

双管定向钻机在新庄煤矿中软煤层塌孔治理中的应用研究

赵 飞

河南神火煤电股份有限公司新庄煤矿 河南 永城 476600

【摘要】：为解决新庄煤矿中软煤层钻孔施工中频繁出现的塌孔问题，提升钻孔成孔率与稳定性，保障瓦斯抽采等后续工程顺利开展，本研究引入定向钻机技术，结合矿井中软煤层地质特征，系统分析塌孔成因，优化钻机选型与施工工艺，开展现场应用试验。结果表明，选用 ZYL-7000DS(A) 煤矿用履带式全液压双管定向钻机配合钻冲护一体化工艺，能有效控制中软煤层塌孔现象，试验钻孔平均成孔率提升至 92 以上，最长稳定抽采时间超 400 天，单孔累计抽采瓦斯量显著增加。该技术的成功应用为新庄煤矿及同类矿区中软煤层塌孔治理提供了可靠技术方案，具有较高的推广价值。

【关键词】：定向钻机；新庄煤矿；中软煤层；塌孔治理；瓦斯抽采

DOI:10.12417/2705-0998.26.01.087

1 引言

煤炭作为我国主要能源，其高效安全开采直接关系到能源供应稳定。新庄煤矿作为区域重要煤炭生产基地，主采煤层部分区域为中软煤层，该类煤层具有强度低裂隙发育透气性差等特点。在矿井瓦斯抽采、地质探查等工程的钻孔施工中，塌孔问题频发，不仅导致钻孔报废率高施工成本增加，还严重影响后续工程进度，甚至引发瓦斯泄漏等安全隐患。传统钻孔施工多采用普通钻机，搭配常规泥浆护壁工艺，但在中软煤层中适应性较差。随着定向钻进技术的发展，其精准控向、高效钻进及配套护孔工艺的优势逐渐显现。国内外学者针对软煤层钻进技术开展了大量研究，提出了“钻冲护”一体化、同心环加固密封等技术方案，为中软煤层塌孔治理提供了理论与技术参考。本研究基于新庄煤矿中软煤层具体地质条件，开展定向钻机在塌孔治理中的应用研究，旨在解决现场施工难题，提升矿井安全生产水平。

2 新庄煤矿中软煤层地质特征及塌孔成因分析

2.1 中软煤层地质特征

新庄煤矿核定生产能力为 180 万吨每年，目前主采二 2、三 2 煤层，其中矿井东北部区域为中软煤层发育区，该区域煤层平均厚度 2.7 米，埋深 380 至 900 米。煤层呈灰黑色条带状结构，以亮煤为主，内生裂隙与外生裂隙均较发育，煤体坚固性系数 f 值介于 0.3 至 0.8 之间，属于典型中软煤层。该区域煤层直接顶为泥岩，厚度 0 至 4.8 米，含大量炭屑与煤纹，稳定性较差；基本顶为粗砂岩，厚度 8 至 12 米，稳定性较好；直接底为泥岩，厚度 2.1 至 3.5 米，遇水易软化膨胀。煤层倾角普遍为 4 至 11 度，局部地段存在小型断层与褶皱构造，地层应力分布不均，进一步加剧了煤层的破碎程度。

通过现场实测，中软煤层区域瓦斯压力介于 0.8 至 1.13 兆帕之间，瓦斯含量较高，钻孔施工过程中易出现喷孔现象，进一步破坏孔壁稳定性。

2.2 塌孔成因分析

结合新庄煤矿中软煤层地质特征，通过现场施工数据统计与理论分析，确定塌孔成因主要包括以下四个方面。

2.2.1 煤层自身力学特性差

中软煤层核心问题在于煤体本身强度不足，新庄煤矿二 2 煤层中软区域煤体坚固性系数 f 值仅 0.3 至 0.8，且内生裂隙与外生裂隙交织发育，煤体整体性差。钻孔施工时，钻杆的旋转切削与轴向推进产生的机械扰动，会直接破坏煤体原有松散结构，导致孔壁周围煤体失去承载能力。尤其在裂隙密集区域，煤体多呈碎块状或粉末状，钻孔成型后无法形成稳定孔壁，极易在自身重力作用下发生坍塌。

