



移动阅读

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1805

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. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2019.1805

竖井掘进机空气洗井流场与携渣效率的数值模拟

焦 宁¹,王衍森^{1,2},孟陈祥¹

(1. 中国矿业大学 力学与土木工程学院,江苏 徐州 221116;2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,江苏 徐州 221116)

摘 要:针对现有竖井掘进机排渣方式的不足,借鉴大直径竖井钻机的流体洗井排渣方式,提出了一种适用于井筒全断面掘进的流体洗井系统。基于部分假定并结合实际工况,分析确定了流体洗井系统的基本参数和典型参数取值。主要采用 FLUENT 流体仿真软件,开展了空气洗井流场与排渣效率的数值模拟。首先,对空气洗井系统的基本参数进行了优化:通过单因素数值分析,以排渣管内径向、切向和竖直方向速度分量以及井底流场涡流情况等为评价指标,得到了1组在一定程度上最优的洗井系统参数;通过正交试验分析得到了排渣管内径、射流口角度等参数对井底流场的影响规律:对井底流场影响最大的为排渣管内径,影响最小的为射流口角度和刀盘与井底夹角。其次,进行了气固两相流的洗井排渣数值模拟:把岩屑假定为均匀的球体颗粒,并将其设置为离散相,以累计排出岩屑质量、排出岩屑的质量速率、清渣率和携渣率为评价指标,得到了岩屑粒径、排渣高度和入口空气流量对洗井排渣效果的影响规律:洗井排渣效果与岩屑颗粒粒径呈负相关、与入射口空气流量大致呈正相关,而排渣高度对洗井排渣效果基本没有较大的影响。最后,简要介绍了相似模型试验的验证情况,基于所推导出的相似准则,开展了相似模化设计;利用自行设计加工的模型实验台,完成了几何相似比为1:20的模型实验。模型实验和数值模拟获得的规律基本相同,表明数值计算结果具有一定的准确性,为后续开展大尺寸模型实验或现场试验研究,提供了理论依据和基础参数。

关键词:竖井掘进机;空气洗井;井底流场;携渣效率;气固两相流

中图分类号:TU621 文献标志码:A 文章编号:0253-9993(2020)S1-0522-10

Numerical simulation on the flow field and slag carrying efficiency of air flush drilling for vertical shaft boring machine

JIAO Ning¹, WANG Yansen^{1,2}, MENG Chenxiang¹

(1. College of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In view of the deficiency of the existing vertical shaft boring machine slag discharge mode, a fluid washing system suitable for a full-section shaft driving is proposed by referring to the fluid washing and slag discharge mode of large diameter shaft drilling rig. Based on some assumptions and combined with actual working conditions, the basic parameters and typical parameters of fluid well washing system are determined. FLUENT fluid simulation software is mainly used to carry out the numerical simulation of air well washing flow field and slag removal efficiency. First, the

收稿日期:2019-12-26 修回日期:2020-02-19 责任编辑:常明然

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600903);中央高校基本科研业务费资助项目(2018ZZCX04)

作者简介:焦宁(1995—),男,河南驻马店人,硕士研究生。E-mail:TS18030044A3LD1@cumt.edu.cn

通讯作者:王衍森(1973—),男,山东邹城人,研究员,博士生导师,博士。E-mail:yswang@cumt.edu.cn

basic parameters of the air well cleaning system are optimized through single-factor numerical analysis, and the radial tangential and vertical velocity components and the eddy current in the bottom hole are used as the evaluation indexes to obtain a set of optimal well flushing system parameters to a certain extent. Through orthogonal test analysis, the influence law of parameters such as the inner diameter of slag discharge pipe and the angle of jet nozzle on the flow field at the bottom of the well is obtained. The inner diameter of the slag discharge pipe has the greatest influence on the flow field at the bottom of the well, while the angle of the jet nozzle and the included angle between the cutter head and the bottom of the well have the least influence. Second, the numerical simulation of gas-solid two-phase flow is carried out. The cuttings are assumed to be homogeneous spherical particles and set as discrete phase, the cumulative cuttings discharge quality and mass rate of cuttings discharge as well as slag removal rate and slag carrying rate are used as evaluation indexes, the influence law of inlet air flow at cuttings particle size and slag discharge height on the effect of well washing and slag discharge are obtained. There is a negative correlation between the effect of well flushing and debris particle size and a positive correlation between the air flow at the entrance, and the height of discharge has little effect on the effect of discharge. Finally, the verification of the similarity model test is briefly introduced, based on the similarity criterion derived, the similarity modeling design is carried out. The model experiment with a geometric similarity ratio of 1:20 is completed by using a self-designed and processed model experiment table. The law obtained by model experiment and numerical simulation is basically the same, which indicates that the numerical calculation results have certain accuracy, and provides a theoretical basis and basic parameters for the follow-up large-scale model experiment or field experiment.

Key words: vertical shaft boring machine; air flush drilling; shaft bottom flow field; slag carrying efficiency; gas-solid two phase flow

随着经济的发展,资源开采的深度越来越大,而深部固体资源的开采一般须建井先行。土木工程建设全面机械化已成发展趋势,盾构、TBM 技术日益成熟,但如今井筒建设机械化程度相对较低,全面机械化凿井仅限于钻井法,但钻井法在深井钻井中存在动力损失严重、掉钻处理难度大、井壁漂浮下沉风险高等缺陷,因此在大直径深井建设中竖井掘进机法是重要的发展方向。

自 20 世纪 80 年代至今,大直径钻井技术逐渐发展壮大,应用于诸多工程技术领域,大量的新型科学技术与大直径钻井技术有机结合,出现了竖井掘进机。

美国罗宾斯公司分别于 1978、1984 年试制了 241SB-184 型竖井掘进机^[1]、20-24FT 型竖井掘进机^[2],2 台掘进机排渣方式均为机械排渣。德国海瑞克公司与澳大利亚力拓集团合作研发出了撑靴式立井掘进机 SBM,可在深达 2 000 m 的地层中挖掘直径大至 12 m 的井筒,排渣系统为垂直胶带输送机^[3]。2014 年,DMC 矿业服务公司首次使用了德国海瑞克公司研发的截削式立井掘进机 SBR,取得了成功,该掘进机的排渣系统同样也为垂直胶带输送机,岩屑最终由吊桶提升至地面^[4]。

