

气化渣破碎与预干燥过程数值仿真及实验研究

周柏屹,王浩南,夏良志*

(大连理工大学化工学院,辽宁大连116000)

摘要:为解决气化渣回收过程受高黏湿特性阻碍的问题,通过搭建实验级破碎和预干燥装置对其进行预处理,结合实验和单向CFD-DEM数值仿真研究了不同因素对气化渣破碎和预干燥效果的影响。结果表明,流场速度随转子转速增加而明显上升,但随着进气速度增加上升幅度减小。建模颗粒团尺寸确定为2 mm,随转子转速增加,颗粒与转子碰撞强度增大,运动速度为2~4 m/s的颗粒数量增多,破碎率升高;随进气速度增加,对颗粒的扰动作用增强,破碎率小幅增加;随进料量增加,颗粒与转子的碰撞强度下降到一定程度后趋于稳定,低速运动的颗粒数量急剧增加,破碎率降低。随进气速度和进气温度的增加,热风对颗粒的传热效果增强,出料温度升高;进气速度增加能有效减少低温颗粒的数量,进气温度升高对颗粒的升温效果影响有限。数值仿真和实验结果为气化渣的大规模工业化处理提供了理论参考。

关键词: 气化渣破碎; 气化渣预干燥; CFD-DEM数值仿真; 流场分析; 离散元分析; 气固两相流

中图分类号: TD985

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)S2-0359-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S2.063

Numerical simulation and experimental study on gasification slag crushing and pre-drying process

ZHOU Bo-yi, WANG Hao-nan, XIA Liang-zhi*

(School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

Abstract: Because the gasification slag recovery process is hindered by high viscosity and humidity characteristics, an experimental crushing pre-drying device is built to pretreat the gasification slag. The influences of different factors on the crushing and pre-drying effects of gasification slag are studied through experiment and one-way CFD-DEM numerical simulation. Results show that the velocity of the flow field increases obviously with the increase of the rotor speed, but the increase becomes small with the increasing inlet velocity. The size of the modeled particle cluster is determined to be 2 mm. With the increase of the rotor speed, the collision strength between the particles and the rotor enhances, the number of particles with a moving speed of 2-4 m·s⁻¹ rises, and the crushing rate also rises. With the higher inlet velocity, the disturbance effect on particles enhances, and the crushing rate rises slightly. With the increasing feed rate, the collision strength between particles and rotor declines to a certain extent and then tends to be stable, the particles moving at low-speed sharply becomes more, and the crushing rate drops. With the increasing inlet velocity and inlet temperature, the heat transfer effect of hot air on particles is enhanced, and the discharge temperature lifts up. Higher inlet velocity can effectively reduce the number of low temperature particles, and higher inlet temperature has little effect on the heating effect of particles. The numerical simulation and experimental results provide a theoretical reference for the large-scale industrial treatment of gasification slag.

Key words: gasification slag crushing; gasification slag pre-drying; CFD-DEM numerical simulation; flow field analysis; discrete element analysis; gas-solid two-phase flow

目前对气化渣的消纳方法有浮选^[1]、重力分离^[2]、掺烧^[3-4]、修复土壤^[5-6]和制备化工材料^[7-8]等,但均受限于消纳量小且处理成本较高。对气化渣脱水后回收利用是一种低成本的规模化消纳方法,目前大多数煤气化企业采用干燥沉淀法对气化粗渣脱水,但该处理方法耗时大且会使现场环境条件更加恶劣^[7]。气化渣呈黏稠状且含水率高,对其的脱水方式还仅限于传统的非蒸发式脱水方法^[9],比如真空带式过滤和板框压滤^[10]。经处理后的气

化渣滤饼含水率仍在40%到50%之间,具有较强的黏性,采用回转窑干燥、带式干燥和管式干燥等传统干燥方法会导致堵塞等问题,严重阻碍气化渣规模化消纳。

类似气化渣特性的物料,如污泥^[11-12]或高含水率的煤泥等,常采用破碎机进行预处理。张明远^[13]设计了一种新型煤泥破碎机实现了黏湿物料的破碎。纪长顺等^[14]研制了一种新型矿用立式煤泥破碎机,将块状煤泥破碎成6 mm以下颗粒。扈树章

收稿日期:2024-04-08;修回日期:2024-08-05

作者简介:周柏屹(1999-),男,硕士生,研究方向为气化渣破碎和干燥处理,zboy@mail.dlut.edu.cn;夏良志(1967-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为油页岩、褐煤等干燥预处理的流态化技术及装备,通讯联系人,xlz@dlut.edu.cn。

