

初应力条件下超临界 CO₂ 气爆致裂规律模拟研究

孙可明, 辛利伟, 吴 迪, 王金彧

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘 要: 考虑到超临界 CO₂ 气爆技术应用环境多受到初始地应力作用, 利用自主研发的超临界 CO₂ 气爆发生装置, 在电液伺服三轴加载平台上进行了初应力条件下超临界 CO₂ 气爆混凝土试件实验, 得到了气爆冲击压力时程曲线和不同载荷工况下试件的破坏形貌。利用 JWL 状态方程拟合气爆冲击压力时程曲线确定的参数计算气爆过程中超临界 CO₂ 的相变过程, 通过开发程序将材料拉伸和压缩硬化引入 Johnson-Cook 模型, 联合使用 SPH 和 FEM 对不同初应力条件下超临界 CO₂ 气爆致裂过程进行了模拟计算。实验和数值模拟一致表明: 超临界 CO₂ 气爆后试件形成粉碎区和裂隙区, 粉碎区是由气爆冲击波将气爆孔附近介质压碎形成的, 初应力对粉碎区的形状和范围影响不大; 裂隙区主要是由爆生气体的气楔作用形成的, 且主裂隙方向与最大初始压应力方向一致, 初应力对垂直于自身方向裂隙的扩展具有抑制作用; 随着初始压应力的增大, 相同爆破条件下裂隙生成条数和裂隙扩展的总长度都降低。计算结果与实验结果的一致性表明改进后的 JC 模型适用于超临界 CO₂ 气爆的模拟。

关键词: 初始应力; 超临界 CO₂; 气爆; 应力波; 数值模拟; 裂纹扩展

中图分类号: O383; TD235

文献标志码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.12.035

Simulation of fracture law of supercritical CO₂ explosion under initial stress condition

SUN Keming, XIN Liwei, WU Di, WANG Jinyu

(School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: The application environment of supercritical CO₂ explosion technology is mostly affected by initial stress, considering that feature and developed a supercritical CO₂ gas explosion device. A series of experiments were carried out with concrete specimens under the initial stress conditions on the electro-hydraulic servo triaxial loading platform, time history curve of the impact pressure and damage profiles of the specimen under different load conditions were obtained. The parameters, obtained from the gas burst impulse pressure time history curve fitted by JWL equation of state, were used calculate phase transition process of supercritical CO₂ in gas explosion. The tension-hardening and compression-hardening were introduced into the Johnson-Cook model in an innovative way. SPH and FEM were used to simulate the process of explosion induced by supercritical CO₂. Experimental and numerical simulations are consistent. After the explosion, specimen formed pulverization zone by shock wave crushing medium near the blasthole, with the effect of gas wedge, fracture zone was formed around pulverization zone. The direction of the main fracture is the same as that of the maximum initial compressive stress. The initial stress has an inhibitory effect on the propagation of the crack perpendicular to its own direction, and has little effect on the shape and extent of the pulverization zone. With the initial compressive stress increases, the number and total length of cracks are reduced. The agreement between the calculated and the experimental results shows that the modified JC model is suitable for the simulation of supercritical CO₂ gas explosion.

Key words: initial stress; supercritical CO₂; gas explosion; stress wave; numerical simulation; crack propagation

爆破法具有效率高、成本低等特点, 使其在矿山开采、地下隧道开挖等众多工程中得到广泛应用^[1-5]。含有易燃易爆气体等处于危险环境的地下工程对安全

高效的爆破技术需求迫切, 利用高压气体膨胀做功致裂岩体的物理爆破技术应运而生, 尤其是使用液态 CO₂ 作为爆破源的气爆技术, 其爆破过程降温效果明显且无明火, 应用于含有甲烷和粉尘的煤炭开采和低渗煤层的增透, 取得了显著成效^[6-15]。超临界 CO₂ 具有近似液体的密度、近似气体的黏度和对温压条件敏感等固有属性, 使得 CO₂ 爆破能量利用率高, 加之近似液体的密度使其冲击效果明显增强, 本课题组进行了

基金项目: 国家自然科学基金(51574137; 51504122)

收稿日期: 2016-12-30 修改稿收到日期: 2017-04-21

第一作者 孙可明 男, 博士, 教授, 博士生导师, 1968 年生

通信作者 辛利伟 男, 博士生, 1990 年生

大量超临界 CO₂ 气爆致裂实验 结果表明: 超临界 CO₂ 气爆致裂岩体的效果显著, 相同爆破条件下爆破效果优于空气爆破^[16]; 相对于化学炸药爆破, 超临界 CO₂ 气爆的能量来自于气体的物理变化, 峰值压力稳定且压力持续时间长, 有利于裂隙的产生和扩展; 利用超临界 CO₂ 对温压条件的敏感性可以进一步控制爆破效果^[17], 且 CO₂ 不属于管制品, 其工业应用前景广阔^[18-22]。