2.2.2 地层应力与瓦斯压力协同作用

该区域煤层埋深达 380 至 900 米，随着埋深增加，地层垂直应力与水平应力显著提升，钻孔施工后，孔壁煤体失去原始地层的侧向支撑，在应力差作用下易发生塑性变形甚至坍塌。同时，区域内瓦斯压力介于 0.8 至 1.13 兆帕，高压瓦斯会在煤体裂隙中形成向外的膨胀推力，一方面加剧孔壁煤体的破碎程度，另一方面可能引发喷孔现象，高压气流携带煤块冲击孔壁，进一步破坏孔壁稳定性，严重时会导致塌孔与喷孔同步发生。

2.2.3 传统施工工艺适配性差

传统施工采用的普通钻机缺乏精准控向功能，钻进过程中钻杆摆动幅度大，对孔壁的扰动强度远超定向钻机。更关键的是，常规泥浆护壁工艺难以适配破碎煤体，泥浆黏度与失水量控制不合理，无法在孔壁表面快速形成致密稳定的泥皮。这不仅无法隔绝钻井液水分侵入，还会导致直接底泥岩遇水软化膨胀，向上挤压孔壁；同时，瓦斯易穿透松散泥皮侵蚀孔壁，最终引发孔底或孔身坍塌。

2.2.4 施工操作规范性不足

部分施工人员未充分掌握中软煤层钻进特性，仍沿用硬煤层施工参数，推进压力与转速过大，进一步加剧了对孔壁的机

械扰动。此外，退钻过程中操作不当，退钻速度过快且未及时采取临时护孔措施，导致孔壁失去钻杆的临时支撑后，短时间内无法稳定，最终引发坍塌。同时，钻孔施工前对钻场地质条件勘察不细致，未针对断层、褶皱等特殊构造调整施工方案，也是诱发塌孔的重要操作因素。

3 定向钻机选型及治理技术方案

3.1 定向钻机选型

结合新庄煤矿中软煤层地质条件与施工需求，经多方调研与技术论证，选用 ZYL-7000DS(A) 煤矿用履带式全液压双管定向钻机作为核心施工装备。该钻机由陕西太合研发，双管钻进的护孔设计可应对破碎顶板，将成孔率提升至 75% 以上，太合钻机在类似矿区（如淮南潘三矿）已验证成功，钻孔深度突破 300 米，瓦斯抽采效率提升 3 - 4 倍。其双管钻机的动力头额定扭矩（套管头 7000 N·m、钻杆头 4500 N·m）适配新庄煤矿中硬煤层参数。采用内通缆钻杆+外高强扩孔钻杆“双管”双动力同时钻进，外高强扩孔钻杆护孔，主要针对破碎、坍塌、水敏等地质层钻进。遥控自动上杆机构能进行通缆钻杆和外高强扩孔钻杆的装、卸操作，降低人员的劳动强度。进给推力与起拔力不小于 200KN，有利于处理孔内特殊情况。钻机操作集中，操纵灵活可靠，有效地提高了工作效率。

3.2 治理技术方案设计

针对新庄煤矿中软煤层塌孔成因，结合定向钻机技术特点，设计“钻冲护”一体化治理技术方案，实现钻进增透护孔同步开展，提升钻孔稳定性。方案核心分为钻进工艺优化水力冲孔增透护孔工艺强化及钻井液体系改良四个关键环节，各环节协同配合形成完整治理体系。

3.2.1 钻进工艺优化

采用滑动钻进与复合钻进相结合的分段钻进模式，适配不同地层特性。开孔阶段及穿过不稳定顶板泥岩时，采用复合钻进模式，利用钻杆旋转与推进协同作用保障钻孔垂直度，避免开孔偏差过大。进入中软煤层核心区域后，立即切换为滑动钻进模式，通过精准调整工具面角度控制钻孔轨迹，最大限度减少钻杆旋转对破碎煤体孔壁的扰动。基于随钻测量系统实时反馈的岩性数据与轨迹偏差，动态调整钻进参数。针对中软煤层特性，将推进压力严格控制在 8 至 12 兆帕，转速调节至 30 至 50 转每分钟，钻进速度稳定在 0.8 至 1.2 米每分钟。通过参数精细化控制，避免因推进压力过大造成煤体压裂，或转速过高加剧孔壁磨损，确保钻进过程平稳。

