

# 川藏铁路复杂地层水平孔钻探护壁堵漏研究与应用

赵文辉

(陕西铁道工程勘察有限公司, 陕西 西安 710043)

**摘要:**川藏铁路地处青藏高原东南部,由于构造活动发育,岩体松散破碎,裂隙及承压水发育,勘察这些地层过程中时常发生塌孔、掉块卡钻、冲洗液漏失等复杂情况。本文针对隧道出口段地层设计的定向水平孔,在钻进过程中出现孔壁失稳和冲洗液漏失等问题,通过分析孔内地层特征、漏失情况,提出了适宜的冲洗液体系。随后,进行正交实验快速得到护壁堵漏材料掺量的最优组合,并通过后续的工程实践结果验证并改进,使得冲洗液工艺效果明显。优化配方后的冲洗液,能够大幅度减少孔内事故,有效地促进勘探进度,取得了显著的经济效益和社会效益。

**关键词:**复杂地层;水平孔;护壁堵漏;正交实验;川藏铁路

**中图分类号:**P634.8;U212.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)11-0019-06

## Wellbore protection and sealing for directional drilling in complicated formation at the Sichuan - Tibet Railway

ZHAO Wenhui

(Shaanxi Railway Engineering Survey Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710043, China)

**Abstract:** The Sichuan - Tibet Railway is located in the southeast of the Qinghai - Tibet Plateau. Due to the development of tectonic activities, the rock mass is loose and broken with well developed fractures and confined water; thus, complex situations such as hole collapse, falling stones, stuck drilling, and lost circulation often occur during the exploration of these formations. In view of the problems of hole wall instability and lost circulation during the drilling of the directional horizontal holes designed for the formation along the tunnel exit section, a suitable drilling fluid system for the hole was proposed through analyzing the formation characteristics and leakage in the hole. Then, orthogonal experiments were carried out to quickly obtain the optimal combination of the adding content of the sealing materials. The follow-up field application results verified that the improved drilling fluid worked well. Therefore, the drilling fluid with the optimized formulation can greatly reduce the incidents in the holes, effectively promote the exploration progress, and obtain significant economic and social benefits.

**Key words:** complex formation; directional drilling; wellbore protection and sealing; orthogonal experiment; Sichuan - Tibet Railway

### 1 工程概述

川藏铁路地处青藏高原东南部,是我国地壳活动最强烈的地区之一,构造发育,内动力地质作用强烈<sup>[1]</sup>,线路沿线地质特征具有三高、两强的复杂地质特征:高烈度地震、高地应力、高地温及强烈发育多样化地质灾害、强烈发育活动断裂。受此影响,沿线山脉纵横起伏、地形陡峻,不良地质发育,罕见地质灾害频发。线路经过的夏里隧道受达龙—八宿大断

裂影响,区域内岩体破碎,岩爆及大变形问题突出,地层岩性复杂<sup>[2]</sup>。

本次开展水平孔勘探的目的是查明隧道出口段地层岩性特征、层厚、完整程度、地质构造、富水性等工程地质条件和水文地质条件进而获取相关地质参数,为设计提供地质基础数据。本次水平孔勘探设计孔深为 550.0 m,倾角为 3°,采用下倾角度实施。

收稿日期:2020-03-10; 修回日期:2020-07-11 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.11.004

作者简介:赵文辉,男,汉族,1993年生,助理工程师,地质工程专业,主要从事铁路勘察勘探工作,陕西省西安市莲湖区正关西街捷瑞公园首府,zwenhui1@163.com。

引用格式:赵文辉.川藏铁路复杂地层水平孔钻探护壁堵漏研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(11):19-24.

ZHAO Wenhui. Wellbore protection and sealing for directional drilling in complicated formation at the Sichuan - Tibet Railway[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(11):19-24.