随着能源、水利、交通运输业的迅速发展, 地下开挖工程不断加深, 使得爆破工程处于高地应力环境, 研究表明地应力越大对爆破工程的影响越发显著, 所以研究初始应力作用下爆破致裂规律意义重大。目前较多学者研究了初始应力条件下的化学爆破, 肖正学等^[23]通过实验研究了初始应力场对爆破效果的影响, 得到了初始应力场改变爆轰波的传播规律且对裂隙发展有导向作用; 刘殿书等^[24]用激光动光弹的实验手段研究了初始应力对应力波传播的影响, 得到破碎区在初始压应力方向会增大; 而魏晨慧等通过数值计算得到初始地应力场的压应力作用不利于爆生裂隙的萌生与扩展; 王长柏等^[25]在研究影响岩体爆破裂纹扩展因素中得到随初始应力的增大裂隙扩展半径减小的结论; 杨立云等^[26]利用焦散线试验系统对爆生裂纹的演化研究表明平行于裂纹扩展方向的初始压应力对裂纹扩展基本无影响。初始应力对爆破裂纹扩展影响规律的不一致是由于初应力对爆破致裂影响机理还没有形成统一认识, 比如在爆破机理研究中, 李聪聪^[27]研究认为爆炸应力波峰值越大, 裂纹扩展能力越强, 而郭晓钧等^[28-29]研究得到相反结论, 即载荷峰值过高会造成能量的浪费, 对宏观连贯性裂纹的扩展延伸没有产生积极的作用。超临界 CO₂ 气爆致裂效果好且有良好的可控性, 具有巨大应用前景, 然而气爆技术相对较新, 目前初应力对超临界 CO₂ 气爆致裂规律相关研究鲜有报道, 且不能把炸药爆破等化学爆破理论直接应用于这种物理爆破法。因此, 本文利用实验和数值模拟相结合的方法对初应力条件下超临界 CO₂ 气爆致裂过程和规律进行研究, 对提高超临界 CO₂ 气爆技术的应用水平有重要意义。

1 初始应力作用下超临界 CO₂ 气爆实验

使用自主研发的超临界 CO₂ 气爆发生装置, 在 DHS-400-2000KN 型微机控制电液伺服三轴加载平台上, 进行了初应力条件下超临界 CO₂ 气爆致裂实验。气爆采用 400 mm × 400 mm × 400 mm 的混凝土试件, 如图 1(a) 所示。在试件中心钻 φ16 mm 爆破孔, 插入气爆头并固定, 经过注气、增压、控温等步骤使 CO₂ 达到预定温压条件, 施加初应力载荷, 打开高速爆破阀门

实现超临界 CO₂ 气爆, 气爆瞬间如图 1(b)、图 1(c) 所示。

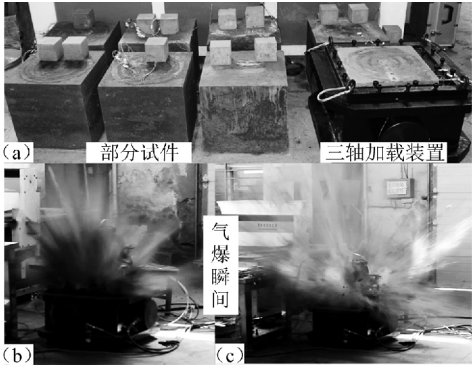


图 1 试件的制作与爆破
Fig. 1 Fabrication and blasting of specimen

测得试件的弹性模量 E 、单轴抗拉强度 σ_t 、单轴抗压强度 σ_c 、密度 ρ 和泊松比 μ , 如表 1 所示。超临界 CO₂ 初始温度 T_0 、初始压力 P_0 和试件初始应力载荷(x 方向 σ_x 、 y 方向 σ_y) 如表 2 所示。

表 1 试件物理力学参数

| Tab. 1 Physical mechanics parameters of specimen | | | | |
|--|-----------------------|-----------------------|--|-------|
| E/GPa | σ_t/MPa | σ_c/MPa | $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | μ |
| 5.2 | 0.45 | 4.32 | 2 200 | 0.27 |

表 2 实验方案

| Tab. 2 Experimental program | | | | |
|-----------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 试件 | P_0/MPa | $T_0/^\circ\text{C}$ | σ_x/MPa | σ_y/MPa |
| a | 22 | 35 | 0 | 0 |
| b | 22 | 35 | 1.0 | 1.0 |
| c | 22 | 35 | 2.0 | 1.0 |
| d | 22 | 35 | 2.0 | 1.5 |

