

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.06.007

CO₂ 相变致裂岩石的损伤范围的计算及影响因素研究*

阿比尔的^{①②} 胡尊榕^{①②} 傅林^{①②} 韩亚峰^{①②} 刘明维^{①②}

①重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心(重庆,400074)

②重庆交通大学山区公路水运交通地质减灾重庆市教委重点实验室(重庆,400074)

[摘要] 在CO₂相变致裂岩石技术中,为探究岩石损伤范围与CO₂相变致裂参数的关系,根据Mises准则和损伤力学理论建立了CO₂相变冲击岩石的致裂损伤半径计算公式。利用3DEC软件模拟了不同泄能片厚度下岩石的致裂损伤半径,并与理论计算相比较,验证了所建模型的准确性。分析了泄能片厚度、岩石强度、致裂孔孔径、CO₂充装质量等因素对岩石损伤的影响规律。结果表明:岩石的致裂损伤半径与泄能片厚度、CO₂充装质量呈对数增长关系,与岩石强度、致裂孔孔径呈指数衰减关系;增加泄能片厚度是增大岩石致裂损伤半径的最有效手段;致裂孔孔径的增大会使岩石的损伤范围迅速减小。可为CO₂相变致裂岩石的损伤机制、技术参数选取等提供参考。

[关键词] 液态CO₂;相变致裂;损伤半径;泄能片厚度;CO₂充装质量

[分类号] TD235

Damage Range Calculation and Influencing Factors of Rock Fractures Caused by CO₂ Phase Transition Blasting

ABI Erdi^{①②}, HU Zunrong^{①②}, FU Lin^{①②}, HAN Yafeng^{①②}, LIU Mingwei^{①②}

① National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing Jiaotong University (Chongqing, 400074)

② Key Laboratory of Geological Hazards Mitigation for Mountainous Highway and Waterway, Chongqing Municipal Education Commission, Chongqing Jiaotong University (Chongqing, 400074)

[ABSTRACT] In the technology of rock fractures caused by CO₂ phase transition, in order to study the relationship between the damage range of rocks and the CO₂ phase transition fracturing parameters, a calculation formula for the damage radius of rock fractures caused by CO₂ phase transition impact was established based on Mises criterion and damage mechanics theory. The damage radius of rocks with different thicknesses of energy release sheet was simulated using 3DEC software, and compared with theoretical calculations to verify the accuracy of the established model. The influence of factors such as thickness of the energy release sheet, rock strength, diameter of borehole, and CO₂ filling mass on rock damage was analyzed. The results show that the damage radius has a logarithmic growth relationship with the thickness of the energy release sheet and CO₂ filling mass, and an exponential decay relationship with the rock strength and the diameter of borehole. Increasing the thickness of the energy release sheet is the most effective way to increase the damage radius. The increase in the diameter of the borehole will rapidly reduce the damage range of rock. It can provide references for the damage mechanism and technical parameter selection in CO₂ phase transition blasting.

[KEYWORDS] liquid CO₂; phase transition blasting; damage radius; thickness of energy release sheet; CO₂ filling mass

* 收稿日期:2024-03-18

基金项目:国家自然科学基金青年基金(41907261);重庆交通大学研究生科研创新项目(2022S0023);重庆市水利科技项目(CQSLK-2022015)

第一作者:阿比尔的(1988—),男,博士,副教授,主要从事岩石冲击损伤力学等领域的教学与科研工作。E-mail:abierdi@163.com

通信作者:傅林(1998—),男,硕士研究生,主要从事岩石冲击损伤力学等领域的研究工作。E-mail:cjfulin@163.com

0 引言

作为一种经济、便捷、高效的破岩方法,爆破技术一直都是煤炭、矿山资源开采的重要手段。传统的炸药爆破在高效破岩的同时也会带来巨大灰尘,产生有毒气体、高振动冲击波等危害居民和作业人员安全的问题。因此,一些非炸药的绿色爆破技术相继出现。其中,利用超临界 CO₂ 与气态 CO₂ 之间的压力差作为破岩动力的 CO₂ 相变致裂岩石技术,具有吸热、无火花、产生的冲击振动较小、产物为无害阻燃的 CO₂ 气体等优点,在众多复杂情况的岩体破碎开挖中得以广泛应用^[1-3]。

CO₂ 相变致裂岩石的原理主要包括 2 个方面^[4-6]。一方面是应力波对岩石的冲击作用。这是一个高温、高压、高速的瞬态过程,会在较短的时间内对岩石产生损伤破坏。也正是由于破坏的时间极为短暂,加之岩体本身的不均匀性和复杂性,使得对岩石的破碎机理的研究非常困难。另一方面是高压 CO₂ 气体的气楔作用。岩石在冲击应力波作用下会产生破碎及裂纹扩展,随后的高压 CO₂ 气体会贯入初始裂纹,并进一步促使裂纹扩展。一些学者利用液态 CO₂ 与炸药等当量代换的方式,采用数值仿真来研究破岩机理,将液态 CO₂ 相变等当量换算为乳化炸药^[7-8]。陈少波等^[9]使用 CO₂ 爆破产生的应力波加载时程曲线,在 LS-DYNA 软件中模拟 CO₂ 膨胀致裂岩石的过程;Zhang 等^[10]分析岩石各阶段的破坏规律,建立了煤层压裂压力和压裂影响范围的数学模型。还有一些学者利用实验对 CO₂ 相变致裂参数进行了研究,通过对比爆破应力波的传播和衰减规律,分析了液态 CO₂ 爆炸中裂纹的扩展范围、爆炸压力、释放孔的数量和半径对液态 CO₂ 爆破效果的影响^[11-13]。研究认为,CO₂ 的充装质量和剪切片强度是决定破岩效果的 2 个主要因素。CO₂ 的充装质量越大,裂纹发育越多,岩块破碎程度就越高。

