

玄武岩纤维堵漏体系在高海拔非开挖钻进中的应用研究

周生伟^{1,2}, 孙平贺^{*1,2}, 苏卫锋³, 周梦迪⁴,
夏余宏焯^{1,2}, 周明明³, 左雷彬³, 王李昌^{1,2}

(1. 有色金属成矿预测与地质环境监测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083;

2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083;

3. 中国石油天然气管道局工程有限公司, 河北廊坊 065000; 4. 中兵勘察设计研究院有限公司, 北京 100053)

摘要:高海拔地区实施非开挖水平定向钻进时, 裂隙发育地层的泥浆漏失不仅会影响泥浆的有效循环, 还会形成大量的岩屑床, 导致钻具过度磨损、摩阻异常增大、有效孔径减小等问题。针对西藏某地钻遇花岗岩裂隙, 采用近景摄影测量技术对其进行量化表征, 得到该区裂隙地层的缝宽 <4 mm; 提出采用玄武岩纤维作为裂隙封堵主剂, 并建立随钻玄武岩纤维堵漏配方体系, 实验结果表明: 采用3、6和9 mm多级组合的玄武岩纤维堵漏效果最好, 3 mm纤维复合惰性材料形成骨架结构, 6和9 mm纤维可发挥一定强度的“加筋”作用。现场随钻实验结果表明: 采用玄武岩纤维堵漏后, 泥浆中固相含量下降幅度减少了13.14%, 有效保障了长距离裂隙山体的有效、绿色、安全钻进。

关键词:裂隙地层; 泥浆漏失; 玄武岩纤维; 堵漏; 近景摄影测量; 非开挖水平定向钻进; 高海拔地区

中图分类号: TE254; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)03-0139-07

Use of basalt fiber drilling fluid in trenchless works at high altitudes

ZHOU Shengwei^{1,2}, SUN Pinghe^{*1,2}, SU Weifeng³, ZHOU Mengdi⁴,

XIA Yuhongye^{1,2}, ZHOU Mingming³, ZUO Leibin³, WANG Lichang^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals and Geological Environment Monitoring (Central South University), Ministry of Education, Changsha Hunan 410083, China;*

2. *School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;*

3. *China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang Hebei 065000, China;*

4. *China Ordnance Industry Survey and Geotechnical Institute Co., Ltd., Beijing 100053, China)*

Abstract: In trenchless horizontal directional drilling in high-altitude areas, mud leakage in fracture-developed formation is one of the key problems that plagues trenchless works. It will not only affect the effective circulation of drilling fluid, but also form a large number of cuttings beds in the borehole. That will lead to other problems such as excessive wear of drilling tools, abnormal increase in frictional resistance, and reduction of the effective diameter. In view of the granite fractures in a Tibetan site, the close-range photogrammetry technology was used to quantitatively characterize the fractures, and found that the fracture width of the fractured strata in the study area was less than 4 mm. At the same time, basalt fiber is proposed as the main fracture plugging agent, and the formulation system of basalt fiber plugging-while-drilling has been established. The experimental results showed that the multi-grade combination of 3mm, 6mm and 9mm basalt fibers can achieve the best results, where the 3mm fiber can form a space skeleton structure with inert materials, and the 6mm and 9mm fibers can function as “reinforcing” with a certain strength. Results at the jobsite indicate that the solid phase content in the mud decreased by 13.14% with basalt fiber plugging,

收稿日期: 2022-02-27; 修回日期: 2022-04-14 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.03.018

基金项目: 中石油管道局科技计划项目“高海拔地区山体定向穿越断层稳定性分析及泥浆技术研究”(编号: 2019-07-01)

第一作者: 周生伟, 男, 汉族, 1999年生, 硕士研究生在读, 地质工程专业, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, zhoushengwei@csu.edu.cn。

通信作者: 孙平贺, 男, 汉族, 1982年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为非开挖、矿产地质及非常规能源钻进技术, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, pinghesun@csu.edu.cn。

引用格式: 周生伟, 孙平贺, 苏卫锋, 等. 玄武岩纤维堵漏体系在高海拔非开挖钻进中的应用研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(3): 139-145.

