



## SC-CO<sub>2</sub>与工业乳化炸药破岩效应的等效试验

蒋楠 姚颖康 朱斌 罗学东

### Equivalent experimental study on rock breaking of SC-CO<sub>2</sub> and industrial emulsion explosive

JIANG Nan, YAO Yingkang, ZHU Bin, LUO Xuedong

引用本文:

蒋楠, 姚颖康, 朱斌, 罗学东. SC-CO<sub>2</sub>与工业乳化炸药破岩效应的等效试验[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(2): 249–258. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.29.001

JIANG Nan, YAO Yingkang, ZHU Bin, LUO Xuedong. Equivalent experimental study on rock breaking of SC-CO<sub>2</sub> and industrial emulsion explosive[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(2): 249–258. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.29.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.29.001>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 缝槽水压爆破破岩载荷实验研究

Experimental study on rock-breaking load in slot-hydraulic blasting

工程科学学报. 2020, 42(9): 1130 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.10.06.002>

#### 露天爆破中炸药单耗对岩石破碎块度的数值模拟研究

Effect of explosive powder factor on rock crushing block size in open-pit blasting

工程科学学报. 2024, 46(6): 973 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.09.11.003>

#### 等效岩体三维随机节理网络模型构建及其在两河口水电站中的应用

Construction of a 3D equivalent rock random fracture network model and its application in the Lianghekou Hydropower Station

工程科学学报. 2022, 44(7): 1282 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.11.30.003>

#### 基于数码电子雷管的岩巷中深孔孔内分段爆破破岩机制及应用

Rock breaking mechanism and the application of medium-deep hole-in-hole segmented blasting in rock roadway using digital electronic detonators

工程科学学报. 2023, 45(11): 1820 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.09.20.008>

#### 超声对熔盐电解法制备Al-7Si-Sc合金组织的影响

Effects of ultrasound on the microstructure of Al-7Si-Sc alloy prepared via molten salt electrolysis

工程科学学报. 2019, 41(9): 1135 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.09.004>

#### Sc对7056铝合金组织和性能的影响

Effect of Sc on the microstructure and properties of 7056 aluminum alloy

工程科学学报. 2019, 41(10): 1298 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.10.22.003>

# SC-CO<sub>2</sub> 与工业乳化炸药破岩效应的等效试验

蒋楠<sup>1,2,3)</sup>, 姚颖康<sup>1,2)</sup>, 朱斌<sup>1,2,3)</sup>✉, 罗学东<sup>3)</sup>

1) 江汉大学省部共建精细爆破国家重点实验室, 武汉 430056 2) 江汉大学爆破工程湖北省重点实验室, 武汉 430056 3) 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074

✉通信作者, E-mail: [b.zhu@cug.edu.cn](mailto:b.zhu@cug.edu.cn)

**摘要** 如何量化核算 SC-CO<sub>2</sub>(超临界二氧化碳)破岩效率是非炸药类破岩技术在实际工程应用时重点关注的内容. 本研究基于爆破当量理论计算和现场爆破试验的研究方法, 通过工程类比法进行工业乳化炸药等效当量计算, 选择典型代表性花岗岩及泥岩场地, 设计进行了 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩效应等效对比现场试验; 基于现场破岩等效现场试验测试数据, 对比分析试验过程中 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩体积、破岩区域形态、大块率和单耗等破岩区域特征及参量数据. 研究表明: 当 SC-CO<sub>2</sub> 破岩体积较大时, 其致裂破岩范围的长短轴较长, 并且随着剪切片厚度的增加, 泥岩场地二氧化碳单耗的下降速率增大, 二氧化碳单耗是炸药单耗的 6~11 倍. SC-CO<sub>2</sub> 破岩技术大块率较高, 而炸药爆炸应力波分布均匀, 大块率较小. SC-CO<sub>2</sub> 破岩地表振速远小于工业炸药破岩, 工业炸药爆破测点合振速值为 SC-CO<sub>2</sub> 破岩测点合振速值的 9~11 倍, SC-CO<sub>2</sub> 破岩对周边环境震动影响较小. SC-CO<sub>2</sub> 破岩测点合应力峰值高于工业炸药破岩, SC-CO<sub>2</sub> 破岩试验中各测点合应力值为炸药破岩试验中对应测点值的 1.2~1.6 倍.

**关键词** SC-CO<sub>2</sub>; 工业炸药; 等效破岩; 动力效应; 破岩体积

**分类号** TD235

## Equivalent experimental study on rock breaking of SC-CO<sub>2</sub> and industrial emulsion explosive

JIANG Nan<sup>1,2,3)</sup>, YAO Yingkang<sup>1,2)</sup>, ZHU Bin<sup>1,2,3)</sup>✉, LUO Xuedong<sup>3)</sup>

1) State Key Laboratory of Fine Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, China

2) Hubei Provincial Key Laboratory of Blasting Engineering, Jiangnan University, Wuhan 430056, China

3) College of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China

✉Corresponding author, E-mail: [b.zhu@cug.edu.cn](mailto:b.zhu@cug.edu.cn)

**ABSTRACT** Supercritical (SC)-CO<sub>2</sub> rock breaking technology offers a safe alternative to industrial explosive blasting. Quantitatively calculating the rock breaking efficiency of SC-CO<sub>2</sub> is crucial for comparing its engineering application and economic benefits against nonexplosive rock breaking methods. By employing the blasting equivalent theory and field blasting test methods, the equivalence of industrial emulsion explosives was calculated through an engineering analogy. Granite and mudstone sites were selected as blasting tests, and a field test scheme was designed to compare the rock-breaking effects of SC-CO<sub>2</sub> and industrial explosives. Using test data of strain, vibration, and rock breaking volume from equivalent field tests, the characteristics and parameters of the rock breaking area, such as volume, shape, bulk rate, and unit consumption of SC-CO<sub>2</sub> and industrial explosives in granite and mudstone sites, were compared and analyzed. The analysis of rock-breaking volume and morphology shows that in granite and mudstone sites, larger rock-breaking volumes

收稿日期: 2024-04-29

基金项目: 湖北省自然科学基金杰出青年项目(2024AFA092); 江汉大学省部共建精细爆破国家重点实验室基金资助项目(PBSKL2023A1); 国家自然科学基金资助项目(42102329, 52478525)

from SC-CO<sub>2</sub> result in long and short axes of the breaking range. As the thickness of the shear slice increases, the carbon dioxide unit consumption rapidly decreases at the mudstone site, whereas changes in unit consumption are less obvious than at the granite site. The carbon dioxide unit consumption is 6–11 times higher than that of explosives. SC-CO<sub>2</sub> rock breaking technology has a high bulk rate, while explosive stress waves are more evenly distributed, resulting in a low bulk rate. Consequently, the bulk rate of dynamite blasting is less than that of SC-CO<sub>2</sub> rock breaking. The surface vibration velocity of SC-CO<sub>2</sub> rock breaking is considerably lower than that of industrial explosive rock breaking. The combined vibration velocity at industrial explosive blasting points is 9–11 times higher than at SC-CO<sub>2</sub> rock breaking points. SC-CO<sub>2</sub> rock breaking has little effect on the surrounding environment vibrations. The peak combined stress at the SC-CO<sub>2</sub> rock breaking point is higher than that of industrial explosive rock breaking. In the SC-CO<sub>2</sub> rock-breaking test, the combined stress at each measuring point is 1.2–1.6 times that of the corresponding point in the explosive rock breaking test. Industrial explosives blasting generates more intense shock waves, but the SC-CO<sub>2</sub> method produces a higher peak combined stress because the high-pressure gas from SC-CO<sub>2</sub> rock breaking creates a gas wedge effect. Owing to site constraints, field tests were carried out only at two sites, granite and mudstone. Additional rock bodies should be tested to generalize the conclusions.

