



## 穿层大直径钻孔预抽煤巷条带瓦斯机理与应用

贺峻 刘红威 刘小平 罗平 郑旭 王飞 周苛

### 引用本文:

贺峻, 刘红威, 刘小平, 等. 穿层大直径钻孔预抽煤巷条带瓦斯机理与应用[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(8): 240–251.  
HE Jun, LIU Hongwei, LIU Xiaoping. Mechanism and application of pre-drainage of strip gas in coal roadway by cross-layer cave-making borehole[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 240–251.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2024-0872>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 基于长距离密闭取心的煤巷条带瓦斯预抽效检研究

Study on efficiency verification of strip in gas pre-drainage coal roadways based on long-distance sealed coring  
煤炭科学技术. 2021, 49(3): 106–111 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.03.013>

#### 底板岩巷穿层钻孔一孔多用瓦斯抽采时效性研究

Study on time effectiveness of gas drainage by crossing layer drilling in floor rock roadway with one hole and multi-purpose  
煤炭科学技术. 2021, 49(1): 248–256 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.01.021>

#### 大直径顶板定向长钻孔替代高抽岩巷的瓦斯抽采效果分析

Analysis on gas drainage effect of large diameter roof directional long borehole instead of high drainage rock roadway  
煤炭科学技术. 2020, 48(7) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/43a033be-eee3-4ad6-9101-14d9f64d0df2>

#### 高瓦斯煤层大直径钻孔卸压增透瓦斯渗流时空演化机理

Temporal and spatial evolution mechanism of large-diameter borehole pressurerelief and permeable gas seepage in high gas coal seam  
煤炭科学技术. 2024, 52(S1): 47–61 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0530>

#### 瓦斯抽采穿层钻孔扩造穴卸压增透机理研究

Study on mechanism of permeability improvement for gas drainage by cross-seam cavitation borehole  
煤炭科学技术. 2021, 49(5): 75–82 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f02c94cb-97bf-4598-91a3-39276e84c72b>

#### 天然弱面对瓦斯抽采水平井压裂多裂缝扩展的影响

Influence of natural weak surface on extension of multiple fractures during fracturing of gas extraction horizontal wells  
煤炭科学技术. 2025, 53(S1): 130–138 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-2000>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

## 安全科学与工程



移动扫码阅读

贺峻,刘红威,刘小平,等.穿层大直径钻孔预抽煤巷条带瓦斯机理与应用[J].煤炭科学技术,2025,53(8):240–251.

HE Jun, LIU Hongwei, LIU Xiaoping, *et al.* Mechanism and application of pre-drainage of strip gas in coal roadway by cross-layer cave-making borehole[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(8): 240–251.

## 穿层大直径钻孔预抽煤巷条带瓦斯机理与应用

贺峻<sup>1</sup>,刘红威<sup>1,2,3</sup>,刘小平<sup>3</sup>,罗平<sup>4</sup>,郑旭<sup>1</sup>,王飞<sup>1</sup>,周苛<sup>1</sup>

(1. 太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原 030024; 2. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, New South Wales 2500, Australia; 3. 潞安化工集团有限公司, 山西 长治 046204; 4. 山西焦煤集团有限责任公司, 山西 太原 030024)

**摘要:**为了解决低渗高突煤层煤巷条带区域消突困难的难题,开展穿层大直径钻孔预抽煤巷条带瓦斯机理与应用研究。以寺家庄煤矿为工程实例,采用离散元和有限元模拟分析软件,数值分析普通钻孔和穿层大直径钻孔周围裂隙发育和瓦斯运移规律;通过现场试验,分析穿层大直径钻孔预抽煤巷条带瓦斯效果。研究表明,当穿层钻孔直径为60~400 mm时,随着钻孔孔径的增大,突出煤层裂隙数呈指数增长;钻孔孔径小于210 mm时,裂隙数增长较快;钻孔孔径在210~400 mm时,裂隙数增长趋于平缓。当穿层钻孔倾角(与水平方向夹角)为30°~90°时,随着倾角的增大,突出煤层裂隙数呈指数增长,倾角为90°时裂隙数达到最大值。在普通钻孔抽采条件下,抽采70 d时回风巷两侧仍存在大量瓦斯含量大于8 m<sup>3</sup>/t的条带区域,无法完全消突;抽采120 d时,回风巷两侧可基本实现消突。在预抽煤巷处每组增加2个普通钻孔抽采条件下,消突时间缩短至100 d。增加穿层大直径钻孔后,消突时间缩短至70 d。经实践验证,穿层大直径钻孔的瓦斯体积分数和瓦斯纯量在抽采的前2个月内均远高于普通钻孔。穿层大直径钻孔提高了钻孔瓦斯抽采率,优化了突出煤层的消突效果,保证了煤巷的安全掘进。

**关键词:**突出煤层;底抽巷;穿层大直径钻孔;瓦斯预抽

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2025)08-0240-12

## Mechanism and application of pre-drainage of strip gas in coal roadway by cross-layer cave-making borehole

HE Jun<sup>1</sup>, LIU Hongwei<sup>1,2,3</sup>, LIU Xiaoping<sup>3</sup>, LUO Ping<sup>4</sup>, ZHENG Xu<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, ZHOU Ke<sup>1</sup>

(1. College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. School of Civil, Mining and Environmental Engineering, University of Wollongong, Wollongong, New South Wales 2500, Australia; 3. Lu'an Chemical Group Co., Ltd., Changzhi 046204, China; 4. Shanxi Coal Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In order to solve the difficult problem of outburst elimination in coal roadway strip area of low permeability and high outburst coal seam, the mechanism and application of strip gas pre-drainage in coal roadway with large diameter boreholes were studied. Taking Sijiazhuang Coal Mine as an engineering example, discrete element and finite element simulation software were used to numerically analyze the law of fracture development and gas migration around ordinary boreholes and large-diameter boreholes; Through field test, the effect of pre-drainage of strip gas in coal roadway by large diameter boreholes is analyzed. The results show that when the diameter of the borehole is 60 ~ 400 mm, the number of fractures in the outburst coal seam increases exponentially with the increase of the aperture; When the aperture is less than 210 mm, the number of cracks increases rapidly; When the aperture is 210 ~ 400 mm, the growth of the number of cracks tends to be gentle. When the dip angle of the borehole (the angle with the horizontal direction) is 30° ~ 90°, the number of frac-

收稿日期:2024-06-12

策划编辑:宫在芹

责任编辑:王晓珍

DOI: 10.12438/cst.2024-0872

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52304246);山西省基础研究计划(自由探索类)资助项目(20210302124222);山西省回国留学人员科研资助项目(2023-057)

作者简介:贺峻(2000—),男,河北定州人,硕士研究生。E-mail: 3131741818@qq.com

通讯作者:刘红威(1990—),男,河南商丘人,副教授,博士(后)。E-mail: liuhongwei01@tyut.edu.cn

tures in the outburst coal seam increases exponentially with the increase of the dip angle, and the number of fractures reaches the maximum when the dip angle is  $90^\circ$ . Under the condition of ordinary borehole extraction, there are still a large number of strip areas with gas content greater than  $8 \text{ m}^3/\text{t}$  on both sides of the return air roadway after 70 days of extraction, which cannot completely eliminate the outburst; When the extraction is 120 d, the outburst can be basically eliminated on both sides of the air return roadway. Under the condition of adding two ordinary oreholes in each group at the pre-drainage of strip gas in coal roadway, the outburst elimination time is shortened to 100 days. After increasing the cross-layer large-diameter boreholes, the outburst elimination time is shortened to 70 days. It has been verified by practice that the gas concentration and gas purity of large-diameter boreholes are much higher than those of ordinary boreholes in the first 2 months of extraction. The large-diameter borehole through the layer improves the gas drainage rate of the borehole, optimizes the outburst elimination effect of the outburst coal seam, and ensures the safe excavation of the coal roadway.

