

工程勘察中钻孔取芯技术的质量控制关键点分析

孔令琼

中国煤炭地质总局一一九勘探队 河北 邯郸 056000

【摘要】：针对工程勘察中钻孔取芯技术存在的岩芯完整性保护、样品管理及质量评价等难题，结合灵北矿井井筒检查孔工程实践，系统分析钻孔取芯全流程的质量控制关键点。研究表明，取芯前的设备调试与孔位校准、取芯过程中的回次进尺控制与岩芯实时整理、取芯后的样品运输保护与测试管理是影响勘察质量的关键环节。通过优化取芯工艺参数、建立标准化样品管理流程，灵北矿井3个井检孔岩芯采取率达84%-89%，样品测试数据可靠性提升30%，单孔质量综合评级均为甲级。研究成果为煤炭资源勘查及井筒设计提供了可复制的质量控制方案，对提升复杂地质条件下钻孔取芯精度具有重要工程价值。

【关键词】：工程勘察；钻孔取芯；质量控制；岩芯采取率；样品管理

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.021

引言

钻孔取芯作为工程勘察获取地下岩土层物理力学参数的核心技术，其质量直接影响井筒设计、围岩稳定性评估及开采技术条件分析。在煤炭资源勘查中，岩芯的完整性、采取率及样品测试精度是判断地层岩性、煤层特征及水文地质条件的关键依据。然而，当前钻孔取芯存在取芯工艺参数不合理、岩芯运输破损率高、质量评价标准执行不统一等问题。以灵北矿井井筒检查孔工程为例，3个井检孔在样品运输中发生20%的岩芯破碎，导致岩石物理力学测试数据偏差达15%。因此，系统分析钻孔取芯技术的质量控制关键点，对提升勘察数据可靠性具有重要意义。

1 项目背景

灵北矿井作为国家灵台矿区规划的七大井田之一，位于甘肃省平凉市东南部，行政区划属灵台县独店镇、梁河乡，井田面积103.569km²，设计生产能力4.00Mt/a，采用立井开拓方案，建设主立井、副立井和回风立井三个井筒。根据《煤矿安全规程》（2022修正）及《灵台矿区总体规划》（发改能源〔2015〕1840号）要求，井筒设计前需在拟建井筒附近10~25m范围内施工与落底深度相当的检查孔，以查明地层岩性、构造特征及水文地质条件，为井筒结构设计和施工安全提供依据。

1.1 地质情况

该项目地处黄土高原与陇南山地过渡带，地层条件复杂，新生界松散层与侏罗系、白垩系基岩交互分布，煤层埋深达1000m以上，且存在多个含水层（如环河组、洛河组）和可采煤层（煤5-2、煤6-2等）。2022年甘肃永润煤基新材料集团有限公司中标该区块后，需通过3个井筒检查孔（J1、J2、J3）获取精准地质数据，然而复杂地层条件对钻孔取芯的完整性和测试精度提出了极高要求。

1.2 研究意义

在前期勘查中发现，传统取芯工艺在第四系松散层取芯率仅60%~70%，煤芯运输破损率达20%，导致岩石力学参数偏

差超过15%，严重影响井筒支护设计的可靠性。因此，针对灵北矿井特殊地质条件，系统分析钻孔取芯技术的质量控制关键点，对保障4.00Mt/a产能规模的井筒安全建设、避免突水、片帮等工程事故具有重要工程意义，同时为同类深埋藏、复杂地层条件下的煤炭资源勘查提供技术参考。

2 钻孔取芯技术流程与质量控制体系

2.1 技术流程与核心目标

2.1.1 全流程工艺分解

钻孔取芯技术遵循“勘察目标导向-地层特性适配-质量指标控制”原则，其标准化流程可细分为7个核心工序。采用TrimbleRTK-GPS系统进行孔位放样，平面误差控制在±10cm内，高程误差±5cm，同步采集地表高程、坡度等微地形数据，为钻机基础设计提供依据。灵北矿井3个井检孔实际定位偏差均<8cm，满足《煤炭勘查钻孔测量规范》（MT/T894-2000）要求。以井筒中心为基准，按10~25m半径范围布置检查孔，采用全站仪复测孔位间距，确保J1、J2、J3孔与井筒中心距离误差<15cm，构建三维坐标控制网。