按照表 2 方案进行超临界 CO₂ 气爆试验, 得到了不同初始压应力作用下超临界 CO₂ 气爆后的试件破坏形貌, 如图 2 所示。

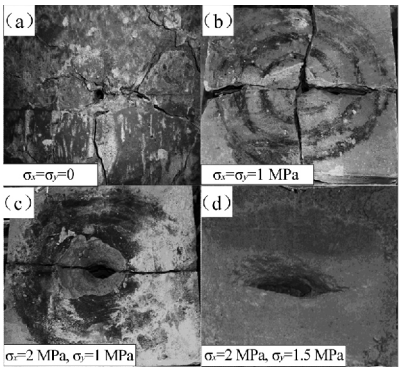


图 2 裂隙形貌分布图
Fig. 2 Fracture morphology distribution map

气爆后无初应力载荷的“a”试件形成以气爆孔为中心直径 320 mm 的破坏区, 爆破成块相对较小; x 和 y

方向都有 1.0 MPa 初应力的“b”试件气爆后形成对称分布的 4 条裂隙,通过气爆孔成十字交叉分布; x 方向 2.0 MPa、 y 方向 1.0 MPa 的“c”试件气爆后产生两条沿 x 方向即初始压应力最大方向的裂隙; x 方向 2.0 MPa、 y 方向 1.5 MPa 的“d”试件气爆后也形成沿 x 方向的两条裂隙,未扩展到试件边缘。通过分析可以得到最大初始压应力对超临界 CO_2 气爆过程中的裂纹扩展具有导向作用,即裂纹扩展主方向与最大初始压应力的主方向一致。

为确定数值模拟中超临界 CO_2 气爆参数,在气爆头的气体喷嘴方向安装压力传感器,连接数字采集系统,进行爆破压力测试实验,压力釜中 CO_2 在 22 MPa、35 °C 爆破时,得到压力釜和气爆头不同喷嘴的平均压力时程曲线,如图 3 所示。

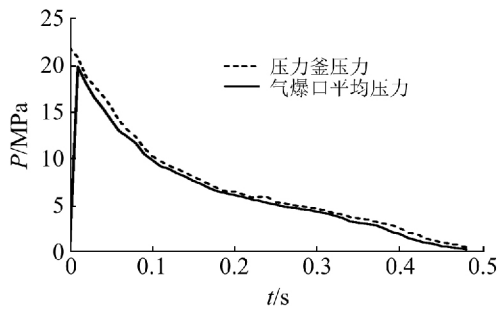


图 3 气爆冲击压力时程曲线

Fig. 3 Pressure history curve of gas explosion

由图 3 可知,冲击压力峰值达 19.8 MPa,远超试件的抗压强度,且超过试件抗压强度的压力持续时间较长。数值模拟中采用描述炸药材料模型的 JWL 状态方程确定超临界 CO_2 气爆过程中的气体压力变化,其表达式为

$$P = A_1 \left(1 - \frac{\omega \rho_1}{R_1 \rho_0} \right) e^{-R_1 \frac{\rho_0}{\rho_1}} + B_1 \left(1 - \frac{\omega \rho_1}{R_2 \rho_0} \right) e^{-R_2 \frac{\rho_0}{\rho_1}} + \omega E_m \rho_1 \quad (1)$$

式中: P 为 CO_2 气体的压力; ρ_0 为气体初始密度; ρ_1 为变化后的密度; ρ_0/ρ_1 为相对体积; E_m 为初始比内能; A_1 B_1 R_1 R_2 和 ω 为材料常数。

使用 Matlab 以 JWL 状态方程形式逼近图 3 所示气爆冲击压力时程曲线,得到可以描述超临界 CO_2 气爆过程中气体压力变化的 JWL 状态方程参数,如表 3 所示。

表 3 JWL 状态方程参数

Tab. 3 Parameters of JWL equation of state

| A_1/MPa | B_1/MPa | R_1 | R_2 | ω | $\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | E_m/GPa |
|------------------|------------------|-------|-------|----------|--|------------------|
| 612.3 | 0.452 | 4.9 | 1.4 | 0.33 | 600 | 0.5 |

2 超临界 CO_2 气爆致裂岩体的力学模型

2.1 冲击波守恒方程

超临界 CO_2 气爆瞬间产生的冲击波满足质量、动

量和能量守恒,方程分别为:

$$\rho_m D_c = \rho_c (D_c - v_c) \quad (2)$$

$$P_c = \rho_m D_c v_c \quad (3)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} P_c \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_c} \right) \quad (4)$$

