

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2022.04.003

# 液态 CO<sub>2</sub> 相变破岩参数及数值模拟研究<sup>\*</sup>

王杰<sup>①②</sup> 张云鹏<sup>①②</sup> 葛晓东<sup>①②</sup> 周敏<sup>①②</sup>

①华北理工大学矿业工程学院(河北唐山,063000)

②华北理工大学河北省矿业开发与安全技术重点实验室(河北唐山,063000)

**[摘要]** 为更好地了解液态 CO<sub>2</sub> 相变破岩技术,对液态 CO<sub>2</sub> 相变的相关参数进行了研究。并通过调节装药不耦合系数,对传统数值模拟方法进行优化,确定了用于施工现场的布孔方式。结果表明:所采用的 CO<sub>2</sub> 相变致裂器的 TNT 当量为 0.29 kg,乳化炸药当量为 0.41 kg;其作用于孔壁上的爆轰压力为 1 200 MPa,仅为乳化炸药爆轰压力的 7.8%;爆容为 509 L/kg,约为乳化炸药爆容的 50%;破岩范围半径约为 1.75 m。提出了用于工程现场的致裂方案,取得了良好的破岩效果。

**[关键词]** CO<sub>2</sub> 致裂;TNT 当量;爆炸压力;数值模拟

**[分类号]** TD235

## Study on Rock Breaking Parameters and Numerical Simulation of Phase Transition of Liquid CO<sub>2</sub>

WANG Jie<sup>①②</sup>, ZHANG Yunpeng<sup>①②</sup>, GE Xiaodong<sup>①②</sup>, ZHOU Min<sup>①②</sup>

①College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology (Hebei Tangshan, 063000)

②Key Laboratory of Mine Development and Safety Technology of Hebei Province, North China University of Science and Technology (Hebei Tangshan, 063000)

**[ABSTRACT]** In order to better understand the liquid CO<sub>2</sub> phase change fracturing technology, relevant parameters of liquid CO<sub>2</sub> phase change were studied. By adjusting the charge uncoupling factor, the traditional numerical simulation method was optimized to determine the hole placement method for the construction site. Results show that the CO<sub>2</sub> phase change fracture device used in this test has a TNT explosive equivalent of 0.29 kg and an emulsion explosive equivalent of 0.41 kg. Blast pressure on the hole wall is 1 200 MPa, which is only 7.8% of the blast pressure of emulsion explosives. Blast capacity is 509 L/kg, which is about 50% of the blast capacity of emulsion explosives. Radius of rock breaking range is about 1.75 m. A fracturing scheme was proposed for the project site, which achieved good rock breaking results.

**[KEYWORDS]** CO<sub>2</sub> induced cracking; TNT equivalent; explosion pressure; numerical simulation

## 引言

爆破技术一直是矿山资源开采的重要手段,具有经济、便捷、高效的优势。但爆破作业也存在着如早爆、迟爆等较大的风险和爆破振动、噪声、有毒气体等有害效应。尤其是爆破作业产生的振动效应,对爆区周边民用建筑物会产生一定的影响。近年来,一种非炸药爆破——液态 CO<sub>2</sub> 相变破岩技术在

我国得到了较快发展。CO<sub>2</sub> 相变破岩技术具有无污染、低振动、低爆炸温度、易于调节等特点,特别适用于一些无法实施爆炸作业和对爆破振动有严格要求的环境,对保证安全生产和减少有害效应具有重要意义。

国内在 CO<sub>2</sub> 相变破岩技术方面开展了初步研究。在破岩应用方面,王燕等<sup>[1]</sup>研究了 CO<sub>2</sub> 致裂在煤体中的破坏程度,得到了炮孔与原生裂隙的夹角越小、距离越近越明显的结论;题正义等<sup>[2]</sup>研究了液

<sup>\*</sup> 收稿日期:2021-11-27

基金项目:河北省自然科学基金(E2016209388)

