

文章编号: 1001-1986(2017)04-0031-07

液态 CO₂ 相变致裂技术在布孔参数优化中的应用

李豪君¹, 王兆丰², 陈喜恩³, 赵 龙², 周大超²

(1. 煤科集团沈阳研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110000; 2. 河南理工大学安全科学与工程学院, 河南 焦作 454003; 3. 平煤股份十三矿, 河南 平顶山 467000)

摘要: 为了实现液态 CO₂ 相变致裂技术在低透气煤层强化消突领域经济高效消突的目的, 在河南平煤十三矿进行了液态 CO₂ 相变致裂穿层强化预抽煤层瓦斯试验, 在致裂影响半径研究的基础上, 通过数值模拟优化和现场验证的方法, 对液态 CO₂ 相变致裂技术布孔参数进行了研究。通过不同布孔方式、孔排间距等参数下的模拟和试验, 研究结果表明: 先致裂孔能为后致裂孔提供爆破自由面, 使爆破易向自由面上发展, 区域性致裂时为减弱自由面的影响, 布孔方式上易采用线性程度低的梅花形布孔方式, 合理的孔间距为 0.5~0.6 倍的单孔致裂有效影响半径。

关键词: 液态 CO₂; 影响半径; 布孔方式; 参数优化; 数值模拟

中图分类号: TD713 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.04.006

Optimization of borehole layout parameters based on fracturing technology of liquid CO₂ phase

LI Haojun¹, WANG Zhaofeng², CHEN Xi'en³, ZHAO Long², ZHOU Dachao²

(1. CCTEG Shenyang Research Institute, Shenyang 110000, China; 2. School of Safety Science & Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 3. The No.13 Mine of Pingdingshan, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: In order to achieve the purposes of economical-effectively eliminating coal and gas outburst in low permeability coal seam areas through fracturing technology of liquid CO₂ phase, the paper carried out through-layer gas pre-drainage test using fracturing technology of liquid CO₂ phase in Pingdingshan No.13 mine, on the basis of study of the fracturing radius of influence, through numerical simulation and field verification, the borehole layout parameters for fracturing technology of liquid CO₂ phase were studied. Through simulation and test with different layout and spacing of boreholes, the results showed that first fractur borehole provided the free surface for the the latter fractured borehole so as to make the fracturing developed towards the direction of the free surface, when regional fracturing was taken, it was easy to reduce the unfavorable influence of the free surface through using quincunx layout of the low linearity, the best borehole spacing was 0.5 to 0.6 times the effective influencing radius of fracturing.

Keywords: liquid CO₂; effective radius; borehole; parameter optimization; simulation

液态 CO₂ 相变致裂技术是一种能安全、有效地增加低透气煤层透气性的强化增透措施, 该技术率先由河南理工大学应用到煤层瓦斯抽采领域, 已在多个煤矿应用, 并取得了成功^[1]。

目前, 国内学者对液态 CO₂ 相变致裂在强化预抽煤层瓦斯方面的研究大多是处在试探研究阶段, 对其布孔方式、孔排距参数方面鲜有考察^[2-5]; 在煤

层强化增透抽采领域, 国内外学者^[6-9]通过研究发现布孔方式和孔排间距等影响着抽采效果, 结合董庆祥等^[10]对液态 CO₂ 相变致裂当量研究, 这一新型的爆破增透技术和传统爆破技术的致裂原理存在一定的差异, 因此对此爆破技术进行布孔参数优化研究, 确定其合理的布孔参数显得尤为重要。

以平煤股份十三矿已-1 采区 11111 底板岩巷穿

收稿日期: 2016-07-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275061)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China(51275061)

第一作者简介: 李豪君(1988—), 男, 河南周口人, 助理工程师, 硕士, 从事矿井瓦斯灾害研究. E-mail: lhj7328@163.com

通讯作者: 王兆丰(1963—), 男, 湖南湘潭人, 研究员, 从事瓦斯灾害与防治研究. E-mail: wzf3988@163.com

引用格式: 李豪君, 王兆丰, 陈喜恩, 等. 液态 CO₂ 相变致裂技术在布孔参数优化中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 31-37.

LI Haojun, WANG Zhaofeng, CHEN Xi'en, et al. Optimization of borehole layout parameters based on fracturing technology of liquid CO₂ phase[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 31-37.

层钻孔液态 CO₂ 相变致裂强化预抽瓦斯效果考察项目作为依托, 在致裂影响半径研究的基础上, 进行不同布孔参数下液态 CO₂ 相变致裂强化预抽效果研究, 通过数值模拟手段对此技术进行布孔参数的优化, 并通过现场试验, 确定其区域性应用时最佳的布孔方式和孔排间距, 使煤矿达到安全、高效消突的目的, 同时, 本研究为该技术在低透气煤层增透领域广泛应用提供参考。

1 致裂模型及布孔参数优化

1.1 致裂力学模型

液态 CO₂ 相变致裂技术属于高压气体物理爆破, 根据国内学者在弹性力学和断裂力学理论爆破高压气体对岩石的拉伸破坏作用研究, 爆破气体作用区可分为爆破应力波作用区和爆破气体的准静力场区, 应力波作用区简化看作为致裂压实区, 准静力场区为裂隙发育区, 由式(1)和式(2)^[11]划分。

$$r_c = r_h \times \left(\frac{P_{max}}{K_i S_t} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \left(\frac{P_{max}}{2P} \right)^{1/K} = 1 + \left[\left(\frac{r_c}{r_h} \right)^2 - 1 \right] \frac{P}{K_b} \\ \sigma_r = P \times \left(\frac{r}{r_c} \right)^{-\alpha} \end{cases} \quad (2)$$

