

阳泉矿区碎软煤层深孔气动定向钻进关键技术与实践

刘飞 李泉新 方俊 刘建林 杨伟锋 褚志伟 赵建国 王四一

引用本文:

刘飞, 李泉新, 方俊, 等. 阳泉矿区碎软煤层深孔气动定向钻进关键技术与实践[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 184–191.
LIU Fei, LI Quanxin, FANG Jun, et al. Key technology and practice of deep borehole pneumatic directional drilling in broken-soft coal seam in Yangquan mining area[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(9): 184–191.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.24.04.0226>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿井下碎软煤层气动定向钻进技术与装备研究

Pneumatic directional drilling technology and equipment for broken-soft coal seams in underground coal mines
煤田地质与勘探. 2024, 52(6): 154–165 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.12.0808>

气动定向钻进技术在松软煤层条带瓦斯预抽中的应用

The application of pneumatic directional drilling technology in gas pre-drainage of strips in soft coal seams
煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 256–261 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.033>

软煤气动螺杆钻具定向钻进技术与装备

Directional drilling technology and equipment of pneumatic screw motor in soft seam
煤田地质与勘探. 2020, 48(2): 36–41 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.02.007>

淮南矿区软煤气动定向钻进技术与装备研究及应用

Air-driven directional drilling technology and equipment in soft coal seam of Huainan mining area
煤田地质与勘探. 2022, 50(10): 151–158 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.01.0014>

煤矿井下碎软煤层顺层钻完孔技术研究进展

Research progress of drilling and borehole completion technologies in broken soft coal seam in underground coal mine
煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 285–296 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.032>

碎软煤层气动双管定向钻进排粉特性分析及应用

Powder discharge characteristics of pneumatic double pipe directional drilling in broken soft coal seams and its application
煤田地质与勘探. 2022, 50(5): 159–166 <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.21.12.0789>



移动阅读

刘飞, 李泉新, 方俊, 等. 阳泉矿区碎软煤层深孔气动定向钻进关键技术与实践[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(9): 184–191. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0226
LIU Fei, LI Quanxin, FANG Jun, et al. Key technology and practice of deep borehole pneumatic directional drilling in broken-soft coal seam in Yangquan mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(9): 184–191. doi: 10.12363/issn.1001-1986.24.04.0226

阳泉矿区碎软煤层深孔气动定向钻进关键技术与实践

刘 飞, 李泉新*, 方 俊, 刘建林, 杨伟峰, 褚志伟, 赵建国, 王四一

(中煤科工西安研究院(集团)有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 【目的】针对山西阳泉矿区碎软煤层瓦斯精准、超前、区域治理需求, 提出采用气动定向钻进煤层预抽钻孔的技术方案。【方法】在分析气动定向钻进成孔技术难题的基础上, 开发了适用于阳泉矿区碎软煤层赋存条件的气动螺杆钻具稳定运转技术、钻孔轨迹精确控制技术、深孔高效排渣技术、气动套铣打捞技术, 优化了气动定向钻进装备配套方案, 并在阳泉矿区碎软煤层中开展了现场工业性试验。【结果和结论】结果表明: (1) 通过优化气动螺杆钻具结构和工艺流程、设计低风阻管路, 有效解决了气动螺杆钻具的异常制动, 实现了稳定高效运转。(2) 通过优化钻孔设计轨迹和工艺参数、设计大角度造斜钻具组合和研制气动冲击螺杆钻具, 保障了钻孔轨迹的精确调控, 提高了煤层钻遇率。(3) 通过复合强排渣技术和短起钻冲孔工艺的应用, 有效提升了钻孔排渣效率。(4) 通过采用气动套铣打捞技术, 配套设计的专用可退式打捞筒, 满足阳泉区矿区碎软煤层孔内复杂事故处理需要, 并成功处理 2 起严重卡钻事故。(5) 在阳泉矿区某矿施工完成孔径 120 mm 的 10 个定向钻孔, 成孔深度均达到 450 m 以上, 最大钻孔深度达到 607 m, 最大单班进尺 76 m。碎软煤层定向孔取得了显著的瓦斯抽采效果, 单孔日均抽采瓦斯纯量最大达 971.96 m³, 实现了阳泉矿区碎软煤层瓦斯长时间稳定抽采。研究成果为阳泉矿区碎软煤层瓦斯高效治理提供了新的技术途径, 具有显著的应用和推广价值。

关 键 词: 阳泉矿区; 碎软煤层; 定向钻进; 气动螺杆钻具; 瓦斯抽采; 钻孔轨迹控制

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2024)09-0184-08

Key technology and practice of deep borehole pneumatic directional drilling in broken-soft coal seam in Yangquan mining area

LIU Fei, LI Quanxin*, FANG Jun, LIU Jianlin, YANG Weifeng, CHU Zhiwei, ZHAO Jianguo, WANG Siyi
(CCTEG Xi'an Research Institute (Group) Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: [Objective] In response to the need for precise, proactive, and regional management of gas in the broken-soft coal seam of the Yangquan Mining Area, a technical scheme utilizing pneumatic directional drilling for pre-drainage boreholes was proposed. [Methods] Based on the analysis of the technical challenges in pneumatic directional drilling, a series of technologies suitable for the broken-soft coal seam in the Yangquan Mining Area were developed. These include stable operation technology for pneumatic downhole motors, precise control technology for drilling boreholes, efficient deep-hole slag discharge technology, and pneumatic milling and salvage technology. The pneumatic directional drilling equipment was optimized, and field industrial trials were conducted in the broken-soft coal seam of the Yangquan Mining Area. [Results and Conclusions] The results indicate: (1) Through the optimization of the structure and technological process of the pneumatic downhole motor, as well as the design of low wind resistance pipelines, ab-

收稿日期: 2024-04-02; 接收日期: 2024-06-12

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-082, 2024GX-YBXM-483, 2023-YBGY-319); 陕西省自然科学基础研究计划重点项目(2023-JCZD-32); 中国煤炭科工集团创新创业基金重点项目(2023-2-TD-ZD002)

