

文章编号: 1671-251X(2024)03-0160-07

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2023080114

水力压裂弱化顶板护孔技术

薛江达, 孙永康, 王军, 张庚

(太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 晋中 030600)

摘要: 煤矿工作面单翼布置顺序开采的情况下, 工作面顺层钻孔容易受到邻近工作面采动支承应力影响导致钻孔失效。现阶段的护孔研究集中在增强钻孔本身强度, 未针对影响钻孔稳定性的根本性因素提出解决措施。针对上述问题, 提出了一种水力压裂弱化顶板护孔技术。通过水力压裂弱化顶板, 减小作用在邻近工作面煤体上的采动支承应力峰值, 阻断高支承应力向顺层钻孔周围煤体的传递, 并在顺层钻孔内全程下筛管, 保证煤体逸散出的瓦斯可以进入顺层钻孔。采用数值模拟分析了水力压裂弱化顶板前后顺层钻孔周围煤体垂直应力和塑性区变化规律, 结果表明: 通过水力压裂弱化顶板, 顺层钻孔周围煤体的垂直应力峰值由 21.2 MPa 降低为 9.1 MPa, 煤体塑性区范围由 19 m 减小为 11 m。根据数值模拟结果确定的水力压裂参数进行了现场测试, 结果表明: 采用水力压裂弱化顶板护孔技术后, 钻孔瓦斯抽采体积分数平均值由 3.6% 提高到 14.1%, 瓦斯抽采混合流量平均值由 1.28 m³/min 降低为 0.464 m³/min, 未出现大范围顺层钻孔内发生煤体氧化而产生 CO 的情况。因此, 水力压裂弱化顶板护孔技术可有效避免钻孔失效漏气, 提高钻孔抽采效果, 保证钻孔抽采安全。

关键词: 水力压裂; 弱化顶板; 采动支承应力; 顺层钻孔; 塑性区

中图分类号: TD712.6

文献标志码: A

Hydraulic fracturing weakening roof borehole protection technology

XUE Jiangda, SUN Yongkang, WANG Jun, ZHANG Geng

(School of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology,
Jinzhong 030600, China)

Abstract: In the case of sequential mining with single wing arrangement in coal mine working face, the drilling along the working face is easily affected by the support stress of adjacent working faces, leading to drilling failure. At present, research on borehole protection focuses on enhancing the strength of the borehole itself, without proposing solutions to the fundamental factors that affect borehole stability. In order to solve the above problems, a hydraulic fracturing weakening roof borehole protection technology has been proposed. By using hydraulic fracturing to weaken the roof, the peak mining support stress acting on adjacent coal working faces is reduced, and the transmission of high support stress to the surrounding coal bodies in the bedding boreholes is blocked. The entire process of screening is carried out in the bedding boreholes to ensure that the gas escaping from the coal body can enter the bedding boreholes. Numerical simulation is used to analyze the changes in vertical stress and plastic zone of the coal body around the borehole before and after hydraulic fracturing weakening the roof. The results show that by weakening the roof through hydraulic fracturing, the peak vertical stress of the coal body around the borehole decreases from 21.2 MPa to 9.1 MPa, and the plastic zone range of the coal body decreases from 19 m to 11 m. According to the numerical simulation results, hydraulic fracturing

收稿日期: 2023-08-29; 修回日期: 2024-03-26; 责任编辑: 盛男。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52004176)。

作者简介: 薛江达(1998—), 男, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为煤矿安全和瓦斯治理技术, E-mail: xuejiangda@126.com。通信作者: 王军(1982—), 男, 山西和顺人, 副研究员, 硕士, 主要研究方向为煤矿瓦斯及火防治理论与技术, E-mail: wangjun02182@163.com。

引用格式: 薛江达, 孙永康, 王军, 等. 水力压裂弱化顶板护孔技术[J]. 工矿自动化, 2024, 50(3): 160-166.

XUE Jiangda, SUN Yongkang, WANG Jun, et al. Hydraulic fracturing weakening roof borehole protection technology[J]. Journal of Mine Automation, 2024, 50(3): 160-166.



扫码移动阅读

parameters are determined and tested on site. The results show that after using hydraulic fracturing weakening roof borehole protection technology, the average volume fraction of gas extraction from boreholes increases from 3.6% to 14.1%. The average mixed flow rate of gas extraction decreases from 1.28 m³/min to 0.464 m³/min. There is no occurrence of coal oxidation and CO production in a large area of bedding boreholes. Therefore, hydraulic fracturing weakening roof borehole protection technology can effectively avoid drilling failure and gas leakage, improve drilling and extraction efficiency, and ensure drilling and extraction safety.

