

烧结微细粉尘多场协同处理工艺数值模拟

李海英, 苗天越, 刘吉恺, 薛海瑞, 李国良

Numerical simulation of multi-field collaborative processing technology for sintering ultrafine dust

LI Haiying, MIAO Tianyue, LIU Jikai, XUE Hairui, and LI Guoliang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2024020002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[电流辅助烧结过程的多物理场耦合体系模拟](#)

System simulation of multi-physical field coupling in electric current-assisted sintering

粉末冶金技术. 2020, 38(6): 414-422

[金属增材制造数值模拟研究进展](#)

Research progress on numerical simulation of metal additive-manufacturing process

粉末冶金技术. 2022, 40(2): 179-192

[紧耦合气雾化喷嘴流场特性研究](#)

Research on flow field characteristic of close-coupled gas atomizing nozzles

粉末冶金技术. 2024, 42(3): 312-319

[纯钼的多向锻造数值模拟及实验研究](#)

Numerical simulation and experimental investigation on multi-directional forging of pure molybdenum

粉末冶金技术. 2021, 39(3): 216-222

[金属粉末注射成形技术及其数值模拟](#)

Metal powder injection molding technology and numerical simulation

粉末冶金技术. 2022, 40(1): 72-79

[放电等离子烧结 \$B_4C\$ 研究进展](#)

Research progress of B_4C prepared by spark plasma sintering

粉末冶金技术. 2022, 40(6): 516-526



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

烧结微细粉尘多场协同处理工艺数值模拟

李海英, 苗天越[✉], 刘吉恺, 薛海瑞, 李国良

华北理工大学冶金与能源学院, 唐山 063210

[✉]通信作者, E-mail: 1004699313@qq.com

摘要 针对烧结烟气微细粉尘处理效率低等问题, 提出了一种新型的相变团聚与湍流团聚耦合的多场协同处理技术。采用数值模拟方法, 深入研究了在多场效应下烧结微细粉尘的团聚行为及其演化参数对团聚效率的影响。结果表明: 较低的入口速度能显著提高团聚效率, 表现为烧结微细粉尘平均粒径的减小和出口处大粒径粉尘数密度的增加。入口速度为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时平均粒径为 $16.1 \mu\text{m}$, 大粒径粉尘数密度为单位体积 (cm^{-3}) 5.08×10^4 个。初始体积分数的提高虽然不利于粉尘长大, 但与出口处大粒径粉尘数密度成正比。体积分数为 0.23% 时平均粒径最大, 为 $19.8 \mu\text{m}$; 体积分数为 0.62% 时大粒径粉尘数密度最大, 可达单位体积 (cm^{-3}) 7.40×10^4 个。这表明较高的体积分数有利于粉尘处理效果。粉尘初始粒径的增加会导致其最终粒径数密度的减小, 并与出口处大粒径粉尘的数密度呈反比关系, 当初始粒径为 $0.78 \mu\text{m}$ 时, 最终粒径最小, 为 $38.9 \mu\text{m}$, 出口处数密度却最高, 为单位体积 (cm^{-3}) 8.17×10^4 个。这表明较小的初始粒径更有利于协同处理工艺的效果。

关键词 协同处理; 烧结烟气; 团聚; 微细粉尘; 多场耦合

分类号 X701.2; TF123

Numerical simulation of multi-field collaborative processing technology for sintering ultrafine dust

LI Haiying, MIAO Tianyue[✉], LIU Jikai, XUE Hairui, LI Guoliang

College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210

[✉]Corresponding author, E-mail: 1004699313@qq.com

ABSTRACT A new type of multi-field collaborative processing technology that couples phase change aggregation and turbulent aggregation has been proposed to address the problem of low efficiency in the treatment of sintering flue gas ultrafine dust. By using numerical simulation methods, the aggregation behavior of sintering ultrafine dust under multi-field effects and the influence of its evolution parameters on aggregation efficiency were thoroughly investigated. The research results show that a lower inlet velocity can significantly improve the aggregation efficiency, as evidenced by a decrease in the average particle size of sintering ultrafine dust and an increase in the number density of large particle dust at the outlet. When the inlet velocity is $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, the average particle size is $16.1 \mu\text{m}$, and the number density of large particle dust at the outlet is $5.08 \times 10^4 \text{ particles}\cdot\text{cm}^{-3}$. Although an increase in initial volume fraction is not conducive to dust growth, it is directly proportional to the number density of large particle dust at the outlet. When the volume fraction is 0.0023, the average particle size is the largest, at $19.8 \mu\text{m}$, and when the volume fraction is 0.0062, the number

收稿日期: 2024-09-06

基金项目: 河北省自然科学基金 (E2022209138); 唐山市重点研发项目 (21130231C)

DOI: 10.19591/j.cnki.cn11-1974/tf.2024020002; <https://pmt.ustb.edu.cn>

density of large particle dust is the highest, reaching 7.4×10^4 particles·cm⁻³. This indicates that a higher volume fraction is beneficial for dust treatment. An increase in the initial particle size of the dust will lead to a decrease in its final particle size density, which is inversely proportional to the number density of large particle dust at the outlet. When the initial particle size is 0.78, the final particle size is the smallest, at 38.9 μm, but the outlet density is the highest, at 8.17×10^4 particles·cm⁻³. This indicates that a smaller initial particle size is more conducive to the effectiveness of the collaborative processing technology.