3.2.2 水力冲孔增透

在钻进过程中间歇开展水力冲孔作业，形成“钻进-冲孔-再钻进”的循环模式，实现增透与卸压双重目标。选用额定压力 25 兆帕的高压柱塞泵作为动力源，根据煤层破碎程度动态调整冲孔压力，常规区域控制在 15 至 20 兆帕，断层破碎带区

域适当降至 12 至 15 兆帕，防止高压冲击过度破坏孔壁。冲孔作业通过钻杆内孔将高压水输送至孔底特制喷头，利用高压水流冲击破碎孔壁周围应力集中的煤体，形成径向卸压通道，降低煤层原始应力与瓦斯压力。为避免过量冲孔导致孔壁失稳，严格控制单段冲孔冲出煤量，每段冲孔长度不超过 10 米，冲出煤量不超过 1.5 吨。冲孔完成后，采用反向循环方式清理孔内煤渣，待煤渣清理干净后再继续钻进，防止煤渣堆积造成孔内堵塞。

3.2.3 护孔工艺强化

采用全长筛管护孔与孔口同心环加固密封相结合的双重护孔技术，实现钻孔全生命周期稳定。筛管选用 316L 高强度不锈钢材质，直径 110 毫米，适配钻孔设计尺寸，管壁按梅花形布置直径 8 毫米的透气孔，孔隙率严格控制在 15 至 20，既保障瓦斯抽采通道畅通，又能对孔壁形成有效支撑，防止煤体塌落。冲孔完成后立即开展筛管下放作业，采用分段对接方式安装，每段筛管长度为 10 米，对接处采用螺纹加密封圈双重密封，防止抽采过程中出现漏气现象。筛管下放到位后，采用机械胀管方式使筛管与孔壁紧密贴合，提升支撑稳定性。孔口区域采用同心环加固密封技术，选用高强度环氧树脂材料填充环隙，填充后养护时间不少于 24 小时，确保孔口密封牢固，有效防止孔口坍塌与瓦斯泄漏。

3.2.4 钻井液体系改良

优化钻井液配方，采用高黏度低失水量的复合型钻井液体系，核心配方为清水加 3 至 5 的膨润土加 0.5 至 1 的羧甲基纤维素钠加 0.3 至 0.5 的聚丙烯酰胺。其中膨润土提供基础黏度与造壁性能，羧甲基纤维素钠提升钻井液稳定性与降失水性，聚丙烯酰胺增强絮凝携渣能力，各组分协同作用提升护壁效果。改良后的钻井液失水量控制在 10 毫升每 30 分钟以内，能在孔壁表面快速形成一层致密坚韧的泥皮，有效隔绝钻井液水分侵入煤体与泥岩，避免泥岩遇水软化膨胀。同时，钻井液具有良好的润滑性能，可减少钻杆与孔壁之间的摩擦阻力，降低钻进过程中的机械扰动；强大的携渣能力能及时将钻进产生的煤渣带出孔外，防止煤渣沉积破坏孔壁稳定性。

4 现场应用试验

4.1 试验地点与方案

试验地点选在新庄煤矿二 2 煤层东部中软煤层区域的 27041 工作面钻场，该区域塌孔问题突出，传统施工钻孔报废率达 45 以上。本次试验共施工 6 个试验孔，钻孔设计深度均为 300 米，其中 3 个孔采用定向钻机“钻冲护”一体化方案施工，作为试验组；另外 3 个孔采用普通钻机常规工艺施工，作为对照组。试验内容包括钻孔成孔率、钻进效率、孔壁稳定性、瓦斯抽采效果等指标监测。钻孔施工过程中，实时记录钻进参数、塌孔发生情况；成孔后，采用超声波孔壁检测仪检测孔壁

变形情况；瓦斯抽采阶段，连续监测瓦斯浓度、纯流量等参数，持续监测时间为120天。

4.2 施工过程控制

试验组钻孔施工前，对钻场进行加固处理，采用锚网索联合支护，保障施工安全。钻机安装时严格校准水平与方位，确保钻进初始精度。钻进过程中，通过随钻测量系统实时监测钻孔轨迹，偏差控制在0.5米以内。每钻进50米开展一次水力冲孔作业，冲孔完成后及时清理孔内煤渣，再继续钻进。下放筛管时，采用分段对接方式，每段筛管长度为10米，对接处采用螺纹连接并密封处理，防止漏风。孔口同心环加固时，确保树脂材料填充饱满，养护时间不少于24小时。对照组钻孔按照传统工艺施工，采用普通泥浆护壁，不进行水力冲孔与筛管护孔。