第一作者:王杰(1995-),男,硕士研究生,主要从事爆破领域的研究。E-mail:2902299640@qq.com

通信作者:张云鹏(1962-),男,教授,博导,主要从事矿业工程、安全工程、爆炸领域的研究。E-mail:276158733@qq.com

态CO<sub>2</sub>致裂在巷道中的快速卸压技术,得到了爆破孔的合理间距范围。在液态CO<sub>2</sub>相变原理研究方面,章文义<sup>[3]</sup>结合具体案例分析了CO<sub>2</sub>气体爆破所反映的问题,提出了CO<sub>2</sub>气体爆破的安全管理建议;夏军等<sup>[4]</sup>分析了CO<sub>2</sub>致裂技术应用于露天台阶破岩、块体破岩、孤石破岩等的具体案例;周科平等<sup>[5]</sup>研究了液态CO<sub>2</sub>爆破系统的爆炸能量和压力响应特征,计算出了液态CO<sub>2</sub>相变裂岩的能量;董庆祥等<sup>[6]</sup>通过分析液态CO<sub>2</sub>相变致裂原理,得到F57L型储液管与SD390型定压片的TNT当量约为277 g;刘光辉等<sup>[7]</sup>从能量角度对CO<sub>2</sub>致裂振动与爆破振动信号进行了比较分析,得出CO<sub>2</sub>致裂的峰值振速仅为炸药爆炸的10%的结论。在煤层增透应用方面的研究表明<sup>[8-9]</sup>,CO<sub>2</sub>相变致裂技术能够提高煤层的透射能力。

CO<sub>2</sub>相变破岩技术在矿山应用还不成熟,许多技术问题有待于解决。本文中,在分析CO<sub>2</sub>相变致裂的炸药当量、爆轰压力和气体涌出量的基础上,利用数值模拟方法研究不同孔间距下CO<sub>2</sub>相变致裂破岩效果,以确定合理的孔网参数。

## 1 液态CO<sub>2</sub>相变破岩原理

CO<sub>2</sub>在超临界状态是一种特殊的流体,其特点是液体的密度高、气体的扩散系数大。CO<sub>2</sub>临界点的临界压力为7.38 MPa,临界温度31.4℃。高于临界点,CO<sub>2</sub>进入超临界状态(SC-CO<sub>2</sub>)。液态CO<sub>2</sub>相变破岩技术正是利用CO<sub>2</sub>的这种特殊性质,通过CO<sub>2</sub>气体的突然释放形成物理爆炸的过程。液态CO<sub>2</sub>相变破岩过程通过CO<sub>2</sub>相变致裂器完成。CO<sub>2</sub>相变致裂器由起充气头、激发管、主管体、密封垫片、破裂片、泄能端头及液态CO<sub>2</sub>等7部分组成,如图1所示<sup>[10]</sup>。起爆时,外界电能刺激激发管内的加热器,引起放热反应;液态CO<sub>2</sub>受热后迅速由液态转变为气态,形成CO<sub>2</sub>高压气团。已有的研究成果显示,液态CO<sub>2</sub>受热后,体积膨胀能够达到原来的600~

1 000 倍<sup>[11]</sup>,瞬时压力高达100~300 MPa;当管内气压超过定压片的临界强度时,剪切片受到破坏;气体溢出,经泄能端头扩散并作用于周围岩体上,高压气体膨胀做功,达到破碎岩石的目的。

## 2 CO<sub>2</sub>相变致裂器参数估算

采用的CO<sub>2</sub>相变致裂器各参数如表1所示。

表1 CO<sub>2</sub>致裂器参数

Tab. 1 Parameters of CO <sub>2</sub> cracker				
直径/ mm	长度/ m	CO <sub>2</sub> 填充质量/ kg	破裂压力/ MPa	主体管 容积/m <sup>3</sup>
186	2.9~3.1	30	300.0	36.4

### 2.1 破岩能量

与炸药爆炸不同,CO<sub>2</sub>爆炸是一个物理过程,但两者在岩石破坏做功过程方面有相似之处。CO<sub>2</sub>爆炸释放的能量,可以用炸药当量来表示。CO<sub>2</sub>物理爆炸产生的能量可以按式(1)计算<sup>[12]</sup>。

$$E_k = \frac{pV}{k-1} \left( 1 - \frac{0.1013^{\frac{k-1}{k}}}{p} \right) \times 10^3.$$

(1)

式中: $p$ 为CO<sub>2</sub>相变致裂管内的气体绝对压力,MPa; $k$ 为气体的绝热指数,取1.295; $V$ 为主体管的容积,m<sup>3</sup>; $E_k$ 是CO<sub>2</sub>气体爆炸能量,kJ。

CO<sub>2</sub>相变致裂器的TNT当量按下式计算:

$$W(TNT) = \frac{E_k}{Q(TNT)}.$$

(2)

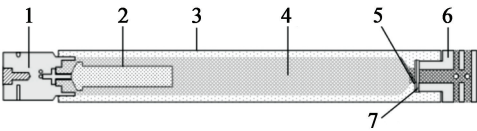
式中: $W(TNT)$ 为CO<sub>2</sub>相变致裂的近似TNT当量; $E_k$ 为CO<sub>2</sub>气体的爆炸能量,kJ; $Q(TNT)$ 为1 kg的TNT爆炸所产生的能量,为4 250 kJ/kg。

