

计算力学学报
Chinese Journal of Computational Mechanics
ISSN 1007-4708, CN 21-1373/O3

《计算力学学报》网络首发论文

题目: 超临界CO₂气爆非均质煤体破裂规律模拟研究
作者: 陈鹏, 孙可明, 张宇
收稿日期: 2020-12-07
网络首发日期: 2021-01-15
引用格式: 陈鹏, 孙可明, 张宇. 超临界CO₂气爆非均质煤体破裂规律模拟研究. 计算力学学报. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1373.O3.20210115.1429.022.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

超临界 CO₂ 气爆非均质煤体破裂规律模拟研究

陈 鹏¹, 孙可明^{*1,2}, 张 宇¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 阜新 123000; 2. 青岛理工大学 理学院, 青岛 266000)

摘 要: 为揭示超临界 CO₂ 气爆含割理裂隙非均质煤体的致裂规律, 开发了识别实际煤体图像获取其割理裂隙几何信息的 Matlab 程序, 将几何信息与煤体非均质物性参数关联并导入 Abaqus 中, 实现了非均质煤体有限元表征, 并采用 SPH 与 FEM 联合求解的方法模拟超临界 CO₂ 气爆非均质煤体的致裂过程, 得到了弱面倾角、弱面到爆孔中心距离及初应力的变化对煤体气爆致裂效果的影响规律。模拟结果表明: 初应力对主裂缝的萌生和扩展具有导向作用, 气爆裂缝沿最大初应力方向扩展; 弱面倾角相同时, 弱面离爆孔越近, 穿过弱面的裂缝尺度和密度越大, 弱面离爆孔较远时, 弱面完全阻断了裂缝的扩展; 弱面到爆孔中心距离相同时, 弱面倾角越大, 弱面对裂缝扩展的阻碍作用越大, 穿过弱面的裂缝尺度和密度越小, 应力波透射率越小。现场气爆增透煤体时应考虑割理裂隙和地应力特征合理布置气爆孔位置及爆破参数。

关键词: 超临界 CO₂; 气爆; 非均质煤体; 弱面; 应力波; 裂缝扩展

文献标识码: A

Simulation of fracturing law of heterogeneous coal caused by supercritical CO₂ explosion

CHEN Peng¹, SUN Ke-ming^{*1,2}, ZHANG Yu¹

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. School of Science, Qingdao University of Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: In order to reveal the fracturing law of heterogeneous coal with cleats caused by supercritical CO₂ explosion. A Matlab code was developed to identify the actual coal image and obtain the geometric information of its cleats. The geometric information was related to the heterogeneous physical parameters of coal and imported into Abaqus to realize the finite element representation of heterogeneous coal. SPH and FEM were used to simulate the fracture process of heterogeneous coal caused by supercritical CO₂ explosion. The dip angle of the weak plane, the distance from the weak plane to the center of the blast hole and the initial stress on the fracturing effect of the coal gas explosion was obtained. The simulation results indicated the initial stress has a guiding effect on the generation and propagation of the main cracks, and the cracks propagate along the direction of the maximum initial stress. For a given dip angle of the weak plane, the weak plane is closer to the blast hole, the size and density of the cracks passing through the weak plane is greater; when the weak plane is farther from the blast hole, the weak plane completely blocks the cracks propagation. For a given distance from the weak plane to the center of the blast hole, the greater the dip angle of the weak plane, the greater the blocking effect of the weak plane on cracks propagation, the smaller the size and density of the cracks passing through the weak plane, the smaller the stress wave transmittance. When gas explosion on site increases the permeability of coal, the location of gas explosion hole and blasting parameters should be rationally arranged in consideration of the cleats and *in-situ* stress characteristics.

收稿日期: 2020-12-07;

基金项目: 国家自然科学基金 (51574137); 国家油气科技重大专项 (2017ZX05037-001) 资助项目.

作者简介: 孙可明^{*} (1968-), 男, 博士, 教授

(E-mail: sskmm11@163.com).

Key words: supercritical CO₂; gas explosion; heterogeneous coal; weak plane; stress wave; crack propagation

1 引言

我国煤层气资源丰富，具有巨大的开发潜力，但抽采量和利用量较低，增速缓慢，主要原因是煤储层具有低压力、低渗透率以及低含气饱和度的“三低”储层特征^[1]，渗透率一般在 $(0.1\sim 0.001) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围内^[2]，导致煤层气抽采难度大，时间长，成本高，因此煤储层渗透率低成为商业化开采的瓶颈。超临界 CO₂ 气爆技术是一种新型的致裂增透技术，相比深孔化学炸药爆破的增透方法，超临界 CO₂ 物理气爆增透方法具有安全、高效、环保、适用范围广和可控性好等优点，特别对于高瓦斯煤层气开发其优势更为明显，超临界 CO₂ 近似液体的密度使气爆具有较强的冲击效果，使煤体内生成大量气爆裂缝，进而提高了增透效果。

天然煤体经过长期地质作用，孕育了大量的割理裂隙、层理等结构弱面，这些结构弱面的存在使煤体表现较强的非均质性，并影响着煤体的力学特性。宋浩然等^[3]基于煤体的各向异性和非均质性，考虑煤体应力变形场和瓦斯渗流场的交叉耦合作用，分析了煤层抽采中水力割缝钻孔周围瓦斯压力以及渗透率的时空演化规律；宋红华等^[4]基于波速测试、CT 扫描和三维重构技术，分析了煤岩内部原生裂隙、孔隙以及矿物夹杂分布的非均质特征，研究了单轴受压条件下，沿不同方向加载时，煤样内部结构分布的非均质性对煤岩破坏特征的影响；贾慧敏^[5]研究发现煤岩孔隙结构具有分段分形特征，煤岩分形维数越大，其孔隙度、渗透率越小，孔隙分选性越差，非均质性越强；赵瑜等^[6]采用非均质固、气耦合数值试验的方法，研究不同瓦斯压力作用下非均质煤岩抗压强度尺寸效应的影响规律及其作用机理。孙可明研究团队^[7-10]进行了大量的超临界 CO₂ 气爆煤体致裂实验研究及均质煤体的气爆模拟研究，且目前关于模拟非均质煤体爆破的相关研究鲜有报道，因此有必要进一步开展超临界 CO₂ 气爆致裂非均质煤体的模拟研究，对提高超临界 CO₂ 气爆技术的应用水平具有重要作用。

