

中文引用格式:张宏图,甄泽栋,李博涛,等. 负压取样过程钻杆转速对煤屑-气流动特性的影响研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(4):94-100.

英文引用格式:ZHANG Hongtu, ZHEN Zedong, LI Botao, et al. Study on influence of drill pipe rotation speed on coal particles-gas flow characteristics in negative pressure sampling process[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(4):94-100.

负压取样过程钻杆转速对煤屑-气流动特性的影响研究*

张宏图^{1, 2, 3}副教授, 甄泽栋¹, 李博涛^{**1, 2, 3}讲师, 张欧娅⁴

(1 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 2 河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454003; 3 河南理工大学 煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同中心, 河南 焦作 454003; 4 湘潭大学 艺术学院, 湖南 湘潭 411100)

中图分类号: X936

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.04.0998

基金项目: 国家自然科学基金资助(52274192); 河南省自然科学基金优秀青年项目资助(232300421062); 河南省高校科技创新人才支持计划资助项目(24HASTIT015)

【摘要】 为探究负压取样过程中钻杆内煤屑-气流动特性, 采用计算流体力学与离散单元法(CFD-DEM)耦合模拟法探讨钻杆转速、煤屑质量流量对煤屑输送过程中气固流动速度分布及煤屑输送效率的影响特征。结果表明: 钻杆内气流最大轴向速度随着输送距离的增加而逐渐减小并趋于稳定, 最大切向速度迅速衰减并消失; 钻杆转速增加时, 气流最大轴向速度变化不大, 最大切向速度显著增加; 随着钻杆转速增加, 煤屑螺旋流更加明显, 旋流区距离变长, 悬浮区距离变短; 进入钻杆的煤屑数量减少, 5 m/s 速度以上的煤屑分布增多且分散; 转动时钻杆内部实际固气比小于设定值, 煤屑输送效率随转速的提高先增后减。

【关键词】 负压取样; 钻杆转速; 煤屑; 流动特性; 计算流体力学与离散单元法(CFD-DEM)耦合模拟

Study on influence of drill pipe rotation speed on coal particles-gas flow characteristics in negative pressure sampling process

ZHANG Hongtu^{1,2,3}, ZHEN Zedong¹, LI Botao^{1,2,3}, ZHANG Ouya⁴

(1 School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China; 2 State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Jiaozuo Henan 454003, China; 3 State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China; 4 Art College, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411100, China)

Abstract: In order to investigate the impact of drill pipe rotation on coal particles transport efficiency during negative pressure sampling, CFD and DEM were used to explore the effects of drill pipe rotational

* 文章编号: 1003-3033(2025)04-0094-07; 收稿日期: 2024-12-15; 修稿日期: 2025-02-19

** 通信作者: 李博涛(1994—), 男, 河南漯河人, 博士, 讲师, 主要从事煤矿瓦斯灾害防治方面的研究。E-mail: libotao@hpu.edu.cn。

speed and coal particles mass flow rate on gas-solid flow characteristics. The results show that: the maximum axial airflow velocity inside the drill pipe decreases and stabilizes as the transport distance increases, while the maximum tangential velocity rapidly decays and vanishes. As rotational speed increases, the axial airflow velocity remains largely unchanged, but the tangential velocity significantly increases. With higher rotational speed, the spiral flow of coal particles becomes more pronounced, the length of the vortex region increases, and the length of the suspension region decreases. The number of coal particles entering the drill pipe decreases, and the distribution of particles above 5 m/s increases and becomes more dispersed. During rotation, the actual solid-to-gas ratio inside the drill pipe is lower than the set value, and coal particles transport efficiency increases and then decreases with the rise in rotational speed.

