

旋风炉内气固两相流动特性的数值模拟

齐霖^{1,2}, 曲迎霞^{1,2}, 姜大鹏³, 邹宗树^{1,2}

(1. 东北大学 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819;
2. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 3. 国家税务总局 辽宁省税务局, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 为探究旋风炉在闪速还原炼铁技术中的应用状况与前景, 气相采用欧拉模型, 颗粒相采用DPM (discrete phase model)对旋风炉内气相流场和颗粒运动轨迹进行了数值模拟. 分析了上升气体(熔融还原炉煤气)速度和铁矿粉粒度对气固两相流动特性的影响. 结果表明: 旋流场的切向速度在喷枪区域近似“凹”字形分布, 在喷枪以上区域近似“M”形分布; 上升气体速度由4 m/s增至8 m/s, 气体切向速度最大值减小, 铁矿粉捕集率由98.99%降至93.51%, 但强旋湍流区逐渐上移, 铁矿粉运动路径变长, 更有利于其熔化和还原. 此外, 捕集率随着粒度的增大先减小后增大, 但大粒度铁矿粉几乎不发生螺旋向上运动.

关键词: 旋风炉; 铁矿粉; 气固两相流; 切向速度

中图分类号: TF 557 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)09-0041-10

Numerical Simulation of Gas-Solid Two-Phase Flow Characteristics in Cyclone Furnace

QI Lin^{1,2}, QU Ying-xia^{1,2}, JIANG Da-peng³, ZOU Zong-shu^{1,2}

(1. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Mineral (Ministry of Education), Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Liaoning Provincial Tax Service, State Taxation Administration, Shenyang 110016, China. Corresponding author: QU Ying-xia, E-mail: quyx@smm.neu.edu.cn)

Abstract: In order to explore the application status and prospects of cyclone furnaces in flash ironmaking technology, numerical simulations were conducted on the gas flow field and particle trajectories within the cyclone furnace using the Eulerian model and DPM, respectively. The effects of the rising gas (smelting reduction vessel gas) velocity and iron ore particle size on the characteristics of gas-solid two-phase flow were analyzed. The results show that the tangential velocity distribution of the vortex field approximately forms a “concave” shape in the lance region and an “M” shape in the region above the lance. As the rising gas velocity increases from 4 m/s to 8 m/s, the maximum tangential velocity of the gas decreases, and the capture rate of the iron ore particles decreases from 98.99% to 93.51%. However, the strong swirling turbulent region gradually moves upward, and the trajectory of the iron ore particles becomes longer, which is more conducive to the melting and reduction. In addition, the capture rate first decreases and then increases with increasing particle size, but the iron ore particles of large size hardly undergo upward spiral motion.

Key words: cyclone furnace; iron ore powder; gas-solid two-phase flow; tangential velocity

铁浴熔融还原炼铁工艺是一种能够以非焦煤为能源和还原剂, 在高温熔融状态下还原铁矿物, 从而获得液态铁水的技术方法. 该技术取消了烧结及焦化等工艺环节, 不仅能够显著减少

CO₂排放量, 还能有效降低综合能耗. 在当前“双碳”背景下, 具有广阔的发展前景^[1-4]. Hisarna 熔融还原工艺是 ULCOS (ultra-low CO₂ steelmaking) 项目下的炼铁技术之一^[5-6], 位于荷兰的示范工厂

收稿日期: 2024-02-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52374329).

作者简介: 齐霖(1998—), 男, 黑龙江绥化人, 东北大学硕士研究生; 邹宗树(1958—), 男, 山东章丘人, 东北大学教授, 博士生导师.

建于2010年^[7].与传统高炉路线相比,省去了造球、烧结及炼焦3个辅助环节,可减少20% CO₂排放,结合碳捕获、利用和封存技术(CCUS),碳排放预计可减少80%以上^[8-9].Hisarna主反应器由CCF(cyclone converter furnace)工艺中的旋风炉^[10]和Hismelt工艺中的熔融还原炉(smelting reduction vessel, SRV)^[11-13]组成.铁矿粉、熔剂和氧气通过旋风炉炉壁上的侧吹喷枪切向进入炉内,同时产生强烈的旋流.氧气与SRV产生的煤气发生燃烧反应,释放出大量的热;铁矿粉随旋流向上运动并发生分解、闪速还原和熔化,预还原度约为10%~20%.预还原产物最终在离心力的作用下被水冷壁面捕集,并在重力作用下滴落至SRV的熔池中.旋风炉内复杂的物理化学变化直接影响到整个工艺的顺行和产能,但目前文献中关于这方面的报道甚少.20世纪90年代,为给CCF工艺的开发提供更多理论依据,Denys^[14]根据炉内不同区域发生的化学反应不同,将主反应器划分为多个区域,并对各个区域进行了动力学分析.文中给出了年产50万t铁水的反应器结构和试验厂的部分操作参数.其中,旋风炉的直径为3 m,高为6 m.氧气与粒度小于300 μm的铁矿粉通过安装在旋风炉下半部12个不同高度上的12组喷枪切向进入炉膛内.文中提到,部分铁矿粉进入旋风炉后会被直接喷吹到对面的水冷炉壁上并被捕集,其运动轨迹近乎是直线;部分铁矿粉会被气体带出旋风炉形成粉尘.为了保证较高的捕集率,下部SRV煤气进入上部旋风炉的速度应控制在8 m/s以下.Link^[15]针对Hisarna工艺中的旋风炉和SRV进行了物料平衡和热平衡分析,给出了每生产1 t铁水的能耗和物料消耗.这些研究均为本文主要参数的选择提供了依据.

旋风炉内的流场与旋风分离器相似,都具有强旋转湍流特性.通过大量文献研究发现,此类反应器的模拟质量取决于湍流模型的选择.一些研究表明,一阶 κ - ε 和 κ - ω 模型是建立在各向同性涡黏假设的基础上,不适用于描述旋风流场中的湍流流动^[16-17].二阶雷诺应力模型(Reynolds stress equation model, RSM)能够考虑高流线曲率以及应变和各向异性的快速变化,因此常被用于模拟旋风流场^[18-27].由于旋风炉内的固相颗粒体积分数很小,多数采用DPM模型跟踪颗粒的运动轨迹^[28],计算结果与实际情况吻合较好.为进一步探究旋风炉在熔融还原炼铁工艺中的应用现状与前景,并为我国该技术的开发拓宽思路,

本文针对旋风炉内的气固两相流进行三维数值模拟,研究不同条件下流体的流动特性和铁矿粉颗粒的运动规律,从而为反应器操作参数的优化设计奠定理论基础.

