水利工程超深竖井地表帷幕灌浆防渗优化设计与应用

阮 超

（中国水利水电第六工程局有限公司，辽宁 沈阳 110169）

摘 要 案例工程6-1#竖井深度616.5 m，属超深竖井，原设计采用井内防渗固结灌浆方案，但施工揭示无地面预注浆井段渗水显著，降雨后最大出水量达22 m^3/h，且存在井内交叉作业安全风险高、占用直线工期、灌浆压力受限导致防渗效果不佳等问题。本文提出将井内防渗固结灌浆优化为地表帷幕灌浆方案，通过井口平台环形布孔（布孔圈半径6.8 m，30个灌浆孔，孔深55.5 m），与地面预注浆段搭接5 m，构建垂向连续防渗体系。从灌浆机制、参数设计、施工工艺及质量控制等方面开展研究，以期为超深竖井防渗设计提供技术参考。结果表明：优化方案采用分级压力控制（最大2.0 MPa）、水泥—水玻璃双液浆及分序加密工艺，灌浆后目标透水率 $q \leqslant 3$ Lu；虽然直接费用增加约23.70万元，但消除了井内交叉作业安全隐患，缩短总工期约6个月，防渗可靠性显著提升，综合效益远高于成本增量。

关键词 超深竖井；帷幕灌浆；浆液变换；帷幕搭接

中图分类号：TV543 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.28.020

0 引言

竖井作为水利、交通及矿山工程中的关键地下结构，其防渗性能直接决定围岩稳定性和长期运行安全[1]。随着工程建设向深部发展，竖井深度已普遍超过300 m，部分工程甚至达到1 000 m以上，高地应力、高裂隙水压及复杂水文地质条件对竖井的防渗加固技术提出了严峻挑战[2]。在富水地层中，地下水渗流不仅降低围岩自稳能力，还可能引发涌水、塌方等灾害，合理选择防渗加固方案是竖井建设的核心问题之一。

案例工程6-1#竖井采用井内灌浆与竖井掘进、衬砌同步进行的作业模式。施工过程中灌浆工序占用竖井掘进直线工期，按原设计排距3.0 m、每段灌浆及候凝时间约24 h～36 h计算，仅防渗固结灌浆一项将延长总工期约15 d～20 d，严重影响工程整体进度。此外，井内空间受限，灌浆压力及扩散范围难以保证，易形成不连续防渗体[3-4]。为规避安全风险、保障工期并提升防渗效果，需优化施工方案。帷幕灌浆作为成熟的防渗技术，在水电大坝及地下工程中已得到广泛应用，其地表施工可避免井内交叉作业，形成连续、可控的防渗帷幕[5]。基于此，本文提出将原井内防渗固结灌浆优化为地表帷幕灌浆，通过环形布孔与地面预注浆段搭接，构建完整的垂向防渗体系。从灌浆机制、参数设计、施工工艺及质量控制等方面开展理论研究，验证优化方案的可行性、安全性与经济性，以期为超深竖井防渗设计提供理论依据。

1 案例工程概况

案例工程6-1#竖井井深616.5 m，属超深竖井，其防渗设计采用井内防渗固结灌浆方案，即在掘进与衬砌过程中同步实施孔深5.0 m的固结灌浆，但施工揭示无地面预注浆井段渗水显著，降雨后最大出水量达22 m^3/h，表明原方案难以有效控制地下水。已有研究表明，井内灌浆与开挖衬砌交叉作业存在高空坠物风险，且灌浆工序占用直线工期，严重影响施工效率[6]。

该工程竖井穿越地层自上而下依次为质岩类、碎块石土、砂卵砾石夹漂石及白云岩夹页岩、炭质页岩等复杂地质。地下水类型主要为基岩裂隙水，总体属中等至强富水地层。竖井采用复合式衬砌结构，衬砌混凝土厚度50 cm～60 cm。地面预注浆共设置8个注浆孔，布孔圈半径6.2 m，注浆段长度608 m，起止高程675 m～67 m。防渗固结灌浆原设计布置于JS0+11.6～JS0+50.5无地面预注浆井段，对应高程713.9 m～675 m，段长38.9 m。固结灌浆孔深度5.0 m，每排15个灌浆孔，排距3.0 m，呈梅花形布置，如图1所示。