Key words: hydraulic fracturing; weakening roof; mining support stress; horizontal drilling; plastic zone

0 引言

瓦斯是威胁煤矿井下安全生产主要的因素之一^[1-3]。顺层钻孔是矿井回采工作面的主要瓦斯治理方式,工作面回采前要施工顺层钻孔预抽煤层瓦斯,抽采达标后才可安排回采作业^[4-5]。采区内单翼布置顺序开采的工作面回采过程中,极易在邻近工作面煤体中形成较高的采动支承应力,导致工作面煤体大范围塑性区破坏,从而造成邻近工作面煤体中提前施工的顺层钻孔的封孔段发生破坏,使得顺层钻孔失效,严重制约了工作面安全高效生产^[6-8]。

为提高顺层钻孔的稳定性,保证其抽采效果,有学者对护孔技术进行了研究。姚向荣等^[9]基于注浆固化成孔新理论,对工作面巷道抽采钻孔围岩弱结构破坏失稳进行了有效控制。叶高榜^[10]分析了钻孔坍塌、变形的力学条件,提出了用于解决松软煤层钻孔塌孔的新型内支撑护孔管。孟晓红^[11]建立了不同角度钻孔塌孔的力学模型,提出了采取小直径钻孔、增加钻孔支护强度等方式提高钻孔稳定性。张金宝^[12]开发了钻孔内水力输送分组筛管自主对接完孔工艺技术,实现了钻孔全孔段筛管护孔。李润泽等^[13]利用大通孔螺旋钻孔配合可开闭钻头对煤层钻孔进行全程下筛管护孔工艺研究,解决了钻孔易发生塌孔的问题。陈超等^[14]提出了采用跟管护孔钻进工艺过高应力区,以达到护壁效果。张鹏等^[15]提出了全长筛管护孔技术,以防止钻孔漏气而影响抽采效果。

现阶段的研究主要集中在增强钻孔本身强度,并未针对影响钻孔稳定性的根本性因素提出解决措施。本文以山西和顺正邦良顺煤业有限公司(以下简称良顺煤矿)150205工作面顺层钻孔受邻近工作面采动影响为工程背景,通过分析顺层钻孔失稳原因,提出了一种水力压裂弱化顶板护孔技术。利用数值模拟与现场实践相结合的方式,研究水力压裂弱化顶板对顺层钻孔的保护效果。

1 工程背景

良顺煤矿井田位于沁水煤田东北部。井田地质

总体上为单斜构造,地层倾角平缓,中部为褶曲构造并发育有8条正断层。煤矿主采15号煤层,且为单翼开采,煤层平均厚度为4.8 m,平均埋深为450 m,工作面基本顶以K2石灰岩和细粒砂岩为主,总厚度为12.0 m。工作面地质柱状图如图1所示。

柱状	层位	层厚/m	岩性描述
	细粒砂岩	5.0	灰色,细砂质结构,块状构造,含有微量重矿物、不透明矿物
	K2 石灰岩	7.0	深灰色,裂隙发育并被方解石脉充填,略含砂质,较硬
	泥岩 02	4.3	黑色,含有大量的沥青质裂隙发育,具有明显接痕,顶部为水平层理
	14 号煤	0.4	黑色,结构简单,不含夹矸
	泥岩 01	8.6	黑色,含有大量的沥青质裂隙发育,具有明显接痕,顶部为水平层理
	15 号煤	4.8	黑色,块状、粉末状,条痕为黑色
	铝质泥岩	7.0	黑色,含有大量的植物化石,裂隙发育,局部含铝铁矿结核

图1 工作面地质柱状图

Fig. 1 Geological column histogram of the working face

工作面布置如图2所示。150203工作面为回采工作面,临近150205工作面为顺层钻孔预抽煤层瓦斯工作面,工作面煤柱宽度为20 m。150205工作面顺层钻孔孔径为108 mm,钻孔间距为2 m,钻孔长度为80 m。随着150203工作面回采,采动支承应力沿顶板坚硬岩层传递到150205工作面煤柱和煤体,造成顺层钻孔周围煤体的塑性区扩展,影响钻孔封孔效果,导致其失效或抽采效果降低。

