

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.020

## CO<sub>2</sub> 相变致裂应力波传播及影响规律试验研究\*

何志坚<sup>1</sup>,张诗童<sup>1,2</sup>,蒋楠<sup>1,3</sup>,罗学东<sup>1,3</sup>,雷宇<sup>1</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院,武汉 430074;2. 绿城中国控股有限公司,杭州 310012;

3. 江汉大学 爆破工程湖北省重点实验室,武汉 430024)

**摘 要:** 为探究 CO<sub>2</sub> 相变致裂应力波传播及影响规律,基于自主研发的三向应变测试装置,设计了 CO<sub>2</sub> 相变致裂应力波测试方案。利用动态应变测试系统采集 CO<sub>2</sub> 相变致裂过程中的应变信号,分析了 CO<sub>2</sub> 相变激发的应力波在岩体中的传播与影响规律。研究表明:射流方向和垂直射流方向的峰值应力随传播距离的增大均呈指数型衰减,射流方向峰值应力大于垂直射流方向的峰值应力;CO<sub>2</sub> 充装量与定压剪切片厚度是影响 CO<sub>2</sub> 相变致裂应力波的重要因素,剪切片厚度一定时,峰值应力随 CO<sub>2</sub> 充装量增加而增大,但增大速率逐渐降低;CO<sub>2</sub> 充装量一定时,峰值应力随剪切片厚度增加而增大,且呈持续增长趋势。

**关键词:** CO<sub>2</sub> 相变致裂; 动态应变测试; 应力波

中图分类号: TD235 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2022)03-0133-06

## Experimental Investigation on Propagation and Influence Law of Stress Wave Induced by CO<sub>2</sub> Phase Transition for Rock Fracturing

HE Zhi-jian<sup>1</sup>, ZHANG Shi-tong<sup>1,2</sup>, JIANG Nan<sup>1,3</sup>, LUO Xue-dong<sup>1,3</sup>, LEI Yu<sup>1</sup>

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Greentown China Holdings Limited, Hangzhou 310012, China;

3. Hubei Key Laboratory of Blasting Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430024, China)

**Abstract:** The stress wave induced by CO<sub>2</sub> phase transition can be used to generate rock fractures. It is important to investigate the propagation and influence law of this stress wave. Based on the self-developed triaxial strain testing device, a testing scheme was designed by utilizing a dynamic strain measurement system to collect strain signals during CO<sub>2</sub> phase transition and rock fracturing. The research results indicate that the peak stress in the jet direction and perpendicular to the jet direction decays exponentially with the increase of propagation distance, and the peak stress in the jet direction is significantly greater than that perpendicular to the jet direction. CO<sub>2</sub> filling amount and shear sheet thickness are important factors affecting the peak stress for CO<sub>2</sub> phase transition fracturing. When the shear sheet thickness is constant, the peak stress increases with the increase of CO<sub>2</sub> filling amount, but the increasing rate decreases gradually. Similarly, while the CO<sub>2</sub> filling amount is constant, the peak stress increases with the increase of shear sheet thickness, showing a continuous growth trend.

**Key words:** CO<sub>2</sub> phase transition fracturing; dynamic strain test; stress wave

收稿日期:2022-06-16

作者简介:何志坚(1999-),男,硕士研究生,主要从事二氧化碳相变致裂方面研究,(E-mail) skynoblank@foxmail.com。

通讯作者:罗学东(1971-),男,博士生导师,主要从事爆破工程方面研究,(E-mail) cugluoxd@foxmail.com。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42072309);爆破工程湖北省重点实验室开放基金资助项目(HKLBEF202002)

炸药爆破因其复杂的物理化学过程、瞬间释放大量能量等特点,易产生振动、噪音、空气污染等危害,虽仍普遍在工程中使用,但在易燃易爆环境或敏感复杂区域工程等复杂环境中无法很好地发挥其效果,而 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术作为一种安全、环保的非

炸药爆破技术,在上述特殊复杂环境中使用效果较好,可大幅提高施工效率。 $\text{CO}_2$ 相变致裂破岩技术利用二氧化碳液-气相变的膨胀能对岩石介质做功,作用过程无火花,相变产物为无害、阻燃气体,是一种环境友好型的绿色爆破技术。近年来,由于 $\text{CO}_2$ 相变致裂技术的诸多优点,该技术在煤层增透、矿山开采、水利水电工程、城市基坑开挖、隧道掘进等领域中得到广泛使用<sup>[1-5]</sup>。

$\text{CO}_2$ 相变致裂破岩应力波的研究是目前工程爆破领域的热门研究课题。Singh提出了贯通式锥形裂纹破碎原理<sup>[6]</sup>,认为在高压 $\text{CO}_2$ 气体作用下,岩体内产生复杂的应力场,岩体在拉应力作用下产生裂纹,并迅速朝向自由面方向发展,最终在岩石中形成锥形裂纹,该破岩方式效率高且飞石少。谢晓峰等将PDVF薄膜传感器放置在管壁和卸能头空腔内<sup>[7]</sup>,测量 $\text{CO}_2$ 相变射流压力曲线,表明 $\text{CO}_2$ 相变荷载为类似炸药爆破的近三角形,但是荷载峰值远低于炸药爆破荷载峰值。陶明等对比分析了 $\text{CO}_2$ 相变致裂破岩与传统炸药爆破的区别<sup>[8]</sup>,认为 $\text{CO}_2$ 相变致裂破岩不会产生类似炸药爆破的强冲击波,极大程度上提高了破岩能量利用率。孙可明等通过 $\text{CO}_2$ 相变致裂实验<sup>[9,10]</sup>,认为 $\text{CO}_2$ 相变致裂破岩过程是应力波和高压 $\text{CO}_2$ 气体联合作用过程,应力波作用将致裂孔周围岩体压碎形成压碎区和初始导向裂纹,随着时间的推移,高压 $\text{CO}_2$ 气体进入裂纹中产生气楔作用,使裂纹二次扩展形成裂隙区。肖诚旭等为提高 $\text{CO}_2$ 相变致裂破岩威力<sup>[11]</sup>,使用多组不同 $\text{CO}_2$ 充装量、剪切片厚度和活化剂进行实验,结果得出只改变单一变量的情况下,改变剪切片厚度,对 $\text{CO}_2$ 相变致裂破岩威力影响最大。

