

中文引用格式:贾进章,李斌,王东明.煤层液态CO₂相变致裂半径范围的影响因素研究[J].中国安全科学学报,2021,31(4):57-63.

英文引用格式:JIA Jingzhang, LI Bin, WANG Dongming. Study on influencing factors of cracking radius range caused by liquid CO₂ phase transition in coal seams[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 57-63.

煤层液态CO₂相变致裂半径范围的影响因素研究*

贾进章^{1,2}教授,李斌^{**1,2},王东明^{1,2}

(1 辽宁工程技术大学安全科学与工程学院,辽宁阜新123000;

2 辽宁工程技术大学矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室,辽宁葫芦岛125105)

中图分类号:X936

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn 1003-3033.2021.04.008

基金项目:辽宁省自然科学基金资助(2019-MS-162);辽宁特聘教授项目(551710007007);辽宁省百千万人才工程项目(2019-45-15)。

【摘要】为提高煤层瓦斯抽采效率,减少矿井瓦斯灾害事故,掌握不同因素对液态CO₂相变致裂半径范围的影响特征,以液态CO₂气爆能量释放的三硝基甲苯(TNT)当量转化为基础,构建煤体爆破损伤演化模型;利用LS-DYNA软件模拟煤层物性参数(煤层地应力 σ 、煤体抗拉强度 S_t 、瓦斯压力 P_g)和孔径 d 对液态CO₂相变致裂半径 L 范围的影响;运用灰色关联分析理论,结合数值模拟结果分析爆破影响因素主次顺序。结果表明:液态CO₂相变致裂半径范围与瓦斯压力和钻孔孔径呈递增关系,与煤层地应力呈递减关系;地应力对致裂半径范围的影响程度最强,钻孔孔径次之,瓦斯压力影响程度相对较弱,煤体抗拉强度变化对致裂半径范围的影响甚微。

【关键词】 液态CO₂相变致裂; 致裂半径范围; 影响因素; 三硝基甲苯(TNT)当量转化; 灰色关联分析

Study on influencing factors of cracking radius range caused by liquid CO₂ phase transition in coal seams

JIA Jinzhang^{1,2}, LI Bin^{1,2}, WANG Dongming^{1,2}

(1 College of Safety Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin Liaoning 123000, China; 2 Key Laboratory of Mine Power Disaster and Prevention of Ministry of Education, Liaoning Technical University, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: In order to improve efficiency of gas drainage of coal seam and reduce accident of mine gas disasters, grasping characteristics of influence of different factors on cracking radius of liquid CO₂ phase change. Based on equivalent conversion of TNT released by liquid CO₂ gas explosion energy, evolution model of coal blasting damage was established. LS-DYNA software was used to simulate physical properties of coal seams (coal in-situ stress σ , coal tensile strength S_t , gas pressure P_g) and influence of pore size d

* 文章编号:1003-3033(2021)04-0057-07; 收稿日期:2021-01-20; 修稿日期:2021-03-16

** 通信作者:李斌(1989—),男,辽宁沈阳人,博士研究生,主要研究方向为安全评价及瓦斯灾害防治。E-mail:30727899@qq.com。

on fracturing radius L of liquid CO_2 phase change. Primary and secondary order of blasting influencing factors was analyzed by using grey-relational-analysis theory. The results show that liquid CO_2 phase change fracturing radius has a positive relationship with gas pressure and borehole diameter, and has a negative relationship with coal seam in-situ stress. In-situ stress has the greatest influence on fracturing radius and borehole diameter has a strong influence on fracturing radius and gas pressure has a slight influence, change of coal tensile strength has little effect on fracturing radius range.

Keywords: cracking caused by liquid CO_2 phase transformation; cracking radius range; influencing factor; trinitrotoluene (TNT) equivalent conversion; grey correlation analysis

0 引言

近年来,随着我国矿井采掘深度不断增加,瓦斯灾害变得日益严重^[1-2],为了保证煤炭安全开采,提高瓦斯抽采率,煤层增透技术被广泛采用,其中液态 CO_2 相变致裂技术是目前较为安全可靠的增透方法之一,不仅可以增加煤层透气性,提高瓦斯抽采效率,而且还能有效防治瓦斯扩散及煤与瓦斯突出^[3-5],具有良好的实际应用前景。