“十二五”期间,我国开展了竖井掘进机的研究,

完成了首台竖井掘进机(MSJ5.8/1.6D)样机的研制。该机具有整体框多点支撑、多油缸推进、低功率输入等特点,但排渣方式同样为机械排渣,不能实现全断面掘进^[5]。

目前绝大多数竖井掘进机采用的都是机械式排渣方式,与钻机采用的流体排渣方式相比^[6],具有不能全断面掘进、机械方式运输设备复杂、破岩面的岩屑留存率较高、除尘和冷却钻头较复杂等缺点,因此流体排渣将是一种更有效、更先进的排渣方式。

而流体排渣中流体主要为气体、液体、泡沫,在水资源匮乏、含有硬岩或季节性冻结层等地区,空气洗井具有节约水资源、降低工程造价、钻进效率较高等明显优势。而且随着国家发展的需要,在我国西部以及边陲地区开展的固体资源开采工程越来越多,因此对大直径空气洗井的研究具有一定的现实意义。

在流体排渣中,按循环方式分为正循环洗井与反循环洗井。针对大直径钻井,因井底岩屑运移距离长、岩屑粒径大,正循环更难获得较大的上返速度,所以大直径钻井洗井排渣时更适合采用反循环洗井^[7-8]。

空气洗井目前在石油类小直径钻井领域应用较为广泛,其中一些专用的反循环钻头中引射器原理的应用有较为丰富的经验,对大直径洗井有较大的参考

价值^[9-11]。由于大直径井筒内的空间较大,使用空气反循环洗井时,井底密封较难、反循环难以形成以及所需流体流量较大等问题较为突出,目前对大直径的空气洗井排渣研究相对较少,针对这些问题尚未有相对较好的解决方案。

针对空气洗井流场数值模拟方法,对目前的井底流场研究方法进行了对比分析,发现首先利用 ANSYS 中对应模块或平台建立相似的有限元模型并进行网格划分,然后导入 Fluent 中进行井底流场模拟是一种相对较为简便、高效的研究方法,并且能有效地模拟大直径空气洗井的井底流场^[12-15]。

笔者针对现有竖井掘进机排渣方式存在的不足,借鉴钻机的流体排渣方式,提出一种适用于全断面掘进的流体洗井系统,并在空气作为洗井介质的条件下,进行参数优化和气固两相流数值模拟,并通过相似模型实验作对比验证。

1 竖井掘进机流体洗井系统总体设计

竖井钻机通常采用气举反循环洗井,钻杆内的排渣通道与外部需存在一定的压力差,大直径井筒钻进时,受泥浆柱压持效应等影响,岩屑径向运移慢,易原位沉积,造成重复破碎,影响破岩效率。现有竖井掘进机,无论是泥浆泵排渣还是刮板等机械排渣,都属于不连续排渣,易存在死角,排渣效率偏低。

鉴于此,笔者采取以下措施,在竖井掘进机施工中实现流体(气体或液体)反循环洗井(图1),具体措施包括:

(1)通过在刀盘上方增设密封盘或密封装置,在竖井掘进迎头形成密封舱;密封舱内可注入有一定压力的流体,为洗井流体的反循环创造条件。

(2)在刀盘上设置一圈或多圈均匀布置的射流口,使得洗井介质以射流形式直接冲洗工作面;射流口数量、位置、截面、角度可调。通过把洗井介质由自然流入改为高速射流,可提高对井底岩屑的径向搬运效果。

(3)在排渣管内设置引射流装置,引射流口的数量、位置、角度等可调。利用引射效应,可提高排渣管内洗井介质的流动速度,加速岩屑排出。

基于上述思路提出的流体洗井系统如图1所示,刀盘密封装置、射流装置、引射装置集成在竖井掘进机上,利用刀盘密封装置形成井底密闭空间,利用射流装置注入有压气体或液体并沿一定角度冲洗井筒工作面,加速岩屑向排渣口汇集;利用引射装置,加速

岩屑从排渣管内排出。

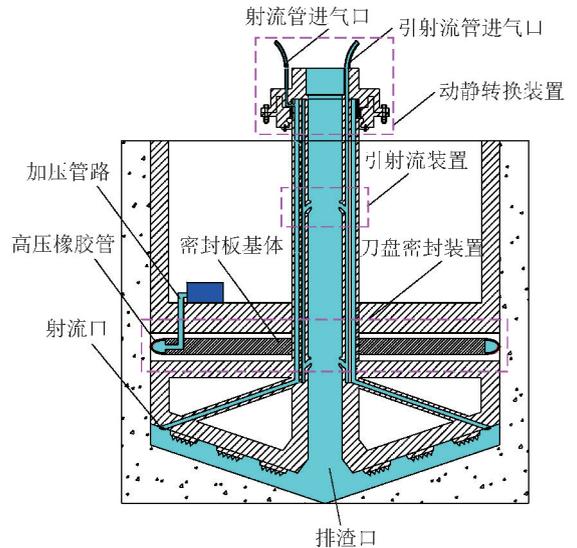


图1 竖井掘进机流体洗井系统

Fig. 1 Fluid flushing system for vertical shaft boring machine

在洗井排渣过程中,排渣管内径、射流口个数、角度、内径等几何参数和刀盘转速、射流入射速度等可能对洗井排渣效果有较大的影响,因此,本文主要对这些因素开展数值模拟研究,以得到不同因素的影响规律。

2 纯空气流场参数优化数值模拟

2.1 典型参数的选取

2.1.1 “硬件参数”的选取

“硬件参数”即几何参数,根据拟建立的基本模型并结合实际工况选取典型参数(表1),图2为典型参数的示意。

表1 基本模型典型参数

Table 1 Typical parameters of the basic model

典型参数	取值	典型参数	取值
D_1/m	8	R_1	$D_1/16$
D_2/m	0.2	R_2	$0.425D_1$
D_3/m	0.4	$\alpha_1/(^\circ)$	10
D_4/m	0.1	$\alpha_2/(^\circ)$	15
H/m	10	$\alpha_3/(^\circ)$	30
h_1/m	0.2	r/m	0.2
h_2	$0.5H$		