综上所述,关于 CO₂ 相变致裂岩石的损伤范围,当前常以等当量炸药代替的方式进行分析,但二者振动差异较大,且容易受到所选炸药参数的影响。而直接研究 CO₂ 相变致裂岩石的损伤范围的文献较少。

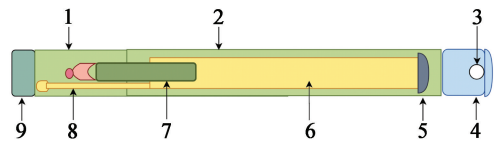
本文中,通过理论分析建立了 CO₂ 相变致裂岩石的损伤范围的计算公式,运用 3DEC 离散元程序模拟了不同泄能片厚度下岩石的损伤范围,分析了

CO₂ 相变冲击波下岩石损伤的演化规律,讨论了岩石损伤范围的影响因素。可为 CO₂ 相变致裂岩石施工的参数选取等提供参考。

1 CO₂ 相变致裂岩石损伤的计算模型

1.1 致裂系统介绍

在 CO₂ 相变致裂岩石技术中,泄能片的厚度、CO₂ 的充装质量等致裂系统的结构差异,均会产生不同的冲击压力,进而影响致裂岩石的效果。CO₂ 相变致裂系统由发热管、储液管、泄能片、释放管以及泄放孔等部分组成,主要结构如图 1 所示。



1 - 启动器;2 - 储液管;3 - 泄放孔;4 - 释放管;5 - 泄能片;6 - 液态 CO₂;7 - 发热管;8 - 充装阀;9 - 导向管。

图 1 CO₂ 相变致裂管的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of CO₂ cracking tube

在工程运用中,通过充装阀充填液态 CO₂,通过发热管内的加热装置提供液态 CO₂ 相变所需的能量,使得液态 CO₂ 在短时间内迅速汽化,相变压力在 10 ~ 50 ms 内达到峰值;当储液管内的压力达到泄能片的最大临界压力时,高压气态 CO₂ 会冲破泄能片,从泄放孔向外释放,迅速作用于周边的岩石,从而导致岩石破坏。

1.2 CO₂ 相变致裂岩石的冲击压力计算

CO₂ 相变致裂岩石时,液态 CO₂ 在发热管的作用下,快速转化为高压 CO₂ 气体,高压脉冲气体冲破泄能片,进入岩石致裂孔,并压缩孔内空气,然后与孔壁岩石发生碰撞,并在岩石中形成冲击波。针对正拱普通型致裂管,剪切破坏公式可较好地反映致裂管的爆破峰值压力^[14-15]。致裂管的爆破压力

$$p_k = \frac{2\sigma_s \delta}{R} \quad (1)$$

式中: R 为泄放孔半径; σ_s 为致裂管泄能片的剪切强度,取 0.6 ~ 0.8 倍的屈服强度; δ 为泄能片厚度。

选取实际工程中常用的 51 型、85 型以及 100 型致裂管,参数如表 1 所示。通过式(1)可以计算得到不同型号的致裂管的爆破压力 p_k 。

致裂管的爆破压力传递至致裂孔表面,与孔壁岩石发生碰撞,产生放大效应,并在岩石中形成冲击波。CO₂ 致裂管多数为不耦合装药,高压气体碰撞

表1 致裂管参数

Tab. 1 Parameters of the fracturing tube

致裂管型号	泄放孔半径/mm	CO ₂ 充装质量/kg	致裂管外径/mm	致裂孔直径/mm
51	11.3	0.9	51.0	55.0
85	17.0	1.4	83.0	90.0
100	21.0	3.5	95.0	100.0

孔壁激起的岩石冲击波初始压力

$$p_R = p_k \left(\frac{d_g}{d_0} \right)^6 n_0 \quad (2)$$

式中: n 为CO₂高压气体和孔壁发生碰撞后的压力放大倍数,受入射空气冲击波的压力影响,取 $n=8$; d_g 为致裂管的外径; d_0 为致裂孔的直径。

致裂冲击波在岩石中传播时不断衰减,最后变成应力波。岩石中任一点引起的径向应力和切向应力可表示为^[15]

$$\sigma_r = p_R \left(\frac{r_b}{r} \right)^\alpha; \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = -b\sigma_r. \quad (4)$$

式中: σ_r 、 σ_θ 分别为岩石中的径向应力和切向应力; r_b 为致裂孔半径; r 为岩石距致裂孔中心的距离; α 为载荷传播衰减指数, $\alpha=2 \pm \mu_d/(1-\mu_d)$,正、负号分别对应冲击波和应力波区; μ_d 为岩石的动态泊松比, $\mu_d=0.8\mu$, μ 是岩石的静态泊松比; b 为侧向应力系数, $b=\mu_d/(1-\mu_d)$ 。