式中 r_c 为初始裂隙长度, m; r_h 为爆破孔径, mm; K 为玻兹尔曼常数; K_i 为动载下抗拉强度提高系数, 不同加载速率下取值不同, 致裂加载速率下取值约为 10; K_b 为煤体体积模量, MPa; P 为初始裂隙区内气体压力, 经迭代计算约为 150 MPa; P_{max} 为爆破产生压力最大值, MPa; S_t 为岩石静载下的抗拉强度, 煤一般取值为 3 MPa; r 为距离炮孔距离; α 为衰减指数, $\alpha=2+\mu(1-\mu)^{-1}$; μ 为煤的为泊松比, 取值 0.3; σ_r 为岩石轴向抗压强度, MPa。

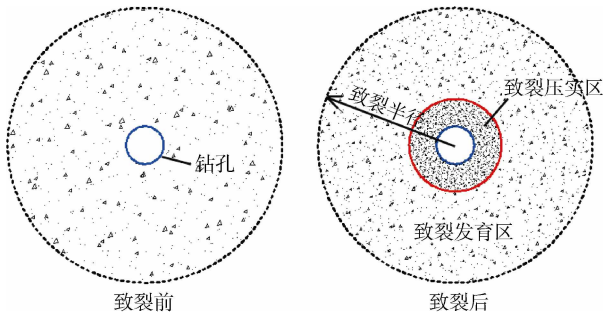


图 1 致裂示意图

Fig.1 Schematic fracturing

根据液态 CO₂ 相变致裂爆破筒径大小, 试验爆破孔径: $r_h=94$ mm; 爆破采用的均为 F57L 型液态

CO₂ 爆破筒、51 mm 厚的破裂片, 即爆破产生的威力相同, 爆破产生高压: $P_{max}=270$ MPa。

1.2 数值模型的建立

为了确定液态 CO₂ 相变致裂技术最佳布孔方式, 以及合理的孔排间距, 通过数值模拟软件 Comsol Multiphysics 的 solid Mechanics 模块, 结合现场试验的实际条件建立一个瞬态液态 CO₂ 相变致裂的模型。

模型采用高压气体爆破冲击波作用原理^[11-12]进行数值计算, 模型的周边边界设置为对 P 波和 S 波反射, 根据对爆破冲击波随时间的衰减规律研究^[13-17], 并结合 r 与时间的函数关系, 将式(2)拟合冲击压力随时间变化的函数, 并加载到致裂孔上, 破坏准则采用了自带岩石的 von mises 强度准则。

爆破冲击力随时间变化函数

$$P(t) = P \times e^{(-\gamma t/t_0)} \times \sin(4\pi t/(t+t_0)) \quad (3)$$

式中 P 为致裂的峰值压力, MPa; t_0 为致裂过程时间, 20 ms; t 为时间, s; γ 为衰减率。

表 1 模拟采用的参数值

Table 1 Parameter values used in simulation

弹性模量/ GPa	压缩强度/ MPa	泊松比	煤体密度/ (kg·m ⁻³)	峰值压 力/MPa	冲击 衰减率
13	15	0.3	1 400	270	0.28

1.3 致裂影响半径试验及模拟

对布孔间距研究前, 在平煤股份十三矿己-1 采区 11111 底板岩巷 450 m 位置处进行了致裂影响半径的考察试验, 共布置 A、B、C 三个考察钻孔组, 每组布置钻孔 13 个, 其中预裂孔 2 个、抽采孔 11 个。试验先布置抽采孔, 并进行致裂前效果考察, 然后在 5 号孔进行第 1 次致裂, 在瓦斯体积分数或者瓦斯纯量(瓦斯抽采流量与体积分数的乘积值)降至初值的 50%时, 再进行 8 号孔的第 2 次致裂。试验采用光学瓦斯检测仪、负压表、改装的煤气表分别对抽采的瓦斯体积分数、负压、流量进行抽采效果的考察, 下面以 B 组孔考察数据为例, 进行致裂影响分析(表 2)。

通过对影响半径试验区的考察(限于篇幅仅列出 B 组考察数据), 试验得出了类似的规律: 第 1 次致裂后可以看出, 单孔致裂后最大影响距离为 30 m 以上, 在 10 m 范围内增透效果显著; 第 2 次致裂在第一致裂的基础进行, 在距离第 2 次致裂孔 16.38 m 范围内, 除个别孔抽采纯量不升反降外, 其余孔抽采纯量明显增加, 是第 1 次抽采前的 2 倍左右。

为了研究多孔联合致裂下的作用范围, 借助建

表 2 B 组影响半径考察数据
Table 2 The data of influence radius of Group B

孔号	距5号致裂孔终孔距离/m	距8号致裂孔终孔距离/m	瓦斯体积分数平均值/%			较第1次致裂倍数	瓦斯纯量平均值/(m ³ ·d ⁻¹)			较第1次致裂倍数
			致裂前	第1次致裂	第2次致裂		致裂前	第1次致裂	第2次致裂	
1	16.03	23.78	22.28	15.98			1.36	0.92		
2	11.65	19.41	34.95	53.60	79.48	1.48	2.52	4.98	10.12	2.03
3	8.66	16.38	22.90	50.38	71.64	1.42	1.37	3.93	6.67	1.70
4	3.99	11.73	35.08	48.13	63.85	1.33	2.64	4.62	7.77	1.68
5(致裂孔)		7.79		46.16	83.50	1.81		6.79	9.71	1.43
6	3.39	4.42	35.08	51.85	77.34	1.49	2.44	4.81	9.64	2.01
7	5.28	2.64	75.30	92.01	86.84	0.94	15.19	20.82	19.59	0.94
8(致裂孔)	7.79									
9	10.68	2.90	20.05	31.6	72.54	2.30	5.08	6.51	12.50	1.92
10	15.84	8.06	19.60	34.17	59.96	1.75	1.59	3.56	8.95	2.51
11	21.25	13.47	32.23	52.08	82.78	1.59	6.40	8.59	17.56	2.04
12	27.25	19.48	44.47	54.40	89.23	1.64	5.04	6.95	12.72	1.83
13	32.08	24.30	60.69	70.30	89.70	1.28	7.01	9.41	15.86	1.69

