

水工隧洞灌浆基础防渗处理技术在水利工程中的应用研究

尹广平

中国水电基础局有限公司 天津市武清区 301700

DOI: 10.12238/j pm.v5i6.6910

[摘要] 水工隧洞灌浆基础防渗处理技术在水利工程施工中具有重要的应用价值。本文详细探讨了隧洞灌浆基础防渗处理的优势及其在水利工程中的实际应用，包括提高隧洞抗渗性能、适应复杂地质条件、施工效率高和经济效益显著等方面。此外，本文还介绍了隧洞回填与固结灌浆施工的准备工作和技术要点，强调了施工过程中砂浆配置、灌浆方法与压力控制、灌浆完毕与封孔的质量控制措施，以确保工程质量和稳定性。最后，通过实例验证，阐明了灌浆技术在不同地质条件下的应用效果和实践经验。

[关键词] 水工隧洞；灌浆基础；防渗处理技术；水利工程

Research on the application of anti-seepage treatment technology of hydraulic tunnel grouting foundation in water conservancy project

Yin Guangping

Sinohydro Foundation Bureau Co., LTD., Tianjin Wuqing District 301700

[Abstract] The anti-seepage treatment technology of hydraulic tunnel grouting foundation has important application value in water conservancy project construction. This paper discusses the advantages of anti-seepage treatment of tunnel grouting foundation and its practical application in water conservancy projects, including the improvement of anti-seepage performance of tunnel, adaptation to complex geological conditions, high construction efficiency and significant economic benefits. In addition, the paper also introduces the preparation work and technical points of tunnel backfill and consolidation grouting construction, emphasizing the quality control measures of mortar configuration, grouting method and pressure control, grouting completion and hole sealing in the construction process, so as to ensure the quality and stability of the project. Finally, the application effect and practical experience of grouting technology in different geological conditions are clarified.

[Key words] hydraulic tunnel; grouting foundation; anti-seepage treatment technology; water conservancy project

1 引言

随着我国水利事业的快速发展，新建水利工程数量不断增加。水利工程施工环境复杂，工程量大，施工难度高，如何保证工程基础性能成为需要重点关注的问题。隧洞灌浆基础防渗处理技术作为一种重要的工程技术，能够有效提升隧洞回填质量和基础整体性能。本文旨在探讨该技术的优势、施工准备工作和技术要点，并提供全面的质量控制措施，确保施工过程中的每一个环节都符合标准，最终保证水利工程的施工质量和运行稳定性。

2 水工隧洞灌浆基础防渗处理技术的优势

水工隧洞灌浆基础防渗处理技术在水利工程中的应用具有显著的优势，有助于提高工程的安全性和耐久性。首先，这项技术能够有效地提高隧洞及其基础的抗渗性能。通过在隧洞

周围的岩体或地基中注入高压浆液，可以填充裂隙和孔隙，形成连续的防渗帷幕。这种处理方式可以显著减少地下水的渗流，防止渗漏水对隧洞结构的侵蚀，从而延长工程的使用寿命。

其次，灌浆技术具有良好的适应性和灵活性。根据不同地质条件和工程需求，可以选择不同类型的浆液，如水泥浆、化学浆液或复合浆液，以实现最佳的防渗效果。对于复杂的地质条件，如断层带、溶洞和岩溶区等，灌浆技术能够通过调整灌浆参数和工艺，灵活应对各种挑战，确保工程质量。

第三，灌浆技术在施工过程中具有效率高、工期短的优势。相比其他防渗措施，如铺设防渗膜或采用物理屏障，灌浆施工相对简单，机械化程度高，能够迅速完成大面积的防渗处理。这对于工期要求紧迫的水利工程项目尤为重要，能够在较短时间内达到预期的防渗效果，确保工程按时交付使用。

此外, 灌浆基础防渗处理技术还具有较高的经济效益。虽然前期的灌浆材料和设备投入较大, 但从长远来看, 灌浆技术能够有效减少渗漏导致的维护和修复费用, 降低工程的整体运行成本。同时, 灌浆技术对环境的影响较小, 施工过程中产生的废浆和污染物较少, 符合现代工程对环保要求的高标准。

最后, 灌浆基础防渗处理技术在实践中得到了广泛应用和验证。大量水利工程实例表明, 灌浆技术能够在各种复杂地质条件下取得良好的防渗效果, 确保工程的安全运行。例如, 在大坝基础、隧洞周边岩体和地下工程中, 灌浆技术的成功应用为类似工程提供了宝贵的经验和借鉴。