利用式(3),可得到在致裂孔孔壁处的峰值应力。CO₂致裂管在致裂孔孔壁处的峰值应力随泄能片厚度变化的曲线如图2所示。在岩石距致裂孔中心的距离 $r=0.1$ m处测得的峰值应力随CO₂充装质量变化的曲线如图3所示。

从图2可知,对于同一型号的致裂管,致裂孔孔壁处的峰值应力随着泄能片厚度的增加呈直线上升

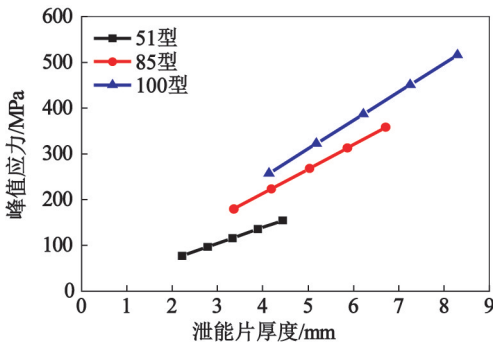
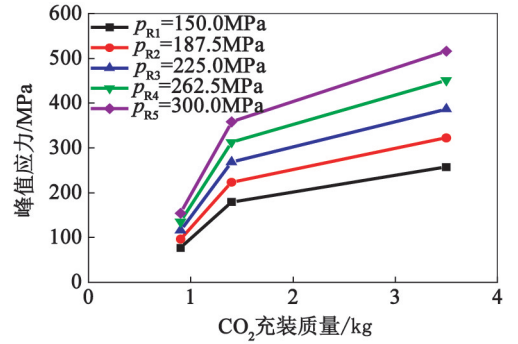


图2 致裂孔孔壁处的峰值应力随泄能片厚度的变化

Fig. 2 Variation curves of peak stress at the wall of the blast hole with thickness of energy release sheet

图3 $r=0.1$ m时的峰值应力随CO₂充装质量的变化Fig. 3 Variation curves of peak stress at $r=0.1$ m with CO₂ filling mass

趋势。对于不同型号的致裂管,在同一泄能片厚度情况下,爆破压力随着致裂管外径变大而逐渐增大。

图3为在不同初始压力的条件下,3种型号的致裂管中分别充填0.9、1.4 kg和3.5 kg的液态CO₂时,相变致裂岩石所得到的峰值压力。图3中,在初始压力一定的条件下,离致裂孔中心0.1 m处,岩石受到的峰值应力随致裂管中CO₂充装质量的增加呈上升趋势。CO₂充装质量从0.9 kg增加到1.4 kg时,峰值应力上升较为明显;而CO₂充装质量从1.4 kg增加到3.5 kg时的峰值应力增加较为缓慢。

1.3 CO₂相变致裂岩石的损伤半径

液态CO₂相变致裂岩石过程中,原始岩石将以致裂孔为中心,依次形成压碎区、裂隙区和振动区^[12]。大量实验证明,压碎区和裂隙区形成了岩石损伤的有效范围。

岩石中任一点的应力强度可表示为

$$\sigma_i = \frac{\sigma_r}{\sqrt{2}} \left[(1+b)^2 - 2\mu_d(1-b)^2(1-\mu_d) + (1+b^2) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

由于该爆破所产生的爆炸载荷在内部是沿轴向均匀分布的^[16],为简化计算,可以将该问题视为平面应变问题,令

$$B = \left[(1+b)^2 - 2\mu_d(1-b)^2(1-\mu_d) + (1+b^2) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

根据Mises准则,对岩石的破坏可以表示为

$$\sigma_i \geq \sigma_0; \quad (7)$$

$$\sigma_0 = \begin{cases} \sigma_{cd} (\text{压碎区}); \\ \sigma_{td} (\text{裂隙区}). \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ_0 为岩石的单轴受力条件下的破坏强度; σ_{cd} 为岩石的单轴动态抗压强度; σ_{td} 为岩石的单轴动态抗拉强度。

CO₂ 爆破后,若岩石中的应力超过 σ_{cd} ,则将在岩石致裂孔壁周围形成压碎区,利用式(1)、式(2)、式(5)~式(7),可得到压碎区半径

$$R_s = \left(\frac{Bp_R}{\sqrt{2}\sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b \quad (9)$$

在压碎区之外,岩石中的应力小于 σ_{cd} ,压碎区范围不扩展,但岩石受拉应力作用产生张拉裂隙,形成裂隙区。根据式(5)~式(7),可得在压碎区与裂隙区分界面上径向应力为

$$\sigma_R = \sigma_r |_{r=R_s} = \frac{\sqrt{2}\sigma_{cd}}{B} \quad (10)$$

在压碎区之外,载荷以应力波的形式继续向外传播,衰减指数为

$$\beta = 2 - \frac{\mu_d}{1 - \mu_d} \quad (11)$$

于是,整理式(5)~式(7)及式(10),可得到岩石中裂隙区半径为

$$R_l = \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{ld}} \right)^{\frac{1}{\beta}} R_s \quad (12)$$

由式(2)、式(9)、式(12)可得,非耦合情况下,当非耦合系数较小时,CO₂ 相变致裂岩石的损伤半径为

$$R = \left[\frac{Bnp_k}{\sqrt{2}\sigma_{cd}} \left(\frac{d_g}{d_0} \right)^6 \right]^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{ld}} \right)^{\frac{1}{\beta}} r_b \quad (13)$$