第一作者: 刘飞, 1989 年生, 男, 陕西永寿人, 硕士, 副研究员。E-mail: lfxike@163.com

*通信作者: 李泉新, 1980 年生, 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 研究员。E-mail: liquanxin@cctegxian.com

© Editorial Office of *Coal Geology & Exploration*. OA under CC BY-NC-ND

normal braking of the pneumatic downhole motor was effectively resolved, achieving stable and efficient operation. (2) The optimization of borehole trajectory and technological parameters, the design of large-angle deflecting drilling tool combinations, and the development of pneumatic impact downhole motors ensured precise control of the borehole trajectory and improved the penetration rate of the coal seam. (3) The application of forced slag discharge with slide and rotary drilling and short-lifting drilling tools significantly enhanced slag discharge efficiency. (4) By adopting pneumatic milling and salvage technology, along with the specially designed retractable overshot, the complex downhole accident handling requirements in the broken-soft coal seam of the Yangquan Mining Area were met, successfully resolving two severe sticking incidents. (5) In a certain mine in the Yangquan Mining Area, ten directional boreholes with a diameter of 120 mm were completed, each reaching depths of over 450 m, with the maximum borehole depth being 607 m and the maximum single-shift footage being 76 m. The directional boreholes in the broken-soft coal seam achieved significant gas drainage results, with the maximum pure gas drainage from a single borehole reaching 971.96 m³, thereby enabling long-term stable gas drainage in the broken-soft coal seam of the Yangquan Mining Area. The research results provide a novel technical approach for the efficient management of gas in the broken-soft coal seam of the Yangquan Mining Area, demonstrating significant potential for practical application and widespread adoption.

Keywords: Yangquan Mining Area; broken-soft coal seam; pneumatic screwdrill; directional drilling; gas drainage; borehole trajectory control

山西阳泉矿区位于沁水盆地东北部的盆缘构造带,是我国重要的无烟煤基地,区域范围内高瓦斯矿井、煤与瓦斯突出矿井占比大^[1-2]。阳泉矿区含煤地层经历过复杂的地质构造运动,主采煤层瓦斯含量高,普遍超过10 m³/t,瓦斯压力大,最大可达2.5 MPa,褶皱构造是其最主要的构造类型,在多期次层间滑动的作用下,原生结构煤被挤压、错动、剪切,煤体破碎程度大,属于典型的碎软低渗煤层,煤层坚固性系数大多在0.5以下。

复杂的煤层赋存地质条件导致阳泉矿区瓦斯治理难度极大^[3],长期采煤生产过程中,曾发生过多次煤与瓦斯突出事故,成为山西省内最严重的突出矿区。为有效遏制瓦斯事故发生,阳泉矿区先后试用密集短钻孔^[4]、水力造穴^[5]、CO₂预裂增透^[6]等瓦斯治理技术,取得了较好的瓦斯治理效果。然而,上述瓦斯治理技术主要基于常规浅钻孔,钻孔轨迹不可控、深度浅、瓦斯抽采控制范围有限,还可能存在瓦斯治理盲区,难以实现瓦斯精准高效治理,造成矿井“抽、掘、采”衔接紧张。阳泉矿区曾引进液动随钻测量定向钻进技术装备在碎软煤层施工定向钻孔,但成孔深度和成孔率未能达到预期目标,无法满足生产实际需求,究其原因,主要在于以清水作为冲洗液钻进过程中,孔壁煤体受结构破碎、机械强度低、冲洗液冲刷扰动、钻具机械碰撞等不利因素影响,稳定性差、易发生塌孔、卡钻等孔内复杂情况^[7-8]。其次,在孔内形成的“气-液-固”三相流,沿环空流道返出时易引起压力波动,加之塌孔沉渣造成孔内瓦斯积聚,进一步导致孔壁煤体瓦斯压力梯度增大,诱导喷孔、塌孔事故发生,严重影响钻孔深度和钻进效率提升。

近年来,气动定向钻进技术因其显著的成孔优势和瓦斯抽采效果,在碎软煤层煤巷条带瓦斯预抽、工作面区域递进式抽采方面得到广泛应用^[9-12],实现了碎软煤

层瓦斯超前、区域、精准抽采,有效提升了矿井瓦斯治理效率,但在阳泉矿区还未取得实质性进展。基于此,针对阳泉矿区碎软煤层地质条件和瓦斯赋存特征,开展了碎软煤层气动定向钻进技术研究与工程实践,分析了碎软煤层气动定向钻进成孔技术难点,研究制定了针对性技术方案,采用大功率定向钻机配套气动定向钻进装备在阳泉矿区开展了现场工业性试验,探索形成了适应于阳泉矿区碎软煤层的气动定向钻进技术与装备,以达到提升碎软煤层瓦斯抽采孔深度、轨迹控制精度和瓦斯抽采效果的目的。

1 深孔气动定向钻进关键技术难题

1.1 气动螺杆钻具异常制动

气动螺杆钻具是实施气动定向钻进工艺的关键工具,然而实际应用过程中,气动螺杆钻具还存在以下问题:

(1)由于气体的可压缩性,气动螺杆钻具在运转过程中表现出明显的“软机械”特性,主要表现为输出转速不稳定性^[13],波动范围大,气动螺杆钻具输出转速如下式,在其他参数不变的情况下,气动螺杆钻具输出扭矩、输出转速、输出功率随孔深的增加而递减,同时由于气体的冷却润滑效果差,气动螺杆钻具在长时间运转后容易发生制动,且在孔内“二次启动”困难。

$$n = \frac{60\rho R}{q} \frac{Qt}{pM} \quad (1)$$

(2)定向钻进加接钻杆孔内卸压过程中,由于钻杆内残留气体快速卸压抽吸,以及孔内瓦斯正压力作用,孔内气体会携带煤渣通过定向钻头进入气动螺杆钻具内部,损坏定、转子部件和密封组件,影响气动螺杆钻具使用寿命。

