

# 铁水连续预处理涡流反应器内液固两相流动特征的数值模拟

刘向军<sup>1</sup>, 石洪志<sup>2</sup>, 温治<sup>1</sup>, 冯俊小<sup>1</sup>, 刘双科<sup>1</sup>, 尹小东<sup>2</sup>, 王妍<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学热能工程系, 北京 100083; 2. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

**摘要:** 铁水预处理技术中反应器的设计至关重要. 采用  $k-\epsilon$  湍流模型与颗粒随机轨道模型相结合的两相流动模型, 数值模拟了涡流反应器内铁水、反应剂的两相流动特征. 计算结果表明, 选取本研究所用的反应器几何参数和运行参数, 反应剂颗粒能有效地加入铁水中, 与铁水较好混合, 可达到设想的加料、混合、进而进行化学反应的效果.

**关键词:** 铁水预处理; 涡流反应器; 两相流动; 数值模拟

**中图分类号:** TK16; Q242      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-606X(2005)04-0370-05

## 1 前言

铁水预处理是自上世纪 50 年代以来迅速发展起来的一项重要工艺技术, 已成为现代钢铁生产流程水平与钢铁产品高质量水平的标志<sup>[1]</sup>. 完整的铁水预处理工艺包括脱硫、脱硅和脱磷三个过程. 开发脱硫、脱硅和脱磷效率高的铁水连续预处理技术, 完善和优化钢铁生产工艺流程, 对钢铁工业的发展有重要意义. 近 10 年来, 我国铁水预处理技术发展较快, 许多厂家建起了铁水预处理脱硫装置, 少数厂家还配备了“三脱”装置. 但到目前为止, 实际生产中还存在各种问题, 效果也不十分理想. 研究和开发高效的铁水预处理技术一直是冶金工作者的重要研究课题之一<sup>[2,3]</sup>.

实现高效的铁水预处理技术, 反应器的设计至关重要. 本工作采用数值模拟的方法研究了涡流反应器内铁水、反应剂的两相流动特征, 详细揭示了反应器各部分的流场信息及反应剂的运动经历.

## 2 物理模型

最近日本学者提出了一种新铁水连续预处理技术的思路, 见图 1, 即: 利用出铁口的高度所具有的重力势能, 使铁水与反应剂进行良好的混合<sup>[4]</sup>, 迅速达到预处理效果, 同时实现脱硫、脱硅和脱磷多步工艺的连续化. 该工艺具有处理过程紧凑、处理时间短、铁水温降相对较小等特点. 该思路自提出后受到广泛的重视.

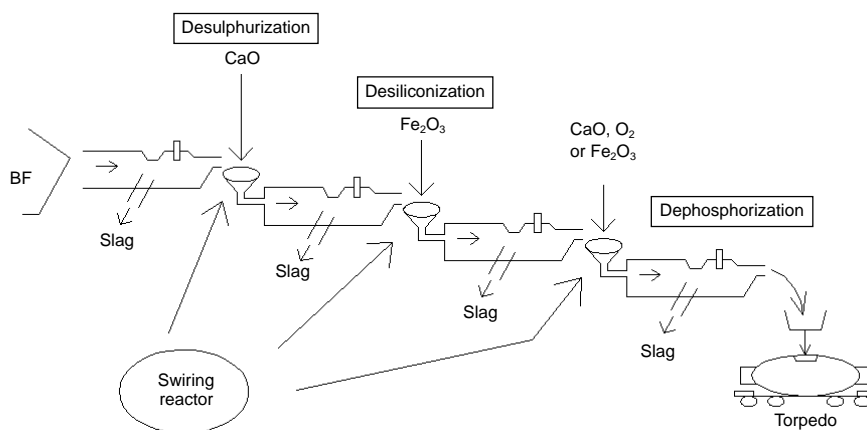


图 1 铁水连续预处理工艺流程简图

Fig.1 Flowchart of the Molten Metal Continuous Pretreatment Technology

实现图 1 所示工艺的关键在于反应器的优化设计. 由图 1 可看出, 连续脱硫、脱硅和脱磷工艺各步所用的反应器都是由漏斗形混合加料反应器 1 和池状反应器 2 两部分组成, 如图 2 所示, 图 2(a)为反应器 1, 2 的简图,

图 2(b)为反应器 1 的侧视图, 图 2(c)为其中 1-1 剖面图的俯视图. 为指导反应器的优化设计, 本研究对反应器 1 内的两相流动进行了数值模拟. 根据文献<sup>[4,5]</sup>, 本研究选用的几何参数和基本工况参数见表 1.