## 2 现场情况及遇到的问题

结构示意图(见图1)。

根据该孔的地层情况以及技术要求绘制出钻孔

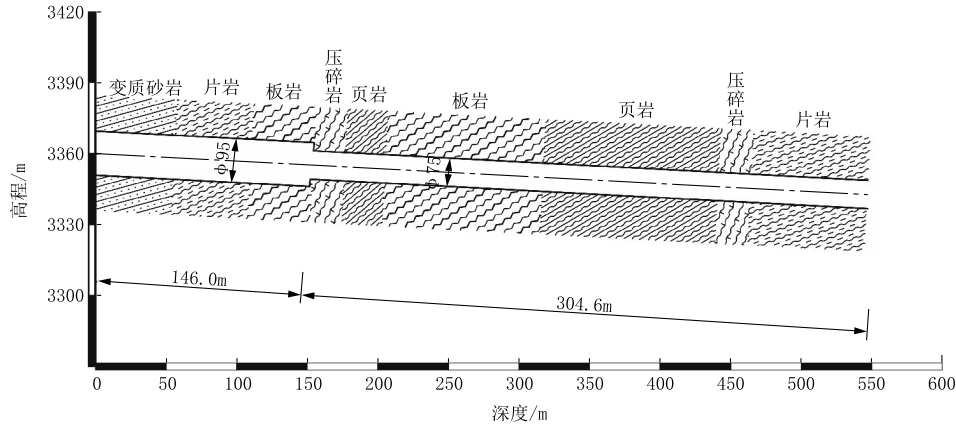


图1 钻孔结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the borehole structure

### 2.1 地层概况

根据钻探结果显示,发生漏浆、掉块及卡钻的地层主要为:110.4~154.3 m 板岩,岩质较坚硬,性脆易开裂,岩体较破碎,板理及节理裂隙发育,板理倾角 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ ,岩心呈块状和夹板状;154.3~177.0 m 压碎岩,岩质较软,锤击易碎,岩体破碎,受构造挤压作用,矿物多有压碎,岩心呈碎块状;177.0~205.7 m 页岩,岩质较软,性脆锤击易开裂,岩体较破碎,板理及节理裂隙发育,页理倾角约 $40^{\circ}$ ,岩心呈块状和薄板状;205.7~317.3 m 板岩,岩质较坚硬,性脆易裂,岩体较完整,板理及节理裂隙发育,节理面局部轻微绿泥石化,岩心呈短柱状和板状;317.3~441.5 m 页岩,岩体性脆,易成碎片状,岩体沿页理裂解发育,岩体极为破碎,页理倾角约 $30^{\circ}$ ,手摸较为光滑和污手,遇水软化,岩心呈块状和碎屑状。采取的岩心如图2所示。

### 2.2 漏失情况

根据漏失机理<sup>[3-8]</sup>,结合地层情况,本文通过现场情况确定该孔的漏失性质:(1)经上节的地层分析,该孔的地质条件不佳,岩体的裂隙、空隙及层理发育,造就了浆液漏失的自然通道;(2)在钻进过程中,发现钻孔有时漏失大量的浆液,但孔口还能返出少量的浆液,有时孔内有一定水位,但孔口不能返水,现场分析该孔为裂隙性漏失<sup>[9-11]</sup>;(3)厂家所提供的配方冲洗液为无固相浆液,粘度和切力较低,在自重和微小压差的条件下,均可顺畅地流至缝隙中。



(a) 页岩岩心



(b) 板岩岩心

图2 水平孔岩心

Fig.2 Shale and slate cores from horizontal holes

### 2.3 遇到的主要问题

(1)钻孔为水平孔,在钻进过程中须严格控制钻孔的方位和倾角(下倾 $3^{\circ}$ ),轨迹设计以满足探明目标层位。

(2)根据钻探技术要求:该孔终孔孔径 $\varnothing 75$  mm,孔壁应保持整体平顺、线性较好,以保证物探测井和抽水试验质量要求;此外,基岩岩心采取率一般应达到80%以上,断层破碎带、松散破碎带等应达到65%及以上,完整地段岩心采取率需达到90%以上。岩心采取段落占全孔进尺的80%及以上。