经计算,采用的CO<sub>2</sub>致裂器爆炸后释放的能量为36 944 kJ。单位质量的液态CO<sub>2</sub>释放的能量为1 231.47 kJ/kg,每千克液态CO<sub>2</sub>的TNT当量为0.29 kg。因此,该型号CO<sub>2</sub>相变致裂器的TNT当量为8.7 kg。

单位质量岩石乳化炸药的爆炸能量约为3 009 kJ/kg,则每千克液态CO<sub>2</sub>的乳化炸药当量为0.41 kg,即该型号CO<sub>2</sub>相变致裂器的乳化炸药当量为12.3 kg。

### 2.2 破岩压力

液态CO<sub>2</sub>被激发后迅速气化,体积骤增,在喷气头喷出。喷出的高压气体首先在炮孔壁和主体管之间的不耦合空间内流动,当触碰到炮孔壁后,强大的爆炸压力作用于炮孔壁,使岩石产生大量裂隙破坏。在不耦合致裂破岩情况下,炮孔壁上形成的初



1 - 充气端头;2 - 激发管;3 - 主管体;4 - 液态CO<sub>2</sub>;  
5 - 密封垫片;6 - 泄能端头;7 - 破裂片。

图1 CO<sub>2</sub>致裂器结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of CO<sub>2</sub> cracker

始爆炸压力为<sup>[13]</sup>

$$p_h = np_m \left( \frac{d_g}{d_0} \right)^6 \tag{3}$$

式中: $p_h$  为高压气体接触炮孔壁后产生的爆轰压力,MPa; $p_m$  为破碎片的破碎压力,MPa; $d_g$  为主体管直径, m; $d_0$  为炮孔直径, m; $n$  为爆轰压力提高倍数,一般取 10。经计算,得到 CO<sub>2</sub> 相变在炮孔壁上产生的爆炸压力约为 1.2 GPa。

炸药爆炸作用于炮孔壁的爆炸压力为<sup>[14]</sup>

$$p_H = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 \left( \frac{d_r}{d_0} \right)^6 n_0 \tag{4}$$

式中: $p_H$  为爆轰压力,Pa; $\rho_0$  为乳化炸药的密度,kg/m<sup>3</sup>;  $D$  为乳化炸药的爆速, m/s; $d_r$  为乳化炸药的直径, m。

以乳化炸药为例,设装药密度为 1 000 kg/m<sup>3</sup>,爆速为 3 500 m/s,则耦合装药时炮孔壁的爆炸压力为 15.3 GPa。

CO<sub>2</sub> 相变在炮孔壁上的破岩压力为乳化炸药耦合装药时爆炸压力的 7.8%。

2.3 气体生成量

CO<sub>2</sub> 相变是一个物理变化的过程,没有新物质的生成,仅是 CO<sub>2</sub> 由液态转变为气态,并伴随着急剧的体积膨胀。CO<sub>2</sub> 分子的摩尔质量  $M$  为 44 g/mol,则液态 CO<sub>2</sub> 的爆容

$$V(\text{CO}_2) = \frac{1\,000}{M} \times 22.4 \tag{5}$$

计算可以得到,液态 CO<sub>2</sub> 的爆容为 509 L/kg。

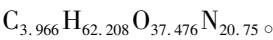
根据分子式及摩尔质量可计算出 1 kg 乳化炸药中各组分的物质的量,见表 2。

表 2 1 kg 乳化炸药中各组分含量

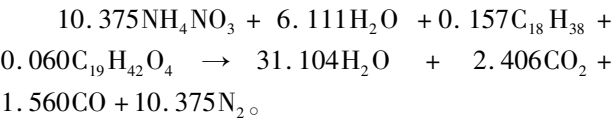
Tab.2 Content of each component in 1 kg emulsion explosive

组分	分子式	相对分子质量	质量/g	物质的量/mol
硝酸铵	NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	80	830	10.375
水	H <sub>2</sub> O	18	110	6.111
复合油相	C <sub>18</sub> H <sub>38</sub>	254	40	0.157
乳化剂	C <sub>19</sub> H <sub>42</sub> O <sub>4</sub>	334	20	0.060

由此可得出,1 kg 乳化炸药的试验式近似为:



采用 B-W 法则建立爆炸反应方程式:



由 Avogadro 定律求得乳化炸药的爆容

$$V_E = \frac{22.4n}{m} \tag{6}$$

式中: $m$  为乳化炸药质量,kg; $n$  为爆炸反应后产物中气体组分的总物质的量。

所以,根据爆炸反应方程式及式(6),计算乳化炸药爆容为

$$V_E = \frac{22.4 \times 45.445}{1} = 1\,017.968 \text{ (L/kg)} \tag{6}$$

对比液态 CO<sub>2</sub> 与乳化炸药的爆容可以发现,两种方式所产生的气体量并不相同,液态 CO<sub>2</sub> 的爆容为 509 L/kg,乳化炸药的爆容为 1 017.968 L/kg,单位质量下乳化炸药的气体生成量约为液态 CO<sub>2</sub> 气体生成量的 2 倍。同等当量下,两种方式的气体生成量相差较小,液态 CO<sub>2</sub> 气体生成量约为乳化炸药气体生成量的 1.2 倍。

