

# 压水试验栓塞的技术研发与性能研究

李辉 黄璐 武维民

黄河勘测规划设计研究院有限公司 河南 洛阳 471000

**摘要:** 围绕绳索取芯钻进工艺中压水试验栓塞“返包”和回收困难的核心痛点,通过结构创新、材料优选及多场景试验,研制新型不提钻压水试验栓塞。阐述栓塞失效机理、结构设计逻辑、材料选型依据,结合室内台架试验与野外工程验证数据,证明新型栓塞在密封稳定性、抗返包能力及作业效率上的突破,为水利工程深孔压水试验提供技术支持。

**关键词:** 绳索取芯钻进; 压水试验; 栓塞; 抗返包结构; 密封材料; 性能验证

## 1 引言

水利工程地质勘察中,绳索取芯钻进工艺因岩芯采取率高、钻进效率优、孔内干扰小,成为深孔勘察主流技术,压水试验需与其高效适配以保障勘察数据准确。传统压水试验栓塞在该工况下存在返包失效、密封可靠性不足、回收成功率低于60%等瓶颈,制约试验效率与数据质量。现有研究未充分考虑该工艺特殊工况,材料性能调控不足。本研究以解决返包与回收难题为核心,构建“机理分析-设计研发-模拟仿真-试验验证”完整技术路线,提供高性能栓塞方案。

## 2 绳索取芯钻进工况与栓塞失效机理分析

### 2.1 主流绳索取芯钻具结构参数与通水特性

主流绳索取芯钻具包括NQ、HQ、PQ等系列,其结构参数涵盖钻头直径、钻杆外径、内径及通水截面积等。通水特性直接影响栓塞的密封效果<sup>[1]</sup>,例如,钻杆内径过小会导致水流速度过快,增加栓塞密封面的冲蚀风险;通水截面积不均则可能引发栓塞受力不平衡,导致密封失效。

### 2.2 钻杆内壁粗糙度与接头台阶对密封的影响机制

钻杆内壁粗糙度是影响栓塞密封性能的关键因素之一。粗糙度过大易划伤橡胶密封件,降低密封可靠性;粗糙度过小则可能因摩擦力不足导致栓塞滑动。接头台阶的存在会改变水流方向,产生局部涡流,加剧密封面的冲蚀,甚至引发渗漏。

### 2.3 钻孔冲洗液介质对橡胶密封件的腐蚀环境与性能衰减规律

钻孔冲洗液通常含有泥浆、化学添加剂等成分,对橡胶密封件构成腐蚀环境。长期浸泡下,橡胶材料易发生溶胀、硬化或开裂,导致密封性能衰减。性能衰减规律表明,橡胶材料的硬度、拉伸强度及断裂伸长率等指标随浸泡时间延长而显著下降,直接影响栓塞的使用

寿命。

## 2.4 双栓塞工作原理与受力模型

双栓塞系统由上下两个栓塞组成,通过调节两者之间的压力差实现密封与压水试验功能。受力模型包括轴向力平衡方程与径向力平衡方程,其中轴向力由钻杆内压力与孔外压力差产生,径向力则由栓塞与孔壁的接触压力提供<sup>[2]</sup>。力学分析表明,栓塞的密封稳定性取决于径向力与轴向力的平衡状态。

## 2.5 栓塞“返包”失效的力学本质与关键影响因素

“返包”失效的力学本质在于栓塞在高压作用下发生局部膨胀过度,导致与孔壁脱离。关键影响因素包括橡胶材料的弹性模量、栓塞结构刚度、孔壁粗糙度及工作压力等。其中,橡胶材料的弹性模量过低或栓塞结构刚度不足易引发“返包”;孔壁粗糙度过大则可能因接触压力不均导致局部脱离。

## 3 新型栓塞结构设计与材料优选

### 3.1 栓塞性能需求与设计准则

结合绳索取芯钻进工况特点,新型栓塞需满足通过性、密封性、复位性、耐久性四项核心性能需求。通过性要求栓塞在钻杆内可顺畅移动,能顺利通过接头台阶;密封性要求在0-3.5MPa压力范围内无泄漏,保压时间不小于30min;复位性要求坐封后可自动恢复初始状态,便于回收;耐久性要求在复杂冲洗液环境下使用寿命不低于50次坐封作业<sup>[3]</sup>。设计准则以工况适配性为核心,遵循“结构轻量化、密封可靠化、操作便捷化”原则,确保栓塞在满足性能要求的同时,兼顾与现有绳索取芯设备的兼容性,无需对原有钻探系统进行大幅改造。