KEY WORDS collaborative processing; sintering flue gas; aggregation; ultrafine dust; multi-field coupling

随着中国钢铁行业的迅猛发展, 相应的环境污染问题也日益凸显。在众多污染源中, 冶金行业的 PM2.5 排放占比高达 15.7%, 其中烧结工序所排放的粉尘量占到了冶金行业总排放量的 48%, 大部分为微细粉尘^[1]。为了有效改善空气质量, 目前已提出多种微细粉尘团聚技术, 包括湍流团聚、化学团聚、相变团聚^[2]等, 但这些技术在实际应用中都有着能耗较高或团聚效率不理想等一些不足之处。因此, 钢铁行业烟气污染物治理需要在原有的单一污染物控制思路, 创新施行多污染物的协同控制技术, 在短流程、高效低耗脱除污染物的基础上实现多污染因子达标排放, 新型高效多污染物协同控制技术逐渐成为当下的研究热点^[3]。学者们提出了多场耦合技术, 通过协同处理来提高脱除效率。如喷雾液滴与声波团聚的耦合^[4]、脉冲电晕放电与声波的耦合^[5]、蒸汽相变团聚与声波团聚的耦合^[6-9]、化学团聚与声波团聚的耦合^[10]以及喷雾蒸发与湍流团聚的耦合^[11]等。在这些方法中, 相变团聚与湍流团聚因其操作简便和较低的能耗而受到广泛关注。

针对蒸汽相变团聚技术的应用与优化, Yan 等^[7]开发了一种声波团聚和蒸汽冷凝耦合的新型微细粉尘预处理工艺, 该团队后续又深入研究了过饱和度和停留时间等关键参数对新型工艺的影响^[9]。米行等^[12]通过微细粉尘相变团聚反应器的构建, 探究了蒸汽相变团聚耦合紊流布朗运动脱除微细粉尘的效果。针对湍流团聚技术进行研究, Saffman 和 Turner^[13]基于球碰撞理论提出了零惯性颗粒在均匀各向同性的湍流中的碰撞模型。郑建祥等^[14]在模拟颗粒物团聚过程中加入排斥势能作用, 引入捕集效率修正颗粒物聚并模型, 修正后的模型与试验结果吻合度大于 97%。

本文自主设计了相变团聚与湍流团聚耦合的团聚室, 并搭建了一套基于相位激光多普勒粒子动态分析仪 (PDA) 的实验测量系统对所建立的粉尘生长模型进行佐证。采用数值模拟的方法深入研究了

烧结微细粉尘在多场协同作用机制下的团聚状态, 以及不同演化参数对团聚效果的影响。

1 数学模型的建立

1.1 多相流模型

研究采用多相流模型中的欧拉-欧拉模型, 其连续性方程表达式 (1)^[15]:

$$\frac{\partial(\alpha_q \rho_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mu_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

式中: ρ_q 表示 q 相的密度; μ_q 表示 q 相速度矢量; \dot{m}_{pq} 表示 p 相到 q 相的质量传; \dot{m}_{qp} 表示 q 相到 p 相的质量传递。

动量守恒方程表达式如公式 (2):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\alpha_q \rho_q \mu_q)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \mu_q \mu_q) = \\ & \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} \mu_{pq} - \dot{m}_{qp} \mu_{qp} + R_{pq}) - \\ & \alpha_q \nabla p + \tau_q \cdot \nabla + \alpha_q \rho_q g + (F_q + F_{lift,q} + F_{wl,q} + F_{vm,q} + F_{td,q}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: P 表示所有相的总压强; g 表示重力加速度矢量; R_{pq} 表示 p 相与 q 相之间的相互作用力矢量; α_q 表示角度系数; τ_q 表示应力张量; F_q 表示外力矢量; $F_{lift,q}$ 表示升力矢量; $F_{wl,q}$ 表示壁面润滑力矢量; $F_{vm,q}$ 表示虚拟质量力矢量; $F_{td,q}$ 表示湍流耗散力矢量; μ_{pq} 表示相间速度, 定义: 如果 $\dot{m}_{pq} > 0$, 则 $\mu_{pq} = \mu_p$, 否则 $\mu_{pq} = \mu_q$; μ_{qp} 表示相间速度, 定义: 如果 $\dot{m}_{qp} > 0$, 则 $\mu_{qp} = \mu_q$, 否则 $\mu_{qp} = \mu_p$ 。

1.2 聚并核函数

微细粉尘的惯性大小由 Stokes 数来表示, 本文研究中所用粉尘 Stokes 数极小, 故选取由 Saffman 和 Turner^[13]提出的零惯性颗粒聚并核函数进行描述, 见公式 (3)。

$$\beta_t(L_i, L_j) = \zeta_T \sqrt{\frac{\varepsilon}{\nu}} \sqrt{\frac{8\pi}{15}} \frac{(L_i + L_j)^3}{8} \quad (3)$$

式中: L_i 、 L_j 分别表示颗粒 i 与 j 的直径; ζ_T 表示

湍流碰撞效率; ν 表示气体运动粘度; ε 表示湍流耗散率。

1.3 颗粒群平衡方程

粒径分布是考察微细粉尘团聚效果的主要因素, 因此, 在模拟过程中, 不仅需要考

及质量守恒方程, 还需要添加一个颗粒群体平衡方程 (PBE) 来描述粒子的平衡。其中多维群体平衡模型是在零维群体平衡模型的基础上耦合了多相流模型, 可以准确模拟出各向异性的微细粉尘场特性, 具体表达式见公式 (4) [16]。

$$\frac{\partial n(x, V, t)}{\partial t} + u_g(t) \frac{\partial n(x, V, t)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D \frac{\partial n(x, V, t)}{\partial x} \right] + n(x, V, t) \frac{\partial [u_d(V, t) - u_g(t) - a]}{\partial x} + \left\{ \frac{1}{2} \int_{V_{\min}}^V \beta(x, V-U, u, t) n(x, V-U, t) n(x, U, t) du - n(x, V, t) \int_{V_{\min}}^{V_{\max}} \beta(x, V, U, t) n(x, U, t) du \right\}_{\text{聚并}} - \left\{ \left[\frac{\partial (I(x, V, t) n(x, V, t))}{\partial V} \right] \parallel \left[\begin{array}{l} C_s(x, t) D_s(x, V - V_0, t) n(x, V - V_0, t) \\ -C_s(x, t) D_s(x, V, t) n(x, V, t) \end{array} \right] \right\}_{\text{蒸发或冷凝}} \quad (4)$$

