

doi:10.13301/j.cnki.ct.2025.03.042

井工式液态 CO₂ 相变致裂煤层关键参数及应用效果研究

马小辉¹, 李文福¹, 刘咸富¹, 王向阳¹, 何伟¹, 王岩², 白晓敏¹, 刘万成³

(1.陕西彬长孟村矿业有限公司, 陕西 咸阳 713600; 2.中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 沈阳 110000; 3.辽宁工大西金矿业技术有限公司, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 陕西彬长孟村矿业有限公司4#煤层具有瓦斯含量高、压力大、渗透性低、瓦斯预抽效率低的特点。主要在明确液态 CO₂ 瞬时相变致裂煤层渗透率演化规律基础上,在孟村煤矿4#煤层专用安全辅助运输大巷开展工业试验,以 SF₆ 示踪气体为测试指标,测定了液态 CO₂ 相变致裂煤层有效半径,确定了煤层卸压增透过程渗透率系数及瓦斯抽采衰减系数变化,对比验证了试验前后煤层瓦斯抽采半径和抽采效果。结果表明:在瞬时相变压力大于 200 MPa 时,示踪气体法检测到液态 CO₂ 瞬时相变致裂煤层有效半径为 7.0 m,试验区域煤层渗透率提高 17.49~22.76 倍。液态 CO₂ 致裂前后抽采钻孔瓦斯流量系数由 0.725 3 d⁻¹ 减小至 0.047 6 d⁻¹,负压抽采半径达到 3.56 m,相比钻孔瓦斯抽采浓度和流量分别增大 3.16 倍和 1.71 倍。表明井工式液态 CO₂ 相变致裂煤层卸压增透和瓦斯促抽效果明显。

关键词: 瓦斯抽采; 煤层渗透性; 相变致裂; 有效半径; 液态 CO₂

中图分类号: TD712 **文献标志码:** A

文章编号: 1008 - 8725(2025)03 - 198 - 05

Study on Key Parameters and Application Effect of Underground Liquid CO₂ Phase-transition Fracturing Coalbed

MA Xiaohui¹, LI Wenfu¹, LIU Xianfu¹, WANG Xiangyang¹, HE Wei¹, WANG Yan², BAI Xiaomin¹, LIU Wancheng³

(1. Shaanxi Binchang Mengcun Mining Co., Ltd., Xianyang 713600, China; 2. CCTEG Shenyang Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110000, China; 3. Liaoning University of Technology Xijin Mining Technology Co., Ltd., Fuxin 123000, China)

Abstract: The No.4 coal seam of Shaanxi Binchang Mengcun mining co., ltd., has the characteristics of high gas-content, high-pressure, low-permeability and low gas extraction efficiency. Based on clarifying the permeability evolution law of the fractured coalbed caused by the instantaneous phase-transition of liquid CO₂, the in-situ test is carried out in the special safety auxiliary transportation roadway of No.4 coal seam in Mengcun coal mine. Taking SF₆ tracer gas as the test index, the effective permeability of the fractured coalbed caused by the phase-transition by liquid CO₂ is measured, and the variations of permeability coefficient and gas extraction attenuation coefficient during the pressure relief and permeability enhancement process of the coalbed are determined. The gas extraction radius and effect of the coalbed before and after the in-situ test are compared and verified. The results show that as the instantaneous phase-transition pressure is greater than 200 MPa, the effective radius of the fractured coalbed caused by the instantaneous phase-transition by liquid CO₂ detected by the tracer gas method is 7.0 m, and the coalbed permeability in the test area is increased by 17.49-22.76 times. Before and after the fracturing of liquid CO₂, the gas flow coefficient in the extraction group decreased from 0.725 3 d⁻¹ to 0.047 6 d⁻¹, and the gas drainage radius reached 3.56 m, which increased by 3.16 times and 1.71 times compared with the gas extraction concentration and flow in the borehole, respectively. The results show that the effect of instantaneous pressure-relief to enhance coalbed permeability and gas extraction in caused by phase-transition of underground liquid CO₂ fracturing is obvious.

Key words: methane extraction; coalbed permeability; phase-transition fracturing; effective radius; liquid CO₂

0 引言

瓦斯是威胁矿井安全生产的主要灾害之一^[1-2]。

有效抽采煤层瓦斯是防治其灾变的重要手段,但我国大部分煤层透气性系数低,地应力情况复杂多变,随采深增加瓦斯压力大且含量高,瓦斯抽采效率低,矿井瓦斯灾害治理困难。因此,煤层卸压增透一直是矿井瓦斯防治的研究重点^[3-5]。

孟村煤矿隶属陕西陕煤彬长矿业有限公司,根据《煤矿瓦斯等级鉴定方法》该矿井4#煤层最大瓦斯涌出量为151.76 m³/min,是典型的高瓦斯矿井。4#煤整体破坏类型为I~II类,煤质坚硬(普氏系数1.48~2.46),开采煤层地质条件复杂,瓦斯流量衰减系数 α 平均值为0.038 2 d⁻¹,煤层渗透率平均值为5.935 m²/(MPa²·d)^[6]。4#煤层目前采用瓦斯治理技术,主要是瓦斯抽采,并在抽采的过程中采用排风进行辅助治理,治理过程中发现该矿井具有煤层瓦斯抽采压力大,抽采钻孔布置点位密集,瓦斯抽采效率低且灾害治理成本较高等问题^[7]。从孟村煤矿的瓦斯涌出量预测情况分析,仅靠风流稀释和普通密置钻孔抽采作用难以达到矿井瓦斯灾害治理达标的目的,阻碍矿井生产工作的进行。

