

斜井爆破扩挖断面成型质量影响因素与改进策略

周志龙 李江 姜凯 陈志忠 曹亚杰

新疆中岩恒泰爆破工程有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i2.8715

[摘要] 以新疆哈密抽水蓄能电站引水上、下斜井爆破扩挖工程为研究对象, 结合工程地质条件、施工参数与工艺特点, 明确斜井爆破扩挖断面成型质量的核心评价指标与工程要求, 从地质、设计、施工操作、现场管理、施工环境五方面分析质量影响因素, 通过专家打分与现场案例统计相结合的方式确定各因素权重, 针对性提出设计优化、工艺管控、参数动态调整等改进策略, 并制定半孔率低、超欠挖、开挖面不平整等典型质量问题的专项防治措施, 为同类花岗岩围岩斜井爆破扩挖工程的质量控制提供实操参考。

[关键词] 斜井爆破扩挖; 断面成型质量; 花岗岩围岩; 爆破参数; 质量管控

Factors Affecting and Improvement Strategies for the Quality of Section Formation in Blasting and Expanded Excavation of Inclined Shafts

Zhou Zhilong Li Jiang Jiang Kai Chen Zhizhong Cao Yajie

Xinjiang Zhongyan Hengtai Blasting Engineering Co., Ltd.

[Abstract] Taking the blasting and expansion excavation project of the upper and lower inclined shafts for water diversion at the Hami Pumped Storage Power Station in Xinjiang as the research object, this paper combines engineering geological conditions, construction parameters, and process characteristics to clarify the core evaluation indicators and engineering requirements for the quality of the blasting and expansion excavation section of the inclined shaft. It analyzes the quality influencing factors from five aspects: geology, design, construction operation, on-site management, and construction environment. By combining expert scoring and on-site case statistics, the weight of each factor is determined. Improvement strategies such as design optimization, process control, and dynamic parameter adjustment are proposed in a targeted manner. Special prevention and control measures for typical quality issues such as low half-hole rate, over-excavation and under-excavation, and uneven excavation surface are formulated, providing practical reference for quality control in similar blasting and expansion excavation projects of inclined shafts in granite surrounding rock.

[Key words] inclined shaft blasting and expansion excavation; section forming quality; granite surrounding rock; blasting parameters; quality control

引言

抽水蓄能电站输水系统中的斜井是连接上、下引水隧洞的关键结构, 其爆破扩挖的断面成型质量直接影响后续支护施工、工程结构稳定性、施工效率及后期机电设备安装。新疆哈密抽水蓄能电站引水上、下斜井为大直径陡坡花岗岩围岩斜井, 采用全断面爆破施工工艺, 施工过程中受多重因素影响, 易出现超欠挖、半孔率低、开挖面错台等质量问题。本文依托该工程实际, 系统分析断面成型质量的影响因素, 提出切实可行的改进策略与专项防治措施, 旨在提升斜井爆破扩挖施工质量, 保障工程顺利推进。

1. 工程概况

1.1 工程基本情况

新疆哈密抽水蓄能电站引水斜井包含引水隧洞 1#、2# 上

下斜井, 上弯段长度均为 20.38m, 垂直转弯半径 40m, 转弯角度 57.37° 。斜井段为连接上下弯段的直线段, 洞轴线与水平夹角 60° , 开挖断面为圆形, 初期支护净空断面直径 8m, 斜井段总长度 269.82m。本工程采用全断面爆破作业方式, 单次作业进尺 3m, 结合现场围岩条件共布置炮孔 105 个, 整体开挖断面面积 49.58 m^2 , 施工规划围绕全断面爆破工艺开展各工序衔接与现场管控。

1.2 工程地质与施工条件

引水上斜井为低~中等压力洞段, 上覆岩体厚度 209m~452m, 围岩以花岗岩为主, III₁类围岩占比 70%, II 类与 IV 类围岩合计占比 30%。岩体断裂构造以小断层及裂隙节理为主, 裂隙节理成组发育, 洞顶及右壁存在不稳定块体, 易出现局部掉块或小面积塌方。洞段后段地下水活动轻微, 以渗滴水为主。

