

# 压水试验技术发展历程与创新构想

许嘉伟, 王 胜\*, 徐世毅, 唐方杰, 谢 杰, 张 洁, 赖 昆

(成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘要:** 在全球能源结构调整与页岩气等非常规资源勘探开发的背景下, 压水试验作为评估岩体渗透性的关键原位测试技术, 其技术进步对保障能源资源安全具有重要意义。本文系统梳理了压水试验从经验定性到数字化、智能化的发展历程, 分析了其技术理论与试验设备的协同演进。针对传统技术存在的起下钻频繁、效率低、数据解读依赖推断等局限, 提出了不提钻压水试验系统、多功能集成探管和多栓塞压水试验装置3项创新技术构想, 并阐述了其工作原理、工艺流程及技术优势。这些构想分别融合绳索取心、孔内成像探测与多栓塞同步隔离测试等核心技术, 旨在实现压水试验向“高效、精准、可视化”的跨越。本研究可为压水试验从单一参数测试向“地质-水文-工程”一体化诊断平台的演进提供路径参考, 为我国能源资源勘探与重大工程建设提供技术支撑。

**关键词:** 压水试验; 技术发展; 创新构想; 不提钻; 集成探管; 多栓塞装置; 智能化

**中图分类号:** P634; TV543+.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)02-0035-12

## Development and innovative concepts of water pressure test technology

XU Jiawei, WANG Sheng\*, XU Shiyi, TANG Fangjie, XIE Jie, ZHANG Jie, LAI Kun

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China)

**Abstract:** Under the backdrop of global energy restructuring and the exploration and development of unconventional resources such as shale gas, the water pressure test serves as a key in-situ testing technology for evaluating rock mass permeability, and its technological advancement is of great significance for ensuring energy and resource security. This paper systematically reviews the development history of the water pressure test from empirical qualitative analysis to digitalization and intelligence, and analyzes the co-evolution of its technical theories and testing equipment. Addressing the limitations of traditional techniques, such as frequent tripping, low efficiency, and data interpretation relying on inference, three innovative technical concepts are proposed: the non-tripping water pressure test system, the multifunctional integrated probe, and the multi-packer water pressure test device. Their working principles, technological processes, and technical advantages are elaborated. These concepts integrate core technologies including wireline coring, borehole imaging detection, and synchronous multi-packer isolation testing, aiming to achieve a leap towards "high efficiency, high precision, and visualization." This study provides a pathway reference for the evolution of water pressure testing from single-parameter testing to an integrated "geological-hydrological-engineering" diagnosis platform, offering technical support for energy resource exploration and major engineering construction in China.

**Key words:** water pressure test; technological development; innovative conception; non-tripping; integrated probe; multi-packer device; intelligence

收稿日期: 2025-10-30; 修回日期: 2025-12-29 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.02.004

基金项目: 中国电建集团核心攻关项目“深孔不提钻压水试验技术”(编号: CDJ-HXGG-2024-07); 成都理工大学珠峰科学研究计划项目“青藏高原深部找矿快速绿色智能钻进关键技术研究”(编号 80000-2020ZF11411)

第一作者: 许嘉伟, 男, 汉族, 2000年生, 地质工程专业, 硕士研究生, 研究方向为钻探新技术, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, 3240948131@qq.com。

通信作者: 王胜, 男, 土家族, 1982年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 主要研究方向为钻探新材料与新技术, 四川省成都市成华区二仙桥东三路1号, yongyuandewangsheng@sina.com。

引用格式: 许嘉伟, 王胜, 徐世毅, 等. 压水试验技术发展历程与创新构想[J]. 钻探工程, 2026, 53(2): 35-46.

XU Jiawei, WANG Sheng, XU Shiyi, et al. Development and innovative concepts of water pressure test technology [J]. Drilling Engineering, 2026, 53(2): 35-46.

## 0 引言

当代世界能源发展格局正经历深刻变革,在技术创新的强劲驱动下,可再生能源与非常规能源加速崛起。我国是全球第一大能源生产国和消费国,能源稳定供应和结构调整事关国计民生和生态文明建设。2018年我国页岩气累计探明地质储量首次超过 $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，“十四五”期间累计探明页岩气储量达 $3.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，其中自然资源部2025年初发布相关数据指出，在新一轮找矿行动中的新增探明页岩气地质储量就高达 $1.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。矿产资源作为国家经济发展的基石，其勘查开发直接关系到国计民生与安全底线<sup>[1-2]</sup>。我国页岩气资源储量丰富，潜力巨大，但整体发展仍处于早期阶段，主要面临着探明率低、储量动用率低和采收率低的“三低”现状。同时，我国页岩气类型多样、地质条件复杂，勘探开发起步相对较晚，在基础理论研究和关键技术攻关方面仍较为薄弱<sup>[3]</sup>。因此亟需以技术创新为核心动力，大力推动压水试验等关键勘查技术的革新与突破。通过技术升级持续加大勘查精度与深度，依靠科技攻关破解资源探寻难题，为保障国家能源资源安全提供坚实支撑。

压水试验作为水文地质和工程地质勘察中的一项关键原位测试技术，在地质勘察与工程建设中扮演着至关重要的角色，其核心作用在于为防渗帷幕设计、涌水量预测及工程稳定性分析提供定量的岩体渗透性参数<sup>[4-8]</sup>。该技术具有可原位测试、代表性强以及可精准定位含水层段等突出优点，通过获取真实反映裂隙岩体宏观渗透特性的数据，成为保障各类工程安全与渗流控制不可或缺的基石<sup>[9-14]</sup>。同时，在非常规能源领域，压水试验的价值主要体现在储层评价与压裂优化上，能够准确评估页岩气、煤层气及干热岩等储层的渗透性与裂隙发育状况，为指导压裂设计和预测产能提供关键依据<sup>[15]</sup>。其优点在于以较高的成本效益直接获取关乎产能的关键参数，并与工程实践紧密结合。当前，该技术正向自动化、智能化演进，能进一步提升复杂地质条件下评价的科学性与效率，为能源高效开发提供强大支持。其核心原理是在钻孔的某一隔离孔段内，以稳定的压力向孔壁周围的岩体裂隙中压入流体，通过测量压入的流量，来定量评价该区段岩体的透水性和完整性，对于准确评估岩体的渗透性、预测地下水对工程的影响起着不可替代的作用<sup>[16-17]</sup>。

随着科学技术的不断发展，压水试验技术也经历了技术的不断发展与完善，从早期依赖人工读数、计算粗糙的起步阶段，到测试设备、理论模型与数据分析方法持续创新，压水试验技术经历了一个由简至繁、由浅入深、不断精细化与规范化的完善过程。这一演进过程，不仅表现在技术工具的升级，更深刻地反映了技术人员对该试验方法认知的不断深化。

## 1 压水试验发展过程

压水试验作为定量评估岩体渗透性的原位测试方法，其价值已在水电、能源及矿产勘查等领域得到证明。然而，任何一项成熟技术的背后，都必然历经一段从萌芽到规范再到精进的动态演化历程，如图1所示。压水试验今日的精准与高效，并非一蹴而就，深深植根于理论与设备2条脉络相互交织、彼此促进的协同演进之中。理解这一发展脉络，不仅是梳理技术史的需要，更是精准把握其现状、洞察其未来趋势的关键基石。

