

初应力条件下超临界  $\text{CO}_2$  气爆致裂规律研究<sup>\*</sup>孙可明<sup>\*\*</sup> 辛利伟 吴 迪 王金瓖

(辽宁工程技术大学力学与工程学院, 阜新, 123000)

**摘 要** 为研究地下爆破工程中初始地应力条件下超临界  $\text{CO}_2$  气爆的致裂规律, 利用自主研发的三轴加载式超临界  $\text{CO}_2$  气爆实验系统, 对不同应力组合工况下混凝土试件进行了超临界  $\text{CO}_2$  气爆致裂实验, 实验结果表明超临界  $\text{CO}_2$  气爆爆破峰值压力低且高压持续时间长, 致裂过程不同于传统炸药爆破, 分为动态和准静态过程: 应力波将气爆孔附近介质压碎形成粉碎区, 在环向拉应力作用下粉碎区周围介质产生径向裂隙的动态过程, 高压  $\text{CO}_2$  气体进入裂隙形成气楔, 促使裂隙继续扩展的准静态过程, 得到了气爆后试件沿最大初始压应力方向开裂的规律. 通过理论计算的方法分析了初应力作用下气爆过程中介质应力状态的变化规律, 揭示了初应力影响裂纹起裂和扩展的机理: 位于气爆孔最大初始压应力方向的介质产生初始环向压应力最小, 在超临界  $\text{CO}_2$  径向冲击产生的环向拉应力作用下首先发生开裂; 位于气爆孔最小初始压应力方向介质中初始环向压应力最大, 开裂所需的径向冲击压力增大, 开裂滞后; 垂直裂隙方向的应力抑制裂隙的张开而阻碍  $\text{CO}_2$  气体的进入, 同时增大了裂隙扩展所需的气楔压力, 气楔作用效果大幅减弱, 对裂隙扩展的阻碍作用显著. 裂隙的扩展速度与扩展距离呈“S 型”曲线关系, 初始压应力越大, 裂隙扩展相同距离降低的速度值越大, 且压碎区和裂隙扩展范围逐渐减小.

**关键词** 初始应力, 超临界  $\text{CO}_2$ , 气爆, 应力波, 裂纹扩展

## 0 引言

爆破致裂法具有效率高、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<sup>[1-6]</sup>. 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  $\text{CO}_2$  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, 可应用于含有甲烷和粉尘的煤炭开采和低渗煤层的增透, 俄罗斯、波兰等国利用  $\text{CO}_2$  爆破致裂技术提高煤层注水率解决煤矿安全问题, 并取得显著成效<sup>[7]</sup>, 周西华等<sup>[8-6]</sup>进行了液态  $\text{CO}_2$  预裂增透的工业性试验, 取得了较好的效果. 超临界  $\text{CO}_2$  具有近似液体的密度、近似气体的粘度和对温压条件敏感等固有属性, 使得  $\text{CO}_2$  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, 本课题组进行了大量超临界  $\text{CO}_2$  气爆致裂实验发现: 超临界  $\text{CO}_2$  的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<sup>[17]</sup>, 相对于化学炸药爆破, 气爆能量来自于  $\text{CO}_2$  的物理变化, 不涉及高温因素, 峰值压力稳定且压力持续时间长, 有利于裂隙的发育和扩展; 利用超临界  $\text{CO}_2$  对温压条件

的敏感性可以进一步控制爆破效果, 且  $\text{CO}_2$  不属于管制品, 其工业应用前景广阔, 在地面控制爆破拆除、珍贵石材的开采等工程中也获得了较好的效果<sup>[18-22]</sup>.

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显著, 所以研究初始应力条件下爆破致裂规律意义重大. 目前很多学者对初始应力条件下的化学爆破做了研究, 肖正学<sup>[23]</sup>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纹发展有导向作用; 刘殿书<sup>[24]</sup>等用激光动光弹的实验手段研究了初始应力对应力波的传播的影响, 得到破碎区在初始压应力方向会增大; 而朱万成<sup>[1]</sup>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纹的萌生与扩展; 王长柏<sup>[25]</sup>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<sup>[26]</sup>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

<sup>\*</sup> 2016-12-26 收到第 1 稿, 2017-05-12 收到修改稿.

<sup>\*\*</sup> 通讯作者. Tel: 0418-3350954, E-mail: sskkmm11@163.com.

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<sup>[27]</sup>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<sup>[28]</sup>、Donze<sup>[29]</sup>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.气爆技术相对较新,目前关于初应力对气爆裂纹扩展的研究很少,由于超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂效果好且有良好的可控性,有巨大应用前景,初应力对超临界 CO<sub>2</sub> 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,超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂技术的机理研究落后于实践.鉴于此,本文利用自主研发的超临界 CO<sub>2</sub> 气爆发生装置,借助动态应变仪和工业窥镜,

开展了初始应力条件下超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律的实验研究.

## 1 初应力条件下超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验

### 1.1 伺服加载式超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验系统

选用 DHS-400-2000KN 型微机控制电液伺服三轴加载室作为初始应力条件下超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂实验的加载平台,并自主研发了超临界 CO<sub>2</sub> 气爆发生装置,以实现不同温度和压力条件下的超临界 CO<sub>2</sub> 可控爆破,使用动态应变仪实时采集预埋应变传感器信号以监测气爆过程中监测点的应变变化情况,从而反推爆破过程中介质状态的变化和受载情况,初应力条件下超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验现场如图 1(a)所示.