立的致裂模型对单孔致裂进行了模拟，模型大小为 50 m×50 m，厚度近似为 5 m，致裂孔布置在横向中心线上，并根据单孔致裂后的致裂孔周边煤体变

形，研究了不同间距下两孔致裂、三孔致裂模拟，得到爆破过程中致裂孔横截面上煤体位移量变化曲线，如图 2 所示。

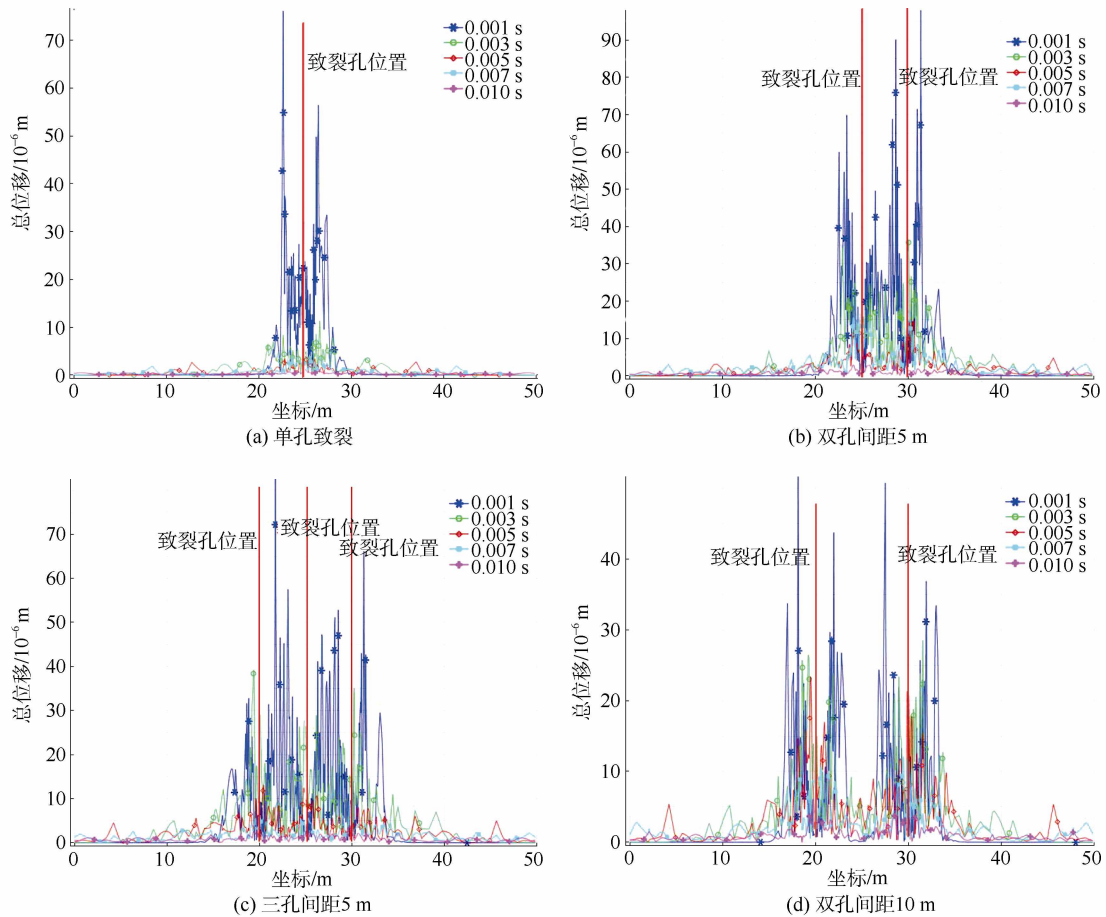


图 2 致裂过程中的煤体位移量变化曲线图

Fig.2 The coal displacement change curve in the process of fracturing

通过图 2a 可以看出单孔下致裂有效半径可达 10 m, 其中变形量较大区集中在距离致裂孔 5m 范围内; 通过图 2b、图 2c 先后致裂的煤体变量曲线可以看出, 致裂后煤体变形量最大值在致裂孔的连线位置上, 这就意味着致裂变形多向前一致裂提供的自由面上发展; 根据图 2b、图 2d 不同间距下模拟效果, 可以看出孔距变大, 在一定程度上影响了煤体的变形量值, 但扩大孔间距可以减弱前一个爆破自由面的不利影响, 提高了能量的利用率, 增大了致裂影响范围。

因此, 液态 CO₂ 相变致裂布孔间距不能仅仅根据单孔的致裂影响半径进行布置, 必须对其布孔参数进行优化。

1.4 布孔方式优化

现场试验主要采用矩形和交错的梅花形布孔方式, 通过爆破工程, 同时考虑工程施工的可行性, 每两排钻孔视为一组, 致裂孔位置按照矩形孔和梅花孔要求进行布置(图 3)。

根据 1.3 节影响半径的试验和模拟, 并结合抽采达标要求, 按照图 3 所示的布孔方式, 进行排孔内孔间距、排间距分别为, 4 m×4 m、5 m×5 m、6 m×6 m 和 7 m×7 m 的数值模拟, 模拟按照实际施工要求先布置非致裂孔, 然后按成排顺序逐个爆破致裂孔, 最终得到 $t=0.07$ s 时刻的应变云图(图 4)以及不同时刻的布孔对角线上的煤体变形量曲线(图 5)。