(3) 高压气流通过管道输送至钻场,产生沿程压力损失,且随着孔深的增加,钻杆连接数量增加,高压气流在钻杆接头处产生的局部压损及钻杆内沿程损失也不断增大,导致气动螺杆钻具输出的碎岩动力不足,这成为制约钻进深度提升的关键因素之一。

1.2 钻孔轨迹控制难度大

阳泉矿区主采煤层结构破碎,定向钻进过程中轨迹控制难度大,主要存在以下问题:

(1) 钻孔轨迹调整需依靠带衬垫的弯外壳气动螺杆钻具支撑孔壁,然而碎软煤层难以给气动螺杆钻具提供足够的反向支撑力使其沿预定方向钻进,当钻遇异常破碎煤层时,常出现造斜能力减弱或轨迹不受控等复杂情况,偏离设计轨迹。

(2) 碎软煤层钻进过程中势必会产生大量钻渣,局部堆积的钻渣在轨迹调整过程中会对钻具产生向上抬升作用,常出现钻孔倾角异常增大的情况^[10],如3 m进尺倾角增加4°~5°,导致钻孔弯曲曲率过大,严重影响孔内定向钻具安全。

(3) 碎软煤层深孔钻进条件下,受局部塌孔或排渣不畅等因素影响,造成气动螺杆钻具输出转速不稳定,导致开分支效率和成功率大幅下降,这成为制约碎软煤层钻孔深度延伸的不利因素之一。

1.3 深孔钻进状态下排渣困难

碎软煤层钻进过程由于塌孔、喷孔形成大量煤渣,而气体的携渣能力较弱,由于钻孔排渣不畅会导致以下问题:

(1) 大量煤渣在钻孔“下凹段”积聚,当高压气流难以“搬运”孔内积聚的煤渣时,则在孔内形成钻孔堵塞段,导致钻头切削的钻渣无法及时排出孔外,同时钻进摩阻随堵塞段长度的增加而不断增大,包括堵塞段钻渣重力摩擦阻力、钻杆自重摩擦阻力和侧压摩擦阻力^[14-15],当钻机所提供的给进/起拔、回转压力不足以克服堵塞段摩擦阻力时,即发生孔内钻进受阻,甚至卡钻事故。

(2) 随着孔深的增加,钻渣的运移过程和路径更加复杂,由于排渣不畅导致钻孔发生堵塞的几率大幅增加,一旦发生钻孔堵塞后,堵塞段至孔底的气体压力会迅速升高,直至达到压缩气源装置的输出压力极限,导致孔底气动螺杆钻具制动、钻进受阻。因此,如何保证环空排渣通道顺畅是降低钻进风险、实现碎软煤层深孔定向钻进的关键。

1.4 钻孔卡钻事故处理

由于碎软煤层孔壁自稳能力差,塌孔、沉渣造成的卡钻事故多发,导致孔内钻具无法转动及进退,处理不当则会造成严重的经济损失。若采用强力回转起拔处理孔内钻具,随着钻机起拔压力的增大,堵塞段钻渣越

密实,堵塞段与事故钻具之间的侧压力越大,钻杆的旋转扭矩迅速增大,同时由于孔内气流通道不畅,钻杆与孔壁煤体长时间摩擦可能产生CO、CO₂等有毒有害气体,处理不当甚至会引发孔内燃烧等安全事故。常规的套铣打捞技术以清水作为冲洗液,不适用于碎软煤层钻孔事故处理,事故处理过程中,由于受钻孔弯曲曲率过大或排渣不畅等因素影响,易引发孔内二次事故。

2 气动定向钻进关键技术

2.1 气动螺杆钻具高效运转技术

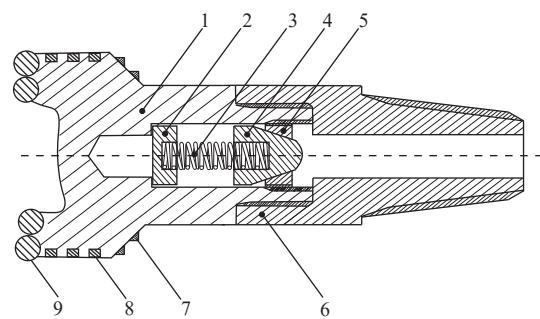
针对气动螺杆钻具运转存在的技术难题,优化了气动螺杆钻具结构和工艺流程、设计了低风阻管路。

1) 气动螺杆钻具结构优化

针对气体冷却润滑效果差的问题,在气动螺杆钻具传动轴部位设置油润滑密封装置,使轴承组在油润滑的条件下工作,也防止煤渣进入轴承组,进一步提高其承载能力、延长使用寿命;优化了马达定转子线型,进一步提高其输出工作扭矩和气密性能^[11];同时在钻进过程中,通过向供风管路中注入润滑油的方式^[16],解决了气动螺杆钻具降温润滑难题,避免或减少气动螺杆钻具在孔内出现异常制动现象,显著提高气动螺杆钻具的可靠性和使用寿命。

2) 气动螺杆钻具工艺优化

针对气体、煤渣逆流损坏气动螺杆钻具的问题,采用防逆流结构钻头^[17],如图1所示。技术原理为:气动螺杆钻具定向钻进过程中,在需要加接钻杆时,先进行孔内卸压,卸压过程中密封堵头在两端气体压力差和弹簧弹力作用下移动,由堵头限位块限位,密封堵头与堵头限位块配合起密封作用,防止孔底气体携带钻渣和瓦斯反向逆流进入气动螺杆钻具内;当加接钻杆完成、给孔内供气后,高压气流推动密封堵头打开,即开始正常钻进。



1—钻头本体; 2—弹簧限位块; 3—复位弹簧; 4—密封堵头;

5—堵头限位块; 6—分体接头; 7—反向切削齿;

