

doi: 10.11799/ce202412017

地应力作用下煤层液态 CO₂ 相变致裂效果研究

王 岩^{1,2}

(1. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 抚顺 113122;

2. 煤矿安全技术国家重点实验室, 辽宁 抚顺 113122)

摘要: 以液态 CO₂ 气爆能量的 TNT 当量转化为基础, 利用 LS-DYNA 软件分析爆破参数(装液量、泄爆压力峰值、致裂孔径)和地应力作用对液态 CO₂ 相变致裂效果的影响程度, 并开展液态 CO₂ 相变致裂工程试验。模拟结果表明, 液态 CO₂ 相变致裂效果与装液量、泄爆压力峰值和致裂孔径的变化呈正相关, 与地应力呈负相关, 并且装液量和致裂孔径的选取不宜过大; 试验结果表明, 煤层致裂有效半径的试验结果(3.62 m)和模拟结果(3.47 m)相接近, 验证了爆破数值模型的可靠性。应用液态 CO₂ 相变致裂技术增透后, 与致裂孔 1 m 距离的观测孔透气性系数提高了 34 倍, 与致裂孔 2.5 m 距离的观测孔瓦斯涌出强度提高了 3.23 倍, 衰减强度降低了 87.93%, 与致裂孔 1~1.5 m 距离的观测孔平均瓦斯抽采浓度提高了 64.38%。

关键词: CO₂ 相变致裂; TNT 当量转化; 地应力; 爆破参数; 工程试验

中图分类号: TD325 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-0959(2024)12-0108-07

Effect of phase change fracturing of liquid CO₂ in coal seams under geostress action

WANG Yan^{1,2}

(1. CCTEG Shenyang Research Institute, Fushun 113122, China;

2. State Key Laboratory of Coal Mine Safety Technology, Fushun 113122, China)

Abstract: Based on the TNT equivalent conversion of liquid CO₂ gas burst energy, LS-DYNA software is used to analyze the influence of blasting parameters (load volume, peak pressure relief and fracture hole diameter) and the effect of geostress on liquid CO₂ phase change fracturing, and to carry out the liquid CO₂ phase change fracturing engineering tests. The simulation results show that the effect of liquid CO₂ phase change fracturing is positively correlated with the changes of load volume, peak pressure relief and fracture hole diameter, and negatively correlated with the ground stress, and the load volume and fracture hole diameter should not be too large; the test results show that the effective fracture radius of the coal seam is close to that of the test results (3.62 m) and simulation results (3.47 m), which verifies the reliability of the numerical model of blasting. After the application of liquid CO₂ phase change fracturing technology to increase the permeability, the permeability coefficient of the observation holes at a distance of 1m from the fracturing holes is increased by 34 times, the gas outflow intensity of the observation holes at a distance of 2.5 m from the fracturing holes is increased by 3.23 times and the attenuation intensity is reduced by 87.93%, and the average gas extraction concentration of the observation holes at a distance of 1~1.5 m from the fracturing holes is increased by 64.38%.

Keywords: CO₂ phase change fracturing; TNT equivalent conversion; geostress; blasting parameters; engineering test

随着煤矿开采强度的增加, 瓦斯灾害变得日益严重^[1-3]。为了提高瓦斯抽采率, 确保煤炭安全、高效开采, 煤层增透技术被广泛应用^[4,5]。其中, 将液态 CO₂ 爆破增透技术应用在煤层瓦斯治理不但可

以增加煤层透气性, 还具有驱替 CH₄ 效果, 是矿井瓦斯灾害治理中强有力的技术措施^[6]。

近年来, 国内外科研人员对液态 CO₂ 相变致裂技术做了大量理论和试验研究。HU 等^[7] 利用模拟

收稿日期: 2024-03-17

作者简介: 王 岩(1981—), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 副研究员, 现主要从事煤矿安全生产研究工作, E-mail: 105813658@qq.com。

引用格式: 王 岩. 地应力作用下煤层液态 CO₂ 相变致裂效果研究 [J]. 煤炭工程, 2024, 56(12): 108-114.

