

### 自驱修孔钻头动力参数及钻齿结构研究

刘勇 李阳 魏建平 苑永旺 代硕 李林豫

引用本文:

刘勇, 李阳, 魏建平, 等. 自驱修孔钻头动力参数及钻齿结构研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 179–189.

LIU Yong, LI Yang, WEI Jianping, et al. Exploring dynamic parameters and tooth structure of self-propelled borehole repairing drill bits[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(4): 179–189.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.23.08.0507>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 负角度定向长钻孔瓦斯抽采完孔工艺研究

Gas drainage borehole completion technology of directional long hole drilling with negative angle

煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 62–68 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.008>

#### 瓦斯抽采钻孔间距优化三维数值模拟量化研究

Quantitative study of 3D numerical simulation on optimizing borehole layout spacing of gas drainage

煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 78–84, 94 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.010>

#### 煤矿隐伏小断层的瓦斯抽采钻孔探测方法

The concealed small faults detection based on gas drainage boreholes along and cross the coal seam

煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 69–77 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.009>

#### 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

Technology and application of high efficiency gas extraction by directional long borehole hydraulic fracturing in coal seams of medium hardness and low permeability

煤田地质与勘探. 2020, 48(6): 103–108, 115 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.06.014>

#### 煤矿井下碎软煤层泡沫钻进技术及应用

Foam drilling technology and application for broken soft coal seam in underground coal mine

煤田地质与勘探. 2020, 48(2): 25–29 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.02.005>

#### 韩城桑树坪二号井松软煤层钻进技术研究与实践

Research and practices on drilling in soft coal seams in Hancheng Sangshuping coal mine

煤田地质与勘探. 2017, 45(3): 165–169 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.03.031>



移动阅读

刘勇, 李阳, 魏建平, 等. 自驱修孔钻头动力参数及钻齿结构研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(4): 179–189. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.08.0507

LIU Yong, LI Yang, WEI Jianping, et al. Exploring dynamic parameters and tooth structure of self-propelled borehole repairing drill bits[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(4): 179–189. doi: 10.12363/issn.1001-1986.23.08.0507

## 自驱修孔钻头动力参数及钻齿结构研究

刘 勇<sup>1,2</sup>, 李 阳<sup>1,2</sup>, 魏建平<sup>1,2</sup>, 苑永旺<sup>1,2</sup>, 代 硕<sup>1,2</sup>, 李林豫<sup>1,2</sup>

- (1. 河南理工大学瓦斯地质与瓦斯治理国家重点实验室培育基地, 河南 焦作 454000;  
2. 河南理工大学煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心, 河南 焦作 454000)

**摘要:** 自驱修孔钻头是修复失效长钻孔的有效技术手段, 为进一步提高修孔速度和瓦斯抽采效果, 本文基于射流反冲理论, 分析了射流反冲力与喷嘴参数的关系, 构建了自驱修孔钻头旋转力学理论模型。采用 LS-DYNA 开展不同结构钻齿破煤过程, 分析了不同钻进压力和扭矩作用下钻齿对煤体破坏形式和钻齿破煤体积变化规律, 并开展了破煤实验验证数值模拟结果。形成了自驱修孔钻头参数确定方法, 设计了自驱修孔钻头, 并在郑煤集团超化煤矿 22 煤柱面底抽巷进行了工程实验。研究表明: (1) 喷嘴张角  $\alpha$  和偏心角  $\beta$  是决定钻进压力和扭矩分配的关键参数, 通过调控张角和偏心角可实现钻进压力和扭矩的最优匹配。(2) 相同钻进参数条件下, 钻齿结构对破煤体积影响较大, 阶梯钻齿破煤效果最优。在钻进压力为 120 N、扭矩 0.6 N·m 时, 阶梯型钻齿结构的修孔钻头能够实现钻进压力和扭矩最优匹配。(3) 确定了最优修孔钻头结构参数为: 钻头外径 28 mm; 后置喷嘴张角 20°, 偏心角 90°; 前置喷嘴张角 90°, 偏心角 0°。(4) 工程应用结果表明: 瓦斯抽采纯量提高了 1.96 倍, 瓦斯抽采体积分数提高了 3.98 倍, 修孔速度提高了 1.2 倍。通过改进钻头动力参数及优化钻齿结构, 设计的自驱修孔钻头在工程实践中达到了提高修孔速度和瓦斯抽采效果的目的。

**关键词:** 瓦斯抽采; 钻孔修复; 钻进压力; 钻齿结构; 煤矿

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2024)04-0179-11

### Exploring dynamic parameters and tooth structure of self-propelled borehole repairing drill bits

LIU Yong<sup>1,2</sup>, LI Yang<sup>1,2</sup>, WEI Jianping<sup>1,2</sup>, YUAN Yongwang<sup>1,2</sup>, DAI Shuo<sup>1,2</sup>, LI Linyu<sup>1,2</sup>

- (1. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China;  
2. State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Self-propelled borehole repairing drill bits provide an effective technique for repairing long boreholes that have failed. In order to further improve the borehole repair speed and gas drainage efficiency, based on the theory of jet recoil, the relationship between the jet recoil force and nozzle parameters was analyzed, and a theoretical model was established for rotational mechanics of self-propelled borehole repairing drill bits. Subsequently, the coal-breaking processes of drill bits with different tooth structures were simulated using LS-DYNA, the failure modes in coal mass broken by cutting teeth and the rules of variation in the volume of coal broken by cutting teeth (coal-breaking volume) were analyzed under different drilling force and torque conditions, and coal-breaking experiments were conducted to verify the numerical simulation results. In addition, a method for determining the parameters of self-propelled borehole repairing drill bits was established, and a self-propelled borehole repairing drill bit was designed and used in the methane drainage roadway at the working face of No.22 Coal Pillar in Chaohua Coal Mine (Zhengzhou Coal Industry (Group) Co., Ltd.) for experimental purposes. The results show that (1) the nozzle opening angle ( $\alpha$ ) and eccentric angle ( $\beta$ ) are key parameters that determine the distribution of drilling force and torque, and the optimal distribution of drilling force and

收稿日期: 2023-08-26; 接收日期: 2023-12-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(52174170, 52374192, 52374193)

第一作者: 刘勇, 1984 年生, 男, 山东临沂人, 博士, 教授, 从事射流理论与技术, 煤层气开发等方面的研究. E-mail: yoonliu@hpu.edu.cn

torque can therefore be achieved by adjusting these two parameters. (2) Under the same drilling conditions/parameters, tooth structure has a great impact on the coal-breaking volume, stepped teeth have the best coal-breaking performance, and when the drilling force is 120 N and the torque is 0.6 N·m, a drill bit with stepped teeth can achieve the optimal distribution of drilling force and torque. (3) The optimal parameters determined for borehole repair drill bits are as follows: drill bit OD (outer diameter): 28 mm; opening angle of rear nozzles: 20°; eccentric angle of rear nozzles: 90°; opening angle of front nozzles: 90°; eccentric angle of front nozzles: 0°. (4) The results of engineering applications show that the scalar drainage rate, gas concentration and borehole repair speed have been increased by 1.96 times, 3.98 times and 1.2 times, respectively. By improving the dynamic parameters of the drill bit and optimizing the structure of the drill teeth, The self-propelled borehole repair drill bit designed with optimized dynamic parameters and tooth structure has improved the borehole repair speed and gas extraction efficiency in engineering practice.