**KEY WORDS** SC-CO<sub>2</sub>; industrial explosives; equivalent rock breaking; dynamic effect; equivalent correction

传统炸药爆破破岩效果明显,效率较高,作为坚硬岩土体开挖的重要手段得到广泛应用。但是炸药破岩噪音大、振动剧烈以及粉尘多<sup>[1-3]</sup>。在环境复杂的城区以及军事敏感区域,苛刻环境和振动安全控制要求使得炸药爆破不再适用。SC-CO<sub>2</sub> (超临界二氧化碳)破岩技术是一种新兴的物理破岩技术,通过致裂管内液态二氧化碳被活化器加热后气化导致体积急速膨胀产生高压,冲破管底剪切片,经泄能头释放出高压二氧化碳气体致使岩石破裂。二氧化碳是一种惰性气体,无毒,遇热反应快,破岩过程作用时间较短且环保,作用过程中不产生爆轰波,较工业炸药爆破技术更加安全。SC-CO<sub>2</sub> 破岩技术被应用于台阶破岩、大型岩体破岩、孤石破岩以及隧道掘进中破岩<sup>[4-6]</sup>。SC-CO<sub>2</sub> 技术成为替代传统工业炸药爆破重点研究方向,具有极大研究潜力,近年来已成为爆破行业前沿热点议题。

目前,传统炸药爆破破岩技术的试验方法、理论基础和数值分析手段都较为成熟,已有大量相关研究,因此针对 SC-CO<sub>2</sub> 破岩技术,相关学者主要以传统炸药爆破破岩技术研究为参考,对 SC-CO<sub>2</sub> 的破岩技术机理、破岩效果和动力效应等方面与传统炸药爆破进行了相关对比研究<sup>[7-9]</sup>。王明宇<sup>[10]</sup> 计算出了液态 CO<sub>2</sub> 爆破过程中破碎区与裂隙区的范围,采用 SPH (Smoothed particle hydrodynamics) 算法建立了液态 CO<sub>2</sub> 爆破气体损伤模型,研究了孔间相互作用裂隙扩展的相关规律。Kang 等<sup>[11]</sup> 通过修正的状态方程确定了二氧化碳相变致裂过程中气体压力的变化。谢晓锋等<sup>[12]</sup> 在研究发现了 SC-CO<sub>2</sub> 致裂技术相较于传统工业炸药的诸多优势之后,开展三种空孔试验。董庆祥等<sup>[13]</sup> 分析确定了 SC-CO<sub>2</sub> 破岩技术的 TNT 当量计算方法,并通过现

场混凝土块试爆试验与数值模拟的破碎块度特征对比分析,验证了该种计算方法的可靠性。孙可明等<sup>[14]</sup> 进行了不同温压条件下的 SC-CO<sub>2</sub> 致裂试验,研究发现介质起裂的最低爆破压力与介质的抗拉强度呈指数式关系。Zhang 等<sup>[15]</sup> 等以混凝土为研究对象,建立了二氧化碳相变作用下岩石动力学模型,分析了爆破压力、释放孔数目与半径对二氧化碳相变致裂效果的影响。沈鑫等<sup>[16]</sup> 通过现场试验采集到了液态 CO<sub>2</sub> 爆破的振动信号,将测得的数据经过一系列反应谱分析,得出液态 CO<sub>2</sub> 爆破的振动信号频率集中于低频,速度峰值与主频也在安全范围之内,适用于较为敏感的施工环境。

上述研究表明,相比于传统工业炸药爆破,定量化核算 SC-CO<sub>2</sub> 破岩效率是非炸药类破岩技术在实际工程应用时重点关注的内容。目前工程应用中 SC-CO<sub>2</sub> 破岩等效换算多以能量换算为主,但是二氧化碳破岩机制与传统炸药不一样,以能量换算存在不合理的地方,现阶段仍没有关于 SC-CO<sub>2</sub> 相变致裂的乳化炸药当量研究。基于此,本研究设计进行 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩效应等效对比试验,对比分析试验过程 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩体积、破岩区域形态、大块率和单耗等破岩区域特征及参量,研究其破岩过程岩体动力效应,并对破岩体积的当量换算公式进行了修正。本研究可使现有的 SC-CO<sub>2</sub> 破岩技术理论进一步完善,丰富 SC-CO<sub>2</sub> 与传统工业炸药爆破的对比研究,达到提高破岩效率、降低工程成本的目的。

## 1 SC-CO<sub>2</sub> 与乳化炸药等效破岩试验

### 1.1 SC-CO<sub>2</sub>-乳化炸药等效当量的计算

炸药爆破属于化学反应,而 SC-CO<sub>2</sub> 相变致裂

属于物理变化,两者破岩原理虽具有本质区别,但破岩均是通过瞬间产生的高压冲击波破岩,破岩的力学原理基本一致.利用能量等效原则,可对 SC-CO<sub>2</sub> 相变致裂与乳化炸药爆破进行等当量换算.研究表明 SC-CO<sub>2</sub> 相变致裂过程符合压缩气体与水蒸气容器爆破的定义<sup>[17]</sup>,SC-CO<sub>2</sub> 相变致裂器释放的能量计算式如式(1).

$$E_g = \frac{pV}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{0.1013}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \times 10^3 \quad (1)$$

式中:  $E_g$  为 SC-CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩能量, kJ;  $p$  为容器内气体的绝对压力,大小等于剪切片剪切强度, MPa;  $V$  为容器的体积, m<sup>3</sup>;  $k$  为气体的绝热指数,取 1.295. 试验选用的 ZL-51 型号致裂器,储液管长 90 cm,底面外径 5.1 cm;管内活化器外径 2 cm,活化器长 32 cm,储液管内净体积为 0.72 L; 3.5 mm 剪切片剪切强度 150 MPa,带入式(1)计算得到 ZL-51 型号致裂器释放的能量  $E_g=297$  kJ. 基于能量等效的 SC-CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩与乳化炸药当量计算公式如式(2)所示<sup>[18]</sup>.

$$W = \frac{E_g}{E_t} \quad (2)$$

式中:  $W$  为 SC-CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩的乳化炸药爆炸当量值,  $E_t$  为二号岩石乳化炸药能量, kJ. 目前工业炸药爆炸能量的测量方法较多,研究发现水下爆炸法测量的炸药能量稳定可靠.借鉴已有水下爆炸方法测量的乳化炸药爆炸能量结果,取其均值  $E_t=3129$  kJ<sup>[18]</sup>. 将计算得到的  $E_g$  与  $E_t$  值,带入式(2)计算得到当量值  $W=0.095$ .

