

液力驱动无绳索取心系统泥浆正反循环切换机构设计及其流体通道优化

马梓熠¹, 李之军^{1*}, 刘阔^{1,2}, 龙爱国³, 李越阳¹, 郭光鼎¹, 张浩¹

(1. 成都理工大学环境与土木工程学院, 四川 成都 610059; 2. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000;
3. 川庆钻探工程有限公司川东钻探公司, 重庆 401147)

摘要:为解决超长水平孔取心钻探效率低的问题,提出通过泥浆液力驱动完成内管总成的投送和回收的无绳取心钻进工艺。为此,本文设计了一种辅助内管投送与回收的孔口泥浆正反循环切换机构。该机构通过两个双通道球阀的相互配合,改变泥浆流动方向,就可实现正反循环的切换。通过ANSYS软件,对正反循环切换机构的L形双通道进行了仿真模拟,结果显示,流体通过L形通道后,高速流体只占总量的50%,流体经过球阀通道的压力降为1008.1 Pa,且靠近通道内侧的流体会产生大量紊流,产生了不同程度的回流。为此,将通道形状进行了优化,将原来的L形通道改为圆弧形通道,仿真模拟结果显示,流体通过圆弧形通道后,高速流体占总量的90%,流体经过球阀通道的压力降仅为105.3 Pa,且流体迹线整体平滑,仅有少量流体发生回流。优化后的流体通道,有效降低了水头压力损耗,保证了流体的稳定运移。

关键词:水平孔;无绳索取心;正反循环切换;液力驱动;流体通道优化;隧道勘察

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)S1-0150-08

Design of slurry forward/reverse circulation switching mechanism and optimization of its fluid channel in hydrodynamic-driven cordless coring system

MA Ziyi¹, LI Zhijun^{1*}, LIU Kuo^{1,2}, LONG Aiguo³, LI Yueyang¹, GUO Guangding¹, ZHANG Hao¹

(1. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China;
2. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China;
3. Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd. Chuandong Drilling Company, Chongqing 401147, China)

Abstract: In order to solve the problem of low efficiency of core drilling in ultra-long horizontal holes, a cordless core drilling process is proposed to complete the delivery and recovery of the inner tube assembly by mud hydraulic drive. To this end, this paper designs a positive/reverse circulation switching mechanism for the borehole mud that assists the delivery and recovery of the inner tube. This mechanism can realize the positive/reverse circulation switching by changing the mud flow direction through the mutual cooperation of two dual-channel ball valves. Through the ANSYS software, the L type double channel of the positive/reverse circulation switching mechanism is simulated, and the results show that after the fluid passes through the L type channel, the high-velocity fluid only accounts for 50% of the

收稿日期:2024-07-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.S1.022

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“智能化岩心钻探装备升级与应用示范”(编号:DD20211421)

第一作者:马梓熠,男,汉族,1998年生,硕士研究生在读,地质资源与地质工程专业,主要研究方向为岩土钻掘技术及现场应用,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,201170378@qq.com。

通信作者:李之军,男,汉族,1984年生,副教授,地质工程专业,博士,主要研究方向为岩土钻掘新技术与新材料,四川省成都市成华区二仙桥东三路1号,lizhijun2014@cdut.edu.cn。

引用格式:马梓熠,李之军,刘阔,等.液力驱动无绳索取心系统泥浆正反循环切换机构设计及其流体通道优化[J].钻探工程,2024,51(S1):150-157.

MA Ziyi, LI Zhijun, LIU Kuo, et al. Design of slurry forward/reverse circulation switching mechanism and optimization of its fluid channel in hydrodynamic-driven cordless coring system[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(S1): 150-157.

total amount of fluid, and the pressure drop of the fluid through the ball valve channel is 1008.1Pa, and the fluid near the inside of the channel will produce a lot of turbulence, resulting in different degrees of backflow. For this reason, the shape of the channel was optimized, the original L channel was changed to a circular channel, simulation results show that the fluid through the circular channel, high-speed fluid accounted for 90% of the total amount of fluid through the ball valve channel pressure drop is only 105.3Pa, and the fluid trace overall smooth, only a small amount of fluid reflux occurred. The optimized fluid channel is effective in reducing the pressure drop through the ball valve. The optimized fluid channel effectively reduces the head pressure loss and ensures the stable transportation of the fluid.