Keywords: negative pressure sampling; drill pipe rotating speed; coal particles; flow characteristic; computational fluid dynamics(CFD)-discrete element method (DEM) coupling

0 引言

随着煤矿开采深度的增加,矿井瓦斯突出已经成为制约煤矿安全生产的主要灾害^[1-2],而准确测定煤层瓦斯含量是防治瓦斯突出事故的关键^[3]。基于负压气力输送理论的负压取样法,可减少煤样暴露时间,避免孔壁残留煤粉干扰,实现快速高效取样,进而达到精准测定的目的^[4]。实际工况负压取样过程中,钻头与钻杆保持同步旋转,钻头对煤壁的不断切削作用导致煤体发生破碎,脱落的煤屑从流体孔进入钻杆内部,并向杆底移动。因此,探究负压取样过程钻杆旋转对杆内煤屑-气流动特性的影响,对于实现快速取样,精确测定煤层瓦斯含量具有一定指导意义。

近年来众多学者在转速对岩屑运移的影响方面开展了大量研究,例如:王庆等^[5]应用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法,模拟研究了钻杆转速对扩径段岩屑运移的影响,认为提高机械转速可使钻杆不同截面处岩屑体积分数增加。AWAD等^[6]利用CFD方法及响应面分析法(Response Surface Methodology, RSM)模拟分析了钻杆转速、倾角及钻杆偏心率对岩屑输送比的影响特征,研究发现三者存在相互作用,其中钻杆旋转对岩屑输送性能具有主导作用,对高偏斜和水平井中的岩屑输送效率影响更为明显。毛纯芝等^[7]采用CFD数值模拟中的欧拉-欧拉法研究了在水平井和斜井中,空气反循环钻井过程中钻杆转速对切削输运效率的影响,指出岩屑的平均体积分数、切削输运比与机械转速正相关。张鑫鑫等^[8]基于欧拉双流体模型,采用CFD数值模拟方法,利用动网格技术,

研究了微小井眼环空内的岩屑运移特征,结果表明:在岩屑初始体积分数不变的情况下,随着钻杆转速增加,岩屑进入环空的初始速度逐渐增大,管道内岩屑颗粒运移速度也增大;但转速过高会导致岩屑颗粒间的碰撞加剧,能量损耗提高,沉积岩屑的体积分数逐渐增加。AKHSHIK等^[9-10]采用CFD和离散单元法(Discrete Element Method, CFD-DEM)耦合模拟法,研究了钻杆旋转对钻屑运移的影响,结果表明:相比于高流速,钻杆转速对低流速介质中岩屑体积分数的影响更大,当转速从100 r/min提高到120 r/min时,岩屑体积分数提升梯度最大。庞博学等^[11]指出,岩屑输运效率与钻杆转速成正比,但达到临界转速后,提高转速无法提升岩屑输运效率。胡金帅等^[12]认为,提高钻杆转速对岩屑颗粒运移速度提升较小。

鉴于此,笔者拟采用CFD-DEM耦合模拟法,考虑负压取样过程中钻头-钻杆转动的作用,研究不同转速下煤屑-气的流动特性,进而揭示转速对煤屑输送效率的影响,以为精准测定煤层瓦斯含量提供理论依据。

1 钻头-钻杆模型及边界条件

负压取样时往往采用聚晶金刚石复合片(Polycrystalline Diamond Compact, PDC)三翼钻头,为了清晰地观察煤屑进入流体孔时的完整流态,建立简化后的钻头模型^[13]。外接内径40 mm、长2 m的取样钻杆,在SolidWorks中进行1:1建模,如图1所示。

采用ANSYS Workbench Meshing划分非结构网格,并在流体孔处局部加密,针对4种网格数目进行

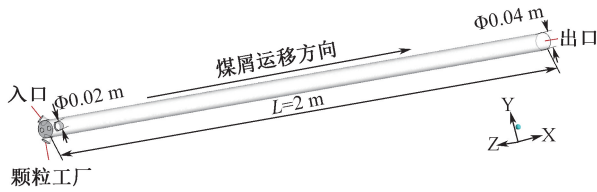


图1 负压取样钻杆模型

Fig.1 Negative pressure sampling drill pipe model

无关性验证,以压降作为验证参数(表1)。结果显示,最大误差为3.1%,发生在9.8万~13.9万网格之间,整体压降变化较小,认为此时已达到网格无关性。为了降低计算成本,选择13.9万网格进行模拟。