2.1.2 设备调试与工艺参数预设

针对1000m深孔钻探，选用ZJ-1500型转盘式钻机，配备液压给进系统（精度±0.5kN）、泥浆循环装置（排量50~150L/min可调），钻头根据地层特性配置。第四系松散层Φ168mm合金三翼钻头+1.5m岩芯管（内壁衬聚氨酯防粘层）；侏罗系基岩Φ127mm金刚石取芯钻头+1.0m双层岩芯管（内管带球阀防漏结构）。制备不同性能护壁泥浆，松散层采用膨润土泥浆（密度1.1~1.2g/cm³，粘度18~22s），基岩段改用清水钻进，遇裂隙发育带切换为聚丙烯酰胺泥浆（浓度0.3%~0.5%），灵北矿井通过泥浆优化使塌孔率从12%降至3%。

2.1.3 钻进取芯与回次管理

采用“三速三段”钻进工艺，开孔段（0~50m）转速60~80r/min，钻压5~8kN，回次进尺≤0.3m，确保孔口稳定；基岩段（50~950m）转速80~120r/min，钻压10~15kN，回次进尺

0.5~1.0m, 兼顾效率与芯样完整性; 煤层段 (目标层位±10m) 转速 50~70r/min, 钻压 8~10kN, 回次进尺≤0.5m, 采用薄壁取芯管 (壁厚 3mm) 减少煤层挤压破损。实时参数监控通过钻机 PLC 系统实时记录转速、钻压、泥浆流量等 12 项参数, 灵北矿井 J2 孔在直罗组砂岩段因钻压波动超限 (>15kN) 导致芯样破碎率升高, 经自动预警后调整钻压至 12kN, 破碎率从 25% 降至 12%。

2.1.4 样品运输与预处理

采用泡沫塑料分隔包装, 层间填充弹性海绵, 箱体侧面设置减震气囊 (压力≤5kPa); 单独放入 PVC 密封管 (内壁涂防氧化涂层), 充入氮气 (纯度≥99.9%) 后热缩封装, 灵北矿井煤样运输破损率从 20% 降至 4%。运输箱内置温湿度记录仪 (精度±0.5℃、±2%RH), 确保温度 20±2℃、湿度 55%~65%, 避免泥岩遇水膨胀、煤芯氧化变质。

2.1.5 实验室测试分析

岩石样品按 GB/T50266 加工为Φ50×100mm 标准试件, 采用 WAW-1000kN 电液伺服试验机测试抗压强度、弹性模量, 每组样品测试 3 个平行件, 变异系数>10%时追加测试; 使用 5E-MAG6600 全自动工业分析仪测定水分、灰分、挥发分, 采用库仑测硫仪检测全硫含量, 重复测试误差>5%时启动样品溯源。针对灵北矿井高瓦斯煤层, 采用直接法测定瓦斯含量 (GB/T23250-2009), 测试前对煤芯进行真空脱气处理, 确保解吸率>95%。

2.1.6 质量评价与报告编制

依据 MT/T1042-2007 进行单孔质量评级, 全孔≥80%, 煤层≥90% (灵北矿井 3 孔均达甲级); 终孔顶角≤1° (J1 孔 0.8°、J2 孔 0.9°、J3 孔 0.9°); 岩石力学测试合格率≥90%, 煤质化验数据重复性误差≤5%。编制《钻孔取芯成果报告》, 包含地层柱状图、岩芯照片集、测试数据附表, 灵北矿井报告中附 3 孔岩芯数码照片 2000 余张, 建立三维地质模型精度达 0.5m。

2.2 核心质量目标量化体系

钻孔取芯技术的核心目标围绕“完整性、代表性、精确性”构建三级指标体系 (表 1), 其中通过取芯工艺优化实现全孔采取率≥80%, 煤层段≥90%, 灵北矿井基岩段采取率 84%~89%, 优于行业标准 10%; 控制岩芯裂纹率≤15%、破碎段占比≤20%, 确保测试样品能真实反映地层原状结构; 岩石力学参数变异系数≤10%、煤质化验误差≤5%, 为井筒设计提供可靠数据支撑。

表 1 核心质量目标对比表

目标维度	核心指标	行业标准	灵北矿井实施效果	控制手段
完整性	全孔岩芯采取率	≥80%	84%~89%	分层钻进+回次优化

	煤层段采取率	≥90%	91%~94%	薄壁取芯管+低钻压工艺
代表性	岩芯裂纹率	≤20%	12%~15%	泥浆护壁+减震运输
	破碎段 (<10cm) 占比	≤30%	18%~20%	实时裂隙标记+定向取芯
精确性	岩石力学参数变异系数	≤15%	8%~10%	平行试验+数据回溯
	煤质化验重复性误差	≤10%	3%~5%	真空封装+恒温运输

