

# 钻井法凿井气-液-固耦合排渣流场及刀盘吸渣口优化

程 桦<sup>1,2</sup>, 郭龙辉<sup>1</sup>, 姚直书<sup>1</sup>, 杨 光<sup>3</sup>, 荣传新<sup>1</sup>

(1. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001; 2. 安徽建筑大学 建筑结构与地下工程安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230601; 3. 中煤特殊凿井有限责任公司, 安徽 合肥 230001)

**摘 要:** 针对西部地区侏罗系地层煤矿立井钻井法施工中出现的气举反循环洗井排渣与钻进效率低下问题, 以陕西可可盖煤矿中央回风立井  $\phi 4.2$  m 超前钻井为工程背景, 基于 CFD-DEM(计算流体力学和离散单元法耦合) 研究方法, 建立了气-液-固多相耦合排渣数值模型, 揭示了排渣管内、井底流场的速度及压力分布规律, 并基于自研的气举反循环排渣试验装置, 采用 PIV(粒子图像测速法) 测试技术对流场分布的正确性进行验证; 提出了优化刀盘吸渣口评判指标和方法, 对吸渣口的数量、长径比、面积比、总面积占比进行优化, 得到了超前钻头刀盘吸渣口布置的最佳方式和相关参数; 讨论了钻头转速、注气量、风管没入比和泥浆黏度等主要因素对排渣流场的影响。研究表明: ① 排渣管内流体的运移以轴向流动为主, 且途经注气端时, 流速发生跳跃式剧增; 井底流体的运移主要以水平流动为主, 流体的垂直上返仅存在于吸渣口附近; 井底流体的水平流动以切向流动为主, 径向流动仅在吸渣口两侧较为明显, 且远离吸渣口处, 径流速度较小易产生岩屑沉积; ② 当刀盘吸渣口数量为 2, 长径比为 0.4, 面积比为 1, 总面积占比为 1.94% 时, 吸渣口的布置方式最佳, 且清渣率较现行吸渣口布置方式提高 66%; ③ 增大钻头转速可显著增强吸渣口的吸附作用, 注气量、风管没入比与井底和排渣管内流体的轴向速度均呈正相关关系, 低黏、低密度的泥浆易获取高流速, 但携岩能力较差。研究结果可为破解侏罗系地层深大立井钻井法洗井排渣与钻进效率低下技术难题, 提供有益的理论参考。

**关键词:** 钻井法凿井; 气举反循环; 排渣流场; 吸渣口优化; 排渣效率

中图分类号: TD265 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)01-0426-16

## Research on the gas-liquid-solid coupled slag discharge flow field and optimization of cutterhead slag suction port in shaft drilling

CHENG Hua<sup>1,2</sup>, GUO Longhui<sup>1</sup>, YAO Zhishu<sup>1</sup>, YANG Guang<sup>3</sup>, RONG Chuanxin<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Anhui Provincial Key Laboratory of Building Structure and Underground Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 3. China Coal Special Drilling Co., Ltd., Hefei 230001, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of gas lift reverse circulation shaft washing slag discharge and low drilling efficiency in

收稿日期: 2023-10-23 修回日期: 2023-12-05 责任编辑: 王 凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0939

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52174104, 51674006); 安徽省重点研发计划资助项目 (202004a07020034)

作者简介: 程 桦 (1956—), 男, 安徽巢湖人, 教授, 博士生导师。E-mail: hcheng@aust.edu.cn

通讯作者: 郭龙辉 (1995—), 男, 河南洛阳人, 博士研究生。E-mail: guolonghui7864@163.com

引用格式: 程桦, 郭龙辉, 姚直书, 等. 钻井法凿井气-液-固耦合排渣流场及刀盘吸渣口优化[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 426-441.

CHENG Hua, GUO Longhui, YAO Zhishu, et al. Research on the gas-liquid-solid coupled slag discharge flow field and optimization of cutterhead slag suction port in shaft drilling[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 426-441.



移动阅读

the application of vertical shaft drilling method in the Jurassic strata coal mines in western China, taking  $\phi 4.2$  m advanced drilling of central return air shaft in the Kekegai coal mine as the engineering background, based on the CFD-DEM (computational fluid dynamics and discrete element method coupling) research method, a gas-liquid-solid multiphase coupling slag discharge numerical model is established, which reveals the velocity and pressure distribution law of the flow field in the slag discharge pipe and the bottom hole. Based on the self-developed gas lift reverse circulation slag discharge test device, the correctness of the flow field distribution is verified by PIV (Particle Image Velocimetry) test technology. The evaluation index and method of optimizing cutter head suction port are put forward. The number, length-diameter ratio, area ratio and total area ratio of slag suction outlets are optimized. The best way and related parameters of cutter head suction port arrangement of advanced bit are optimized. The effects of main factors such as bit speed, gas injection rate, submerged ratio of air duct and mud viscosity on slag discharge flow field are discussed. The research results show that ① the fluid in the slag discharge pipe mainly moves in the axial direction, and when passing through the gas injection end, the velocity increases sharply. The migration of bottom hole fluid is mainly horizontal flow, and the vertical upward flow of fluid only exists near the slag suction port. The horizontal flow at the bottom of the shaft is mainly tangential flow, and the radial flow is obvious only on both sides of the slag suction port, and it is far away from the slag suction port, so the run-off speed is small and it is easy to produce cuttings deposition. ② When the number of slag suction ports of cutter head is 2, the length-diameter ratio is 0.4, the area ratio is 1, and the total area ratio is 1.94%, the layout of slag suction ports is the best, and the slag removal rate is increased by 66% compared with the current layout of slag suction ports. ③ Increasing the bit speed can significantly enhance the adsorption of the slag suction port. The gas injection rate and the submerged ratio of the air duct are positively correlated with the axial velocity of the fluid in the bottom hole and the slag discharge pipe. The mud with low viscosity and low density is easy to obtain high return velocity, but its rock carrying capacity is poor. The research results can provide a useful theoretical reference for solving the technical problems of washing, slag removal and low drilling efficiency of deep and large vertical shaft drilling in the Jurassic strata.

**Key words:** shaft sinking by drilling method; gas lift reverse circulation; slag discharge flow field; optimization of slag suction port; slag discharge efficiency

我国西部矿区煤炭多赋存于白垩—侏罗系含水弱胶结岩石地层, 新井建设常采用冻结法施工深大立井井筒<sup>[1-3]</sup>。与冻结法相比, 钻井法凿井具有机械化程度高、作业环境好、井壁质量高等优点, 符合少人、安全、绿色、智能化的煤炭行业发展趋势<sup>[4-7]</sup>。长期以来, 钻井法主要应用于中东部地区深厚松散层立井施工, 将该工法应用于西部可可盖煤矿含水弱胶结岩石地层进、回风井深大立井施工在国内外尚属首次<sup>[8-9]</sup>。但在钻进侏罗系泥岩、泥质砂岩等含泥地层时, 出现了泥浆突变、刀具磨损严重、钻进效率低等工程问题<sup>[10-11]</sup>。初步分析表明, 对气-液-固耦合排渣流场缺乏认识, 现行吸渣口设计与洗井参数无法适应该类地层高效钻进要求, 是导致钻进排渣效率低的主要原因之一, 亟待研究解决。

国内外相关领域的专家学者, 针对洗井排渣流场、钻头吸渣口布置、排渣参数优化等问题, 开展了大量研究, 取得了系列成果。在排渣流场研究方面, 伍晓龙<sup>[12]</sup>等对气举反循环双壁钻具环形空间及气水混合器流场中的速度及压力进行了仿真分析, 发现减少双

壁钻杆环形空间的变径有利于减少压力损失和能量损耗, 且对称进气孔结构更利于上返速度的均匀性; 夏敏等<sup>[13]</sup>通过数值模拟研究了大直径有、无牙轮钻头钻进时井底流场速度分布规律, 认为距吸渣口较远处易产生岩屑堆积, 可通过增大泥浆流量减小沉积区。但上述气举反循环流场的研究还处于数值模拟方面的可行性探讨, 缺乏室内试验验证, 且与工程应用尚有距离。

在刀盘吸渣口优化研究方面, 前苏联曾在顿巴斯采用 YZTM-8.75 型钻机开展吸渣口优化的现场试验, 发现三吸渣口布置, 泥浆的压头损失严重且易发生堵塞, 单吸渣口的抽吸速度及冲开能力均较三吸渣口强; 美国和日本曾采用机械方式在钻头上安装刮板或刀具泵, 使剥离的钻渣直接刮、吸向吸渣口<sup>[14]</sup>; 黄志强等<sup>[15]</sup>改变了潜孔钻头排屑槽的布置方式, 将径向布置改为切向布置, 此举减小了井底流体的旋涡强度, 改善了排渣效果; 付孟雄<sup>[16]</sup>针对现有两翼 PDC 钻头设计的不足, 改进了钻头排渣口的位置和排渣通道尺寸, 大幅减小了排渣流场钻渣聚集区, 提高了排渣效率。

可见,国内外在该方面的研究仅局限于工程试验,缺乏理论指导,且所做的工作已年代久远。

在钻井排渣施工影响因素方面,国外学者 S WALKER<sup>[17]</sup>研究了钻渣粒度、洗井液流变性对连续水平油管钻进作业时井底钻渣输送的影响,发现洗井效果受限于钻渣尺寸和洗井液黏度,湍流状态下的低黏流体洗井效果更好;刘少伟<sup>[18]</sup>、易振华<sup>[19]</sup>、熊亮<sup>[20]</sup>等分别开展了巷道底板锚固孔、灌注桩孔和瓦斯抽排井的反循环钻进排渣参数研究,认为影响排渣效果的主要因素有:进水孔和排渣通道孔径、泥浆循环量、注气量、注气压力等,并提出了合理的排渣参数组合。但钻井法施工灌注桩、瓦斯抽排井和油气井,在钻井工艺、钻井直径、排渣方式、排渣流型等方面均与矿山立井钻井法凿井存在较大区别,相关成果无法满足需要。

综上,笔者以西部地区可可盖煤矿中央回风立井  $\phi 4.2$  m 超前钻井为研究背景,基于 CFD-DEM 方法,建立气-液-固多相耦合排渣数值模型,分析其排渣流场分布规律及主要影响因素;提出优化刀盘吸渣口评判指标和方法,优化吸渣口布置方式和相关参数,为优化吸渣口布置,选择合理钻进参数,提高排渣与钻进效率提供理论参考。

## 1 气举反循环排渣数值模型

### 1.1 工程背景

可可盖煤矿位于陕西省榆林市境内,设计生产能力为 10 Mt/a,煤层赋存地层为西部典型的富水弱胶结岩石地层,矿井开拓采用敞开式 TBM 掘进主、副斜井和钻井法施工中央进、回风井的联合方式,其中,中央进、回风立井是我国在西部地区首次采用钻井法施工的立井井筒且在近期均已成功完成了钻进工作<sup>[21]</sup>。

中央回风立井井筒设计深度 521.5 m,净直径 6 m,井筒依次下穿第四系、白垩系、侏罗系地层,井筒钻进直径为 8.5 m,钻进方式选用 AD130/1000 型全液压力头竖井钻机(图 1)进行  $\phi 4.2$  m 超前钻进和  $\phi 8.5$  m 扩孔钻进联合的两级钻进施工,其中超前钻孔采用直径为 4.2 m 的平底滚刀钻头,滚刀布置采用 14 把正刀+4 把边刀+1 把中心刀的组合方式,钻头吸渣口采用中心式+偏心扫掠式双吸渣口布置方式(图 2),洗井方式采用气举反循环泥浆悬浮排渣工艺。

