

引用格式:周康,林冬梅,刘长乐. 矿热炉水冷型和保温型烟道内颗粒沉积特性对比研究[J]. 有色设备,2025,39(2):50-55,61.
ZHOU Kang, LIN Dongmei, LIU Changle. Numerical comparison study of water-cooled flue and insulated flue deposition in submerged arc furnace[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(2): 50-55, 61.

矿热炉水冷型和保温型烟道内颗粒沉积特性对比研究

周 康, 林冬梅, 刘长乐

(沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

[摘 要] 通过数值模拟,研究了镍铁冶炼中矿热炉烟气回收过程中烟气颗粒沉积特性;利用 Grant 和 Tabakoff 提出的颗粒反弹模型及临界速度模型,建立颗粒沉积模型;利用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,模拟了烟气流场;研究了水冷型烟道和保温型烟道颗粒沉积特性以及烟气流速对烟道颗粒沉积的影响。研究发现,水冷型烟道的沉积速率明显低于保温型烟道,采用水冷型烟道能有效减少烟道内颗粒沉积;随着烟气流速的增加,颗粒沉积速率降低,并且烟气的最佳流速为 7 m/s。

[关键词] 水冷型烟道; 两相流动; 颗粒沉积; 数值模拟; 矿热炉; 镍铁

[中图分类号] TF815 [文献标志码] A [文章编号] 1003-8884(2025)02-0050-06

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.02.006

0 引言

回转窑-矿热炉(Rotary Kiln-Electric Furnace, RKEF)因其具有较高的生产效率、镍铁品质高和工艺技术成熟等特点被广泛应用于镍铁冶炼生产中^[1]。但 RKEF 工艺一直存在高能耗、高排放等问题制约其工艺的升级。因此,在提高冶炼镍铁质量的同时,减少能耗和“三废”排放已经成为镍铁冶炼行业的迫切需求。为了提高 RKEF 工艺余热利用率,利用烟道回收烟气作为回转窑辅助燃料与煤粉混合燃烧,有助于降低镍合金的单位煤耗。而矿热炉工作时所产生大量的高温烟气,其中会夹杂着许多矿石颗粒。在回收烟气过程中,矿石颗粒随着烟气一起在烟道内流动,会与烟道壁产生摩擦、碰撞,导致颗粒沉积在烟道内壁面和冲蚀烟道壁面^[2],对烟道造成结构性损害,甚至会缩短烟道使用寿命和降低烟气输送速率。

随着对颗粒沉积的深入研究,发现矿热炉烟道内矿料颗粒随高温烟气在烟道中的输运过程是一个多相流动耦合多物理场的复杂过程,包括气固两相的传热传质以及颗粒与壁面的碰撞、粘附、反弹和去除等过程。此外,颗粒的沉积也将会受颗粒的物性

参数(如颗粒的粒径和黏度)和颗粒的碰撞行为(如撞击速度和角度)的影响。目前,研究人员已通过大量试验和工程实践建立数学模型来研究颗粒的沉积行为。Wood 等^[3]提出了无量纲沉积速率的半经验公式来描述颗粒沉积行为,至今仍被广泛使用。Guha^[4]基于颗粒输运、沉积的物理过程及其理论模型,总结了沉积物的输运机制,提出利用随机拉格朗日粒子跟踪和统一的欧拉平流扩散法来数值模拟粒子的运动和沉积行为。Guan 等^[5]建立了一个综合数学模型,研究了结垢对翅片圆柱管对流换热的影响,该模型还耦合了流体流动、颗粒输运、颗粒沉积、颗粒磨蚀和污垢去除等行为,并分析了翅片圆柱管结垢过程。此外,在颗粒输运过程中还包括颗粒的碰撞、反弹、沉积和去除等行为。Ai 等^[6]基于计算流体力学(CFD)建立了颗粒沉积数值模型,对颗粒与壁面之间的粘附、反弹和去除等行为进行了解释。Fang 等^[7]提出了一种新的数学模型,分析了颗粒与壁面的碰撞,考虑了附着力的影响,描述了颗粒粘附现象。Babak 等^[8]利用 JKR 粘附模型,研究了不同颗粒表面粗糙度对去除率的影响,确定了临界剪切速度来研究颗粒的去除行为。Xu 等^[9]基于 JKR 理论和临界速度判断准则,研究了气体曳力、热泳力、