2.1.2 “软件参数”的选取

(1)射流口入射速度 v_1 : 根据泥浆洗井时岩渣粒径与临界速度公式,推算出空气洗井时携带 2 cm 大小的岩屑颗粒,所需空气最小上返速度约为 3 m/s,在其他参数取典型参数的前提下,利用数值模拟试算

可得射流口入射速度 v_1 应大于 8 m/s , 因此取入射速度的典型参数为 10 m/s 。

(2) 刀盘旋转的角速度 ω : 目前已知竖井掘进机及参考盾构机旋转速度为 $0 \sim 6 \text{ r/min}$, 经数值模拟试算发现, 随着刀盘旋转速度的增大, 对井底空气流场的影响逐渐增大, 且当 $v = 10 \text{ m/s}$ 时, ω 至少大于 3 r/min , 有较明显的影响, 因此为模拟刀盘旋转的影响, 取 $\omega = 5 \text{ r/min}$ 。

(3) 入射口空气总流量 Q : 根据入射速度和典型参数计算可得空气总流量约为 $7\,200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

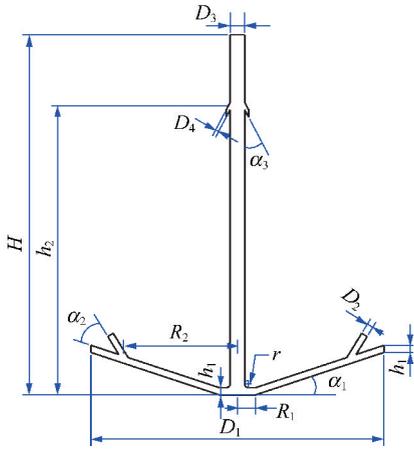


图 2 基本模型几何尺寸示意

Fig. 2 Model geometric size schematic diagram

2.2 基本模型与数值计算方案

在本节研究中暂时不考虑空气和颗粒间的相互作用, 仅考虑纯空气流场。根据空气洗井时雷诺数的大小可判断出, 空气洗井流场分析时为湍流分析^[16], 其他假定条件为排渣管与井眼同心、整个空气流场的流动为变截面流动等。

如图 3 所示, 取整个流体区域进行建模, 利用 ANSYS Workbench 中 Design Model 模块进行建模, 为了模拟刀盘的旋转, 将模型分为射流口、排渣管和井底空间 3 个部分, 然后分别利用 Meshing Automatic Method、Patch Independent 两种方法进行网格划分(图 4), 并对射流口部位进行加密, 之后进行网格质量检查, 最后进行试算, 以排渣管中轴线的空气流速和压力等为指标, 进行网格独立性验证(加密网格至评价指标没有较明显变化或对计算分析结果不造成影响, 认为网格独立)。

最后使用 FLUENT 进行正式计算, 主要求解设置为: 首先将模型设置为 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型, 其数学方程: $k = 1.5 (ul)^2$, $I = 0.16 (Re)^{-0.125}$, $\varepsilon = C_\mu^{0.75} k^{1.5} \times (0.07L)^{-1}$ (其中 I 为湍流强度, L 为水力直径), 然后依次进行材料属性 (air)、边界条件 (设置速度入口、自由流出口) 和流体域属性设置 (设置射流口部分

以固定速度绕 Z 轴旋转, 并设置交界面), 接着进行初始化和运行求解设置, 最后设置残差监视窗口、开始计算。

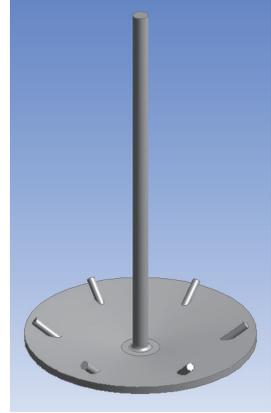


图 3 几何模型

Fig. 3 Geometric model diagram

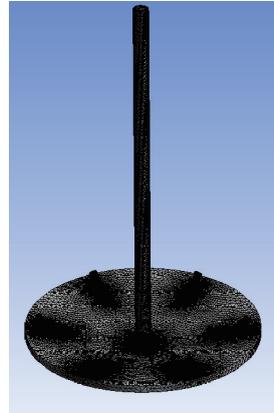


图 4 几何模型网格划分

Fig. 4 Geometric model grid partition

2.3 单因素数值计算分析

本节单因素数值模拟主要利用纯空气单相流模拟井底流场, 在典型参数的基础上, 通过改变单因素变量, 分析该因素对井底、排渣管内流场的影响, 最终得到 1 组效果相对最优的参数组合。

主要变量参数为: 井底净空高度 h_1 、刀盘与井底的夹角 α_1 、排渣管内径 D_3 、射流口直径 D_2 、个数 n 、角度 α_2 、引射流距井底高度 h_2 、角度 α_3 、内径 D_4 。为简化计算, 在进行引射流因素分析之前, 暂不考虑引射流影响。

2.3.1 单因素分析举例—井底净空高度

根据几何尺寸估计和数值模拟试算, 井底净空高度 h_1 选取 $0.1 \sim 0.3 \text{ m}$ 共 5 个水平分别进行数值模拟计算。利用 FLUENT 进行数值计算时, 除井底净空高度 h_1 外, 其他参数按典型参数取值建模, 依次进行网格划分方法、模型设置、边界条件、初始化等, 进行计算求解。

计算完成后,将模型分为排渣管内部空间和刀盘底部空间2部分,对于排渣管内部空间,取XZ平面上的直线 $x=0, 0.16, z=0.5, 8$,对于刀盘底部空间,分别取其在XZ, YZ平面上投影的中线 L_1, L_2 ,分析流速、压力在这些直线上的分布情况,在整体模型和排渣管底部的水平中心平面 $plane1(Z=0.5h_1)$ 上导入速度矢量图对比分析井底流场。同时为了分析时更简便有效,将坐标系转化为柱坐标系,把速度分解,则水平旋转速度分量可表示为切向速度分量 v_φ ,向中心汇聚速度分