3 隧洞回填与固结灌浆施工

3.1 施工准备工作

做好灌浆基础防渗处理工作必须要保证准备工作足够充分, 通常包括施工设备、测量仪器、砂浆配置等几个方面。

3.1.1 设备准备

灌浆基础防渗处理工艺中, 所需的设备包括地质钻机、双层立式搅拌机、潜孔钻机、立方空压机、卷扬机、电焊机等, 同时还包括一系列的泵类设施, 如泥浆泵、潜水泵、污水泵。此外, 还要准备相应数量的运输车辆。由于所需的设备种类较多, 为了保证防渗施工顺利开展, 必须要做好设备的性能检测工作, 保证所需设备运行性能能够满足工程建设标准。结合工程设计标准, 在隧洞灌浆施工中, 手风钻与潜孔钻孔孔径标准为 36~40mm, 施工钻头直径选择 38mm, 地质钻机孔径标准为 75~110mm, 施工钻头直径选择 80mm。

3.1.2 仪器验证

正式施工前要对所需仪器进行验证, 如水平尺、经纬仪等。垂直误差必须要控制在 0.2% 以内, 并配合使用钻杆垂直。

3.1.3 砂浆配置

通常情况下, 为了保持砂浆整体性能, 主要是采用抗硫酸水泥作为主要原材料。采用高速搅拌机将水泥砂浆筛, 转速控制在 1,400 r/min, 储浆桶采用双层之后传送到低速搅拌桶中。在试验阶段确定水泥砂浆浓度情况下, 对各级别水泥砂浆配比量进行计算 (3:1、2:1、1:1、1:0.8 等)。在加入水泥时必须整袋放入, 如果不满足整袋需要用台秤称量, 保证水泥使用量可以达到标准。同时, 砂浆配置中要严格控制水灰比, 施工中以土层性质、室内试验数据为基准, 并结合现场实际施工情况合理调整。本工程回填灌浆配置比为 0.5:1, 固结灌浆比例为 3:1、2:1、1:1、0.5:1 均可以满足工程质量标准。

3.2 施工技术

在实际施工中, 由于隧洞灌浆基础防渗工艺的特殊性, 要贯彻“先回填、后固结”的原则, 也就是先进行隧洞顶回填灌浆, 在隧洞顶强度达到设计标准后通过质量验收检查, 合格后再进行固结灌浆施工。

3.2.1 回填灌浆

回填灌浆施工是隧洞灌浆基础防渗处理的重要环节, 其施工流程包括布孔、钻孔、洗孔、灌浆和封孔几个步骤。具体操作步骤如下:

1. 布孔: 布孔是指在隧洞顶拱部位按照设计要求进行孔位

布置。布孔时要注意孔之间的间距和排列方式, 以确保灌浆材料能够均匀分布, 达到预期的防渗效果。通常情况下, 表孔溢洪洞顶拱部位钻取 10 cm 的回填灌浆孔, 孔之间的间距为 1.5 m, 采用矩形布置方案。这种设计标准可以有效满足防渗加固质量标准。

2. 钻孔: 钻孔是指使用专业钻孔设备在布孔位置进行钻孔作业。钻孔时要注意孔径和深度的控制, 确保孔洞尺寸符合设计要求。常用的钻孔设备包括地质钻机和潜孔钻机等, 钻孔过程中要严格按照设计标准操作, 避免孔洞尺寸不合格影响后续灌浆效果。

3. 洗孔: 洗孔是指在钻孔完成后, 对孔洞进行清洗, 去除孔内的泥浆和杂质, 确保孔洞内壁干净, 以便灌浆材料能够充分与孔壁结合。洗孔过程通常使用高压水泵进行冲洗, 确保孔洞内无残留泥浆和杂质。

4. 灌浆: 灌浆是指将配制好的水泥砂浆通过灌浆管注入到孔洞中, 填充孔隙和裂隙。灌浆时要控制灌浆速度和压力, 确保浆液能够均匀填充孔洞内部。回填灌浆通常采用层次性的施工方法, 从下游开始, 逐渐向上游推进。同排分两序开展, 先对 I 序进行施工, 再进行 II 序施工, 确保灌浆材料能够均匀分布, 达到防渗加固效果。