2 超临界 CO₂ 气爆煤体力学模型

2.1 爆轰波守恒方程

超临界 CO₂ 气爆瞬间产生的爆轰波满足质量、动量和能量守恒方程^[11]：

$$\rho_m D_c = \rho_c (D_c - v_c) \quad (1)$$

$$P_c = \rho_m D_c v_c \quad (2)$$

$$\Delta E = \frac{1}{2} P_c \left(\frac{1}{\rho_m} - \frac{1}{\rho_c} \right) \quad (3)$$

式中 ρ_m 为煤体的密度； ρ_c 为冲击波阵面上煤体的密度； P_c 为冲击波阵面的压力峰值； D_c 为冲击波在煤体内的传播速度； v_c 为冲击波阵面上质点速度； ΔE 为单位质量煤体内能的变化。

2.2 煤体变形场方程

(1) 增量型平衡微分方程：

$$\Delta \sigma_{ij,j} + \Delta F_i = \rho_m \Delta \ddot{u}_i \quad (4)$$

式中 ΔF_i 为体力的增量； $\Delta \sigma_{ij,j}$ 为应力分量对坐标偏导数的增量， $\Delta \ddot{u}_i$ 为位移对坐标二阶导数的增量。

(2) 增量型几何方程：

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\Delta u_{i,j} + \Delta u_{j,i}) \quad (5)$$

式中 $\Delta \varepsilon_{ij}$ 为应变的增量， $\Delta u_{i,j}$ 为位移对坐标偏导数的增量。

(3) 煤体损伤本构模型：

由于煤体气爆是大应变和高应变率的动态过程，煤体材料采用 Johnson-Cook 模型，其屈服应力可表示为^[12]：

$$\sigma_c = (A + B \varepsilon_p^n) (1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p^*) (1 - T^{*m}) \quad (6)$$

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 和 m 为材料硬化指数； $T^* = (T - T_r) / (T_s - T_r)$ ， T 为材料瞬时温度， T_r 为环境温度， T_s 为材料融化温度，气爆过程温度变化幅度相对较小，取 $T = T_r$ ，可得 $T^* = 0$ ；根据文献[13-14]， A 取 5.8MPa， B 取 16MPa， C 取 0.0097， n 取 0.18， m 取 0.61。

3 超临界 CO₂ 气爆非均质煤体有限元模型

为了建立非均质含弱面煤体的几何模型,基于数字图像方法开发了对实际煤体图像识别处理的 Matlab 程序,将实际煤体图像灰度化,利用灰度值将 400×400 像素的图像分隔为 400×400 个节点矩阵,利用此节点矩阵和像素代表的真实长度构建出非均质煤体的几何表征模型,将其导入 Abaqus 中生成非均质煤体有限元模型,实际煤体图像与有限元模型对比如图 1 所示。

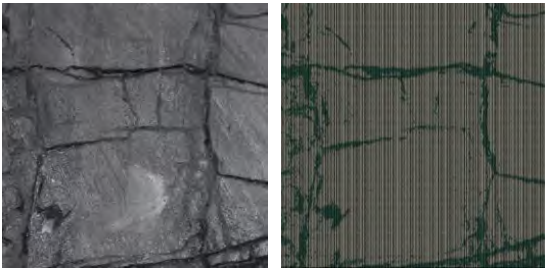


图 1 实际煤体图像与非均质煤体有限元模型

为减少计算工作量和便于对比分析,建立的煤体模型尺寸为 400 mm×400 mm×20 mm,煤体中心处气爆孔直径为 16mm (与团队实验的模型^[9]尺寸一致),与爆孔轴线平行的四个边界面设置固定约束,且各边界无反射,煤体 x 和 y 方向施加的初应力如图 2 所示,α 为弱面倾角。煤体上监测点布置方式如图 3 所示, x 和 y 方向布置的监测点到爆孔中心的距离相同,分别为 10mm、30mm、60mm、100mm、140mm 及 180mm。实验中得到了煤体及弱面的物理力学参数^[9] (如表 1 所示)。

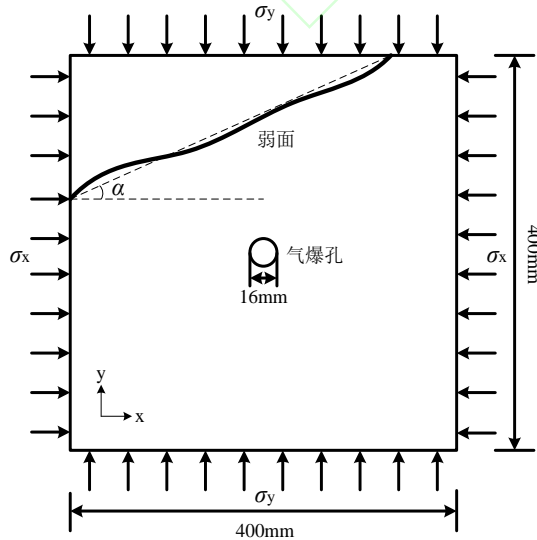


图 2 气爆煤体计算模型

Fig.2 Calculation model of gas explosion coal

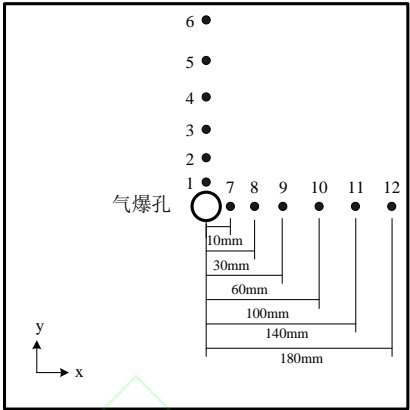


图 3 监测点布置示意图

Fig.3 Layout of monitoring points

表 1 煤体及弱面的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of the coal and weak plane

类别	$\rho/(\text{kg/m}^3)$	E/GPa	μ	σ_t/MPa	σ_c/MPa
煤体	1200	3.20	0.25	0.52	4.57
弱面	900	0.31	0.30	0.20	2.54