[收稿日期] 2024-11-07

[第一作者] 周康(1999—),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向为矿热炉烟道沉积。

Saffman 力、重力以及布朗力对颗粒沉积的影响,并结合 UDF 子程序建立了颗粒沉积模型。李猛等^[10]采用离散颗粒模型数值模拟研究了颗粒在直圆管中的沉积特性,并研究了流速和粒径对颗粒沉积速率的影响。Han 等^[11]运用了雷诺应力模型以及离散相颗粒模型对微米颗粒在换热管中的沉积特性进行了数值模拟研究,发现颗粒流速越大,颗粒沉积速率越小。

由于对大型管道的研究较少,且深入研究烟道的沉积机理是保证矿热炉烟道正常工作的关键,因此,本文对矿热炉烟道内烟气颗粒沉积特性进行了数值研究,使用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型^[12-13]对矿热炉烟道内烟气的流场进行了模拟。采用了离散相模型(DPM)并结合 Grant 和 Tabakoff 颗粒反弹模型研究颗粒的碰撞和反弹行为,并对连续相以及离散相进行耦合计算,最后根据 JKR (Johnson-Kendall-Roberts)理论结合临界捕捉速度,建立了判断颗粒沉积的准则,探究了不同型烟道与烟气流速对颗粒沉积的影响。

1 物理模型

图 1 与图 2 分别为本文所研究的保温型烟道和水冷型烟道的结构示意图。除了入口段直径为 1 700 mm,其余各段直径均为 1 000 mm。高温烟气携带矿料颗粒从烟道底部的入口段进入烟道,再流经 I 段烟道、II 段烟道、III 段烟道、三通段和盲管段,最后通过出口段流出烟道。其中 I 段长度 5 300 mm, II 段长度为 3 700 mm, III 段长度为 10 000 mm,盲管长度 1 500 mm,出口段长度 8 000 mm,以及 III 段和出口段的夹角 $\alpha = 80^\circ$ 。保温型烟道是由壳层、水泥层和流体域 3 部分组成,其中水泥层厚度为 0.012 m。水冷型烟道是由水冷层、壳层和流体域 3 部分组成,水冷层厚度为 0.04 m,壳层厚度为 0.02 m,水冷型烟道外侧有 10 根水冷管,其水流与烟气方向相反。