2.4 CO<sub>2</sub> 相变致裂器破岩范围

区别于传统的破岩方法,液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术中,临界态 CO<sub>2</sub> 由液态转变为气态时,通过剧烈的体积膨胀形成强大推力,并在周围炮孔壁岩体中产生初始裂隙,在高压气体的作用下,初始裂隙逐渐延伸、扩张,达到破碎岩石的目的。因此,CO<sub>2</sub> 相变致裂不会出现明显的岩石粉碎区。在不同距离处的岩石爆压计算公式为<sup>[13]</sup>

$$\delta(\text{CO}_2) = n[p_m] \left[ \left( \frac{d_g}{d_0} \right)^6 \left( \frac{d_0}{2r} \right)^{2+\frac{\nu}{1-\nu}} \right] \tag{7}$$

式中: $\delta(\text{CO}_2)$  为 CO<sub>2</sub> 相变致裂在岩体中不同距离的爆压峰值,MPa; $\nu$  为岩石泊松比。

根据岩石破坏准则,当岩石受到的压应力达到抗压极限[即  $\delta = \delta(\text{CO}_2)$ ]时发生破坏。由此,可继续推导出破岩范围:

$$r = \left[ \frac{2np_m}{\delta} \left( \frac{d_g}{d_0} \right)^6 \right]^{\frac{1}{2+\frac{\nu}{1-\nu}}} d_0 \tag{8}$$

式中: $r$  为 CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩的半径范围; $\delta$  为岩石的抗压强度,取 29.67 MPa; $\nu$  为岩石泊松比,取 0.1。

由式(8)可得,破岩半径范围的理论值为  $r = 1.75 \text{ m}$ 。破岩范围约为炮孔孔径的 16.2 倍。

3 CO<sub>2</sub> 相变致裂数值模拟

为了验证理论计算 CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩范围的准确性,同时选取合适的孔网参数用于指导矿山生产实践,对破岩过程进行数值模拟分析。

作为新兴的液态爆破方法,CO<sub>2</sub> 相变致裂不完善的状态方程很难直接应用于 LS-DYNA 数值模拟软件研究。虽然前文已经得到了 CO<sub>2</sub> 相变致裂作



用于炮孔壁的爆轰压力,但爆炸反应是一个复杂的过程,破岩效果同时受到多种作用的影响,简单地在炮孔壁上施加爆轰压力并不能模拟 CO<sub>2</sub> 相变致裂效果。目前,常用的方法为运用同等当量下的 TNT 炸药模拟其破岩效果。董庆祥等<sup>[6]</sup>通过分析液态 CO<sub>2</sub>相变致裂原理,得到了 F57L 型致裂器的 TNT 当量约为 277 g;并利用 LS-DYNA 数值模拟软件模拟了 TNT 在混凝土模型中的爆破效果,对比 CO<sub>2</sub> 相变致裂混凝土试验,得到了很好的一致性,说明同等当量下 TNT 炸药模拟 CO<sub>2</sub> 相变致裂是一种有效的数值模拟方法。

3.1 数值模拟过程优化

虽然同等当量下 TNT 炸药能够很好地模拟 CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩效果,但由于两种破岩方法在爆轰压力上差距较大,模拟结果上仍存在少许差异。所以,保持爆轰压力的相近对于提高模拟准确性具有重要意义。为此,采用不耦合装药,通过调节不耦合系数,使得炮孔壁压力与 CO<sub>2</sub> 破岩压力相等,进而提高模拟结果的精确度。

岩体材料本身具有裂隙、节理构造与各向异性,为了更好地模拟致裂效果并减少计算过程,拟将岩石设置为各个方向岩石性质相同且均匀的材料,采用 \* Mat\_Plastic\_Kinematic 模型。此模型在达到抗压强度时仍不会失效,能够直接测得作用于炮孔壁上的压力。空气使用 \* Mat\_Null 材料模型,建立 \* Eos\_Linear\_Polynomial 状态方程。炸药使用 \* Mat\_High\_Explosive\_Burn 材料模型,建立 \* Eos\_JWL 状态方程。此外,额外添加适合炸药爆炸的 ALE 控制 \* Control\_ALE。