液态 CO_2 相变致裂半径范围对瓦斯抽采效果的影响很大,准确地预测煤层致裂半径范围是提高瓦斯抽采率和减少瓦斯灾害的重要技术手段,被众多科研人员不断地探索研究,如董庆祥等^[6]提出了液态 CO_2 爆破释放能量的三硝基甲苯 (Trinitrotoluene, TNT) 当量转换法,为煤层致裂半径范围的理论研究和模拟分析奠定了基础;雷云等^[7]通过理论研究,建立了煤层液态 CO_2 相变致裂的裂隙区半径和致裂器峰值压力与致裂孔径 3 个参数变量之间的数学耦合模型;FAR 等^[8]认为,岩体爆破裂缝的萌生和扩展具有概率性,在蒙特卡罗取样法的基础上,提出了岩体爆破致裂范围的概率预测分析方法;ESEN 等^[9]基于统计学理论思想,结合岩体爆破相似模型试验数据,得出了爆破损伤区半径范围的统计公式;周西华等^[10]借助模拟软件,分析了不同地应力条件下,液态 CO_2 相变致裂的单孔致裂半径有效影响范围和双孔致裂最佳布孔间距,井下试验表明优化后的布孔方式可以有效提高煤层渗透性;吕鹏飞^[11]考虑爆破后煤体裂隙发展是一个损伤积累的过程,将爆破致裂半径范围的理论公式中引入了损伤变量;郭德勇等^[12]在煤体爆破分区的基础上,将理论公式和模拟分析相结合,得出了煤体爆破致裂有效半径范围是由粉碎区、裂隙区和裂隙扩展区共同组成的结论。以上研究推动了液态 CO_2 相变致裂技术的应用和发展,但由于影响致裂半径的因素较多,各因素对致裂半径范围的影响程度又尚

不明确,且现有计算致裂半径范围的方法各异,导致相关研究缺乏统一的测定评价标准。

鉴于此,笔者拟在分析液态 CO_2 相变致裂半径影响因素的主次顺序上,理清各影响因素对致裂半径的影响程度,借助 LS-DYNA 软件,模拟地应力、瓦斯压力、煤体抗拉强度及孔径大小对液态 CO_2 相变致裂半径的影响,应用灰色关联分析法,确定多个影响因素中的主控因素,以期对液态 CO_2 致裂半径范围的确定提供理论参考与借鉴。

1 液态 CO_2 爆破的 TNT 当量转化

选用液态 CO_2 致裂器,其定压泄能片的卸放压力峰值为 200 MPa,储液管的容积 1.4 L,装液量为 1.0 kg。液态 CO_2 爆破时释放的能量计算为^[6]:

$$E_g = \frac{P_1 V}{K-1} \left[1 - \left(\frac{P_2^{(K-1)/K}}{P_1} \right) \right] \times 10^3 \quad (1)$$

式中: E_g 为气体爆破能量, kJ; P_1 为致裂器内气体压力, MPa; P_2 为标准大气压力,取 0.101 MPa; V 为致裂器体积, m^3 ; K 为介质的绝热指数,液态 CO_2 取 1.295。

将相关参数代入式(1),得出液态 CO_2 爆破后能量释放约为 946 kJ。

液态 CO_2 爆破释放出能量的近似 TNT 当量计算为:

$$W = \frac{E_g}{Q} \quad (2)$$

式中: W 为 TNT 炸药释放当量, kg; Q 为 1 kg TNT 炸药爆炸能量,取 4 250 kJ/kg^[6]。

经计算,所选液态 CO_2 致裂器能量释放当量约为 223 g TNT。

2 煤体爆破破坏损伤模型

液态 CO_2 相变致裂技术是利用 CO_2 相变释放高压气体对煤体产生冲击,在应力(应变)达到煤体本身

的损伤临界值时,煤体发生损伤,关系表达式如下^[13]:

$$E = (1 - D) E_0 \quad (3)$$

式中: D 为煤体的损伤变量, $0 \leq D \leq 1$; E 、 E_0 分别为损伤和非损伤单元的弹性模量,MPa。

当煤层受到的剪切应力 F 达到莫尔库伦损伤临界值时,即

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\psi}{1 - \sin\psi} \geq S_c \quad (4)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力,MPa; ψ 为内摩擦角,(°); S_c 为抗压强度,MPa。