2 数学模型

2.1 运动方程

本研究中,烟气是含有颗粒、不可压缩的湍流流体,冷却水为常温、不可压缩流体。在模拟烟气流动的过程中气固两相流遵循连续性方程、动量方程和能量方程。

连续性方程见式(1)。

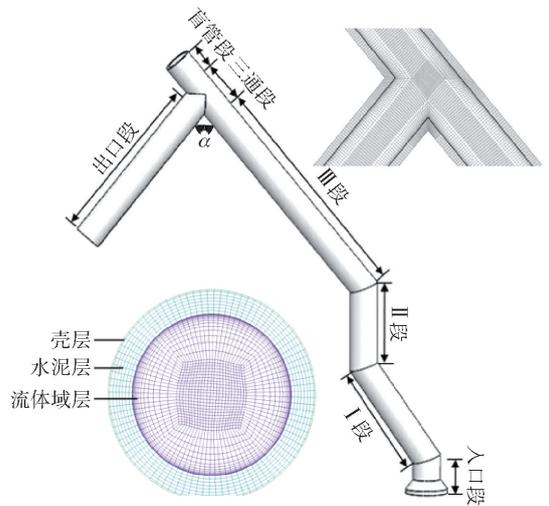


图 1 保温型烟道结构示意图

Fig. 1 Structure of insulated flue pipe

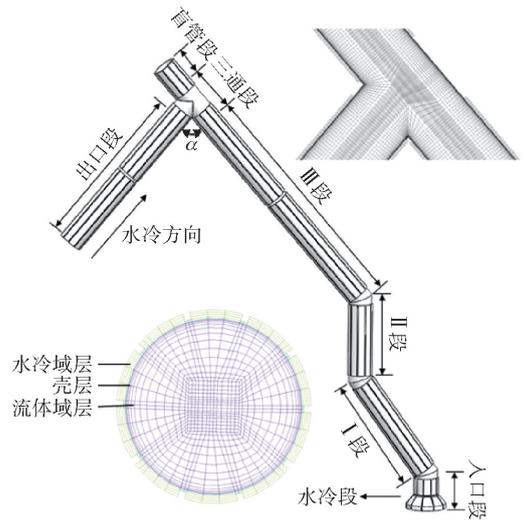


图 2 水冷型烟道结构示意图

Fig. 2 Structure of water-cooled flue pipe

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程见式(2)。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + F_x \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v v) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + F_y \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w w) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程见式(3)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

根据工厂现场监测数据,矿热炉内烟气是由 CO、H₂、CH₄、N₂ 和 CO₂ 组成。所以,混合气体密度可根据理想气体状态方程进行求解,见公式(4)。

$$\rho_m = \sum \frac{M_A p}{RT} \quad (4)$$

式中: M_A 为组分 A 的相对分子量; R 为通用气体常数, $R = 8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$; T 为气体温度, K ; p 为气体压力, Pa 。

2.2 运动控制方程

本研究运用离散相 (DPM) 模型来求解烟气中固相颗粒的运动。基于颗粒粒径分布,在本研究中流体密度和颗粒密度之比小于 0.1,颗粒输运过程中的受力分析主要考虑颗粒的重力、曳力、热泳力和 Saffman 力,其中曳力采用 DEFINE_DPM_DRAG 宏拓展计算,准确模拟了烟气和颗粒在发生相互作用时产生的相互作用力,颗粒运动方程^[14]见式(5)。

$$m_p \frac{du_p}{dt} = m_p \frac{u_1 - u_p}{\tau_r} + m_p \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F \quad (5)$$

式中: m_p 表示颗粒质量, kg ; u_p 表示颗粒速度, m/s ; u_1 表示烟气速度, m/s ; ρ_p 表示颗粒密度, kg/m^3 ; ρ 表示烟气密度, kg/m^3 ; F 表示合力,包括了重力、曳力、热泳力和 Saffman 力, N ; τ_r 为粒子的松弛时间, s 。

τ_r 能够影响曳力的大小,其表达式见式(6)。

$$\tau_r = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu C_D Re_p} \frac{24}{C_D Re_p} \quad (6)$$

式中: d_p 表示颗粒直径, m ; μ 表示流体的动力黏度, $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$; C_D 表示球形阻力系数; Re_p 为相对雷诺数。

Re_p 其表达式见式(7)。

$$Re_p = \frac{\rho d_p |u_p - u_1|}{\mu} \quad (7)$$

Saffman 力 F_1 是由于流体速度梯度的存在而产生的力,其表达式见式(8)。

$$F_1 = \frac{2\rho v^{0.5} K_1 d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{ik} d_{kl})^{0.25}} (u_1 - u_p) \quad (8)$$

式中: v 为空气的运动黏度, $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$; K 为常数,通常取值为 2.594; d_{ij} 为应变张量。

热泳力 F_2 为流体的温度梯度所产生的力,其表达式见式(9)。

$$F_2 = -D_{T,p} \frac{1}{m_p T} \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

式中: $D_{T,p}$ 为热泳力系数, $\text{N} \cdot \text{m/K}$ 。

2.3 颗粒沉积模型

为了研究矿热炉烟道内烟气颗粒沉积特性,利用拉格朗日模型模拟固相颗粒的运动。本文利用 UDF 子程序来拓展 JKR 模型颗粒沉积判断准则,即通过对比临界捕捉速度与颗粒撞击速度,来判断颗粒是否沉积。临界捕捉速度 u_{cr} 见公式(10)。

$$u_{cr} = \left(\frac{2K}{d_p R_c} \right)^{10/7} \quad (10)$$

式中: u_{cr} 为颗粒临界捕捉速度, m/s ; R_c 为运动恢复系数,定义为反弹与到达变形恢复系数的比值,取 0.9; K 为有效刚度参数,见公式(11)。

$$K = 0.51 \left\{ \frac{5[E_p(1 - \nu_s^2) + E_s(1 - \nu_p^2)]}{4E_p E_s \rho_p^{3/2}} \right\} \quad (11)$$