到目前为止,研究学者普遍认为 $\text{CO}_2$ 相变致裂破岩是应力波和高压 $\text{CO}_2$ 气体联合作用下的岩体裂纹扩展行为,应力波在岩体内的传播规律和应力波的影响规律的研究仍未明晰,极大阻碍了对 $\text{CO}_2$ 相变致裂破岩机理的研究。本文基于自主研发的动态应变测试装置,设计了 $\text{CO}_2$ 相变致裂应力波测试方案,利用动态应变测试系统采集 $\text{CO}_2$ 相变致裂过程中的应变信号,分析 $\text{CO}_2$ 相变激发的应力波在岩体中的传播及影响规律,研究成果对于 $\text{CO}_2$ 相变致裂破岩机理的深入研究具有重要的指导作用。

## 1 $\text{CO}_2$ 相变致裂应力波测试原理

$\text{CO}_2$ 相变致裂器是 $\text{CO}_2$ 相变致裂破岩技术的关键设备,如图1所示。此装置通过使活化器通电产生大量热量,储液管中液态 $\text{CO}_2$ 不断吸热转化为

超临界态,同时管内压力不断增大。当管内压力增大至定压剪切片额定压力时,剪切片被高压冲破,管内超临界态 $\text{CO}_2$ 瞬间卸压膨胀,转化为高压气体从泄爆头冲出,从而破坏致裂器周围岩石,达到破岩目的<sup>[12]</sup>。

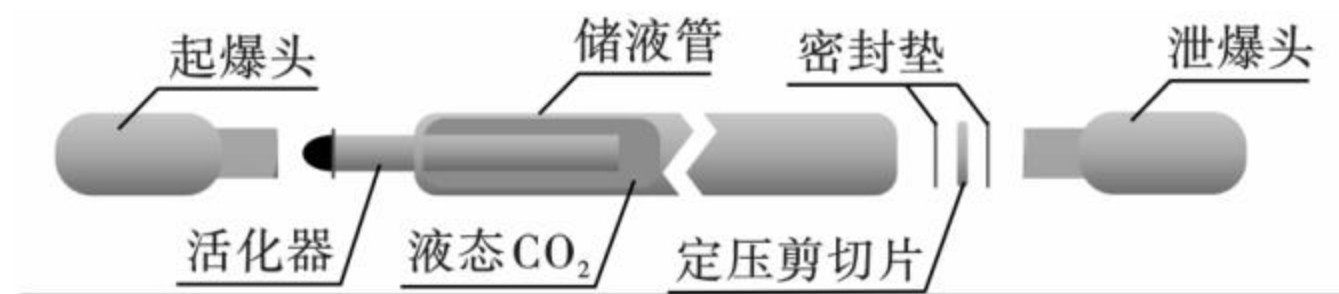


图1  $\text{CO}_2$ 相变致裂器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of  $\text{CO}_2$  phase transition cracker

$\text{CO}_2$ 相变致裂激发的应力波在岩体中的传播特点,可用应力 $\sigma$ 、应变 $\varepsilon$ 、加速度 $a$ 以及位移 $s$ 来表征,上述参数值在岩体中随时空变化,且能互相转化<sup>[13]</sup>。利用动态应变测试技术采集测点的应变信号,再通过计算得到应力是目前常用的一种应力波测试手段<sup>[14]</sup>。因此,为测量 $\text{CO}_2$ 相变致裂作用下岩体内部受到复杂的应力作用,本试验使用石膏、钢管、应变片等材料,制作了一种可以测试三向应变的动态应变测试计,如图2(a)所示,随后将其埋入预先钻好的测试孔内,保证应变片与致裂器射流面处于同一深度且 $x$ 方向指向致裂器,如图2(b)所示。