当煤体单元受到爆破所产生的压应力达到损伤临界值时,损伤变量 D 表示为:

$$D = \begin{cases} 0 & \varepsilon < \varepsilon_{c0} \\ 1 - \frac{S_{cr}}{E_0 \varepsilon} & \varepsilon_{c0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_r \\ 1 & \varepsilon > \varepsilon_r \end{cases} \quad (5)$$

式中: S_{cr} 为抗压残余强度,MPa; ε 为应变临界值; ε_{c0} 为最大压应变; ε_r 为残余应变。

对应单元的透气系数见下式:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 \exp[-\beta(\sigma_c - \alpha P_g)] & D = 0 \\ \xi \lambda_0 \exp[-\beta(\sigma_c - \alpha P_g)] & D > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: λ 为煤层损伤时透气系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$; λ_0 为初始透气系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$; α 为瓦斯压力系数; β 为应力影响系数; σ_c 为压应力,MPa, P_g 为瓦斯压力,MPa; ξ 为煤体损伤时透气系数的增大系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 。

当煤体单元受到爆破所产生的拉应力达到抗拉强度损伤阈值时,拉应力满足^[13]:

$$\sigma_t \leq -S_t \quad (7)$$

式中: σ_t 为拉应力,MPa; S_t 为抗拉强度,MPa。

损伤变量 D 表达为:

$$D = \begin{cases} 0 & \varepsilon \leq \varepsilon_{t0} \\ 1 - \frac{S_{tr}}{E_0 \varepsilon} & \varepsilon_{t0} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu} \\ 1 & \varepsilon \geq \varepsilon_{tu} \end{cases} \quad (8)$$

式中: S_{tr} 为抗拉残余强度,MPa; ε_{t0} 为最大弹性拉应变; ε_{tu} 为极限拉应变。

对应单元透气系数的描述按下式:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 \exp[-\beta(\sigma_t - \alpha P_g)] & D = 0 \\ \xi \lambda_0 \exp[-\beta(\sigma_t - \alpha P_g)] & 0 < D < 1 \\ \xi' \lambda_0 \exp[-\beta(\sigma_t - \alpha P_g)] & D = 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中 ξ' 为煤体破坏时透气系数的增大系数, $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 。

3 液态 CO₂ 相变致裂数值模拟

3.1 数值模型的建立

采用 LS-DYNA 软件模拟煤层液态 CO₂ 相变致裂演化特征。以爆破后煤体损伤分布作为致裂半径范围的评价指标^[14],定量分析爆破破坏损伤区域。建立液态 CO₂ 气爆模型尺寸为 8 m×8 m,由炸药,空气,煤体 3 部分组成。液态 CO₂ 气爆致裂模型及网格划分如图 1 所示。模型顶部加 12 MPa 的均布载荷来等效试验煤层上 900 m 的岩层自重,采用流固耦合方式,两端采用水平约束,底端固定约束,边界设置为非反射界面边界。煤层物理力学参数见表 1。

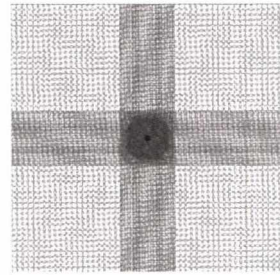


图 1 液态 CO₂ 气爆致裂模型网格

Fig.1 Liquid CO₂ gas explosion caused cracking model grid

表 1 煤岩材料参数

Tab.1 Coal rock material parameters

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	弹性模 量/GPa	泊松 比	抗压强 度/MPa	黏聚力/ MPa
1.4	0.82	0.3	12	2

3.2 数值模拟结果分析

1) 地应力对致裂半径范围的影响分析。液态 CO₂ 气爆致裂半径范围的模拟结果如图 2 所示。钻孔孔径为 72 mm,煤层瓦斯压力为 2 MPa,煤体抗拉强度为 0.4 MPa 时,选取煤层的地应力分别为 14、16、18 和 20 MPa 时,利用 LS-PrePose 软件的 Measure 测量功能,测得所对应的致裂半径分别约为 1.78、1.27、0.81 和 0.53 m。

由图 2 可以看出,随着煤层地应力的增大,液态 CO₂ 气爆后,煤层致裂半径逐渐减小。原因在于:液态 CO₂ 气爆荷载所产生的环向拉应力能够引起煤层产生径向裂纹,而煤层中的地应力会产生环向压缩应力,这将抑制气爆的张拉效应,缩小裂纹的扩展范围;此外,煤层中较高的地应力会降低准静态应力场作用下煤体裂纹尖端的应力强度因子,不利于裂隙的扩展。