量为径向速度分量 v_r 、竖直向上速度分量 v_z 。

(1)排渣管内部空间。如图5所示,在直线 $x=0$ 上,随着井底净空高度 h_1 的增大,切向速度分量有轻微减小的趋势,竖直向上速度分量及压力均有明显增大趋势;在直线 $x=0.16$ 上,随着井底净空高度 h_1 的增大,切向速度分量有明显增大趋势,竖直向上速度分量及压力有轻微增大的趋势。

如图6所示,在直线 $z=0.5$ 上,随着井底净空高度 h_1 的增大,切向速度分量有明显增大的趋势,竖直

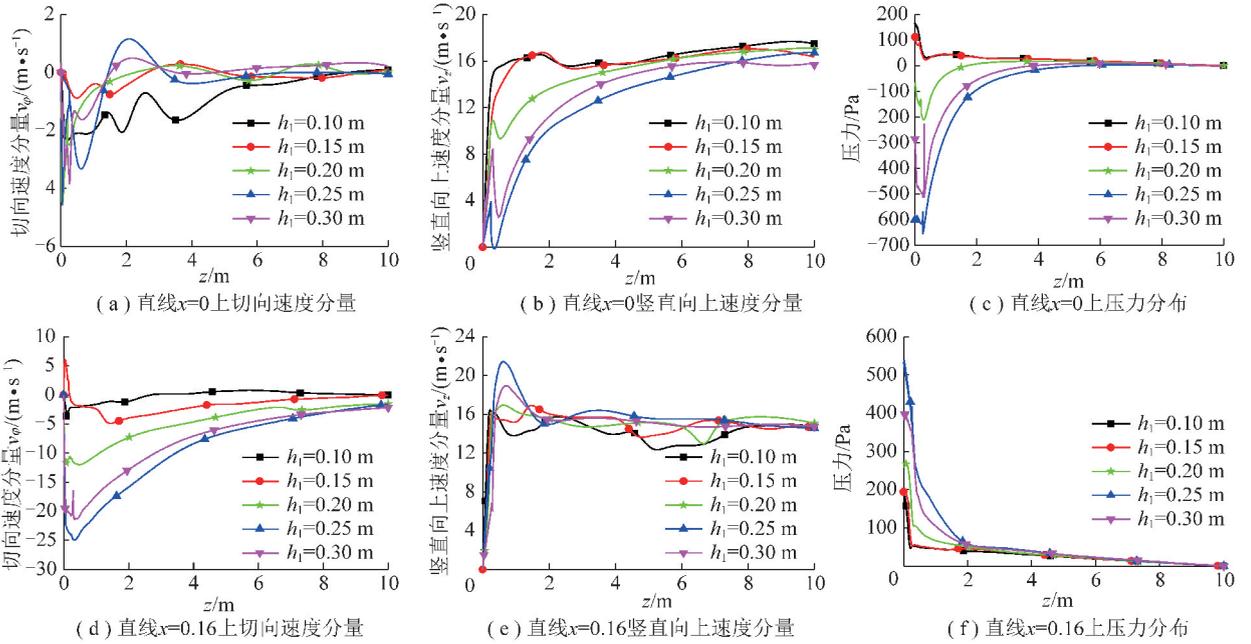


图5 排渣管内部空间直线 x 上纵向流速、压力对比

Fig. 5 Diagram of longitudinal flow rate and pressure in slag pipe line x

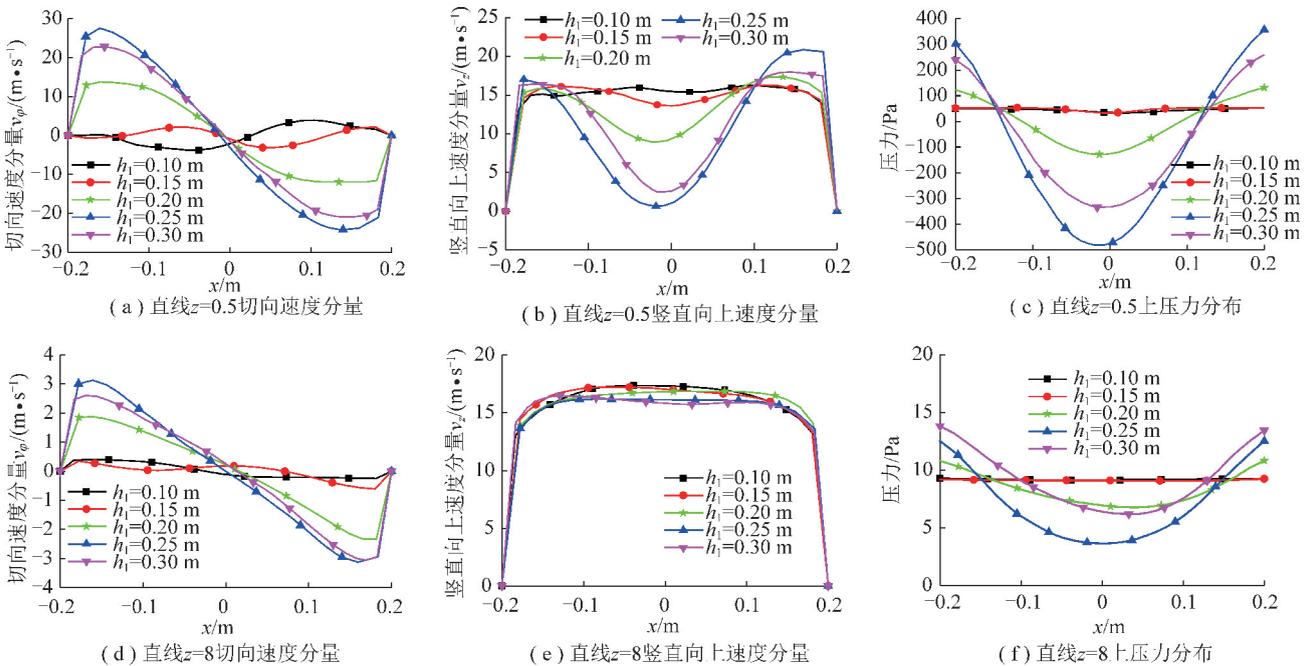


图6 排渣管内部空间直线 Z 上径向流速、压力对比

Fig. 6 Comparison diagram of radial flow rate and pressure in slag discharge pipe line Z