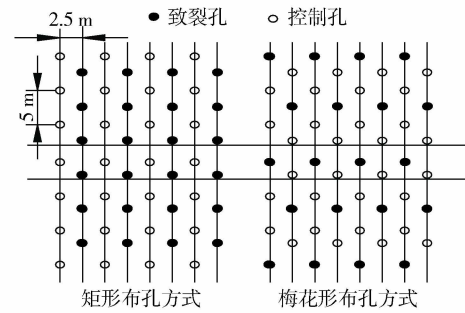
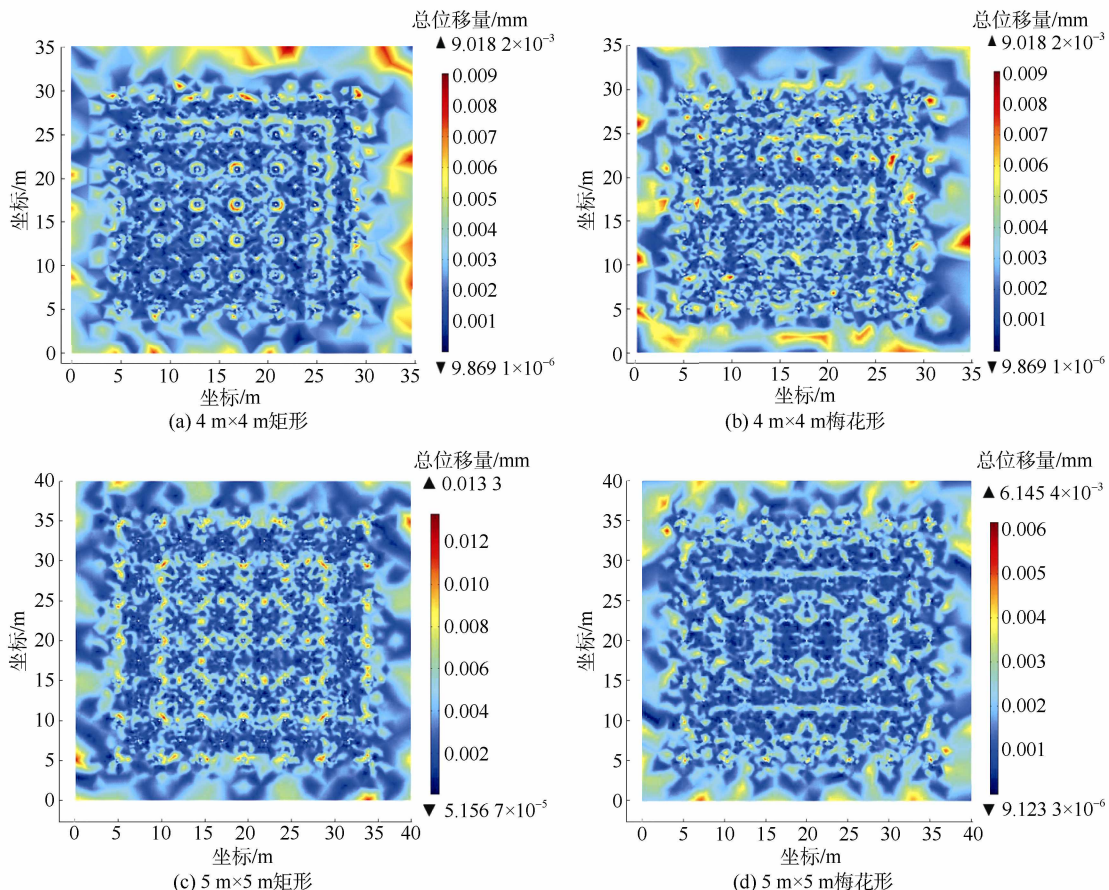


图 3 现场布孔示意图

Fig.3 Schematic borehole layout

通过以上 2 种布孔方式下致裂过后的应变云图对比, 可以看出矩形孔布置方式下应变多集中在致裂孔连线位置上, 而梅花形孔由于致裂孔位置相对分散, 应变集中现象不明显; 通过变形量曲线图, 可以看出矩形布孔方式下变形量较大点多集中在致裂孔附近, 而梅花孔变形量较大值点相对分散, 分布相对均匀。

通过上述分析可以看出先致裂孔的破坏区和周边抽采孔为后致裂孔提供了自由面, 后致裂孔冲击波遇到自由面发生反射产生拉伸破坏, 同时也由于自由面的存在导致冲击变形更易向自由面方向发展, 裂隙将明显呈致裂孔连线上发育贯通, 呈明显的条带状分布, 影响致裂效果, 这就导致了致裂孔在矩形布置方式下由于线性过于集中, 致裂效果差, 同等条件下, 采用交错梅花形布孔能取得更好的效果。