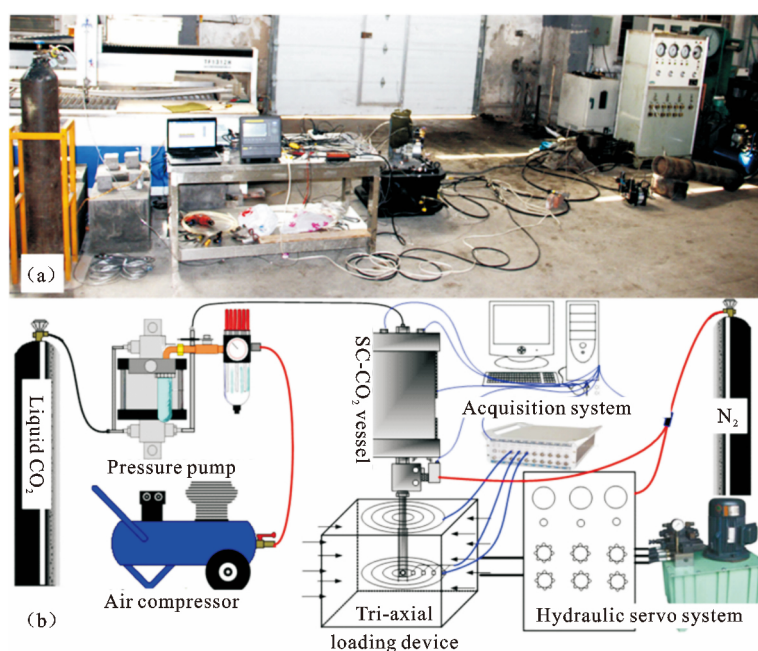


图 1 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验系统

Fig. 1 SC-CO<sub>2</sub> explosion test system

伺服加载式超临界 CO<sub>2</sub> 气爆实验系统包括:提供液压动力的泵站,集成压力调节和压力采集的数控液压稳压控制柜(可较好的吸收爆破、应力波等产生的压力波动),可抗爆破冲击的三轴加载室,具有储液功能的超临界压力釜和液态 CO<sub>2</sub> 瓶,将液态 CO<sub>2</sub> 增压至超临界压力釜的 CO<sub>2</sub> 增压泵,计算机、动态应变仪、传感器等部件组成的数字采集控制单元,实验系统组装如图 1(b)所示.

### 1.2 气爆模型的制作

选用 0.5 mm 以下石英砂为骨料,与水泥按照

体积比 6 : 1 的配比掺适量水搅拌均匀,浇筑于 400 × 400 × 400 mm 的专用混凝土立方体模具,浇筑过程中在预定深度填埋有防水处理的应变传感器和传感线圈,传感器可测环向和切向两方向的应变,其响应频率大于 200 kHz.在以爆破点为圆心的同心圆上布置传感线圈,通过线圈电阻的变化和断开时间的先后顺序确定裂纹扩展速度.在气爆试件浇筑的同时用相同的材料制作 100 × 100 × 100 mm 的小试件,用于混凝土强度、弹性模量等物理力学参数的测试;所有试件硬化 48 小时后进行脱模,并在相同条

件下养护 21 天,部分试件如图 2(a)所示.



图 2 混凝土试件的制作与爆破

Fig. 2 Fabrication and blasting of concrete specimen

测得试件的弹性模量  $E$ 、单轴抗拉强度  $\sigma_t$ 、单轴抗压强度  $\sigma_c$ 、密度  $\rho$  和泊松比  $\mu$  如表 1 所示.

表 1 混凝土物理力学参数

Table 1 Physical mechanics parameters of concrete

$E(\text{GPa})$	$\sigma_t(\text{MPa})$	$\sigma_c(\text{MPa})$	$\rho(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\mu$
5.2	0.45	4.32	2200	0.27

1.3 实验过程

(1) 将试件吊装到三轴加载室,安装加载板(图 2(a)所示),连接传感器和动态应变仪并开机检测.

(2) 启动微机控制电液伺服系统,按照预定应力值施加载荷,不同实验载荷方案如表 2 所示.

表 2 实验方案

Table 2 Experimental program

No.	$P_0(\text{MPa})$	$T_0(^{\circ}\text{C})$	$\sigma_x(\text{MPa})$	$\sigma_y(\text{MPa})$
a	22	35	0	0
b	22	35	1.0	1.0
c	22	35	1.0	2.0
d	22	35	1.5	2.0

(3) 在试件中心钻取  $\phi 16\text{ mm}$  气爆孔,安装超临界  $\text{CO}_2$  气爆发生器使气爆头插入爆孔预定深度.

(4) 打开采集控制系统,用  $\text{CO}_2$  冲洗出气路中的空气,关闭爆破阀门后注入液态  $\text{CO}_2$  并升温直至预定温压条件.

(5) 调试动态应变仪并开始采集,启动爆破,爆

破瞬间如图 2(b)所示.

(6) 爆破后使用高清工业窥镜观察和测量爆孔内部情况,统计并记录裂隙开裂等信息.