作者简介：阮超（1981-），男，本科，高级工程师，研究方向：水利水电工程施工管理。

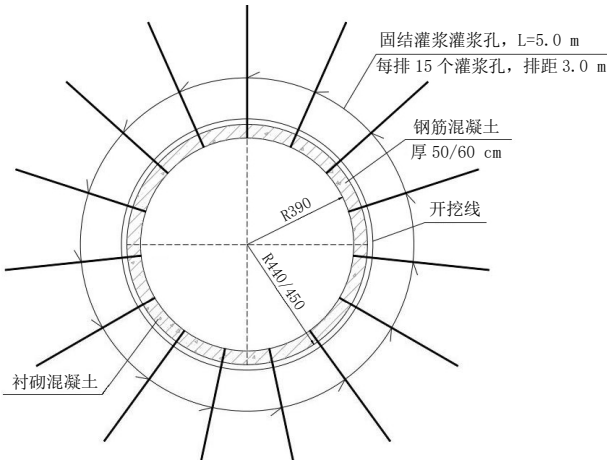


图 1　竖井防渗固结灌浆布置图

2　方案设计及优化

2.1　帷幕灌浆优化思路与参数设计

基于上述问题，在确保工程安全与质量的前提下，将原井内防渗固结灌浆变更为地表帷幕灌浆，通过调整灌浆工艺，确保达到更优的防渗效果，同时兼顾施工效率与经济性。

具体优化思路如下：利用井口平台开阔场地，从地表向下钻孔，形成环形帷幕，与已完成的地面预注浆段搭接，构建垂向连续防渗体系。该方案可避免井内交叉作业，同时实现更大深度、更大范围的防渗加固，确保防渗体系在垂向上无空白段，增强整体防渗可靠性。

在井口平台布置1环帷幕注浆孔，布孔圈半径6.8 m，共 30 个灌浆孔，孔间距 1.42 m，孔深 55.5 m，注浆段长度 43.5 m（起止高程为 713.5 m～670 m），与地面预注浆顶部高程 675 m 搭接 5 m。

2.2　灌浆材料、压力及孔段划分

帷幕灌浆的浆材由主材和辅材共同构成。主材为 P.O 42.5级普通硅酸盐水泥，辅材为水玻璃（模数3.0～3.5，波美度 45°），用于配制水泥—水玻璃双液浆，以提高速凝效果，适用于裂隙发育、吃浆量大的地层。浆液比级采用 2:1、1:1、0.7:1、0.5:1 四个水灰比级，由稀至浓逐级变换。

帷幕灌浆施工过程中所需要的浆液由制浆站提供，制浆站布置在井口平台处，配备 ZJ-600L 高速制浆机、两个 JP400L 双层搅拌桶，通过 Φ25 mm 管路输送至井口作业面。

根据孔序及孔深，实行分级压力控制，将全孔55.5 m划分为 8 个灌浆段。为逐步加密、提高帷幕均匀性，30 个帷幕孔分为三个次序施工——Ⅰ序孔 8 个、Ⅱ序孔 7 个、Ⅲ序孔 15 个。Ⅰ、Ⅱ序孔采用自上而下分段钻孔、分段灌浆，Ⅲ序孔作为加密孔，根据地层情况采用自上而下或自下而上分段灌浆。从渗水量相对较大的方向开灌，灌浆压力视注入率动态调整，确保浆液有效扩散与裂隙充填。帷幕灌浆设计参数如表 1，各段长度及设计灌浆压力如表 2 所示。

表 1　帷幕灌浆设计参数

施工项目	孔序	设计工程量			设计孔深 /m
		孔数 / 个	覆盖层 /m	基岩 /m	
帷幕灌浆 1 环	Ⅰ序孔	8	96	348	55.5
	Ⅱ序孔	7	84	304.5	55.5
	Ⅲ序孔	15	180	652.5	55.5
合计		30	360	1 305	166.5

表 2　不同灌浆段设计灌浆压力统计表

段次	孔深 /m	段长 /m	Ⅰ序孔压力 /MPa	Ⅱ序孔压力 /MPa	Ⅲ序孔压力 /MPa
1	14	2	0.5	0.7	1.0
2	20	6	0.7	1.0	1.5
3	26	6	1.0	1.0	1.5
4	32	6	1.0	1.0	1.5
5	38	6	1.0	1.0	1.5
6	44	6	1.0	1.0	1.5
7	50	6	1.0	1.0	1.5
8	55.5	5.5	1.0	2.0	2.0

3　施工工艺与关键技术

3.1　施工流程与钻孔技术

单孔施工流程：根据孔序不同，单孔施工分为自上而下分段灌浆法和自下而上分段灌浆法两种流程。

1. 自上而下分段灌浆流程（适用于Ⅰ、Ⅱ序孔及部分Ⅲ序孔）：钻入第一段（2 m～6 m）→洗孔、压水→灌浆→待凝→扫孔→钻入下一段→重复上述步骤直至终孔→全孔封孔。

2. 自下而上分段灌浆流程（适用于部分Ⅲ序孔）：全孔一次钻至设计深度→自孔底向上分段→每段下设灌浆塞→洗孔、压水→灌浆→提升灌浆塞至上一段→重复直至孔口→封孔。

竖井地表覆盖层厚度约13.5 m，主要由碎块石土、砂卵砾石组成，结构松散，易塌孔。因此，在钻孔过程中，覆盖层采用跟管钻进形式，采用HM-90SC全液压履带式锚固钻车，配备Φ130 mm钻头，采用跟管钻进工艺，边钻进边下入Φ108 mm套管，直至穿过覆盖层进入基岩2 m，钻进完成后，在套管内注入水泥浆固结，形成稳固的孔口管，待凝48 h后方可进行后续基岩钻进；基岩采用回转钻进形式，该段采用XY-2型地质回转钻机，钻孔孔径Φ76 mm，钻头选用硬质合金或金刚石钻头，根据地层情况调整钻压与转速。钻进过程中采用清水循环，及时排除岩粉，保持孔内清洁。