式中: ν_s 和 ν_p 分别表示烟道壁面和颗粒的泊松比; E_s 为烟道壁面的杨氏模量, $E_s = 2.19 \times 10^{11}$; E_p 为颗粒的杨氏模量,并与烟气温度呈反比^[15],见公式(12)。

$$E_p = 3 \times 10^{18} e^{-0.03165T} \quad (12)$$

2.4 颗粒去除模型

研究表明,颗粒沉积过程是颗粒沉积和去除两种相反机制同时作用的结果。本研究中颗粒的去除采用 DEFINE_DPM_EROSION 宏拓展计算,颗粒的去除速率和总沉积速率的计算分别见公式(13)和公式(14)。

$$\dot{m}_r = k \left(\frac{\tau_w}{\psi} \right) x_f \quad (13)$$

式中: \dot{m}_r 为颗粒的去除速率, kg ; k 为去除常数; τ_w 为壁面剪切应力, N/m^2 ; ψ 为沉积层强度系数, Pa ; x_f 为颗粒的沉积厚度, m 。

$$\dot{m}_f = \dot{m}_d - \dot{m}_r \quad (14)$$

式中: \dot{m}_d 为沉积速率, kg ; \dot{m}_f 为总沉积速率, kg 。

3 结果与讨论

上述数学模型考虑了烟气和颗粒之间的相互作用,分析了颗粒输运过程中所受到的力,并结合颗粒沉积和去除模型,提出了综合性的沉积模型。通过对保温型烟道和水冷型烟道颗粒沉积特性进行对比分析,探讨了烟气流速对保温型烟道和水冷型烟道颗粒沉积的影响,并根据这 2 种烟道的颗粒沉积情况和成本效益选择最佳烟道。

3.1 水冷型烟道和保温型烟道沉积对比

图 3 和图 4 为保温型烟道和水冷型烟道的温度

分布云图。由图可知,水冷型烟道内部温度普遍较保温型烟道低,水冷型烟道内烟气的降温效果也较明显,这是因为水冷型烟道内冷却水的强化冷却换热作用使得烟气的温度逐渐降低,而保温型烟道受水泥层的保温效果使得烟气温度较高。因此,水冷型烟道内各截面处的温度梯度均大于保温型烟道。

图4为水冷型烟道温度分布云图。在冷却水强化传热的作用下,使烟道壁面处的温度降低,从而增大了烟气中心与烟道壁面间的温度梯度,较大的温度梯度增强了热泳力的作用,使得颗粒向温度较低的区域移动并产生沉积。同时,烟道结构的改变影响了烟气在三通段和各段烟道间拐角处的流动,导致涡流形成,使得烟气流动更加紊乱,进一步强化了烟气与冷却水之间的换热,导致这些区域存在较大的温度梯度。