### 1.2 多相耦合排渣数值模型

为研究气-液-固三相耦合排渣流场分布规律,采用 CFD-DEM 方法,建立气举反循环排渣数值模型,其中流体相泥浆和压缩空气的计算在流体仿真软件 Fluent 中进行,离散相岩渣颗粒在离散元仿真软件



图 1 AD130/1000 型竖井钻机

Fig.1 AD130/1000 shaft drilling rig

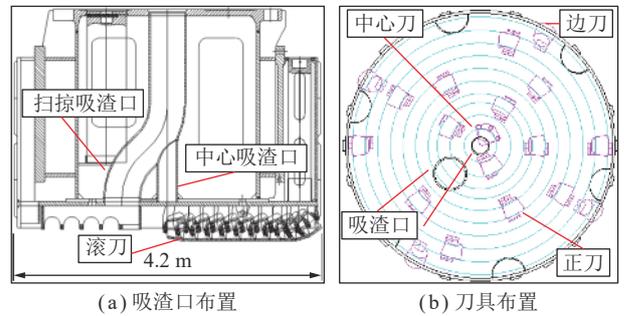


图 2  $\phi 4.2$  m 超前钻头刀盘吸渣口及滚刀布置

Fig.2 Slag suction port and hob arrangement of  $\phi 4.2$  m advanced bit cutter head

EDEM 中进行,2 者通过编译 UDF 耦合接口实现耦合计算。

#### 1.2.1 控制方程

(1) 流体相控制方程。气举反循环排渣过程是压缩空气-泥浆-岩渣三相耦合的流动,在流体仿真软件 Fluent 中选择欧拉多相流模型对流体相进行仿真分析,考虑到泥浆满足非牛顿流体流变特性,因此选择幂律流体模型;为提高欧拉多相流的计算精度,选择标准  $k-\epsilon$  湍流模型计算排渣流场。排渣流场中泥浆与空气的运动满足流体质量守恒和牛顿第二定律,因此在欧拉坐标系中建立混合流体的连续方程和动量守恒方程<sup>[22]</sup>,分别为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i) + \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i) = -\alpha_i \nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_i + \alpha_i \rho_i \mathbf{g} + F_i + F_{\text{lift},i} + F_{\text{vm},i} + F_{\text{wl},i} + F_{\text{td},i} + R \quad (2)$$

式中, $i$ 表示液相或气相; $\alpha_i$ 、 $\rho_i$ 、 $\mathbf{v}_i$ 分别为*i*相的体积分数(%)、密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、速度( $\text{m}/\text{s}$ ); $\boldsymbol{\tau}_i$ 为*i*相的应力-应变张量; $P$ 、 $F_i$ 、 $F_{\text{lift},i}$ 、 $F_{\text{vm},i}$ 、 $F_{\text{wl},i}$ 、 $F_{\text{td},i}$ 、 $R$ 分别为相

间共享压力、外部体积力、升力、虚拟质量力、壁面力、相间湍流扩散力和相间相互作用力。

(2) 离散相的控制方程。选用 EDEM 离散元仿真软件对排渣流场中岩渣的运移过程进行仿真分析, 在井底生成 30 000 个直径为 3 mm 的球形颗粒用以模拟岩渣<sup>[10]</sup>, 并选择 Hertz-Mindlin 无滑移弹性接触模型模拟岩渣颗粒间的碰撞和挤压, 每个岩渣颗粒在运动过程中满足牛顿第二定律和动量守恒方程<sup>[23-24]</sup>, 即

$$m \frac{dv}{dt} = mg \left( 1 - \frac{\rho_l}{\rho} \right) + F_D + F_C \quad (3)$$

式中,  $m$  为岩渣的质量, kg;  $v$  为岩渣的运移速度, m/s;  $\rho_l$  为流体密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\rho$  为岩渣密度, kg/m<sup>3</sup>;  $F_D$  分别为岩屑受到的牛顿阻力;  $F_C$  为岩屑与其他岩屑以及壁面接触的合力。

岩屑颗粒的角动量守恒方程为

$$\frac{d}{dt}(I\omega) = T_q + T_c + T_z \quad (4)$$

式中,  $I$  为岩渣颗粒的转动惯量, kg · m<sup>2</sup>;  $\omega$  为角加速度, rad/s<sup>2</sup>;  $T_q$ 、 $T_c$ 、 $T_z$  分别为岩渣颗粒所受的切向、法向和轴向扭矩, N · m。

### 1.2.2 反循环排渣数值模型建立

结合钻井法凿井气举反循环排渣施工工艺和  $\phi 4.2$  m 超前钻头的结构形式、吸渣口布置、刀具布置(图 2), 建立了气举反循环排渣的缩尺数值模型(为现场实际模型的 1/12), 如图 3 所示。数值模型主要包括井底、钻头和排渣管, 将井底和排渣管设置为流体域, 钻头设置为旋转域, 以四面体网格划分模型, 并对钻头和注气口进行局部网格加密, 共计划分 91 064 节点、441 661 网格。在 Fluent 中依次设置欧拉多相流模型、标准  $k-\varepsilon$  湍流模型计算流场, 并定义泥浆和空气的材料属性(表 1)、边界条件(空气以 8.4 m<sup>3</sup>/h 输入, 泥浆以 0.03 MPa 压力输入)和旋转域属性(以 30 r/min 绕  $z$  轴旋转); 在 EDEM 中设置岩渣属性参数并生成 3 万个球形岩渣颗粒, 使刀具钻入岩渣 3 mm, 经耦合接口连接 Fluent 和 EDEM 进行流体相和离散相的数值分析计算。其计算流程如图 4 所示, 建模参数见表 1, 建模参数由现场实际施工参数和相似准则转化得到, 相似准则推导见文献[10]。

## 2 排渣流场分布规律

为分析井底工作面和排渣管内的流场分布规律, 在数值模型  $z=0.2$ 、1.5 m 两截面上分别设置排渣管水平测线  $H_1$  和  $H_2$ , 在  $x=0$  截面处设置垂直测线  $V_1$ ; 在井底  $z=-0.22$  m 截面上设置两条水平测线  $L_1$  和  $L_2$ , 在刀盘井底设置 9 条垂直测线(吸渣口处的  $S_1$ 、 $S_2$ , 钻头

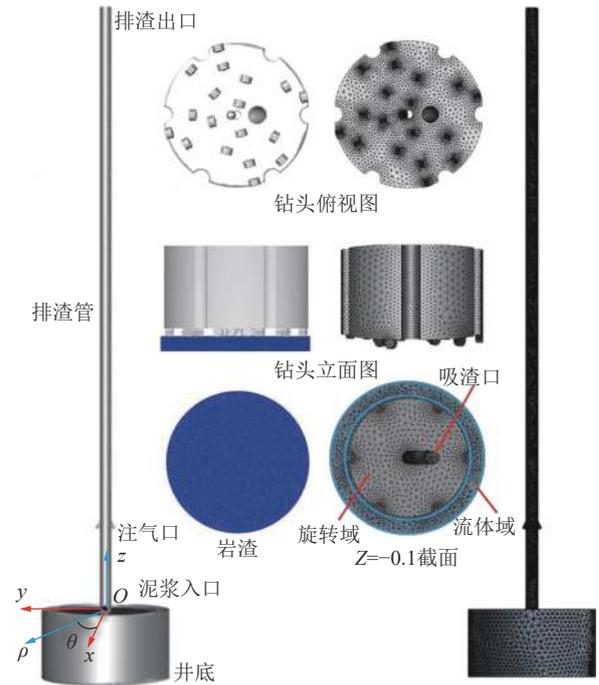


图 3 排渣数值模型及网格划分

Fig.3 Numerical model and grid division of slag discharge

表 1 建模参数选取

Table 1 Selection of modeling parameters

参数	现场参数	模型参数
刀盘转速 $w/(r \cdot \min^{-1})$	5~11	30
刀盘直径 $D_1/m$	4.20	0.35
泥浆密度 $\rho_l/(kg \cdot m^{-3})$	1 045~1 307	1 100
泥浆黏度 $\mu_l/(mPa \cdot s)$	90~300	8
注气密度 $\rho_g/(kg \cdot m^{-3})$	1.29	1.29
注气流量 $Q_g/(m^3 \cdot h^{-1})$	3 600~4 800	8.40
井底压力 $P/MPa$	—	0.03
风管埋深 $L_1/m$	—	1.80
岩屑密度 $\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$	2 000~2 600	2 300
岩屑直径 $d_s/mm$	3~50	3
井筒直径 $D_2/m$	6.00	0.45
风管直径 $d_1/mm$	95.00	5.40
钻杆直径 $d_2/mm$	460.00	40.00
钻杆长度 $L_2/m$	—	2.15

径向的  $S_3 \sim S_5$ , 滚刀周边的  $S_6 \sim S_9$ ), 测线布置如图 5 所示。数值分析计算参数见表 1。

### 2.1 排渣管内流场

图 6(a)~(c) 为  $V_1$  测线上的速度及压力分布图, 图 6(d)~(f) 为  $H_1/H_2$  测线上的速度及压力分布图。

分析图 6(a)~(c) 可知, 排渣管内液固气区段泥浆及岩渣的轴向速度远大于液固区段, 岩渣和泥浆途经注气端时, 上返速度分别大幅提升 116% 和 99%, 排渣

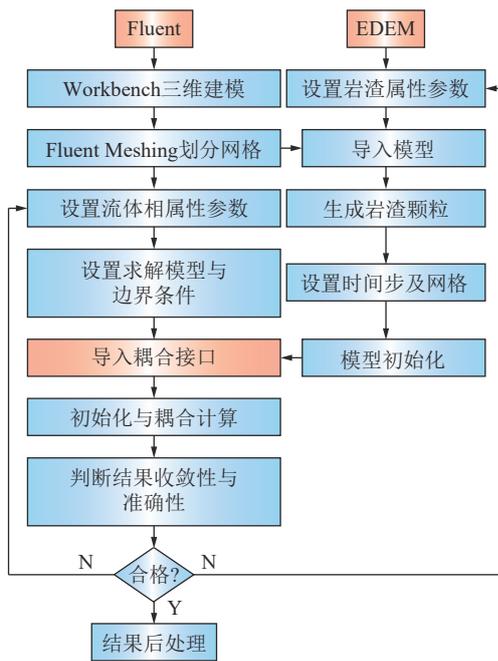


图4 数值模型计算流程

Fig.4 Calculation flow of numerical model

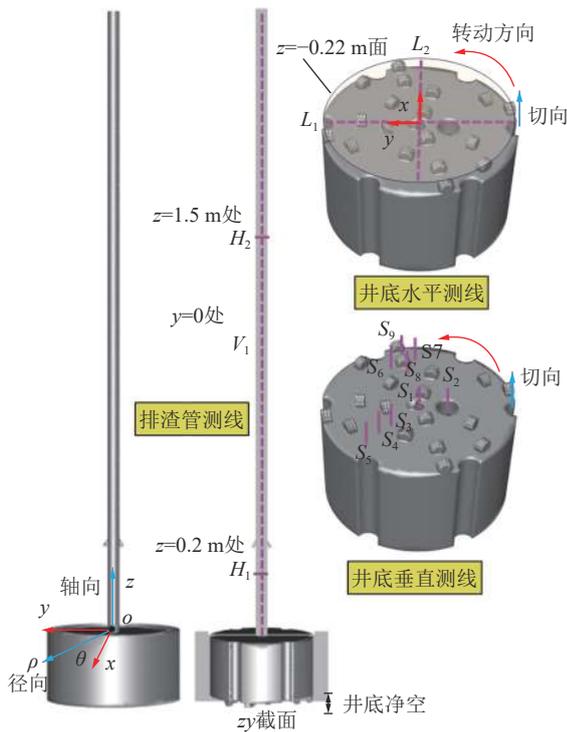


图5 排渣流场测线布置

Fig.5 Layout of measuring line for slag discharge flow field

管内泥浆的上返速度始终大于岩渣,其中在液固、液固气区段,泥浆的平均上返流速较岩渣分别增长23.9%和9.8%;泥浆的切向速度反映其环流程度,在钻头转动影响下,排渣管内液固区段泥浆环流现象显著,但在液固气区段泥浆的高速上返大大削弱了其切向运动,环流现象逐渐消失,流场更利于排渣<sup>[25]</sup>;当压缩空气输入排渣管,管内混合流体的密度及压力骤然