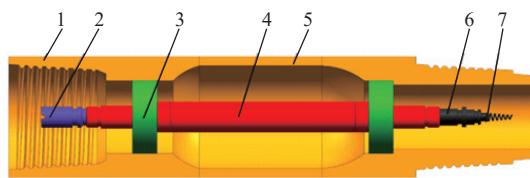
8—耐磨合金块; 9—正向切削齿

图 1 钻头防逆流结构

Fig.1 Structure of drill bit anti-backflow mechanism

3) 低风阻管路设计

针对高压气流在输送过程中存在沿程损失和局部损失大的问题,选配了大排量压缩气源装置,输出气体流量 $\geq 900 \text{ m}^3/\text{min}$ 、气体压力 $\geq 1.5 \text{ MPa}$;采用大通径气体输送管路,压缩气源装置至钻场的高压气流输送选用直径75 mm以上的耐高压管道,以降低高压气体输送过程中的沿程损失;设计了大通孔送风器,通孔直径增大至40 mm;研制了有线随钻测量螺旋钻杆,优化了信号传输结构,如图2所示,有效减小了钻杆接头部位流阻、提升了钻杆内部流场的稳定性^[18],保障了气动螺杆钻具的高效运转。



1—钻杆母接头；2—不锈钢套；3—支撑环；4—信号传输装置；5—钻杆管体；6—绝缘接头；7—弹簧

图2 钻杆信号传输结构

Fig.2 Structure of drill pipe signal transmission

2.2 钻孔轨迹精确控制技术

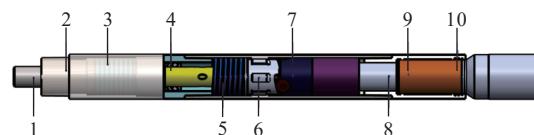
针对阳泉矿区碎软煤层钻孔轨迹控制难度大的技术难题,开展了钻孔轨迹优化、钻具组合优化和控制方法研究。

1) 钻孔轨迹优化设计

钻孔轨迹设计兼顾瓦斯抽采区域覆盖和钻孔造斜率的要求,首先根据煤层等高线初步设计钻孔轨迹,然后按照一定间隔施工探查分支孔,通过探顶开分支的形式探明抽采区域内煤层顶底板及软硬分层情况,为邻近钻孔施工提供指导。造斜曲率设计要保证孔内钻具安全、降低钻具摩阻^[19],在保证钻孔轨迹沿煤层延伸的前提下,尽可能降低钻孔造斜曲率,提高钻孔轨迹平滑性,以降低钻孔轨迹控制难度和钻进安全风险。

2) 钻具组合优化设计

基于阳泉矿区碎软煤层赋存特征,结合现场实际施工数据,优化设计了定向钻具组合,采用铣削螺旋槽结构的有线测量定向钻杆,以提高排渣效率。针对异常破碎煤层,采用1.75°气动螺杆钻具组合,通过试验对比:1.75°气动螺杆钻具造斜能力可达到 $2(^\circ)/3 \text{ m}$,较1.25°气动螺杆钻具造斜能力提高1倍^[20],确保钻孔实钻轨迹按设计轨迹顺利通过异常破碎孔段。研制了气动冲击螺杆钻具,具有冲击和定向双重功能,单次最大冲击力达到6 kN,冲击机构如图3所示。当钻遇煤层顶底板时,通过气动冲击螺杆钻具进行轨迹纠偏,使钻孔轨迹回到煤层中,克服了深孔钻进条件下岩层钻进和开分



1—接万向轴；2—上TC承套；3—轴承组；4—密封组件；5—蓄能弹簧；6—冲锤；7—砧体；8—钻头轴；9—下TC轴承；10—密封组件

图3 冲击机构

Fig.3 Structure diagram of percussion mechanism

支成孔率低的问题。

3) 钻孔轨迹交互式控制方法

采用复合定向钻进轨迹交互控制方法,复合钻进模式下,利用螺旋钻杆和高压气流进行复合排渣、实现稳斜钻进^[21],回转速度保持在40~60 r/min,给进压力需要根据孔深、返渣情况等综合确定,防止给进压力过大造成单位时间内钻头切削的钻渣量过大,造成钻孔排渣通道堵塞;滑动钻进模式下,利用高压氮气进行循环排渣、实现造斜钻进,给进压力需要根据孔口返渣、返风及输入风压、风量变化情况进行调整,保证钻进速度不大于0.5 m/min。为保证钻进过程中ø89 mm气动螺杆钻具高效运转需要,额定风压要保持在1.3 MPa以上、工况风量要保持在500 m³/h以上。

2.3 深孔高效排渣技术

针对阳泉矿区碎软煤层气动定向钻孔钻渣量大、排渣困难的技术难题,研究了复合强排渣技术和短起钻冲孔工艺。

1) 复合强排渣技术

复合强排渣是利用螺旋钻杆和高压气流实现高效排渣,孔内沉渣受到螺旋钻杆切向力作用绕钻杆运动,同时螺旋钻杆持续碾压、破碎大块钻渣,使得钻渣更容易被高压气流携带出孔外,钻杆转动速度越快,钻渣运移距离越远,排渣效果越好。螺旋钻杆在旋转状态下翼片持续刮削孔壁,起到修复孔壁和清洁钻孔的作用,从而提高钻孔轨迹平滑度;此外,复合钻进状态下孔径相较于滑动钻进状态下明显扩大,相当于增大了环空排渣通道面积,减小了环空排渣阻力^[22],有利于提高排渣效率。

2) 短起钻冲孔工艺

钻进工艺参数微小变化可能就是钻孔事故的前兆。当孔口输入风压上升、风量降低、钻机系统压力增大时,即可判断孔内出现排渣不畅,通过短起钻冲孔工艺强化孔内排渣、疏通局部孔段堵塞,避免排渣不畅导致的堵塞段长度增大,钻杆起出数量要根据供风参数和钻机系统压力综合确定,直至正常后再下钻至孔底、继续钻进。