通过炸药当量换算,12.3 kg 乳化炸药长 3 m 时装药直径为 7.2 cm。首先,建立 4.00 m × 4.00 m × 0.01 m 的模型,炮孔位于模型中部,装药直径 7.2 cm。然后,建立 4.00 m × 4.00 m × 0.01 m 的空气模型作为空气炸药耦合域。分别建立不同炮孔孔径

的模型,研究乳化炸药的爆轰压力与不耦合系数的关系。模型如图 2(a) 所示;反应过程如图 2(b) 所示。

在装药直径为 7.2 cm 的前提下,分别模拟了孔径为 31.0、26.0、24.0、22.0、19.0、13.0、8.0 cm 的爆破方式。并于炮孔壁均匀选取 8 个点,分别标记为 A、B、C、D、E、F、G、H,记录压力平均值。炮孔壁压力曲线如图 3 所示。

孔径与爆轰压力、不耦合系数与爆轰压力的拟合曲线如图 4 所示。

测试结果如表 3 所示。

通过拟合曲线得到孔径与爆轰压力的拟合方程式为:

$$p = 4\,438.5e^{-0.093d} \tag{9}$$

式中:  $p$  为爆轰压力,MPa;  $d$  为孔径,cm。

由孔径与爆轰压力的拟合方程式可得,当装药直径为 7.2 cm 的乳化炸药爆轰压力为 1 200.0 MPa 时,孔径为 13.98 cm,不耦合系数 1.94。此时,乳化炸药在炮孔壁上形成的爆轰压力与液态 CO<sub>2</sub> 相变在炮孔壁上形成的爆轰压力相同。

3.2 CO<sub>2</sub> 相变致裂裂隙扩展数值模拟

岩石采用 \* Mat\_Johnson\_Holmquist\_Concrete 材料模型。此模型能够很好地描述爆炸反应过程中高应变率、大应变的非线性变形及断裂特征。岩石材料参数见表 4。同时,添加 \* Mat\_Add\_Erosion 关键字,定义最大拉应力与剪应变,通过删除失效单元能够直观看出裂纹扩展的过程与效果。

根据 CO<sub>2</sub> 相变致裂裂隙圈半径分析进行孔距为 3.0、3.5、4.0 m 的双孔模型数值模拟,尺寸为 8.00 m × 8.00 m × 0.01 m 的三维平面,装药直径 7.2 cm,孔径 13.98 cm,模型正、反面设置为对称边界条件,侧面设置为无反射边界条件,用来模拟无限域中的致裂效果,双孔模型如图 2(c) 所示。图 2(c) 中未显示炸药存在区域,通过体积分数法在 k 文件