向上的速度分量及压力均呈现出排渣管中心附近明显减小,两侧轻微增大;在直线 $z=8$ 上,随井底净空高度 h_1 的增大,切向速度分量仍有明显增大的趋势(但都明显小于 $z=0.5$ 上的,说明随高度的增加,排渣管内气流的旋转逐渐减弱),竖直向上的速度分量没有明显变化,压力呈现出排渣管中心附近明显减小,两侧轻微增大。为了使水平旋转的切向速度分量更小,竖直向上速度分量更大,使流场更有利于排渣,对于排渣管内部空间,井底净空高度 h_1 越小越好。

(2) 刀盘底部空间。如图 7 所示,在直线 L_1, L_2 上,随着井底净空高度 h_1 的增大,切向速度分量明显增大,压力呈现出排渣管中心附近减小,两侧增大,向

中心汇聚的径向速度分量逐渐减小;为了使水平旋转的速度分量更小,使流场更有利于排渣,仅按此因素考虑,井底净空高度越小越好。

如图 8,9 所示,通过速度矢量图对比可得:随着井底净空高度增大,井底高速区所占面积逐渐减小,井底涡流呈现逐渐增大趋势,为排除涡流过大造成井底中心紊流区过大的影响,以及井底流速越大越好的需要, h_1 越小越好,但考虑到与实际工程相结合,比如刀盘上刀具的高度以及过小时可能会导致排渣管入口堵塞等问题,因此选取在一定程度上较小的井底净空高度。因此,综合分析可认为:井底净空高度 $h_1=0.2\text{ m}$ 为 5 个水平中最优值。

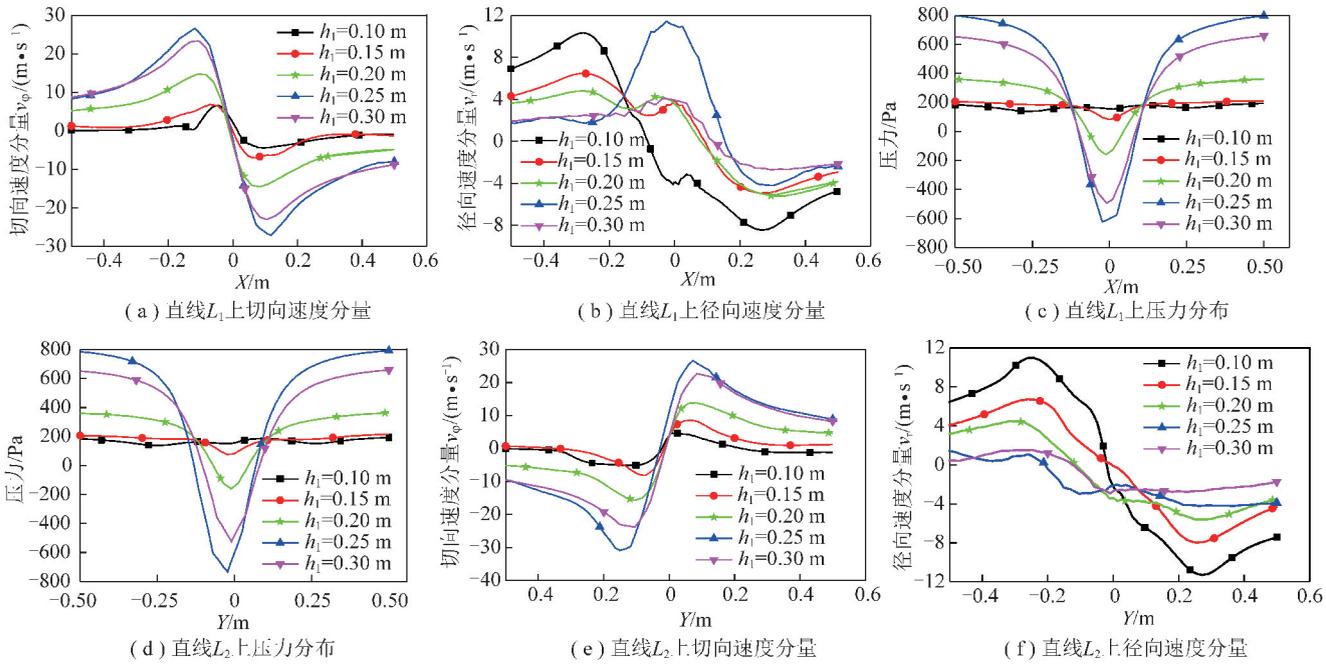


图 7 刀盘底部空间直线 L_1, L_2 上流速、压力对比

Fig. 7 Comparison diagram of flow rate and pressure on the bottom space line L_1, L_2