降低,在外部泥浆柱压力作用下,泥浆及岩渣实现“注气加速”,获得高流速而被举升。

分析图6(d)~(f)可知,沿排渣管断面, $H_2$ 测线上平均轴向速度较 $H_1$ 测线增大2倍,但切向速度则降低27倍,两测线上流体轴向速度均远大于其切向速度,因此排渣管内流体的运动以轴向流动为主,且高速流动的泥浆流主要分布在排渣管中心区域的主流区内,近排渣管内壁面处(黏附区),泥浆流速则因黏滞阻力而迅速降低(图6(d));泥浆的切向运动沿排渣管断面自内向外可划分为环流中心、环流区和黏附区,其切向流速在环流中心处较小,在环流区随管径的增加而增大,在黏附区随管径的增加而减小(图6(e));排渣管内流体的流动压力变化反映其动能变化,管内两水平测线动能分布均呈抛物线型,中心处动能最大并向两侧逐渐递减(图6(f))。

## 2.2 井底流场

本节通过分析刀盘水平测线 $L_1$ 、 $L_2$ 和垂直测线 $S_1$ ~ $S_9$ 上的速度及压力分布来研究井底流场的分布规律。

井底水平测线上流场分布如图7所示,分析图7可见,井底泥浆的轴向上返主要集中在吸渣口附近,扫掠吸渣口处泥浆的上返速度较中心吸渣口处增大35.4%,因此扫掠吸渣口的吸附力较中心吸渣口更强;井底泥浆的运动形式以水平切向流动为主,以 $L_2$ 测线为例,其平均切向流速约是轴向流速的15倍,是径向流速的2倍,钻头中心处泥浆切向速度最小,沿钻头半径向外逐渐增大,泥浆的径向运动仅发生在吸渣口两侧,远离吸渣口处,泥浆的径向速度较小,对岩渣的冲刷及携带能力较弱,因此易发生岩屑堆积;井底压力分布沿径向自外向内近似呈线性降低,在吸渣口处压力值最小,且扫掠吸渣口处较中心吸渣口更小,此时环空泥浆柱与井底的压差就越大,井底泥浆与岩渣更易被吸附举升。

井底净空垂直方向吸渣口处 $S_1/S_2$ 测线流场分布如图8所示,井底径向 $S_3$ ~ $S_5$ 测线流场分布如图9所示,钻头周边 $S_6$ ~ $S_9$ 测线流场分布如图10所示。

分析图8可知,吸渣口吸附区域内,泥浆的流动以轴向上返为主,且中心吸渣口处平均轴向速度分别较径向、切向速度增大8倍和14倍,扫掠吸渣口处分别增大4倍和2倍;中心吸渣口和扫掠吸渣口处泥浆的轴向速度沿井深方向近似呈线性增大,且中心吸渣口处增速略大,但泥浆的切向、径向速度均较扫掠吸渣口处显著降低;井底每一净空深度扫掠吸渣口处井压均小于中心吸渣口,表明扫掠吸渣口处与环空泥浆柱之间的压差更大,泥浆和岩渣更易被吸附举升。

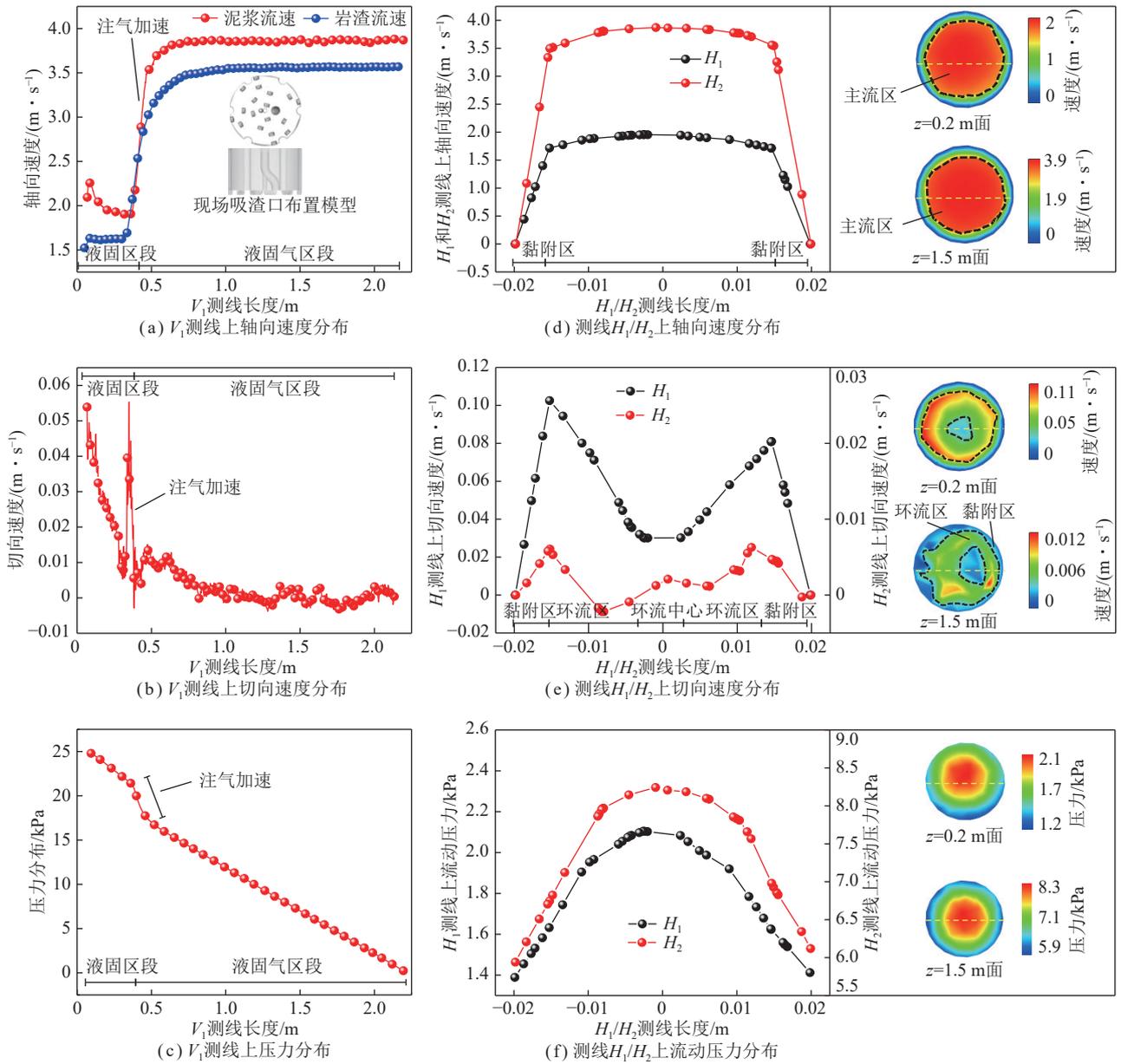


图 6 排渣管内  $V_1$  和  $H_1/H_2$  测线上的速度及压力分布

Fig.6 Velocity and pressure distribution on  $V_1$  and  $H_1/H_2$  measuring lines in the slag discharge pipe

分析图 9 可知,沿井底径向布置的垂直测线上泥浆的轴向、径向速度在破岩面和钻头底面都趋近于 0,轴向速度近似在井底净空中心处达到最大,且在吸渣口吸附作用下,泥浆的轴向、径向速度均随钻头半径的减小而增大,距离吸渣口较远处,泥浆几乎不发生轴向运动;贴近钻头表面处(距井底 20~25 mm),泥浆随钻头做同向运动,其环流程度随旋转半径的增大而增大,在距井底 10~20 mm 内,钻头对泥浆的拖曳作用等同于其黏滞阻力,泥浆近似以恒定速度环向运动,在距井底 10 mm 内,泥浆的黏滞力起主导作用,其切向速度随距井底距离的减小而减小,直至为 0 [13];在井底水平同一净空深度,井压沿着钻头边缘向中心方向均匀递减,在钻头表面至井底的垂直方向上,井

压呈线性增加,且不同径向位置的井压增速近似相等。

分析图 10 可知,由于钻头在钻进过程中,刀具对井底泥浆具有推动作用,钻头刀具周边泥浆的轴向速度与切向速度,均在迎头处大于尾部,外侧大于内侧(图 11)。此外,刀具划过井底,在其外侧及尾部形成涡旋,导致泥浆流向时上时下;刀具周边泥浆径向流速迎头处大于尾部,内侧略大于外侧,且外侧泥浆在距井底 20~25 mm 内流向发生改变,流向背离吸渣口方向,因此刀具对其外侧泥浆流的径向运动具有一定的阻滞作用;同一井底净空深度,刀具内侧压力小于外侧,刀具前、后压力分布并无显著差异。

### 2.3 岩渣的分布与运移

基于现场排渣数值模型,选取不同时刻井底及排

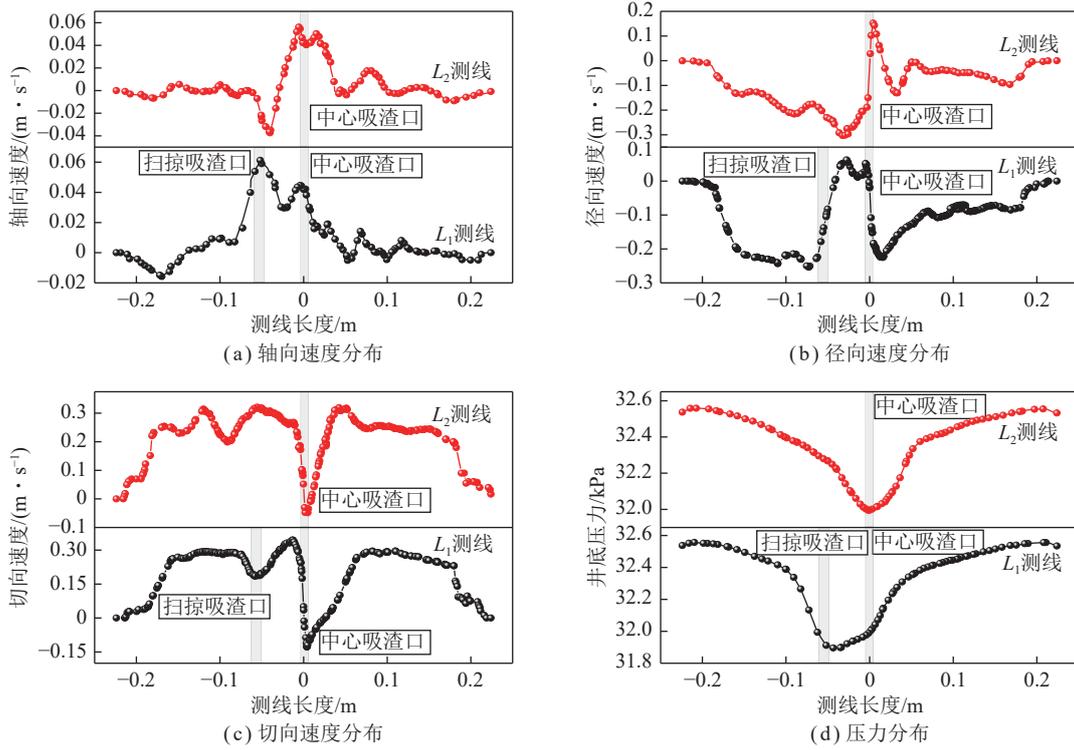


图 7 井底水平测线  $L_1$  和  $L_2$  上速度与压力分布

Fig.7 Velocity and pressure distribution on  $L_1/L_2$  bottom hole horizontal survey line

