

引文格式:杨勇,杨艳国,张兴华,等. 松软低透煤层机械造穴参数优化数值模拟研究[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(4): 854-862.

YANG Yong, YANG Yanguo, ZHANG Xinghua, et al. Numerical simulation of mechanical cavitation parameter optimization in soft and low-permeability coal seam[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4): 854-862.

松软低透煤层机械造穴参数优化数值模拟研究

杨 勇, 杨艳国, 张兴华, 穆永亮, 庞 杰, 张艳新, 邢文静

(太原理工大学 安全与应急管理工程学院, 山西 太原)

摘 要:【目的】以唐安煤矿3[#]煤层为工程背景, 研究机械造穴技术对松软低透煤层的增透效果。【方法】建立了瓦斯抽采流-固耦合数值模型, 利用COMSOL Multiphysics软件研究了造穴段长度与造穴段间距对瓦斯抽采效果影响。【结果】增加造穴段长度或减小造穴段间距可以增加孔内洞穴煤体与空气接触面积, 同时使煤体产生新的裂隙或使原有裂隙增大, 增加瓦斯运移通道, 使瓦斯在卸压过程中能更快地被煤体解吸, 提高煤体渗透性。综合考虑提升煤层瓦斯抽采效果以及节省现场施工成本和施工时间的情况下, 合理造穴段长度和造穴段间距分别取1 m和10 m为宜。在唐安煤矿3[#]煤层进行了现场试验, 比较不同造穴段长度和造穴段间距对抽采纯量的影响, 现场考察结果与数值模拟结果相吻合。通过与普通钻孔对比, 机械造穴钻孔单孔瓦斯抽采纯量提高了2.95~3.65倍, 表明机械造穴相较于普通钻孔更适用于松软低透煤层。

关键词:松软低透煤层; 机械造穴参数; 普通钻孔; 瓦斯抽采; 数值模拟

中图分类号:TD712 **文献标识码:**A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20240505

文章编号:1007-9432(2026)04-0854-09

Numerical Simulation of Mechanical Cavitation Parameter Optimization in Soft and Low-Permeability Coal Seam

YANG Yong, YANG Yanguo, ZHANG Xinghua, MU Yongliang, PANG Jie,
ZHANG Yanxin, XING Wenjing

(College of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology,
Taiyuan, Shanxi, China)

Abstract:【Purposes】In order to study the anti-reflection effect of mechanical cavitation technology on soft and low-permeability coal seam, a fluid-solid coupling numerical model for gas extraction is established on the basis of the engineering background of No.3 coal seam in Tangan Coal Mine. 【Methods】The effects of cavitation section length and spacing on gas extraction effect were studied by using COMSOL Multiphysics software. 【Results】The results show as follows: Increasing the length of cavitation section or decreasing the spacing of cavitation section can increase the contact area between coal and air in the cavity, generate new cracks in the coal body or enlarge the original cracks, increase gas migration channels, make gas desorption faster in the process of pressure relief, and increase permeability of coal body. Considering the improvement of coal seam gas extraction effect and

收稿日期: 2024-06-25; 修回日期: 2024-07-23

基金项目: 山西省基础研究计划项目(202203021212280)

第一作者: 杨勇, 硕士研究生, (E-mail)1633770331@qq.com

通信作者: 杨艳国, 博士, 副教授, 主要从事煤与瓦斯突出防治研究, (E-mail)591009403@qq.com

the saving of engineering cost and construction time, the reasonable length and spacing of cavitation section should be 1 and 10 m, respectively. A field test was carried out in the No. 3 coal seam of Tanggan Coal Mine to compare the influence of different caving section lengths and caving section spacing on the extraction purity. The field investigation results are in agreement with numerical simulation results. Compared with ordinary drilling, the pure gas extraction from single hole of mechanical cavitation drilling is increased by 2.95~3.65 times, indicating that mechanical cavitation drilling is more suitable for soft and low-permeability coal seam than ordinary drilling.

Keywords: soft low-permeability coal seam; mechanical cavitation parameters; ordinary drilling; gas extraction; numerical simulation

煤层瓦斯是一种新型洁净能源,由于各煤矿条件复杂,抽采渗透率低,抽采难度较大。为了提高煤层渗透性,国内外学者提出了很多的增透措施。对煤层进行钻孔瓦斯抽采是提高瓦斯渗透率的常见手段,但普通钻孔对于抽采条件要求较高且抽采效果较差,因此,对普通抽采钻孔进行改进成为急需研究的内容。我国大部分煤层的透气性较低,尤其对于松软低透煤层,普通钻孔抽采时间长,且预抽效果较差,而水力压裂和水力割缝等目前常用的增透措施持久性差,且易导致煤体局部应力集中。为此,根据煤层赋存条件及特征,提出机械造穴钻孔技术。造穴钻孔是在钻头切割煤体的过程中,同时进行高压水冲击、破碎钻孔周围煤体,再将破碎的煤体冲出钻孔,形成孔内洞穴,对钻孔周围煤体卸压,使得对煤层预抽效果更好,进而更快地实现抽采达标。对于松软低透煤层,机械造穴技术是否可行、抽采效果如何,以及优化机械造穴相关实施参数还需要详细论述。

近年来,煤与瓦斯突出是造成重大人员伤亡和经济损失最主要的原因之一,对煤层进行瓦斯预抽是消除事故的主要方法^[1]。然而由于我国煤层赋存复杂,煤层渗透率偏低且通常在 $1 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ 以下,导致抽采难度大,抽采效率低^[2]。对于松软低透煤层国内外学者提出了许多增透消突的方法,如水力压裂、水力割缝、水力冲孔等^[3]。其中,水力压裂技术在外部能量输入过大的情况下,存在引起煤体局部应力集中和诱发高应力煤层地质灾害的风险^[4]。水力割缝对硬煤质效果较好,但对于松软煤层容易发生裂缝闭合的问题,影响增透效果^[5]。水力冲孔造穴技术是通过高压水射流冲击煤体,在煤体内形成孔穴,孔穴周围煤体应力重新分布生成大量裂隙,使裂隙发育,增加瓦斯流通通道,使得煤层渗透率增加^[6]。但水力冲孔技术的媒介是高压水流,在排渣排水方面存在问题,且在淹没环境下,水射流