式中: X 表示空间位置矢量; $n(x, V, t)$ 表示与时间和空间相关联的微细粉尘尺度分布函数; u_g 、 u_d 分别为连续相和微细粉尘相的速度矢量; $\beta(x, V, U, t)$ 表示 t 时刻两微细粉尘 (体积分别为 U 和 V) 的聚并核; $I(x, V, t)$ 表示微细粉尘体积变化率; C_s 表示冷凝单体的数量浓度; $D_s(x, V, t)$ 表示冷凝单体在体积为 V 的微细粉尘表面的沉积速率; V_0 表示同一物质所形成的冷凝单体体积; D 表示 Fick 扩散系数; a 表示由外部作用力引起的微细粉尘迁移速度矢量; $[a]||[b]$ 表示从连续相和微细粉尘相的冷凝/蒸发表达式中选择其中一个。

2 物理模型的建立

2.1 几何模型

基于实验团聚室的实际尺寸, 采用前处理软件 Icem 建立团聚室二维模型及网格划分。结果如图 1 所示。

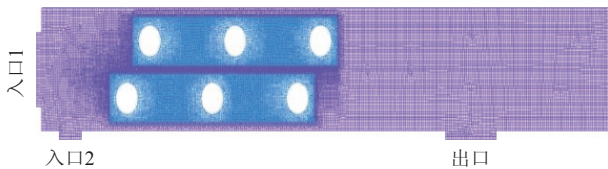


图 1 团聚室物理模型

Fig.1 Physical model of agglomeration chamber

将入口 1 视为烟气入口, 入口 2 视为湿空气入口。计算域整体高 20 cm。入口 1 与出口直径均为 9 cm、入口 2 直径 4 cm, 湍流柱交错排列, 直径为 4 cm。对物理模型进行结构化网格划分, 对湍流柱区域进行局部加密, 总体网格数为 77068 个, 网格质量全部在 0~1 之间, 符合模拟要求。

2.2 网格无关性验证

分别比较 20491 个、77068 个和 115429 个网格下相同工况的模拟结果差异来验证模型的网格无关性。三组网格的湍动能分布和速度分布如图 2、图 3 所示。

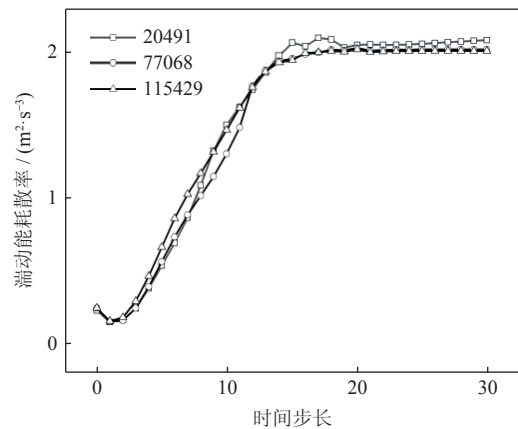


图 2 湍动能分布

Fig.2 Turbulent kinetic energy distribution

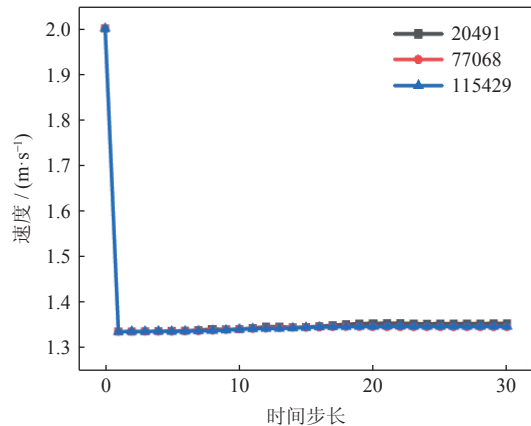


图 3 速度分布

Fig.3 Velocity distribution

图 2、图 3 可以看出，三组网格的湍动能分布以及速度分布都已经趋于稳定，随着网格数量的变化，模拟结果均无太大差距，因此认为该模型已经达到了网格无关性的要求，文章最终选择采用 77068 个网格数量的模型进行后续模拟研究。

2.3 相关假设

模拟研究并不能完全达到实验参数要求，故对其进行一些相关假设：

- (1) 将粉尘视为表面光滑的球形颗粒，并忽略粉尘破碎的情况对流场的影响；
- (2) 由于蒸汽相变凝结时间较短，可认为蒸汽均匀的凝结在微细粉尘表面；
- (3) 将团聚室壁面视为绝热壁面，不考虑其散热过程；
- (4) 假设粉尘生长速率为常数。

2.4 边界条件

模型边界条件的设置参照实际实验中的参数并加以简化。将烧结烟气简化为空气和水蒸气作为连

续相与微细粉尘物的混合。烟气温度设置为 298.55 K，湿空气温度设置为 297 K。经参考实际条件为了模拟“成云”条件，使细颗粒物在这样的过饱和湿度环境中与饱和水蒸气充分混合，湿空气中水蒸气含量为 $23 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。微细粉尘物的密度为 $2200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，粘度为 $1.72\times 10^{-5} \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ，体积分数为 0.0043，微细粉尘初始粒径为 $0.785 \mu\text{m}$ 。粉尘生长速率根据前人文献^[17]设置为 $8.93\text{-}6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，采用湍流聚并模型。入口 1、2 全部设为速度入口，出口设为压力出口。湿空气速度分为 X、Y 两个方向，Y 方向速度设置为 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，X 方向速度与烟气入口速度相同，烟气入口速度由实验中实测所得。采用相间耦合的方法对模型进行求解。对颗粒群平衡方程采用分区算法，将颗粒群大小分为 Bin-0 ($35.5 \mu\text{m}$)、Bin-1 ($16.6 \mu\text{m}$)、Bin-2 ($7.73 \mu\text{m}$)、Bin-3 ($3.61 \mu\text{m}$)、Bin-4 ($1.68 \mu\text{m}$)、Bin-5 ($0.785 \mu\text{m}$) 6 个子区间，如图 4 所示。

