

喷粉透气砖狭缝内气-固两相流动数值模拟

周建安¹⁾✉, 刘春明²⁾, 刘中秋²⁾, 李宝宽¹⁾, 战东平²⁾, 倪红卫¹⁾, 李志强¹⁾

1) 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081 2) 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110819

✉ 通信作者, E-mail: zhou_jianan@sina.com

摘要 狭缝型喷粉透气砖是铁水底喷粉脱硫预处理工艺重要功能性元件, 对底喷粉脱硫工艺的顺利实施影响重大. 结合实际应用情况, 基于欧拉-欧拉双流体和颗粒动力学理论, 对喷粉透气砖狭缝内气-固两相流进行了三维数值模拟, 得到狭缝内的流场、压力场和颗粒相体积分场分布. 喷粉透气砖狭缝内颗粒相体积分数非均匀段长度一般为 250 mm, 加速段长度一般小于 250 mm. 在颗粒直径为 20 μm 时单缝内的压降最大, 为 2350 Pa. 工业试验结果表明, 底喷粉工艺脱硫效率比同类型顶喷粉工艺提高 15% 以上.

关键词 炼铁; 脱硫; 狭缝; 粉煤; 两相流; 数值模拟

分类号 TF 538.6⁺3

Numerical simulation on gas-solid two-phase flow in slots of porous plugs

ZHOU Jian-an¹⁾✉, LIU Chun-ming²⁾, LIU Zhong-qiu²⁾, LI Bao-kuan¹⁾, ZHAN Dong-ping²⁾, NI Hong-wei¹⁾, LI Zhi-qiang¹⁾

1) School of Materials and Metallurgy, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China

2) School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China

✉ Corresponding author, E-mail: zhou_jianan@sina.com

ABSTRACT The slot-type porous plug used for injecting pulverized coal into the ladle through a bottom position is an extremely important element for desulfurization during hot iron pretreatment, and it makes great effect on the trouble-free operation of this desulfurization technology. With the help of the Eulerian-Eulerian model and the particle dynamic theory, a three-dimensional model is constructed to evaluate the velocity, pressure and concentration fields of gas-solid two-phase flow in the slot of a porous plug. It is found that the concentration nonuniform length in the slot is about 250 mm, the acceleration length is always less than 250 mm, and the maximum difference in pressure is 2350 Pa on condition that the particle size is 20 μm . The result of industrial application shows that the desulfurization efficiency of coal injection through the bottom position is about 15% higher than that by the top lance.

KEY WORDS ironmaking; desulfurization; slots; pulverized coal; two-phase flow; numerical simulation

铁水底喷粉脱硫预处理新工艺, 是以气体为载体将粉剂通过狭缝式透气砖从铁水包底部送入包内进行喷粉铁水脱硫. 该工艺操作简单、稳定可靠、脱硫率高、无喷溅现象、铁损少、温降小、无污染、处理周期短以及投资省, 是比较理想的脱硫新工艺, 具有广阔的应用前景. 狭缝型喷粉透气砖^[1]是该工艺重要的功能性元件, 对工艺顺行及处理效果的影响重大. 为了确保透气砖底喷粉工艺的顺行, 提高粉剂

输送的安全性和效率, 需要深入研究粉剂在透气砖狭缝内的流动状况.

CFD (computational fluid dynamics) 数值仿真是研究颗粒两相流的重要方法之一. 国内外研究者应用欧拉-拉格朗日方法对水平气力输送和气-固喷射器内气-固两相流场做了大量研究, 同时结合离散单元法考虑颗粒之间以及颗粒与管壁之间的相互作用, 较为准确地模拟了气-固两相运动行为^[2-4].