为得到气爆时试件受到的冲击压力,将高频压力传感器固定于  $\phi 16\text{ mm}$  的钢管,安装在爆破喷嘴处并启动爆破.在起爆压力  $22\text{ MPa}$ 、温度  $35^{\circ}\text{C}$  时测得的气体冲击压力峰值达  $19.8\text{ MPa}$ ,即超临界  $\text{CO}_2$  从压力釜到爆破喷嘴的压力损失很小,试件受到的冲击压力远超试件的抗压强度,且超过试件抗压强度压力的持续时间较长.

2 实验结果分析

按照表 2 方案进行超临界  $\text{CO}_2$  气爆实验,得到了不同初始压应力条件下超临界  $\text{CO}_2$  气爆后的试件破坏形貌(图 3 所示).

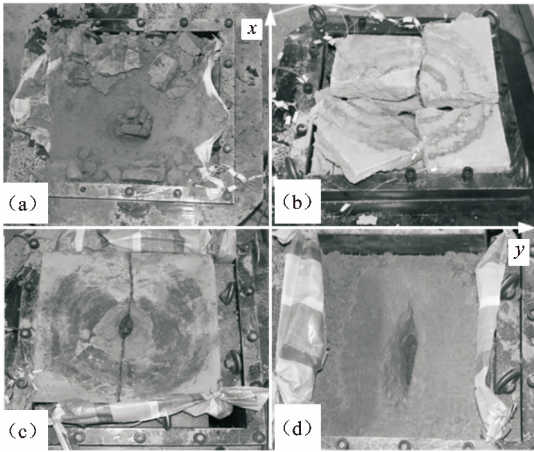


图 3 裂隙形貌分布图

Fig. 3 Fracture morphology distribution map

气爆后 a 试件形成以气爆孔为中心直径  $320\text{ mm}$  的破坏区和直径为  $78\text{ mm}$  的爆破空腔,爆破成块相对较小;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,并贯穿整个试件,通过工业窥镜可以观察到爆破孔内形成直径  $55\text{ mm}$  的爆破空腔;c 试件爆后产生两条沿  $y$  方向即初始压应力最大方向的裂隙,通过气爆孔相连并贯通整个试件,气爆孔内部形成长  $65\text{ mm}$ 、宽  $30\text{ mm}$  的椭圆型爆破空腔;d 试件爆后也形成沿  $y$  方向的两条裂隙,裂隙以气爆孔为中心向两个方向延伸,对称分布的两条裂隙总长  $330\text{ mm}$ ,未扩展到试件边缘,爆孔中心形成长  $150\text{ mm}$ 、宽  $35\text{ mm}$  的纺锤形爆破空腔.

通过分析不同初始压应力条件下超临界  $\text{CO}_2$  气



爆后试件的破坏形貌特征,可以得到初始压应力对超临界  $\text{CO}_2$  气爆过程中的裂纹扩展具有导向作用,裂纹扩展主方向与最大初始压应力的主方向一致;初始压应力载荷越大,裂纹扩展的总长度越小,垂直裂隙扩展主方向的应力载荷制约裂隙的扩展;在气爆形成贯通试件的裂隙时,爆破空腔随初始压应力的增大而减小,在形成未贯通试件的裂隙时,爆破空腔有所增大,是因为形成贯通裂隙时,高压  $\text{CO}_2$  从裂隙中溢出,压力得到释放,不足以使气爆空腔继续扩大,没有贯通裂隙时  $\text{CO}_2$  的高压持续时间较长,促使空腔进一步扩大.

通过处理动态应变仪采集的气爆过程的动态数据,得到了气爆时试件内部应变变化规律,图 4 为气爆 b 试件时内部介质径向应变时程曲线. 从图中分析得到超临界  $\text{CO}_2$  从气爆喷嘴喷出作用于气爆孔壁,在试件内部形成应力波,由于液压稳压系统干预,试件边界处无明显应力波反射现象. 在 250 mm 深的气爆孔内爆破边长为 400 mm 的试件形成的应力波可认为以柱面波的形式向外传播,传播过程中介质的变形和受力示意图如图 5 所示.

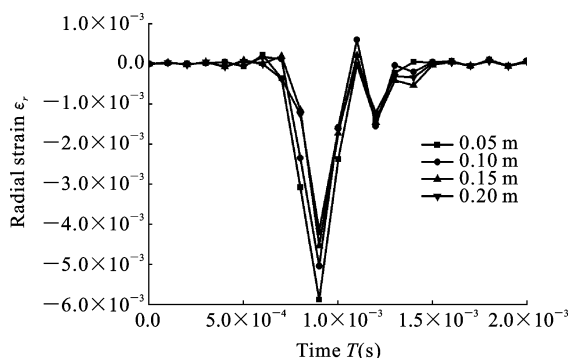


图 4 径向应变时程曲线

Fig. 4 Radial strain time history curve

联合图 4 和图 5 分析可以得到, A 单元体处于应力波作用下的压缩区,对应图 4 中 0.0091 s 左右的状态,即  $\sigma_r$  为压应力,介质向外运动必然产生环向拉应力,即  $\sigma_\theta$  为拉应力,在  $\sigma_r$  和  $\sigma_\theta$  的共同作用下产生径向裂隙;由于柱面应力波为纵波,介质在压应力波峰过后回弹会形成拉伸区,即图 5 中 B 单元体的所处位置,  $\sigma'_r$  为拉应力,对应图 4 中 0.0011 s 左右的应力,有加剧破坏程度的作用. 图 4 显示距离气爆孔中心 0.05 m 处的介质未出现拉应变,是因为在超临界  $\text{CO}_2$  的冲击作用下介质已经产生粉碎性破