由液态CO₂相变致裂煤岩原理可知,相态不稳定流体遇热瞬时汽化膨胀,瞬态相变产生高压气体破坏煤体结构,继而实现煤层卸压增透,与传统的炸药爆破开采和预裂煤层方法相比,这种方法有效避免了破坏面积过大、危险性高以及矿体粉碎化严重等缺点,降低了对周围矿井环境的破坏和安全风险^[8-9]。针对孟村矿4#煤层开采存在渗透性低,瓦斯预抽难度大的问题,利用液态CO₂受热迅速气化膨胀并释放大量的爆破能量,造成岩层及煤体破裂,达到煤层卸压增透的效果^[10-11]。同时,相变为气态CO₂气体分子与煤层赋存CH₄竞争吸附,能够促抽瓦斯,提升灾害治理效率^[12]。

因此,为了研究液态CO₂相变致裂煤层规律、透气性系数及有效影响半径,选择在陕西彬长孟村矿业有限公司4#开采煤层的专用安全辅助运输大巷,开展煤层顺层钻孔液态CO₂相变致裂促抽瓦斯技术的试验,通过测试液态CO₂瞬时相变致裂有效半径、瓦斯抽采衰减系数及抽采过程瓦斯浓度、流量的判定,验证井工式液态CO₂相变致裂煤层促抽瓦斯技术的可靠性。

1 液态CO₂相变致裂煤层基本规律

1.1 煤体流-固耦合界面损伤方程

液态CO₂相变致裂技术,是通过相态转变过程中迅速释放的高压CO₂气体压裂和破坏煤体结构,当超过煤体可承受的应力及应变损伤上限后,煤体的应力及应变超过其损伤阈值,煤体的微观单元开

始出现损伤。各向应力张拉、剪切破坏导致煤体产生裂隙网络,煤岩形变损伤出现破碎现象。使得煤层透气性显著增加,根据Mohr-Coulomb准则,可得剪应力

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \geq f_c \quad (1)$$

式中 σ_1 ——最大主应力,MPa;
 σ_3 ——最小主应力,MPa;
 φ ——内摩擦角,(°);
 f_c ——单轴抗压强度,MPa。

液态CO₂相态易变,在热源诱导下瞬时相变产生冲击波,冲击波在煤体界面能量传递过程衰减形成各向应力,会导致受载煤岩发生张拉形变破坏。当冲击波能量传递产生的应力突破煤岩固有应力强度值时,煤体原始结构受损破坏产生裂隙发育,导致煤体微单元的渗透率发生变化。则对应煤体单元渗透性表征系数

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_c - \alpha p)} & D=0 \\ \zeta \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_c - \alpha p)} & D>0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 λ_0 ——初始透气性系数,m²/(MPa²·d);
 σ_c ——压应力,MPa;
 p ——瓦斯压力,MPa;
 α ——瓦斯压力系数;
 β ——应力影响系数;
 ζ ——煤体受损后渗透性表征系数,常数;
 D ——煤体渗透性系数分布区间。

液态CO₂瞬时相变产生应力波在沿着煤体结构面传递过程中出现衰减现象,各向应力加载过程煤体被压缩,产生弹性形变,煤基质块体所受的拉应力超过了抗拉强度 f_t 损伤阈值,该过程表征煤体渗透性的系数

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_t - \alpha p)} & D=0 \\ \zeta' \lambda_0 e^{-\beta(\sigma_t - \alpha p)} & 0 < D \leq 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中 σ_t ——拉应力;
 ζ' ——煤体在各向应力作用下渗透性表征系数。

1.2 液态CO₂相变致裂煤层增透规律

液态CO₂瞬时相变过程中释放的高压冲击波致使煤层形成初始导向裂隙,该裂隙对后续煤体裂隙的发育形式和扩展方向起到关键的控制作用,煤岩受载损伤产生初始导向裂隙中应力差传递对新生、延伸具有促进作用,应力损伤煤岩裂隙网络空间展布,对煤体透气性系数与裂隙面的密闭存在正相关关系。通过对煤层顺层钻孔液态CO₂瞬时相变致裂过程不同距离应力位移分析,可以量化表征液态CO₂