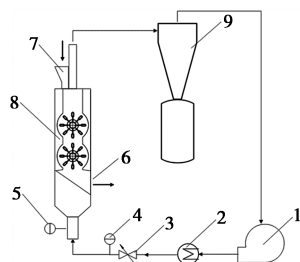
等^[15]设计出一种不粘齿、不堵料、粉碎颗粒的粒径在 10 mm 以下且不会二次粘结的新型高水分煤泥饼破碎机。刘亮亮等^[16]研究了一种高灰煤泥滤饼破碎及均匀配比混料的装置。赵权等^[17]在污泥颗粒干化研究中发现,污泥颗粒粒径越小干燥速率越快。由于气化细渣的可燃物含量随粒径增加而增加,而气化粗渣的可燃物含量随粒径增加而减少^[18-19],气化渣高黏湿的特性对回收利用产生了巨大挑战^[20],因此将气化渣破碎至较合适的粒径范围并将表面预干燥是大规模消纳的关键。

本文搭建了耦合热风作用的双层链式破碎机装置,结合单向 CFD-DEM 数值仿真计算,确定合适的建模颗粒团尺寸,通过实验和数值模拟研究不同转速、不同进气速度和不同进料量对气化渣破碎率的影响;除此之外,本文还研究不同进气速度和不同进气温度对预干燥效果的影响,为工业化处理气化渣提供了理论依据。

1 实验和数值仿真

1.1 实验流程

气化渣破碎与预干燥实验流程如图 1 所示,破碎装置采用实验级双层链式破碎机,设计处理量为 20 kg/h,转子转速最高为 1 800 r/min,进气速度最高为 1.4 m/s,进气温度为 453.15 K。电机功率为 1.1 kW;气化渣从破碎机顶部入口进入,下部侧边出口抛出。下部有管道向上通入热风,鼓风机功率 0.75 kW,风压 2.4 kPa;底部配有不锈钢孔板和粗孔径丝网,分别用于分散进风和防止气化渣重新粘结。



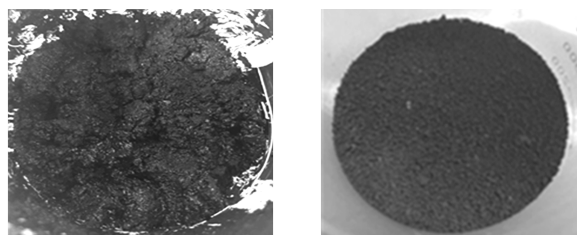
1—热风循环中压风机;2—电加热器;3—闸阀;
4—温度传感器;5—毕托管风速仪;6—出料口;7—进料口;
8—双层链式破碎机;9—旋风分离器

图 1 气化渣破碎与预干燥工艺流程图

1.2 实验物料

为提高碳回收效率、节约能耗、减少飞灰产生^[21]且满足后续流化床干燥的粒径要求(粗细颗粒粒径之比不超过 6 倍),本文主要研究平均粒径为

0.4 mm 的气化渣的回收利用。由于气化渣和煤的性质类似,本文的气化渣样品由煤中粒径在 0.2~0.6 mm 的颗粒代替,通过筛网筛分得到,后文中统称气化渣。气化渣样品呈深黑色且黏性强,含水率在 45% 以上,如图 2(a) 所示,出料样品如图 2(b) 所示。本文采用出料样品温度作为预干燥效果的评判指标,出料温度由 PT100 型温度传感器测量。



(a) 进料样品 (b) 出料样品

图 2 进料样品及出料样品图像

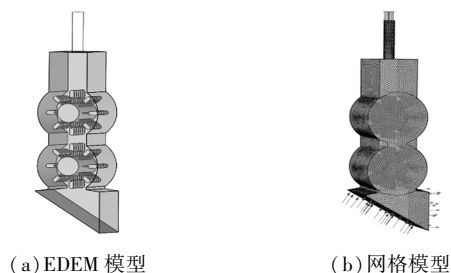
采用对照仿真中建模颗粒团尺寸大小的筛网对出料样品进行反复筛分,将过筛的物料质量与出料样品的总质量比值设为实验破碎率,计算公式如式(1):

$$\eta_1 = (m_1/m) \times 100\% \quad (1)$$

式中, η_1 为实验破碎率; m_1 为出料中粒径小于建模颗粒团尺寸的质量,g; m 为出料总质量,g。

1.3 数值仿真

本文采用单向 CFD-DEM 耦合方法对破碎机进行数值仿真,图 3(a) 为依照实验装置实际尺寸在 EDEM 软件中建立破碎机仿真模型,流场网格模型如图 3(b) 所示,为非结构化多面体网格。速度场数据和温度场数据由 FLUENT 软件计算并通过 API 写入 EDEM 软件中。



(a) EDEM 模型 (b) 网格模型

图 3 破碎机装置仿真模型

流场与颗粒之间的曳力计算公式由式(2) 而得:

$$C_D = \begin{cases} 0.44, & Re \geq 1000 \\ (24/Re)(1 + 0.15Re^{0.687}), & Re < 1000 \end{cases} \quad (2)$$

