

文章编号: 1671-251X(2024)01-0035-07

DOI: [10.13272/j.issn.1671-251x.2023050014](https://doi.org/10.13272/j.issn.1671-251x.2023050014)

水力压冲一体化增透抽采瓦斯技术

王宝贵^{1,2}

(1. 山西焦煤西山煤电集团公司 杜儿坪矿, 山西 太原 030053;

2. 太原理工大学 继续教育学院, 山西 太原 030024)

摘要: 现有的水力压裂、水力冲孔、水力掏槽、水力割缝等煤矿井下水力增透技术工艺复杂、适应条件单一、劳动强度大, 而钻冲一体化、钻扩一体化、水力冲/压一体化等技术对硬煤增透效果不理想, 且存在工序繁琐、不能连续作业等问题。针对上述问题, 提出了一种水力压冲一体化增透抽采瓦斯技术, 在钻进过程中利用高压水射流定点(定向、分段)对煤层实施水力增透作业, 可实现集打钻、对软煤水力冲孔及对硬煤水力喷射压裂的一体化作业。揭示了水力压冲一体化增透原理, 即通过水力冲孔将软煤层的部分煤体冲出, 实现软煤层出煤卸压增透, 对硬煤层进行定点水力喷射压裂, 实现硬煤层造缝增透; 研制了水力压冲一体化钻具, 满足高压、大排量的要求, 具备较强的破岩和排屑能力, 其工序简单、可操控性强; 给出了高压水射流冲孔和水力喷射压裂时的钻具操控方法, 探讨了钻进时冲压工艺和退钻时冲压工艺。在某矿 16101 底抽巷使用水力压冲一体化钻具进行了现场工程试验, 结果表明: 在软煤段进行水力冲孔作业, 比传统水力冲孔缩短时间 60%~80%, 而单孔出煤量增加了约 2 倍, 单孔平均百米瓦斯抽采纯量提高了 1 倍; 在硬煤段进行水力喷射压裂作业, 单孔平均百米瓦斯抽采纯量比传统水力冲孔提高了 2 倍。

关键词: 瓦斯抽采; 煤层增透; 水力压冲一体化; 水力冲孔; 水力喷射压裂

中图分类号: TD712

文献标志码: A

Hydraulic fracturing and punching integration enhanced permeability gas extraction technology

WANG Baogui^{1,2}

(1. Duerping Mine, Shanxi Coking Coal Xishan Coal and Electricity Group Company, Taiyuan 030053, China;

2. School of Continuing Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The existing hydraulic fracturing, hydraulic punching, hydraulic slotting, hydraulic cutting and other underground hydraulic permeability enhancement technologies in coal mines have complex processes, single adaptability conditions, and high labor intensity. However, drilling and punching integration, drilling and expansion integration, hydraulic punching/fracturing integration and other technologies are not ideal for enhancing the permeability of hard coal. There are problems such as cumbersome processes and inability to operate continuously. In order to solve the above problems, a hydraulic fracturing and punching integration enhanced permeability gas extraction technology is proposed. During the drilling process, high-pressure water jet is used to perform hydraulic enhanced permeability operations on coal seams at fixed points (directional, segmented). It can achieve integrated drilling, hydraulic punching of soft coal, and hydraulic injection fracturing of hard coal. The study reveals the principle of hydraulic fracturing and punching integration permeability enhancement. The hydraulic punching is used to flush out part of the coal body in soft coal seams, achieving pressure relief and permeability enhancement of soft coal seams. The fixed-point hydraulic jet fracturing is performed on hard coal

收稿日期: 2023-05-06; 修回日期: 2024-01-20; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 河南省科技攻关项目(212102310599)。

作者简介: 王宝贵(1987—), 男, 河南南阳人, 工程师, 硕士, 主要从事煤矿瓦斯治理工作, E-mail: 1031715958@qq.com。

引用格式: 王宝贵. 水力压冲一体化增透抽采瓦斯技术[J]. 工矿自动化, 2024, 50(1): 35-41.

WANG Baogui. Hydraulic fracturing and punching integration enhanced permeability gas extraction technology[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(1): 35-41.