收稿日期: 2013-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目支持(50804009); 国家高技术研究发展计划资助项目(No. 2009AA03Z530)

DOI: 10.13374/j.issn1001-053x.2014.10.011; http://journals.ustb.edu.cn

但是,该方法的计算量很大,不适用于稠密颗粒相流动,一般要求颗粒相的体积分数小于 12%。欧拉-欧拉多相模型是一种平均 N-S 方程,计算量相对于欧拉-拉格朗日方法小很多,可以计算任意粒子体积分数和连续相物质,而且可以更加准确地反映气-固两相间的相互作用。部分学者^[5-6]应用欧拉模型对 90°弯管气力输送和旋风分离器内的气-固两相流进行模拟,得到了比较理想的结果。以往对于气-固两相流的研究多集中于管道输送系统^[7],对于透气砖狭缝内气-固两相流的研究较少。近几年,虽然有学者对钢包精炼底喷粉透气砖狭缝内的气-固两相流进行了一定研究^[8-9],但这些研究成果没有考虑粉料粒度形状、粒度分布等影响因素,也没有进行工业试验验证。

本文在结合实际应用的条件下,采用欧拉-欧拉模型对喷粉透气砖狭缝内气-固两相流动进行了理论和应用研究,得出了喷粉透气砖狭缝内颗粒相体积分数非均匀段和运动加速段长度,并对该工艺进行了工业试验验证。

1 数学模型

1.1 欧拉-欧拉双流体模型

欧拉-欧拉双流体流动模型的主要控制方程包括:连续性方程、动量方程和 $k-\varepsilon$ 湍流方程^[10]。

(1) 连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) = 0, \quad i = g, s. \quad (1)$$

式中 t 为时间, α_i 是 i 相的体积分数, ρ_i 是 i 相的密度, \mathbf{u}_i 是 i 相的速度, ∇ 是哈密顿算子。

(2) 动量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \mathbf{u}_i \mathbf{u}_i) = -\alpha_i \nabla p - \nabla(\alpha_i \boldsymbol{\tau}_i) + \alpha_i \rho_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_i. \quad (2)$$

式中 $\boldsymbol{\tau}_i$ 是 i 相的应力, p 是所有相共享的压力, \mathbf{g} 为重力加速度, \mathbf{F}_i 为相间动量交换。

i 相方程的应力项为:

$$\boldsymbol{\tau}_i = -\mu_{\text{eff},i} \left[\nabla \mathbf{u}_i + (\nabla \mathbf{u}_i)^T - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \mathbf{u}_i) \right]. \quad (3)$$

式中: δ_{ij} 是 Kronecher 符号; $\nabla \mathbf{u}_i$ 为 i 相的速度梯度; $\mu_{\text{eff},i}$ 是有效黏度,它由两部分构成,分别是分子黏度和湍流黏度。

颗粒有效黏性与气体有效黏性存在如下关系:

$$\mu_{\text{eff},g} = \mu_{m,g} + \mu_{t,g}. \quad (4)$$

$$\mu_{\text{eff},s} = \frac{\rho_s}{\rho_g} \mu_{\text{eff},g}. \quad (5)$$

(3) $k-\varepsilon$ 湍流方程:

本研究利用 $k-\varepsilon$ 湍流模型计算气相的湍流涡黏性 $\mu_{t,g}$,对应的湍动能 k 和湍流耗散率 ε 方法如下:

$$\mu_{t,g} = C_\mu \rho_g \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g k) + \nabla(\rho_g \mathbf{u}_g k) = \nabla \left(\frac{\mu_{t,g}}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_{k,g} - \rho_g \varepsilon, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \varepsilon) + \nabla(\rho_g \mathbf{u}_g \varepsilon) =$$

$$\nabla \left(\frac{\mu_{t,g}}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (G_{1\varepsilon} G_{k,g} - G_{2\varepsilon} \rho_g \varepsilon), \quad (8)$$

式中 t 为时间。由于平均速度梯度引起的湍流动能 k 的产生项 $G_{k,g}$ 为

$$G_{k,g} = \mu_{t,g} [\nabla \mathbf{u}_g + (\nabla \mathbf{u}_g)^T] \nabla \mathbf{u}_g. \quad (9)$$