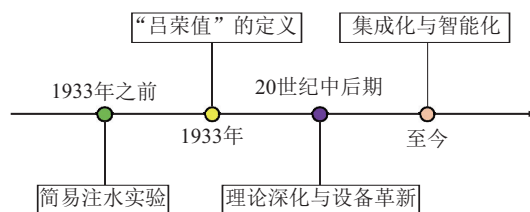


图1 压水试验发展历程

Fig.1 Development of water pressure test

早期“吕荣法”的创立，建立了压力与流量之间的分析框架，实现了岩体透水性的原位定量测试，但方法和装备较为简易，只能通过简易水利、矿山工具对较浅孔洞进行测试。到了20世纪中后期，随着工程实践积累和工程应用的需求增加，我国相关规程明确了采用吕荣法和五点法程序，并推广标准化栓塞，单塞与双塞技术逐步发展，更适用于常规坝基的坚硬及半坚硬岩层。近年来，为应对深埋隧洞、抽水蓄能等工程的高压挑战，技术迭代主要围绕高压化与电子化展开，专门的试验规程和电子化测量设备成为必然要求，提高安全性和精确度的同时，也推动我们对高压下岩体裂隙水流动有了更深入的认识。压水试验的发展正朝着创新拓展与场景深化迈进，其适用范围已扩大至水平钻孔、矿山

巷道等特殊空间,装备上涌现出水平孔专用设备和智能压力控制系统,原理上从单点测量迈向线状连续勘察,并与数值模拟深度融合,实现了从垂直到水平、从人工到智能的集成创新。下面分别对压水试验技术理论与试验设备的发展历程进行分析。

1.1 压水试验技术理论发展

压水试验理论的发展,经历了从经验定性到科学定量的演进过程。1933 年法国工程师吕荣提出“吕荣值”是一个里程碑,首次为岩体透水性评估提供了国际统一的量化基准<sup>[18]</sup>。此后,随着岩体力学、渗流理论及计算机技术的进步,该技术不断深化:首先,是初步量化阶段,技术核心在于建立稳定的流量-压力关系,旨在求得均质、连续介质假设下的透水率,分析方法直接但略显粗糙<sup>[19-21]</sup>;然后,进入了流态判别阶段,研究者发现,将裂隙水流一概视为层流存在显著误差,因此技术重点转向对水流流态(层流、紊流、扩张流)的精确辨识,这为后续的数据校正与模型优化奠定了物理基础<sup>[22-25]</sup>;最后,是当前的模型精细化与智能化解析阶段,在此阶段,技术不再满足于单一公式的应用,而是通过引入多种修正公式和复杂的解释模型,并结合地质统计与

数值模拟,系统性地优化了各参数的计算与转换。这一演进,极大地提升了对非均质、各向异性裂隙岩体水文地质特性评估的准确性与可靠性<sup>[26-29]</sup>。近年来,压水试验迎来了以“融合”为标志的深刻变革。传统的压水试验虽能提供渗透性参数,但其结果易受局部裂隙主导,难以反映岩体结构的整体特征。为突破这一局限,技术发展呈现出明确的“模型化”与“数字化”跃升趋势,其核心路径是主动将压水试验与地球物理测井、数字岩土等先进技术进行交叉融合。这一改进并非简单叠加,而是旨在构建一个多源信息相互验证与约束的解释框架。通过系统性地改进试验流程与反演算法,该框架致力于从单次原位测试中提取并整合更多维度的数据,从而实现对岩体裂隙网络的空间结构、连通性等关键特性的更精准反演,最终推动评估方法从孤立的“参数化”描述,迈向全面且真实的“数字化”岩体模型重建<sup>[30-32]</sup>,其核心不再是优化单一公式的参数,而是构建一个高保真的数字化岩体原型,为渗流-应力耦合分析提供直接输入。在压水试验技术的持续演进中,试验效率与测试精度实现了协同提升<sup>[33-35]</sup>。压水试验技术理论发展详情如表 1 所示。

表 1 压水试验技术理论发展概况

Table 1 Overview of the development of water pressure test technology theory

| 发展阶段        | 时间范围             | 技术革新与焦点       | 主要技术特征                              | 理论基础与支撑              | 局限与突破动因                             |
|-------------|------------------|---------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 经验定性        | 1933 年之前         | 从无标准到追求量化     | 依赖工程师个人经验与定性判断,缺乏统一、可对比的评估标准        | 传统工程经验               | 结果主观性强,无法进行跨项目对比与精确设计               |
| 初步量化        | 1933 年起至 20 世纪中期 | 吕荣值的提出        | 首次为岩体透水性提供了国际统一的量化指标与测试方法           | 经典渗流理论               | 将岩体假设为均质、连续介质,结果易受主导裂隙影响,难以反映复杂岩体结构 |
| 流态判别        | 20 世纪中后期         | 水流流态的精确辨识     | 认识到裂隙流态(层流、紊流、扩张流)对结果的影响,并进行流态判别与校正 | 岩体力学、多相流理论           | 将水流一概视为层流存在显著误差,流态辨识为精细建模奠定了物理基础    |
| 模型精细化与智能化解析 | 20 世纪末至 21 世纪初   | 复杂模型与数值技术应用   | 引入多种修正公式、复杂解释模型,并结合地质统计与数值模拟进行反演分析  | 计算机技术、数值分析、非连续介质渗流理论 | 单一公式无法准确描述非均质、各向异性裂隙岩体的复杂水文特性       |
| 融合与数字化      | 当前与未来            | 多技术交叉融合与数字化重构 | 实现了从“参数反演”到“系统重构”的范式转变              | 数字孪生、大数据、人工智能        | 传统方法难以从“点”的测试揭示岩体“三维空间”的结构特征,信息维度不足 |



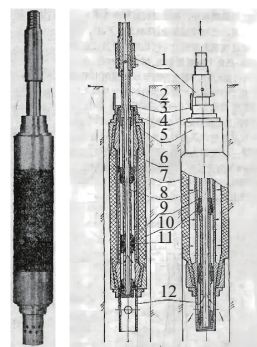
在我国,压水试验的技术发展则是一条引进、消化并实现跨越的创新之路。以阎如璩<sup>[36]</sup>发表《压水试验概略介绍》为关键节点,该项技术被系统引入国内,奠定了方法论基础。此后,我国数代科技工作者结合国内复杂多样的工程实践,通过持续的技术改良与理论创新,不仅克服了诸多本土化应用挑战,积累了宝贵经验,更推动了该技术在国家标准体系、理论模型及工程应用上的深化与拓展<sup>[37-38]</sup>。这一历程不仅满足了国家重大工程建设的关键需求,更实现了从早期的技术追赶到部分领域的国际引领,彰显了中国工程岩土学的长足进步与创新能力。

## 1.2 压水试验设备发展

从吕荣值的提出到流态理论的深化,再到与现代信息技术的融合,每一次理论突破与应用边界的拓展,都离不开测试设备的强力支撑。对试验精度、效率与数据维度要求的不断提高,驱动着压水设备从最初简陋的栓塞、量筒与机械压力表,向高精度变频水泵、智能稳压控制系统、多参数实时采集与自动成图解释的一体化、智能化系统演进。压水试验设备的发展史,同样是一部核心装备不断迭代、功能持续进化的创新史。