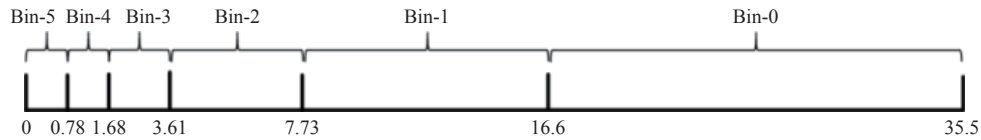


图 4 子区间分布图

Fig.4 Subinterval distribution map

2.5 生长模型验证

通过自行搭建的多场协同处理烧结微细粉尘实验系统，研究了不同入口速度下，烧结微细粉尘在团聚室内 66 cm 处的粒径数值。实验中团聚室各个参数与模拟研究中一致，初始粒径由激光粒度分析仪测得，流场中的粉尘粒径由相位激光多普勒粒子动态分析仪进行测量。根据实验测量结果，烧结微细粉尘的粒度分布具体数值如图 5 所示。在实验过程中，受潮湿环境的影响，烧结微细粉尘可能会发生受潮结块的现象，再经过团聚过程之后，会致使流场中会出现极小部分的超大粒径粉尘。故在分析粒径分布时，忽略了极大数值部分，只讨论粒径范围为 $0\sim 48.6 \mu\text{m}$ 的烧结粉尘。

对整体粒径分布进行分析后，为了进一步探讨不同烟气流速对烧结微细粉尘团聚粒径的影响，对不同烟气流速工况下烧结微细粉尘的平均粒径进行了分析，结果如图 6 所示。

当入口速度分别为 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $3.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $4.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $5.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以及 $5.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时，通过实验得出的粉尘平

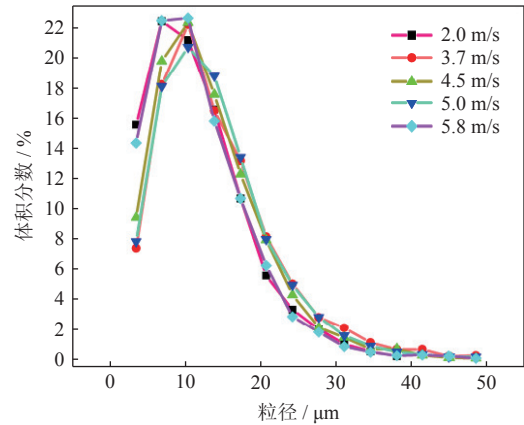


图 5 微细粉尘团聚后的粒度分布

Fig.5 Particle size distribution of fine dust after agglomeration

均粒径分别为 $17.1 \mu\text{m}$ 、 $13.3 \mu\text{m}$ 、 $12.4 \mu\text{m}$ 、 $11.4 \mu\text{m}$ 、 $10.3 \mu\text{m}$ ；通过模拟得出的粉尘平均粒径分别为 $16.1 \mu\text{m}$ 、 $13.5 \mu\text{m}$ 、 $12.1 \mu\text{m}$ 、 $11.2 \mu\text{m}$ 、 $10.1 \mu\text{m}$ 。

根据实验结果和模拟结果，验证了生长模型的准确性，结果对比图如图 7 所示。

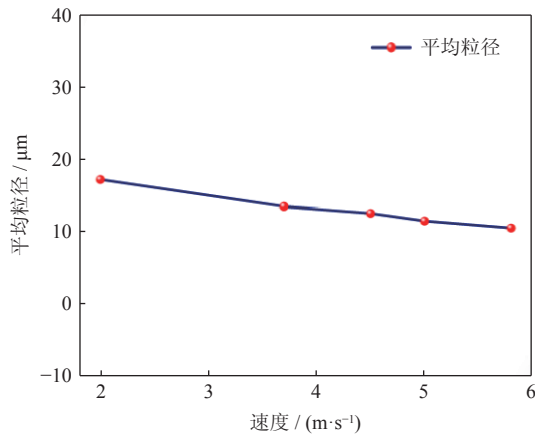


图 6 不同烟气流速下的粉尘平均粒径

Fig.6 Average particle size of dust under different flue gas flow rates

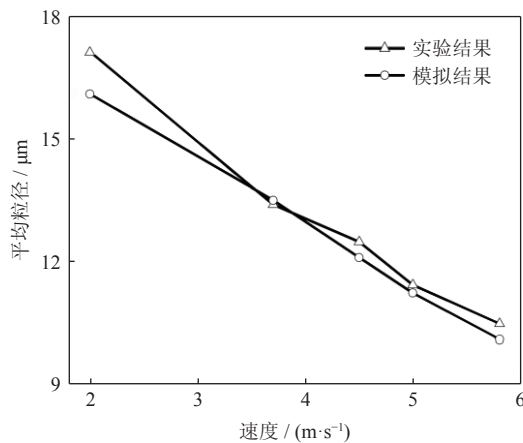


图 7 实验结果与模拟结果对比

Fig.7 Comparison between experimental results and simulation results

3 结果与讨论

3.1 不同入口速度对多场协同团聚效果影响

为研究不同入口速度对烧结微细粉尘团聚状态的影响, 选取了体积分数均为 0.0043 入口速度分别为 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $3.7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $4.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $5.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $5.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 这 5 种不同工况进行模拟。团聚室出口处各粒径区间的数密度分布如图 8 所示。

在流体动力学中, 流场内的速度对湍动能的耗散率具有显著影响。速度的增加导致湍动能耗散率提高, 反映了流场中湍动能转化为粉尘动力的能力。湍动能耗散率是湍流强度和流体粘性力之间相互作用的量度, 对粉尘颗粒的动力学行为产生直接影响。

然而, 由图 8 可以明显看出, 对于粒径较小的颗粒, 入口速度的增加伴随着出口处初始粒径粉尘

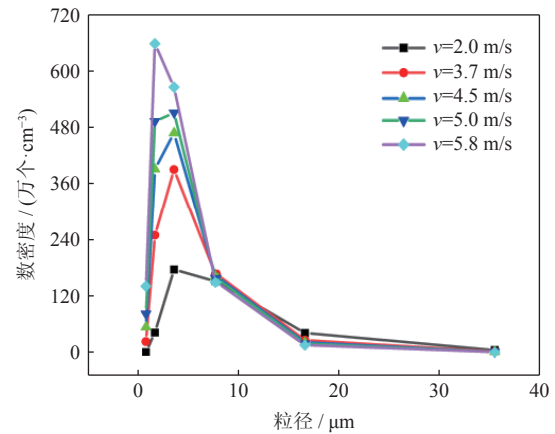


图 8 出口处各粒径区间数密度

Fig.8 The number density of each particle size interval at the exit

数密度的提高, 在出口处, 初始粒径粉尘数密度依然与烟气流速呈正比关系。当入口速度为 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 初始粒径在团聚室内的数密度为单位体积 (cm^{-3}) 1.89×10^8 个, 在出口处的数密度为单位体积 (cm^{-3}) 9800 个; 而当入口速度增加至 $5.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 团聚室内初始粒径的数密度达到单位体积 (cm^{-3}) 1.96×10^8 个, 出口处数密度为单位体积 (cm^{-3}) 1.405×10^6 个。在出口处, 数密度最高的粉尘粒径区间为 $3.6 \mu\text{m}$, 此时粉尘数密度依然随着烟气流速的增加而提高, 且增长幅度较大。