与周围环境的介质密度相同,水流在穿过水域过程中会引起能量损耗,使得破煤效果不佳^[7]。而机械造穴技术在一定程度上可以缓解水力冲孔过程中因淹没水流而出现的动力不足和排渣困难等问题^[8,9]。对于机械造穴技术,柴锡军等^[10]研发了一套打钻、造穴一体化机械造穴技术,经过现场对比发现,与普通水力冲孔相比,机械造穴更能增大瓦斯抽采浓度,提高抽采效率,缩短抽采达标时间。邓书军等^[11]通过对透气性煤层使用机械造穴卸压增透技术,发现煤层裂隙可以更好发育,大幅度提高煤层透气性。王亮等^[12]建立了钻孔造穴后煤层的渗透率演化方程,分析了钻孔造穴的增透机理。毕猛等^[13]研制了一款利用钻杆旋转带动产生的离心力作为打开动力的离心式机械刀,通过调节钻杆转速来控制刀臂打开角度,更加优化了离心式机械刀内部结构及刀臂性能,使得机械造穴半径更加可控,对瓦斯安全高效抽采具有良好的效果。

以上研究对于煤层顺层钻孔机械造穴技术具有指导作用,然而,这些研究未考虑机械造穴技术对于松软低透煤层的实际适用性及造穴钻孔中主要造穴参数(如造穴段长度与造穴段间距对煤层抽采效果)的影响。山西唐安煤矿受构造应力影响,煤层渗透率低,且煤质松软,具有显著的松软低透煤层特征,其埋藏深(400~1 200 m),瓦斯含量高($10 \sim 20 \text{ m}^3/\text{t}$),瓦斯压力大(约 $1.5 \sim 3.5 \text{ MPa}$),煤的坚固性系数低($0.2 \sim 0.7$),透气性低(渗透率 $0.001 \sim 0.01 \times 10^{-15} \text{ m}^2$)。该煤矿3[#]煤层在进行掘进施工时,必须预先抽采瓦斯,防止煤与瓦斯突出。之前预抽瓦斯使用的是普通钻孔,其抽采时间长,抽采效率低,因此现阶段在3[#]煤层引进机械造穴技术来提高煤层瓦斯抽采效率。基于此,本文以唐安煤矿为背景,建立考虑瓦斯渗流、煤体变形、气体吸附的流-固耦合模型,分析不同造穴参数对瓦斯抽采效果的影响,并在3[#]煤层进行现场施工来验证数

值模拟的正确性,同时对比机械造穴与普通钻孔的抽采效果,为同类型煤矿的瓦斯抽采及安全生产提供参考^[14]。

1 理论模型建立

1.1 瓦斯渗流控制方程

煤体中瓦斯气体在裂隙中做层流运动,符合达西定律^[15],且瓦斯主要以吸附态和游离态进行赋存,气体在浓度梯度与压力梯度作用下进行扩散,煤层中的瓦斯在裂隙渗流的连续方程为:

$$\varphi_i \frac{\partial(p_i)}{\partial t} + p_i \frac{\partial(\phi_i)}{\partial t} - \frac{k}{\mu} \nabla \cdot (p_i \nabla p_i) - 1/(D_i \sigma) \cdot (1 - \phi_i)(p_m - p_i) = 0. \quad (1)$$

式中: t 为时间,s; p_i 为煤体裂隙内的瓦斯压力,Pa; k 为煤体渗透率,mD; μ 为甲烷动力学黏度,Pa·s; ∇p_i 为裂隙压力梯度; D_i 为煤基质扩散系数,m²/s; σ 为煤基质形状因子,m⁻²; ϕ_i 为煤体裂隙孔隙率,%; p_m 为煤体基质内瓦斯压力,Pa。

1.2 煤体变形控制方程

假设煤体是各向同性,基于弹性力学理论 Terzaghi 有效应力定律,考虑游离瓦斯压力不断变化,导致基质骨架变形,煤体变形控制方程为:

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 \mu_i}{\partial x_j^2} + \frac{G}{1-2\nu} \sum_{j=1}^3 \frac{\partial^2 \mu_j}{\partial x_j \partial i} - \frac{(3\lambda - 2G3ak_s)}{3k_s} \frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i = 0. \quad (2)$$

式中: λ 、 G 为拉梅常数; μ_i 为3个 $x_i(x_j)$ 方向($i, j=1,$

2,3)的应力分量, N ; v 为甲烷流速,m/s; k_s 为弹性变形阶段煤体渗透率,mD; a 为等效孔隙度; F_i 为体积力,N/m³。

1.3 煤体孔隙率和渗透率耦合方程

在不考虑温度以及瓦斯吸附解吸对煤骨架变形的影响下,游离瓦斯压力导致煤骨架应变下的孔隙率为^[16]:

$$\phi = 1 - \frac{(1 - \phi_0)}{1 - \epsilon_v} \left(1 - \frac{\Delta p}{k_s} \right). \quad (3)$$

式中: ϕ_0 为煤初始孔隙率; ϵ_v 为煤体在变形过程中所产生的体积应变; Δp 为瓦斯压力变化。

煤体孔隙率的变化导致渗透率的改变,煤体渗透率可表示为^[17]:

$$k = \frac{k_0}{1 + \epsilon_v} \left[1 + \frac{\epsilon_v + \Delta p(1 - \phi_0)/k_s}{\phi_0} \right]. \quad (4)$$

式中: k_0 为煤初始渗透率,mD。

经以上分析,将(1)–(4)式作为瓦斯流动的流固耦合控制方程。

2 机械造穴参数数值模拟分析

2.1 几何模型

根据唐安煤矿试验区域 3312 回风巷现场顺层造穴钻孔施工情况,3[#]煤层埋深 556 m,平均煤厚 6.09 m,煤层温度为 297 K。建立简化的几何模型如图 1 所示。模型尺寸为 100 m×6.09 m,模型左边、右边和下边设置为固定边界,上边为恒定应力边界,代表上覆岩层应力,取 6.5 MPa。