5. 封孔: 封孔是指在灌浆完成后, 对孔洞进行封堵, 防止浆液外流, 确保灌浆效果。封孔过程通常采用封孔材料进行填充, 确保孔洞封堵严密, 不出现渗漏问题。

3.2.2 固结灌浆

固结灌浆施工是隧洞灌浆基础防渗处理的另一重要环节, 其施工流程包括布孔、钻孔、洗孔、压水试验、灌浆和封孔几个步骤。具体操作步骤如下:

1. 布孔: 在表孔溢洪洞拱形部位设置一圈灌浆内控, 孔之间的间距为 3 m, 孔深为 4 m, 采用矩形分布形式。布孔时要注意孔位布置的均匀性和合理性, 确保灌浆材料能够均匀分布在隧洞周围, 提高防渗效果。

2. 钻孔: 使用专业钻孔设备在布孔位置进行钻孔作业。钻孔时要注意孔径和深度的控制, 确保孔洞尺寸符合设计要求。常用的钻孔设备包括地质钻机和潜孔钻机等, 钻孔过程中要严格按照设计标准操作, 避免孔洞尺寸不合格影响后续灌浆效果。

3. 洗孔: 在钻孔完成后, 对孔洞进行清洗, 去除孔内的泥浆和杂质, 确保孔洞内壁干净, 以便灌浆材料能够充分与孔壁结合。洗孔过程通常使用高压水泵进行冲洗, 确保孔洞内无残留泥浆和杂质。

4. 压水试验: 压水试验是固结灌浆施工的重要步骤, 通过向孔洞内注入高压水, 测试孔洞的渗透性和承压能力。压水试验可以帮助确定孔洞的灌浆参数, 确保后续灌浆施工的效果。

5. 灌浆: 将配制好的水泥砂浆通过灌浆管注入到孔洞中, 填充孔隙和裂隙。灌浆时要控制灌浆速度和压力, 确保浆液能够均匀填充孔洞内部。固结灌浆通常采用“环间分序、环内加密”的施工原则, 由下游到上游逐排施工。具体操作包括先进行 I 序环的 I 序孔, 再进行 I 序环的 II 序孔; 然后进行 II 序环

的 I 序孔, 再进行 II 序环的 II 序孔, 确保灌浆材料能够均匀分布, 充分发挥其防渗和加固作用。

6. 封孔: 在灌浆完成后, 对孔洞进行封堵, 防止浆液外流, 确保灌浆效果。封孔过程通常采用封孔材料进行填充, 确保孔洞封堵严密, 不出现渗漏问题。

通过以上施工步骤, 固结灌浆能够有效填充隧洞周围的孔隙和裂隙, 形成连续的防渗帷幕, 显著提高隧洞的抗渗性能和整体强度, 确保隧洞结构的稳定性和安全性。

4 灌浆基础防渗质量控制措施

4.1 砂浆控制

在灌浆施工中, 砂浆的配置与质量控制是关键环节, 直接影响工程的防渗效果和结构强度。在灌浆施工前, 必须确保水泥的物理性能达到标准, 尤其是抗压强度和耐久性。常用的材料包括水泥、砂子、粘土和水, 要求这些材料在配置前必须进行严格的质量检查。例如, 对于水泥的选择, 一般采用抗硫酸水泥, 其抗硫酸盐性能能够有效抵御化学侵蚀, 延长工程寿命。

施工现场的抽检工作同样重要。受潮结块的水泥会显著降低灌浆效果, 必须立即剔除。抽检过程采用液体密度计测量浆液各项参数, 确保不达标的水泥砂浆不得使用。同时, 砂浆的配置比例也需严格控制。具体来说, 回填灌浆的配置比例通常为 0.5 : 1, 而固结灌浆的比例可以是 3 : 1、2 : 1、1 : 1 或 0.5 : 1, 这些比例可以根据现场实际情况灵活调整, 以满足工程的质量要求。

此外, 砂浆的水灰比必须根据土层性质和室内试验数据确定。为了保证砂浆的均匀性和稳定性, 采用高速搅拌机进行搅拌, 转速控制在 1, 400 r/min。储浆桶采用双层结构, 然后传送到低速搅拌桶中。在实验阶段, 通过计算各级别水泥砂浆的配比量 (如 3 : 1、2 : 1、1 : 1、1 : 0.8 等), 确保施工中能够准确地控制砂浆的使用量。如果不满足整袋加入的条件, 需要使用台秤进行称量, 保证水泥的使用量达到标准。

砂浆的配置和控制直接影响隧洞灌浆的防渗效果和整体强度, 因此, 在施工中必须严格按照设计和施工规范要求进行操作, 确保每一个环节都符合标准, 从而保证最终的工程质量。