ZHOU Shengwei, SUN Pinghe, SU Weifeng, et al. Use of basalt fiber drilling fluid in trenchless works at high altitudes[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(3): 139-145.

ensuring effective, green, and safe drilling for the long-distance mountain crossing with trenchless technology.

Key words: fractured formation; mud leakage; basalt fiber; plugging; close-range photogrammetry; trenchless horizontal directional drilling; high altitude areas

0 引言

近年来,随着“一带一路”的深入推进,国内外长输管道的建设规模越来越大,水平定向钻进的应用越来越广,钻进过程中的泥浆漏失问题也得到越来越多的重视。泥浆漏失是钻遇各类裂隙地层中普遍遇到的技术难题,不仅会延误作业时间、延长钻进周期,还会耗费大量泥浆材料,导致卡钻、塌孔等一系列复杂问题的发生。漏失主要分为渗透性漏失、裂缝性漏失和孔洞性漏失3种类型^[1]。当漏失发生时,使用堵漏材料是封堵地层漏失通道的最常用方法^[2]。工程中常用的堵漏材料有桥接堵漏材料、复合堵漏材料、高失水堵漏材料、凝胶堵漏材料、膨胀型堵漏材料和随钻堵漏材料6种。其中桥接堵漏材料和随钻堵漏材料主要用于封堵裂缝性漏失;复合堵漏材料主要应用于高温地层或油基钻井液;高失水堵漏材料适用于大漏失通道;凝胶堵漏材料对漏失通道的适应性好,因此多与其他堵漏材料配合使用;膨胀型堵漏材料主要针对严重漏失地层或页岩地层钻井中的裂缝性漏失^[3]。堵漏材料的承压能力是封堵裂隙的重点,堵漏材料的破碎率、粒径、回弹性等性能对承压能力的影响不断被研究总结^[4]。目前,堵漏材料逐渐向低成本、天然产物改性、抗高温抗盐等方向发展^[5]。

纤维可分为天然纤维和化学纤维两大类,玄武岩纤维是以天然玄武岩为原料,在高温条件下破碎熔融后经拉伸形成的无机连续纤维^[6],属于天然纤维的一种,使用过程中不会对生态环境造成危害,是一种绿色环保材料,且我国纤维用玄武岩资源在四川等地有着十分开阔的开发利用前景^[7]。玄武岩纤维具有较好的化学稳定性^[8];在力学性能方面,玄武岩纤维具有优异的拉伸强度和机械强度^[9]。针对玄武岩纤维国内外专家学者有较多的研究,目前,在土木工程领域,玄武岩纤维主要用于改善混凝土^[10]、水泥^[11]、沥青^[12]和轨道板^[13]等材料或部件的强度;在造纸领域,玄武岩纤维含量 $<50\%$ 时可基本满足纸张强度的加工和使用需求^[14];在航天领域,玄武岩纤维作为吸能填充材料应用于空间碎片防护结构

设计中^[15];此外,玄武岩纤维还在防火隔热^[16]、改善复合材料^[17]和树脂基摩擦材料^[18]的耐磨性等领域得到应用。综上所述,当前国内外对玄武岩纤维应用的研究主要集中在土木、航天和材料等方面,其作为随钻堵漏材料的研究较少。

该文结合西藏某地钻遇花岗岩裂隙特征,选取玄武岩纤维作为裂隙封堵的主要材料,构建玄武岩纤维堵漏体系,并在西藏某高海拔地区非开挖水平定向钻进现场得到了成功的应用。

1 工程概况

该工程为中国石油管道局工程有限公司在西藏某地铺设的输气管道水平定向穿越段。由于西藏地区山体复杂程度高、开挖铺设成本高,因此该段管道采用水平定向钻进的方式铺设,管道穿越长度为730 m,出入土点斜坡平均坡度均约为 30° ,高程约为3804 m。拟穿越场区地理位置概况见图1。



图1 场区地理位置示意

Fig.1 Geographic location of the site

穿越区坡面基岩陡立,坡体表面风化强烈,节理裂隙发育,裂隙面呈闭合—微张状,岩体破碎,呈碎裂状及块状,局部分布有块石、碎石,整段岩土体透水性较强。在实际钻进和回拖管线作业过程中,该场区漏失严重,回流浆液因外部涌水稀释导致粘度下降幅度极大,旋转粘度计在转速为600 r/min时的读数远小于初始泥浆的150 mPa·s,存在卡钻和塌孔的风险。