2 CO₂ 相变致裂岩石损伤的模型验证

2.1 模型建立

采用 3DEC 离散元程序对 CO₂ 相变致裂过程进行模拟,将致裂作用简化为 CO₂ 相变产生的冲击压力直接作用在岩壁上。考虑实际有效范围,确定模型及模型的边界条件如图 4 所示。模型长 4 m、宽 4 m、高 0.3 m,中部致裂孔半径为 0.1 m。

在结构面间距发生变化的条件下,需对块体进行网格化,从而满足频率和波长控制的网格尺寸限制。为了精确地描述冲击应力波的传播过程,通常网格单元的尺寸 Δl 应不大于最高频率波长的 1/8 ~ 1/10。给定单元网格尺寸所允许的输入波最高频率

$$f_{\max} = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{10\Delta l} \quad (14)$$

式中: λ 为最高频率所对应的波长; Δl 为网格单元的最大长度,取 2 cm; c 为波在岩石中的传播速度,取纵波速度和横波速度中的较小者。

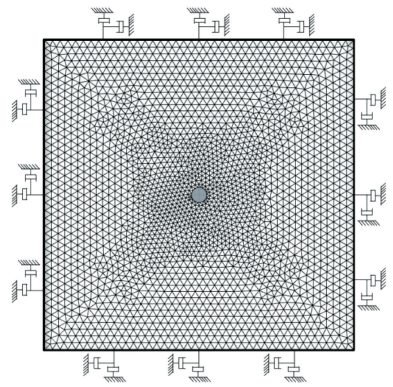


图 4 计算模型及边界条件

Fig. 4 Computational model and its boundary conditions

对模型采用犀牛软件划分块体,大多数块体划分尺寸范围为 0.5 ~ 1.5 cm,整个模型共有 12 569 个节点和 58 380 个块体。为了减少动载荷作用下边界反射波的影响,采用黏性边界。

数值模拟中,岩石介质采用理想线弹性模型,节理采用库伦滑移模型。对岩石节理的法向刚度 k_n 和剪切刚度 k_s 进行估算^[17-18]:

$$k_n = k_s = 10 \max \left(\frac{K + 4G/3}{\Delta z_{\min}} \right) \quad (15)$$

式中: K 为体积模量; G 为剪切模量; Δz_{\min} 为接触面法向方向上连接区域的最小尺寸。

考虑到冲击载荷的动态硬化效应,岩石的动弹性模量取静态模量的 1.2 倍,其余参数与静态参数相同,岩石的力学特性参数见表 2~表 3。

表 2 凝灰岩的力学特性参数

Tab. 2 Mechanical properties parameters of tuff

密度/ (kg · m ⁻³)	体积 模量/ GPa	剪切 模量/ GPa	泊 松 比	黏结 力/ MPa	张拉 强度/ MPa	摩擦 角/ (°)	抗压 强度/ MPa
2 640	25	16.5	0.23	7.8	5.5	56.3	107.5

表 3 节理的力学特性参数

Tab. 3 Mechanical properties parameters of joints

法向刚度/ GPa	切向刚度/ GPa	黏结力/ MPa	摩擦角/ (°)	张拉强度/ MPa
9 390	9 390	7.8	56.3	5.5

2.2 CO₂ 相变冲击载荷

结合文献[19]的相关研究,CO₂ 压力曲线接近于高斯曲线,压力从 0 到峰值、再降为 0 的时间变化范围约为 30 ms。故 CO₂ 相变致裂岩石过程中,高压气体对孔壁内侧的初始冲击压力 p_R 的时间衰减函数为

$$p(t) = p_R a e^{-\frac{[b(t-t_m)]^2}{2}} \quad (16)$$

式中: a 、 b 为致裂衰减系数,与泄能片厚度有关; t_m 为峰值载荷出现的时间。

CO₂相变致裂压力从剧增点到峰值的持续时间约为10~15 ms。取增压持续时间 t_m 为15 ms。

2.3 数值模型验证

2.3.1 CO₂相变致裂岩石应力场对比

选用特征最为明显的85型致裂管,在泄能片厚度为4.19 mm的情况下进行CO₂相变冲击载荷作用于岩石的损伤数值模拟。在模型中部距边界1.9、1.8、1.4、1.1、0.8、0.5、0.2 m和0 m位置处布置测点,岩石中部不同测点处的水平应力随时间的变化如图5所示。根据不同位置与时间上水平应力的分布特征,可以看出:CO₂相变产生的冲击压力直接作用于致裂孔孔壁岩石上,孔壁周围岩石所受水平峰值应力最大;随着致裂时间的增加,岩石所受水平应力呈先增加、后衰减的趋势。相变产生的冲击波不断向远处传播,由于岩石的阻尼作用导致冲击波能量消耗变为应力波,在岩石中产生的应力逐渐减弱。距离致裂孔越远,岩石所受的峰值应力越小;同时,升压时间也不断滞后。

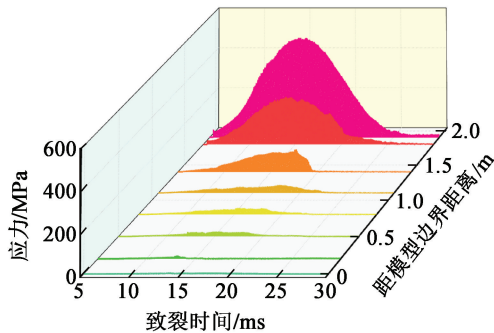


图5 不同测点处CO₂相变致裂岩石的水平应力变化
Fig. 5 Variation of horizontal stress at different measurement points in CO₂ phase transition fracturing rocks