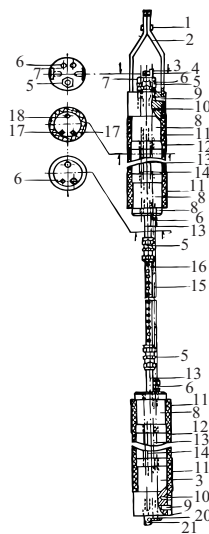
在技术萌芽的早期阶段,设备极为简陋,试验完全依赖操作人员个人经验。试验依靠简易的水利和矿山工具,压力通过机械式压力表盘观测,流量则需人工计时、测量。这种全程手动的方式不仅效率低下,且人为误差显著,数据可靠性与可比性均难以保证。技术的第一次重要突破,聚焦于孔段的精确隔离与压力的稳定控制,可膨胀栓塞开始普及与应用。压水试验设备从早期简陋操作到栓塞技术取得重要突破的发展历程如图2<sup>[39-41]</sup>所示。从国内液压栓塞(图2a)到GPS<sub>3</sub>型双塞(图2b),逐步实现了对目标试验段的可靠封隔,避免了水流串通,确保了测试对象的唯一性。与此同时,机械式调压阀、气液联动加压装置等压力调控设备开始精密化,水压式栓塞(图2c)可提供持续稳定的水头<sup>[42-43]</sup>。这2项核心设备的革新,为“吕荣值”这一标准化指标的建立与推广奠定了坚实的基础。

更具革命性的飞跃源于电子传感与自动控制技术的引入。高精度的电测压力传感器与电子流量计取代了人工判读,能将压力和流量信号实时转换为电信号;与此同时,自动数据采集仪开始取代



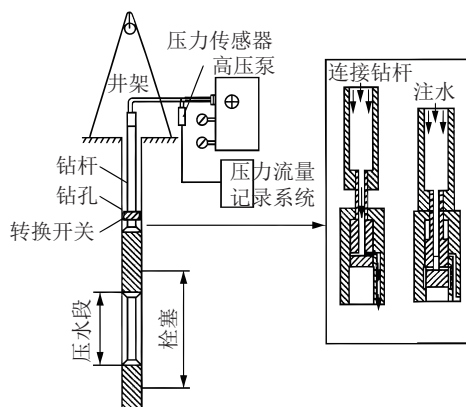
1—放水接头; 2—变径接头; 3—挡帽; 4—锁母; 5—胶塞盖碗; 6—上塔管; 7—橡胶塞筒; 8—螺丝管; 9—螺母螺帽; 10—皮碗; 11—垫片; 12—下塔管

(a)单管液压栓塞



1—螺钉; 2—悬吊架; 3—充气管; 4—供水管; 5、6—接头; 7—压力传感器; 8—封隔器接头; 9—销钉; 10—螺钉; 11—夹持套管; 12—封隔器; 13—供水管; 14—压水管; 15—充气管; 16—穿孔钢管; 17—压力管; 18—供水管; 19、20、21—螺栓

(b)GPS<sub>3</sub>型双塞压水封隔器



(c)水压式栓塞

图2 压水试验设备早期栓塞发展历程  
Fig.2 Early development of packers in water pressure test equipment

手写记录本<sup>[44-46]</sup>。压水试验设备的智能化发展过程如图3<sup>[45-49]</sup>所示。钻孔压水试验综合测试仪(图3a)的出现极大提升了数据的准确性与连续性,更催生了以“微机控制、自动采集、实时显示”为特征的全自动压水试验系统出现,压水试验压力控制设备(图3b)能够精准控制系统压力大小,将操作人员从繁复的现场记录中解放出来<sup>[47]</sup>。当前,压水试验设备已演进为高度集成的智能测试平台,融合精准加压、多参数同步采集与远程信号传输。高度集成化与智能化(如图3c所示的水平定向孔压水试验技术框架体系),使其成功攻克了超长孔段、高渗地层、水平定向钻孔等复杂工况的测试挑战,实现了从“单点参数获取”到“全程智能感知”的跨越,标志着压水试验正式迈入一个以智能化、自动化为核心的全新发展阶段<sup>[48-49]</sup>。

## 2 压水试验技术发展构想

钻孔压水试验作为评估岩体渗透性的关键手段,其理论体系虽已较为成熟,但在工程实践中仍面临施工效率与数据可靠性之间的突出矛盾,亟待实现从理论成熟到高效可靠施工的能力跨越。近年来,该技术呈现出明显的数字化、智能化发展趋势。随着传感器、控制与数据传输系统的升级,高精度传感器、自动稳压控制系统与实时远程监控平台正推动测试过程向高精度、低干预和可复现的方向演进。在此背景下,不提钻压水试验设备作为工艺革新的重要体现,已从概念走向初步应用,如图4<sup>[50-51]</sup>所示。该类设备可实现不起下钻杆即可完成不同孔段的连续测试,显著节约时间、减少孔壁扰动并提高作业安全性。尽管技术方向明确,但传统施工模式仍在实践中占据主导地位,作业高度依赖人工进行钻杆起下,不仅效率低下、安全风险突出,而且传统栓塞的密封性能受孔壁状况影响较大,难以进行可靠评估与实时验证,直接影响数据的真实性与代表性。尤其在深孔、超深孔的分段试验中,反复的起下钻操作不仅成本高昂,还会反复刮擦孔壁,加剧塌孔风险,并对原始地层造成不可逆的扰动<sup>[50-53]</sup>。尽管以不提钻压水试验为代表的新工艺已展现出解决这些痛点的巨大潜力,但目前该项技术还未形成较为成熟的体系,亟需通过技术与装备的升级予以突破。针对以上痛点,未来的发展方向应聚焦于“装备智能化、工艺高效化、数据信息化”。

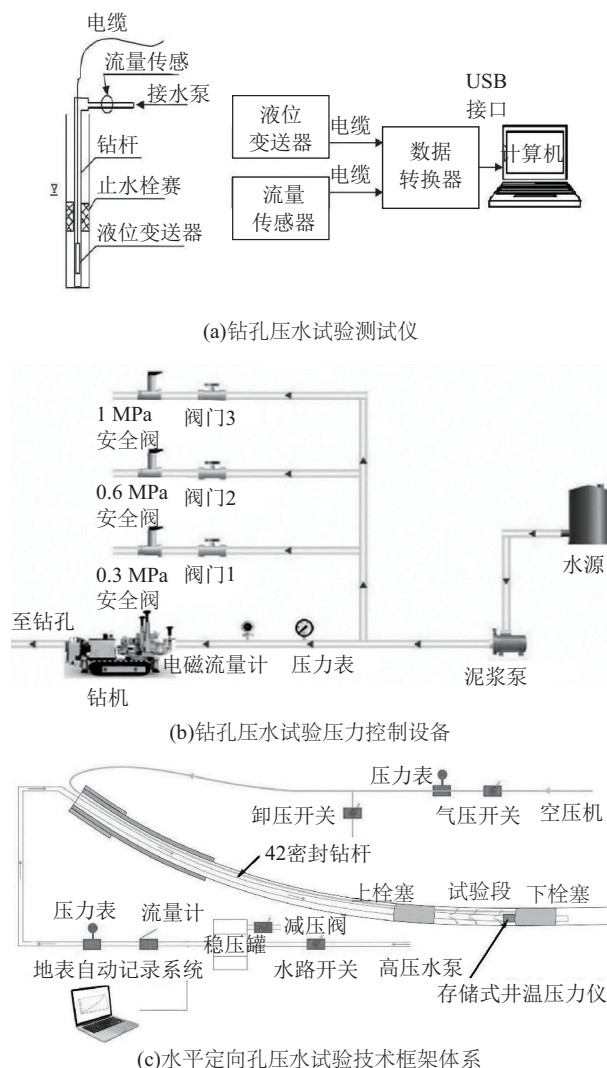
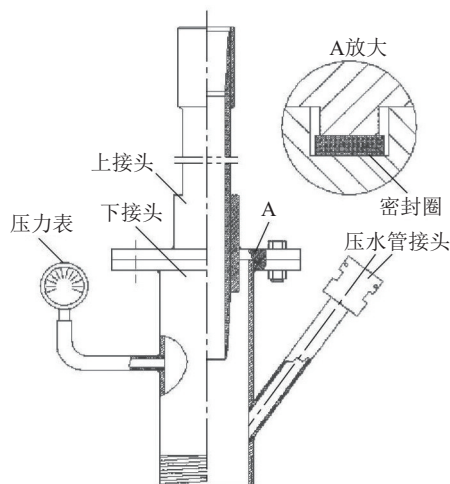