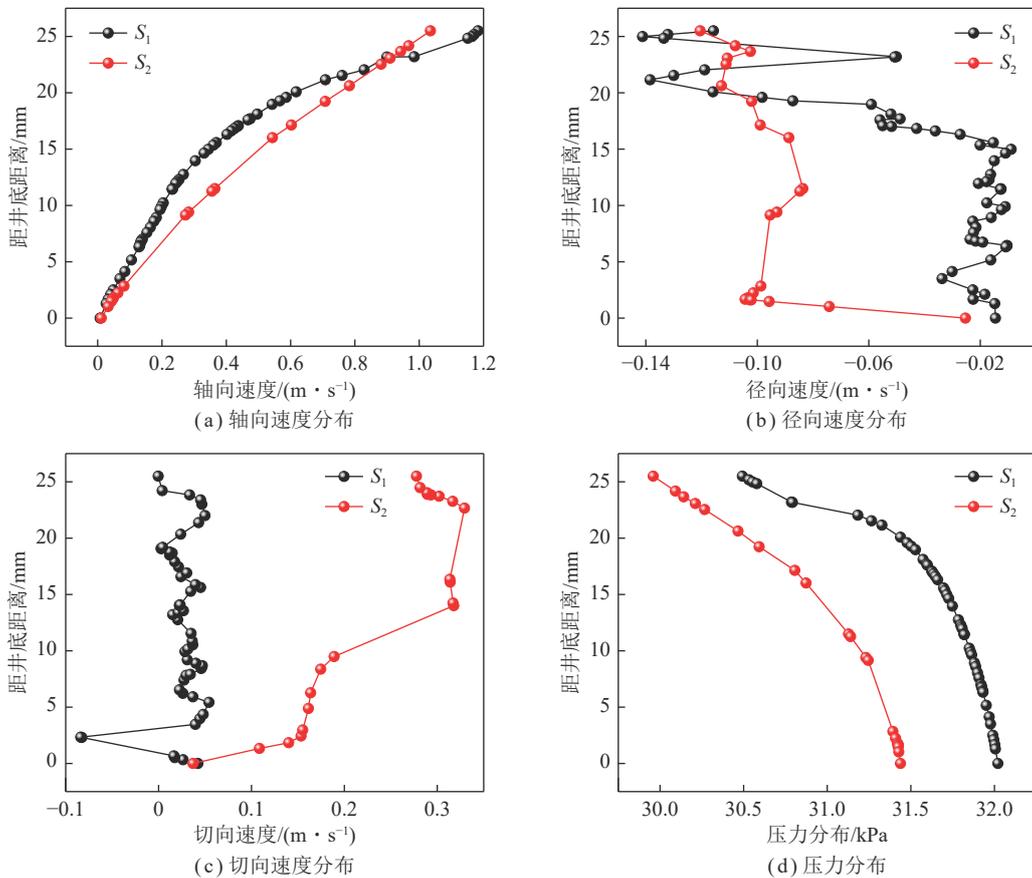


图 8 吸渣口处  $S_1$  和  $S_2$  测线上速度与压力分布

Fig.8 Velocity and pressure distribution on  $S_1/S_2$  measuring line at slag suction port

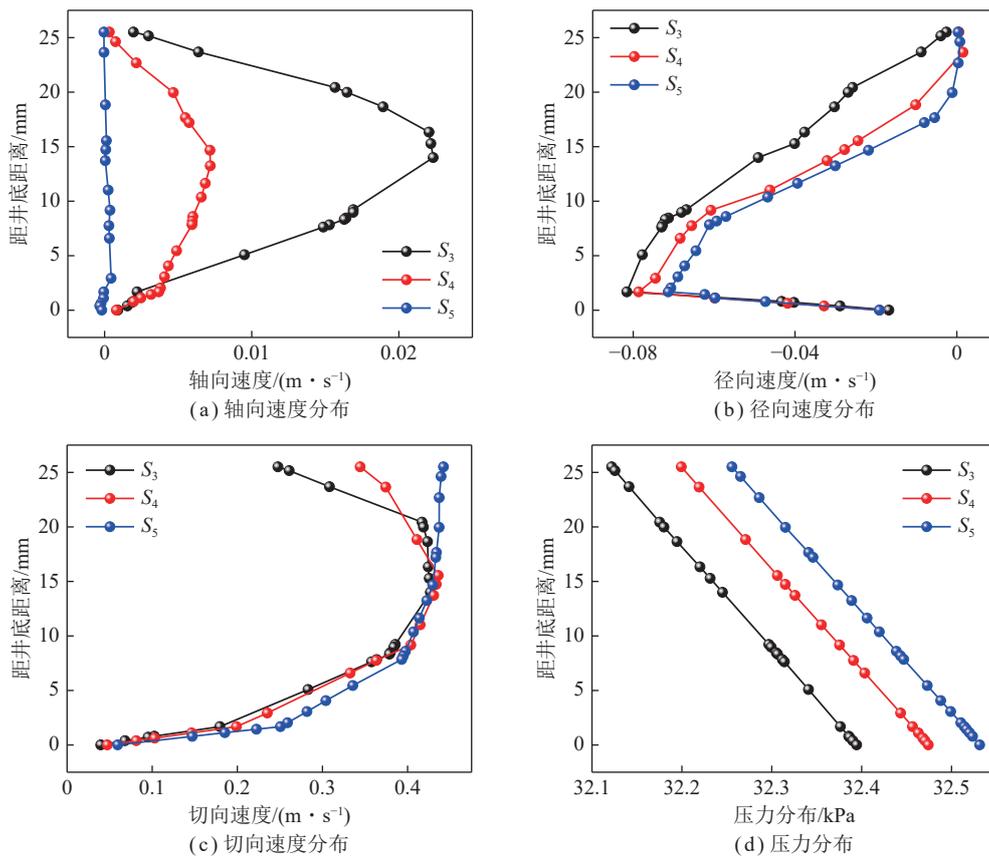


图 9 井底径向  $S_3 \sim S_5$  测线上速度与压力分布

Fig.9 Velocity and pressure distribution on bottom hole radial  $S_3 \sim S_5$  survey line

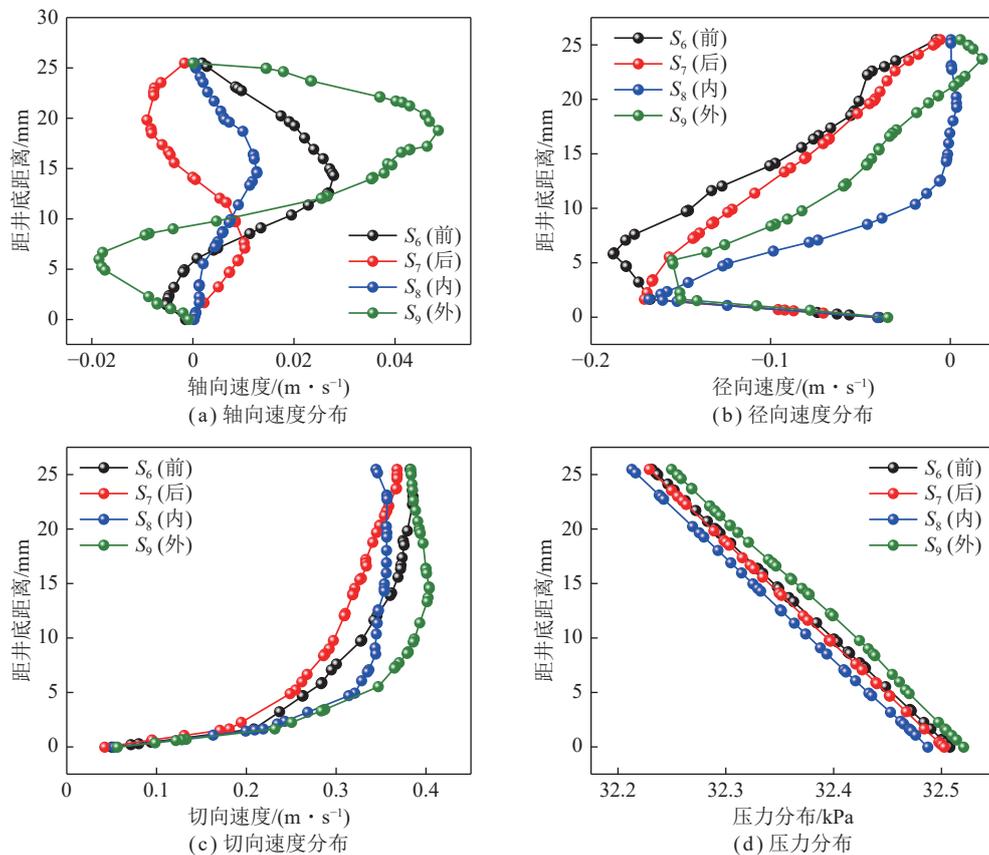


图 10 钻头周边  $S_6 \sim S_9$  测线上速度与压力分布

Fig.10 Velocity and pressure distribution on  $S_6 \sim S_9$  survey line around the drill bit

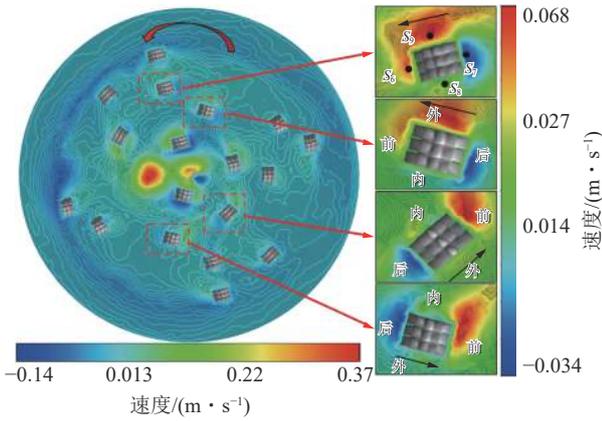


图 11 钻头刀具周边流体轴向速度分布云图

Fig.11 Cloud image of axial velocity distribution of fluid around the bit cutter

渣管内岩渣的分布状态,分析其汇聚、悬浮、吸附、举升等运移规律。

分析图 12 可知,岩渣在井底做“汇聚—悬浮—吸附—举升”运移,首先,岩渣在吸附作用和钻头、旋转泥浆流的推动作用逐渐汇聚井底中部,其次,旋转泥浆流增大对岩渣的扰动力,使其克服泥浆柱的压持效应而悬浮井底,并在吸渣口吸附作用下抽排出井底进入排渣管,岩渣运移循环往复,直至井底彻底清零;泥浆携带岩渣途经注气端,在气举和压差作用下上返速度大幅增加,但由于气相输入,岩渣的密度分布显著降低,因此,岩渣以高返速、低密度的形式在排渣管内运移,直至排出地面。

