

## 二氧化碳相变致裂技术研究进展与展望

周盛涛<sup>1)</sup>, 罗学东<sup>1,2)</sup>✉, 蒋楠<sup>1,2)</sup>, 张宗贤<sup>3)</sup>, 姚颖康<sup>1,2)</sup>

1) 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074 2) 江汉大学爆破工程湖北省重点实验室, 武汉 430024 3) 奥卢大学奥卢矿业学院, 奥卢 90014

✉通信作者, E-mail: [cugluoxd@foxmail.com](mailto:cugluoxd@foxmail.com)

**摘要** 二氧化碳相变致裂作为一种环境友好的绿色破岩技术, 具有破岩效率高、振动小、无污染等优点, 近年来已成为岩石破碎与开挖领域的热门研究课题, 相关研究发展迅速。大量学者运用理论分析、实验研究和数值模拟等手段对二氧化碳相变致裂技术进行了广泛探究, 并取得了一些有益进展。通过对现有相关研究成果的调研分析, 阐述了二氧化碳相变致裂技术的破岩机理, 回顾了二氧化碳相变致裂荷载特征及其测试手段, 归纳了致裂荷载表征方法, 概括了致裂荷载与致裂效果的主要影响因素, 分析了二氧化碳相变致裂的有害效应, 总结了二氧化碳相变致裂技术在多领域的应用, 并探讨了二氧化碳相变致裂当前存在的问题与未来挑战, 以期期为二氧化碳相变致裂技术的理论研究和工程应用推广提供参考。

**关键词** 二氧化碳; 岩石破碎; 破岩机理; 荷载特征; 有害效应

**分类号** TU94+1

## A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition

ZHOU Sheng-tao<sup>1)</sup>, LUO Xue-dong<sup>1,2)</sup>✉, JIANG Nan<sup>1,2)</sup>, ZHANG Zong-xian<sup>3)</sup>, YAO Ying-kang<sup>1,2)</sup>

1) Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

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

3) Oulu Mining School, University of Oulu, Oulu 90014, Finland

✉ Corresponding author, E-mail: [cugluoxd@foxmail.com](mailto:cugluoxd@foxmail.com)

**ABSTRACT** With continuously increasing urban construction, more underground projects require the breaking of rocks near sensitive areas, such as hospitals, schools, and residential areas. On one hand, since conventional blasting that uses explosives has a negative impact on the safety of the surrounding buildings and brings about noise and flying rocks, the use of explosives are sometimes not allowed. On the other hand, the efficiency of mechanical rock excavation is very low, resulting in a low speed of rock excavation and high operation cost. In view of this situation, techniques that incorporate carbon dioxide phase transition fracturing have been tried in rock fragmentation in complex and sensitive environments such as those mentioned above. Furthermore, carbon dioxide phase transition fracturing is also regarded as an ideal substitute for the explosives in the field of coal permeability improvement. As an environmentally friendly rock-breaking technology, carbon dioxide phase transition fracturing has the advantages of high excavation efficiency, low vibration, and no pollution. In recent years, it has become a hot topic in the field of rock breakage and excavation. Research on this gas explosion technology has been developed rapidly and several useful progresses were made in this technology using theoretical analysis, experiments, and numerical simulations in a wide range. Through investigation and analysis of existing research results, the rock breakage mechanism of carbon dioxide phase transition fracturing was elaborated. A review was also presented on the fracturing load characteristics and its testing method. The main factors influencing the fracture load and fracture result were recapitulated. This review also analyzed the harmful effects of this new technique and generalized the applications of this technology in different fields. Finally, the

收稿日期: 2020–11–05

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)

problems and future challenges of carbon dioxide phase transition fracturing were discussed. The review aims to provide a reference for the theoretical research, generalization, and application of carbon dioxide phase transition fracturing technology.

**KEY WORDS** carbon dioxide; rock breakage; rock-breaking mechanism; load characteristics; harmful effect

由于资源开发、工程建设等方面的需要, 人类对岩石破碎的需求从未停歇. 早在公元前 5 世纪, 我国就采用火爆法落矿. 自 19 世纪以来, 硝化甘油炸药的发明使爆破成为应用最广泛的岩石破碎开挖方法<sup>[1]</sup>. 爆破作为一种高加载率破岩方法, 不可避免地带来振动、空气冲击波和飞石等公害<sup>[2-3]</sup>, 且存在损伤原岩、对临近建筑物扰动较大等缺点. 为克服爆破的诸多缺点, 一些安全可靠的爆破替代技术逐步被引入岩石破碎与开挖领域. 其中, CO<sub>2</sub> 相变致裂具有安全性好、操作方便、破岩效率高、公害小等优点, 在各类岩体破碎开挖工程中使用较多.