Key words: horizontal hole; cordless coring; switching between forward and reverse loops; hydraulic drive; fluid channel optimization; tunnel investigation

0 引言

M铁路是我国西部重要省份对外运输通道的重要组成部分,是引导产业布局、促进沿线国土开发、整合旅游资源的黄金通道,也是巩固国家边防安全的重要战略通道^[1]。M铁路沿线自然环境恶劣,山高谷深,地形高差大,构造极其发育,岩性复杂,基础设施薄弱,沿线桥隧众多^[2-3],隧道长、埋深大^[4]。其中最为复杂的某线路段,共有隧道72座,隧道全长838.253 km,含特长隧道35座、累计长度达730 km,隧线比高达83%,这大大增加了地质勘察的复杂性和重要性^[5]。目前,地表垂直孔勘探仍然是国内铁路勘察中普遍采用的方法,但如遇高山、峡谷陡峻地形、河道等地区,容易造成设备搬迁困难、取样信息有限、地质情况反应不全等一系列问题^[6]。若采用水平定向勘察技术,在隧道傍山段或沟谷内布置水平钻孔,沿着隧道洞身段进行水平

孔取心钻进,能够直观获取深部岩体样本,并可在深孔内开展相关原位测试工作,获取最准确最直观的地质参数信息^[7-10]。

目前,在需要全孔取心的水平孔中,较为常见的取心方式为绳索取心^[11]。该方法是在原有的垂直孔绳索取心钻具和打捞矛上加装密封圈,通过液力投送内管和打捞矛,绳索打捞内管的方式完成取心^[12]。然而,针对超长水平孔的钻探取心,传统绳索取心技术的工艺流程较为复杂,钻孔越深,取心时间占比越大,效率越低^[13-17]。

为了解决超长水平孔取心钻探效率低的问题,提出通过泥浆液力驱动完成内管总成的投送和回收的无绳索取心钻进工艺,即通过泥浆正循环将内管总成投送至孔底,泥浆反循环将内管总成回收至孔口。其工作原理如图1所示。

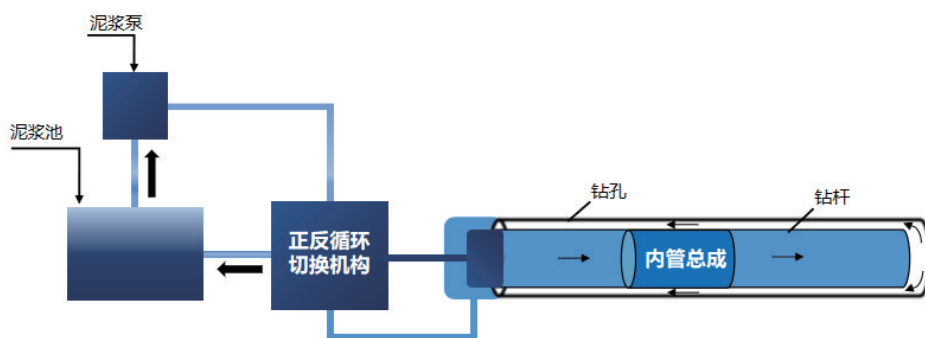


图1 液力驱动无绳索取心原理

基于以上原理,需要设计出一种辅助内管总成投送和回收的孔口泥浆正反循环切换机构,以满足根据实际工况随时切换泥浆正反循环的需要。

王尚卫等^[18]为解决水平井水力作业时反循环冲击力差和正循环液体携带能力差等问题,研制了水平井正反水力连续循环作业装置。该装置放置于井口,正、反循环方式切换时不需要更换换向井

口,只需根据循环方式重新连接井口接头和换向井口旁通的注水管线和接水管线即可。赵崇镇^[19]基于射流泵原理研制了修井液正反循环换向钻具,能够与钻杆旋转和螺杆钻具两种套磨铣修井工艺配套,达到正循环泵入、反循环套磨铣的目的。

从目前的研究成果来看,还没有适用于辅助液力驱动无绳索取心钻进系统的孔口泥浆正反循环

切换机构。因此,笔者设计出了一种仅需转动球阀即可切换泥浆的正反循环方式的切换机构,代替工程中频繁装卸管路来改变泥浆正反循环的过程,减轻工作强度,提高水平孔钻探取心效率。

1 结构设计

1.1 结构

孔口泥浆正反循环切换机构主要由球阀结构(图2a)和通水管道构成。从球阀结构剖面视图(图

2b)可以看出球阀内部有两条通路,通过旋转球心改变循环通路的走向。球心顶部与法兰盘操纵手柄形成刚性连接,内部嵌套密封圈、压紧栓,保证内部密封性。该机构可通过操纵手柄旋转内部球阀自由转换泥浆循环通路,方便、快捷的实现泥浆在正循环与反循环之间自由切换。同时,孔口仅有1个进水管和1个出水管,从而简化操作流程,减少辅助工作时间,提升取心效率。