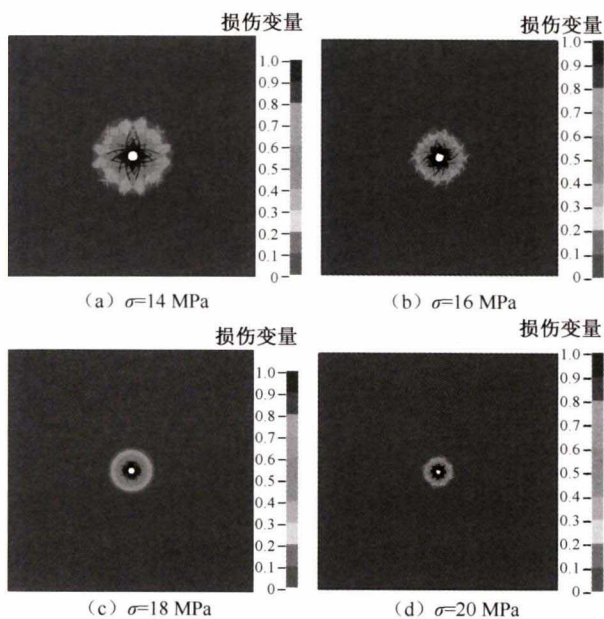


图2 不同地应力对致裂半径的影响
Fig.2 Influence of different in-situ stresses on cracking radius

煤层致裂半径与地应力之间的拟合曲线如图3所示。图3中,拟合关系为 $L = -0.21\sigma + 4.676$, 相关性系数 $R^2 = 0.984$ 。在井下实际施工过程中,煤层的爆破孔间距和位置要根据地应力值合理布置,以达到最佳的爆破致裂效果。

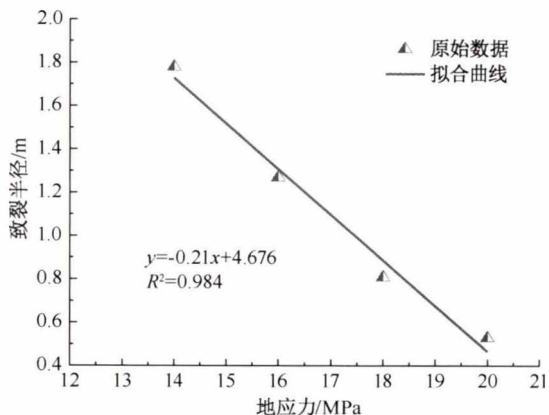


图3 致裂半径与地应力的拟合曲线
Fig.3 Fitting curve of cracking radius and in-situ stress

2) 瓦斯压力对致裂半径范围的影响分析。地应力 20 MPa,孔径 94 mm,煤体抗拉强度为 0.4 MPa 时,瓦斯压力为 2、4、6 和 8 MPa 情况下,液态 CO₂ 气爆致使煤层损伤范围变化的模拟,如图4所示。所对应的致裂半径分别约为 1.14、1.23、1.35 和 1.42 m。

由图4可以看出,随着瓦斯压力的增加,液态

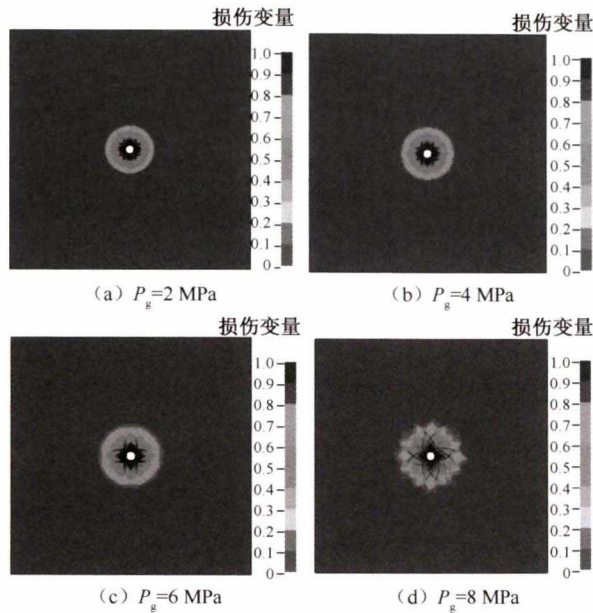


图4 不同瓦斯压力对致裂半径的影响
Fig.4 Influence of different gas pressure on cracking radius

CO₂ 相变致裂半径随之增加。原因为煤层内随着瓦斯压力的增大,煤体本身的有效应力将会降低,煤体内瓦斯压力较大时,在气爆后裂纹扩展需要克服的应力降低,故气爆致裂范围随之增大。二者的拟合关系如图5所示。煤层致裂半径可以表示为 $L = 0.048P_g + 1.045$, 对于高瓦斯煤层在实施液态 CO₂ 爆破增透时,可适当增加布孔间距来节约成本。