式中: ρ_m 为试件密度; ρ_c 为冲击波阵面上介质的密度; P_c 为冲击波阵面的压力峰值; D_c 为冲击波在介质内的传播速度; v_c 为冲击波阵面上质点速度; ΔE 为单位质量介质内能的变化。

2.2 岩体的强度模型

考虑到气爆致裂岩体是涉及大应变和高应变率的动态过程,计算材料采用 Johnson-Cook 模型^[30],其屈服应力为

$$\sigma_{JC} = [A + B \varepsilon_p^n] [1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*] [1 - T^{*m}] \quad (5)$$

式中: ε_p 为等效塑性应变; $\dot{\varepsilon}_p^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ 为无量纲塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_0 = 1.0 \text{ s}^{-1}$; n 为材料硬化指数; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$, T 为材料瞬时温度; T_r 为环境温度; T_m 为材料融化温度;由于气爆过程是小幅度降温过程,取 $T = T_r$,即 $T^* = 0$;根据文献[31], A 取 5.8 MPa, B 取 16 MPa, C 取 0.009 7, n 取 0.18, m 取 0.61。

然而混凝土是典型的脆性材料,抗拉强度远小于抗压强度,Johnson-Cook 模型不能完全适用,为提高计算可靠性开发了子程序,创新性的将材料硬化模型加入,通过定义拉伸硬化和压缩硬化的不同来体现脆性材料的特性,加入硬化特性的材料特性示意图,如图 4 所示。其中 ε_0 取单轴压缩破坏应变 837 μm 。

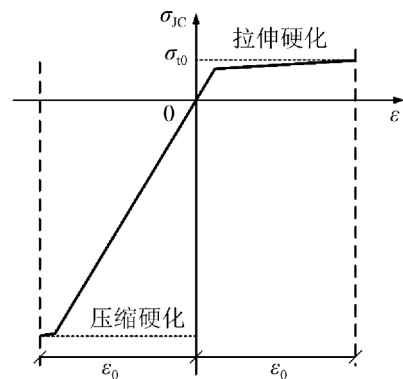


图 4 引入材料硬化特性的 JC 模型示意图

Fig. 4 JC model with material hardening characteristics introduced

2.3 超临界 CO_2 气爆致裂计算模型

超临界 CO_2 气爆致裂是一个含有大变形的高度非线性动力学过程,普通有限元网格难以准确实现这一过程,加之爆破过程中 CO_2 的运移膨胀对介质的劈裂作用不可忽略,选用光滑粒子流体动力学 (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) 方法对超临界 CO_2 气爆致裂进行数值模拟,SPH 方法是一种无网格方法,是将连续的流体(或固体)用相互作用的质点组来描述,各

个物质点上承载质量、速度等各种物理量,通过求解质点组的动力学方程和跟踪每个质点的运动轨道,求得整个系统的力学行为,在大变形中无网格缠绕问题,能够有效的追踪材料的历史变形行为。

模拟计算岩体参照表1所示参数,超临界 CO₂ 用 JWL 状态方程描述,使用表4所示参数。爆破试件尺寸采用 400 mm × 400 mm × 20 mm,如图5(a)所示。保证与实验有较好可比性的基础上减少计算量。气爆孔直径与实验相同,与气爆孔轴线平行的四个边界面设置固定边界条件。采用有限元网格与 SPH 联合使用的计算方法,混凝土模型中实体单元达到转化阈值时转变为 SPH 粒子,转化阈值采用破坏应变标准,转换为 SPH 粒子区域即为介质破坏区;超临界 CO₂ 的有限单元以时间为转化标准,开始计算时直接转变为 SPH 粒子,粒子可以进入非有限单元空间内与有限单元发生相互作用;粒子间、粒子与有限单元之间接触类型采用硬接触以满足质量、动量和能量守恒。

3 结果分析

3.1 无初应力气爆裂隙演化过程

图5为无初始应力作用时,超临界 CO₂ 气爆致裂裂隙演化过程。由图5可得在超临界 CO₂ 气爆初始时间段,气爆孔附近裂隙的产生与应力波的传播几乎是同时发生,如图5(b)、图5(c)所示。气爆孔附近介质在气爆冲击载荷作用下产生粉碎性破坏;在 60 μs 之后气爆孔附近介质继续破坏并出现环向裂隙,粉碎区继续扩大,且应力波波峰超前于裂隙的产生,如图5(d)、图5(e)、图5(f)所示。在 100 μs 之后应力波穿过计算区域,气爆孔附近的粉碎区范围基本不变,只有径向裂隙继续扩展形成裂隙区,直至停止形成最终形貌,如图5(i)所示。与无初应力气爆试验结果高度相似,如图2(a)所示。