式中, Re 为雷诺数; C_D 为阻力系数。

流场与颗粒之间的传热计算公式由式(3) 而得:

$$\begin{cases} Nu = 0.013 3Re^{1.6} \\ h = Nud\lambda \end{cases} \quad (3)$$

式中, Re 为雷诺数; Nu 为努塞尔数; h 为对流传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; λ 为热导率, $W/(m \cdot K)$; d 为颗粒直径, m 。

将粘结键断裂总数量与生成粘结键总数量的比值设为仿真破碎率, 仿真破碎率的计算公式为式(4):

$$\eta_2 = (N/M) \times 100\% \quad (4)$$

式中, η_2 为仿真破碎率; N 为破碎的粘结键个数; M 为总粘结键个数。

工业上处理类似气化渣滤饼的高黏湿物料时, 需要先经切条机切割成小块后再进行下一步处理, 切割后呈长条状。由于气化渣仿真单颗粒粒径较小, 建模为长条状的大型颗粒团难度较大, 同时会导致计算成本显著增加。为便于建模和计算, 在 EDEM 软件中分别建立了 1.6、2、2.4 mm 和 2.8 mm 尺寸的立方体颗粒团模型。

颗粒团由单颗粒组成并通过粘结键相互作用, 基本参数与粘结颗粒模型参数见表 1 所示, 表中的粘结刚度和临界应力由离散元参数标定, 其余参数由实验测得并计算得到。

表 1 仿真基本参数设置

参数	数值
颗粒的密度/ $(g \cdot m^{-3})$	1158
颗粒的物理半径/mm	0.2
单位面积法向粘结刚度/ $(N \cdot m^{-3})$	2.1995×10^7
单位面积切向粘结刚度/ $(N \cdot m^{-3})$	3.1211×10^7
法向临界应力/Pa	5×10^5
切向临界应力/Pa	5×10^5
粘结半径/mm	0.576
比热容/ $[J \cdot (kg \cdot ^\circ C)^{-1}]$	1130

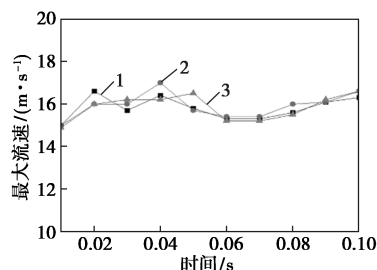
1.4 网格无关性验证

网格的质量会直接影响计算结果的准确性及计算时间, 增加网格模型的数量可以在一定程度上提高计算精度, 但当网格数量较多时, 继续增加网格的数量不仅不会使计算精度提高, 还会增加计算时间和计算量。为确定不同网格尺寸对计算精度的影响, 采用 3 种不同的最小网格尺寸划分模型, 最大的网格尺寸均为 2 mm, 对旋转区域进行局部加密, 得到的网格划分情况如表 2 所示。

表 2 不同最小网格尺寸的网格划分数量

最小网格尺寸/mm	上旋转区网格数量	下旋转区网格数量
0.65	288922	285997
0.75	288412	285775
0.85	288032	285024

这 3 个网格模型设置相同工况参数并分别求解, 比较不同网格尺寸下场内最大流速随时间变化的情况, 网格无关性验证见图 4。



1—0.65 mm 网格; 2—0.75 mm 网格; 3—0.85 mm 网格

图 4 网格无关性验证

从图 4 中可以看出, 3 种网格模型中的最大流速差异很小, 并随时间进行差异逐渐变小, 说明网格精度已经满足计算要求。由于更大的网格尺寸出现计算发散情况, 同时为减少计算时间和成本, 本文采用 0.75 mm 网格尺寸进行后续计算。

2 结果与讨论

2.1 破碎机腔内流场分析

2.1.1 不同转速对流场的影响

为与实验的参数设置对应, 计算转子的转速分别为 1 200、1 400、1 600 r/min 和 1 800 r/min 的流场数据, 进气速度为 1.4 m/s, 破碎机内的最大流速在一定范围内波动, 不同转子转速的峰值流速流场云图如图 5 所示。