2 钻遇地层裂隙分析

堵漏材料尺寸的选择不当易导致裂隙处形成压力差,导致堵漏失败^[19]。因此为合理确定玄武岩纤维堵漏体系的配方,需进行穿越段裂隙尺寸的确定。在综合考虑岩体裂隙特征统计方法的基础上,本文采用近景摄影测量技术对西藏某地钻遇的岩体裂隙进行测量分析。近景摄影测量技术是采用相机在不同位置或时刻获得相同目标的图像,在分析图像间几何约束关系的基础上算出目标表面的三维坐标信息,最终建立拍摄目标的三维模型^[20]。目前,近景摄影测量技术已在监测矿山岩体相似材料模型^[21]、煤矿沉陷模型^[22]和平面地表变形^[23]等方面得到应用。相对其他常用方法而言,该方法具有精度高、累积误差小和工作效率高等^[24]优点,结合三维建模能获取详实且便于保存的裂隙几何信息。选取现场钻遇的岩体样品裂隙如图2所示。

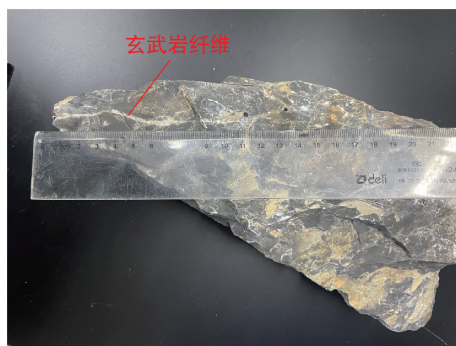


图2 岩体样品裂隙

Fig.2 Fractures in a rock sample

通过手持拍摄法和支架拍摄法的顺时针和逆时针拍摄实验,最终选择图像平均覆盖率和清晰度最高的逆时针方向手持拍摄法获取图像,首先完成所得图像的特征点标记工作并对无效特征点进行剔除;其次,对各图像的特征点进行分析匹配,建立点云图;之后在点云图的基础上进行三角网格的划分;最后生成具备纹理的3D模型(如图3所示)。

在已有三维坐标系的模型中利用PMS软件提取特征点,并通过多图像特征点关联进行定位测距得到裂隙尺寸,经识别测量,裂隙尺寸数据如表1所示。

由表1可得,通过近景摄影测量技术得到现场钻遇地层样品的裂隙长度在20.3~112.7 mm之间、宽度在0.4~3.2 mm之间,因此确定该区域内裂隙

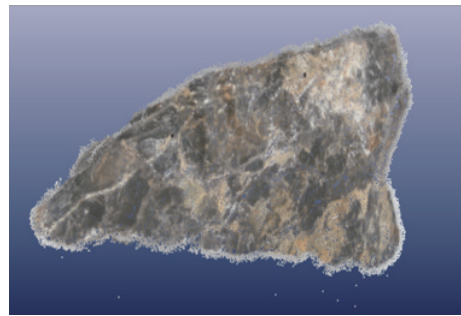


图3 岩体样品3D模型

Fig.3 3D model of a rock sample

表1 裂隙尺寸数据

Table 1 Fracture sizes

裂隙编号	长/mm	宽/mm	面积/mm ²
1	112.7	3.2	360.64
2	20.3	0.9	18.27
3	32.4	0.8	25.92
4	22.3	0.4	8.92
5	89.8	0.6	53.88
6	68.9	1.1	75.79
7	80.6	0.5	40.30
8	36.7	0.4	14.68
9	55.2	0.7	38.64

宽度最大为3.2 mm,随钻堵漏实验可采用4 mm缝板以确保堵漏材料配方在现场的适用性。

3 堵漏材料室内实验

3.1 堵漏材料配方设计

通过近景摄影测量技术确定区域内裂隙宽度在4 mm以内,预实验中弹性橡胶粒粒径为3~6 mm、核桃壳①目数为6~8目、核桃壳②目数为10~16目、云母片目数为20目。在DL-2型中压堵漏材料测定仪上分别进行核桃壳与弹性橡胶粒混合材料和核桃壳、弹性橡胶粒与云母片混合材料的堵漏性能评价,测量其自由漏失量和最大承载压力等参数。DL-2型中压堵漏材料测定仪配套有1~5 mm的缝板和0~25 MPa的氮气源,分别用来模拟不同宽度的裂隙地层和不同的地层压力。