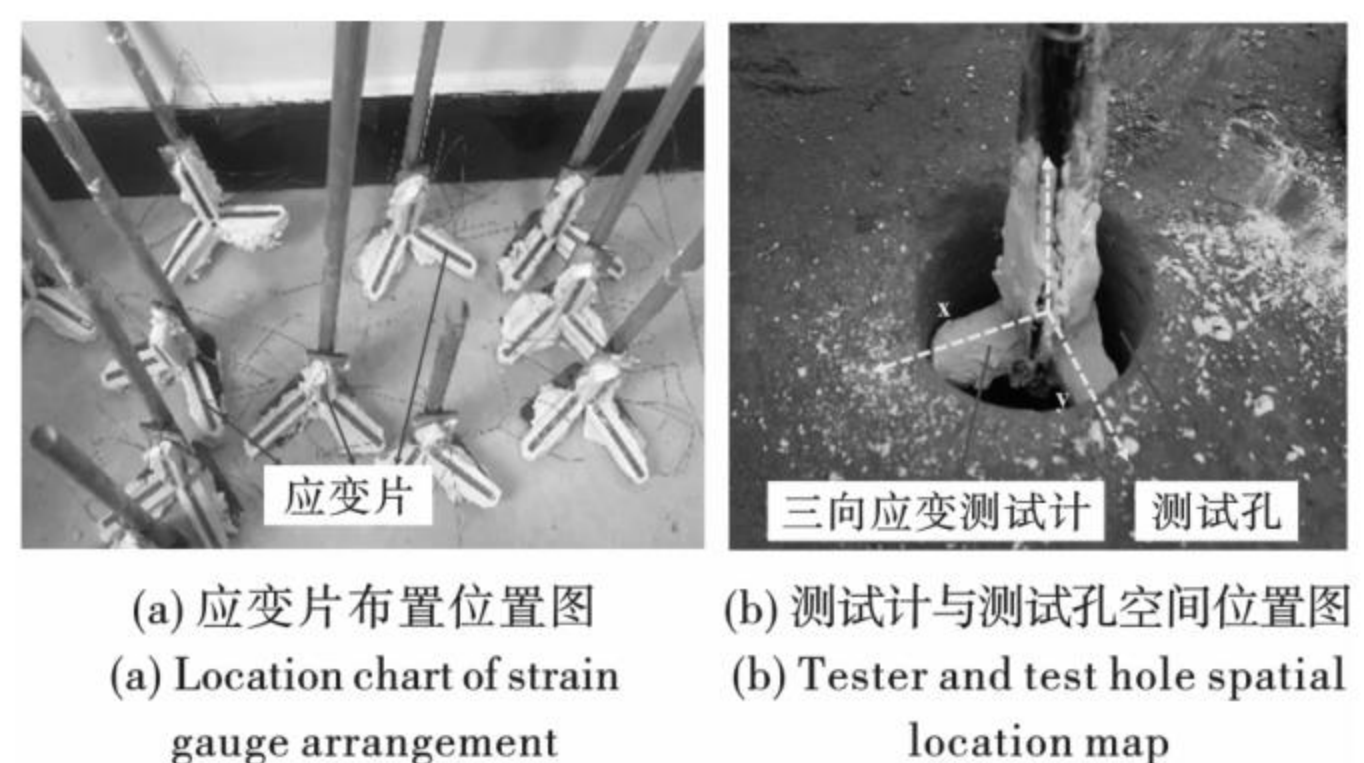


图2 三向动态应变测试计实物图

Fig. 2 Three-dimensional dynamic strain material object diagram

## 2 $\text{CO}_2$ 相变致裂应力波测试试验

### 2.1 试验地点概况

试验场地位于湖北省鄂州市,试验对象为红砂岩,其基本质量等级以IV级为主,单轴抗压强度约为31 MPa,无节理裂纹发育。为满足原位测试要求,测试前对试验场地岩体进行了平整切割,使自由面基本位于同一高程上,保证应力波测试时场地足够平整开阔,以减小地形不平整带来的试验误差。现场试验场地图如图3所示。



图3 现场试验场地  
Fig. 3 Field test site

### 2.2 试验方案设计

为研究 CO<sub>2</sub> 相变激发的应力波传播与影响规律,定义射流方向为 *M* 向,垂直于射流方向为 *S* 向,在沿射流方向和垂直于射流方向距致裂孔不同距离处的岩体中埋设自制动态应变测试计,对二氧化碳相变激发的应变信号进行采集,计算分析应力波参数,从而研究应力波在岩体中的传播与影响规律。其中,液态 CO<sub>2</sub> 充装量为 750 g,定压剪切片厚度为 3.5 mm,孔深 90 cm,孔径 115 mm,测点距离致裂孔中心线的距离分别为 2 m、4 m、8 m、10 m、12 m,如图 4 所示。测试时,保证 CO<sub>2</sub> 相变致裂射流方向与 *M* 方向一致,即致裂管导气孔连线与 *M* 方向重合。

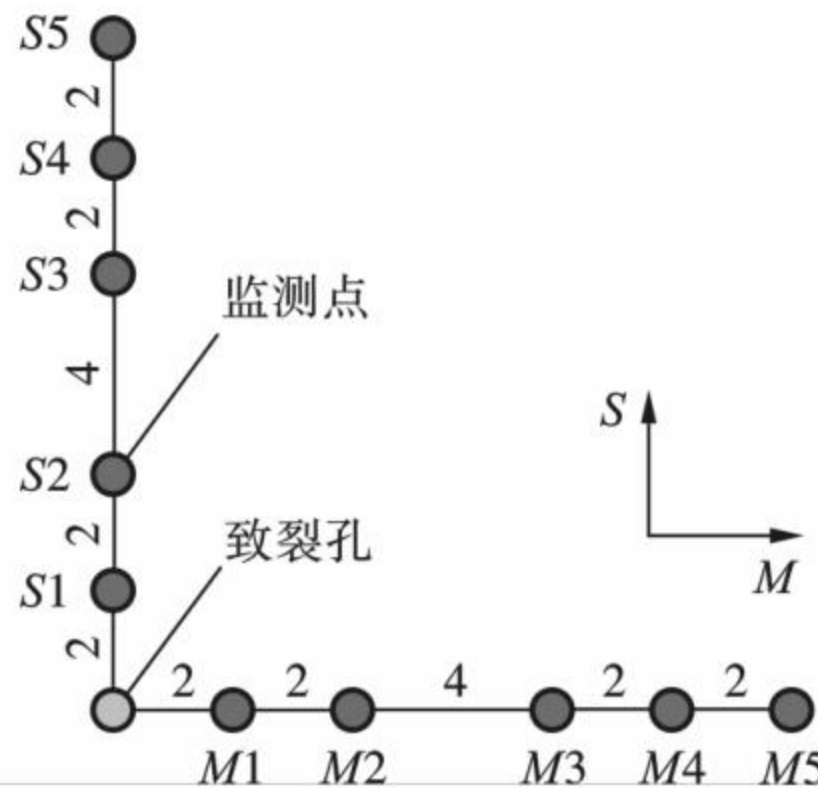


图4 致裂孔与监测点位置关系图(单位:m)  
Fig. 4 The diagram of relationship between fracturing hole and monitoring point position(unit:m)

## 3 CO<sub>2</sub>相变致裂应力波测试结果分析

### 3.1 应力波传播规律分析

#### 3.1.1 应变波形分析

利用 DHDAS 动态应变测试系统采集波形数据后进行数据输出,得到测点三个方向的应变随时间的变化曲线。以典型的 *M*<sub>1</sub> 号监测点为例,应变时程曲线如图 5 所示,应变正值代表应变片受拉产生拉应变,应变负值表示应变片受压产生压应变<sup>[15]</sup>。

由图 5 可知,*M*<sub>1</sub> 监测点径向(*X* 向)和垂向(*Z* 向)上产生压应变,切向(*Y* 向)产生拉应变,垂向峰值

应变最大,径向峰值应变次之,切向峰值应变最小。应变信号中,0.1 s 附近区间,三个方向上应变信号发生突跃,表明应力波在此时传播到测点位置,使得测点径向和垂向受到压应力的作用,而切向受到拉应力作用。随后应变逐渐减小,但未减小至 0,说明应力波通过测点后,测点位置处的石膏应变砖进入塑性变形阶段,其变形不能回到初始阶段,存在残余变形。