模型常量取值为: $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.2 相间作用力

两相间的动量交换通过相间作用力实现,包括

$$\mathbf{F}_i = -\mathbf{F}_{g,s} = -\mathbf{F}_{s,g} = \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_L + \mathbf{F}_{VM}. \quad (10)$$

式中 \mathbf{F}_D 、 \mathbf{F}_L 和 \mathbf{F}_{VM} 右侧的三项分别代表曳力、浮升力和虚拟质量力。

曳力定义为

$$\mathbf{F}_D = -\frac{3}{4} \alpha_s \rho_g \frac{C_D}{d_s} |\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_g| (\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_g). \quad (11)$$

式中 α_s 是颗粒相的体积分数, d_s 是颗粒的直径。定义颗粒 Reynolds 数 $Re_s = \rho_g |\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_g| d_s / \mu_g$, 当它足够大的时候,曳力系数 C_D 是与 Reynolds 无关的量,即 $C_D = 0.44$, $1000 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ 。

浮升力定义为:

$$\mathbf{F}_L = \alpha_s \rho_g C_L (\mathbf{u}_s - \mathbf{u}_g) \times \nabla \times \mathbf{u}_g. \quad (12)$$

式中 C_L 是模型常数,取为 0.5。

虚拟质量力定义为:

$$\mathbf{F}_{VM} = \alpha_s \rho_g C_{VM} \left(\frac{d\mathbf{u}_s}{dt} - \frac{d\mathbf{u}_g}{dt} \right). \quad (13)$$

式中,虚拟质量系数 $C_{VM} = 0.5$ 。

1.3 网格独立性分析

本文以狭缝型喷粉透气砖的单个狭缝为研究对象,如图 1 所示。狭缝几何尺寸和流体物性参数见表 1。采用有限体积法计算该单缝内的流场及颗粒相分布。为了能够捕捉足够多内部流场结构来分析狭缝内颗粒相的湍动状态,本文建立三种结构化网

格,网格数分别为 20000、80000 和 150000. 然后在粉气质量比 10:1 下,利用本模型计算粒径为 20 μm 的粉剂在氮气中的运动情况. 图 2 给出了 CaC₂ 粉剂和氮气在狭缝中心线上的速度分布. 由图可知,三种网格情况下的速度计算误差均在 0.5% 范围内,且后两种网格的误差更小,所以本文在保证计算结果准确性的同时,为了节省计算量,选择网格数为 80000 的网格进行计算.

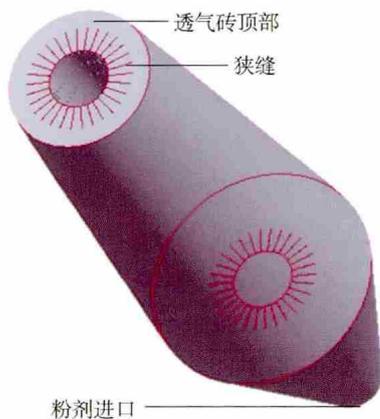
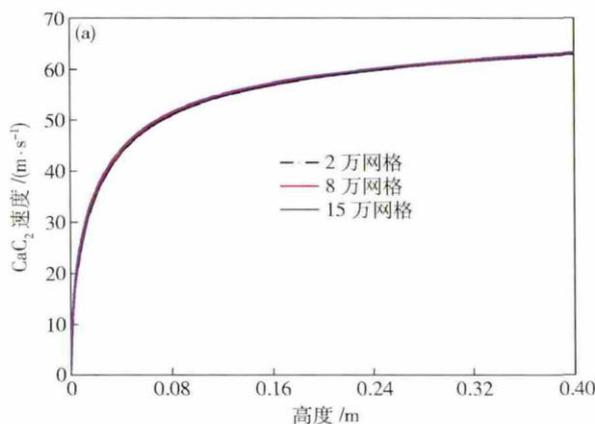