利用式(2)、式(3)得到与数值模拟测点相同位置处的理论峰值应力,与数值模拟得到的结果进行比较。如图6所示,理论峰值应力曲线和数值计算结果较为接近,近域(0.1 m)处的计算误差为10%,远域(2.0 m)处的计算误差为21%。该模型可以较好地模拟CO₂相变冲击应力场的衰减规律。

2.3.2 CO₂相变致裂岩石的损伤半径对比

泄能片厚度 δ 分别为3.36、4.19、5.03、5.87 mm和6.71 mm时,进行85型致裂管致裂岩石的损伤半径的数值计算,获得不同泄能片厚度下岩石损伤范围的模拟结果,如图7所示。

由图7可知,不同泄能片厚度下的致裂损伤半径分别约为0.53、0.59、0.71、0.79 m和0.86 m。

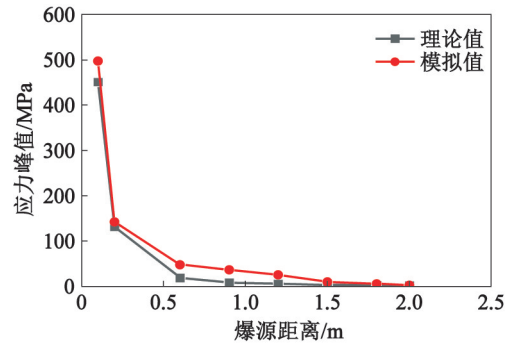


图6 数值模拟与理论结果比较

Fig. 6 Comparison of numerical simulation and theoretical results

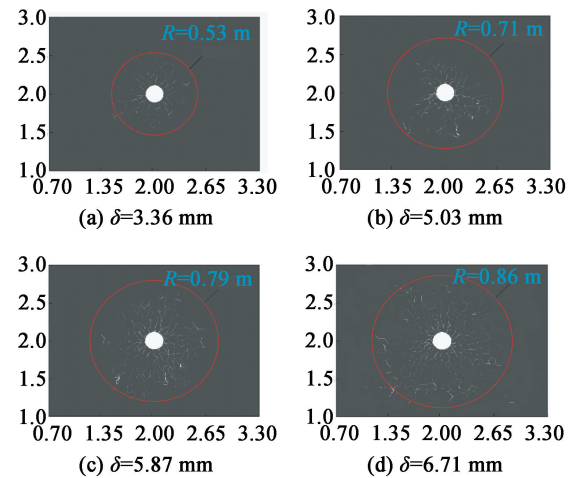


图7 不同泄能片厚度下岩石的损伤范围

Fig. 7 Damage range of rocks with different thickness of energy release sheet

可见,泄能片厚度越大,产生的冲击压力越大,岩石致裂损伤半径也逐渐增大。同理,由式(13)获得理论致裂损伤半径分别为0.59、0.66、0.71、0.76 m和0.81 m。将两者进行比较,可以得到图8。

由图8可以看出,随着泄能片厚度的增加,致裂

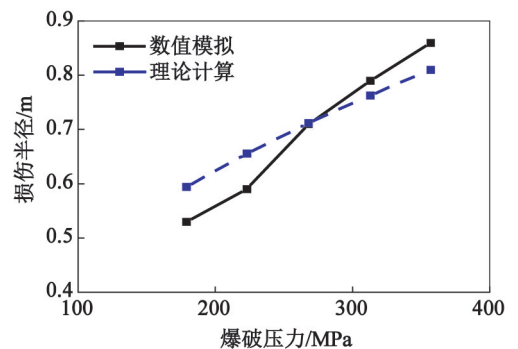


图8 不同泄能片厚度下岩石的损伤半径

Fig. 8 Damage radius of rocks with different thickness of energy release sheet

损伤半径逐渐增大,数值模拟与理论计算大致相近,最大误差 10%。原因在于:液态 CO₂ 相变所产生的高压气体剪坏泄能片后,形成冲击波冲击岩石,致使出气孔周围产生主裂纹;后续高压气体嵌入由主裂纹所衍生的裂缝中;裂缝继续延伸扩展,直至高压气体全部耗散。冲击波能够引起岩石产生径向裂纹,而致裂管泄能片的厚度与产生冲击波的大小成正比,这将促进岩石裂纹的产生,增大裂纹的扩展范围。因此,随着泄能片厚度的增大,岩石损伤范围亦逐渐增大。可为实际施工过程中合理布置岩石的致裂孔间距和位置提供理论依据,以达到最佳的致裂效果。

3 致裂参数对岩石损伤半径的影响

根据上述模拟结果可知,理论计算与数值模拟的计算结果接近。可以认为,基于 Mises 准则,利用损伤半径来描述岩石损伤的压碎区和裂隙区是合理的。因此,选取岩石损伤半径作为母因素,子因素分别为泄能片厚度、岩石强度、致裂孔孔径、CO₂ 充装质量。通过理论计算公式分析这 4 个因素与损伤半径之间的关系。