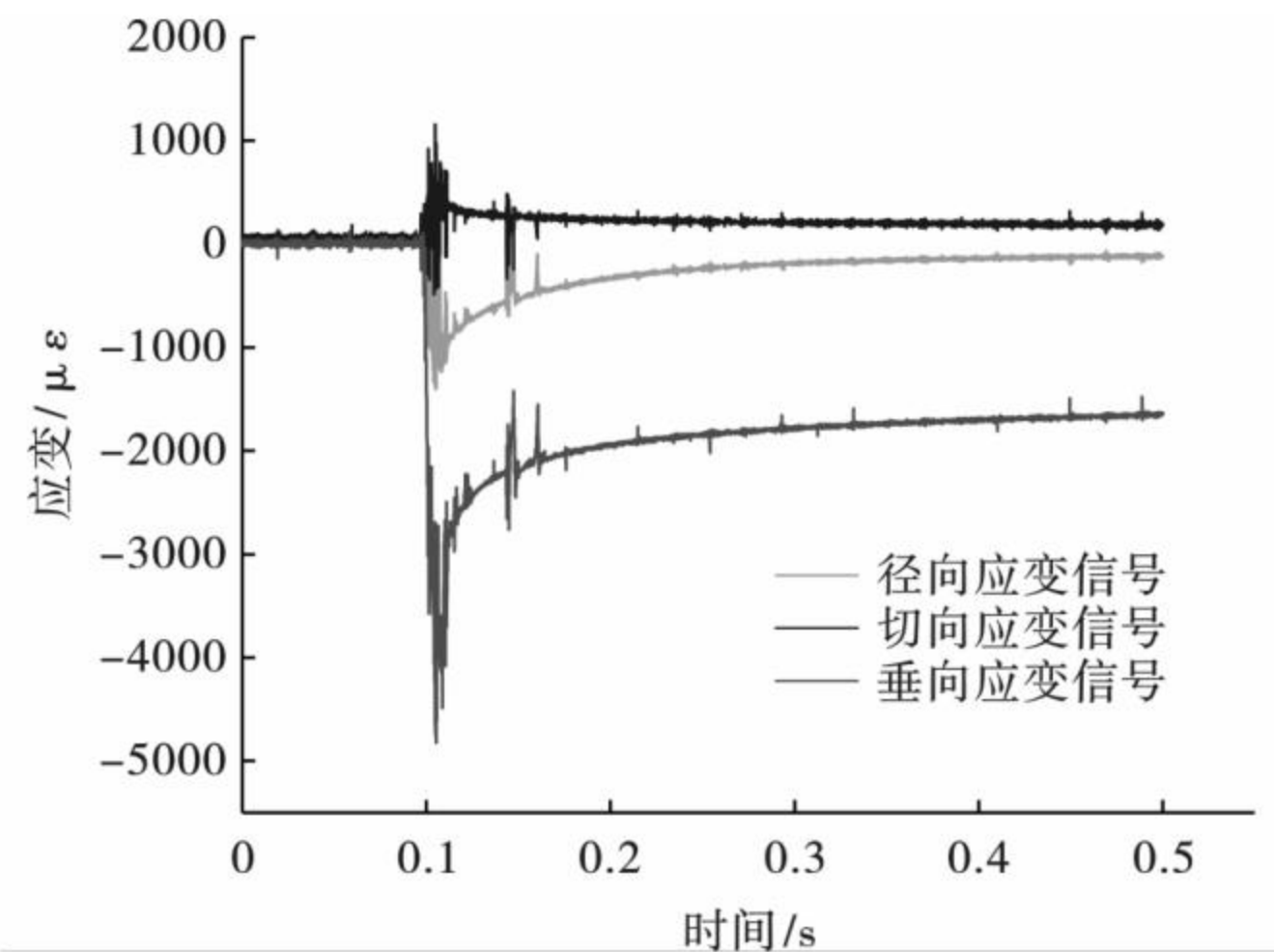


图5 *M*<sub>1</sub>号监测点应变时程曲线  
Fig. 5 Strain time-history curve of monitoring point *M*<sub>1</sub>

#### 3.1.2 峰值应力衰减规律分析

假设试件的三个主应变分别为  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  和  $\epsilon_z$ ,根据广义胡克定理,试件三个方向的主应力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\sigma_z$  分别为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{E}{1+\mu} \left( \frac{\mu}{1-2\mu} \theta + \epsilon_1 \right) \\ \sigma_2 &= \frac{E}{1+\mu} \left( \frac{\mu}{1-2\mu} \theta + \epsilon_2 \right) \\ \sigma_3 &= \frac{E}{1+\mu} \left( \frac{\mu}{1-2\mu} \theta + \epsilon_3 \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $E$  为被测试件的动弹性模量; $\mu$  为被测试件材料的动泊松比; $\theta$  为体积应变, $\theta = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3$ 。原位试验中石膏应变砖动弹性模量  $E$  为 400 MPa,动泊松比  $\mu$  为 0.3。

统计各测点峰值应变数据,利用式(1)计算出各监测点的三向峰值应力,并且采用公式  $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$  计算测点峰值合应力,即峰值合应力的平方等于三向主应力峰值的平方和,统计结果如表 1 和表 2 所示。拟合两监测方向上各监测点的峰值合应力随爆心距变化的特征曲线,如图 6 所示。

结合表 1、表 2 和图 6 可知,两方向上各点优势应力方向均为垂向,径向峰值应力略大于切向峰值应力,并且随传播距离的增大,*M* 方向和 *S* 方向的峰值应力均呈指数型衰减,两方向峰值应力拟合关系

式如表3所示。对比M方向和S方向峰值应力数据可以发现,CO<sub>2</sub>相变致裂峰值应力大小存在明显的方向差异,主要原因为受CO<sub>2</sub>相变致裂器特殊的机械结构影响,高压CO<sub>2</sub>气体从导气孔射流而出时,高压气体高速冲击与之正对的炮孔孔壁,所以射流方向受到了更大的冲击力。