选择4 mm的缝板进行核桃壳与弹性橡胶粒混合材料和核桃壳、弹性橡胶粒与云母片混合材料的堵漏预实验,固相含量控制在20%以内,以保证泥浆的流变参数相对稳定^[25]。预实验的堵漏基浆配

方为5% 钠化膨润土、0.3% 无水碳酸钠、0.6% 羧甲基纤维素钠。预实验一的核桃壳的质量百分比为8%,弹性橡胶粒质量百分比为1%;预实验二在预实验一的基础上增加了质量百分比2%的云母片。最终测得预实验一的自由漏失量为800 mL,最大承载压力为0.9 MPa;预实验二的自由漏失量为600 mL,1 MPa漏失量为300 mL,最大承载压力为1.8 MPa。由预实验结果可得,仅使用桥接颗粒在加载压力为0.9 MPa时封堵层被完全破坏,堵漏效果较差;添加云母片之后,自由漏失量降低了25%,加载压力可达到1.8 MPa,承压能力仍较小。在两次预实验的基础上进行玄武岩纤维堵漏体系的优选实验以提高堵漏材料的堵漏效果。弹性橡胶粒、核桃壳和云母片的粒径与预实验相同,堵漏材料配方设计如表2所示。实验所用的桥接堵漏材料和玄武岩纤维如图4、图5所示。

表2 堵漏材料配方

Table 2 Leakage plugging material formula %

堵漏材料 实验组	弹性橡 胶粒	核桃 壳①	核桃 壳②	云母 片	玄武岩纤维
1	3	1	1	2	0.3(3 mm)
2	3	1	1	2	0.3(6 mm)
3	3	1	1	2	0.3(9 mm)
4	3	1	1	2	0.3(12 mm)
5	3	1	1	2	0.15(3 mm)+0.15 (6 mm)
6	3	1	1	2	0.15(6 mm)+0.15 (9 mm)
7	3	1	1	2	0.15(9 mm)+0.15 (12 mm)
8	3	1	1	2	0.1(3 mm)+0.1 (6 mm)+0.1(9 mm)
9	3	1	1	2	0.1(6 mm)+0.1 (9 mm)+0.1 (12 mm)

3.2 随钻堵漏实验

根据近景摄影测量技术实验结果及现场水平定向钻进段地层压力,本实验采用4 mm缝板和4 MPa氮气源压力进行加压堵漏实验,以探究堵漏材料的堵漏效果。实验基浆配方为5% 钠化膨润土、0.3%