方法对液态 CO₂ 相变气爆过程进行了研究,并在模拟结果基础上优化井下致裂孔布置方式,试验结果表明液态 CO₂ 爆破后煤体渗透性显著增加,CH₄ 的抽采效率是原始钻孔的 1.8~8 倍;PAN 等^[8]将一种非连续性岩体致裂模拟新方法应用在岩体液态 CO₂ 相变致裂当中,并通过实验结果证明了此方法适用于处理多相流致裂模拟问题;陈少波等^[9]基于模拟手段揭示了岩体在 CO₂ 相变爆破和炸药爆破两种方式下的裂纹扩展特征和差异性,并得到了裂纹扩展形式与岩体强度的关系;LUO 等^[10]基于理论分析和实验研究发现了在岩体相变致裂过程中液态 CO₂ 的流变规律,并证明了 CO₂ 的粘度随温度和剪切速率增加而变大;YANG 等^[11]基于热力学封存对 CO₂ 相变气爆所释放的能量进行评估,并采用 SPH 算法建立了岩体气爆计算模型,获得了高压气体作用下岩体破碎区范围和裂纹扩展形式。

上述科研成果为煤层液态 CO₂ 相变致裂技术的研究奠定了坚实的基础,但由于井下煤体赋存条件复杂,爆破致裂效果的影响因素较多,各因素对致裂效果的影响程度又尚不明确,使得该项技术在工程实际应用当中难免造成致裂效果不理想或投入成本增高。鉴于此,本研究通过模拟和试验相结合的方法,分析地应力条件下爆破参数对 CO₂ 相变致裂效果的影响规律,并通过开展井下现场试验验证了爆破数值模型的可靠性和增透效果。该研究结果对优化煤层钻孔布置和指导现场施工具有良好的指导价值。

1 液态 CO₂ 爆破的 TNT 当量转换

液态 CO₂ 经加热装置加热后迅速由液态转化为气态,气体介质在致裂器内的膨胀是一个绝热的过程,爆破释放出的能量相当于气体膨胀所做的功^[12],可以表示为:

$$E_g = \frac{P_0 V_L}{K-1} \left[1 - \left(\frac{P}{P_0} \right)^{(K-1)/K} \right] \times 10^3 \quad (1)$$

式中, E_g 为气体爆破能量, kJ; P_0 为泄爆压力峰值, MPa; P 为标准大气压力, MPa; V_L 为 CO₂ 致裂器容积, m³; K 为 CO₂ 的绝热指数,取 1.295。

液态 CO₂ 相变爆破所释放出的能量转化为 TNT 当量可以表示为^[12]:

$$W_{TNT} = \frac{E_g}{Q_{TNT}} \quad (2)$$

式中, W_{TNT} 为 TNT 释放当量, kg; Q_{TNT} 为 1 kg TNT 爆炸能量,取 4250 kJ/kg^[12]。

利用上述热力学方程,可对本研究中不同条件下液态 CO₂ 爆破能量进行 TNT 当量转换。

2 液态 CO₂ 相变致裂数值模拟

2.1 模型及参数

本研究根据试验工作面的煤岩参数实际情况,构建四分之一煤层液态 CO₂ 相变致裂数值分析模型,模型由致裂器、空气和煤体三部分构成,采用流-固耦合算法。该模型尺寸设置为 6 m×6 m×0.2 m,模型如图 1 所示。将模型划分 126626 个网格单元,前后表面设置 Z 轴方向的束,上下边界和左右边界设置 Y 轴和 X 轴方向约束,边界面为无反射边界,并在上面和右面边界施加相应的地应力。煤层力学参数见表 1。

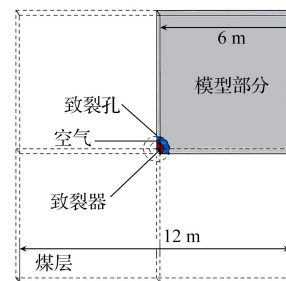


图 1 煤层液态 CO₂ 爆破模拟模型

Fig. 1 Simulation model of coal seam liquid CO₂ blasting

表 1 煤岩材料参数

Table 1 Coal rock material parameters

参数	取值	参数	取值
密度/(kg·m ⁻³)	1.23	压缩应变	2.9×10 ⁻⁵
破坏面参数	1.7	拉应变	2.9×10 ⁻⁶
侵蚀塑性应变	1.2	破裂压缩应变率	2.9×10 ²⁵
泊松比	0.3	破裂拉应变率	2.9×10 ²⁵
初始孔隙率	2.2	压力对塑性的影响	0.001
相对抗剪强度/MPa	0.07	损伤参数	0.02
抗压强度/MPa	25.6	抗拉强度/MPa	0.48

根据液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量转化,爆轰压力 P 可用 JWL 状态方程^[13]表示:

$$P=A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中, E_0 为初始内能, GPa; V 为相对体积, m³; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为常数,由 TNT 密度 ρ 、爆速 D 和绝热系数 γ 拟合获得,炸药参数及 JWL 方程参数见表 2。

