

基于可控卸压装置的分层水文地质试验装置设计与应用

曾伟国, 张宁, 张小平

(中水珠江规划勘测设计有限公司, 广东广州 510610)

摘要: 随着国家大型工程建设的推进, 深埋隧洞施工日益增多, 其衬砌结构设计面临高外水压力的挑战, 现有针对深埋隧洞水文地质试验的试验装置和方法存在诸多不足。本文介绍了一种基于可控卸压装置的深埋隧洞分层水文地质试验装置及方法。该试验装置通过封隔器栓塞隔离试验段与上下岩层的水力联系, 利用可控卸压装置消减试验段内高地下水压力, 再通过渗压计测得地下水压力恢复时间及最终分层地下水压力, 通过建立内置空气罐气体与地下水压力、入渗水总量的动态平衡关系, 可推算出岩层渗透系数, 实现地下水正向流入工况下的水文地质试验。该装置及方法具有操作简便、适用性强、成本较等优点, 已在某大型水资源配置工程中得到应用, 为深埋隧洞的结构设计和安全运行提供了可靠依据。

关键词: 深埋隧洞; 分层水文地质试验; 可控卸压装置; 外水压力折减; 岩层渗透系数

中图分类号: TV554; P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)03-0071-06

Design and application of a stratified hydrogeological test device based on controllable pressure relief equipment

ZENG Weiguo, ZHANG Ning, ZHANG Xiaoping

(China Water Resources Pearl River Planning, Surveying & Designing Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510610, China)

Abstract: With the advancement of national large-scale engineering projects, the construction of deep-buried tunnels has increased significantly, posing challenges to lining structure design under high external water pressure. Existing hydrogeological test devices and methods for deep-buried tunnels exhibit multiple limitations. This paper introduces a stratified hydrogeological test device and methodology for deep-buried tunnels based on controllable pressure relief equipment. The device isolates the test section from hydraulic connections with upper and lower rock strata using packer plug, employs a controllable pressure relief device to reduce high groundwater pressure within the test section, and measures groundwater pressure recovery time and final stratified groundwater pressure through piezometers. By establishing a dynamic equilibrium relationship between the built-in air vessel gas, groundwater pressure, and total infiltrated water volume, the permeability coefficient of rock strata can be calculated, enabling hydrogeological testing under groundwater inflow conditions. This device and method feature operational simplicity, strong applicability, and low cost, and have been successfully applied in a large-scale water resources allocation project, providing reliable references for structural design and safe operation of deep-buried tunnels.

Key words: deep-buried tunnel; stratified hydrogeological test; controllable pressure relief device; external water pressure reduction; rock stratum permeability coefficient

0 引言

近年来, 国家大力发展大型基础设施建设, 如

大型引调水工程、抽水蓄能电站等。张小宝等^[1]指出, 随着中国长距离引调水工程的兴建, 深埋隧洞

收稿日期: 2025-03-03; 修回日期: 2025-04-11 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.03.009

第一作者: 曾伟国, 男, 汉族, 1985年生, 水利水电勘察所副所长, 高级工程师, 工程地质专业, 从事水利水电工程地质勘察及研究工作, 广东省广州市天河区沾益直街19号, 514740306@qq.com。

引用格式: 曾伟国, 张宁, 张小平. 基于可控卸压装置的分层水文地质试验装置设计与应用[J]. 钻探工程, 2025, 52(3): 71-76.

ZENG Weiguo, ZHANG Ning, ZHANG Xiaoping. Design and application of a stratified hydrogeological test device based on controllable pressure relief equipment[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 71-76.

的埋深通常可达500~1000 m,工程建设中的高外水压力将成为深埋隧洞建设的关键制约因素,直接影响工程的安全和成本。厘清隧洞全生命周期地下水的水力联系规律是准确评价深埋隧洞外水压力和隧洞建设影响地下水环境的关键^[2-3]。