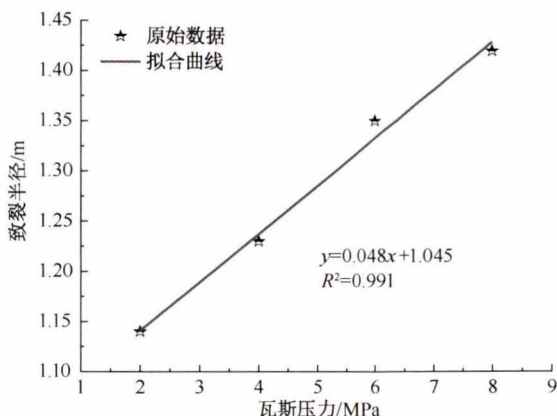


图5 瓦斯压力与致裂半径的拟合曲线
Fig.5 Fitting curve of gas pressure and cracking radius

3) 煤体抗拉强度对致裂半径范围的影响分析。煤层地应力为 20 MPa,孔径为 94 mm,瓦斯压力为 2 MPa,煤体抗拉强度 f 分别为 0.4、0.8、1.2 和 1.5 MPa 时,液态 CO₂ 气爆致使煤层损伤范围变化

的模拟,如图 6 所示。液态 CO₂ 气爆致使煤体碎裂损伤效果,所对应的致裂半径分别约为 1.01、0.98、0.96 和 0.95 m。

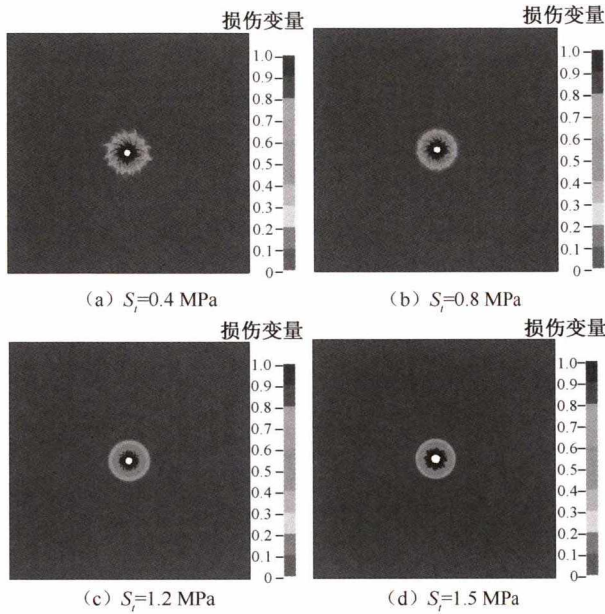


图 6 不同煤体强度对致裂半径的影响

Fig.6 Influence of different coal strength on cracking radius

由图 6 可以看出,煤体强度的大小对液态 CO₂ 相变致裂半径的变化影响很小,因为煤体裂纹发育主要是克服煤层地应力来实现的,煤体抗拉的强度与地应力相比数值很小,几乎可以忽略,所以导致煤体强度对液态 CO₂ 气爆致裂范围的影响很小。

4) 钻孔孔径对致裂半径范围的影响分析。地应力 14 MPa,瓦斯压力为 8 MPa,煤体抗拉强度为 0.4 MPa 时,钻孔孔径 d 分别取 72、94、113 和 133 mm 情况下,液态 CO₂ 相变致使煤层损伤范围变化的模拟,如图 7 所示。所对应的致裂半径范围分别约为 0.45、0.68、0.94 和 1.14 m。