图3 压水试验智能化测试系统发展历程

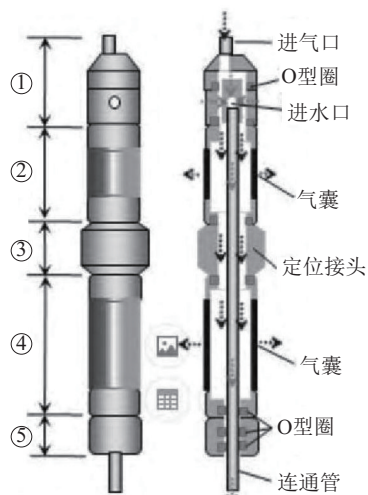
Fig.3 Development history of intelligent test system of water pressure test

## 2.1 不提钻压水试验新构想

随着钻探深度的不断增加,传统压水试验中频繁起下钻杆的工艺弊端日益凸显。该过程不仅耗费大量人力与时间,降低了勘探效率,更因钻具对孔壁的反复刮蹭,对原始地层造成扰动与破坏,极易引发塌孔等事故。已有的不提钻压水试验方法还存在仅能进行单次试验、止水栓塞精度不高以及密封效果受孔壁影响较大等不足。为解决上述问题,构想了一套基于井下原位测试的新型不提钻压水试验系统。该技术的核心在于通过绳索取心与内置式封隔器的协同作业,实现高效、精准测试。此设计将压水试验从一项繁重的外围作业,转变为



(a)分体式不提钻压水试验孔口装置



(b)随钻压水试验器

图4 不提钻压水试验设备

Fig.4 Non-tripping water pressure testing equipment

可与钻探过程集成的测控工序。绳索取心式不提钻压水试验设备从根本上消除了因起下钻导致的效率瓶颈与孔壁损伤风险,且该设备可以根据现场情况,按照现场工艺流程快速组织回次,使多次井下压水测试衔接顺畅,作业效率显著提高。其工艺流程见图5。

(1)钻孔与取心。使用绳索取心钻具钻进至预设的目标试验深度。在获取地下岩心样本的同时,为后续测试形成一个规则、完整的钻孔通道。完成钻进后,通过绳索打捞装置将岩心内管取出地表,为后续测试做好准备。

(2)洗孔与通道准备。在取出岩心内管后,进行孔内清洗作业。清除孔底残留的岩粉、泥浆等杂

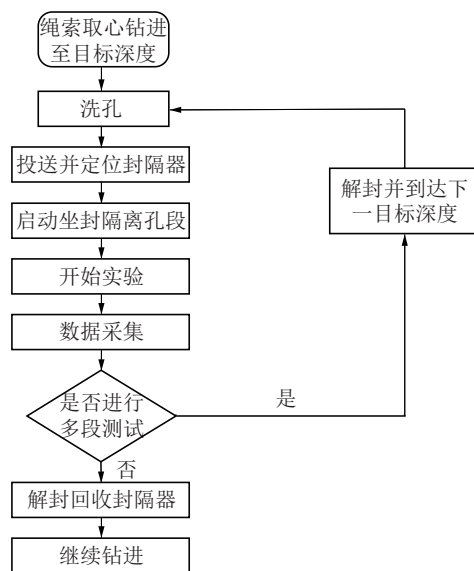


图5 不提钻压水试验设备工作流程

Fig.5 Workflow of non-tripping water pressure testing equipment

质,确保测试孔段保持清洁,避免这些物质影响封隔器的坐封效果和测试数据的准确性。

(3)封隔器模块下放与定位。将一个串接式的双封隔器模块通过钻杆内部通道投送下去。该模块直径经过精密设计,略小于钻头内径,以确保能顺利到达试验孔段。利用钻杆作为投送通道,实现设备在深孔中的快速、精准定位。

(4)目标段精准坐封与隔离。封隔器到达指定位置后,通过地面控制系统发出指令(如液压增压或机械驱动),使上下2个封隔元件同时膨胀。使封隔器与孔壁紧密贴合,在测试层位的上下两端形成可靠的密封。从而在复杂的钻孔环境中,精准地隔离出一个独立的、受控的目标试验段,这是获得可靠原位参数的关键基础。

(5)原位注水与数据自动采集。通过钻杆与封隔器的中心通道,向被隔离的试验段稳定注入清水。同时,利用集成在封隔器上的传感器,对试验段内的压力、流量等关键参数进行实时监测与记录,实现了测试过程的自动化和数据的实时化,为后续计算岩体渗透性等参数提供直接依据。

(6)解封回收与循环作业。测试结束后,地面系统发出指令,解除封隔器的密封状态,然后再次使用绳索打捞工具,将整个封隔器模块从钻杆内快速提出至地表,回收测试设备,并结束本回次的测试作业。上一流程完成后,也可以立即进行压水试



验多段测试,通过改变封隔器的位置对不同孔段进行多次原位试验,极大提升了作业效率。

不提钻压水试验设备构想高度契合“能源装备高质量发展”的政策导向,集成的传感器设计与封隔器的密封与解封系统是勘探装备向智能化、数字化转型的具体实践;其“一孔多用”的设计理念正是对绿色化、高效化要求的践行,属于典型的创新型关键技术装备。从安全角度出发,通过减少起下钻工作量,不仅降低了作业人员在孔口附近的直接操作时间和暴露于潜在风险的概率,同时也最大限度避免了频繁操作对孔壁造成的一系列损伤与风险事故,是安全生产的有力保障。从技术层面分析,绳索取心技术、封隔器技术与微型传感器技术目前发展已趋于成熟,该构想是对现有技术进行的创新性集成与模块化设计;其工艺流程与传统压水试验方法相兼容,工程实现路径清晰,技术风险可控。从经济效益来看,不提钻压水试验设备通过单孔获取多层位数据,避免了为单一测试目的而实施多个钻孔的巨大成本;其快速的打捞回收和连续作业能力,大大加快了勘探进度,时间成本显著降低。

综上所述,不提钻压水试验新构想是一项技术可行、经济合理、与国家宏观政策及安全生产要求高度同频共振的创新方案,不仅解决了传统技术的痛点,更符合能源勘探装备与技术向高质量、高安全方向发展的必然趋势,具有广阔的应用前景。