表2 炸药和状态方程参数

Table 2 Parameters of the explosive and equation of state

$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	A	B	R_1	R_2	ω	E_0/GPa
1.12	4122	273000	8440	5.19	2.09	0.5	0.49

2.2 煤岩爆破损伤定义

煤岩损伤因子(D)是用于描述煤岩体在受力过程中损伤程度的物理量。损伤因子适用于描述煤体在爆破过程中的损伤演化规律,揭示煤体的破坏机制^[14]。 D 的表达式如下^[14]:

$$D = 1 - (1 - \eta)^2 \quad (4)$$

式中, η 为煤岩声波速度的降低率。

从严格意义上来讲,当 $D > 0$ 时,即说明岩体结构受到某种程度上的损伤,但考虑到爆破作用对岩体产生损伤的影响程度,根据相关规定指出^[15],当 $\eta > 10\%$ 时,可判定爆破作用对岩体造成实质性损伤,对应的损伤阈值 $D_{cr} = 0.19$,故本研究将 $D > 0.19$ 的区域作为致裂有效半径^[15,16]。

2.3 模拟结果分析

通过LS-DYNA模拟软件,模拟得到不同地应力、装液量、峰值压力和致裂孔径条件下的煤层液态 CO_2 相变致裂结果,并利用LS-Prepost后处理软件,提取距致裂孔不同距离的煤层爆破损伤因子进行分析。

2.3.1 地应力对致裂有效半径的影响分析

根据煤矿地应力分布特征地应力取10、20、30和40 MPa时,液态 CO_2 相变致裂模拟结果如图2、图3所示。

从模拟结果可以发现,在不同地应力条件下,

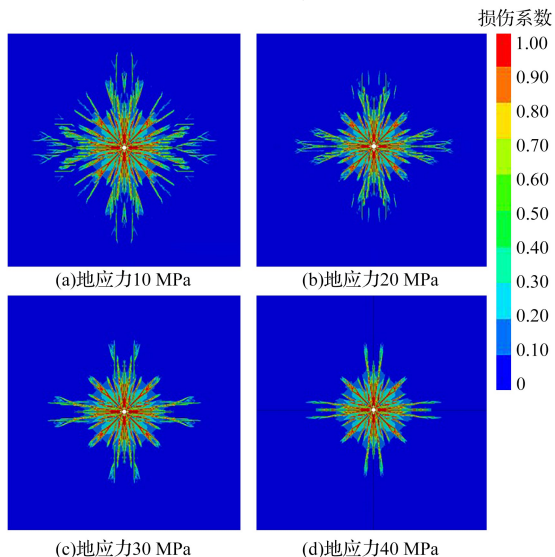


图2 不同地应力下的煤岩损伤分布

Fig.2 Coal rock damage distribution under different ground stresses

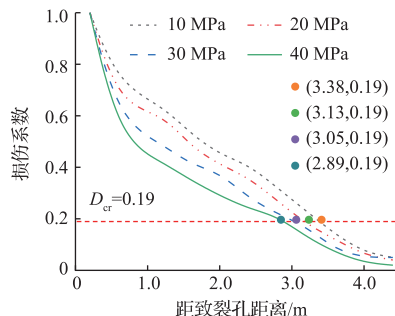


图3 不同地应力下的损伤系数变化规律

Fig.3 Changing law of damage coefficient under different geostress

液态 CO_2 相变致裂有效半径分别约为3.38、3.13、3.05和2.89 m。有效致裂半径随地应力的增加而减小,原因在于 CO_2 气爆作用使煤岩产生环向拉应力,进而促使煤岩产生径向裂纹扩展,而地应力会对煤岩产生环向的压缩应力,这对气爆高压所产生的拉应力有抑制作用,不利于煤体形成初始裂纹和裂纹的扩展延伸,并且地应力增加会使爆炸能量在传播过程中的衰减速度增加,因此裂纹在岩石中扩展范围会变小;其次,煤岩在准静态应力场下的裂纹尖端应力强度因子会随地应力的增加而降低,导致裂纹扩展受阻。因此,在矿井工程施工中,需要根据煤层实际地应力值来科学合理的布置致裂孔间距或位置,这样才能获得最佳致裂效果。

2.3.2 装液量对有效致裂半径的影响分析

根据不同型号液态 CO_2 致裂器的装液量规格,选取装液量为1.2、1.5、2.0和2.5 L作为研究对象,不同装液量条件下液态 CO_2 相变致裂模拟结果如图4、图5所示。