2.4 气动套铣打捞技术

针对碎软煤层钻孔卡钻事故,提出以高压氮气作为

冲洗介质, 配备采用 $\varnothing 127\text{ mm}$ 套铣打捞钻杆+ $\varnothing 168\text{ mm}$ 套铣打捞钻头进行事故处理, 大通径套铣钻具组合能保证顺利通过钻孔弯曲孔段^[23], 同时也提高了套铣排渣效果。针对套铣钻杆与事故钻杆磨损严重的问题, 通过在套铣打捞钻杆内添加润滑油, 降低钻具之间的异常磨损, 从而提高钻具使用寿命, 此外, 氮气能有效阻止摩擦高温导致着火风险。针对解卡后事故钻具可能随打捞钻杆进入钻孔的情况, 开发了专用可退式打捞筒, 实现孔内事故钻具快速提出。

3 气动定向钻进关键装备

针对阳泉矿区碎软煤层赋存特征及瓦斯抽采钻孔设计要求, 优化确立了阳泉矿区碎软煤层气动定向钻进装备的配套方案, 见表 1。

表 1 气动定向钻进关键装备

Table 1 Key equipment for pneumatic directional drilling

装备	规格/型号
钻机	ZDY15000LD
矿用制氮机	DMJ-900/20
气动螺杆钻具	$\varnothing 89\text{ mm}$
随钻测量系统	YHD2-1000T(B)
有线随钻测量螺旋钻杆	$\varnothing 89\text{ mm} \times 2\,000\text{ mm}$
孔口除尘装置	RDCC1

1) 定向钻机

根据施工矿井巷道及钻场条件, 选配了 ZDY15000LD 型大功率定向钻机, 最大输出扭矩 15 000 N·m、最大给进/起拔力 300 kN, 钻机输出能力大、工艺适应性强、可靠性高, 可配套 $\varnothing 89$ 、 $\varnothing 127\text{ mm}$ 等规格定向钻具, 满足阳泉矿区碎软煤层气动定向钻进成孔及复杂孔内事故处理需要。

2) 矿用制氮机

为满足气动螺杆钻具运转及孔内高效排渣需要, 同时保障碎软煤层气动定向钻进安全, 防止孔内着火事故发生, 利用氮气作为碎软煤层气动定向钻进动力及循环介质, 选配了 DMJ-900/20 型矿用制氮机。矿用制氮机由煤矿用螺杆式移动空气压缩机段、压缩空气预处理段与膜分离段组成, 输出氮气额定流量 900 m³/h、压力 2 MPa, 输出流量和压力稳定可靠, 满足碎软煤层深孔钻进需要。制氮机配备矿用氧气传感器进行气体浓度连续自动检测, 当氮气体积分数低于 93% (氧气体积分数 $\leq 7\%$) 时, 不合格氮气会自动排空, 只有合格氮气才会进入管路, 有效保证钻孔施工安全。

3) 气动螺杆钻具

气动螺杆钻具是实现碎软煤层气动定向钻进成孔

的核心工具, 为孔底钻头碎岩提供持续动力, 并调控钻头前进方向。为实现阳泉矿区碎软煤层孔径 120 mm、孔深 600 m 成孔需要, 选配了 $\varnothing 89\text{ mm}$ 气动螺杆钻具, 通过采用多级多头设计、优化马达线型, 实现了低压力起动和大扭矩输出, 马达头数 5:6、压差 1.0 MPa、输出扭矩 495 N·m、钻头转速 199~245 r/min; 传动轴采用油密封结构设计, 提高了轴承的使用寿命; 在定子外壳设计螺旋槽结构, 以提高近钻头排渣能力。

4) 随钻测量系统

为提升碎软煤层定向钻孔轨迹测量稳定性和成孔效率, 选配了 YHD2-1000T(B) 型随钻测量系统, 孔口防爆计算机给孔内测量探管供电, 有线测量钻杆进行信号传输, 探管工作时间不受限制, 测量精度高、信号传输速度快。

5) 有线随钻测量螺旋钻杆

根据碎软煤层定向钻孔高效排渣及钻孔轨迹信号稳定传输需要, 研制了 $\varnothing 89\text{ mm}$ 有线随钻测量螺旋钻杆, 钻杆体采用摩擦焊接工艺, 整体强度高, 适用于孔内复杂受力工况; 在钻杆体上铣削加工螺旋槽, 螺旋翼片与管体同材质, 耐磨性能好, 螺旋槽结构有利于提高钻孔排渣效果; 钻杆内部设计有信号传输装置, 可实现孔底测量探管与孔口防爆计算机之间的双向实时通信。

6) 孔口除尘装置

孔口除尘装置主要用于清除孔口煤尘, 避免钻场空气污染, 保持施工环境干净。主要由孔口集尘器、一级除尘器、二级除尘器、集尘袋和配套管路等组成, 如图 4 所示, 利用一级除尘器和二级除尘器实现含煤尘瓦斯的分级处理, 一级除尘器主要作用是收集大颗粒钻渣, 并向下一级除尘器输送小颗粒钻渣和瓦斯; 二级除尘器作用是将小颗粒钻渣与瓦斯分离, 并进行除尘, 处理后的瓦斯由负压管路抽走。

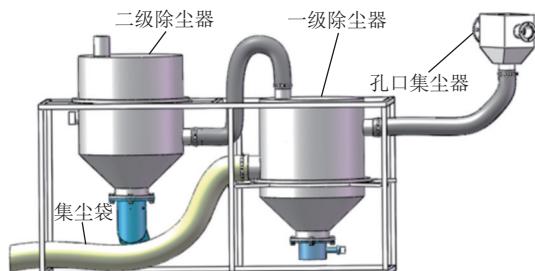


图 4 孔口除尘装置

Fig.4 Dust removal device at orifice

4 工程实践

4.1 试验矿井地质概况

试验在阳泉矿区华阳某矿 81505 进风巷开展, 钻进目标地层为 8 号煤层, 工作面区域总体形态为单斜构造,

煤层间接顶为砂质泥岩, 厚度在 0.20 m 左右, 直接顶为砂质泥岩与泥岩互层, 平均厚度 11.6 m; 煤层直接底为砂质泥岩, 厚度为 4.87 m, 深灰色, 坚硬, 参差状断口。8号煤层平均厚度 3.8 m, 瓦斯压力 0.48~0.59 MPa, 瓦斯含量 7.05~8.48 m³/t, 煤层坚固性系数为 0.48, 局部区域发育粉煤, 煤层透气性系数为 0.003 1 m²/(MPa²·d), 属于极难抽煤层。