## 2.2 多功能集成探管

当前,在不提钻压水试验系统中,数据的采集已普遍实现自动化,通过传感器直接传输并实时绘制压力-流量( $P$ - $Q$ )曲线,有效规避了传统人工记录中难以避免的读数误差与主观偏差。然而,这种数据驱动模式仍存在一个核心局限:整个试验孔段内部的地质情况,特别是裂隙的空间展布、发育密度、产状及连通性,依然只能依靠各项间接水力参数进行推断和解译,缺乏对孔壁真实面貌的直观、可视化认知。为突破这一壁垒,提出一项创新性技术构想:在新型不提钻压水试验系统的基础上,对现有压水试验系统中栓塞间连接的花管进行功能性升级与结构改造,将传统的中空花管替换为一种集成化、多功能探管。该新型探管在继承原有过水通道与承压功能的基础上,内嵌微型高分辨率孔内扫描成像单元(如光学摄像或激光扫描模块)。该探管采集到的高清、连续的图像数据,不仅是实时分析

的依据,更是对整个试验孔段裂隙网络的一次全景测绘。通过对这些图像进行后处理分析,可以精确量化裂隙的走向、倾角、开度、间距等关键几何参数,并分析其空间组合规律。这些精确的结构信息为深入判断岩体渗透各向异性、识别优势渗流路径、构建水文地质概念模型提供了最直观、最可靠的地质证据。其工作原理如图6所示。

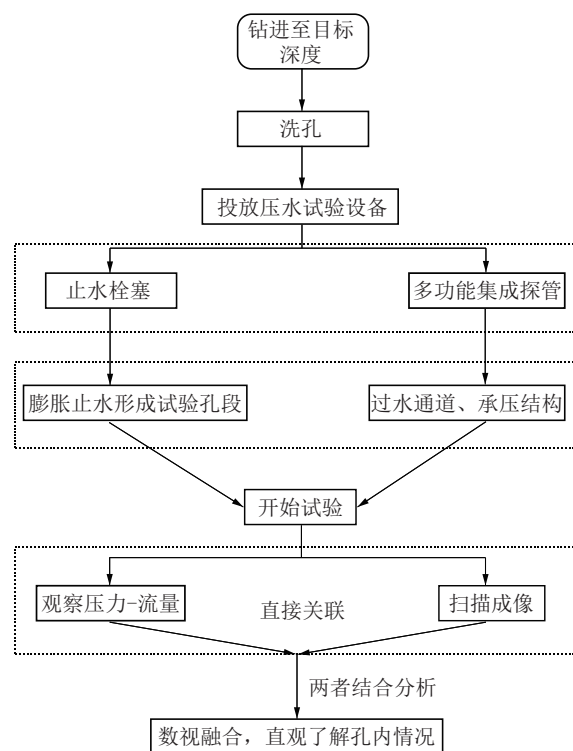


图6 多功能集成探管工作原理

Fig.6 Working principle of multifunctional integrated probe

(1)结构改造与功能集成:实现“探+测一体”的硬件基础。将传统中空、仅作为过水通道的花管,替换为一种定制化的集成式多功能探管。该探管在结构上完整继承传统花管的承压和过水通道功能,确保基础的水力测试不受影响,在管体内内嵌微型高分辨率孔内扫描成像单元(如光学摄像或激光扫描模块),实现试验孔段扫描成像,直观反映孔段中的裂隙发育情况。

(2)同步采集:水力数据与地质影像精准对应。在压水试验的整个过程中,系统并行运行2套数据采集流程:水力参数采集,按标准规程,同步、连续地记录压力( $P$ )与流量( $Q$ )数据,形成 $P$ - $Q$ 曲线;地质视觉采集,启动成像单元,对被隔离的试验孔段

孔壁进行360°、全程、实时的扫描成像,生成视频与图像,为后续数据与图像的相互关联奠定基础。

(3)因果关联机理:从“现象”到“成因”的直观解读。基于前述操作,工程师可以将 $P$ - $Q$ 曲线上观察到的形态与图像中实时捕捉到的地质动态进行直接关联。这种关联能揭示异常水力响应的内在机理,将水力测试从基于经验的“推断”转变为基于直接证据的“诊断”。

(4)信息实时化与决策可视化:实现现场精准指挥。成像数据通过集成在探管内的数据传输系统,实时上传至地表移动终端,这使得现场决策者能够直观观察到孔内正在发生的水力-地质相互作用。决策者能依据直观的图像证据,结合实时 $P$ - $Q$ 曲线,迅速判断岩体渗透性,评估工程处理效果,实现现场决策的精准化与高效化。

多功能集成探管作为不提钻压水试验系统迈向智能化、可视化升级的关键组件,直接响应了国家的政策号召,特别是在智慧水利领域,这项技术能提供关键的现场数据支撑。从经济效益来看,其价值远超传统测试报告,能有效避免因地质情况不明导致的工程变更或事故,现场实时成像使工程师能立刻判断岩体状况,缩短会诊和决策周期,加快项目进度,经济效益巨大。在安全方面,多功能集成探管直接显示出地下裂隙发育状况,能更准确地洞察潜在风险,为各项工程的稳定性评价提供直接证据,从设计源头杜绝安全隐患。在技术层面,多功能集成探管的构想本身并非依赖基础科学突破,而是将成熟的孔内扫描技术、井下传感器技术与不提钻压水试验装备进行集成再创造的技术整合。

多功能集成探管构想,在政策、经济、安全和技术4个维度上都展现出较高的可行性和价值潜力。通过推动压水试验向“可视化洞察”与“智能诊断”的深度融合,把试验孔段从一个抽象的“数据源”转变为一个清晰的“地质观察窗”,将钻孔压水试验从一种纯粹的水力测试,升级为一种“水力-光学”联动的原位综合诊断技术,不仅极大地丰富了对岩体渗流结构的认知维度,更能为工程防渗设计、岩体稳定性评价提供精准地质依据,实现压水试验的智能化跃升与透明化管控。

### 2.3 多栓塞压水试验装置

历经多年的技术演进,压水试验的核心部件——栓塞,已实现了从单一栓塞到三栓塞的重大跨

越。这一进步使得测试模式从传统的每个试验孔段孤立测量,跃升为能够同时进行双孔段对比测试的协同作业,压水试验技术进入了高效化的新阶段。然而,对于水利水电、深地资源勘探等需要获取全孔精细渗透性剖面的重大项目,即便采用三栓塞装置,其效率瓶颈依然突出。三栓塞装置一次下孔仅能形成2个相邻试验段,面对多孔段测试需求,仍需进行多次提钻、移位、再坐封的循环操作。频繁的起下钻过程不仅延长了工期,也增加了机械磨损与孔内事故风险。对于孔段数量较多的项目,虽然三栓塞比单栓塞效率提升显著,但反复作业的累计时间与成本依然可观,其效率增益在面对多孔段测试任务时仍显不足。因此,为支撑压水试验实现更高层次的“不提钻、多层次、高效率”作业目标,有必要对多栓塞压水试验装置进行持续研发与优化。多栓塞装置的核心工作原理是通过多个栓塞将钻孔划分为若干个独立的密封段,并利用中心通道向不同试验段同时输送高压水,从而实现对多个孔段同时进行连续压水试验。其工作流程见图7。