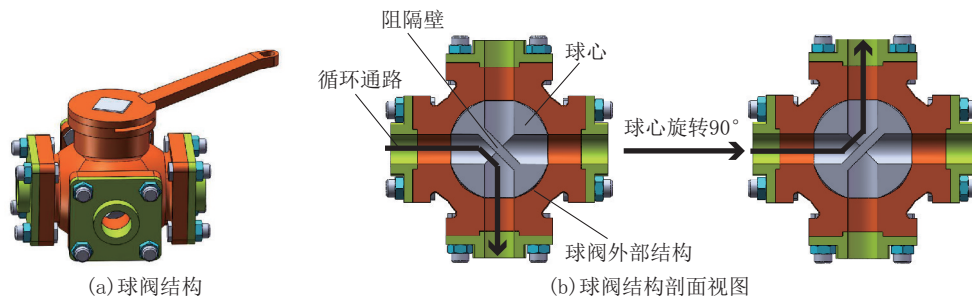


图2 孔口泥浆正/反循环切换机构

1.2 工作原理

从图3(a)可以看出,正循环钻进时泥浆从钻杆内部进入,推动内管总成向孔底运移。内管总成到位后,其内部通水口打开,循环通道通畅,泥浆顺利流至孔底,沿钻杆与钻孔之间的环状间隙流至孔

口。钻进回次完成后,仅需操纵法兰盘手柄将球阀旋转 90° ,泥浆通道即从正循环切换至反循环,如图3(b)所示,泥浆从环状间隙流至孔底,受内管阻滞作用,泥浆压力升高推动内管完成解卡并运移至孔口,完成内管总成的回收。

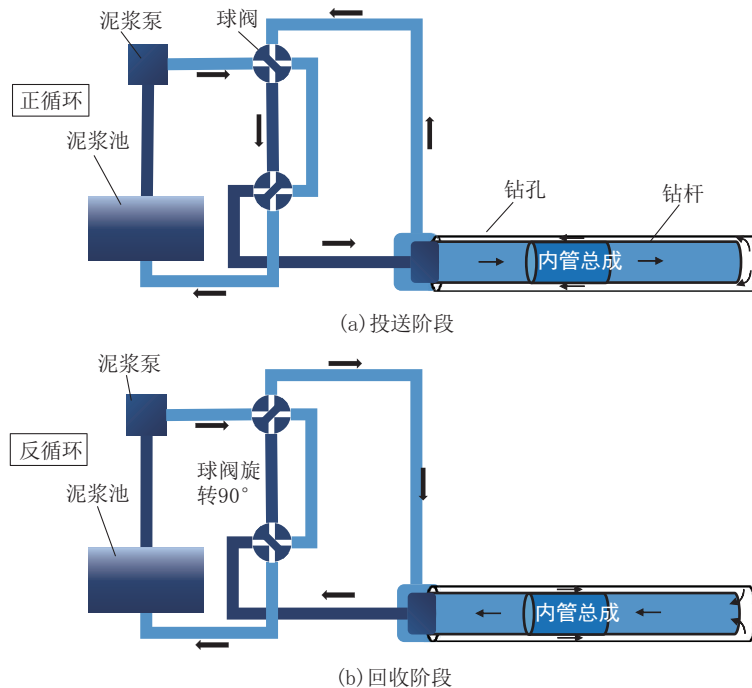


图3 孔口泥浆正反循环切换机构工作原理图

2 正反循环切换机构仿真分析及流体通道优化

孔口泥浆正反循环切换机构主要是由具有双通道球阀组成,双通道都呈L形,为验证其结构的可行性,对孔口泥浆正反循环切换机构中的双通道球阀进行流体仿真模拟,分析流体通过球阀内部通道的运动情况和水头损失情况。

2.1 流体力学理论基础

流体力学的研究对象分为液体和气体,现实中大多数流体都是非正常流体,因此本文在流体仿真中采用湍流模型进行模拟更为合适^[20-23]。

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \rho \epsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu_1 + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 E \epsilon - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\nu \epsilon}} \end{cases}$$

式中: C_1 、 C_2 、 σ_k 、 σ_ϵ ——经验系数; μ_t ——湍流动力粘度; ρ ——流体密度,kg/m³; ϵ ——湍流耗散率; k ——湍流的动能。

2.2 有限元模型建立

2.2.1 模型简化

流体流动是一个非常复杂的过程,为了提高模拟效率,减少模拟时间,凸显模拟目标,对流体流场的有限元模型作出如下假设:

(1)流体为连续不可压缩粘性流体;(2)流体流动过程中不考虑温度的变化;(3)不考虑流体内固相大颗粒对流动过程的影响;(4)假设流体充满内管入口通道。

2.2.2 有限元模型建立

由于是研究泥浆在经过球阀通道时的运动情况,其他部位对流体运动没有影响。因此,仅需对球阀内部两个通道进行分析。而两个通道形状完全相同,且对称排列,故只对其中一条通道进行分析。通路建模如图4所示。