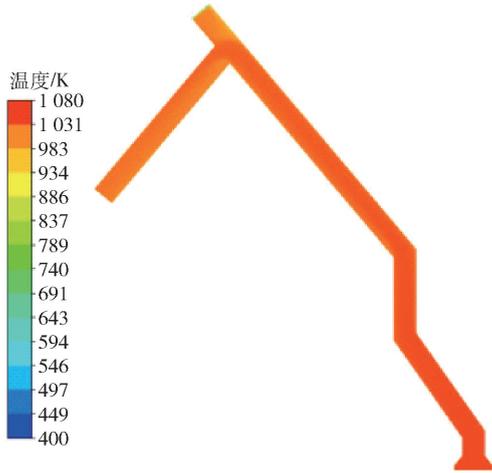


图3 保温型烟道温度分布云图

Fig. 3 Temperature distribution cloud map of insulated flue

图5和图6是保温型烟道和水冷型烟道的颗粒沉积速率云图。由图可知,保温型烟道和水冷型烟道颗粒沉积主要发生在入口段、烟道各分段间内外拐角、盲管段及三通段。并且,水冷型烟道颗粒沉积速率低于保温型烟道颗粒沉积速率。原因是当烟气刚进入入口段时,水冷型烟道和保温型烟道的烟气温度较高,所以颗粒在入口段处易产生沉积。随着烟气流向各段,水冷型烟道内冷却水的强化冷却作用,使得烟气的温度逐渐降低,进而影响了颗粒的杨氏模量,降低了颗粒的粘附性,而保温型烟道受水泥层的保温效果,使得烟气温度较高,因此导致水冷型烟道内的颗粒沉积速率和沉积范围均小于保温型烟道。

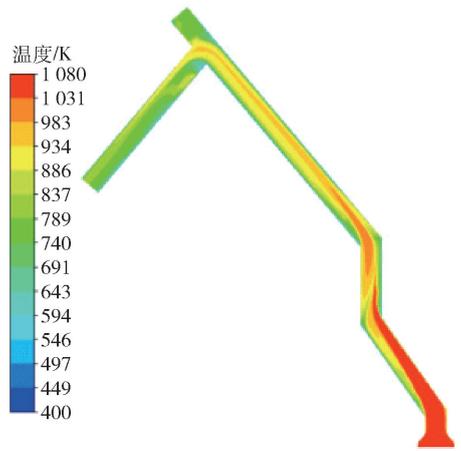


图4 水冷型烟道温度分布云图

Fig. 4 Temperature distribution cloud map of water-cooled flue

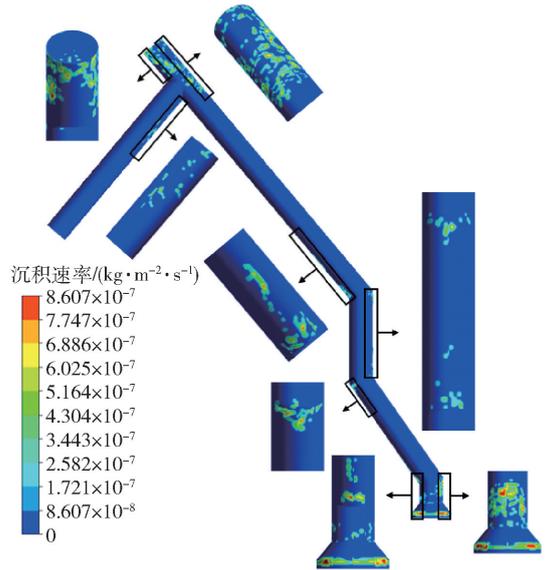


图5 保温型烟道沉积云图

Fig. 5 Contours of deposition rate in insulated flue

图6为水冷型烟道沉积速率云图。由图6可知,在烟道的入口段,由于烟道截面的急剧收缩,较大粒径颗粒($d_p > 60 \mu\text{m}$)因为惯性作用而与烟道壁面发生惯性碰撞从而产生沉积。同时,入口段的温度较高,颗粒的杨氏模量较小,颗粒的粘附能力强,容易发生沉积行为(见式(11)~(12))。然后,当颗粒流经I段、II段和III段烟道间内外拐角时,同样发生明显沉积行为,其主要原因包括:①烟气在烟道内外拐角处发生边界层分离而形成涡流,导致小粒径颗粒($d_p = 5 \sim 20 \mu\text{m}$)受到涡流的作用而发生沉积;②大粒径颗粒随烟气流至烟道外拐角处,受惯性