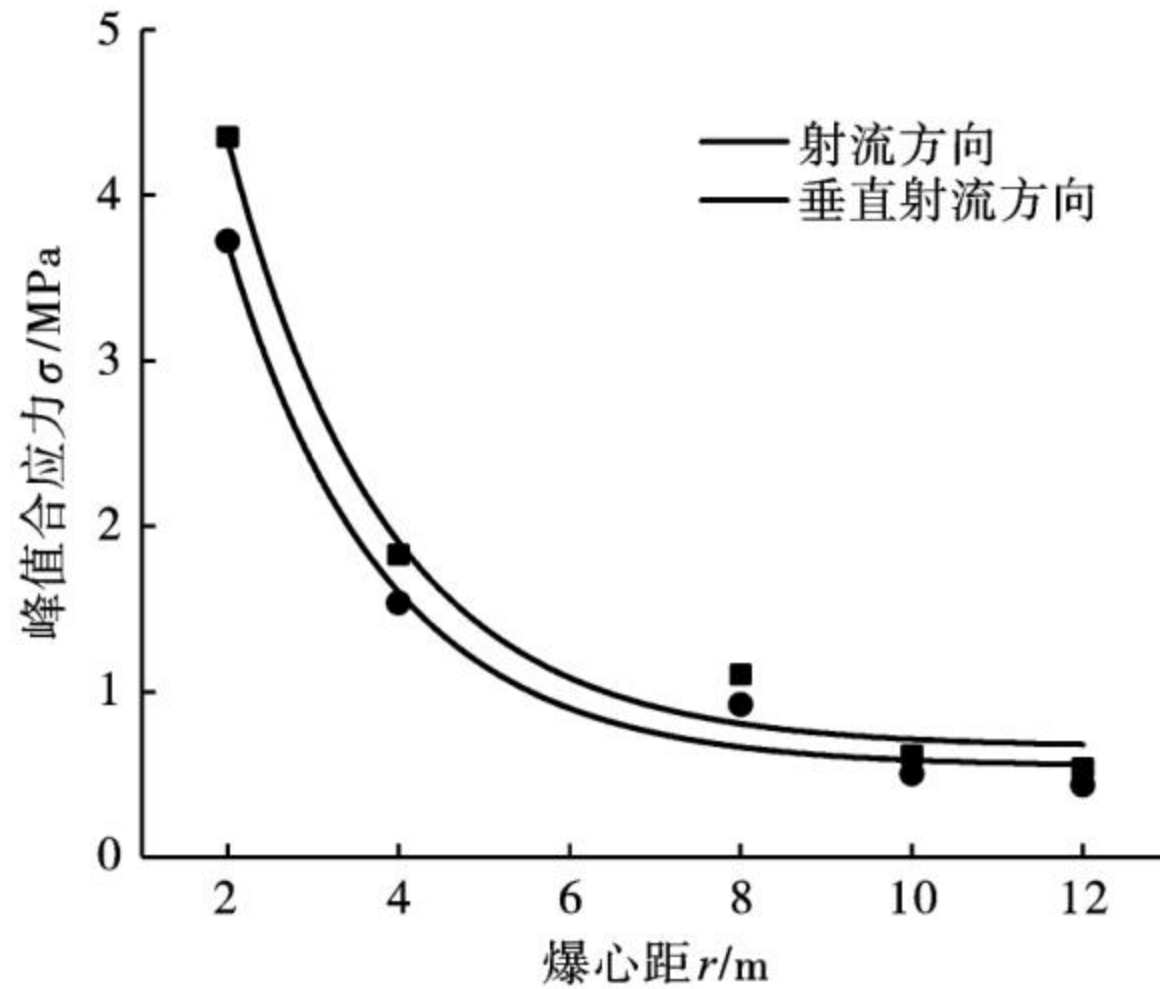


图6 峰值应力随爆心距的变化情况  
Fig. 6 Variations of peak stress with blasting center distance

表1 射流方向各测点峰值应力

**Table 1 Peak stress of each measuring point in jet direction**

爆心距/m	峰值应力/MPa			峰值合应力/MPa
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	
2	2.135	2.058	3.187	4.353
4	0.915	0.864	1.325	1.827
8	0.547	0.537	0.795	1.104
10	0.335	0.324	0.406	0.618
12	0.288	0.279	0.359	0.538

表2 垂直于射流方向各测点峰值应力

**Table 2 Peak stress of each measuring point perpendicular to jet direction**

爆心距/m	峰值应力/MPa			峰值合应力/MPa
	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	
2	1.783	1.759	2.550	3.724
4	0.777	0.729	1.107	1.536
8	0.459	0.451	0.660	0.922
10	0.270	0.263	0.335	0.504
12	0.234	0.229	0.290	0.437

表3 峰值应力随爆心距变化拟合关系式

**Table 3 The fitting relationship between peak stress and blasting center distance**

方向	拟合关系式	相关系数 $R^2$
射流(M)方向	$\sigma = 10.86e^{-\frac{x}{1.84}} + 0.66$	0.991
垂直射流(S)方向	$\sigma = 9.48e^{-\frac{x}{1.82}} + 0.55$	0.992

### 3.2 应力波影响规律分析

由于二氧化碳相变致裂射流方向上峰值应力更大,在原有试验方案基础上,取致裂器射流方向上距离炮孔2 m位置,即图4中M<sub>1</sub>点位处布置自制应变测试计。本次实验分别探究CO<sub>2</sub>充装量与剪切片厚度对CO<sub>2</sub>相变激发的应力波峰值的影响,因此选取CO<sub>2</sub>充装量与剪切片作为变量进行实验,其中CO<sub>2</sub>相变致裂器的管长分别为75 cm、90 cm、105 cm、120 cm,CO<sub>2</sub>充装量分别为585 g、750 g、870 g、960 g;剪切片厚度选取1.5 mm、2.5 mm、3.5 mm;孔深90 cm,孔径115 mm,不同型号的二氧化碳相变致裂器利用超动态应变测试技术采集监测点位应变信号,然后转化为应力进行分析。