(1)试验准备与装置下放。按设计要求钻至预定深度,进行洗孔确保孔内岩粉和杂质被清除干

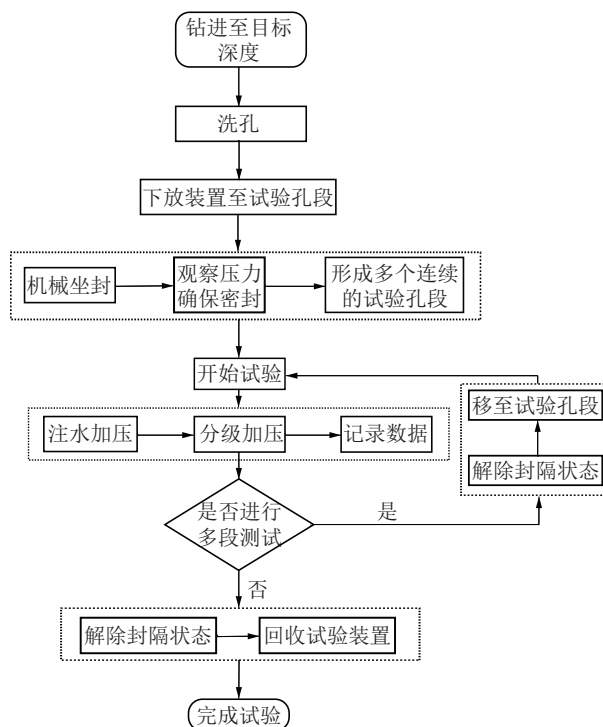


图7 多栓塞压水试验装置工作流程  
Fig.7 Workflow of the multi-packer water pressure test device



净,并在地面将多栓塞装置连接,将组装好的装置下放至孔底,从孔底开始向上进行压水试验。

(2)机械式栓塞坐封分隔试验孔段。装置到位并启动坐封,可一次性实现多个孔段的同步隔离。各栓塞集成的压力传感器能实时反馈各试验孔段压力变化情况,通过观察坐封后各段压力的稳定性,可直接判断栓塞密封的可靠性,确保后续压水试验数据的有效性。

(3)开始试验采集数据。待栓塞完成密封后,向中央通道进行注水,通过每个试验孔段中安装的传感设备对每一段的压力、流量等关键数据进行持续监测与记录。这套分布式传感系统确保了关键数据从源头被精确、独立、同步地获取,为后续计算岩体渗透率提供了可靠的数据基础。

(4)解封、移位与连续测试。完成既定测试任务后,进行机械解封操作,使所有栓塞收缩以解除封隔状态,随后将装置从孔内安全回收。若钻孔存在多个待测孔段,则进入移位循环流程,根据勘察方案,将装置精准定位至下一个目标测试区间。到位后,重复执行坐封、测试、数据采集与解封等全套步骤。如此循环往复,直至满足全孔分段测试需求,从而高效、连贯地获取整个钻孔的岩体渗透性剖面。

多栓塞压水试验装置响应水利、能源等部门发布的政策,满足工程勘察技术的自动化、智能化与装备升级的相关要求,可以极大提升工程效率。在安全方面,通过减少传统压水试验过程中的高危作业环节,提升了勘察作业的安全水平,且更短的作业周期意味着更少的能源消耗和对现场环境更小的扰动,符合绿色发展的要求。在经济效益方面,通过多孔段同时试验,大大缩短了工作周期,极大节约了现场时间、人力和能耗,直接降低了勘察成本。在技术层面,传统的单栓塞压水试验提供了完整的理论、方法和评判标准,多封隔器分段测试技术在石油、地热领域已广泛应用,且传感器与数据传输技术现已十分成熟,为集成至不提钻作业模式提供了坚实的技术基础。

多栓塞压水试验装置,在安全和政策层面高度可行,在经济上具有显著优势,在技术上有坚实基础。其重要意义,在于将压水试验从一种低效、孤立的“点式”勘察手段,升级为一种高效、连续的“线状”勘探方法,不仅极大地解放了生产力、缩短了勘

察周期,更是重大基础设施安全、经济、高效建设的核心技术保障,其成功研发与应用将产生深远的技术、经济和社会效益,同时推动工程地质勘察技术的进步与发展。

### 3 总结

本文系统梳理了压水试验技术及设备的发展历程,并进一步提出了3项创新性技术构想。第一项构想旨在革新设备的工作模式与作业流程,通过引入绳索取心理念,实现快速、高效的连续测试;第二项构想则聚焦于核心部件的功能集成与数据融合,将传统花管升级为“数-视”一体的智能探测单元;第三项构想通过增加栓塞数量,实现多试验孔段同步分隔。下面对这3项构想进行总结。

(1)不提钻压水试验新构想,通过将压水试验设备与绳索取心装置相结合,在减少传统压水试验环节中频繁起下钻的同时,可以做到快速、连续的压水试验测试。该构想将钻探取心、水文测试、地质描述3大功能融为一体,促成了一种全新的精细化、高效率勘探模式,特别适合在复杂裂隙性岩体、非常规储层等需要高精度表征的领域推广应用。

(2)多功能集成探管,这项技术通过对花管的改进设计,实现了从基于数据的“黑箱推断”到结合影像的“透明洞察”的跨越,能为页岩气储层压裂设计、地热储层改造评价等提供前所未有的精细地质模型,精准圈定优势渗流通道。实现该构想的挑战不在于基础原理的突破,而在于现有技术的极致集成与优化。

(3)多栓塞压水试验装置,其核心创新在于通过增加栓塞数量,实现了对钻孔内多个试验孔段的同步有效隔离。这一设计针对需进行多段压水试验的项目,能显著减少重复作业时间,从而大幅提升整体工作效率,缩短项目周期。该项技术的成功实现与广泛应用,有赖于在多栓塞同步联动控制与微小流道精密加工等核心技术领域取得突破。

上述创新构想的价值,不仅在于单一地应用,更在于根据具体工程场景进行相关的集成与融合,为重大工程地质勘察与非常规能源探测提供从“精准识别”到“高效作业”的全方位解决方案,力求能够实现更精准的识别、更准确的判断和更高效的工作方式,最终推动行业向智能化、精细化迈进。

展望未来,我们期望这些技术构想能加速落地

与应用。压水试验技术的革新,正推动其从单一参数测试工具,向“地质-水文-工程”一体化诊断平台演进,为地质勘探与非常规能源勘察技术带来了巨大提升,为我国摸清矿产资源家底、高效开发非常规能源以及筑牢能源资源安全屏障等诸多方面提供了不可替代的技术支撑。