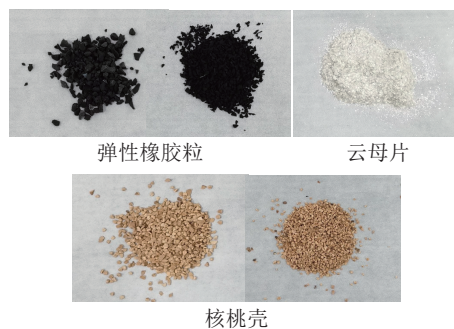


图4 桥接堵漏材料

Fig.4 Bridging and plugging materials

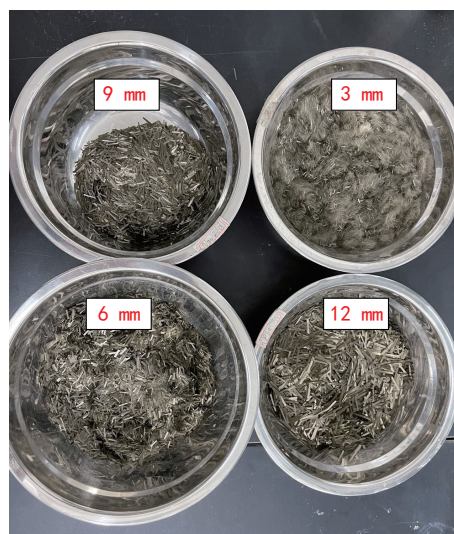


图5 不同尺寸玄武岩纤维

Fig.5 Basalt fibers of different sizes

无水碳酸钠和0.6% 羧甲基纤维素钠,单次实验泥浆用量4 L。

4 堵漏实验结果分析

利用DL-2型中压堵漏材料测定仪测试各堵漏配方的漏失时间、漏失量和固相漏失量,实验数据如表3所示。

由表3可得,对于4 mm缝板,掺入单一尺寸玄武岩纤维的堵漏泥浆的堵漏效果在纤维长度为3 mm时漏失时间为90 s、漏失量为750 mL、固相漏失量为45.1 g,其堵漏效果最好;纤维长度增加至9 mm时,漏失时间和固相漏失量增加至173 s和60.6 g,达到最大;纤维长度增加至12 mm时,漏失量达到最大的1650 mL,由此可得,使用单一尺寸玄武岩纤维对4 mm缝板进行堵漏时,随着纤维长度的不断增加,其堵漏效果不断降低。由缝板封堵现象分

表3 漏失实验数据

Table 3 Leakage experiment data

实验组	漏失时间/s	漏失量/mL	固相漏失量/g
1	90	750	45.1
2	108	820	51.0
3	173	1600	60.6
4	146	1650	50.4
5	98	930	46.1
6	109	1270	66.4
7	172	1360	78.6
8	86	630	43.2
9	126	950	50.1

析,纤维长度和缝板宽度较接近时,进入缝板的纤维的量更多,参与架桥和形成网状受力结构的概率更大,纤维长度大于缝板宽度时,堵漏材料会积聚在缝板端口处,形成封门堵漏,堵漏效果不理想,且泥浆漏失量较大。

为研究玄武岩纤维种数对堵漏效果的影响,分别计算单一尺寸玄武岩纤维和2种、3种尺寸玄武岩纤维共同作用的平均漏失时间、平均漏失量和平均固相漏失量,计算结果如表4所示。

表4 漏失实验平均数据

Table 4 Average of leakage experiment data

玄武岩纤维种数	平均漏失时间/s	平均漏失量/mL	平均固相漏失量/g
1	129.3	1205.0	51.8
2	126.3	1186.7	63.7
3	106.0	790.0	46.7

由表4可得,随着玄武岩纤维种数的增加,平均漏失时间、平均漏失量和平均固相漏失量分别由单一尺寸玄武岩纤维堵漏时的129.3 s、1205 mL和51.8 g降至106 s、790 mL和46.7 g;综合考虑平均漏失时间、平均漏失量和平均固相漏失量可得,3种尺寸的玄武岩纤维共同使用时的堵漏效果最好。缝板堵漏的实际效果如图6所示。

由图6可得,当使用3种尺寸的玄武岩纤维进行堵漏时,3 mm的纤维与弹性橡胶粒、核桃壳和云母等桥接颗粒更多的进入缝板,形成了封堵缝板的基本骨架;6和9 mm的玄武岩纤维则起到了一定强度的“加筋”作用,加大了封堵层的机械强度,使封堵效

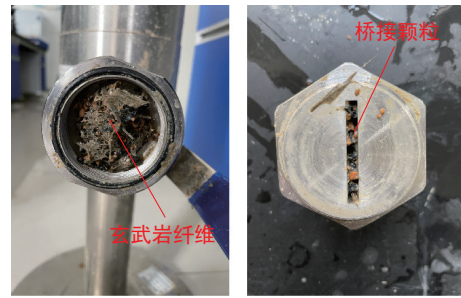


图6 多级配纤维泥浆堵漏后缝板

Fig.6 Joint plate after multi-grade fiber slurry plugging

果达到最好。

综上所述,当缝板宽度为4 mm时,3种尺寸的玄武岩纤维堵漏泥浆的平均漏失时间、平均漏失量和平均固相漏失量与单一尺寸的玄武岩纤维相比分别降低了18.0%、34.4%和9.8%,其堵漏效果高于单一尺寸玄武岩纤维的泥浆;原因为多尺寸玄武岩纤维中的小尺寸纤维可在缝板部位产生挂阻并“架桥”,形成堵漏的基本骨架,大尺寸纤维被夹在骨架中,可起到一定的“加筋”作用,二者共同作用提高了多尺寸玄武岩纤维的封堵效果。其中3、6和9 mm三种尺寸的玄武岩纤维共同作用的堵漏效果最明显,漏失时间、漏失量和固相漏失量分别为86 s、630 mL和43.2 g,均达到最低。