(3)该孔构造复杂,岩体破碎,冲洗液漏失严重,孔内频繁塌孔。

(4)页岩岩质较软且为水敏性地层,易裂解,常出现缩径和掉块的现象。

(5)厂家提供的适宜钻机的配方冲洗液,不能适用于该地层特征,不能达到护壁堵漏的效果。

(6)该孔的漏失为裂隙性漏失,在 98.2~228.3 m 范围内,浆液消耗量大,约 3.08 m<sup>3</sup>/h。

(7)掉块等事故频发,起钻扫孔等辅助工作占总台时的 63.6%,台班效率约为 4.45 m/d。

### 3 护壁堵漏浆液实验研究

#### 3.1 浆液的参数测定和影响因素分析

针对孔内的地层情况、漏失的情况,本文从冲洗液材料的选择、配比、实验测试、参数分析以及采用正交实验对冲洗液的各个组料掺量进行了优化,可快速地选择适宜该孔的冲洗液。

现场采用 5%膨润土+2%纯碱作为基浆,加入不同比例的腐植酸钾(KHM)、钠羧甲基纤维素(Na-CMC)和植物胶<sup>[12-14]</sup>,通过实验测试冲洗液的性能指标。并分析各参加因子对浆液性能的具体影响(见图 3~5)。

表 1 KHM+Na-CMC+植物胶浆液漏斗粘度、失水量、泥皮厚度参数

Table 1 Funnel viscosity, water loss, and mud cake thickness of KHM+Na-CMC+vegetable glue drilling fluid

基浆		腐植	钠羧甲基	植物	漏斗	失水	泥皮
粘土/ %	纯碱/ %	酸钾/ %	纤维素/ %	胶/ %	粘度/ s	量/ mL	厚/ mm
5	2	0.0	0.0	0.0	22	17.4	1.6
5	2	1.0	0.0	0.0	24	13.5	1.7
5	2	2.0	0.0	0.0	21	12.2	1.4
5	2	3.0	0.0	0.0	19	10.7	1.1
5	2	2.0	0.0	0.0	21	12.2	1.4
5	2	2.0	0.5	0.0	24	14.3	1.3
5	2	2.0	1.0	0.0	29	9.6	1.1
5	2	2.0	1.5	0.0	32	9.3	1.0
5	2	2.0	1.0	0.0	29	9.6	1.1
5	2	2.0	1.0	0.01	30	9.8	1.1
5	2	2.0	1.0	0.02	32	9.5	1.0
5	2	2.0	1.0	0.03	33	9.4	0.9

通过对表 1、图 4~6 分析可以得出以下结论:

(1)KHM 具有很好的降失水作用,随着加量的增加,浆液失水量明显降低,泥皮厚度显著降低,致密性越来越好;KHM对浆液的粘度作用稍弱,随

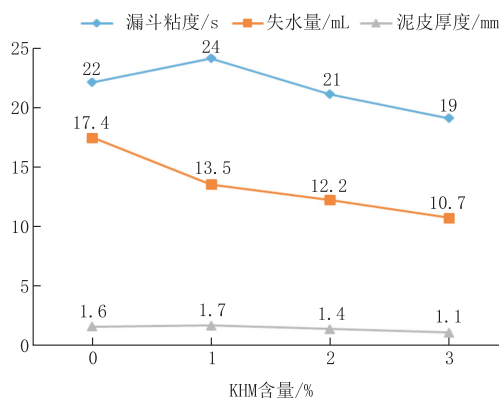


图 3 KHM 对漏斗粘度、失水量、泥皮厚度的影响  
Fig.3 Effect of KHM on funnel viscosity, water loss and mud cake thickness

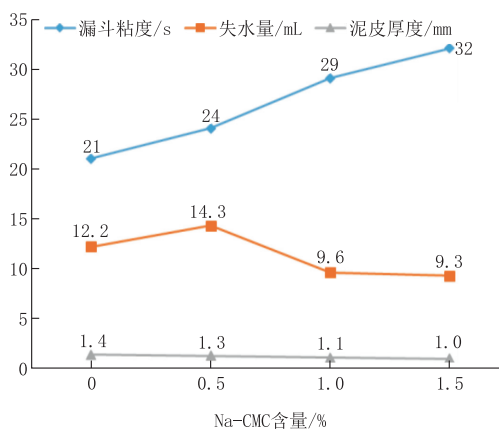


图 4 Na-CMC 对漏斗粘度、失水量、泥皮厚度的影响  
Fig.4 Effect of Na-CMC on funnel viscosity, water loss and mud cake thickness