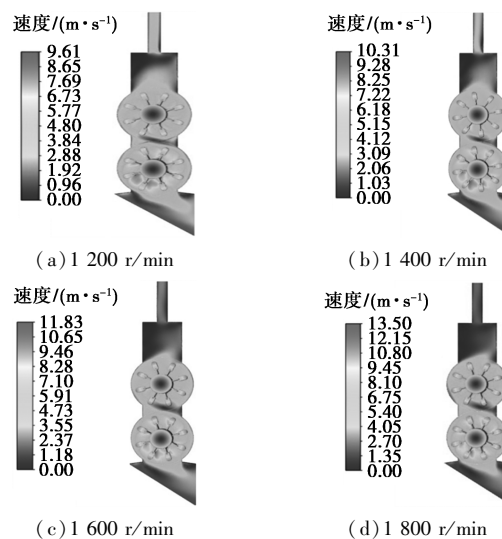


图 5 不同转速的峰值流速流场

从图 5 可以看出, 随转子转速增大, 流场内的最大流速从 9.61 m/s 增大到 13.50 m/s, 随转速增大上升幅度逐渐增加, 峰值流速出现在下转子与进气口的交汇处。由于转子的线速度随转子的半径增大

而增大,链条远离转轴的末端流场流速明显大于链条靠近转轴的流场流速。

2.1.2 不同进气速度对流场的影响

计算进气速度分别为 0.8、1.0、1.2 m/s 和 1.4 m/s 的流场数据,转子的转速为 1 800 r/min,不同转子转速的峰值流速流场如图 6 所示。

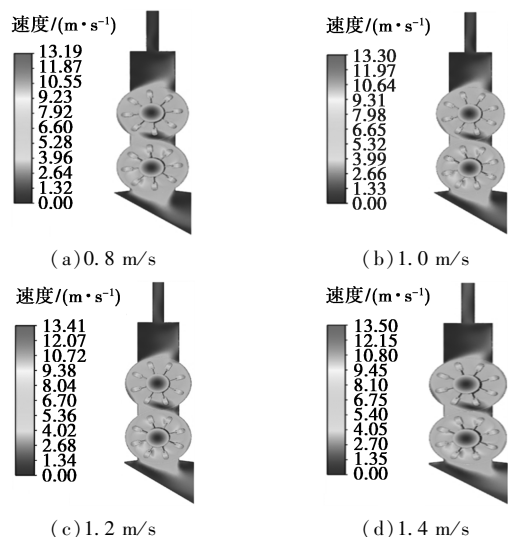


图 6 不同进气速度的峰值流速流场

从图 6 可以看出,场内的最大流速随进气速度增大略微增加,底部的非旋转区的流场流速明显增大,底部的非旋转区受进气速度影响明显强于旋转区。

2.2 破碎机破碎实验与仿真结果分析

2.2.1 实验与仿真结果对比

在转子转速 1 800 r/min、进气速度 1.4 m/s 和进料量为 20 kg/h 的工况下,在 EDEM 软件中进行不同颗粒团尺寸的仿真,按照公式(4)计算仿真破碎率;在实验中分别用 1.6 mm 筛网、2 mm 筛网、2.4 mm 筛网和 2.8 mm 筛网对出料样品进行反复过筛,随后用电子天平称重并按公式(1)计算实验破碎率,气化渣破碎与预干燥仿真和实验的对比结果如表 3 所示。

表 3 气化渣破碎与预干燥仿真和实验的对比

仿真颗粒团尺寸/mm	破碎率%			出料温度 K		
	仿真	实验	误差/%	仿真	实验	误差/%
1.6	85.5	78.5	8.92	334.56	321.85	3.95
2.0	93.5	95.1	1.68	334.83	321.85	4.03
2.4	90.5	98.1	7.75	338.31	321.85	5.11
2.8	91.7	99.3	7.65	335.32	321.85	4.19

从表 3 中可以看出,对于破碎率,仿真破碎率和实验破碎率的误差均在 10% 以下,验证了破碎仿真的准确性,其中仿真颗粒团尺寸为 2.0 mm 时仿真破碎率与实验破碎率的误差最小,且远小于其余尺

寸颗粒团的误差;对于出料温度,仿真出料温度和实验出料温度的误差均小于 10%,验证了预干燥仿真的准确性,仿真颗粒团尺寸对仿真出料温度的影响较小。依据仿真和实验的对比结果,为了降低仿真与实验的误差,确保仿真计算的准确性,选择 2.0 mm 颗粒团进行后续仿真计算。

2.2.2 转子转速对破碎效果的影响

设定工况为颗粒团尺寸为 2 mm、进气速度为 1.4 m/s 和进料量为 20 kg/h,在 EDEM 软件中进行了不同转子转速的仿真,仿真结果如图 7 所示。

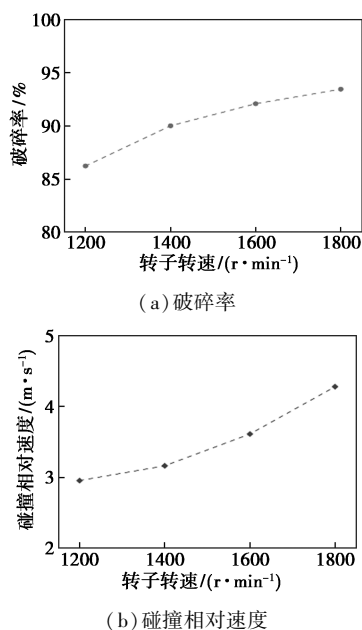
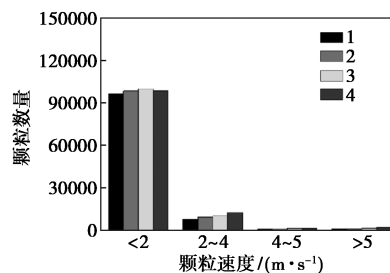