模拟中采用 JWL 状态方程确定超临界 CO₂ 气爆过程中爆生气体的压力变化,其表达式为^[15]:

$$P = A_1(1 - \frac{\omega \rho_1}{R_1 \rho_0})e^{-R_1 \frac{\rho_0}{\rho_1}} + B_1(1 - \frac{\omega \rho_1}{R_2 \rho_0})e^{-R_2 \frac{\rho_0}{\rho_1}} + \omega E_m \rho_1 \quad (7)$$

式中 P 为 CO₂ 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 以及 ω 为材料常数。

通过团队前期实验测得的爆破过程气体的压力,计算出 JWL 状态方程参数^[8], A_1 取 612.3MPa, B_1 取 0.452MPa, R_1 , R_2 , ω 分别取 4.9, 1.4, 0.33, ρ_0 取 600kg/m³, E_m 取 0.5GPa。

模拟过程采用了 SPH 与 FEM 联合求解的计算方法,煤体与超临界 CO₂ 单元类型均为 C3D8R, SPH 粒子直径为 1mm,煤体模型中实体单元达到转化阈值时转变为 SPH 粒子,转化阈值采用应力标准,转变为 SPH 粒子的区域即为煤体破坏区;计算开始时超临界 CO₂ 有限单元直接转变为 SPH 粒子,粒子可以进入非有限单元区域与有限单元发生相互作用;粒子与粒子、粒子与有限单元之间接触类型采用通用接触来满足质量、动量和能量守恒。

4 含单个弱面煤体气爆的模拟结果及分析

地下煤层往往受地应力作用,文献[16]给出地应力公式为:

$$\sigma_v = \gamma H \quad (8)$$

式中 σ_v 为铅垂应力, γ 为上覆岩体的平均重力密度, H 为岩体单元的深度。

本文选取地下 800m 深度煤层所受地应力情况进行模拟,煤层顶板岩石平均重力密度 γ 为 25kN/m^3 ,由式(8)可得 σ_v 为 20MPa ,因此模拟中将煤体 x 和 y 方向的初应力工况设置为静水应力状态 $\sigma_x=\sigma_y=20\text{MPa}$ 及非静水应力状态 $\sigma_x=0\text{MPa}$, $\sigma_y=20\text{MPa}$ 和 $\sigma_x=20\text{MPa}$, $\sigma_y=10\text{MPa}$ 。

为了控制变量的统一,将一个含单个弱面煤体的图像经过图像的拉伸和旋转得到图 4 和图 8 所示的图像,保证了这些图像中煤体的弱面为相同弱面,弱面厚度约为 10mm 。图 4 中弱面倾角为 0° ,弱面到爆孔中心距离分别为 40mm 、 80mm 、 120mm 、 160mm ;图 8 中弱面到爆孔中心距离为 80mm ,弱面倾角分别为 0° 、 15° 、 30° 、 45° 。

4.1 弱面到爆孔中心距离对气爆致裂效果的影响

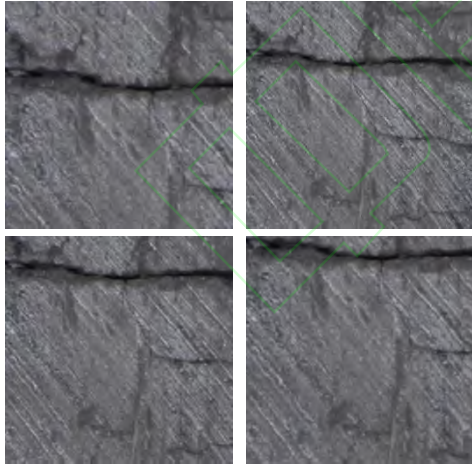
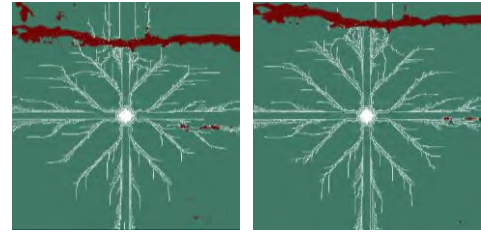
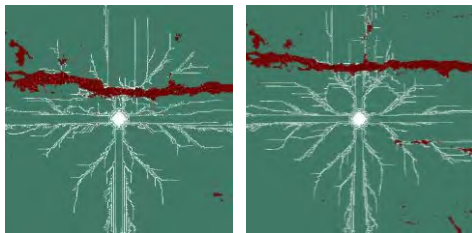
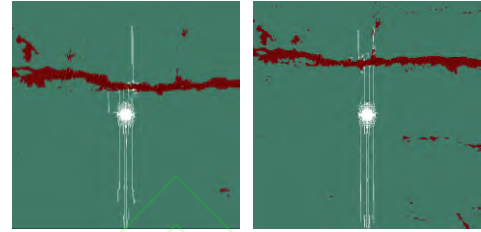


图 4 实际煤体图像

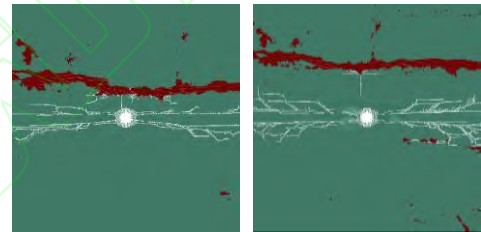
Fig.4 Image of actual coal



(a) $\sigma_x=\sigma_y=20\text{MPa}$



(b) $\sigma_x=0\text{MPa}$, $\sigma_y=20\text{MPa}$



(c) $\sigma_x=20\text{MPa}$, $\sigma_y=10\text{MPa}$

图 5 不同初应力下弱面到爆孔中心不同距离气爆结果

Fig.5 Results of gas explosion at different distances from the weak plane to the blast hole center under different initial stresses

图 5 (a) 中气爆产生的主裂缝沿 x 和 y 方向扩展,可以看出弱面对裂缝扩展具有阻碍作用,随着弱面到爆孔中心距离的增大,弱面对裂缝扩展的阻碍作用逐渐增大,穿过弱面扩展的裂缝密度逐渐减小;图 5 (b) 中气爆产生的主裂缝只沿 y 方向上扩展,随着弱面到爆孔中心距离的增大,穿过弱面扩展的裂缝尺度逐渐减小,弱面到爆孔中心距离为 160mm 时,没有裂缝穿过弱面扩展;图 5 (c) 中气爆产生的主裂缝只沿 x 方向上扩展,主裂缝上生成的分支裂缝偏向 y 方向扩展。

