

千米级水平定向钻孔压水试验设备研发与应用

张祥祥¹, 杨 栋^{1,2*}, 朱 贤³, 王军朝², 李 勇^{1,2}, 张佳敏¹

(1. 成都华建地质工程科技有限公司, 四川 成都 611734; 2. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734;
3. 湖南省自然资源调查所, 湖南 长沙 410007)

摘要:传统压水试验设备在数据采集和试验操作上存在诸多局限,难以满足高精度工程需求。本文介绍了一套适用于千米级水平定向孔的压水试验方法及设备,压水试验设备引入先进的自动采集系统,集成了高精度传感器和智能控制模块,创新设计了止水栓塞结构。该套设备可直接测定试验段实际压力,获取的试段压力排除了管路损失;判别试验段密封性,提高试验可靠性;可对试验过程中的关键参数进行实时、连续、准确的记录,避免了人工操作误差和数据采集不及时的问题;新型止水栓塞的设计降低了事故率。与之配套的试验方法,依据智能化成套设备的特点进行优化,实现了试验的自动化运行和高效管理,并且根据试验所得数据可准确计算压水试验在水平孔中试验段的水位高程。经实际工程应用验证,该新型压水试验设备及试验方法显著提高了试验数据的可靠性和精度,提升了工作效率,为岩土工程、水利水电工程等领域的地质勘察和工程设计提供了更为科学、准确的基础数据,具有重要的工程应用价值和推广意义。

关键词:千米级水平定向钻孔;压水试验;传感器;智能控制模块;止水栓塞

中图分类号:P634;TV221 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)03-0077-07

R&D and application of water pressure test equipment for kilometer-level horizontal directional boreholes

ZHANG Xiangxiang¹, YANG Dong^{1,2*}, ZHU Xian³, WANG Junchao², LI Yong^{1,2}, ZHANG Jiamin¹

(1. Chengdu Huajian Geological Engineering Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 611734, China; 2. The Institute of Exploration Technology, GAGS, Chengdu Sichuan 611734, China; 3. Hunan Institute of Natural Resources Survey, Changsha Hunan 410007, China)

Abstract: Traditional water pressure test equipment has many limitations in data collection and test operation, and it is difficult to meet the needs of high-precision projects. This paper introduces a set of water pressure test methods and equipment suitable for kilometer-level horizontal directional holes, which incorporates an advanced automatic collection system, integrates high-precision sensors and intelligent control modules, innovatively designs the water-stop plug structure. This set of equipment can directly measure the actual pressure of the test section excluding pipeline losses. It can also judge the sealing performance of the test section and improve the test reliability. The key parameters in the test process can be recorded in real-time, continuously and accurately, avoiding problems such as manual operation errors and untimely data collection. The design of the new water-stop plug reduces the accident rate. The supporting test method is optimized according to the characteristics of the intelligent complete set of equipment, realizing the automatic operation and efficient management of the test. According to the test data, the water level elevation of the test section

收稿日期:2025-03-11; 修回日期:2025-04-15 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.03.010

基金项目:湖南省地质院科研项目“千米级水平钻孔压水实验设备研发”(编号:HNGSTP2022);中国地质调查局地质调查项目“地质矿产勘查技术方法升级与应用”(编号:DD20243535)

第一作者:张祥祥,男,汉族,1998年生,助理工程师,机械工程专业,主要从事机械设计和孔内测试技术研究工作,四川省成都市郫都区港华路139号,1662936213@qq.com。

通信作者:杨栋,男,汉族,1985年生,高级工程师,注册岩土工程师,岩土工程专业,硕士,主要从事岩土体稳定性、地灾防治技术和孔内测试技术研究工作,四川省成都市郫都区港华路139号,271062514@qq.com。

引用格式:张祥祥,杨栋,朱贤,等.千米级水平定向钻孔压水试验设备研发与应用[J].钻探工程,2025,52(3):77-83.

ZHANG Xiangxiang, YANG Dong, ZHU Xian, et al. R&D and application of water pressure test equipment for kilometer-level horizontal directional boreholes[J]. Drilling Engineering, 2025,52(3):77-83.