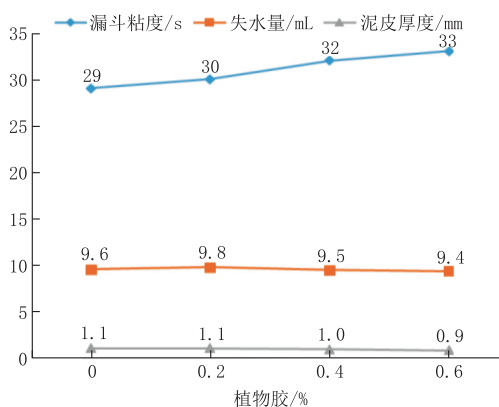


图 5 植物胶对漏斗粘度、失水量、泥皮厚度的影响  
Fig.5 Effect of vegetable glue on funnel viscosity, water loss and mud cake thickness

着含量则增加,粘度有一定程度的减少。

(2)Na-CMC 对浆液的增粘效果显著,随着含量的增加,浆液的粘度急剧增加;此外对浆液也起到

一定的降滤失性,随着其含量的增加,浆液的失水量有着一定量的降低,泥皮越来越致密。

(3)植物胶对浆液的粘度、失水量、泥皮厚度作用较小,随着其含量的增加,粘度有着适量的提高,浆液的失水量也轻微的降低,泥皮厚度基本变化不大。

### 3.2 浆液配方的优化设计

通过以上的研究,可以明确腐植酸钾、钠羧甲基纤维素、植物胶加入基浆后对冲洗液性能的影响,为了优化配比的冲洗液浆液材料,使其能更好地解决复杂地层的护壁堵漏问题,本次实验采用正交实验<sup>[15-16]</sup>,快速得出浆液的优化配方。

本次正交实验采用三因素三水平的正交表安排实验,以5%膨润土+2%纯碱作为基浆,来获得腐植酸钾(A),钠羧甲基纤维素(B),植物胶(C)的优化掺量,A、B、C的水平值均以基浆为准。设定A的水平值为:1%、2%、3%;设定B的水平值为:0.4%、0.8%、1.2%;设定C的水平值为:0.2%、0.4%、0.6%;实验结果如表2、表3所示。

表2 掺加剂因素和水平值  
Table 2 Admixtures and add values %

序号	腐植酸钾(A)	钠羧甲基纤维素(B)	植物胶(C)
1	1	0.4	0.2
2	2	0.8	0.4
3	3	1.2	0.6

根据表3中的极差分析,漏斗粘度最佳组合是 $B_3C_3A_2$ ,失水量的最佳组合是 $A_3B_2C_3$ ,泥皮厚度最佳组合是 $A_3B_2C_3$ ,综合考虑漏斗粘度、失水量、泥皮厚度,确定护壁堵漏材料最佳组合为 $A_2B_2C_3$ ,各组分参考掺量推荐值为:腐植酸钾 $A_2$ (2%);钠羧甲基纤维素 $B_2$ (0.8%);植物胶 $C_3$ (0.6%),其优化配方为:5%粘土+2%纯碱+2%腐植酸钾+0.8%钠羧甲基纤维素+0.6%植物胶。

### 4 应用效果

现场采用优化后的冲洗液配方冲洗液,通过观察钻进情况、台班效率、岩体的RQD及冲洗液消耗量等,并与之前进行对比。

(1)根据岩心情况,测量每延米的RQD值,求得平均RQD值。计算得出208.0~441.5m的平均 $RQD=38\%$ 。相比之前RQD不足3%有了很大的提升,应用优化后配方冲洗液的岩心如图6所示。

表3 漏斗粘度、失水量、泥皮厚度指标结果和因素分析  
Table 3 Index results and factor analysis of funnel viscosity, water loss and mud cake thickness