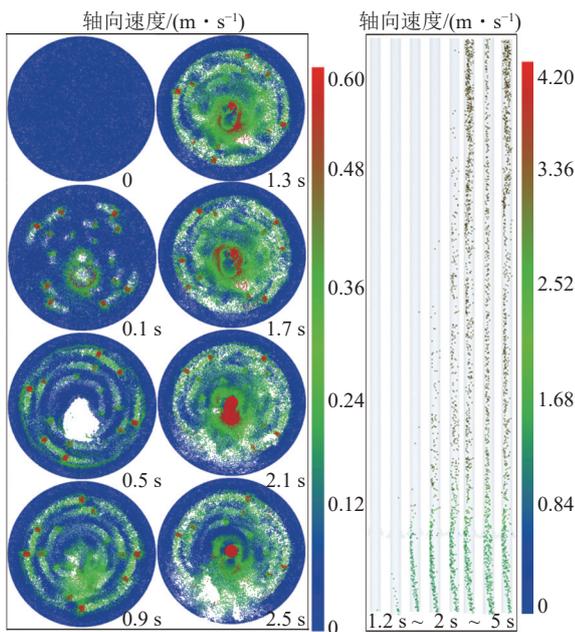


图 12 井底及排渣管内岩渣的分布状态

Fig.12 Distribution of rock slag in bottom hole and slag discharge pipe

### 3 刀盘吸渣口优化

#### 3.1 优化内容及评价指标

煤矿立井钻井法施工过程中,井底部分岩渣因吸渣口布置不合理等原因积聚井底被重复破碎,致使钻头磨损增大,钻进效率降低<sup>[26]</sup>。因此,本节以可可盖煤矿中央回风立井  $\phi 4.2\text{ m}$  超前钻进为背景,取清渣率  $\eta$ 、泥浆输送比  $\lambda$  和气力输送比  $\xi$  作为评判指标,从刀盘吸渣口的数量、间距、面积比和总面积 4 个方面对吸渣口的布置进行优化,优化流程如图 13 所示。

$$\begin{cases} \eta = \frac{\sum M_s}{\sum M_{\text{total}}} \\ \lambda = \frac{\sum M_s}{\sum M_1} \\ \xi = \frac{\sum M_s}{\sum M_g} \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $M_{\text{total}}$  为生成岩渣的总质量;  $M_s$  为累计排出岩渣的质量;  $M_1$  为累计排出泥浆的质量;  $M_g$  为累计输入气体的质量。

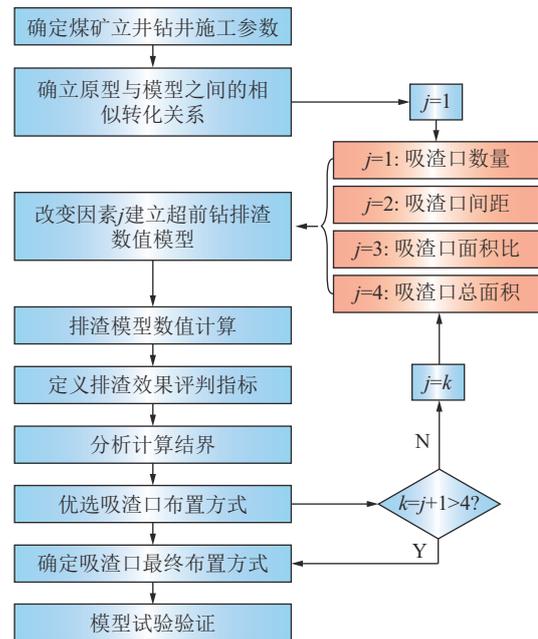


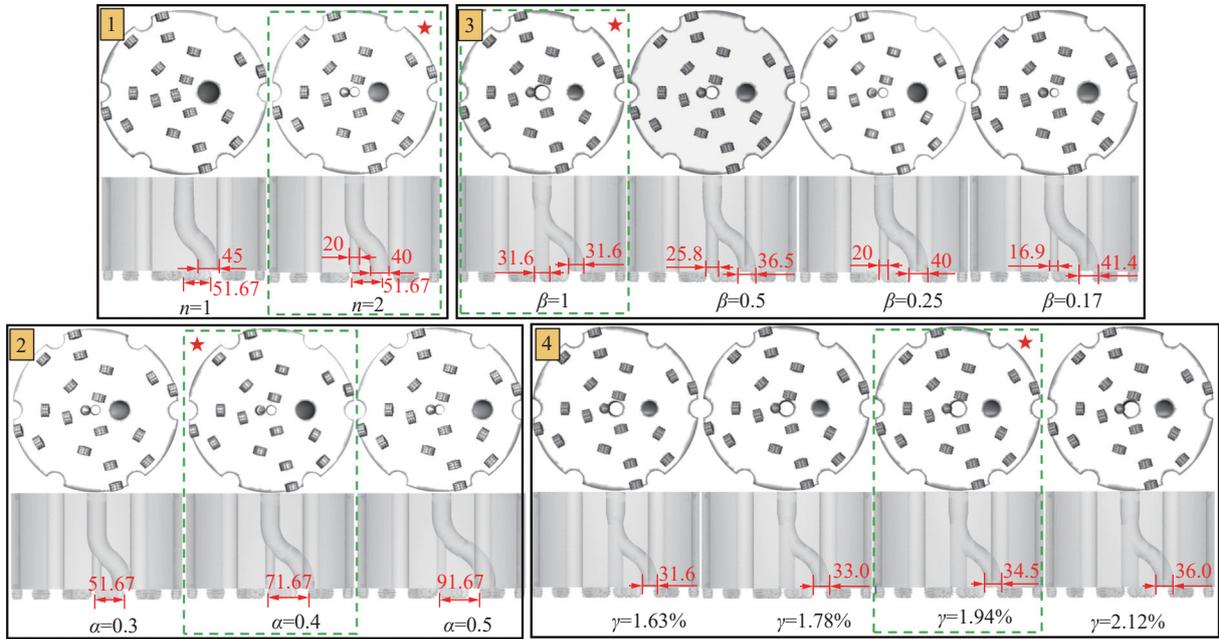
图 13 钻头吸渣口优化流程

Fig.13 Optimization flow chart of bit slag suction port

#### 3.2 吸渣口优化结果

定义两吸渣口中心距与钻头半径之比为长径比  $\alpha$ , 两吸渣口面积的比值为面积比  $\beta$ , 两吸渣口总面积占钻头横截面积的百分比为总面积占比  $\gamma$ , 按照图 13 钻头优化流程,依次改变吸渣口的数量  $n$  (分别为 1, 2), 长径比  $\alpha$  (分别为 0.3, 0.4, 0.5), 面积比  $\beta$  (分别为 1, 0.5, 0.25, 0.17), 总面积占比  $\gamma$  (分别为 1.63%, 1.78%, 1.94%, 2.12%), 建立不同的钻头吸渣口布置数值模型 (图 14),

基于每次吸渣口优选结果逐级优化并选出最佳吸渣口布置方式, 计算结果见表 2 和图 15。



注: 红色字体代表两吸渣口间距, mm。

图 14 不同因素下吸渣口布置的数值模型

Fig. 14 Numerical model of slag suction port arrangement under different factors

表 2 吸渣口优化计算结果

Table 2 Optimization calculation results of slag suction port

因素及取值	评判指标			结果	
	清渣率/%	气力输送比	泥浆输送比/%		
n	1	31.56	14.95	1.67	最优
	2	55.77	26.42	2.94	
alpha	0.3	55.77	26.42	2.94	最优
	0.4	66.78	31.64	3.52	
	0.5	34.75	16.46	1.83	
beta	1	91.62	43.40	4.83	最优
	0.5	87.13	41.28	4.60	
	0.25	66.78	31.64	3.52	
	0.17	54.30	25.73	2.86	
gamma	1.63%	91.62	43.40	4.83	最优
	1.78%	92.29	43.73	4.87	
	1.94%	92.61	43.87	4.89	
	2.12%	89.20	42.26	4.71	

分析表 2 和图 15 可知:

(1) 刀盘吸渣口总面积相同时, 双吸渣口布置方式排渣效果较单吸渣口好。单吸渣口由于其偏心布置方式, 在靠近吸渣口一侧出现井底泥浆径流短路现象,

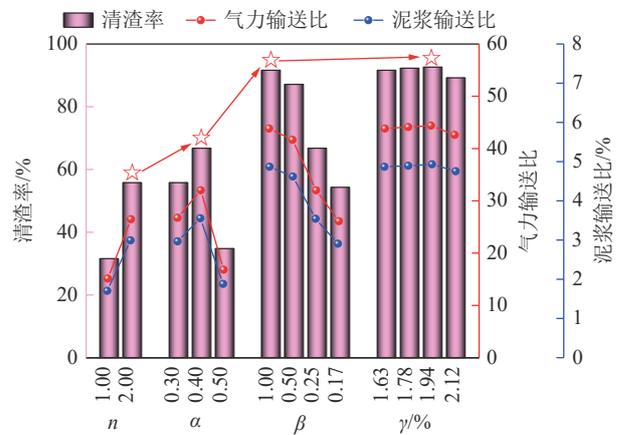


图 15 排渣效果指标趋势

Fig. 15 Trend chart of slag discharge effect index

在井底中心位置及远离吸渣口一侧泥浆流速衰减严重, 致使钻渣积聚井底中心无法被泥浆举升而重复破碎, 严重影响排渣效果。双吸渣口布置方式具有分布均匀、吸附范围广的优点, 且吸附兼顾井底中心和钻头外缘岩渣滞留区, 因此, 双吸渣口布置方式较为合理, 且清渣率较单吸渣口布置增长 76.5%, 泥浆携岩能力及气力举升能力也显著提升。

(2) 当两吸渣口间距过近时, 吸附区域会发生交叉重叠造成有效吸附面积减小, 当两吸渣口间距过大时, 吸渣口之间存在“吸附空白区”, 且外侧吸渣口因其线速度过大而造成吸附效果差, 因此两吸渣口间距的布

置并非越近或越远最好,其存在一最优阈值,且当吸渣口长径比 $\alpha$ 为0.4时排渣效果最佳,其清渣率较现场双吸渣口布置方式提升19.7%。

(3) 清渣率、气力输送比和泥浆输送比均随着吸渣口面积比 $\beta$ 的增大而增大;井底岩渣暴露于扫掠吸渣口吸附路径下方的时间较短,扫掠吸渣口吸附能力有限,尚有大量岩渣滞留井底,且主要分布在中心部位,因此适当增大中心吸渣口面积有利于提高排渣效果,且当吸渣口面积比 $\beta$ 为1时,其清渣率较现场双吸渣口布置方式提升64.3%。

