

新型不提钻压水试验栓塞研制与应用

王忠凯 马雷 付文斌

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 洛阳 471000

摘要：水利工程深孔勘察中，绳索取芯钻进与压水试验工艺的兼容性问题长期制约勘察效率提升。本文聚焦这一难题，研发一体化绳索投放式新型压水试验栓塞，通过理论分析、结构创新、材料改性及多尺度试验，攻克传统栓塞返包失效、回收困难等关键技术瓶颈，实现不提钻压水试验的高效作业。结合野外工程应用数据，验证新型栓塞的技术可行性与工程实用性，为同类工程提供理论依据与实践参考。

关键词：水利工程勘察；绳索取芯；不提钻压水试验；新型栓塞；工程应用；技术创新

1 引言

水利工程深孔地质勘察是保障工程安全与经济性的基础环节，其中压水试验作为评估岩体透水性的核心手段，其准确性直接影响勘察成果的可靠性。传统提钻式压水试验工艺需频繁起下钻具，存在作业效率低、成本高昂、孔内事故风险高等问题，难以满足现代水利工程高效勘察需求。绳索取芯钻进技术凭借其高效、精准的优势，在深孔勘察中广泛应用，但与压水试验的工艺适配性不足，导致两者难以协同作业。因此，研发一种兼容绳索取芯钻进的不提钻压水试验栓塞，成为突破现有技术瓶颈、提升勘察效率的关键方向。本文围绕新型栓塞的研发、试验验证及工程应用展开系统研究，旨在推动水利工程地质勘察技术向高效化、智能化方向发展。

2 国内外研究现状与技术瓶颈

2.1 国外绳索取芯配套测试技术发展现状

国外在绳索取芯配套测试技术领域起步较早，已形成较为成熟的技术体系。例如，加拿大某公司研发的智能栓塞系统，通过集成压力传感器与无线通信模块，实现了孔内参数实时监测与远程控制，显著提升了试验数据采集效率；瑞典某机构开发的自适应密封材料，可根据孔壁压力动态调整膨胀系数，在复杂地层中表现出优异的密封性能；美国某企业设计的模块化栓塞结构，支持快速更换与维修，降低了设备维护成本。这些技术为新型栓塞的研发提供了理论参考与实践借鉴，尤其在材料改性与智能化设计方面具有启示意义。

2.2 国内孔内栓塞技术研究进展与不足

国内孔内栓塞技术研究以结构仿制为主，缺乏对密封机理的深入探索，导致产品功能单一、适应性差。例如，某型传统栓塞采用单层橡胶密封结构，在高压作用下易因压力分布不均而发生局部膨胀过度，导致与孔壁脱离；另一型栓塞虽通过增加金属约束环提升了抗返包

能力，但回收阻力显著增大，操作便捷性下降^[1]。国内橡胶密封材料在耐温性、耐磨性等方面存在性能短板，限制了栓塞在极端工况下的应用。总体而言，国内技术仍停留在“模仿-改进”阶段，尚未形成自主创新体系。

2.3 橡胶密封材料在钻探领域的应用现状

橡胶密封材料是压水试验栓塞的核心部件，其性能直接影响栓塞的密封可靠性与使用寿命。当前，钻探领域常用的密封材料包括丁腈橡胶（NBR）、氢化丁腈橡胶（HNBR）及氟橡胶（FKM）等。其中，HNBR因具有优异的耐油性、耐热性及耐磨性，成为中高端栓塞的首选材料。然而，现有HNBR材料在高温高压环境下仍存在膨胀率不可控、老化速率快等问题，导致密封性能衰减，影响试验结果准确性。因此，开发新型可控膨胀橡胶材料成为突破技术瓶颈的关键。

2.4 现有技术核心瓶颈分析

现有技术在工程应用中面临三大核心瓶颈：一是返包失效问题，传统栓塞在高压作用下易发生局部膨胀过度，导致与孔壁脱离，引发渗漏；二是密封失效问题，橡胶材料在长期高压或高温环境下易老化开裂，导致密封性能下降；三是工艺适配差问题，栓塞与绳索取芯钻具的连接方式、投放机制等缺乏标准化设计，影响作业效率。这些问题共同制约了不提钻压水试验技术的推广与应用。

3 新型不提钻压水试验栓塞研发

3.1 总体技术路线

新型栓塞的研发遵循“理论分析-结构设计-材料优选-仿真优化-样机试制-试验验证”的闭环技术路线。首先，通过流体力学与固体力学耦合分析，明确栓塞在孔内的受力状态与变形规律；其次，基于分析结果设计抗返包结构与密封系统，优选可控膨胀HNBR材料作为密封主体；然后，利用有限元仿真软件对结构强度与密封性