序号	A	B	C	漏斗粘度/ s	失水量/ mL	泥皮厚度/ mm
1	1	1	1	23	11.6	1.4
2	1	2	2	21	10.4	1.1
3	1	3	3	34	10.3	1.0
4	2	1	2	26	10.5	1.2
5	2	2	3	33	9.4	0.9
6	2	3	1	34	9.4	0.8
7	3	1	3	27	9.7	1.1
8	3	2	1	29	9.4	0.9
9	3	3	2	33	9.6	0.8
漏斗 粘度 极差 分析	$K_1$ $K_2$ $K_3$ R	29.3 31.0 29.7 1.3	25.3 31.0 33.7 8.3	28.7 30.0 31.3 2.7	1.组分B影响最大,掺量越大越好 2.组分C影响较大,掺量取大值合适 3.组分A影响最小,掺量取中值合适 最佳组合: $B_3C_3A_2$	
失水 量极 差分 析	$K_1$ $K_2$ $K_3$ R	10.8 9.8 9.6 1.2	10.6 9.7 9.8 0.9	10.1 10.2 9.8 0.4	1.组分A影响最大,掺量越大越好 2.组分B影响较大,掺量取中值合适 3.组分C影响最小,掺量越大越好 最佳组合: $A_3B_2C_3$	
泥皮 厚度 极差 分析	$K_1$ $K_2$ $K_3$ R	1.2 1.0 0.9 0.3	1.2 1.0 1.0 0.2	1.0 1.0 1.0 0.0	1.组分A影响最大,掺量越大越好 2.组分B影响较大,掺量取中值合适 3.组分C影响最小,掺量取大值合适 最佳组合: $A_3B_2C_3$	

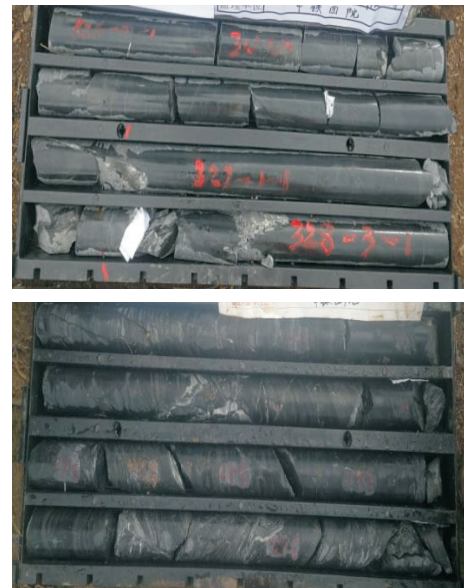


图6 冲洗液优化后的定向孔页岩岩心  
Fig.6 Shale core from horizontal holes after optimization of the drilling fluid

(2)钻探完成后小组统计了每日的台班效率如表4所示,得出平均进尺为10.3m/d,相比之前4.45m/d,效率方面有了很大的提升。



表 4 台班效率  
Table 4 Rig shift efficiency

日期	日进尺/m	累计进尺/m	当日情况
2019-04-15	11.2	219.2	
2019-04-16	9.9	229.1	
2019-04-17	10.6	239.7	
2019-04-18	10.2	249.9	
2019-04-19	13.7	263.6	
2019-04-20	11.2	274.8	
2019-04-21	9.6	284.4	
2019-04-22	9.3	293.7	
2019-04-23	10.7	304.4	
2019-04-24	10.3	314.7	
2019-04-25	10.4	325.1	
2019-04-26	11.2	336.3	
2019-04-27	12.5	348.8	
2019-04-28	11.9	360.7	
2019-04-29	3.5	364.2	掉块
2019-04-30	6.2	370.4	扫孔
2019-05-01	11.8	382.2	
2019-05-02	11.7	393.9	
2019-05-03	13.1	407.0	
2019-05-04	12.3	419.3	
2019-05-05	10.5	429.8	
2019-05-06	11.1	440.9	
平均日进尺	10.6		

(3)统计在 208 m 之后冲洗液的消耗情况,得出其冲洗液平均消耗量为  $1.27 \text{ m}^3/\text{h}$ ,相对之前的冲洗液消耗量约  $3.08 \text{ m}^3/\text{h}$ ,有了很大的提升,其中冲洗液消耗量如图 7 所示。