直到粉尘粒径增长至 $7.73 \mu\text{m}$ 后, 粉尘数密度与烟气流速则呈现出反比关系, 并且随着粒径的增长, 数密度开始逐渐下降, 整体形成一个单峰值分布。对于大粒径粉尘 (在本研究中指 Bin-0 粒径区间内的粉尘, 以下简称为“大粒径粉尘”) 的数密度产生了负面影响, 即大粒径粉尘的数量密度随着入口速度的提高而减少。出口处大粒径粉尘数密度对比如图 9 所示。

由图 9 可以看出, 当入口速度为 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 大粒径粉尘数密度为单位体积 (cm^{-3}) 5.08×10^4 个, 而入口速度增加到 $5.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 大粒径粉尘数密度显著下降至单位体积 (cm^{-3}) 0.73×10^4 个。这一变化揭示了尽管流速的增加确实可以增强粉尘在流场内的扰动, 但这同样也会导致粉尘在团聚室内的停留时间缩短。随着流速的提升, 粉尘停留时间的减少意味着异质成核反应的不充分, 进而影响到大粒径粉尘的形成与积累。因此, 出口处大粒径粉尘的数密度随着入口速度的增加而减少。这表明, 虽然高入口速度可能促进粉尘颗粒的动力学活性, 但同时也可能抑制有效的粉尘团聚过程, 从而不利于烧

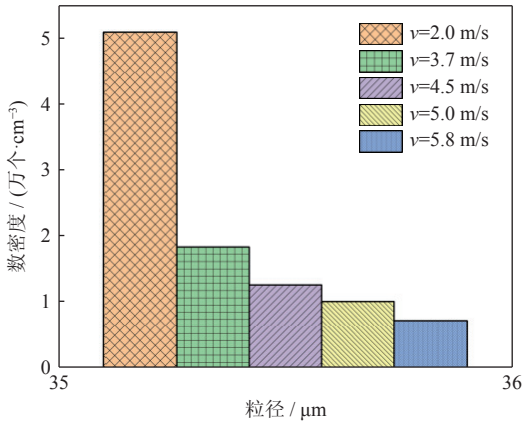


图9 大粒径数密度分布

Fig.9 Large particle size number density distribution

结微细粉尘的有效处理。

3.2 不同体积分数对多场协同团聚效果影响

3.2.1 体积分数对微细粉尘粒径的影响

为探究不同初始体积分数对烧结微细粉尘团聚状态的影响，本节模拟了入口速度为 $2.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，初始粒径为 $0.785 \mu\text{m}$ ，烟气温度为 298.55 K 的工况下，体积分数分别设置为 0.0023 、 0.0035 、 0.0043 、 0.0051 、 0.0062 这 5 种不同的初始体积分数对多场协同处理微细粉尘的影响。

在团聚室 y 轴为 8 cm ， x 轴为 70 cm 处不同体积分数工况下的粉尘粒径如图 10 所示。

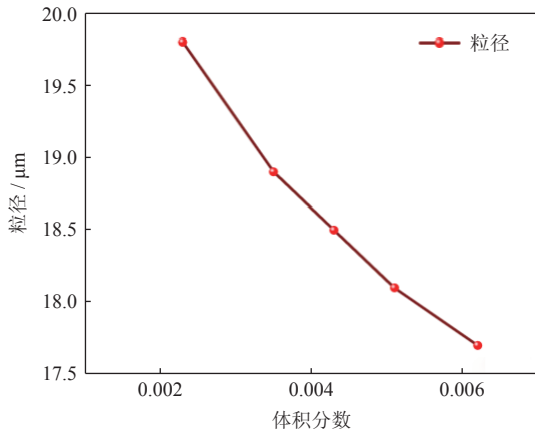


图10 不同体积分数工况下的粉尘粒径

Fig.10 Particle size of dust under different volume fraction conditions

由图 10 可以看出，随着微细粉尘体积分数的增长，粉尘粒径与体积分数呈现反比关系。当体积分数为 0.0023 时，观测点处的粒径为 $19.8 \mu\text{m}$ ；当体积分数分别增加至 0.0035 、 0.0043 、 0.0051 和 0.0062 时，观测点处的粒径分别为 $18.9 \mu\text{m}$ 、 $18.5 \mu\text{m}$ 、

$18.1 \mu\text{m}$ 和 $17.7 \mu\text{m}$ 。由此可以表明，体积分数的增加，会减小烧结微细粉尘团聚粒径。体积分数分别为 0.0062 与 0.0023 的工况下， X 方向的速度分布如图 11、图 12 所示。

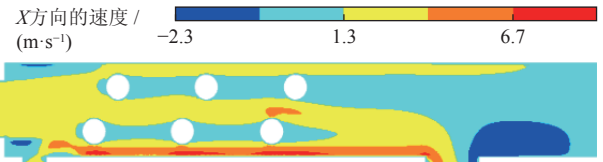


图11 体积分数为 0.0062 时的 X 方向速度分布

Fig.11 Velocity distribution in the X direction when the volume fraction is 0.0062