5 现场应用

根据室内实验中3种尺寸玄武岩纤维共同作用时的堵漏效果最好,选择多级配纤维堵漏泥浆进行堵漏以提高堵漏效果。本次实验在扩孔钻头回拉至距离入土点270 m处进行,泥浆体系为正电胶泥浆体系。室内实验堵漏泥浆中3种尺寸的玄武岩纤维含量均为0.1%,在现场实验中提高玄武岩纤维含量以提升堵漏效果,6 mm和9 mm玄武岩纤维各添加210 kg(1.05%),12 mm玄武岩纤维添加200 kg(1%)。在现场采用水枪辅助添加和泥浆罐处直接添加两种加料方式,每加入50 kg玄武岩纤维需搅拌6 min;搅拌均匀后开始泵入地层。

为了进一步验证玄武岩纤维的随钻堵漏效果,分别对玄武岩纤维处理前后的现场返浆进行取样,对比分析除砂、烘干后泥浆中固相含量的变化如表5所示。分析结果表明,泥浆中固相含量由原始的13.69%增加至15.49%,泥浆固相含量下降幅度减少了13.14%,说明随钻泥浆封堵体系有效减少了泥

浆的漏失,保障了非开挖钻进作业的顺利实施。

表5 室内固相含量测试结果

Table 5 Indoor solid phase content test results

实验序号	泥浆类型	烘干前泥浆质量/g	除砂、烘干后泥浆质量/g	固相含量平均值/%
1	原始循环后	18.62	2.56	13.69
	泥浆	19.21	2.62	
2	掺入纤维循	17.98	2.79	15.49
	环后泥浆	18.50	2.86	

同时,部分纤维在泥浆循环过程中返至地表,如图7所示。说明玄武岩纤维能够在钻孔中有效循环,减少自身的漏损量,在绿色封堵的同时,能够提高裂隙地层堵漏的经济效果。



图7 地表返浆中的纤维

Fig.7 Fibers in mud return at surface

6 结论与展望

(1)西藏高海拔地区花岗岩地层受构造运动的影响,节理裂隙发育,以现场钻遇的地层样品作为研究对象,应用近景摄影测量技术得到实际岩体裂隙宽度的范围为0.4~3.2 mm,最终确定区域内裂隙宽度为4 mm以内。

(2)对于4 mm缝板,3 mm的玄武岩纤维单独作用时,其漏失时间为90 s,漏失量为750 mL,固相漏失量为45.1 g,在单一尺寸的玄武岩纤维中堵漏效果最好;3种尺寸的玄武岩纤维混合使用的平均漏失时间、平均漏失量和平均固相漏失量分别为106 s、790 mL和46.7 g,均小于单种和两种玄武岩纤维的堵漏效果,原因为多种长度的玄武岩纤维既可形成堵漏的基本骨架,也可发挥一定的“加筋”作用,提高堵漏效果。

(3)在室内玄武岩纤维堵漏体系优选实验的基础上,选择6、9和12 mm的玄武岩纤维堵漏体系在

现场进行应用,该体系使泥浆漏失段的泥浆固相含量下降幅度减少了13.14%,堵漏效果较好。

本文进行室内实验时,只研究了不同配方的玄武岩纤维堵漏材料对4 mm缝板的堵漏效果,实验条件具有一定的局限性。今后可研究玄武岩纤维堵漏材料对不同尺寸缝板的堵漏效果以拓宽玄武岩纤维堵漏材料的应用范围。

参考文献(References):