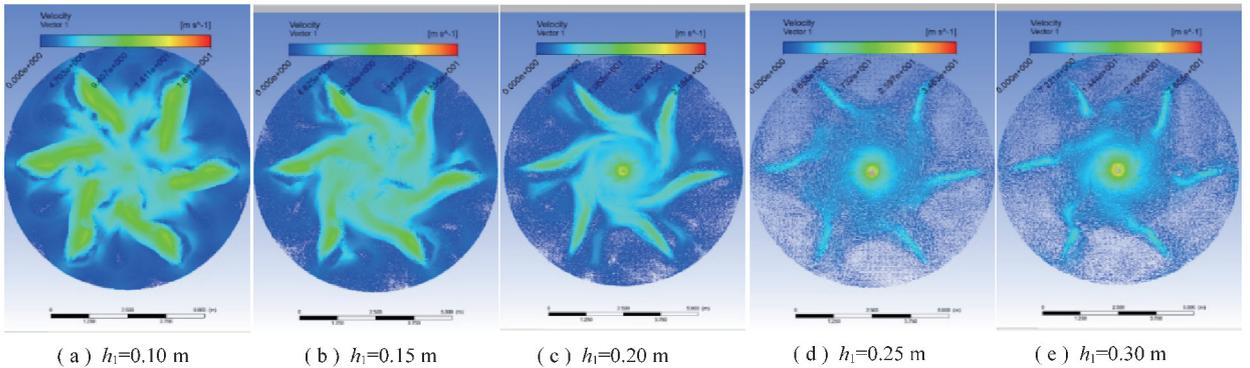
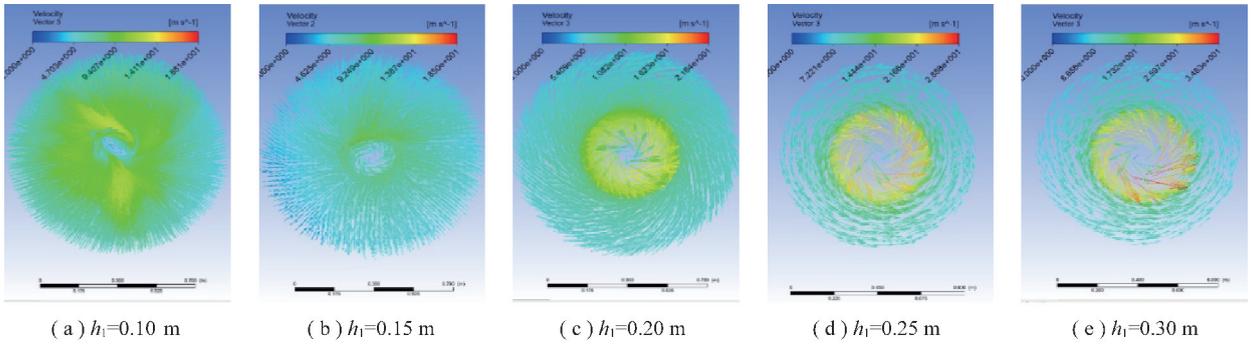


图 8 刀盘底部整体模型速度矢量图(仰视)

Fig. 8 Velocity vector diagram of the overall model at the bottom of cutter head

图 9 $Z=0.5h_1$ 平面速度矢量图(正视)Fig. 9 $Z=0.5h_1$ plane velocity vector graph (Orthographic view)

2.3.2 其他因素数值计算分析结果

其他因素计算分析过程类似,不再一一列举,分析结果见表 2,其中引射流距井底高度和引射流角度在纯空气流场中未分析出最优值。

表 2 单因素数值计算分析结果

Table 2 Single factor calculation and analysis results

参 数	最优值
井底净空高度 h_1/m	0.2
刀盘与井底的夹角 $\alpha_1/(\circ)$	15
排渣管内径 D_3/m	0.4
射流口内径 D_2/m	0.2
射流口个数 n	5
射流口角度 $\alpha_2/(\circ)$	15
引射流内径 D_4/m	0.2
引射流距井底高度 h_2/m	—
引射流角度 $\alpha_3/(\circ)$	—

2.4 正交试验分析

在单因素分析结果的基础上,舍弃不便控制为单因素变量的射流口个数和内径 2 个因素,取其余 5 个因素,每个因素选取 5 个水平(因素分析时至少选取 3 个水平,为使计算结果更准确,同时避免工作过大,选择 5 个水平),选用 $L_{25}(5^5)$ 的正交试验表,共 25 组模型,进行正交试验,计算完成后分别对井底 $Z=0.5h_1$ 平面的平均流速和排渣管内总压降进行极差分析,得到各个因素的影响大小。

(1)对 $Z=0.5h_1$ 平面平均流速不同因素的影响大小为:排渣管内径 D_3 >井底净空高度 h_1 >井筒直径 D_1 >射流口角度 α_2 >刀盘与井底夹角 α_1 。

(2)对排渣管内总压降不同因素的影响大小为:排渣管内径 D_3 >井筒直径 D_1 >井底净空高度 h_1 >刀盘与井底夹角 α_1 >射流口角度 α_2 。

3 气固两相流井底流场数值模拟

在纯空气参数优化数值模拟的基础上,加入岩屑颗粒,进行气固两相流的数值模拟,主要求解设置为:气固两相流模型选用 Euler-Lagrange 模型,将岩屑颗粒假定为等径(d_1)的均匀球体,并将其设置为离散相,以破岩面为入口,以 0.66 m/h 的速度进入流体区域,模拟岩屑的产生,并依次对岩屑的质量速率(结合岩屑的粒径、密度、破岩面面积进行计算)、颗粒黏度等进行设置,其他边界条件、气相材料属性等与纯空气流场相同。

选取岩屑粒径 d_1 、洗井高度 H 和入口空气流量 Q 三个因素进行洗井流场数值模拟,并对计算结果进行对比分析,分析不同因素对洗井排渣的影响,分析评价指标选取岩屑累计排出质量、清渣率(排出岩屑质量/总岩屑质量)、携渣率(排出岩屑的体积/总吸入空气体积)。

3.1 岩屑粒径

将岩屑简化为大小均等的球体颗粒,结合实际工况,颗粒粒径 d_1 选取 0.005~0.025 m 五个水平。通过对比分析结果如图 10 所示。可以发现,随着岩屑粒径的增大,岩屑排出的时间相对越来越晚,排出岩屑的总质量越来越小,岩屑排出的质量速率也逐渐减小;清渣率和携渣率也随着颗粒粒径的逐渐增大呈逐渐减小的趋势,但其中 0.005,0.010 m 粒径没有较明显的差别。因此可知,随着岩屑粒径的增大,洗井排渣效果逐渐变差,同时存在临界值,岩屑粒径小于该值时,排渣效果几乎相同。

3.2 排渣高度

为验证系统洗井排渣能力以及洗井高度的影响,洗井高度 H 选取 10~50 m 五个水平。对比分析图 11 可得,当入射口空气速度达到一定值时,在一

定范围内,随着洗井排渣高度的增大,除岩屑初始排出时间相对变晚之外,排出的岩屑质量、排出岩屑的质量速率,以及清渣率、携渣率没有较明显的差别。因此在一定范围内,洗井高度对洗井排渣效果没有较大的影响。

3.3 入口流量

参考纯空气模拟结果以及工程实际,并结合数值模拟试算,发现在其他参数确定不变的条件下,5 m/s 为入射临界速度 ($Q=3\ 600\ \text{m}^3/\text{h}$),小于 5 m/s 时会导致岩屑堵塞排渣管,导致计算无法完成,因此入射