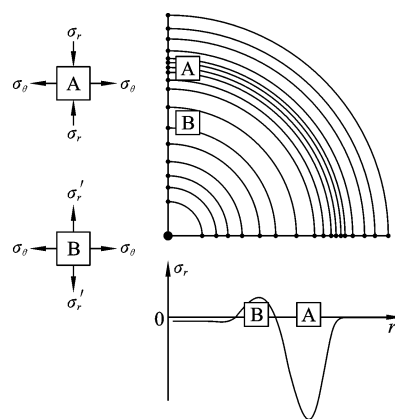


图 5 应力波作用下的单元体

Fig. 5 Unit body under impact of stress wave

坏.

图 6 为不同试件的不同位置的应变峰值规律,从中可以看出径向应变峰值随着与气爆孔距离的增大逐渐减小,变化规律符合负指数形式,其中 a 试件的应变峰值下降最快,是因为 a 试件没有初始载荷,粉碎性破坏范围较大,试件的粉碎性破坏消耗较多的能量,致使应力波能量迅速降低,相应的应力和应变峰值迅速下降;由于 b 试件受到初始压应力载荷作用,相同气爆载荷产生的应变峰值下降速度仅次于 a 试件的; c、d 两试件 y 方向的应变峰值小于各自 x 方向距离气爆孔相同距离处的应变峰值,即同一次气爆过程中压应力较大方向应变峰值较小,是因为初始压力大的方向介质被压密的严重,相同能量产生的应变峰值较小; d 试件两个方向的初始应力差小于 c 试件的,且不同方向相同距离处的应变峰值的差也小于 c 试件的,说明以增大较小初应力

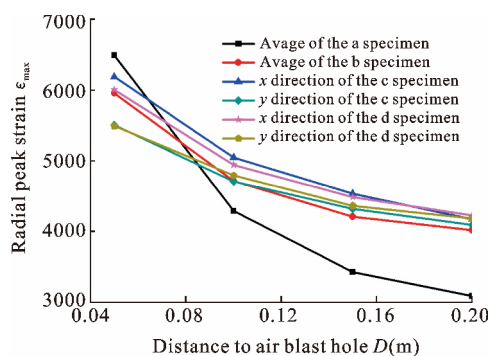


图 6 应变峰值与到气爆孔距离的关系曲线

Fig. 6 Relationship between peak strain and distance to the explosion hole

而减小两个方向初应力差的方式,使两方向的介质被压密程度差异减小,从而使相同爆破条件在不同方向产生的应变峰值之差减小;d 试件与 c 试件相比  $x$  方向初应力增大,所以  $x$  方向的应变峰值小于 c 试件相同位置的,但  $y$  方向初始应力相同,d 试件的应变峰值大于 c 试件相同位置的,原因是 d 试件破坏程度低,消耗于介质破坏的能量相对较少。

图 7 是根据预埋金属丝断裂时间得到的气爆过程中裂纹扩展速度曲线,可以看出随着裂纹扩展距离的增大,扩展速度逐步降低,且降低的速率先增大后减小呈“S 型”曲线,关系式为:

$$V = V_1 + \frac{V_h - V_1}{1 + e^{(D - D_b)/K}} \quad (1)$$

式中  $V, V_h, V_1, D, D_b, K$  分别为裂纹的扩展速度、最高开裂速度、最低开裂速度(m/s),裂纹距离气爆孔的距离(m),粉碎区和裂隙区交界到气爆孔的距离(m),与材料性质等有关的系数。

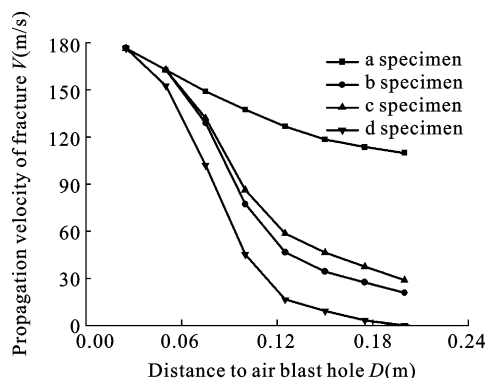


图 7 裂隙扩展速度与扩展距离关系曲线

Fig. 7 Fracture expansion velocity and extension distance curve

裂隙扩展速度随着初始载荷的增大,裂纹的扩展速度整体降低,但是初始扩展速度基本相同,结合图 6 分析得出相同温压条件的超临界 CO<sub>2</sub> 冲击气爆孔壁形成的峰值应变趋于相同,初始的裂纹发育和扩展是由应力波造成的,由于应力波的传播速度远超裂纹扩展速度,且应力波能量迅速衰减,不足以使得裂纹持续高速扩展,裂纹扩展速度迅速降低,之后高压 CO<sub>2</sub> 气体进入裂隙,形成气楔促使裂隙进一步扩展,高压气体的加载速度远小于应力波传播速度,所以对应的扩展速度也较低。距离爆孔超过 0.08 m 外的区域,a 试件裂隙扩展速度要远高于其它试件,因为 a 试件初始载荷小,应力波冲击将孔壁附近介