次试验验证,一般压水试验将频率设定为2.5 s时采集的数据处理起来更方便直观^[10]。单次采集时间最低可以连续记录148 h。其技术标准见表1。

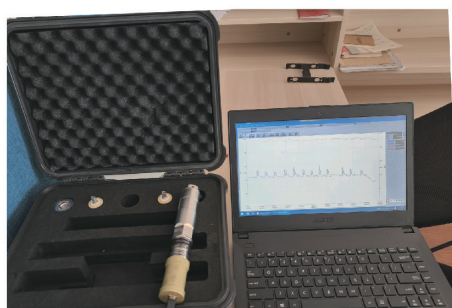


图2 存储式压力计

Fig.2 Storage-type pressure gauge

表1 存储式压力计技术标准

Table 1 Technical standards for storage-type pressure gauge

性 能	参 数
压力量程/PST	0~20000
压力精度/%	0.03(满量程)、0.05(满量程)
温度量程/℃	-20~150
温度精度/℃	±0.5
温度分辨率/℃	0.01
数据存储容量	50万组数据点
工作模式	存储
采样间隔	1 s~24 h

1.2.2 地表自动记录系统的研制

地表自动记录系统是将流量和压力集成(见图3),以数模转换器为集成模块,具有高稳定性、抗干扰的特性^[4]。超声波流量计要求过管水质清洁,无杂质;电磁流量计要求出管水量必须满管,无磁场影响;机械式涡轮流量计精度较高且量程范围广,可以应对复杂工况,但是涡轮易卡死,在现场水质无法保证清洁且抽水功率以及新旧程度不同情况下,试验过程中难免抽出带气泡水且无法保证满管,可通过沉淀法保证水质无杂质且达到试验要求。因此择优选择机械式涡轮流量计。内设压力变送器分辨率可以达到0.05%,响应频率<5 Hz,响应速度>10 ms。系统内增加了压力自动调节功能,选用的是不锈钢电动球阀通过控制泄水流量大小来实现压力的调节。最后通过软件算法使得测量数据得以实时保存。在不同的工况要求下可通

过更改软件参数设置采集频率以及精度。

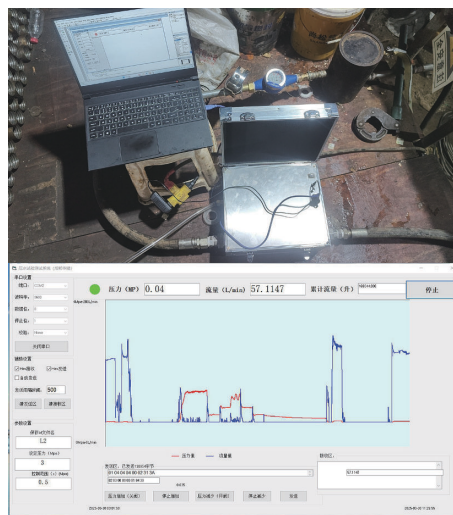
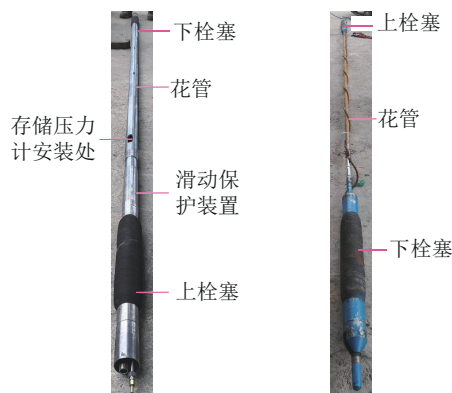


图3 地表自动记录系统

Fig.3 Surface automatic recording system

1.2.3 双栓塞结构的改进

考虑到深孔推送对栓塞的磨损和在推送过程中防止有卡死风险,对栓塞结构改进如下(见图4)。



(a) 新研发双栓塞

(b) 传统双栓塞

图4 栓塞结构(膨胀起状态)

Fig.4 Plug structure(inflated state)