图 1 狭缝型喷粉透气砖结构
Fig. 1 Structure of the slot-type porous plug

表 1 数值模拟过程中的几何、物性和操作参数

Table 1 Geometrical properties, physical properties and operating conditions used in numerical simulation model

参数	N ₂	CaC ₂
密度/(10 ³ kg·m ⁻³)	0.00125	2.22
黏度/(10 ⁻³ Pa·s)	0.01663	0.016
粒度/μm	5, 10, 40, 100	
粉气质量比	5:1, 10:1	
单缝高度/mm	400	
单缝宽度/mm	20	
单缝厚度/mm	0.15	



1.4 边界条件及计算方法

本数学模型的边界条件设置为: (1) 速度入口(缝的下部) 60 m·s⁻¹; (2) 压力出口(缝的上部) 101325 Pa; (3) 固体壁面为无滑移光滑壁面.

求解控制中,连续性方程、速度方程、k-ε 方程和固相体积分数残差收敛标准均采用 1.0 × 10⁻⁴, 能量方程残差收敛标准采用 1.0 × 10⁻⁶ 标准. 压力速度耦合选择 Phase Coupled SIMPLE 算法,离散采用一阶迎风格式.

2 透气砖狭缝内气粉两相流速和颗粒相体积分数的分布

图 3 为不同粉气质量比和粒径的粉剂在狭缝中心线上的速度分布. 由图 3 可知,粉气质量比对于粉剂在狭缝内速度分布的影响基本可以忽略. 粉剂在狭缝入口处速度急剧增加. 此后,随着粉剂颗粒粒径的增加,粉剂在狭缝内加速达到稳定状态所需距离增加. 粉剂颗粒粒径 d_s 为 5 μm 时,粉剂在狭缝入口附近便达到稳定速度并在出口附近有所减小. 当粉剂颗粒粒径为 20 μm 时,粉剂速度持续增加并在狭缝出口处达到稳定值. 当粉剂粒径增大至 40 μm 及 100 μm 时,粉剂速度在狭缝内持续增加,在出口处分别达到 56 m·s⁻¹ 及 44 m·s⁻¹. 在粒度小于 20 μm,粉气质量比较小时,加速段长度一般小于 250 mm.

图 4 为不同粉气质量比条件下的粉剂颗粒相在狭缝中心线上的体积分数的分布. 由图 4 可知,粒径和粉气质量比对于粉剂颗粒相在狭缝中心线上体积分数的影响较大. 当粉剂粒径为 5 μm 时,随着粉气质量比增加,粉剂颗粒相体积分数在狭缝内达到稳定状态所需距离增加,其体积分也增加. 当粉气质量比为 5:1 时,随着粉剂颗粒粒径增大,颗粒

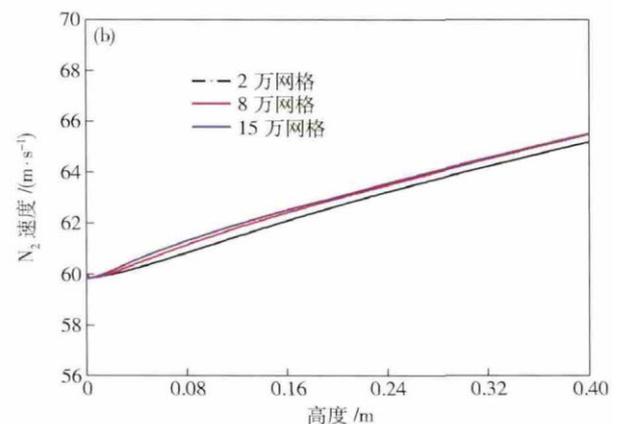


图 2 粉气质量比 10:1 下两相中 CaC₂ (a) 和 N₂ 速度分布 (b)

Fig. 2 Velocity distributions of CaC₂ (a) and N₂ (b) at a solid/gas mass ratio of 10:1