**Key words:** outburst coal seam; bottom drainage roadway; large diameter drilling through the layer; gas pre-drainage

## 0 引 言

近年来,随着矿井瓦斯治理技术的进步以及煤矿工作者安全认识的增强,我国煤与瓦斯突出事故的发生率虽有显著下降,但仍然时有发生。如近些年仍发生了 2021 年山西省晋中市华阳新材料石港煤业“3·25”、2021 年贵州省毕节市黎明能源公司东风煤矿“4·9”、2022 年贵州省清镇市利民煤矿“3·2”、2023 年贵州省毕节市黔西市谷里煤矿“3·19”等众多煤与瓦斯突出事故<sup>[1]</sup>,为广大煤矿科研和生产工作者敲响了警钟。

对突出煤层进行瓦斯抽采是消除煤与瓦斯突出煤层危险性有效且直接的方式<sup>[2-4]</sup>。在利用普通穿层钻孔和顺层钻孔瓦斯抽采技术进行煤层瓦斯抽采方面,前人进行了大量研究并取得了一定的成果<sup>[5-8]</sup>。但由于钻孔成孔率和煤层透气性等原因,导致瓦斯抽采消突时间过长,效果不好,影响工作面的正常采掘交替<sup>[9-10]</sup>。因此采取卸压增透措施,以提高煤体渗透率,从而强化瓦斯抽采效果是十分有必要的。

目前改变煤岩体结构是煤体卸压增透的主要措施,常用的方法有水力压裂<sup>[11-16]</sup>、水力冲孔<sup>[17-18]</sup>、深孔预裂爆破<sup>[19-23]</sup>、水力割缝等技术<sup>[24-26]</sup>。上述技术的主要原理是在完成钻孔作业后,进一步破坏煤层,从而形成更多的新裂缝,进而提高煤层渗透率,并强化瓦斯抽采效果。然而,在实施水力压裂技术时,经常出现部分裂隙容易闭合、裂隙周围煤体的应力集中以及封孔困难等缺陷。水力冲孔技术在现场施工后,对有效影响半径的测量存在一定的误差,且需要大量投资和人力;深孔爆破技术对于控制技术要求较高,施工复杂,并且突出煤层中使用该技术存在一定的安全隐患<sup>[27]</sup>。水力割缝技术同样也容易造成钻孔周围部分煤体应力集中,致使煤体卸压增透效果不稳定,瓦斯抽采效果提升较小<sup>[28]</sup>。穿层大直径钻孔抽采瓦斯技术融合了钻孔和扩孔的过程,一定程

度上解决了深孔爆破、水力割缝、水力压裂等技术施工量大的问题。同时,该技术对各种地质条件都能适应,穿层大直径钻孔形态稳定,瓦斯抽采效果稳定,是一种极具潜力的瓦斯抽采技术。

寺家庄矿煤层瓦斯含量较高,预抽消突时间较长,严重影响采掘接替。为解决上述难题,提出利用穿层大直径钻孔预抽煤巷条带瓦斯。笔者以寺家庄煤矿为工程实例,运用离散元数值模拟软件分析不同钻孔参数条件下的裂隙演化规律;运用有限元数值模拟软件分析穿层大直径钻孔抽采作用下的瓦斯运移规律;通过现场施工分析穿层大直径钻孔的消突效果。研究成果能为类似条件的消突提供理论依据和现场指导。

## 1 工程概况

### 1.1 工作面概况

15309 综采工作面属北一盘区,地面标高为 947—1 130 m,工作面标高为 555—630 m。15309 工作面设计可采走向长 2 716 m,倾斜长 275 m,煤厚 5.49 m,可采储量 482.26 万 t。工作面 15 号煤层为复杂结构,一般含矸 2~3 层,块状及粉状,以镜煤为主,其次为暗煤,属光亮型煤,工作面煤层中部高,南、北两头低的背斜构造,倾角一般  $2^\circ \sim 10^\circ$ 。西部为 15305 工作面(未掘),北部为盘区大巷。

### 1.2 地质条件

寺家庄煤矿隶属于潞安化工集团,15309 工作面为 15 号煤层,平均煤厚为 5.49 m。煤层含矸 2~3 层,以镜煤为主,其次为暗煤,属光亮型煤。15309 回风巷为煤巷掘进。巷道掘进期间预计遇 1 条背斜、2 个陷落柱,1 个倾角大于  $15^\circ$  区块,临近 1 条挠曲,15309 回风底抽巷与 15309 回风巷水平距离 2.5 m,层间距为 10~15 m。煤层底板具体岩性情况如图 1 所示。现阶段预抽 15309 回风巷至达标界限的时间过长,严重影响采掘接替。



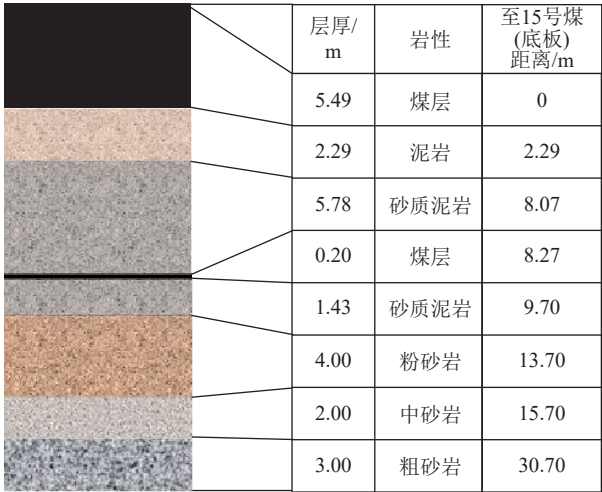


图 1 煤层岩性情况柱状图  
Fig.1 Coal seam lithology histogram

1.3 水文地质情况

地表无河流穿过,工作面主要充水因素为 15 号煤上覆的 K2 石灰岩局部裂隙含水层,巷道距离含水层较远,一般不出现淋水情况,预计巷道正常涌水量为 1~2 m<sup>3</sup>/h,最大涌水量 5 m<sup>3</sup>/h,水文地质条件简单。

1.4 瓦斯赋存情况

15 号煤层平均埋深 400 m 左右,15309 工作面的煤层赋存较为稳定,整体起伏变化不大,有煤与瓦斯突出危险性,工作面遇背、向斜轴部、挠曲、小型断裂构造、陷落柱、煤层倾角较大区域,可能出现局部瓦斯积聚的情况。工作面平均瓦斯含量 12.75 m<sup>3</sup>/t,平均瓦斯压力为 0.47 MPa,煤层坚固性系数  $f=0.21$ ,瓦斯放散初速度  $\Delta P=25.9 \sim 28.0$ ,孔隙率 3.57%,视密度 1.43 t/m<sup>3</sup>;无爆炸危险性,属Ⅲ类不易自燃煤层。

2 不同穿层钻孔参数下突出煤层裂隙发育规律

2.1 PFC<sup>2D</sup> 模型构建

根据寺家庄煤矿的地质情况,利用 PFC<sup>2D</sup> 离散元模拟软件建立模型,对不同钻孔参数下的裂隙发育情况进行模拟。本文选择平行黏结模型。在平行黏结模型中,颗粒接触处可以看作一组均匀分布且具有法向和切向刚度的弹簧,具有传递力和力矩的功能。当外界载荷逐渐增大时,黏结会出现剪切或拉伸裂纹,导致模型发生剪切或拉伸破坏,这与岩石这类材料的力学特性较为接近。

模型共 4 层,如图 2 所示。采用 PFC<sup>2D</sup> 数值模拟代码随机生成球形颗粒,颗粒半径最小为 15 mm,最大为 30 mm。上覆载荷为岩石重力,设为  $1.3 \times$

10<sup>7</sup> Pa。左右下设定为固定边界。通过伺服程序使得建立的数值模型颗粒间达到理想状态,在此基础上进行钻孔钻进过程。

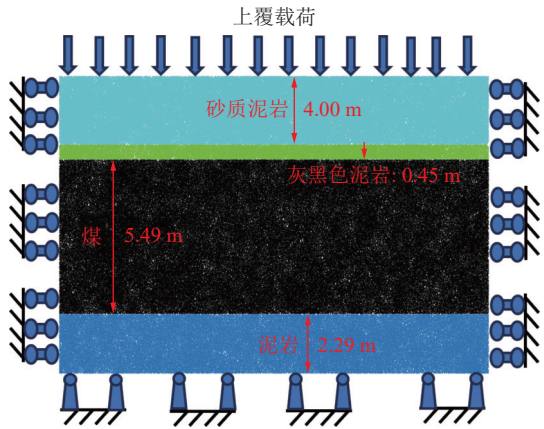


图 2 PFC 离散元模型  
Fig.2 PFC discrete element model

2.2 颗粒流方法基本原理

离散元颗粒流方法,主要是通过把岩土划分为分离的圆盘颗粒或球形颗粒的离散元方式,来描述颗粒和颗粒之间通过接触产生的相互作用。颗粒流方法作为一种非连续体方法,与有限元、边界元等连续介质体方法不同。它能够模拟各种复杂的岩土材料,更接近真实岩土材料的力学响应特性。特别是在处理大变形破坏和渐变破坏问题时,相比较传统数值方法显示出更显著的优势。该方法通过力-位移定律来更新接触颗粒间的接触力,然后通过牛顿第二运动定律来修正颗粒的位置,以此来调节颗粒间的接触关系<sup>[29]</sup>。最终,这些过程交替进行迭代,直至系统达到平衡状态或岩石发生破坏。