通过对灵北矿井 3 个井检孔 (累计钻探 3185.89m) 的施工过程跟踪, 运用 PDCA 循环法对 127 项作业记录进行分析, 识别出 4 个关键控制环节, 其影响权重分别为: 取芯前准备 (35%)、钻进过程控制 (30%)、样品管理 (25%)、质量检验 (10%)。

2.2.1 取芯前准备阶段

初期因钻机稳定性差 (振动幅度>5mm/s) 导致 J1 孔前 100m 取芯率仅 72%, 经增加地锚数量 (从 4 个增至 8 个)、铺设 10cm 厚混凝土基础后, 振动幅度降至 2mm/s, 取芯率提升至 85%; 传统取芯依赖操作手经验设定钻压 (平均 15kN), 导致基岩芯样破碎率达 25%, 通过引入 PLC 智能控制系统, 实现钻压自动匹配 (砂岩段 12kN、泥岩段 8kN), 破碎率降至 15%。

2.2.2 钻进过程控制阶段

第四系松散层采用 1.0m 长回次时, 取芯率仅 55%, 调整为 0.3m 短回次后提升至 68%; 环河组含水层段因泥浆密度不足 (1.1g/cm³) 发生塌孔, 实时监测泥浆密度并提升至 1.2g/cm³ 后, 塌孔事故归零。

2.2.3 样品管理阶段

煤芯未封装导致 J1 孔 5-2 煤层挥发分测试值偏差 12%, 采用充氮密封管后误差降至 3%; 岩石样品加工精度不足 (直径偏差>2mm) 导致抗压强度测试变异系数达 18%, 引入自动切割机 (精度±0.5mm) 后降至 8%。

2.2.4 质量检验阶段

初期未分层计算采取率, 导致松散层取芯不足问题被掩盖, 建立新生界与基岩段分别评价机制后, 针对性优化第四系取芯工艺; 测试数据与岩芯编号对应混乱, 开发“孔深-芯号-数据”关联管理系统后, 问题样品追溯时间从 4 小时缩短至 15 分钟。

3 质量控制关键点分析

3.1 取芯前准备：设备与工艺的系统性校准

3.1.1 孔位测量与设备调试

采用 RTK-GPS 定位系统，确保孔位坐标误差 $\leq 0.1\text{m}$ ，高程误差 $\leq 0.05\text{m}$ 。灵北矿井 3 个井检孔实际坐标与设计偏差均 $< 5\text{cm}$ ，满足《煤炭勘查钻孔测量规范》要求。安装前平整场地至坡度 $< 3^\circ$ ，采用地锚固定钻机，确保钻进时机身振动幅度 $< 2\text{mm/s}$ 。J3 孔因初期钻机稳定性不足，前 50m 取芯率仅 72%，经加固后提升至 85%。

3.1.2 取芯工具选型与参数预设

第四系松散层采用 $\Phi 168\text{mm}$ 合金钻头(取芯管长度 1.5m)，基岩段改用 $\Phi 127\text{mm}$ 金刚石钻头(取芯管长度 1.0m)，解决松散层塌孔与基岩芯样破碎问题。根据地层硬度调整钻进参数，如侏罗系砂岩段控制转速 80~100r/min、钻压 8~10kN、回次进尺 $\leq 0.5\text{m}$ ，避免因进尺过快导致岩芯断裂。灵北矿井基岩段取芯率达 84%~89%，优于行业平均水平(75%)。

3.2 钻进过程控制回次管理与实时判别

3.2.1 回次进尺与压力动态调整

新生界土层采用短回次(0.3~0.5m)、低钻压(5~7kN)，避免泥浆冲刷破坏结构；基岩段长回次(0.5~1.0m)、高钻压(10~15kN)，确保岩芯完整进入取芯管。J1 孔第四系取芯率 63%，基岩段提升至 89%，验证了分层策略的有效性。遇裂隙发育带时，立即降低转速至 50r/min，注入护壁泥浆(膨润土含量 8%)，如 J2 孔在直罗组裂隙段通过该措施，岩芯破碎率从 35%降至 18%。

3.2.2 岩芯实时整理与初步鉴定

取出岩芯后立即清洗表面泥浆，按顺序摆放于岩芯箱(隔间 5cm)，标注深度、层位及破碎情况。灵北矿井采用二维码标签实时录入岩芯信息，减少人为记录误差。现场测定岩芯长度、直径、湿度，计算初步采取率，如发现某回次采取率 $< 70\%$ ，立即复钻补芯。J3 孔通过补芯措施，全孔取芯率从 82%提升至 85%。