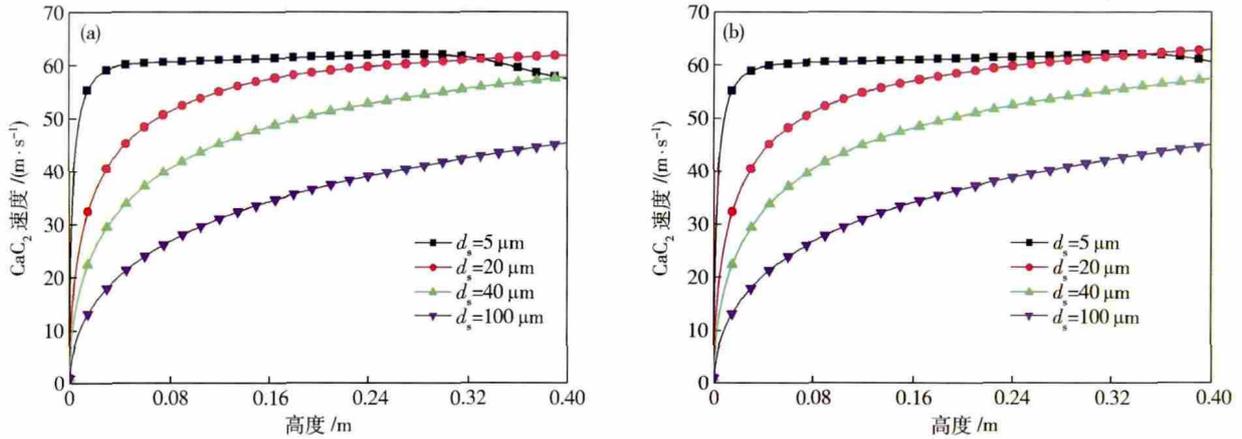


图 3 粉气质量比为 5:1 (a) 和 10:1 (b) 时颗粒相速度分布

Fig. 3 Velocity distribution of particles at a solid/gas mass ratio of 5:1 (a) and 10:1 (b)

相体积分数在狭缝内开始增加,达到稳定值所需距离也变大.但是,当粒径为 $40 \mu\text{m}$ 及 $100 \mu\text{m}$ 时,颗粒相体积分数在狭缝出口附近才有所增加.这一现象在粉气质量比为 10:1 时表现得更为明显.由于气体进口速度很大,所以粒子在进口迅速被加速,造成加速段小粒径粒子的体积分数很小,而大粒径的粒子速度增加较慢,所以造成粒子在进口处停留,表现其体积分数相对较大.粉气质量比小且颗粒粒度小,则颗粒相体积分数变化相对较大,反之变化相对较小.如图 3 所示,高速的气流通过曳力把能量传递给了颗粒,所以加速段颗粒蕴藏的能量较大而且相互之间的碰撞较多,因此颗粒的跃动也较大.进入稳定输运状态之后,可以看到不同粒径的粒子达到稳定状态的时间不同.粒径为 $5 \mu\text{m}$ 的粒子大致在 75 mm 处达到稳定, $20 \mu\text{m}$ 的粒子在 250 mm 处达到稳定.而 $40 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$ 的粒子体积分数除了进口和出口外,在其余区域始终很小.我们分析是大粒子随着气体在轴向运动,颗粒不断扩散开,局部体积分数减小,动量耗损,此时颗粒基本上就跃动不

起来了,而是沿管壁的方向运动,直至喷出.

图 5 为粉气质量比 5:1 条件下在狭缝内气流速度和压力分布.由图 5 可知,气流在通过狭缝的过程中,其速度增长而压力下降.颗粒直径为 $5 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 时,气流速度和压力在个别位置出现拐点.颗粒直径为 $40 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$ 时,速度和压力沿高度方向基本呈现线性变化,且粒径因素对其变化程度影响甚微.分析进出口压降的变化可知,整个过程压强不断降低,压降增大.当颗粒直径为 $20 \mu\text{m}$ 时,单缝内的气流压降最大,为 2350 Pa ;颗粒直径为 $5 \mu\text{m}$ 时为 1700 Pa ;而颗粒直径为 $40 \mu\text{m}$ 和 $100 \mu\text{m}$ 时仅为 700 Pa 左右,相应的出口速度较大.