2.2.1 力-位移定律

两颗粒之间接触平面的单位法向量为

$$\mathbf{n}_i = \frac{\mathbf{x}_i^B - \mathbf{x}_i^A}{d} \tag{1}$$

其中,  $\mathbf{n}_i$  为单位法向量,关于颗粒与墙体的接触,法向量被定义为从颗粒中心到约束墙体最近直线距离的连线方向;  $\mathbf{x}_i^A$ 、 $\mathbf{x}_i^B$  为颗粒 A 和颗粒 B 的位置;  $d$  为颗粒 A 和颗粒 B 之间的距离。其计算公式为

$$d = |\mathbf{x}_i^B - \mathbf{x}_i^A| = \sqrt{(\mathbf{x}_i^B - \mathbf{x}_i^A)(\mathbf{x}_i^B - \mathbf{x}_i^A)} \tag{2}$$

接触间的重叠量  $U^n$  为

$$U^n = \begin{cases} R_A + R_B - d(\text{颗粒-颗粒接触}) \\ R_C - d(\text{颗粒-墙体接触}) \end{cases} \tag{3}$$

式中:  $R_A$  为颗粒 A 的半径;  $R_B$  为颗粒 B 的半径;  $R_C$  为颗粒 C 的半径。

不同接触模式其接触点位置 $x_i^w$ 的计算公式为

$$x_i^w = \begin{cases} x_i^A + \left(R_A - \frac{1}{2}U^n\right)n_i & (\text{颗粒-颗粒接触}) \\ x_i^C + \left(R_C - \frac{1}{2}U^n\right)n_i & (\text{颗粒-墙体接触}) \end{cases} \quad (4)$$

式中： $x_i^C$ 为颗粒 C 的位置。

接触实体之间接触力矢量 $F_i$ 可以分解为法向接触力和切向接触力

$$F_i = F_i^n + F_i^s \quad (5)$$

法向接触力 $F_i^n$ 计算公式为

$$F_i^n = K_n U^n n_i \quad (6)$$

式中, $K_n$ 为接触点处的法向刚度。

### 2.2.2 运动定律

根据前述力-位移定律,可以计算出每个颗粒承受的合力和合力矩,基于这些数据,依据牛顿第二运动定律,可以进一步得出颗粒的加速度和角加速度,由此,能够计算出颗粒的速度、角速度以及位置变化。颗粒受力以后运动方式分为平动和转动 2 种方式,其基本的运动方程(平动方程和转动方程)为

$$F_i = m(\ddot{x}_i - g_i) \quad (7)$$

$$M_i = I\dot{\omega}_i \quad (8)$$

式中: $m$ 为颗粒单元质量; $\ddot{x}_i$ 为加速度; $g_i$ 为重力加速度矢量; $M_i$ 为作用在颗粒上的合力矩; $I$ 为主惯性矩; $\dot{\omega}_i$ 为角加速度。

### 2.3 穿层、钻孔孔径与煤层裂隙数关系

为研究穿层、钻孔孔径与裂隙数的关系,以 30 mm 的跨度分别模拟了 60~400 mm 不同孔径时对应的裂隙发育情况。图 3 为孔径为 60、90、210、400 mm 时裂隙发育情况。可以看到,当钻孔处于垂直状态时,随着钻孔直径的增大,钻孔周围的裂隙近似呈菱形分布,并且裂隙数量逐渐增多。

图 4 为穿层钻孔孔径与煤层裂隙数的关系式。由图 4 可知,穿层钻孔孔径与煤层裂隙数符合  $y=6\,652.96-6\,609.57e^{(-0.02x)}$  指数函数。当孔径在 60~400 mm 时,随着钻孔孔径的增大,裂隙数量也在逐渐增多。在钻孔孔径小于 210 mm 时,裂隙数量的增长趋势较快;当钻孔孔径为 210~400 mm 时,随着钻孔孔径的扩大,裂隙数量的增长逐渐趋于平缓。

### 2.4 穿层钻孔角度与煤层裂隙的关系

为研究穿层钻孔角度与裂隙数的关系,分别模拟了钻孔倾角为 40°、50°、60°、70°、80°、90°时不同参数下的裂隙数量。图 5 为倾角为 30°、50°、70°、

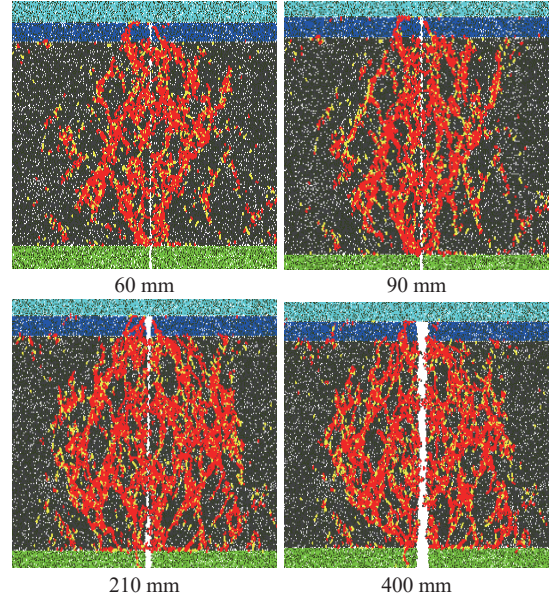


图 3 不同穿层钻孔孔径下裂隙发育规律

Fig.3 Fracture development law under different borehole apertures

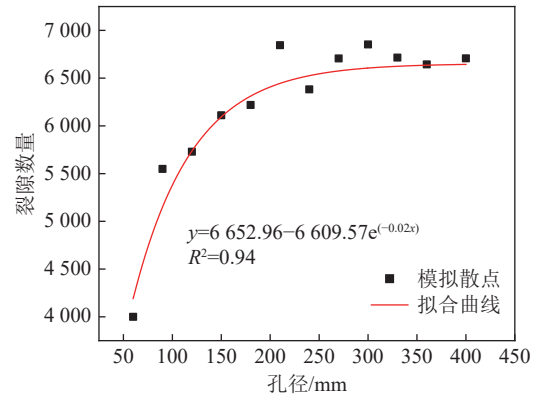


图 4 穿层钻孔孔径与煤层裂隙数的关系式

Fig.4 Relationship between borehole diameter and coal seam fracture number

90°时裂隙发育情况。当倾角为 30°时,裂隙发育范围较小,只集中在钻孔周围;当钻孔倾角逐渐增大到 50°和 70°,钻孔周围的裂隙逐渐向四周发展为菱形形状。

图 6 为穿层钻孔倾角与煤层裂隙数的关系式。由图 6 可知,穿层钻孔倾角与煤层裂隙数符合  $y=e^{(9.02-31.98/(x-9.21))}$  指数函数,随着钻孔与水平方向的倾角逐渐增大,裂隙数量也随之增大。在钻孔为垂直状态时,裂隙数量达到峰值。

## 3 穿层钻孔抽采瓦斯数值分析

### 3.1 底抽巷层位选择

底抽巷层位选择主要考虑以下 3 个因素<sup>[30]</sup>:



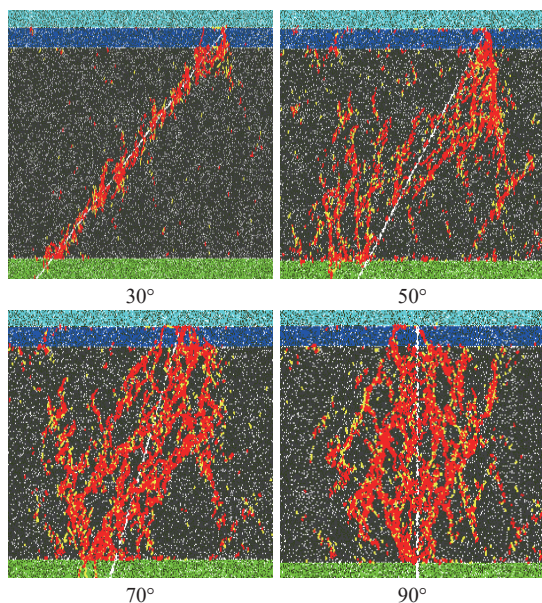


图 5 不同穿层钻孔倾角下裂隙发育规律

Fig.5 Fracture development law under different dip angles of boreholes

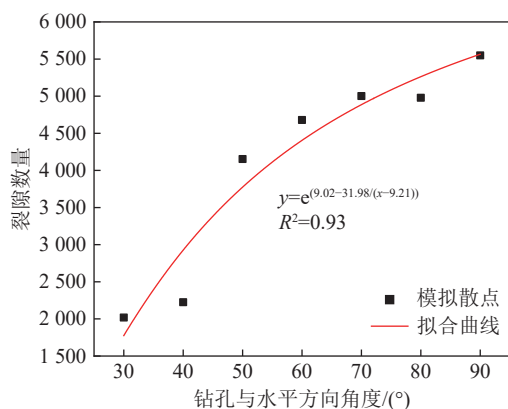


图 6 穿层钻孔倾角与煤层裂隙数的关系式

Fig.6 Relationship between the dip angle of the borehole and the number of coal seam fractures

1) 为确保钻孔施工的顺利,首要条件是满足穿层钻孔能够控制 15309 回风巷及其轮廓线外 15 m 范围。同时,也要避免在巷道钻孔过程中遇到含水层或坚硬岩层。

2) 为确保掘进工作的效率,需要确保巷道在坚固性系数较低且掘进机组容易进行切割作业的岩层中掘进,以提高掘进效率。

3) 为保证足够的安全距离,需确保巷道沿着比较稳定的岩层进行底板或顶板的掘进,同时确保底抽巷与 15 号煤层之间要有足够的安全距离。

在综合评估底抽巷层位选择的基础上,最终确定以粉砂岩为底板进行底抽巷的掘进,即底抽巷的巷道顶板与采掘煤层底板的距离在 10 ~ 15 m。

### 3.2 几何模型

结合回风巷底板岩石地质情况,利用 COMSOL 数值模拟软件建立三维模型。模型各岩层均视作水平,走向长度为 50 m,倾向长度为 100 m,模型总高 24.19 m,其中底抽巷尺寸为 50 m×4.6 m×3.2 m,回风巷尺寸为 50 m×4.6 m×3.6 m。三维模型如图 7 所示。

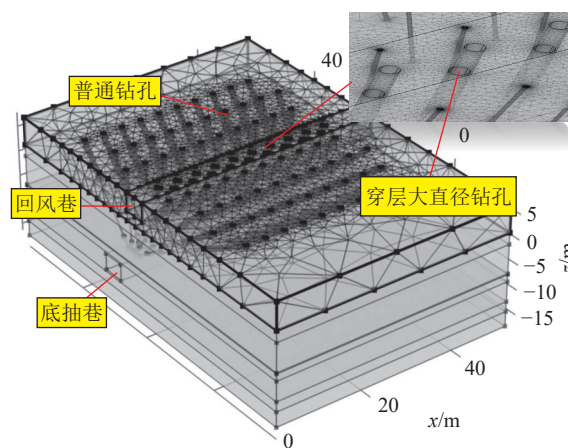


图 7 数值模拟网格

Fig.7 Numerical simulation grid diagram

### 3.3 瓦斯运移数学模型

假设三维裂隙场中的气体为理想气体,因此三维裂隙场气体运移研究中的气体流动基于动量方程、连续性方程和质量守恒方程<sup>[31]</sup>。

1) 理想气体状态方程。

理想气体状态方程为:

$$PV = \frac{m_0}{M} R_0 T \quad (9)$$

式中:  $m_0$  为气体质量, g;  $P$  为绝对压力, Pa;  $V$  为混合气体体积,  $m^3$ ;  $M$  为混合气体摩尔质量, kg/mol;  $R_0$  为普适气体常数,  $R_0 = 8.31 \text{ (J} \cdot \text{K)/mol}$ ;  $T$  为绝对温度, K。

2) 动量方程。

Navier—Stokes 方程表示为

$$-\nabla \eta (\nabla \mathbf{u}_{ns} + (\nabla \mathbf{u}_{ns})^T) + \rho \mathbf{u}_{ns} \nabla \mathbf{u}_{ns} + \nabla p_{ns} = 0 \quad (10)$$

式中:  $\eta$  为黏性系数,  $\text{kg/(m} \cdot \text{s)}$ ;  $\mathbf{u}_{ns}$  为速度矢量, m/s;  $\rho$  为流体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $p_{ns}$  为压力, Pa。

3) 连续性方程。

质量守恒方程及连续性方程,质量守恒方程其微分形式表达式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

为简化式子,引入矢量散度符号  $\text{div}(\mathbf{a}) = \partial \mathbf{a}_x / \partial x + \partial \mathbf{a}_y / \partial y + \partial \mathbf{a}_z / \partial z$ , 简化为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (12)$$

式中： $\mathbf{a}$ 为向量场， $\mathbf{a}_x$ 、 $\mathbf{a}_y$ 、 $\mathbf{a}_z$ 为向量场在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的散度； $t$ 为时间， $s$ ； $\mathbf{U}$ 为速度矢量； $u$ 、 $v$ 、 $w$ 为流速在 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向上的速度分量， $\text{m/s}$ 。

#### 4) 瓦斯质量守恒方程。

瓦斯运移满足质量守恒定律，其表达式为

$$\frac{\partial(\rho c_g)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho c_g u_i) = -\frac{\partial}{\partial x}(J_g u_i) + S_g \quad (13)$$

式中： $c_g$ 为游离甲烷质量浓度， $\text{g/cm}^3$ ； $u_i$ 为在 $i$ 方向上多孔介质平均流速， $\text{m/s}$ ； $S_g$ 为瓦斯源项的额外产生率； $J_g$ 为瓦斯的扩散通量， $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

### 3.4 模拟参数

所建数值模型底部为固定边界，模型共分为 8 层，从上到下依次为煤层、泥岩、砂质泥岩、煤层、砂质泥岩、砂岩、中砂岩、粗砂岩。回风巷位于底抽巷的东北方向，以底抽巷掘进方向为水平方向。数值模拟参数见表 1。研究中做以下假设：

- 1) 在初始条件下煤层为自由应力状态；
- 2) 模型所有外部边界为瓦斯的无渗透边界；
- 3) 模型中只有顶部煤层的瓦斯参与瓦斯抽采，其他岩层不参与流体流动及物质流动；
- 4) 模型不考虑裂隙分布对瓦斯运移影响。

### 3.5 模拟效果分析

《防治煤与瓦斯突出细则》第五十八条规定：根据煤层瓦斯压力 (0.74 MPa) 和含量 ( $8 \text{ m}^3/\text{t}$ )

表 1 数值模拟参数

Table 1 Numerical simulation parameters

参数	数值
甲烷的动力黏度系数/( $\text{Pa} \cdot \text{s}$ )	$1.08 \times 10^{-5}$
煤层初始瓦斯压力/Pa	$4.7 \times 10^5$
Langmuir 常数(压力)/MPa	1.382
Langmuir 常数(极限吸附)/( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.032
初始的裂隙率	0.0357
初始渗透率/ $\text{m}^2$	$1 \times 10^{-17}$
煤的视密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1430
甲烷的气体分子质量/( $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	0.016
气体状态常数/( $\text{J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$ )	8.415
原煤瓦斯含量/( $\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ )	12.75
煤层温度/K	293

的临界值进行预测是否为突出危险区<sup>[32]</sup>。瓦斯抽采过程中将煤层瓦斯含量降到  $8 \text{ m}^3/\text{t}$  以下作为重要的指标。本文将瓦斯含量降到  $8 \text{ m}^3/\text{t}$  以下的区域作为预抽效果评判标准。

#### 3.5.1 条带区域不同孔径下瓦斯抽采效果分析

图 8 为条带区域不同孔径下抽采负压 1.3 kPa 条件下，抽采时间 70 d 时煤层瓦斯含量。可以看到，在抽采时间为 70 d 的情况下，随着条带区域抽采钻孔的孔径的逐渐增大，瓦斯抽采效果也愈发明显。条带区域瓦斯抽采钻孔孔径扩大到 400 mm，抽采 70 d 时，回风巷及回风巷左右 15 m 内瓦斯含量下降到临界值以下。