(1)在栓塞橡胶末端滑动刚体处设计随动油室利用液压油增加润滑性,使用双密封圈提高密封性。

(2)试验段花管外径大于栓塞外径1~2 mm,推送过程中花管接触孔壁悬空栓塞橡胶。

(3)双栓塞滑动位置朝孔口向下方向安装,栓塞膨胀滑动方向则与提钻方向一致,优先考虑有卡塞现象发生后利于提出设备。

(4)钢体部分选用不锈钢材质,橡胶为可更换式,以达到节约成本、延长寿命的目的。

(5)设计适用双口径膨胀栓塞外径 $\varnothing 70$ mm,可同时用于 $\varnothing 76$ mm口径和 $\varnothing 96$ mm口径钻孔。

1.2.4 系统软件

开发的地表自动采集系统主要分为用户操作界面、实时显示界面、压力调整区三大模块(见图5)。用户操作界面可设定初始压力以及相应控制精度。实时显示模块可在试验过程中观察流量变化趋势,在透水率不稳定岩层中流量有突然降低或增高状态,为了防止压力过高此时可通过人为干预调整控制精度,待流量稳定后再调回初始状态。压力调整区即在突发状态下可通过软件控制电动球阀,实现压力增加、压力减小。

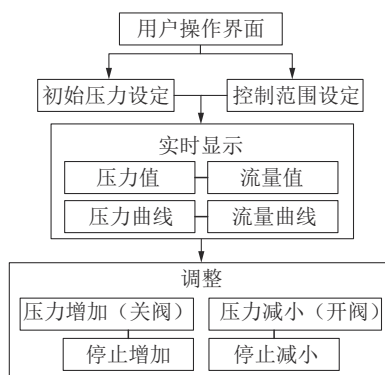


图5 地表系统软件框架

Fig.5 Software framework of surface system

2 工程应用

2.1 工程概况

某电站上移方案厂址山体高程910~1848 m,临河相对高差600~900 m,地形坡度 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$,沿河一侧大部分呈陡坎,山体顶部为斜坡或缓平台。工区地形强烈切割,山势陡峻,属高、中山构造侵蚀地貌,河谷形态以“U”形为主,两岸零星发育有I~III级阶地。厂区地层主要为正长花岗岩($\xi\gamma Z_1$)、二长花岗岩($\eta\gamma Z_1$)、辉长岩(νPt_3)及第四系全新统覆盖层(Q_4),岸边局部可见辉绿岩($\beta\mu Pt_3$)岩脉零星分布,均属硬质岩。在该厂区布置的SPDZK9钻孔以 $\varnothing 146$ mm口径开孔,钻至孔深31.7 m后换 $\varnothing 114$ mm口径沿设计轨迹定向钻进,钻至孔深120.65 m后换 $\varnothing 89$ mm口径,钻至孔深435.5 m后换 $\varnothing 76$ mm口径,钻进至765.7 m终孔。平均岩心采取率97.7%。本文通过测定0~765 m压水试验,获取岩石渗透系数,进行渗透性分级,并结合孔内电视录像和压水

试验综合分析,为隧道改造工程地质评价提供依据。

2.2 压水试验过程

为获取更完整的试验过程数据,在原有五点法试验流程的基础上增加了3个试验步骤(见图6), P_0 :压力观测; P_1 :气密性检测; P_5 :压力恢复。以SPDZK9孔的176~181 m处为例介绍整个压水试验过程。此处以花岗岩为主,部分裂隙发育和隐裂隙发育,岩心破碎。试验过程的设计在标准规范基础上有以下创新点。

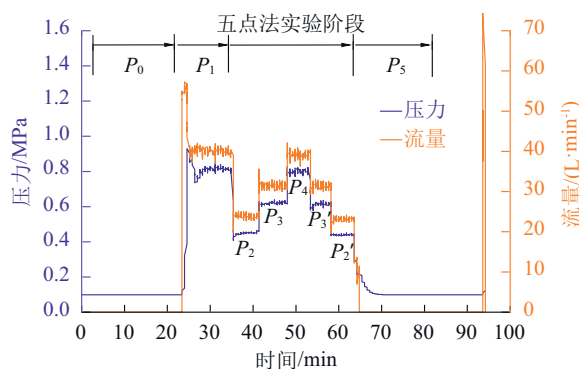


图6 压水试验流程

Fig.6 Flowchart of the water pressure test

(1) P_0 :水柱压力观测。此过程在现场试验中持续时长控制在30 min,双栓塞膨胀起后静置30 min,最后通过压力计数据可观察出试验段压力轻微的变化,一般在孔内水位以上层段不会有太大变化。通常有3种变化状态(见图7),在水平孔中可根据静置状态下稳定后水柱压力的大小计算出试验段水位高程。