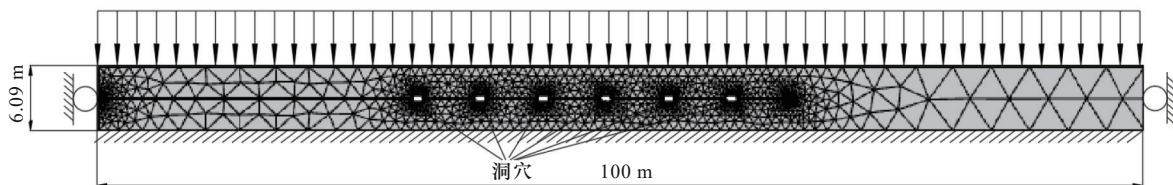


图 1 顺层机械造穴钻孔几何模型

Fig. 1 Geometric model of mechanical caving borehole along bedding

2.2 模拟参数

数值模拟所需要的主要参数,由实验室及试验现场测定所得,如表 1 所示。

2.3 模型验证

郝从猛在李村煤矿开展了机械造穴技术的相关研究,并进行了现场测试,记录了相关数据^[18]。为了验证本文模型的准确性,对李村煤矿的瓦斯抽采进行模拟,建模中使用的关键参数如表 2 所示,并将模拟结果与现场数据进行了对比。文献[18]给

出了煤层机械造穴钻孔周围残余瓦斯压力变化值,图 2 为监测数据与模拟结果的对比。从图 2 可以看出模拟结果与现场监测较为吻合,机械造穴钻孔在煤层中随着抽采时间的延长,煤层残余瓦斯压力在不断下降;且总体趋势一致,最大误差小于 10%,证明了机械造穴后煤体瓦斯流-固耦合模型的合理性。

2.4 模拟结果

2.4.1 造穴段长度对抽采效果影响

在本煤层使用机械造穴技术,造穴段长度以及

表 1 模型主要参数
Table 1 Main parameters of the model

参数名称	数值
煤层弹性模量 E/GPa	2.7
煤层泊松比	0.35
煤层瓦斯初始压力/MPa	1.6
初始渗透率 k_0/mD	1.79×10^{-18}
瓦斯动力粘度/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$	1.85×10^{-5}
初始孔隙率 Φ_0	0.037
抽采负压 p_0/kPa	15
瓦斯摩尔质量 $M/(\text{kg}\cdot\text{mol}^{-1})$	16
煤体视密度 $\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 370

表 2 模拟验证中使用的关键参数
Table 2 Key parameters used in simulation validation

参数名称	数值
煤层弹性模量 E/GPa	2.5
煤层泊松比	0.32
煤层瓦斯初始压力/MPa	1.6
初始渗透率 k_0/mD	1.65×10^{-18}
初始孔隙率 Φ_0	0.036
煤体视密度 $\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1 356

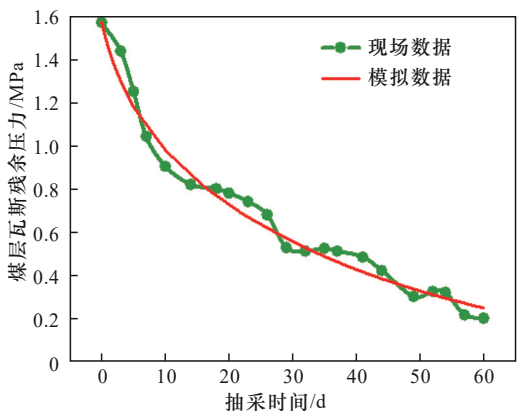


图 2 模拟结果与实测数据对比

Fig. 2 Comparison between simulation results and measured data

造穴段间距都与造穴后煤层的渗透率有关^[19]。造穴后洞穴大小会影响钻孔瓦斯抽采效果,由文献[20]得到模拟造穴段长度为 0.3、0.4、0.5 m 机械造穴钻孔抽采煤层瓦斯压力分布情况。在此基础上分别设定洞穴长度即造穴段长度为 0.5、1.0、1.5 m,且每个钻孔均从距离孔底 5 m 处开始造穴,每个穴间距均设置为 5 m,造 6 个穴。取造穴钻孔底部 3 个洞穴截面图来分析不同造穴段长度下,不同抽采时间(0、5、15、30、45、60 d)机械造穴钻孔对煤层压力影响变化,如图 3—图 5。由图 3、图 4、图 5 煤层瓦斯压力云图可知,分别进行 5、15、30、45、60 d 抽采,煤层瓦斯压力有不同幅度下降。在普通钻孔段与造穴段瓦斯压力下降幅度不同,造穴段大于普通钻孔

段,这是由于造穴段刀臂割煤体损伤范围更大,能够产生更多的瓦斯通道,瓦斯流动更容易。

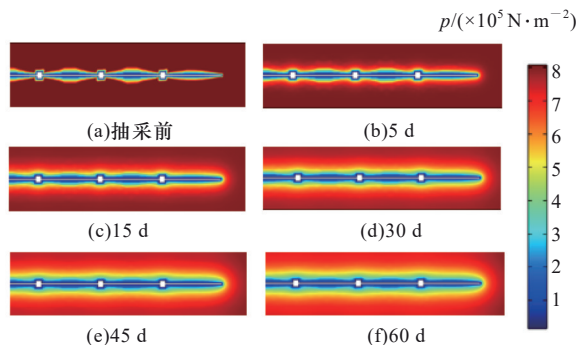


图 3 造穴段长度为 0.5 m 时煤层瓦斯压力变化

Fig. 3 Changes of coal seam gas pressure when the length of cavitation section is 0.5 m

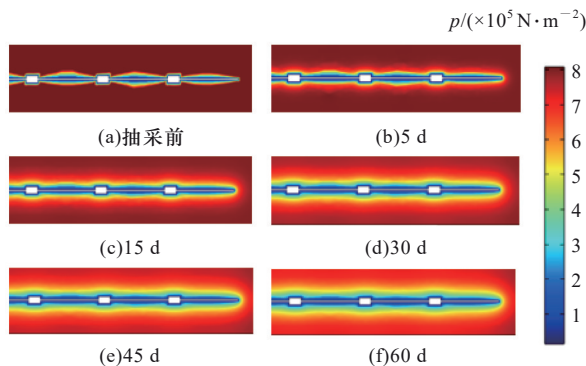


图 4 造穴段长度为 1 m 时煤层瓦斯压力变化

Fig. 4 Changes of coal seam gas pressure when the length of cavitation section is 1 m