扫码移动阅读

seams, achieving fracture formation and permeability enhancement in hard coal seams. The drilling tool of hydraulic fracturing and punching integration is developed to meet the requirements of high pump pressure and large displacement. The drilling tool has strong rock breaking and chip removal capabilities. The process is simple and controllable. The drilling tool control methods for high-pressure water jet punching and hydraulic jet fracturing are provided. The stamping process during drilling and stamping process during drill withdrawal are discussed. The on site engineering tests are conducted using fracturing and punching integration drilling tools in the 16101 bottom drainage roadway of a coal mine. The results show that hydraulic punching operation in the soft coal section shortens the time by 60% to 80% compared to traditional hydraulic punching. The coal output from a single hole increases by about 2 times, and the average gas extraction purity per 100 meters per hole increases by 1 time. The hydraulic jet fracturing operation is carried out in the hard coal section. The average gas extraction purity per 100 meters per hole increases by 2 times compared to traditional hydraulic punching.

Key words: gas extraction; coal seam permeability enhancement; hydraulic fracturing and punching integration; hydraulic punching; hydraulic jet fracturing

0 引言

煤层瓦斯是成煤过程中形成的以甲烷为主的伴生气体,是造成煤与瓦斯突出和瓦斯爆炸灾害的主因^[1-2]。瓦斯抽采是治理瓦斯最直接、最有效的方法。我国大多数矿井具有高瓦斯、低渗透的特点,实现低渗煤层高效抽采瓦斯的关键是煤矿井下水力增透技术^[3]。

煤矿井下水力增透技术在国内多个大型矿区得到推广应用,有效遏制了煤与瓦斯突出事故的发生,取得了显著经济效益^[4-6]。目前,煤矿井下水力增透技术主要有水力压裂^[7-8]、水力冲孔^[9-11]、水力掏槽^[12]、水力割缝^[13-15]等。水力压裂是一种对低渗硬煤层有效增透的技术,通过压裂造缝实现煤层增透,但由于煤矿井下条件限制,压裂泵的排量往往难以满足煤层滤失的要求,对于厚煤层只能是煤层注水,难以实现增透消突目的。水力冲孔是一种对低渗软煤层有效增透的技术,通过高压水射流冲出部分煤体,起到出煤卸压的作用,但存在对硬煤破煤动力不足的问题。水力掏槽的原理类似于开采保护层,通过高压水射流破碎煤体形成矩形槽的孔洞,具备快速消突、提高煤巷掘进速度的作用,然而施工时容易出现瓦斯超限、诱导煤与瓦斯突出,且卸压范围有限、施工条件要求较高,仅在个别煤矿采用。水力割缝是以高压水为动力,在煤层内开 1 条扁平缝槽,相当于在局部范围内开采了 1 层极薄的保护层,实现煤层内部卸压增透,但存在硬煤割不动、软煤割不整的问题。上述各项技术在一定程度上有效增加了煤层的渗透性,但均涉及打钻、水力增透、联网抽采等步骤,工艺复杂、适应条件单一、劳动强度大,难以满足煤矿企业对瓦斯治理工作提出的更高要求^[15-16]。

为进一步提高煤层增透效果,实现瓦斯由“抽得出”向“抽得快、抽得省、抽得纯和抽得净”转变,有学者提出了钻冲一体化、钻扩一体化、水力冲/压一体化等技术^[17-18],但这些技术对硬煤增透效果不理想,且仍存在工序繁琐、不能连续作业的问题^[19]。因此,本文提出了一种水力压冲一体化增透抽采瓦斯技术,在钻进过程中利用高压水射流定点(定向、分段)对煤层实施水力增透作业,能够实现集打钻、对软煤水力冲孔及对硬煤水力喷射压裂的一体化作业。

1 水力压冲一体化增透原理

水力压冲一体化是指在钻进过程中以静压水为钻进介质,静压水经水力喷射器流向钻头,在钻进/退钻的过程中冷却钻头和排渣;在需要进行冲压操作时,将静压水直接切换为高压水,高压水可通过水力喷射器产生高压水射流逐点实施水力喷射压裂或水力冲孔。该技术在钻进过程中通过高压水射流对硬煤的水力喷射压裂和软煤的水力冲孔“一趟钻”完成,实现对煤层的递进式增透,逐段逐层消除煤层应力和瓦斯压力,使瓦斯抽得更快、更省。

水力喷射压裂和水力冲孔都是利用高压水射流原理,但对硬煤和软煤的增透机制截然不同。水力喷射压裂是以高压流体为介质,当流体通过水力喷射器喷嘴时,将静压能转换成动能,产生高速水射流冲击煤岩形成射孔通道,完成水力射孔^[20]。高速射流持续的冲击作用在孔道端部产生微裂缝,此时高速射流的动能转换为静压能并形成增压,当环空压力与射流增压值之和超过地层破裂压力时,在孔道端部产生裂缝,具有准确在指定位置造缝、可实现自动封隔、节省作业时间、安全高效等优点。硬煤或围岩作为弹性体,可对其进行水力喷射压裂,实现压