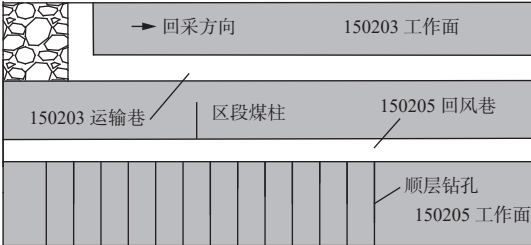


图2 工作面布置

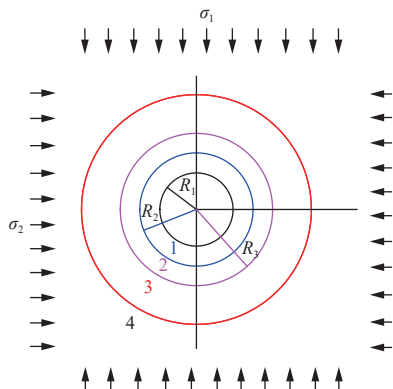
Fig. 2 Layout of the working face

2 顺层钻孔失稳分析

2.1 顺层钻孔应力分布特征

基于巷道围岩松动圈理论^[16-18],类比分析顺层

钻孔在支承应力作用下周围亦存在破碎区和塑性区。在理想状态下,钻孔围岩弹塑性区分布如图 3 所示。其中, σ_1 为垂直应力, MPa; σ_2 为水平应力, MPa; R_1 为钻孔半径, m; R_2 为破碎区半径, m; R_3 为塑性区半径, m。



1—破碎区; 2—塑性区; 3—弹性区; 4—原岩应力区。

图 3 钻孔围岩弹塑性区分布

Fig. 3 Distribution of borehole surrounding rock elastoplastic zones

根据弹性力学模型可知^[19-21], 钻孔位于围岩弹性范围的非均匀引力场中, 巷道围岩处于弹性状态, 可得

$$\sigma_1 = p_0 \left(1 - \frac{R_3^2}{r^2} \right) + \sigma \frac{R_3^2}{r^2} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = p_0 \left(1 + \frac{R_3^2}{r^2} \right) + \sigma \frac{R_3^2}{r^2} \quad (2)$$

式中: p_0 为围岩初始支护力, MPa; r 为钻孔孔径, m; σ 为围岩应力, MPa。

2.2 钻孔失稳破坏影响因素

1) 顺层钻孔施工完成后, 钻孔形状固定, 孔壁稳定。由于煤体中支承应力的影响, 钻孔孔壁煤体发生蠕变, 随着抽采时间延长, 孔壁煤体较软处会形成坍塌而完全阻塞瓦斯的流动通道。

2) 顺层钻孔施工完成后, 钻孔周围的应力场趋于稳定, 且钻孔未发生破坏。当钻孔周围煤体受扰动或采动影响时, 会发生支承应力的重新分布, 并产生较高的支承应力峰值, 造成煤体塑性区扩展, 使顺层钻孔封孔区发生破坏, 影响钻孔抽采效果。

3 水力压裂弱化顶板护孔技术数值模拟

3.1 水力压裂弱化顶板护孔原理分析

水力压裂可降低坚硬基本顶的强度, 优化基本顶的断裂位置, 减小作用在邻近工作面煤体上的采动支承应力峰值, 切断应力传播路径。作用在顺层钻孔周围煤体中的应力峰值降低后, 可有效防止钻孔周围煤体发生较大范围的塑性破坏而导致钻孔封孔段失效而漏气。

顺层钻孔全孔段下置筛管, 保证煤体与钻孔之间存在气体流通的通道, 水力压裂弱化顶板护孔技术可很好地保护钻孔封孔段的密封性, 从而保证顺层钻孔的抽采效果。

3.2 模型建立及参数设定

根据矿井地质柱状图及岩石力学试验结果, 各岩层物理力学参数见表 1。

表 1 各岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of each rock formation

岩性	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
铝质泥岩	10.0	5.00	2.50	40	2.0	2 530
15号煤	5.3	2.36	1.25	32	1.5	1 380
泥岩01	10.0	6.00	1.50	23	1.3	2 300
14号煤	5.3	2.36	1.25	32	1.5	1 380
泥岩02	10.0	6.00	1.50	23	1.3	2 300
K2石灰岩	14.0	9.00	3.00	40	2.0	2 800
细粒砂岩	15.0	9.20	2.70	32	2.5	2 700

从工程实际角度出发, 确定数值模型尺寸为 150 m×150 m×37.1 m (长×宽×高), 共有 400 000 个单元和 417 231 个节点, 选用摩尔-库仑本构模型, 数值模型如图 4 所示。图中沿煤层走向为 x 轴, 沿煤层倾向为 y 轴, 垂直于煤层方向为 z 轴。

150205 工作面埋深为 450 m, 计算上覆岩层荷载, 施加的垂直应力约为 10 MPa。根据良顺煤矿的地质资料, 侧压系数取 1.2。模型边界设置为不透水