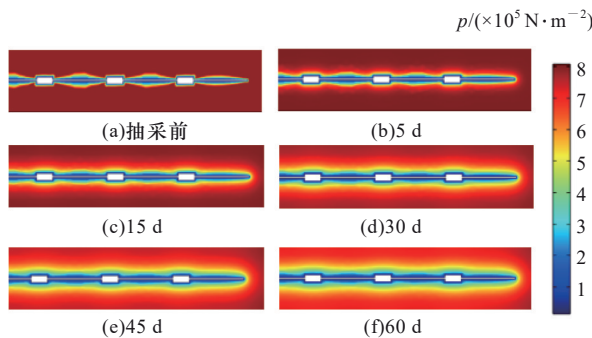


图 5 造穴段长度为 1.5 m 时煤层瓦斯压力变化

Fig. 5 Changes of coal seam gas pressure when the length of cavitation section is 1.5 m

通过观察造穴后煤体的残余瓦斯压力,来说明造穴段长度对瓦斯抽采效果的影响。在抽采 5 d 时,钻孔内瓦斯压力变化不明显,但钻孔瓦斯四周压力开始下降,两个洞穴及其中间部分压力变化逐渐形成纺锤体,且造穴段长度为 1.5 m 的纺锤体明显最大,即说明抽采 5 d 时,造穴段长度为 1.5 m 所在煤体残余压力较小,造穴钻孔抽采效果较好。在抽采 15 d 时,三种造穴段所展示出来的瓦斯压力云图基本一致。抽采 30 d 时,造穴段长度为 1.5 与 1 m 的

煤体压力相似但均小于造穴段长度 0.5 m 的煤体压力。抽采 45 d 时,造穴段长度为 1.5 与 1 m 较造穴段长度 0.5 m 的煤体瓦斯扩散速度快,造穴孔附近出现白色抽采带,且整个煤层的瓦斯压力也逐渐下降。在抽采达到 60 d 时,造穴段长度 1.5 与 1 m 的煤体残余瓦斯压力相近,均比造穴段长度为 0.5 m 的煤体残余瓦斯压力低,钻孔抽采范围也均比造穴段长度为 0.5 m 的大,白色抽采带逐渐由孔中心向煤层两边蔓延,整个煤层的瓦斯压力继续减小。

为更加准确合理地选取造穴段长度,对不同造穴段长度(0.5、1、1.2、1.5 m)进行量化处理,观察煤层瓦斯压力随抽采时间的变化情况。在模型造穴钻孔洞穴之间取二维截点(坐标)进行瓦斯压力分析,如图 6 所示。

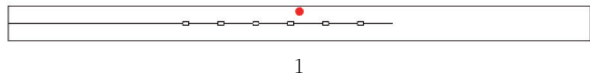


图 6 二维截点分布图

Fig. 6 Two-dimensional intercept distribution diagram

不同造穴段长度瓦斯压力随着抽采时间的变化如图 7 所示。由图 7 可知,在抽采过程中,造穴段长度为 0.5、1、1.2、1.5 m 四种情况下,煤层瓦斯压力变化趋势基本一致。其煤层瓦斯初始压力均为 1.6 MPa,随着抽采开始,煤层瓦斯压力逐渐下降且下降幅度比较大,四种造穴段长度在抽采前期显示出的抽采效果也比较接近。但随着抽采时间的不断延长,抽采后期抽采速率在逐渐降低,曲线趋于平缓。在前 5 d 的抽采过程中,此时由于刚刚开始造穴抽采,四种造穴段长度煤体瓦斯残余压力基本相同,但造穴段长度为 1.5 m 的煤体洞穴煤壁暴露面积相对较大,抽采效果更好一些。抽采 30 d 时,造穴段长度为 1.5 m 的煤体瓦斯压力比造穴段长度为 1 m 的煤体压力低 0.003 5 MPa,且造穴段长度为 1 m 比 0.5 m 的煤体压力下降幅度明显。抽采 60 d 时,造穴段长度为 1 m 的煤体瓦斯压力比造穴段长度为 0.5 m 的煤体低 0.003 9 MPa,造穴段长度为 1.5 m 的煤体瓦斯压力比造穴段长度为 1 m 的煤体低 0.004 3 MPa,说明在一定范围内,随着造穴段长度增加,机械造穴钻孔对煤层瓦斯抽采范围逐渐增大。

同时从图 7 可看出,造穴段长度为 1 m 与 1.2 m 的机械造穴钻孔在前 30 d 抽采过程中,煤层残余瓦斯压力随抽采时间降低的曲线基本重合,后 30 d 抽采过程中造穴段长度为 1.2 m 的机械造穴钻孔虽然比造穴段长度为 1 m 造穴钻孔抽采效果要好,但效果并不突出,即造穴段长度为 1、1.2、1.5 m 的造穴

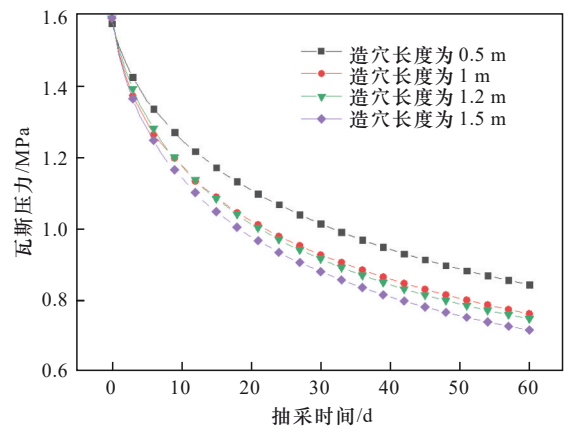


图 7 不同造穴段长度下瓦斯压力随时间变化

Fig. 7 Variations of gas pressure with time under different cavitation lengths

钻孔瓦斯抽采效果接近,煤层瓦斯压力下降幅度与速率均相近,可知增加造穴段长度带来的瓦斯抽采效果提升是逐渐减弱的。在现场施工过程中,常见的矿用钻杆长度多为 1、1.5 和 2 m,而造穴过程中采用后退式造穴,即边退杆边造穴的方式,为方便计算造穴位置与记录施工进度,宜选择造穴段长度 1 m 或 1.5 m 来进行施工。同时考虑造穴段长度为 1.5 m 钻孔的施工时间长且对钻机消耗大,最终在确定合理造穴工艺时应选造穴段长度为 1 m。