#### 3.2.1 CO<sub>2</sub>充装量对应力波峰值的影响

此次实验选取四种不同型号的CO<sub>2</sub>致裂器和厚度为3.5 mm的定压剪切片,以探究不同CO<sub>2</sub>充装量对应力波峰值的影响规律。实验结束后统计试验场地四次试验测点的峰值应变,利用式(1)计算出各测点的峰值应力。实验场地测点的峰值应力随二氧化碳充装量的变化如图7所示。

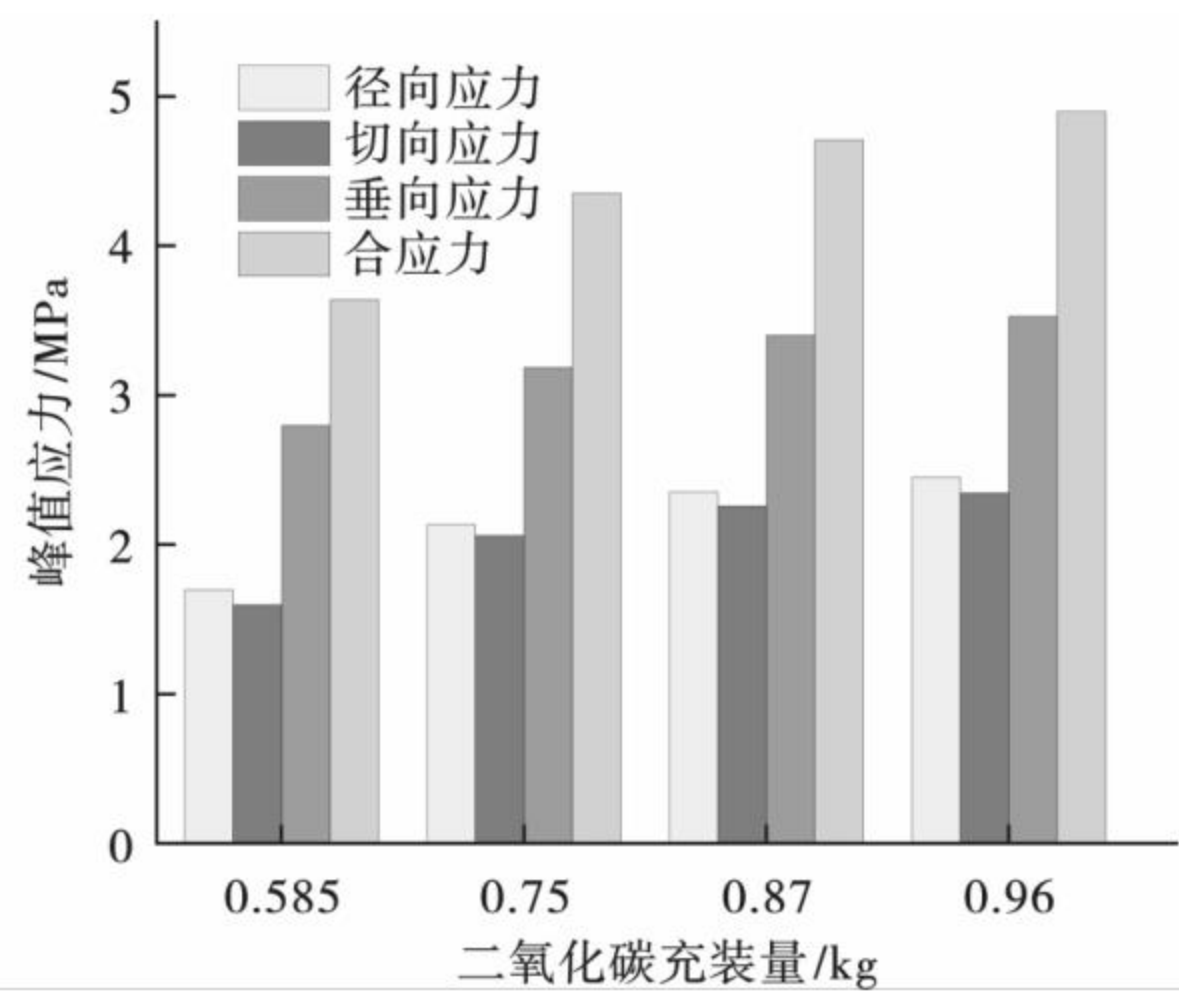


图7 峰值应力随二氧化碳充装量变化情况

Fig. 7 Variations of peak stress with CO<sub>2</sub> filling amount

由图7可知,峰值应力随着CO<sub>2</sub>充装量的增加而增大,但增大幅度逐渐减小,原因是定压剪切片的存在限制了峰值应力阈值,若仅增大CO<sub>2</sub>充装量,必然会对CO<sub>2</sub>相变致裂破岩能量造成极大的浪费。由上述结论可知CO<sub>2</sub>充装量并非影响峰值应力的唯一因素,单纯增加CO<sub>2</sub>充装量无法实现高效破岩,定压剪切片厚度对CO<sub>2</sub>相变致裂峰值应力的影响不可忽视。为进一步提高CO<sub>2</sub>相变致裂破岩效率,需研究定压剪切片厚度对CO<sub>2</sub>相变致裂应力波峰值应力的影响。

### 3.2.2 剪切片厚度对应力波峰值的影响

此次实验选取三种不同厚度的剪切片和管长为90 cm的CO<sub>2</sub>相变致裂器,以探究不同剪切片厚度对应力波峰值的影响规律。为满足单一变量的条件,在充装前后称取致裂器的重量,保证三次试验CO<sub>2</sub>充装量一致。实验结束后统计试验场地三次试验测点的峰值应变,利用式(1)计算出各测点的峰值应力。实验场地测点的峰值应力随剪切片的厚度变化如图8所示。