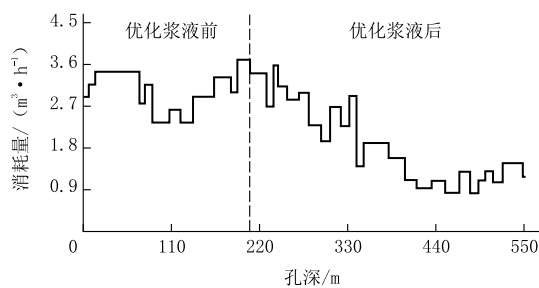


图 7 水平孔冲洗液消耗量示意图

Fig.7 Schematic diagram of drilling fluid consumption of the horizontal hole

## 5 结论

(1)通过理论分析和经验判断,确定了孔内的地层类型和特征,再通过地层特征和钻进情况确定该孔的漏失为自然井壁漏失。

(2)根据地层和漏失情况,否定了随机自带的无固相配方冲洗液,所提出的不分散低固相冲洗液即

5%粘土+2%纯碱+2%腐植酸钾+0.8%钠羧甲基纤维素+0.6%植物胶,是适宜该孔情况的。

(3)通过室内实验和经验确定各个组料掺量的区间范围,本文通过正交表安排与分析多因素水平实验,快速寻求最佳组合的方法是正确的,大量地减少实验参数测定。

(4)优化后的冲洗液应用于现场取得了良好的效果,钻进的顺畅情况、台班效率、岩体的  $RQD$  及冲洗液消耗量都有了明显的改善,生产面貌有了很大的改观,缩短了勘探工期。

## 参考文献(References):

- [1] 刘凯.川藏铁路板块结合带应力-形变特征及工程效应研究[D].成都:成都理工大学,2018.  
LIU Kai. Study on stress-deformation characteristics and engineering effects of the suture zone in Sichuan-Tibet Railway [D]. Chengdu. Chengdu University of Technology, 2018.
- [2] 徐慧娟.怒江流域高山峡谷区泥石流活动规律及成灾驱动力研究[D].昆明:云南大学,2016.  
XU Huijuan. Study on debris-flow activity patterns and hazard driving forces of the alpine vally area in Nujiang River Basin [D]. Kunming: Yunnan University, 2016.
- [3] 沈海超,胡晓庆,李桂芝.破碎性地层漏失力学机理及井漏诊断与处理思路[J].钻井液与完井液,2013,30(1):85-88.  
SHEN Haichao, HU Xiaoqing, LI Guizhi. Research on mechanical mechanism and treating method of mud loss in fragile formation[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2013, 30 (1):85-88.
- [4] 贾利春,陈勉,侯冰,等.裂缝性地层钻井液漏失模型及漏失规律[J].石油勘探与开发,2014,41(1):95-101.  
JIA Lichun, CHEN Mian, HOU Bing, et al. Drilling fluid loss model and loss dynamic behavior in fractured formations[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41 (1): 95-101.
- [5] 蒋宏伟,石林.钻井过程中的地层漏失机理研究[J].重庆科技学院学报(自然科学版),2013,15(4):88-91.  
JIANG Hongwei, SHI Lin. Research on formation mechanism of leakage in drilling process[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2013, 15(4):88-91.
- [6] 李伟.裂缝性地层堵漏技术研究[D].成都:西南石油大学,2013.  
LI Wei. Study on leakage stoppage technology in fractured formation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013.
- [7] 李国志,杨树伟,徐景株.浩布高矿区复杂地层钻进护壁堵漏技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(8):23-26.  
LI Guozhi, YANG Shuwei, XU Jingzhu. Wall protection and leakage control technical measures for drilling in the complex formation of Haobugao Ming Area[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(8):23-26.