2.4.2 造穴段间距对抽采效果影响

由于一般煤矿工作面钻孔长度确定且相同,则造穴钻孔的造穴段间距对于造穴效果的影响也比较突出,尤其在固定长度的钻孔内,选择合适的造穴间距可以大幅度缩短瓦斯抽采达标所需要的时间,提高瓦斯抽采效率且减少钻孔施工时间,还可以防止由于孔内洞穴过多及煤体应力扰动所导致的孔内坍塌。在上文中已对造穴段长度进行了分析,发现造穴段长度为 1 m 时瓦斯抽采效果较好,在此基础上,进一步分析造穴段间距对瓦斯抽采效果的影响。由于在距煤壁 30 m 内瓦斯可由煤壁向外进行自由扩散,且为防止距煤壁太近,造穴应力扰动过大,导致钻孔坍塌,故此次模拟在钻孔前 30 m 内不造穴,在固定钻孔长度内具体造穴参数情况如表 3 所示。

表 3 造穴参数情况表
Table 3 Cavitation parameters

造穴段间距/m	造穴段长度/m	孔长/m	洞穴个数
5	1	96	10
9	1	96	6
10	1	96	6
11	1	96	5
15	1	96	4

为评价不同造穴段间距对煤层瓦斯抽采的影响,分析了不同造穴段间距下抽采60 d时的瓦斯压力变化云图,如图8所示。

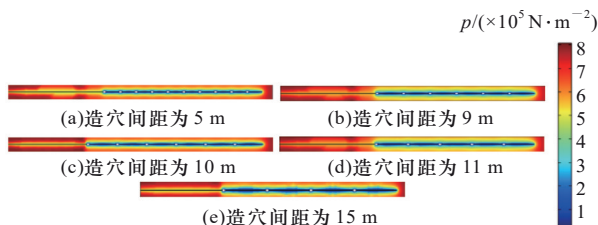


图8 不同造穴间距抽采60 d时的瓦斯压力变化云图
Fig. 8 Cloud maps of gas pressure variation during 60 d of extraction with different cavitation spacing

从图8可知,在连续抽采60 d时,机械造穴间距不同瓦斯抽采效果不同。造穴段长度为5、9、10、11、15 m的钻孔两个相邻洞穴中间的瓦斯压力呈纺锤状,并依次增大,说明在造穴段间距为15 m时,两个洞穴之间瓦斯抽采效果最好。但是由于一般煤层钻孔长度固定,所造穴个数固定,则需要考虑整个钻孔抽采效果。为从五种造穴工艺中最终获得更为合理的造穴间距,将对抽采60 d后瓦斯抽采有效半径进行分析。

为量化不同抽采时间下煤层瓦斯压力的变化,在造穴段长度为1 m的模型中,选择在洞穴中心垂直于水平方向的直线引入二维截线来分析瓦斯抽采有效半径,如图9所示。



图9 二维截线分布
Fig. 9 Two-dimensional transversal distribution

大气压力按0.1 MPa进行考察,本文将煤层瓦斯压力降到0.74 MPa作为煤层抽采达标要求,机械造穴瓦斯抽采效果可通过考察机械造穴钻孔瓦斯抽采半径的实际变化来得知^[21]。从图10可以看出,抽采10 d时,造穴间距为5 m的钻孔有效抽采半径为0.88 m,造穴间距为9 m的钻孔有效半径为0.75 m,造穴间距为10 m的钻孔有效半径为0.67 m,造穴间距为11 m的钻孔有效抽采半径为0.63 m,造穴间距为15 m的钻孔有效抽采半径为0.38 m。可以看出,造穴间距为5 m的有效半径是造穴间距为9 m的1.17倍,是造穴间距为10 m的1.31倍,是造穴间距为11 m的1.4倍,是造穴间距为15 m的2.32倍。在抽采60 d时,造穴间距为5 m的钻孔有效抽采半径为2.64 m,造穴间距为9 m的钻孔有效抽采半径为2.19 m,造穴间距为10 m的钻孔有效抽采半径

为2.07 m,造穴间距为11 m的钻孔有效抽采半径为2.01 m,造穴间距为15 m的钻孔有效抽采半径为1.55 m。造穴间距为5 m的有效半径是造穴间距为9 m的1.21倍,是造穴间距为10 m的1.28倍,是造穴间距为11 m的1.31倍,是造穴间距为15 m的1.7倍。这些数据说明,造穴钻孔的间距会影响钻孔的有效抽采半径,进而影响造穴钻孔的抽采效果。由表3可知,当选取造穴段间距为5 m的造穴工艺时,施工96 m深的造穴孔需钻机造10个洞穴,而选取造穴段为9 m和10 m的则需造6个洞穴,选取造穴段长度为11 m的需造5个洞穴,因此在施工现场减少施工量的同时保证抽采效果的前提下,造穴段长度选择9、10或11 m比较合适。

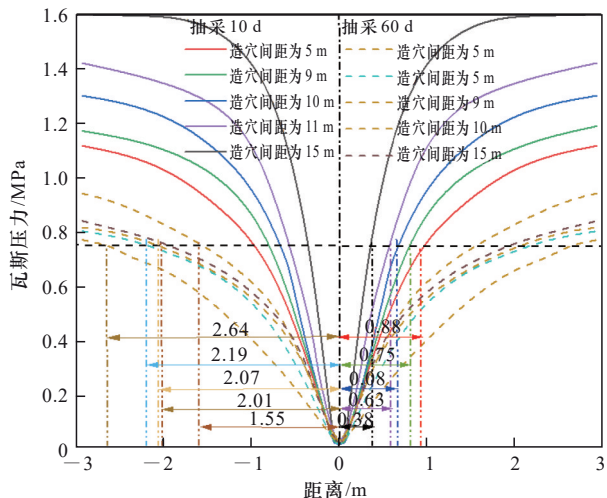


图10 不同造穴段间距下煤层瓦斯压力随抽采时间变化
Fig. 10 Changes of coal seam gas pressure with extraction time under different caving intervals

