

# 高喷灌浆技术在水库除险加固工程中的应用

孙 旻

(华北水利水电大学, 河南 郑州 450046)

**【摘 要】** 高压喷射灌浆是在高压作用下使浆液高速喷射到周围地层, 对地质介质产生冲切、搅拌和挤压等作用, 在浆液凝固后可以起到封堵裂隙、加固结构的效果。本文以河南省某水库为例, 结合工程实际情况, 简要分析高压喷射灌浆施工工艺, 并设计高压喷射灌浆方案, 进行高压喷射灌浆施工。最后通过一系列检测试验, 对本次防渗墙施工质量进行检验。结果表明: 防渗墙的渗透系数、抗压强度和弹性模量等均达到工程设计要求, 取得了理想的防渗效果。

**【关键词】** 高压喷射灌浆; 施工工艺; 除险加固

**【中图分类号】** TV697

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1009-6159(2024)-12-0040-04

## Application of High Sprinkler Grouting Technology in the Strengthening of Reservoir

SUN Yang

(North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450046, China)

**Abstract:** High pressure jet grouting is under the action of high pressure to make the slurry high-speed jet to the surrounding strata, resulting in the geological medium punching, stirring and extrusion, which can play the function in sealing the cracks and strengthening the structure after the slurry solidification. This paper takes a reservoir in Henan Province as an example, combined with the actual situation of the project, briefly analyzes the construction technology of high-pressure jet grouting, and designs the high-pressure jet grouting scheme to carry out high-pressure jet grouting construction. At last, through a series of testing tests, the construction quality of the cutoff wall is tested. The results show that the permeability coefficient, compressive strength and elastic modulus of the anti-seepage wall meet the engineering design requirements, and the anti-seepage effect can be achieved.

**Key words:** High-pressure jet grouting; Construction technology; Reinforcement and strengthening

河南省某水库位于黄河二级支流好阳河下游, 水库总库容 1 328 万  $\text{m}^3$ , 水库正常蓄水位 431.73 m, 兴利库容 450 万  $\text{m}^3$ , 死水位 422.73 m, 死库容 274 万  $\text{m}^3$ ; 流域面积 129  $\text{km}^2$ , 多年平均入库径流量约 950 万  $\text{m}^3$ 。水库主体工程有大坝、溢洪道、输水洞等建筑物, 是一座以防洪、灌溉为主, 结合发电、养殖等综合利用的中型水库<sup>[1]</sup>。

## 1 高压喷射灌浆防渗墙试验

### 1.1 试验方案

#### 1.1.1 试验方案拟定

浆砌石廊道轮廓线宽约 2.4 m, 高喷钻头直径 10 cm, 为避免钻孔破坏现状输水洞廊道墙身,

廊道两侧喷浆孔孔距至少需要 2.6 m, 考虑到钻孔孔深及钻孔倾斜率影响, 本次试验拟采用 3.0 m 和 2.8 m 两种孔距搭配不同的喷浆参数配置分别进行试验, 通过工艺试验成果分析, 最终确定可有效保证高喷防渗墙成墙质量的施工工艺方案。结合工程施工条件, 高压喷射灌浆防渗墙拟采用冲击钻成孔、双高压三管法喷浆施工, 具体如下:

1)《水电水利工程高压喷射灌浆技术规范》(DL/T 5200-2004) 中经验资料提出旋喷三管法最大成桩直径为 2 m, 无法在输水洞 2.4 m 宽廊道下形成闭合的防渗墙体, 故选择喷射半径更大

收稿日期: 2024-06-15

作者简介: 孙旻(1998—), 男, 硕士在读

的摆喷(规范中经验资料显示摆喷及定喷有效长度为旋喷直径的 1.5 倍),采用对接的形式来完成高喷防渗墙施工。

2)因摆喷施工过程中,喷嘴附近形成的墙体较薄,为满足设计墙厚 0.6 m 的要求,在预设的喷浆孔位置采用直径 0.6 m 的冲击钻成孔,喷浆管下至孔底后,使用低压原地喷浆的方式对孔内泥浆进行置换,待孔口回浆出现水泥浆时再开始高压摆喷施工,以此来保证灌浆孔成墙厚度及质量。

1.1.2 试验安排

初次工艺试验拟安排 2 个灌浆孔进行高压喷浆摆喷试验,孔距 3 m,孔深 3 m。通过试验需要解决施工方案设计中存在的摆喷对接搭接宽度和图 1 示  $W_1$  和  $W_2$  成墙厚度,具体如下:

1) 通过调整摆喷角度观察测量图 1 示  $W_2$  成墙厚度,初拟摆喷角度为  $90^\circ$  和  $110^\circ$ 。图 1 所示  $W_2$  在摆喷角度为  $90^\circ$  时,理论成墙厚度为 36 cm,考虑到现场实际喷嘴喷浆有散射,成墙厚度应大于 36 cm,具体数值待开挖检查后确定。

2) 通过调整提升速度观察测量喷浆半径,初拟提升速度为 7 cm/min 和 9 cm/min。

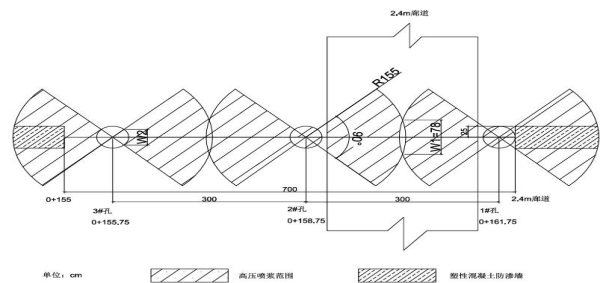


图 1 初始 3 m 孔距高压喷射注浆施工方案示意图

1.1.3 试验机械

所需主要机械设备包括冲击钻机 1 台;高喷台车 1 台;高压灌浆泵 1 台;空气压缩机 1 台;拌浆机 1 台;柴油发电机组 300 kW 2 台;高压水泵 1 台。

1.2 试验施工

1.2.1 试验步骤

1)钻机就位:钻机需平置于牢固坚实的地方,钻头对准孔位中心,水平位置偏差不超过 5 cm,竖直度控制在 1%桩长内,钻孔深度应超过设计墙深不小于 0.3 m。

2)钻孔下管:在下管过程中,需带低压下管,防止管外泥砂堵塞喷嘴,确保下管顺利,下管过程中同时输送压缩气流,直至注浆喷头下到预定位置。

3)制浆:本次试验高压喷射注浆材料采用 P·O42.5 普通硅酸盐水泥,水灰比根据适配暂定为 1.35,水泥浆容重  $1.40\text{ g/cm}^3$ 。

4)试管:当注浆管置入土层预定深度后先用清水试压,若高压水、气、浆设备和管路安全正常,则可搅拌制作水泥浆开始高压注浆作业。

5)高压注浆作业:高压射浆应先按规定参数进行原位喷射,待浆液返出孔口、情况正常、孔内泥浆置换完成后,方可开始自下而上连续摆喷作业<sup>[2]</sup>。

6)喷浆结束与拔管:喷浆由下而上至设计高度后,停止喷浆,拔出喷浆管,喷浆即告结束。把浆液填入注浆孔中,多余的清除掉,但需防止浆液凝固时产生收缩的影响,拔管要及时,不可久留孔中,否则浆液凝固后将难以拔出。

7)注浆设备清洗:当喷浆结束后,立即清洗高压泵、输浆管路、注浆管及喷头。

8)移位:高喷台车移至下一孔位,重复进行上述步骤施工。

1.2.2 质量控制及保证措施

1)水泥浆:水泥浆要严格按设计的配合比配置,要预先筛除水泥中的结块。为防止水泥浆发生离析,可在灰浆拌搅机中不断搅动,待压浆前缓慢倒入料斗中,水泥浆自制备至用完时间不应超过 4 h。

2)冲击钻成孔时,钻孔有效深度应超过设计墙底深度 0.3 m,并保证孔斜率不超过 1%。

3)高喷灌浆宜全孔自下而上连续作业,中途拆卸喷射管时,搭接段应进行复喷,搭接长度不小于 0.2 m,若因故中断恢复施工时,复喷搭接长度不小于 0.5 m。

1.3 备用工艺试验方案

在以上工艺试验不能满足设计要求时,拟采用 2.8 m 喷浆孔孔距,双高压旋喷和双高压  $30^\circ$  摆喷加复喷的方式来保证防渗墙成墙质量。

1)若预设的摆喷角度、提升速度等不能满足有效搭接宽度及成墙厚度 0.6 m 的要求时,可降低摆喷角度,摆喷角度越小,压力衰减就越小,摆喷半径越大。

2)30°摆喷会造成图 1 中 W<sub>2</sub> 厚度不能满足设计墙厚 0.5 m 的要求,可采用原孔位旋喷摆喷搭接的方式进行该薄弱处补强,备用工艺试验参数见表 2。