1 几何模型的建立

1.1 基本假设

旋风炉的形状与结构如图1所示,基本尺寸参数见表1.氧气和铁矿粉分别由氧气喷枪和铁矿粉喷枪进行喷吹,1支氧气喷枪与1支铁矿粉喷枪称为1组喷枪.每层设置1组喷枪,共12层,错位布置(即每侧6组喷枪).两层间距为0.25 m,每层中2支喷枪间的相对位置由 α 和 β 确定.其中, α 为铁矿粉喷枪与径向方向的夹角; β 为氧气喷枪与铁矿粉喷枪所处位置与圆心连线间的夹角.

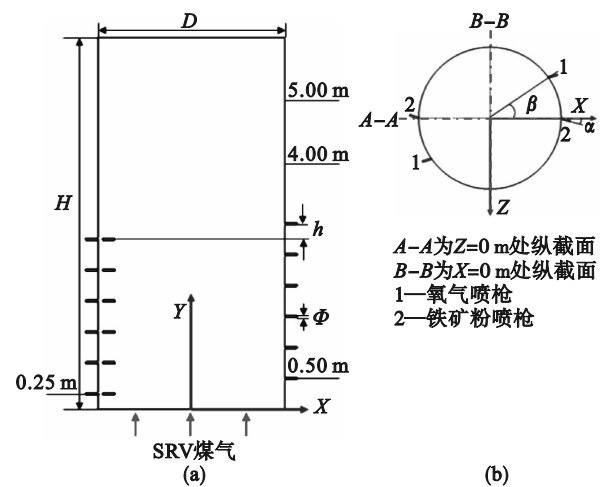


图1 旋风炉示意图

Fig.1 Schematic diagram of cyclone furnace
(a)—主视图; (b)—俯视图.

表1 物理模型几何参数

参数	尺寸
炉高 H/m	6
炉径 D/m	3
喷枪直径 Φ/m	0.032
喷枪层间间距 h/m	0.250
铁矿粉喷枪径向夹角 $\alpha(^{\circ})$	18.5
两类喷枪径向连线夹角 $\beta(^{\circ})$	35.0

1.2 网络划分及无关性验证

物理模型采用结构化网格进行划分,为提高计算精度,在喷枪附近进行了局部加密,如图2所示.分别采用20万、40万、60万和80万4种规模网

格进行模拟计算,同时对旋风炉内的气体速度分布进行了监测.图 3 给出了不同网格数量下 $Z=0$ m 纵截面上 $Y=4$ m 处,径向位置的气体速度分布.由图可知,40 万、60 万和 80 万网格下的数值模拟结果相差较小.为节省计算时间成本,选取的网格数量为 40 万.

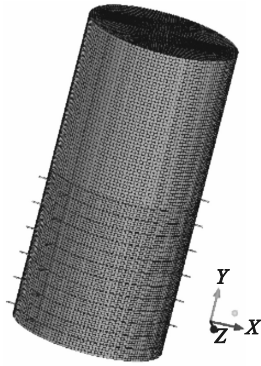


图 2 旋风炉网格划分示意图

Fig. 2 Schematic diagram of grid division for cyclone furnace

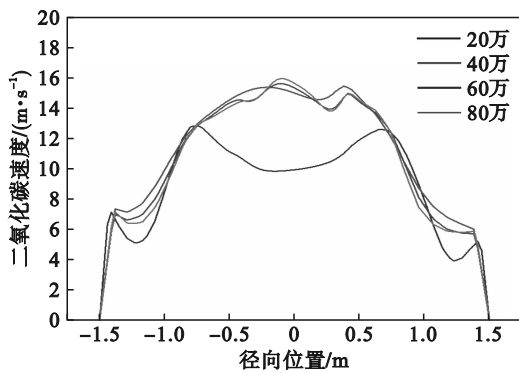


图 3 不同网格数量下旋风炉 $Z=0$ m 纵截面上 $Y=4$ m 处二氧化碳气体速度

Fig. 3 Carbon dioxide gas velocity at $Y=4$ m on $Z=0$ m longitudinal section of cyclone furnace with different grid numbers

2 数学模型的建立

2.1 基本假设

旋风炉内的流场十分复杂,模拟过程中作出如下假设:

- 1) 将气相视为稳态不可压缩流体;
- 2) 壁面设为无滑移壁面,近壁面处流动采用壁面函数进行处理;
- 3) 忽略各组分之间的化学反应对气固两相流的影响;
- 4) 忽略固相颗粒之间的相互作用.

2.2 控制方程及边界条件

如前所述,旋风炉内部流场为复杂的强旋流动,采用 RSM 能够较好地反映湍流的各向异性,压力-速度耦合选用能够处理复杂几何形状和边界条件的 SIMPLEC 算法.由于铁矿粉体积分数小于 10%,采用 DPM 模型跟踪颗粒运动轨迹,入口条件均设置为速度入口 (velocity-inlet),出口条件为自由流出口 (outflow).雷诺应力、湍动能和湍流耗散率离散格式选用一阶迎风格式.所涉及的控制方程如下.

连续性方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0. \quad (1)$$

式中: \bar{u}_i 为 i 方向上的平均速度分量 ($i=1, 2, 3$); x_i 为 i 方向上的坐标分量.

雷诺平均纳维-斯托克斯方程:

$$\bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} R_{ij}. \quad (2)$$

式中: \bar{P} 是平均压强;下标 $i, j=1, 2, 3$; μ 是黏性系数; ρ 是密度; R_{ij} 是雷诺应力张量.

湍流应力分量方程:

$$\bar{u}_k \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial}{\partial x_k} R_{ij} \right) - \left[R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right] - C_1 \frac{\varepsilon}{K} \left[R_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} K \right] - C_2 \left[P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \varepsilon, \quad (3)$$

$$P_{ij} = - \left[R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} + R_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} \right], \quad (4)$$

$$P = -R_{ik} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k}. \quad (5)$$

式中: $\sigma_k=1.0$; $C_1=1.8$; $C_2=0.6$; δ_{ij} 为 Kronecker 符号; K 为湍动能; ε 为耗散率; μ_t 为湍流黏性系数.

湍流耗散率方程:

$$\bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] - C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K}, \quad (6)$$

$$K = \frac{1}{2} \bar{u}'_i \bar{u}'_i. \quad (7)$$

式中: $\sigma_\varepsilon=1.3$; $C_{\varepsilon 1}=1.44$; $C_{\varepsilon 2}=1.92$; u'_i, u'_j 为脉动速度分量.

对于单个颗粒,力平衡方程为

$$\frac{du_p}{dt} = F_D (u_g - u_p) + \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} g + F. \quad (8)$$

式中: g 是重力加速度;下标 g 和 p 分别表示气相和固相; F 是附加力 (包括萨夫曼升力、虚拟质量力、压力梯度力). F_D 表达式为

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24}. \quad (9)$$

式中, Re 为相对雷诺数, 其表达式为

$$Re = \frac{\rho_p d_p |u_p - u_g|}{\mu_g} \quad (10)$$

其中, d_p 是颗粒直径.

C_D 是曳力系数, 其表达式为

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{Re} + \frac{a_3}{Re^2} \quad (11)$$

式中, a_i 是经验常数 ($i=1, 2, 3$).