(4) 在经历吸渣口的数量、长径比和面积比的优化后,排渣效果得到明显的改善,继续增大吸渣口的面积,清渣率及其他清渣指标均小幅增长后下跌,可见过度增大吸渣口的总面积反而会导致吸渣口吸附力不足而降低排渣效果,因此优选吸渣口总面积占比

$\gamma$ 为1.94%,其清渣率较现场双吸渣口布置方式提升66.06%。

综上,通过建立13个排渣数值模型,依次改变吸渣口的数量、间距、面积比和总面积,最终发现吸渣口的数量 $n$ 为2,长径比 $\alpha$ 为0.4,面积比 $\beta$ 为1,总面积占比 $\gamma$ 为1.94%时吸渣口的布置方式最佳且排渣效果最好。

### 3.3 试验验证

为验证排渣流场分布数值模拟及优化吸渣口结果的正确性,采用自研的可视化气举反循环泥浆悬浮排渣试验装置(图16),设计几何相似缩比为12的相似模型试验,并利用高频摄像机对排渣管内岩渣进行监测捕捉,通过PIV测试技术获取了排渣管流场中岩渣的上返速度,其中相似模型设计、试验装置研制和试验过程见文献[10],试验参数选取同表1,图17为试验与数值模拟结果对比。

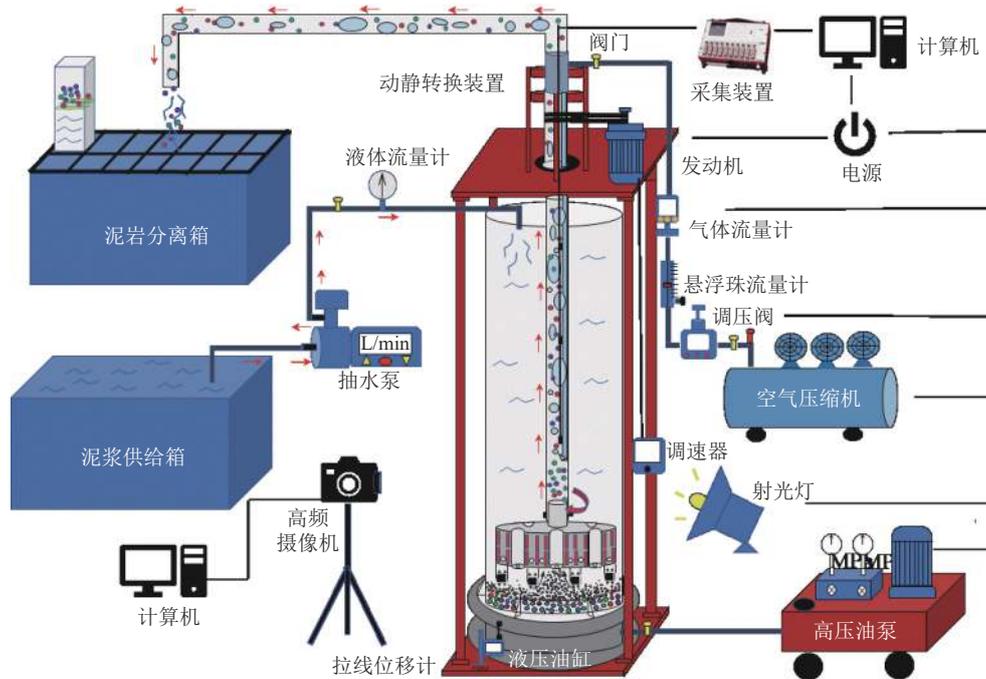


图16 气举反循环排渣试验装置示意

Fig.16 Schematic diagram of gas lift reverse circulation slag discharge test device

模型试验结果显示,现场模型排渣管内液固及液固气区段岩渣平均上返速度分别为1.32和3.88 m/s,对应优化模型为1.55和4.07 m/s,优化模型排渣管内液固及液固气段岩渣上返速度较现场模型分别提升17.4%和4.9%;与数值模拟结果相比,现场模型排渣管内液固及液固气段岩渣上返速度相对误差分别为22.7%和10.9%,对应优化模型相对误差分别为14.8%和13.1%,试验结果与模拟结果具有较高的吻合性,从而验证了数值模拟排渣流场分布的正确性和优化吸渣口布置的优越性。

## 4 排渣流场影响因素分析

### 4.1 排渣管内流场主要影响因素

以排渣管内 $V_1$ 测线的速度及压力分布为例,分析钻头转速(20~40 r/min),注气量(6.4~10.4 m<sup>3</sup>/h),风管没入比(0.70~0.88),泥浆黏度(1~11 mPa·s)等因素对优化模型排渣管内流场的影响。

分析图18~21可知:

(1) 排渣管内泥浆及岩渣的上返速度随钻头转速的增加呈先增加后降低趋势,当转速为35 r/min时,泥浆及岩渣的上返速度均达到峰值,分别较低转速

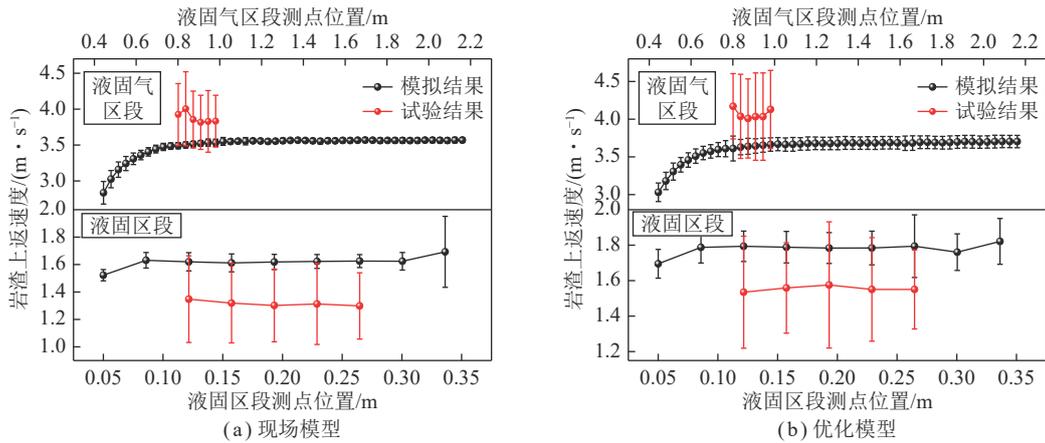


图 17 试验与模拟流场岩渣上返速度对比

Fig.17 Comparison of upward velocity of rock slag between experimental and simulated flow fields

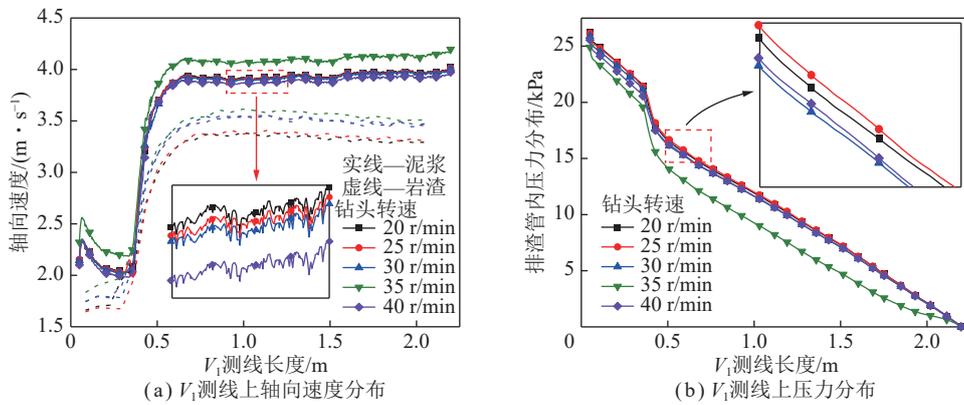


图 18 钻头转速对排渣管流场的影响

Fig.18 Influence of bit speed on flow field of slag discharge pipe

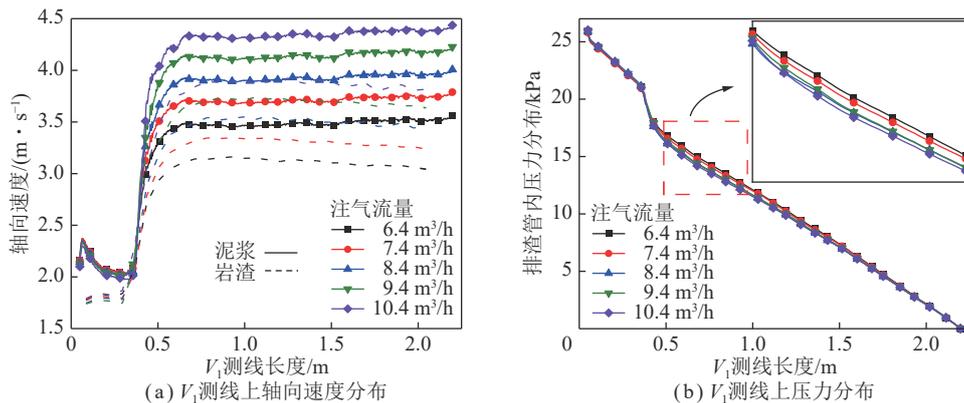


图 19 注气量对排渣管流场的影响

Fig.19 Influence of gas injection on flow field of slag discharge pipe

20 r/min 时增加 4.4% 和 7.2%，当转速增至 40 r/min 时，泥浆及岩渣的上返速度骤然降低，因此钻头转速存在最优阈值，在合理范围内增加钻头转速可小幅提高泥浆及岩渣的上返速度；排渣管内压力分布随转速的增加呈先减小后增加趋势，当转速为 35 r/min 时，排渣管内压力最小，即排渣管内外泥浆柱的压力差最大，

泥浆及岩渣更易获得高流速而被举升。

(2) 增大注气量可以显著增加排渣管内液固气区段的气体体积分数及岩渣、泥浆的上返流速。当注气量从 6.4 增至 10.4 m<sup>3</sup>/h 时，排渣管内气体平均体积分数增长 31%，液固气区段岩渣及泥浆的平均上返流速分别增长 25% 和 27%，且排渣管内的压力随注气量的

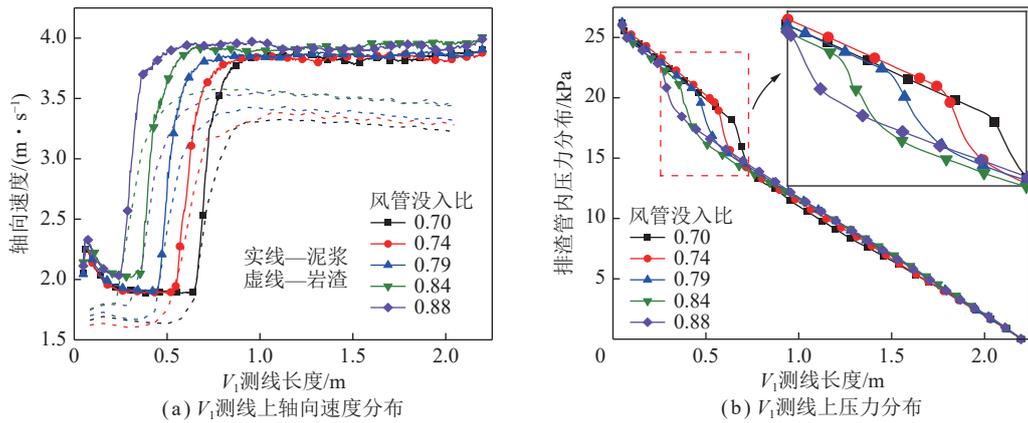


图 20 风管没入比对排渣管流场的影响

Fig.20 Influence of air duct submergence ratio on flow field of slag discharge pipe