图 7 不同转子转速的破碎率与碰撞相对速度

从图 7(a)可以看出,当转子转速从 1 200 r/min 增加到 1 800 r/min 时,破碎率从 86.2% 提升到 93.5%;从 EDEM 导出颗粒与转子的碰撞相对速度图 7(b)可见,颗粒与转子的碰撞相对速度从 2.953 m/s 上升到 4.280 m/s,转子转速的增加使颗粒与转子的碰撞相对速度大幅上升,颗粒与转子的碰撞强度增大,破碎率大幅升高。

不同转子转速的颗粒速度统计图像如图 8 所示。



1—1 200 r/min; 2—1 400 r/min; 3—1 600 r/min; 4—1 800 r/min

图 8 不同转子转速的颗粒速度统计

从图8中可以看出,随着转子转速增加,颗粒速度在2 m/s到4 m/s之间的颗粒数量明显增加,而速度在4 m/s到5 m/s和大于5 m/s的颗粒数量相对较少,增长幅度有限。当上转子击打颗粒团时,对颗粒有加速作用,导致颗粒的速度增大,再经过下转子的击打后,颗粒的速度再次增加,使速度在2 m/s到4 m/s之间的颗粒数量增加。随着转子转速的增加,破碎机腔内流场速度也增加,较大的流场速度也能对颗粒有一定的加速作用,使颗粒的运动速度增大。

2.2.3 进气速度对破碎效果的影响

设定工况为颗粒团尺寸为2 mm、转子转速为1 800 r/min和进料量为20 kg/h,在EDEM软件中进行了不同进气速度的仿真,实验与仿真结果如图9所示。

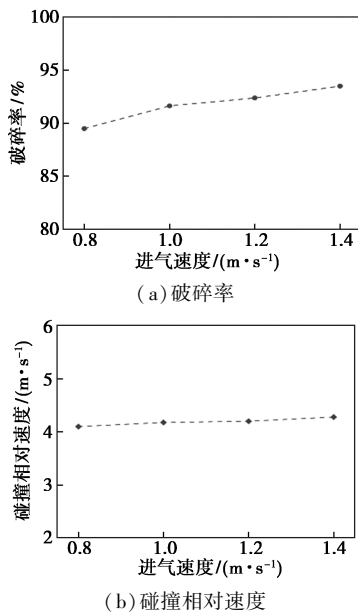
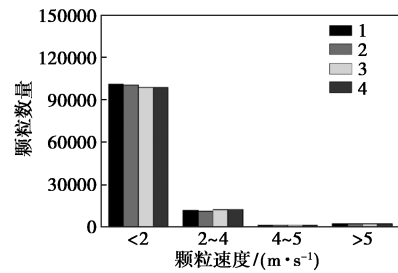


图9 不同进气速度的破碎率与碰撞相对速度

从图9(a)可以看出,当进气速度从0.8 m/s增大到1.4 m/s时,破碎率从89.5%上升到93.5%;从颗粒与转子的碰撞相对速度图9(b)可见,颗粒与转子的碰撞相对速度从4.100 m/s上升到4.280 m/s,进气速度的增大使颗粒和转子的碰撞相对速度略微增加,结合进气速度增大使气体对颗粒的扰动效果增强,破碎率随之小幅上升。