4.2 钻孔设计

在 81505 工作面运输巷定向钻场共设计 10 个定向钻孔, 钻孔轨迹在平面上沿 81505 工作面走向布置, 进行工作面瓦斯区域预抽。钻孔设计深度 500 m、终孔孔径 120 mm、终孔间距 11 m, 最后下入ø32 mm 的聚乙烯(PE)筛管完孔。

封孔段施工过程中, 首先施工ø120 mm 先导孔, 孔深 20 m, 二开扩孔至ø153 mm, 三开扩孔至ø250 mm, 最后下入ø160 mm 的聚氯乙烯(PVC)套管, 定向孔段采用随钻测量定向钻进工艺、按照设计轨迹施工, 孔径为 120 mm。

4.3 施工情况

在 81505 进风巷定向钻场共施工完成 10 个瓦斯抽采钻孔, 施工钻孔深度均达到 450 m 以上, 累计进尺 5 380 m, 最大台班效率 41.92 m, 试验钻孔详细信息见表 2, 实钻轨迹平面如图 5 所示, 钻孔轨迹沿 81505 综采工作面均匀展布。其中 2 号钻孔深度 607 m, 最大单班进尺 76 m, 台班效率 37.94 m, 创造了煤矿井下碎软

表 2 试验钻孔详细信息
Table 2 Detailed information of test borehole

孔号	主孔深度/m	累计进尺/m	分支个数	台班效率/m
1	511	511	0	18.93
2	607	607	0	37.94
3	535	579	2	21.44
4	483	559	3	31.06
5	463	463	0	30.87
6	503	503	0	41.92
7	472	652	4	19.76
8	483	483	0	26.83
9	475	555	2	34.69
10	468	468	0	29.25

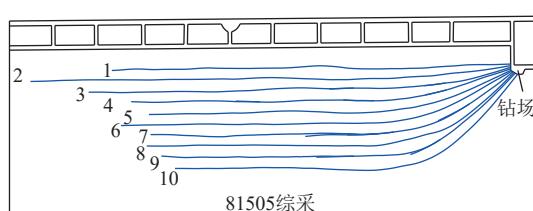


图 5 钻孔实钻轨迹平面
Fig.5 Actual borehole trajectory plane

煤层气动定向钻进孔深的新纪录, 实钻轨迹剖面如图 6 所示, 孔口至孔底垂直位移 -18.3 m。钻孔成孔后, 通过下筛管钻具组合在孔内下入ø32 mm 护孔筛管, 下入深度达到孔深的 80% 以上。

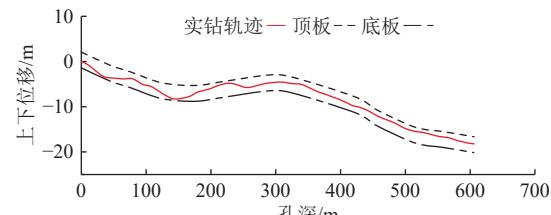


图 6 2号钻孔轨迹剖面
Fig.6 Trajectory profile of borehole No.2

在 4 号和 6 号钻孔施工过程中发生 2 次卡钻事故, 其中 4 号钻孔在孔深 427 m 处发生卡钻事故, 6 号钻孔在孔深 399 m 处发生卡钻事故, 采用气动套铣打捞技术、配套可退式打捞筒, 成功处理出孔内事故钻具。

4.4 施工效果分析

以 2 号钻孔为例分析钻孔施工效果。随着孔深的增加, 风压损耗不断增大, 且由于钻孔整体呈俯角, 排渣阻力更大, 钻进施工难度大。

由图 7 可看出, 孔深 0~200 m: 风压从 1.25 MPa 增加到 1.5 MPa, 工况风量保持在 550~630 m³/h, 由于该孔段整体呈“V”型, 钻渣更容易发生沉积。孔深 200~400 m: 风压在 1.35~1.5 MPa 波动, 工况风量稳定在 630 m³/h 左右, 钻渣在运移过程中经过初次起动、团聚、沉积、重复破碎、再次起动, 直至被运移出孔口, 局部的塌孔沉渣会引起风压波动。孔深 400~600 m: 风压从 1.40 MPa 增加到 1.55 MPa, 工况风量 580~660 m³/h, 随着孔深的增加, 钻渣颗粒运移路径更加复杂、运移距离更长, 钻渣发生沉积堵孔频次显著增加, 需要的风压、风量也随之增大。实践表明: DMJ-900/20 型矿用制氮机满足孔深 600 m 以上碎软煤层定向钻孔成孔需要。

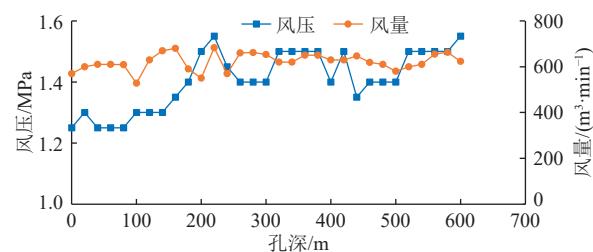


图 7 2号钻孔供风参数变化曲线
Fig.7 Variation curve of air supply parameters for borehole No.2

由图 8 可看出, 2 号钻孔施工过程中, 钻压保持在 7 MPa 左右, 回转压力呈现阶梯式增长。孔深 240 m 以内, 回转压力保持在 7 MPa 左右; 孔深 240~500 m, 回转压力由 7 MPa 增大至 10 MPa; 孔深超过 500 m 后, 回