从模拟结果可以发现,致裂有效半径分别约为3.16、3.35、3.49和3.58 m。随着致裂器装液量的增加,煤岩的致裂有效半径逐渐增加,原因在于随着装液量的增大,气爆所释放的能量也在增大,这将造成 CO_2 气爆应力波的动力作用与爆生气体的准静态作用增强,使得致裂孔周围的破碎区范围增加,裂纹长度增加,但是破碎区域越大,所需要的气爆能量就越多,作用在破碎区消耗的能量就越大,相

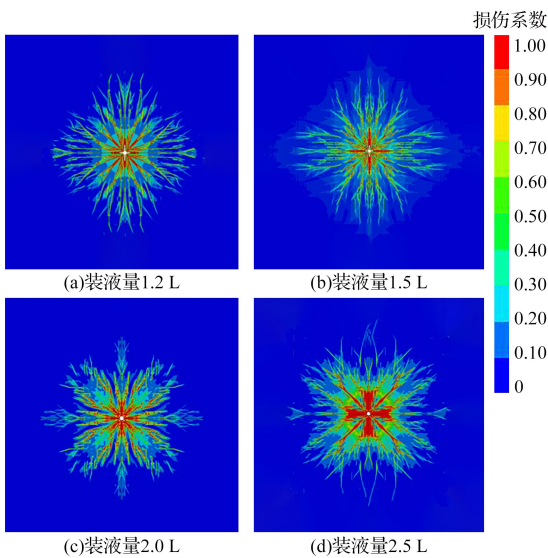


图4 不同装液量下的损伤分布

Fig. 4 Damage distribution under different liquid volumes

同爆能作用下, 这将导致裂纹扩展区获得的爆能大幅降低, 并且缩短了应力波的作用时间, 不利于初期裂纹的发育和延伸, 而且大面积的粉碎区会造成煤体强度降低, 易发生塌孔现象。因此, 合理装液量可以更好地提高煤层增透效果。根据模拟结果, 建议选取致裂器的装液量在 1.5~2.0 L 之间。

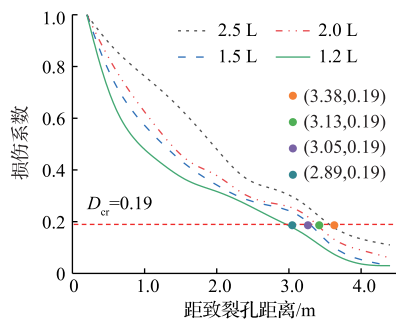


图5 不同装液量下的损伤系数变化规律

Fig. 5 Changing law of damage coefficient under different liquid volumes

2.3.3 孔径对有效致裂半径的影响分析

根据煤矿常用钻孔直径参数规格, 孔径分别选取 133、113、94 和 75 mm 时, 液态 CO₂ 相变致裂的模拟结果如图 6、图 7 所示。从模拟结果可以发现, 致裂有效半径分别约为 3.55、3.47、3.36 和 3.23 m。随着致裂孔径的缩小, 致裂有效半径随之降低。原因在于致裂孔孔径的增大, 气爆将更多的能量传递给了周围的空气, 使孔壁冲击压力降低, 这将减少消耗在钻孔周围煤体发生破碎和产生塑性变形的能量, 增加裂纹区爆破能量的利用率; 此外,

空气的波阻抗值远远小于煤岩, 使得传播过程中气爆冲击波和应力波的作用时间减少, 进而增加高压气体对裂纹区的准静压作用时间, 对提高爆破效果起到了极大的作用。在实际工程中, 随着钻孔直径的增大, 钻孔机械的钻进速度会降低, 因此, 为了形成较好质量的预裂纹, 同时充分考虑工作效率, 建议在施工过程中, 要根据特定条件(装药量, 岩石性质等), 合理选择致裂孔径大小。根据模拟结果, 建议选取致裂孔径为 113 mm。