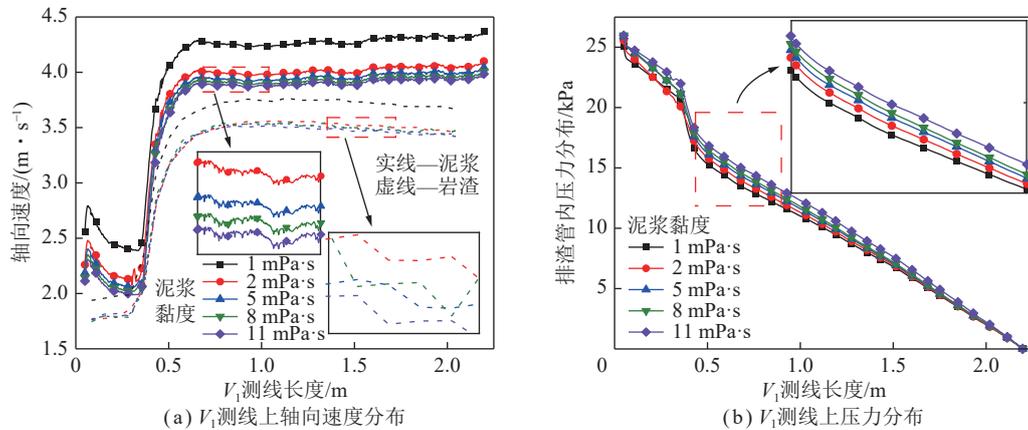


图 21 泥浆黏度对排渣管流场的影响

Fig.21 Influence of mud viscosity on flow field of slag discharge pipe

增加而降低。这是由于当注气量增加时,会以较大动能克服排渣管内混合流体重力势能而做功,压缩空气的动能向混合流体重力势能及动能转变,使其以高流速上返;另外,随着注气量增加,排渣管内混合流体的密度及压力迅速降低,在外部环空泥浆柱压差作用下,排渣管内混合流体更易获得高返速。

(3) 增大风管没入比可使岩渣-泥浆两相流提前被“注气加速”,且在一定程度上可小幅增加排渣管内液固气段岩渣及泥浆的上返流速。当风管没入比从 0.70 增至 0.84,岩渣-泥浆两相流提前被加速,且分别实现 8.9%、11.8% 的增幅,多相流上返路径延长,但获取高流速上返,有效节省了岩渣及泥浆自井底至地面的流动时间<sup>[27]</sup>。

(4) 泥浆黏度与混合流体的上返速度呈负相关关系。低密度、低黏度的泥浆更易获得高返速,且在排渣管内保持低压状态,但携岩能力较差。当泥浆黏度为  $1 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ,密度为  $1 \text{ kg/m}^3$  时(此时泥浆为清水),其上返流速为  $4.28 \text{ m/s}$ ,较黏度梯度为  $2 \sim 11 \text{ mPa} \cdot \text{s}$  的泥浆(密度为  $1.1 \text{ kg/m}^3$ )分别增长  $6.7\% \sim 9.7\%$ ,岩渣

颗粒上返流速分别增长  $6\% \sim 7\%$ 。这是因为低黏、低密度的泥浆与钻杆内壁间的壁面剪切力较小,沿程阻力损失少,在液固气区段易形成低密度的混合流体且保持管内低压状态,因此能获得高流速,但是在实际钻井工程中,还要考虑泥浆平衡地压、井帮护壁、悬浮井壁、携带岩渣的能力,因此泥浆黏度及密度也并非越小越好。

#### 4.2 井底流场主要影响因素

以井底水平测线  $L_1$  上的速度及压力分布为例,分析钻头转速 ( $20 \sim 40 \text{ r/min}$ ),注气量 ( $6.4 \sim 10.4 \text{ m}^3/\text{h}$ ),风管没入比 ( $0.70 \sim 0.88$ ),泥浆黏度 ( $1 \sim 11 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ ) 等因素对优化模型井底流场的影响。

图 22~25 分别为钻头转速,注气量,风管没入比和泥浆黏度对井底  $L_1$  测线上速度及压力分布的影响曲线,分析可得

(1) 钻头转速对井底流体的速度场及压力场影响最为显著,井底流体的轴向速度随钻头转速呈先增大后降低趋势,且在  $35 \text{ r/min}$  时,井底流体的上返速度最大,井底压力则与钻头转速呈负相关关系,钻头转速

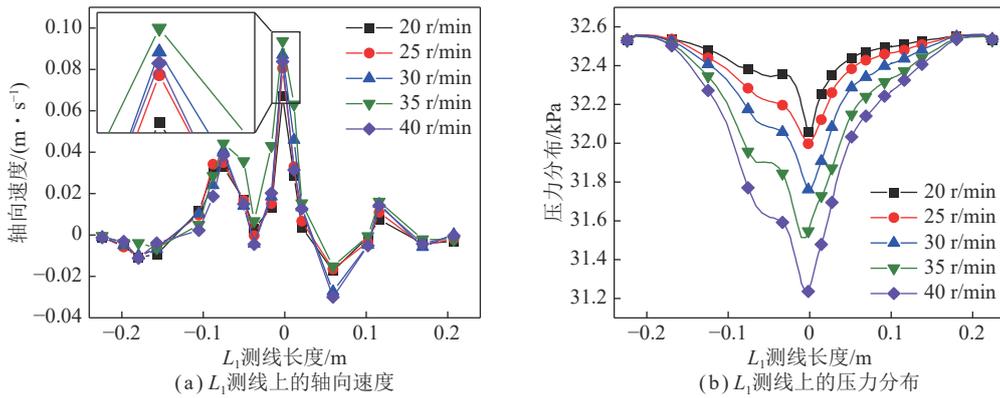


图 22 钻头转速对  $L_1$  测线上速度及压力的影响

Fig.22 Influence of bit speed on speed and pressure on  $L_1$  survey line

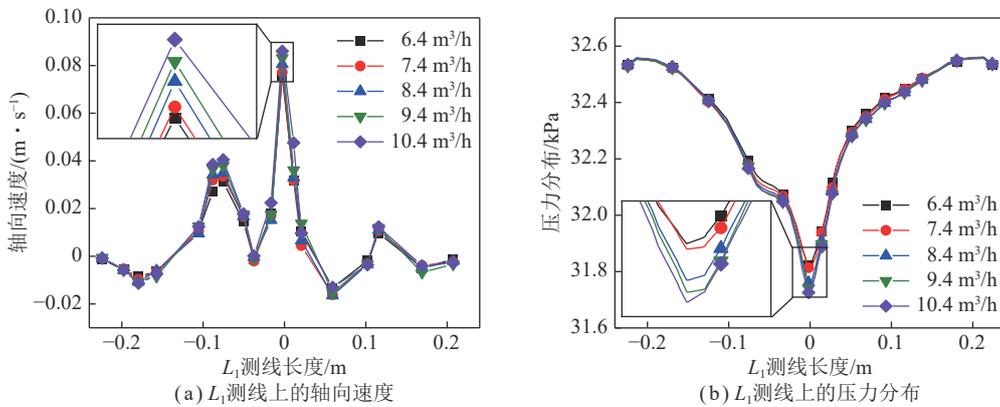


图 23 注气量对  $L_1$  测线上速度及压力的影响

Fig.23 Influence of gas injection on speed and pressure on  $L_1$  measuring line

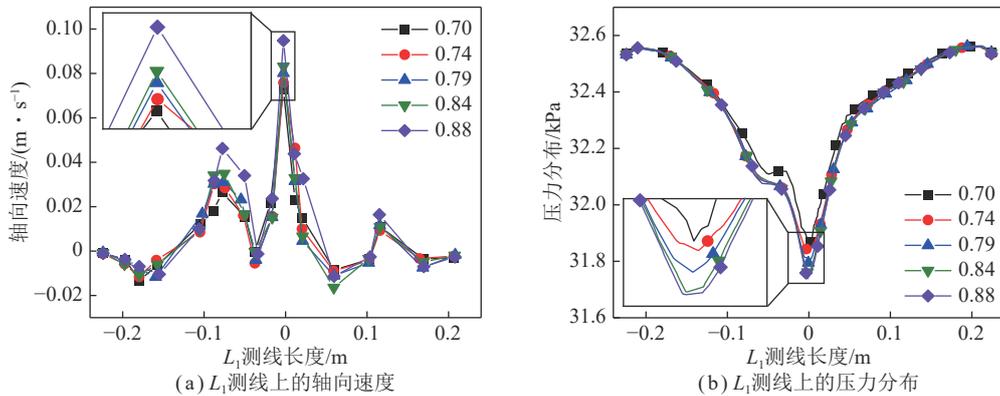


图 24 风管没入比对  $L_1$  测线上速度及压力的影响

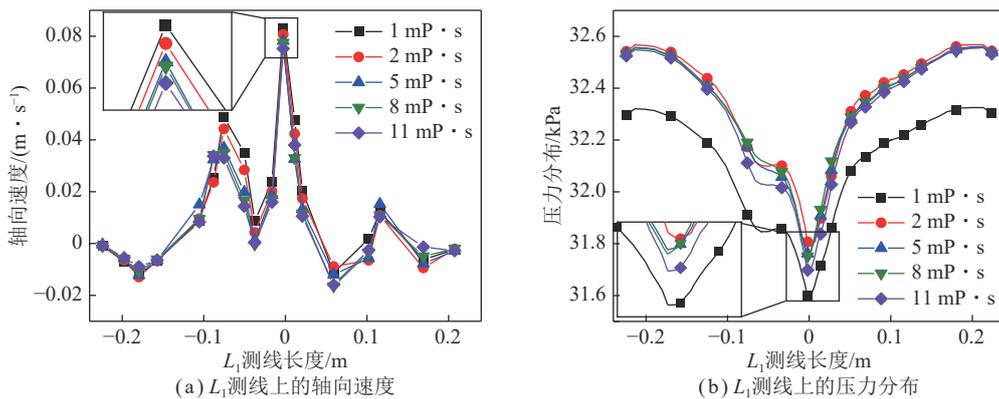
Fig.24 Influence of air duct submergence ratio on speed and pressure on  $L_1$  measuring line

由 20 增至 40 r/min 时,中心吸渣口、扫掠吸渣口与环空泥浆柱之间的压力差分别增大 1.8 倍和 4.3 倍,吸渣口吸附力显著增强。

(2) 注气量、风管没入比与井底流体的轴向速度呈正相关关系,与井底压力呈负相关关系。当注气量由 6.4 增至 10.7  $m^3/h$  时,中心吸渣口处流体轴向速度增长 13.5%,井底与环空压差增大 13.9%;当风管没入比由 0.70 增至 0.88 时,中心吸渣口处流体轴向速度

增长 30.4%,井底与环空压差增大 13.6%,因此,增大风管注气量和埋入深度可显著增长井底流体的轴向速度和吸渣口吸附力。

(3) 泥浆黏度与井底流体的轴向速度呈负相关关系,低黏流体易获取高返速,泥浆黏度由 1 增至 11  $mPa \cdot s$  时,中心吸渣口和扫掠吸渣口处泥浆的轴向速度分别降低 9.6% 和 32.3%;泥浆密度相同时,黏度对井底压力影响较小,但采用低密度泥浆时,井底