## 1.2 试验方案设计

由公式(1)可知,容器内气体的绝对压力  $p$  是决定致裂能量的重要参数之一,结合致裂器工作原理,该参数与定压剪切片的抗拉强度直接相关.压剪切片厚度是容器内气体绝对压力  $p$  的决定性因素<sup>[19]</sup>.在本次对比试验中,忽略液态二氧化碳充装量的影响,将致裂器剪切片厚度作为影响致裂效果的唯一变量.因此本次试验共设三个对比组,试验工况设计如表 1 所示.定制厚度分别为 1.5、

2.5、3.5 mm 的致裂器定压剪切片,其对应的剪切强度分别为 64、107、150 MPa,试验中储液管长 90 cm,底面外径 5.1 cm;管内活化器外径 2 cm,活化器长 32cm,储液管内净体积为 0.72 L.将上述参数带入公式(2)得到上述剪切片厚度所对应的二号岩石乳化炸药药量分别为 38、66、95 g,试验方案如表 1 所示.

现场试验依托于湖北省鄂州市某爆破生产项目场地进行,选取较为平整的泥岩与花岗岩场地进行现场试验.泥岩场地,长约 60 m,宽 15 m.其主要由褐色强、中风化炭质泥岩构成,基本质量等级为 V 级,单轴抗压强度低于 10 MPa,属极软岩.场地有裂隙发育,岩石完整性较差.花岗岩场地长约为 30 m,宽 18 m,由强、微风化花岗岩构成.基本质量等级以 III 级为主,单轴抗压强度约为 50 MPa,属次硬岩,其裂隙发育程度较少,较泥岩的发育程度低.现场试验布孔如图 1(a)所示,图中 Q 为炸药炮孔, D 为致裂管孔, M 定义为主冲击(Main shock)方向,为 M 方向振动测点, S 为出气口法向方向定义为次冲击(Second shock)方向,为 S 方向振动测点,  $\epsilon$  为应变测点.以花岗岩场地为例,试验中布孔共分为两排,经过试爆后,发现二氧化碳相变致裂漏斗与炸药爆炸漏斗最大半径不超过 1.0 m,考虑到现场爆破作业情况以及单孔致裂的影响范围,防止产生孔间相互影响,孔间距均为 3 m.在两排分布型布孔设计中包含两个应变孔的布设,在空间布设上各对比孔与应变孔相对位置一一对应,确保各对比组内起爆孔到应变测点距离一致.

现场选用的 ZL-51 型号致裂器如图 1(b)所示.不同的剪切片厚度可以满足变剪切片厚度的试验需求,从而控制不同的管内气体释放压力,得到不同致裂威力的试验结果,匹配不同质量的二号岩石乳化炸药.配备相应的充装装置,包括拆装机、储液罐、充装台等,并使用电子秤来精准控制每次充装的药量一致.

现场试验采取单孔起爆,如图 1(a)所示,二氧化碳相变致裂孔起爆时,在其致裂器出气口方向

表 1 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药等效破岩试验方案设计表

Table 1 Design of equivalent rock breaking test scheme of SC-CO<sub>2</sub> and industrial explosive

Comparison group	Liquid carbon dioxide filling amount, $q/g$	Splitter shear sheet thickness, $D/mm$	Shear sheet strength/MPa	No. 2 rock emulsion explosive amount, $Q/g$
A	600	1.5	64	38
B	600	2.5	107	66
C	600	3.5	150	95



图 1 试验方案设计. (a)现场试验布置; (b)试验动力测试系统

Fig.1 Test scheme design: (a) test schematic and site layout; (b) dynamic effect test and fracture tube filling system

以及出气口法向方向 2 m 处各呈直线布设 4 台振动速度监测仪, 每台仪器间隔 1 m, 通过其采集结果研究液态二氧化碳相变致裂排气口方向与排气口法向方向的地表振动速度衰减规律. 而对于炸药孔, 仅在其起爆孔任意方向 2 m 处呈直线布设 4 台台爆破振动速度监测仪, 每台仪器间隔 1 m 即可. 选用欧美大地仪器设备中国有限公司出产的 Instantel 振动监测仪. 此外, 为探究 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩效应等效方案及其效果, 测试动态应变特征参数来反映破岩效果. 采用 BF350-6AA(11) 型应变片, 自制应变测试计. 利用 DH5960 超高速动态信号采集系统, 采集单孔破岩弹塑性区域的应变数据, 对采集的多组动态应变实测信号进行分析. 现场 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药爆破破岩效应等效研究试验均为单孔起爆, 因此分为 SC-CO<sub>2</sub> 致裂孔起爆与炸药孔起爆两个试验过程, 主要步骤包括: 冲装与准备、致裂器埋设、激发测试、破岩体积量测.

## 2 破岩区域特征分析

### 2.1 破岩体积及区域形态对比

花岗岩与泥岩场地 SC-CO<sub>2</sub> 与炸药现场破岩

区域形态效果如图 2 所示, 图中  $L_a$  和  $L_b$  分别为二氧化碳爆破区域长轴与短轴,  $R$  为炸药爆破漏斗半径. 可以看出 SC-CO<sub>2</sub> 破岩区域形态均为椭圆锥形, 这是由于其致裂器构造决定的, 泄气孔向两边定向致裂, 故定向致裂方向破岩区域较长, 炸药爆破破岩区域形近乎为圆锥形, 与现有的爆破漏斗研究一致.

选取地面为基准面, 破岩完成后, 清除区域中碎石, 按 10 cm×10 cm 的网格测量破岩区域轮廓线距基准面距离, 求出各测点的破岩区域深度. 按辛卜生法<sup>[20]</sup> 计算出破岩区域各断面的面积  $S_i$ , 最后按棱台体求得各破岩区域体积  $V$ . 计算公式如下:

$$S_i = \frac{B}{3} [(Y_0 + Y_n) + 2(Y_2 + Y_4 + \dots + Y_{2i}) + 4(Y_1 + Y_3 + \dots + Y_{2i+1})] \quad (3)$$

$$V = \frac{B}{3} \left[ (S_1 + S_n) + 2(S_1 + S_2 + \dots + S_i + \dots + S_n) + \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i S_{i+1}} \right] \quad (4)$$

其中,  $S_i$  为破岩区域某断面面积, m<sup>2</sup>;  $B$  为测点间距,  $B=0.1$  m;  $Y_i$  为第  $i$  点的破岩区域深度, m. 破岩后, 扣除破岩区域口周围岩石片落部分, 圈定破岩

区域口的边界,由于二氧化碳相变致裂破岩区域为椭圆圆形,所以以炮孔为中心,每隔 45°角量取破岩区域直径,取其最大值为椭圆的长轴  $L_a$ ,选取与长轴垂直方向的直径为椭圆的短轴  $L_b$ . 其区域面积特征如图 3 所示.

