

# Analysis of sequential and segmented construction technology of high pressure consolidation grouting in high and large caverns

Xiangfeng Yan

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610213, China

## Abstract

After excavation of large underground caverns, surrounding rock fractures tend to expand and form seepage channels. Without timely high-pressure grouting consolidation, water leakage, rock loosening, and abnormal support stress often occur at arch shoulders, side walls, and intersections. Given the cavern's high ceiling, dispersed working surfaces, and dense grouting network, conventional planar grouting methods may lead to grout flow, movement, and loss of control. This study integrates hydraulic grouting standards with underground powerhouse practices, focusing on sequential densification and top-down segmented grouting. It analyzes critical aspects including grout mouth configuration, pressure control, grout transition, anomaly handling, and quality inspection. The research demonstrates that sequential grouting should first stabilize the grout mouth and surrounding rock, then achieve uniform diffusion and effective filling through controllable segment lengths, ultimately forming a continuous and dense reinforcement ring.

## Keywords

Water Conservancy and Hydropower Engineering; High-Height Caverns; High-Pressure Consolidation Grouting; Sequential and Segmental Construction; Construction Technology

# 高大洞室高压固结灌浆分序分段施工工艺分析

严祥锋

中国水利水电第七工程局有限公司, 中国·四川成都 610213

## 摘要

高大地下洞室开挖后围岩裂隙易张开并形成渗流通道,若未及时实施高压固结灌浆,拱肩、边墙与交叉口常出现渗水、松弛掉块及支护受力异常。洞室空间高、作业面分散、孔网密集,若仅按平面顺推,易产生串浆、抬动与节拍失控。本文结合水工灌浆规范与地下厂房实践,围绕分序加密和自上而下分段灌注,分析孔口成套、压力控制、浆液变换、异常处置与质量检验等关键环节。研究表明,分序分段应先稳孔口与围岩,再以可控段长实现均匀扩散与有效充填,最终形成连续致密的加固圈。

## 关键词

水利水电工程;高大洞室;高压固结灌浆;分序分段;施工工艺

## 1 引言

大型水利水电工程地下厂房、主变洞等高大洞室,多处在裂隙较发育且应力较高的岩体中。开挖扰动与地下水作用叠加后,围岩渗透性和松弛范围常呈不均匀分布,常规低压灌浆难以在有限工期内取得稳定效果。而高压旋喷固结灌浆因其施工速度快、加固效果好、适用范围广、施工空间要求小、对地基扰动小等特点在水利水电工程中应用广泛<sup>[1]</sup>。为此,本文将就高大洞室高压固结灌浆分序分段施工工艺进行分析,形成可落地的控制要点。

## 2 高大洞室高压固结灌浆概述

高大洞室高压固结灌浆是指在地下厂房、主变洞与母线洞等大断面空间内,按照设计孔网在围岩松弛带内钻设固结孔,通过较高灌浆压力把水泥浆液压入节理裂隙、微细孔隙及破碎带,使岩体渗透性降低并提高整体性与承载能力。其灌浆深度通常以洞周卸荷影响范围为依据,并兼顾局部断层、弱夹层和构造破碎带的加深要求,孔位常布置在拱肩、边墙及交叉口等应力集中区,孔向宜尽量切割主要裂隙产状以提高充填效率。与帷幕灌浆侧重构筑防渗帘幕不同,固结灌浆强调形成一定厚度的加固圈,常与喷锚支护、系统锚索、衬砌分仓及排水措施的时序相衔接<sup>[2]</sup>。高压条件下浆液扩散半径受裂隙开度、原位水压力和孔口封闭质量控制,施工中需要通过压水试验或试验段校核孔距、段长与压力上限,

【作者简介】严祥锋(1987—),男,中国四川南充人,工程师,从事水利水电施工及管理研究。

并以分级变浆和分段递进的方式完成灌注。若洞室高度大、围岩暴露时间长, 孔口渗漏、掉块与钻孔偏斜的风险明显增大, 局部还可能沿软弱结构面产生远距离跑浆, 导致有效充填不足。基于此, 现场通常把孔口管、止浆塞和封闭材料作为成套控制对象, 同时把允许抬动、串浆判据与停灌准则预先固化为操作指令, 以便在复杂工况下快速调整并保持施工可控。