表1 网格无关性验证

Table 1 Grid independence verification

| 网格数量 | 压降/Pa | 最大误差/% |
|---------|-------|--------|
| 64 278 | 377 | 3.1 |
| 98 319 | 369 | |
| 139 308 | 358 | |
| 177 118 | 352 | |

将入口设定为压力入口,出口设定为速度出口,采用 Eulerian-Lagrangian 方法及压力求解器求解计算,利用压力耦合方程组 SIMPLE 算法求解各控制方程组。在入口设置无限动态产生直径为2mm煤屑的颗粒工厂;在 CFD-DEM 耦合模拟中,设置 CFD 计算时间步长为 10^{-4} s, DEM 计算时间步长为 10^{-6} s。表2为边界条件^[14]。

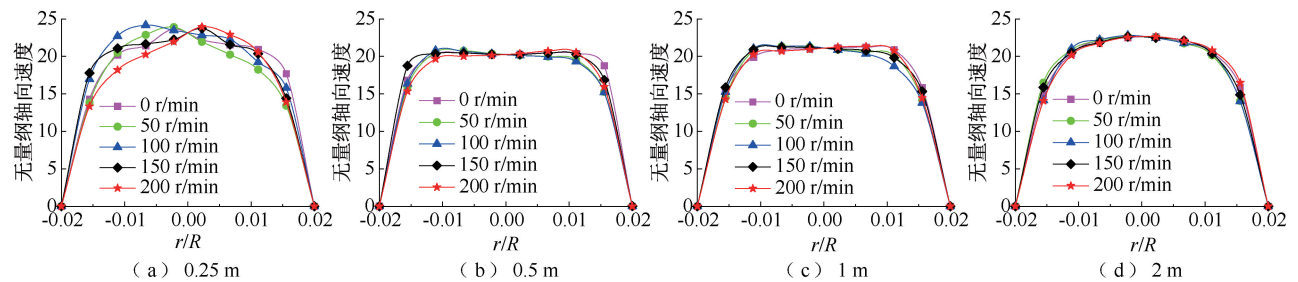


图2 不同转速下取样钻杆内气流轴向速度分布

Fig.2 Axial velocity distribution of airflow inside the sampling drill pipe at different rotational speeds

杆转动导致钻杆0~0.5 m处旋流影响较强,壁面附近轴向速度较小,而远离中心时旋流影响减弱,轴向速度逐渐增大。

不同转速钻杆内切向速度分布如图3所示,钻杆内切向速度分布与轴向速度相似,0.25 m截面切向速度变化明显,壁面附近较大,接近中心逐渐减小。随着转速增加,切向速度波浪线状分布更显著,200 r/min时最大切向速度为钻杆不转动时(1.47

表2 边界条件
Table 2 Boundary conditions

| 参数对象 | 数值 |
|--|---------------------|
| 钢密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 7 400 |
| 钻杆转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) | 0,50,100,150,200 |
| 取样风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 20 |
| 煤屑直径/mm | 2 |
| 煤屑密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 1 450 |
| 煤屑质量流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) | 0.01,0.02,0.03,0.04 |
| 煤屑—煤屑静摩擦因数 | 0.6 |
| 煤屑—煤屑动摩擦因数 | 0.05 |
| 煤屑—钢静摩擦因数 | 0.4 |
| 煤屑—钢动摩擦因数 | 0.05 |

2 负压取样煤屑—气流动特性研究

2.1 钻杆内气相流动特性

负压取样过程中,气流通过3个流体孔以一定的角度进入钻杆内,形成切向进气式起旋装置^[15],选定距离钻头0.25、0.5、1和2 m处4个截面为测量面。无量纲速度定义为各截面上各测点速度值与入口气流速度之比, r/R 定义为径向距离与管道半径之比。