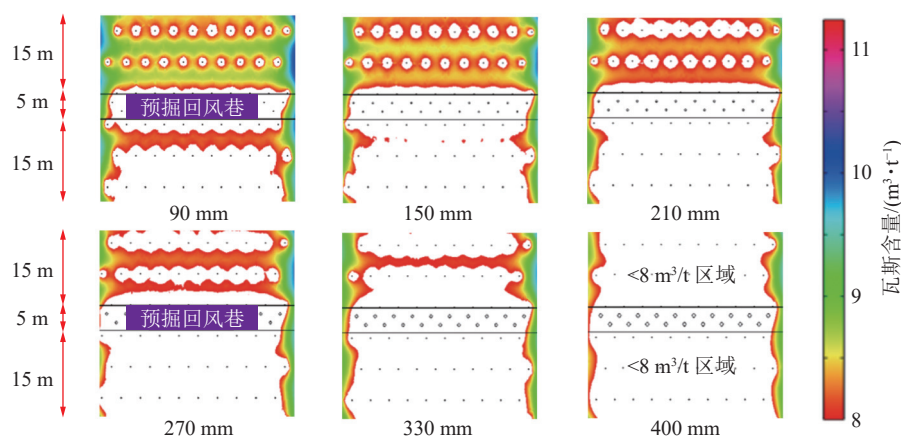


图 8 不同孔径穿层钻孔抽采作用下瓦斯含量云图

Fig.8 Gas content cloud map under the action of different aperture borehole extraction

#### 3.5.2 普通钻孔抽采效果分析

普通钻孔抽采几何模型如图 9 所示。普通钻孔水平间距为 4 m，垂直间距为 6.6 m，直径为 90 mm。穿层钻孔的终孔位置位于穿透煤层顶板 0.5 m 处。

图 10 为普通钻孔抽采负压 2.3 kPa 条件下，抽采时间 10 ~ 120 d 时煤层瓦斯含量。结合不同孔径下裂隙发育模拟结果来看，由于普通钻孔孔径较小，裂隙发育并不完全，导致普通钻孔周围瓦斯抽采效

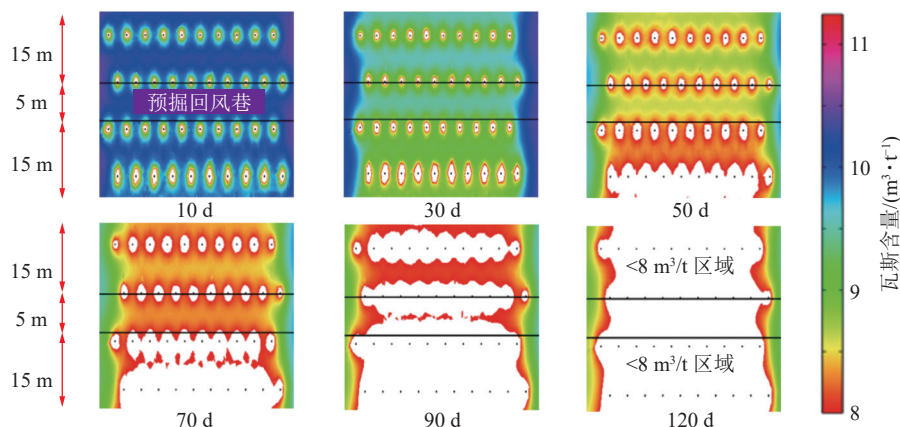


图 9 普通穿层钻孔抽采作用下瓦斯含量云图

Fig.9 Gas content cloud diagram under the action of ordinary cross-layer drilling extraction

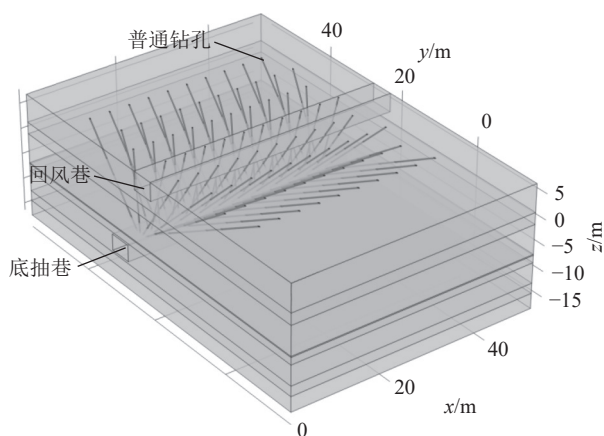


图 10 普通穿层钻孔布置

Fig.10 Common layer drilling layout diagram

果并不明显,抽采 70 d 时,回风巷东部有部分区域瓦斯含量降到临界值以下,但回风巷道处以及回风巷西部 15 m 内只有钻孔抽采处瓦斯含量降低到安全值,在钻孔与钻孔之间还存在许多条带空白区域瓦斯含量仍处于临界值  $8 \text{ m}^3/\text{t}$  以上。普通钻孔抽采 120 d 时,原有的条带空白区的瓦斯含量降低到了安全值,实现了消突目的,但是抽采时间太长,影响工作面的正常采掘交替,故考虑在回风巷条带掘进区域增设 2 排普通钻孔强化瓦斯抽采效果。

### 3.5.3 增设普通钻孔后抽采效果分析

在回风巷道处增设 2 排普通钻孔,增设普通钻孔后抽采几何模型如图 11 所示,增设普通钻孔的水平间距为 4 m,垂直间距为 2.2 m(增设钻孔距回风巷壁为 2.2 m)。穿层钻孔的终孔位置位于穿透煤层顶板 0.5 m 处。

图 12 为增设穿层普通钻孔后,抽采负压 2.3 kPa 条件下,煤层抽采时间 120 d 时煤层瓦斯含量图。结合不同孔径下裂隙发育模拟结果来看,由

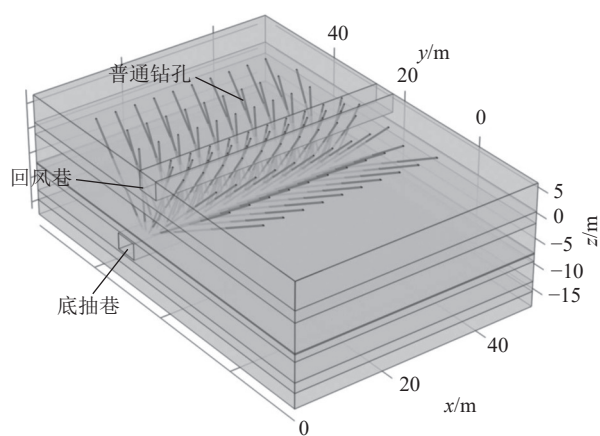


图 11 增加普通穿层钻孔布置

Fig.11 Increase the layout of ordinary cross-layer boreholes

于普通钻孔孔径较小,裂隙发育并不完全,导致普通钻孔周围瓦斯抽采效果并不明显。在回风巷处增设普通钻孔之后,抽采 70 d 时,回风巷及回风巷东部 15 m 内瓦斯含量有明显的下降,但是回风巷西部 15 m 区域内仍存在许多空白条带区域瓦斯含量处于临界值  $8 \text{ m}^3/\text{t}$  以上。抽采 100 d 时,原有的条带空白区的瓦斯含量降低到了安全值,抽采时间缩短,实现了消突目的,但抽采达标时间依旧很长,仍无法满足工作面的正常采掘交替,所以采用机械设备对新增的 2 个普通钻孔进行扩孔。

### 3.5.4 穿层大直径钻孔抽采效果分析

对新增的 2 个普通钻孔进行扩孔,钻孔从孔口处开始扩孔,每个孔穴孔径为 400 mm,穿层大直径钻孔抽采几何模型如图 13 所示。

图 14 为增设穿层大直径钻孔后,抽采负压 2.3 kPa 条件下,煤层抽采时间 70 d 时的瓦斯含量。结合不同孔径下裂隙发育模拟结果来看,由于造穴钻孔孔径扩大,裂隙发育已经较为完全,使得造穴钻