由图11可知,随着抽采时间的延长,机械造穴钻孔在煤层的有效抽采半径不断增大,且增长速率不断减小,曲线逐渐趋于平缓。在造穴段长度相同的情况下,机械造穴钻孔造穴段间距不同,其抽采效果也不同,造穴段间距越小,同一时间点其有效抽采半径越大。这是由于在固定长度的造穴钻孔中,不同造穴段间距钻孔内洞穴个数并不相同,洞穴越多,煤壁与空气接触面积越大,洞穴四周煤体发生卸荷损伤,其应力扰动增大,煤层渗透率增加。造穴间距为9、10、11 m的造穴钻孔,有效抽采半径随时间延长而逐渐增大,增长幅度与趋势均接近,孔内洞穴数都是6个,且抽采效果很接近,而造穴间距为11 m的钻孔虽然洞穴个数相比前两者少一个,但抽采效果远不如前两种工艺。综合考虑现场施工及实际应用效果,机械造穴钻孔最佳造穴间距选为10 m比较合适。

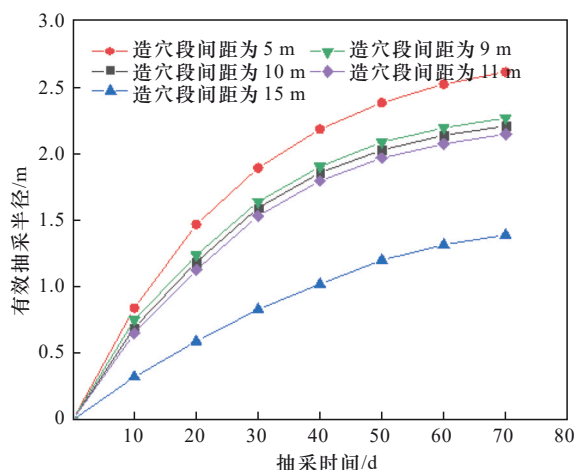


图 11 不同造穴间距下造穴钻孔有效抽采半径随时间变化

Fig. 11 Changes of effective extraction radius with time under different cavitation spacing

3 现场考察

前文通过数值模拟得出了最佳造穴段间距与造穴段长度,分别为 1 与 10 m。本节将通过现场试验考察,校验数值模拟结果,并对比机械造穴与普通钻孔抽采效果,阐明机械造穴优势。

3.1 施工方案设计

此次考察地点位于晋城市高平市唐安煤矿 3[#]煤层 3312 回风巷距巷口 800 m 位置处。该煤层煤质松软且透气性较差,平均煤厚为 6.09 m,煤的种类为无烟煤。

基于数值模拟结果(图 10)可知,造穴段长度为 1 m、造穴间距为 10 m 的造穴钻孔施工 60 d 的有效抽采半径为 2.07 m,在设计钻孔时为了安全考虑,将钻孔间距设置为 6 m 进行施工。共两组钻孔在距巷道口 800 m 处进行施工考察,第一组在测站 1 进行施工,作为造穴钻孔不同参数对比(1—8[#]造穴钻孔);第二组作为普通钻孔与造穴钻孔(9[#]、10[#])抽采效果对比,在测站 2 进行施工,总共施工 10 个钻孔。由于穴长为 1 与 0.5 m 的造穴钻孔模拟效果相近且穴长为 0.5 m 的造穴个数过多、工程量大且不安全;而造穴段长度为 1.2 m,造穴间距为 9、11 m 的机械造穴钻孔在井下施工过程中,无法保证机械造穴技术现场试验的准确性,因此,为对比普通钻孔与机械造穴钻孔瓦斯抽采效果,以及验证上文模拟不同造穴参数对煤层瓦斯抽采影响,选择施工造穴段长度为 1 与 1.5 m,造穴间距为 5、10、15 m 的机械造穴钻孔来进行效果对比,具体现场施工安排与钻孔参数如图 12 和表 4 所示。

通过施工后所获钻孔瓦斯抽采纯量来考察该

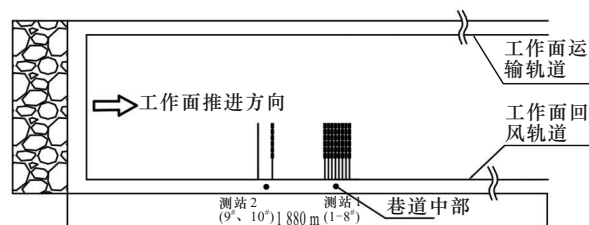


图 12 考察钻孔布置图

Fig. 12 Drill hole layout

表 4 现场施工钻孔参数表

Table 4 Drilling parameters for site construction

编号	孔长/m	造穴段长度/m	造穴段间距/m
1#	96	1	5
2#		1.5	5
3#		1	10
4#		1.5	10
5#		1	15
6#		1.5	15
7#		1	9
8#		1	11
9#		1	10
10#		/	/

松软低透煤层机械造穴钻孔主要造穴参数即造穴段长度与造穴段间距对抽采效果的影响,最终确定合理造穴工艺的造穴钻孔与孔径、孔深、封孔深度、抽采方式(采用 2BEC52 型水环式真空泵,抽采负压为 20.85 kPa 进行抽采)均相同的普通钻孔进行效果对比。

