

深部地下工程分层递进式水泥注浆施工方法与质量控制研究

贾康 姜海浪 徐红林

淮安市淮河水利建设工程有限公司, 中国·江苏 淮安 223400

摘要: 随着矿山、水利及城市地下空间开发向深部发展, 传统基于静水压力倍率确定注浆压力的方法在超深注浆工程中面临巨大挑战, 易导致设备负荷过大、成本激增及地层劈裂风险。本文提出一种适用于深部地下工程的分层递进式水泥注浆施工方法。该方法将目标注浆深度进行等距分割, 在各分割层设置注浆平台并通过管道串联; 注浆过程采用自浅至深的顺序, 注浆压力随深度增加而阶梯式递增, 初始压力设定较低。通过在管道内部集成搅拌与增压装置, 保证了浆液在长距离输送过程中的均匀性与流动性; 注浆完成后采用覆土加载方式增强结石体密实度。同时, 本文构建了涵盖事前配比试验、过程动态调控与事后智能检测的全过程质量控制体系。本方法旨在科学分配注浆压力, 避免初始压力过高对设备及浅部地层的负面影响, 提高深部注浆施工的安全性及经济性, 为深部地层加固与堵水提供了一种创新性的解决方案。

关键词: 深部地下工程; 水泥注浆; 分层施工; 压力递增; 过程控制; 质量控制

Research on the Construction Method and Quality Control of Stratified Progressive Cement Grouting in Deep Underground Engineering

Jia Kang, Jiang Hailang, Xu Honglin

Huai'an Huaihe Water Conservancy Construction Engineering Co., LTD., China Jiangsu Huai'an 223400

Abstract: With the in-depth development of mining, water conservancy and urban underground space, the traditional method of determining grouting pressure based on hydrostatic pressure ratio faces huge challenges in ultra-deep grouting projects, which can easily lead to excessive equipment load, sharp increase in cost and risk of stratum splitting. This paper proposes a stratified progressive cement grouting construction method suitable for deep underground engineering. This method divides the target grouting depth into equidistant sections, sets up grouting platforms at each division layer and connects them in series through pipelines. The grouting process follows a sequence from shallow to deep. The grouting pressure increases step by step with the increase of depth, and the initial pressure setting is relatively low. By integrating stirring and pressurizing devices inside the pipeline, the uniformity and fluidity of the slurry during long-distance transportation are guaranteed. After the grouting is completed, the soil covering and loading method is adopted to enhance the compactness of the stone body. Meanwhile, this paper constructs a full-process quality control system covering pre-proportioning tests, dynamic process regulation and post-intelligent detection. This method aims to scientifically allocate grouting pressure, avoid the negative impact of excessively high initial pressure on equipment and shallow strata, enhance the safety and economy of deep grouting construction, and provide an innovative solution for deep stratum reinforcement and water blocking.

Keywords: Deep underground engineering; Cement grouting; Stratified construction; Increasing pressure; Process control; Quality control

0 引言

注浆技术是地下工程中进行地层加固、堵水防渗的关键手段, 广泛应用于矿井建设、隧道工程、坝基处理等领域^[1,2]。传统的注浆设计参数, 特别是注浆压力, 常依据经验公式(如地下水静水压力的1.5-3.0倍)确定^[3]。然而, 随着资源开采与工程建设向深部延伸(深度已达

1000-2000米), 若继续沿用此方法, 注浆压力可能超过50MPa, 这不仅对注浆泵、管路系统等设备提出极高要求, 显著增加施工成本, 更可能超过浅部或软弱岩土体的抗压/抗拉强度, 引发止浆困难、地层劈裂破坏、浆液无效扩散等一系列问题^[4,5]。因此, 发展一种适应深部环境、能够科学调控注浆压力的施工方法具有重要的工程意义。

现有研究表明,注浆压力应与地应力场、岩土体物性性质及浆液流变特性相匹配^[6]。简单的线性压力估算已无法满足深部复杂地层注浆的需求。本文针对深部地下工程注浆作业中的高压挑战,提出一种“分层设置、递进加压”的施工方法。其核心思想是将整个深部注浆段自上而下划分为若干个施工单元(分层),通过在不同深度设置注浆平台,实现注浆压力的分段独立控制与逐级递增,从而将单次注浆作业所需克服的压力峰值分散到各个分层,有效降低了设备瞬时负荷和对地层的冲击。本文系统阐述该方法的施工工艺流程、关键技术创新点,并集成一套全过程质量控制体系,以期对深部高风险注浆工程提供理论参考与实践指导。