2.3 模型验证

由于目前已知的旋风炉实验数据稀缺, 选取同为内部强旋流场的旋风分离器进行模型验证, 实验数据取自文献 [29]. 将旋风分离器 $Y=0$ m 纵截面上 $Z=-0.2$ m 高度处切向速度的测量值与计算结果进行对比, 如图 4 所示, 两者吻合较好.

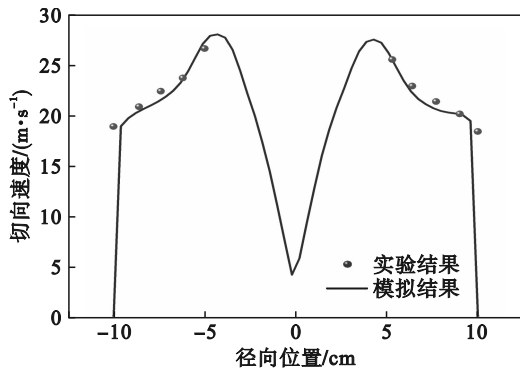


图4 旋风分离器 $Y=0$ m 纵截面上 $Z=-0.2$ m 处切向速度
Fig. 4 Tangential velocity at $Z=-0.2$ m on $Y=0$ m longitudinal section of cyclone separator

2.4 计算方案

本文以典型旋风炉结构参数为基础, 探究主要操作参数对反应器内气固两相强旋湍流流场

的影响. 根据文献中提供的相关信息和数据, 将所研究的主要操作参数确定为: SRV 产生煤气进入旋风炉的速度 (以下称为上升气体速度) 和铁矿粉粒度. 表 2 给出了不同算例中的具体操作参数.

表 2 不同算例中的主要操作参数
Table 2 Main operating parameters of different cases

算例	SRV 上升	铁矿粉	铁矿粉
	气体速度 $m \cdot s^{-1}$	喷吹速率 $m \cdot s^{-1}$	粒度 μm
Case 1	4	30	30
Case 2	6	30	30
Case 3	8	30	30
Case 4	8	30	100
Case 5	8	30	300

3 结果与讨论

3.1 气相流线分析

图 5 给出了不同上升气体速度下旋风炉内的气体流线图. 从图中可以看出, 旋流场形成后, 气体基本呈螺旋形向上运动. 当上升气体速度分别为 4 和 6 m/s 时 (如图 5a 和图 5b 所示), 旋风炉下半段的炉膛内均会形成强旋湍流流动, 并且后者与前者相比, 强旋湍流区略有上移; 上半段炉膛内气体旋流强度减弱. 当上升气体速度提升至 8 m/s 时 (如图 5c 所示), 强旋湍流区上移至旋风炉的中部区域, 且其旋流强度较 4 m/s 和 6 m/s 时弱.

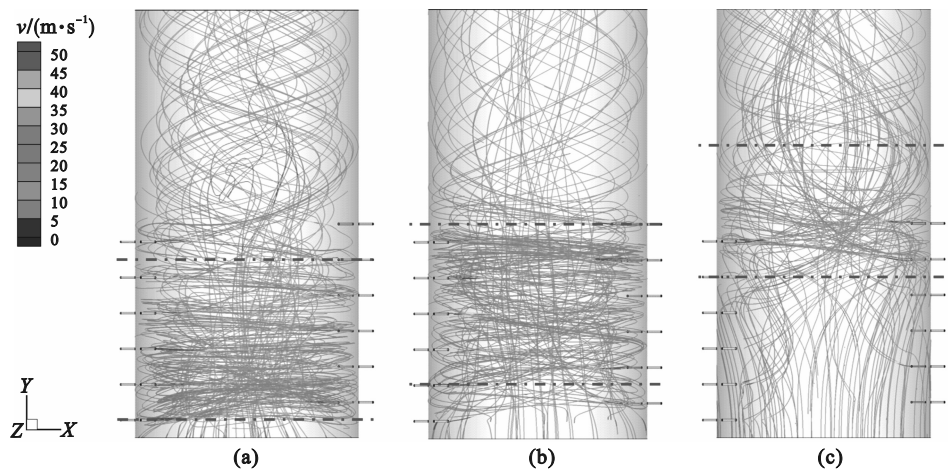


图 5 旋风炉气体流线图

Fig. 5 Gas streamline diagram of cyclone furnace

(a) 一上升气体速度 4 m/s; (b) 一上升气体速度 6 m/s; (c) 一上升气体速度 8 m/s.

为了进一步探究旋风炉内部的旋流流场,图 6~图 8 给出了 3 种情况下横截面上的气体流线图.取左侧喷枪所在高度、右侧喷枪所在高度和喷枪以上不同高度的横截面进行分析.从图中可以看出,在氧气喷枪的作用下,旋风炉内形成了复杂的旋流流场.当上升气体速度为 4 m/s 时,在 $Y=0.25$ m (第 1 层喷枪所在高度) 的横截面上,气相在靠近壁面区域已形成逆时针的旋流.从 $Y=0.25\sim 0.75$ m (第 1 层至第 3 层喷枪) 不同横截面上的气体流线图可以看出,自下而上旋流作用面积逐渐扩大直至覆盖整个横截面,且在 $Y=0.75$ m 的横截面上形成了一个同样逆时针流动的内部涡旋.内部涡旋在 $Y=1.25\sim 2.00$ m (第 5 至第 8 层喷枪) 的区域内逐渐减弱并且消失.但在 $Y=4.00$ m 横截面上又形成一个较小的内部涡旋,并且在此高度以上,旋流场结构相对简单.当上升气体速度为 6 m/s 时,在 $Y=0.25$ m 的横截面上尚未形成

明显的涡旋.在 $Y=0.50$ m (第 2 层喷枪) 的横截面上形成了逆时针流动的外部涡旋和一个内部涡旋.在 $Y=0.75$ m 的横截面上可观察到第二个逆时针流动的内部涡旋.此涡旋面积在轴向方向上先增大后减小,并且两个内部涡旋逐渐向几何中心旋进,最终在 $Y=2.50$ m (第 10 层喷枪) 高度上发生合并.当上升气体速度为 8 m/s 时,横截面上形成的流场结构最为复杂.从 $Y=0.25\sim 0.75$ m 高度上的流线图可以看出,在左右两侧氧气喷枪出口附近先形成两个内部涡旋.在 $Y=1.00$ m 高度上,靠近几何中心位置又形成了第 3 个小尺寸的涡旋.多个涡旋的形成必然会增加湍流效应,从而加剧流体的能量损失.气流直至 $Y=1.25$ m 的壁面附近才开始形成外部涡旋.最小的涡旋在 $Y=1.75$ m 的横截面上融入外部涡旋中.余下的 2 个内部涡旋随着轴向位置的升高逐渐向几何中心旋进.最终,2 个内涡旋在 $Y=5.50$ m 的高度上发生合并.