口空气流量 Q 选取 3 600, 5 400, 7 200, 9 000, 10 800 m^3/h 五个水平。

对比分析图 12 可得,随着入口空气流量的增大,累计排出岩屑的质量、排出岩屑的平均质量速率逐渐增大,清渣率也随着入口空气流量的增大而增大,且与入口流量呈线性关系,而携渣率随着入口流量的增大呈指数性降低。因此,入口空气流量存在一个最优值,可同时满足清渣率较高和携渣率也较高,即在基本可以清除最多的岩屑的同时,使用的空气体积最小。

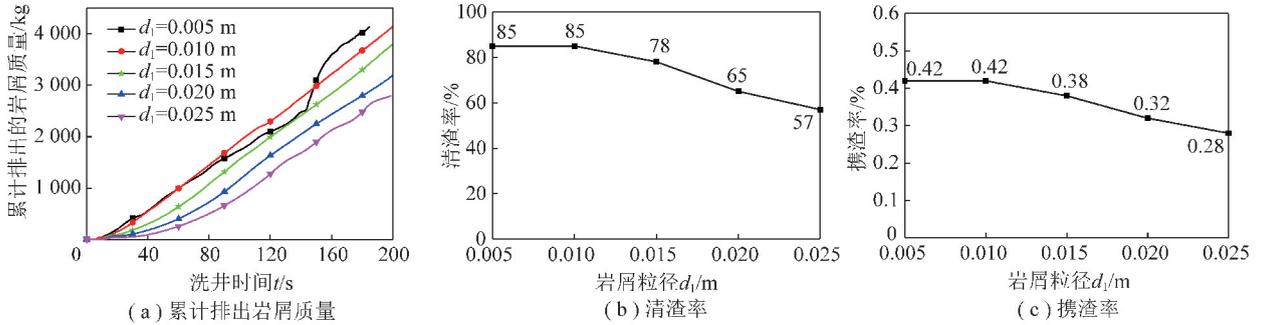


图 10 不同岩屑粒径排渣效果对比

Fig. 10 Contrast diagram of slag removal effect of different cuttings size

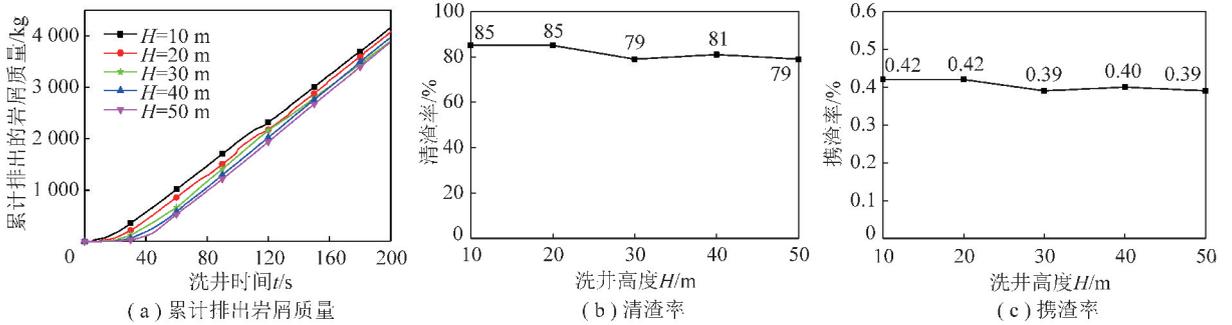


图 11 不同洗井高度排渣效果对比

Fig. 11 Contrast diagram of slag discharge effect at different well cleaning heights

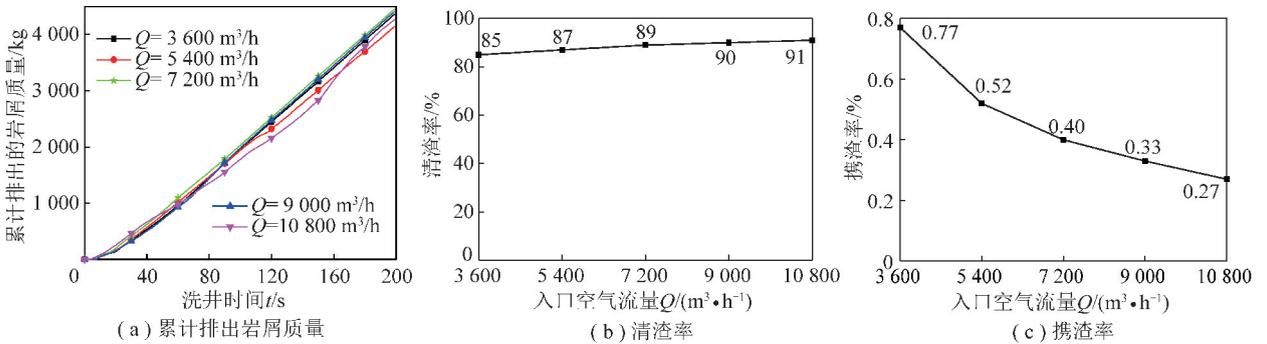


图 12 不同入射口速度排渣效果对比

Fig. 12 Contrast diagram of slag discharge effects at different inlet velocity

4 相似模型实验验证

根据相似理论,首先推导出了竖井掘进机空气洗

井问题的相似准则;结合基本实验条件,取几何相似缩比为 1:20,开展了竖井洗井系统的相似模化设计。模型试验的主要原型参数和模化后的模型参数,见表 3。

根据模型参数设计加工了模型试验台,使其可同时满足模拟岩屑产生、模拟射流以及模拟刀盘旋转的需要。气源选取空气压缩机,并加装调压阀和流量计,使其可精确调节入口空气流量。因岩屑密度的相似缩比为1:1,选取密度为 $2\ 600\text{ kg/m}^3$ 的彩砂来模拟岩屑,粒径按照相似缩比进行选取。