质压碎产生较大粉碎区,形成大量通道,CO<sub>2</sub> 压力迅速消散,其它试件由于初始应力的存在,粉碎区的扩展受到抑制,高压 CO<sub>2</sub> 消散较慢,岩石的抗拉强度远小于抗压强度,所以在 CO<sub>2</sub> 气楔作用下继续扩展,但是扩展速度大幅低于应力波作用时裂隙的扩展速度。c 试件远区的裂隙扩展速度高于 b 试件是因为 c 试件只生成 2 条裂隙,相比于 4 条裂隙的 b 试件,CO<sub>2</sub> 消散缓慢,在较高压力的气楔作用下裂隙扩展速度也较快,d 试件由于  $x$  方向的初始压应力增加,大幅抑制了 CO<sub>2</sub> 气楔作用,致使裂隙沿  $y$  方向扩展困难。

### 3 初应力对超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律影响机理分析

岩石是一种脆性材料,具有抗压不抗拉的特性,其抗拉强度一般仅有抗压强度的 1/10 左右,且超临界 CO<sub>2</sub> 气爆相对于化学炸药爆破是一种峰值压力低且作用时间长的物理爆破,所以在气爆孔周围产生较小范围的压缩破坏,被爆岩石的主要破坏形式是受拉破坏<sup>[30]</sup>,地下工程的岩石爆破破碎是静态地应力和气爆产生的动态应力共同作用的结果。在气爆产生的冲击压力的作用下,气爆孔周围的介质产生压缩应力波,并以柱面波的形式向外传播,气爆孔周围介质受到的环向总应力  $\sigma_T$  是由初始静应力和气爆动态应力叠加的,即:

$$\sigma_T = \sigma_{\theta s} + \sigma_{\theta d} \quad (2)$$

式中  $\sigma_{\theta s}$  为初始应力引起的环向应力(MPa), $\sigma_{\theta d}$  为气爆产生的动态环向应力(MPa)。

气爆产生的作用于孔壁上的初始冲击压应力为  $P_d$ ,实验测得为 19.8 MPa。岩石弹性区内,爆炸应力波峰值  $P$  的衰减规律为:

$$P = \sigma_{rd} = P_d \left( \frac{a}{r} \right)^\alpha \quad (3)$$

式中  $\sigma_{rd}$  为动态径向应力(MPa); $a$  为爆孔半径(m); $r$  为计算点到爆孔中心的径向距离(m); $\alpha$  为应力波的衰减指数, $\alpha = 2 - \mu / (1 - \mu)$ ,其中  $\mu$  为岩石的泊松比。

动态环向应力  $\sigma_{\theta d}$  和径向应力  $\sigma_{rd}$  的关系为<sup>[31]</sup>:

$$\sigma_{\theta d} = -(1 - 2b^2) \sigma_{rd} \quad (4)$$

式中  $b$  为岩石的横波波速与纵波波速之比,即  $b = \sqrt{(1 - 2\mu) / [2(1 - \mu)]}$ ,其中的“ $-$ ”代表拉应力。

半径为 8 mm 的气爆孔相对于 400 × 400 mm 的试件尺寸很小,可认为是小孔影响面内应力分布。初应力条件如图 8 所示,当试件只受到  $\sigma_x$  作用时,

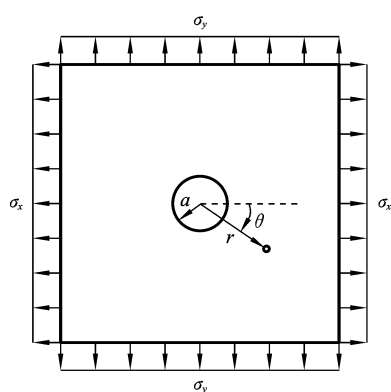


图8 初始载荷作用示意图

Fig. 8 Action schematic of initial load

由弹性力学知识可得<sup>[32]</sup>:

$$\sigma_{rs} = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_y}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \left(1 - 3 \frac{a^2}{r^2}\right) \cos(2\theta) \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta s} = \frac{\sigma_x}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_y}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) \quad (6)$$

当试件只受  $\sigma_y$  作用时,将式(5)、式(6)中的  $\sigma_x$  换为  $\sigma_y$ ,并将  $\theta$  旋转  $\pi/2$ ,得到的式子分别与式(5)、式(6)叠加,即为试件同时受两个方向载荷作用时(图8所示)气爆孔附近的应力分布规律,径向应力和环向应力分布为:

$$\begin{aligned} \sigma_{rs} = & \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \\ & + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \left(1 - 3 \frac{a^2}{r^2}\right) \cos(2\theta) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sigma_{\theta s} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \cos(2\theta) \quad (8)$$