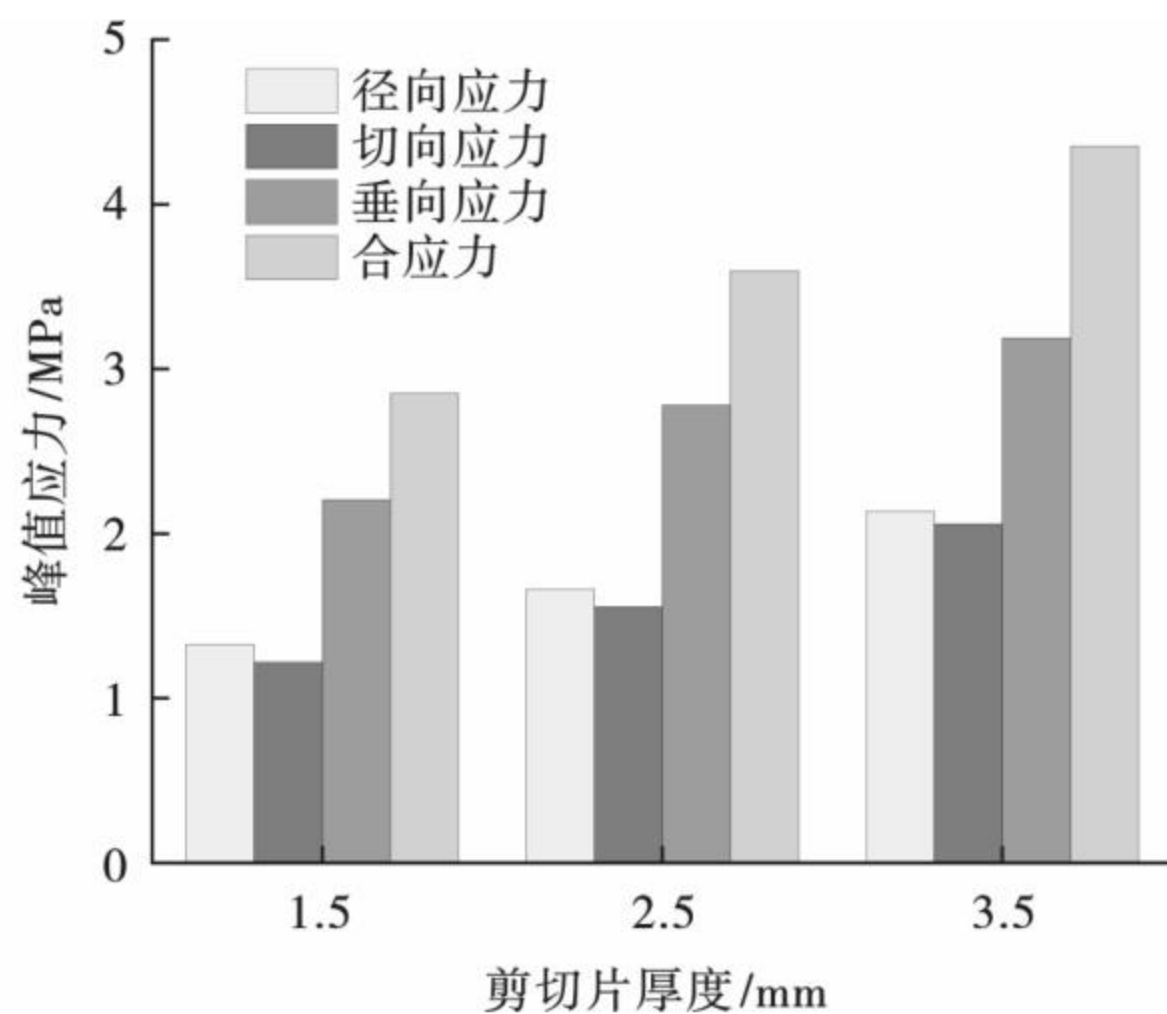


图8 峰值应力随剪切片厚度变化情况

Fig. 8 Variations of peak stress with shear slice thickness

由图8可知,CO<sub>2</sub>充装量一定时,随着剪切片厚度的增大,试验场地测点的各项峰值应力均在增大,并呈现出持续增长趋势。产生此结果的原因是储液管中高压CO<sub>2</sub>需破坏剪切片才能从泄爆头处冲出,从而对周围岩体产生冲击作用,当剪切片越厚,破坏剪切片后初始应力也就越大,在CO<sub>2</sub>致裂器周边固定位置处监测到的应力波峰值应力也就越大。因此定压剪切片的厚度决定了CO<sub>2</sub>相变致裂应力波峰值应力的大小,故理论上剪切片越厚,峰值应力则越大,反之则越小。

## 4 结论

(1)基于自主研发的三向应变测试系统,得到了二氧化碳相变致裂应变波形数据,其中2 m处的监测点径向和垂向上产生压应变,切向产生拉应变,且垂向峰值应变最大,径向峰值应变次之,切向峰值应变最小。

(2)根据射流方向和垂直于射流方向峰值应力随爆心距的变化情况,两个方向的峰值应力随传播距离的增大均呈指数型衰减,且射流方向的峰值应力明显大于垂直于射流方向的峰值应力。

(3)CO<sub>2</sub>充装量与定压剪切片厚度均对CO<sub>2</sub>相

变致裂应力波的峰值应力有影响。定压剪切片厚度一定时,峰值应力随着CO<sub>2</sub>充装量的增加而增大,但增大速率逐渐降低;CO<sub>2</sub>充装量一定时,峰值应力随着剪切片厚度的增加而增大,且呈持续增长趋势。