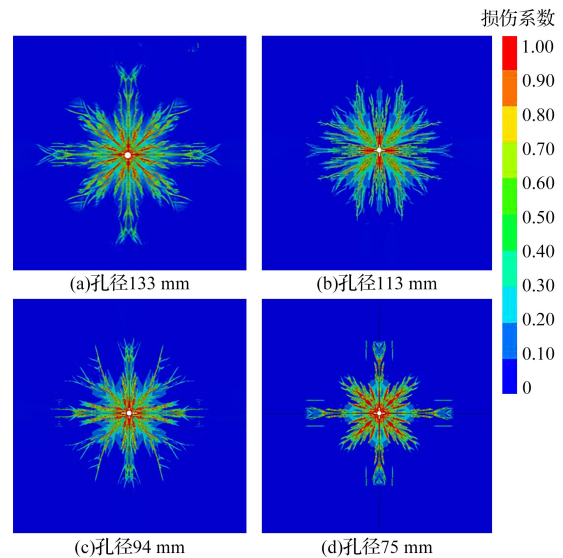


图6 不同孔径下的损伤分布

Fig. 6 Damage distribution at different pore sizes

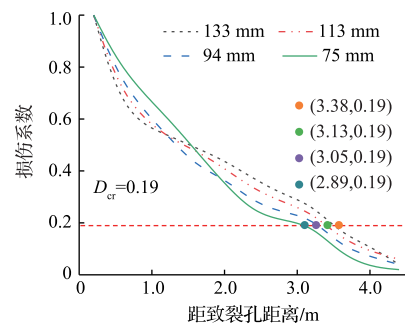


图7 不同孔径的损伤系数变化规律

Fig. 7 Changing law of damage coefficient under different apertures

2.3.4 泄爆压力峰值对致裂有效半径的影响分析

泄爆压力峰值分别取 150、200、250 和 300 MPa, 煤层液态 CO₂ 相变致裂的模拟结果如图 8、图 9 所示。从结果可以发现, 致裂有效半径分别为 3.59、3.39、3.27 和 3.19 m。随着致裂器的泄爆压力峰值增加, 煤层气爆致裂有效半径逐渐增加。原因在于随着致裂器泄爆压力峰值增加, 煤岩裂纹尖端的动态应力强度因子峰值增大, 使得裂纹扩展

速度和长度增加；此外，泄爆压力峰值的增加同样会使得应力波的动态作用与气体的准静态作用增强，使得爆破过程中煤体粉碎区和裂纹区的范围增加，但是泄爆压力的增加并没有造成大面积的粉碎区，所以为了达到更为理想的气爆致裂效果，工程应用中应尽可能选择峰值压力较大的卸压片。根据模拟结果，建议选取的泄压片峰值压力为250~300 MPa。

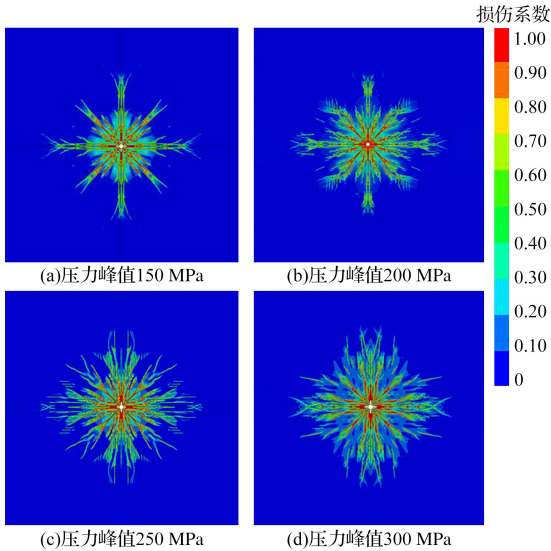


图8 不同泄爆压力峰值下的损伤分布

Fig. 8 Damage distribution under different peak pressure of explosion relief

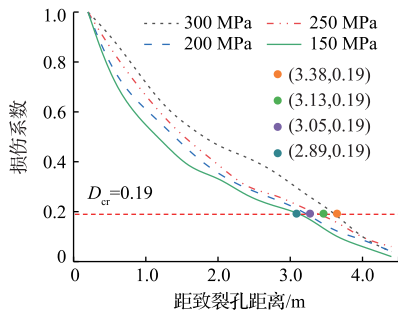


图9 不同孔径的损伤系数变化规律

Fig. 9 Changing law of damage coefficient under different apertures

综上所述，煤体物性参数和爆破参数对爆破效果有不同程度的影响作用，但在不同的爆破工程中，煤岩物性参数只能对其勘察而不能改变。因此，进行液态CO₂爆破设计时，须在详细勘察煤体物性参数的基础上选取爆破参数，确定合理的装液量、泄压片峰值和爆破孔间距或位置，以此来获得最佳的增透效果。

3 液态CO₂相变致裂工程试验

3.1 试验区煤层地质条件

本研究以蒋家河矿井202工作面回风巷作为试验工作面。煤层平均厚度为9.27 m，倾角2°~10°，地应力11.59 MPa，透气性系数0.031 m²/(MPa²·d)，瓦斯含量5.23~6.44 m³/t，煤岩稳定性较好，属于可抽采煤层。