由图 7 可以看出,随着钻孔孔径大小的增加,液态 CO₂ 气爆致裂半径增加。原因为液态 CO₂ 气爆过程中,钻孔周围煤体会受到高压气体造成的强烈扰动,煤体在高压气体产生的应力作用下,会形成由内向外不同发育程度的裂隙圈,此区域内煤体充分卸压。在煤层内瓦斯含量变化不大的情况下,大孔径钻孔内的周围煤体裂隙发育程度随卸压区域增大而增大,因此,在液态 CO₂ 气爆致裂后,气爆致裂效果会明显大于小孔径钻孔。图 8 为孔径与致裂半径的拟合曲线,由图 8 可知:二者拟合关系式可以表示为 $L=0.011d-0.386$,适当的增加孔径可以提高煤

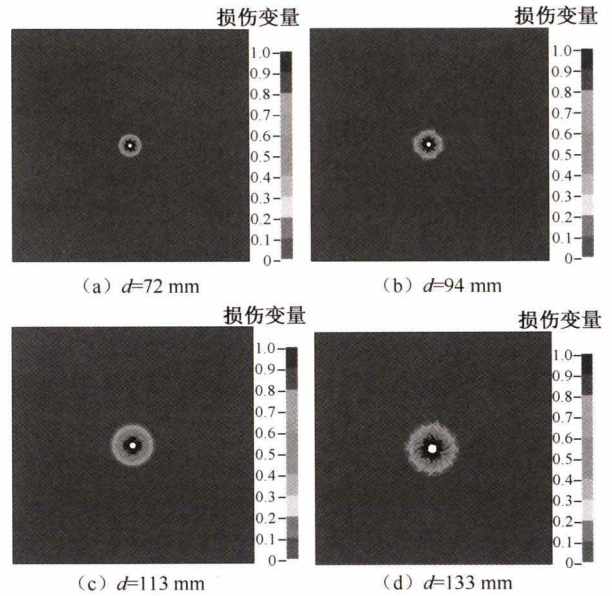


图 7 不同孔径对致裂半径的影响

Fig.7 Influence of different aperture on cracking radius

层的增透效果。

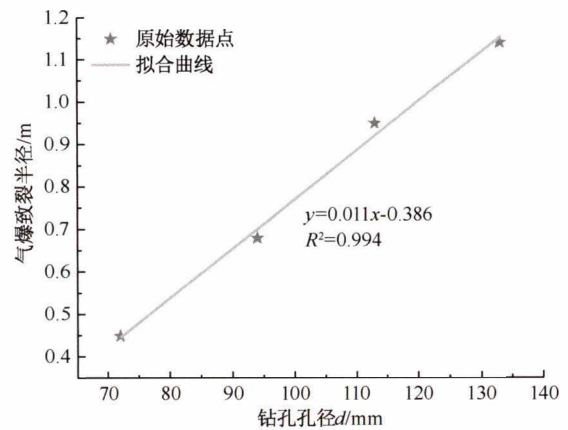


图 8 孔径与致裂半径的拟合曲线

Fig.8 Fitting curve between aperture and cracking radius

4 液态 CO₂ 致裂半径影响因素分析

根据上述模拟结果可知:地应力、瓦斯压力和钻孔孔径对致裂半径的影响较为显著,为确定这 3 个因素对液态 CO₂ 相变致裂半径影响程度的强弱关系,引入灰色关联理论^[15],分析这 3 个影响因素与致裂半径之间的关联度的主次顺序。

选取煤层致裂半径作为母因素,子因素分别为地应力、瓦斯压力和钻孔孔径。不同影响因素的取值见表 2。

表2 灰色绝对关联度数据

Tab.2 Data of grey absolute correlation

L/m	σ/MPa	P _g /MPa	d/mm
1.78	14	2	72
1.27	16	2	72
0.81	18	2	72
0.53	20	2	72
1.14	20	2	94
1.23	20	4	94
1.35	20	6	94
1.42	20	8	94
0.45	14	8	72
0.68	14	8	94
0.94	14	8	113
1.14	14	8	133

灰色关联度理论分析步骤^[15]如下:

1) 绝对关联度 ε_{0i}。

$$\epsilon_{0i} = \frac{1 + |s_0| + |s_i|}{1 + |s_0| + |s_i| + |s_i - s_0|} \quad (10)$$