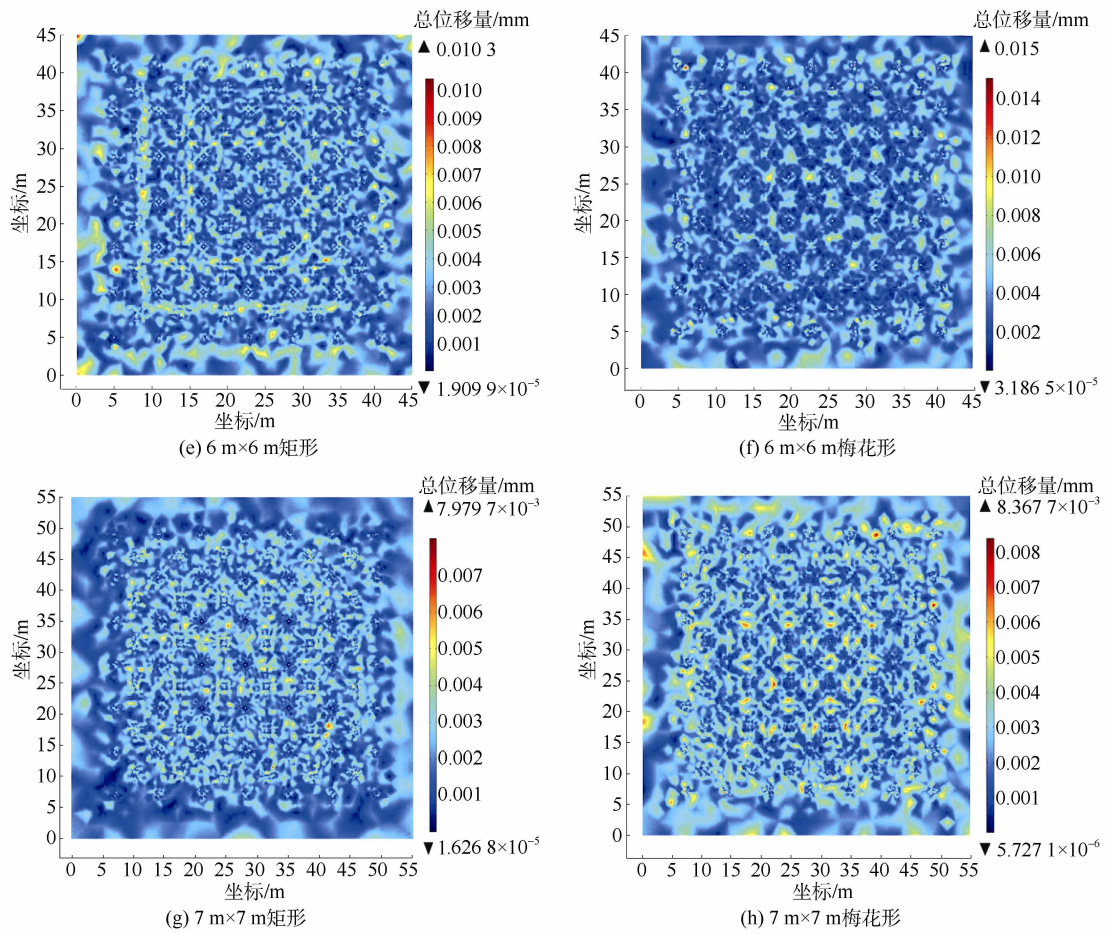
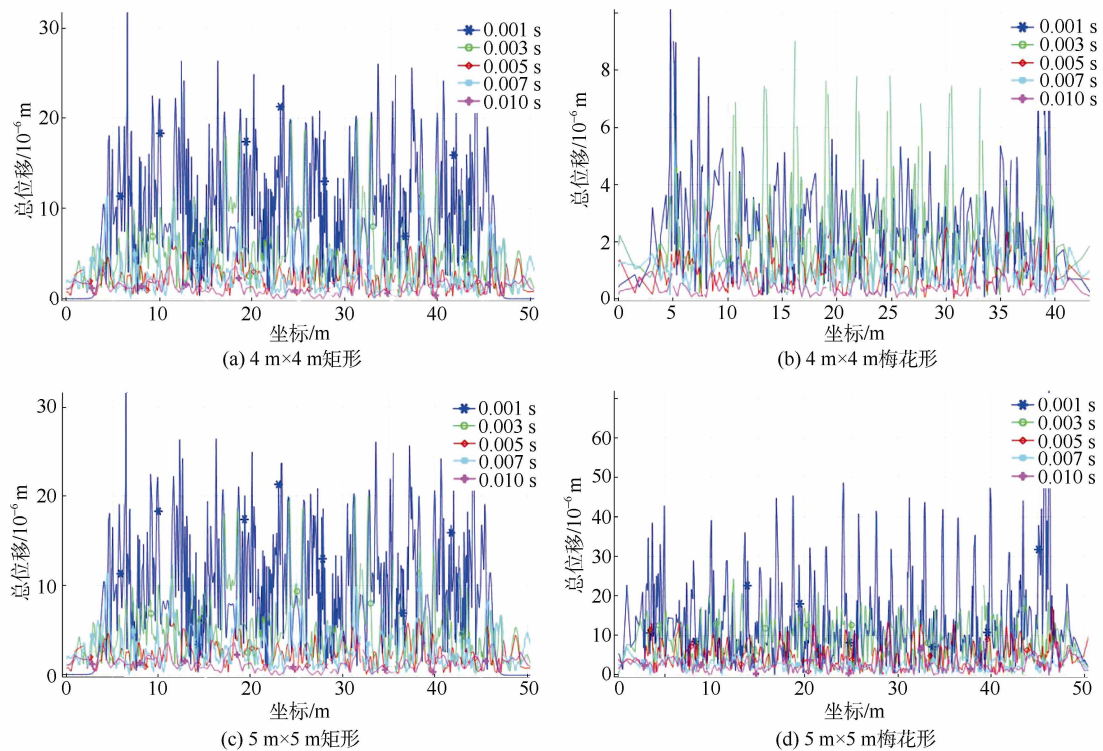


图 4 不同布孔方式下不同间距的应变云图模拟结果($t=0.007$ s)

Fig.4 Simulation results of the strain nephogram under the different spacing of hole