1.4 试验成果检测

成桩 3 d 后,采用浅部开挖桩头,深度在停

浆面下 1.5 m 范围内,检测成墙厚度、摆喷直径、摆喷搭接宽度等指标,具体见表 1、表 2。

1.5 试验结论

综上所述,备用工艺试验所使用的参数配置可以满足设计及规范要求,可以选定作为高喷防渗墙的施工参数:先使用冲击钻成孔,孔距

表 1 工艺试验 4 组试验参数组合

|                | 水泥浆比重/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 水压/MPa | 气压/MPa  | 浆压/MPa | 摆喷角度/° | 提升速度/(cm·min <sup>-1</sup> ) | 摆速/(次·min <sup>-1</sup> ) |
|----------------|-----------------------------|--------|---------|--------|--------|------------------------------|---------------------------|
| 1 <sup>#</sup> | 1.40                        | 35~40  | 0.8~1.2 | 30~35  | 90     | 9                            | 9                         |
| 2 <sup>#</sup> | 1.40                        | 35~40  | 0.8~1.2 | 30~35  | 110    | 7                            | 7                         |
| 3 <sup>#</sup> | 1.40                        | 35~40  | 0.8~1.2 | 30~35  | 30     | 3                            | 12                        |
| 4 <sup>#</sup> | 1.40                        | 35~40  | 0.8~1.2 | 30~35  | 30     | 3                            | 12                        |

表 2 工艺试验 4 组试验参数组合检测成果

| 孔位<br>编号       | 孔距/<br>m | 摆喷直<br>径/cm | 成墙<br>质量  | 喷浆孔 W <sub>1</sub> 处<br>成墙厚度/cm | 摆喷搭接处 W <sub>2</sub><br>成墙厚度/cm |
|----------------|----------|-------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|
| 1 <sup>#</sup> | 3        | 241         | 均匀<br>无夹渣 | 115                             | 未搭接                             |
| 2 <sup>#</sup> |          | 195         | 均匀<br>无夹渣 | 132                             |                                 |
| 3 <sup>#</sup> | 2.8      | 292         | 均匀<br>无夹渣 | 118                             | 62                              |
| 4 <sup>#</sup> |          | 295         | 均匀<br>无夹渣 | 126                             |                                 |

定为 2.8 m,施工工艺严格按照试验参数的 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 执行。

2 质量检测

2.1 检测方法

选用钻孔检查法来检查墙体的连续性及有无夹泥等现象。另外选用注水实验法,根据《水利水电工程注水试验规程》(SL345-2007)的要求进行<sup>[9]</sup>。

2.2 检测结果

1)防渗墙抗压强度质量检测结果见表 3。

表 3 防渗墙抗压强度检测成果表

| 序号 | 工程部位  | 试件规格/mm  | 取样深度/m | 芯样强度/m | 平均值/MPa | 设计强度/MPa |
|----|-------|----------|--------|--------|---------|----------|
| 1  | 0+077 | Φ100×100 | 4.2    | 6.5    | 6.7     | 5.0      |
|    |       |          | 9.7    | 6.8    |         |          |
|    |       |          | 21.5   | 6.9    |         |          |
| 2  | 0+120 | Φ100×100 | 8.5    | 5.7    | 5.6     | 5.0      |
|    |       |          | 21.9   | 5.4    |         |          |
|    |       |          | 28.7   | 5.8    |         |          |
| 3  | 0+159 | Φ100×100 | 7.5    | 6.2    | 6.6     | 5.0      |
|    |       |          | 19.2   | 6.6    |         |          |
|    |       |          | 26.3   | 6.9    |         |          |
| 4  | 0+225 | Φ100×100 | 4.1    | 6.5    | 6.7     | 5.0      |
|    |       |          | 13.5   | 6.8    |         |          |
|    |       |          | 27.8   | 6.9    |         |          |
| 5  | 0+312 | Φ100×100 | 6.4    | 6.3    | 6.1     | 5.0      |
|    |       |          | 21.3   | 6.1    |         |          |
|    |       |          | 36.7   | 5.8    |         |          |
| 6  | 0+337 | Φ100×100 | 3.8    | 6.2    | 5.9     | 5.0      |
|    |       |          | 16.4   | 5.7    |         |          |
|    |       |          | 29.6   | 5.9    |         |          |