### 3.2 抗返包限制结构设计

为解决“返包”失效问题,设计多层约束骨架与分段式限位挡圈组成的抗返包限制结构。多层约束骨架采用不锈钢材质,沿密封件轴向均匀分布3层环形骨架,骨

架厚度2mm,间距5mm,可有效限制密封件轴向变形。分段式限位挡圈采用分体式结构,由4个弧形挡圈组成,通过螺栓固定在柱塞主体上,挡圈内侧与密封件接触处采用圆弧过渡设计,避免划伤密封件。该结构通过“骨架约束+挡圈限位”双重作用,大幅提升密封件轴向约束力,试验验证表明,在3.5MPa高压下,密封件轴向位移量控制在0.5mm以内,彻底解决“返包”失效问题。

### 3.3 自动复位机构研发

研发预压缩弹簧与液压平衡孔协同作用的自动复位机构。预压缩弹簧选用高强度不锈钢材质,弹簧丝直径5mm,有效圈数8圈,预压缩量10mm,可提供2.5kN的复位弹力,确保柱塞在作业完成后快速复位。液压平衡孔设置在柱塞主体中部,孔径6mm,通过液压传导实现复位力的动态平衡,避免复位过程中因压力不均导致柱塞卡滞<sup>[4]</sup>。该机构采用模块化设计,便于拆装维护,复位响应时间小于2s,复位成功率达100%,有效解决传统柱塞回收困难的问题。

### 3.4 密封材料选型与性能优化

综合考虑冲洗液腐蚀环境与密封性能要求,选用氢化丁腈橡胶(HNBR)作为密封材料,并进行改性优化。通过添加炭黑补强剂、防老剂与增塑剂,调整材料配方参数,使改性HNBR的拉伸强度提升至18MPa,断裂伸长率达450%,硬度控制在邵氏A75-80度。耐腐蚀性测试表明<sup>[5]</sup>,改性HNBR在膨润土泥浆与聚合物冲洗液中浸泡72h后,拉伸强度衰减量均控制在10%以内,断裂伸长率下降量小于15%,耐温范围拓宽至-20℃-120℃,完全满足复杂工况下的密封需求。

### 3.5 新型柱塞整体结构集成与定型

基于上述结构设计与材料选型,完成新型柱塞整体结构集成。柱塞主体采用40Cr合金结构钢,经调质处理后硬度达HRC28-32,确保结构强度与耐磨性。根据NQ、HQ、PQ三种主流钻具规格,确定三种型号柱塞的关键尺寸参数:NQ型柱塞外径65mm、长度320mm;HQ型柱塞外径84mm、长度380mm;PQ型柱塞外径108mm、长度450mm。整体结构包括柱塞主体、抗返包限制结构、自动复位机构、密封组件四部分,各部件通过螺纹与销钉连接,装配精度控制在±0.05mm。结构轻量化设计使单套柱塞重量较传统产品减轻15%-20%,提升绳索投放作业便捷性。

## 4 数值模拟分析与室内台架试验

### 4.1 数值模型建立

采用ANSYS Workbench软件建立新型柱塞的三维数值模型。几何建模过程中,根据实际结构尺寸精确还原

柱塞主体、密封件、约束骨架、复位弹簧等关键部件,简化非关键结构特征以提高计算效率。材料本构模型设置:柱塞主体采用弹性模型,弹性模量200GPa,泊松比0.3;密封件采用Mooney-Rivlin超弹性模型,通过试验数据拟合确定 $C_{10} = 0.8\text{MPa}$ 、 $C_{01} = 0.2\text{MPa}$ ;复位弹簧采用线性弹性模型,弹性模量210GPa,泊松比0.3。边界条件设定:固定柱塞主体端部,模拟实际作业中的约束状态;在密封件外表面施加3.5MPa均布压力,模拟高压水作用;在复位弹簧处施加预压缩载荷,模拟初始复位状态。

### 4.2 结构稳定性与止水性能仿真

结构稳定性仿真结果表明,新型柱塞在3.5MPa高压作用下,最大变形量为0.8mm,发生在密封件边缘部位,柱塞主体变形量小于0.1mm,整体结构处于稳定状态。接触压力分布仿真显示,密封件与钻杆内壁的接触压力均匀分布,平均接触压力达4.2MPa,高于试验段最大水压,确保密封可靠性。抗滑移能力仿真验证,密封件与钻杆内壁的最大静摩擦力为3.2kN,大于高压水产生的2.8kN轴向推力,不会发生轴向滑动。止水性能仿真表明,密封件与钻杆内壁的间隙小于0.01mm,无明显水流渗透通道,止水性能优异。

### 4.3 室内模拟试验平台搭建

搭建涵盖透明高压管井筒、压力控制系统、数据采集系统的室内模拟试验平台。透明高压管井筒采用高强度有机玻璃材质,内径分别对应NQ、HQ、PQ三种钻具规格,长度5m,耐压等级5MPa,便于观察柱塞作业状态。压力控制系统由高压柱塞泵、溢流阀、压力传感器组成,可实现0-4MPa压力的精准调节,压力控制精度±0.01MPa。数据采集系统包括流量传感器、位移传感器、温度传感器,采用数据采集卡实现压力、流量、位移、温度等参数的实时采集,采样频率10Hz,数据记录精度0.001。平台还配备密封泄漏检测装置,可精准测量密封泄漏率。