相变致裂对煤层渗透性的增强效果。在煤层不同距离节点的应力、位移变化曲线,如图1所示。

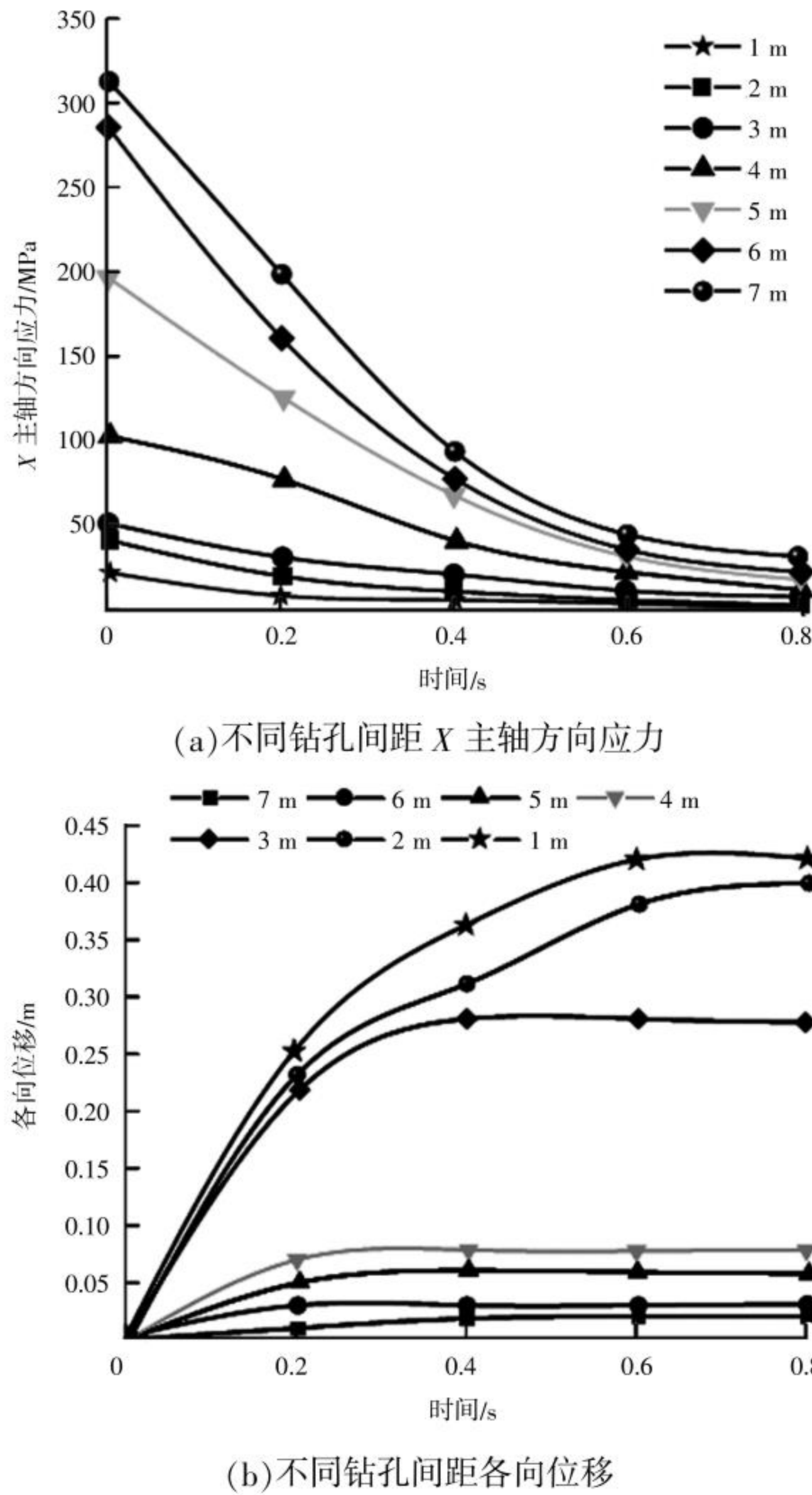


图1 液态 CO₂ 相变致裂煤层不同位置应力及位移曲线图

由图1可知,不同节点的应力与瞬时相变产生的爆轰波持续时长成反比关系,表示随着时间的增加,节点应力逐渐减小;且距离致裂孔7 m时,节点应力与原始应力相当,节点位移约为0,随着致裂孔距离的增加,煤层位移对应减小,并呈现先快速增加后趋于平稳阶段。当距离致裂钻孔1 m时,液态 CO₂ 瞬时相变产生的应力冲击波的致裂范围最大,相变应力与煤层应力达到平衡状态,煤层局部区域的节点位移超过0.4 m。

距离液态 CO₂ 瞬时相变致裂钻孔的距离越近,则煤层渗透性系数呈非线性增加趋势。这主要是由于爆轰波在近距离范围内对煤层产生的扰动效应较强,导致裂隙的形成和扩展,从而提高了煤层的透气性。

2 液态 CO₂ 相变致裂煤层增透效果

液态 CO₂ 相变致裂煤层工艺技术试验时,选择在4#煤层专用安全辅助运输大巷进行,选取2个毗邻的区域,一个为非致裂抽采区,另一个为液态 CO₂ 相变致裂抽采区,2个区域均布置数量和布孔参数

相同的钻孔;记录致裂前后煤层瓦斯含量、瓦斯流量、钻孔瓦斯流量衰减系数和瓦斯抽采率等参数,综合分析这些参数,依据瓦斯浓度、流量指标衡量液态 CO₂ 相变致裂增透煤层的瓦斯促抽效果,钻孔参数如表1所示。

表1 钻孔布置参数表

| 钻孔类别 | 孔径 ϕ /mm | 孔深/m | 装药长度/m | 倾角/(°) | 装液量/kg | 孔间距/m |
|------|---------------|-------|--------|--------|---------|--------------|
| 致裂孔 | 113.0 | 160.0 | 40.0 | +2.0 | 1.0~2.0 | 2.0、3.0、4.0、 |
| 检测孔 | 113.0 | 160.0 | 40.0 | +2.0 | 未压注 | 5.0、6.0、7.0 |

2.1 有效影响半径

采用 SF₆(煤层不含该气体也不吸附)示踪气体检测方法对致裂有效影响半径进行观测,如图2所示,主要进行液态 CO₂ 瞬时相变致裂,单次致裂动作完成通过每个阶段向致裂孔释放 SF₆ 气体,同时在设定检测孔每隔 2~5 min 取样检测 SF₆ 气体浓度大小,通过 SF₆ 气体运移范围判定液态 CO₂ 相变致裂煤层有效影响半径,结果如表2所示。

表2 钻孔观测 SF₆ 气体浓度表

| 钻孔编号 | 次数 | SF ₆ 浓度/% | 间距/m |
|-------|----|----------------------|------|
| 0#致裂孔 | 1# | 14.84 | 5.0 |
| | 2# | 12.68 | 7.0 |
| | 3# | 0.0 | 27.0 |
| 3#致裂孔 | 2# | 0.0 | 20.0 |
| | 4# | 20.14 | 4.0 |
| | 5# | 0.0 | 10.0 |
| | 6# | 0.0 | 25.0 |