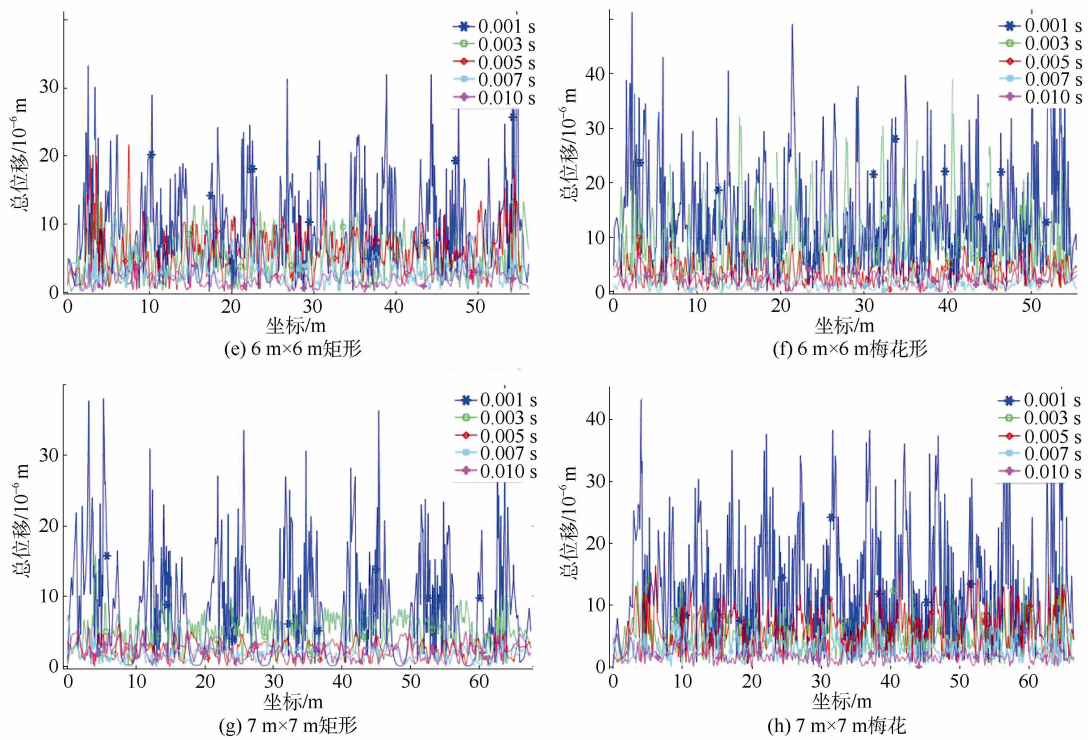


图 5 不同布孔方式下不同间距的煤体变形曲线模拟结果(不同时刻)

Fig.5 Simulation results the coal displacement change curve under the different spacing of hole

在 4 m×4 m 布孔方式下，致裂区煤体变形强烈，当达到 7 m×7 m 时，通过位移变形量图可以看出部分煤体区域变形量较小，在致裂孔连线位置上煤体变形不充分。根据以上分析，结合不同孔排间距下的模拟研究和渗透率与应变关系方程^[18]，可以看出孔排间距布孔为单孔致裂有效影响半径的 0.5~0.6 倍间距致裂效果最佳。

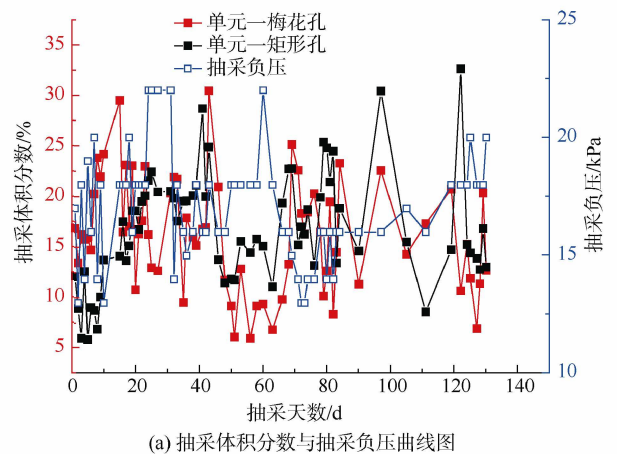
2 现场试验效果

为了验证优化效果,现场进行了 2 种布孔方式下的效果试验,同时根据模拟结果选择了 5 m×5 m、6 m×6 m 的孔排距。现场选择平煤股份十三矿己-1 采区 11111 底板岩巷 850~950 m 范围段作为试验区,为了充分验证优化效果,试验区划分了 2 个单元,即单元一和单元二,单元一采用图 3 所示布孔方式布孔,单元二与单元一的布孔方式类似仅改变了孔排间距。每种布孔方式下选择 1 组(两排孔)作为试验的精细考察组,试验共计 4 组精细考察组,同时为了定量考察,将抽采达标期作为效果考察对象。

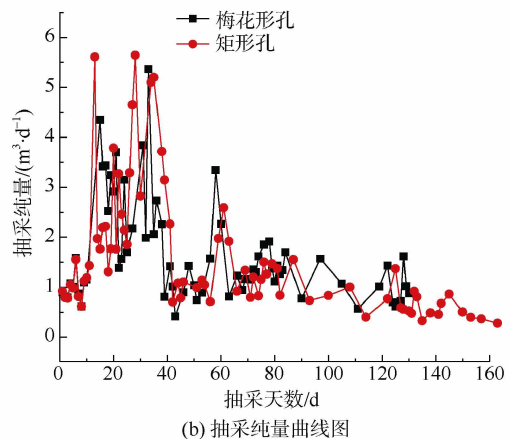
经过现场测压、取样,发现该 100 m 范围内煤层原煤瓦斯含量为 8.7~11.7 m³/t,原煤瓦斯压力为 0.8~0.88 MPa,原始煤层透气性系数为 0.06 m³/(m²·d),未采取致裂措施抽采达标需要 260 d 左右。

2.1 单元一抽采效果

该试验单元内致裂孔在第 8 d 左右进行了致裂,通过图 6a 所示的瓦斯平均抽采体积分数曲线,可以



(a) 抽采体积分数与抽采负压曲线图



(b) 抽采纯量曲线图

图 6 单元一致裂后瓦斯抽采效果对比
Fig.6 The comparison of extraction effect after fracturing of unit.1

看出在 2 种布孔方式下致裂后瓦斯体积分数均增大, 矩形布孔方式下致裂后抽采瓦斯体积分数为致裂前的 1.5~4 倍, 梅花形布孔方式下致裂后抽采体积分数为致裂前的 1.2~4.5 倍。