模拟结果可以得出弱面到爆孔中心距离较小时, 有裂缝穿过弱面扩展, 随着距离的增大, 穿过弱面扩展的裂缝尺度和密度不断减小, 当弱面距离爆孔中心足够远时, 弱面完全阻断了裂缝的扩展, 没有裂缝穿过弱面。

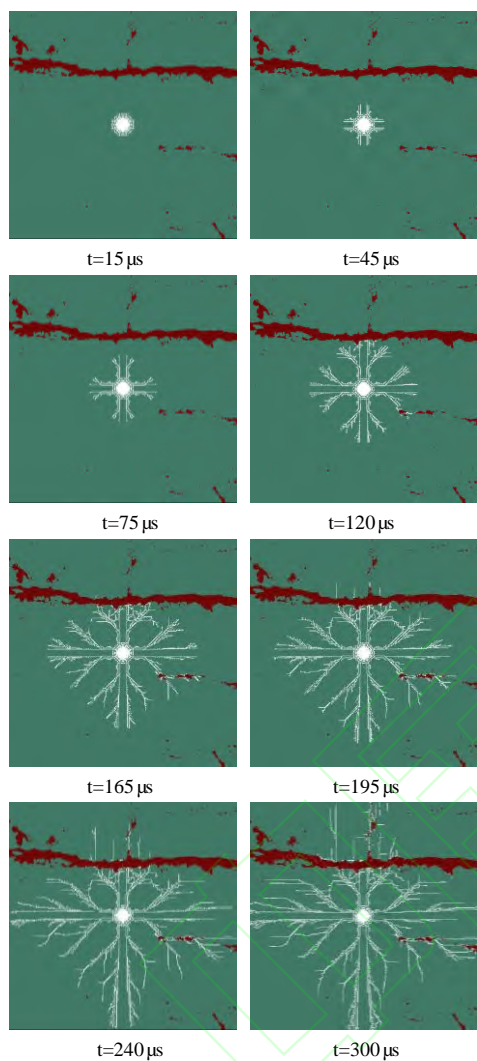


图 6 裂缝扩展过程图

Fig.6 The process of the cracks propagation

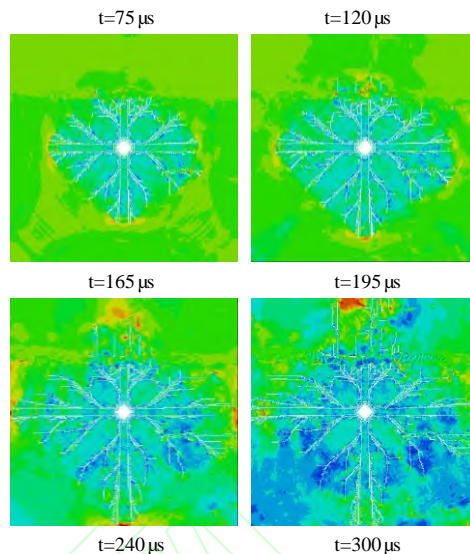
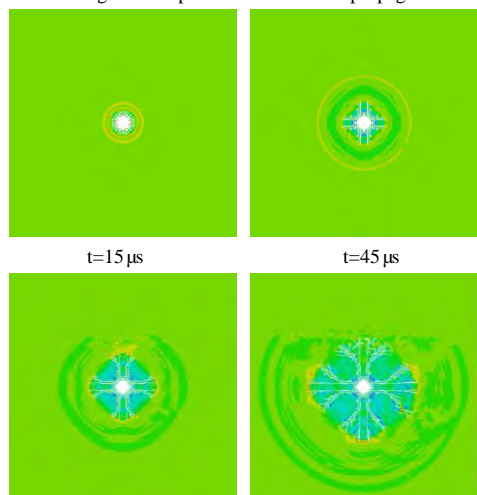


图 7 应力波传播过程图

Fig.7 The process of the stress wave propagation

图 6 和图 7 给出了部分含单个弱面煤体气爆时裂缝扩展及应力波传播过程图, 在超临界 CO_2 气爆初始时间段, 爆孔周围介质在气爆应力波作用下发生粉碎性破坏, $45\mu\text{s}$ 后爆孔周围介质继续破坏, 爆孔四周出现环向裂缝, 裂缝随着应力波传播时间的增加不断扩展, 裂缝扩展到弱面时, 弱面阻碍了裂缝的扩展, 仅有少量裂缝穿过弱面继续扩展, $240\mu\text{s}$ 后主裂缝不再扩展, 只有分支裂缝在扩展; 初始时应力波呈现圆环状向外传播, $75\mu\text{s}$ 时应力波传播到弱面, 表现非环状特征, $75\mu\text{s}$ 至 $120\mu\text{s}$ 可看出弱面对应力波的阻隔作用, 应力波未穿透弱面, 说明应力波在弱面上被吸收和反射, $135\mu\text{s}$ 后应力波传播到弱面上侧的煤体上, 应力波发生衰减, $165\mu\text{s}$ 后弱面下侧的应力波穿过计算区域, $240\mu\text{s}$ 后应力波穿过整个煤体。

结合应力分析可知, 气爆初始时, 应力波主要表现为压力波, 对爆孔周围煤体进行挤压破坏形成粉碎区, 接着爆孔周围产生环向裂缝, 爆生气体进入初始裂缝驱动其继续扩展形成裂隙区; 应力波传播到弱面时, 应力值出现不连续, 入射应力波分化为反射应力波和透射应力波, 反射应力波表现为拉应力, 使弱面内侧产生向爆孔方向扩展的反射裂缝, 在不断的入射压应力波和反射拉应力波作用下, 造成煤体拉压累积损伤, 反射裂缝与爆孔处产生的径向裂缝交汇贯通, 使弱面和爆孔之间形成裂缝密集