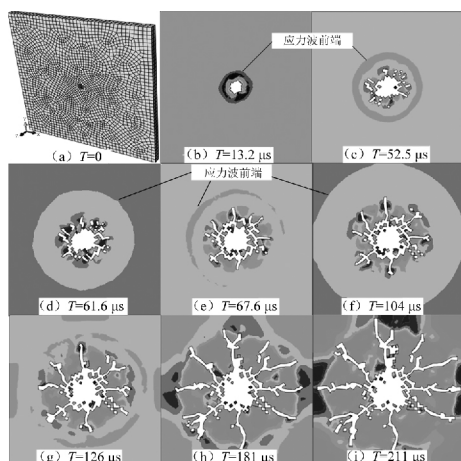


图5 无初应力气爆裂隙演化

Fig. 5 Fracture evolution with no initial stress

图6、图7为距离气爆孔中心不同距离的监测点的径向应力和速度的时程曲线。

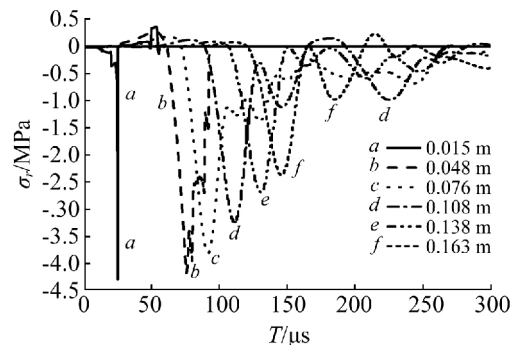


图6 监测点径向应力时程曲线

Fig. 6 Radial stress time history curve of monitoring points

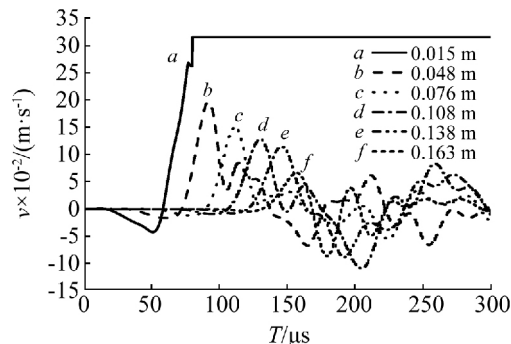


图7 监测点径向速度时程曲线

Fig. 7 Velocity time history curve of monitoring points

由图6可知,在气爆冲击载荷作用下,介质内形成的应力波是压缩波,从质点受压时间点和距离气爆孔位置分析,应力波随时间推移快速向外传播;随传播距离的增大,峰值应力逐渐衰减;距离气爆孔中心 0.015 m 处介质在气爆冲击载荷作用下在极短时间内达到抗压强度并发生压缩破坏,承载应力得以释放,应力值变为零且不再变化;距离气爆孔中心 0.048 m 处介质受到较大冲击应力作用并发生屈服,之后回弹,径向应力降到零;距离气爆孔中心更远处介质受到衰减后的应力波作用,未发生破坏,所以形成图6所示曲线。在 150 μs 之后应力波波动有所增大,是爆生气体加载作用产生的,即爆生气体的气楔作用是应力波作用过后裂隙继续扩展的动力。

由图7可知,介质在应力波作用下产生径向振动,结合图6可知,质点起振时间与应力波到达时刻一一对应,及质点是在应力波作用下起振的;质点振动速度与应力波的大小正相关,且监测点的应力波峰值越大,质点的振动峰值速度也越大;应力波随传播距离逐渐衰减,致使质点振动速度峰值随距离气爆孔中心距离的增大而减小。分析图7还可知,由于质点的振动速度不同,使介质产生压密区和疏松区,压密区介质径向受压,疏松区介质径向受拉,加之脆性材料抗拉不抗压

的特性,导致爆破过程中有环向裂隙产生;由于质点向外运动,所处半径增大,所以介质在环向都是受拉的,初始径向裂隙的产生就是在径向压缩和环向拉伸共同作用下产生的;在 $70\ \mu\text{s}$ 之后应力波传播超前于裂隙扩展,所以裂隙的后续扩展是爆生气体进入初始裂隙,作用于裂隙面,使裂隙有张开的趋势,进而促使裂隙继续扩展,直至形成最后的裂隙区。