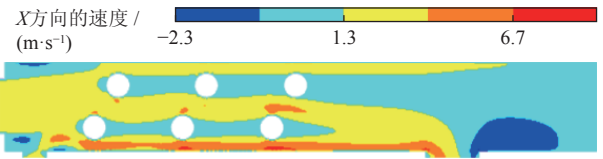


图12 体积分数为 0.0023 时的 X 方向速度分布

Fig.12 Velocity distribution in the X direction when the volume fraction is 0.0023

以体积分数分别为 0.0062 和 0.0023 的两种工况为例进行了对比研究，其结果分别如图 11 和图 12 所示。通过对流场内 X 方向速度分布进行对比可以观察到，在体积分数为 0.0023 时，前两排湍流柱两侧涡旋数量明显多于体积分数为 0.0062 时的工况，并且通过对比前两排湍流柱的关于 X 方向的速度分布可以观察到，体积分数 0.0062 明显低于体积分数 0.0023 ，其结果如图 13 示。综上所述说明体积分数的增加，导致了流场内的烧结微细粉尘数量增多，会阻碍流场发展，减少流场内的涡旋生成，从而不利于微细粉尘的长大。

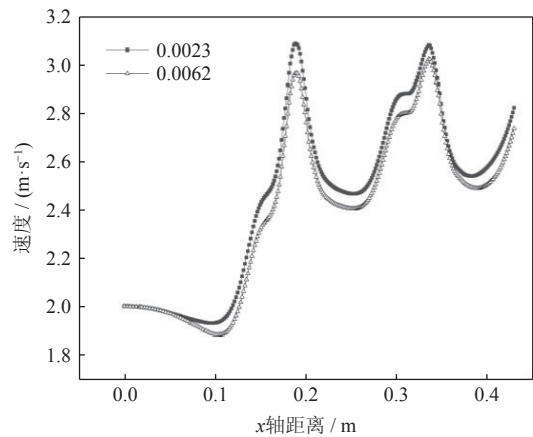


图13 前两排湍流柱的关于 X 方向的速度分布

Fig.13 The velocity distribution in the X-direction of the first two rows of turbulent columns

3.2.2 体积分数对微细粉尘数密度的影响

不同体积分数工况下, 团聚室出口处数密度分布如图 14 所示。由图 14 可以发现, 在出口处, 体积分数为 0.0062 时的初始粒径粉尘数密度最小, 为单位体积 (cm^{-3}) 0.7×10^4 个; 大粒径粉尘数密度最大, 可达 7.4 万个 $\cdot \text{cm}^{-3}$ 。而体积分数为 0.0023 时, 初始粒径粉尘数密度最大, 高达单位体积 (cm^{-3}) 1.3×10^4 个, 大粒径粉尘数密度最小, 为单位体积 (cm^{-3}) 2.5×10^4 个。由此可以表明, 在初始体积分数较高时, 烧结微细粉尘的团聚效果更为显著。

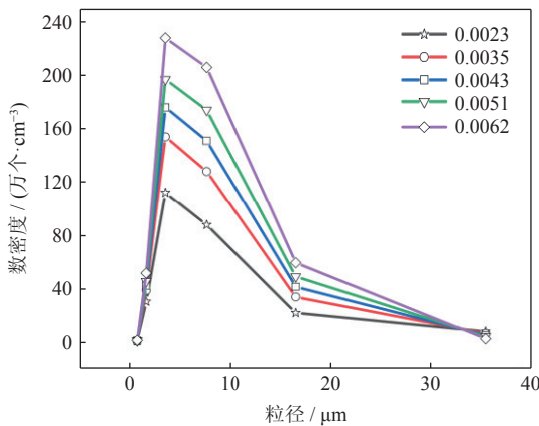


图 14 不同体积分数出口处数密度分布

Fig.14 Number density distribution at outlets with different volume fractions

随着初始体积分数的提高, 也意味着更多的微细粉尘会加入到团聚过程中来, 粉尘的增多导致粉尘间碰撞机会的增加, 促进了团聚效率。团聚室内初始粒径粉尘和大粒径粉尘数密度均与初始体积粉尘成正比。也正是因为粉尘间频繁的碰撞, 导致较小粒径的粉尘更快地团聚成较大粉尘, 导致了出口处大粒径粉尘数密度相对较高。

3.2.3 体积分数对流场内湍动能耗散率的影响

体积分数分别为 0.0062 与 0.0023 的工况下, 流场内湍动能耗散率分布云图如图 15、图 16 所示。

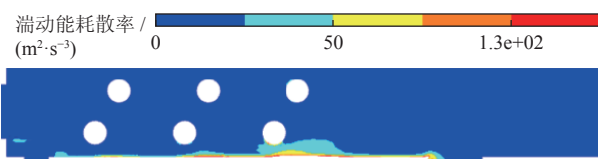


图 15 体积分数为 0.0062 时的湍动能耗散率分布

Fig.15 Turbulent energy dissipation rate distribution at a volume fraction of 0.0062

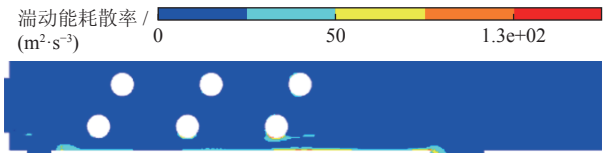


图 16 体积分数为 0.0023 时的湍动能耗散率分布

Fig.16 Turbulent energy dissipation rate distribution at a volume fraction of 0.0023

由图 15 和图 16 的比较分析表明, 体积分数增加虽然限制了流场的完全发展, 但同时导致湍动能耗散率上升。这一变化促进了微细粉尘动力的增强, 从而提高了粉尘间的碰撞概率, 并导致大粒径粉尘数密度的增加, 从而有效地优化了粉尘团聚效果。

3.3 不同初始粒径对多场协同团聚效果影响

本节研究了在入口速度为 $2.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 体积分数 0.0062 的工况下, 初始粒径分别为 $0.78 \mu\text{m}$ 、 $1.08 \mu\text{m}$ 、 $1.38 \mu\text{m}$ 、 $1.68 \mu\text{m}$ 、 $2.00 \mu\text{m}$, 这 5 种不同的初始粒径对多场协同处理微细粉尘的影响机理。不同初始粒径 Bin-5 沿 X 轴的体积分数变化如图 17 所示。