3 工业试验结果

3.1 CaC₂基粉剂形状及粒度分布

试验用脱硫粉剂为钝化 CaC₂ 粉,其颗粒形状如图 6 所示.由 BT-9300H 型激光式粒度分布仪测得的 CaC₂ 基粉粒度:中位径 (D_{50}) 为 $10.88 \mu\text{m}$,体积平

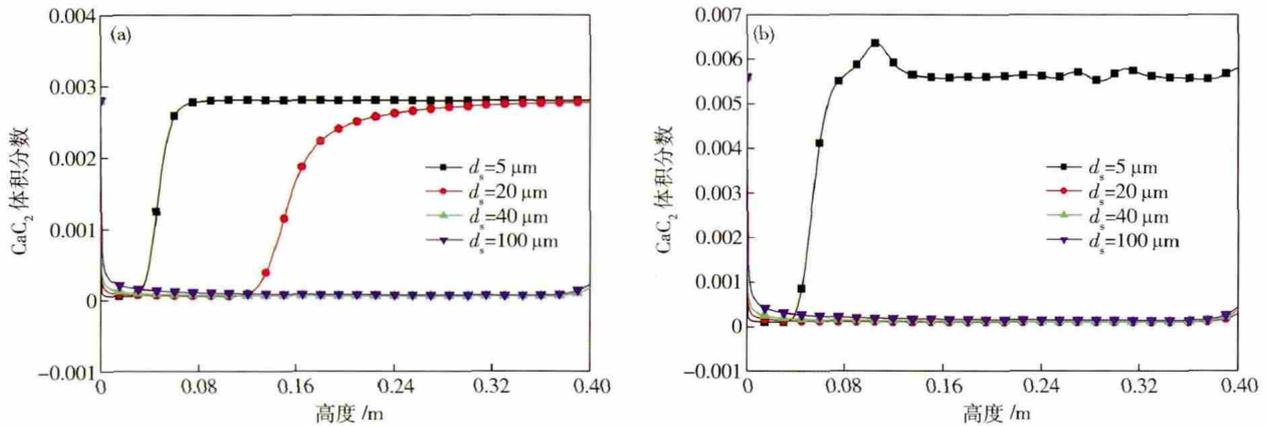


图 4 粉气质量比为 5:1 (a) 和 10:1 (b) 时颗粒相的体积分数分布

Fig. 4 Volume fraction distribution of particles at solid/gas mass ratio 5:1 (a) and 10:1 (b)