同时，为保证帷幕搭接效果，须严格控制钻孔偏斜。在开孔前使用罗盘、水平仪校准钻机立轴，确保其倾角与方位角符合设计要求。在钻进过程中，每10 m进行一次孔斜测量，采用陀螺测斜仪或精度不低于±0.5°的电子测斜仪。终孔孔底允许偏差按孔深控制：孔深55.5 m时，最大允许偏差不大于1.2 m。

3.2 灌浆方法与控制技术

采用孔口封闭、孔内循环灌浆法。灌浆塞置于孔口或孔内预定位置，浆液通过钻杆注入孔底，经孔壁裂隙进入地层，多余浆液经回浆管返回搅拌桶形成循环。对于Ⅰ、Ⅱ序孔，采用自上而下分段灌浆，每段灌浆结束后待凝8 h～12 h再钻下一段；对于Ⅲ序加密孔，可采用自下而上分段灌浆，以提高施工效率。

在灌浆过程中，采用抬动监测与压力分级控制技术。起始阶段采用较低压力（设计值的20%～40%），根据注入率变化逐步升压。注入率与压力关系如下：当吸浆率＞30 L/min时，使用0.2P；15 L/min～30 L/min时，使用0.4P；＜15 L/min时，使用0.8P；终灌阶段达到设计压力。

3.3 浆液比级与变换标准

开灌水灰比根据压水试验透水率确定。透水率≤10 Lu时，采用2:1浆液开灌；10 Lu～30 Lu时，采用1:1开灌；＞30 Lu时，可直接采用0.5:1浓浆开灌。

浆液采用由稀至浓的逐级变换变标准：当灌浆压力保持不变而注入率持续减少，或注入率不变而压力持续升高时，不得改变水灰比；当某级浆液注入量达到300 L以上，或灌注时间已达30 min，而灌浆压力和注入率均无明显改变时，改浓一级水灰比；当注入率大于30 L/min时，可视情况越级变浓（直接从2:1跳至0.7:1）。此外，在灌浆过程中若出现漏浆、冒浆、串浆等异常情况，可越级变浓或改用水泥—水玻璃双液浆。灌浆段在设计压力下，注入率不大于1 L/min后，屏浆30 min，屏浆期间平均注入率不超过1 L/min，即可结束该段灌浆。

4 技术经济分析

为客观评估优化方案的工程经济性，依据《水利工程设计概（估）算编制规定》（水总〔2024〕323号）及本工程实际施工条件，分别对原井内防渗固结灌浆方案与地表帷幕灌浆方案进行费用估算约98.29万元，帷幕灌浆费用约121.99万元，优化后增加费用约23.70万元。虽然直接工程成本有所上升，但其在防渗效果、施工安全、工期保障三方面的综合效益远高于成本增量，是一项技术上先进、经济上合理、安全上可靠的优化举措。

5 结论

针对案例工程6-1#竖井原井内防渗固结灌浆方案存在的安全风险高、占用直线工期、防渗效果差等突出问题，将其优化为地表帷幕灌浆方案是必要且可行的。优化的帷幕灌浆方案采用孔口封闭、孔内循环灌浆法，通过分序加密（Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ序孔）、分级压力控制（0.5 MPa～2.0 MPa）、浆液比级变换（2:1→0.5:1）及水泥—水玻璃双液浆等关键技术，可确保浆液有效扩散与深部裂隙充填，灌后透水率目标值q≤3 Lu。通过地表环形布孔、垂向帷幕搭接，构建了完整的垂向防渗体系，有效解决了原方案的技术局限，且防渗可靠性大幅提升。

参考文献：

[1] 王耀毅,尚书亳,曾庆好,等.库尾复杂地质段超深竖井咬合桩的施工技术研究[J].云南水力发电,2023,39(10):98-101.

[2] 刘力源,纪洪广,王涛,等.高渗透压和不对称围压作用下深竖井围岩损伤破裂机理[J].工程科学学报,2020,42(06):715-722.

[3] 温东北.富水厚覆土层地区竖井施工技术[J].工程建设与设计,2020(20):132-133.

[4] 薛惠江,周王鹏,蒲仕洋,等.高水头条件下超深竖井渗透特性及防渗技术研究[J].安徽建筑,2024,31(04):127-129.

[5] 王天培.水利水电工程施工中帷幕灌浆施工技术的应用研究[J].科技与创新,2026(08):155-158.

[6] 程玉泉.破碎围岩小断面渐变调压井施工关键技术[J].水利技术监督,2026(08):277-280,330.