由图 3 分析可知,受二氧化碳相变致裂器泄能

头特殊的机械构造影响,SC-CO<sub>2</sub> 破岩区域上表面近似呈椭圆形.随着剪切片厚度的增加,破岩致裂区域长轴长度增加,致裂区域短轴长度减小.二氧化碳相变致裂管剪切片的厚度越大,泄爆压力越大,破岩区域形态越来越趋于瘦长.三组试验结果表明,泥岩场地 SC-CO<sub>2</sub> 破岩区域长短轴长度较

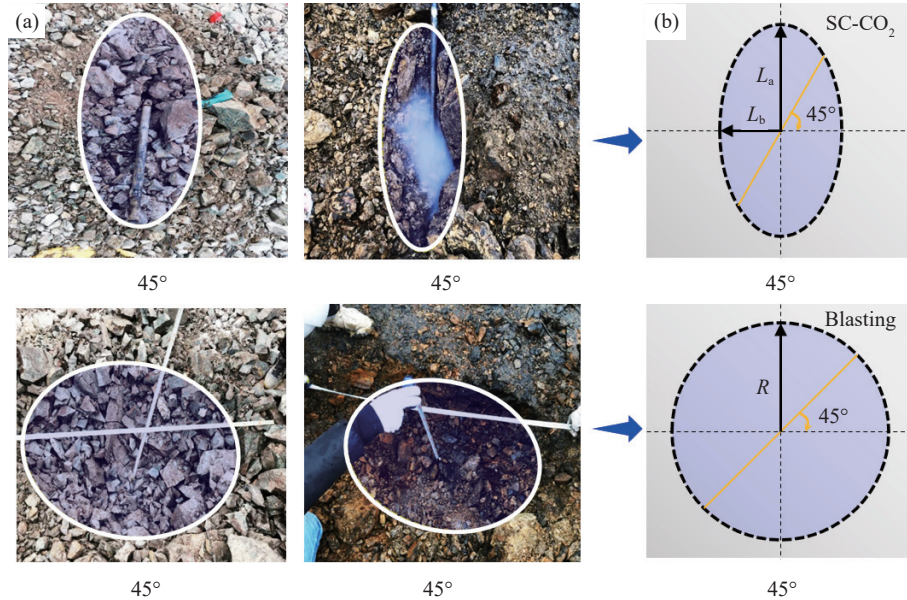


图 2 现场破岩区域形态特征对比。(a)现场实测;(b)测试统计模型

Fig.2 Comparison of morphological characteristics of rock breaking areas on site: (a) field measurement; (b) test statistics model

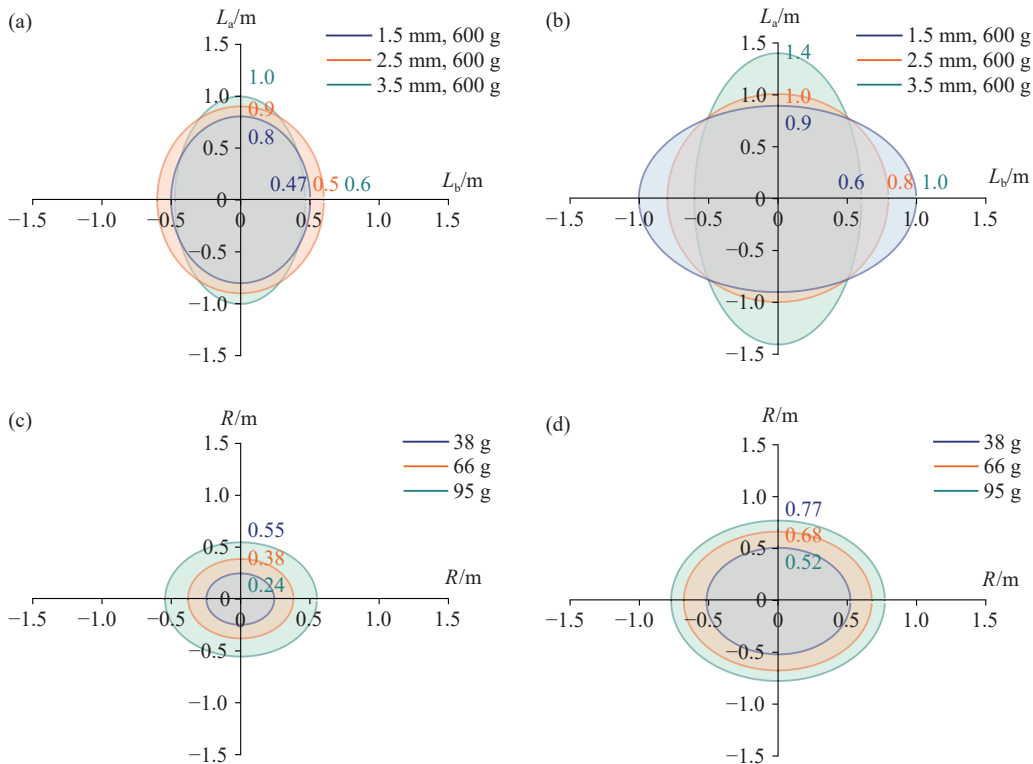


图 3 破岩区域面积特征对比。(a)花岗岩二氧化碳破岩尺寸;(b)泥岩二氧化碳破岩尺寸;(c)花岗岩炸药破岩尺寸;(d)泥岩炸药破岩尺寸

Fig.3 Comparison of area characteristics of rock breaking areas: (a) the size of granite carbon dioxide rock breaking; (b) size of mudstone carbon dioxide rock breaking; (c) granite explosive rock breaking size; (d) rock breaking size of mudstone explosive

花岗岩场地的长短轴长度大. 基于上述计算公式(4), 计算统计各实验工况破岩体积. 本次单孔 SC-CO<sub>2</sub> 破岩试验中, 定义二氧化碳单耗为每致裂单位体积岩石所消耗的液态二氧化碳质量. 同理, 炸药单耗也是爆破单位体积岩石所消耗的炸药量. 工程实践表明, 岩石硬度越高, 二氧化碳与炸药消耗量越大, 单耗是现场破岩施工中衡量施工成本的重要经济指标, 单耗越低, 破岩成本越低. 按照炸药与 SC-CO<sub>2</sub> 破岩单位体积消耗量计算统计其单耗对比如图 4 所示.

由图 4 可知, 在花岗岩场地和泥岩场地, SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩体积均分别随剪切片厚度和药量的增大而增大, 但其破岩体积的差异随着剪切片厚度的增大而减小, 图中 SC-CO<sub>2</sub> 破岩体积一直高于炸药爆破破岩体积, 表明二氧化碳破岩体积与等效当量计算炸药破岩体积存在误差, 说明该当量换算公式尚需要一定调整. 花岗岩场地 SC-CO<sub>2</sub> 破岩试验中, 当剪切片厚度由 1.5 mm 增加至 2.5 mm 时, 二氧化碳单耗下降了 3.2 kg·m<sup>-3</sup>, 当剪切片厚度由 2.5 mm 增加到 3.5 mm 时, 单耗下降 1.3 kg·m<sup>-3</sup>. 随着剪切片厚度的增加, 二氧化碳单耗的下降速率降低. 在泥岩场地 SC-CO<sub>2</sub> 破岩试验中, 当剪切片厚度由 1.5 mm 增加到 2.5 mm 时, 单耗下降了 1.1 kg·m<sup>-3</sup>, 当剪切片厚度由 2.5 mm 增加到 3.5 mm 时, 单耗下降了 1.7 kg·m<sup>-3</sup>. 整体而言, 随着剪切片厚度的增加, 泥岩场地二氧化碳单耗的下降速率增大. 在破岩体积几乎一样情况下, 根据数据计算得到二氧化碳的单耗是炸药单耗 6~11 倍.