1 分层递进式注浆施工方法

1.1 总体工艺流程

本方法主要包括以下五个步骤,流程示意图如图1所示:

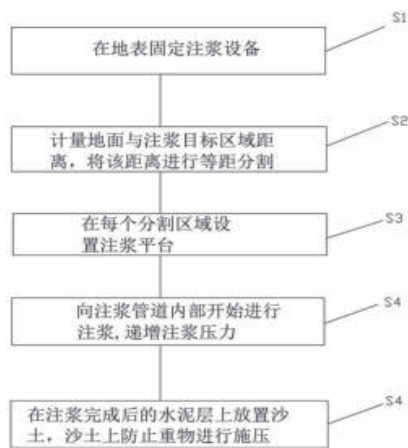


图1 是种地下工程应用水泥注浆施工方法的步骤示意图

(1) S1: 地表设备固定。清理并平整地表作业区域,稳固安装主注浆泵、搅拌站等设备,并设置可靠的设备基础与地锚。

(2) S2: 深度测量与等距分割。精确测量地表至目标注浆区域底板的垂直距离 L 。将此距离 L 进行 n 等分 ($n \geq 3$), 分割间距 $d = L/n$ 。推荐分割间距 d 与总深度 L 的比例在 1:5 至 1:8 之间,即 $d/L \in [1/5, 1/8]$ 。此比例需结合地层条件与设备能力综合确定。

(3) S3: 分层注浆平台构建与管道连接。在每一个分割深度对应的位置(通常利用既有巷道、钻孔或专门开挖的硐室),构建稳定的注浆作业平台。各平台依次安装辅助注浆设备或连接装置。采用高强度注浆管道将各地表设备与各分层平台、以及各分层平台之间串联起来,形成一个从地表直达最深目标区的分布式注浆网络。

(4) S4: 分层递进注浆作业。自最浅层平台开始注浆,逐步向深层平台推进。设定初始注浆压力 P_0 (例如 0.1-0.5 MPa,根据地层特性调整)。每向下一层,注浆压力在上一层的基础上增加一个递增量 ΔP (如 0.1-0.5 MPa)。即第 i 层 ($i=1,2,\dots,n$,从浅至深)的注浆压力 $P_i = P_0 + (i-1) * \Delta P$ 。注浆过程中,各平台设备主要承担本分层及以下的压力,避免了地表设备直接承受全孔深终压。

(5) S5: 注浆后处理与加压密实。注浆结束后,在尚未完全凝固的浅部注浆体上部覆盖一层厚度适中的沙土(建议沙土层厚度与水泥浆液扩散层厚度之比约为 1:5)。随后在沙土层上施加静荷载(如堆放重物),通过荷载传递对下部水泥结石体进行加压,以挤出残留孔隙水与气泡,提高结石体的密实度与早期强度。

1.2 关键技术装置与措施

(1) 分布式注浆平台与减震支护:各分层注浆平台需开挖在稳定地层中,并采用刚性支架(如型钢支架)进行可靠支护。在支架与设备底座间设置橡胶垫等减震结构,以吸收设备运行时的振动,防止对开挖硐室围岩造成扰动破坏。

(2) 带搅拌与增压功能的输送管道:为克服水泥浆液在长距离、多环节输送中易发生的沉淀、离析及压力损耗问题,在连接各平台的垂直或倾斜主输送管道内部,间隔设置内置式搅拌装置(如由外部电机驱动的螺旋搅拌叶片)和管道增压泵。搅拌装置能维持浆液的均匀性,增压泵可补偿管路压力损失,确保浆液以设计压力和流态到达目标注入点。

(3) 可控压力释放的注浆管:下入地层中的注浆花管(前端带射浆孔的管段),其射浆孔的布置与开启压力需进行专门设计。可采用分级式或可控式阀嘴,使得浆液在不同压力阶段注入不同区域,引导浆液按预定模式(渗透、劈裂)扩散,优化加固效果。

(4) 科学的压力递进规则:压力递增量 ΔP 并非恒定值,其设定应基于地质勘察资料。原则上, ΔP 的确定需考虑相邻分层之间的地层性质差异、自重应力增量以及浆液流阻等因素。通过理论计算与现场试验相结合的方式,动态优化 P_0 与 ΔP 序列,实现“浅层低压渗透、中深层中压挤密、深层适当劈裂”的精准注浆。