不同转速钻杆内气流轴向速度分布如图2所示,不同转速下,钻杆内气流的轴向速度分布呈相似变化趋势。0.25 m截面中心轴向速度最大,受旋流影响,轴向速度沿径向方向先增加后减小;0.5~2 m处截面轴向速度逐渐减小并稳定,呈拱形分布。钻

m/s)的4.7倍。输送距离增加时,切向速度迅速衰减,0.5 m截面最大值为1.82 m/s,1~2 m截面切向速度几乎为0。表明切向速度对沉积于底部的煤屑起旋作用显著,煤屑在旋流作用下悬浮并加速。

2.2 钻杆内煤屑流动特性

2.2.1 钻杆内煤屑流态

不同转速下钻杆内煤屑运动流态如图4所示。钻杆转动对煤屑运动轨迹影响显著。当钻杆不转动

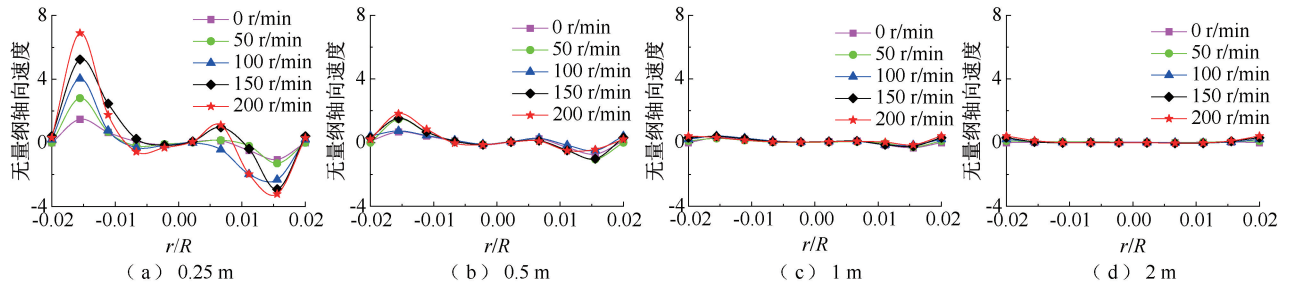


图 3 不同转速下取样钻杆内气流切向速度分布

Fig. 3 Tangential velocity distribution of airflow inside the sampling drill pipe at different rotational speeds

(0 r/min)时,煤屑通过流体孔进入钻杆后,经过短暂加速以平稳流输送,微弱旋流减缓煤屑沉积。当钻杆转动时,气流在轴线形成旋流,随输送距离增加逐渐减弱。煤屑在反射区和旋流区与气流交换能量,进入滑行区后逐渐变为平稳流,最终达到悬浮区

并实现悬浮输送。随着转速增加,钻杆提供的能量增大,旋流强度增强,煤屑的螺旋流轨迹更加明显,增加了与壁面的碰撞次数。反射区内煤屑运动距离缩短,旋流区螺旋节距变小,悬浮区距离变短。

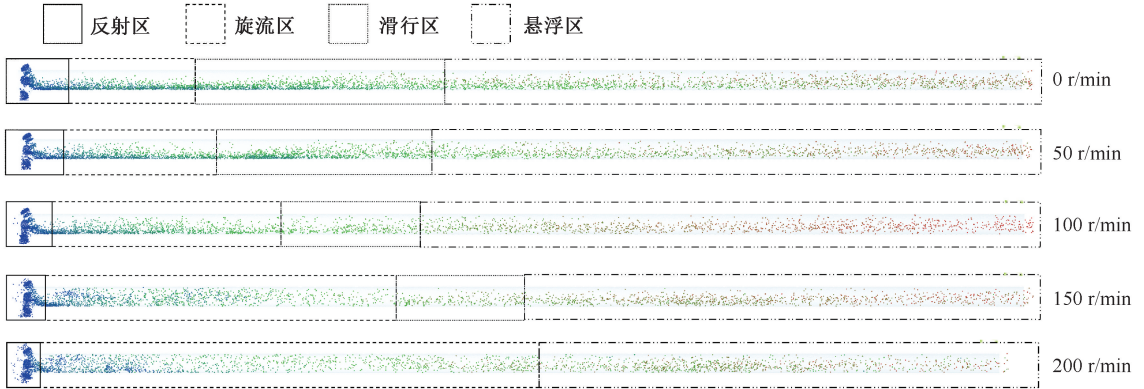


图 4 不同转速下取样钻杆内煤屑运动流态

Fig. 4 Flow state of coal particles inside the sampling drill pipe at different rotational speeds