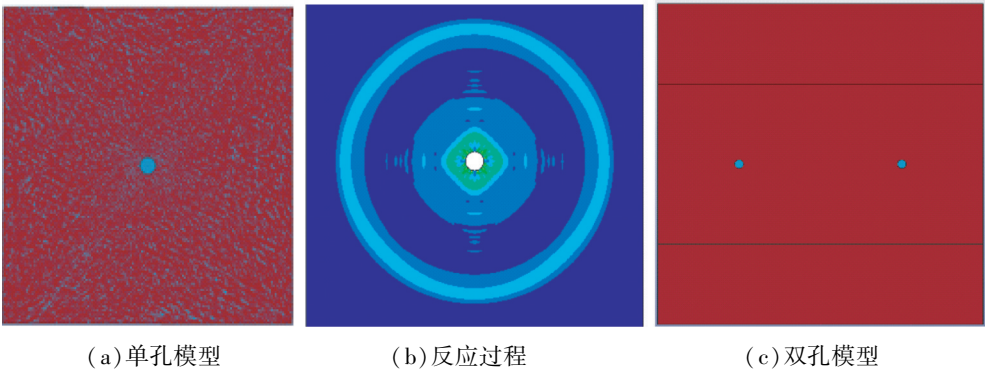


图2 空气模型  
Fig.2 Air models

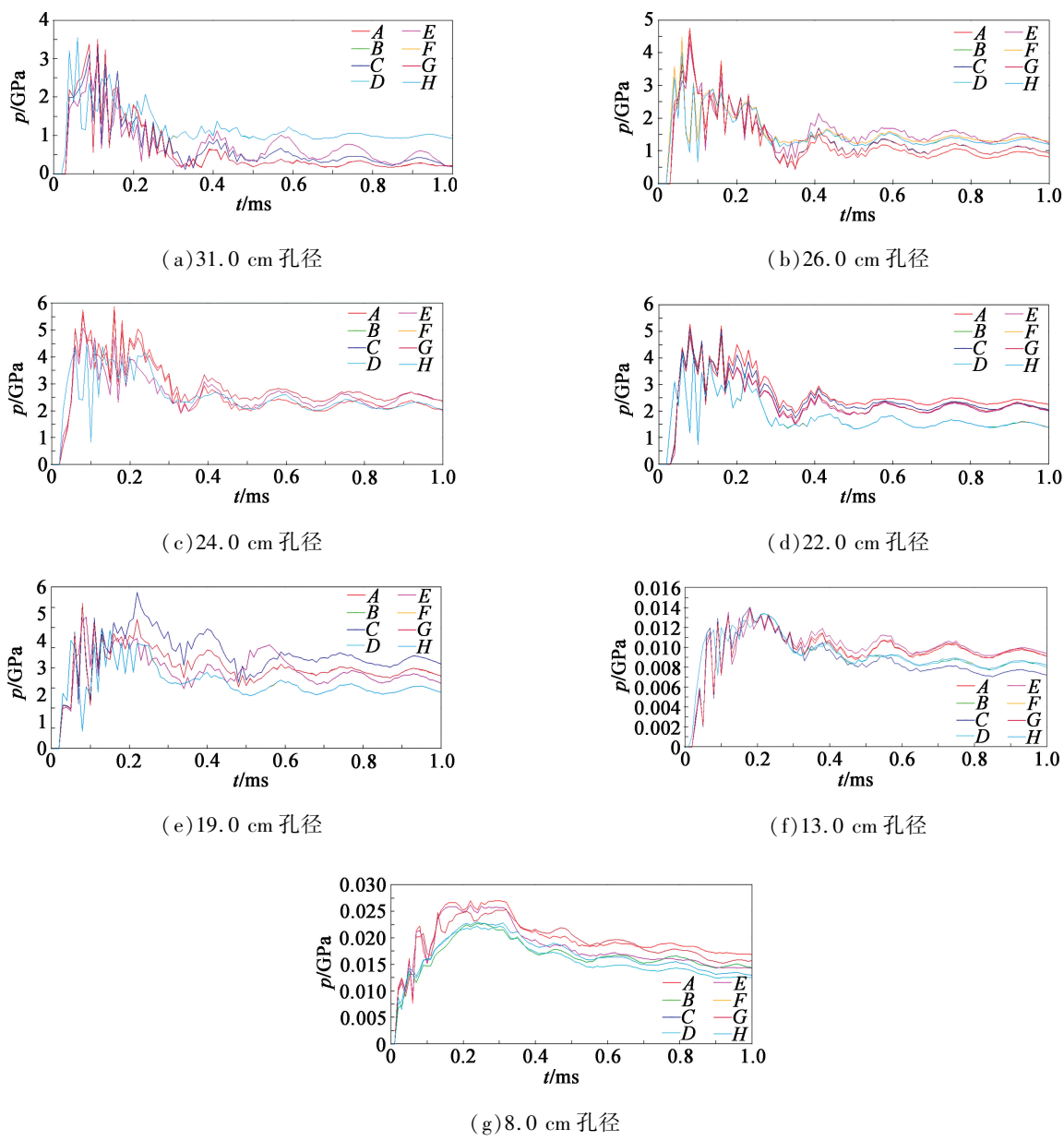


图 3 爆轰压力曲线

Fig. 3 Detonation pressure curves

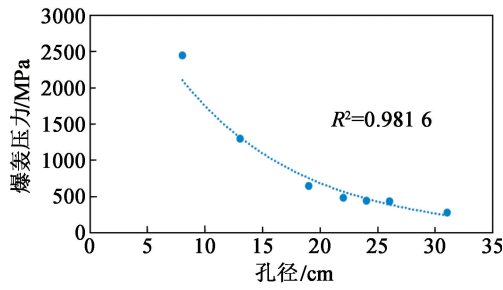


图 4 爆轰压力-孔径拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of detonation pressure-aperture

表 3 孔径、不耦合系数、爆轰压力的关系

Tab. 3 Relationship among aperture, decoupling coefficient and detonation pressure

孔径/cm	不耦合系数	平均爆轰压力/MPa
31.0	4.32	286.6
26.0	3.60	436.4
24.0	3.32	445.5
22.0	3.08	487.0
19.0	2.70	654.5
13.0	1.80	1 300.0
8.0	1.16	2 452.0

不同孔距时的致裂效果模拟如图 5 所示。

由图 5 可知:相邻炮孔孔距为 3.0 m 时,孔间产

中添加 \* Initial\_Volume\_Fraction\_Geometry 关键字,用来在空气域中定义炸药的存在区域,此方式能够有效减少建模及网格划分时间。

生破碎区范围较大,岩石破碎明显;当相邻炮孔孔距为 3.5 m 时,爆炸产生的裂隙能够有效联通,孔间岩石碎度良好,孔距合适;当相邻炮孔孔距为 4.0 m 时,仅在孔间连线上的少量裂隙贯通,爆破效果差,孔距过大。故矿炮孔孔距选取 3.0 ~ 3.5 m 较为合适,此数值模拟结果与 CO<sub>2</sub> 相变致裂器破岩范围计算结果较为一致。