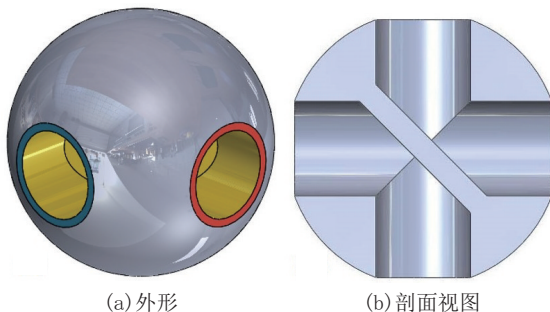


图4 球阀通道建模

湍流模型的常见计算方法有多种,且每一种模型的特点及适用方向都略有不同^[24-25]。Realizable k-Epsilon模型是基于标准k-Epsilon模型对因时均应变率特别大而导致可能出现负压应力的情况而做出符合物理定律的改进,适用于旋转均匀剪切流、包含有射流和混合流的自由流动,以及带有分离的流动^[26-27]。符合本文的数值模拟要求,因此,本文选择Realizable k-Epsilon模型进行数值模拟。

其数学表达式为:

以下为模型具体参数:

(1)设置边界:将图4(a)中蓝色面设置为进水口(inlet),红色面设置为出水口(outlet),泥浆流动经过的内壁(黄色区域)设置成wall。

(2)材料设置:材料设置成液体,设置液体密度 $\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$,粘度为0.01;湍流强度为5%。

(3)边界条件:工作条件设置为101325 Pa的标准大气压强下,根据《地质岩心钻探规程》(DZ/T 0227—2010),取泥浆泵量150 L/min,因此将泥浆流速设置为0.8 m/s,出水口设置为标准大气压强。流道壁面粗糙度设置为0.05 mm。水口直径为40 mm。

(4)网格划分:取单元网格最小尺寸为0.2 mm,最大尺寸为2 mm,对其自动划分网格,单元类型为多面体网格,如图5所示。

2.3 仿真结果分析

图6为流体的压力云图,图7为流入口A面、流

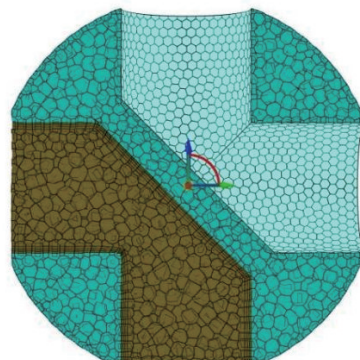


图5 模型网格划分

出口B面的压力云图。从压力云图中可以看出,流体流过转弯处前后的压力差异较大,流体流入口A面的平均压力为1005.9 Pa;在经过转弯处后,流体流出口B面的平均压力为-2.2 Pa。可以确定流体在经过斜面转弯处时造成了大量压力损失,经分析,这是因为流体分子在流经斜面时,流道的横截面积变小,流体分子的运动受阻,在转弯前区域堆积,造成了流入区域的压力增大,而流体在经过转弯区后,流道面积增大,导致压力急剧减小。因为直角的存在,致使其附近的区域不能立刻被流体充满,进一步降低了出口处的压力。这样可能会造成流体进入钻柱内会因流量不够,流体压力不足,难以推动内管,增加泥浆泵的负荷。

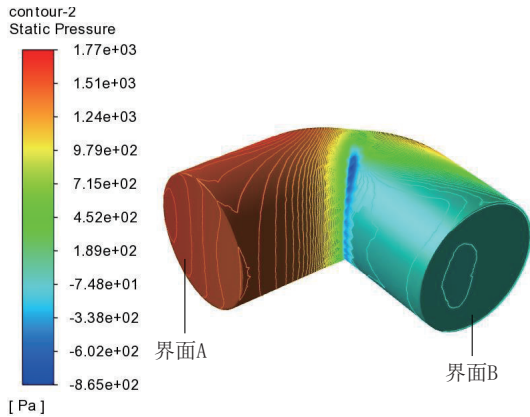


图6 液体压力云图

图8为流体的速度云图和出水口截面对称轴线 $m-n$ 的速度分布曲线图。从图中可以看出,流体经过流道转弯处后管道外侧速度最快,约为1.92 m/s;管道内侧速度最低,约为0.19 m/s。管道内壁流体流速均为零,经分析,这是因为粘性不可压缩流体在流经管道时具有粘度,紧贴壁面的流体因受到壁面固体分子力的作用而处于静止状态,随着流体离壁面距离的增加,流体的速度也连续增大。通过管道横截面可以分析出流速 >0.8 m/s 的流体只占约50%,流速 <0.8 m/s 的流体占约50%,且流速梯度较大,流速分布不均匀。