- [1] 张希文,孙金声,杨枝,等. 裂缝性地层堵漏技术[J]. 钻井液与完井液,2010,27(3):29-32,96.
ZHANG Xiwen, SUN Jinsheng, YANG Zhi, et al. Lost circulation control in fractured formations[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2010,27(3):29-32,96.
- [2] 李伟,白英睿,李雨桐,等. 钻井液堵漏材料研究及应用现状与堵漏技术对策[J]. 科学技术与工程,2021,21(12):4733-4743.
LI Wei, BAI Yingrui, LI Yutong, et al. Research and application progress of drilling fluid lost circulation materials and technical countermeasures for lost circulation control[J]. Science Technology and Engineering, 2021,21(12):4733-4743.
- [3] 赵福豪,黄维安. 钻井液防漏堵漏材料研究进展[J]. 复杂油气藏,2020,13(4):96-100.
ZHAO Fuhao, HUANG Weian. Research progress on prevention and plugging materials for drilling fluid lost circulation[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2020,13(4):96-100.
- [4] 何龙,史堃,杨健,等. 裂缝性地层堵漏材料承压性能及材料优选研究[J]. 钻采工艺,2019,42(2):42-44,3.
HE Long, SHI Kun, YANG Jian, et al. Study on pressure-bearing property and material optimum selection of leakage-plugging materials for fractured formation[J]. Drilling & Production Technology, 2019,42(2):42-44,3.
- [5] 孙金声,张希文. 钻井液技术的现状、挑战、需求与发展趋势[J]. 钻井液与完井液,2011,28(6):67-76,96.
SUN Jinsheng, ZHANG Xiwen. Situations, challenges, demands and trends of drilling fluid technology[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2011,28(6):67-76,96.
- [6] 霍冀川,雷永林,王海滨,等. 玄武岩纤维的制备及其复合材料的研究进展[J]. 材料导报,2006(S1):382-385.
HUO Jichuan, LEI Yonglin, WANG Haibin, et al. Progress of study on the preparation of basalt fiber and composite material of basalt fiber[J]. Materials Reports, 2006(S1):382-385.
- [7] 王跃忠. 四川省纤维用玄武岩找矿远景分析[J]. 矿物学报,2019,39(6):664-672.
WANG Yuezhong. A prospective appraisal for the exploration of fiber-applied basalts in Sichuan province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2019,39(6):664-672.
- [8] 陈鹏,张谌虎,王成勇,等. 玄武岩纤维主要特性研究现状[J]. 无机盐工业,2020,52(10):64-67.