将表2所示初始应力条件代入式(8),得到实验条件下气爆孔附近的环向应力均为压应力,分布规律如图9所示。

将式(3)、(4)、(8)代入式(2),并令  $\sigma_T = \sigma_r$  求得开裂半径  $r$  的大小,即不同应力组合下裂纹的扩展范围,表2所示条件下气爆冲击载荷作用产生的裂隙范围如图10所示。

由图9可知:在表2所示初始应力条件下,气爆孔附近最大压应力方向(即竖直方向)介质的环向应力最小,在最小压应力方向(即水平方向)介质的环向应力最大且大于竖直方向的初始载荷,且两个方向初始应力载荷差值越大,环向应力差值也越大。气爆孔内壁受到均匀冲击压力  $P_d$  作用后,位于气爆孔竖直方向的介质由于环向压应力较小,介质在较低

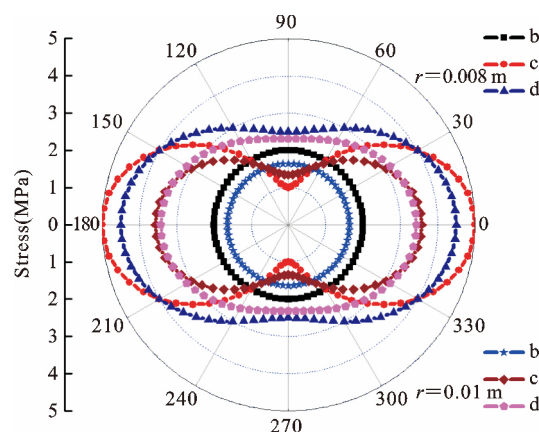


图9 气爆孔附近的环向应力分布图

Fig. 9 Circumferential stress distribution near the explosion hole

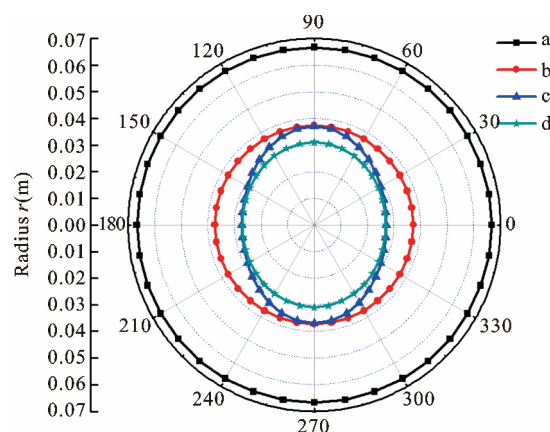


图10 不同初应力组合下裂纹扩展范围

Fig. 10 Range of fracture propagation under different initial stress

径向冲击应力作用下发生破坏,而位于水平方位的介质受到较大环向压应力的作用,介质抗径向冲击强度增加,所以在竖直方向介质优先达到并超过临界载荷而发生压缩破坏,产生初始裂隙,即试件在压应力最大的方向首先开裂。随应力波的传播,裂隙进一步发育和扩展,形成图10所示的破坏区,对比a、b和d三种初始应力条件下裂隙分布可得:初始压应力越大,爆破冲击作用产生的裂隙范围越小。对比b、c和d三种条件下裂隙分布可得:水平和竖直两个方向的初始压应力比值越大,裂隙分布呈现的椭圆形越扁,理论规律与实验结果一致,在应力波过后,高压  $\text{CO}_2$  进入裂隙促使裂隙进一步扩展,最终形成如图3(c)、3(d)所示破坏形貌。

在实际气爆过程中,由于介质破坏形成径向裂隙,裂隙形成后在尖端会有应力集中促使裂隙高速扩展,扩展过程中环向应力得到释放,周边裂隙因扩展所需的环向应力不足而减缓扩展,致使优先开裂的裂隙迅速成为主裂隙,分布如图10所示。超临界 CO<sub>2</sub> 气爆相对炸药爆破峰值爆破压力低,所以产生的裂隙数目较少,但是超临界 CO<sub>2</sub> 爆生气体量大,所以高压持续时间长,其进入应力波作用生成的裂隙(如图11所示),形成气楔,促使裂隙进一步扩展,气体作用于裂隙面,使得主裂隙张开度增加,则挤压周边裂隙,阻碍高压气体进入,使周边裂隙扩展缓慢甚至不扩展,垂直于裂隙扩展方向的初始应力使得裂隙趋于闭合,导致裂隙张开所需气体压力增大,加之高压气体楔入困难,裂隙扩展缓慢或不扩展,即垂直于裂隙扩展方向的初始载荷对裂隙的扩展影响较大。随 CO<sub>2</sub> 气体的膨胀和消散,气压下降裂纹扩展减缓直至停止,形成最终的破坏形貌。

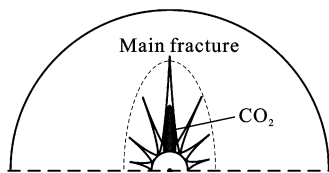


图 11 气楔作用示意图

Fig. 11 Gas wedging action schematic

### 3 结论

(1) 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆不同于传统炸药爆破,具有爆破峰值压力低、持续时间长的特点,分为动态和准静态过程:超临界 CO<sub>2</sub> 冲击爆孔壁形成应力波将气爆孔附近介质压碎形成粉碎区,粉碎区周围介质在动态环向拉应力的作用下产生径向裂隙的动态过程;应力波作用之后高压 CO<sub>2</sub> 气体进入裂隙形成气楔,促使动生裂隙继续扩展直至最终破坏状态的准静态过程。