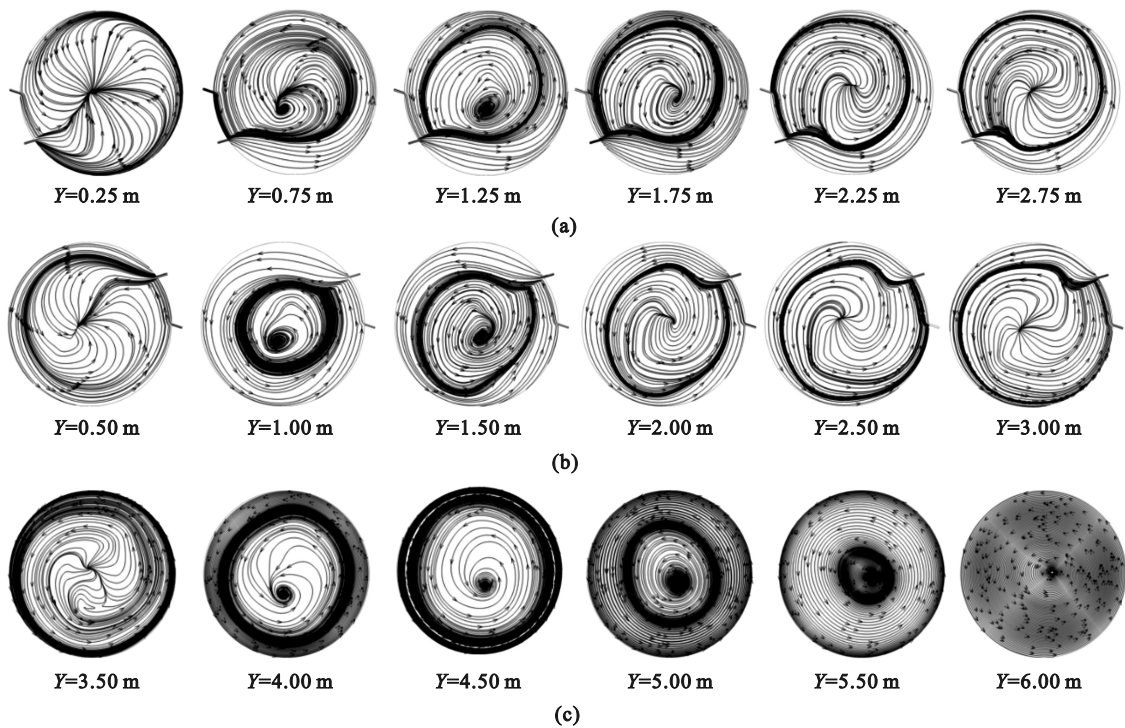
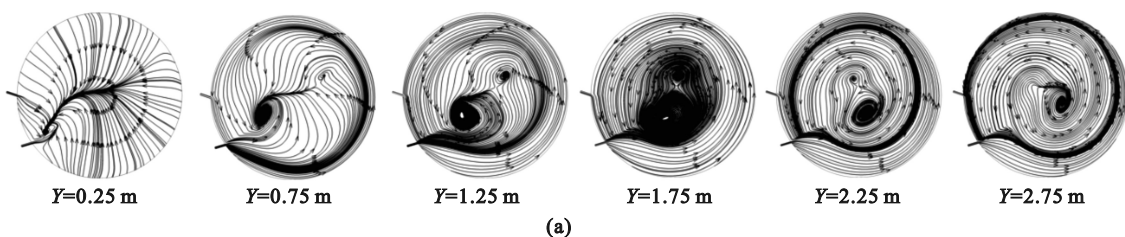


图 6 上升气体速度为 4 m/s 时不同高度处的气体流线图

Fig. 6 Gas streamline diagram at different heights when rising gas velocity is 4 m/s
(a) — 左侧喷枪所在高度; (b) — 右侧喷枪所在高度; (c) — 喷枪以上各高度.



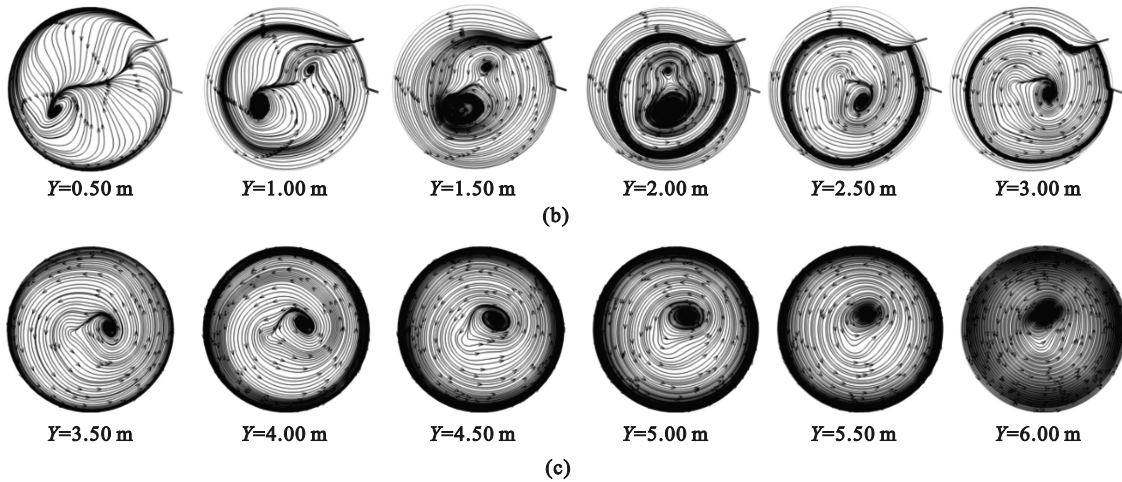


图7 上升气体速度为 6 m/s 时不同高度处的气体流线图

Fig. 7 Gas streamline diagram at different heights when rising gas velocity is 6 m/s

(a)—左侧喷枪所在高度; (b)—右侧喷枪所在高度; (c)—喷枪以上高度.