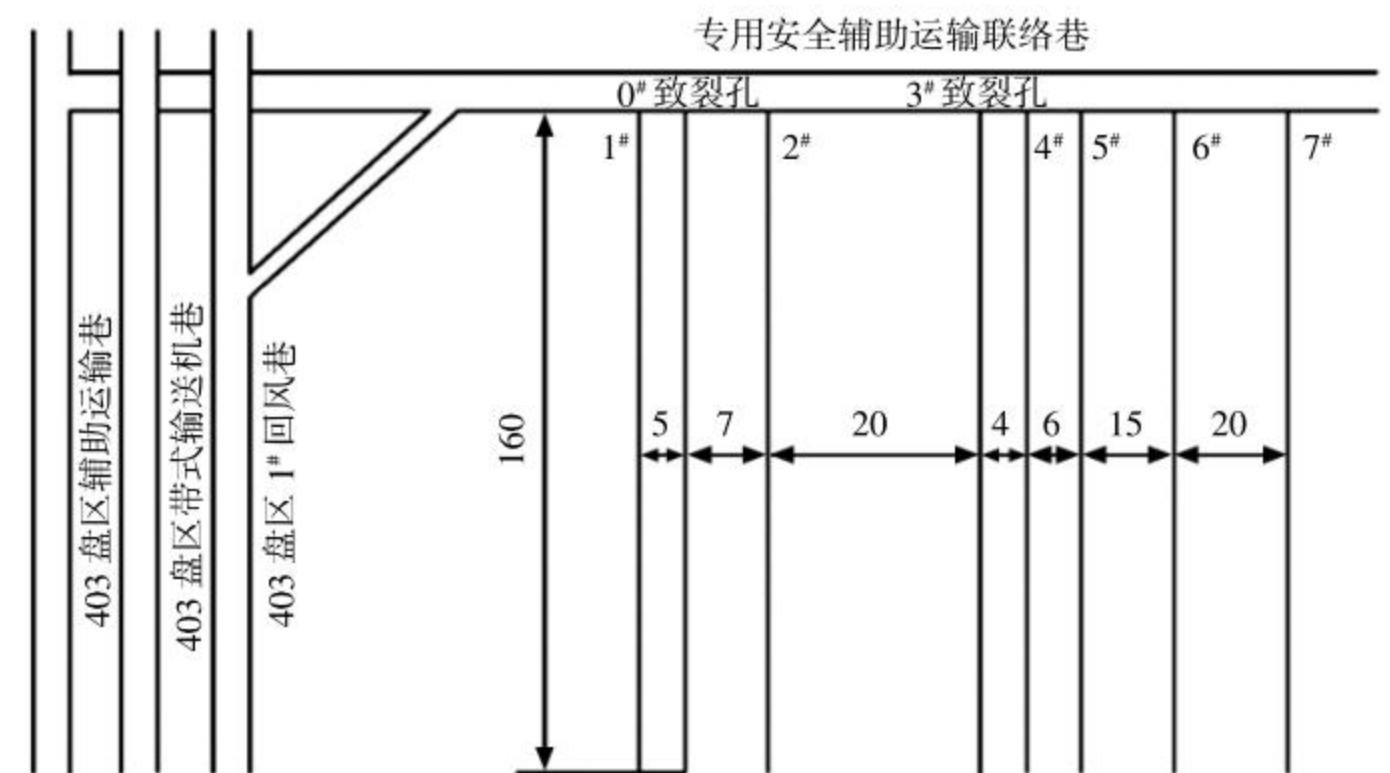


图2 SF₆ 检测有效影响半径示意图(单位:m)

SF₆ 释放结束,对致裂孔周边的检测孔中示踪气体浓度各10次的观测,则由表2可以看出,0#致裂孔周边距离分别为5.0 m和7.0 m的1#、2#钻孔 SF₆ 浓度大于10%,而距离27.0 m的3#致裂孔中 SF₆ 浓度为0,初步判定液态 CO₂ 相变致裂增透煤层的有效影响半径达到了7.0 m。通过对距离3#致裂孔4.0 m位置的4#检测孔 SF₆ 气体浓度平均为20.14%,而周边10.0 m和25.0 m位置处的5#、6#钻孔 SF₆ 观测浓度为0,因此,结合2个致裂孔与周边检测孔 SF₆ 浓度,可以判定本次试验液态 CO₂ 相变致裂煤层有效影响半径达到7.0 m。