(2) P_1 :气密性检测。通过在止水栓塞上、中、下

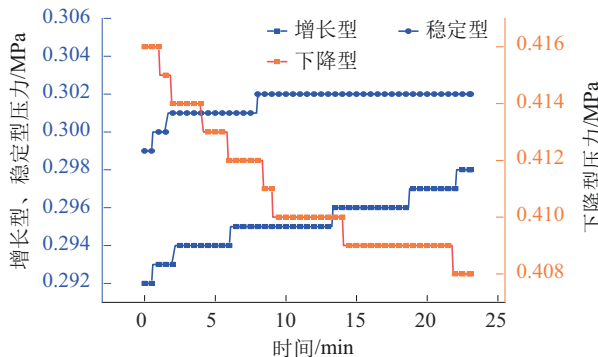


图7 P_0 阶段3种压力变化状态

Fig.7 Three pressure states in the P_0 stage

各布置一个压力计,在试验段注高压水的情况下通过观察各部分压力的稳定性以及压力差的变化值辨别试验段是否漏水。此过程的持续时间为10 min,经过大量试验证明设备布置在一些非常破碎段时当水压过高会冲破孔壁或者水从栓塞侧面露走导致水压突然下降。此时需要改变试验段位置再次试验。

(3)五点法试验阶段:针对该次试验制定了3级压力的试验规程,即0.3 MPa(5 min)→0.6 MPa(5 min)→1 MPa(5 min)→0.6 MPa(5 min)→0.3 MPa(5 min),按照该过程逐级升压至1 MPa后再逐级降压。

(4) P_5 :压力恢复阶段。五点法试验阶段结束后关闭进出口水阀,保持栓塞气压稳定,静置30 min后观察存储压力计压力变化情况,此阶段可反应出水压力消散速度以及在涌水段可明显看出压力呈上升趋势。

设备的改进极大的提升了试验结果的准确性和稳定性,与传统压水试验相比,智能化设备具备完善的安全监测和预警系统;试验人员可随时查看设备运行和试验进展,进行参数调整和指令下达;自动化程度高,流程简化,可采集多方面数据,在大规模试验中优势明显。

2.3 测试成果

水利工程地质勘察中根据渗透系数对岩体的

渗透性进行了划分,不同裂隙岩体对应不同的透水等级(见表2),渗透系数 k 是一个代表岩体的渗透性强弱的重要指标,也是渗流计算时必须用到的一个基本参数^[11]。不同种类的岩体 k 值差别很大^[12]。

表2 不同裂隙岩体对应的透水等级

裂隙含等价开度/mm	透水等级
<0.025或完整岩石	极微透水
0.025~0.05	微透水
0.05~0.01	弱透水
0.01~0.5	中等透水
0.5~2.5	强透水
>2.5或连通孔洞	极强透水

此次压水试验对0~300 m孔段每5 m一个段次、300~765 m孔段每20 m一个段次分别进行了全孔的压水试验,共72段次。依据岩心特征及破碎程度分类选取6段典型水平孔代表性断面压水试验资料作为主要分析对象,分析压力及流量随时间的变化规律,形成压水试验典型段成果图(图8)以及岩体渗透性分级表(表3)。不同钻孔深度下透水率变化与钻孔电视成像及岩心吻合度较高,所得出的渗透系数值也能较好反应电站厂区地层实际透水程度^[13]。