制造缝增透。水力冲孔是一种以出煤卸压为核心的增透技术,非常适用于作为塑性体的软煤^[21]。根据摩尔库伦准则,水力冲孔对软煤的剪切破坏,一方面能够克服煤体的黏聚力,在微观上使煤体颗粒发生脱离,另一方面能够克服与煤体所受正应力成正比的摩擦力,在宏观上使煤体产生错动而破坏。这一增透措施与钻进中克服钻孔失稳相反,其破坏特点是通过高压水射流冲出部分煤体,实现诱导小型的煤与瓦斯突出,并在地应力和瓦斯压力的多重作用下,孔周围的煤体向钻孔方向偏移,使影响范围内的瓦斯压力和地应力得以释放,达到出煤卸压增透的目的。

2 水力压冲一体化钻具研制

水力压冲一体化钻具由高压密封水辘、高压密封钻杆、水力喷射器和钻头组成,各部件通过螺纹接头依次连接,如图1所示。正常钻进时用静压水作为介质,对煤层水力增透时切换为高压水。水力压冲一体化钻具与传统钻具的区别在于具备高压密封的特性,且钻杆内通道增大,满足大排量、高泵压的要求,排屑和破岩能力增加,是一种高性能专用钻具。

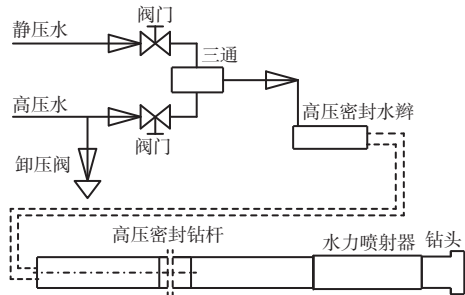


图1 水力压冲一体化钻具组成

Fig. 1 Composition of drilling tool for hydraulic fracturing and punching integration

2.1 高压密封水辘和钻杆

目前煤矿井下使用的水辘和钻杆的抗压能力约为10 MPa,而研制的水力压冲一体化钻具的抗压能力大于50 MPa,确保能够利用高压水射流对煤层进行压冲作业。高压密封钻杆外径为73 mm,并配套直径为113 mm的PDC钻头,使得钻孔的环空增大、排屑通道增加,提高了对钻屑的搬运能力。高压密封钻杆螺纹接头内径由原来的19 mm增加至23 mm,使得高压密封钻杆的过水通道增大,进一步提高了钻具的排屑和破岩能力。

2.2 水力喷射器

水力喷射器由内锥螺纹接头、喷射器本体和外锥螺纹接头组成,如图2所示。内锥螺纹接头和外锥螺纹接头分别连接高压密封钻杆和钻头。阀芯组

合包括同轴向设置的顶盖、阀芯套筒、压力调节套、阀杆、压缩弹簧和滑锁。阀杆的后端固定连接顶盖,阀杆上套有压缩弹簧,阀杆从后向前穿过压力调节套,阀杆的前端设置有外螺纹并与滑锁连接。当高压水作用于顶盖时,顶盖带动滑锁向前滑动,从而切断水力喷射器与钻头的连通,高压水改道汇聚至喷射器本体上的喷嘴喷出,此时压缩弹簧处于压缩状态。喷射器本体上设置有泄压孔,泄压孔减弱了高压水对滑锁的压力并由压缩弹簧带动滑锁复位,从而限制了滑锁的行程,以保证钻进状态与冲压状态的灵活切换。