施工布置分阶段实施，扩挖前 30m 沿斜井岩面设置步梯供人员通行，30m 后采用扩挖台车作为施工作业平台，人行爬梯作为应急逃生通道。导井已贯通，施工采用轴流风机压入式通风排烟方式，施工排水通过导井流至中平洞及引水支管后抽排出洞外。

2. 斜井爆破扩挖断面成型质量评价指标与工程要求

2.1 核心评价指标

斜井爆破扩挖断面成型质量的核心评价指标包含超欠挖控制、半孔率、开挖面平整度及围岩爆破裂隙四个方面。超欠挖控制以断面轮廓偏差为核心，要求开挖轮廓与设计轮廓偏差控制在合同范围内。半孔率是光面爆破的重要指标，直接反映围岩完整性，要求爆破后周边孔残留半孔数量达到规范标准。开挖面平整度要求掌子面无明显错台与起伏差，保持平顺性^[1]。

2.2 本工程断面成型质量具体要求

本工程针对花岗岩围岩及陡坡斜井施工特点制定质量要求，超欠挖控制采用短进尺、多循环施工方式，严格控制每一循环开挖偏差。光面爆破要求周边孔半孔率达标，保留岩体完整性，减少爆破对围岩的二次损伤。开挖面成型要求消除排炮间错台，控制岩面起伏差在允许范围，保证开挖面无明显爆破裂隙，防止因成型质量问题影响施工安全与工程整体质量。

3. 斜井爆破扩挖断面成型质量的主要影响因素分析

3.1 地质条件因素

围岩类别与岩体特性是断面成型质量的基础影响因素，不同类别围岩的爆破响应差异显著，对爆破参数适配性要求较高。不利结构面对爆破扰动响应明显，洞顶及右壁不稳定块体在爆破振动下易掉块，小断层与裂隙节理会导致爆破能量分布不均，引发局部超挖或欠挖。地下水的轻微活动会使炮孔壁泥化，降低装药与堵塞密实度，同时改变岩体物理特性，影响爆破效果均匀性。

3.2 爆破设计参数因素

炮孔布置参数的合理性直接影响爆破效果，周边孔孔距、排距与围岩特性不匹配易导致半孔率低、开挖面不平整。装药结构与装药量把控不当会降低光面爆破效果，炸药单耗与单孔

装药量偏差会造成爆破能量过大或不足，引发超挖或欠挖。爆破网络分段延时参数设置不合理，会导致爆破能量叠加或分散，影响开挖面平顺性。结合本工程花岗岩围岩特性、开挖断面尺寸及炸药单耗等核心参数，最小抵抗线与爆破作用指数需通过现场试爆试验确定合理取值，若未结合现场实际精准测算，盲目设定参数，会导致爆破能量作用方向偏差，引发局部成型质量问题。

3.3 施工操作工艺因素

钻孔角度偏差、孔深与孔径精度不足会导致炮孔布置与设计不符，使爆破能量分布不均。钻孔验收流程执行不到位，不合格炮孔未及时处理，会直接影响后续爆破效果。炮孔堵塞长度不足、炮泥质量差或堵塞不密实，易出现冲炮现象，造成爆破能量泄漏。起爆网路连接不牢固、网路检测不到位，会导致网路导通故障，出现盲炮，影响爆破均匀性^[2]。

3.4 现场施工管理因素

作业人员未持证上岗、专业技能不足，会导致施工操作不规范。技术交底与培训落实不到位，作业人员对施工要求不明确，易出现操作偏差。测量放线偏差大、控制点保护不当，会导致炮孔布置定位不准，各工序衔接不紧密会影响整体施工质量。爆破后未及时开展效果分析与参数优化，会导致后续施工重复出现同类质量问题。