不同进气速度的颗粒速度统计图像如图10所示。

从图10可以看出,随进气速度的增大,速度小于2 m/s的颗粒数量下降,而其余速度区间的颗粒数量变化较小,气体对破碎机底部近出口处颗粒的加速效果增强是主要原因。



1—0.8 m/s;2—1.0 m/s;3—1.2 m/s;4—1.4 m/s

图10 不同进气速度的颗粒速度统计

2.2.4 进料量对破碎效果的影响

设定工况为颗粒团尺寸为2 mm、转子转速为1 800 r/min和进气速度为1.4 m/s,在EDEM软件中进行了不同进料量的仿真,实验与仿真结果如图11所示。

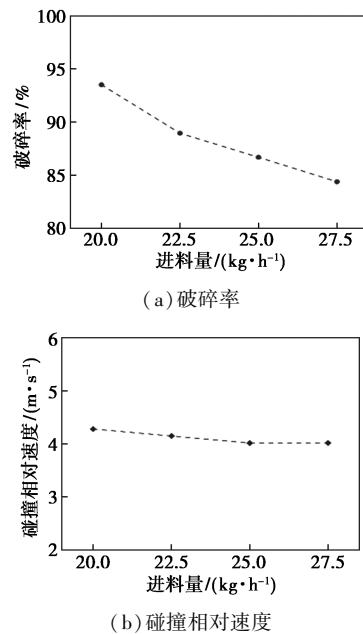
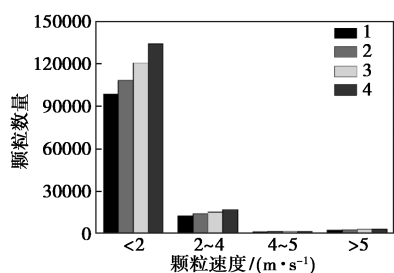


图11 不同进料量的破碎率与碰撞相对速度

从图11(a)可以看出,当进料量从20 kg/h增加到27.5 kg/h时,破碎率从93.5%下降到84.4%。从图11(b)中可以看出,颗粒与转子的碰撞相对速度从4.280 m/s下降至4.015 m/s后趋于稳定,这是因为进料量的增多会导致低速碰撞的总数量增多,占总碰撞数量的比例增大,达到一定程度后,高速碰撞次数和强度的变化对碰撞相对速度的影响较小,碰撞相对速度保持在相对稳定的数值。由于随进料量增多,转子对颗粒团的碰撞强度降低,破碎效果变差,破碎率显著降低。

不同进料量的颗粒速度统计图像如图12所示。

从图12可以看出,随进料量增加,破碎机腔内速度低于2 m/s的颗粒数量显著增加。虽然其余速



1—20 kg/h; 2—22.5 kg/h; 3—25 kg/h; 4—27.5 kg/h

图 12 不同进料量的颗粒速度统计

度区间的颗粒数量也有一定程度的上升,但远低于颗粒速度小于 2 m/s 的数量增长,大量低速运动颗粒会使破碎机内颗粒的堆积现象增多,加重了对破碎机内壁面的粘附。

2.3 破碎机预干燥实验与仿真结果分析

2.3.1 进气速度对预干燥效果的影响

设定工况为颗粒团尺寸为 2 mm、转子转速为 1 800 r/min 和进料量为 20 kg/h,进气温度为 453.15 K,在 EDEM 软件中进行了不同进气速度的传热仿真,实验与仿真结果如图 13 所示。

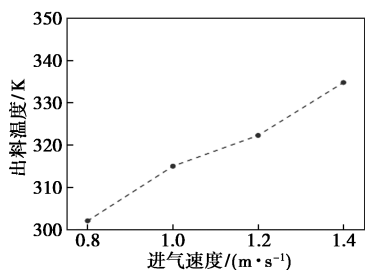
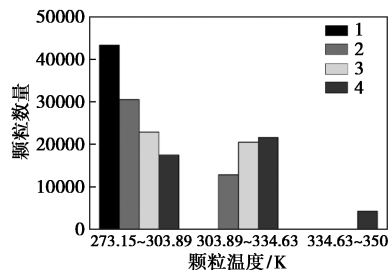


图 13 不同进气速度的出料温度

从图 13 可以看出,当进气速度从 0.8 m/s 增大到 1.4 m/s 时,颗粒的出料温度从 302.06 K 上升到 334.83 K。进气速度的增大会使气体对颗粒的对流传热系数增大,使气体的热量更有效地传给颗粒,从而使颗粒的出料温度提高。

不同进气速度的颗粒温度统计图像如图 14 所示。



1—0.8 m/s; 2—1.0 m/s; 3—1.2 m/s; 4—1.4 m/s

图 14 不同进气速度的颗粒温度统计

从图 14 可以看出,随着进气速度的增加,温度低于 303.89 K 的颗粒数量上升,工况为 0.8 m/s 的颗粒温度不超过 303.89 K,而工况为 1.0 m/s 和 1.2 m/s 的颗粒温度均不高于 334.63 K,仅进气速度为 1.4 m/s 的工况中有少量颗粒温度高于 334.63 K。进气速度的升高可以有效减少低温颗粒的数量,但不能使高温颗粒的数量大幅上升。

2.3.2 进气温度对预干燥效果的影响

设定工况为颗粒团尺寸为 2 mm、转子转速为 1 800 r/min 和进料量为 20 kg/h,进气速度为 1.4 m/s。在 EDEM 软件中进行了不同进气温度的传热仿真,实验与仿真结果如图 15 所示。