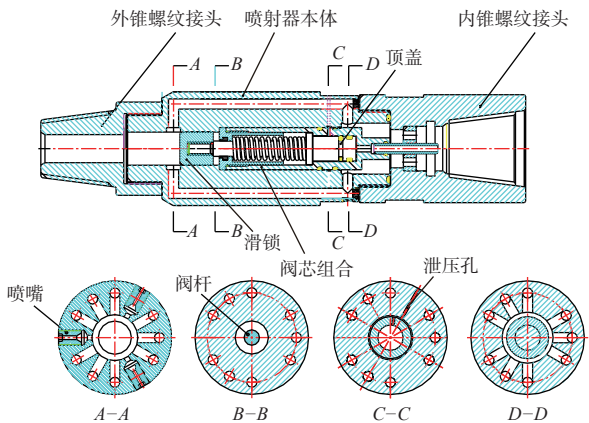


图2 水力喷射器结构

Fig. 2 Hydraulic injector structure

2.3 高压水泵

采用水力压冲一体化增透抽采瓦斯技术时,若柱塞泵排量不足,则极易导致排渣不顺,引发钻孔憋孔、堵孔;若柱塞泵压力较低,则不能保证破煤量,特别是对于硬煤打击力不足,增透效果不佳。因此,选用额定压力为37.5 MPa、额定流量为400 L/min以上的高压水泵为水力压冲一体化钻具提供高压水。

3 水力压冲一体化钻具操控方法及增透工艺

3.1 水力压冲一体化钻具操控方法

1) 以钻进方向为前向,从后至前依次通过螺纹连接高压密封水辘、高压密封钻杆、水力喷射器和钻头,将静压水和高压水接入高压密封水辘,并通过阀门进行控制。

2) 打钻施工前需关闭静压水阀门和高压水阀门,打开卸压阀门,钻进/退钻施工时打开静压水阀门,静压水通过高压密封钻具的通道流向钻头,在钻进/退钻时用于冷却钻头和排渣,确保钻进/退钻的顺利进行。

3) 当需要进行冲压操作时,关闭静压水阀门,打开高压水阀门,启动高压水泵,缓慢关闭卸压阀门,使施工压力缓慢升高到指定压力。高压水作用于水

力喷射器内的阀芯组合,切断与钻头的通道,使高压水从水力喷射器的 3 个喷嘴喷出,形成高压水射流,实施高压水射流冲孔或水力喷射压裂。

4) 对于软煤一边旋转钻杆一边冲孔;对于硬煤实施定点水力喷射压裂。水力压冲一体化钻具操控方法如图 3 所示。

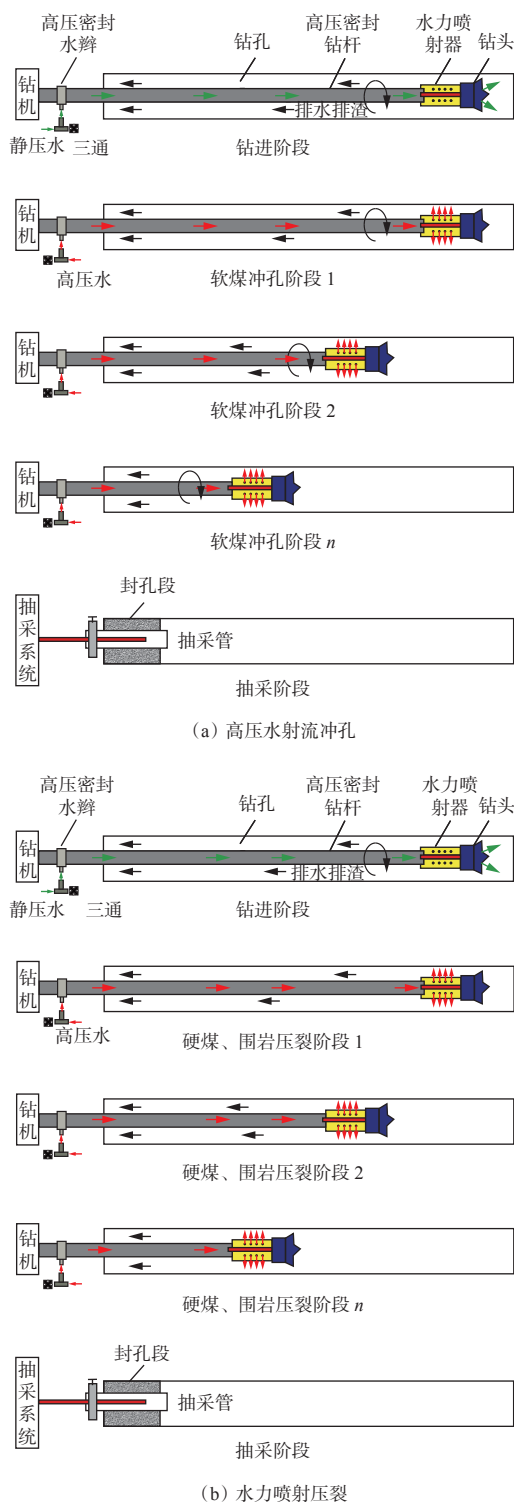


图 3 水力压冲一体化钻具操控方法

Fig. 3 Control method of drilling tool for hydraulic fracturing and punching integration