3.2 试验设计

为考察煤层液态CO₂相变致裂效果，在试验矿井202工作面开展液态CO₂相变致裂工程试验，如图10所示。设置1个致裂孔，10个观测孔，为了避免干扰，在距离致裂孔30 m处设置2个自然抽放孔，如图11所示。致裂孔，观测孔和自然排放孔的布孔参数相同，孔径为113 mm，方位角为72°，仰角1°，孔深60 m，封孔长度15 m。试验选取液态CO₂致裂器的装液量1.68 L，泄压片峰值275 MPa。爆破结束后，采用“两堵一注”的封孔方式，待钻孔封孔完成后，安装好抽采管路，以及抽采浓度，抽采流量检测设备，进行瓦斯抽采和数据采集。



图10 液态CO₂相变致裂孔

Fig. 10 Liquid CO₂ phase change fracture hole

3.3 煤层透气性效果分析

本研究应用径向不稳定流动法^[17,18]，计算得到致裂后煤层10个观测孔的透气性系数，然后将每个观测孔距离致裂孔的距离作为因变量，煤层透气性系数作为自变量，利用数学软件进行一阶求导，得到距致裂孔不同距离煤层透气性的变化率，将透气性的变化率接近于0时，作为有效致裂半径，如图12所示。

现场测试结果表明，随着观测孔与致裂孔的距离不断增加，煤层透气性逐渐降低，在距离致裂孔约3.62 m处的煤层透气性系数一阶导数接近于0，说明CO₂相变致裂有效半径约为在3.62 m，这与相同工况条件下的图6(b)模拟结果(3.47 m)相接近，说明了

本研究所构建的 CO₂ 煤层爆破致裂数值模型的合理性。其中,相变致裂后 1[#]观测孔(1 m 处)的透气性系

数为 1.12 m²/(MPa²·d),比原始透气性提高了约 34 倍,说明 CO₂ 相变致裂有效地改善了煤层透气性。

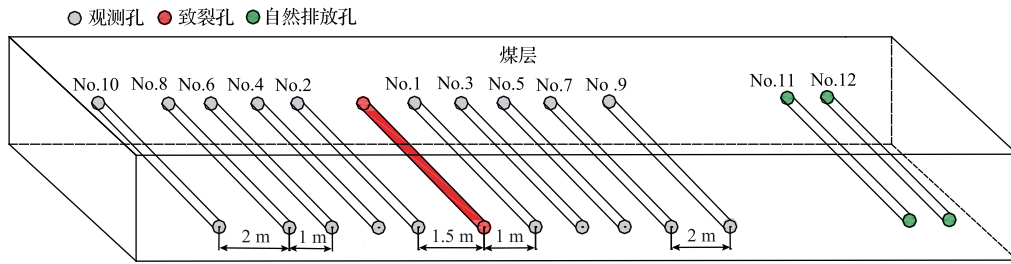


图 11 试验钻孔设计

Fig. 11 Design of test borehole

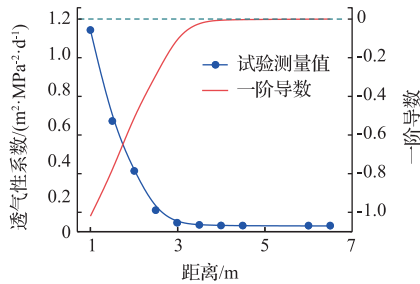


图 12 透气性系数变化特征

Fig. 12 Characteristics of permeability coefficient

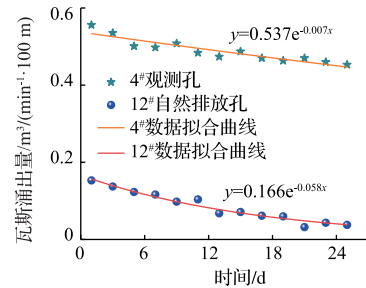


图 13 煤层瓦斯涌出量变化特征

Fig. 13 Variation characteristics of gas emission in the coal seam

3.4 钻孔瓦斯抽采效果分析

瓦斯涌出量可以用钻孔初始瓦斯涌出强度 q_0 和瓦斯流量衰减系数 α 进行描述^[19,20]。然后根据公式(5)进行非线性回归分析,可得到 q_0 和 α 的数值结果。

$$q_t = q_0 e^{-\alpha t} \quad (5)$$

式中, q_t 为 t 时刻钻孔瓦斯流量, m³/min·100m; q_0 为 $t=0$ 时刻瓦斯流量, m³/(min·100m); t 为排放时间, d。