收稿日期: 2004-09-21, 修回日期: 2004-11-22

作者简介: 刘向军(1969-), 女, 湖北省武汉市人, 博士, 副教授, 主要从事流动与燃烧过程的数值模拟研究, E-mail: liuxj@me.ustb.edu.cn.

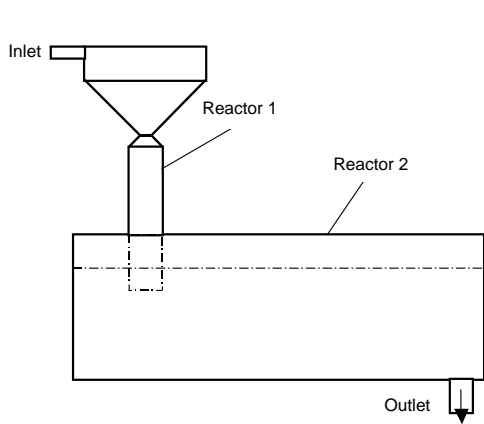


图 2(a) 反应器 1, 2 简图  
Fig.2(a) Schematic diagram of reactor 1 and 2

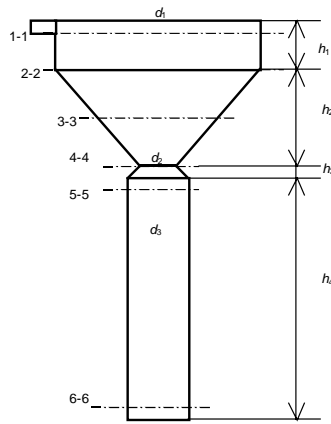


图 2(b) 反应器 1 侧视图  
Fig.2(b) Side view of the reactor 1

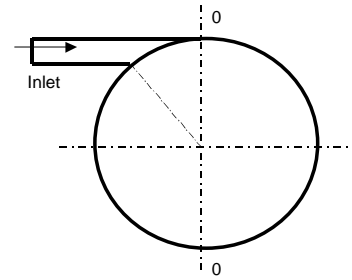


图 2(c) 反应器 1 中 1-1 剖面图  
Fig.2(c) 1-1 section of reactor 1

表 1 反应器几何参数及主要工况参数

Table 1 Geometrical parameters of the reactor and main operating conditions

Inlet area (m <sup>2</sup> )	0.0067
d <sub>1</sub> (m)	1.0
d <sub>2</sub> (m)	0.1
d <sub>3</sub> (m)	0.4
h <sub>1</sub> (m)	0.3
h <sub>2</sub> (m)	0.6
h <sub>3</sub> (m)	0.1
h <sub>4</sub> (m)	1.0
Flow rate of molten metal (m <sup>3</sup> /s)	0.02374
Inlet velocity (m/s)	3.544
Particle density (kg/m <sup>3</sup> )	3000
Particle flow ratio (kg/t)	10
Particle diameter (μm)	40

### 3 数学模型

#### 3.1 控制方程

铁水的预处理主要包括脱硫、脱硅和脱磷三部分，都属于多相流动、传热及化学反应过程。在该过程中，固体粉末，如 CaO 粉、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉等喷射到高温铁水中，

边流动边混合，同时又发生化学反应，产生热量和质量的交换，最终实现脱硫、脱硅和脱磷的目的。

显然对上述这样一个复杂过程进行完整的数学描述是非常困难的，必须对其进行合理的简化。通过对该过程主要特点的分析，并结合前期研究工作的经验，提出如下假设条件：

- (1) 铁水近似按牛顿流体处理，计算中将其粘度按常数处理，取  $5.59 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ；
- (2) 初始状态下，硫、硅和磷等主要组分在铁水中是均匀分布的；
- (3) 熔融的铁渣既不挥发也不溶于钢水；
- (4) 固体粉末作为离散相处理，颗粒形状近似为球形，且在流动过程中形状保持不变。