5) 当某一点的冲孔或压裂作业结束时,打开卸压阀,并及时关闭高压水阀门,切换为静压水,继续移钻至下一个冲孔或压裂作业点,循环作业至施工完整个钻孔后退钻封孔联抽。

3.2 增透工艺

水力压冲一体化增透工艺包括钻进时冲压和退钻时冲压 2 种工艺。

钻进时冲压工艺(图 4):在用静压水打钻到煤岩交界处时,针对硬煤分层进行水力喷射压裂,起到压裂造缝增透作用,针对软煤分层进行高压水射流冲孔,起到出煤卸压增透作用,按设计间距布置冲/压作业点,循环执行“冲/压—钻进”工序,其中,高压水射流冲孔以每米钻孔出煤量 1 t 为达标标准,水力喷射压裂以持续压裂 1 h 为达标标准,直至钻入顶板 0.5 m 完钻。

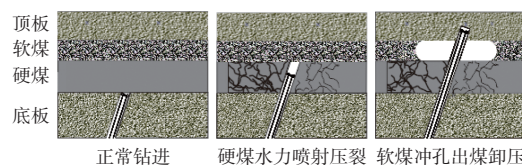


图 4 钻进时冲压工艺

Fig. 4 Stamping process during drilling

退钻时冲压工艺(图 5):在用静压水钻过煤层 0.5 m 完钻后,在退钻过程中进行冲压操作,退钻时由里向外按设计间距布置冲/压作业点,循环执行“冲/压—退钻”工序;也可完钻后退钻至煤岩交界面,由外向里按设计间距布置冲/压作业点,循环执行“冲/压—钻进”工序。

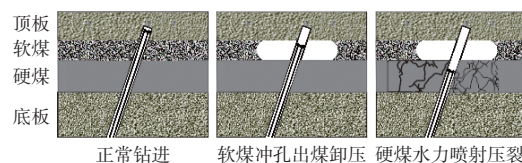


图 5 退钻时冲压工艺

Fig. 5 Stamping process during drill withdrawal

4 现场工程试验及效果评价

4.1 试验区概况

某矿 16101 底抽巷位于 16 采区西翼,由 16 采区西翼底板回风巷统尺 260 m 处开口沿煤层倾向向西掘进,最终与 16061 运输底抽巷贯通。北邻 F₁₆₋₃ 断层防水煤柱。地质构造条件较简单,二₁ 煤层倾向 127°,倾角 10°,煤层由东向西逐渐变厚,煤层厚度在 4.5~9.0 m 之间,平均厚度为 6.3 m。在底板以上 0.3~0.4 m 和顶板以下 1 m 左右为软煤,其余部分为硬煤。瓦斯原始含量为 21.46 m³/t,压力为 1.62 MPa,瓦斯赋存条件较好,巷道掘进区域煤层整体为单斜构

造,煤层直接顶为粉砂岩,直接底为泥岩。二₁煤层埋深为415.2~509.6 m,覆盖层厚度较大、埋藏较深,瓦斯释放困难。

4.2 试验方案

根据16101底抽巷穿层钻孔设计,选取3组钻场为考察钻场,1组钻场为对照钻场,钻场间距为6 m。为避免同一钻场中钻孔之间相互干扰,选取钻场中3号、5号、8号钻孔作为单孔考察钻孔(图6),钻孔参数见表1。