3.5 施工环境与设施因素

斜井 60° 夹角造成施工空间受限，作业平台操作空间不足会降低钻孔、装药的施工精度。自然排烟的局限性使炮烟与粉尘遮挡视线，影响作业人员操作状态与施工精度。YT-28 钻孔设备未及时维护会导致精度下降，台车作业平台稳定性不足会在施工中出现晃动，影响炮孔布置与装药施工的准确性。

4. 斜井爆破扩挖断面成型质量影响因素权重分析

为精准识别断面成型质量的关键控制因素，本工程结合施工实际筛选出 5 类核心因素及 12 项子因素，采用专家打分法与现场实际案例统计法相结合的方式权重分析，综合计算各因素权重并划分影响程度等级，具体结果见表 1。

表 1 斜井爆破扩挖断面成型质量影响因素权重分析

因素类别	具体影响因素	专家打分权重	现场案例占比	综合权重	影响程度等级
地质条件	围岩节理裂隙发育	0.18	0.20	0.19	高
	不利结构面分布	0.12	0.11	0.115	中
爆破设计	周边孔孔距/排距设计	0.15	0.16	0.155	高
	装药结构与装药量	0.14	0.15	0.145	高
	起爆网络延时参数	0.08	0.07	0.075	低
施工操作	钻孔角度/孔径精度	0.17	0.18	0.175	高
	炮孔堵塞质量	0.09	0.08	0.085	低
	起爆网路连接质量	0.06	0.05	0.055	低
施工管理	测量放线与控制点保护	0.13	0.14	0.135	高
	钻孔验收与整改	0.09	0.08	0.085	低
	斜井空间操作限制	0.07	0.06	0.065	低
	通风排烟条件	0.06	0.05	0.055	低

通过权重分析可明确，围岩节理裂隙发育、钻孔角度与孔位精度、周边孔孔距与排距设计、装药结构与装药量、测量放线与控制点保护为综合权重排名前五的核心影响因素，是本工程质量控制的重点。

5. 提升斜井爆破扩挖断面成型质量的改进策略

5.1 基于地质条件的爆破设计优化策略

针对不同类别围岩特性动态调整爆破参数，对 III₁ 类围岩优化孔距与排距，II 类围岩适当加大孔距并提高单孔装药量，IV 类围岩减小孔距、降低装药量。对洞顶、右壁等不利结构面区域，减小周边孔孔距，降低装药量，增设缓冲孔分散爆破能量。结合花岗岩围岩物理特性，根据岩体裂隙发育情况调整周边孔间隔装药的线装药密度，裂隙发育区域适当降低线装药密度，减少爆破对围岩的损伤。

5.2 施工操作工艺精细化管控策略

推行样板孔引路制度，由熟练工人负责周边孔与掏槽孔施工，全程严控钻孔精度。钻孔完成后用高压风吹净炮孔，由质检人员检查孔深、孔距、角度等参数，对不合格炮孔及时处理。实现装药与填塞作业标准化，周边孔借助竹片控制装药位置与密度，严格按设计控制填塞长度，采用高质量炮泥分层夯实。数码电子雷管在装入炮孔前应进行单发检测，确保通讯信号正常。数码电子雷管与母线卡接后逐点检查，待人员全部撤离后，在地面安全地点进行网路导通检测^[3]。

5.3 爆破参数动态优化策略

爆破后由专业人员联合检查，对残孔率、开挖面平整度等指标记录分析。基于检测结果及时调整爆破参数，半孔率低则优化周边孔孔距与线装药密度，存在超欠挖则调整单孔装药量与延时参数。借鉴邻近洞室同类花岗岩围岩的爆破成果，结合本工程斜井施工特点验证并优化爆破参数，形成适配本工程的参数体系。