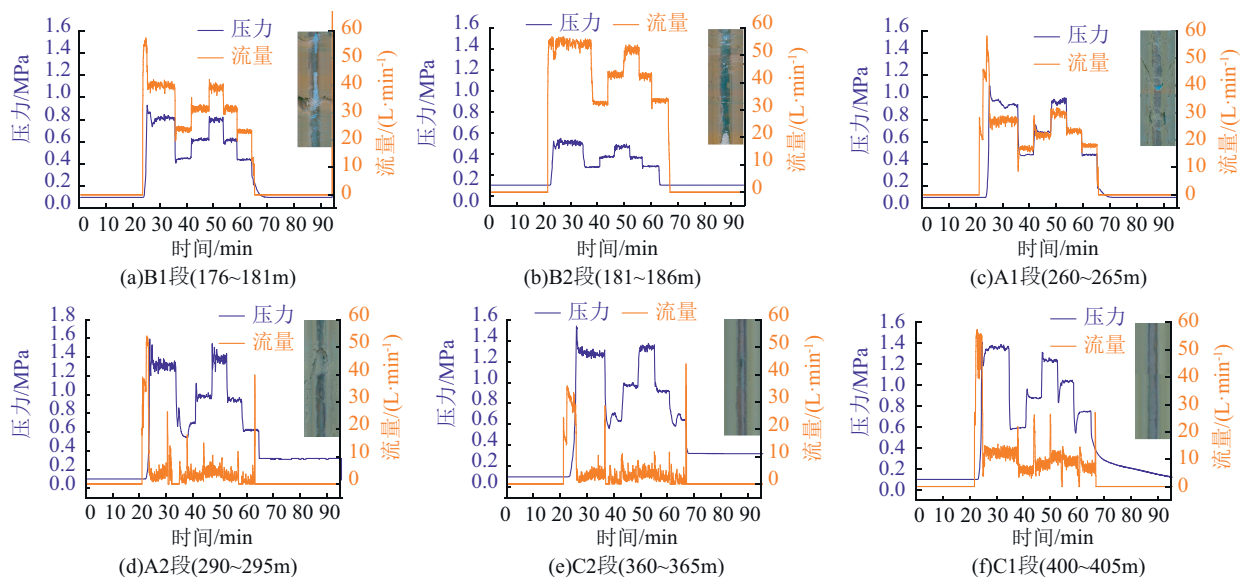


图8 压力和流量随时间变化关系试验结果

Fig.8 Test results of the changes of pressure and flow varies with the time

表3 岩体渗透性分级

Table 3 Classification of rock mass permeability

段号	深度/m	压力/MPa	流量/(L·min ⁻¹)	透水率/Lu	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	渗透性等级
B1	176~181	0.38	46.2	24.22	1.6×10^{-3}	中等透水
B2	181~186	0.7	38.7	11.01	7.57×10^{-4}	弱透水
A1	260~265	0.89	29.45	6.59	4.53×10^{-4}	弱透水
A2	290~295	1.16	10.4	1.79	1.22×10^{-4}	弱透水
C2	360~365	1.25	3	0.48	1.97×10^{-6}	极微透水
C1	400~405	1.31	4.5	0.68	4.7×10^{-5}	微透水

利用压水试验资料统计得出全孔透水率随孔深分布变化以及运用统计学来确定全孔透水率分段占比(图9)。结果表明,划分了岩心分区后的透水率分布情况与整体上的分段统计值都较为接近,说明按岩心裂隙程度对某水电站岩体划分渗透特性是合理有效的。

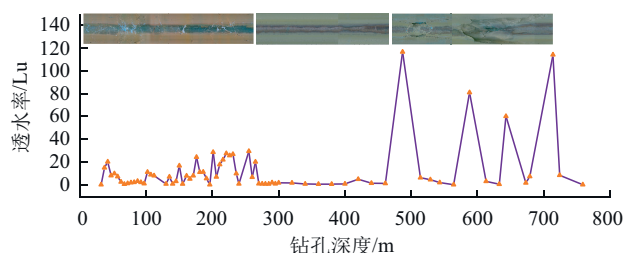


图9 透水率分段区分图

Fig.9 Diagram of permeability rate segmentation

3 讨论

3.1 适宜性分析

(1)满足千米级水平钻孔压水试验需求。通过压水试验设备和工艺工法的升级,在SPDZK9钻孔实地应用后验证了该设备能满足千米级压水实验的需求,并且在之后其他钻孔中该套设备已经成功突破了1200 m的深度测试。另外,通过设备的智能化改造,提高了实验数据的实时性和准确度。