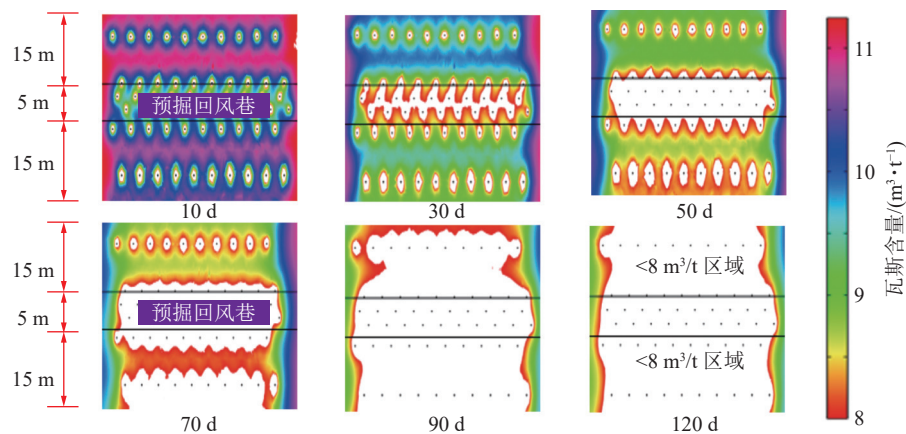


图 12 增加普通穿层钻孔抽采作用下瓦斯含量云图

Fig.12 Add the gas content cloud map under the action of ordinary cross-layer drilling extraction

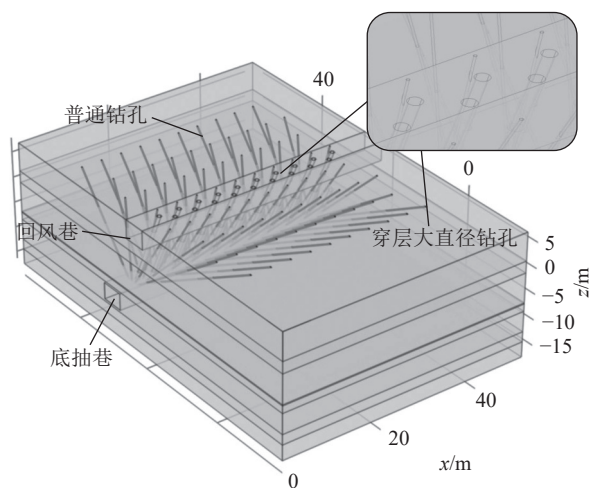


图 13 增加大直径穿层钻孔布置

Fig.13 Increase the layout of large-diameter boreholes.

孔周围瓦斯抽采效果较好,在对回风巷处 2 排普通钻孔采取机械扩孔之后,抽采 70 d 时,回风巷及回风巷左右 15 m 内瓦斯含量下降到临界值以下,大幅缩短了消突时间,达到了快速消突效果。

## 4 穿层大直径钻孔抽采瓦斯现场应用

### 4.1 机械扩孔原理与设备

#### 4.1.1 技术原理

底抽巷穿层大直径钻孔、卸压增透高效瓦斯抽采技术是利用能够扩孔的机械设备(本文使用塔形渐变式钻头,如图 15 所示)来构造大直径钻孔,对低渗煤层进行卸压增透,从而有效提高钻孔瓦斯抽采能力、强化瓦斯治理效果,是一种实用技术手段。采用机械扩孔技术在底抽巷施工穿层钻孔时,一共包含以下 5 个步骤:① 普通钻进;② 退杆;③ 安装钻头;④ 机械扩孔;⑤ 退钻。

#### 4.1.2 机械扩孔设备

底抽巷穿层普钻施工采用 ZDY4200 LPS(4) 型钻机,  $\phi 89$  mm 光杆式钻杆,  $\phi 113$  mm 钻头;底抽巷穿层大直径钻孔采用 ZDY7300 型钻机,  $\phi 89$  mm 光杆式钻杆,  $\phi 200$ 、 $\phi 300$ 、 $\phi 400$  mm 塔形渐变式钻头进行机械扩孔。同时根据防突细则和现场实际钻头规格,将直径为 120 ~ 400 mm 定义为大直径钻孔。

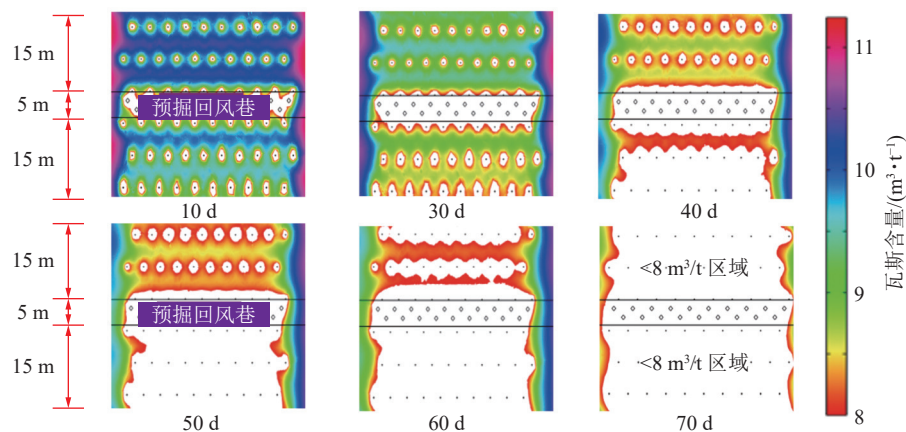


图 14 增加大直径穿层钻孔抽采作用下瓦斯含量云图

Fig.14 Add the gas content cloud map under the action of large diameter borehole extraction

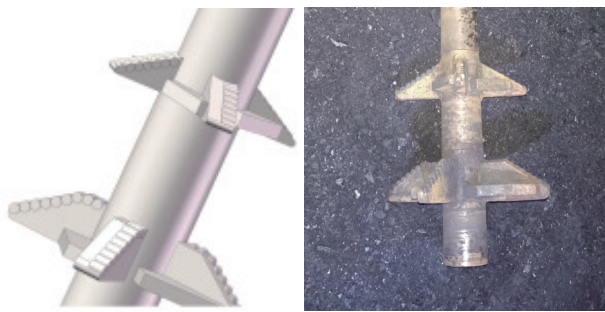


图 15 塔形渐变式钻头示意

Fig.15 Schematic diagram of tower-shaped gradient drill bit

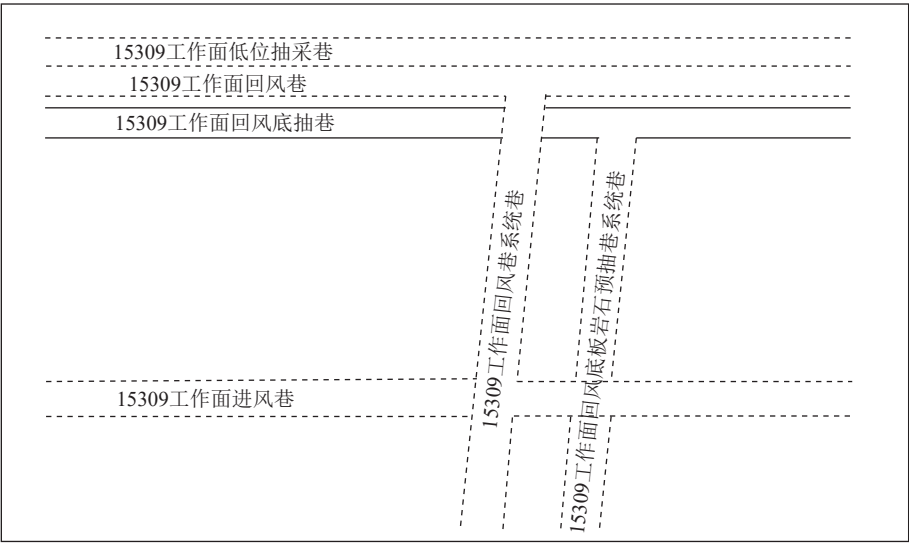


图 16 底抽巷巷道布置

Fig.16 Bottom pumping roadway layout diagram

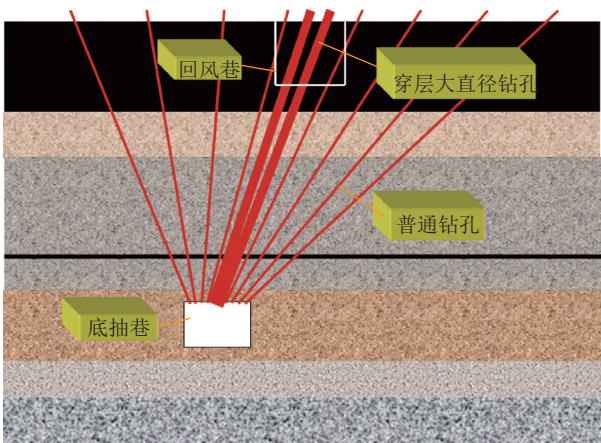


图 17 增加大直径穿层钻孔现场布置剖面

Fig.17 Increase the field layout profile of large-diameter cross-layer drilling

4.3 现场抽采效果分析

4.3.1 钻孔抽采浓度分析

取第 1 组钻孔(8 个普通钻孔, 2 个穿层大直径

4.2 现场钻孔布置方案

图 16 为底抽巷巷道布置示意。结合相关资料及现场工作面实际情况, 在 15309 工作面底抽巷布置穿层钻孔预抽 15309 工作面回风巷左右 15 m 范围的瓦斯。施工巷道为 470 m, 钻孔布置在底抽巷巷道顶板上。现场共布置 117 组钻孔, 每组施工 10 个钻孔, 包含 8 个普通钻孔和 2 个穿层大直径钻孔(每组 9、10 孔为穿层大直径钻孔, 其余为普通钻孔)。每组钻孔间距 4 m(相邻 2 组 1 号孔间距 4 m), 共施工 1 170 个钻孔。图 17 为底抽巷穿层大直径钻孔布置剖面示意, 图 18 为 2 组底抽巷顶板钻孔布置示意。