当前深埋隧洞勘察中常用的水文地质试验方法主要包括压水试验、钻孔抽水试验及微水试验等^[4-7]。压水试验通过向岩层注入带有压力的水来获取渗透系数,其试验方向与隧洞实际渗流方向相反,试验数据受钻孔扰动、注水压力范围、封隔器密封性等因素影响。例如,高压注水可能导致裂隙扩展,使渗透系数测量值偏大^[8]。另外,压水试验在极低渗透性岩体(如完整花岗岩、深部页岩等)中可能无法获取有效数据,因注水量过小导致误差显著^[9-10]。抽水试验需在钻孔内放置大直径潜水泵,封隔器充气工艺复杂且事故率高,成本达常规钻孔的3倍以上,深孔环境下水泵扬程不足问题也制约其在工程中的适用性^[11-12]。微水试验虽能获取局部岩层渗透参数^[13-18],但缺乏激发高水压的有效手段,难以模拟隧洞实际工况。

鉴于现有水文地质试验方法存在上述缺陷,本文设计研发了一种基于可控卸压装置的深埋隧洞分层水文地质试验装置及方法,以更好地适应深埋隧洞勘察中的水文地质试验,更为简便快速地获取岩体的渗透系数。该装置具有操作简便、适用性强、成本低等优点,试验成果可为深埋隧洞的结构设计和安全运行提供可靠依据。

1 分层水文地质试验装置结构原理

1.1 试验系统结构

本试验系统主要包含封隔系统、水位观测系统以及可控卸压装置^[19],如图1所示。

封隔系统包括上封隔器、下封隔器、水管及压水箱1;水位观测系统包括渗压计、数据线(穿越上封隔器并做好防水措施)、地面显示终端;可控卸压装置包括空气罐、顶针、活塞器、钻杆及压水箱2。

1.2 试验原理与参数计算

在钻孔钻进过程中或钻孔结束后,先用上下封隔器将拟进行水文地质试验的某一长度孔段隔离,再利用可控卸压装置中的顶针刺破内置的空气罐来给试验段的水压力卸压,消减试验段内高水压力,通过内置的渗压计测得试验段内水压力的恢复

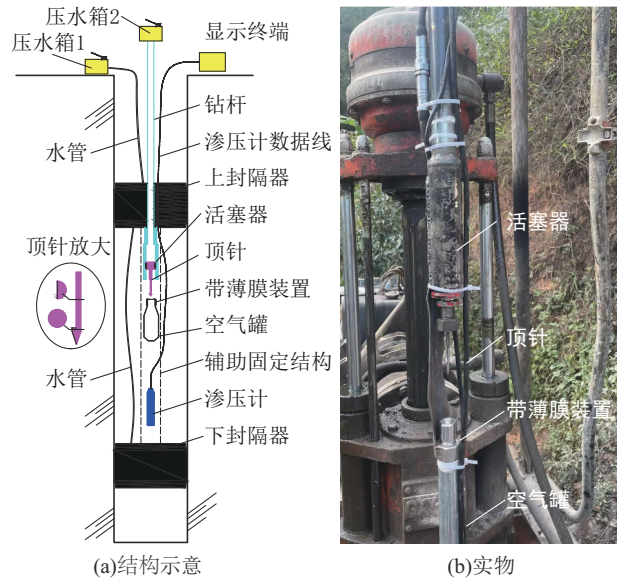


图1 可控卸压装置

Fig.1 The controllable depressurization device

时间及最终水压力。最后利用计算模型推导岩层渗透系数 K 。

试验开始,设顶针刺穿薄膜瞬间 $t=0$ 时空气罐内压力 P_{t0} 为大气压强,此时其内空气体积为 V_{g0} ,即空气罐容积。在 t 时刻,由于外部水体不断渗入空气罐,囊内气体被压缩,此时空气体积为 V_{gt} ,压力为 P_t ,即试验段水压,根据实测 P_t-t 曲线拟合函数 $P_t=P(t)$,其导数为 $P'(t)$ 。假设温度不变,有:

$$P_{t0}V_{g0} = P_tV_{gt} \quad (1)$$

整理可得:

$$V_{gt} = P_{t0}V_{g0}/P_t \quad (2)$$

在试验条件下水的压缩量可以忽略不计,空气罐内空气减少的体积即为 t 时刻入渗水的体积 V_{wt} :

$$V_{wt} = V_{g0} - P_{t0}V_{g0}/P_t \quad (3)$$

根据《水利水电工程钻孔抽水试验规程》(SL320-2005)附录B^[20]中的吉林斯基、巴布什金公式:

$$K = 0.366Q_t \lg(al/r)/(lS) \quad (4)$$

整理可得:

$$Q_t = KlS/[0.366 \lg(al/r)] \quad (5)$$

通过流量 Q_t 对时间的积分求得:

$$V_{wt} = \int Q_t dt \quad (6)$$

由式(3)、(6),可得:

$$\int Q_t dt = V_{g0} - P_{t0}V_{g0}/P_t \quad (7)$$

两边对 t 求导可得:

$$Q_t = \frac{P_{10} V_{g0}}{P(t)^2} P'(t) \quad (8)$$

由式(5)、(8),可得:

$$\frac{100Kl(P_0 - P(t))}{0.366 \lg(al/r)} = \frac{P_{10} V_{g0}}{P(t)^2} P'(t) \quad (9)$$

变换可得:

$$K = \frac{0.366 \lg(al/r) P_{10} V_{g0} P'(t)}{l(P_0 - P(t)) P(t)^2} \quad (10)$$

式中: Q_t —— t 时刻的入渗流量, m^3/s ; a ——调整系数, $a=1.60$; l ——试段长度,即上封隔器底部至下封隔器顶部的距离, m ; r ——试验孔半径, m ; S ——水位降深,等于 $(P_0 - P_t) \times 100$, m ; P_0 ——栓塞封隔前渗压计压力, MPa 。

本试验装置及方法具有以下优点:

(1)解决深埋隧洞外水压力测量难题。通过内置空气罐的方式给试验段水压力卸压,相当于重置水压力,实现了地下水向试验段的正向流入,解决了勘察期深埋隧洞外水压力水文地质试验的一大难题,且使用场景不受深度控制。

(2)本装置较为轻便,使用钻机的钻杆作为活塞及顶针的控制水管,无钻机在场时也可以使用跟隔水栓塞同规格的细水管,能实现无钻机场景的水文地质试验,节约试验成本(钻机台班费)。与传统的抽水试验方法相比,本装置及方法具有操作简便、试验周期短、成本低等优点。本试验装置及方法在某大型水资源配置工程中得到应用,有效降低了水文地质试验的成本,提高了试验效率。

(3)能准确测量地下水压力。通过试验段内放置的渗压计能迅速、准确地读取试验段内水压力变化,从而得出试验段分层地下水压力。

(4)通过建立空气罐气体与地下水压力、入渗水总量的动态平衡关系,可计算出岩层渗透系数,实现地下水正向流入工况下的水文地质试验。

1.3 试验步骤

本套装置的试验步骤如下:

(1)钻孔与封隔系统安装。钻至目的层后,下入封隔系统及水位观测系统到指定深度,静置并观测、记录此时稳定的渗压计读数 P_0 。通过压水箱1向上、下封隔器注水,使上下封隔器膨胀以隔断目的含水层与其他含水层的水力联系。

(2)可控卸压装置操作。通过压水器2向活塞

器压水,推动撞针下移并顶破空气罐封口薄膜。顶针设计为下部实心、上部半空心,下部针头顶破薄膜后顶针继续向下移动,使薄膜位于顶针半空心部分中间,利于外水快速流进空气罐内,迅速消减试验段内水压力。

(3)水压力恢复监测与计算。水位恢复期间,通过地面显示终端观测、记录并储存水位,获得真正的外水压力、水位变化曲线,从而求出岩层的渗透系数。完成试验后,进行封隔器卸压,回收试验装置,更换空气罐中的薄膜,以备下次使用。

2 试验装置应用案例

2.1 工程背景

某大型水资源配置工程隧洞埋深较大,地下水压力问题成为衬砌结构设计的关键。该工程中的一条支线隧洞拟采用盾构法施工,施工期间对隧洞外水压力比较敏感,为准确测量深埋隧洞衬砌外水压力,勘察期间除了进行常规的压水试验外,还在部分钻孔采用基于可控卸压装置的分层水文地质试验装置进行了试验,以进一步查清岩土层的渗透系数,为隧洞外水压力计算提供可靠的基础数据。

2.2 测试过程

以该工程 LCZKSB25 孔为例,该孔孔深 175.30 m,岩性:0~41.0 m 为强风化石英千枚岩及石英片岩、41.00~109.00 m 为弱风化石英岩、109.00~114.70 m 为弱风化石英片岩、114.70~175.30 m 为弱风化石英岩。0~43 m 孔段孔径为 $\varnothing 110$ mm, 43~175.30 m 孔段孔径为 $\varnothing 90$ mm。

