

# 岩溶地区深孔灌浆孔斜控制技术研究

赵双要<sup>1</sup> 李文帝<sup>2</sup> 孙一鸣<sup>3</sup>

黄河勘测规划设计研究院有限公司地质勘探院 河南 洛阳 471000

**摘要:** 针对某水利枢纽岩溶地区深孔帷幕灌浆施工中面临的孔斜控制难题,本文系统分析了导致孔斜偏差的地质、设备工艺及操作管理三大主要因素,并总结了其控制难点。在此基础上,研究并提出了一套集常规控制措施、强化钻孔过程中的孔斜控制措施(多段线性插值细化孔斜控制指标)、钻进参数优化及分级纠偏策略于一体的综合控制技术。该技术在工程实例中的应用结果表明,终孔偏距不仅达到设计要求,而且实现了更好的优化,同时有效减少了孔斜处理时间,提高了施工效率,降低了综合成本,为类似复杂地质条件下的深孔钻孔质量控制提供了有效的技术参考。

**关键词:** 岩溶地区; 孔斜控制; 多段线性插值; 钻进参数优化; 分级纠偏

## 1 引言

岩溶地区地质条件复杂多变,溶洞、溶隙广泛发育且分布不均,深孔灌浆施工中孔斜问题频发,易导致灌浆范围偏离设计要求,降低防渗加固效果,甚至引发孔壁坍塌、工期延误等工程风险,制约岩溶区域水利、交通等基础设施建设质量。本文聚焦岩溶特殊地质工况下深孔灌浆孔斜成因与控制难点,系统研究孔斜监测方法与精准调控技术,旨在提出适配岩溶地质的孔斜控制方案,提升深孔灌浆施工精度与稳定性,为同类工程施工提供技术参考。

### 1.1 项目概况

陕西省某水利枢纽工程以防洪减淤为主,兼顾供水、发电及改善生态等综合利用。枢纽工程坝基帷幕沿大坝基础廊道向两岸展布;右岸帷幕出坝端后,折向上游约26°,沿山脊直线布置,顶层防渗帷幕轴线长度1168.06m;左岸主帷幕出坝端后,折向上游约24°,然后沿山脊折线布置,顶层防渗帷幕轴线长度为2097.45m。

防渗帷幕线上地层岩溶发育,尤其以左岸最为发育。本工程共布置防渗帷幕约80万m,最大灌浆压力6Mpa,最大孔深为180.68m。设计要求100米以上的孔底偏距最大不超过2.5m。

### 1.2 深孔帷幕灌浆钻孔孔斜控制的重要性

深孔帷幕灌浆孔斜控制的好坏关系到灌浆孔能否按照设计的间距和方向分布。在灌浆施工过程中,孔斜控制的好,浆液能够在预定的范围内均匀扩散,确保对需要加固或防渗处理的区域进行全面覆盖,可以使灌浆帷幕形成一道连续的防渗墙。若钻孔孔斜失控,部分区域可能会出现浆液无法到达的“盲区”,这些盲区可能会成为潜在的渗漏通道。除了灌浆质量外,孔斜控制的不好,会加剧孔壁坍塌、掉块、岩层错动等地质因素所易造成

的孔内埋钻、卡钻挤夹等事故,进而影响施工效率,造成经济损失<sup>[1]</sup>。因此,对岩溶地区深孔灌浆孔斜控制技术进行研究,降低钻孔偏斜率,是非常必要的。

## 2 孔斜偏差的主要原因及控制难点分析

### 2.1 孔斜偏差的主要原因

在钻孔过程中,造成钻孔孔斜偏差的原因有很多,主要原因可归结为地质因素、设备与工艺因素和操作与管理因素。<sup>[2]</sup>

#### 2.1.1 地质因素

地质因素是导致孔斜偏差的客观且难以控制的重要原因。地下岩土体的非均质性、各向异性和复杂多变的结构构造,直接影响了钻头的受力状态和钻进轨迹。其主要表现如下:

- (1) 软硬不均地层: 钻头总是趋向于“跑软避硬”。
- (2) 陡倾角岩层: 钻头沿岩层面“顺层跑”。<sup>[3]</sup>
- (3) 破碎带/裂隙发育带: 孔壁不稳,钻具在腔内晃动,方向失控。

(4) 岩溶地区: 钻头遇溶蚀空间(如溶洞、溶沟)时易突然“失稳跌落”或“沿溶蚀斜面滑移”;同时,钻具在腔内晃动剧烈,方向难以控制。

#### 2.1.2 设备与工艺因素

设备与工艺因素是影响孔斜精度的核心技术环节,其选择的合理性与应用的规范性直接决定了钻孔轨迹的可控性。

(1) 钻具刚性不足: 在深孔或复杂地层中,若使用的钻杆、钻铤刚性不足,在巨大钻压和扭矩作用下易发生弯曲,导致钻头轴线与钻孔轴线产生夹角,从而引发孔斜。

(2) 钻具组合不合理: 未根据地层特点和防斜要求设计合理的钻具组合。

(3) 钻进工艺参数选择不当: 1) 钻压过高: 过大的钻压会加剧钻具的弯曲变形, 尤其是在深孔、软硬交替或倾角较大的地层中, 高钻压会放大“跑软避硬”和“顺层跑”的效应; 2) 转速不匹配: 转速过低时, 钻头破岩效率低, 钻进缓慢; 转速过高则可能引起钻具剧烈离心振动, 破坏钻孔壁的稳定性, 破坏钻具的导向性; 3) 泵量不当: 冲洗液量过小, 会导致岩屑无法及时排出, 在孔底形成“垫层”, 使钻头工作不稳定; 泵量过大则可能冲刷孔壁, 尤其是在松散地层中, 造成孔壁坍塌或扩大, 使钻具失去有效支撑而摆动。

### 2.1.3 操作与管理因素

操作与管理水平是确保前两方面因素得以优化的主观能动性保障, 任何疏忽都可能使精良的设备和完善的工艺功亏一篑。这些因素主要包括开孔与换径操作不规范、钻进参数执行不严格、钻具检查与维护不到位、测斜与纠斜不及时和技术培训与交底不足等。<sup>[4]</sup>

### 2.2 控制难点分析

孔斜控制是一项贯穿钻孔施工全过程的系统性挑战, 其难点主要体现在以下几个方面:

(1) 地质条件的不可预见性与复杂性: 地下情况具有高度的不确定性和局部突变性。如遭遇未预见的小型溶洞、断层或硬度异常的孤石, 会在瞬间打破原有的受力平衡, 使防斜措施失效。

(2) 钻孔深度较大: 随着孔深增加, 钻杆柱的柔性和自重显著增大, 犹如“细长的面条”, 极易发生弯曲与涡动。深度也放大了任何微小偏差的累积效应, 导致“差之毫厘, 谬以千里”的终孔偏差。

(3) 防斜、纠斜与钻进效率的矛盾: 如何在保证钻孔质量的前提下, 寻求最优的钻进效率, 是施工中需要持续平衡的技术经济难题。

(4) 经济成本的制约: 高精度的导向钻具、随钻测量系统以及严格的纠斜工序都会显著增加施工成本。在

一般性工程项目中, 往往需要在控制精度与经济性之间做出权衡, 这使得绝对的“零偏差”在技术上和成本上都不现实, 只能将偏差控制在允许的规范范围内。

### 3. 岩溶地区深孔孔斜控制的技术与措施研究

#### 3.1 孔斜控制的常规措施

常规措施是孔斜控制的基础, 侧重于通过成熟的钻具组合和规范操作来预防孔斜的发生。

##### 3.1.1 合理的钻具组合设计:

(1) 满眼钻具组合: 通过在钻铤部分安装多个与孔壁间隙极小的扶正器, 形成一个“刚性满眼”的底部钻具组合。这种组合能有效支撑孔壁, 限制钻具的弯曲和侧向移动, 适用于防斜要求高的较稳定地层。