### 参考文献(References):

- [1] 高炳奇. 中国页岩气资源勘查开发现状与形势[C]//2014第十四届国际煤层气暨页岩气研讨会论文集. 北京: 国家煤矿安全监察局科技装备司, 2014: 62-110.  
GAO Bingqi. Current status and situation of shale gas resource exploration and development in China[C]//Proceedings of the 14th International Coalbed Methane and Shale Gas Seminar, 2014. Beijing: Department of Science, Technology, and Equipment, National Coal Mine Safety Administration, 2014: 62-110.
- [2] 吕昕倩, 韩睿婧, 张帆, 等. 我国页岩油标准现状与布局展望[J]. 标准科学, 2024(11): 65-69.  
LV Xinqian, HAN Ruijing, ZHANG Fan, et al. Analysis of status and future development of shale oil standards in China[J]. Standard Science, 2024(11): 65-69.
- [3] 包书景, 葛明娜, 赵培荣, 等. 中国页岩气勘探开发现状、潜力与发展建议[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(2): 348-364.  
BAO Shujing, GE Mingna, ZHAO Peirong, et al. Status-quo, potential, and recommendations on shale gas exploration and exploitation in China[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(2): 348-364.
- [4] 饶贤华. 水文地质勘察过程中压水试验原理及方法研究[J]. 江西化工, 2018(5): 182-184.  
RAO Xianhua. Research on the principles and methods of packer test in hydrogeological survey[J]. Jiangxi Chemical Industry, 2018(5): 182-184.
- [5] 王光明, 钟辉, 张正雄. 钻孔高压压水试验在某抽水蓄能电站的应用[C]//CHINA ROCK 2024 第二十一届中国岩石力学与工程学术年会论文集. 成都: 中国岩石力学与工程学会, 2024: 303-306.  
WANG Guangming, ZHONG Hui, ZHANG Zhengxiong. ZHANG zhengxiong application on pressure water tests with high pressure in boreholes of an pumped storage power plant[C]//CHINA ROCK 2024 Proceedings of the 21st Annual Academic Conference on Rock Mechanics and Engineering in China. Chengdu: China Association for Rock Mechanics and Engineering, 2024: 303-306.
- [6] 陈政明. 水利检测工作中压水试验浅析[J]. 珠江水运, 2021(19): 13-14.  
CHEN Gongming. A brief analysis of the water pressure test in hydraulic inspection work[J]. Pearl River Water Transport, 2021(19): 13-14.
- [7] 张自信. 压水试验在帷幕灌浆初期防渗效果评价中的运用[J]. 工程技术研究, 2020, 5(16): 120-121.  
ZHANG Zixin. Application of water pressure tests in evaluating the anti-seepage effect during the initial stage of curtain grouting[J]. Engineering and Technological Research, 2020, 5(16): 120-121.
- [8] 杨志斌, 董书宁. 压水试验定量评价注浆效果研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 2021-2028.  
YANG Zhibin, DONG Shuning. Study on quantitative evaluation of grouting effect by water pressure test[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 2021-2028.
- [9] 胡雨. 钻孔压水试验在工程勘察中的应用[J]. 山西建筑, 2012, 38(4): 105-106.  
HU Yu. Drill hole water pressure test and it's application in engineering survey[J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(4): 105-106.
- [10] 郝记林. 钻孔压水试验在林州市风门沟水库帷幕灌浆检测中的应用[J]. 河南水利与南水北调, 2013(8): 40, 42.  
HAO Jilin. Application of borehole water pressure test in curtain grouting inspection of Fengmen Gou reservoir in Linzhou City[J]. Henan Water Resources and South-to-North Water Diversion, 2013(8): 40, 42.
- [11] 张成志, 尹丹, 郭明. 钻孔压水试验测试仪及其在古贤水利枢纽工程中的试验应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(12): 32-35.  
ZHANG Chengzhi, YIN Dan, GUO Ming. Experimental application of borehole water pressure test instrument in Guxian hydro-junction project[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(12): 32-35.
- [12] 肖勇. 压水试验在新建铁路隧道勘察工程中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2009(21): 66.  
XIAO Yong. Application of water pressure test in the investigation of newly built railway tunnels[J]. New Technologies and New Products of China, 2009(21): 66.
- [13] 李跃华, 邹海洋. 压水试验在渗流分析研究中的应用[J]. 广东建材, 2010, 26(10): 16-18.  
LI Yuehua, ZOU Haiyang. Application of pressure water test in seepage analysis research[J]. Guangdong Building Materials, 2010, 26(10): 16-18.
- [14] 王丹微, 庞大鹏, 乔艳红. 压水试验在工程岩体透水性评价中的应用[J]. 廊坊师范学院学报(自然科学版), 2017, 17(2): 73-75.  
WANG Danwei, PANG Dapeng, QIAO Yanhong. Application of water pressure tests to the permeability evaluation of engineering rock mass[J]. Journal of Langfang Teachers University(Natural Science Edition), 2017, 17(2): 73-75.
- [15] 马玲. 非常规能源向“新”而行[N]. 中国石化报, 2024-12-09(5).  
MA Ling. Non-conventional energy moves towards the 'new'[N]. China Petrochemical News, 2024-12-09(5).
- [16] 范波, 罗平平. 钻孔压水试验理论研究现状及展望[J]. 煤炭工程, 2010(1): 91-94.  
FAN Bo, LUO Pingping. Present status and outlook of theoretical study on borehole water pressurized test[J]. Coal Engineering, 2010(1): 91-94.
- [17] 中华人民共和国水利部. 水利水电工程钻孔压水试验规程: SL 31—2003[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.  
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Code of water pressure test in borehole for water resources and hydropower engineering: SL 31—2003[S]. Beijing: China

- Water Resources and Hydropower Press, 2003.
- [18] 丁立丰,郭啟良,王成虎.某石油储备库吕荣压水试验与水力摩阻[J].水文地质工程地质,2011,38(6):35-38,61.  
DING Lifeng, GUO Qiliang, WANG Chenghu. Lugeon water pressure test and its hydraulic friction in an oil reserve library project[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2011, 38(6):35-38, 61.
- [19] 李维欣.水文地质勘察中压水试验方法及存在的问题研究[J].世界有色金属,2020(2):117-118.  
LI Weixin. Study on test method and existing problems of pressurized water in hydrogeological survey[J]. World Nonferrous Metals, 2020(2):117-118.
- [20] 郝章飞.钻孔压水试验中应注意的问题[J].内蒙古水利,2007(3):130.  
HAO Zhangfei. Issues to be aware of in borehole water injection tests[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2007(3):130.
- [21] 李健,于开宁,梁钊,等.基于宁波大榭岛熔结凝灰岩地区的压水试验改进[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(5):21-29.  
LI Jian, YU Kaining, LIANG Zhao, et al. Improved water pressure test and its application in Daxie island (Ningbo) tuffs area[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39(5):21-29.
- [22] 李念军.论钻孔压水试验参数选择及成果计算方法[J].云南水力发电,2008,24(1):25-27.  
LI Nianjun. Discussion on selection of drill hole water pressure test parameters and result calculation method[J]. Yunnan Water Power, 2008, 24(1):25-27.
- [23] 袁博文,徐力群,郭步天,等.基于非稳定渗流理论的某土石坝坝肩岩体压水试验渗透系数确定方法[J].三峡大学学报(自然科学版),2022,44(1):26-32.  
YUAN Bowen, XU Liqun, GUO Butian, et al. Method for determining permeability coefficient of abutment rock mass under water pressure test of an earth-rock dam based on unsteady seepage theory[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2022, 44(1):26-32.
- [24] Zhang C C, Wang D Q, Diao H, et al. Accurate estimation of fractured rock mass permeability using borehole imaging and water pressure testing[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2025, 43(5):208.
- [25] 吕文龙,胡嘉伟.基于抽水试验的基坑承压水止水帷幕渗透系数计算方法研究[J].建筑科学,2025,41(9):149-156.  
LV Wenlong, HU Jiawei. Research on the calculation method of permeability coefficient of pit confined water waterproof curtain based on pumping test[J]. Building Science, 2025, 41(9):149-156.
- [26] 蔡海荣,朱宣杰,陈清华.基于钻孔压水试验数据的岩体裂隙特征分析[J].土工基础,2014,28(3):97-99,113.  
CAI Hairong, ZHU Xuanjie, CHEN Qinghua. Characterization of rock fissures by packer tests[J]. Soil Engineering and Foundation, 2014, 28(3):97-99, 113.
- [27] 杨文超,范新宇,任超,等.外水压力折减系数对抽蓄电站深孔高压压水试验参数的影响研究[J/OL].工程科学与技术.(2025-06-17) [2025-10-16]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250616.1818.006>.
- YANG Wenchao, FAN Xinyu, REN Chao, et al. Study on the effect of external water pressure reduction coefficient on the parameters of high-pressure water test in deep wells of pumped storage power stations[J/OL]. Advanced Engineering Sciences. (2025-06-17) [2025-10-16]. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20250616.1818.006>.
- [28] Ganjalipour K, Esmailzadeh M. Development a modification factor for lugeon's water pressure test based on the intersect angle between borehole and rock mass discontinuities[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39(2):1409-1423.
- [29] 黄震,姜振泉,曹丁涛,等.基于钻孔压水试验的岩层阻渗能力研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(S2):3573-3580.  
HUANG Zhen, JIANG Zhenquan, CAO Dingtao, et al. study of impermeability of rock stratum based on water injection test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2):3573-3580.
- [30] Nasri Fakherdavood M J, Ramezanzadeh A. Evaluate the behavior of fluid flow in rock mass according to the result of water pressure tests in the bakhtiari dam project[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2020, 38(1):425-434.
- [31] 褚泽辉.水利工程渗透性检测中使用压水试验的精度提升研究[C]//新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(二).北京:《中国招标》期刊有限公司,2025:304-305.  
CHU Zehui. Research on improving the accuracy of water pressure tests in permeability testing of hydraulic engineering[C]//Collection of Papers for the Forum on Driving Secondary Industry Development and Innovation in Bidding and Procurement by New Productive Forces (II).Beijing:China Tendering Journal Co., Ltd, 2025:304-305.
- [32] 王锦国,韩智颖,程伟,等.基于双重介质渗流-应力耦合模型的高压压水试验渗透参数反演[J].长江科学院院报,2024,41(8):113-119,156.  
WANG Jinguo, HAN Zhiying, CHENG Wei, et al. Inversion of permeability in high pressure packer test under hydro-mechanical coupling of dual media[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2024, 41(8):113-119, 156.
- [33] 袁艳.单栓塞止水压水试验常见问题的处理[J].江淮水利科技,2014(4):41-42.  
YUAN Yan. Handling common issues in single-plug water pressure tests[J]. Jianghuai Water Resources Science and Technology, 2014(4):41-42.
- [34] 谭俊.浅谈钻孔压水试验试验段成功隔离的影响因素与方法[J].科技视界,2014(8):323-323.  
TAN Jun. A brief discussion on the influencing factors and methods of successfully isolating sections in borehole water pressure tests[J]. Science & Technology Vision, 2014(8):323-323.
- [35] 刘士虎.压水试验中密封止水失效原因分析及解决对策[J].三峡大学学报(自然科学版),2019,41(S1):49-51.  
LIU Shihu. An analysis of sealing failure in water pressure test and the solutions[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2019, 41(S1):49-51.
- [36] 阎如璠.压水试验概略介绍[J].地质知识,1955(6):20-24.  
YAN Rusui. Overview of the hydrostatic test[J]. Geological Knowledge, 1955(6):20-24.