图9为速度矢量云图和流体迹线图。从速度矢量云图(图9a)可以看出,流体在撞击斜截面后会产生转向,仅有小部分的流体分子发生紊乱。而经过内侧 90° 转角处的流体会产生大量紊乱,流体分子运动方向混乱并相互碰撞。

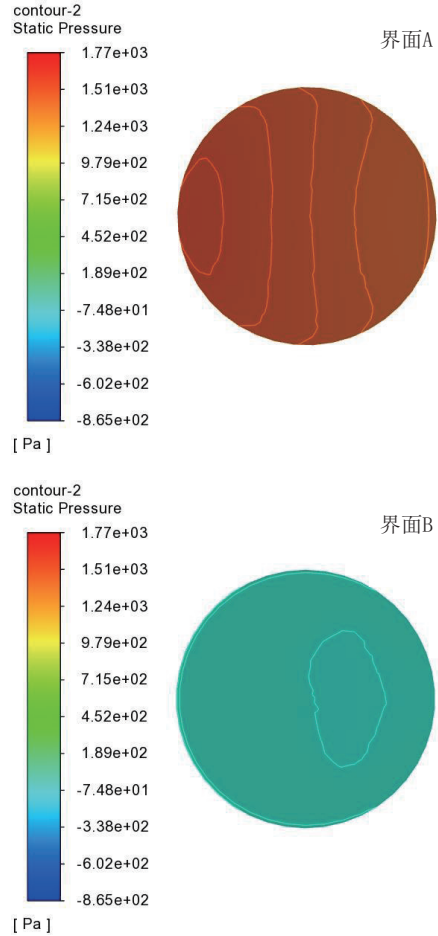


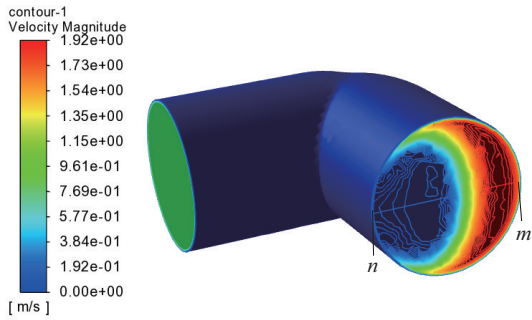
图7 A/B界面压力云图

从迹线图(图9b)可以看出,流体分子在到达转弯处时,部分流体分子撞击到通道内壁,造成流体内部紊乱,产生了不同程度的回流,回流的流体分子与后面运动的流体分子相互撞击,使流体分子运动速度下降,造成了大量水头损失。根据流体力学中的连续方程和能量守恒方程,流体的流速下降会造成动能减小,静压会根据动能的减小量补足动能,这就导致静压下降。

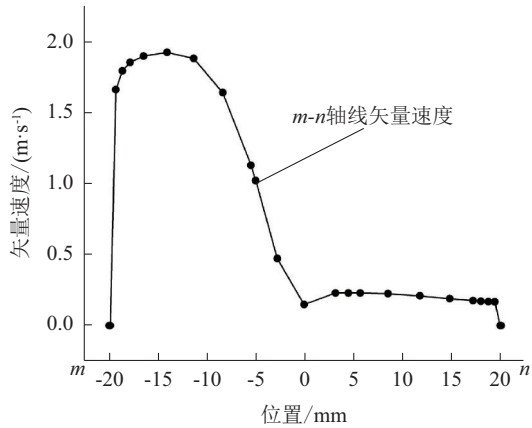
综合上述分析可知,这种形状的流道设计对流体运动影响极大,造成大量不必要的能量损失。因此,为了减小流体通过球阀门时产生的能量损失,应对球阀的流道进行优化。

2.4 孔口泥浆正反循环切换机构通道优化

图10(a)为改进后的球阀通道剖面视图,从图中可以看出改进后的通道与之前的通道相比更加光滑,转角处从L形壁面转变为椭圆形壁面,水口直径为32 mm。对改进后的通道进行网格划分(图10b),