**Keywords:** gas drainage; borehole repair; drilling force; tooth structure; coal mine

松软煤层瓦斯高效抽采难题是长期制约煤炭高效生产的重要原因之一<sup>[1-2]</sup>。尤其在松软煤层中采用水力化增透技术后,水的侵入导致煤体力学强度进一步降低,在抽采过程中极易发生塌孔、堵孔等现象<sup>[3-5]</sup>,堵塞瓦斯运移通道,瓦斯抽采流量衰减极快,导致瓦斯抽采周期长,制约采掘交替和煤炭产能释放<sup>[6-8]</sup>。对发生塌孔、失去抽采能力的钻孔进行修复,恢复钻孔的抽采能力,是经济高效的技术手段<sup>[9-10]</sup>。

水射流自驱钻头修复失效钻孔技术具有经济、高效、适用性强等特点<sup>[11]</sup>,具有广泛的应用前景。但随着瓦斯抽采钻孔钻进技术的发展,钻孔长度增加,定向长钻孔的长度普遍超过 300 m<sup>[12-13]</sup>。长钻孔失效后,需要更大的推进力才能实现全钻孔修复疏通。提高钻头的推进能力是满足长距离失效钻孔修复的迫切技术需求。水射流自驱钻头的推进力与射流压力、喷嘴直径、喷嘴角度等参数有关<sup>[14]</sup>。喷嘴直径一定时,推进力与射流压力成正比;射流压力一定时,推进力随着喷嘴直径增大而增大<sup>[15]</sup>。笔者前期开展了钻孔修复运动方程关键参数研究<sup>[16]</sup>,得出推进力等于后置喷嘴轴向推力减去前置喷嘴轴向反冲力和系统总摩擦阻力。前置喷嘴射流反冲力沿钻头轴线分力方向与钻头行进方向相反,增大了系统阻力,导致后置喷嘴射流提供的推力不足,长钻孔修复时需要更高的射流压力<sup>[17]</sup>。钻孔修复过程中,返水对钻头和高压软管产生阻力,钻孔角度和射流压力增大均导致返水流速增大,致使系统阻力增大<sup>[18]</sup>。提高射流压力和减小系统阻力是提高钻头推进能力的有效措施,减小系统阻力是更经济有效的技术思路。

为此,笔者前期基于水射流自驱旋转和机械钻头破煤相结合的理念,提出了自驱修孔钻头修孔方法<sup>[19]</sup>,高压水经后置喷嘴喷射提供行进动力,前置喷嘴沿钻头切向布置,切向射流提供钻头旋转破煤清渣动力。由于钻头前置喷嘴射流不产生反推力,钻头推进能力得到提高。旋转钻头对煤体产生的压应力和剪应力是破煤、清渣的主要动力,而压应力和剪应力与钻头对煤体施加的钻进压力和扭矩有关。分析钻进压力与扭矩的影响因素,

建立其控制方法和能量分配机制,是设计自驱修孔钻头的前提。钻进压力和扭矩均源于高压水能量经喷嘴转化和分配,合理分配高压水能量是该技术效能高效发挥的关键。常用钻齿结构包括阶梯钻齿、十字钻齿和三翼钻齿等。钻齿结构影响钻齿与煤体接触面和侵蚀角度,造成煤体压入破碎和切削破碎程度不同,故优选钻齿结构是实现高效破煤的关键<sup>[20-21]</sup>。

针对长距离失效钻孔修复难题,本文通过构建自驱修孔钻头旋转力学理论模型,明确自驱修孔钻头动力分配机制。基于旋转力学理论模型确定数值模拟方案,开展不同钻齿结构破煤数值模拟研究,优选钻齿结构。在此基础上形成自驱修孔钻头参数确定方法,优化设计自驱修孔钻头,并进行现场试验,为长距离失效钻孔修复难题提供新的技术思路。

## 1 自驱修孔钻头修孔原理及动力分析

### 1.1 修孔原理

自驱修孔钻头修孔原理如图 1 所示,系统装备包括高压柱塞泵、高压胶管卷盘、高压胶管和自驱修孔钻头。柱塞泵将高压水输送至修孔钻头,经钻头后置喷嘴喷出形成高压射流并产生推力,提供系统前进动力,同时用于机械钻齿对煤体施加钻进压力。前置喷嘴喷射切向射流,提供机械钻齿旋转扭矩,驱动机械钻齿旋转破煤。

### 1.2 动力分析

钻头自进力决定了修孔距离和行进速度,钻进压力和扭矩决定破煤能力,转速决定破煤效率。自驱修孔钻头受力分析如图 2 所示,钻头对煤体的钻进压力等于自进力减去摩擦阻力。射流反冲力是钻进压力、扭矩以及转速的动力来源。因此,基于射流反冲力理论公式推导钻进压力、扭矩和转速理论公式,并建立自驱修孔钻头旋转力学理论模型。

#### 1.2.1 射流反冲力

根据动量定理,物体喷出气体、液体或者固体时,被喷出的物体会产生一个反方向的推力,即反冲

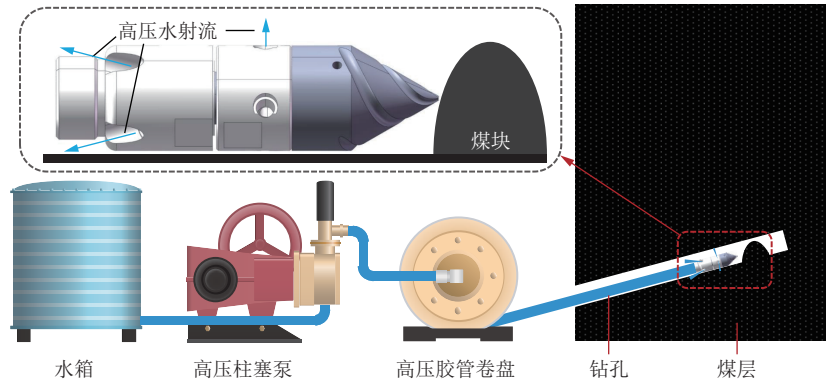


图1 自驱修孔钻头修孔原理

Fig.1 Principle of borehole repair with a self-propelled drill bit

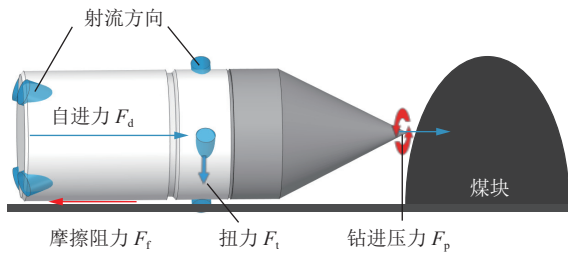


图2 自驱修孔钻头受力分析

Fig.2 Force analysis of a self-propelled drill bit

力。根据杨博凯<sup>[14]</sup>的研究,单个喷嘴产生射流反冲力  $F_r$  为:

$$F_r = 1.57d^2p \quad (1)$$

### 1.2.2 钻进压力

钻进压力为钻头作用于煤体的力,数值上等于钻头自进力减去系统摩擦阻力。自进力  $F_d$  为各射流反冲力在钻头轴线上的合力。钻头自进力计算模型如图3所示,其中  $\alpha$  为喷嘴与钻头轴线夹角,即张角。

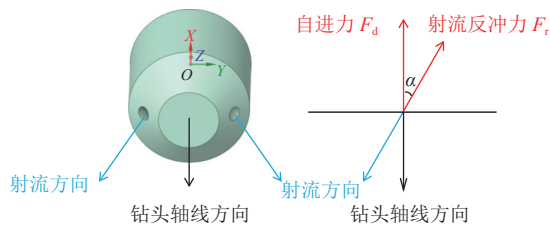


图3 自进力计算模型

Fig.3 Propelling force calculation model

由式(1)可得:

$$F_d = 1.57md^2pcosa \quad (2)$$

钻孔修复过程中,系统总摩擦阻力由钻头与高压胶管与孔壁间的摩擦阻力和返水阻力组成。根据刘勇等<sup>[16]</sup>的研究,系统总摩擦阻力  $F_f$  为:

$$F_f = kx \quad (3)$$

钻进压力  $F_p$  等于自进力  $F_d$  减去摩擦阻力  $F_f$ , 即:

$$F_p = F_d - F_f \quad (4)$$

$$F_p = 1.57md^2pcosa - kx \quad (5)$$

### 1.2.3 扭矩

施加在钻头上的扭矩克服摩擦扭矩驱动机械钻齿旋转破煤,扭矩的大小等于扭力与力的作用线到转动轴垂直距离的乘积。扭力为射流反冲力在钻头外壁切线方向上的分力。扭力计算模型如图4所示,其中  $\beta$  为喷嘴与钻头外壁切线方向夹角,即偏心角。