- [37] 邢继飞, 山龙江, 于群. 智能化高效钻探技术在深层地下水勘探中的实践应用[J]. 科学技术创新, 2025(20):143-146.  
XING Jifei, SHAN Longjiang, YU Qun. Practical application of intelligent and efficient drilling technology in deep groundwater exploration[J]. Scientific and Technological Innovation, 2025(20):143-146.
- [38] 李鹏飞, 卢晓仓, 曾荣福, 等. 钻孔高压压水试验应用与探讨[C]//贵州省岩石力学与工程学会2013年学术年会论文集. 贵阳:贵州省岩石力学与工程学会, 2013:114-118.  
LI Pengfei, LU Xiaocang, ZENG Rongfu, et al. Application and discussion of high-pressure water testing for drilling[C]//Proceedings of the 2013 Academic Annual Meeting of the Guizhou Society for Rock Mechanics and Engineering. Guiyang: Guizhou Society of Rock Mechanics and Engineering, 2013: 114-118.
- [39] 夏永祥, 胡仁岳. 钻孔压水试验的一种新型设备——液压栓塞[J]. 水利水电技术, 1979(2):31-35.  
XIA Yongxiang, HU Renyue. A new type of equipment for water pressure testing of boreholes—hydraulic plug[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1979(2):31-35.
- [40] 陈志新, 陈旻, 彭满华, 等. 压水试验中止水栓塞的创新研究[J]. 福建建设科技, 2021(6):32-34.  
CHEN Zhixin, CHEN Min, PENG Manhua, et al. Innovation research on stopping water embolism in water pressure test[J]. Fujian Construction Science & Technology, 2021(6):32-34.
- [41] 郭守志. GPS3型双塞压水试验设备及其初步应用[J]. 水利水电技术, 1987(9):14-18.  
GUO Shouzhi. GPS3 type Double-Plug water pressure testing equipment and its preliminary application[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1987(9):14-18.
- [42] 裴熊伟. 钻孔压水试验水压式栓塞排水泄压问题研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(3):56-59.  
PEI Xiongwei. Research on drainage and pressure relief of hydraulic plug for water pressure test in borehole[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(3):56-59.
- [43] 林立. 一种简易适用的压水试验方法[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(3):59-60.  
LIN Li. A simple and practical water pressure testing method[J]. West-China Exploration Engineering, 2007, 19(3):59-60.
- [44] 王晓鹏, 田铂, 张广滨. 全自动记录 and 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 of fully automatic recording and traditional manual recording of water pressurisation test results[C]//Proceedings of the 31st Technical Exchange Seminar of the Oil and Gas Exploration Technology Centre. Huai'an: Petroleum Engineering Professional Committee of China Petroleum Society, 2024: 131-135.
- [45] 李守圣, 葛宇家, 王飞, 等. 一种新型的钻孔压水试验技术及工程应用[J]. 资源环境与工程, 2013, 27(4):515-521.  
LI Shousheng, GE Zijia, WANG Fei, et al. The water press test research in water resources and hydropower engineering exploration[J]. Resources Environment & Engineering, 2013, 27(4):515-521.
- [46] 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 Coal, 2024, 43(9):127-130, 172.
- [47] 李守圣, 周晓, 吕万宏, 等. 钻孔压水试验综合测试仪的研制与推广应用[J]. 山西建筑, 2015, 41(17):227-228, 229.  
LI Shousheng, ZHOU Xiao, LYU Wanhong, et al. The development and promotion application of drill water pressure test comprehensive test instrument[J]. Shanxi Architecture, 2015, 41(17):227-228, 229.
- [48] 张宜军. 浅谈全自动高压水试验机超高压密封的选用与维护[J]. 流体传动与控制, 2008(1):57-59.  
ZHANG Yijun. The selection and maintenance of superhigh pressure seal of automatic water pressure tester[J]. Fluid Power Transmission and Control, 2008(1):57-59.
- [49] 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.
- [50] 聂新明. 分体式不提钻钻孔压水试验孔口装置的研发与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(3):51-56.  
NIE Xinming. Development and application of split type well-head device for water injection test without tripping the drill string[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(3):51-56.
- [51] 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.
- [52] 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. 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.
- [53] 王光明. 绳索取芯钻孔不起大钻压水试验技术[J]. 云南水力发电, 2023, 39(12):310-314.  
WANG Guangming. Rope core drilling without lifting large drilling water pressure test technology[J]. Yunnan Water Power, 2023, 39(12):310-314.

(编辑 王跃伟)