## 2.2 块度特征及影响范围对比

大块率以及破岩范围是评价破岩效果的重要

指标, 优化致裂破岩块度是提高致裂破岩质量的关键问题之一<sup>[21]</sup>. 参考已有的爆破漏斗试验研究方法, 在本次 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩试验中, 由于药量较小, 将岩石块度小于 10 mm 的岩块定义为小块, 大于 100 mm 的岩块定义为大块, 10~100 mm 之间的岩块为合格块度, 测量筛选二氧化碳相变致裂剥离的破碎岩块, 并进行称重. 测量时岩石块度按岩块长边尺寸区分, 同一类岩块一起称重计量, 求出大于 100 mm 的大块岩石占致裂破碎总岩块重量的比例. 并根据裂缝扩展尽头定位 SC-CO<sub>2</sub> 与炸药爆破破岩影响范围, 在地表面上每隔 45° 过致裂孔中心量取两破岩区域边界之间的距离, 求取 4 个方向上的影响范围直径平均值, 定义为 SC-CO<sub>2</sub> 破岩区域影响范围直径. 破岩块度与破岩范围计算统计如图 5 所示.

由图 5 可知, 在花岗岩场地和泥岩场的 SC-CO<sub>2</sub> 破岩试验中, 随着剪切片厚度的增大, 其大块率逐渐减小, 在炸药破岩对比实验中, 随着炸药单耗的增大, 其大块率也呈现出逐渐减小的趋势, 其最低值为 16.6%. 可以看出 SC-CO<sub>2</sub> 破岩的岩石大块率要大于炸药爆破的岩石大块率. 泥岩场地 SC-CO<sub>2</sub> 破岩与炸药爆破的岩石大块率差距比花岗岩场地小. 其原因在于 SC-CO<sub>2</sub> 破岩技术中致裂器的出气口方向与其法向气体压力大小不一, 导致岩石受到的冲击压力不均匀, 大块率较高, 而炸药爆炸应力波分布均匀, 因此相同条件下, 炸药爆破的大块率要小于 SC-CO<sub>2</sub> 破岩的大块率. 由图 6 可知, 花岗岩场地 SC-CO<sub>2</sub> 破岩区域的影响范围直径最大达到 1.5 m, 而炸药的影响范围直径最多 1.3 m. 泥岩场地 SC-CO<sub>2</sub> 破岩的影响范围直径最大达到 2.2 m, 而炸药的影响范围直径最多 1.8 m, 由此看来, SC-

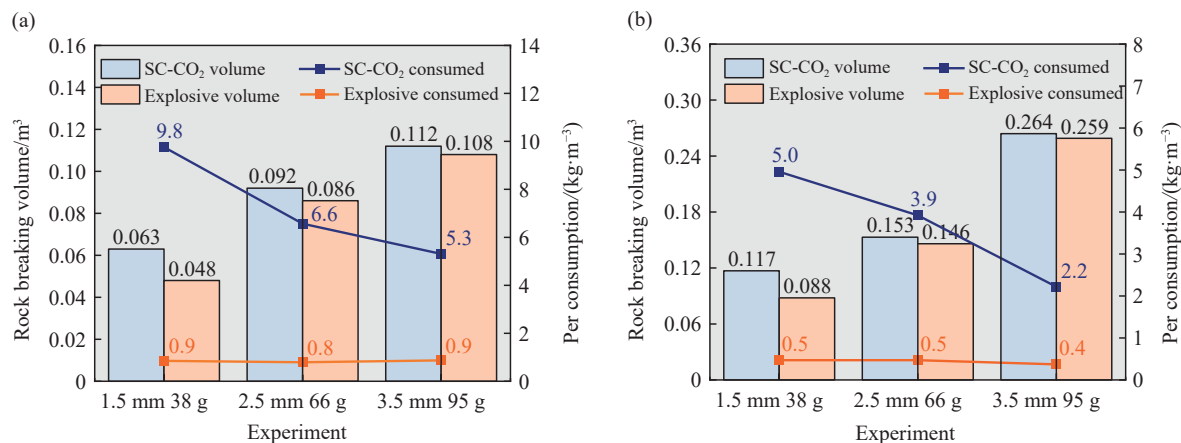


图 4 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩体积与单耗对比. (a) 花岗岩破岩实验; (b) 泥岩破岩实验

Fig. 4 Comparison of rock breaking volumes and unit consumption of SC-CO<sub>2</sub> and industrial explosives: (a) granite rock breaking experiment; (b) mudstone breaking experiment

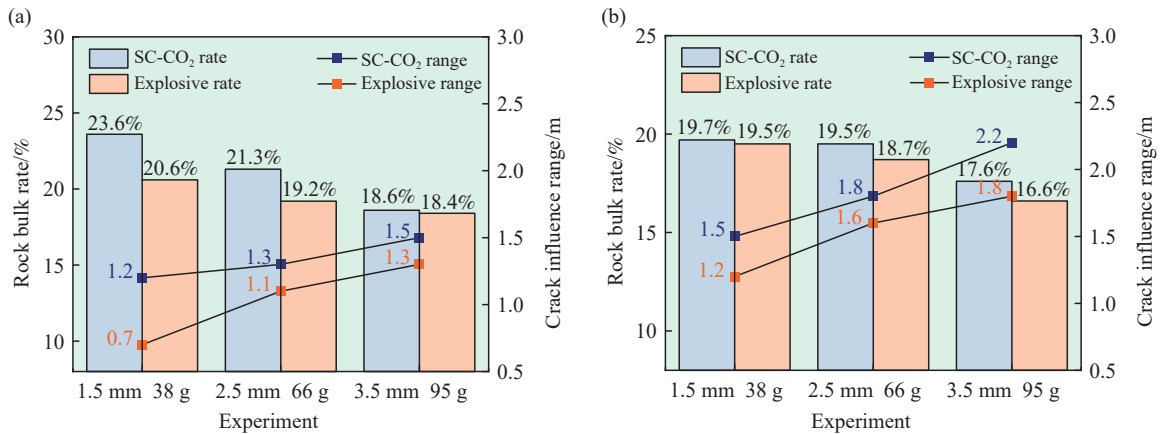


图5 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药大块率和破岩裂隙范围对比。(a)花岗岩破岩实验;(b)泥岩破岩实验

Fig.5 Comparison of bulk rates and rock breaking fracture ranges between SC-CO<sub>2</sub> and industrial explosives: (a) granite rock breaking experiment; (b) mudstone breaking experiment