相应地，对于连续相的铁水，采用欧拉方法研究其流动规律，湍流模型采用  $k-\varepsilon$  双方程模型，其控制方程可通过表 2 来描述。

表 2 连续相控制方程

Table 2 Governing equations for molten metal

Variable	Equation
Mass	$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$
Momentum	$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot \tau - \nabla \left( \frac{2}{3} \rho k \right) + \rho \vec{g} + \vec{S}_{pv}, \quad \tau = \mu_c [\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T]$
Turbulence kinetic energy	$\nabla \cdot (\rho \vec{V} k) = -\frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \vec{V} + \tau : \nabla \vec{V} + \nabla \cdot [(\mu_c / \sigma_k) \nabla k] - \rho \varepsilon$
Turbulence dissipation rate	$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \varepsilon) = -\frac{2}{3} C_1 - C_3 \cdot \rho \varepsilon \nabla \cdot \vec{V} + \nabla \cdot [(\mu_c / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon] + \frac{\varepsilon}{k} [C_1 \tau : \nabla \vec{V} - C_2 \rho \varepsilon]$

其中： $\mu_c = \mu + \mu_t$ ,  $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$ ,  $\vec{S}_{pv} = \sum_k N_k [(m_k \vec{V})_{in} - (m_k \vec{V})_{out}]$ ,  $\vec{S}_{pv}$  为颗粒对铁水流动造成的动量源项， $(m_k \vec{V})_{in}$ ,  $(m_k \vec{V})_{out}$  分别为颗粒进出计算单元的动量， $N_k$  为单个颗粒所代表的颗粒总个数。各常数取值为： $C_1=1.44$ ,  $C_2=1.92$ ,  $C_3=1.0$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.0$ 。

对于固体粉末离散相，在拉格朗日坐标下采用随机轨道模型研究其运动规律。计算中主要考虑颗粒受到的重力及铁水的曳力，运动方程的具体表达式为

$$m_c \frac{d\vec{V}_c}{dt} = \vec{F}_D + m_c \vec{g}$$

式中  $m_c$  为单个固体颗粒的质量,  $\bar{F}_D = (\rho\pi r_c^2 C_D/2)|\bar{v} - \bar{v}_c|$ .  $(\bar{v} - \bar{v}_c)$  为铁水对颗粒的曳力,  $C_D$  为阻力系数, 在不同的颗粒运动的 Reynolds 数范围内,  $C_D$  可用不同的经验表达式来计算: 当  $Re_c < 1$  时,  $C_D = 24/Re_c$ , 当  $1 \leq Re_c < 1000$  时,  $C_D = (1 + Re_c^{2/3})24/Re_c$ , 当  $Re_c \geq 1000$  时,  $C_D = 0.44$ .

### 3.2 边界及初始条件

入口铁水流速根据流量给为定值, 入口处  $k = 0.01V_{in}^2$ ,  $\epsilon = k^{3/2}/l$ , 特征尺寸  $l$  取为入口的当量直径. 在固体壁面上速度取无滑移边界条件, 近壁处采用壁函数, 出口采用压力边界条件, 计算域内初始速度为 0.

颗粒的初始位置在漏斗形反应器的中心正上方, 初始速度取为竖直向下 2 m/s, 颗粒的初始粒径为 40  $\mu\text{m}$ , 本计算中根据取铁水的携粉率为 10 kg/t, 则颗粒的喷粉量为  $1.6578 \times 10^{10}$  个/s, 计算中采用随机轨道模型跟踪计算了 600 条轨道, 每条轨道代表  $2.763 \times 10^7$  个颗粒的运动经历.