2.2 煤层透气性系数大小

试验前取样对煤层原始区域透气性系数所需基

基础参数进行测定,采用钻孔流量法对液态 CO₂ 相变致裂煤层透气性系数进行了计算,结果如图 3 所示。

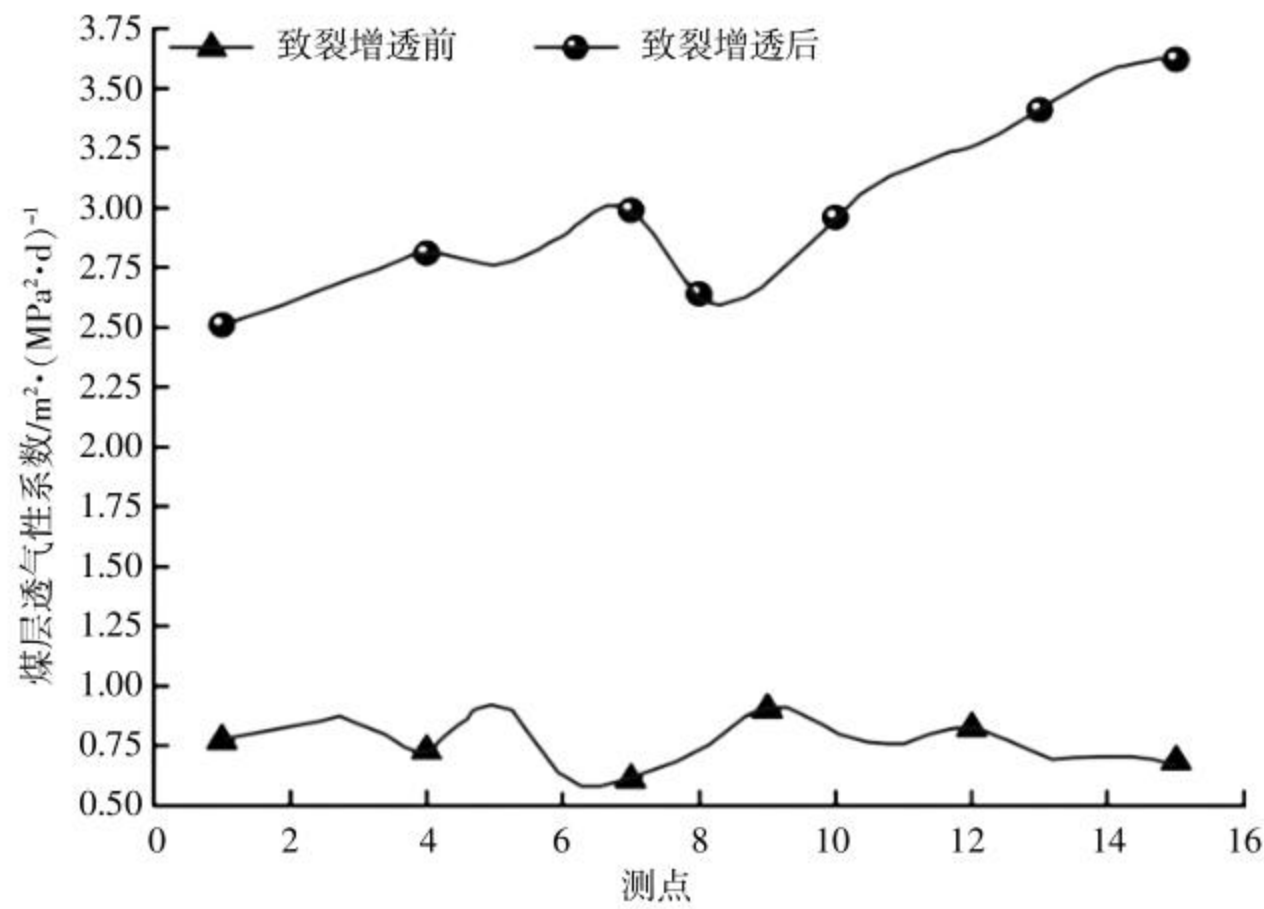


图 3 煤层透气性系数变化曲线图

液态 CO₂ 相变致裂后煤体会产生破断损伤效应,煤体内部裂隙网络延长,煤层透气性显著提升。采用普适的径向流量法测定试验区域煤层渗透性系数,由图 3 可知,液态 CO₂ 相变致裂煤层后渗透性表征系数至少增加 4 倍,表明煤层渗透性在液态 CO₂ 瞬时相变应力作用下,使煤层产生了多应力破断损伤,煤体孔隙及宏观大尺度裂缝形成增加了煤体中空间结构,即气体吸附空间,煤层透气性得以改善。

3 煤层钻孔瓦斯衰减系数及抽采效果

3.1 钻孔瓦斯流量衰减系数

为了防止钻孔之间产生截流效应,布孔方式设计,如图 4 所示,开展液态 CO₂ 瞬时相变致裂煤层瓦斯抽采衰减系数测定试验。

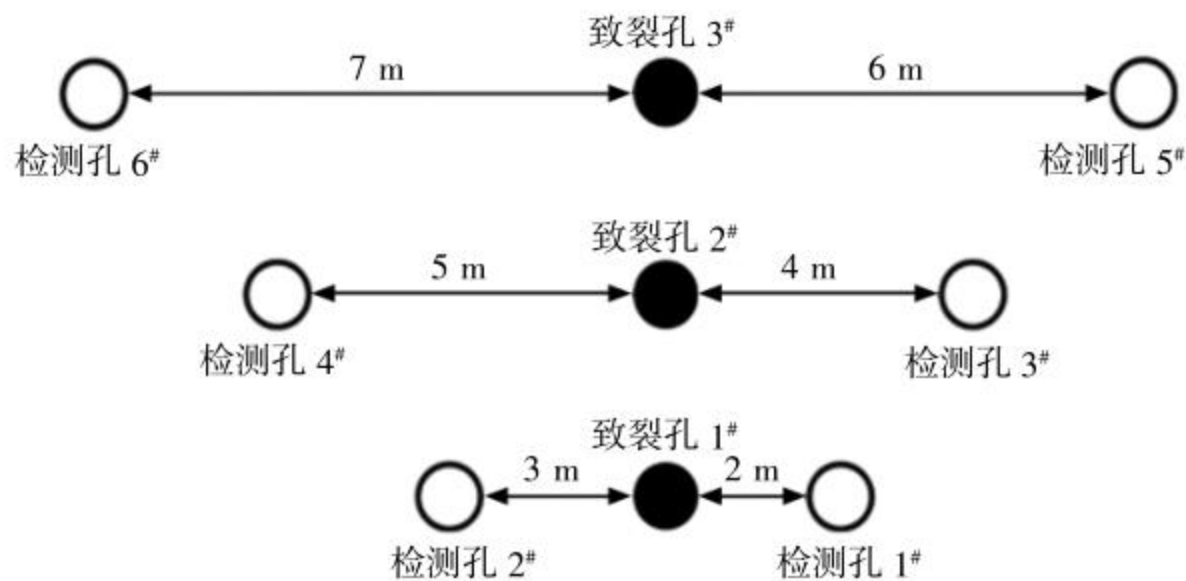


图 4 瓦斯流量衰减系数测定钻孔示意图

采用快速胶凝封孔器对成型钻孔进行封堵,以保证钻孔密封性。对致裂前后钻孔负压抽采瓦斯自然流量进行观测,通过液态 CO₂ 相变致裂前后致裂孔和不同距离检测孔瓦斯抽采流量参数,以时间、瓦斯流量为指标,量化表征钻孔抽采过程瓦斯流量衰减系数。