(2) 钟摆钻具组合: 在钻头上方一定距离安装一个扶正器, 使下部未受支撑的钻铤像钟摆一样自然下垂, 从而对钻头产生一个使其回到井眼中心线的“钟摆力”。这种组合主要用于纠斜, 或在易斜地层中采用轻压吊打的方式进行防斜。

(3) 塔式钻具组合: 采用直径上大下小的钻铤组合, 通过降低组合重心来增加钻具的稳定性, 适用于倾角不大、软硬交错的地层。

##### 3.1.2 保证钻机安装质量与开孔精度:

钻机基础必须坚固、水平, 确保天车、转盘、孔口三者中心线在一条铅垂线上。使用高精度的测斜仪器在开孔阶段进行多次测量, 确保“开孔直”, 为全孔质量打下良好基础。

##### 3.1.3 强化钻具管理:

建立钻具台账, 定期检查、校直弯曲钻杆和钻铤, 杜绝使用磨损超标的扶正器。

#### 3.2 强化钻孔过程中的孔斜控制措施

根据《水工建筑物水泥灌浆施工技术规范》(SL/T62-2020)可知(见表1), 在规定区间内的任何深度的偏移距不超过该范围规定的最大偏移距即为合格。

表1 钻孔孔底允许偏距表

孔深/m	20	30	40	50	60	80	100
允许偏距/m	0.25	0.50	0.80	1.15	1.50	2.00	2.50

为了加强钻孔过程控制, 本项目采用多段线性插值的方法, 对上述允许偏距进行细化。

线性插值计算公式:

$$D_x = D_1 + \frac{(D_2 - D_1)}{(H_2 - H_1)} \times (H_x - H_1)$$

其中:

$D_x$ : 为目标孔深的允许最大偏距

$D_1$ : 为基准孔深的最大偏距

$\frac{(D_2 - D_1)}{(H_2 - H_1)}$ : 计算的是“每加深一米, 允许偏差增加多少”, 也就是变化率或斜率。

$(H_x - H_1)$ : 计算的是目标深度 $H_x$ 超过基准深度 $H_1$ 多少米。

根据表1可知, 不同深度范围偏距增加量不同, 因此, 需进行分段插值。细化后的参数不同于传统的以最大偏

差值为标准，而是不同深度对应的插值后的偏距判断标准（如表2），插值后的偏距表可灵活对应各种孔深。通过插值后的偏距表，对中间过程的孔斜控制更为细致严格，从而达到更好的控制孔斜的目的。

表2 分段线性插值后的孔底允许偏距示例表

输入任意孔深/m	5.23	10.11	18.6	30.2	55	80	92.3
对应允许偏距/m	0.07	0.13	0.23	0.51	1.33	2.00	2.31

3.3 钻进参数优化研究

钻进参数的优化是实现高效、低耗、高质量钻进的核心。本研究通过理论分析与现场试验相结合，寻求最优参数匹配。

(1) 钻压的优化：钻压是影响孔斜和效率最敏感的参数。试验表明，存在一个“临界钻压”。低于此值，钻进速度慢，经济性差；高于此值，钻具弯曲加剧，孔斜风险呈指数级增长。

(2) 转速的优化：高转速有助于提高破岩效率，但也会加剧钻具的离心振动和涡动，不利于孔壁稳定。在

坚硬、均质且完整的岩层中，可适当提高转速；在破碎、软硬不均或易斜地层中，应采用中低转速，以维持钻具和孔壁的稳定。

(3) 泵量的优化：泵量直接影响岩屑的携带和孔底清洁程度。泵量不足会导致岩屑在孔底重复破碎，并可能托压、憋泵，引起钻头瞬时侧滑；泵量过大会冲刷孔壁。优化的泵量应确保环空返速高于岩屑的沉降速度。

通过在不同地层及深度进行的钻进试验，得出如表3、4，不同钻头、不同地层的钻压、转速和泵量的建议范围值。

表3 金刚石钻头钻进参数 (XY-2)