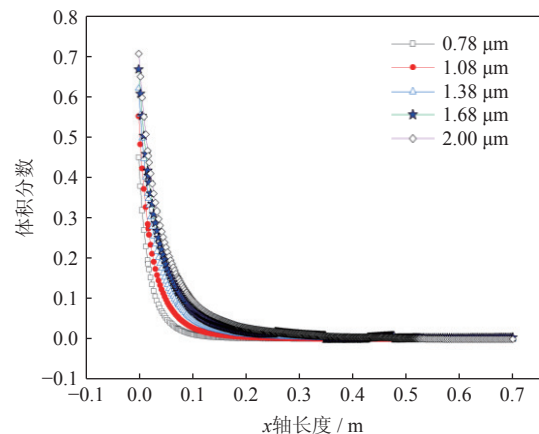


图 17 不同初始粒径 Bin-5 沿 X 轴的体积分数变化

Fig.17 Volume fraction variation of Bin-5 with different initial particle sizes along the X-axis

Bin-5 意味着团聚室内最小粉尘粒径, 由图可以看出, 初始粒径为 $2.00 \mu\text{m}$ 时的体积分数最大, 初始粒径为 $0.78 \mu\text{m}$ 时的体积分数最小。在 $0 \sim 0.2 \text{ m}$ 的区间内, Bin-5 的体积分数骤降, 0.2 m 以后体积分数已经趋近于 0。这是因为微细粉尘刚刚进入团聚室内便会发生蒸汽相变团聚, 而后又流经湍流柱区域发生湍流团聚现象, 微细粉尘初始粒径较小, 长大速率较高, 可以在短时间内迅速完成团聚。

从结果中可以得出, 团聚室内初始粒径粉尘沿 X 轴的体积分布随着初始粒径的增加而增大。这表明, 初始粒径的增加, 会阻碍粉尘团聚的发展,

不利于微细粉尘的脱除。不同初始粒径沿 X 轴的湍动能耗散率分布如图 18 所示。

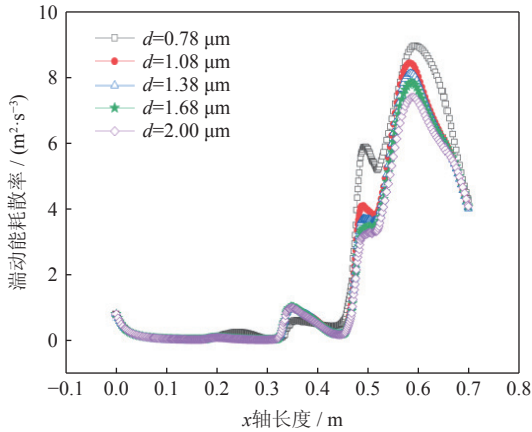


图 18 不同初始粒径沿 X 轴的湍动能耗散率分布

Fig.18 Distribution of turbulent energy dissipation rate along the x-axis with different initial particle sizes

湍动能耗散率随着 x 轴长度的增加而逐步增高, 某些区域呈现错落的现象是因为流经湍流柱区域后, 柱子后方产生的涡旋强度较大, 使得湍动能耗散率增加, 并在增高之后迅速降低。而流场内需要流经 3 次湍流柱区域, 所以湍动能耗散率逐步增高。并且可以发现, 初始粒径的增大, 会使得流场内的湍动能耗散率减小, 从而减小了粉尘运动所需动力以及碰撞机率。不同初始粒径出口数密度如图 19 所示。

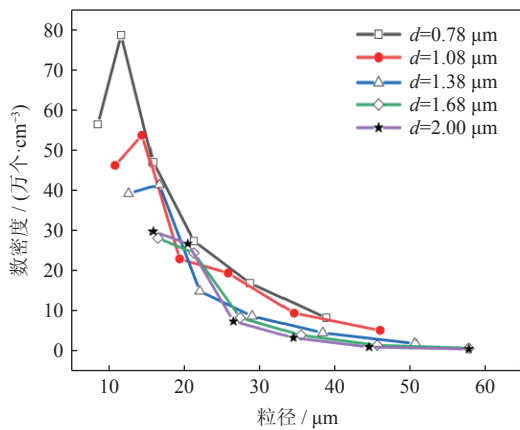


图 19 不同初始粒径出口数密度

Fig.19 Number density of outlets with different initial particle sizes

由图 19 中可以看出, 虽然粉尘被排出时的最终粒径随着初始粒径的增加而增大, 但出口处的大粒径粉尘数密度却随着初始粒径的增大而减少。当初始粒径为 0.78 μm 时, 最终粒径为 38.90 μm, 出

口处数密度为单位体积 (cm⁻³) 8.17×10⁴ 个; 而在初始粒径为 2.00 μm 时, 最终粒径可达 57.80 μm, 但出口处数密度仅为单位体积 (cm⁻³) 0.40×10⁴ 个。由 Stokes 数可以知道, 粉尘粒径越小, Stokes 数也就越小, 则微细粉尘对流场的响应也就越强^[18], 所以更容易形成微细粉尘富集区, 增加碰撞几率。初始粉尘越大, Stokes 数越大, 粉尘自身惯性增加, 维持自身运动轨迹的能力增加, 便会减少被涡旋卷吸的机率, 不利于粉尘的长大。

4 结论

通过自主设计和搭建一个多场耦合团聚室来实现烧结微细粉尘的多场协同处理实验系统。采用数值模拟方法, 深入探讨了多种因素对烧结微细粉尘团聚机理的影响, 得到以下重要结论:

(1) 烧结微细粉尘的处理效果受入口速度的显著影响。随着入口速度的增加, 微细粉尘的平均粒径逐渐减小, 入口速度为 2.0 m·s⁻¹ 时平均粒径最大, 模拟数据为 16.1 μm。同时, 速度增加使得团聚室内的停留时间减少, 导致出口处大粒径粉尘的数密度下降, 入口速度为 2.0 m·s⁻¹ 时大粒径粉尘数密度为单位体积 (cm⁻³) 5.08×10⁴ 个。这表明入口速度的增加不利于粉尘的有效处理, 相对较小的入口速度有助于增强多场协同处理的效率。