(2)水平孔水位计算。通过图6中 P_0 阶段压力趋向稳定值的数据和孔口高程可以计算水平孔中压水试验过程每个试验段的水位,获取的试段压力排除了管路损失。

3.2 局限性分析

(1)试验段流量采集缺陷。孔口采集的流量值经过管路损失等因素与实际的试验段透水量之间存在一定误差,未来可设计将流量计直接内置于栓塞上端或试验段内部,进一步推动数据的可靠性。

(2)橡胶强度较低。在涌水量大、破碎段多的钻孔中存在事故风险。压水试验栓塞橡胶一直是事故高发处,应继续加强强度设计,采用合适材料。

(3)试验效率不高。在超深孔做实验需要起下钻提出所有钻杆,费时费力。近年来随着绳索取心工艺的不断发展与成熟,随钻压水试验也在国内有了进展^[14-16],未来可以朝着随钻测试方向发展。

4 结论

通过试验设备和试验方法的改进,形成了一套适用于千米级水平定向深孔的各种渗透性岩体的压水试验方法和高精度的压水试验设备,实现了精细化的压水试验,为长深埋工程岩体渗透系数的准确、快速获取提供了一种方法,达到了以下效果:

(1)使用压力传感器直接测定试验段实际压力,获取的试验段压力排除了管路损失;

(2)通过布置在止水栓塞上、中、下的3个压力传感器实时监测试验过程中各部位的水压变化数据,判别试验段的密封性;

(3)配套0~100 L量程的高精度自动流量记录系统,解决试验过程应对各种压力升降的实时记录和数据反馈,避免了人工读数误差大的问题;

(4)建立了适用于各种渗透性的岩体的综合压水试验体系,可以测得 $<1.0 \times 10^{-5}$ m/d量级的渗透系数,更加精确;

(5)在超深孔做压水实验需要起下钻,测试效率低,随着绳索取心工艺的不断发展与成熟,可促进水平定向孔压水测试向随钻测试的发展。

参考文献(References):

- [1] 刘明明,李博勇,熊泽斌,等.基于钻孔压水试验的渗透系数取值方法研究[J].中国农村水利水电,2021(5):183-187.
LIU Mingming, LI Boyong, XIONG Zebin, et al. An analytical