采用液态 CO₂ 瞬时相变致裂前后,区域煤层钻孔的瓦斯抽采自然流量观测结果,如图 5 所示。各钻孔自然瓦斯流量在联孔后在负压作用下,原始抽采系数衰减至 0.002 m³/min。对比图 5 瓦斯抽采流量参数,可知液态 CO₂ 瞬时相变致裂煤层抽采平均

自然瓦斯流量增加约 15 倍,相距致裂孔 4 m 以内的检测孔增加 6.8~13.4 倍,距离致裂孔 5~7 m 的检测孔受影响较小,瓦斯衰减明显且以此可说明液态 CO₂ 相变致裂后煤层瓦斯抽采半径在 4 m 以内。

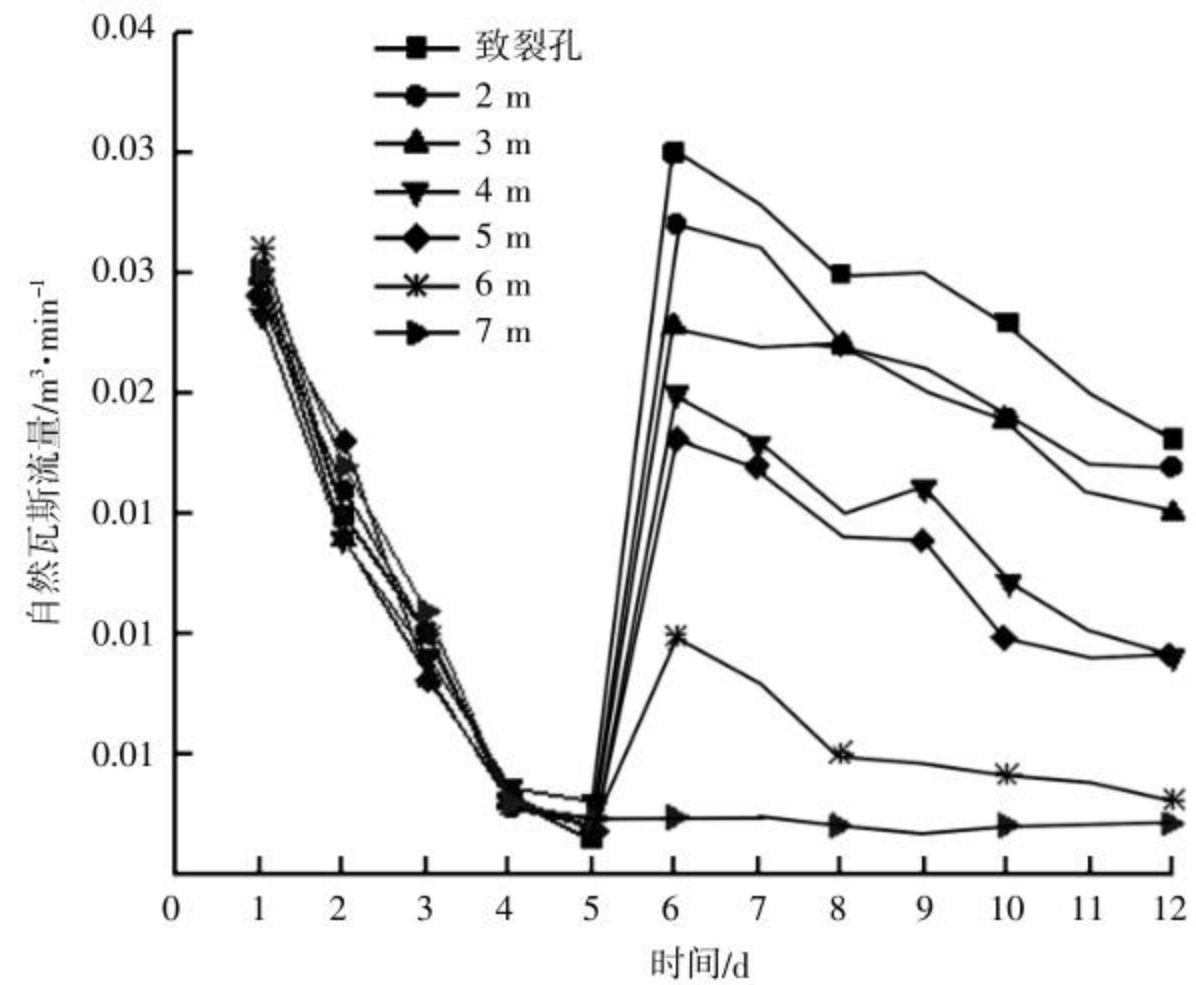


图 5 致裂前后钻孔自然瓦斯流量图

钻孔瓦斯流量衰减系数在液态 CO₂ 瞬时相变致裂后也大幅度降低,主要是因为煤体孔裂隙结构发生变化,冲击波作用诱导瓦斯解吸速率增大,煤层瓦斯抽采流量衰减系数从 0.054 8 d⁻¹ 减至 0.033 6 d⁻¹。与致裂孔相距 4 m 内瓦斯流量明显增大,而距致裂孔 5 m 的钻孔瓦斯流量明显增加,而距致裂孔 6~7 m 的探孔瓦斯流量仅略有变化,验证可知,液态 CO₂ 瞬时相变致裂孔有效影响半径为 6~7 m。

3.2 煤层瓦斯抽采效果对比分析

试验所在的安全辅助运输大巷的煤层地应力约为 24 MPa,采用分段式连续致裂增透。每 5 m 布置 1 个致裂器,7 m 布置 1 个致裂孔,抽样孔与致裂孔之间间隔布置,致裂器及钻孔布置位置,如图 6 所示。