### 3 高大洞室高压固结灌浆分序分段施工工艺

#### 3.1 试验段与施工准备

为使高大洞室高压固结灌浆分序分段参数可执行, 开工前需用试验段把关键工艺锁定到现场条件。第一, 项目部应按围岩级别、渗水分布与支护形式选取典型洞段布置试验孔, 完成孔位复核与孔口清理, 剔除松动喷层并及时补喷修补, 配套整治排水沟与集水点, 保证封闭面完整且不受渗水软化影响, 同时预排钻机站位与管线通道, 避免与运输通风冲突。第二, 试验孔按分段冲洗、回水澄清后再压水的顺序组织, 采用分级试压获取吸水量与压力关系, 判定连通性与裂隙开启压力, 据此确定段长及压力递增幅度, 并以注入率衰减曲线校核终灌标准, 常用最大设计压力下注入率不大于约 1 L/min 并持续 30 min 作为转段或结束条件, 同步布设拱肩、边墙抬动与收敛测点形成控制界限。第三, 制浆站宜配置高速搅拌、贮浆与循环搅拌装置, 按试验段确定的水灰比分级配制稀浆至浓浆, 水泥批次、细度与安定性应复验, 细裂隙段可采用特细水泥或微膨胀材料调黏, 拌和水复测 pH 与含泥量, 计量系统校准后控制误差并设置筛网过滤, 防止离析结团堵管。第四, 灌浆泵组、压力表、流量计与泄压阀应成套标定并核对量程, 封闭器、止浆塞及高压胶管逐件耐压试验, 洞内管线采用支架固定并设置防磨保护, 交接班按孔段编号交底, 备齐易损件与备用电源, 按停电停水、突涌水及超压泄压处置流程进行演练, 确保试验参数转入大面施工后节拍稳定。

#### 3.2 孔位布置与成孔控制

分序分段固结灌浆要把孔位与成孔质量先做成可复核、可纠偏的控制项。第一, 孔位放样以洞轴线、拱脚线和衬砌控制点为基准, 采用全站仪复测并在孔口弹线编号, 复核孔间距与排距并与分序编号一致, 孔位偏差控制在 10cm 以内, 孔深不得小于设计值, 高位孔在拱肩布置固定导向架并校核孔向指示, 孔口预留封闭与卡塞操作面, 结合分层台阶将孔网分为拱顶、拱肩、边墙区段分色标识, 保证内插加密仍有布孔余量。第二, 钻进按围岩软硬与裂隙发育选配钻头和转速给进, 开孔段低速稳压并随进埋设孔口管或短护筒, 钻具下放与起拔保持均匀, 孔口防护随孔随封, 破碎带采用短进尺、勤扫孔、勤排渣, 必要时清水循环护壁, 遇掉块或涌水先停钻补浆稳孔后续进, 卡钻用小幅度起落与倒扣解卡, 禁止强提造成扩径塌孔。第三, 孔斜控制采取就位校直与过程测

斜并行, 钻机立轴用吊线校垂直, 孔深每进尺 10 至 20m 测斜一次并绘制投影, 拱肩孔重点核对倾角与走向满足设计, 出现偏斜趋势及时调整钻具组合或回退重钻, 偏斜超限则回填水泥砂浆后重钻并复测终孔深度, 确保灌注段落与加固带对位。第四, 终孔后先进行孔内循环冲洗清除岩粉沉渣, 再开展裂隙冲洗并采用间歇脉冲控制, 冲洗水压由低到高逐级调整并控时, 回水转清且返水顺畅后转入压水试验, 过程中检查孔口封闭区无冲蚀、无串孔冒水, 压水结束后复核孔深与通水性, 必要时压缩空气排水, 再安装封孔器, 按分段长度自下而上灌注<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 分序加密组织