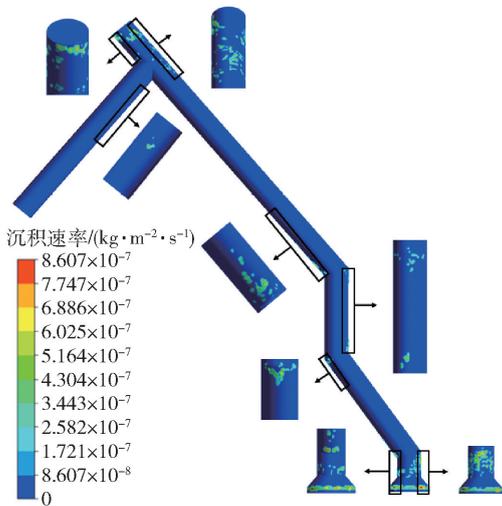


图 6 水冷型烟道沉积速率云图

Fig. 6 Contours of deposition rate in water-cooled flue

作用而与壁面发生惯性碰撞从而产生沉积;③烟道各分段拐角处的温度梯度大,增强了颗粒所受到的热泳力(见式(9)),促使颗粒向低温壁面运动而发生沉积。之后,颗粒受到惯性作用的影响,一部分在三通段随烟气直接流入出口段,另一部分随烟气流至盲管段与壁面发生多次碰撞后,再随烟气返回三通段流入出口段。在此期间,颗粒流速降低,并因惯性碰撞和湍流涡等方式发生沉积行为。最后,颗粒随烟气通过出口段流出烟道。

3.2 烟气流速对沉积速率的影响

烟气流速是影响颗粒沉积速率的一个主要因素,本研究考虑了 3 ~ 13 m/s 烟气入口流速。不同烟气流速下保温型烟道和水冷型烟道的颗粒沉积速率分别如图 7 和图 8 所示。结果表明:随着烟气流速增加,保温型烟道和水冷型烟道的颗粒沉积速率均降低;烟气流速从 3 m/s 增至 13 m/s 时,保温型烟道的颗粒沉积速率从 6.07 g/s 降至 1.50 g/s,水冷型烟道的颗粒沉积速率从 0.55 g/s 降至 0.23 g/s。这是由于烟气对颗粒的夹带作用,流速增加,使得颗粒速度增大,颗粒撞击壁面的速度大于临界捕捉速度,减轻了颗粒的湍流涡和布朗扩散作用。随着烟气流速的增加,颗粒的沉积会使烟气的尾迹涡面积减小,使得烟道内的流场发生变化,颗粒难以进一步发生沉积行为。高速流动的颗粒还会引起对沉积颗粒的去除,从而使得沉积速率降低。在不同烟气流速下,水冷型烟道的颗粒沉积速率低于保温型烟道的颗粒沉积速率,由于水冷型烟道内的温度普遍低

于保温型烟道,导致水冷型烟道颗粒的杨氏模量较大,颗粒粘附性降低和临界捕捉速度减小,因此水冷型烟道颗粒沉积速率较低。

当烟气进入炉口流速为 7 m/s 时,保温型和水冷型 2 种类型烟道内颗粒沉积速率变化趋于稳定。水冷型烟道的颗粒沉积速率明显低于保温型烟道的颗粒沉积速率,这是由于水冷型烟道内部温度普遍低于保温型烟道,温度减小,使得杨氏模量增大,进而造成临界捕捉速度减小,颗粒的粘附性降低。

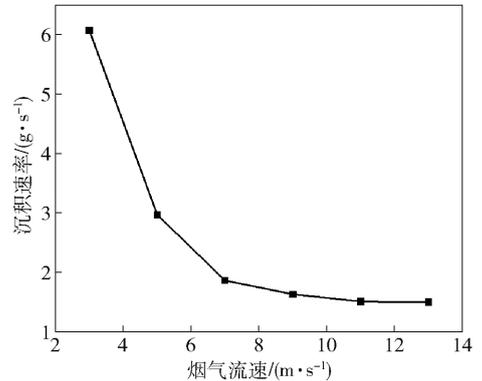


图 7 不同烟气流速对保温型烟道总沉积速率的影响
Fig. 7 The effect of different flue gas flow velocity on the total deposition rate of insulated flue