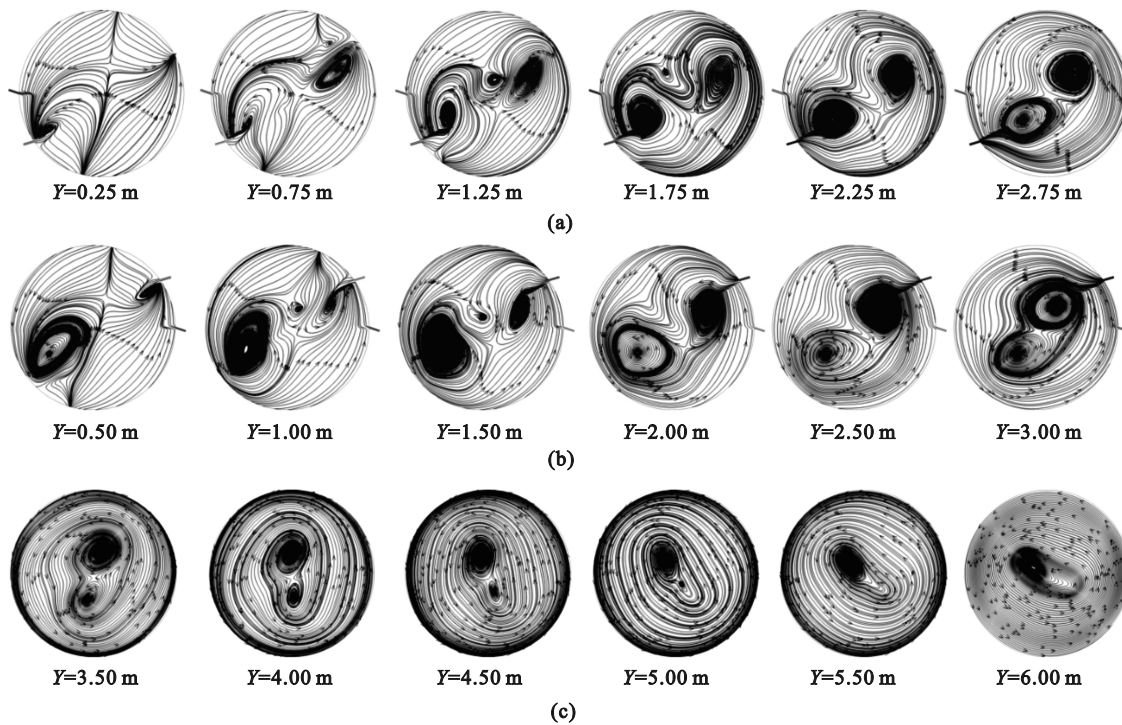


图8 上升气体速度为 8 m/s 时不同高度处的气体流线图

Fig. 8 Gas streamline diagram at different heights when rising gas velocity is 8 m/s

(a)—左侧喷枪所在高度; (b)—右侧喷枪所在高度; (c)—喷枪以上高度.

图9和图10分别给出了 $Z=0\text{ m}$ 和 $X=0\text{ m}$ 处纵剖面上的气体流线图,即图1b中的A-A剖面和B-B剖面.在 $Z=0\text{ m}$ 的纵截面上,当上升气体速度为 4 m/s 时(如图9a所示),靠近旋风炉底部的壁面附近和 $3\sim 4\text{ m}$ 高度处的中心区域均形成了纵向环流;当上升气体速度为 6 m/s 时(如图9b所示),中心区域的纵向环流消失,壁面附近的纵向环流较 4 m/s 时变得狭长且略有上移;当上升气体速度提升至 8 m/s 时(如图9c所示),纵截面上

无纵向环流形成.在 $X=0\text{ m}$ 的纵截面上,当上升气体速度为 4 和 6 m/s 时(如图10a和10b所示),在旋风炉下半部壁面附近形成了多个小尺度纵向环流;当上升气体速度为 8 m/s 时(如图10c所示),下半部的纵向环流消失,仅在最高层喷枪附近产生纵向环流.在对旋风分离器内气固两相流的研究中,同样在轴向上发现了纵向环流^[30],又称为二次流.研究表明,二次流的形成会影响固相颗粒(尤其是较小颗粒)的运动轨迹.

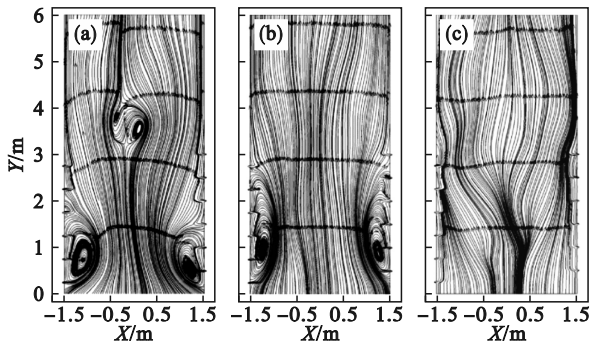


图9 旋风炉 $Z=0$ m 处纵剖面上的气体流线图
 Fig. 9 Gas streamline diagram of cyclone furnace in longitudinal section at $Z=0$ m
 (a) — 上升气体速度 4 m/s; (b) — 上升气体速度 6 m/s;
 (c) — 上升气体速度 8 m/s.

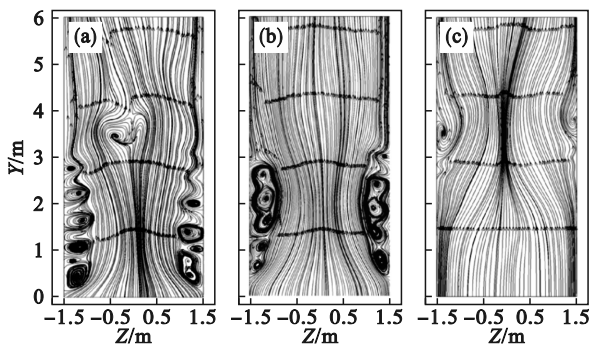


图10 旋风炉 $X=0$ m 处纵剖面上的气体流线图
 Fig. 10 Gas streamline diagram of cyclone furnace in longitudinal section at $X=0$ m
 (a) — 上升气体速度 4 m/s; (b) — 上升气体速度 6 m/s;
 (c) — 上升气体速度 8 m/s.

3.2 气相切向速度分析

气体的切向速度是决定铁矿粉运动轨迹和捕集率的重要因素.图11~图13给出了3种上升气体速度下,切向速度在不同高度横截面上的径向分布.由于喷枪出口处气体速度大,气流间碰撞剧烈,不具代表性.因此,选取Z方向上的计算结果进行分析.为了与上述结果对应分析,每种条件下同样给出了3组数据:左侧喷枪所在高度、