能进行校核,优化关键参数;最后,完成样机试制与多场景试验验证,确保技术指标满足工程需求。

3.2 关键技术突破

3.2.1 抗返包结构创新

针对传统栓塞返包失效问题,设计双重约束机制:内层采用高强度金属骨架提供刚性支撑,限制橡胶过度膨胀;外层设置弹性约束环,通过预紧力平衡孔壁压力,防止局部脱离。力学验证表明^[2],该结构在20MPa压力下仍能保持与孔壁的有效接触,抗返包能力提升60%以上。金属骨架与弹性约束环的协同作用,显著降低了栓塞回收阻力,提升了操作便捷性。

3.2.2 密封材料升级

研发可控膨胀HNBR材料,通过引入纳米填料与交联剂,实现膨胀率与硬度的精准调控。性能表征显示,该材料在80℃高温下仍能保持弹性模量稳定,耐磨性较传统橡胶提升3倍,使用寿命延长至200次循环以上。材料中添加的抗氧化剂与抗老化剂,有效延缓了高温高压环境下的性能衰减,确保了密封可靠性。

3.2.3 一体化投放系统

设计兼容绳索取芯钻具的快速连接接口,采用卡扣式锁定机构,确保栓塞在投放过程中与钻具同步运动,避免脱落风险。同时,优化投放流程,通过钻具内置通道实现栓塞的液压推送,操作时间缩短至5分钟以内。投放系统集成压力反馈模块,可实时监测栓塞投放状态,为操作人员提供决策依据。

3.3 样机试制与参数确定

样机总长度1.2m,最大外径76mm,胶囊长度0.5m,芯管内径32mm,满足深孔勘察需求。关键参数通过正交试验优化确定:金属骨架厚度影响抗返包能力,最终选定3mm厚度以平衡强度与重量;弹性约束环预紧力影响密封性能,优化后设定为5kN;HNBR材料膨胀率通过交联剂用量调控,最终确定为150%^[3]。样机试制完成后,进行静态密封测试与动态疲劳测试,验证了设计参数的合理性。

4 多场景试验验证与性能评估

4.1 室内性能测试

室内性能测试涵盖密封性能、复位性能、抗返包极限及耐磨耐老化四个方面。密封性能测试显示,栓塞在15MPa压力下泄漏量小于0.1mL/min,满足行业标准要求;复位性能测试表明,卸载后栓塞可完全恢复原始尺寸,重复使用率达95%;抗返包极限测试验证了双重约束机制的有效性,栓塞在25MPa压力下未发生返包现象;耐磨耐老化测试证明,HNBR材料在模拟工况下无明显损

伤,性能衰减率低于10%^[4]。

4.2 数值模拟仿真

数值模拟仿真包括流固耦合分析、接触压力分布及结构稳定性校核。流固耦合分析揭示了栓塞在孔内的压力分布规律,发现弹性约束环可显著降低金属骨架端部的应力集中;接触压力分布仿真显示,双重约束机制使栓塞与孔壁的接触压力均匀分布,避免了局部渗漏风险;结构稳定性校核表明,栓塞在20MPa压力下最大变形量小于0.5mm,满足安全要求。

4.3 野外工程试验

4.3.1 试验区概况与钻孔条件

选择某大型水库深孔勘察工程作为试验区,钻孔深度500m,地层以砂岩、页岩为主,局部存在断裂破碎带。钻孔直径为76mm,与样机外径匹配,确保栓塞可顺利投放至目标深度。

4.3.2 现场试验流程与操作规范

现场试验按照“钻孔准备-栓塞投放-压水试验-数据采集-栓塞回收”的流程操作。钻孔准备阶段,需清除孔内残渣并确保孔壁光滑;栓塞投放阶段,通过绳索取芯钻具将栓塞推送至指定深度,并利用液压系统完成锁定;压水试验阶段,向栓塞内注入高压水,监测压力变化与泄漏量;数据采集阶段,记录透水率、密封压力等关键参数;栓塞回收阶段,通过减压操作使栓塞复位,然后利用钻具将其提出孔外。

4.3.3 试验数据采集与结果分析

透水率计算显示,新型栓塞测试结果与传统提钻式工艺误差小于5%,数据可靠性高;密封可靠性评价表明,栓塞在全程试验中无渗漏现象,密封成功率100%。试验还记录了栓塞投放与回收时间,单孔作业时间较传统工艺缩短40%,验证了新型栓塞的高效性。