2.2.2 钻杆内煤屑沿程速度分布

在气流的作用下,煤屑加速并达到悬浮状态,这一过程中煤屑的速度变化显著。不同转速下负压取样钻杆内颗粒速度三维散点分布如图 5 所示。煤屑质量流量为 0.01 和 0.02 kg/s 时,在不同转速下其煤屑速度分布趋势相同,随着流动距离的增加其速度也逐渐增加,最终趋于稳定。煤屑质量流量为 0.03 和 0.04 kg/s 时,其不同速度颗粒分布散乱,且不同转速条件下差异显著。钻杆不转动时,煤屑速度较低,主要在 0~5 m/s 之间,少量煤屑速度达到 6~9 m/s。随着转速的提升,进入钻杆内部的煤屑数量减少,0~5 m/s 区间的煤屑数量逐渐减少,而 5 m/s 以上的煤屑数量则增多且分布变得更为松散。而在转速为 100 r/min 时,钻杆沿程的煤屑速度分布相对稳定。

2.3 钻杆内煤屑输送效率

固气比是气力输送重要的基础参数,可表示为:

$$m = \frac{M_c}{Q\rho_g} \quad (1)$$

式中: m 为固气比; M_c 为煤屑质量流量, kg/s; Q 为气体体积流量, m^3/h ; ρ_g 为气体密度, kg/m^3 。

模拟中可通过钻杆内煤屑质量变化得到 M_c , 可表示为:

$$M_c = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中: t_1 和 t_2 为检测开始和结束时间, s; W_2 、 W_1 为对应 t_2 、 t_1 时间的煤屑质量, kg。

在负压取样过程中,钻杆做定轴旋转运动,部分煤屑受离心力的影响可能会从流体孔中逃逸,未能进入钻杆内部,如图 6 所示。进而导致钻杆内的实际固气比低于设定值,见表 3。