式中:s₀为参照数列的始点零化像的有向面积;s_i为对比数列的始点零化像的有向面积。

根据文中的参考数据,令|S_i|、|S₀|、|S_i-S₀|为:

$$|s_i| = \int_1^{12} x_i^0(k) dk = \left| \sum_{k=2}^{11} x_i^0(k) + \frac{1}{2}x_i^0(12) \right| \quad (11)$$

$$|s_0| = \int_1^{12} x_0^0(k) dk = \left| \sum_{k=2}^{11} x_0^0(k) + \frac{1}{2}x_0^0(12) \right| \quad (12)$$

$$|s_i - s_0| = \left| \sum_{k=2}^{11} [x_i^0(k) - x_0^0(k)] + \frac{1}{2}[x_i^0(12) - x_0^0(12)] \right| \quad (13)$$

式中:x₀⁰为参照数列的始点零化像;x_i⁰为对比数列的始点零化像。

其中,令

$$\begin{aligned} x_i^0 &= [x_i(1) - x_i(1), x_i(2) - x_i(1), \dots, \\ &x_i(k) - x_i(1), \dots, x_i(12) - x_i(1)] = \\ &[x_i^0(1), x_i^0(2), \dots, x_i^0(k), \dots, x_i^0(12)] \\ &(i = 0, 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (14)$$

式中x_i(k)为第i个因素关于第k个对象的观测数据。

将式(11)一式(14)代入式(10),可求得各因素对致裂半径的绝对关联度。

2) 灰色相对关联度 γ_{0i}。

$$\gamma_{0i} = \frac{1 + |s'_0| + |s'_i|}{1 + |s'_0| + |s'_i| + |s'_i - s'_0|} \quad (15)$$

式中:s'₀为参照数列初值像的始点零化像的有向面积;s'_i为对比数列初值像的始点零化像的有向面积。

求出x_i的初值像x'_i:

$$x'_i = \left[\frac{x_i(1)}{x_i(1)}, \frac{x_i(2)}{x_i(1)}, \dots, \frac{x_i(k)}{x_i(1)}, \dots, \frac{x_i(12)}{x_i(1)} \right] = [x'_i(1), x'_i(2), \dots, x'_i(k), \dots, x'_i(12)] \quad (16)$$

令

$$\begin{aligned} x_i^{0'} &= [x'_i(1) - x'_i(1), x'_i(2) - x'_i(1), \dots, \\ &x'_i(k) - x'_i(1), \dots, x'_i(12) - x'_i(1)] = \\ &[x_i^{0'}(1), x_i^{0'}(2), \dots, x_i^{0'}(k), \dots, x_i^{0'}(12)] \\ &(i = 0, 1, 2, 3) \end{aligned} \quad (17)$$

式中:x'_i(k)为第i个因素关于第k个对象的初始值数据;x_i^{0'}(k)为数列初始值的始点零化像。其中,|s'₀|、|s'_i|、|s'_i-s'₀|的计算方法和|s₀|、|s_i|、|s_i-s₀|相同。

3) 灰色综合关联度 δ。灰色综合关联度涵盖灰色绝对(相对)关联度的共同的优势,即可以对比数据之间的相关性又可以比较相对于数据始点变化趋势^[16],计算方法如下:

$$\delta = \rho \epsilon_{0i} + (1 - \rho) \gamma_{0i} \quad (18)$$

式中ρ为分配系数,取值为0.5。

按上述步骤计算,结果见表3。由表3可以看出,煤层地应力对液态CO₂相变致裂半径范围的影响最大,综合关联度为0.7557,其次是钻孔孔径(δ=0.7179)和瓦斯压力(δ=0.5815)。因此,在工程实践中应用液态CO₂相变致裂进行煤层增透时,应该测试本煤层地应力和瓦斯压力的数值,确定合理的孔径大小,当煤层地应力较大时,应该适当地增加致裂孔的孔径,这样才能使煤层达到最佳致裂效果,有效的提高煤层增透效果。

表3 计算结果

Tab.3 Calculation results

参考指标	综合关联度/δ
地应力	0.7570
瓦斯压力	0.5815
钻孔孔径	0.7179

5 结论

1) 通过液态CO₂爆破能量释放的TNT当量转

换,计算得到液态 CO₂ 致裂器的能量释放当量约为 223 g TNT。

2) 借助模拟软件分析得到液态 CO₂ 致裂半径范围与煤层地应力呈递减关系;与瓦斯压力和钻孔孔径呈递增关系;煤体强度对致裂半径的影响甚微。

3) 利用数学灰色关联分析法得到 3 个影响因

素对液态 CO₂ 相变致裂半径的影响程度排序为:地应力>孔径大小>瓦斯压力。故在井下施工时,应该基于可靠的地应力和瓦斯压力参数进行爆破工艺参数设计,再进行合理的钻孔孔径设计,以此来获得更为理想的增透效果。