图 25 泥浆黏度对  $L_1$  测线上速度及压力的影响Fig.25 Influence of mud viscosity on speed and pressure on  $L_1$  measuring line

和环空泥浆柱的压力骤然降低。

## 5 结 论

(1) 排渣管内气-液-固混合流体的运移以轴向流动为主, 途经注气端时, 流速发生跳跃式剧增; 井底流体的运移主要以水平流动为主, 流体的垂直上返仅存在于吸渣口附近; 井底水平流动以切向流动为主, 径向流动仅在吸渣口两侧较为明显, 且远离吸渣口处, 径流速度较小易产生岩屑沉积。

(2) 提出了优化刀盘吸渣口评判指标: 清渣率  $\eta$ 、泥浆输送比  $\lambda$  和气力输送比  $\xi$ 。依次改变刀盘吸渣口的数量、间距、面积比和总面积, 通过数值模拟优化得到吸渣口的数量为 2, 长径比为 0.4, 面积比为 1, 总面积占比为 1.94% 时, 吸渣口的布置方式最佳, 其清渣率较现行吸渣口布置方式提高 66%, 且优化结果得到试验验证。

(3) 钻头转速对井底流场的影响最为显著, 增大钻头转速可显著降低井底压力, 提高与环空泥浆柱间的压差, 增强吸渣口的吸附作用; 注气量、风管没入比与井底和排渣管内流体的轴向速度均呈正相关关系, 低黏、低密度的泥浆易获取高转速, 但携岩能力较差。

(4) 基于钻井法气-液-固耦合流场分布规律, 优化改变刀盘吸渣口布置及相应钻进参数, 是提高侏罗系基岩钻井法凿井排渣和钻进效率重要的技术途径之一。但由于在钻进过程中存在岩性、刀具、泥浆等诸多综合影响因素, 开展现场工业性试验研究将是今后不可或缺的重要环节。

## 参考文献(References):

[1] 刘志强, 宋朝阳, 纪洪广, 等. 深部矿产资源开采矿井建设模式及其关键技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 826-845.  
LIU Zhiqiang, SONG Chaoyang, JI Hongguang, et al. Construction mode and key technology of mining shaft engineering for deep mineral resources[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3):

826-845.  
[2] 程桦, 唐彬, 唐永志, 等. 深井巷道全断面硬岩掘进机及其快速施工关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3314-3324.  
CHNEG Hua, TANG Bin, TANG Yongzhi, et al. Full face tunnel boring machine for deep-buried roadways and its key rapid excavation technologies[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3314-3324.  
[3] 孙利辉, 纪洪广, 杨本生. 西部典型矿区弱胶结地层岩石的物理力学性能特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(3): 866-874.  
SUN Lihui, JI Hongguang, YANG Bensheng. Physical and mechanical characteristic of rocks with weakly cemented strata in Western representative mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(3): 866-874.  
[4] 刘志强, 陈湘生, 蔡美峰, 等. 我国大直径钻井技术装备发展的挑战与思考[J]. 中国工程科学, 2022, 24(2): 132-139.  
LIU Zhiqiang, CHEN Xiangsheng, CAI Meifeng, et al. Challenges and thoughts on the development of large-diameter drilling technology and equipment[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(2): 132-139.  
[5] 姚直书, 许永杰, 程桦, 等. 西部钻井法“一钻成井”新型高强复合井壁力学特性研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(12): 4365-4379.  
YAO Zhishu, XU Yongjie, CHENG Hua, et al. Study on the mechanical properties of a new high-strength composite shaft lining for the “one drilling and forming process” by drilling method in western China[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(12): 4365-4379.  
[6] 范京道, 封华, 宋朝阳, 等. 可可盖煤矿全矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备[J]. 煤炭学报, 2022, 47(1): 499-514.  
FAN Jingdao, FENG Hua, SONG Chaoyang, et al. Key technology and equipment of intelligent mine construction of whole mine mechanical rock breaking in Kekagai Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 499-514.  
[7] 洪伯潜. 钻井法凿井技术在我国的发展与应用[J]. 中国煤炭工业, 1998(4): 8-9.  
HONG Boqian. Development and application of drilling sinking technology in China[J]. China Coal Industry, 1998(4): 8-9.  
[8] 姚直书, 方玉, 乔帅星, 等. 孔隙型含水岩层钻井法凿井壁后充填技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(10): 1-9.  
YAO Zhishu, FANG Yu, QIAO Shuaxing, et al. Research on back-fill technology of drilling shaft sinking method in porous water-bearing rock stratum[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(10):

- 1-9.
- [9] 崔明远, 刘锦玉, 李翔宇, 等. 钻井法凿井在我国西部地区的应用分析——以可可盖煤矿进风立井采用钻井法施工为例[J]. 建井技术, 2022, 43(5): 67-70, 48.  
CUI Mingyuan, LIU Jinyu, LI Xiangyu, et al. Analysis on mine shaft drilling method applied to mine shaft sinking in western china area-taking the construction of air inlet shaft in kekegai coal mine as an example[J]. Mine Construction Technology, 2022, 43(5): 67-70, 48.
- [10] 程桦, 郭龙辉, 姚直书, 等. 钻井法凿井气举反循环多相排渣运移规律及其洗井参数优化试验研究[J/OL]. 中国矿业大学学报: 1-14[2023-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1152.TD.20230619.1100.002.html>.  
CHENG Hua, GUO Longhui, YAO Zhishu, et al. Experimental study on transport law of multiphase slag discharge and optimization of well washing parameters in gas lift reverse circulation of drilling shaft sinking[J/OL]. Journal of China University of Mining & Technology: 1-14[2023-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1152.TD.20230619.1100.002.html>.
- [11] 刘志强, 宋朝阳, 程守业, 等. 基于重力排渣的大直径井筒钻掘技术与工艺体系研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 272-282.  
LIU Zhiqiang, SONG Chaoyang, CHENG Shouye, et al. Research on the technology and equipment system of large diameter shaft drilling based on gravity slagging[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 272-282.
- [12] 伍晓龙, 冯钰琦, 杜杲森, 等. 气举反循环双壁钻具流场仿真分析[J]. 钻探工程, 2022, 49(3): 83-91.  
WU Xiaolong, FENG Yuqi, DU Yaosen, et al. Simulation analysis of the flow field of the air lift reverse circulation dual wall drill tool[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 83-91.
- [13] 夏敏, 何建京, 王占军, 等. 竖井大直径钻头井底流场的数值模拟[J]. 矿山机械, 2013, 41(4): 14-19.  
XIA Min, HE Jianjing, WANG Zhanjun, et al. Numerical simulation on flow field of shaft bottom drilled with large-diametered drill bit[J]. Mining & Processing Equipment, 2013, 41(4): 14-19.
- [14] 张永成, 孙杰, 王安山. 钻井技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2008: 465-467.
- [15] 黄志强, 周巳, 单代伟, 等. 潜孔钻头排屑槽布置方式对井底流场影响的研究[J]. 物探装备, 2008(5): 296-299.  
HUANG Zhiqiang, ZHOU Yi, SHAN Daiwei, et al. Study on influence of layout of DHT bits junk slot on hole-bottom flow field[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2008(5): 296-299.
- [16] 付孟雄, 刘少伟, 贾后省, 等. 巷道下向小孔径锚固孔钻进产渣特征及高效钻头设计[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2311-2325.  
FU Mengxiong, LIU Shaowei, JIA Houxing, et al. Fragments generation characteristics and design of a kind of efficient rock breaking bit during borehole drilling with small diameter at a downward angle of coal mine roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2311-2325.
- [17] WALKER S, LI J. The Effects of particle size, fluid rheology, and pipe eccentricity on cuttings transport[J]. Society of Petroleum Engineers, 2000, 60(7): 55-65.
- [18] 刘少伟, 冯友良, 董士举. 巷道底板锚固孔排渣影响因素分析及参数优化[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(5): 761-765.  
LIU Shaowei, FENG Youliang, DONG Shiju. Influence factors analysis and parameters optimization of deslagging in roadway floor anchoring boreholes[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(5): 761-765.
- [19] 易振华, 何龙飞, 胡志海. 大直径贯通式潜孔锤局部气举反循环钻进工艺的试验研究[J]. 地质装备, 2013, 14(1): 33-36.  
YI Zhenhua, HE Longfei, HU Zhihai. Experimental study on local gas lift reverse circulation drilling technology of large diameter through DTH hammer[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2013, 14(1): 33-36.
- [20] 熊亮, 张小连, 熊菊秋, 等. 大口径工程井气举反循环钻进效率影响因素初探[J]. 探矿工程, 2014, 41(5): 42-45, 49.  
XIONG Liang, ZHANG Xiaolian, XIONG Juqiu, et al. Preliminary analysis on influence factors of air-lift reverse circulation drilling efficiency to large diameter engineering well[J]. Drilling Engineering, 2014, 41(5): 42-45, 49.
- [21] 范京道, 魏东, 汪青仓, 等. 智能化建井理论技术与工程实践[J]. 煤炭学报, 2023, 48(1): 470-483.  
FAN Jingdao, WEI Dong, WANG Qingcang, et al. Theory and practice of intelligent coal mine shaft excavation[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(1): 470-483.
- [22] YAN T, QU J, SUN X, et al. Numerical investigation on horizontal wellbore hole cleaning with a four-lobed drill pipe using CFD-DEM method[J]. Powder Technology, 2020, 375(1): 249-261.
- [23] 王志亮, 陈锬, 张震, 等. 新型钻杆的携岩原理研究与数值仿真分析[J]. 工程设计学报, 2021, 28(5): 602-614.  
WANG Zhiliang, CHEN Kun, ZHANG Zhen, et al. Study on cuttings carrying principle and numerical simulation analysis of new drill pipe[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2021, 28(5): 602-614.
- [24] 王志亮, 张震, 周旺明, 等. 页岩气井眼净化模拟研究及影响因素分析[J]. 石油机械, 2021, 49(7): 23-30.  
WANG Zhiliang, ZHANG Zhen, ZHOU Wangming, et al. Shale gas wellbore cleaning simulation and influencing factors analysis[J]. China Petroleum Machinery, 2021, 49(7): 23-30.
- [25] 焦宁, 王衍森, 孟陈祥. 竖井掘进机空气洗井流场与携渣效率的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 522-531.  
JIAO Ning, WANG Yansen, MENG Chenxiang. Numerical simulation on the flow field and slag carrying efficiency of air flush drilling for vertical shaft boring machine[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(S1): 522-531.
- [26] 金丽娜. 反循环钻井合理注气参数的研究[D]. 大庆: 大庆石油学院, 2008: 15-22.  
JIN Lina. Research on the reasonable gas injection parameters of the counter-circulation drilling[D]. Daqing: Daqing Petroleum Institute, 2008: 15-22.
- [27] 尹晓利, 高洪军, 殷亮. 大直径竖井钻井反循环洗井参数计算[J]. 矿山机械, 2009, 37(21): 5-8.  
YIN Xiaoli, GAO Hongjun, YIN Liang. Anti-circulation flushing parameter calculation of the large-diameter shaft drilling[J]. Mining & Processing Equipment, 2009, 37(21): 5-8.