区;透射压应力波继续在煤体内传播,由于弱面对裂缝扩展的阻碍,弱面外侧煤体上只生成少量裂缝。

4.2 弱面倾角对气爆致裂效果的影响

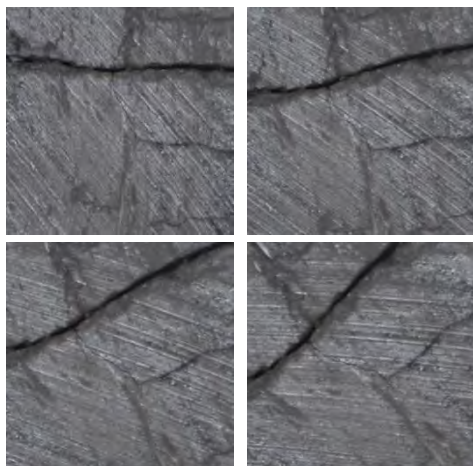
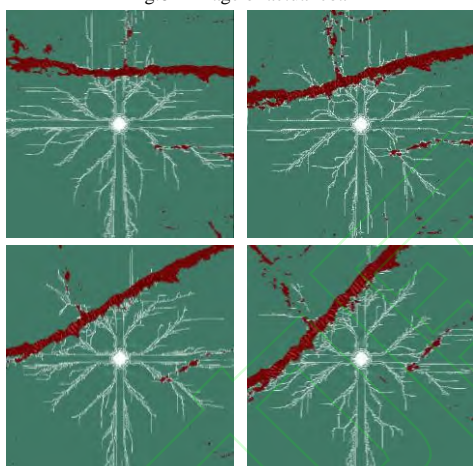
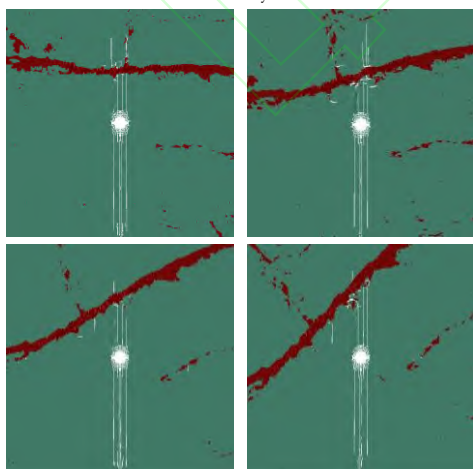


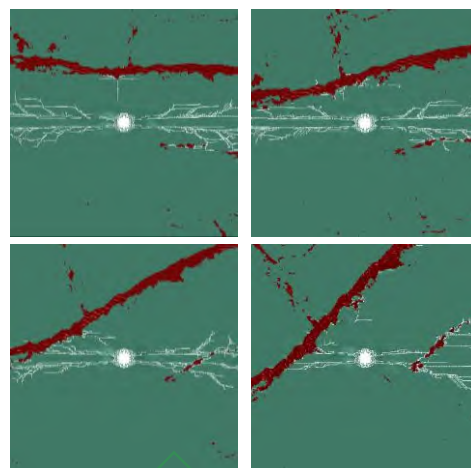
图8 实际煤体图像
Fig.8 Image of actual coal



(a) $\sigma_x = \sigma_y = 20\text{MPa}$



(b) $\sigma_x = 0\text{MPa}, \sigma_y = 20\text{MPa}$



(c) $\sigma_x = 20\text{MPa}, \sigma_y = 10\text{MPa}$

图9 不同初应力下弱面不同倾角气爆结果

Fig.9 Results of gas explosion at different angles of the weak plane under different initial stresses

图9(a)和(b)可以看出随着弱面倾角的增大,弱面对裂缝扩展的阻碍作用逐渐增大,穿过弱面扩展的裂缝尺度和密度逐渐减小;图9(b)和(c)可明显看出45°倾角弱面对裂缝扩展的阻碍作用最大,几乎没有裂缝穿过弱面。

对比图5和图9中3种初应力工况下的模拟结果可得,气爆主裂缝沿最大初应力方向扩展,初应力对裂缝的萌生和扩展具有导向作用。

根据图3监测不同弱面倾角下y方向各个监测点处的振动速度峰值,监测数据如表2所示。

表2 质点振动速度峰值

Tab.2 Peak velocity of particle vibration

	y 方向的监测点振动速度峰值/(m/s)					
	1	2	3	4	5	6
0°	4.3054	3.4982	5.8952	2.9817	1.2855	0.5258
15°	4.3047	3.8863	5.0957	2.3295	1.2675	0.4607
30°	4.3053	3.6630	3.1877	4.9229	1.2176	0.4360
45°	4.3052	3.2373	2.9351	4.0171	1.0035	0.3579

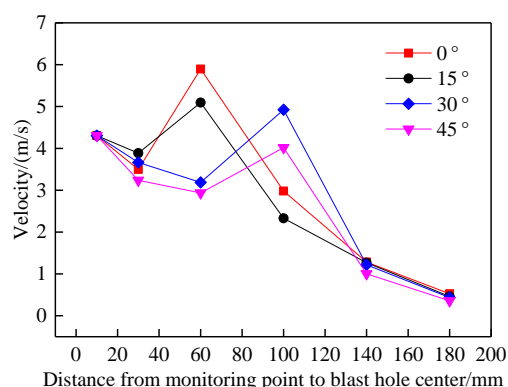


图10 质点振动速度峰值曲线

Fig.10 Peak velocity curve of particle vibration

图 10 可以看出监测点 1 和 2 与弱面距离较大, 受弱面的影响较小, 不同倾角时同一监测点振动速度相差不大; 弱面倾角为 0°和 15°时监测点 3 接近弱面, 倾角为 30°和 45°时监测点 4 接近弱面, 由曲线可看出接近弱面处的监测点振动速度发生了突变, 因为应力波传播到弱面时, 在弱面上产生能量聚集, 造成应力集中, 导致弱面附近的质点振动速度大幅度增大; 弱面后的质点振动速度峰值随弱面倾角的增大而减小。

应力波通过弱面后会发生衰减, 弱面不同倾角时监测点 6 均位于弱面之后, 监测得到该点的 Mises 应力峰值, 如表 3 所示, 数据表明弱面后 Mises 应力峰值随其倾角的增大而减小, 图 11 可得应力波通过弱面时, 弱面倾角越大, 应力波衰减得越多。