4.2 灌浆方法与压力控制

灌浆方法的选择和压力控制是确保防渗施工质量的重要环节。在隧洞灌浆中, 通常采用孔口循环法和孔内纯压式灌浆法。这些方法可以保证一次性完成灌浆, 避免重复操作带来的质量风险和时间浪费。

在实际施工中, 泥浆泵灌浆机是传输水泥砂浆的主要设备。为了避免挤压式机械塞发生堵塞问题, 通常选择高压钢管作为灌浆管道, 确保灌浆过程顺畅。灌浆压力的控制需要严格按照设计标准和施工规范进行。回填灌浆的压力通常控制在 0.3~0.4 MPa, 而固结灌浆的压力控制在 0.3~0.5 MPa。这些压力标准是通过大量实验和实际操作总结得出的, 能够有效保证灌浆质量和工程稳定性。

灌浆过程中, 要密切监测压力和流量的变化。回填灌浆时, 吸浆量不得超过 0.4 L/min, 并且需要持续运行 30 分钟, 确保

灌浆材料能够充分填充孔隙并达到设计强度。固结灌浆时, 采用环间分序、环内加密的原则, 由下游到上游逐排施工。具体操作包括先进行 I 序环的 I 序孔, 再进行 I 序环的 II 序孔; 然后进行 II 序环的 I 序孔, 再进行 II 序环的 II 序孔, 这种方法可以确保灌浆材料能够均匀分布, 充分发挥其防渗和加固作用。

灌浆方法与压力控制是确保防渗效果和工程稳定性的关键, 因此, 施工过程中必须严格按照设计标准和施工规范进行操作, 确保每一个环节都符合要求, 从而保证最终的施工质量和效益。

4.3 灌浆完毕与封孔

灌浆完毕后, 封孔操作是确保灌浆效果和结构稳定性的重要环节。在回填灌浆达到设计标准后, 需要严格控制吸浆量, 确保吸浆量不超过 0.4 L/min, 并持续运行 30 分钟。这可以确保灌浆材料充分填充孔隙, 达到设计强度。

封孔操作主要采用压力灌浆封孔法。在岩基部位, 封孔压力与灌浆压力相同, 确保封孔过程顺利进行。具体操作步骤包括将导管送入到距离孔底 0.5 m 的位置, 使用泥浆泵打入 0.5 : 1 的水泥砂浆, 置换出孔底的水和稀浆, 当孔口开始溢出浓浆时停止注浆, 并增设止浆阀, 继续灌注 0.5 : 1 浓浆, 进行压力灌浆封孔。这种方法可以确保孔洞内部填充密实, 防止渗漏。

在混凝土部位, 封孔通常使用 1 : 1 浓度的砂浆。除了顶拱, 其他孔洞都采用 1 : 1 砂浆封孔, 封孔完毕后, 需要将封孔周围的乳砂浆抹平, 确保封孔质量和美观。顶拱封孔和水平孔封孔都必须保证岩基部位封孔足够密实, 封孔压力与灌浆压力一致, 使用泥浆泵压入 0.5 : 1 浓浆封孔, 可以有效提高封孔质量, 减少渗漏风险。

灌浆完毕与封孔是确保灌浆效果和工程稳定性的最后一道防线, 必须严格按照施工规范和设计要求进行操作, 确保每一个环节都符合标准, 从而保证最终的施工质量和效益。

5 结束语

为了有效提高水工隧洞的整体性能, 科学应用隧洞回填技术和固结灌浆技术是关键。通过在施工前做好充分的准备工作, 掌握工艺规范要求, 严格控制砂浆、灌浆压力和封孔质量, 可以显著提升隧洞结构的防渗性和整体强度, 保障水工隧洞工程的长期稳定运行。灌浆基础防渗处理技术不仅适用于各种复杂地质条件, 还在实践中得到了广泛应用和验证, 具有显著的经济效益和环保优势。全面加强对该技术的研究和应用, 对于水利工程建设的安全性和耐久性具有重要意义。

[参考文献]

- [1]冯学兵, 常杰, 吴玉丽.水工隧洞灌浆基础防渗处理技术在水利工程中的应用研究 [J].中华建设, 2024, (03): 151-153.
- [2]王军红.固增水电站有压引水隧洞支洞封堵防渗施工技术 [J].四川水力发电, 2023, 42 (05): 9-12.
- [3]王强.水工隧洞灌浆基础防渗处理技术在水利工程中的运用 [J].四川水泥, 2021, (07): 181-182.