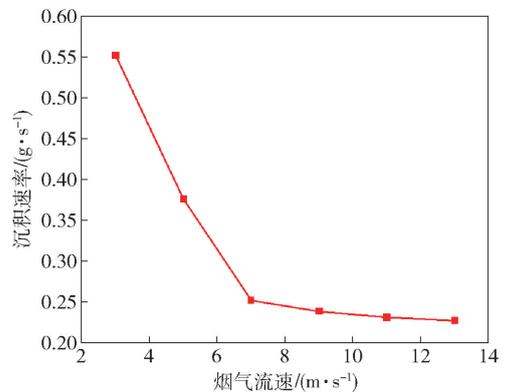


图 8 不同烟气流速对水冷型烟道总沉积速率的影响
Fig. 8 The effect of different flue gas flow velocity on the total deposition rate of water-cooled flue

4 结论

本文利用 Fluent 软件模拟水冷型和保温型烟道的颗粒沉积特性。以临界捕捉速度为判断准则,比较了保温型烟道和水冷型烟道的沉积效果和烟气流速对沉积速率的影响,结论如下。

1) 保温型烟道和水冷型烟道颗粒沉积主要发生在

入口段、烟道各分段间内外拐角、盲管段及三通段。

2) 水冷型烟道由于冷却水的强化冷却作用, 使得烟气的温度逐渐降低, 杨氏模量增大, 减小了颗粒的粘附性, 从而导致水冷型烟道内的颗粒沉积速率和沉积范围均小于保温型烟道。

3) 烟气流速从 3 m/s 增至 13 m/s 时, 2 种烟道的沉积速率均降低, 水冷型烟道从 0.55 g/s 降至 0.23 g/s, 保温型烟道从 6.07 g/s 降至 1.50 g/s。且烟气流速为 7 m/s 时, 2 种烟道的沉积速率变化均趋于稳定。研究表明, 采用水冷型烟道能有效减少烟道内颗粒沉积, 并且烟气的最佳流速为 7 m/s。

[参考文献]

[1] Liu P, Li B, Cheung C S, et al. Material and energy flows in rotary kiln-electric furnace smelting of ferronickel alloy with energy saving [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 109:542 - 559.

[2] 马梓舰, 刘鹏, 刘伟, 等. 矿热炉烟道气固两相传质机理及冲蚀特性[J]. *材料与冶金学报*, 2022, 21(4):247 - 254.

[3] Wood N B. A simple method for the calculation of turbulent deposition to smooth and rough surfaces [J]. *Journal of Aerosol Science*, 1981, 12(3): 275 - 290.

[4] Guha A. Transport and deposition of particles in turbulent and laminar flow [J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2008, 40:311 - 341.

[5] Guan Q, Li H, Afshin G, et al. Laminar cross-flow convective heat transfer of a finned cylindrical tube in the presence of particle deposition and deposit erosion [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 236(PB):121570.

[6] Ai W, Fletcher T H. Computational analysis of conjugate heat transfer and particulate deposition on a high pressure

turbine vane [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(4):041020.

[7] Fang Z, Zhang Y, Wei M, et al. A numerical study on adhesive collision between a micro-sized particle and a wall [J]. *Powder Technology*, 2020, 360:769 - 779.

[8] Babak N, Goodarz A, R. A F, et al. A model for particle removal from surfaces with large-scale roughness in turbulent flows [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2020, 54(3):291 - 303.

[9] Xu Z, Han Z, Sun A, et al. Numerical study of particulate fouling characteristics in a rectangular heat exchange channel [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 154:657 - 667.

[10] 李猛, 陶乐仁, 杜登高, 等. 颗粒物在直管的颗粒沉积规律数值模拟 [J]. *化学工程*, 2023, 51(7):72 - 77.

[11] Han Z, Xu Z, Sun A, et al. The deposition characteristics of micron particles in heat exchange pipelines [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 158:113732.

[12] Abd-Elhady M, Rindt C, Wijers J, et al. Particulate fouling in waste incinerators as influenced by the critical sticking velocity and layer porosity [J]. *Energy*, 2004, 30(8):1469 - 1479.

[13] Lu H, Lu L, Jiang Y. Numerical study of monodispersed particle deposition rates in variable-section ducts with different expanding or contracting ratios [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110:150 - 161.