表 3 监测点 6 的 Mises 应力峰值

倾角/°	0	15	30	45
Mises 应力/MPa	21.1731	21.1492	21.0681	20.6948

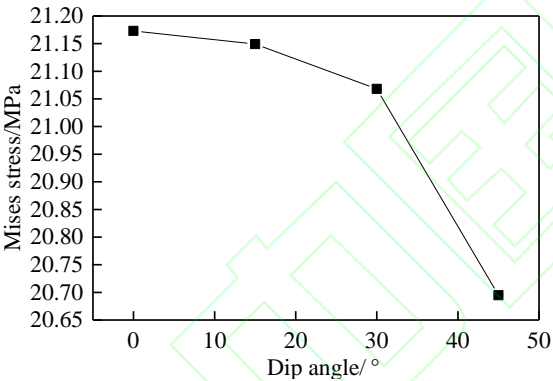


图 11 监测点 6 的 Mises 应力峰值曲线

Fig.11 Peak Mises stress curve of monitoring point 6

文献[17]给出爆炸应力波透射率为透射应力与入射应力的比值, 即:

$$T = \frac{\sigma_t}{\sigma_i} \tag{9}$$

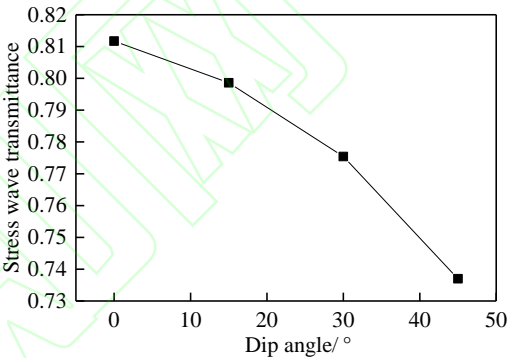
式中 T 为应力波透射率; σ_i 为入射应力; σ_t 为透射应力。

按照应力波向弱面入射和透射的时间及其入射和透射方向, 监测弱面上及接近弱面两端的煤体上的应力, 得到应力波由煤体传入弱面及由弱面传入煤体时的入射应力和透射应力, 根据公式 (8) 计算出弱面不同倾角时应力波透射率 (见表 4), 并得到图 12 所示的曲线。

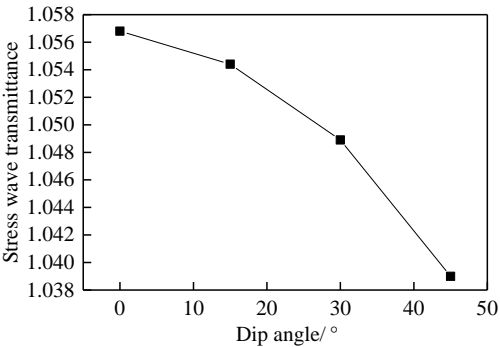
表 4 应力波透射率

Tab. 4 Stress wave transmittance

		0°	15°	30°	45°
应力波由煤体传入弱面	σ_i /MPa	20.5972	20.4366	20.6067	20.6381
	σ_t /MPa	16.8433	16.3197	15.9784	15.2113
	透射率	0.8177	0.7986	0.7754	0.7370
应力波由弱面传入煤体	σ_i /MPa	16.8433	16.3197	15.9784	15.2113
	σ_t /MPa	17.7992	17.2074	16.7593	15.8046
	透射率	1.0568	1.0544	1.0489	1.0390



(a) From coal to weak plane



(b) From weak plane to coal

图 12 应力波透射率曲线

Fig.12 Stress wave transmittance curve

结果表明, 应力波由煤体传入弱面时应力波透射率小于 1, 应力波由弱面传入煤体时应力波透射率大于 1; 随着弱面倾角的增大, 应力波透射率不断减小, 应力波透射率衰减度不断增大。