## 参考文献 (References)

- [1] WANG Z F, LI H J, CHEN X, et al. Study on hole layout of liquid CO<sub>2</sub> phase-transforming fracture technology for permeability improvement of coal seam [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015.
- [2] LI W, LIU Z, SU E, et al. Experimental investigation on the effects of supercritical carbon dioxide on coal permeability: implication for CO<sub>2</sub> Injection method [J]. Energy & fuels, 2019, 33 (JAN): 503-512.
- [3] 任新伟, 刘艳. 液态二氧化碳裂石技术在城市轨道交通车站基坑开挖中的应用 [J]. 江苏建筑, 2019 (4): 96-97.
- [3] REN Xin-wei, LIU Yan. Application of liquid carbon dioxide blasting technology in foundation pit excavation of urban rail transit station [J]. Jiangsu Construction, 2019 (4): 96-97. (in Chinese)
- [4] 陈枫, 胡凡. 二氧化碳爆破技术在路基石方开挖中的应用探析 [J]. 工程建设与设计, 2019 (10): 102-104.
- [4] CHEN Feng, HU Fan. The application of carbon dioxide blasting technology in excavation of subgrade stonework [J]. Construction & Design For Project, 2019 (10): 102-104. (in Chinese)
- [5] 崔玉明, 张福宝, 宋战平. 二氧化碳爆破技术在隧道施工中的应用 [J]. 公路交通科技 (应用技术版), 2019, 15 (5): 254-256.
- [5] CUI Yu-ming, ZHANG Fu-bao, SONG Zhan-ping. Application of carbon dioxide blasting technology in tunnel construction [J]. Highway Traffic Technology (Application Technology Version), 2019, 15 (5): 254-256. (in Chinese)
- [6] SINGH S P. Non-explosive applications of the PCF concept for underground excavation [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 1998, 13 (3): 305-311.
- [7] 谢晓锋, 李夕兵, 李启月, 等. 液态CO<sub>2</sub>相变破岩技术述评研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15 (6): 1406-1414.
- [7] XIE Xiao-feng, LI Xi-bing, LI Qi-yue, et al. Research and review about the liquid CO<sub>2</sub> phase-transforming rock fracturing technology [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15 (6): 1406-1414. (in Chinese)
- [8] 陶明, 赵华涛, 李夕兵, 等. 液态CO<sub>2</sub>相变致裂破岩与炸药破岩综合对比分析 [J]. 爆破, 2018, 35 (2): 41-49.
- [8] TAO Ming, ZHAO Hua-tao, LI Xi-bing, et al. Compreh-

- sive comparative analysis of liquid CO<sub>2</sub> phase change fracturing and explosive rock fracturing[J]. *Blasting*, 2018, 35(2):41-49. (in Chinese)
- [9] 孙可明, 辛利伟, 吴 迪. 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆煤体致裂机理实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2):302-308.
- [9] SUN Ke-ming, XIN Li-wei, WU Di. Experimental study on fracture mechanism of coal caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2):302-308. (in Chinese)
- [10] 孙可明, 辛利伟, 吴 迪, 等. 初应力条件下超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律研究[J]. *固体力学学报*, 2017, 38(5):473-482.
- [10] SUN Ke-ming, XIN Li-wei, WU Di, et al. Mechanism of fracture caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion under the impact of initial stress[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2017, 38(5):473-482. (in Chinese)
- [11] 肖诚旭, 邓守春, 李海波, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂试验研究[J]. *煤炭技术*, 2018, 37(7):190-192.
- [11] XIAO Cheng-xu, DENG Shou-chun, LI Hai-bo, et al. Experimental study on phase-transforming fracturing of liquid CO<sub>2</sub>[J]. *Coal Technology*, 2018, 37(7):190-192. (in Chinese)
- [12] 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.
- [12] ZHOU Sheng-tao, LUO Xue-dong, JIANG Nan, et al. A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021, 43(7):883-893. (in Chinese)
- [13] 褚怀保, 杨小林, 侯爱军, 等. 煤体中爆炸应力波传播与衰减规律模拟实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(2):185-189.
- [13] CHU Huai-bao, YANG Xiao-lin, HOU Ai-jun, et al. A simulation-based experimental study on explosion stress wave propagation and attenuation in coal[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(2):185-189. (in Chinese)
- [14] ZHOU S, JIANG N, HE X, et al. Rock breaking and dynamic response characteristics of carbon dioxide phase transition fracturing considering the gathering energy effect[J]. *Energies*, 2020, 13(6):1336.
- [15] 付宏伟. 水压爆破应力波传播及破煤岩机制研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
- [15] FU Hong-wei. Study on hydraulic blasting stress wave propagation and coal broken mechanism [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)

英文编辑:柯 波

(上接第 70 页)

- [8] 杨果林, 胡 敏, 申宗球, 等. 大跨连拱隧道复合式中墙承载模式研究[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(1):136-141.
- [8] YANG Guo-lin, HU Min, SHEN Zong-qiu, et al. Research on bearing modes of compound middle-wall of multi-arch tunnels with large spans[J]. *Modern Tunnel Technology*, 2020, 57(1):136-141. (in Chinese)
- [9] 陈贵红, 李玉文, 赵玉光. 连拱隧道中墙受力研究[J]. *中国铁道科学*, 2005, 26(1):20-24. DOI: 10.3321/j.issn:1001-4632.2005.01.004.
- [9] CHEN Gui-hong, LI Yu-wen, ZHAO Yu-guang. Mechanical behavior of middle wall in continuous arch tunnel[J]. *China Railway Science*, 2005, 26(1):20-24. DOI: 10.3321/j.issn:1001-4632.2005.01.004. (in Chinese)
- [10] 杨果林, 葛云龙, 彭 伟, 等. 连拱隧道复合式曲中墙受力现场监测分析[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(1):55-59.
- [10] YANG Guo-lin, GE Yun-long, PENG Wei, et al. In-situ TESTING analysis of compound curved middle wall of multi-arch tunnel[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(1):55-59. (in Chinese)
- [11] 张继琪, 江学良, 杨 慧, 等. 含连拱隧道边坡地震响应特性研究[J]. *应用力学学报*, 2021, 38(2):597-606.
- [11] ZHANG Ji-qi, JIANG Xue-liang, YANG Hui, et al. Study on seismic response characteristics of slope with multi arch tunnel[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2021, 38(2):597-606. (in Chinese)
- [12] 邱明明, 杨果林, 张沛然, 等. 浅埋偏压对连拱隧道施工力学效应的影响及处治措施[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(5):2061-2068.
- [12] QIU Ming-ming, YANG Guo-lin, ZHANG Pei-ran, et al. Influence of shallow buried eccentric pressure on mechanical effect of multi arch tunnel construction and treatment measures [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(5):2061-2068. (in Chinese)
- [13] 储桂华. 无中导洞连拱隧道后行洞施工爆破控制[J]. *中华建设*, 2020(2):132-135.
- [13] CHU Gui-hua. Construction blasting control of back tunnel without middle guide tunnel[J]. *China Construction*, 2020(2):132-135. (in Chinese)
- [14] SHE Y, WANG M, LI Q. Analysis of influence of blasting vibration on middle wall of a double-arch tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6):1275-1279.

英文编辑:柯 波