[14] 孔德海, 李心慧, 牛夕莹, 等. 基于 CFD-DEM 微细带肋内冷通道中颗粒沉积特性比较研究 [J]. *热能动力工程*, 2023, 38(12):84 - 94.

[15] Ai W, Kuhlman M J. Simulation of coal ash particle deposition experiments [J]. *Energy & Fuels*, 2011, 25 (Jan./Feb.):708 - 718.

Numerical comparison study of water-cooled flue and insulated flue deposition in submerged arc furnace

ZHOU Kang, LIN Dongmei, LIU Changle

(School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

Abstract: The flue gas particle deposition characteristics in the flue gas recovery process of submerged arc furnace flue in ferronickel smelting was investigated by numerical simulation method. The particle deposition was modeled using Grant and Tabakoff particle bounce model and critical velocity model. The

(下转第 61 页)

[参考文献]

- [1] 徐涛,郭武英. 地下金属矿山大块产生原因以及处理措施[A]. 中国金属学会. 第十四届中国钢铁年会论文集—1. 矿业工程[C]. 中国金属学会:中国金属学会, 2023:6. DOI:10.26914/c.cnkihy.2023.055018.
- [2] 范阿永. X射线分选机在某钨矿选矿厂的分选试验[J]. 有色矿冶,2021,37(3):23-26.
- [3] 李振武,何建新,沈建波. 深埋煤层运输巷变形特征及支护优化研究[J]. 中国矿山工程,2022,51(5):48-53.
- [4] 何文轩,胡健,柳小波,等. 矿石块度视觉识别判断方法[J]. 中国矿业,2021,30(6):100-105.
- [5] 曲伟霞,潘伟,郑飞,等. 黄金矿山溜井运输 AI 视觉技术分析研究[J]. 金属矿山,2023(4):174-179.
- [6] 陈立军,蔡国强,张文斌. 基于深度学习技术的爆堆块度识别方法研究[J]. 爆破,2024,41(1):196-201,220.
- [7] 曹士杰,张竹林. 基于改进 YOLO v5 的矿石石块实例分割算法[J]. 兰州工业学院学报,2023,30(6):19-25.
- [8] 郭帅,郝毅,周永伟. 矿山有轨运输电机车双机牵引技术及无人化应用研究[J]. 有色设备,2024,38(4):9-15.
- [9] 刘善明,余新阳,欧阳魁. 面向筛面复杂背景的矿山异物视觉检测方法[J]. 计算机技术与发展,2024,34(5):196-204.
- [10] 邹知炜,孙文浩,陈松. YOLO 目标检测后处理算法的优化和硬件加速[J]. 微电子学与计算机,2024,41(4):31-37.

Application of ore block identification system in ore chute loading

GUO Shuai

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: This paper aiming at the working conditions of large ore blocks and easy jamming in the automatic loading process of unmanned rail transportation, constructs an ore block size recognition system based on the application design of machine vision library OpenCV and YOLO training model. The system can realize the functions of ore block size calculation, ore block size quantity and time distribution statistics, real-time alarm and query of super large blocks, etc., realize the detection and management of ore block size in the chute, ensure the safety of ore discharge equipment under the working conditions of unmanned rail transportation, and reduce the labor intensity of manual monitoring, providing reference for the implementation of unmanned mine system and digital transformation.

Keywords: ore size identification; image recognition; underground rail transportation; mine intelligence; ore; metal mine; detection ▲

(上接第 55 页)

gas flow field was simulated using the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. The particle deposition characteristics of water-cooled flue and insulated flue were investigated, as well as the effect of flue gas flow velocity on the particle deposition in the flue. It was found that the deposition rate of the water-cooled flue was significantly lower than that of the insulated flue, and the use of the water-cooled flue could effectively reduce the particle deposition in the flue; with the increase of the flue gas flow velocity, the particle deposition rate was reduced and the optimal flow velocity of the flue gas was 7 m/s.

Keywords: water-cooled flue; two-phase flow; particle deposition; numerical simulation; submerged arc furnace; ferronickel ▲