## 4 计算方法

采用上述控制方程, 在圆柱坐标下将方程离散化, 网格的划分如图 3 所示, 网格数为  $40 \times 36 \times 12$ , 铁水连续

相流的计算采用 SIMPLER 算法, 对流项离散化采用上风格式, 扩散项的离散化采用中心差分格式, 代数方程的求解采用 Gauss-Seidel 迭代法. 颗粒相的控制方程是一组常微分方程, 采用 Gill 算法. 计算中首先计算铁水连续相的流场达到初收敛, 在初收敛的流场中计算颗粒的运动经历, 然后将颗粒对铁水连续相的源项加入流场, 重新计算流场, 在达到基本稳定后, 在新的流场中重新计算颗粒相的运动经历, 更新源项, 再回到流场计算, 如此反复, 直到铁水连续相流场最终收敛. 上述算法采用 Fortran 语言编程, 在 Pentium III 866 内存为 512 M 的微机上运行 21 h 达到收敛. 本工作采用的收敛准则是  $\sum_{i=1}^n |\phi_i^{k+1} - \phi_i^k| / \sum_{i=1}^n |\phi_i^k| \leq \lambda$ , 式中,  $n$  为网格节点总数,  $k$  为迭代次数,  $\phi$  为铁水连续相因变量,  $\lambda$  为收敛准则, 取最终收敛的精度标准为  $\lambda = 0.0001$ , 开始两相耦合时的标准是  $\lambda = 0.005$ .

## 5 计算结果与分析

图 4~7 为计算所得各截面上铁水连续相流场图及铁水-反应剂两相流谱图, 各截面的具体位置见图 2(b), 2(c),  $u, v, w$  分别代表  $r, \theta, Z$  方向上的速度.

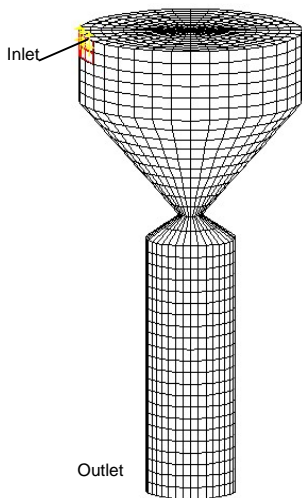


图 3 网格的划分  
Fig.3 Grid system

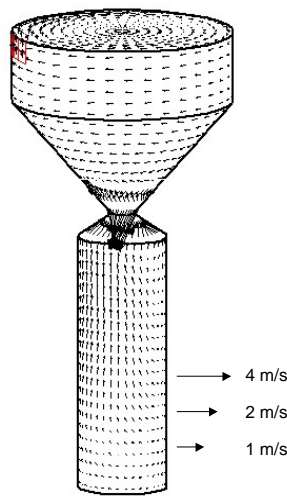


图 4 铁水流谱图  
Fig.4 Flow pattern of molten metal

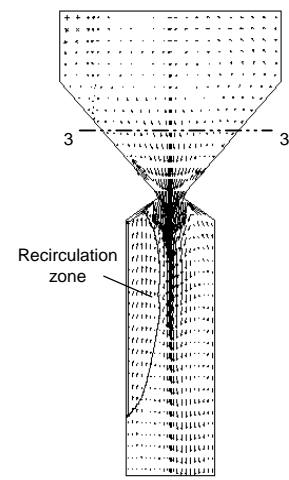


图 5 0-0 截面的  $u-w$  速度分布图  
Fig.5 Velocity distribution in 0-0 section

### 5.1 铁水连续相流动特征

图 4 为铁水单相流谱图, 图 5 为中心纵截面 0-0 截面的速度分布图, 由此两图可以看出, 由于反应器形状复杂, 包括直管段、漏斗段、喉部收缩、扩张段及第二直管段多部分, 铁水在反应器内的流场是复杂多变的, 反应器内速度梯度大; 3-3 截面以上, 流体的纵向动量基本为 0, 从 3-3 截面起, 纵向动量逐渐增大, 到喉部, 由于截面缩小, 铁水以很大的竖直向下速度流入扩张段, 扩张段由于截面突然变大, 受铁水纵向

射流的卷吸, 喉部以下局部流动十分复杂, 速度梯度大, 近壁处出现较大的回流区, 到近出口处, 回流区消失, 铁水的动量全部转为向下. 铁水连续相的总体流动趋势是: 铁水切向流入漏斗形反应器 1 内, 形成旋涡流动, 边旋转边向下流动. 这一流场结构对铁水-反应剂两相之间以及铁水内部的混合及进一步的反应是十分有利的.