5 含多弱面煤体气爆的模拟结果及分析

图 1 给出了含多个弱面煤体的实际图像及其经

过图像识别处理得到的有限元模型, 给煤体 x 和 y 方向均施加 20MPa 初应力, 得到气爆裂缝扩展过程及应力波传播过程为图 13 和图 14。

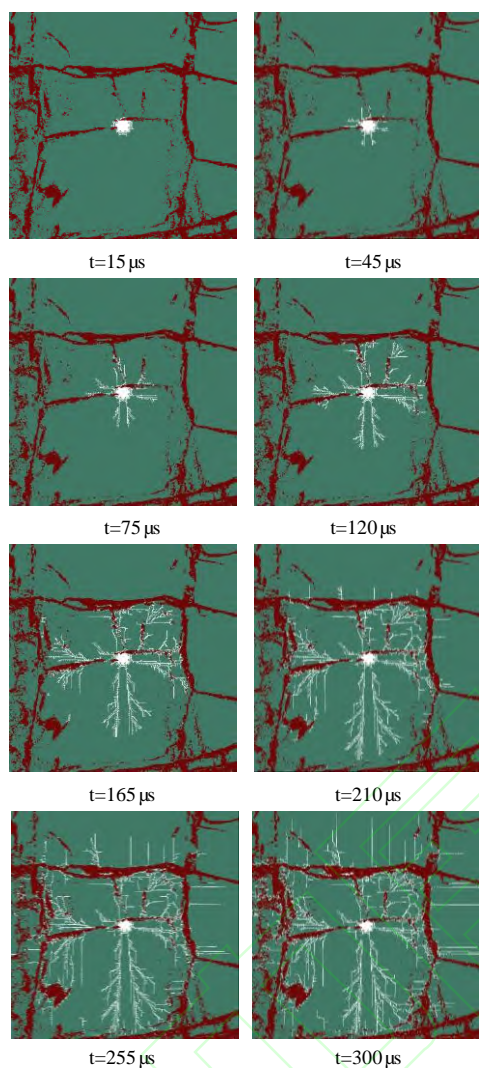


图 13 裂缝扩展过程图
Fig.13 The process of the cracks propagation

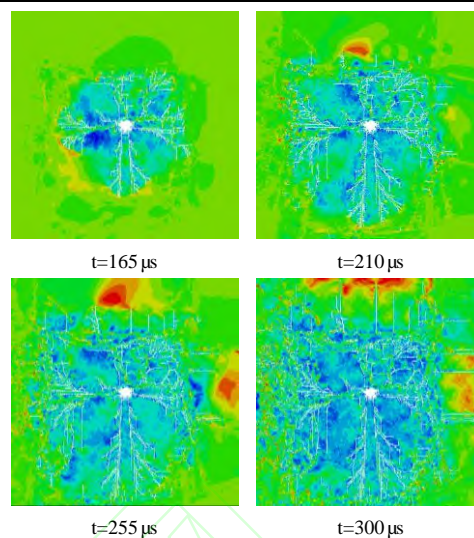
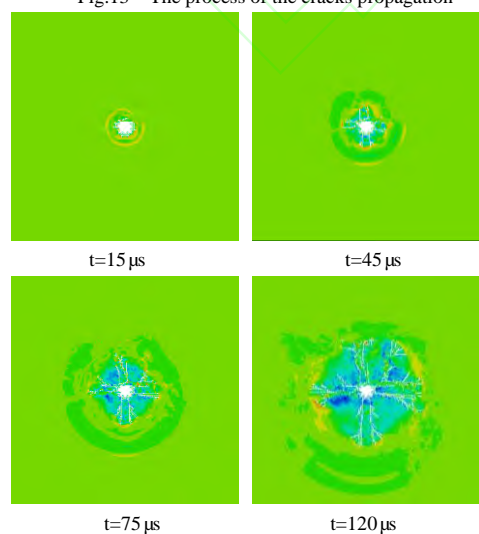


图 14 应力波传播过程图

Fig.14 The process of the stress wave propagation

对比含单个弱面煤体气爆结果可得, 多个弱面的存在, 改变了煤体气爆的粉碎区和裂隙区形貌, 应力波波形变得不规则; 煤体中弱面越多, 应力波衰减越多, 弱面处生成向爆孔扩展的反射裂缝越多, 爆孔与弱面之间煤体上的裂缝密度越大。

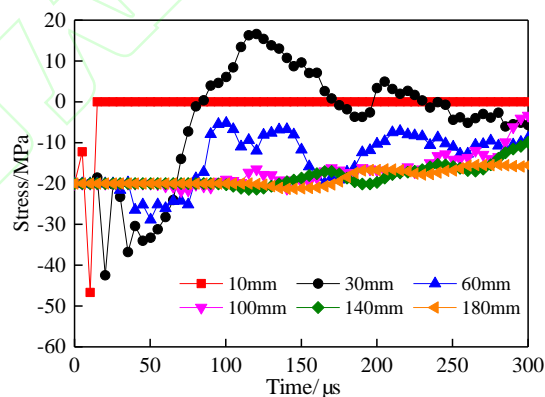


图 15 x 方向应力时程曲线

Fig.15 Stress time history curve of x direction

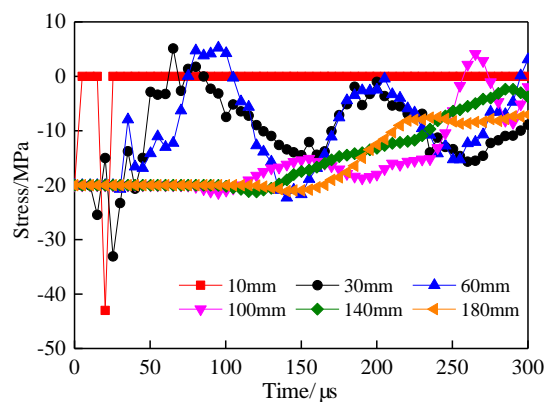


图 16 y 方向应力时程曲线

Fig.16 Stress time history curve of y direction

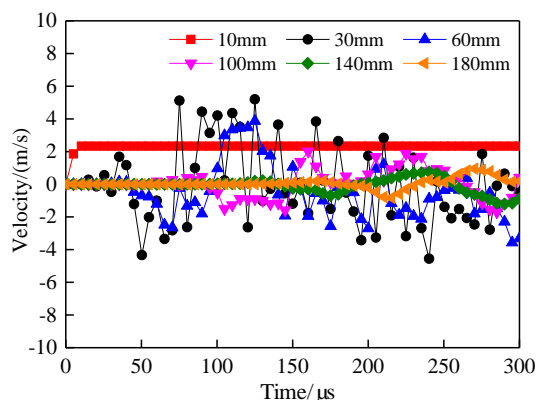


图 17 x 方向速度时程曲线

Fig.17 Velocity time history curve of x direction

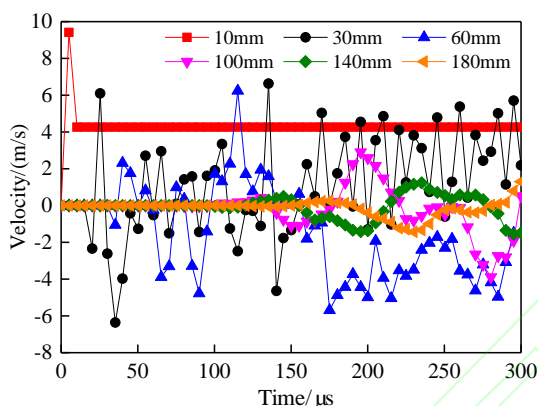


图 18 y 方向速度时程曲线

Fig.18 Velocity time history curve of y direction

对比同一监测点上的速度和应力时程曲线可知,质点在应力波作用下产生振动,质点起振时刻与应力波到达时刻一致。 x 方向监测点 7 处介质在气爆冲击载荷作用下瞬间达到抗压强度发生压缩破坏,承载应力得以释放,应力变为 0 恒定不变;监测点 8 处介质受到较大冲击应力的作用并发生屈服,之后回弹,应力逐渐减小;应力波随时间的推移向外传播,传到弱面时被反射和吸收,反射应力波为拉力波,煤体发生拉压累积破坏,应力波通过弱面后发生衰减,造成监测点处的速度和应力大幅度减小,曲线波动较小。 y 方向在爆孔边缘存在一个弱面,监测点 1 受弱面影响应力和速度发生突变,其后监测点的速度和应力时程曲线变化规律与 x 方向的规律比较接近。