2 全过程质量控制体系

为确保分层递进式注浆法的工程效果,必须建立贯穿始终的质量控制体系。

2.1 事前控制:设计参数优化与材料试验

(1) 地质条件精细化勘查:采用综合物探、钻探等手

段, 详细查明注浆深度范围内的地层结构、裂隙发育程度、渗透系数及地应力状态, 为分层设计和压力参数提供依据^[7]。

(2) 浆液配比正交试验: 针对目标地层, 在实验室开展系统的浆液配比试验。采用正交试验法, 研究水灰比、外加剂(减水剂、速凝剂、膨胀剂等)种类与掺量对浆液流动性、凝结时间、结石率及抗压强度的影响, 确定最优配比方案^[8]。

(3) 工艺参数模拟与验证: 利用数值模拟软件, 对分层注浆压力下的浆液扩散半径、注浆量进行预估。在正式施工前, 选择代表性地段进行现场试验性注浆, 验证并最终确定分割层数 n 、初始压力 P_0 、递增量 ΔP 等关键施工参数。

2.2 过程控制: 施工动态监测与调整

(1) 工序标准化管理: 编制详细的作业指导书, 对钻孔、清孔、平台构建、管道连接、设备调试、注浆操作、压力切换、记录填写等每一道工序进行标准化规定, 并进行全员技术交底与培训。

(2) 关键参数实时监测与反馈: 注浆过程中, 对每一分层的注浆压力、注浆流量、浆液密度进行连续、实时监测并记录。设立预警阈值, 当压力-流量曲线发生异常(如压力骤降可能预示劈裂或通道打开, 压力骤升可能预示堵塞)时, 立即暂停注浆, 分析原因并调整参数。

(3) 信息化施工平台: 引入注浆自动记录仪与远程监控系统, 实现施工数据的自动采集、无线传输与集中管理。管理人员可远程监控各平台作业状态, 实现施工过程的透明化与可追溯性。

2.3 事后控制: 效果检验与评估

(1) 无损检测与取芯验证: 注浆结束并达到养护龄期后, 采用钻孔取芯、压水(注水)试验、声波测井、地质雷达、电子计算机断层扫描(CT)等综合手段, 对注浆加固体的连续性、密实度、强度及抗渗性能进行检测评估^[9,10]。

(2) 变形与渗流监测: 对于有止水或加固要求的工程, 在注浆影响区布设沉降观测点、渗压计、位移测斜仪等, 长期监测工程结构的变形与地下水位变化, 直观评价注浆的长期效果。

(3) 质量责任制与绩效激励: 建立基于检测结果的施工质量考评制度, 将注浆质量与施工班组、技术人员的绩效直接挂钩, 推行“质量红黑榜”, 激发全员主动管控制

量的积极性。

3 讨论与优势分析

与传统“地表面点高压注浆”模式相比, 本方法具有以下显著优势:

(1) 设备压力需求降低, 安全性提升: 将极端高压分解为多个中高压阶段, 大幅降低了对单一注浆泵和管路的最高承压要求, 延长了设备寿命, 减少了高压作业的安全风险。

(2) 注浆压力与地层匹配性更佳: 递进式压力设计更符合地层应力随深度增加的规律, 能更有效地控制浆液扩散模式, 减少无效注浆和地层破坏风险, 提高注浆效率与材料利用率。

(3) 适用于超深与复杂地层: 该方法通过中间平台接力, 理论上可突破单一设备扬程限制, 适用于千米以上超深注浆。同时, 分层独立控制便于应对不同深度的地层变异。

(4) 质量控制更为精细: 分层施工使得每一段的注浆参数可以独立优化和调整, 问题易于定位和处理, 整体工程质量更可控。

4 结语

本文提出的深部地下工程分层递进式水泥注浆施工方法, 通过“深度分割、平台接力、压力递增”的核心思路, 有效解决了传统深孔注浆面临的压力过高难题。配套的带搅拌增压功能的管道系统和全过程质量控制体系, 进一步保障了施工的可行性与注浆体的最终质量。该方法体现了从经验施工向精细化、智能化施工的转变, 具有理论先进性和工程实用价值。未来, 可结合自动化控制与人工智能算法, 实现注浆压力的自适应动态调整, 进一步提升该方法的智能化水平与应用效果。

参考文献:

- [1] 张可能, 刘宝琛. 注浆理论及其应用[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1996.
- [2] 程晓楠, 马巍. 岩土注浆技术的理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] 中华人民共和国行业标准. GB 50487-2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008.
- [4] 刘人太, 李术才, 张庆松等. 深部裂隙岩体高压动水注浆扩散规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2415-2421.