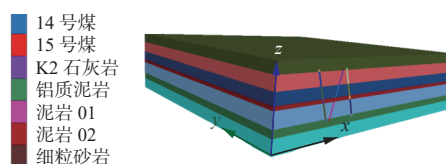


图 4 数值模型

Fig. 4 Numerical model

边界。限制模型向四周变形移动, 即将模型的前后

左右及底面的位移、速度限制为零,将模型的上边界作为自由边界。

设置 $x=15\sim 18\text{ m}$, $y=0\sim 150\text{ m}$, $z=7\sim 10\text{ m}$ 处为 150205 回风巷, $x=38\sim 138\text{ m}$, $y=10\sim 50\text{ m}$, $z=7\sim 10\text{ m}$ 处为回采范围,并预留 20 m 宽煤柱。考虑到工程实际情况,水力压裂钻孔布置在 150205 回风巷两侧 $y=20\sim 60\text{ m}$, $z=10\text{ m}$ 处,沿 y 轴方向每 10 m 设置 1 个水力压裂钻孔,并在临近 150203 运输巷相同位置布置水力压裂钻孔。水力压裂钻孔穿过 K2 石灰岩,钻孔角度为 75° ,钻孔孔径为 75 mm。注水压力为 20~27 MPa,每个钻孔压裂 4 次,每个压裂段都在关键层中,每个压裂段压裂时间为 30 min。

3.3 水力压裂弱化顶板前后煤体破坏规律分析

当煤层上部赋存坚硬顶板时,邻近工作面回采会在钻孔附近的煤体形成应力集中区域,如图 5 所示。

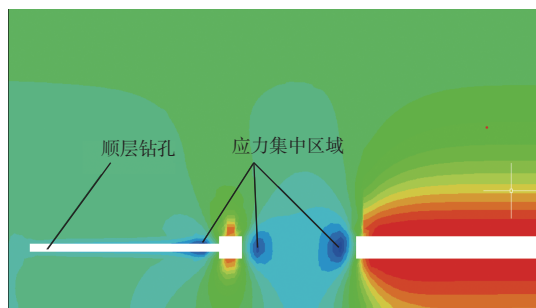


图 5 钻孔周围煤体应力分布云图

Fig. 5 Cloud map of coal stress distribution around borehole

水力压裂弱化顶板前,邻近工作面回采 40 m 过程中,钻孔周围煤体垂直应力演化规律如图 6 所示。可看出邻近工作面回采至 10 m 时,钻孔周围煤体的垂直应力峰值为 15.6 MPa,此时钻孔周围煤体受采动支承应力影响较小;回采至 20 m 时,钻孔周围煤体的垂直应力峰值为 18.1 MPa,采动支承应力对钻孔周围煤体的影响逐渐变大;回采至 30 m 时,钻孔周围煤体的垂直应力峰值为 21.2 MPa,此时采动支承应力对钻孔周围煤体的影响达到最大;回采至 40 m 时,钻孔周围煤体的垂直应力峰值减小,为 17.3 MPa。

水力压裂弱化顶板后,邻近工作面回采 40 m 过程中,钻孔周围煤体垂直应力演化规律如图 7 所示。可看出邻近工作面回采至 10, 20, 30, 40 m 时,钻孔周围煤体的垂直应力峰值分别为 8.6, 8.9, 9.0, 9.1 MPa。水力压裂弱化顶板后,钻孔周围煤体的垂直应力峰值降低了 57.1%,能够很好地避免钻孔周围煤体的塑性区扩展,保证钻孔的封孔和抽采效果。