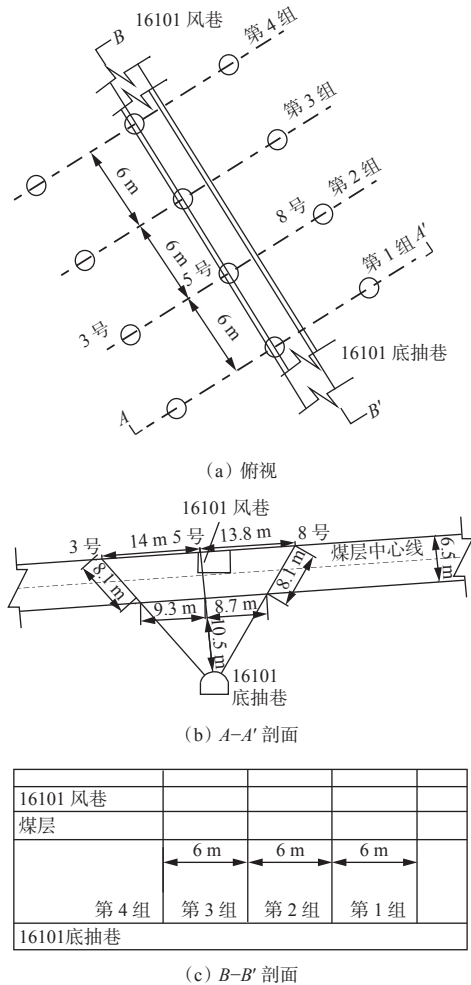


图6 16101底抽巷穿层钻孔布置

Fig. 6 Layout of 16101 bottom extraction roadway through layer drilling

表1 钻孔设计参数

Table 1 Borehole design parameters

孔号	倾角/(°)	方位	孔径/mm	岩段/m	煤段/m	总长/m
3	48.0	下帮	94	13.6	8.1	21.8
5	83.5	下帮	94	10.5	6.5	17.0
8	57.5	上帮	94	13.2	8.1	21.3

为考察水力压冲一体化增透抽采瓦斯技术效果,设计4种试验方案。

1) 第1组钻孔:在硬煤段进行分段定点水力喷

射压裂,在软煤段进行高压水射流冲孔。

2) 第2组钻孔:只在软煤段进行高压水射流冲孔,硬煤段直接略过,目的是考察高压水射流冲孔在软煤段的增透效果。

3) 第3组钻孔:只在硬煤段进行分段定点水力喷射压裂,软煤段直接略过,目的是考察水力喷射压裂在硬煤段的增透效果。

4) 第4组钻孔:使用传统的水力冲孔技术对软煤段进行增透,目的是与前3组钻孔进行对比分析。

在钻进过程中,需结合钻孔施工过程的返渣,判断煤层的软硬分布层位,填写煤体结构统计表,为水力喷射压裂和水力冲孔的层位选择提供依据。

在进行增透操作时,记录施工压力、作业时间、反渣情况及单孔出煤量。退钻后进行封孔连抽。采用CJZ7瓦斯抽采综合参数测定仪每天测定钻孔的瓦斯抽采浓度、流量和负压等参数。

4.3 增透效果评价

第1组钻孔的施工压力为22~25 MPa,在顶板以下1 m软煤段冲孔0.5~1 h,在硬煤段间隔2 m设置1个压裂作业点,单点压裂时间平均为1 h,单孔出煤量为8~12 t。封孔后测得单孔平均百米瓦斯抽采纯量为0.038 9 m³/min(图7)。

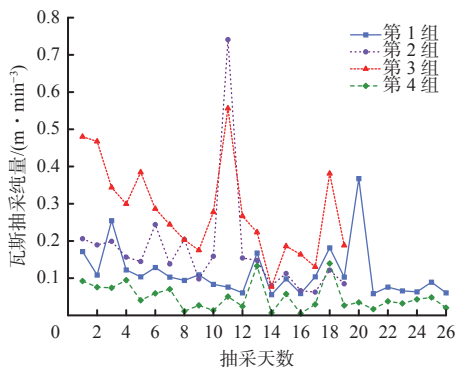


图7 4组钻孔百米瓦斯抽采纯量对比

Fig. 7 Comparison of pure volume of 100 m gas extraction in four groups of boreholes

第2组钻孔的施工压力为21 MPa,冲孔时间为1~2 h,单孔出煤量为10~14 t。封孔后测得该组钻孔的百米瓦斯抽采纯量最高达0.740 8 m³/min,单孔平均百米瓦斯抽采纯量为0.057 7 m³/min(图7)。

第3组钻孔的施工压力为23~25 MPa,在硬煤段间隔2 m设置1个压裂作业点,单点压裂时间平均为1 h,单孔平均出煤量为4~7 t。封孔后测得该组钻孔的百米瓦斯抽采纯量最高达0.556 0 m³/min,单孔平均百米瓦斯抽采纯量为0.088 7 m³/min(图7)。