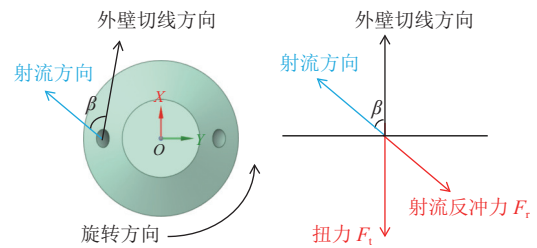


图4 扭力计算模型

Fig.4 Torsional force calculation model

扭力计算公式为:

$$F_t = 1.57md^2pcos\beta \quad (6)$$

所以扭矩计算公式有:

$$M = F_t L \quad (7)$$

$$M = 1.57md^2pLcos\beta \quad (8)$$

扭力产生的扭矩除克服摩擦扭矩外,还用于驱动机械钻齿旋转破煤,则有:

$$M = M_1 + M_2 \quad (9)$$

其中摩擦扭矩和破煤扭矩计算公式分别为:

$$M_1 = \frac{k'F_p L^2}{2S_1} \quad (10)$$

$$M_2 = \frac{\tau S_2 L^2}{2} \quad (11)$$

### 1.2.4 转速

射流提供的扭矩克服系统摩擦扭矩后,使得钻齿旋转,机械钻齿转速决定破煤效率。根据温志辉等<sup>[19]</sup>的研究,转速计算公式为:



$$n = 428.35 \sqrt{p} \left[ \frac{(1-i)\cos\beta}{L} - \frac{j}{md^2L^2} \right] \quad (12)$$

### 1.2.5 自驱修孔钻头旋转力学理论模型

结合式(1)、式(5)、式(8)构建自驱修孔钻头旋转力学理论模型:

$$\begin{cases} F_r = 1.57md^2p \\ F_p = F_r \sin\beta \cos\alpha - kx \\ M = F_r L \cos\beta \end{cases} \quad (13)$$

由旋转力学理论模型可知,射流反冲力大小决定于射流压力、喷嘴数量和喷嘴直径。喷嘴的张角 $\alpha$ 和偏角 $\beta$ 是钻进压力与扭矩分配的关键。当射流反冲力为定值时,钻进压力随张角 $\alpha$ 增大而减小,随偏角 $\beta$ 增大而增大;扭矩随偏角 $\beta$ 的增大而减小。自驱修孔钻头旋转力学理论模型为确定钻齿破煤数值模拟方案参数和优化设计自驱修孔钻头提供理论基础。

## 2 钻齿结构

### 2.1 物理模型

利用 Solidworks 建立阶梯钻齿、三翼钻齿、十字钻齿和煤体模型,钻齿和煤体模型如图 5 所示。通过 Hypermesh 对钻齿和煤体模型进行网格划分,钻齿模型基本参数见表 1。数值模拟中使用的煤体模型均相同,为边长 60 mm 的正方体,煤体模型网格数量为 216 000。应用软件中关键字对煤体模型进行固定,对钻齿施加钻进压力和扭矩,计算时间为 0.1 s。

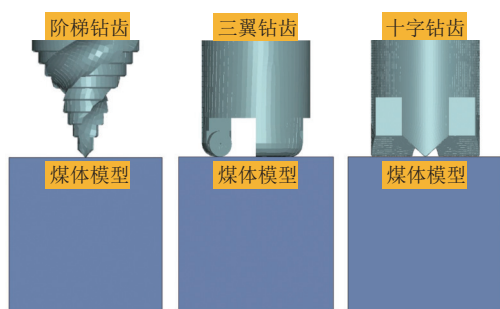


图 5 钻齿和煤体模型

Fig.5 Models of cutting teeth and coal mass

表 1 钻齿模型基本参数

Table 1 Basic parameters of cutting teeth models

| 钻齿类型 | 最大直径/mm | 长度/mm | 单元格数量   |
|------|---------|-------|---------|
| 阶梯钻齿 | 42      | 63.5  | 39 122  |
| 三翼钻齿 | 42      | 45.0  | 75 439  |
| 十字钻齿 | 42      | 53.0  | 422 696 |

## 2.2 HJC 本构模型及参数

LS-DYNA 中 HJC (Holmquist Johnson Cook) 本构模型充分考虑了屈服应力的影响指标<sup>[22]</sup>,通过 MAT\_

HOLMQUIST\_CONCRETE 关键字对 HJC 本构模型进行定义。HJC 本构模型包括强度模型、损伤模型和状态方程,其中共涉及 20 个参数,可分成 5 类。物理力学参数: $\rho_0$ 、 $f_c$ 、 $T$ 、 $G$ ;强度参数: $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $N$ 、 $S_{\max}$ ;压力参数: $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $p_{\text{lock}}$ 、 $p_{\text{crush}}$ 、 $\mu_{\text{lock}}$ 、 $\mu_{\text{crush}}$ ;失效参数: $f_s$ ;损伤参数: $D_1$ 、 $D_2$ 、 $\varepsilon_{\text{fmin}}$ 。

经强度模型、损伤模型和状态方程标定的煤样 HJC 模型参数见表 2。

表 2 煤样 HJC 模型基本参数

Table 2 Basic parameters of the HJC model for coal samples

| 参数名称                                      | 数值      | 参数名称                                 | 数值      |
|---|---------|--------------------------------------|---------|
| 密度 $\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 1 561   | 压力常数 $K_1/\text{GPa}$                | 4.39    |
| 单轴抗压强度 $f_c/\text{MPa}$                   | 16.47   | 压力常数 $K_2/\text{GPa}$                | 3.77    |
| 抗拉强度 $T/\text{MPa}$                       | 0.6     | 压力常数 $K_3/\text{GPa}$                | -0.25   |
| 剪切模量 $G/\text{GPa}$                       | 0.5     | 压实压力 $p_{\text{lock}}/\text{GPa}$    | 0.8     |
| 黏聚力强度 $A$                                 | 0.315   | 压碎体积压力 $p_{\text{crush}}/\text{MPa}$ | 3.49    |
| 压力硬度系数 $B$                                | 0.16    | 压实体积应变 $\mu_{\text{lock}}$           | 0.041 7 |
| 应变率系数 $C$                                 | 0.007 3 | 压碎体积应变 $\mu_{\text{crush}}$          | 0.004 4 |
| 压力硬度指数 $N$                                | 1.43    | 损伤常数 $D_1$                           | 0.04    |
| 最大标准化强度 $S_{\max}$                        | 7       | 损伤常数 $D_2$                           | 1       |
| 失效类型 $f_s$                                | 0       | 最小塑性应变 $\varepsilon_{\text{fmin}}$   | 0.01    |

### 2.2.1 强度模型

如图 6 所示,强度模型由归一化等效应力 $\sigma^*$ 进行描述,其表达式为:

$$\sigma^* = [A(1-D) + Bp^{*N}](1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (14)$$

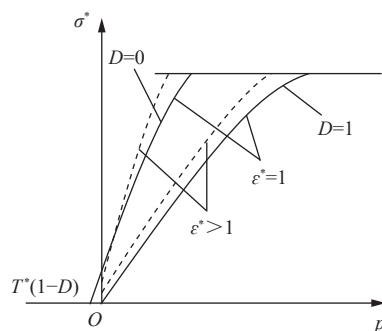


图 6 强度模型

Fig.6 Strength model

### 2.2.2 损伤模型

如图 7 所示,模型损伤由塑性应变累积而成,其中塑性应变包括等效塑性应变 $\varepsilon_p$ 和体积塑性应变 $\mu_p$ ,表达式为:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1(p^* + T^*)^{D_2}} \quad (15)$$