钻孔与封隔系统安装。在选定的试验地点施钻孔至目的层后,将封隔系统及水位观测系统通过钻杆下入孔内,到达指定深度后静置。通过栓塞压水箱向上、下栓塞注水,使其膨胀,保持压力在 3~4 MPa,以隔断试验段与上下含水层的水力联系。

可控卸压装置操作。通过活塞压水器经钻杆向活塞器压水,推动撞针下移并顶破空气罐封口薄膜,试验段内地下水压力迅速消减并逐步回升。

水压力恢复监测与计算。通过地面显示终端观测、记录及储存水位,获得外水压力、水位恢复数据及水位变化曲线。根据推导的计算模型计算出岩层分层渗透系数。共进行了 6 段基于可控卸压装置的分层水文地质试验,各试验段测试情况见表 1,基本参数及渗透系数见表 2,恢复曲线见图 2。

表1 各孔段测试情况

Table 1 The testing situations of each section

编号	孔段/m	孔径/mm	岩性	测试次数	成功率/%
1	70.5~74.5	90	弱风化石英岩	2	50
2	79.5~83.5	90	弱风化石英岩	1	100
3	88.0~92.0	90	弱风化石英岩	1	100
4	109.5~113.5	90	弱风化石英片岩	1	100
5	120.5~124.5	90	弱风化石英岩	3	33
6	168.0~172.0	90	弱风化石英岩	1	100

表2 各试验段的基本参数及渗透系数

Table 2 Basic parameters and the permeability coefficient of each test section

编号	$P_0/10^5\text{Pa}$	$V_{g0}/10^{-4}\text{m}^3$	l/m	r/m	$P_0/10^5\text{Pa}$	a	$K/(10^{-6}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	1	4.25	4	0.045	5.6	1.6	10.8
2	1	4.25	4	0.045	6.5	1.6	1.23
3	1	4.25	4	0.045	7.7	1.6	1.34
4	1	4.25	4	0.045	10	1.6	0.249
5	1	4.25	4	0.045	10.7	1.6	1.05
6	1	4.25	4	0.045	14.5	1.6	1.94

2.3 结果分析

通过对多个试验段的试验实践,对试验结果分析如下:

2.3.1 最终恢复的外水压力值

试验结果显示,不同试验孔的初始外水压力存在差异,这与试验段埋深、地质条件等因素有关,通过可控卸压装置能够快速消减试验段内的高地下水压力,并通过渗压计准确监测水压力恢复过程。

从图2中可以看出,恢复时间从8 s到230 s不等,最终恢复的外水压力都接近于原来的外水压力(有的略低),与采用《水利水电工程地质勘察规范》(GB 50487-2008)里的折减系数方法计算出来的外水压力结果差距较大,分析是因为该工程目前尚未施工,地下水没有排泄条件,地下水压力必然都是恢复到本身该有的分层水位压力,并不会出现折减,最终恢复的外水压力数据体现出来的就是实际分层地下水水位。这个观测结果也体现了隧洞的外水压力计算应该考虑隧洞开挖及运行时地下水排泄的作用。衬砌及隧洞周围岩石圈的渗透性对隧洞面临的外水压力起到非常重要的作用,采用合适的水文地质计算模型(例如选取对外水压力有影