钻孔)连续 2 个月钻孔瓦斯抽采体积分数监测数据, 绘制图 19 曲线。由图 19 可知, 随着抽采时间的增长, 1—8 号普通钻孔抽采瓦斯体积分数下降趋势较平缓, 但是抽采瓦斯体积分数较小; 9、10 号穿层大直径钻孔抽采瓦斯体积分数下降趋势较快, 但是瓦斯抽采体积分数相比较普通钻孔维持在较高水平; 穿层大直径钻孔的瓦斯体积分数在抽采的前 2 个月内均远高于普通钻孔。

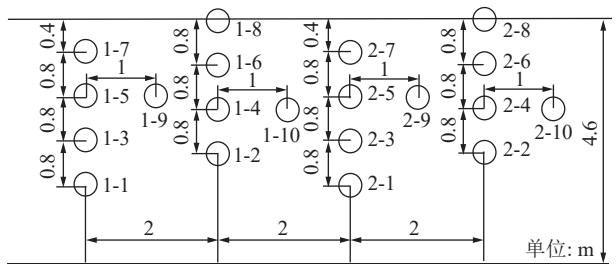


图 18 底抽巷顶板钻孔布置

Fig.18 Bottom pumping roadway roof drilling layout

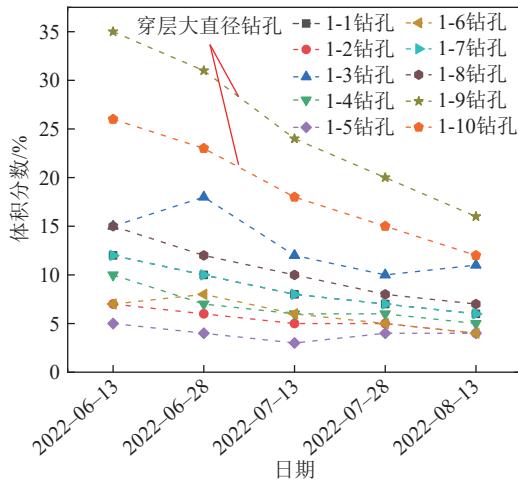


图 19 钻孔瓦斯体积分数变化

Fig.19 Change of gas concentration in boreholes

#### 4.3.2 钻孔抽采纯量分析

取第 1 组钻孔(8 个普通钻孔, 2 个穿层大直径钻孔)连续 2 个月钻孔瓦斯抽采纯量监测数据, 绘制图 20 曲线。由图 20 可知, 随着抽采时间的增长, 1—8 号普通钻孔抽采瓦斯纯量下降趋势较平缓, 但是抽采瓦斯纯量较小; 9、10 号穿层大直径钻孔抽采瓦斯纯量下降趋势较快, 但是瓦斯抽采纯量相比较普通钻孔维持在较高水平; 穿层大直径钻孔的瓦斯纯量在抽采的前 2 个月内均远高于普通钻孔。

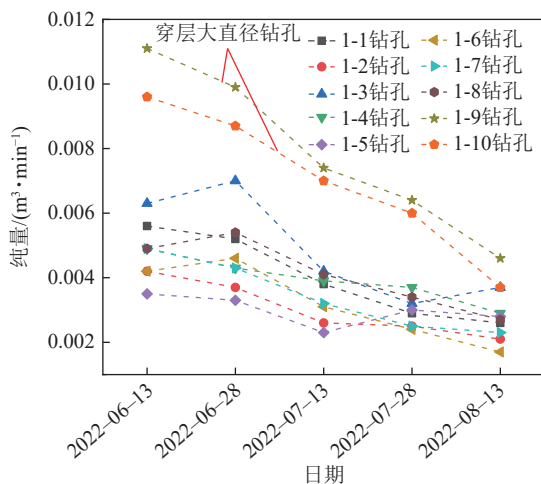


图 20 钻孔瓦斯纯量变化

Fig.20 Borehole gas pure quantity change

#### 4.4 抽采效果达标评判

从第 1 组钻孔开始, 每隔 28 m 测试煤层瓦斯含量对瓦斯抽采效果进行评判, 共取 17 组数据, 如图 21 所示。最低瓦斯含量为  $3.89 \text{ m}^3/\text{t}$ , 最高瓦斯含量为  $5.73 \text{ m}^3/\text{t}$ , 均低于《防治煤与瓦斯突出细则》中的瓦斯含量临界值  $8 \text{ m}^3/\text{t}$ , 满足工作面抽采达标评判需求。

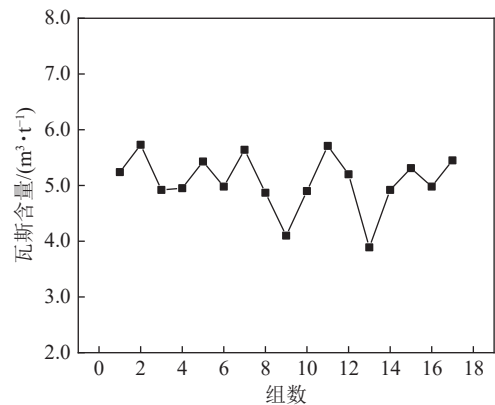


图 21 瓦斯抽采效果评判

Fig.21 Evaluation diagram of gas extraction effect

## 5 结 论

1)穿层钻孔孔径与裂隙数量的关系基本符合指数函数。当孔径在  $60 \sim 210 \text{ mm}$  区间时, 裂隙数量增长较快; 当孔径在  $210 \sim 400 \text{ mm}$  时, 裂隙数量增长较慢。穿层钻孔的角度与裂隙数量也存在指数关系。随着钻孔角度趋于垂直, 钻孔周围的裂隙数也在逐渐增多。

2)不同直径的钻孔抽采效果差异较为显著, 随着条带区域钻孔孔径的增大, 条带消突效果越来越明显。普通钻孔抽采条件下, 抽采 70 d 时, 回风巷两侧仍存在大量瓦斯含量超标的条带区域; 抽采 120 d 时, 回风巷两侧条带突出区域基本消除。增设普通钻孔后, 消突时间缩短到 100 d; 将增设的普通钻孔扩孔为穿层大直径钻孔后, 消突时间缩短为 70 d。

3)通过现场工程实践煤层的瓦斯抽采过程, 实施机械造穴钻孔技术后, 穿层大直径钻孔的瓦斯浓度和瓦斯纯量在抽采的前 2 个月内均远高于普通钻孔, 穿层大直径钻孔有效提高了穿层钻孔预抽煤巷条带瓦斯的效率。

4)底抽巷穿层大直径钻孔瓦斯预抽技术能够使煤层地应力下降, 有效降低煤体中的瓦斯含量, 显著提高局部抽采效果, 有利于消除煤与瓦斯突出危险性, 加快掘进速度, 实现矿井采、掘、抽平衡。

#### 参考文献(References):

- [1] 国家矿山安全监察局. 关于进一步加强煤与瓦斯突出防治工作的紧急通知 [EB/OL]. (2021-06-06)[2024-05-03]. <https://www.chinamine-safety.gov.cn/zfxsgk/fdzdgknr/tzgg/202106/P020210607641742430625.pdf>.
- [2] 周世宁, 林柏泉. 煤矿瓦斯动力灾害防治理论及控制技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] YANG F F, LI P P, SU W W, et al. Study on reasonable gas ex-