### 2.2.3 状态方程

如图 8 所示,状态方程中静水压力 $p_1$ 与体积应变

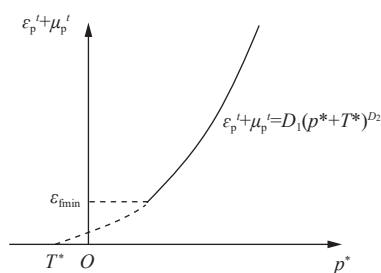


图 7 损伤模型

Fig.7 Damage model

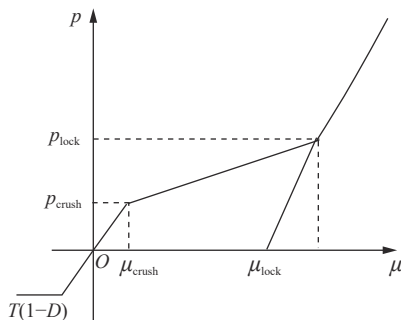


图 8 状态方程

Fig.8 State equation

$\mu$  之间的关系分 3 个阶段描述, 分别为弹性压缩阶段、塑性变形阶段和密实阶段。

第一阶段为弹性压缩阶段, 该阶段静水压力与体积应变之间的关系为:

$$p_1 = K\mu \quad (16)$$

第二阶段为塑性变形阶段, 材料原生孔隙逐渐压实, 并产生塑性变形。此时, 静水压力与体积应变之间的关系为:

$$p_1 = p_{crush} + \frac{(p_{lock} - p_{crush})(\mu - \mu_{crush})}{\mu_{lock} - \mu_{crush}} \quad (17)$$

第三阶段为密实阶段, 此时材料无孔隙, 且在此阶段材料被完全压碎。此时, 静水压力与体积应变之间的关系为:

$$p_1 = K_1\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3 \quad (18)$$

### 2.3 模拟方案

将不同结构钻齿破煤数值模拟分组, 第 I 组为阶梯钻齿破煤模拟, 第 II 组为三翼钻齿破煤模拟, 第 III 组为十字钻齿破煤模拟。由文献研究可知<sup>[16]</sup>, 当钻孔修复长度 100 m 时, 所需自进力 120 N。根据实验室高压水泵条件, 钻头后置喷嘴张角 21°, 前置喷嘴偏心角 0°, 喷嘴直径为 0.50、0.75、1.00、1.50 和 2.00 mm, 由式(1) 计算得出可为自驱修孔钻头提供 150 N 射流反冲力。因此, 破煤数值模拟中以 150 N 射流反冲力为基础进行钻进压力与扭矩的分配。利用式(13) 计算分配射流反冲力, 得到钻进压力与扭矩分配结果见表 3, 其中钻进压力由 20 N 逐渐增加至 140 N, 钻头扭矩由 2.6 N·m 降至 0.2 N·m。

表 3 钻进压力与扭矩的分配

Table 3 Distribution of drilling force and torque

| 编号 | 钻进压力/N | 扭矩/(N·m) |
|----|--------|----------|
| 1  | 20     | 2.6      |
| 2  | 40     | 2.2      |
| 3  | 60     | 1.8      |
| 4  | 80     | 1.4      |
| 5  | 100    | 1.0      |
| 6  | 120    | 0.6      |
| 7  | 140    | 0.2      |

### 2.4 模拟结果与分析

在钻进压力和扭矩共同作用下, 钻齿对煤体造成压剪作用, 当煤体受到的压应力或剪应力达到煤体强度极限时, 煤体发生破坏, 破坏体积通过失效网格单元数量量化。

不同钻进参数作用下钻齿破煤体积变化曲线如图 9 所示。由图 9 可知, 对于阶梯钻齿, 随着钻进压力增大、扭矩减小, 破煤体积先增大后减小。当钻进压力 120 N、扭矩 0.6 N·m 时破煤体积最大, 为 1 750 mm<sup>3</sup>。对于十字钻齿, 当钻进压力 20 N、扭矩 2.6 N·m 时, 钻齿未对煤体造成破坏。当钻进压力 40 N、扭矩 2.2 N·m 时, 破煤体积最大, 为 459 mm<sup>3</sup>。但随着钻进压力的增大、扭矩的减小, 破煤体积呈现减小趋势, 减小趋势相对稳定。对于三翼钻齿, 随着钻进压力增大、扭矩减小, 破煤体积不断减小。当钻进压力 20 N、扭矩 2.6 N·m 时破煤体积最大, 为 390 mm<sup>3</sup>。当钻进压力 140 N、扭矩 0.2 N·m 时, 破煤体积最小, 为 61 mm<sup>3</sup>。

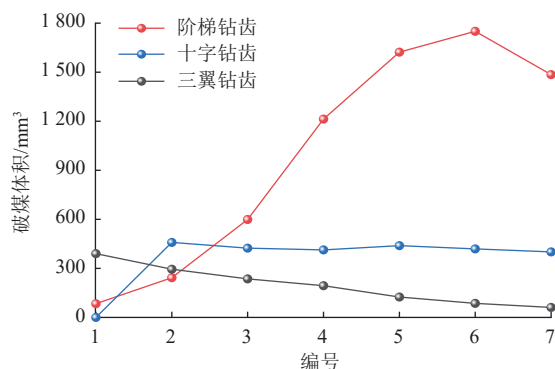


图 9 不同钻进参数作用下钻齿破煤体积变化

Fig.9 Changes in coal-breaking volume for differently structured drill bits under different drilling parameters

#### 2.4.1 阶梯钻齿

选取与钻齿相接触的失效网格单元, 对比分析失效网格单元破坏形式。阶梯钻齿在钻进压力 120 N、扭矩 0.6 N·m 条件下接触网格单元及单元应力曲线如图 10 所示。阶梯钻齿破煤时, 齿尖在钻进压力作用下与煤体网格单元 a 发生局部接触, 如图 10a 所示。因接触面积较小, 钻齿对网格单元 a 产生的压应力较大, 如

图 10c 所示。当齿尖对煤体产生的压应力超过煤体抗压强度, 网格单元 a 产生压破坏。随着齿尖侵蚀进入煤体, 钻齿的切削刃对水平方向的煤体进行切削, 如图 10b 所示, 网格单元 b 受切削刃产生剪应力超过煤体抗剪强度, 网格单元 b 产生剪切破坏。同理, 位于钻齿正下方的网格单元 c 破坏形式为压破坏, 说明阶梯钻齿以压-剪破坏混合形式侵蚀煤体。根据网格单元 a、b、c 的应力曲线, 压应力是导致网格单元失效的主要形式。随着钻进压力增大, 相同时间内阶梯钻齿破煤体积增大。在钻进压力 120 N、扭矩 0.6 N·m 时破煤体积达到最大, 为 1 750 mm<sup>3</sup>。阶梯钻齿呈锥形, 破煤体积增大意味着钻齿侵蚀深度增加, 进而导致钻齿与煤体接触面积增大, 钻齿与煤体间的摩擦扭矩随之增加。而钻进压力增大的同时扭矩减小, 转速随之减小, 进而影响破煤效率。因此, 当钻进压力进一步增大, 扭矩进一步减小时, 阶梯钻齿对煤体的破坏体积减小。

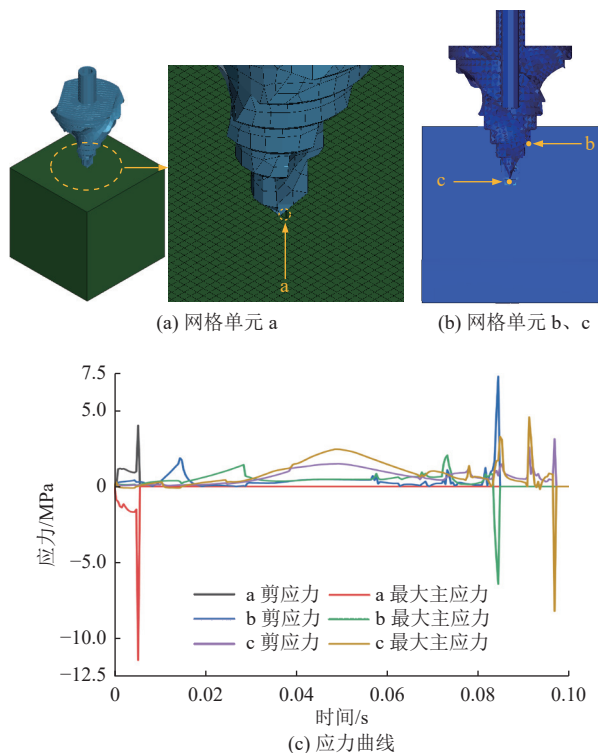


图 10 网格单元 a、b、c 及其应力曲线

Fig.10 Grid units a, b and c and their stress curves

## 2.4.2 十字钻齿

十字钻齿破煤模拟中网格单元 d 如图 11a 所示, 该单元在编号 2、4、6 条件下的应力曲线如图 11b 所示。由图 11b 知十字钻齿对网格单元 d 造成压破坏。钻进压力达到一定值时, 十字钻齿对网格单元产生的压应力导致单元失效。由图 9 知, 当钻进压力 20 N、扭矩 2.6 N·m 时, 十字钻齿未对煤体造成破坏; 钻进压力 40 N、扭矩 2.2 N·m 时, 破煤体积最大, 为 459 mm<sup>3</sup>。但煤体破碎体积并未随着钻进压力的增大而增大。钻进压力增大的