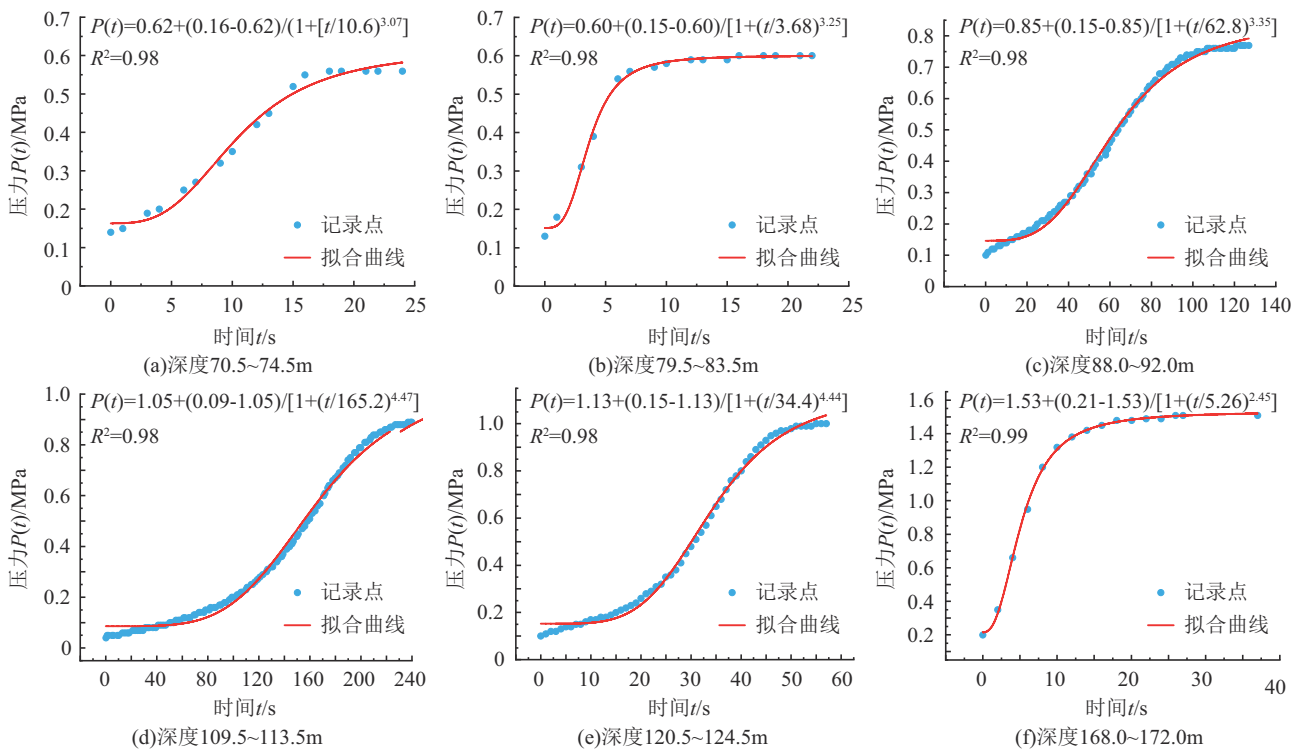


图2 压力恢复曲线

Fig.2 Pressure recovery curves

响的岩石圈半径及渗透系数、合适的衬砌结构渗透系数、考虑隧洞排水条件等^[21])更符合隧洞开挖及运行后的地下水渗流特征,结果才会更准确。

2.3.2 渗透系数

从上述试验成果中可以看出,由于地层渗透系数不一样,各个试验段地下水压力恢复的时间也存在较大差异,这反映了岩层的非均质性。总体来说,渗透系数小恢复得慢,渗透系数大则恢复得快。通过给每个恢复曲线适配的曲线函数,求得曲线函数的相应导数公式,然后将曲线函数及其导数代入式(10),得到了每个试验段对应岩层的分层渗透系数,从 2.49×10^{-7} cm/s到 1.08×10^{-5} cm/s,相应的岩层渗透性从微透水到弱透水。

为了验证本试验成果的可靠性,在该钻孔相应孔深进行了压水试验,试验采用三级压力五段式试验方法,压力分别为0.2—0.4—0.6—0.4—0.2 MPa,按照《工程地质手册》(第五版)^[22]提供的公式(9-3-11)对试验数据进行整理计算,试验成果见表3。

表3 压水试验计算结果

Table 3 Calculation results of the pressure water test

编号	孔段/m	水位/ m	水头/ m	流速/ (cm ³ ·s)	K/(10 ⁻⁶ cm· s ⁻¹)	渗透 等级
1	70.5~74.5	19	79	39.4	8.9	微透水
2	79.5~83.5	19	79	21.7	4.9	微透水
3	88.0~92.0	19	79	11.9	2.7	微透水
4	109.5~113.5	19	79	4.5	1.0	微透水
5	120.5~124.5	19	79	6.6	1.5	微透水
6	168.0~172.0	19	79	9.5	2.2	微透水