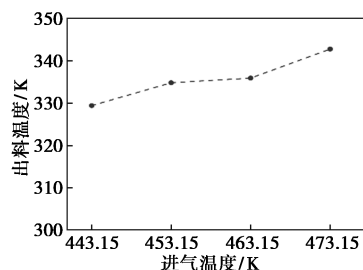
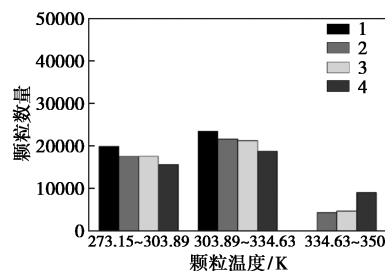


图 15 不同进气温度的出料温度

从图 15 可以看出,随进气温度增加,颗粒的出料温度从 329.43 K 上升到 342.79 K。随着进气温度的增加,气体对颗粒表面之间的对流传热系数增大,传热效果增强。

不同进气温度的颗粒温度统计图像如图 16 所示。



1—443.15 K; 2—453.15 K; 3—463.15 K; 4—473.15 K

图 16 不同进气温度的颗粒温度统计

从图 16 可以看出,随进气温度的增加,温度高于 334.63 K 的颗粒数量上升,工况为 443.15 K 的颗粒温度不超过 334.63 K,温度在 273.15 K 到 303.89 K 之间和 303.89 K 到 334.63 K 之间的颗粒数量均随进气温度的增加而有小幅度下降。由于温度高于 334.63 K 的颗粒数量占颗粒总数量的比例较小,进气温度的升高对破碎机内整体颗粒的升温效果影响有限,在考虑加热成本和装置承受能力的情况下,可以适当降低进气温度。

3 总结

(1) 本文搭建了耦合热风作用的破碎机实验装置对气化渣进行预处理,并结合数值仿真研究不同因素对破碎和预干燥效果的影响。破碎机腔内流场分析表明,随转子转速增加,破碎机腔内峰值流场的最大速度从 9.61 m/s 增大到 13.50 m/s,低转子转速的流场速度受底部进气的影响较大;随进气速度增大,峰值流场的最大速度从 13.19 m/s 增大到 13.50 m/s,底部非旋转区的流场速度增加。

(2) 通过单向 CFD-DEM 仿真和实验确定仿真颗粒团尺寸,采用 2.0 mm 的仿真颗粒团尺寸可以降低仿真与实验的误差。破碎仿真结果表明,转子转速提高,破碎率从 86.2% 提升到 93.5%,颗粒与转子的碰撞相对速度从 2.953 m/s 上升到 4.280 m/s,速度为 2 m/s 到 4 m/s 之间的颗粒数量增多;进气速度增大,破碎率从 89.5% 上升到 93.5%,颗粒与转子的碰撞相对速度从 4.100 m/s 上升到 4.280 m/s,速度低于 2 m/s 的颗粒数量减少。进料量增加,破碎率从 93.5% 下降到 84.4%,颗粒与转子的碰撞相对速度从 4.280 m/s 下降至 4.015 m/s 后趋于稳定,速度低于 2 m/s 的颗粒数量增加。

(3) 传热仿真结果表明,进气速度提高,出料温度从 302.06 K 上升到 334.83 K,低温颗粒的数量减少;进气温度升高,出料温度从 329.43 K 上升到 342.79 K,整体颗粒的升温效果有限。

参考文献

- [1] Wang W, Liu D, Tu Y, *et al.* Enrichment of residual carbon in entrained-flow gasification coal fine slag by ultrasonic flotation [J]. *Fuel*, 2020, 278: 118195.
- [2] 范宁, 张逸群, 樊盼盼, 等. 煤气化渣特性分析及资源化利用研究进展 [J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(8): 145-154.
- [3] 杜杰, 戴高峰, 李帅帅, 等. 气化细渣基础燃烧特性试验研究

(上接第 358 页)

- [3] 霍培书, 管越强, 周可新, 等. 重金属离子对活性污泥处理污水的影响 [J]. *环境工程学报*, 2010, 4(10): 2173-2178.
- [4] 陈纯, 何占航. 重金属离子对活性污泥系统处理性能的影响 [J]. *河南化工*, 2005, 22(2): 17-20.
- [5] 裴安书, 刘文斌, 林逸宁. 城市污水中重金属的处理方法研究 [J]. *世界有色金属*, 2016, (7): 112-113.
- [6] 方宇媛, 韩光磊, 许旻, 等. 城镇污水处理厂污泥重金属污染及生态风险分析 [J]. *能源环境保护*, 2021, 35(3): 71-74.
- [7] 罗智力. 城镇污水处理厂应对工业废水冲击有效处理技术研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2016.
- [8] 王方圆, 刘书谱, 曹磊, 等. 城镇小型污水处理厂对重金属的去除 [J]. *浙江师范大学学报: 自然科学版*, 2018, 41(4): 454-458.
- [9] 盛筱祺, 盛俊宝. 电镀园区重金属总镍污水达标排放——以无