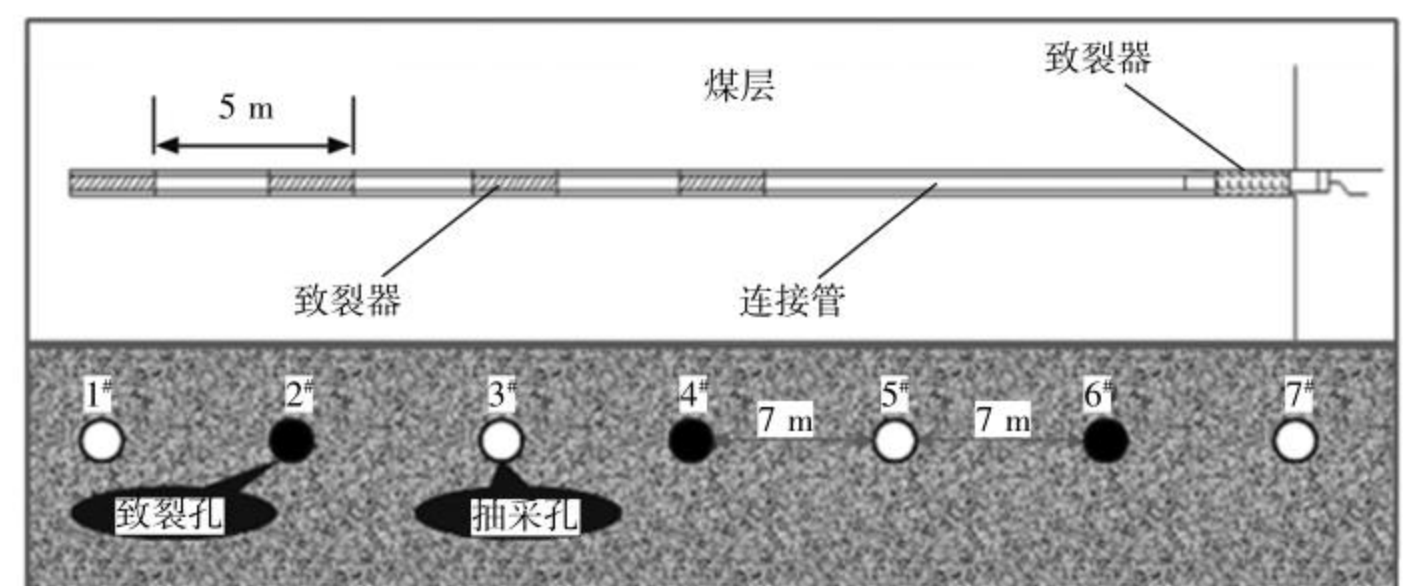


图 6 致裂器结构及钻孔布置示意图

经过煤层顺层钻孔液态 CO₂ 相变致裂后进行瓦斯抽采,以抽采过程的瓦斯浓度和流量为指标,分析得到各测点的平均瓦斯抽采浓度和流量如图 7 所示。

通过对比液态 CO₂ 相变致裂前后每个测点的瓦斯抽采浓度及瓦斯流量,发现致裂区域煤层恒定负压抽采瓦斯浓度约增大至 3.16 倍,混合流量约增加 1.71 倍。液态 CO₂ 致裂前抽采瓦斯工作困难,抽采出的瓦斯浓度低,致裂后钻孔附近裂缝增多,内部煤