3.2 初应力作用下气爆致裂规律

气爆之前通过预定义场的方式对模型按照表2施加初始应力场,保证了与实验载荷的一致性。由于篇幅限制,没有给出气爆裂演化过程,气爆后试件最终破坏形貌如图8所示。

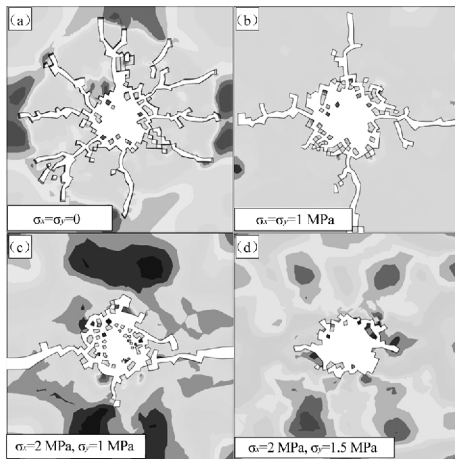


图8 不同初应力条件下气爆破坏形貌

Fig. 8 Specimen failure morphology under different initial stress conditions

对比图2与图8可知,数值计算的破坏形貌与实验结果较为一致,无初应力时,实验和模拟均产生了大量近似对称分布的裂隙;在两个方向上都施加1 MPa初应力时,气爆后产生十字交叉分布的4条裂隙;当 x 方向施加2 MPa、 y 方向施加1 MPa初应力时,裂隙沿 x 方向贯穿整个试件;当 x 方向施加2 MPa、 y 方向施加1.5 MPa的初应力时,试件只在 x 方向产生较短裂隙。

表2中c所示初应力加载方案时,在 x 方向距离气爆孔中心不同距离监测点的应力和速度时程曲线,如图9和图10所示。由图9可知,气爆产生的应力波与无初应力时一致,均为压缩波,由于 x 方向存在2 MPa的初应力,应力波的起点降低到相应值,且达到介质破坏应变的时间比无初应力时更短,之后由于裂隙沿水平方向扩展,监测点处介质的初应力得到释放,应力值逐步趋于无初应力状态。图10所示监测点在 x 方向的速度与无初应力时规律基本一致,部分监测点在 $200\ \mu\text{s}$ 之后速度不变且不为零,说明监测点已经破坏并自由飞离,与图9所示应力减小到零一致。

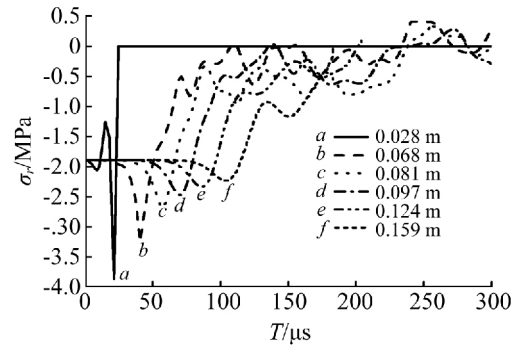


图9 监测点 x 方向应力时程曲线

Fig. 9 x direction stress time history curve of monitoring points

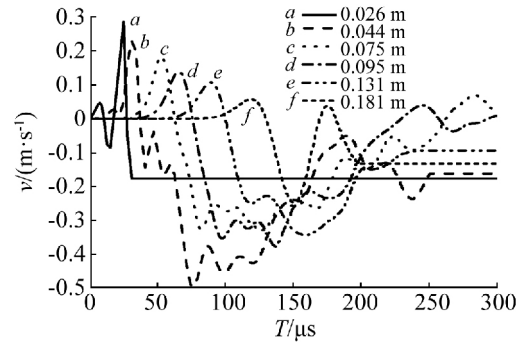


图10 监测点 x 方向速度时程曲线

Fig. 10 x direction velocity time history curve of monitoring points

气爆后试件在气爆孔附近都产生了粉碎区,随着初应力的改变,粉碎区的形状和范围没有明显变化,初应力远小于气爆冲击载荷,所以初应力对气爆冲击载荷作用形成的粉碎区影响不大。初应力对裂隙区影响很大,随初始应力的增大,裂隙数目和裂隙长度都降低,对比图8(a)与图8(b),可得裂隙长度基本相同,但数量减少,即初始压应力的存在不利于裂隙的产生;图8中有初应力作用时,裂隙沿最大初始压应力方向开裂,说明初始压应力对裂隙的产生和扩展有导向作用;对比图8(b)与图8(c), x 方向初应力增大后, x 方向的裂隙依然形成并长度增加,即初始压应力没有抑制同方向裂隙的产生和扩展,原因是爆生气体进入裂隙促使裂隙张开的力与初始压应力方向垂直,气楔作用效果不受影响;垂直于初应力方向的裂隙发育程度低且扩展较短,对比图8(c)和图8(d)也是同样的规律,原因是垂直于裂隙的初始压应力抑制裂隙的张开,抵消部分爆生气体的气楔作用,提高了裂隙扩展所需的气体驱动压力,即初始压应力抑制垂直于压应力方向裂隙的产生和扩展,并起主控作用。