由表 3 可得,实际值与设定值变化特征一致,先增后稳。当设定值为 1.43 和 1.90 时,各转速下实际值变化不大。将实际固气比与设定固气比之比作

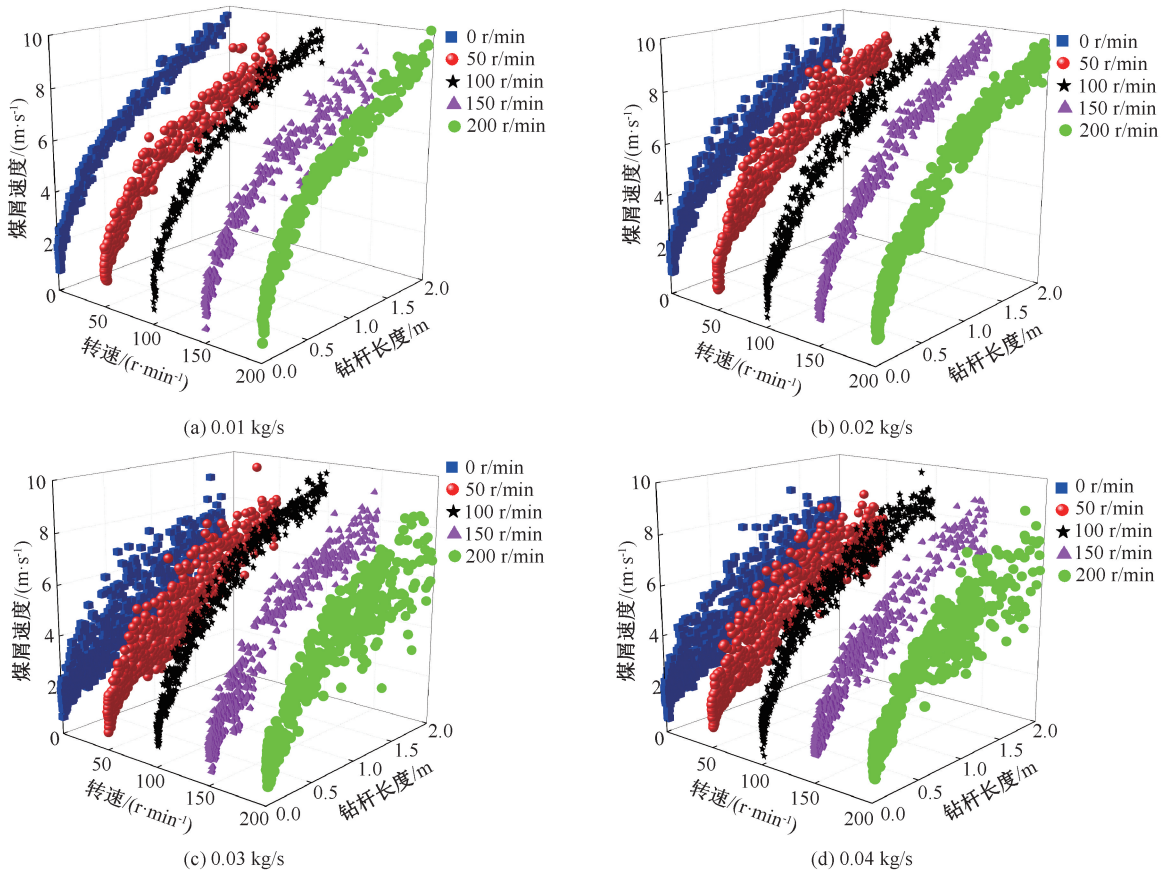


图5 不同工况下取样钻杆内煤屑速度分布

Fig. 5 Distribution of coal particles velocity in sampling drill pipes under different working conditions

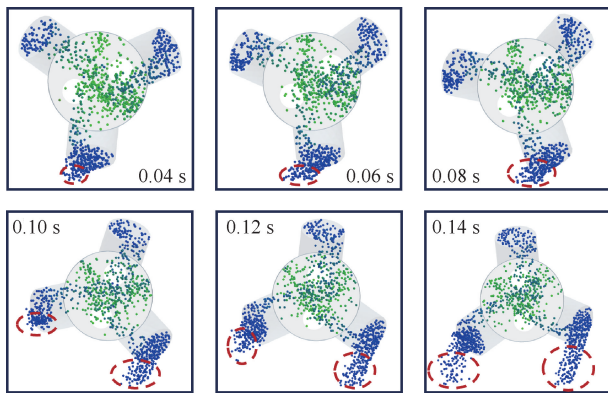


图6 不同时刻取样钻头截面处煤屑损失情况

Fig. 6 Loss of coal particles at the cross-section of the sampling drill bit at different times

为输送效率的表征,各工况下煤屑输送效率如图7所示。当质量流量为0.01 kg/s和0.02 kg/s时,不同转速下输送效率接近;200 r/min时,0.01 kg/s流量的输送效率较高。当质量流量为0.03 kg/s和0.04 kg/s时,输送效率随转速增加先升高后下降,50 r/min时达到最高值,200 r/min时输送效率最低,甚至低于0 r/min时的效率。表明随着钻杆转