6 结论

本文基于数字图像方法开发了对实际煤体图像识别处理的 Matlab 程序,建立了非均质煤体有限元模型,模拟了不同初应力条件下超临界

CO_2 气爆非均质煤体的致裂过程,分析了初应力及煤体中的弱面对超临界 CO_2 气爆裂隙演化和应力波传播的影响规律,得到以下主要结论:

(1) 弱面倾角相同时,弱面到爆孔中心距离越大,弱面对裂缝扩展的阻碍作用越大,穿过弱面的裂缝尺度和密度越小。

(2) 弱面到爆孔中心距离相同时,弱面倾角越大,弱面对裂缝扩展的阻碍作用越大(弱面倾角为 45° 时阻碍作用最大),穿过弱面的裂缝尺度和密度越小,应力波透射率越小,应力波透射率衰减度越大。

(3) 煤体受初应力作用时,主裂缝会沿最大初应力方向扩展,初应力对气爆裂缝的萌生和扩展有导向作用。

(4) 天然煤体中的弱结构面对超临界 CO_2 气爆致裂效果影响较大,弱面数量越多、形态越复杂,煤体上生成的气爆裂缝密度越大,可较好地提高煤体的致裂增透效果。

参考文献(References):

- [1] 刘貽军,姜建青.中国煤层气储层特征及开发技术探讨[J].天然气工业,2004(1):68-71+108. (LIU Yi-jun, LOU Jian-qing.Study on reservoir characteristics and development technology of coal-bed gas in China [J]. *Natural Gas Industry*,2004(1):68-71+108.(in Chinese))
- [2] 李友谊,靳小平.低渗透煤储层煤层气高效开采技术途径研究[J].中国资源综合利用,2019,37(2):84-86.(LI You-yi, JIN Xiao-ping.Study on high efficiency coalbed methane exploitation technology in low permeability coal reservoir[J].*China Resources Comprehensive Utilization*, 2019,37(2):84-86. (in Chinese))
- [3] 宋浩然,林柏泉,赵洋,等.各向异性和非均质性对煤层抽采钻孔瓦斯渗流的影响作用机制[J].西安科技大学学报,2019,39(3):461-468. (SONG Hao-ran, LIN Bo-quan, ZHAO Yang, et al. Effect mechanism of anisotropy and heterogeneity on gas seepage during coal seam drainage [J].*Journal of Xi'an University of Science and Technology*,2019,39(3):461-468.(in Chinese))
- [4] 宋红华,赵毅鑫,姜耀东,等.单轴受压条件下煤岩非均质性对其破坏特征的影响[J].煤炭学报,2017,42(12):3125-3132. (SONG Hong-hua, ZHAO Yi-xin, JIANG Yao-dong, et al.Influence of heterogeneity on the failure

- characteristics of coal under uniaxial compression condition [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017,42(12): 3125-3132.(in Chinese))
- [5] 贾慧敏.高煤阶煤岩孔隙结构分形特征研究[J].石油化工高等学校学报,2016,29(1):53-56+85.(JIA Hui-min.he fractal feature of the pore structure for high goal rank goal poroua media[J].*Journal of Petrochemical Universities*, 2016,29(1):53-56+85.(in Chinese))
- [6] 赵 瑜,李晓红,卢义玉,等.瓦斯压力对非均质煤岩抗压强度尺寸效应的影响[J].煤炭学报, 2009, 34(8): 1081-1085. (ZHAO Yu, LI Xiao-hong, LU Yi-yu, et al.Influence of gas pressure on compressive strength size effect of inhomogenous coal[J].*Journal of China Coal Society*, 2009,34(8):1081-1085.(in Chinese))
- [7] 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 Ke-ming, XIN Li-wei, WU Di..Experimental study on fracture mechanism of coal caused by supercritical CO₂ explosion[J].*Explosion and Shock Waves*,2018,38(2): 302-308.(in Chinese))
- [8] 孙可明,辛利伟,吴 迪,等.初应力条件下超临界 CO₂ 气爆致裂规律模拟研究 [J].振动与冲击,2018, 37(12): 232-238.(SUN Ke-ming, XIN Li-wei, WU Di, et al. Simulation of fracture law of supercritical CO₂ explosion under initial stress condition[J].*Journal of Vibration and Shock*,2018,37(12):232-238. (in Chinese))
- [9] 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(05):473-482.. (SUN Ke-ming, XIN Li-wei, WU Di, et al.Mechanism of fracture caused by supercritical CO₂ explosion under the impact of initial stress[J].*Chinese Journal of Solid Mechanics*,2017,38(05):473-482.(in Chinese))
- [10] 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 Ke-ming, XIN Li-wei, ZHANG Shu-cui, 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. (in Chinese))
- [11] Zhang Z X. *Rock Fracture and Blasting* [M]. Elsevier, 2016.
- [12] 刘晓蓬,陈健云,徐 强.混凝土重力坝爆炸荷载数值分析及抗爆性能研究[J].计算力学学报,2018,35 (2): 174-181. (LIU Xiao-peng, CHEN Jian-yun, XU Qiang. Numerical analysis and anti-knock property study of concrete dam subjected to underwater explosion [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*,2018,35 (2): 174-181.(in Chinese))
- [13] Johnson G R,Cook W H.Fracture charateristics of three metals subject to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1)31-48.
- [14] Holmquist T J, Johnson G R.A computational constitutive model for glass subjected to large strains, high strain rates and high pressures[J]. *Journal of Applied Mechanics*,2011, 78(5).
- [15] 张程娇,李晓杰,闫鸿浩,等.改进特征线法在水下爆炸正反演问题中的应用[J].计算力学学报,2017,34(2):251-256. (ZHANG Cheng-jiao, LI Xiao-jie, YAN Hong-hao, et al. Application of modified method of characteristics in forward and inversion simulations of underwater explosion [J].*Chinese Journal of Computational Mechanics* , 2017,34(2):251-256.(in Chinese))
- [16] Wittke W. *Rock Mechanics* [M]. Springer, 1990.
- [17] 赵安平,冯 春,郭汝坤,等.节理特性对应力波传播及爆破效果的影响规律研究 [J].岩石力学与工程学报,2018,37(9):2027-2036.(ZHAO An-ping, FENG Chun, GUO Ru-kun, et al.Effect of joints on blasting and stress wave propagation[J].*Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2018,37(9):2027-2036. (in Chinese))