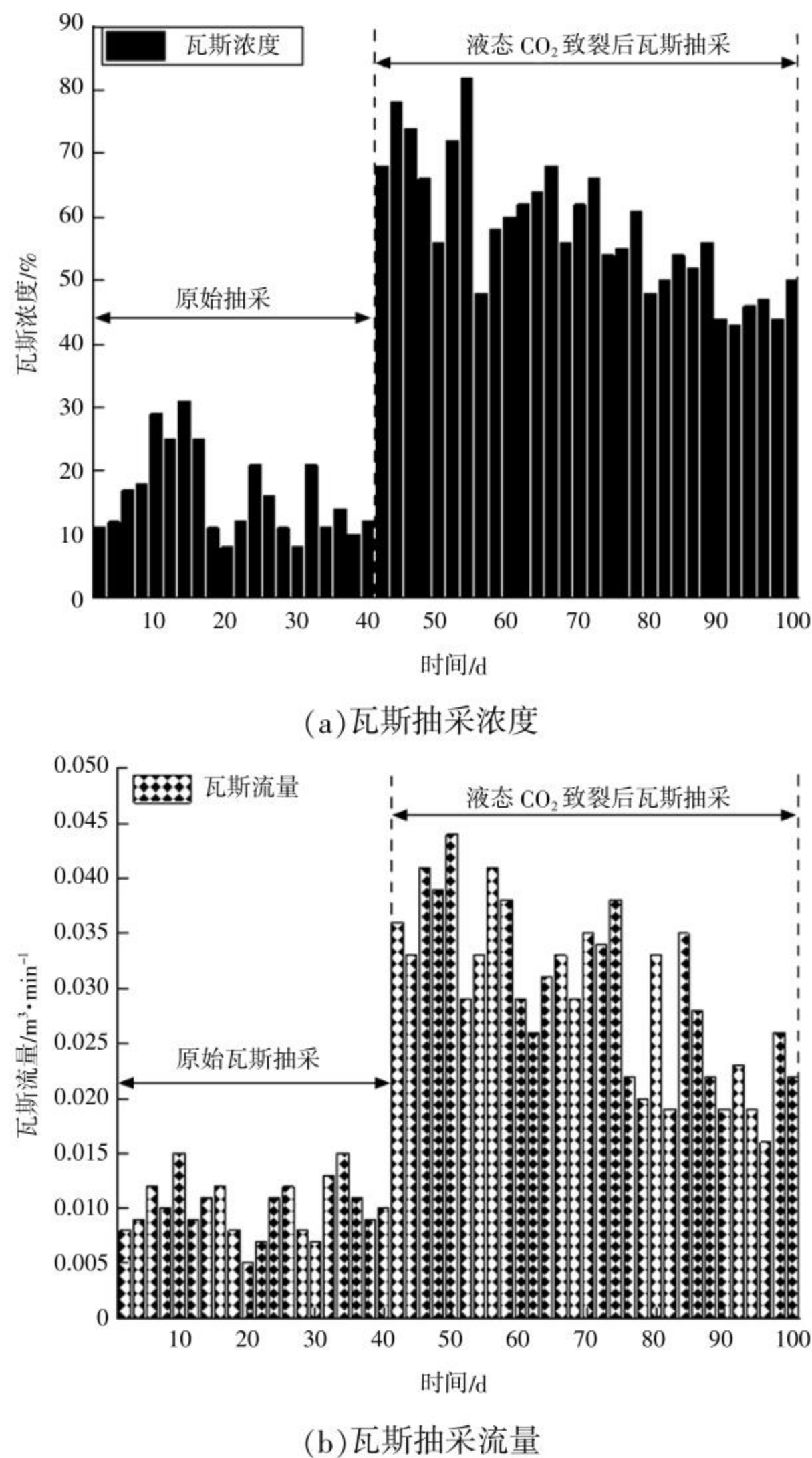


图7 试验前后煤层瓦斯抽采浓度与流量曲线

层结构被破坏,原先吸附在煤层及煤体内部的瓦斯在扰动后变为游离态,瓦斯抽采浓度随着游离在煤层间的瓦斯外泄而迅速提高;由于2种气体之间存在竞争吸附,煤层致裂后存留在煤层裂隙的大量气态 CO₂ 迅速附着于煤体表面及孔隙,使得大量 CH₄ 从煤层中解吸出来并外泄,瓦斯抽采浓度保持较高水平,随着 CO₂ 持续驱替煤层中的 CH₄,大量 CO₂ 气体吸附于煤层中,解吸出的 CH₄ 流量逐渐减小不再变化。

液态 CO₂ 相变致裂后煤体形变损伤,产生裂隙发育,提升煤层渗透性,导致孔裂隙网络中瓦斯流动阻力的减小,瓦斯气体层中的贯通裂隙通道渗流速率提高,进而瓦斯抽采混量增加,对比瓦斯促抽效果明显。

4 结语

(1)理论分析了多钻孔 CO₂ 相变致裂煤层增透基本规律,确定了当致裂孔间距 5.0 m,致裂孔间距

7.0 m 时,多孔连续液态 CO₂ 瞬时相变致裂工艺作用显著。采用 SF₆ 示踪气体法,测定增透煤层有效影响半径随地应力增加呈线性减小趋势,液态 CO₂ 相变致裂后煤层有效影响半径达到 7.0 m。

(2)液态 CO₂ 相变致裂煤层瓦斯流量衰减系数由 0.725 3 d⁻¹ 缩减至 0.047 6 d⁻¹。采用径向流量法得到液态 CO₂ 相变致裂后,煤层透气性系数增加了 17.49~22.76 倍,液态 CO₂ 相变致裂煤层增透效果明显。

(3)瓦斯抽采浓度在液态 CO₂ 相变致裂煤层后平均上升 3.16 倍,抽采混合流量上升 1.71 倍。液态 CO₂ 相变致裂煤体产生各向应力破断损伤,煤体裂隙增加,大量 CO₂ 气体与煤基体上吸附的 CH₄ 竞争吸附位,提高瓦斯抽采效率。液态 CO₂ 相变致裂后的煤层透气性系数显著提高,增加了瓦斯流通速度,减小了瓦斯流动间的阻力,起到煤层卸压增透促抽瓦斯的目的。

参考文献:

- [1] 翟成,从钰洲,陈爱坤,等. 中国煤矿瓦斯突出灾害治理的若干思考及展望[J]. 中国矿业大学学报,2023,52(6):1146-1161.
- [2] 肖知国,郝梅. 煤层酸化增透技术的研究现状及进展[J]. 煤矿安全,2023,54(10):1-7.
- [3] 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]. 煤炭科学技术,2024,52(12):1-11.
- [4] 侯恩科,荣统瑞,卫勇锋,等. 基于 LSSA-BP 神经网络的煤层瓦斯含量预测方法研究[J]. 煤矿安全,2023,54(11):55-61.
- [5] 李文. 阿艾矿区煤层瓦斯赋存规律及其主控因素[J]. 煤炭技术,2023,42(11):157-161.
- [6] 李文福,宋战宏,马小辉,等. 高瓦斯煤层液态 CO₂ 驱替瓦斯工艺参数及效果[J]. 煤炭工程,2021,53(6):82-86.
- [7] 王向阳,马小辉,李文福,等. 孟村煤矿煤层高压水力割缝增透技术应用[J]. 陕西煤炭,2021,40(S1):110-113,124.
- [8] 肖婷,欧玉峰. 致裂器对液态 CO₂ 相变破岩的功效影响分析[J]. 工程爆破,2022,28(4):78-83.
- [9] 贾进章,邢迎欢,李斌,等. 液态 CO₂ 相变爆破孔网参数优化研究[J]. 安全与环境学报,2023,23(6):1868-1879.
- [10] 李青松,付金磊,衡献伟,等. 基于 CO₂ 相变致裂技术的低渗透煤层钻孔参数优化研究[J]. 煤炭技术,2021,40(11):118-123.
- [11] 王长禄,彭然,郑义,等. 煤层液态 CO₂ 相变致裂半径预测研究[J]. 工矿自动化,2023,49(10):110-117.
- [12] 赵丹,刘晓青. 液态 CO₂ 煤层增透技术及应用研究[J]. 煤炭科学技术,2021,49(10):107-114.

作者简介:马小辉(1984-),陕西咸阳人,高级工程师,主要从事矿井一通三防工作,电子信箱:547694924@qq.com.

责任编辑:李景奇 收稿日期:2024-06-18