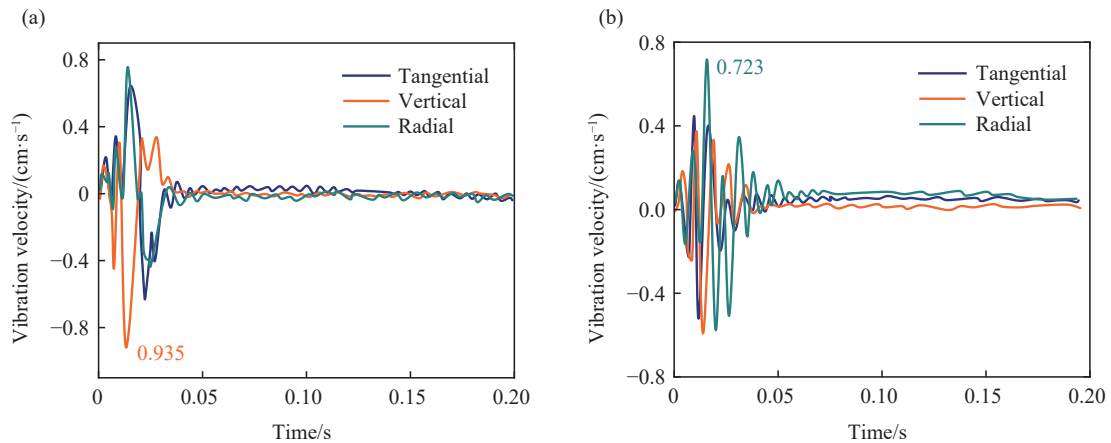


图6 SC-CO<sub>2</sub> 破岩振动测试波形。(a) 3 m M 方向的振速波形;(b) 3 m S 方向的振速波形

Fig.6 Waveform of SC-CO<sub>2</sub> rock breaking vibration test: (a) vibration velocity wave pattern in 3 m M direction; (b) vibration velocity wave pattern in the 3 m S direction

CO<sub>2</sub> 破岩的影响范围要大于炸药爆破。从破岩机理上分析, SC-CO<sub>2</sub> 致裂冲击波将岩石拉裂产生裂隙, 随后由于高压气体的气楔作用使得裂隙发育, 因此影响范围较大。而炸药主要产生应力波将岩石破碎, 裂隙发育不如二氧化碳相变致裂广泛。

### 3 破岩动力效应分析

#### 3.1 振速衰减特征对比

高压二氧化碳气体通过 SC-CO<sub>2</sub> 致裂装置泄能头定向释放, 该方向成为泄气孔方向, 为主冲击(Main shock)方向, 出气口法向方向为次冲击(Second shock)方向。根据现场振动测试数据, 在电脑端信号处理软件中对现场监测数据进行处理, 不同仪器预触发时间段不一致, 删去该段时间。此外, 剔除因人为因素而采集到的错误波形, 找出误差较大得测点波形。花岗岩场地, M 与 S 方向 3 m 处测点的三向振速波形处理后如图 6 所示。

由图 6 可以看出在 M 方向上, 竖向振速最高, 而在 S 方向上, 径向振速最高。为更直接比较 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩试验中振速随距离衰减规律以及峰值大小情况, 统计了各测点的三向振动速度峰值, 选取测点合振速峰值进行对比<sup>[22]</sup>, 如图 7 所示。

由图 7 分析可知, 随着剪切片厚度的增加, 各测点合振速峰值随之增加, 相同测点位置, 泥岩场地测点合振速峰值大于花岗岩场地, 这与岩体软硬以及完整性程度有关。观察曲线衰减特征可以发现, 在 M 与 S 方向, 随着水平距离的增加, 测点合振速峰值在近处衰减较快, 远处衰减较慢, 看出剪切片厚度越大, 释放能量越高, M 方向测点合振速峰值增长值越大, 剪切片厚度对于振动强度有直接影响。S 方向与 M 方向一样遵循上述规律。炸药单孔爆破测点合振速峰值随距离衰减规律与 SC-CO<sub>2</sub> 破岩试验中总体一样, 随着距离的增加,

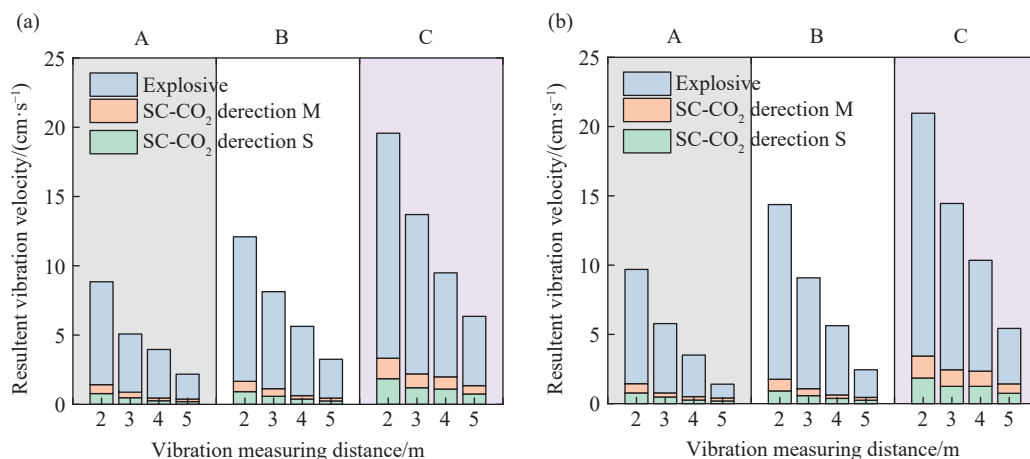


图 7 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩峰值和振速对比分析。(a)花岗岩试验;(b)泥岩试验

Fig.7 Comparative analysis of SC-CO<sub>2</sub> and industrial explosive rock breaking peak and vibration velocity: (a) granite tests; (b) mudstone tests

合振速峰值逐渐减小,且减小速率逐渐降低,呈指数型衰减.不同之处在于,4 m到5 m测点处 SC-CO<sub>2</sub> 破岩试验中合振速峰值衰减速率降低更为明显,说明工业炸药破岩能量衰减较快,SC-CO<sub>2</sub> 与破岩影响范围更广. SC-CO<sub>2</sub> 破岩地表振速远小于工业炸药破岩,根据测试数据统计计算得到工业炸药爆破测点合振速值为 SC-CO<sub>2</sub> 破岩测点合振速值的 9~11 倍.其根本原因在于二者破岩原理不同,炸药爆炸产生的应力波强度远大于 SC-CO<sub>2</sub> 破岩,符合现场实际生产中,SC-CO<sub>2</sub> 破岩对周边环境震动影响较小的特点.

### 3.2 变形特征对比

现场试验中在炮孔周围岩体埋设自制动态应变计,使用动态应变仪直接测量应变片的应变大小,采用计算公式反算得到测点应力值的方法处理现场实测应变数据.试验自制的应变计在主应力方向设有三个相互垂直铁片,铁片上安置应变砖,应变砖中放有应变片,设测点的三向应变分别为  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  和  $\varepsilon_3$ ,根据广义胡克定理,测点的主应力  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$  和  $\sigma_3$  分别按下式(5)计算<sup>[23]</sup>.

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{K}{1+\mu} \left( \frac{\mu}{1-2\mu} \theta + \varepsilon_1 \right) \\ \sigma_2 = \frac{K}{1+\mu} \left( \frac{\mu}{1-2\mu} \theta + \varepsilon_2 \right) \\ \sigma_3 = \frac{K}{1+\mu} \left( \frac{\mu}{1-2\mu} \theta + \varepsilon_3 \right) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $K$  为被测试件材料的动弹性模量,  $\theta$  为体积应变,  $\theta = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$ ,  $\mu$  为被测试件材料的动泊松比.试验中,石膏应变计动弹性模量为 400 MPa,泊松比为 0.3.