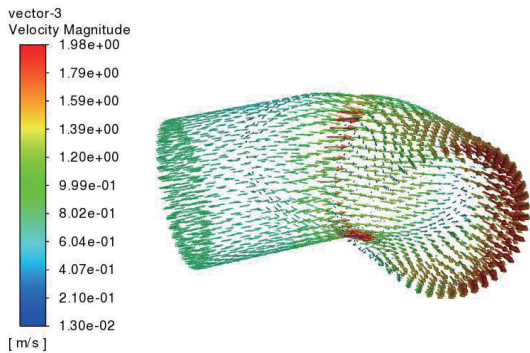


(a) 速度云图

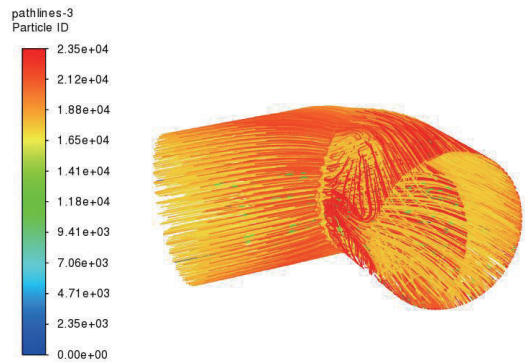


(b) 轴线速度分布

图 8 速度云图和 $m-n$ 轴线速度分布



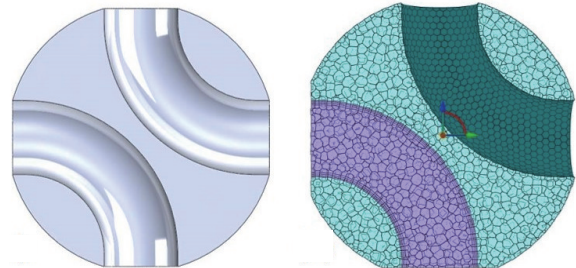
(a) 矢量



(b) 迹线

图 9 速度矢量图和流体迹线图

相关参数设置与优化前的结构的模拟参数一致。



(a) 三维模型

(b) 网格划分

图 10 改进后球心剖面视图和网格划分

通过仿真分析得出改进后的通道分析结果,图 11 为流体压力云图,图 12 为流入口 A 面、流出口 B 面的压力云图。从压力云图中可以看出,流体流过弧形通道前后的压力差异较小,流体未流过转弯处的压力,即流入口 A 面的平均压力,为 106.2 Pa,在经过转弯处后,即流出口 B 面的平均压力,为 0.9 Pa,压力损失较小。

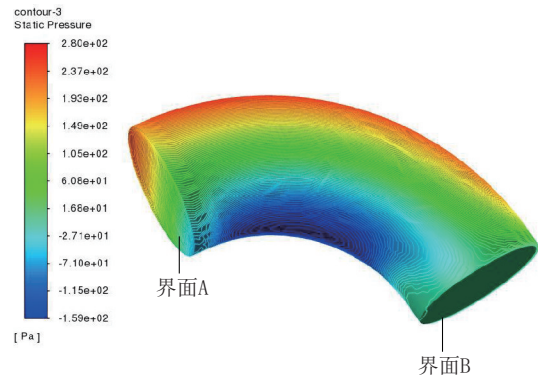


图 11 改进后的液体压力云图

图 13 为流体的速度云图和出水口截面对称轴线 $m-n$ 的速度分布曲线图。从图中可以看出,流体经过流道转弯处后管道外侧速度最快,约为 1.02 m/s;管道内侧速度最低,约为 0.10 m/s。管道横截面的流速分布较为均匀。通过管道横截面可以分析出保持高流速的流体占比达到 90%,仅有 10% 的流体流速较低。

图 14 为速度矢量云图和流体迹线图。从图中可以明显看出,流体迹线呈均匀分布且轨迹顺畅,仅有少量流体分子发生回流,说明流体经过此流路时,内壁的限位作用使流体顺滑转向,此过程中只产生轻微的粘性摩擦损失。相较于原 L 形通道显著