表3 空气洗井问题的原型与模型参数

Table 3 Prototype and model parameters of air-flushing problem

参 数	原型取值	模型取值
钻井直径 D_1/m	8	0.40
排渣管直径 D_3/m	0.40	0.02
井底净空高度 h_1/m	0.20	0.01
射流口直径 D_2/m	0.20	0.01
岩屑颗粒直径 d_1/mm	5~50	0.25~2.50
排渣高度 H/m	1~100	0.5~5.0
入口空气流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	3 600~10 800	2~6
岩屑密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 600	2 600
刀盘与井底的夹角 $\alpha_1/(\text{°})$	15	15
射流口角度 $\alpha_2/(\text{°})$	15	15
射流口个数 n	6	6

针对岩屑粒径、入口流量等参数进行单因素洗井排渣模型实验,并将实验结果与数值模拟进行对比验证:

(1)岩屑粒径。不同岩屑粒径下排出岩屑的质量规律基本相同且符合相似比,排出质量均随着粒径的增大逐渐降低;清渣率和携渣率略有不同,虽然同样随着粒径的增大而逐渐降低,但数值模拟近似呈线性降低,而模型实验呈指数性降低;同时不同粒径的临界流量随着粒径增大呈指数性增大。

(2)排渣高度。模型实验与数值模拟相比,不同排渣高度下的排出岩屑质量时间规律、清渣率和携渣率规律基本相同且符合相似比,即随着排渣高度的增大,除岩屑初始排出时间相对变晚之外,排出的岩屑总量、排出岩屑的质量速率,以及清渣率、携渣率没有较明显的差别。

(3)入口流量。模型实验与数值模拟相比,不同入口流量下排出岩屑的质量时间和携渣率规律大致相同且符合相似比,但略有不同的是:模型实验中,当入口流量增大至可使岩屑稳定排出之后,再增大入口流量,排出岩屑总量基本不再增加,即清渣率基本保持稳定不再增大。

因篇幅所限,模型试验研究的具体内容将另文介绍。

5 结 论

(1)通过单因素数值分析,得到了8个参数的最优值:刀盘与井底的夹角为 15° 、井底净空高度为0.2 m、井筒直径为8 m、排渣管内径为0.4 m、射流口内径为0.2 m、射流口个数为5个、射流口角度为 15° 、引射流内径为0.2 m。

(2)通过多因素正交分析,得到了在井底中心平面平均流速、排渣管内总压降2种指标下,对井内流场影响最大的参数为排渣管内径,影响最小的为刀盘与井底夹角和射流口角度。

(3)通过气固两相数值模拟,发现:在一定条件下,对于竖井掘进机空气洗井的排渣效果,岩屑颗粒粒径呈负相关,入射口空气流量呈正相关,而洗井高度则没有太大的影响。

(4)利用自行研制的模型试验台,初步开展了几何缩比1:20条件下的竖井掘进机空气洗井效果的相似模型实验。模型实验初步验证了数值分析所得规律的可靠性;但清渣率、携渣率随着岩屑粒径增大的降低规律等略有差异。

参考文献 (References):

- [1] 田兰勋. 241SB-184型竖井掘进机[J]. 矿山机械, 1979(3):25-32.
TIAN Lanxun. 241SB-184 shaft boring machine [J]. Mining Machinery, 1979(3):25-32.
- [2] 张祀勇. 20-24FT竖井钻机[J]. 水利电力机械, 1987(6):53-55.
ZHANG Siyong. 20-24ft vertical drilling rig [J]. Hydraulic and Electric Machinery, 1987(6):53-55.
- [3] 梅宁. 海瑞克公司撑靴式立井掘进机SBM[J]. 建井技术, 2014(4):7-7.
MEI Ning. Herrick boot-mounted shaft boring machine SBM [J]. Well Construction Technology, 2014(4):7-7.
- [4] 梅宁. 截削式立井掘进机SBR首试成功[J]. 建井技术, 2014, 35(3):6-6.
MEI Ning. The first trial of the truncated shaft boring machine SBR was successful [J]. Well Construction Technology, 2014, 35(3):6-6.
- [5] 刘志强,洪伯潜,龙志阳. 矿井建设科研成就60年[J]. 建井技术, 2017, 38(5):1-6.
LIU Zhiqiang, HONG Boqian, LONG Zhiyang. 60 years of scientific achievements in mine construction [J]. Well Construction Technology, 2017, 38(5):1-6.
- [6] 刘志强. 竖井掘进机凿井技术[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2018:35-36.
- [7] 张永成,孙杰,王安山. 钻井技术[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2008:457-458.
- [8] 张永成,史基盛,王占军. 钻井施工手册[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2010:287-288.

- [9] VEENHUIZEN S, D, CHINA R, KOLLEETC J. Ultra high pressure jet assist of mechanical drilling [A]. Presentation at the 1997 SPE/IADC Drilling Conference [C]. Amsterdam, 1997: 79-90.
- [10] KOLLE J, THEIMER A, et al. Coiled tubing jet drilling with a downhole intensifier [A]. Presentation at the 2008 SPE/ICOTA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition [C]. Texas, 2008: 1-10.
- [11] 仇恒彬. 气体循环介质井底流场数值模拟 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2009.
QIU Hengbin. Numerical simulation of bottom hole flow field of gas circulating medium [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009.
- [12] 管志川, 刘希圣. PDC 钻头条件下圆喷嘴撞击射流井底流场的数值模拟 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 1995, 19(5): 30-35.
GUAN Zhichuan, LIU Xisheng. Numerical simulation of the bottom hole flow field of a jet impinging on a circular nozzle with a PDC bit [J]. Journal of Petroleum University (Natural Science Edition), 1995, 19(5): 30-35.
- [13] 李轩. 高压喷射钻井井底流场模拟 [D]. 成都: 西南石油大学, 2013.
LI Xuan. Simulation of downhole flow field in high-pressure jet drilling [D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013.
- [14] 赵琳娜. 粒子钻井数值模拟与破岩机理研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2013.
ZHAO Linna. Numerical simulation and rock-breaking mechanism of particle drilling [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [15] 杨兴国. PDC 钻头井底流场研究 [D]. 青岛: 中国石油大学, 2008.
YANG Xingguo. Research on bottom hole flow field of PDC bit [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2008.
- [16] 过曾明. 大直径井孔钻进中空气洗井效果研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2008.
GUO Zengming. Study on the effect of medium air cleaning in drilling large diameter hole [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2008.