第4组钻孔使用额定压力为31.5 MPa、额定排量为200 L/min的泵,单孔冲孔时间为5~6 h,出煤

量为 5~6 t。封孔后测得单孔平均百米瓦斯抽采纯量为 0.030 2 m³/min(图 7)。

第 1—3 组钻孔的单孔平均百米瓦斯抽采纯量较第 4 组钻孔分别提高了 0.3, 1 和 2 倍。第 1 组钻孔的百米瓦斯抽采纯量整体低于第 2 组和第 3 组钻孔,这是由于第 1 组钻孔封孔后钻孔的瓦斯抽采体积分数一直低于 20%,封孔质量不佳,但其单孔平均百米瓦斯抽采纯量较传统水力冲孔仍提高了 0.3 倍。第 2 组钻孔仅在软煤段进行水力冲孔作业,比传统水力冲孔缩短时间 60%~80%,而单孔出煤量增加了约 2 倍,单孔平均百米瓦斯抽采纯量提高了 1 倍,起到了很好的出煤卸压增透作用。第 3 组钻孔仅在硬煤段进行水力喷射压裂作业,单孔平均百米瓦斯抽采纯量比传统水力冲孔提高了 2 倍,起到了很好的压裂造缝增透作用。可见,水力压冲一体化增透抽采瓦斯技术在缩短作业时间的同时取得了更好的增透效果。

5 结论

1) 水力压冲一体化增透抽采瓦斯技术是在抽采钻孔的钻进过程中通过高压水射流对硬煤的水力喷射压裂和软煤的水力冲孔“一趟钻”完成,实现对煤层的递进式增透,逐段逐层消除煤层应力和瓦斯压力,使瓦斯抽得更快、更省。

2) 水力压冲一体化钻具满足高泵压、大排量的要求,具备较强的排屑和破岩能力,其工序简单、可操作性强。

3) 现场试验结果表明:使用水力压冲一体化增透抽采瓦斯技术在软煤段进行水力冲孔作业,比传统水力冲孔缩短时间 60%~80%,而单孔出煤量增加了约 2 倍,单孔平均百米瓦斯抽采纯量提高了 1 倍,起到了很好的出煤卸压增透作用;在硬煤段进行水力喷射压裂作业,单孔平均百米瓦斯抽采纯量比传统水力冲孔提高了 2 倍,起到了很好的压裂造缝增透作用。

参考文献(References):

- [1] 陶云奇, 张超林, 许江, 等. 水力冲孔卸压增透物理模拟试验及效果评价[J]. 重庆大学学报, 2018, 41(10): 69-77.
TAO Yunqi, ZHANG Chaolin, XU Jiang, et al. Effect evaluation on pressure relief and permeability improvement of hydraulic flushing physical experiment[J]. Journal of Chongqing University, 2018, 41(10): 69-77.
- [2] 李国富, 李超, 霍春秀, 等. 山西重点煤矿区瓦斯梯级利用关键技术与工程示范[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(9): 42-50.
- LI Guofu, LI Chao, HUO Chunxiu, et al. Key technology and engineering demonstration for cascade utilization of gas in key coal mining areas of Shanxi Province, China[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(9): 42-50.
- [3] 郭超奇, 赵继展, 李小建, 等. 中硬低渗煤层定向长钻孔水力压裂瓦斯高效抽采技术与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(6): 103-108, 115.
GUO Chaoqi, ZHAO Jizhan, LI Xiaoqian, et al. Technology and application of high efficiency gas extraction by directional long borehole hydraulic fracturing in coal seams of medium hardness and low permeability[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(6): 103-108, 115.
- [4] 张帅, 刘志伟, 韩承强, 等. 高突低渗透煤层超高压水力割缝卸压增透研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(4): 147-151.
ZHANG Shuai, LIU Zhiwei, HAN Chengqiang, et al. Study on coal pressure relief and permeability increase through ultra-high pressure hydraulic slotting in high outburst and low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(4): 147-151.
- [5] 刘见中, 孙海涛, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 258-267.
LIU Jianzhong, SUN Haitao, LEI Yi, et al. Current situation and development trend of coalbed methane development and utilization technology in coal mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 258-267.
- [6] 陈洪涛, 李太训. 薛湖煤矿超高压水力割缝工艺参数优化试验[J]. 工矿自动化, 2020, 46(1): 90-94.
CHEN Hongtao, LI Taixun. Optimization test of ultra-high pressure hydraulic slotting process parameters in Xuehu Coal Mine[J]. Industry and Mine Automation, 2020, 46(1): 90-94.
- [7] 姜婷婷, 张建华, 黄刚. 煤岩水力压裂裂缝扩展形态试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 3677-3684.
JIANG Tingting, ZHANG Jianhua, HUANG Gang. Experimental study of fracture geometry during hydraulic fracturing in coal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 3677-3684.
- [8] 董志勇. 煤矿井下水力压裂切顶卸压护巷技术应用研究[J]. 工矿自动化, 2019, 45(10): 99-103.
DONG Zhiyong. Application research on roadway protection technology by hydraulic fracturing roof cutting pressure relief in underground coal mine[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(10): 99-103.
- [9] 张福旺, 秦汝祥, 杨应迪. 密集水力冲孔增透抽采瓦斯试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(4): 142-148.