钻孔周围煤体受采动支承应力影响时,会在煤体中造成塑性区扩展,如图 8 所示。可看出邻近工

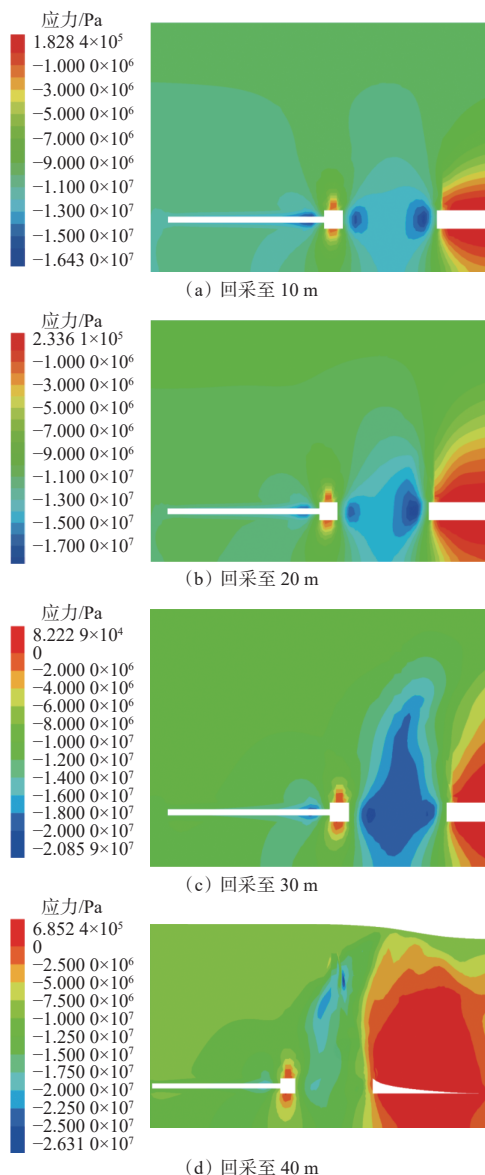


图 6 水力压裂弱化顶板前煤体垂直应力演化规律

Fig. 6 Evolution law of vertical stress of coal before hydraulic fracturing weakening roof

作面回采后,由于钻孔周围煤体受较高采动支承应力的影响,煤体发生塑性破坏的范围较大,塑性区范围约为 19 m;采用水力压裂弱化顶板后,作用在钻孔周围煤体的采动支承应力峰值大大降低,煤体发生塑性破坏的范围减小,塑性区范围约为 11 m,塑性区范围减小了 42.1%。

4 水力压裂弱化顶板护孔技术现场实测

为改善 150205 回风巷内顺层钻孔周围煤体的应力环境,使钻孔能够更好地发挥预抽作用,降低煤层瓦斯含量,在 150205 回风巷距切眼 350~550 m 区域实施水力压裂弱化顶板护孔技术。根据取芯样本,水力压裂弱化的目标岩层是由 7 m 厚石灰岩和 5 m 厚细粒砂岩组成的基本顶。

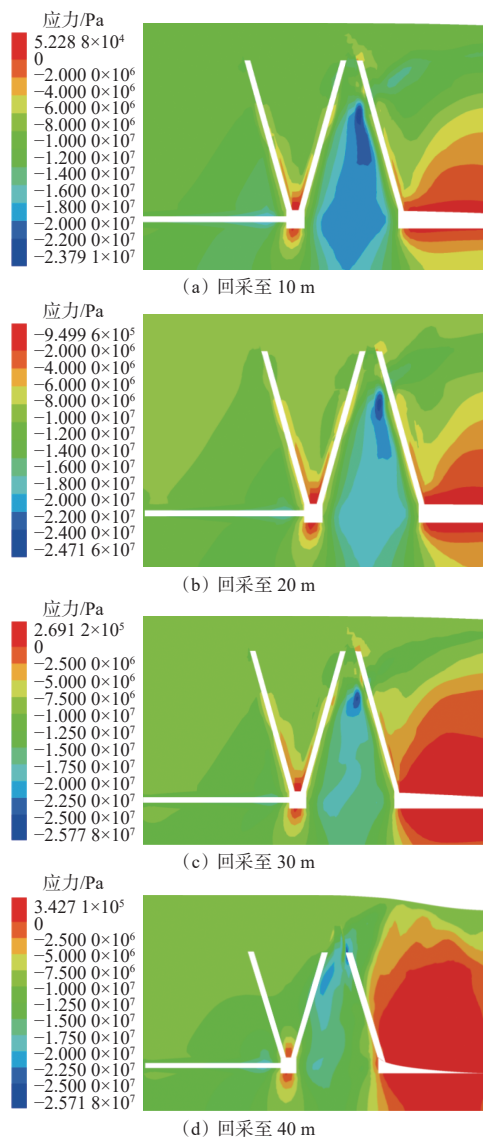


图 7 水力压裂弱化顶板后煤体垂直应力演化规律

Fig. 7 Evolution law of vertical stress of coal after hydraulic fracturing weakening roof

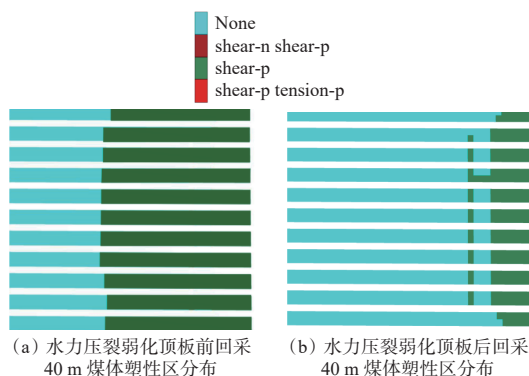


图 8 水力压裂弱化顶板前后回采 40 m 时煤体塑性区分布

Fig. 8 Plastic zone distribution of coal when mining 40 m before and after hydraulic fracturing weakening roof