右侧喷枪所在高度和喷枪以上不同高度切向速度的径向分布.整体来看,中心区域的切向速度较小,两侧的切向速度较大.各喷枪所在高度的横截面上,切向速度近似呈“凹”字形分布,而喷枪以上横截面上的切向速度近似呈“M”形分布.当上升气体速度为 4 m/s 时,从 $Y=0.25$ m 到 $Y=0.75$ m (第1至第3层喷枪),切向速度的峰值(曲线上的最高点)迅速增大并达到最大值 33 m/s.随着轴向位置的升高,流体与壁面之间的摩擦和强旋湍流所产生的能量损耗增加,切向速度逐渐减小,如图11a、图11b所示.由图11c可以看出,在喷枪以上各横截面上,切向速度几乎不再随轴向高度的变化而变化,说明流场基本稳定.当上升气体速度为 6 m/s 时(如图11所示),在 $Y=0.25$ m 高度上的切向速度在整个径向位置上接近于零,说明此高度上未形成涡旋,验证了图5中观察到的结果.切向速度峰值在 $Y=1.75$ m (第7层喷枪)高度处达到最大值 27 m/s.喷枪以上区域的切向速度同样基本无变化.当上升气体速度为 4 m/s 和 6 m/s 时,切向速度在旋风炉下半部且靠近炉壁的区域出现波动,这是由图9a和图9b中的纵向环流引起的.当上升气体速度为 8 m/s 时,因纵向环流减少,壁面附近切向速度仅在 $Y=2.75$ m 和 $Y=3.00$ m (第11和12层喷枪)高度上略有波动.在 $Y=1.25$ m 以下的整个径向位置上,切向速度均较小;随后切向速度的峰值随着轴向位置的升高而逐渐增大,在 $Y=3.00$ m 处达到最大值 20 m/s.由此可见,切向速度的最大值随着上升气体速度的增大而逐渐减小,且出现最大值的位置逐渐升高.这是因为上升气体速度越大,壁面摩擦和涡旋碰撞造成的能量损失越大.切向速度减小不利于铁矿粉的捕集,但可能会增加铁矿粉被壁面捕集前的运动距离.在喷枪以上横截面上,切向速度随着高度的升高而逐渐减小,说明旋流强度逐渐减弱.

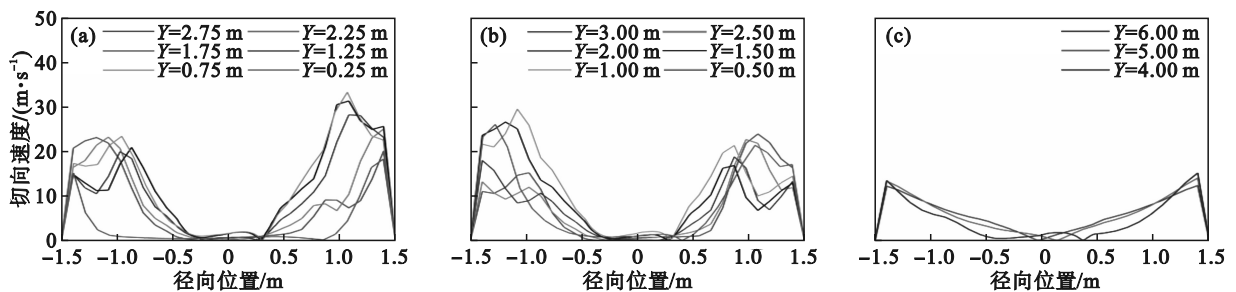


图11 上升气体速度为 4 m/s 时切向速度在不同横截面径向位置上的分布
 Fig. 11 Distribution of tangential velocity at different cross-sectional radial positions when rising gas velocity is 4 m/s
 (a) — 左侧喷枪所在高度; (b) — 右侧喷枪所在高度; (c) — 喷枪以上各高度.

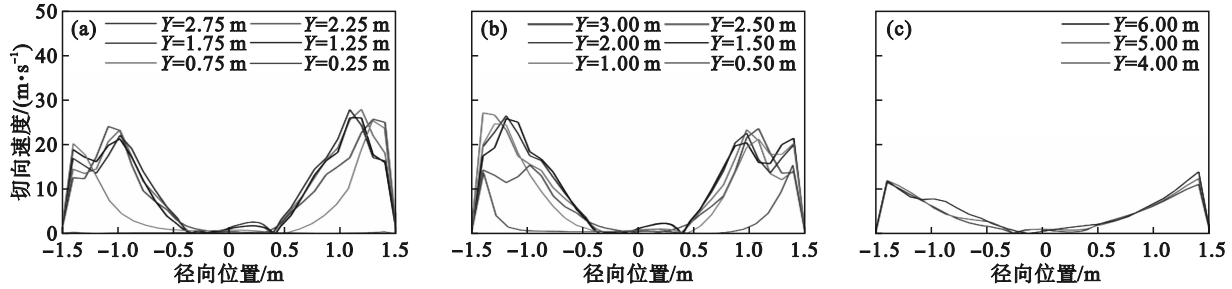


图 12 上升气体速度为 6 m/s 时切向速度在不同横截面径向位置上的分布

Fig. 12 Distribution of tangential velocity at different cross-sectional radial positions when rising gas velocity is 6 m/s

(a)—左侧喷枪所在高度; (b)—右侧喷枪所在高度; (c)—喷枪以上各高度.

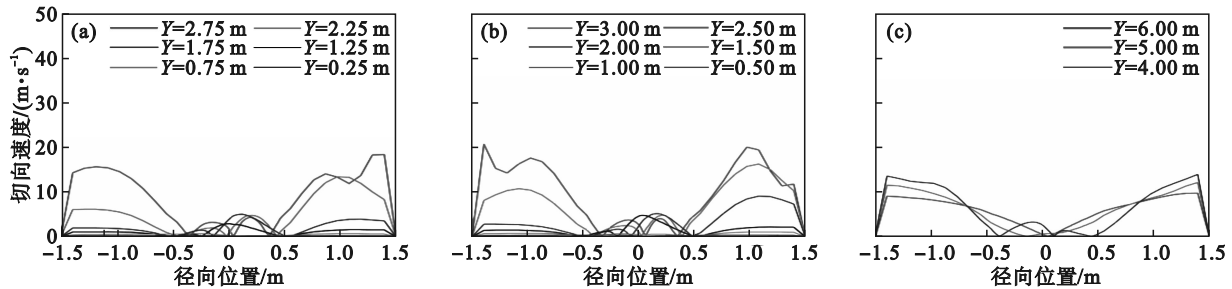


图 13 上升气体速度为 8 m/s 时切向速度在不同横截面径向位置上的分布

Fig. 13 Distribution of tangential velocity at different cross-sectional radial positions when rising gas velocity is 8 m/s

(a)—左侧喷枪所在高度; (b)—右侧喷枪所在高度; (c)—喷枪以上各高度.

3.3 铁矿粉的运动行为分析

铁矿粉颗粒首次到达壁面即视为被壁面上的液相层捕获. 捕集率为被壁面捕获的粒子数量与喷吹粒子总数量之比. 图 14 给出了铁矿粉颗粒在壁面上被捕集的位置分布. 由图可知, 当上升气体速度为 4 m/s 和 6 m/s 时, 铁矿粉被捕集的位置分布于炉壁的整个下半段. 这表明大部分铁矿粉颗粒经喷枪进入炉膛后, 未进行预期的螺旋向上运动便直接被壁面捕获. 由上述切向速度分析可知, 在这两种情况下(图 11~图 12), 气体在旋风

炉下半段的切向速度较大. 由于离心力与切向速度成正比, 因此铁矿粉在较大的离心力作用下更容易被该区域壁面捕集. 当上升气体速度为 8 m/s 时, 大部分铁矿粉在 $Y=2.00\sim 3.00$ m 的壁面上被捕集, 说明铁矿粉在炉膛内的运动路径较 4 m/s 和 6 m/s 时更长. 3 种情况下的捕集率分别为 98.99%, 97.74% 和 93.51%. 由此可见, 虽然上升气体速度降低能够提高铁矿粉的捕集率, 但铁矿粉在反应器内的运动路径更短, 不利于其熔化和还原.