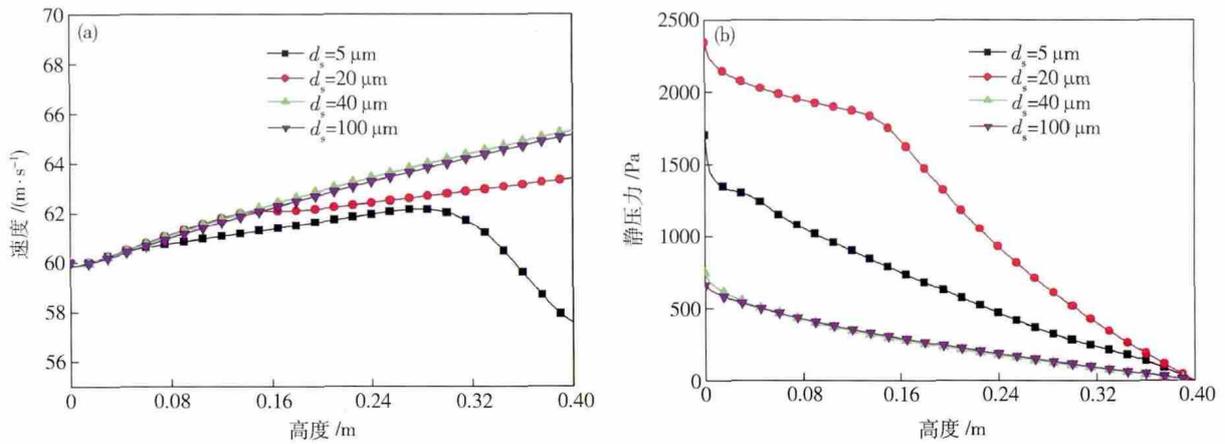


图 5 粉气质量比 5:1 时狭缝内气体速度 (a) 和压力 (b) 分布

Fig. 5 Velocity (a) and pressure (b) distribution of gas flow in the slot at a solid/gas mass ratio of 5:1

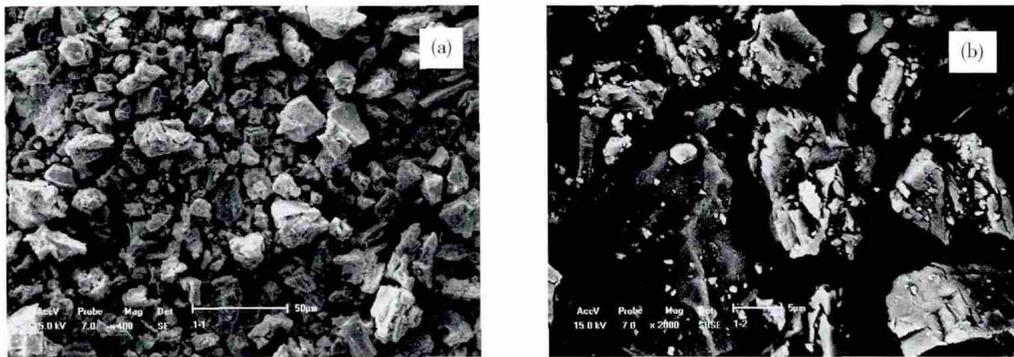


图 6 50 μm (a) 和 5 μm (b) 视场中钝化 CaC₂ 粉剂的颗粒形状

Fig. 6 Particle shape of passivating calcium carbide in viewing fields of 50 μm (a) and 5 μm (b)

均径 $D_{[4,3]}$ 为 15.12 μm, 面积平均径 $D_{[3,2]}$ 为 4.12 μm, 比表面积 $968.7 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. CaC_2 基粒度分布如图 7 所示.

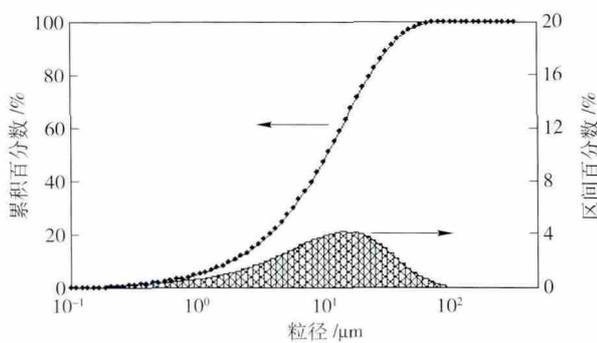


图 7 CaC_2 粉粒度分布

Fig. 7 Size distribution of calcium carbide

3.2 应用效果

通过在某冶金企业 20 t 铁水包底部喷粉透气砖狭缝进行炉外底喷粉脱硫预处理试验表明^[11]: 该工艺脱硫效率比同类型顶喷粉工艺提高 15% 以上. 试验采用狭缝式喷粉透气砖元件, 狭缝尺寸 $0.15 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$, 其中加速段长度采用

220 mm, 颗粒相体积分数非均匀段长度 250 mm, 狭缝呈圆周对称布置, 大小、间距相同. 狭缝数量共 30 条, 喷吹压力为 0.4 MPa. 脱硫粉剂采用钝化 CaC_2 , 粒度及其分布同上. 这说明计算采用的狭缝尺度和粉剂粒度对生产实际应用具有一定指导意义.