水力压裂弱化顶板施工如图 9 所示。具体实施方案: 在 150203 运输巷向煤柱帮施工水力压裂钻孔, 在 150205 回风巷两侧施工水力压裂钻孔; 钻孔

设计深度为 32 m, 倾角为 75°, 孔径为 75 mm, 间距为 10 m; 每个钻孔采取后退式水力压裂方式, 每后退 2.5 m 压裂 1 次, 单孔压裂 4 次, 每个钻孔压裂时间为 30 min, 注水压力为 20~27 MPa。

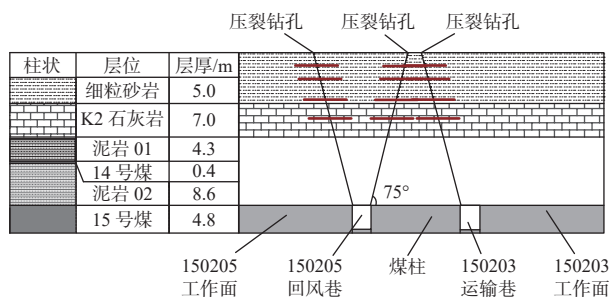


图 9 水力压裂弱化顶板施工

Fig. 9 Construction of hydraulic fracturing weakening roof

150205 回风巷内顺层钻孔长度为 60 m, 钻孔孔径为 108 mm, 封孔管径为 63 mm, 封孔深度为 18 m。在受采动影响的 150205 回风巷进行水力压裂弱化顶板区域选取 3 组顺层钻孔, 编号分别为 1-1, 1-2, 1-3, 与切眼的距离分别为 400, 450, 500 m, 每组各有 8 个钻孔; 在受采动影响的 150205 回风巷未进行水力压裂弱化顶板区域选取 3 组顺层钻孔, 编号分别为 2-1, 2-2, 2-3, 与切眼的距离分别为 100, 150, 200 m, 每组各有 8 个钻孔。每组顺层钻孔中布置汇流管、放水器和计量装置, 通过测定顺层钻孔中瓦斯抽采体积分数、瓦斯抽采流量和 CO 体积分数来分析水力压裂弱化顶板护孔效果。

各组钻孔的瓦斯抽采体积分数如图 10 所示。可看出受采动影响的 150205 回风巷进行水力压裂弱化顶板区域的 3 组钻孔瓦斯抽采体积分数最大值达 18.2%, 平均值为 14.1%; 未进行水力压裂弱化顶板区域的 3 组钻孔瓦斯抽采体积分数最大值为 9.3%, 平均值为 3.6%, 且有钻孔出现瓦斯抽采体积分数接近 0 的情况。

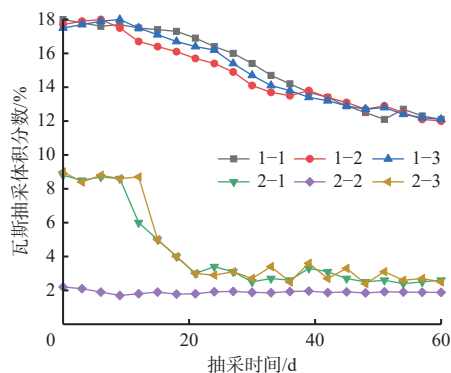


图 10 瓦斯抽采体积分数变化曲线

Fig. 10 Variation curve of gas extraction volume fraction

各组钻孔的瓦斯抽采混合流量如图 11 所示。可看出受采动影响的 150205 回风巷进行水力压裂弱化

顶板区域的3组钻孔瓦斯抽采混合流量平均值为 $0.464\text{ m}^3/\text{min}$;未进行水力压裂弱化顶板区域的3组钻孔瓦斯抽采混合流量平均值为 $1.28\text{ m}^3/\text{min}$,这是由于未进行水力压裂弱化顶板区域的钻孔封孔段出现漏气的情况。

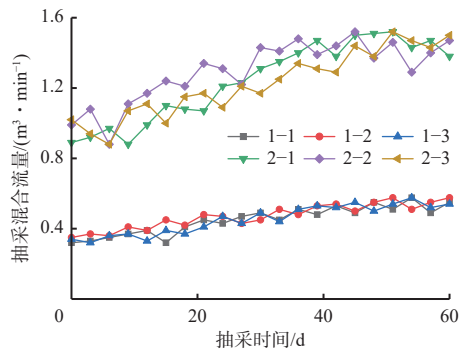


图11 瓦斯抽采混合流量变化曲线

Fig. 11 Variation curve of mixed flow rate of gas extraction

各组钻孔的CO体积分数如图12所示。可看出受采动影响的150205回风巷进行水力压裂弱化顶板区域的3组钻孔CO体积分数最大值为 8×10^{-6} ;未进行水力压裂弱化顶板区域的3组钻孔的CO体积分数最大值为 44×10^{-6} ,平均值为 38×10^{-6} ,这是由于未进行水力压裂弱化顶板区域出现顺层钻孔与巷道通过煤壁裂隙贯通的情况,造成钻孔内煤体氧化产生较多的CO。