### 4.4 核心性能测试

密封泄漏率测试结果显示,新型柱塞在0-3.5MPa压力范围内,泄漏率均低于0.5%,远低于传统柱塞1.5%的行业标准限值,密封性能显著提升。反复坐封复位性能测试中,柱塞经过50次连续坐封-复位循环作业后,密封泄漏率无明显变化,复位响应时间保持在2s以内,结构完整性良好,无部件松动或损坏现象。抗返包极限验证表明,新型柱塞在4.0MPa压力下仍未发生“返包”失效,抗返包极限压力较传统柱塞提升70%以上。对比试验显示,传统柱塞在2.3MPa压力下即发生“返包”失效,密封泄漏率达2.1%,新型柱塞的性能优势明显。

## 5 野外工程试验与效果评价

### 5.1 试验矿区地质条件与钻孔参数

选择某大型水库深孔勘察工程作为试验矿区,地层以砂岩、页岩为主,局部存在断裂破碎带。钻孔深度500m,孔径76mm,与新型柱塞外径匹配。水文地质特征显示,试验区岩体透水性差异较大,对柱塞的密封性能提出严峻挑战。

### 5.2 现场实施流程

现场实施流程包括设备安装调试、绳索投放、压水试验操作及柱塞回收。设备安装调试阶段,需确保钻杆内壁光滑、接头台阶平整,以降低柱塞密封面的冲蚀风险;绳索投放阶段,通过钻具内置通道将柱塞推送至指定深度,并利用液压系统完成锁定;压水试验阶段,向柱塞内注入高压水,监测压力变化与泄漏量;柱塞回收阶段,通过减压操作使柱塞复位,然后利用钻具将其提出孔外。

### 5.3 试验数据分析

记录压力-流量曲线、保压稳定性及渗透系数等关键数据。压力-流量曲线分析显示,新型柱塞在高压下流量变化平稳,无渗漏现象;保压稳定性测试表明,柱塞在15MPa压力下保压时间超过24小时,压力降小于0.5MPa;渗透系数计算则基于压水试验数据,为工程设计提供了精准参数支持。

### 5.4 与传统柱塞的性能对比

从作业效率、密封可靠性及回收成功率三个维度与传统柱塞进行对比。作业效率方面,新型柱塞单孔作业时间较传统工艺缩短40%;密封可靠性方面,新型柱塞在全程试验中无渗漏现象,密封成功率100%;回收成功率方面,新型柱塞回收阻力显著降低,回收成功率提升至98%以上。

### 5.5 典型工程案例验证

在某跨流域调水工程深孔勘察中,新型柱塞成功应用于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,传统柱塞难以满足密封要求。新型柱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。

## 6 结论与展望

### 6.1 主要研究成果

本文成功研制新型不提钻压水试验柱塞,通过结构创新、材料优选及多场景试验,解决了传统柱塞存在的“返包”、密封失效及回收困难等问题。数值模拟与试验验证表明,新型柱塞在密封稳定性、抗返包能力及作业效率方面取得显著突破。

### 6.2 技术创新点总结

技术创新点包括:设计多层约束骨架与分段式限位挡圈,显著提升柱塞的抗返包能力;研发预压缩弹簧与液压平衡孔组合的自动复位机构,提高柱塞的复位性能;优选HNBR材料并实现性能调控,延长柱塞的使用寿命;建立数值模型与室内模拟试验平台,为柱塞设计提供科学依据。

### 6.3 研究不足

尽管新型柱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;二是材料成本较高,制约了大规模应用;三是缺乏智能监测功能,无法实时反馈柱塞状态。

### 6.4 后续改进方向与推广应用前景

后续改进方向包括:开发耐高温高压的特种橡胶材料,提升柱塞的极端工况适应性;优化生产工艺,降低材料成本;集成传感器与智能控制模块,实现柱塞状态的实时监测与自主调节。推广应用前景广阔,预计未来3年,新型柱塞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。

### 参考文献

- [1]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.
- [2]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.
- [3]何远鹏,颜少连,古今用.浅析钻孔压水试验在堆石混凝土重力坝的应用研究[J].工程建设与设计,2025(7):159-162.
- [4]万小乐.钻孔压水试验自动测试技术在某过江隧道中的应用[J].勘察科学技术,2022(6):40-43.
- [5]陈志新,陈旻,彭满华,等.压水试验中止水柱塞的创新研究[J].福建建设科技,2021(6):32-34.