利用上述瓦斯涌出量计算方法,在试验工作面分别选取 4[#]观测孔和 12[#]自然排放孔进行瓦斯涌出量试验测定,测试结果如图 13 所示。从图 13 中 4[#]观测钻孔和 12[#]自然抽采钻孔的百米钻孔瓦斯涌出量和衰减程度分析结果可以发现:煤层实施液态 CO₂ 致裂增透技术后,瓦斯涌出强度从 12[#]钻孔的 0.166 增加到 4[#]钻孔的 0.537,提高了 3.23 倍,同时,瓦斯流量衰减系数也从 4[#]孔的 0.058 d⁻¹ 降低为 11[#]孔的 0.007 d⁻¹,降低了 87.93%,这说明 CO₂ 致裂技术增加了煤层瓦斯抽采的持续期,进而提高了瓦斯抽采量。

为了进一步验证液态 CO₂ 相变致裂技术对瓦斯抽采效果的促进作用,选取 1[#]、2[#]观测孔和 11[#]、12[#]自然抽放孔作为研究对象,每 2 天进行一次数据采集,数据分析结果如图 14 所示。

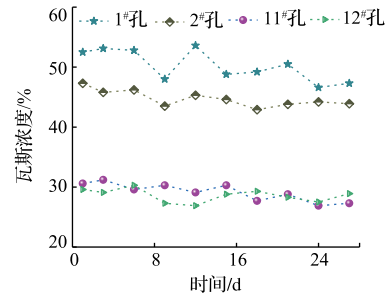


图 14 煤层瓦斯浓度抽采效果

Fig. 14 Coal seam gas extraction efficiency

的瓦斯抽采浓度的分析结果(图 14)可以发现,经过 CO₂ 爆破技术致裂后,瓦斯抽采浓度得到了显著提升。其中,1[#]、2[#]观测孔的瓦斯浓度在 43.9%~52.5%之间,单孔的平均瓦斯抽采浓度为 47.49%,正常抽放孔的瓦斯浓度在 27.3%~30.6%之间,单孔的平均瓦斯抽采浓度为 28.89%,经过爆破后,平均瓦斯抽采浓度提高了 64.38%,说明该技术有效地提高了瓦斯抽采效率。

4 结论

1) 借助模拟软件构建了煤层液态 CO₂ 相变致裂气爆模型,得到不同工况条件下的致裂有效半径在 2.89~3.59 m 之间,并且致裂有效半径与装液

量、致裂孔直径和泄爆压力峰值的变化呈正相关,与地应力呈负相关。

2) 液态 CO₂ 致裂器的装液量和致裂孔径不宜过大,否则易造成塌孔现象和钻进速度降低,工程应用中建议选取装液量为 1.5~2 L 之间,致裂孔径 113 mm,泄爆压力峰值为 250~300 MPa 之间。

3) 煤层实施液态 CO₂ 相变致裂后,致裂有效半径约为 3.62 m,距致裂孔 1 m 处的观测孔透气性系数提高了 34 倍,2.5 m 处的观测孔瓦斯涌出强度提高了 3.23 倍,衰减强度降低了 87.93%,1~1.5 m 距离的观测孔平均瓦斯抽采浓度提高了 64.38%。

参考文献 (References):