转压力保持在 10 MPa 以上,最大达到 11 MPa,因为随着孔深增加,钻杆与孔壁的接触面积增大,造成钻进阻力和回转压力增大。施工结果表明:采用复合强排渣工艺可极大提升钻孔排渣效果、降低钻进阻力,也可实现对钻孔轨迹的精确控制。复合钻进条件下,钻杆与孔壁之间的摩擦力由静摩擦转变为动摩擦,减阻效果明显,保证了钻压传递效率,极大提高了碎软煤层钻孔延伸能力。其次,钻渣颗粒在运移过程中,螺旋钻杆搅动、破碎大颗粒钻渣,更容易被携带到具有较高气体速度的悬浮层排出孔口,从而显著提高了排渣效率。

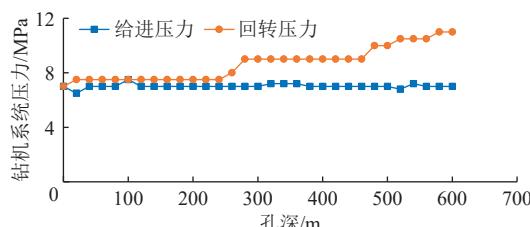


图 8 2号钻孔钻进工艺参数变化曲线

Fig.8 Variation curve of drilling technology parameters for borehole No.2

4.5 瓦斯抽采效果分析

自 2023 年 7 月开始施工,至 2024 年 3 月,81505 运输巷定向钻场已抽采纯量瓦斯 137.57 万 m³。以 2 号钻孔为例,该钻孔于 2023 年 7 月 28 日开始连抽,抽采初期,抽采瓦斯体积分数为 47%,抽采纯量 0.92 m³/min。随着抽采的持续,抽采瓦斯体积分数和抽采纯量呈现波动性变化,抽采瓦斯体积分数最大达到 94%、抽采纯量最大达到 1.44 m³/min。截至 2024 年 3 月 1 日,2 号钻孔已抽采 21.09 万 m³ 纯量瓦斯,日均抽采纯量瓦斯 971.96 m³,抽采瓦斯体积分数仍为 92%、抽采纯量为 0.51 m³/min,瓦斯抽采统计数据如图 9 所示。

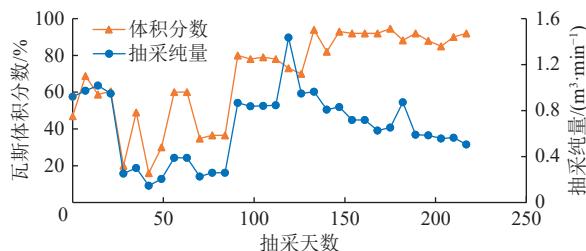


图 9 2号钻孔瓦斯抽采统计

Fig.9 Statistics of gas drainage of borehole No.2

瓦斯抽采结果表明,采用气动定向钻进技术与装备施工钻孔抽采瓦斯体积分数高、流量大、持续时间长,主要原因在于:(1)施工钻孔成孔性好、成孔深度大,孔壁暴露面积大,同时采用筛管完孔工艺,有效保证了瓦斯抽采通道顺畅。(2)与液动定向钻进技术相比,采用

气动定向钻进技术成孔后,瓦斯抽采不受孔内积水的影响,尤其是下斜孔,钻孔成孔后即可实现快速连抽。

5 结论

(1) 基于阳泉矿区碎软煤层赋存特征及瓦斯高效治理需求,开发了深孔气动定向钻进关键技术,包括气动螺杆钻具稳定运转、钻孔轨迹精确控制、深孔高效排渣、气动套铣打捞等关键技术,集成了适应于阳泉矿区碎软煤层的气动定向钻进装备。实践表明,成套技术装备满足阳泉矿区碎软煤层孔径 120 mm、孔深 600 m 以上高效成孔,瓦斯抽采体积分数高、流量大、持续时间长,单孔日均抽采瓦斯纯量最大达 971.96 m³,实现了碎软煤层瓦斯精准、超前、区域治理。

(2) 深孔气动定向钻进技术具有轨迹控制精度高、排渣效果好、钻孔延伸及事故处理能力强等优势,配套的大功率定向钻机、矿用制氮机、气动螺杆钻具等装备稳定可靠,有效提升了碎软煤层定向钻孔煤层钻遇率、钻进效率、钻孔深度和瓦斯抽采效果,为阳泉矿区碎软煤层瓦斯高效治理提供了新的技术途径。

(3) 为进一步提升阳泉矿区碎软煤层瓦斯抽采效果,建议在气动定向钻钻进成孔的基础上,配套开发相适应的增透改造技术,进一步提升瓦斯抽采效果和覆盖范围,缩短抽采达标时间。

符号注释:

n 为气动螺杆钻具输出转速, r/min; ρ 为气体密度, g/m³; q 为每转排量, m³/r; Q 为进气量, m³/min; M 为气体的摩尔质量, g/mol; R 为气体通用常数, 取 $R = 8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$; p 为气体的压强, MPa; t 为气体的温度, °C。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References)

- [1] 令狐建设. 阳泉矿区瓦斯综合防治与利用技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2021.
- [2] 姜波, 李明, 程国玺, 等. 矿井构造预测及其在瓦斯突出评价中的意义[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2306–2317.
JIANG Bo, LI Ming, CHENG Guoxi, et al. Mine geological structure prediction and its significance for gas outburst hazard evaluation[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(8): 2306–2317.
- [3] 翟红, 令狐建设. 阳泉矿区瓦斯治理创新模式与实践[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(2): 168–175.
ZHAI Hong, LINGHU Jianshe. Practice and innovation mode of gas control in Yangquan Mining Area[J]. Coal Science and Tech-