将本试验系统试验结果与压水试验结果对比(见图3),发现本试验得出的大部分数值都比压水试验略小,其中109.5~113.5 m本试验值为 2.49×10^{-7} cm/s,与压水试验值 1.02×10^{-6} cm/s相差较大,这是因为压水试验在极微透水层中可能无法获取有效数据,也可能是由于注水的压力使岩层中的闭合裂隙有所张开导致数据偏大,而利用本装置进行试验则未改变围岩应力条件,能较好地适应极微透水层中的水文地质试验。

2.3.3 适用范围

由于本试验中地下水压力变化在向渗压计传导时存在迟滞效应,地下水压力超短时间内的变化数据不容易被渗压计记录,或者说记录的数据不准

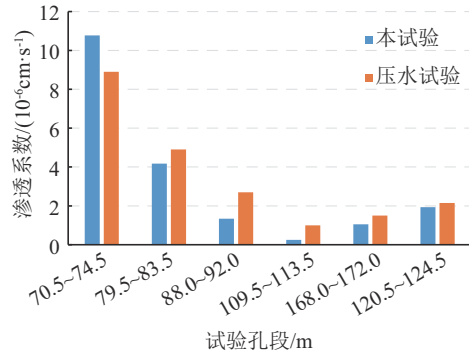


图3 本试验与压水试验测得渗透系数对比

Fig.3 Comparison of permeability coefficient measured in this test and packer test

确。目前认为变化范围在5 s以内的数据变化不容易被很好地观测和记录,所以本试验装置更加适用于恢复时间超过5 s的水文地质试验。假设试验时间为5 s,代入上述变化曲线及公式,得到曲线方程和渗透系数值基本在 10^{-5} cm/s数量级,因此本试验装置适用弱透水及以下渗透性的岩层中。

3 结论

本文介绍的基于可控卸压装置的深埋隧洞分层水文地质试验装置及方法,通过创新的试验原理和装置设计,减少对围岩应力扰动的同时实现了对对深埋隧洞弱中透水及以下渗透性岩层的分层水文地质试验,为隧洞支护与衬砌设计提供了可靠的基础资料。在某大型水资源配置工程中的应用表明,该装置及方法具有操作简便、适用性强、成本低等优点,结果准确可靠,具有广阔的应用前景。未来,随着试验技术的进一步完善和推广,该装置及方法有望在更多深埋隧洞工程勘察中得到应用,为大型引调水工程、抽水蓄能电站工程等包含深埋隧洞构筑物的工程建设提供有力的技术支持。

参考文献(References):

[1] 张小宝,司富安,段世委,等.深埋水工长隧洞主要工程地质问题与勘察经验[J].水利规划与设计,2021(12):55-60.
ZHANG Xiaobao, SI Fuan, DUAN Shiwei, et al. Major engineering geological issues and exploration experience of deep-buried hydraulic long tunnels[J]. Water Resources Planning and Design, 2021(12):55-60.

[2] 陈念,张强,汪小刚,等.深埋隧洞地下水分层水力联系地表深孔监测技术与工程应用[J].清华大学学报(自然科学版),2024,64(7):1226-1237.
CHEN Nian, ZHANG Qiang, WANG Xiaogang, et al. Deep