4 结论

本文通过实验和数值模拟相结合的方法,对初应力作用下超临界 CO_2 气爆致裂规律进行了研究,得到以下主要结论:

(1) 超临界 CO₂ 气爆产生的冲击载荷将气爆孔附近介质压碎形成粉碎区, 初应力载荷相对于气爆冲击载荷很小, 对粉碎区的形状和范围影响不大; 爆生气体进入初始裂隙形成气楔, 驱动裂隙继续扩展而形成裂隙区, 初始压应力抑制垂直于自身方向裂隙的张开而削弱爆生气体的气楔作用, 阻碍裂隙扩展, 平行于初应力方向裂隙的扩展不受影响, 使得裂隙主方向与最大初始压应力方向一致。

(2) 初始压应力越大, 抑制垂直于自身方向裂隙张开的程度越大, 相同爆破条件下裂隙生成条数和裂隙扩展的总长度都降低。

(3) 通过开发程序实现了将材料拉伸和压缩硬化引入 Johnson-Cook 模型, 并将 JWL 状态方程拟合参数应用于超临界 CO₂ 相变过程的计算, 得到的模拟结果与实验结果较为一致, 说明改进后的 JC 模型适用于超临界 CO₂ 气爆的模拟。

超临界 CO₂ 气爆技术往往应用于更为复杂地应力环境, 本文结论有较大局限性, 所以关于初应力作用下超临界 CO₂ 气爆裂纹扩展规律有待更深入研究。

参考文献

- [1] 魏晨慧, 朱万成, 白羽, 等. 不同节理角度和地应力条件下岩石双孔爆破的数值模拟[J]. 力学学报, 2016, 48(4): 926-935.
WEI Chenhui, ZHU Wancheng, BAI Yu, et al. Numerical simulation on two-hole blasting of rock under different joint angles and in-situ stress condition[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 926-935.
- [2] 李夕兵, 周子龙, 王卫华. 岩石破碎工程发展现状与展望[R]. 北京: 岩石力学与岩石工程学科发展报告, 2010.
- [3] 刘建, 刘泽功, 高魁, 等. 不同装药模式爆破载荷作用下煤层裂隙扩展特征试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 735-742.
LIU Jian, LIU Zegong, GAO Kui, et al. Experiment study of extension characters of cracks in coal seam under blasting load with different charging modes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 735-742.
- [4] 王伟, 李小春, 袁伟, 等. 低渗透砂岩型铀矿床爆破增渗模型试验及增透机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1609-1617.
WANG Wei, LI Xiaochun, YUAN Wei, et al. Model test and mechanism study of the blasting-enhanced permeability of sandstone-type uranium deposits of low-permeability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1609-1617.
- [5] 陈俊桦, 张家生, 李新平. 基于岩石爆破损伤理论的预裂爆破参数研究及应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(5): 1441-1450.
CHEN Junhua, ZHANG Jiasheng, LI Xinping. Study of presplitting blasting parameters and its application based on rock blasting-induced damage theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1441-1450.
- [6] REIMER G M. Reconnaissance techniques for determining soil-gas radon concentrations: an example from prince georges country, Maryland[J]. Geophysical Research Letter, 1990, 17(6): 809-812.
- [7] 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): 523-529.
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): 523-529.
- [8] 吴锦旗. 液态 CO₂ 预裂强化预抽突消技术在突出煤层揭煤过程中的应用[J]. 煤炭与化工, 2015, 38(7): 105-109.
WU Jinqi. Liquid CO₂ presplitting reinforcement pre-drainage outburst elimination application in outburst coal seam mining[J]. Coal and Chemical Industry, 2015, 38(7): 105-109.
- [9] 周西华, 门金龙, 王鹏辉, 等. 井下液态 CO₂ 爆破增透工业实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(9): 76-82.
ZHOU Xihua, MEN Jinlong, WANG Penghui, et al. Industry experimental research on improving permeability by underground liquid CO₂ blasting[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(9): 76-82.
- [10] 赵立朋. 煤层液态 CO₂ 深孔爆破增透技术[J]. 煤矿安全, 2013, 44(12): 76-81.
ZHAO Lipeng. Technology of liquid carbon dioxide deep hole blasting enhancing permeability in coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(12): 76-81.
- [11] 王滨. 运用 CO₂ 爆破技术增加煤层透气性的研究[J]. 水利采煤与管道运输, 2015(2): 9-11.
WANG Bin. Study on increasing coal seam permeability by CO₂ blasting technology[J]. Hydraulic Coal Mining and Pipeline Transportation, 2015(2): 9-11.
- [12] 李志强. CO₂ 预裂爆破增透技术在瓦斯抽采中的应用[J]. 山西焦作科技, 2014(7): 30-40.
LI Zhiqiang. Application of CO₂ presplit blasting anti-reflection technology in gas extraction[J]. Shanxi Coking Coal Science and Technology, 2014(7): 30-40.
- [13] 杨晓国. CO₂ 预裂增透技术在高瓦斯低透气性煤层中的应用[J]. 中国煤矿, 2015, 41(4): 122-126.
YANG Xiaoguo. Application of presplitting and permeability-increasing technique by CO₂ to high-gas and low-permeability coal seam[J]. China Coal, 2015, 41(4): 122-126.
- [14] 赵龙, 王兆丰, 孙矩正, 等. 液态 CO₂ 相变致裂增透技术在高瓦斯低渗透煤层中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 75-79.
ZHAO Long, WANG Zhaofeng, SUN Juzheng, et al. Application of permeability improvement technology with liquid CO₂ phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 75-79.
- [15] 李宝华. CO₂ 增透预裂技术在常村煤矿瓦斯抽采中的应