根据致裂后抽采纯量曲线(图 6b), 可计算得到矩形布孔方式下致裂后 10 d、20 d、30 d、40 d 单孔平均抽采纯量累计值分别为 28 m³、52 m³、90 m³、103 m³, 抽采达标需 120 d 左右。梅花形布孔方式下致裂后 10 d、20 d、30 d、40 d 单孔平均抽采纯量累计值分别为 38 m³、75 m³、115 m³、123 m³, 抽采达标需 100 d 左右, 可以看出在致裂后一段时间内显著增加, 前期内两者差别不大, 但是从长期来看梅花形孔抽采纯量处于稍高的水平。

2.2 单元二抽采效果

该试验单元内矩形孔和梅花孔布孔方式均在第 7 天左右进行液态 CO₂ 相变致裂。根据图 7a 所示为致裂前后瓦斯平均抽采体积分数曲线, 矩形孔布孔方式下致裂后瓦斯抽采体积分数为致裂前的 0.8~2 倍, 梅花形布孔方式下, 致裂后瓦斯抽采体积分数为致裂前的 1.2~2.5 倍。

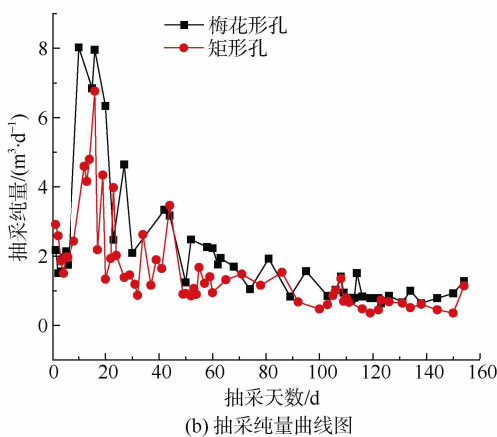
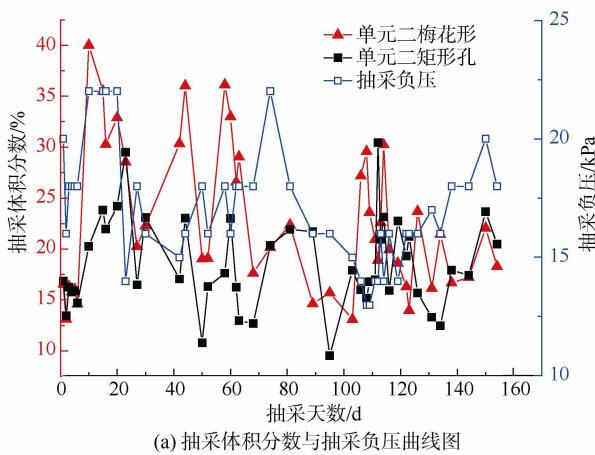


图 7 单元二致裂后瓦斯抽采效果对比

Fig.7 Comparison of extraction effect after fracturing of unit.2

由抽采纯量曲线(图 7b), 可计算出矩形布孔方式下致裂后 10 d、20 d、30 d、40 d 单孔平均抽采纯量累计值分别为 25 m³、65 m³、87 m³、105 m³, 计算得到抽采达标期为 140 d 左右, 梅花形布孔方式下致裂后 10 d、20 d、30 d、40 d 单孔平均抽采纯量累计值分别为 46 m³、85 m³、112 m³、130 m³, 根据该区原煤瓦斯含量计算得出抽采达标需 125 d。

2.3 优化效果验证

2 种布孔方式的对比, 可以看出在试验的 2 个单元内矩形孔致裂后抽采效果均不如交错的梅花形布孔方式致裂后抽采效果, 现场与模拟的结果基本一致, 充分说明液态 CO₂ 相变致裂技术布孔方式采用交错的梅花式布置能取得更好效果。

致裂后试验区煤层透气性系数为 2.1~2.6 m³/(m²·d), 是非致裂时的 35~45 倍, 煤层瓦斯抽采达标期缩短至非致裂时的一半左右; 同时, 在孔排参数的选取上, 取得了与前述一致的结论, 适当增大孔排间距, 减弱自由面的不利影响会取得更好的效果, 现场试验在孔排间距为 6 m×6 m 时取得了最佳的致裂增透效果, 验证了多排联合致裂时孔排间距为单孔致裂有效影响半径的 0.5~0.6 倍间距是合理的。这也充分验证了所建立的模型能对液态 CO₂ 相变致裂技术进行布孔参数优化。

3 结论

a. 研究表明, 河南平煤十三矿煤层地质条件下单孔致裂有效影响半径可达 10 m, 同时, 结合不同孔排间距下的模拟研究和渗透率与应变关系方程, 得出区域性致裂时合理的孔排间距为单孔致裂有效影响半径的 0.5~0.6 倍。

b. 模拟和现场试验结果显示, 梅花形布孔方式由于致裂孔位置线性集中度低于矩形布置方式, 致裂后能量分布均匀, 取得较好的增透效果, 因此在液态 CO₂ 相变致裂布孔方式设计上, 应尽量避免致裂孔线性布置; 在孔排距选择上, 该矿布孔方式采用 6 m×6 m 孔排间距致裂效果最佳。

c. 现场试验证明, 采用所建立的气体爆破力学致裂模型对参数优化是可行的, 该模型为类似条件下布孔参数优化设计提供理论依据。

参考文献

- [1] 王兆丰, 孙小明, 陆庭侃, 等. 液态 CO₂ 相变致裂强化瓦斯预抽试验研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 21(1): 1-5. WANG Zhaofeng, SUN Xiaoming, LU Tingkan, et al. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO₂ phase transition[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science Edition), 2015, 21(1): 1-5.