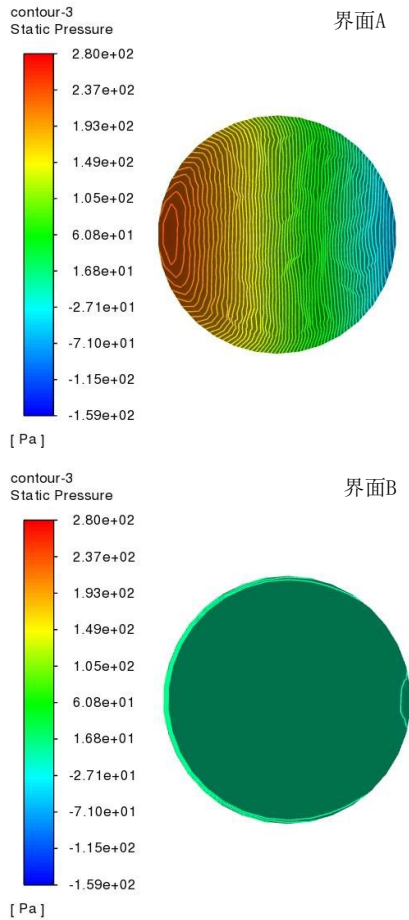


图12 改进后的A/B界面压力云图

减小了流体撞击倾斜内壁产生内部流体紊乱现象的发生,大幅提高了流体运动稳定性。

综上所述,改进后的球阀内部通道结构能有效降低流体的能量损失,保持流体正常流速。具体参数见表1。从表1中可以看出,在初始流体速度为0.8 m/s的条件下,原球阀中流体的最高速度可以达到1.92 m/s,优化后的球阀为1.02 m/s,说明流体在原始球阀中运动具有较高的流体动能。从最高流速流体占比可以看出,原始球阀内部流体流速变化大,流速分布不均衡;改进后球阀最高流速占比高达90%,说明流体流速分布较均衡,差异变化小。原球阀中的流体流过球阀通道后的压力降为1008.1 Pa,改进后的压力降仅为105.3 Pa,可以直观地看出改进后球阀相较于原球阀有效降低了水头压力损耗,保证了流体的稳定运移。由此可见,改进后的球阀结构优于原球阀。

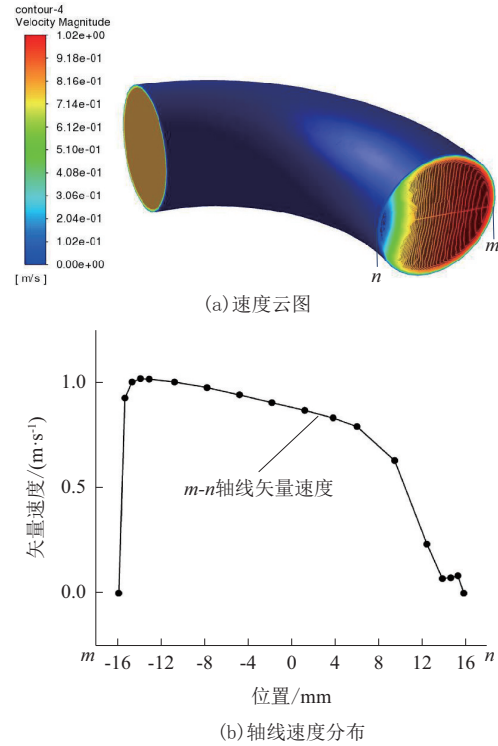
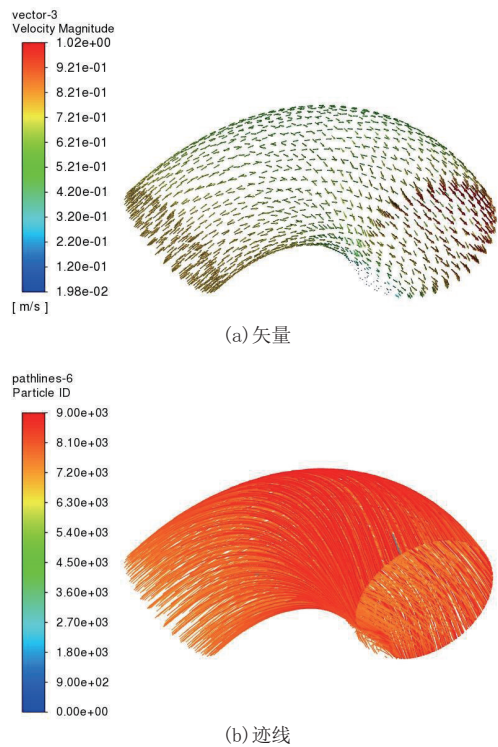
图13 改进后的速度云图和 $m-n$ 轴线速度分布

图14 改进后的速度矢量图和流体迹线图

3 结论

本文设计出了一种用于液力驱动无绳索取心钻进工艺的孔口泥浆正反循环切换机构,使用 AN-

表1 球阀通道优化前后参数对照

球阀通道	流体出水口最高流速/(m·s ⁻¹)	高流速流体占比/%	流体通过球阀通道的压力降/Pa
通道改进前	1.92	50	1008.1
通道改进后	1.02	90	105.3

SYS软件对流经正反循环切换机构的球阀的双通道结构进行仿真分析,并对流道进行结构优化。取得的结论如下:

(1)在流速为0.8 m/s条件下,初始结构中的流体通过球阀通路的压力降为1008.1 Pa,且流速较高区域仅占50%,流动轨迹较紊乱,部分流体发生回流现象。优化后,流体通过其球阀通道的压力降仅为105.3Pa,流速较高区域高达90%,流动轨迹通畅,仅有少量流体发生回流。