工况	钻压(kN)	转速(rpm)	泵量(L/min)
开孔段(0-20m)	10-25	150-250	60-80
完整岩层段	30-50	300-500	80-100
破碎/裂隙带	15-30	200-300	60-80
穿越溶洞	10-20	150-250	视情况定

表4 牙轮钻头钻进参数 (XY-2)

工况	钻压(kN)	转速(rpm)	泵量(L/min)
开孔段(0-20m)	15-30	80-120	70-90
完整岩层段	40-70	120-200	90-120
破碎/裂隙带	20-40	80-120	70-90
穿越溶洞	15-25	60-100	视情况定

3.4 分级纠偏研究

针对钻孔过程中可能出现的不同程度的偏差，进行

分级处理，分级标准如表5，对不同等级提出不同的纠偏策略与措施，实行“一级一策”。

表5 金刚石钻头钻进参数 (XY-2)

偏斜等级	评判标准
一级偏斜	顶角变化率 > 0.2°/10m
二级偏斜	顶角变化率 > 0.5°/10m
三级偏斜	顶角已超设计值70%
极端偏斜	前三级纠偏措施无效的

(1) 一级纠偏: 发现孔斜趋势微增, 立即降低钻压20%~50%, 并适当降低转速, 观察2~3个回次, 看趋势是否得到遏制。

(2) 二级纠偏: 一级纠偏无效或孔斜率已超 $0.5^{\circ}/10\text{m}$ , 起钻, 换用“钟摆”钻具组合或带扶正器的满眼组合, 回到偏斜起始点上方3~5m处进行扫孔纠斜。

(3) 三级纠偏: 孔斜顶角超设计值70%, 采用螺杆钻具等定向钻进工具进行主动、强制纠偏。这是最有效但成本最高的手段。

(4) 极端情况处理: 因孔壁坍塌、溶洞等原因导致纠偏困难时, 需起钻对该孔段进行灌浆固结, 待凝后再重新扫孔钻进, 从根本上改变地层条件。

#### 4 工程应用效果分析

为验证上述技术与措施的有效性, 在陕西省某水利枢纽工程项目中的岩溶地区深孔段进行了工程应用。

##### 4.1 工艺流程实施

在岩溶地区深孔孔施工中, 严格遵循了以下工艺流程:

孔前策划: 根据邻孔资料和地质预告, 针对不同地层设计了不同的钻具组合

过程监控: 每钻进10米进行一次单点测斜, 在关键地层界面和孔深100米后加密至5米一次。实时监控机械钻速、泵压等参数变化。

动态优化: 根据测斜数据和钻进现象, 动态调整钻压和转速。

分级纠偏: 根据测斜数据, 严格按照“一级一策”, 及时进行纠偏处理。

##### 4.2 效果评估

通过应用综合控制措施, 该岩溶地区深孔钻孔孔斜控制取得了显著成效。该区域共计完成深孔485个, 其中最大孔深为170.46米, 最小孔深为103.27米, 钻孔最大偏距为2.03米, 最小偏距为0米, 平局偏距为0.56米。远优于 $\leq 2.5\text{m}$ 的设计要求。

#### 5 结论

实践证明, 将“常规措施保障、强化钻孔过程中的孔斜控制措施、钻进参数优化、分级纠偏决策”四者相结合的综合性孔斜控制技术体系, 能够有效应对复杂地层条件下的深孔孔斜问题, 在保证钻孔质量的前提下, 实现了技术可行性与经济合理性的统一, 具有广泛的推广应用价值。

#### 参考文献

- [1]高千园.浅谈深帷幕钻孔孔斜控制技术[C]//2021水利水电地基与基础工程技术创新与发展,2021:241-244.
- [2]杨小军,龙波,王勇,赵志勇.岩溶地区钻孔灌注桩孔斜处理施工技术研究[J]//四川水力发电,2021:41(5)49-53.
- [3]蔡盛业.论钻孔弯曲及其纠偏方法[J]//黄金科学技术,2004:12(3)35-38.
- [4]卢永兵.深孔帷幕灌浆钻孔施工的孔斜控制技术[J]//四川建材,2023:49(8) 123-125.