4 结论

(1) 喷粉透气砖前段有一加速段和颗粒相体积分数非均匀段;

(2) 颗粒由“静止”开始在透气砖狭缝内作加速运动, 最后形成稳定态. 颗粒越大其速度比越小; 质量比越大, 其速度比越小. 粒径小于 20 μm 的颗粒渐趋稳定前, 其加速运行的长度一般小于 250 mm;

(3) 在颗粒粉剂加速初期, 颗粒相体积分数相对较高. 随着输送过程的进行, 颗粒相体积分数由小变大直到稳定, 且渐趋均匀. 颗粒相体积分数非均匀段长度一般为 250 mm;

(4) 工业试验结果表明, 该工艺操作简单, 脱硫效率比同类型顶喷粉工艺提高 15% 以上.

参 考 文 献

- [1] Zhou J A, Zhu M Y, Pan S S, et al. Experimental study on desulfurization for hot metal pretreatment with bottom powder injection through slot plug. *J Iron Steel Res*, 2007, 19(9): 14
(周建安, 朱苗勇, 潘时松, 等. 狭缝式透气砖底喷粉铁水脱硫的实验研究. 钢铁研究学报, 2007, 19(9): 14)
- [2] Xiong Y Q. *Experimental Research and Three-dimensional Numerical Simulation on Conveying Properties of Gas-solid Injector* [Dissertation]. Nanjing: Southeastern University, 2003
(熊源泉. 气固喷射器输送特性的试验研究及其三维数值模拟[学位论文]. 南京: 东南大学, 2003)
- [3] Xiong Y Q, Yuan Z L, Zhang M Y. Three-dimensional numerical simulation on conveying properties of gas-solid injector under pressurization. *J Chem Ind Eng*, 2004, 55(10): 1638
(熊源泉, 袁竹林, 章名耀. 加压条件下气固喷射器疏松特性的三维数值模拟. 化工学报, 2004, 55(10): 1638)
- [4] Tsuji Y, Kawaguchi T. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed. *Power Technol*, 1993, 77: 79
- [5] Chu K W, Yu A B. Numerical simulation of complex particle-fluid flows. *Power Technol*, 2008, 179: 104
- [6] Lai Y L, Tai Y Q, Rensheng D, et al. Pneumatic transport of granular materials through a 90° bend. *Chem Eng Sci*, 2004, 59: 4637
- [7] Luo K, Yan J, Fan J R, et al. On coherent structures in a three-dimensional transitional plane jet. *Sci China Ser E*, 2008, 51(4): 386
- [8] Zhou J A. *Study on the New Refining Process of Desulfurization in Ladle with Bottom Powder Injection through Slot Porous Plug* [Dissertation]. Shenyang: Northeastern University, 2007
(周建安. 狭缝型透气砖底喷粉脱硫钢包精炼新工艺研究[学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2007)
- [9] Pan S S, Zhu M Y. Motion characteristics of injected powder through porous brick mounted in the bottom of refining ladle. *Acta Metall Sin*, 2007, 43(5): 553
(潘时松, 朱苗勇. 精炼钢包透气砖中喷粉颗粒的运动特性. 金属学报, 2007, 43(5): 553)
- [10] Liu Z Q, Li B K, Jiang M F, et al. Modeling of transient two-phase flow in a continuous casting mold using Euler-Euler large eddy simulation scheme. *ISIJ Int*, 2013, 53(3): 484
- [11] Zhou J A, Sun Z Q, Zhan D P, et al. Comparative study of desulfurization with powder injected into hot iron through lance and slot porous plug. *J Northeast Univ Nat Sci*, 2012, 33(1): 90
(周建安, 孙中强, 战东平, 等. 铁水包顶底喷粉脱硫对比试验研究. 东北大学学报: 自然科学版, 2012, 33(1): 90)