使用 DHDAS 动态应变测试系统截取波形特

征明显的部位进行数据输出,得到测点三个方向的微应变随时间的变化曲线.但由于 DH5960 动态应变测试仪灵敏性极高,现场测试环境复杂,应变片在采集数据过程中极易被各种噪声污染,故应变信号往往没有明显特征,震荡次数极多.因此需要借助 Matlab 软件进行波形去噪<sup>[24]</sup>,此操作较为简单,载入信号数据,直接在 Matlab 命令框中输入去噪程序,去噪之后  $M_{v1}$  处三向微应变波形图如图 8 所示.

由图 8 可以看出,三向应变均在 0.1 s 左右是发生突变,表明该时刻应力波传播到该位置,使各向应变片发生变形,峰值过后,应变逐渐减小表明变形结束石膏应变砖开始逐渐恢复,这时石膏应变砖处于弹性状态,但最后波形并没有恢复到 0 轴,而是在一定位置保持平稳,表明应变砖因为变形过大,有残余变形,无法恢复.

为更为直观观察测点动态响应特征,将现场测点三向应变值,转化为三向主应力值,统计三向主应力值绝对值,采用计算公式  $\sigma = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}$  得到测点合主应力值<sup>[25]</sup>,以主应力值为指标,该指标综合测点三向应力应变值,更为直观反映测点动态响应特征.花岗岩和泥岩场地试验测点应力峰值数据如图 9 所示.

由图 9 可知,SC-CO<sub>2</sub> 破岩试验中各测点三向应力值均高于炸药破岩试验中对应测点值,在花岗岩场地中,SC-CO<sub>2</sub> 破岩试验中各测点合应力值为炸药破岩试验中对应测点值的 1.2~1.6 倍,该现象原因可能是与 SC-CO<sub>2</sub> 破岩特征有关,SC-CO<sub>2</sub> 破岩分为应力波与高压气体的气楔作用两部分,在应力波消散后,二氧化碳气体持续性的气楔作用是导致测点合应力值高于炸药爆破的重要原因.

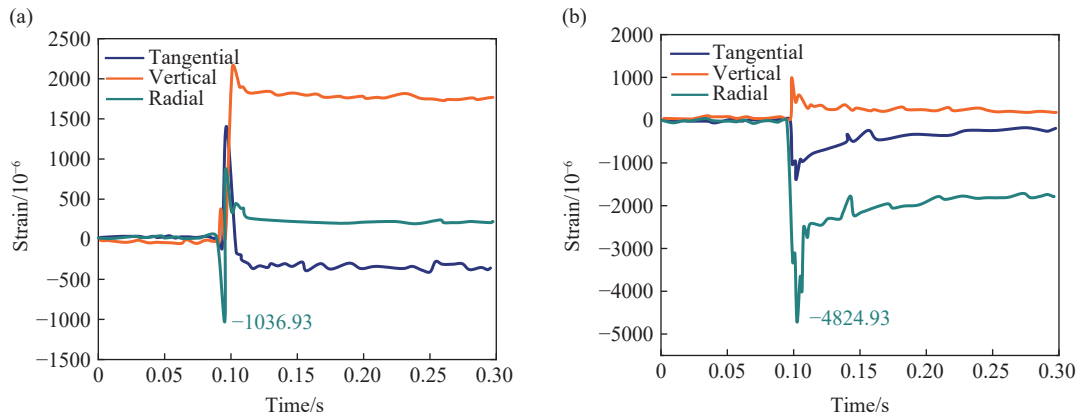


图8 处理后花岗岩和泥岩 3.5 mm 剪切片  $\epsilon_1$  测点微应变。(a)花岗岩试验;(b)泥岩试验

Fig.8 Strain of  $\epsilon_1$  measuring point of a 3.5-mm shear slice of granite and mudstone after treatment: (a) granite tests; (b) mudstone tests

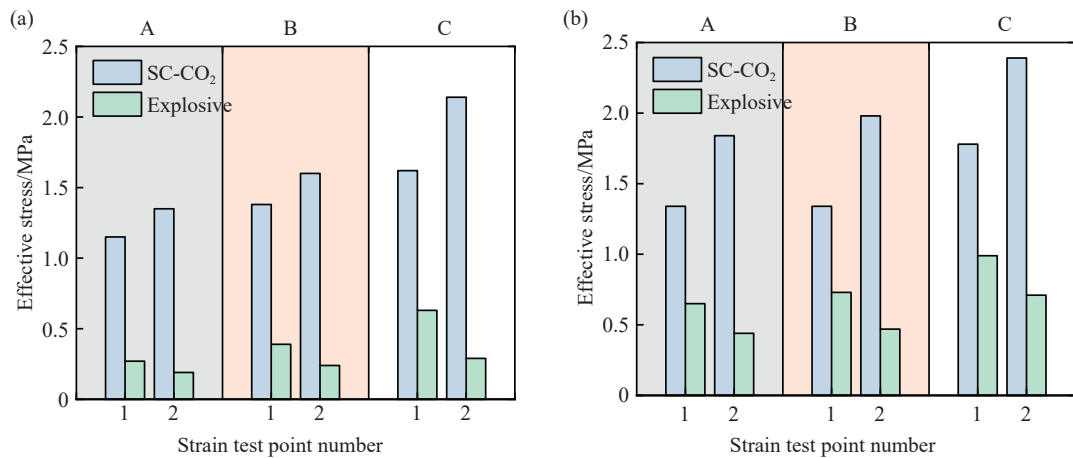


图9 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩峰值应力对比。(a)花岗岩试验;(b)泥岩试验

Fig.9 Comparison of peak stress of SC-CO<sub>2</sub> and industrial explosive rock breaking: (a) granite tests; (b) mudstone tests

泥岩场地与花岗岩场地规律一样。SC-CO<sub>2</sub> 破岩试验中各测点合应力值为炸药破岩试验中对应测点值的 1.2~1.6 倍。在振动速度对比分析中, SC-CO<sub>2</sub> 破岩地表振速远小于工业炸药破岩,但在应力应变对比分析中, SC-CO<sub>2</sub> 破岩测点合应力峰值高于工业炸药破岩,两个指标呈现出完全相反的结论,究其原因与 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩特征有关。合振速指标受应力波影响较大,受气楔作用影响较小,而应力应变指标在受应力波影响之余,继续受到气楔作用影响,且影响持续时间较长,因此, SC-CO<sub>2</sub> 破岩地表振速远小于工业炸药破岩原因在于工业炸药爆破产生冲击波较为强烈,而其合应力峰值高于工业炸药破岩原因在于 SC-CO<sub>2</sub> 破岩产生的高压气体具有气楔作用。

#### 4 结论

本研究设计进行 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩效应等效对比试验,对比分析试验过程 SC-CO<sub>2</sub> 与工业炸药破岩体积、破岩区域形态、大块率和单耗

等破岩区域特征及参量,研究其破岩过程岩体动力效应,主要研究结论如下:

(1)破岩体积与破岩区域形态分析可知,在花岗岩和泥岩场地中, SC-CO<sub>2</sub> 破岩体积较大时,其致裂破岩范围的长短轴越长。随着剪切片厚度的增加,泥岩场地二氧化碳单耗的下降速率增大,泥岩场地二氧化碳单耗变化较花岗岩场地不明显,二氧化碳单耗是炸药单耗的 6~11 倍。