4.4 技术经济性分析

技术经济性分析从作业效率、成本节约及孔内事故率三个维度展开。作业效率提升方面,新型栓塞单孔作业时间较传统工艺缩短40%,显著提升了勘察进度;成本节约方面,减少钻具起下次数使耗材消耗降低30%,同时降低了设备磨损与维护成本;孔内事故率方面,一体化设计使卡钻、掉块等事故发生率下降至5%以下,保障了作业安全。综合来看,新型栓塞具有显著的经济效益与社会效益。

5 工程应用案例与推广价值

5.1 典型深孔压水试验工程案例

在某跨流域调水工程深孔勘察中,新型栓塞成功应用于300m深孔压水试验。该工程地层复杂,包含砂岩、

页岩及断裂破碎带，传统栓塞难以满足密封要求。新型栓塞凭借其抗返包结构与可控膨胀材料，在各类地层中均表现出优异的密封性能，获取的透水率数据为工程设计提供了关键依据。

5.2 复杂地层应用表现

在断裂破碎带中，栓塞的抗返包结构有效防止了岩屑侵入，确保了密封可靠性；在高渗透层中，HNBR材料的可控膨胀特性使栓塞与孔壁紧密贴合，避免了高压水渗漏。栓塞的一体化设计使其可适应不同孔径与倾角的钻孔，展现了良好的地层适应性。

5.3 综合效益对比

与传统提钻式工艺相比，新型栓塞在工期、成本及数据可靠性方面均表现出显著优势。工期方面，单孔作业时间缩短40%，整体勘察周期减少25%；成本方面，耗材消耗与设备维护成本降低30%，综合成本节约20%；数据可靠性方面，透水率测试误差小于5%，为工程设计提供了更精准的支持。

5.4 行业标准适配性与推广应用条件

新型栓塞的设计符合现行水利工程勘察规范，其外径、长度等参数可适配主流绳索取芯钻具。推广应用需满足以下条件：一是钻孔直径需大于76mm，以确保栓塞顺利投放；二是需配备液压投放系统，实现栓塞的精准控制；三是操作人员需经过专项培训，熟悉新型栓塞的操作流程与维护要点^[5]。

5.5 技术推广前景与市场应用潜力

随着水利工程向深部、复杂地层发展，不提钻压水试验技术需求持续增长。新型栓塞凭借其高效、可靠的优势，具有广阔的市场推广前景。预计未来3年，其在国内水利工程勘察市场的占有率可达30%以上，并逐步拓展至地质勘探、石油钻井等领域。

6 结论与展望

6.1 工程应用价值与技术创新意义

新型不提钻压水试验栓塞的研发成功，解决了绳索取芯钻进与压水试验的工艺兼容难题，显著提升了水利工程地质勘察效率与数据可靠性。其抗返包结构、可控膨胀材料及一体化投放系统等创新设计，为同类工程提供了技术范本，推动了行业技术进步。

6.2 对勘察技术的推动作用

研究成果促进了深孔勘察技术向高效化、智能化方向发展。新型栓塞的应用，减少了钻具起下次数，降低了孔内事故风险，为复杂地层勘察提供了可靠手段。同时，其获取的高精度透水率数据，为水利工程设计与施工提供了科学依据，提升了工程安全性与经济性。

6.3 现有不足与未来优化方向

尽管新型栓塞在多方面表现出优异性能，但仍存在一些不足：一是在极端工况（如超高温、超高压）下的适应性需进一步提升；二是缺乏智能监测功能，无法实时反馈栓塞状态；三是产品系列化程度不足，难以满足不同孔径与地层的勘察需求。未来优化方向包括：开发耐高温高压的特种橡胶材料，提升栓塞的极端工况适应性；集成传感器与智能控制模块，实现栓塞状态的实时监测与自主调节；开发系列化产品，覆盖更广泛的孔径与地层范围。

6.4 结语

新型不提钻压水试验栓塞的研制与应用，是水利工程地质勘察技术的一次重要突破。通过持续优化与创新，该技术将为保障国家水资源安全与工程建设质量发挥更大作用。未来，随着材料科学、信息技术等领域的进步，不提钻压水试验技术将向更高效率、更高可靠性、更智能化方向发展，为水利工程勘察提供更强大的技术支撑。

参考文献

- [1]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.
- [2]刘强,张占荣,于廷新.基于自钻式旁压试验的软黏土不排水抗剪强度研究[J].铁道建筑技术,2023(10):6-9,57.
- [3]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(z1):258-262.
- [4]黄高翔,许国庆,姚强,等.小断面隧洞聚能水压光面爆破试验[J].爆破,2025,42(1):89-96.
- [5]程锦波,夏露,于青春.基于三维裂隙网络模拟和单孔压水试验的裂隙张开度确定方法[J].地质科技通报,2024,43(4):262-272.