- 及变形序列[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2006, 36(2): 215-220.
- LIU Xingjun, LIU Zhihong, FENG Yongjiu, et al. Structural characteristics and deformation sequence of the Urxun sag in Hailar basin, China[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(2): 215-220.
- [8] 刘秋宏, 任延广, 李春柏, 等. 海拉尔盆地乌尔逊-贝尔凹陷的构造特征及其对油气成藏的影响[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(2): 151-156.
- LIU Zhihong, REN Yanguang, LI Chunbai, et al. Structural features and their impacts on hydrocarbon accumulation in Urxun-Beier depression in Hailar basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(2): 151-156.
- [9] 侯艳平, 朱德丰, 任延广, 等. 贝尔凹陷构造演化及其对沉积和油气的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(3): 300-307.
- HOU Yanping, ZHU Defeng, REN Yanguang, et al. Tectonic evolution and its controlling on sedimentation and hydrocarbon accumulation in Bei'er depression[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2008, 32(3): 300-307.
- [10] 李思田. 断陷盆地分析与煤聚集规律[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 32-39.
- [11] 柳磊, 汪立今, 田继军, 等. 新疆托克逊煤田侏罗系成煤环境及沉积特征分析[J]. 地球学报, 2011, 32(5): 549-558.
- LIU Lei, WANG Lijin, TIAN Jijun, et al. Sedimentary characteristics and coal-accumulation pattern of the Xishanyao Formation in the Toksun coalfield of Xinjiang[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2011, 32(5): 549-558.
- [12] 田龙臣, 李守军, 徐凤琳, 等. 山东彭庄煤矿石炭-二叠系孢粉特征与成煤环境[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(6): 12-21.
- TIAN Longchen, LI Shoujun, XU Fenglin, et al. Carboniferous and Permian palynological assemblages and the coal forming environment in Pengzhuang coal mine of Shandong Province[J]. Coal Geology & Exploration, 2015, 43(6): 12-21.
- [13] 龙永文. 海拉尔盆地沉积相特征与油气分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995: 59-71.

(责任编辑 范章群)

(上接第37页)

- [2] 郭有慧, 孙锐. 石家庄 CO₂ 预裂爆破强化抽采技术试验研究[J]. 科技与创新, 2014(1): 6-8.
- GUO Youhui, SUN Rui. Test of CO₂ pre-fracturing technology for enhanced extraction in Sijiazhuang[J]. Technology and Innovation, 2014(1): 6-8.
- [3] 张悦, 张民波, 朱天玲, 等. 低透气性煤层 CO₂ 增透预裂技术应用[J]. 科技导报, 2013(23): 36-39.
- ZHANG Yue, ZHANG Mingbo, ZHU Tianling, et al. Application of permeability improvement technology with CO₂ in coal seams of low permeability[J]. Journal of Tech Review, 2013(23): 36-39.
- [4] 孙小明. 液态二氧化碳相变致裂穿层钻孔强化预抽瓦斯效果研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
- [5] 韩亚北. 液态二氧化碳相变致裂增透机理研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2014.
- [6] 梁冰, 赵海波, 王岩, 等. 确定卸压瓦斯抽采钻孔合理层位的试验[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(3): 96-99.
- LIANG Bing, ZHAO Haibo, WANG Yan, et al. Experimental study on determining the rational horizon of pressure-relief gas extraction boreholes[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(3): 96-99.
- [7] 王新生, 崔国顺, 梁为民, 等. 大断面岩巷快速掘进爆破参数优化[J]. 煤炭工程, 2009, 41(12): 35-37.
- WANG Xinsheng, CUI Guoshun, LIANG Weimin, et al. Blasting parameter optimization of rock drift rapid excavation on large section[J]. Journal of Coal Engineering, 2009, 41(12): 35-37.
- [8] 刘明举, 盛锴, 郝富昌, 等. 大孔径预抽煤巷条带瓦斯技术的优化及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2014, 42(6): 110-113.
- LIU Mingju, SHENG Kai, HAO Fuchao, et al. The optimization and application of large diameter borehole for pre-drainage of stripe gas in roadway[J]. Coal Geology & Exploration, 2014, 42(6): 110-113.
- [9] Б.Н.库图佐夫, 宋文祥. 裂隙岩体爆破作用参数的优化[J]. 国外金属矿采矿, 1986(9): 39-41.
- KUTUZOV B N, SONG Wenxiang. Optimizing blasting parameters of fractured rock mass[J]. Foreign Metal Mining, 1986(9): 39-41.
- [10] 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-transforming fracture[J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 84-88.
- [11] 李守巨, 费鸿禄, 何庆志, 等. 试论爆炸气体的爆破作用[J]. 阜新矿业学院学报(自然科学版), 1992(3): 46-49.
- LI Shouju, FEI Honglu, HE Qingzhi, et al. Discussion on the blasting effect of explosion gas[J]. Journal of Fuxin Mining Institute(Natural Science Edition), 1992(3): 46-49.
- [12] 郭学彬. 爆破工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [13] 陆遐龄. 岩体中爆炸应力波的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 31(4): 364-372.
- LU Xialing. Experimental study of stress wave in rock mass induced by blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 31(4): 364-372.
- [14] 亨利奇(Henrych J). 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [15] 崔新社, 李卫民, 段祝平, 等. 爆炸应力波在各向同性损伤岩石中的衰减规律研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 76-80.
- CUI Xinzhuang, LI Weimin, DUAN Zhuping, et al. Stress wave attenuation in isotropic damaged rocks[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 76-80.
- [16] 金旭浩, 卢文波, 田勇, 等. 岩石爆破过程 S 波的产生机制分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊2): 228-232.
- JIN Xuhao, LU Wenbo, TIAN Yong, et al. Analysis of mechanisms of S wave generated in rock blasting process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 228-232.
- [17] BIOT M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941(12): 155-164.

(责任编辑 聂爱兰)