- CHEN Peng, ZHANG Chenhu, WANG Chengyong, et al. Research status of main properties of basalt fiber [J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2020, 52(10):64-67.
- [9] 王森,沈艳琴,武海良.玄武岩纤维的发展现状及趋势[J]. *纺织导报*, 2021(5):50-53.
- WANG Miao, SHEN Yanqin, WU Hailiang. Development status and trend of basalt fiber[J]. *China Textile Leader*, 2021(5):50-53.
- [10] 高真,曹鹏,孙新建,等.玄武岩纤维混凝土抗压强度分析与微观表征[J]. *水力发电学报*, 2018, 37(8):111-120.
- GAO Zhen, CAO Peng, SUN Xinjian, et al. Compressive strength analysis and microscopic characterization of basalt fiber reinforced concrete [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2018, 37(8):111-120.
- [11] 贾明皓,肖学良,谷元慧,等.玄武岩纤维及其格栅增强水泥基复合材料力学性能对比研究[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(12):246-249.
- JIA Minghao, XIAO Xueliang, GU Yuanhui, et al. Comparative study on mechanical property of basalt fiber and its grille reinforced cement matrix composite [J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(12):246-249.
- [12] 刘晓阳,任宪利,裴鑫雨.玄武岩纤维增强沥青混合料作用机理及性能研究[J]. *四川建材*, 2022, 48(1):29-30.
- LIU Xiaoyang, REN Xianli, PEI Xinyu. Study on action mechanism and performance of basalt fiber reinforced asphalt mixture [J]. *Sichuan Building Materials*, 2022, 48(1):29-30.
- [13] 施成.应用玄武岩纤维筋的轨道板静载受力性能试验研究[J]. *铁道建筑*, 2021, 61(10):109-112.
- SHI Cheng. Experimental study on static mechanical behavior of track slab reinforced by basalt fiber bar [J]. *Railway Engineering*, 2021, 61(10):109-112.
- [14] 宋顺喜,张帅,张美云,等.玄武岩纤维的分散及其对纸基材料性能的影响[J]. *陕西科技大学学报*, 2020, 38(4):13-17.
- SONG Shunxi, ZHANG Shuai, ZHANG Meiyun, et al. Dispersion of basalt fiber and its effect on paper properties [J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2020, 38(4):13-17.
- [15] 管公顺,戴训洋,张铎.玄武岩纤维布/铝板组合防护结构的高速撞击防护性能[J]. *高压物理学报*, 2022, 36(1):99-108.
- GUAN Gongshun, DAI Xunyang, ZHANG Duo. High velocity impact shielding performance of basalt fiber cloth/Al-plate composite shields [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(1):99-108.
- [16] 胡显奇.玄武岩纤维防火保温板外墙外保温系统研究[J]. *墙材革新与建筑节能*, 2014(8):58-61.
- HU Xianqi. Study on external thermal insulation system of basalt fiber fire insulation board [J]. *Construction Wall Innovation & Building Energy-Saving*, 2014(8):58-61.
- [17] 熊洪威,马银龙,张帅,等.玄武岩纤维增强铝基复合钻杆材料的制备研究[J]. *钻探工程*, 2021, 48(3):140-145.
- XIONG Hongwei, MA Yinlong, ZHANG Shuai, et al. Preparation of basalt fiber reinforced aluminum based composite material for drill pipes [J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(3):140-145.
- [18] 刘浪,栾道成,胡志华,等.玄武岩纤维和钢纤维含量对树脂基摩擦材料性能的影响研究[J]. *中国塑料*, 2022, 36(3):33-39.
- LIU Lang, LUAN Daocheng, HU Zhihua, et al. Effects of basalt fiber and steel fiber contents on properties of resin-based friction materials [J]. *China Plastics*, 2022, 36(3):33-39.
- [19] 吴天乾,李明忠,蒋新立,等.杭锦旗地区裂缝性漏失钻井堵漏技术研究与应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2020, 47(2):49-53.
- WU Tianqian, LI Mingzhong, JIANG Xinli, et al. Research and application of plugging technology for fracture type leakage in the Hangjinqi area [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2020, 47(2):49-53.
- [20] 刘杰,连增增,何荣,等.基于近景摄影测量技术的地下巷道三维建模[J]. *金属矿山*, 2020(9):179-183.
- LIU Jie, LIAN Zengzeng, HE Rong, et al. 3D modeling of underground tunnel based on close range photogrammetry technique [J]. *Metal Mine*, 2020(9):179-183.
- [21] 余全兵,徐守明,薛博.近景摄影测量技术在相似材料模型实验观测中的应用[J]. *山东煤炭科技*, 2022, 40(1):192-195, 204.
- YU Quanbing, XU Shouming, XUE Bo. Application of close range photogrammetry in experimental observation of similar material model [J]. *Shandong Coal Science and Technology*, 2022, 40(1):192-195, 204.
- [22] 杨福芹,蒋瑞波,戴华阳,等.近景摄影测量技术在煤矿沉陷模型试验中的应用研究[J]. *中国煤炭*, 2018, 44(11):141-145.
- YANG Fuqin, JIANG Ruibo, DAI Huayang, et al. Research on application of close shot photogrammetry technique in coal subsidence model test [J]. *China Coal*, 2018, 44(11):141-145.
- [23] 李天子,郭辉.多基线近景摄影测量的平面地表变形监测[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2013, 32(8):1098-1102.
- LI Tianzi, GUO Hui. Deformation observing of plane terrain basing on multi-baseline close-range photogrammetry [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2013, 32(8):1098-1102.
- [24] 屈仁飞,王培俊,刘瑞,等.近景摄影测量技术在钢轨检测中的应用研究[J]. *机械制造与自动化*, 2021, 50(3):175-178.
- QU Renfei, WANG Peijun, LIU Rui, et al. Application of close-range photogrammetry technology in rail inspection [J]. *Machine Building & Automation*, 2021, 50(3):175-178.
- [25] 邢世宽,孙平贺,朱俊毅,等.固相含量对盾构泥浆性能的影响研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2021, 17(5):1537-1543.
- XING Shikuan, SUN Pinghe, ZHU Junyi, et al. Effect of solid phase content on mud properties in shield tunneling [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2021, 17(5):1537-1543.

(编辑 荐华)