(2) 气爆后试件沿最大初始压应力方向开裂,垂直于裂隙开裂方向的初始压应力对裂隙扩展的阻碍作用明显。位于气爆孔最大初始压应力方向介质的初始环向压应力最小,在超临界 CO<sub>2</sub> 径向冲击产生的环向拉应力作用下,最先达到临界载荷而发生开裂破坏,环向拉应力得到释放,减弱周边介质的开裂;位于气爆孔最小初始压应力方向介质中初始环向压应力最大,介质开裂所需的径向冲击压力增大,

开裂滞后。垂直裂隙方向的初始压应力抑制裂隙的张开而阻碍高压 CO<sub>2</sub> 气体的进入,同时增大了裂隙扩展所需的气楔压力,气楔作用效果大幅减弱,对裂隙扩展的阻碍作用显著。

(3) 裂隙的扩展速度与扩展距离呈“S型”曲线关系,初始应力越大,扩展相同距离裂隙的扩展速度降低越大,压碎区和裂隙扩展范围逐渐减小,相同范围的介质粉碎性破坏消耗的能量远大于介质开裂所需能量。利用超临界 CO<sub>2</sub> 气爆峰值压力小,爆生气体量大的特点可以增大裂隙扩展范围,提高能量利用率。

(4) 在含有初始地应力的爆破工程中,应适当扩大最大主应力方向的气爆孔间距,在保证致裂效果的基础上减少钻孔等工程量来增加爆破效率。

通过实验和理论分析得到的结论揭示了初应力对超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律的影响机理,但由于爆破工程一般应用于天然岩体的致裂,而岩体内存在的大量节理裂隙、应力环境更为复杂等自然因素均影响致裂效果,因此需要更完善的研究才能应用于实际工程。