(2)通过对球阀通道形状的优化,有效降低了水头压力损耗,且流体的运移更加稳定流畅。

(3)随着钻探设备与技术向智能化方向发展,应进一步深化设计孔口泥浆正反循环切换机构,使其能够智能识别孔内情况并作出判断,自动切换泥浆正反循环状态。

参考文献:

- [1] 谢和平.“川藏铁路工程与环境”专栏前言[J].工程科学与技术,2021,53(3):1.
- [2] 杨德宏.川藏铁路成都至林芝段主要工程地质问题分析[J].铁道标准设计,2019,63(9):16-22,27.
- [3] 兰恒星,张宁,李郎平,等.川藏铁路可研阶段重大工程地质风险分析[J].工程地质学报,2021,29(2):326-341.
- [4] 田四明,巩江峰.截至2019年底中国铁路隧道情况统计[J].隧道建设(中英文),2020,40(2):292-297.
- [5] 田四明,王伟,李国良,等.川藏铁路隧道设计理念与主要原则[J].隧道建设(中英文),2021,41(4):519-530.
- [6] 向军文,陈晓林,胡汉月.定向造斜及水平钻进连续取心技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(9):33-36.
- [7] Liu X. Predicting tunnel groundwater inflow by geological investigation using horizontal directional drilling technology[J]. Advances in Civil Engineering, 2022,2022.
- [8] Ma B S, Cheng Y, Liu J G, et al. Tunnel accurate geological investigation using long distance horizontal directional drilling technology[J]. Tunn. Constr, 2021,41:972-978.
- [9] 王震,崔景川,彭文波,等.水平定向钻隧道地质勘察孔岩屑运

移与地层相关性研究[J].地质科技通报,2022,41(6):331-338.

- [10] 吴纪修,尹浩,张恒春,等.水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望[J].钻探工程,2021,48(5):1-8.
- [11] 马映辉,贾宏福,李成志,等.某铁路勘察近水平孔取心钻探施工技术[J].地质与勘探,2021,57(1):190-197.
- [12] 郝永进,赵江鹏.煤矿井下复杂地层近水平钻孔绳索取心钻进工艺试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(11):33-37.
- [13] 张伟,王达.影响单位进尺成本的因素及其影响规律研究[J].地质科技情报,2008(3):93-97.
- [14] 冉灵杰,何远信,宋殿兰.浅钻技术在宁夏青铜峡地区地质填图中的应用研究[J].地质与勘探,2019,55(1):187-193.
- [15] 肖华,刘建国,徐正宣,等.川藏铁路勘察超长水平孔绳索取心钻探技术[J].钻探工程,2021,48(5):18-26.
- [16] 李冰乐,王胜,袁长金,等.复杂山区水平绳索取心定向钻进聚合醇绿色防塌冲洗液研究[J].钻探工程,2023,50(6):85-91.
- [17] 胡郁乐,赵海滨,姚震桐.坑道定向钻进系统在隧洞水平勘探工程中的适应性分析[J].钻探工程,2023,50(5):116-124.
- [18] 王尚卫,梁万银,张雄涛,等.水平井正反水力连续循环作业装置的研制[J].石油机械,2016,44(6):92-95.
- [19] 赵崇镇.基于射流泵原理的修井液正反循环换向钻具[J].石油机械,2016,44(4):97-100.
- [20] Singh J P, Kumar S, Mohapatra S K. Modelling of two phase solid-liquid flow in horizontal pipe using computational fluid dynamics technique[J]. International journal of hydrogen energy, 2017, 42(31): 20133-20137.
- [21] Singh M K, Kumar S, Ratha D. Computational analysis on disposal of coal slurry at high solid concentrations through slurry pipeline[J]. international Journal of Coal Preparation and utilization, 2017.
- [22] 刘小年,刘燕云,刘豪,等.海上油田钻屑远距离传输摩阻计算研究[J/OL].化工科技,1-17.
- [23] 王锋,李宁.高地温施工隧道环境温度特征及通风参数优化研究[J/OL].地下空间与工程学报,1-9.
- [24] Xu D, Khoo B C, Leschziner M A. Numerical simulation of turbulent flow in an axisymmetric diffuser with a curved surface centre-body[J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 1998,8(2):245-255.
- [25] 田航.基于数值模拟的水下气泡运动特性及其流场压力分析[D].沈阳:沈阳工业大学,2022.
- [26] Shaheed R, Mohammadian A, Kheirkhah Gildeh H. A comparison of standard k-ε and realizable k-ε turbulence models in curved and confluent channels[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2019, 19: 543-568.
- [27] Lateb M, Masson C, Stathopoulos T, et al. Comparison of various types of k-ε models for pollutant emissions around a two-building configuration[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2013,115:9-21.

(编辑 荐华)