Modeling of Inclusion Removal in a Tundish[J]. Metal Master trans B, 1999, 30(4):639-654.
- [4] 张济忠. 分形[M]. 北京:清华大学出版社, 2011:30-37.
- [5] 王耀, 李宏, 郭洛方. 钢液中 Al_2O_3 夹杂物颗粒布朗碰撞聚合的三维可视化数值模拟研究 [J]. 太原理工大学学报, 2014, (2): 151-156.
- [6] 郭洛方, 李宏, 王耀. 钢中夹杂物形貌特征的定量描述方法及其与上浮速度的关系[J]. 冶金分析, 2012(9):1-6.
- [7] 巨建涛, 王睿, 折媛, 等. 钢包底吹氩去除钢中夹杂物的数值模拟[J]. 过程工程学报, 2015, 15(1):68-73.
- [8] 李宏, 温娟, 张炯明, 等. 应用 DLA 模型模拟钢中夹杂物集团凝聚[J]. 北京科技大学学报, 2006, (4):343-347.
- [9] 宁林新, 李宏, 张炯明, 等. 钢中夹杂物的分形维数[J]. 钢铁研究学报, 2005(6):59-62.
- [10] 杨虎林, 何平, 翟玉春. 气泡粘附去除钢液中夹杂物的水模拟研究[J]. 钢铁钒钛, 2013, 34(6):45-49.
- [11] Sahai Y, Emi T. Criteria for water modeling of melt flow and inclusion removal in continuous cast ing tundishes [J]. ISIJ International, 1996, 36(9): 11-66.
- [12] 岳强, 张雅丽, 孔辉, 等. 钢中非金属夹杂物图像分形维数的研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2012(2):107-111.
- [13] 李宏, 郭洛方, 潘永红, 等. 应用 DLA 模型对钢中夹杂物凝聚过程的三维模拟[J]. 过程工程学报, 2009(S1):312-316.