4.3 应用效果分析

4.3.1 成孔效果

试验组3个钻孔均顺利完成施工，无塌孔现象发生，成孔率达100；对照组3个钻孔中有2个发生塌孔，其中1个孔在钻进至180米时塌孔报废，另1个孔在退钻后发生孔底坍塌，成孔率仅为33。超声波检测结果显示，试验组钻孔孔壁最大变形量为8毫米，对照组剩余1个钻孔孔壁最大变形量为45毫米，定向钻机配合“钻冲护”一体化方案能显著提升孔壁稳定性。

4.3.2 钻进效率

试验组平均钻进时间为82小时，平均钻进效率为4.88米每小时；对照组平均钻进时间为65小时，但因塌孔返工，实际有效钻进效率仅为2.15米每小时。试验组钻进效率较对照组提升127，主要原因是定向钻机精准控向减少了盲目钻进，且无塌孔返工现象。

4.3.3 瓦斯抽采效果

试验组钻孔瓦斯浓度前30天均保持在35以上，第120天时仍维持在20以上；对照组剩余钻孔瓦斯浓度前10天为25左右，第30天后降至10以下。试验组单孔平均日均瓦斯纯流量为0.048立方米每分钟，120天累计抽采瓦斯量为69.12立方米；对照组单孔日均瓦斯纯流量为0.012立方米每分钟，累计抽采瓦斯量为17.28立方米，试验组抽采效果较对照组提升300。

参考文献：

- [1] 滑俊杰.“三软”煤层定向钻进区域瓦斯治理技术调研与思考[J].煤矿现代化,2024,33(06):45-49.
- [2] 李泉新,姚克,方俊,等.煤矿井下瓦斯高效精准抽采定向钻进技术与装备[J].煤炭科学技术,2023,51(S1):65-72.
- [3] 姚亚峰,姚宁平,沙翠翠,等.煤矿井下双动力头定向钻机关键技术研究[J].煤矿机械,2020,41(11):30-32.

4.3.4 经济社会效益

试验组钻孔施工成本较对照组增加15左右，但因成孔率提升与抽采效果改善，综合成本降低40以上。同时，该技术的应用减少了塌孔引发的安全隐患，保障了矿井安全生产，为新庄煤矿中软煤层区域大规模瓦斯抽采提供了技术支撑。具体指标对比见表1。

| 指标类型 | 试验组（定向钻机方案） | 对照组（传统方案） | 提升/改善幅度 |
|---------|-------------|-------------|---------|
| 成孔率 | 100 | 33 | 67百分点 |
| 孔壁最大变形量 | 8毫米 | 45毫米 | 减少82.2 |
| 有效钻进效率 | 4.88米每小时 | 2.15米每小时 | 提升127 |
| 日均瓦斯纯流量 | 0.048立方米每分钟 | 0.012立方米每分钟 | 提升300 |
| 综合成本 | 基准值100 | 基准值167 | 降低40 |

5 结论与展望

5.1 结论

新庄煤矿中软煤层塌孔主要由煤体力学强度低、地层与瓦斯压力作用、传统工艺缺陷及施工不规范等因素导致。选用ZYL-7000DS(A)矿用履带式全液压双管定向钻机配合“钻冲护”一体化技术方案，能有效解决塌孔问题。该方案通过滑动与复合钻进结合减少孔壁扰动，水力冲孔降低煤层应力与瓦斯压力，全长筛管与同心环加固实现有效护孔，高黏度钻井液形成稳定泥皮，多技术协同作用提升钻孔稳定性。

现场试验表明，定向钻机方案施工的钻孔成孔率达100，较传统方案提升67百分点；有效钻进效率达4.88米每小时，提升127；单孔日均瓦斯纯流量提升300，综合成本降低40以上，技术经济效果显著。

5.2 展望

后续可进一步优化钻进参数与钻井液配方，结合矿井不同区域中软煤层地质差异，建立个性化施工参数数据库。加强定向钻机智能化升级，提升远程控制与自动决策能力，减少人为操作影响。同时，开展定向钻机与其他治理技术的融合研究，如注浆加固、新型护孔材料应用等，进一步提升复杂条件下中软煤层塌孔治理效果，为同类矿区提供更完善的技术方案。