给定不同的泄能片厚度、岩石强度和致裂孔孔径,计算 85 型致裂管爆破在岩石内产生的损伤半径,如图 9 ~ 图 11 所示。

3.1 泄能片厚度

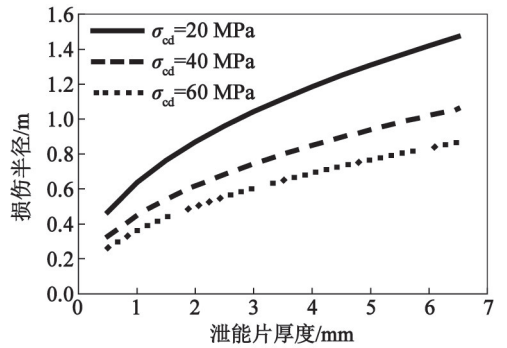
从图 9 可以看出,在不同岩石强度和致裂孔孔径下,损伤半径均随着泄能片厚度的增加而不断增加,且在较低强度和较小孔径下增长幅度较为明显。泄能片厚度从 3 mm 增加到 6 mm,当岩石强度为 20 MPa 时,损伤半径增大 0.38 m,增幅为 36%;当致裂孔孔径为 90 mm 时,损伤半径增大 0.25 m,增幅为 38%。可知,当泄能片厚度增加一倍时,损伤半径的最大增幅可达 38% 左右。

3.2 岩石强度

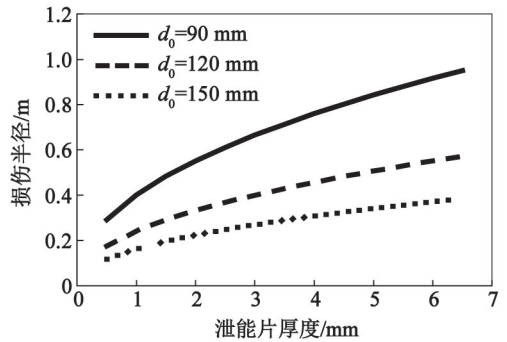
从图 10 可以看出,随着岩石强度的增大,损伤半径逐渐减小。岩石强度越小,受致裂孔孔径和泄能片厚度的影响越大;且随着岩石强度的增大,这种影响越来越小。岩石强度从 20 MPa 增加到 40 MPa,泄能片厚度为 2 mm 时,岩石损伤半径减小 0.25 m,减幅为 29%;致裂孔孔径为 90 mm 时,岩石损伤半径减小 0.40 m,减幅为 28%。可见,岩石强度增大一倍,损伤半径的最大减幅为 29%。

3.3 致裂孔孔径

由图 11 可知,损伤半径随致裂孔孔径的增大而



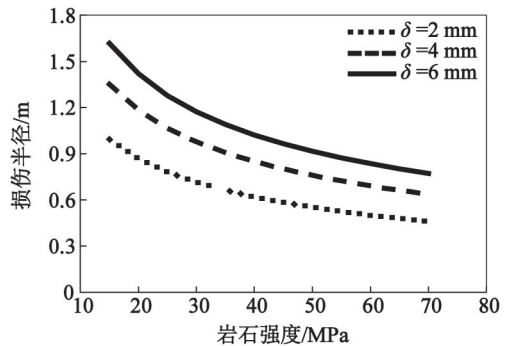
(a) 不同岩石强度



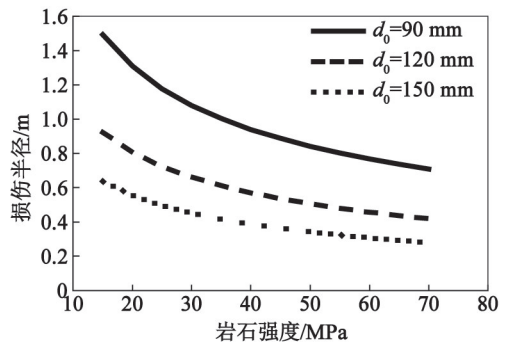
(b) 不同致裂孔孔径

图 9 损伤半径随泄能片厚度的变化

Fig. 9 Variation curves of damage radius with thickness of energy release sheet



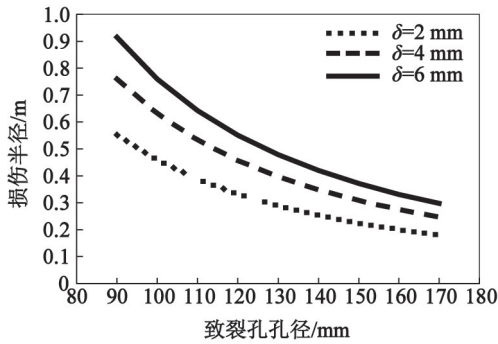
(a) 不同泄能片厚度



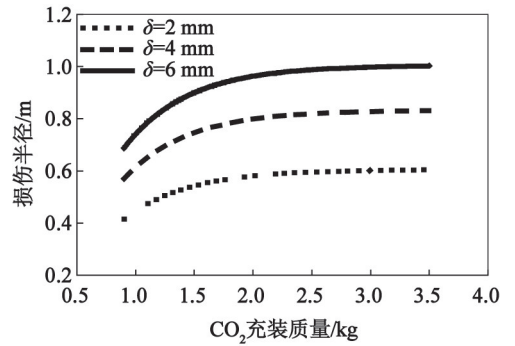
(b) 不同致裂孔孔径

图 10 损伤半径随岩石强度的变化

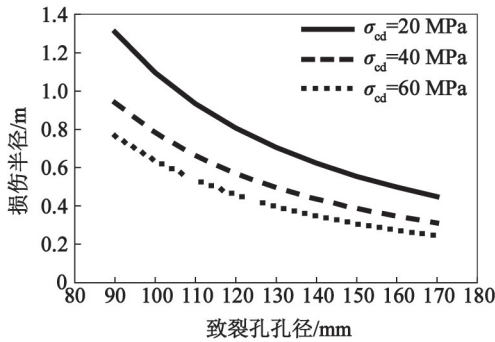
Fig. 10 Variation curves of damage radius with rock strength