- model for the permeability of fractured rocks based on water pressure tests in boreholes[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(5):183-187.
- [2] 王晓鹏,田铂,张广滨.全自动记录和传统手动记录压水试验结果对比研究[C]//石油天然气勘察技术中心站第三十一次技术交流研讨会论文集.淮安:中国石油学会石油工程专业委员会,2024:131-135.
- WANG Xiaopeng, TIAN Bo, ZHANG Guangbin. Comparative study on the results of fully automatic recording and traditional manual recording water pressure tests[C]//Proceedings of the 31st Technical Exchange Seminar of the Petroleum and Gas Exploration Technology Center Station. Huai'an: Petroleum Engineering Professional Committee of China Petroleum Society, 2024:131-135.
- [3] 姜龙,段庆伟,曹瑞琅,等.引汉济渭工程隧洞围岩压水试验装置研发及应用[J].山西建筑,2017,43(25):59-61.
- JIANG Long, DUAN Qingwei, CAO Ruilang, et al. Development and application of water pressure test device for tunnel surrounding rock of the water diversion from the Han to the Wei River[J]. Shanxi Architecture, 2017,43(25):59-61.
- [4] 钟威,何晨辉,毕娜,等.改进的压水试验技术及其在地下水封洞库中的应用[C]//石油天然气勘察技术中心站第三十一次技术交流研讨会论文集.淮安:中国石油学会石油工程专业委员会,2024:124-130.
- ZHONG Wei, HE Chenhui, BI Na, et al. Improved water pressure test technology and its application in underground water-sealed caverns [C]//Proceedings of the 31st Technical Exchange Seminar of the Petroleum and Gas Exploration Technology Center Station. Huai'an: Petroleum Engineering Professional Committee of China Petroleum Society, 2024:124-130.
- [5] 彭满华,翁洋益,张海顺,等.多段锥压式止水栓塞的研究及应用[C]//2014全国工程勘察学术大会论文集.呼和浩特:全国建筑工程勘察科技情报网,2014:611-615.
- PENG Manhua, WENG Yangyi, ZHANG Haishun, et al. Research and application of multi segment cone type sealing plug [C]//Proceedings of the 2014 National Engineering Survey Academic Conference. Hohhot: National Construction Engineering Survey Technology Information Network, 2014:611-615.
- [6] 金水源,张红纲,傅克登,等.绳索取芯和液压式压水试验技术在水利工程地质勘探中的联合应用[C]//2018年全国工程勘察学术大会论文集.西安:中国建筑学会工程勘察分会,2018:261-266.
- JIN Shuiyuan, ZHANG Honggang, FU Kedeng, et al. Combined application of rope core and hydraulic pressure water test technology in water conservancy construction [C]//Proceedings of the 2018 National Engineering Survey Academic Conference. Xi'an: Engineering Survey Branch of China Architectural Society, 2018:261-266.
- [7] 杨栋.一种新型钻孔压水试验压力控制设备设计与应用[J].陕西煤炭,2024,43(9):127-130,172.
- YANG Dong. Design and application of a new type of pressure control equipment for borehole water pressure test [J]. Shaanxi Meitan, 2024,43(9):127-130,172.
- [8] 房勇,钱锋,周策,等.水平孔多参数综合测试仪器研发与应用[J].钻探工程,2024,51(1):97-105.
- FANG Yong, QIAN Feng, ZHOU Ce, et al. Development and application of multi-parameter integrated testing instrument for horizontal hole [J]. Drilling Engineering, 2024,51(1):97-105.
- [9] 蔡赫.存储式电子井下压力计校准存在的问题及解决办法[J].石油工业技术监督,2024,40(12):34-39.
- CAI He. Problems and solutions in the calibration of stored electronic downhole pressure gauge [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2024,40(12):34-39.
- [10] 张毅.存储式电子压力计在水平井压裂中的应用[J].石油矿场机械,2012,41(10):81-85.
- ZHANG Yi. Application of electronic memory gauge in horizontal well for fracturing [J]. Oil Field Equipment, 2012,41(10):81-85.
- [11] 胡代钊.东津水库坝肩岩体压水试验渗透系数分析[J].黑龙江水利科技,2023,51(4):100-103.
- HU Daizhao. Analysis of permeability coefficient of water pressure test of rock mass at the abutment of Dongjin Reservoir [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2023,51(4):100-103.
- [12] 陈强,聂德新,潘思祎,等.渗透系数作为岩体卸荷分带量化指标的研究[J].水文地质工程地质,2011,38(4):48-53.
- CHEN Qiang, NIE Dexin, PAN Siyi, et al. A study of coefficient of permeability as a quantitative classification index for unloaded zones of rockmass [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011,38(4):48-53.
- [13] 李军,李勇,谢小国,等.狮子洋主航道水平勘察孔测井评价方法研究与应用[J].钻探工程,2022,49(6):21-29.
- LI Jun, LI Yong, XIE Xiaoguo, et al. Research and application of the logging evaluation method for horizontal holes in the main Channel of Shiziyang [J]. Drilling Engineering, 2022,49(6):21-29.
- [14] 柏君,王胜,赖昆,等.基于随钻关键参数的岩体智能探测方法研究进展[J].钻探工程,2024,51(5):77-84.
- BAI Jun, WANG Sheng, LAI Kun, et al. Research progress on intelligent rock mass detection method based on drilling parameters [J]. Drilling Engineering, 2024,51(5):77-84.
- [15] 周治刚,黄帆,丁晔,等.轻便式气囊隔离随钻压水试验器的研制与应用[J].钻探工程,2024,51(S1):258-262.
- ZHOU Zhigang, HUANG Fan, DING Ye, et al. Development and application of a portable pump-in tester while drilling with airbag isolation [J]. Drilling Engineering, 2024,51(S1):258-262.
- [16] 肖冬顺,马明,项洋.水利水电钻探技术进展及发展趋势[J].钻探工程,2021,48(1):103-111.
- XIAO Dongshun, MA Ming, XIANG Yang. Progress and development trend of water conservancy and hydropower drilling technology [J]. Drilling Engineering, 2021,48(1):103-111.

(编辑 王文)