- [8] 庞茂安.适用于孔缝漏失地层防漏水泥浆体系研究等[D].成都:西南石油大学,2013.  
PANG Maoan. Study on antileakage cement slurry for porosity-fracture type leak formation[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013.
- [9] 陈晓华,邱正松,杨鹏,等.基于 ABAQUS 的裂缝性漏失过程动态模拟研究[J].钻井液与完井液,2019,36(1):15-19.  
CHEN Xiaohua, QIU Zhengsong, YANG Peng, et al. Dynamic simulation of mud losses into fractured formations using ABAQUS software[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2019,36(1):15-19.
- [10] 李砚智,张长茂,张平.漏失量较大地层“戴帽”固井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(7):41-45,50.  
LI Yanzhi, ZHANG Changmao, ZHANG Ping. Top fill cementing technology for large loss formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(7):41-45,50.
- [11] 李锦峰.恶性漏失地层堵漏技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,7(22):47-50.  
LI Jinfeng. The status and development direction of plugging technology for severe circulation loss formation[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,7(22):47-50.
- [12] 乌效鸣,胡郁乐,贺冰新.钻井液与岩土工程浆液[M].武汉:中国地质大学出版社,2002.  
WU Xiaoming, HU Yule, HE Bingxin. Drilling fluid and slurry in geotechnical engineering[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2002.
- [13] 周亮.煤系地层护壁堵漏钻井液配制技术探讨[J].中国煤炭地质,2009,21(S2):120-122.  
ZHOU Liang. Discussion on preparation of borehole wall protecting and leak plugging drilling fluid in coal measures strata[J]. Coal Geology of China, 2009,21(S2):120-122.
- [14] 汪荣鑫.数理统计[M].西安:西安交通大学出版社,1986.  
WANG Rongxin. Mathematical statistics[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1986.
- [15] 李炜,李瑾,陈英,等.正交实验法优选沙棘果油的提取工艺[J].西北药学杂志,2017,32(4):49-52.  
LI Wei, LI Jin, CHEN Ying, et al. Optimization of the extraction process of sea buckthorn pulp oil from Hippophae rhamnoides L. by orthogonal test[J]. Northwest Pharmaceutical Journal, 2017,32(4):49-52.
- [16] 伍永平,罗宇恩,贺圣林.基于正交实验法的坡体安全系数影响因素分析[J].煤炭技术,2019,38(12):76-79.  
WU Yongping, LUO Yuen, HE Shenglin. Analysis of factors affecting slope safety factor based on orthogonal experimental method[J]. Coal Technology, 2019,38(12):76-79.

(编辑 韩丽丽)

## (上接第 18 页)

- [24] Lingrong Kong, Yu Wang, Bohong Wu, et al. Simulation and experimental study on cuttings-carrying for reverse circulation horizontal directional drilling with dual drill pipes[J]. Advances in Civil Engineering, 2019: 6262308.
- [25] 金新.两淮矿区复杂煤矿瓦斯抽采 PVC 筛管完孔技术研究[D].成都:成都理工大学,2012.  
JIN Xin. Study on the technology of gas drainage PVC sieve pipe hole in complex coal mine in Two Huai Mining Area[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012.
- [26] 王红波.铁路深孔勘探钻进钻杆柱的磨损与折断研究[D].武汉:中国地质大学(武汉),2007.  
WANG Hongbo. Research on wear and fracture of drill strings for railway deep hole exploration drilling[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2007.
- [27] 王清峰,陈松林.煤矿用坑道钻机钻杆断裂原因分析及采取的措施[J].煤矿机械,2007,28(6):148-150.  
WANG Qingfeng, CHEN Songlin. Analysis on cause and prevention measures of drilling pipe rupture of coal roadway drilling machine[J]. Coal Mine Machinery, 2007,28(6):148-150.
- [28] 刘勇,常江华.某金矿水平绳索取心钻进钻头选型及试验分析[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(7):73-75.  
LIU Yong, CHANG Jianghua. Selection of horizontal wire-line coring bit in a gold mine and the test analysis[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011,38(7):73-75.
- [29] 方鹏.勘查钻进钻杆的实验模型与仿真分析[D].武汉:中国地质大学(武汉),2007.  
FANG Peng. Experimental model and simulation analysis on drill pipe of the reconnaissance drilling[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2007.
- [30] 潘德元.绳索取心钻杆管柱的力学分析与优化设计[D].武汉:中国地质大学(武汉),2011.  
PAN Deyuan. The mechanical analysis and optimization design of wire-line coring drill string[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2011.

(编辑 周红军)