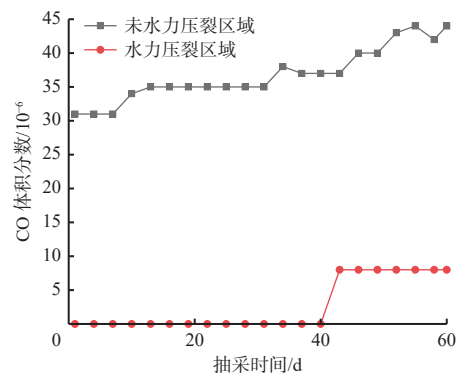


图12 CO体积分数变化曲线

Fig. 12 Variation curve of CO volume fraction

在实施水力压裂弱化顶板护孔技术后,钻孔瓦斯抽采浓度明显提高,瓦斯抽采混合流量大幅降低,钻孔内煤体基本不会出现氧化反应而产生CO,提高了钻孔抽采效果,保证了钻孔抽采安全。

5 结论

1) 水力压裂弱化顶板护孔技术一方面降低了采动支承载力的峰值,另一方面阻断了高支承载应力向顺层钻孔周围煤体的传递。数值模拟结果表明,顺层钻孔周围煤体的垂直应力峰值由 21.2 MPa 降低

为 9.1 MPa ,降低了57.1%。

2) 水力压裂弱化顶板护孔技术可减小临近巷道煤壁塑性区范围,避免顺层钻孔封孔段全区域的塑性破坏。数值模拟结果表明,随着钻孔周围煤体支承载应力峰值降低,煤体塑性区范围由 19 m 减小为 11 m ,减小了42.1%。

3) 在150203运输巷与150205回风巷实施水力压裂弱化顶板护孔技术后,钻孔瓦斯抽采体积分数平均值由3.6%提高到14.1%,提高了74.5%;瓦斯抽采混合流量平均值由 $1.28\text{ m}^3/\text{min}$ 降低为 $0.464\text{ m}^3/\text{min}$,降低了63.8%;未进行水力压裂弱化顶板区域的顺层钻孔中出现较高的CO体积分数,平均值为 38×10^{-6} ,而进行水力压裂弱化顶板区域只有少数钻孔出现CO。

参考文献(References):

- [1] 詹小凡. 煤与瓦斯突出事故分析及预测研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2020.
ZHAN Xiaofan. Accidents analysis and prediction of coal and gas outburst[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.
- [2] 孙杰, 陈美英, 唐朝苗, 等. 我国煤炭资源勘查现状跟踪研究[J]. 中国煤炭地质, 2017, 29(11): 1-8.
SUN Jie, CHEN Meiyang, TANG Zhaomiao, et al. Tracking study of coal resources exploration status quo in China[J]. Coal Geology of China, 2017, 29(11): 1-8.
- [3] 王刚, 杨曙光, 张寿平, 等. 新疆煤矿区瓦斯抽采利用技术现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3): 154-161.
WANG Gang, YANG Shuguang, ZHANG Shouping, et al. Status and prospect of coal mine gas drainage and utilization technology in Xinjiang Coal Mining Area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 154-161.
- [4] 刘军, 卢鹏, 刘志宽, 等. 顺层钻孔瓦斯抽采叠加效应影响研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-11[2024-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231120.1014.001.html>.
LIU Jun, LU Peng, LIU Zhikuan, et al. Study on the influence of superimposed effect of gas extraction in downhole drilling[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-11[2024-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20231120.1014.001.html>.
- [5] 叶兰. 我国瓦斯事故规律及预防措施研究[J]. 中国煤层气, 2020, 17(4): 44-47.
YE Lan. Research on rules and prevention measures of gas accidents in China[J]. China Coalbed Methane, 2020, 17(4): 44-47.
- [6] 张凯文. 顺层钻孔瓦斯抽采浓度影响机理及其调控优化研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2022.
ZHANG Kaiwen. Study on the influence mechanism of gas extraction concentration and its regulation and optimization in bedding borehole[D]. Xi'an: Xi'an