- nology, 2018, 46(2): 168–175.
- [4] 金新, 管强盛. 高转速干式螺旋钻进筛管完孔技术在新景矿瓦斯治理中的应用[J]. 煤炭技术, 2022, 41(10): 115–118.
JIN Xin, GUAN Qiangsheng. Application of high speed dry spiral drilling sieve tube completion technology in xinjing coal mine gas control[J]. Coal Technology, 2022, 41(10): 115–118.
- [5] 于宝种. 松软低透煤层高压射流造穴强化抽采技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(6): 42–46.
YU Baozhong. Enhanced extraction technology of high pressure jet in soft and low permeability coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(6): 42–46.
- [6] 杨百舸. 阳泉矿区瓦斯地质特征与 CO₂ 相变致裂瓦斯治理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2022.
YANG Baige. Study on gas geology characteristics and coal mine gas control with CO₂ phase transition fracturing in Yangquan mining area[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2022.
- [7] 刘建林, 刘飞, 李泉新, 等. 碎软煤层瓦斯抽采钻孔孔壁稳定性分析[J]. 煤矿安全, 2018, 49(8): 189–193.
LIU Jianlin, LIU Fei, LI Quanxin, et al. Stability analysis of borehole wall for gas drainage boreholes in broken soft coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(8): 189–193.
- [8] 徐超平, 李贺, 鲁义, 等. 软煤瓦斯抽采钻孔失稳特性及控制技术研究现状[J]. 矿业安全与环保, 2022, 49(3): 131–135.
XU Chaoping, LI He, LU Yi, et al. Research status of borehole instability characteristics and control technology for gas extraction in soft coal seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2022, 49(3): 131–135.
- [9] 田宏亮, 陈建, 张杰, 等. 淮南矿区软煤气动定向钻进技术与装备研究及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(10): 151–158.
TIAN Hongliang, CHEN Jian, ZHANG Jie, et al. Air-driven directional drilling technology and equipment in soft coal seam of Huainan mining area[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(10): 151–158.
- [10] 孙永新, 张杰, 马强, 等. 王坡煤矿碎软煤层高压氮气定向钻进试验研究[J]. 煤矿安全, 2022, 53(7): 64–69.
SUN Yongxin, ZHANG Jie, MA Qiang, et al. Experimental study on directional drilling with high pressure nitrogen in soft-fragmentized coal seam of Wangpo Coal Mine[J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(7): 64–69.
- [11] 方俊, 刘飞, 李泉新, 等. 煤矿井下碎软煤层空气复合定向钻进技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 224–229.
FANG Jun, LIU Fei, LI Quanxin, et al. Air compound directional drilling technology and equipment for soft-fragmentized seam underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 224–229.
- [12] 张杰. 气动定向钻进技术在松软煤层条带瓦斯预抽中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 256–261.
ZHANG Jie. The application of pneumatic directional drilling technology in gas pre-drainage of strips in soft coal seams[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 256–261.
- [13] 刘飞, 梁道富, 刘建林, 等. 碎软煤层空气复合定向钻进工艺技术[J]. 煤矿安全, 2019, 50(7): 116–119.
- LIU Fei, LIANG Daofu, LIU Jianlin, et al. Air compound directional drilling technology in broken soft seam[J]. Safety in Coal Mines, 2019, 50(7): 116–119.
- [14] 王永龙, 孙玉宁, 王振锋, 等. 松软突出煤层钻进钻孔堵塞力学特征[J]. 煤炭学报, 2015, 40(增刊1): 119–125.
WANG Yonglong, SUN Yuning, WANG Zhenfeng, et al. Mechanical characteristic of borehole clogging drilling in soft and outburst coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(Sup 1): 119–125.
- [15] 王永龙, 陆云飞, 王振锋, 等. 松软煤层“护孔卸压”钻进力学机制[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3186–3194.
WANG Yonglong, LU Yunfei, WANG Zhenfeng, et al. Mechanism of “hole-protecting and pressure relief” drilling in soft coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3186–3194.
- [16] 李坤. 空气定向钻进螺杆马达润滑关键技术[J]. 煤矿安全, 2023, 54(1): 230–234.
LI Kun. The key technology of lubrication for screw motor in air directional drilling[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(1): 230–234.
- [17] 褚志伟, 李泉新, 刘建林, 等. 带有气体逆止功能的定向钻头: CN216642010U[P]. 2022-05-31.
- [18] 朱宁. 大风量有线随钻测量螺旋钻杆设计及流场分析[J]. 煤炭技术, 2020, 39(11): 181–184.
ZHU Ning. Design and flow field analysis of screw drill pipe with high air volume while drilling[J]. Coal Technology, 2020, 39(11): 181–184.
- [19] 敬俊. 气体钻水平井摩阻扭矩分析及延伸钻进研究[D]. 成都: 西南石油大学, 2016.
JING Jun. Torque-drag and extend reaching analysis in horizontal gas drilling[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2016.
- [20] 李平, 童碧, 许超. 顶板复杂地层高位定向钻孔成孔工艺研究[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 197–201.
LI Ping, TONG Bi, XU Chao. Study on hole-forming technology of high-level directional borehole in complicated roof strata[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 197–201.
- [21] 张杰, 王毅, 黄寒静. 软煤气动螺杆钻具定向钻进技术与装备[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(2): 36–41.
ZHANG Jie, WANG Yi, HUANG Hanjing. Directional drilling technology and equipment of pneumatic screw motor in soft seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(2): 36–41.
- [22] 徐保龙, 姚宁平, 王力. 煤矿井下定向深孔复合钻进减阻规律研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(2): 92–95.
XU Baolong, YAO Ningping, WANG Li. Friction reduction law of compound drilling in directional deep hole of underground mine[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(2): 92–95.
- [23] 王建强, 张杰. 煤矿井下定向深孔大孔径套铣打捞技术及工艺参数[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 189–193.
WANG Jianqiang, ZHANG Jie. Large aperture milling and salvage technology and technic parameters of directional deep-hole in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 189–193.

(责任编辑 郭东琼)