同时扭矩减小, 导致转速降低, 进而降低了破煤效率。钻进压力增大提高的破煤效果与扭矩减小降低的破煤效果基本一致, 因此随着钻进压力的增大、扭矩的减小, 十字钻齿破煤体积波动趋势相对稳定。

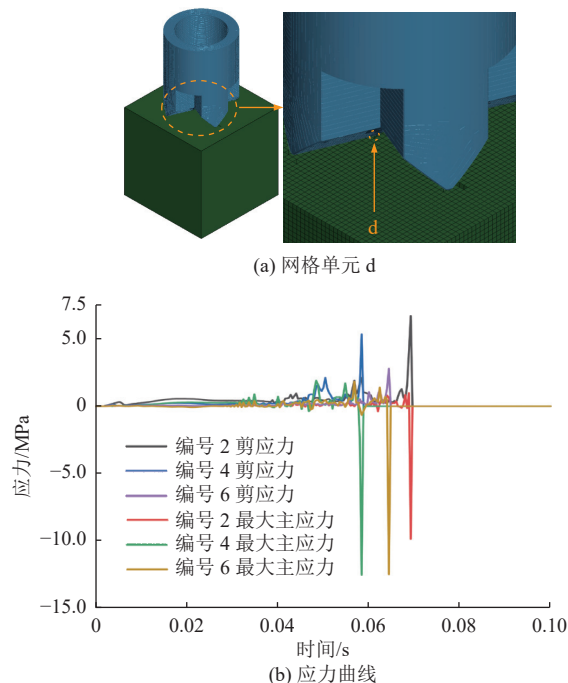


图 11 网格单元 d 及应力曲线

Fig.11 Grid unit d and stress curves for this unit

## 2.4.3 三翼钻齿

三翼钻齿破煤模拟中网格单元 e 如图 12a 所示, 该单元在编号 2、4、6 条件下的应力曲线如图 12b 所示。由图 12b 知三翼钻齿对网格单元施加剪应力导致网格单元失效。扭矩减小后, 一方面使钻齿对网格单元产生的剪应力减小, 另一方面钻齿转速降低影响破煤效率。因此在钻进压力为 20 N、扭矩为 2.6 N·m 时, 破煤体积最大, 为 390 mm<sup>3</sup>。随着钻进压力增大、扭矩减小, 三翼钻齿破煤体积呈现不断减小趋势。

## 2.4.4 模拟结论

在相同钻进压力和扭矩条件下, 不同结构钻齿破煤体积呈现不同。当钻进压力 20 N、扭矩 2.6 N·m 时, 三翼钻齿破煤体积大于阶梯钻齿和十字钻齿, 为 390 mm<sup>3</sup>。当钻进压力 40 N、扭矩 2.2 N·m 时, 十字钻齿破煤体积略大于阶梯钻齿和三翼钻齿, 为 459 mm<sup>3</sup>。当钻进压力 60 N、扭矩 1.8 N·m 时, 阶梯钻齿的破煤体积略大于三翼钻齿和十字钻齿, 随着钻进压力增大、扭矩减小, 阶梯钻齿的破煤体积远大于三翼钻齿和十字钻齿。在钻进压力 120 N、扭矩 0.6 N·m 时, 阶梯钻齿破煤体积最大, 为 1 750 mm<sup>3</sup>。

当射流反冲力为定值时, 钻齿所受钻进压力增大意味自进力增大, 而提高自进力是长距离失效钻孔修复的

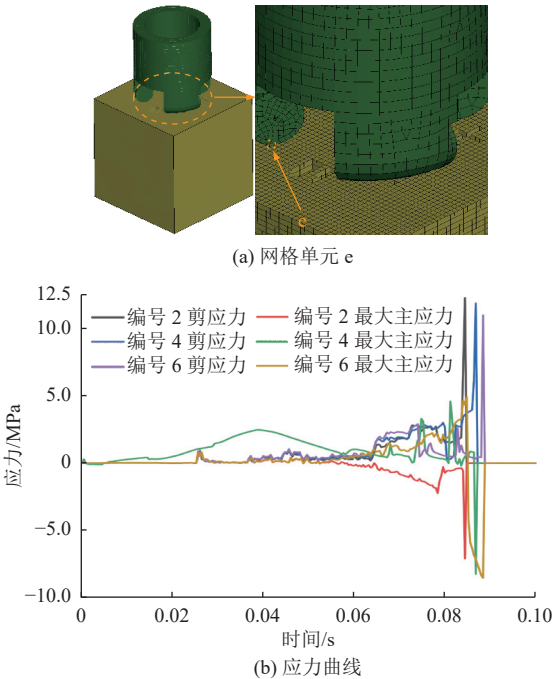


图 12 网格单元 e 及应力曲线

Fig.12 Grid unit e and stress curves for this unit

迫切需求。钻齿破煤是失效钻孔修复的重要环节, 钻齿破煤能力决定了钻孔修复效果。

综上所述, 阶梯钻齿为最优破煤钻齿, 故选择阶梯钻齿作为自驱修孔钻头的钻齿结构。

2.5 阶梯钻齿破煤实验

为进一步明确阶梯钻齿破煤效果, 选用阶梯钻齿作为修孔钻头钻齿结构, 开展自驱修孔钻头破煤实验。实验装置如图 13 所示, 瓦斯抽采筛管水平放置并固定, 煤样放置于筛管管口, 连接高压胶管的钻头放置于筛管内, 启动高压柱塞泵, 高压水能量经喷嘴转化和分配产生钻进压力与扭矩, 带动钻头自进并旋转破煤。通过改变喷嘴的数量和直径控制钻进压力与扭矩, 实验方案见表 4。尽可能保持实验与模拟条件一致, 所用阶梯钻齿最大直径 42 mm, 长度 80 mm。

破煤体积是表征阶梯钻齿破煤效果的重要因素。通过灌砂法测得破煤体积, 其原理为利用颗粒均匀的砂置换孔洞的体积。计算公式为:

$$V_c = \frac{m_s}{\rho_s} \quad (19)$$

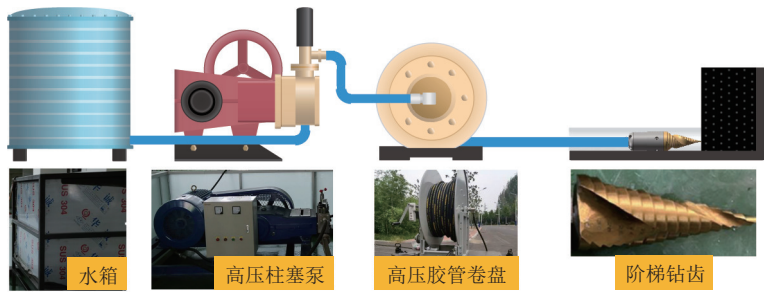


图 13 自驱修孔钻头破煤实验装置

Fig.13 Experimental system for coal breaking by a self-propelled drill bit

表 4 不同钻进参数条件下自驱修孔钻头破煤实验方案  
Table 4 Experimental program for coal breaking by self-propelled drill bits under different drilling parameters

| 编号 | 泵压/MPa | 后喷嘴数量 | 后喷嘴直径/mm   | 前喷嘴数量 | 前喷嘴直径/mm   | 钻进压力/N | 扭矩/(N·m) |
|----|--------|-------|------------|-------|------------|--------|----------|
| 1  | 12     | 2     | 0.75       | 2     | 2.00       | 20     | 2.6      |
| 2  | 12     | 4     | 0.75       | 1, 3  | 0.50, 1.50 | 40     | 2.2      |
| 3  | 12     | 2, 2  | 0.75, 1.00 | 2, 2  | 0.75, 1.50 | 55     | 1.8      |
| 4  | 12     | 2     | 1.50       | 2     | 1.50       | 80     | 1.4      |
| 5  | 12     | 2, 2  | 0.75, 1.50 | 2, 2  | 0.75, 1.00 | 100    | 1.0      |
| 6  | 12     | 2, 2  | 1.00, 1.50 | 2     | 1.00       | 115    | 0.6      |
| 7  | 12     | 2     | 2.00       | 2     | 0.50       | 140    | 0.2      |