图 6 则分别为 1-1~6-6 六个横截面上的  $u-v$  速度分布. 可以看出: 在 1-1 和 2-2 截面, 在水平截面上有较

大的切向速度，铁水旋流较强；到 3-3 截面，由于漏斗的向下导流作用，铁水的动量逐渐由水平切向转化为纵向，旋流削弱，水平切向速度减小；在喉部 4-4 截面，旋流已很微弱。经喉部收缩、扩张段后，到 5-5 截面，大部分铁水已基本没有水平切向动量，仅有一小区域的

流体受残余旋流的影响，还有较小的切向动量分量，但在整个截面上，已不存在旋流；到 6-6 截面，水平截面上的动量已基本消失。这一结论与图 5 所示的中心纵截面上的  $u-w$  速度分布相一致。

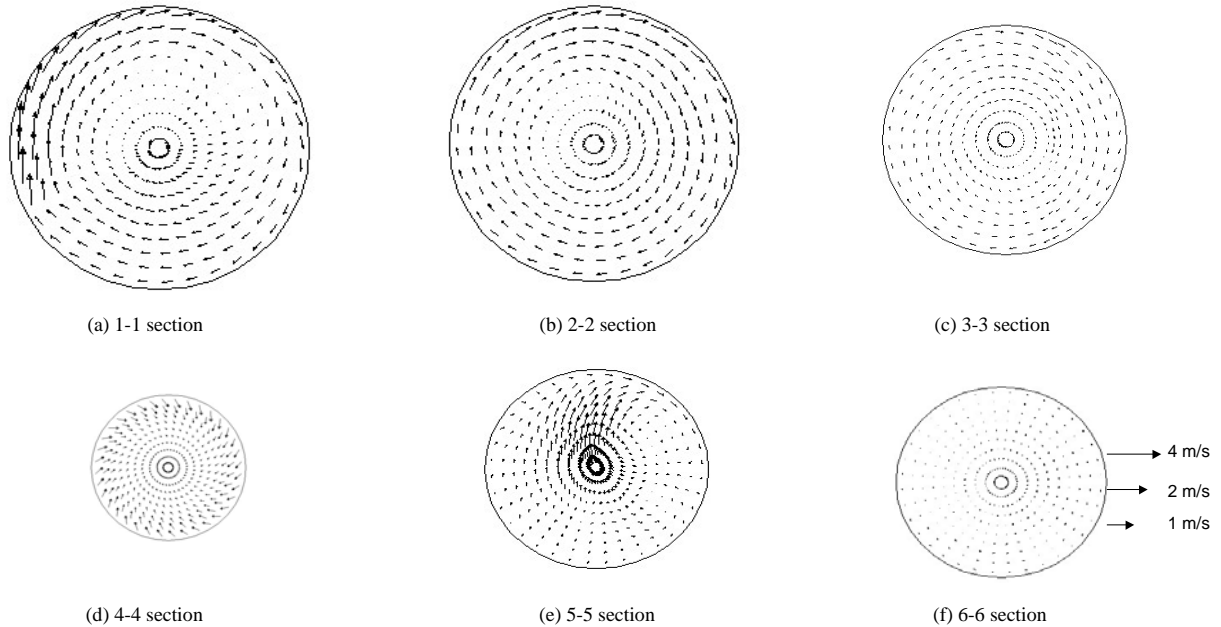


图 6 各水平截面上的速度分布  
Fig.6 Velocity distribution in each horizontal section

### 5.2 铁水-反应剂两相流动特征

图 7 所示为铁水-反应剂两相流谱图，可以看出，3-3 截面以上铁水作较强的旋流运动，反应剂颗粒从上部中心撒入，落入到铁水旋涡中心，被铁水卷吸，边旋转边向下流动，在喉部与铁水一起以较大的速度向下流动，由于喉部以下局部流动十分复杂，近壁处有回流区，

速度梯度大，部分反应剂被回流区卷吸，弥散较好，能达到设想的加料混合效果。这一计算结果说明，采用本研究所用的几何参数和运行参数，反应剂颗粒能有效地加入铁水中，与铁水较好混合，达到所设想的加料、混合进而进行化学反应的效果。