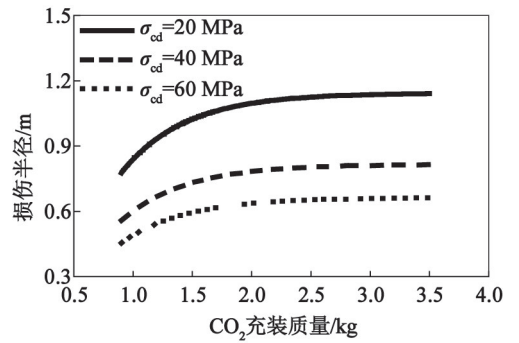
(a) 不同泄能片厚度



(a) 不同泄能片厚度



(b) 不同岩石强度



(b) 不同岩石强度

图 11 损伤半径随致裂孔孔径的变化

Fig. 11 Variation curves of damage radius with diameter of borehole

图 12 损伤半径随 CO₂ 充装质量的变化Fig. 12 Variation curves of damage radius with CO₂ filling mass

迅速减小,且呈指数衰减。当致裂孔孔径增加为致裂管外径的2倍、泄能片厚度为4 mm时,损伤半径减小到0.3 m,减幅为68%;岩石强度为20 MPa时,损伤半径减小到0.45 m,减幅为66%。可以看出,致裂孔孔径增大1倍时,损伤半径的最大减幅为68%。

3.4 CO₂ 充装质量

选取表1中3种不同CO₂充装质量的致裂管,计算在不同泄能片厚度、不同岩石强度下致裂岩石所产生的损伤半径,如图12所示。

从图12可以看出,随着CO₂充装质量的增加,损伤半径的增加幅度逐渐减小,且呈对数增长。当CO₂充装质量从0.9 kg增长到2.0 kg,泄能片厚度为6 mm时,损伤半径增长0.27 m,增幅为39%;岩石强度为20 MPa时,损伤半径增长0.31 m,增幅为40%。当CO₂充装质量超过2.0 kg,损伤半径几乎不再增长。可以看出,当充装的CO₂达到致裂管的容积之后,再增加CO₂质量,对损伤半径的影响微乎其微。

从以上分析可以看出,泄能片厚度和CO₂充装质量的增加在一定范围内能有效增大损伤半径,而

岩石强度和致裂孔孔径的增大会减小损伤半径。且当致裂管型号一定、CO₂充装质量达到致裂管的最大充装量时,增加泄能片厚度会显著增加岩体的损伤半径,此时的损伤半径增长率最大;同样的,增大致裂孔孔径会使岩石损伤半径迅速减小。

4 现场实验分析

为更好地分析CO₂相变致裂岩石的损伤范围,在重庆南桐绿色矿山进行超临界CO₂相变致裂岩石现场实验,如图13所示。采用RSM-SY6桩基声波探测仪进行声波测试。依据SL—94《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》规定,以声波变化率 $\eta > 10\%$ 作为判定岩石损伤的标准,可得出损伤门槛 $D_{cr} = 0.19$ 。当损伤变量超过损伤门槛时,岩石进入破坏状态。

根据图14可以看出,所建立的理论模型比现场实验测得的数值稍大,但规律性相同。这是因为,理论分析中假定岩石为连续、均值的材料,但实际工程中的岩石存在节理裂隙以及结构面等形态。



图 13 超临界 CO₂ 相变致裂岩石的过程

Fig. 13 Process of rock fracturing caused by supercritical CO₂ phase transition blasting

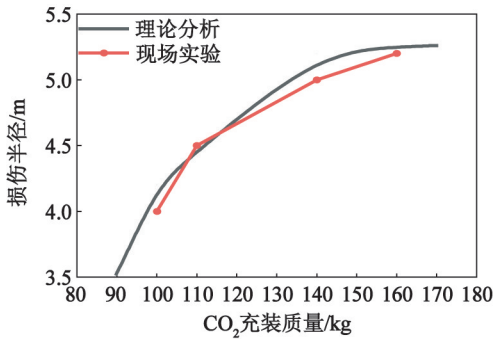


图 14 现场实验结果理论分析的对比

Fig. 14 Comparison between field test results and theoretical analysis

现场实验时,超临界 CO₂ 相变致裂岩石的过程中无明显飞石,致裂孔有部分灰尘喷出,致裂孔外产生大量裂纹,引起的周边岩石振动很小。致裂引起的岩块形成率较高,颗粒级配适中,可以有效提高岩石开挖规格石料的获得率。

5 结论

通过对 CO₂ 相变致裂岩石的损伤范围的理论分析和基于 3DEC 软件的岩石致裂损伤的数值模拟研究,得出以下结论:

1) 通过 CO₂ 相变致裂岩石损伤范围理论分析,给出了 CO₂ 相变产生的冲击压力的计算方法,并根据 Mises 准则和损伤力学理论,建立了 CO₂ 相变致裂岩石的损伤半径的计算模型。

2) 采用数值模拟分析了 CO₂ 相变产生的冲击波在岩石中的衰减规律,得到了不同泄能片厚度时岩石的致裂损伤半径。结果表明,对于 85 型致裂

管,在泄能片的厚度为 3.36 ~ 6.71 mm 时,产生的冲击波大小与泄能片厚度成正相关;随着泄能片厚度的增加,产生的冲击压力增大,引起的岩石致裂损伤半径也越大。

3) 泄能片厚度和 CO₂ 充装质量的增加能有效增大损伤半径,岩石强度和致裂孔孔径的增大会减小损伤半径。且增大泄能片厚度是增大损伤半径最有效的手段。岩石的损伤范围随着致裂孔孔径的增大呈指数衰减。

参考文献

[1] 周盛涛, 罗学东, 蒋楠, 等. 二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望[J]. 工程科学学报, 2021, 43(7): 883-893.
 ZHOU S T, LUO X D, JIANG N, et al. A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 883-893.

[2] 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 X H, MEN J L, SONG D P, 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.

[3] 孙小明. 液态二氧化碳相变致裂掏槽破岩试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(8): 81-87.
 SUN X M. Experimental study on cutting and rock breaking by liquid CO₂ phase transition fracturing technology [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(8): 81-87.

[4] 孙可明, 辛利伟, 吴迪. 超临界 CO₂ 气爆煤体致裂机理实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 302-308.
 SUN K M, XIN L W, WU D. Experimental study on fracture mechanism of coal caused by supercritical CO₂ explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(2): 302-308.

[5] 孙可明, 辛利伟, 吴迪, 等. 初应力条件下超临界 CO₂ 气爆致裂规律研究[J]. 固体力学学报, 2017, 38(5): 473-482.
 SUN K M, XIN L W, WU D, et al. Mechanism of fracture caused by supercritical CO₂ explosion under the impact of initial stress [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2017, 38(5): 473-482.

[6] WANG H, CHENG Z, ZOU Q, et al. Elimination of coal and gas outburst risk of an outburst-prone coal seam using controllable liquid CO₂ phase transition fracturing [J].

- Fuel, 2021, 284: 119091.
- [7] 王杰, 张云鹏, 葛晓东, 等. 液态 CO₂ 相变破岩参数及数值模拟研究[J]. 爆破器材, 2022, 51(4): 16-22.
WANG J, ZHANG Y P, GE X D, et al. Study on rock breaking parameters and numerical simulation of phase transition of liquid CO₂ [J]. Explosive Materials, 2022, 51(4): 16-22.
- [8] 郭云龙, 李纪宝, 孙崔源, 等. 孔间距对二氧化碳相变爆破效果的影响模拟分析[J]. 铁道建筑, 2022, 62(6): 125-129.
GUO Y L, LI J B, SUN C Y, et al. Simulation analysis of influence of borehole spacing on effect of CO₂ phase change blasting [J]. Railway Engineering, 2022, 62(6): 125-129.
- [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 S B, LU Y B, YUAN H L, et al. Study on crack propagation characteristics of liquid CO₂ phase transition rock breaking based on ANSYS/LS-DYNA [J]. China Production Safety Science and Technology, 2023, 19(6): 74-82.
- [10] ZHANG W, XU K, LEI Y, et al. Evolutionary features in damage and destruction of gas-rich coal seam by CO₂ phase-transition blasting [J]. Ekoloji, 2018, 27(106): 1605-1613.
- [11] 郭志兴. 液态二氧化碳爆破筒及现场试爆[J]. 爆破, 1994(3): 72-74.
- [12] 田泽础. 液态二氧化碳相变致裂裂缝形态及影响因素研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
TIAN Z C. Crack form and influencing factors of liquid carbon dioxide phase transition fracturing [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [13] 程选生, 刘华东, 张尚龙, 等. 岩质路堑液态 CO₂ 相变爆破充装量的试验研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(7): 137-146.
CHENG X S, LIU H D, ZHANG S L, et al. Test on filling of liquid CO₂ phase transition blasting in rock cutting [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(7): 137-146.
- [14] 曾永庆. 二氧化碳致裂爆破振动效应研究[D]. 武汉: 中国科学院大学, 2019.
ZENG Y Q. Study on blasting vibration effect for carbon dioxide blasting [D]. Wuhan: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [15] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [16] 冷振东, 卢文波, 陈明, 等. 岩石钻孔爆破粉碎区计算模型的改进[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(1): 101-107.
LENG Z D, LU W B, CHEN M, et al. Improvement calculation model for the size of crushed zone around blasthole [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(1): 101-107.
- [17] HART R D. An introduction to distinct element modeling for rock engineering [J]. Analysis and Design Methods, 1993: 245-261.
- [18] DENG X F, CHEN S G, ZHU J B, et al. UDEC-AUTODYN hybrid modeling of a large-scale underground explosion test [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(2): 737-747.
- [19] ZHU W C, GAI D, WEI C H, et al. High-pressure air blasting experiments on concrete and implications for enhanced coal gas drainage [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 36: 1253-1263.