- traction radius based on multi-index and multi-method[J]. *Energy Reports*, 2022, 8: 287–294.
- [4] LI Y B, JIANG T, GUO X. Research on gas extraction technology of directional long borehole in ultrathick coal seam[J]. *Geofluids*, 2022, 2022(1): 6957896.
- [5] 林柏泉, 刘厅, 杨威. 基于动态扩散的煤层多场耦合模型建立及应用[J]. *中国矿业大学学报*, 2018, 47(1): 32–39, 112.  
LIN Baiquan, LIU Ting, YANG Wei. Solid-gas coupling model for coalseams based on dynamic diffusion and its application[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2018, 47(1): 32–39, 112.
- [6] 刘厅, 林柏泉, 赵洋, 等. 瓦斯非均衡赋存煤层精准冲孔增透技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 217–231.  
LIU Ting, LIN Baiquan, ZHAO Yang, et al. Precise permeability enhancement technique with hydraulic flushing for coal seams with non-uniformly distributed gas[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 217–231.
- [7] 鲁义, 申宏敏, 秦波涛, 等. 顺层钻孔瓦斯抽采半径及布孔间距研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2015, 32(1): 156–162.  
LU Yi, SHEN Hongmin, QIN Botao, et al. Gas drainage radius and borehole distance along seam[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2015, 32(1): 156–162.
- [8] 王兆丰, 李炎涛, 夏会辉, 等. 基于 COMSOL 的顺层钻孔有效抽采半径的数值模拟[J]. *煤矿安全*, 2012, 43(10): 4–6.  
WANG Zhaofeng, LI Yantao, XIA Huihui, et al. Numerical simulation on effective drainage radius of drill hole along coal seam based on COMSOL[J]. *Safety in Coal Mines*, 2012, 43(10): 4–6.
- [9] 石智军, 姚克, 姚宁平, 等. 我国煤矿井下坑道钻探技术装备 40 年发展与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2020, 48(4): 1–34.  
SHI Zhijun, YAO Ke, YAO Ningping, et al. 40 years of development and prospect on underground coal mine tunnel drilling technology and equipment in China[J]. *Coal Science and Technology*, 2020, 48(4): 1–34.
- [10] KANG Y S, GENG Z, LIU B, et al. Study on gas extraction efficiency using in-seam borehole method considering influence of plastic zone induced by borehole drilling[J]. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 2023, 33: 100426.
- [11] 华涛, 申林方, 王志良, 等. 基于近场动力学的岩石水力压裂数值模拟及裂隙网络定量分析[J]. *岩土力学*, 2024, 45(2): 612–622.  
HUA Tao, SHEN Linfang, WANG Zhiliang, et al. Numerical simulation of rock hydraulic fracturing based on peridynamics and quantitative analysis of fracture network[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2024, 45(2): 612–622.
- [12] 胡千庭, 刘继川, 李全贵, 等. 煤层顶板分段水力压裂应力及裂缝演化试验研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2023, 52(6): 1084–1095, 1202.  
HU Qianting, LIU Jichuan, LI Quanguai, et al. Study on stress and fracture evolution of sectional hydraulic fracturing of coal seam roof[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2023, 52(6): 1084–1095, 1202.
- [13] 郑凯歌. 碎软低透煤层底板梳状长钻孔分段水力压裂增透技术研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(2): 272–281.  
ZHENG Kaige. Permeability improving technology by sectional hydraulic fracturing for comb-like long drilling in floor of crushed and soft coal seam with low permeability[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(2): 272–281.
- [14] LI X Z, ZHOU W L, HAO S G, et al. Prevention and control of coal and gas outburst by directional hydraulic fracturing through seams and its application[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(41): 38359–38372.
- [15] GAO L, KANG X T, HUANG G, et al. Experimental study on crack extension rules of hydraulic fracturing based on simulated coal seam roof and floor[J]. *Geofluids*, 2022, 2022(1): 7462201.
- [16] LIU Y L, ZHENG X B, PENG X F, et al. Influence of natural fractures on propagation of hydraulic fractures in tight reservoirs during hydraulic fracturing[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 138: 105505.
- [17] 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.
- [18] 曹佐勇, 王恩元, 何学秋, 等. 近距离突出煤层群水力冲孔卸压瓦斯抽采及效果评价研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(3): 634–642.  
CAO Zuoyong, WANG Enyuan, HE Xueqiu, et al. Effect evaluation of pressure relief and gas drainage of hydraulic punching in short-distance coal seam group with the risk of outburst[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(3): 634–642.
- [19] 刘健, 刘泽功, 高魁, 等. 不同装药模式爆破载荷作用下煤层裂隙扩展特征试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(4): 735–742.  
LIU Jian, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experimental study of extension characters of cracks in coal seam under blasting load with different charging modes[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(4): 735–742.
- [20] 蔡峰, 刘泽功, 张朝举, 等. 高瓦斯低透气性煤层深孔预裂爆破增透数值模拟[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(5): 499–503.  
CAI Feng, LIU Zegong, ZHANG Chaoju, et al. Numerical simulation of improving permeability by deep-hole presplitting explosion in loose-soft and low permeability coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(5): 499–503.
- [21] GAO F, LI X, XIONG X, et al. Refined design and optimization of underground medium and long hole blasting parameters: A case study of the Gaofeng Mine[J]. *Mathematics*, 2023, 11(7): 1612.
- [22] HUANG C G, ZHANG Y B, HE J F, et al. Permeability improvements of an outburst-prone coal seam by means of presplitting and blasting with multiple deep boreholes[J]. *Energy Science & Engineering*, 2019, 7(5): 2223–2236.
- [23] WANG W, WEI Y Z, GUO M G, et al. Coupling technology of deep-hole presplitting blasting and hydraulic fracturing enhance permeability technology in low-permeability and gas outburst coal seam: A case study in the No. 8 mine of Pingdingshan, China[J].

- [Advances in Civil Engineering](#), 2021, 2021(1): 5569678.
- [24] 唐永志, 李平, 朱贵旺, 等. 超高压水力割缝技术在中等硬度低透气性煤层的应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 43–49.  
TANG Yongzhi, LI Ping, ZHU Guiwang, et al. Application of ultra-high pressure hydraulic slotting technology in medium hardness and low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 43–49.
- [25] 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.
- [26] 李栋, 卢义玉, 荣耀, 等. 基于定向水力压裂增透的大断面瓦斯隧道快速揭煤技术[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 363–369, 378.  
LI Dong, LU Yiyu, RONG Yao, et al. Rapid uncovering seam technologies for large cross-section gas tunnel excavated through coal seams using directional hydraulic fracturing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 363–369, 378.
- [27] YE Q, JIA Z Z, ZHENG C S. Study on hydraulic-controlled blasting technology for pressure relief and permeability improvement in a deep hole[J]. [Journal of Petroleum Science and Engineering](#), 2017, 159: 433–442.
- [28] 张荣. 复合煤层水力冲孔卸压增透机制及高效瓦斯抽采方法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
ZHANG Rong. Research on the stress relief and permeability increase mechanism and high-efficiency gas drainage method on a composite coal seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [29] Itasca Consulting Group Inc. (2002) PFC2D Particle Flow Code in 2 Dimensions, User's Guide[Z]. Minneapolis.
- [30] 李楠, 孟冯超, 赵高博. 九里山矿 16071 工作面底抽巷层位选择研究[J]. 能源与环保, 2021, 43(12): 287–292, 304.  
LI Nan, MENG Fengchao, ZHAO Gaobo. Study on layer selection of floor drainage roadway on 16071 working face of Jiulishan Mine[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(12): 287–292, 304.
- [31] 胡千庭, 梁运培, 刘见中. 采空区瓦斯流动规律的 CFD 模拟[J]. 煤炭学报, 2007, 32(7): 719–723.  
HU Qianting, LIANG Yunpei, LIU Jianzhong. CFD simulation of goaf gas flow patterns[J]. [Journal of China Coal Society](#), 2007, 32(7): 719–723.
- [32] 陈永冉. 《防治煤与瓦斯突出细则》修订关键技术研究[J]. 煤炭与化工, 2021, 44(9): 101–105, 108.  
CHEN Yongran. Study on key technology of revision of detailed rules for prevention and control of coal and gas outburst[J]. Coal and Chemical Industry, 2021, 44(9): 101–105, 108.