针对高大洞室围岩松弛带展布不均的特点, 固结灌浆宜采用先疏后密的分序加密组织, 并与自上而下分段灌注相衔接。第一, I 序孔按设计孔距上限布置, 优先覆盖渗水集中带、节理裂隙密集区及衬砌背后空鼓疑点, 孔位编号应在衬砌面清晰标注并同步建立孔位台账, 放样时核对支护锚杆与预埋件位置, 孔口管理设要保证同轴度与止浆可靠性, 起灌压力取控制值下限并以稀浆入孔, 结合分段短时稳压观察回浆与吸浆变化, 形成可承压的初始封闭圈。第二, II 序孔在 I 序孔终灌封孔并达到规定待凝后实施, 起灌前复测孔深、段位并完成洗孔, 孔位以补齐 I 序影响半径边界与局部盲区为主, 钻孔偏斜需及时校核, 灌注时采用分级升压与由稀到浓的浆液递变, 连续记录注入率、压力回落及返浆含砂, 必要时采取跳孔灌注和单孔限压限量, 避免相邻孔同步高压引起围岩累积抬动<sup>[4]</sup>。第三, III 序孔作为精细补强环节, 应对拱肩剪切带、洞室交叉口、边墙渗水线及局部破碎带加密布孔, 段长宜缩短并优先处理高位孔, 止浆塞应分段复位并缓慢泄压, 若出现孔间连通或串浆, 应先调整孔序改为由外围向核心推进, 配合低压稀浆预堵、间歇复灌与缓压稳注, 严禁一次性强压扩展走浆通道。第四, 分序转换需设定可量化判据, 可综合压水试验改善幅度、终灌压力稳定持续时间及相邻孔注入率衰减程度判断转序, 并对代表孔进行复测漏水点与返浆情况, 对异常孔、停灌孔与耗浆突增孔建立复灌或补孔清单, 逐孔核对封孔质量与段塞密封, 复灌时先稳压后升压并控制单段耗浆上限, 后序孔布置应先洞顶后拱肩并兼顾边墙高位孔。

#### 3.4 自上而下分段灌注

高大洞室高压固结孔多为深斜孔与扇形孔组, 自上而下分段灌注应先稳固洞顶松弛带并逐步形成承压区。第一, 段长划分以围岩完整性、裂隙发育、孔径与含水性为主控, 按规范提出的灌浆段长超过 6 m 宜分段执行, 完整段取 4 ~ 6 m, 破碎带及涌水段收缩至 2 ~ 3 m, 段界可设短过渡段并结合扩散半径校核, 配合分段止浆塞或孔口封闭器坐封, 测绳复核孔深并留 0.2 ~ 0.3 m 搭接, 斜孔段应校核塞具偏磨与坐封位移。第二, 灌注顺序宜先拱肩、拱顶高位段, 后边墙中段并覆盖底拱周边, 单孔开灌前完成孔内冲洗、压水试

验与排气，回浆管路保持畅通并设观察桶与计量装置，随时核对回浆量与含砂，回浆夹气或断续时先低压稳灌并间歇排气，必要时短停复压，避免表压虚高，同时相邻孔错开灌注并布设抬动监测点。第三，止浆塞坐封应选孔壁稳定且泥皮较薄段位，坐封前检查胶筒完好与锁紧机构，下放到位以 0.2 ~ 0.3 MPa 试封不漏后按分级升压控制泵量，压力随段深逐级提高且不突跳，实行压力与注入率双控，浆液由稀到浓逐级变换，吸浆突增时先稳压再调整比级，终灌按设计最大压力下注入率降至约 1 L/min 并稳定 30 min 后转段并同步记录。第四，转段时先降压停泵再缓慢上提塞具至下一段位，上提过程控制摩阻变化避免带浆回吸，复位后先低压试封并确认回浆通畅，停灌超过允许窗口应先扫孔冲洗恢复通畅，复灌从稀浆起灌逐级恢复原比级并按原梯度升压，防止孔口冲刷、塞体滑移或裂隙骤然张开。