4 工程应用

河北某矿业有限公司露天矿山,露天境界南北长 3.0 km,东西宽 1.5 km。传统的爆破方式产生的振动有害效应长期困扰矿区附近民房。为此,在边坡附近采用 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术进行开采试验。

选取孔距 3.5 m、排距 3.0 m、孔深 4.0 m,每个炮孔装填 1 根 CO<sub>2</sub> 致裂器,上部填塞 1.0 m。使用激

发管加热系统与同时起爆技术,共在采场东帮 3 处不同地点进行了试验。炮孔布置如图 6(a) 所示;致裂效果如图 6(b) 所示。

现场试验取得良好效果,岩石碎度合适,孔网参数较为合理。

5 结论

- 1) 依据 CO<sub>2</sub> 致裂器破裂片的破碎压力、装液量及储液管的容积等数据,通过计算 CO<sub>2</sub> 的物理爆炸能量,得出所选取的 CO<sub>2</sub> 相变致裂器的爆炸 TNT 当量为 8.7 kg,乳化炸药当量为 12.3 kg。
- 2) 经计算得到:CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩在炮孔壁上产生的爆轰压力约为 1.2 GPa;乳化炸药耦合装药时孔壁爆轰压力为 15.3 GPa;两种破岩方式产生的爆轰压力相差较大。

表 4 岩石材料参数  
Tab. 4 Material parameters of rock

$G/\text{GPa}$	$A$	$B$	$C$	$N$	$f_c/\text{MPa}$	$T/\text{MPa}$	$E_{t,\min}$	$S_{t,\min}$
13.2	0.35	1.6	0.007	0.61	29.67	3	0.01	7
$p_c/\text{GPa}$	$u_c/\text{GPa}$	$p_l/\text{GPa}$	$u_l$	$D_1$	$D_2$	$K_1/\text{GPa}$	$K_2/\text{GPa}$	$K_3/\text{GPa}$
0.010 8	0.071 8	1.05	0.1	0.04	1	17.4	38.8	29.8

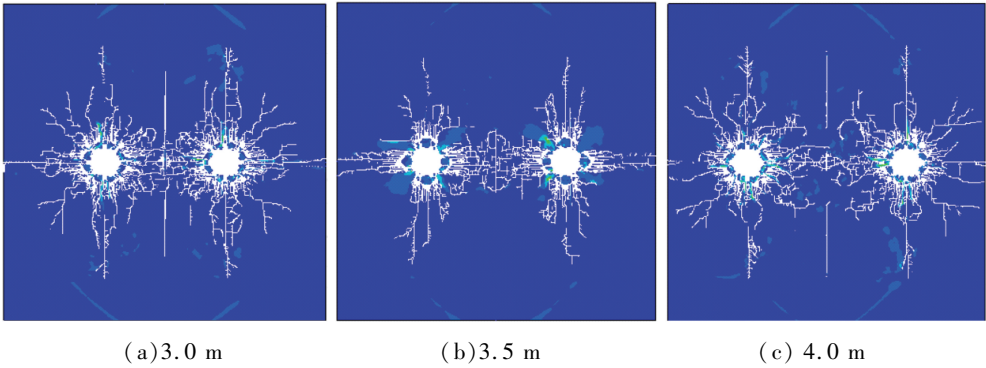
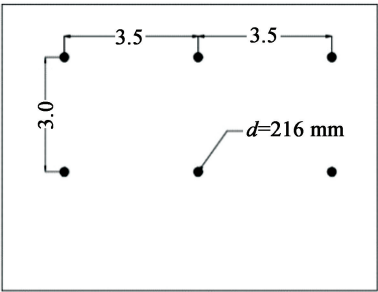


图 5 不同孔距时的致裂效果  
Fig. 5 Cracking outcomes simulation of different hole spacing



(a) 爆破方案(单位:m) (b) 致裂效果

图 6 开采试验  
Fig. 6 Mining test

3) 在标准状态下,单位液态  $\text{CO}_2$  的爆容为 509 L/kg,单位乳化炸药爆容为 1 017.968 L/kg,爆容比约为 1 : 2。