(2) 粉尘的初始体积分数对团聚效果具有积极作用。粉尘平均粒径随体积分数的增加而减小。当体积分数为 0.0023 时平均粒径最大, 为 19.8 μm。但是出口处大粒径粉尘的数密度却显示出增加趋势, 体积分数为 0.0062 时的初始粒径粉尘数密度最小, 为单位体积 (cm⁻³) 0.7×10⁴ 个; 大粒径粉尘数密度最大, 可达单位体积 (cm⁻³) 7.4×10⁴ 个。这表明适当提高粉尘的初始体积分数有助于增强多场协同处理的效率。

(3) 烧结微细粉尘的处理效果受初始粒径的显著影响。随着初始粒径的增加, 被排出团聚室前的最终粒径随之增加, 但式出口处大粒径粉尘的数密度与初始粒径呈反比。当初始粒径为 0.78 μm 时, 最终粒径最小, 为 38.9 μm, 但是出口处数密度却最高, 为单位体积 (cm⁻³) 8.17×10⁴ 个。这表明较大的初始粒径会削弱多场协同处理技术对烧结微细粉尘的处理效果, 相对较小的初始粒径有助于增强多场协同处理的效率。

参 考 文 献

- [1] Wang G, Zhang H Q, Su B X, et al. The current situation of carbon emission and carbon reduction in Chinese steel industry. *Ind Min Process*, 2021, 50(12): 55
(王广, 张宏强, 苏步新, 等. 我国钢铁工业碳排放现状与降碳展望. 化工矿物与加工, 2021, 50(12): 55)
- [2] Zhou D, Luo Z Y, Fang M X, et al. Preliminary experimental study of acoustic agglomeration of coal-fired fine particles. *Procedia Eng*, 2015, 102: 1261
- [3] Yan B J, Xing Y, Lu P, et al. A critical review on the research progress of multi-pollutant collaborative control technologies of sintering flue gas in the iron and steel industry. *Chin J Eng*, 2018, 40(7): 767
(闫伯骏, 邢奕, 路培, 等. 钢铁行业烧结烟气多污染物协同净化技术研究进展. 工程科学学报, 2018, 40(7): 767)
- [4] Zhang G X, Wang J Q, Chi Z H, et al. Acoustic agglomeration with addition of sprayed liquid droplets: Three-dimensional discrete element modeling and experimental verification. *Chem Eng Sci*, 2018, 187: 342
- [5] Luo Z Y, Chen H, Wang T, et al. Agglomeration and capture of fine particles in the coupling effect of pulsed corona discharge and acoustic wave enhanced by spray droplets. *Powder Technol*, 2017, 312: 21
- [6] Lin W Q. *Intensification of Acoustic Agglomeration and Ultrasonic Atomization on Behavior of Fine Dust in Air Filtration Process* [Dissertation]. Tianjin: Tianjin University, 2014
(林伟强. 声场联合超声波水雾强化过滤式除尘性能的研究 [学位论文]. 天津: 天津大学, 2014)
- [7] Yan J P, Chen L Q, Yang L J. Combined effect of acoustic agglomeration and vapor condensation on fine particles removal. *Chem Eng J*, 2016, 290: 319
- [8] Li K, Wang E L, Wang Q, et al. Improving the removal of inhalable particles by combining flue gas condensation and acoustic agglomeration. *J Clean Product*, 2020, 261: 121270
- [9] Yan J P, Chen L Q, Lin Q. Removal of fine particles in WFGD system using the simultaneous acoustic agglomeration and supersaturated vapor condensation. *Powder Technol*, 2017, 315: 106
- [10] He M C. *Study on The Agglomeration and Removal of Fine Particles in Multiple Fields* [Dissertation]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020
(赫明春. 多场协同作用下细颗粒物团聚和脱除研究 [学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2020)
- [11] Sun Z K, Yang L J, Chen S, et al. Promoting the removal of fine particles and zero discharge of desulfurization wastewater by spray-turbulent agglomeration. *Fuel*, 2020, 270: 117461
- [12] Mi X, Wang C B. Theory of aggregation kernel of turbulence and Brown synergizing vapor condensing on the surface of PM and its numerical simulation. *Proceed CSEE*, 2018, 38(17): 5126
(米行, 王春波. 蒸汽在 PM 表面凝结的紊流布朗核聚并理论与数值模拟. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5126)
- [13] Saffman P G, Turner J S. On the collision of drops in turbulent clouds. *J Fluid Mech*, 1956, 1(1): 16
- [14] Zheng J X, Xu S, Wang J Y. Simulation study of ultrafine particle aggregation models and agglomerator coagulation. *Proceed CSEE*, 2016, 36(16): 4389
(郑建祥, 许帅, 王京阳. 超细颗粒聚团模型及湍流聚并器聚团研究. 中国电机工程学报, 2016, 36(16): 4389)
- [15] Qian F P, Huang N J, Zhu X J, et al. Numerical study of the gas-solid flow characteristic of fibrous media based on SEM using CFD-DEM. *Powder Technol*, 2013, 249: 63
- [16] Zhao H B, Zheng C G. *Particle Group Equilibrium Simulation for Dynamic Evolution of discrete Systems*. Beijing: Science Press, 2008
(赵海波, 郑楚光. 离散系统动力学演变过程的颗粒群平衡模拟. 北京: 科学出版社, 2008)
- [17] Zhang Y M. *Effect of Nucleation and Growth Process of Particles and Its Strengthening Means on Separation Performance of Cloud-Air-Purifying Technology* [Dissertation]. Lanzhou: Lanzhou university, 2021
(张宇萌. 颗粒成核长大过程及其强化手段对 CAP 技术除尘效率的影响机理 [学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2021)
- [18] Mei T, Li Y, Yang L, et al. Numerical simulation of fine particles in flue gas by using of vapor phase change. *J Hebei Univ Technol*, 2019, 13(3): 27
(梅涛, 李阳, 杨历, 等. 蒸汽相变促进烟气中细颗粒生长的数值模拟. 河北工业大学学报, 2019, 13(3): 27)