3.2 不同造穴参数现场监测结果对比

在 3312 回风巷进行现场施工,造穴段长度 1 m 和 1.5 m 的造穴钻孔在不同的造穴间距情况下,现场实测瓦斯抽采纯量变化如图 13 所示。

由图 13 可知,随着抽采持续进行,造穴间距为 5 m、造穴段长度为 1.5 m 时的钻孔抽采纯量大于造穴段长度为 1 m 的钻孔,抽采效果更好。大部分抽采量与抽采时间满足指数函数关系^[22],图中趋势走势说明数据可反映真实抽采情况,穴长为 1.5 m 的造穴钻孔瓦斯抽采量大于穴长为 1 m 造穴钻孔瓦斯抽采量。同样由图 13(b)、(c)可知,在造穴段间距为 10、15 m 的造穴钻孔中,造穴段长度为 1.5 m 的造穴抽采纯量均大于造穴段长度为 1 m 的造穴钻孔瓦斯抽采纯量。在松软低透煤层中进行机械造穴时,增加造穴段长度,会提升瓦斯抽采效果,但造穴段长度为 1.5 m 造穴钻孔的瓦斯抽采提升效果比造穴段长度为 1 m 的造穴钻孔略好,说明随着造穴段长度的增加,瓦斯抽采虽然在提升但提升的效果逐渐减弱,与模拟结果相同。

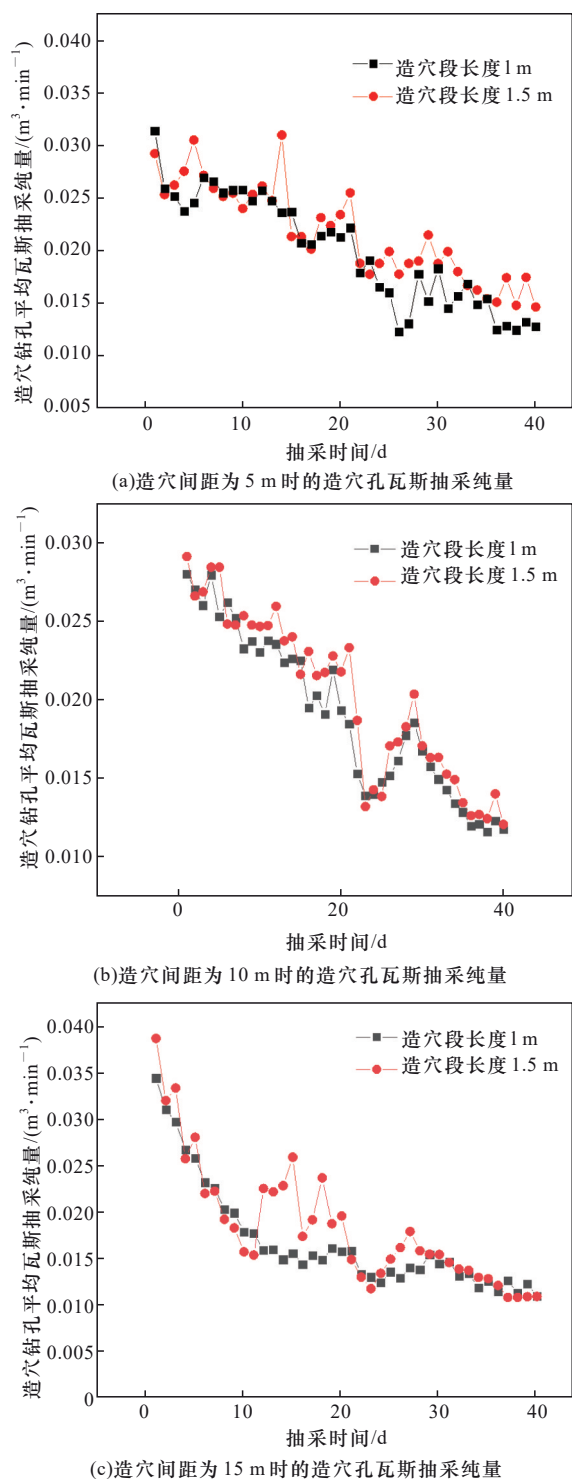


图13 不同造穴段长度、不同造穴间距造穴钻孔瓦斯抽采纯量变化图

Fig. 13 Variations of gas extraction net quantity in different caving section lengths and different caving spacing

由图14可知,不同造穴工艺的造穴钻孔随着抽采时间延长,其钻孔瓦斯抽采纯量衰减规律相同。在抽采初期,造穴间距为15 m的造穴钻孔抽采纯量较高但衰减速度也很快。在抽采中后期,造穴间距

为5 m的造穴钻孔瓦斯抽采纯量均要高于其他造穴工艺钻孔,且抽采纯量还在随着抽采时间的延长而下降。而造穴间距为9、10、11 m的造穴钻孔,其每天煤层瓦斯抽采纯量接近,抽采速率也相近,瓦斯抽采纯量曲线随着抽采时间延长而逐渐趋于平缓。现场监测结果与上文模拟得到的结论相同,综合考虑工作量、成本及施工条件,最佳造穴间距选择10 m较为合适。

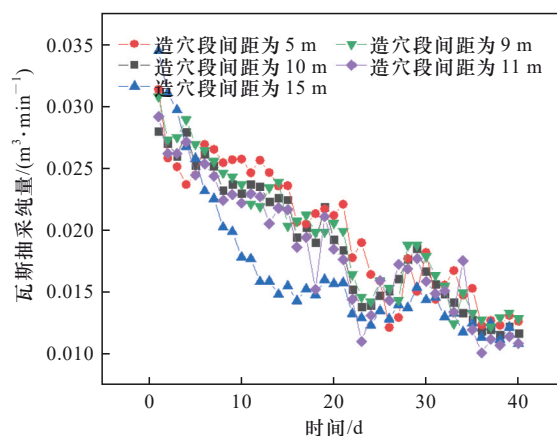


图14 不同造穴段间距造穴孔(造穴段长度为1 m)瓦斯抽采纯量变化

Fig. 14 Changes of gas extraction purity at different spacing of cavitation holes (the length of cavitation section is 1 m)

图15对比了造穴钻孔(造穴段长度为1 m、造穴段间距为10 m)与普通钻孔的瓦斯抽采纯量。由图15可知,在同一抽采地点同样孔径、孔深、封孔工艺及抽采方式抽采40 d时,机械造穴钻孔(造穴段长度为1 m、造穴段间距为10 m)瓦斯抽采纯量相比普通钻孔抽采纯量明显提高,单孔瓦斯抽采纯量可提高2.95~3.65倍。这说明机械造穴技术在松软低透煤层完全适用且可大幅提高煤层瓦斯抽采效率,可以更高效地完成煤层抽采目标。