- University of Science and Technology, 2022.
- [7] 许胜军. 基于 UDEC 和 D-P 准则的煤层钻孔稳定性分析[J]. 煤矿安全, 2013, 44(3): 160-162, 165.
- XU Shengjun. Seam drilling stability analysis based on UDEC and D-P standards[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(3): 160-162, 165.
- [8] 王超, 张雷林, 翟文杰, 等. 五轮山煤矿瓦斯抽采钻孔封孔工艺优化研究[J]. 煤炭技术, 2019, 38(5): 99-101.
- WANG Chao, ZHANG Leilin, ZHAI Wenjie, et al. Optimization study on sealing process of gas drainage borehole in Wulunshan Coal Mine[J]. Coal Technology, 2019, 38(5): 99-101.
- [9] 姚向荣, 程功林, 石必明. 深部围岩遇弱结构瓦斯抽采钻孔失稳分析与成孔方法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(12): 2073-2081.
- YAO Xiangrong, CHENG Gonglin, SHI Biming. Analysis on gas extraction drilling instability and control method of pore-forming in deep surrounding-rock with weak structure[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(12): 2073-2081.
- [10] 叶高榜. 内支撑护孔管提高瓦斯抽采钻孔稳定性技术及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
- YE Gaobang. Study and application on improving the stability of gas drainage drilling by high strength inner support pipe[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [11] 孟晓红. 松软煤层瓦斯抽放钻孔塌孔机理及改进措施研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- MENG Xiaohong. Study on mechanism of borehole collapse and improvement measures of gas drainage borehole in soft coal seam[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [12] 张金宝. 高位定向长钻孔水力输送对接筛管护孔技术研究[J/OL]. 煤炭科学技术: 1-11 [2024-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240321.1542.001.html>.
- ZHANG Jinbao. Research on hole protection technology of screen pipe for hydraulic transportation and automatic butt joint in high position directional borehole[J/OL]. Coal Science and Technology: 1-11 [2024-03-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2402.TD.20240321.1542.001.html>.
- [13] 李润泽, 刘飞. 瓦斯抽采钻孔全孔段筛管护孔工艺技术研究[J]. 能源技术与管理, 2023, 48(3): 30-32.
- LI Runze, LIU Fei. Study on full-hole slotting and pipe screen hole protection technology for gas extraction borehole[J]. Energy Technology and Management, 2023, 48(3): 30-32.
- [14] 陈超, 陈天柱, 张马军, 等. 孤岛工作面碎软煤层跟管护孔钻进工艺研究[J]. 工矿自动化, 2023, 49(1): 73-79.
- CHEN Chao, CHEN Tianzhu, ZHANG Majun, et al. Research on pipe-following hole protection drilling technology in broken soft coal seam of the isolated island working face[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(1): 73-79.
- [15] 张鹏, 秦政, 李峰. 松软煤层大孔径瓦斯抽采钻孔护孔技术研究[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(3): 92-95.
- ZHANG Peng, QIN Zheng, LI Feng. Study on hole protection technology of large diameter gas extraction boreholes in loose and soft coal seams[J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(3): 92-95.
- [16] 靖洪文, 孟庆彬, 朱俊福, 等. 深部巷道围岩松动圈稳定控制理论与技术进展[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(3): 429-442.
- JING Hongwen, MENG Qingbin, ZHU Junfu, et al. Theoretical and technical progress of stability control of broken rock zone of deep roadway surrounding rock[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(3): 429-442.
- [17] 傅航, 马宏发, 宋彦琦. 深部硐室群巷道围岩变形机理及控制技术研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(12): 49-54.
- FU Hang, MA Hongfa, SONG Yanqi. Mechanism and control of surrounding rock deformation of deep chamber group roadway[J]. Coal Engineering, 2021, 53(12): 49-54.
- [18] 苏士龙, 高海海, 周康乐. 基于统一强度理论的巷道围岩松动圈计算方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(27): 11045-11050.
- SU Shilong, GAO Haihai, ZHOU Kangle. Calculation method of roadway surrounding rock loose circle based on unified strength theory[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(27): 11045-11050.
- [19] 陈梁, 茅献彪, 李明, 等. 基于 Drucker-Prager 准则的深部巷道破裂围岩弹塑性分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(2): 484-491.
- CHEN Liang, MAO Xianbiao, LI Ming, et al. Elastoplastic analysis of cracked surrounding rock in deep roadway based on Drucker-Prager criterion[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(2): 484-491.
- [20] 范文, 俞茂宏, 陈立伟, 等. 考虑剪胀及软化的洞室围岩弹塑性分析的统一解[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3213-3220.
- FAN Wen, YU Maohong, CHEN Liwei, et al. Unified elastoplastic solution for surrounding rocks of openings with consideration of material dilatancy and softening[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3213-3220.
- [21] 郝宪杰, 袁亮, 卢志国, 等. 考虑煤体非线性弹性力学行为的弹塑性本构模型[J]. 煤炭学报, 2017, 42(4): 896-901.
- HAO Xianjie, YUAN Liang, LU Zhiguo, et al. An elastic-plastic-soften constitutive model of coal considering its nonlinear elastic mechanical behavior[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 896-901.