速增加,煤屑输送效率先增后减。50 r/min时煤屑数量最多,效率最高,但大部分煤屑以管底流形式输

表3 不同工况下设定固气比与实际固气比对比

Table 3 Comparison between set solid gas ratio and actual solid gas ratio under different operating conditions

| 工况 | 设定质量流量/ (kg · s ⁻¹) | 转速/ (r · min ⁻¹) | 设定 固气比 | 实际 固气比 |
|----|------------------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|
| 1 | 0.01 | 0 | 0.48 | 0.32 |
| 2 | | 50 | | 0.375 |
| 3 | | 100 | | 0.36 |
| 4 | | 150 | | 0.33 |
| 5 | | 200 | | 0.34 |
| 6 | 0.02 | 0 | 0.95 | 0.64 |
| 7 | | 50 | | 0.76 |
| 8 | | 100 | | 0.71 |
| 9 | | 150 | | 0.63 |
| 10 | 200 | 0.61 | | |
| 11 | 0.03 | 0 | 1.43 | 0.81 |
| 12 | | 50 | | 0.85 |
| 13 | | 100 | | 0.77 |
| 14 | | 150 | | 0.61 |
| 15 | | 200 | | 0.54 |

续表 3

| 工况 | 设定质量流量/ ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) | 转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$) | 设定 固气比 | 实际 固气比 |
|----|--|---|-----------|-----------|
| 16 | 0.04 | 0 | 1.90 | 0.82 |
| 17 | | 50 | | 0.85 |
| 18 | | 100 | | 0.77 |
| 19 | | 150 | | 0.61 |
| 20 | | 200 | | 0.54 |

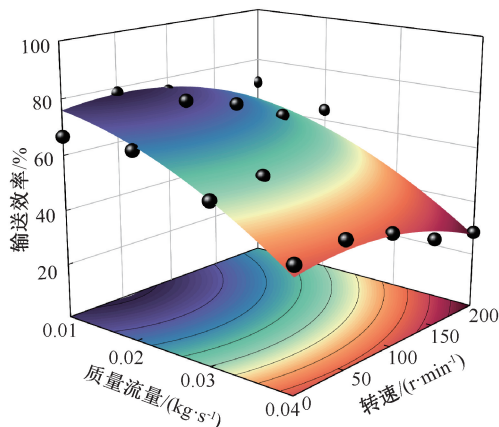


图7 各工况下煤屑输送效率

Fig.7 Coal particles conveying efficiency under various operating conditions

送,煤屑碰撞增多;100 r/min 时煤屑受气流扰动悬浮效果明显,效率稍低;150 r/min 和 200 r/min 时,煤屑虽完全悬浮,但进入钻杆的煤屑数量大幅减少,输送效率低。

3 结论

1) 钻杆内气相轴向速度呈对称分布,随着输送距离的增加,最大轴向速度逐渐减小并稳定,最大切向速度迅速衰减并消失;转速增加时,最大轴向速度变化不大,最大切向速度显著增大。

2) 转速增加时,旋流强度增强,煤屑螺旋流更加明显,煤屑运动路径延长,钻杆前端反射区缩短,旋流区螺旋节距减小,悬浮区距离变短。

3) 煤屑速度沿流动方向逐渐增加并稳定,转速增高时,进入钻杆的煤屑数量减少,速度在 5 m/s 以上的煤屑分布增多且较为分散。100 r/min 时,不同煤屑质量流量下煤屑速度分布平稳。

4) 钻杆转动导致流体孔处煤屑未完全进入钻杆,致使实际固气比低于设定值。随着转速增加,输送效率先增后减,50 r/min 时效率最高,200 r/min 时效率降至最低,甚至低于静止状态(0 r/min)。