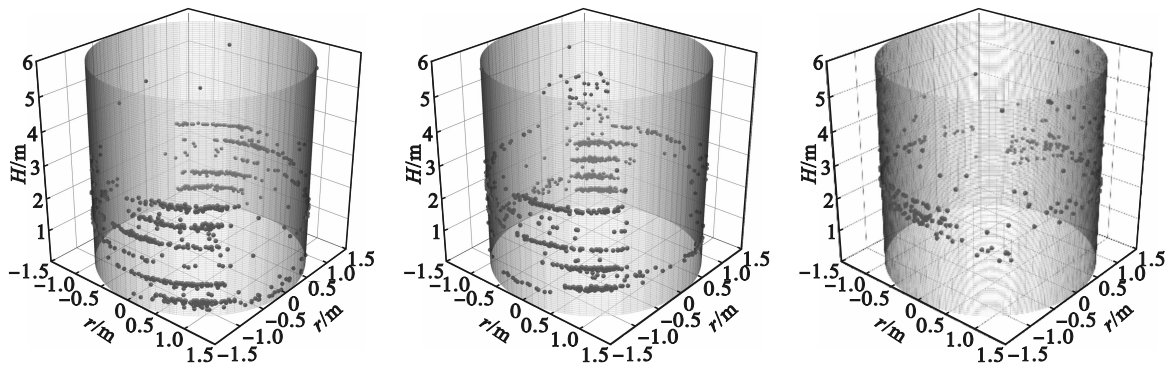


图 14 被旋风炉炉壁捕获的颗粒散点图

Fig. 14 Scattering diagram of captured particles on wall of cyclone furnace

(a)—上升气体速度 4 m/s; (b)—上升气体速度 6 m/s; (c)—上升气体速度 8 m/s.

图 15 给出了不同粒度铁矿粉在旋风炉内的运动轨迹. 上升气体速度为 8 m/s, 考察的铁矿粉

粒度分别为 30, 100 和 300 μm . 3 种粒度下铁矿粉的捕集率分别为 93.5%, 74.8% 和 100%. 由图 15a

可以看出,大部分 $30\ \mu\text{m}$ 的铁矿粉被气体带入外部涡旋,随气流螺旋向上运动.由图8可知,外部涡旋区域的切向速度较大.因此,铁矿粉在向上运动一定距离后,在离心力作用下被壁面捕集.少数 $30\ \mu\text{m}$ 的铁矿粉颗粒会被气流卷入中心区域的内涡旋.由于此区域的切向速度较小,颗粒容易被气流带出反应器形成粉尘.随着粒度的增大,铁矿粉受到的惯性力逐渐增大.因此, $100\ \mu\text{m}$ 的铁矿粉沿喷吹方向运动一定距离后才随气流向上运动.与小粒度相比,更多铁矿粉被带入中心区域的涡旋中,如图15b所示.因此,捕集率明显降低.粒度为 $300\ \mu\text{m}$ 的铁矿粉随流性最差,几乎不发生螺旋向上运动而被直接喷吹到喷枪对面的炉壁上,如图15c所示.虽然捕集率最高,但颗粒运动路径最短.这与文献[14]中描述的 $300\ \mu\text{m}$ 铁矿粉在旋风炉中的运动轨迹一致.当前旋风炉内,铁矿粉的停留时间小于 $0.8\ \text{s}$, $300\ \mu\text{m}$ 铁矿粉的运动时间最短.

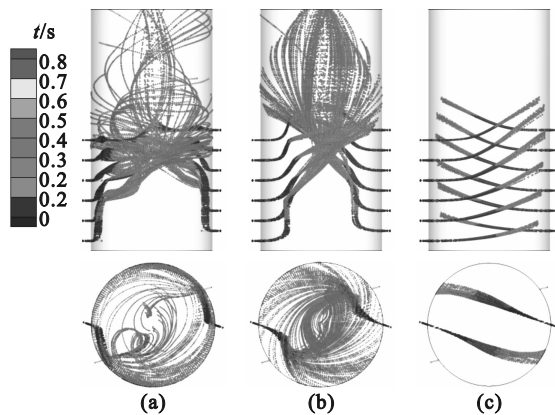


图15 旋风炉不同粒径颗粒运动轨迹

Fig.15 Motion trajectory of particles with different sizes in cyclone furnace

(a)— $30\ \mu\text{m}$ 主视图和侧视图;(b)— $100\ \mu\text{m}$ 主视图和侧视图;
(c)— $300\ \mu\text{m}$ 主视图和侧视图.

4 结 论

1) 旋风炉内的气体整体呈螺旋形上升运动.随着上升气体速度由 $4\ \text{m/s}$ 增加到 $6\ \text{m/s}$ 和 $8\ \text{m/s}$,旋风炉内形成强旋湍流的位置逐渐升高,横截面上内涡旋数量的最大值增至3个,形成外涡旋包围内部多个涡旋的复杂流场结构.纵向环流随上升气体速度的增大而逐渐减弱.随着轴向高度的增加,多个内涡旋逐渐合并成一个涡旋.

2) 旋流场形成后中心区域的切向速度较小,而两侧切向速度较大.旋风炉下半段($0\sim 3\ \text{m}$),即

在喷枪所在区域,近似呈“凹”字形分布,在喷枪以上区域近似呈“M”形分布.这表明铁矿粉在中心区域受到的离心力较小.同一条件下,切向速度的峰值随轴向位置的升高先增大后减小.随着上升气体速度的增大,切向速度的最大值逐渐减小,能量损失主要发生在近壁面以及涡旋碰撞区域.

3) 铁矿粉的捕集率随着上升气体速度的升高而逐渐降低,但在被旋风炉内壁面捕获前的运动路径变长.随着粒度的增大,铁矿粉颗粒的随流性变差,更容易进入离心力较小的中心区域或被直接喷吹到喷枪对面的炉壁上. $30\ \mu\text{m}$ 的铁矿粉相较于 $100\ \mu\text{m}$ 和 $300\ \mu\text{m}$ 的铁矿粉更容易被气流带入外部涡旋,并随气流螺旋向上运动,少数颗粒被带出反应器形成炉尘.当上升气体速度为 $8\ \text{m/s}$ 时,铁矿粉在旋风炉内的运动时间小于 $0.8\ \text{s}$.未来研究工作中,应在当前工作基础上,以延长铁矿粉在旋风炉内的运动路径(或运动时间)并尽量提高捕集率为目标,进行反应器操作参数的优化设计.