注: 同一行(1, 3)和(0.5, 1.5)表示1个喷嘴直径0.5 mm, 3个喷嘴直径1.5 mm, 其他同。

破煤实验结果如图 14 所示, 实验值与仿真值对比如图 15 所示。由图 14、图 15 可知, 随着钻进压力的增大与扭矩的减小, 破煤体积呈先增大后减小的趋势, 实验结果与阶梯钻齿破煤数值模拟结果规律基本一致。由于仿真软件中网格单元失效后, 失效单元被直接

删除, 而实验过程中钻齿破碎的部分煤渣颗粒留存于侵蚀坑中, 导致钻齿在钻进破煤过程中的摩擦增大, 造成一定的能量损耗, 致使实验结果与数值模拟结果产生误差。



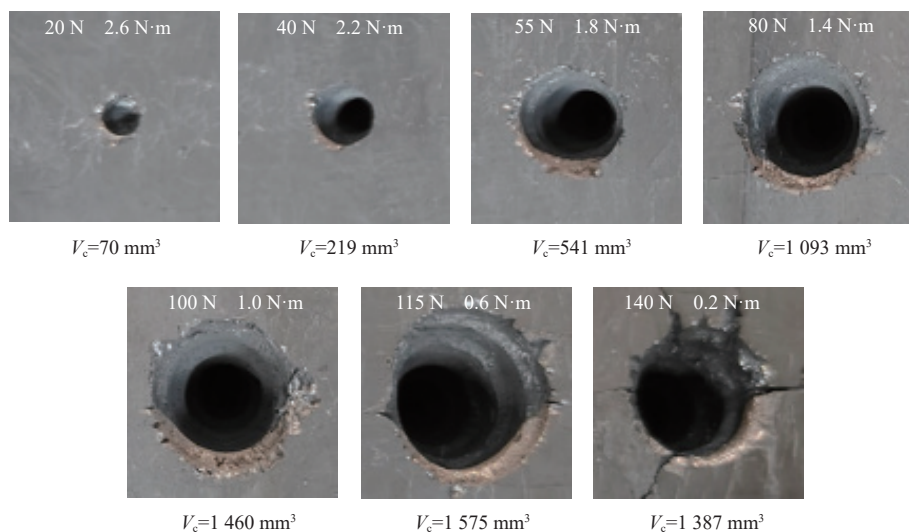


图 14 不同钻进参数条件下自驱修孔钻头破煤效果

Fig.14 Coal-breaking performance of self-propelled drill bits under different drilling parameters

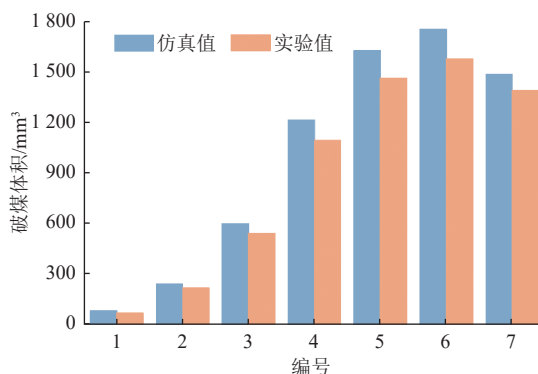


图 15 破煤体积实验值与仿真值对比

Fig.15 Comparison of experimental and simulation results with respect to coal-breaking volume

### 3 钻头设计

#### 3.1 钻头参数确定方法

当钻孔和煤体参数确定时, 钻孔修复所需的自进力与扭矩一定。由式(4)可知, 修复钻孔过程中, 自驱修孔钻头钻进压力等于钻头受到自进力减去系统总摩擦阻力。由式(10)可知, 钻进压力的增大会导致钻头与煤体间的摩擦扭矩增大, 导致钻头所需扭矩增大。自驱修孔钻头的自进力和扭矩均源于高压水能量经喷嘴转化和分配, 合理设计的自驱修孔钻头结构能够有效分配高压水能量, 是满足长距离失效钻孔修复的关键。因此, 自驱修孔钻头参数确定具体步骤如下:

(1) 通过 LS-DYNA 数值模拟软件开展不同钻齿破煤模拟, 优选钻齿结构, 设计钻齿结构参数。

(2) 依据井下高压柱塞泵工作参数和钻孔参数条件进行高压胶管和高压胶管卷盘选型。

(3) 依据钻孔和高压胶管参数, 通过式(3) 确定系统总摩擦阻力, 确定钻进压力, 通过式(4) 计算修复钻孔所需自进力。

(4) 根据煤体物理力学性质, 通过式(10) 和式(11) 计算所需扭矩。通过式(13) 确定自驱修孔钻头喷嘴参数。

#### 3.2 钻头设计

基于前期研究结论, 选择阶梯钻齿作为自驱修孔钻头的钻齿结构。钻头结构如图 16 所示, 钻头主要由入口连接螺母、钻头底座、旋转体和阶梯钻齿组成。

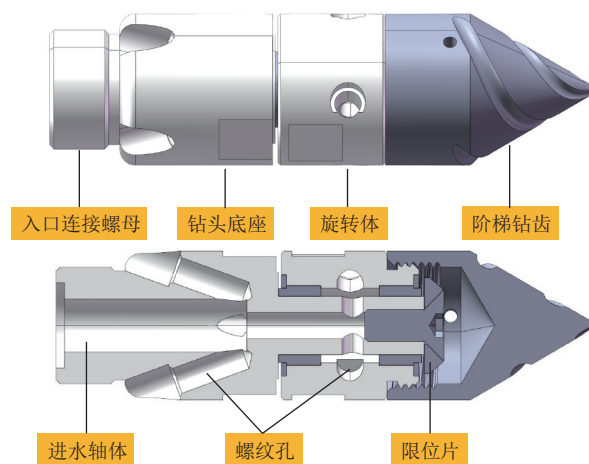


图 16 自驱修孔钻头结构

Fig.16 Structure of a self-propelled drill bit with stepped teeth

根据钻孔参数条件, 在保证环空比前提下, 钻头整体外径为 28 mm。钻头后置喷嘴由 4 个沿圆周对称布置的喷嘴组成, 前置喷嘴由 4 个旋转对称布置的喷嘴组成。基于自驱修孔钻头结构, 钻头进水轴体不旋转, 后置喷嘴射流反冲力仅提供自进力及钻进压力, 偏心角  $\beta$  应取 90°。前置喷嘴  $\alpha$  角不合理时会为旋转体提供推进力, 使旋转体与限位片间摩擦力增大, 从而增大摩擦扭矩, 故张角应取 90°。

自驱修孔钻头如图 17 所示, 其中后置喷嘴直径为 2 mm, 张角  $\alpha$  为 20°, 偏心角  $\beta$  为 90°; 前置喷嘴直径 1 mm, 张角  $\alpha$  为 90°, 偏心角  $\beta$  为 0°。



图 17 自驱修孔钻头

Fig.17 A self-propelled drill bit for borehole repair

## 4 现场试验研究

### 4.1 实验地点

自驱修孔钻头钻孔修复技术应用地点选择在郑煤集团超化煤矿 22 煤柱面底抽巷。实验地点煤层坚固性系数 0.10~0.23, 瓦斯压力 0.45 MPa, 瓦斯含量约 7.62 m<sup>3</sup>/t, 煤层煤质松软, 透气性差且埋深较大, 导致瓦斯抽采孔塌孔现象严重。试验地点失效抽采钻孔参数见表 5。