参考文献

- [1] 陈亮,王恩元. 含瓦斯煤受载破坏瓦斯涌出的前兆特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2020,30(12): 79-84.
CHEN Liang, WANG Enyuan. Study on precursory characteristics of gas emission from damaged coal containing gas [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(12): 79-84.
- [2] 林海飞,高帆,严敏,等. 煤层瓦斯含量 PSO-BP 神经网络预测模型及其应用[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(9):80-87.
LIN Haifei, GAO Fan, YAN Min, et al. Study on PSO-BP neural network prediction method of coal seam gas content and its application [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(9):80-87.
- [3] 王俏,王兆丰,马树俊,等. 冷冻取芯过程煤样温度变化特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2021,31(2): 76-81.
WANG Qiao, WANG Zhaofeng, MA Shujun, et al. Study on temperature variation of coal sample in process of freezing coring [J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(2): 76-81.
- [4] 张宏图,魏建平,王云刚,等. 煤层瓦斯含量测定定点取样方法研究进展[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(1): 186-192.
ZHANG Hongtu, WEI Jianping, WANG Yungang, et al. Sampling methods for coalbed gas content direct determination [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(1):186-192.
- [5] 王庆,张佳伟,陶亮,等. 古龙页岩油水平井扩径段岩屑运移数值模拟研究[J]. 石油机械, 2023,51(12):44-51.
WANG Qing, ZHANG Jiawei, TAO Liang, et al. Numerical simulation on cuttings migration in hole enlargement section of horizontal well in gulong shale oil reservoir [J]. China Petroleum Machinery, 2023, 51(12):44-51.
- [6] AWAD A M, HUSSEIN I A, NASSER M S, et al. A CFD-RSM study of cuttings transport in non-Newtonian drilling fluids: impact of operational parameters[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2022, 208:DOI:10.1016/j.petro. 2021. 109613.
- [7] MAO Chunzhi, ZHANG Xinxin, LI Fenqiang, et al. On cutting transport for air reverse circulation in horizontal and

- inclined wells[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 136:DOI:10.1016/j.tust.2023.105095.
- [8] 张鑫鑫,毛纯芝,信伟卫,等. 基于欧拉双流体模型的微小井眼环空岩屑运移数值模拟研究[J]. *中南大学学报:自然科学版*, 2023, 54(11):4 413-4 423.
ZHANG Xinxin, MAO Chunzhi, XIN Weiwei, et al. Numerical simulation research of cuttings transport in microhole annulus based on Eulerian two-fluid model [J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2023, 54(11):4 413-4 423.
- [9] AKHSHIK S, BEHZAD M, RAJABI M. CFD-DEM simulation of the hole cleaning process in a deviated well drilling: the effects of particle shape[J]. *Particuology*, 2016, 25:72-82.
- [10] AKHSHIK S, BEHZAD M, RAJABI M. CFD-DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 127:229-244.
- [11] PANG Boxue, WANG Shuyan, JIANG Xiaoxue, et al. Effect of orbital motion of drill pipe on the transport of non-Newtonian fluid-cuttings mixture in horizontal drilling annulus [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, 174:201-215.
- [12] 胡金帅,张光伟,李峻岭,等. 基于 CFD-DEM 耦合模型的岩屑运移数值模拟分析[J]. *断块油气田*, 2022, 29(4):561-566.
HU Jinshuai, ZHANG Guangwei, LI Junling, et al. Numerical simulation of cuttings migration based on CFD-DEM coupling model [J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2022, 29(4):561-566.
- [13] LI Botao, ZHANG Hongtu, WEI Jianping, et al. Coal particle transport behavior in a rotating drill pipe used for negative pressure pneumatic conveying[J]. *Powder Technology*, 2022, 402:DOI:10.1016/j.powtec.2022.117369.
- [14] 李博涛. 负压排渣钻孔定点取样过程煤屑-气流动特性研究[D]. 焦作:河南理工大学,2020.
LI Botao. Gas-solid flow characteristics of sampling method based on negative pressure pneumatic conveying [D]. Jiaozuo:Henan Polytechnic University,2020.
- [15] 宋先知,李根生,王海柱,等. 盐穴储气库底部碎屑旋转射流冲洗数值模拟[J]. *天然气工业*, 2010, 30(8):83-86.
SONG Xianzhi, LI Gensheng, WANG Haizhu, et al. Numerical simulation on rotating jet-flow washing for debris on the bottom of cavern underground storage [J]. *Natural Gas Industry*, 2010, 30(8):83-86.



作者简介: 张宏图 (1988—),男,河南驻马店人,博士,副教授,主要从事煤矿瓦斯灾害防治方面的研究。E-mail: zhanghongtu@hpu.edu.cn。