参 考 文 献

- [1] 贾进章,葛佳琪,甄纹浩,等.水力压裂增透技术及应用研究[J].中国安全科学学报,2020,30(10):63-68.
JIA Jinzhang, GE Jiaqi, ZHEN Wenhao, et al. Research and application of anti-reflection technology of hydraulic fracturing [J]. China Safety Science Journal, 2020,30(10): 63-68.
- [2] 赵丹,李斌,雷云,等.煤层复合射孔增透技术研究[J].中国安全科学学报,2019,29(6):109-115.
ZHAO Dan, LI Bin, LEI Yun, et al. Research on permeability enhancement of coal seam by compound perforation technology [J]. China Safety Science Journal, 2019,29(6): 109-115.
- [3] MA Yankun, NIE Baisheng, HE Xueqiu, 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] 聂百胜,杨涛,李祥春,等.煤粒瓦斯解吸扩散规律实验[J].中国矿业大学学报,2013,42(6):975-981.
NIE Baisheng, YANG Tao, LI Xiangchun, et al. Research on diffusion of methane in coal particles [J]. Journal of China University of Mining Technology, 2013,42(6): 975-981.
- [5] 许江,程亮,周斌,等.突出过程中煤-瓦斯两相流运移的物理模拟研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(10):1945-1953.
XU Jiang, CHENG Liang, ZHOU Bin, et al. Physical simulation of coal-gas two-phase flow migration in coal and gas outburst process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(10): 1945-1953.
- [6] 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.
- [7] 雷云,刘建军,张峭楠.CO₂ 相变致裂本煤层增透技术研究[J].工程地质学报,2017,25(1):215-221.
LEI Yun, LIU Jianjun, ZHANG Shaonan. Permeability improvement technology by cracking coal seam with CO₂ phase transition [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(1): 215-221.
- [8] FAR M S, WANG Yuan. Probabilistic analysis of crushed zone for rock blasting [J]. Computers and Geotechnics, 2016, 80: 290-300.
- [9] ESEN S, ONEDERRA I, BILGIN H A. Modelling the size of the crushed zone around a blasthole [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(4): 485-495.
- [10] 周西华,门金龙,宋东平,等.液态 CO₂ 爆破煤层增透最优钻孔参数研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(3):524-529.
ZHOU Xihua, MEN Jinlong, SONG Dongping, et al. Research on optimal borehole parameters of antireflection in coal seam by liquid CO₂ blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 524-529.
- [11] 吕鹏飞.聚能爆破煤体增透及裂隙生成机理研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2014.
LYU Pengfei. Research on coal body permeability increase and crack generation mechanism under cumulative blasting[D]. Beijing:China University of Mining & Technology-Beijing, 2014.
- [12] 郭德勇,赵杰超,吕鹏飞,等.煤层深孔聚能爆破有效致裂范围探讨[J].工程科学学报,2019,41(5):582-590.
GUO Deyong, ZHAO Jiechao, LYU Pengfei, et al. Effective fracture zone under deep-hole cumulative blasting in coal seam [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(5): 582-590.
- [13] 周西华,门金龙,宋东平,等.煤层液态 CO₂ 爆破增透促抽瓦斯技术研究[J].中国安全科学学报,2015,25(2):60-65.
ZHOU Xihua, MEN Jinlong, SONG Dongping, et al. Research on increasing coal seam permeability and promoting gas drainage with liquid CO₂ blasting [J]. China Safety Science Journal, 2015,25(2): 60-65.
- [14] 陈俊桦,张家生,李新平.考虑岩体完整程度的岩石爆破损伤模型及应用[J].岩土工程学报,2016,38(5):857-866.
CHEN Junhua, ZHANG Jiasheng, LI Xinping. Model of rock blasting-induced damage considering integrity of rock mass and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 857-866.
- [15] 刘思峰,党耀国,方志耕,等.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学出版社,2010:73-82.

作者简介:贾进章(1974—),男,河北石家庄人,博士,教授,主要从事矿井通风与瓦斯防治方面的研究。
E-mail:jjajinzhang@163.com。