4) 通过计算,获得了  $\text{CO}_2$  相变致裂岩石的破坏范围,破岩半径为 1.75 m,约为炮孔孔径的 16.2 倍。

5) 通过数值模拟,确定孔网参数为 3.5 m × 3.0 m。现场试验后破碎效果较好。

## 参 考 文 献

- [1] 王燕,孙伟博,张丁丁. 二氧化碳相变致裂软岩实验研究[J]. 爆破器材,2020,49(2): 46-51.  
WANG Y, SUN W B, ZHANG D D. Experimental study on fracture of soft rock fracturing by phase change of carbon dioxide[J]. Explosive Materials, 2020, 49(2): 46-51.
- [2] 题正义,陈波. 亭南煤矿  $\text{CO}_2$  致裂巷道卸压技术的应用研究[J]. 金属矿山,2019(4): 48-52.  
TI Z Y, CHEN B. Application of pressure relief technology of liquid  $\text{CO}_2$  fracturing roadway in Tingnan Coal Mine [J]. Metal Mine, 2019(4): 48-52.
- [3] 章文义. 对二氧化碳气体爆破的管理对策研究[J]. 工程爆破,2018,24(3): 77-79,90.  
ZHANG W Y. Reseach on the management countermeasures of carbon dioxide gas blasting [J]. Engineering Blasting, 2018,24(3): 77-79,90.
- [4] 夏军,陶良云,李必红,等. 二氧化碳液-气相变膨胀破岩技术及应用[J]. 工程爆破,2018,24(3): 50-54.  
XIA J, TAO L Y, LI B H, et al. Technology and application of the rock breaking by  $\text{CO}_2$  liquid-gas phase transition and expansion[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(3): 50-54.
- [5] 周科平,柯波,李杰林,等. 液态  $\text{CO}_2$  爆破系统压力动态响应及爆炸能量分析[J]. 爆破,2017,34(3): 7-13.  
ZHOU K P, KE B, LI J L, et al. Pressure dynamic response and explosion energy of liquid carbon dioxide blasting system[J]. Blasting, 2017, 34(3): 7-13.
- [6] 董庆祥,王兆丰,韩亚北,等. 液态  $\text{CO}_2$  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 Q X, WANG Z F, HAN Y B, et al. Research on TNT equivalent of liquid  $\text{CO}_2$  phase-transition fracturing [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(11): 84-88.
- [7] 刘光辉,王海亮,吴钦鑫. 竖井爆破振动及  $\text{CO}_2$  致裂振
- 动信号的小波包分析[J]. 煤矿安全,2018,49(9): 233-237.
- LIU G H, WANG H L, WU Q X. Shaft blasting vibration and  $\text{CO}_2$  fracturing vibration signals by wavelet packet analysis[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(9): 233-237.
- [8] CHEN H D, WANG Z F, CHEN X E, et al. Increasing permeability of coal seams using the phase energy of liquid carbon dioxide [J]. Journal of  $\text{CO}_2$  Utilization, 2017,19: 112-119.
- [9] LU T K, WANG Z F, YANG H M, et al. Improvement of coal seam gas drainage by under-panel cross-strata stimulation using highly pressurized gas [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 77: 300-312.
- [10] 梅比,高星,方莹,等. 二氧化碳膨胀爆破新型致裂管与安全技术研究[J]. 爆破,2021,38(2): 153-159.  
MEI B, GAO X, FANG Y, et al. Study on a new type of fracturing tube and safety technology of carbon dioxide expansion blasting[J]. Blasting, 2021, 38(2): 153-159.
- [11] 夏祥,李海波,王晓炜,等. 核电工程中的  $\text{CO}_2$  致裂与炸药爆破地表振动传播规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(7): 1350-1356.  
XIA X, LI H B, WANG X W, et al. Comparison analysis of ground vibrations induced by  $\text{CO}_2$  gas fracturing and explosive blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(7): 1350-1356.
- [12] 李文伟,狄刚,王瑞欣. 船运液态二氧化碳储罐爆炸事故的原因分析[J]. 安全与环境工程,2010,17(1): 95-98.  
LI W W, DI G, WANG R X. Analysis of a liquid  $\text{CO}_2$  tank explosion on a ship[J]. Safety and Environmental Engineering,2010,17(1): 95-98.
- [13] 李必红,夏军,陈丁丁.  $\text{CO}_2$  液-气相变膨胀破岩机理及其安全效应测试研究[J]. 采矿技术,2017,17(1): 61-63,68.  
LI B H, XIA J, CHEN D D. Research on rock breaking mechanism and safety effect of  $\text{CO}_2$  liquid gas phase change expansion [J]. Mining Technology, 2017, 17(1): 61-63,68.
- [14] 王莉,陈杰,李必红. 复杂环境下  $\text{CO}_2$  膨胀爆破工程应用[J]. 工程爆破,2021,27(1): 95-99.  
WANG L, CHEN J, LI B H. Application of  $\text{CO}_2$  expansion blasting project in complex environment [J]. Engineering Blasting,2021,27(1): 95-99.