### 参考文献

- [1] 魏晨慧,朱万成,白羽,李帅. 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 C H, Zhu W C, Bai Y, Li S. 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. (in Chinese))
- [2] 李夕兵,周子龙,王卫华. 岩石破碎工程发展现状与展望[C]. 2009-2010 岩石力学与岩石工程学科发展报告,北京,2010:142-149. (Li X B, Zhou Z L, Wang W H. The status and prospect of development in rock fragmentation engineering[C]. Report on the Development of Rock Mechanics and Rock Engineering Discipline in 2009-2010, Beijing, 2010:142-149. (in Chinese))
- [3] 刘建,刘泽功,高魁,薛俊华,姜亚北. 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 J, Liu Z G, Gao K, Xue J H, Lou Y B. 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. (in Chinese))
- [4] 王伟,李小春,袁伟,王奇智,李桂峰. 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 W, Li X C, Yuan W, Wang Q Z, Li G F. 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. (in Chinese))
- [5] 姚金阶. 基于爆炸裂隙分形维的损伤岩体爆破参数计算[J]. 固体力学学报,2008,29:95-98. (Yao J J. Damage rock blasting parameter calculate based on blasting fissure fractal dimensions[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics,2008,29:95-98. (in Chinese))
- [6] 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 J H, Zhang J S, Li X P. 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. (in Chinese))
- [7] 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.
- [8] 周西华,门金龙,宋东平,李诚玉. 液态 CO<sub>2</sub> 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 X H, Men J L, Song D P, Li C Y. Research on optimal borehole parameters of antireflection in coal seam by liquid CO<sub>2</sub> blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(3):523-529. (in Chinese))
- [9] 吴锦旗. 液态 CO<sub>2</sub> 预裂强化预抽消突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 J Q. Liquid CO<sub>2</sub> presplitting reinforcement pre-drainage outburst elimination application in outburst coal seam mining[J]. Coal and Chemical Industry,2015,38(7):105-109. (in Chinese))
- [10] 周西华,门金龙,王鹏辉,白刚. 井下液态 CO<sub>2</sub> 爆破增透工业试验研究[J]. 中国安全生产科学技术,2015,11(9):76-82. (Zhou X H, Men J L, Wang P H, Bai G. Industry experimental research on improving permeability by underground liquid CO<sub>2</sub> blasting[J]. Journal of Safety Science and Technology,2015,11(9):76-82. (in Chinese))
- [11] 赵立朋. 煤层液态 CO<sub>2</sub> 深孔爆破增透技术[J]. 煤矿安全,2013,44(12):76-81. (Zhao L P. Technology of liquid carbon dioxide deep hole blasting enhancing permeability in coal seam[J]. Safety in Coal Mines,2013,44(12):76-81. (in Chinese))
- [12] 王滨. 运用 CO<sub>2</sub> 爆破技术增加煤层透气性的研究[J]. 水利采煤与管道运输,2015,2015(2):9-11. (Wang B. Study on increasing coal seam permeability by CO<sub>2</sub> blasting technology[J]. Hydraulic Coal Mining and Pipeline Transportation,2015,2015(2):9-11. (in Chinese))
- [13] 李志强. CO<sub>2</sub> 预裂爆破增透技术在瓦斯抽采中的应用[J]. 山西焦作科技,2014,2014(7):30-40. (Li Z Q. Application of CO<sub>2</sub> presplit blasting anti-reflection technology in gas extraction[J]. Shanxi Coking Coal Science and Technology,2014,2014(7):30-40. (in Chinese))
- [14] 杨晓国. CO<sub>2</sub> 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 X G. Application of presplitting and permeability-increasing technique by CO<sub>2</sub> to high-gas and low-permeability coal seam[J]. China Coal,2015,41(4):122-126. (in Chinese))
- [15] 赵龙,王兆丰,孙矩正,涂冬平. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层中的应用[J]. 煤炭科学技术,2016,44(3):75-79. (Zhao L, Wang Z F, Sun J Z, Tu D P. Application of permeability improvement technology with liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam[J]. Coal Science and Technology,2016,44(3):75-79. (in Chinese))
- [16] 李宝华. CO<sub>2</sub> 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 B H. Application of presplitting technique by CO<sub>2</sub> to gas extraction in Changcun coal[J]. Coal,2015,24(9):53-54. (in Chinese))
- [17] 孙可明,辛利伟,张树翠,李天舒,吴迪. 超临界 CO<sub>2</sub> 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 K M, Xin L W, Zhang S C, Li T S, Wu D. 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))
- [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, Geskin L G. Car-dox 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 Z X. Liquid carbon dioxide cartridge and site test[J]. Blasting, 1994, 6(3): 72-74. (in Chinese))
- [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 Z. Application of carbon dioxide blasting technique in coal mines[J]. Coal Technology, 2007, 26(8): 26-27. (in Chinese))
- [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, 390(12): 46-47. (Zhao H Y. Application of carbon dioxide blasting technique in expressway construction [J]. Transport World, 2016, 390(12): 46-47. (in Chinese))
- [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 Z X, Zhang Z C, Li D M. The influence of initial stress field on blasting[J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(5): 497-501. (in Chinese))
- [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 D S, Wang W F, Yang L J, et al. Holophotoelasticity study on mechanism of blasting under initiative stress field[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(6): 612-614. (in Chinese))
- [25] 王长柏, 李海波, 谢冰, 夏祥, 莫振泽, 邹飞. 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 C B, Li H B, Xie B, Xia X, Mo Z Z, Zou F. Analysis on influencing factors of blasting crack expansion[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(10): 31-61. (in Chinese))
- [26] 杨立云, 杨仁树, 许鹏, 宋永威. 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 L Y, Yang R S, Xu P, Song Y W. 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. (in Chinese))
- [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. (Li C C. Numerical Study on Crack Propagation Mechanism of Rock Under Dynamic Loading[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese))
- [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. (Guo X J. A Study of Fracture Mechanisms in Brittle Materials Under Borehole Blasting[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese))
- [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] Mchugh S. Crack extension caused by internal gas pressure compared with extension caused by tensile stress[J]. International Journal of Fracture, 1983, 21(3): 163-176.
- [31] 孙长寿. 由矿岩性质确定爆破参数的研究与应用[J]. 有色金属, 1994, 1: 32-34. (Sun C S. Research and application of determining blasting parameters from ore and rock[J]. Youshe Jinshu, 1994, 1: 32-34. (in Chinese))
- [32] 吴家龙. 弹性力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011. (Wu J L. Elasticity[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese))

## Mechanism of Fracture Caused by Supercritical CO<sub>2</sub> Explosion under the Impact of Initial Stress

Keming Sun    Liwei Xin    Di Wu    Jinyu Wang

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

**Abstract** A customized triaxial loading explosion system is developed to investigate concrete fractures under coupled action. The supercritical CO<sub>2</sub> explosion experiments are carried out to explore the process of crack propagation with initial stress. The experiments indicate low peak pressures and long durations of high pressure during the explosion, which are different from the traditional explosion. Stress of the medium and mechanism of crack propagation are studied in the process with initial stress. The process is divided into two stages, i. e. the dynamic stage and the quasi-static stage. During the first stage, the medium near a blasting hole is crushed, a crush zone comes into being, and a radial crack is formed outside the crush zone due to the circumferential tensile stress. Then the high-pressure CO<sub>2</sub> diffuses into the fracture and forms a gas wedge, so cracks continue to extend. It is found that cracks form in the direction of the maximum initial stress. The initial circumferential compressive stress of the medium in that direction is the minimum, and therefore, the specimen is cracked because of the tensile stress caused by supercritical CO<sub>2</sub>. The initial circumferential compressive stress of the medium in the vertical direction is the highest, so a sufficiently high stress is required to cause cracks, leading to a delay in crack initiation. The stress in the vertical fracture direction prevents gas from diffusing, and a higher pressure is needed to form the wedge. Influence of the wedge is therefore weakened, and the crack propagation is considerably hindered. The velocity of crack propagation follows an S-shaped curve with the distance from the hole. At the same distance in propagation, the greater is the initial stress, the greater is the velocity decline, and the more reduced are the crush zone and crack area. Above all, it is suggested that the distance between holes is broadened and the hole size is reduced to improve the efficiency of explosion with initial stress.

**Key words** initial stress, supercritical CO<sub>2</sub>, gas explosion, stress wave, crack propagation