5.4 施工管理体系完善策略

严格执行持证上岗制度，对作业人员开展技能培训与质量教育，每次作业前进行详细技术交底。测量放线前复核控制网，将导线精准引入井壁，对控制点采取防护措施。对钻孔、验收、装药等工序实行专人负责制，建立全程质量追溯体系。爆破后采用挖机排险结合人工清撬的方式清除浮石，及时测量断面轮廓，将结果反馈给技术人员作为参数调整依据^[4]。

5.5 施工环境与设施保障策略

根据斜井施工特点调整扩挖台车作业平台，合理规划操作空间，增设操作辅助设施。采用自然排烟与轴流风机供风相结合的方式，爆破后及时洒水除尘，改善作业环境。制定 YT-28 钻孔设备、测量仪器的定期维护与校准制度，及时更换磨损部件，确保设备精度与稳定性。

6. 典型质量问题专项防治措施

6.1 半孔率低的专项防治

施工前由专业人员校核控制点，严格按设计进行洞身放线。根据钻进速度与岩粉性状分析岩性变化，及时调整周边孔线装药密度。采用短钻杆开孔，在已钻好的孔内插入导向杆，严控钻杆倾角与倾向，避免钻孔角度偏差，提升光面爆破效果。

6.2 超欠挖的专项防治

坚持短进尺、多循环的施工原则，减小单次爆破的进尺与装药量，降低爆破振动对围岩的扰动，减少因爆破能量过大引发的超挖问题。严格控制周边孔的间距与钻孔方向，根据围岩特性合理确定周边孔间距，采用导向杆引导钻孔，提升钻孔精度，确保爆破后断面轮廓与设计相符。装药前仔细清除孔口岩粉，取出孔口保护装置并检查钻孔深度，根据实际孔深调整装药量，保证装药到位^[5]。

6.3 开挖面不平整、错台的专项防治

加强钻孔过程中的角度控制，专人检查钻杆的倾角与倾向，重点把控光爆孔拐点处的钻孔角度，确保周边孔的钻孔方向一致，提升开挖面的平顺性。针对不同围岩与地质条件及时调整爆破方案，在断层带等岩体破碎区域，减小周边孔孔距、降低装药量，增设缓冲孔，开挖后及时对掌子面进行封闭与初期支护，防止局部坍塌。严格控制排炮间的施工衔接，在上一循环爆破完成后，及时复核断面轮廓，对出现的微小错台与起伏差及时处理，在地质情况较差的区域采取超前锚杆支护，结合短进尺、弱爆破的方式，保证开挖面的成型质量。

结束语：

新疆哈密抽水蓄能电站引水上、下斜井爆破扩挖工程受地质、设计、施工等多因素综合影响，断面成型质量控制难度较大。通过工程分析，明确围岩节理裂隙发育、钻孔精度、爆破参数设计等为核心影响因素。基于此提出的设计优化、工艺管控、参数动态调整等策略，以及针对半孔率低、超欠挖等典型问题的专项防治措施，可从设计、施工、管理全流程提升断面成型质量。本工程的质量控制思路结合了花岗岩围岩陡坡斜井的施工特点，其实操性强的管控措施可为同类抽水蓄能电站斜井爆破扩挖工程提供有益借鉴，后续可结合现场监测数据进一步优化爆破参数，推动斜井爆破施工技术提升。

【参考文献】

- [1] 裴继承. 煤矿轨道暗斜井巷道光面爆破技术研究[J]. 能源技术与管理, 2025, 50 (06): 131-134.
- [2] 宋娟娟, 赵少强, 张远松. 深埋隧道竖井围岩断面爆破开挖施工技术研究[J]. 交通世界, 2024, (31): 130-133.
- [3] 郑恒伟, 孔德晖. 隧道斜井进洞施工技术要点探讨[J]. 工程技术研究, 2024, 9 (11): 47-49.
- [4] 马宝龙. 高地应力隧道爆破裂纹扩展机理与能量调控方法研究[D]. 沈阳工业大学, 2024.
- [5] 辛志军. 大断面通风斜井爆破施工对邻近隧道振动特性的影响[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53 (09): 47-52+83.