2)防渗墙弹性模量检测结果见表 4。

3)防渗墙渗透系数质量检测结果。本次采用钻孔降水头注水试验,检测墙体渗透系数见表 5。

2.3 检测结论

1)防渗墙抗压强度。采用钻芯法对防渗墙抗压强度进行检测,设计抗压强度 5.0 MPa,共检测

表 4 防渗墙弹性模量检测成果表

| 序号 | 工程部位        | 试件规格 /mm    | 样品编号 | 弹性模量 /MPa | 平均值 /MPa | 弹性模量设计值 /MPa |
|----|-------------|-------------|------|-----------|----------|--------------|
| 1  | 0+077       | Φ 100 × 100 | 1-1  | 2 161     | 2 091    | 1 500-3 000  |
|    |             |             | 1-2  | 2 055     |          |              |
|    |             |             | 1-3  | 2 056     |          |              |
| 2  | 0+120       | Φ 100 × 100 | 2-1  | 2 033     | 2 023    | 1 500-3 000  |
|    |             |             | 2-2  | 2 054     |          |              |
|    |             |             | 2-3  | 1 981     |          |              |
| 3  | 0+159       | Φ 100 × 100 | 3-1  | 2 186     | 2 185    | 1 500-3 000  |
|    |             |             | 3-2  | 2 160     |          |              |
|    |             |             | 3-3  | 2 210     |          |              |
| 4  | 0+225       | Φ 100 × 100 | 4-1  | 1 852     | 1 913    | 1 500-3 000  |
|    |             |             | 4-2  | 1 920     |          |              |
|    |             |             | 4-3  | 1 966     |          |              |
| 5  | 0+312       | Φ 100 × 100 | 5-1  | 2 133     | 2 089    | 1 500-3 000  |
|    |             |             | 5-2  | 2 054     |          |              |
|    |             |             | 5-3  | 2 081     |          |              |
| 6  | 防渗墙桩号:0+337 | Φ 100 × 100 | 6-1  | 2 186     | 2 152    | 1 500-3 000  |
|    |             |             | 6-2  | 2 160     |          |              |
|    |             |             | 6-3  | 2 110     |          |              |

表 5 注水试验检测成果表

| 检测项目                        | 检测部位                          |                         |                         |                         |                         |                         |
|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                             | 0+077                         | 0+120                   | 0+159                   | 0+225                   | 0+312                   | 0+337                   |
| 孔顶高程 /m                     | 432.00                        | 432.00                  | 432.00                  | 432.00                  | 432.00                  | 432.00                  |
| 钻孔深度 /m                     | 31                            | 45                      | 45                      | 45                      | 45                      | 30                      |
| 试验段直径 /cm                   | 10                            | 10                      | 10                      | 10                      | 10                      | 10                      |
| 地下水位 /m                     | 422.73                        |                         |                         |                         |                         |                         |
| 渗透系数 /(cm·s <sup>-1</sup> ) | 7.12 × 10 <sup>-8</sup>       | 5.92 × 10 <sup>-8</sup> | 6.26 × 10 <sup>-8</sup> | 4.39 × 10 <sup>-8</sup> | 6.92 × 10 <sup>-8</sup> | 6.33 × 10 <sup>-8</sup> |
| 备注                          | 设计要求不大于 10 <sup>-7</sup> cm/s |                         |                         |                         |                         |                         |

6 组芯样,所检部位现龄期抗压强度推定值均符合设计要求。

2)防渗墙弹性模量。采用钻芯法对防渗墙弹性模量进行检测,设计弹性模量 1 500~3 000 MPa,共检测 6 组样品,所检样品弹性模量值均符合设计要求。

3)防渗墙渗透系数。采用注水实验对防渗墙桩号 0+077、0+120、0+159、0+225、0+312、0+337 检查孔进行检测,渗透系数分别为 7.12×10<sup>-8</sup>cm/s、5.92×10<sup>-8</sup> cm/s、6.26×10<sup>-8</sup> cm/s、4.39×10<sup>-8</sup> cm/s、6.92×10<sup>-8</sup> cm/s、6.33×10<sup>-8</sup> cm/s,注水部位防渗墙渗透系数均满足设计不大于 1×10<sup>-7</sup> cm/s 要求<sup>[4]</sup>。

3 结 论

本次高喷灌浆施工采用水灰比为 1.35,水泥浆比重 1.40 g/cm<sup>3</sup> 的浆液材料,采取水压、气压、

浆压分别为 35 MPa、0.8 MPa、30 MPa,摆喷角度 30°,提升速度 3 cm/min,摆速 12 次/min 的施工参数,使得成墙厚度符合要求,顺利完成除险加固工程。根据最终的检测结果,高压喷射灌浆防渗墙的抗压强度、弹性模量、渗透系数等性能都符合设计要求,取得了预期效果。

参考文献

[1] 苏晓玉,李松平,王米米,等.沟水坡水库溢洪道弯道水流数值模拟[J].水利发展研究,2023,23(8):67-74.  
[2] 刘斯奇.高压喷射灌浆防渗施工关键参数取值的试验研究[J].黑龙江水利科技,2023,51(9):42-45.  
[3] 刘学义.雷达法和注水试验在高喷防渗墙检测中的应用[J].河南水利与南水北调,2018,47(1):56-57.  
[4] 程雄辉.高压喷射灌浆技术在病险坝防渗加固中的应用[J].科技创新与应用,2022,12(33):48-51.

(责任编辑 赵其芬)