表 5 失效钻孔参数  
Table 5 Parameters of failed boreholes

| 钻孔编号 | 钻孔倾角/(°) | 钻孔深度/m | 封孔深度/m | 抽采体积分数/% |
|------|----------|--------|--------|----------|
| S1   | 26       | 87     | 16     | 7.28     |
| S2   | 44       | 60     | 16     | 5.22     |
| S3   | 29       | 81     | 16     | 7.06     |
| S4   | 39       | 71     | 16     | 6.64     |
| S5   | 35       | 76     | 16     | 5.98     |

根据井下高压柱塞泵额定压力和额定流量, 选定高压胶管基本参数为: 内径 16 mm, 外径 24 mm, 工作压力 25 MPa。选定高压胶管卷盘, 负责有序回收并缠绕高压胶管。应用自驱修孔钻头钻孔修复技术开展现场试验。

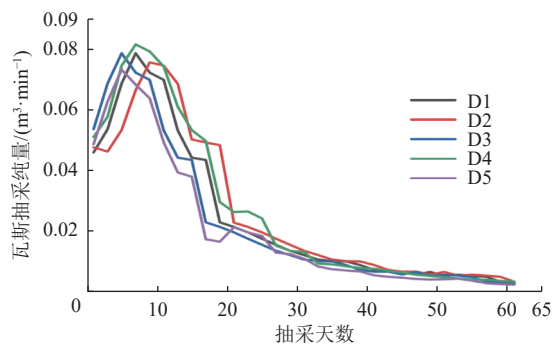
### 4.2 钻孔修复实验

为了明确钻孔修复效果, 对比分析塌孔钻孔和塌孔后修复钻孔的瓦斯抽采数据。塌孔后修复钻孔编号为 S1、S2、S3、S4、S5; 塌孔未修复钻孔编号为 D1、D2、D3、D4、D5。钻孔修复过程中, 记录钻孔修复时间和修复长度, 统计出塌孔钻孔平均修复速度, 见表 6。

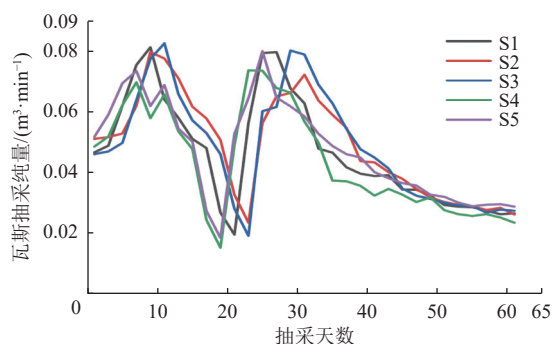
表 6 钻孔修复参数  
Table 6 Parameters of borehole repair

| 钻孔编号 | 钻孔倾角/(°) | 钻孔深度/m | 修复长度/m | 修复时间/min | 平均修复速度/(m·min <sup>-1</sup> ) |
|------|----------|--------|--------|----------|-------------------------------|
| S1   | 26       | 87     | 87     | 28       | 3.11                          |
| S2   | 44       | 60     | 60     | 33       | 1.82                          |
| S3   | 29       | 81     | 81     | 29       | 2.79                          |
| S4   | 39       | 71     | 71     | 33       | 2.15                          |
| S5   | 35       | 76     | 76     | 31       | 2.45                          |

对塌孔未修复钻孔和塌孔后修复钻孔的瓦斯抽采情况进行监测, 监测结果如图 18、图 19 所示。



(a) 塌孔后未修复钻孔



(b) 塌孔后修复钻孔

图 18 瓦斯抽采纯量变化曲线

Fig.18 Changes in scalar drainage rate for unrepaired and repaired boreholes

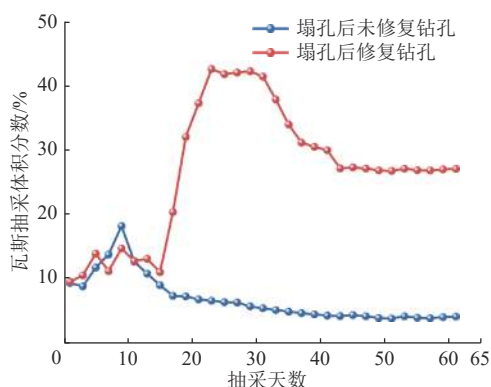


图 19 瓦斯抽采体积分数变化曲线

Fig.19 Changes in gas concentration during gas drainage

由表 6 可知, 钻孔 S2 的平均修复速度最低, 为 1.82 m/min, 钻孔 S1 的平均修复速度最高, 为 3.11 m/min, 相比水射流自驱钻头, 修孔速度提高了 1.2 倍<sup>[23]</sup>。由图 18、图 19 可知, 应用自驱修孔钻头钻孔修复技术的钻孔瓦斯抽采纯量和抽采体积分数明显提高。经统计, 塌孔未修复钻孔单孔瓦斯抽采纯量平均为 0.024 m<sup>3</sup>/min, 而塌孔后修复钻孔单孔瓦斯抽采纯量平均为 0.047 m<sup>3</sup>/min, 抽采纯量提高了 1.96 倍。在瓦斯抽采体积分数方面, 塌孔未修复钻孔瓦斯抽采体积分数平均为 6.73%, 塌孔修复钻孔瓦斯抽采体积分数平均为 26.77%, 抽采体积分数提高了 3.98 倍。塌孔钻孔在修复后 40 d 内能够保持较好的抽采效果。

## 5 结论

a. 建立了自驱修孔钻头旋转力学理论模型,明确了射流压力、喷嘴数量和喷嘴直径决定射流反冲力大小,喷嘴的张角  $\alpha$  和偏心角  $\beta$  是钻进压力和扭矩合理分配的关键参数。当射流反冲力为定值时,钻进压力随张角  $\alpha$  的增大而减小,随偏心角  $\beta$  增大而增大;扭矩随偏心角  $\beta$  的增大而减小。

b. 在相同的钻进压力和扭矩条件下,不同结构钻齿破煤体积呈现较大差异,阶梯钻齿破煤效果优于三翼钻齿和十字钻齿。当射流反冲力为定值时,随着钻进压力增大、扭矩减小,阶梯钻齿破煤体积先增大后减小,当钻进压力 120 N、扭矩 0.6 N·m 时,破煤体积最大。

c. 根据超化煤矿 22 煤柱面底抽巷钻孔和煤体参数,确定最优钻头结构参数为:钻头外径 28 mm,4 个后置喷嘴沿圆周对称布置,喷嘴直径 2 mm,张角 20°,偏心角 90°;4 个前置喷嘴旋转对称布置,喷嘴直径 1 mm,张角 90°,偏心角 0°。工程应用结果表明:瓦斯抽采纯量提高 1.96 倍,瓦斯抽采体积分数提高 3.98 倍;相比水射流自驱钻头,修孔速度提高 1.2 倍。

### 符号注释:

$A$  为黏聚强度;  $B$  为压力硬度系数;  $C$  为应变率系数;  $d$  为喷嘴直径, mm;  $D$  为损伤变量;  $D_1$ 、 $D_2$  均为损伤常数;  $F_r$  为射流反冲力, N;  $F_d$  为自进力, N;  $F_f$  为摩擦阻力, N;  $F_p$  为钻进压力, N;  $F_t$  为扭力, N;  $i$  为扭矩损耗系数;  $j$  为综合损失系数,  $m^3$ ;  $k$  为单位长度综合摩擦阻力系数, N/m;  $k'$  为钻头与煤体间摩擦因数;  $K$  为体积模量;  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  均为压力常数;  $L$  为力的作用线到转动轴的垂直距离, m;  $m_s$  为填洞所用砂质量, kg;  $M$  为总扭矩, N·m;  $M_1$  为摩擦扭矩;  $M_2$  为破煤扭矩, N·m;  $n$  为转速, r/min;  $N$  为压力硬度指数;  $p$  为射流压力, MPa;  $p^*$  为归一化静水压力,  $p^*=p_1/f_c$ ,  $p_1$  为静水压力, MPa,  $f_c$  为单轴抗压强度, MPa;  $p_{lock}$  为压实压力, GPa;  $p_{crush}$  为压碎体压力, MPa;  $S_1$  为钻头与煤体接触面积,  $m^2$ ;  $S_2$  为切削齿与煤体接触面积,  $m^2$ ;  $T^*$  为归一化抗拉强度,  $T^*=T/f_c$ ,  $T$  为抗拉强度, MPa;  $V_c$  为破煤体积,  $m^3$ ;  $x$  为钻孔修复距离, m;  $\alpha$  为张角, (°);  $\beta$  为偏心角, (°);  $\varepsilon^*$  为等效应变率,  $\varepsilon^*=\varepsilon/\varepsilon_0$ ,  $\varepsilon$  为实际应变率,  $\varepsilon_0$  为参考应变率;  $\varepsilon_p$  为等效塑性应变;  $\Delta\varepsilon_p$  单位时间步长等效塑性应变;  $\varepsilon'_p+\mu'_p$  为当前积分时步下塑性应变之和,  $t$  为积分时间步长;  $\mu_p$  为体积塑性应变;  $\Delta\mu_p$  单位时间步长等效体积塑性应变;  $\mu$  为体积应变;  $\bar{\mu}$  为修正体积应变;  $\mu_{lock}$  为压实体积应变;  $\mu_{crush}$  为压碎体积应变;  $\rho_s$  为所用砂密度,  $kg/m^3$ ;  $\sigma^*$  为归一化等效应力,  $\sigma^*=\sigma/f_c$ ,  $\sigma$  为实际应力, MPa;  $\tau$  为煤体抗剪强度, MPa。