- [J]. *洁净煤技术*, 2019, 25(2): 83-88.
- [4] Guo Y, Guo F, Zhou L, *et al.* Investigation on co-combustion of coal gasification fine slag residual carbon and sawdust char blends: Physiochemical properties, combustion characteristic and kinetic behavior [J]. *Fuel*, 2021, 292: 120387.
- [5] Ren L, Ding L, Guo Q, *et al.* Characterization, carbon-ash separation and resource utilization of coal gasification fine slag: A comprehensive review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 398: 136554.
- [6] Zhu D, Xue B, Jiang Y, *et al.* Using chemical experiments and plant uptake to prove the feasibility and stability of coal gasification fine slag as silicon fertilizer [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(6): 5925-5933.
- [7] Zhang J, Zuo J, Ai W, *et al.* Preparation of a new high-efficiency resin deodorant from coal gasification fine slag and its application in the removal of volatile organic compounds in polypropylene composites [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384: 121347.
- [8] 刘开平, 赵红艳, 李祖仲, 等. 煤气化渣对水泥混凝土性能的影响 [J]. *建筑科学与工程学报*, 2017, 34(5): 190-195.
- [9] 饶天曦, 马钊, 张庆龙, 等. 神宁炉细灰掺烧气流床锅炉可行性和经济性分析 [J]. *化工管理*, 2019, (21): 7-8.
- [10] 曹真真, 王江涛, 孟雪. 水煤浆气化细渣脱水板框压滤机运行总结 [J]. *大氮肥*, 2019, 42(5): 292-294.
- [11] Jeong I, Lee D, Lim J, *et al.* Study on flow pattern according to rotor design parameter of sewage sludge solid fuel crusher [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2020, 15(3): 1471-1479.
- [12] 陈锐章, 陶从喜, 赵必胜, 等. 水泥窑协同处置城市干化污泥技术及其工程化应用 [J]. *水泥技术*, 2023, (3): 25-31.
- [13] 张明远. 新型煤泥破碎机结构设计及试验研究 [J]. *煤炭工程*, 2022, 54(S1): 215-219.
- [14] 纪长顺, 戴昭斌, 任祥军. 矿用立式煤泥破碎机的研制与应用 [J]. *煤矿机械*, 2020, 41(9): 142-143.
- [15] 扈树章, 陈继莹, 焦庆国, 等. 基于高水分煤泥饼的细颗粒不黏结破碎机 [J]. *煤炭技术*, 2021, 40(9): 198-199.
- [16] 刘亮亮, 周伟, 李亮, 等. 高灰煤泥滤饼破碎及均匀配比混料装置的设计 [J]. *山西焦煤科技*, 2021, 45(12): 18-20.
- [17] 赵权, 高爱华, 刘玥, 等. 粒径与干燥温度对污泥颗粒干燥特性的影响 [J]. *河南化工*, 2023, 40(1): 32-37.
- [18] 高旭霞, 郭晓镭, 龚欣. 气流床煤气化渣的特征 [J]. *华东理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 35(5): 677-683.
- [19] 宋瑞领, 李静, 付亮亮, 等. 多喷嘴对置式水煤浆气化炉渣特性研究 [J]. *洁净煤技术*, 2018, 24(5): 43-49.
- [20] 高海洋, 梁龙, 靳开宇, 等. 煤气化渣资源化利用综述 [J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(8): 192-208.
- [21] 王学斌, 于伟, 张韬, 等. 基于粒度分级的煤气化细渣特性分析及利用研究 [J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(3): 61-69. ■
- 锡杨市金属表面处理工业园为例 [J]. *环境与发展*, 2017, 29(9): 41, 43.
- [10] 高秋凤. 工业企业废水排放对城市污水处理厂运行影响的研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
- [11] 楚金喜, 吕丹, 贾清龙, 等. 活性污泥重金属中毒的工艺调控方法与对策 [J]. *净水技术*, 2022, 41(1): 166-172.
- [12] 付丽亚, 宋玉栋, 王盼新, 等. 突发环境事件中典型水污染物应急去除技术及案例 [J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(1): 322-328.
- [13] 姜雅雯, 李申, 黄茜. 污水处理过程中重金属的归趋特性研究 [J]. *环境与发展*, 2019, 31(9): 124-125.
- [14] 刘书谱. 中小型城镇污水处理厂重金属去除及排放水体的生态风险研究 [D]. 金华: 浙江师范大学, 2019.
- [15] 李龙宇, 毛宇翔, 李永, 等. 重金属在氧化沟式污水处理工艺中的迁移转化 [J]. *安全与环境学报*, 2014, 14(4): 217-223. ■