- hole monitoring technology and engineering application of groundwater stratified hydraulic connection for deep tunnel[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 64(7):1226-1237.
- [3] 钮新强,张传健.复杂地质条件下跨流域调水超长深埋隧洞建设需研究的关键技术问题[J].*隧道建设(中英文)*, 2019, 39(4):523-536.
- NIU Xinqiang, ZHANG Chuanjian. Some key technical issues on construction of ultra-long deep-buried water conveyance tunnel under complex geological conditions[J]. *Tunnel Construction (Chinese and English)*, 2019, 39(4):523-536.
- [4] 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.
- [5] 杨联锋,段云星.新型同径分层止水工艺在地热探采深井的应用[J].*钻探工程*, 2021, 48(8):33-39.
- YANG Lianfeng, DUAN Yunxing. Application of new single diameter multi-level water sealing technology in geothermal exploration and production wells[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(8):33-39.
- [6] 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.
- [7] 李福林.基于抽水试验的深基坑降水方案优化调整与实施[J].*钻探工程*, 2021, 48(11):103-110.
- LI Fulin. Optimized adjustment and implementation of deep foundation pit dewatering based on pumping test[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(11):103-110.
- [8] Zhou Y, Rutqvist J, Birkholzer J T. Hydraulic testing challenges in deep boreholes for nuclear waste disposal[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 566:537-549.
- [9] Kuhlman K L, Malama B, Heath J E. Semi-analytical approach for modeling borehole hydraulic tests in low-permeability formations[J]. *Water Resources Research*, 2015, 51(1):550-566.
- [10] Zhang L, Bachu S, Deng H. Risk of leakage in CO₂ storage: the role of overlying formation permeability[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2016, 45:120-129.
- [11] 陈迪,闫海涛,乔翔宇,等.巨厚非均质含水层中超深孔涌水量预测[J].*地质科技通报*, 2024, 43(4):302-310.
- CHEN Di, YAN Haitao, QIAO Xiangyu, et al. Prediction of ultradeep pore water inflow in giant thick heterogeneous aquifers[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(4):302-310.
- [12] 顾素清,宋吉苏.深孔野外抽水试验方法及质量要求探讨[J].*能源技术与管理*, 2010(2):73-74.
- GU Suqing, SONG Jisu. Field pumping test methods and quality requirements for deep boreholes[J]. *Energy Technology and Management*, 2010(2):73-74.
- [13] 陈则连,原国红,赵丙君.微水试验技术的应用研究[J].*工程勘察*, 2009, 37(7):31-34.
- CHEN Zelian, YUAN Guohong, ZHAO Bingjun. A study on application of slug test[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, 37(7):31-34.
- [14] 毛果.基于 Hvorslev 和 CBP 模型的微水试验应用[J].*地球科学前沿*, 2018, 8(5):927-938.
- MAO Guo. Application of slug-water test based on Hvorslev and CBP model[J]. *Advances in Geosciences*, 2018, 8(5):927-938.
- [15] 林广宇,符亚兵,焦志亮,等.微水试验方法在天津地区求取渗透系数应用对比分析[J].*水利与建筑工程学报*, 2020, 18(4):242-246.
- LIN Guangyu, FU Yabing, JIAO Zhiliang, et al. Comparative study on the application of slug test method for permeability in Tianjin[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2020, 18(4):242-246.
- [16] 吴蓉,朱继嗣.基于微水振荡试验资料确定含水层渗透系数[J].*勘察科学技术*, 2013(4):16-19.
- WU Rong, ZHU Jisi. Determination on permeability coefficient of aquifer based on slug test data[J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2013(4):16-19.
- [17] 郭涵轩,王全荣,潘可欣,等.基于微水试验求解高渗透性承压含水层水文地质参数[J].*水文地质工程地质*, 2024, 51(4):108-116.
- GUO Hanxuan, WANG Quanrong, PAN Kexin, et al. Inversion of hydraulic parameters of high permeability confined aquifer based on slug test[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2024, 51(4):108-116.
- [18] 林杰,朱华浪,陈秋丽.基于微水试验的深圳市某场地含水层渗透系数估计方法[J].*工程技术研究*, 2023, 8(22):47-49.
- LIN Jie, ZHU Hualang, CHEN Qiuli. Estimation method of aquifer hydraulic conductivity at a site in Shenzhen based on slug test[J]. *Engineering and Technological Research*, 2023, 8(22):47-49.
- [19] 曾伟国,李振嵩,刘飞.分层水文地质测试方法、计算机设备及存储介质:CN202410874705.X[P].2024-07-02.
- ZENG Weiguo, LI Zhensong, LIU Fei. Layered hydrogeological testing method, device, computer equipment and storage medium: CN202410874705.X[P]. 2024-07-02.
- [20] 中华人民共和国水利部.水利水电工程钻孔抽水试验规程:SL 320—2005[S].北京:中国水利水电出版社,2005.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specification for borehole pumping test of water resources and hydropower engineering: SL 320—2005[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2005.
- [21] 李振嵩,李宁新,张小平.基于四层水文地质结构确定隧洞外水压力的方法和系统:CN202410280748.5[P].2024-03-12.
- LI Zhensong, LI Ningxin, ZHANG Xiaoping. Method and system for determining external water pressure of tunnel based on four-layer hydrogeological structure: CN202410280748.5 [P]. 2024-03-12.
- [22] 编委会.工程地质手册(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- Editorial Committee. *Engineering Geology Handbook (5th ed.)*. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.

(编辑 王跃伟)