### 3.5 高压控制与浆液变换

在高大洞室固结灌浆分序分段施工中，高压控制与浆液变换必须随裂隙响应动态匹配，并用自动记录仪连续采集压力、注入率与浆量形成参数链并每日同步填写孔段施工日志。第一，加压宜采取孔段检压与分级递进，起灌用低压短循环核验孔口封闭、止浆塞坐封和回浆通畅，同时以回浆计量与压力表对读排查虚压与漏失，再按压力台阶逐级提升，各级稳压 5 至 10 分钟同步读取注入率衰减，当曲线转入缓降区后再升至设计值，到达终压后仍应维持稳定灌注并观察注入率是否回跳，穿越结构面密集带应减小升压梯度并控制升压间隔，必要时先改浓后升压以抑制远距走浆。第二，浆液比级应依据注入率变化由稀到浓连续转换，先用稀浆扩大可进入范围，单一比级灌注量达到约 300L 或持续 30 分钟而压力与注入率无明显变化时应换浓一级，注入率较大时可视情况越级变浓，并保持供浆不中断和搅拌不停。第三，终压上限需综合洞室覆岩、支护反力与混凝土盖重确定，孔口压力应扣除管路损失并定期校验压力表，常规围岩段可将终压控制在 0.4 至 0.7MPa 并配套拱顶抬动与围岩收敛观测，深埋高压水道等部位允许采用更高压力但应缩短段长至 1.5 至 3m 并提高止浆等级，同时设置旁通泄压与压力联锁，确保异常可快速卸载避免衬砌受扰<sup>[4]</sup>。

### 3.6 封孔与质量检验

第一，各段终灌后应在孔内浆液初凝前完成封孔回填，

优先采用水泥浆或细砂水泥砂浆自孔底连续返填，回填管随浆面上升分步提升，封孔深度覆盖孔口扰动带并与孔口管长度同步校核，孔口上部宜补填稍稠浆液并适度捣实，回填过程中控制返浆通道和回流压力<sup>[5]</sup>。第二，封孔前由技术人员逐段复核压力曲线、注入率变化、耗浆量与变浆节点，对中断复灌、异常吸浆和串浆孔单列处置记录，注明补灌段位、补配比与复核结论，现场由质检人员签认并附原始曲线，同时将孔位坐标、孔向、孔深及偏斜实测值纳入竣工台账并完成孔口编号复核。第三，质量检查宜以压水试验为主并结合检查孔验证，在拱肩、交叉口、破碎带等部位加密抽检，重点对比灌前灌后透水性改善幅度与孔间连通性变化，必要时取芯观察裂隙充填与结石完整性，若指标未满足设计要求，应按薄弱区重新布孔补灌并优化段长、压力与浆液比级。第四，洞室衬砌前应进行系统渗水巡检与排水通畅核查，对新渗点、回潮区及集水沟反涌部位实施局部补强灌浆，封孔外露段切除整平并清理孔口标识，隐蔽验收与分部验收资料同步归档，形成可追溯的实体记录。

## 4 结语

高大洞室高压固结灌浆的核心是把“高压能量”转化为“有效充填”，其可控性主要来自分序加密与自上而下分段灌注的协同。工程实施中应以试验段校核压力与段长，以孔口成套和成孔质量保证承压基础，并通过压力递进、分级变浆和异常快速处置稳定灌注过程。质量验收需以封孔实体和检验结果为依据，做到补强有据可循。按上述思路组织施工，可在复杂洞室群条件下实现节拍稳定与加固均匀，为衬砌与运行期渗控奠定基础。

## 参考文献

- [1] 贺新武,葛建军,房敦敏.千岛湖配水工程穿江隧洞Ⅲ类围岩固结灌浆优化研究[J].四川建材, 2024, 50(7):101-103.
- [2] 张曦彦,孙广亮.长龙山电站上斜井固结灌浆施工技术[J].水利水电施工, 2022(5):88-90.
- [3] 罗贯军,王克祥,郭增光,等.复杂河床坝基岩体盖重固结灌浆关键技术[J].JOURNAL- TSINGHUA UNIVERSITY, 2020, 000(7):7.
- [4] 王志国.有压引水隧洞分时段高压固结灌浆效果试验[J].水利技术监督, 2024(003):000.
- [5] 胡启军.固结灌浆技术在水库泄洪洞加固中的应用[J].河南水利与南水北调, 2021.