参考文献:

- [1] 何桂珍,都兴红,曲赫威,等.非高炉冶炼技术的发展现状与展望[J].矿产综合利用,2014,35(3):1-7.
(He Gui-zhen, Dou Xing-hong, Qu He-wei, et al. Present status and development perspective of non-blast furnace ironmaking technology [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2014, 35(3): 1-7.)
- [2] 张晓华,师学峰,赵凯,等.非高炉炼铁工艺流程发展现状及前景展望[J].矿产综合利用,2020(2):8-15.
(Zhang Xiao-hua, Shi Xue-feng, Zhao Kai, et al. Development status and prospect of smelting reduction ironmaking process [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(2): 8-15.)
- [3] 张福君,杨树峰,李京社,等.“双碳”背景下低碳排炼钢流程选择及关键技术[J].工程科学学报,2022,44(9):1483-1495.
(Zhang Fu-jun, Yang Shu-feng, Li Jing-she, et al. Selection and key technologies of low-carbon steelmaking processes under the background of “double carbon” [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(9): 1483-1495.)
- [4] 崔志峰,徐安军,上官方钦.国内外钢铁行业低碳发展策略分析[J].工程科学学报,2022,44(9):1496-1506.
(Cui Zhi-feng, Xu An-jun, Shanguan Fang-qin. Low-carbon development strategy analysis of the domestic and foreign steel industry [J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2022, 44(9): 1496-1506.)
- [5] Quader M A, Ahmed S, Dawal S Z, et al. Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient ultra-low carbon dioxide (CO_2) steelmaking (ULCOS) program [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 537-549.
- [6] 严璐洁.超低二氧化碳排炼钢项目的进展与未来[J].中国冶金,2017,27(2):6-11.
(Yan Jun-jie. Progress and future of ultra-low carbon

- dioxide emission steelmaking project [J]. *China Metallurgical*, 2017, 27(2): 6–11.)
- [7] Sripriya R, Peeters T, Meijer K, et al. Computational fluid dynamics and combustion modelling of HIsarna incinerator [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 2016, 43(3): 192–202.
- [8] Schrama F N H, Beunder E M, Boggelen J W K van, et al. Desulphurisation of HIsarna hot metal—a comparison study based on plant data [C]//3rd International Conference on Science and Technology of Ironmaking & Steelmaking. Kanpur, 2017: 419–422.
- [9] Van Boggelen J W K, Meijer H K A, Zeilstra C, et al. HIsarna-demonstrating low CO₂ ironmaking at pilot scale [J]. *Steel VIA*, 2018: 25–27.
- [10] Meijer H K A, Laar J, Knoop D W, et al. 旋流转换炉 (CCF) 装置的工艺设计 [J]. *燃料与化工*, 1998(5): 277–281.
(Meijer H K A, Laar J, Knoop D W, et al. Process design of cyclone converter furnace (CCF) device [J]. *Fuel & Chemical Processes*, 1998(5): 277–281.)
- [11] Cao C, Meng Y, Mei C, et al. Latest progress in industrialization of HIs melt process [C]//11th Iron and Steel Conference of China Proceedings. Beijing, 2017: 1–7.
- [12] Khasraw D, Spooner S, Hage H, et al. Evaluation of devolatilization behaviour of different carbonaceous materials under rapid heating for the novel HIsarna ironmaking process [J]. *Fuel*, 2021, 292: 120329.
- [13] Khasraw D, Htet T T, Yang X L, et al. Gasification and structural behaviour of different carbon sources and resultant chars from rapid devolatilization for HIsarna alternative ironmaking process [J]. *Fuel*, 2022, 309: 122210.
- [14] Denys M B. Dynamical modelling of the cyclone converter furnace [D]. Delft: Delft University of Technology, 1997.
- [15] Link J. IRMA—flowsheet model examples of application [J]. *Metallurgical Research & Technology*, 2009, 106(10): 398–403.
- [16] Chaghakaboodi H A, Saidi M. Numerical study of gas-solid flow in a square cyclone separator with different vortex finders [J]. *Chemical Engineering Research & Design*, 2023, 194: 621–635.
- [17] Venkatesh S, Sivapirakasam S P, Sakthivel M, et al. Experimental and numerical investigation in the series arrangement square cyclone separator [J]. *Powder Technology*, 2021, 383: 93–103.
- [18] 林秀丽, 曹亚平, 夏祉君, 等. 轴流旋风分离器特性的数值模拟 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(9): 1360–1364.
(Lin Xiu-li, Cao Ya-ping, Xia Zhi-jun, et al. Numerical simulation on characteristics of the axial flow cyclone separator [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(9): 1360–1364.)
- [19] Wasilewski M, Brar L S, Ligos G. Effect of the central rod dimensions on the performance of cyclone separators—optimization study [J]. *Separation & Purification Technology*, 2021, 274: 119020.
- [20] Zhu L, Wang S, Ru Y, et al. Numerical investigation on dynamic characteristics of flow field in cyclone separators with different dust hopper structures [J]. *Particuology*, 2023, 82: 134–145.
- [21] Dong S J, Jiang Y C, Jin R Z, et al. Numerical study of vortex eccentricity in a gas cyclone [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2020, 80: 683–701.
- [22] Dong S J, Wang C W, Zhang Z H, et al. Numerical study of short-circuiting flow and particles in a gas cyclone [J]. *Particuology*, 2023, 72: 81–93.
- [23] Parvaz F, Hosseini S H, Elsayed K, et al. Influence of the dipleg shape on the performance of gas cyclones [J]. *Separation & Purification Technology*, 2020, 223: 116000.
- [24] Dziubak T, Bąkała L, Karczewski M, et al. Numerical research on vortex tube separator for special vehicle engine inlet air filter [J]. *Separation & Purification Technology*, 2020, 239: 116588.
- [25] Pang X X, Wang C Y, Yang W, et al. Numerical simulation of a cyclone separator to recycle the active components of waste lithium batteries [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2022, 16(1): 937–951.
- [26] Zhang Z H, Dong S J, Jin R Z, et al. Vortex characteristics of a gas cyclone determined with different vortex identification methods [J]. *Powder Technology*, 2022, 404: 117370.
- [27] Liu G H, Wang W B, Yu J Z, et al. Effect of extra inlets structure on cyclone wall erosion [J]. *Powder Technology*, 2022, 411: 117926.
- [28] Zhang L L, Chen Y X, Zhao B, et al. Numerical simulation on structure optimization of escape-pipe of cyclone separator with downward outlet [J]. *Powder Technology*, 2022, 411: 117588.
- [29] 王晨雯. 旋风分离器内短路流的流动特征与形成机理研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
(Wang Chen-wen. Study on flow characteristics and formation mechanism of short-circuit flow in cyclone separator [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.)
- [30] Zhang Z H, Yan S J, Dong S J, et al. Study of the short-circuit flow and circulation flow's impact on separation performance of cyclone separator with volute-helical inlet [J]. *Advanced Powder Technology*, 2024, 35(1): 104281.