- ZHANG Fuwang, QIN Ruxiang, YANG Yingdi. Experimental study on gas extraction with intensive hydraulic punching and penetration enhancement[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(4): 142-148.
- [10] 王恩元, 汪皓, 刘晓斐, 等. 水力冲孔孔洞周围煤体地应力和瓦斯时空演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(1): 39-45.
- WANG Enyuan, WANG Hao, LIU Xiaofei, et al. Spatio temporal evolution of geostress and gas field around hydraulic punching borehole in coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(1): 39-45.
- [11] 刘东, 刘文. 水力冲孔压裂卸压增透抽采瓦斯技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(3): 136-141.
- LIU Dong, LIU Wen. Research on gas extraction technology: hydraulic stamping and hydrofracture to pressure relief and permeability improvement[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(3): 136-141.
- [12] GU Beifang, HU Ruili, WANG Longkang, et al. Study on the influence rule of high-pressure water jet nozzle parameters on the effect of hydraulic slotting[J]. Geofluids, 2022(8): 1-10.
- [13] 杜金磊, 张民波, 张电吉, 等. 低透气突出煤层水力割缝协同卸压增透技术[J]. 工矿自动化, 2021, 47(7): 98-105.
- DU Jinlei, ZHANG Minbo, ZHANG Dianji, et al. Hydraulic cutting cooperative pressure relief and permeability enhancement technology in low permeability outburst coal seam[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(7): 98-105.
- [14] 王正帅. 碎软煤层顺层钻孔水力割缝增透技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(8): 147-151.
- WANG Zhengshuai. Research on hydraulic slitting anti-reflection technology for borehole drilled along broken soft coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 147-151.
- [15] 梁银权, 王进尚, 冯星宇. 高瓦斯低透气性煤层深钻孔高压水力割缝增透技术[J]. 煤炭工程, 2019, 51(6): 99-102.
- LIANG Yinquan, WANG Jinshang, FENG Xingyu. Permeability-increasing technology of deep drilling super-high pressure hydraulic cutting in high gas and low permeability coal seam[J]. Coal Engineering, 2019, 51(6): 99-102.
- [16] 卢义玉, 李瑞, 鲜学福, 等. 地面定向井+水力割缝卸压方法高效开发深部煤层气探讨[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 876-884.
- LU Yiyu, LI Rui, XIAN Xuefu, et al. Discussion on the efficient exploitation method of deep coalbed methane with pressure relief by ground directional well+hydraulic slotting[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 876-884.
- [17] 王正帅. 水力化增透技术在碎软煤层瓦斯抽采中的应用研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(2): 85-89.
- WANG Zhengshuai. Application of hydraulic permeability-enhancing in gas extraction of broken soft coal seam in Xinjiang[J]. Coal Engineering, 2021, 53(2): 85-89.
- [18] 司徒俊. 冲压一体化联合增透技术在软煤层瓦斯治理中的应用研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(增刊2): 348-352.
- SI Junting. Research on the application of stamping integration combined anti-reflection technology in gas treatment of soft coal seam[J]. China Mining Magazine, 2020, 29(S2): 348-352.
- [19] 苏现波, 宋金星, 郭红玉, 等. 煤矿瓦斯抽采增产机制及关键技术[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(12): 1-30.
- SU Xianbo, SONG Jinxing, GUO Hongyu, et al. Increasing production mechanism and key technology of gas extraction in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(12): 1-30.
- [20] 于世耀. 钻冲压一体化瓦斯抽采增产技术及应用研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2020.
- YU Shiyao. Study on the stimulation technology and application of gas drainage by hydraulic drilling flushing and fracturing integration[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2020.
- [21] SONG Jinxing, ZHANG Huiyan, YU Shiyao, et al. Application of integrated drilling and stamping technology in gas extraction through layer drilling[J]. Energy Exploration & Exploitation, 2022, 40(4): 1113-1130.