3.3 样品管理运输保护与测试前处理

3.3.1 岩芯包装与运输控制

采用泡沫塑料分隔包装，易碎段(如煤层、泥岩)额外包裹弹性海绵，灵北矿井运输破损率从初期 20%降至 5%。配备恒温恒湿运输箱(温度 $20\pm 2^\circ\text{C}$ ，湿度 $60\pm 5\%$)，避免煤芯氧化风化。J1 孔煤样在运输中因湿度控制不足导致挥发分测试偏差 10%，改进后误差 $< 3\%$ 。

3.3.2 实验室测试质量控制

岩石力学样品按 GB/T50266《工程岩体试验方法标准》加工，直径 $50\pm 2\text{mm}$ 、高径比 2:1，灵北矿井制备合格率达 95%。

每个岩样测试 3 组平行样，取平均值作为结果，如 J2 孔砂岩抗压强度测试变异系数从 12%降至 8%，满足规范要求。

3.4 质量检验与评价

3.4.1 采取率计算与分级

按《煤炭地质勘查钻孔质量标准》，新生界与基岩段分别计算采取率，灵北矿井 3 个孔新生界采取率 63%~76%，基岩段 84%~89%，均达甲级标准(表 2)。

表 2 灵北矿井井检孔岩芯采取率统计

孔号	新生界厚度/m	芯长/m	采取率/%	基岩厚度/m	芯长/m	采取率/%	综合评级
J1	11.10	7.00	63	1047.38	934	89	甲级
J2	7.90	5.20	66	1054.68	881.76	84	甲级
J3	9.70	7.40	76	1055.13	893.50	85	甲级

3.4.2 完整性与测试数据关联性

采用岩石质量指标(RQD)评价岩芯完整性，灵北矿井基岩段 RQD 值 0.40~0.85，与饱和抗压强度(15~60MPa)呈正相关($R^2=0.78$)，表明完整性直接影响力学参数可靠性。建立“钻孔深度-岩芯编号-测试数据”关联表，如 J1 孔煤 5-2 层岩芯采取率 92%，其挥发分测试值 34.06%与邻孔偏差 $< 5\%$ ，数据可信度高。

3.5 工程实例控制实施效果

通过分层钻进与回次控制，基岩段取芯率提升 12%，煤层取芯率达 90%以上(表 3)，满足井筒设计对煤层参数的精度要求。运输破损率降至 5%，煤样挥发分、全硫等指标测试误差 $< 3\%$ ，岩石力学参数合格率从 75%提升至 92%。

表 3 煤层取芯率与测试数据对比

煤层编号	孔号	取芯率/%	挥发分 Vdaf/%	全硫 St.d/%	抗压强度 /MPa
5-2	J1	92	34.06	1.01	32.5
	J2	94	33.41	0.65	35.2
6-2	J3	91	32.00	0.43	38.7

第四系采取率 63%~76%，低于基岩段，需研发新型护壁泥浆(如高分子聚合物泥浆)提升松散层稳定性。岩芯整理仍依赖人工，计划引入机器视觉系统自动识别岩芯破损与层位，预计效率提升 40%。

4 结论

钻孔取芯质量控制需构建“事前校准-事中控制-事后回溯”全流程体系，重点把控设备调试、回次管理、样品运输等 7 个

关键节点：分层钻进工艺与岩芯实时整理显著提升采取率，灵宝矿井基岩段取芯率达 84%~89%，高于行业平均水平；标准化样品管理降低测试误差，煤质化验数据重复性误差从 10%降至 3%，岩石力学参数合格率提升 17%。未来可开发智能化取芯设备，集成压力传感器与高清摄像头，实现钻进参数自动调

节与岩芯状态实时监控；建立基于区块链的样品溯源系统，确保从取芯到测试全流程数据不可篡改，提升勘察数据公信力；研究复杂地层取芯技术，突破现有质量控制瓶颈，拓展钻孔取芯应用场景。

参考文献：

- [1] 吴明哲,晋凤明,肖周,等.水利工程勘察资料基于地理信息系统的新式数字化应用探讨[J/OL].水利水电技术(中英文),1-8[2025-06-30].
- [2] 路浩,李龙.某高层建筑岩土工程勘察实例分析与评价[J].安徽建筑,2025,32(05):139-141.
- [3] 李世权.智能技术在岩土工程勘察中的应用探究[J].智能建筑与智慧城市,2025,(04):168-170.
- [4] 赵亮,谢朝俊,张霖,等.数据挖掘与融合技术在岩土工程勘察中的应用探讨[J].地下水,2025,47(02):248-252.
- [5] 张世殊.水利水电深部工程地质勘察技术现状与发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2025,44(06):1377-1404.