4 结论

本文以唐安煤矿3#煤层为研究背景,建立了考虑瓦斯渗流、煤体变形、气体吸附的机械造穴钻孔瓦斯抽采流-固耦合模型,通过数值模拟分析了不同造穴参数(造穴段长度与造穴段间距)对瓦斯抽采效果的影响,得到了最优造穴参数,并通过现场应用进行了检验,可为后续类似煤层瓦斯抽采提供指导,结论如下:

1)数值模拟与现场所得结论一致,造穴段长度为1和1.2 m的造穴钻孔抽采效果接近,但考虑现场施工工作量与可行性,造穴段最佳长度宜选择

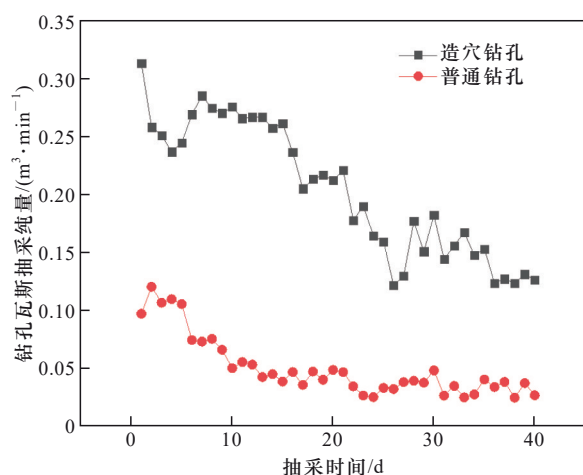


图 15 造穴钻孔与普通钻孔瓦斯抽采纯量对比

Fig. 15 Comparison of pure gas extraction from cavitation borehole and ordinary borehole

1 m,造穴间距为 5 m 的造穴钻孔抽采效果最佳;在固定长度钻孔内造穴个数太多,工作量大、成本高且可能造成孔内应力扰动大而塌孔,而 9、10、11 m 三者孔内洞穴数量相近,故在施工过程中考虑施工可行性与准确性,最终确定最佳造穴间距为 10 m。

2)机械造穴增透技术在松软低透煤层可增加煤体暴露面积,增大瓦斯运移速率,提高煤层透气性,其抽采效果比普通钻孔更加显著,单孔瓦斯抽采纯量相较于普通钻孔提高了 2.95~3.65 倍,可以更高效地完成煤层抽采达标。

参考文献:

- [1] 王义均,黄光利.高瓦斯矿井低含量煤层工作面瓦斯预抽必要性论证[J].煤炭技术,2021,40(2):103-106.
- [2] Ni G H, Dong K, Li S, et al. Gas desorption characteristics effected by the pulsating hydraulic fracturing in coal[J]. Fuel, 2019, 236:190-200.
- [3] 李偲.定向长钻孔水力压裂煤层增透提高瓦斯抽采效果研究[D].贵阳:贵州大学,2023.
- [4] 王永革,令狐建设.地面井水力压裂增透技术在立井快速揭煤中的应用[J].矿业安全与环保,2020,47(5):77-80.
- [5] 曹建军.超高压水力割缝卸压抽采区域防突技术应用研究[J].煤炭科学技术,2020,48(6):88-94.
- [6] 武国胜,武泽铭,潘鹏飞,等.高瓦斯低渗透煤层冲孔造穴卸压增透技术及装备应用[J].能源与环保,2022,44(3):31-36,41.
- [7] 卢义玉,黄杉,葛兆龙,等.我国煤矿水射流卸压增透技术进展与战略思考[J].煤炭学报,2022,47(9):3189-3211.
- [8] 刘春.松软煤层瓦斯抽采钻孔塌孔失效特性及控制技术基础[D].徐州:中国矿业大学,2015.
- [9] 李波,孙东辉,张路路.煤矿顺层钻孔瓦斯抽采合理布孔间距研究[J].煤炭科学技术,2016,44(8):121-126,155.
- [10] 柴锡军,熊俊杰,杨程涛.煤矿井下机械造穴卸压增透装置研究与应用[J].煤炭技术,2023,42(2):163-166.
- [11] 邓书军,杨聘卿.高瓦斯低透气性坚硬煤层机械造穴泄压增透技术研究[J].煤炭技术,2020,39(6):126-128.
- [12] 王亮,廖晓雪,褚鹏,等.瓦斯抽采穿层钻孔扩造穴卸压增透机理研究[J].煤炭科学技术,2021,49(5):75-82.
- [13] 毕猛,董群,周建伟,等.瓦斯抽采离心式机械造穴增透机制及装备研发[J].煤矿安全,2023,54(10):189-195.
- [14] 王一琦,杨雷,范超军.高瓦斯厚煤层顺层钻孔有效抽采区及参数优化研究[J].煤矿安全,2022,53(10):212-221.
- [15] 董骏.基于等效物理结构的煤体瓦斯扩散特性及应用[D].徐州:中国矿业大学,2019.
- [16] 李培超,孔祥言,卢德唐.饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型[J].水动力学研究与进展(A辑),2003(4):419-426.
- [17] 王登科.含瓦斯煤岩本构模型与失稳规律研究[D].重庆:重庆大学,2009.
- [18] 郝从猛.下向钻孔机械破煤造穴快速卸压增透机制及瓦斯抽采技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- [19] 郭军伟,张浩,王伟,等.区域性顺层水力造穴卸压增透特征及其影响因素数值分析[J].西安科技大学学报,2023,43(2):292-300.
- [20] 徐洋.穿层钻孔机械分段造穴煤层增透技术在李村矿应用研究[D].徐州:中国矿业大学,2024.
- [21] 王亚雄.底抽巷穿层钻孔机械造穴高效抽采瓦斯试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2023.
- [22] 舒龙勇,霍中刚,张浪,等.煤矿井下煤层瓦斯抽采半径直接测定方法:瓦斯储量法的建立与应用[J].煤炭科学技术,2018,46(8):8-15.

(编辑:赵树庆)