- 用[J]. 煤, 2015, 24(9): 53–54.
- LI Baohua. Application of presplitting technique by CO₂ to gas extraction in Changcun coal [J]. Coal, 2015, 24(9): 53–54.
- [16] 孙可明, 辛利伟, 张树翠, 等. 超临界 CO₂ 气爆致裂规律实验研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(7): 27–31.
- SUN Keming, XIN Liwei, ZHANG Shucui, et al. Experimental study on laws of crack caused by gas burst of supercritical carbon dioxide [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2016, 12(7): 27–31.
- [17] SRINIVASAN N, JU L. Supercritical CO₂ hydrolysis and explosion as pretreatment of guayule bagasse for fermentation feedstock [C]// ICOSSE 2009: The 1st International Congress on Sustainability Science and Engineering. Cincinnati: American Institute of Chemical Engineers, 2009.
- [18] SINGH S P. Non-explosive applications of the PCE concept for underground excavation [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1998, 13(3): 305–311.
- [19] KRISTINA P, JOHN M S, FARRUKH A, et al. Cardox system brings benefits in the mining of large coal [J]. Coal International, 1995, 243(1): 27–28.
- [20] 郭志兴. 液态二氧化碳爆破筒及现场试爆[J]. 爆破, 1994, 6(3): 72–74.
- GUO Zhixing. Liquid carbon dioxide cartridge and site test [J]. Blasting, 1994, 6(3): 72–74.
- [21] 聂政. 二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J]. 煤炭技术, 2007, 26(8): 26–27.
- NIE Zheng. Application of carbon dioxide blasting technique in coal mines [J]. Coal Technology, 2007, 26(8): 26–27.
- [22] 赵海洋. 二氧化碳爆破技术在高速公路施工中的应用[J]. 交通世界, 2016(12): 46–47.
- ZHAO Haiyang. Application of carbon dioxide blasting technique in expressway construction [J]. Transport World, 2016(12): 46–47.
- [23] 肖正学, 张志呈, 李端明. 初始应力场对爆破效果的影响[J]. 煤炭学报, 1996, 21(5): 497–501.
- XIAO Zhengxue, ZHANG Zhicheng, LI Duanming. The influence of initial stress field on blasting [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(5): 497–501.
- [24] 刘殿书, 王万富, 杨吕俊, 等. 初始应力条件下爆破机理的动光弹实验研究[J]. 煤炭学报, 1999, 24(6): 612–614.
- LIU Dianshu, WANG Wanfu, YANG Lijun, et al. Holophotoelasticity study on mechanism of blasting under initiative stress field [J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 612–614.
- [25] 王长柏, 李海波, 谢冰, 等. 岩体爆破裂纹扩展影响因素分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(10): 31–61.
- WANG Changbai, LI Haibo, XIE Bing, et al. Analysis on influencing factors of blasting crack expansion [J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(10): 31–61.
- [26] 杨立云, 杨仁树, 许鹏, 等. 初始压应力场对爆生裂纹行为演化效应的实验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(3): 404–410.
- YANG Liyun, YANG Renshu, XU Peng, et al. Experimental study on the effect of initial compression stress field on blast-induced crack behaviors [J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(3): 404–410.
- [27] 李聪聪. 动力作用下岩体裂隙扩展机制的数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
- [28] 郭晓钧. 脆性材料钻孔爆炸致裂机理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [29] DONZE F V, BOUCHEZ J, MAGNIER S A. Modeling fractures in rock blasting [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8): 1153–1163.
- [30] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31–48.
- [31] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjective to large strain, high strain rates, and high pressure [C]// 1th International Symposium on Ballistic. Quebec: ISB, 1993.