(2)岩石破碎块度特征与影响范围分析可知, SC-CO<sub>2</sub> 破岩技术中致裂器的出气口方向与其法向气体压力大小不一,导致岩石收到的冲击压力不均匀,大块率较高,而炸药爆炸应力波分布均匀,因此相同条件下,炸药爆破的大块率要小于 SC-CO<sub>2</sub> 破岩的大块率, SC-CO<sub>2</sub> 破岩的影响范围要大于炸药爆破。

(3)振动速度特征对比分析可知, SC-CO<sub>2</sub> 破岩地表振速远小于工业炸药破岩,工业炸药爆破测点合振速值为 SC-CO<sub>2</sub> 破岩测点合振速值的 9~11 倍, SC-CO<sub>2</sub> 破岩对周边环境震动影响较小。

(4)测试应力应变对比分析可知, SC-CO<sub>2</sub> 破岩测点合应力峰值高于工业炸药破岩, SC-CO<sub>2</sub> 破岩试验中各测点合应力值为炸药破岩试验中对应测点值的 1.2~1.6 倍. 工业炸药爆破产生冲击波较为强烈, 而其合应力峰值高于工业炸药破岩原因在于 SC-CO<sub>2</sub> 破岩产生的高压气体具有气楔作用.

由于场地限制, 仅在花岗岩、泥岩两种场地开展现场试验. 应选用更多岩体, 使所得结论更具普适性.

## 参 考 文 献

- [1] Bajpayee T S, Rehak T R, Mowrey G L, et al. Blasting injuries in surface mining with emphasis on flyrock and blast area security. *J Saf Res*, 2004, 35(1): 47
- [2] Singh S P. Non-explosive applications of the PCF concept for underground excavation. *Tunnling Underground Space Technol*, 1998, 13(3): 305
- [3] Zhou S T, Luo X D, Jiang N, et al. A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition. *Chin J Eng*, 2021, 43(7): 883  
(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. 工程科学学报, 2021, 43(7): 883)
- [4] Wang H Z, Li G S, Shen Z H, et al. Experiment on rock breaking with supercritical carbon dioxide jet. *J Pet Sci Eng*, 2015, 127: 305
- [5] Sui H Y, Su T M, Hu R L, et al. Liquid CO<sub>2</sub> phase-transition rock fracturing: A novel technology for safe rock excavation. *Appl Sci*, 2021, 12(1): 68
- [6] Caldwell T. *A Comparison of Non-explosive Rock Breaking Techniques* [Dissertation]. Brisbane: The University of Queensland, 2004
- [7] Liu L Y, Zhu W C, Wei C H, et al. Microcrack-based geomechanical modeling of rock-gas interaction during supercritical CO<sub>2</sub> fracturing. *J Pet Sci Eng*, 2018, 164: 91
- [8] Zhou D W, Zhang G Q, Wang Y Y, et al. Experimental investigation on fracture propagation modes in supercritical carbon dioxide fracturing using acoustic emission monitoring. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2018, 110: 111
- [9] Hu S B, Pang S G, Yan Z Y. A new dynamic fracturing method: Deflagration fracturing technology with carbon dioxide. *Int J Fract*, 2019, 220(1): 99
- [10] Wang M Y. *Study on Crack Propagation Law of Liquid Carbon Dioxide Phase Transition Blasting and its Application* [Dissertation]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018  
(王明宇. 液态二氧化碳相变爆破裂纹扩展规律研究及应用[学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2018)
- [11] Kang J H, Zhou F B, Qiang Z Y, et al. Evaluation of gas drainage and coal permeability improvement with liquid CO<sub>2</sub> gasification blasting. *Adv Mech Eng*, 2018, 10(4): art. No. 168781401876857
- [12] Xie X F, Li X B, Li Q Y, et al. Liquid CO<sub>2</sub> phase-transforming rock fracturing technology in pile-well excavation. *J Cent South Univ (Sci Technol)*, 2018, 49(8): 2031  
(谢晓峰, 李夕兵, 李启月, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变破岩桩井开挖技术. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(8): 2031)
- [13] Dong Q X, Wang Z F, Han Y B, et al. Research on TNT equivalent of liquid CO<sub>2</sub> phase-transition fracturing. *China Saf Sci J*, 2014, 24(11): 84  
(董庆祥, 王兆丰, 韩亚北, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂的 TNT 当量研究. 中国安全科学学报, 2014, 24(11): 84)
- [14] Sun K M, Xin L W, Zhang S C, et al. Experimental study on laws of crack caused by gas burst of supercritical carbon dioxide. *J Saf Sci Technol*, 2016, 12(7): 27  
(孙可明, 辛利伟, 张树翠, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 气爆致裂规律实验研究. 中国安全生产科学技术, 2016, 12(7): 27)
- [15] Zhang Y N, Deng J R, Deng H W, et al. Peridynamics simulation of rock fracturing under liquid carbon dioxide blasting. *Int J Damage Mech*, 2019, 28(7): 1038
- [16] Shen X, Li Z Q, Hu R L, et al. Response spectrum analysis of carbon dioxide phase change cracking signal. *J Earth Sci Environ*, 2018, 40(5): 645  
(沈鑫, 李志清, 胡瑞林, 等. 二氧化碳相变致裂信号反应谱分析. 地球科学与环境学报, 2018, 40(5): 645)
- [17] Vidanovic N, Ognjanovic S, Ilincic N, et al. Application of unconventional methods of underground premises construction in coal mines. *Technics Technol Educ Manage*, 2011, 6(4): 861
- [18] Agrawal H, Mishra A. A study on influence of density and viscosity of emulsion explosive on its detonation velocity. *Modell Meas Control C*, 2017, 78(3): 316
- [19] Xia J Q, Dou B, Tian H, et al. Research on initiation of carbon dioxide fracturing pipe using the liquid carbon dioxide phase-transition blasting technology. *Energies*, 2021, 14(3): 521
- [20] Simpson, T A. *A Bibliography on Surface Mine Blasting*. Gotham City: State Mine Experiment Station, 1984
- [21] Gao W L, Zhang Z H, Li B J, et al. Study on numerical simulation of geometric elements of blasting funnel based on PFC5.0. *Shock Vib*, 2021, 2021(1): 1
- [22] Zhu B, Jiang N, Zhou C B, et al. Dynamic interaction of the pipe-soil subject to underground blasting excavation vibration in an urban soil-rock stratum. *Tunnelling Underground Space Technol*, 2022, 129: 104700
- [23] Zhu B, Jiang N, Zhou C B, et al. Dynamic failure behavior of buried cast iron gas pipeline with local external corrosion subjected to blasting vibration. *J Nat Gas Sci Eng*, 2021, 88: 103803
- [24] Wang H L, Bai H B, Zhao Y, et al. The removal method of the blasting vibration signal trend item and noise. *Shock Vib*, 2021, 2021(1): 1645380
- [25] Yang Y M, Jiang N, Zhou C B, et al. Damage analysis and safety control of surrounding rock around peripheral hole of diversion tunnel. *Eng Fail Anal*, 2024, 160: art. No. 108226