## 参考文献(References)

- [1] 周斌,郝晋伟,张春华. 松软煤层瓦斯钻孔失稳分析及动态密封技术[J]. 煤田地质与勘探, 2016, 44(4): 161-166.  
ZHOU Bin, HAO Jinwei, ZHANG Chunhua. Analysis on borehole instability under coupled multiple stress and dynamic sealing technology in soft coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2016, 44(4): 161-166.
- [2] 杨恒,魏建平,蔡玉波,等. 后混合磨料空气射流喷嘴结构优化及破煤效果研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 114-126.  
YANG Heng, WEI Jianping, CAI Yubo, et al. Structure optimization and coal breaking effect of air jet nozzle for post-mixed abrasive[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 114-126.
- [3] 王耀锋,何学秋,王恩元,等. 水力化煤层增透技术研究进展及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1945-1955.  
WANG Yaofeng, HE Xueqiu, WANG Enyuan, et al. Research progress and development tendency of the hydraulic technology for increasing the permeability of coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 1945-1955.
- [4] 张超,延婧,李树刚,等. 瓦斯抽采钻孔动态密封黏液型材料实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(5): 1033-1040.  
ZHANG Chao, YAN Jing, LI Shugang, et al. Experimental study on dynamic sealing of mucilage material in gas extraction borehole[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(5): 1033-1040.
- [5] 刘勇,戴彪,魏建平,等. 水射流卸压增透钻孔布置优化分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(3): 21-25.  
LIU Yong, DAI Biao, WEI Jianping, et al. Analysis on layout optimization of borehole for pressure relief and permeability improvement by water jet[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(3): 21-25.
- [6] 丁洋,朱冰,李树刚,等. 高突矿井采空区卸压瓦斯精准辨识及高效抽采[J]. 煤炭学报, 2021, 46(11): 3565-3577.  
DING Yang, ZHU Bing, LI Shugang, et al. Accurate identification and efficient drainage of relieved methane in goaf of high outburst mine[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(11): 3565-3577.
- [7] 张超林,王恩元,王奕博,等. 近 20 年我国煤与瓦斯突出事故时空分布及防控建议[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 134-141.  
ZHANG Chaolin, WANG Enyuan, WANG Yibo, et al. Spatial-temporal distribution of outburst accidents from 2001 to 2020 in China and suggestions for prevention and control[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 134-141.
- [8] 刘勇,代硕,魏建平,等. 低压磨料空气射流破硬岩规律及特征实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(6): 1172-1182.  
LIU Yong, DAI Shuo, WEI Jianping, et al. Experimental study on hard rock breaking laws and characteristics by low-pressure abrasive air jet[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1172-1182.
- [9] 苏现波,刘晓,马保安,等. 瓦斯抽采钻孔修复增透技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(6): 58-60.  
SU Xianbo, LIU Xiao, MA Baoan, et al. Repairing and enhancing permeability technology and equipment of gas drainage borehole[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(6): 58-60.

- [10] 张士岭, 和树栋. 瓦斯压力对煤体应力及失稳破坏特性影响分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 847–856.  
ZHANG Shiling, HE Shudong. Analysis of the influence of gas pressure on coal stress and instability failure characteristics[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(4): 847–856.
- [11] 刘勇, 梁博臣, 何岸, 等. 自进式旋转钻头钻孔修复理论及关键参数研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(2): 39–44.  
LIU Yong, LIANG Bochen, HE An, et al. Research on theory and technical parameter of borehole restoration for self-propelling and rotating drill[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(2): 39–44.
- [12] 石智军, 董书宁, 姚宁平, 等. 煤矿井下近水平随钻测量定向钻进技术与装备[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(3): 1–6.  
SHI Zhijun, DONG Shuning, YAO Ningping, et al. Technology and equipment of horizontal measuring directional drilling in underground coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(3): 1–6.
- [13] 沈荷莲, 刘勇, 魏建平, 等. 自激振荡脉冲超临界二氧化碳射流冲击频率变化规律[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(5): 1097–1104.  
SHEN Helian, LIU Yong, WEI Jianping, et al. Impact frequency variation of self-excited oscillation pulsed supercritical carbon dioxide jets[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(5): 1097–1104.
- [14] 杨博凯. 煤层自进式旋转钻头的设计与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.  
YANG Bokai. Design and research on self-propelling and rotating drill for coal seam[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [15] 杨博凯, 卢义玉, 杨晓峰, 等. 煤层自进式水射流钻头优化设计及实验研究[J]. 机械, 2011, 38(1): 6–11.  
YANG Bokai, LU Yiyu, YANG Xiaofeng, et al. Design and research of self-propelled nozzle worked in coal seam with water jet[J]. Machinery, 2011, 38(1): 6–11.
- [16] 刘勇, 代硕, 魏建平, 等. 自进式旋转钻头钻孔修复运动方程及关键参数研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2023, 42(3): 1–9.  
LIU Yong, DAI Shuo, WEI Jianping, et al. Study on motion equations and technical parameters of borehole restoration for self-propelling drill[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2023, 42(3): 1–9.
- [17] 刘勇, 代硕, 魏建平, 等. 水射流自驱钻头自进能力影响因素研究[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(5): 198–206.  
LIU Yong, DAI Shuo, WEI Jianping, et al. Study on factors influencing the self-propelling capacity of self-propelled water jet drill bits[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(5): 198–206.
- [18] 刘力红, 张东速. 自进式旋转射流钻孔的自进运动分析[J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2012, 35(4): 94–97.  
LIU Lihong, ZHANG Dongsu. Self-propelled motion analysis of self-propelled whirling water jet[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 35(4): 94–97.
- [19] 温志辉, 苑永旺, 张铁岗, 等. 水力联合机械钻头修复失效钻孔方法及参数[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(3): 527–539.  
WEN Zhihui, YUAN Yongwang, ZHANG Tiegang, et al. Method and parameters of hydraulic-driven mechanical drill for repairing the invalid gas extraction borehole[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(3): 527–539.
- [20] LIU Songyong, CHANG Huanhuan, LI Hongsheng, et al. Numerical and experimental investigation of the impact fragmentation of bluestone using multi-type bits[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 91: 18–28.
- [21] KARASAWA H, OHNO T, MIYAZAKI K, et al. Experimental results on the effect of bit wear on torque response[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2016, 84: 1–9.
- [22] 解北京, 赵泽明, 徐晓萌, 等. 含瓦斯煤锤击破坏 HJC 本构模型及数值模拟[J]. 煤炭学报, 2018, 43(10): 2789–2799.  
XIE Beijing, ZHAO Zeming, XU Xiaomeng, et al. HJC constitutive model and numerical simulation of hammer damage with gas-containing coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 2789–2799.
- [23] 代硕. 水力自驱钻头钻孔修复关键参数理论与实验研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2023.  
DAI Shuo. Theoretical and experimental study on key parameters of boreholes repair with hydraulic self-propelled drill bits[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2023.

(责任编辑 郭东琼)