- [1] 张巨峰,施式亮,鲁义,等. 矿井瓦斯异常涌出防控现状及展望 [J]. 煤炭工程, 2023, 55(2): 110-115.
ZHANG Jufeng, SHI Shiliang, LU Yi, et al. Present situation and prospect on prevention and control of abnormal gas emission in mine [J]. Coal Engineering, 2023, 55(2): 110-115.
- [2] 衡献伟,李希建,李文彬,等. 基于瓦斯地质可视化的差异化协同抽采技术研究 [J]. 煤炭工程, 2024, 56(4): 79-84.
HENG Xianwei, LI Xijian, LI Wenbin, et al. Differentiated collaborative gas extraction technology based on gasgeological visualization [J]. Coal Engineering, 2024, 56(4): 79-84.
- [3] MA Y K, NIE B S, HE X Q, et al. Mechanism investigation on coal and gas outburst: an overview [J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2020, 27(7): 872-887.
- [4] 任仲久. 导向槽定向水力压裂煤层增透强化瓦斯抽采技术及应用 [J]. 煤炭工程, 2024, 56(2): 131-137.
REN Zhongjiu. Technology and application of directional hydraulic fracturing with guide slot to enhance permeability and gas extraction in coal seam [J]. Coal Engineering, 2024, 56(2): 131-137.
- [5] 王泽东,刘国磊,崔蔚,等. 低渗透煤层气液两相复合压裂卸压增透技术 [J]. 煤矿安全, 2022, 53(11): 76-82.
WANG Zedong, LIU Guolei, CUI Yu, et al. Pressure relief and permeability enhancement technology of gas-liquid composite fracturing in low permeability coal seam [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(11): 76-82.
- [6] 樊世星,文虎,童校长,等. 低透煤层液态 CO₂ 压裂增透理论与成套技术 [J]. 煤矿安全, 2022, 53(10): 80-88.
FAN Shixing, WEN Hu, TONG Xiaozhang, et al. Permeability enhancement theory and a complete set of technology for low permeability coal seam by liquid CO₂ fracturing [J]. Safety in Coal Mines, 2022, 53(10): 80-88.
- [7] HU G Z, HE W R, SUN M. Enhancing coal seam gas using liquid CO₂ phase-transition blasting with cross-measure borehole [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 60: 164-173.
- [8] PAN P Z, RUTQVIST J, FENG X T, et al. Modeling of caprock discontinuous fracturing during CO₂ injection into a deep brine auifer [J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 19: 559-575.
- [9] 陈少波,卢玉斌,袁海梁,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的液态 CO₂ 相变破岩裂纹扩展特征研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2023, 19(6): 74-82.
CHEN Shaobo, LU Yubin, YUAN Hailiang, et al. Study on crack propagation characteristics of liquid CO₂ phase transition rockbreaking based on ANSYS/LS-DYNA [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2023, 19(6): 74-82.
- [10] LUO X, WANG S, WANG Z, et al. Experimental research on rheological properties and proppant transport performance of GRF-CO₂ fracturing fluid [J]. Journal of Petroleum Science Engineering, 2014, 120: 154-162.
- [11] YANG Z B, ZHOU Y J, et al. Numerical Modelling of liquid CO₂ phase transition blasting based on smoothed particle hydrodynamics algorithm [J]. Thermal Science, 2019, 23: 693-702.
- [12] 董庆祥,王兆丰,韩亚北,等. 液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量研究 [J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(11): 84-88.
DONG Qingxiang, WANG Zhaofeng, HAN Yabei, et al. Research on TNT equivalent of liquid CO₂ phase-transition fracturing [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 84-88.
- [13] 原文杰,熊紫琛,候鑫,等. 深孔间隔装药爆破效果数值模拟研究 [J]. 露天采矿技术, 2021, 36(6): 16-19.
YUAN Wenjie, XIONG Zichen, HOU Xin et al. Research on numerical simulation of blasting effect of deep hole interval charge [J]. Opencast Mining Technology, 2021, 36(6): 16-19.
- [14] 闫长斌. 爆破作用下岩体累积损伤效应及其稳定性研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- [15] SL 47—2020, 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范 [S].
- [16] 张枝伟,雷兴海,吴桂义,等. 不同装药结构爆破掘进时巷道围岩损伤规律分析 [J]. 煤炭工程, 2022, 54(3): 125-130.
ZHANG Zhiwei, LEI Xinghai, WU Guiyi, et al. Laws of roadway surrounding rock damage in blasting excavation with different charge structures [J]. Coal Engineering, 2022, 54(3): 125-130.
- [17] 鲁自盛. 径向不稳定流动法测试煤层瓦斯透气性系数 [J]. 淮南职业技术学院学报, 2010, 10(3): 4-6.
LU Zisheng. Test of gas permeability coefficient of coal seam by radial unsteady flow method [J]. Journal of Huainan Vocational Technical College, 2010, 10(3): 4-6.
- [18] 刘师胜. 马堡煤矿液态 CO₂ 相变致裂增透技术研究 [D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2023.
- [19] 白志安,吴桂义,张开智,等. 松动爆破作用下的瓦斯抽采效率研究 [J]. 煤炭工程, 2021, 53(1): 118-122.
BAI Zhian, WU Guiyi, ZHANG Kaizhi, et al. Gas extraction efficiency after loosening blasting [J]. Coal Engineering, 2021, 53(1): 118-122.
- [20] 郭建行,程志恒,孔维一. 综采工作面瓦斯涌出量数学预测模型建立及实测应用 [J]. 煤炭工程, 2018, 50(8): 109-113.
GUO Jianhang, CHENG Zhiheng, KONG Weiyi. Establishment and application of mathematical prediction model of gas emission rate in fully mechanized coal face [J]. Coal Engineering, 2018, 50(8): 109-113

(责任编辑 苏越)