### 6 结论

通过对数值仿真计算的结果及其分析可以看出，漏斗形反应器内的流动可以描述为：铁水切向流入漏斗形反应器，边旋转边向下流动，形成旋涡流动，固体颗粒从中心喷入，被旋涡中心卷吸，与铁水一起向下流动。同时流动分析表明，采用本研究所用的几何参数和运行参数，反应剂颗粒能有效地加入铁水中，与铁水较好混合，达到所设想的加料、混合进而进行化学反应的效果。这一结论证实了文献<sup>[4,5]</sup>所提出的铁水连续预处理技术的思路理论。

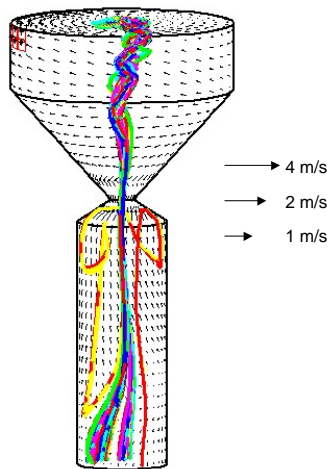


图 7 铁水-反应剂两相流谱图  
Fig.7 Two-phase flow pattern of particles and molten-metal

#### 符号表:

$C_1, C_2, C_3, C_\mu$	湍流模型常数	$C_D$	阻力系数
$\bar{F}_b$	铁水对颗粒的曳力 (N)	$g$	重力加速度 ( $m/s^2$ )
$k$	湍流动能 ( $m^2/s^2$ )	$m_c$	单个固体颗粒的质量 (kg)
$p$	压力 (Pa)	$r_c$	颗粒半径 (m)

$S_{pv}$	颗粒对铁水流动造成的动量源项	$\bar{v}$	铁水流速 (m/s)
$\bar{v}_c$	固体颗粒速度 (m/s)	$\rho$	铁水密度 ( $\text{kg/m}^3$ )
$\sigma_k$	湍动能的普朗特常数	$\sigma_\epsilon$	耗散率的普朗特常数
$\tau$	粘性应力张量		

## 参考文献:

- [1] 欧阳守忠. 铁水脱硫预处理及其有关技术的新发展 [J]. 炼钢, 1995, 11(6): 61-65.
- [2] 张荣生. 钢铁生产中的脱硫 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1986. 91-93.
- [3] 程正东, 沙永志, 叶绪恕, 等. 铁水沟喷粉连续脱硫工业试验 [J]. 钢铁, 1991, 26(2): 12-17.
- [4] 横谷真一郎. 旋回流による精炼プロセスへの適用 [J]. 材料とプロセス, 2000, 13: 81-89.
- [5] 田中敏宏, 原茂太, 丸川雄浄, 等. 高温融体物性論の立場から見た高效率反応プロセス [J]. 材料とプロセス, 2004, 17: 37-39.

## Numerical Simulation of the Two-phase Flow in a Swirling-reactor for Continuous Pretreatment of Molten Metal

LIU Xiang-jun<sup>1</sup>, SHI Hong-zhi<sup>2</sup>, WEN Zhi<sup>1</sup>, FENG Jun-xiao<sup>1</sup>, LIU Shuang-ke<sup>1</sup>, YIN Xiao-dong<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>2</sup>

(1. Dept. Thermal Eng., University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Baoshan Iron and Steel Co., Ltd., Shanghai 201900, China)

**Abstract:** A novel continuous molten-metal pretreatment technology using swirling-reactors is recently proposed by Japanese Scientists. Reactor designing is a key problem for developing and applying this technology. Detailed information about the flow process in a reactor is then very necessary. In this paper, a mathematical model for numerically simulating two-phase molten-metal and particle flow is established. The models used include the  $k-\epsilon$  two-equation model for turbulent molten-metal flow and the random trajectory model for particle flow. The governing equations are solved by SIMPLER algorithm. The two-phase flow characteristics in a swirling-reactor are numerically studied. Detailed flow field of the molten metal and moving behavior of the particles in the reactor are obtained. Calculated results show that particles can be effectively dropped into molten metal flow using this type swirling-reactor. Particles and molten metal could be mixed well when adopting proper geometrical parameters and operating conditions. These results offer detailed scientific basis for designing and optimizing the hot metal pre-treatment technology.

**Key words:** molten-metal pretreatment; swirling-reactor; two-phase flow; numerical simulation