CO<sub>2</sub> 相变致裂以超临界 CO<sub>2</sub> 与气态 CO<sub>2</sub> 之间的能量差作为破岩动力, 致裂时液态 CO<sub>2</sub> 首先吸热转化为超临界态, 再卸压膨胀转换为高压气体, 破碎岩石. 整个致裂过程不仅无火花, 还能吸热抑燃, 属于典型的物理爆炸<sup>[4]</sup>. 该技术起源于 20 世纪初, 最初用于英国煤矿中的低透气高瓦斯煤层增透和开采, 以达到减少开采煤尘、降低瓦斯爆炸风险的目的<sup>[5]</sup>, 随后在美、德、法等国的煤矿中大量使用<sup>[6]</sup>. 得益于煤矿机械化生产的快速发展, 20 世纪 70 年代末, 英国在采煤领域全方位推广了机械化开采, 停止了 CO<sub>2</sub> 相变致裂管的使用<sup>[7]</sup>. 与此同时, 此技术开始在钢铁、水泥、电力等领域崭露头角, 用于结块清除、管道清堵、料仓破拱<sup>[8]</sup>.

如今, CO<sub>2</sub> 相变致裂在改善瓦斯抽放、复杂环境下岩土体开挖等领域破岩的优势再度得到关注, 但因其致裂效果影响因素较多, 理论研究尚处于起步阶段, 生产规范还未形成, 大规模推广应用仍存在一定困难. 为推动该技术在岩石破碎与开挖领域的大规模应用, 本文针对国内外 CO<sub>2</sub> 相变致裂相关研究成果, 系统归纳分析了 CO<sub>2</sub> 相变致裂设备、致裂原理、致裂荷载、致裂效果影响因素及有害效应研究现状, 介绍了该技术在各个领域的应用情况, 并指出了该技术现有研究的不足和未来发展趋势.

## 1 二氧化碳相变致裂技术

### 1.1 致裂设备

CO<sub>2</sub> 相变致裂对机械设备要求较高, 使用时需配

备 CO<sub>2</sub> 储液罐、CO<sub>2</sub> 充填设备、CO<sub>2</sub> 相变致裂管<sup>[7]</sup> (图 1). CO<sub>2</sub> 相变致裂管由充装头、发热管、储液管、密封垫、剪切片及泄能头组成<sup>[4,7]</sup>, 如图 2 所示.

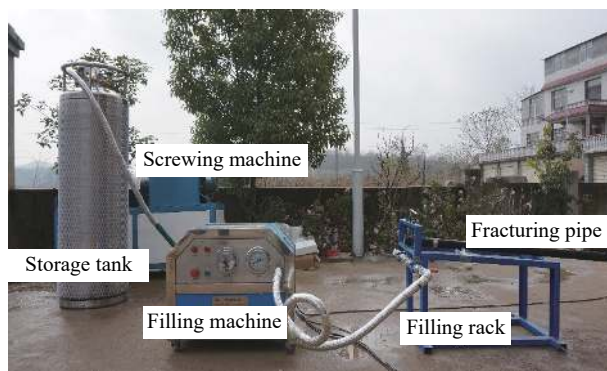


图 1 二氧化碳相变致裂设备

Fig.1 Mechanical equipment of the carbon dioxide phase transition fracturing

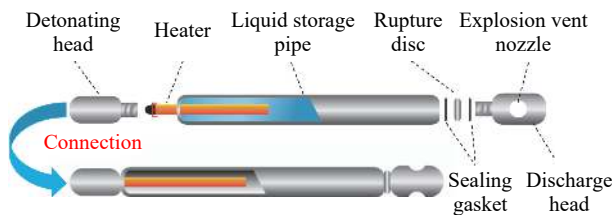


图 2 二氧化碳相变致裂管结构图

Fig.2 Structure of carbon dioxide phase transition fracturing pipe

充装头上设置有充液阀, 是液态 CO<sub>2</sub> 注入致裂管的通道; 此外, 还设置有电阻芯, 用于传导起爆电流. 发热管化学成分特殊, 在极小的电流下即可发热, 从而促使 CO<sub>2</sub> 由液态转化为超临界态<sup>[7,9]</sup>. 储液管通常由高强度合金材料制成, 是 CO<sub>2</sub> 发生相态转换的场所. 剪切片与密封垫在致裂管激发前对储液管起到密封作用, 致裂管通电起爆时, 剪切片厚度在起爆时控制致裂管爆力大小. 泄能头通常与储液管材质相同, 泄能头上设置的泄爆口 (泄爆喷嘴) 是高压 CO<sub>2</sub> 气体释放的通道.

### 1.2 致裂原理

当温度超过 31.3 °C 且压力超过 7.39 MPa 时, 二氧化碳进入超临界态. CO<sub>2</sub> 相变致裂时, 发热管通电释放大量热量, 储液管内的液态 CO<sub>2</sub> 受热相变为超临界态, 管内压力升高. 当管内压力超过剪切片的额定压力时, 剪切片发生破断, 超临界 CO<sub>2</sub> 瞬间卸压膨胀为高压气体, 破碎岩石.

自 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术问世以来, 对其破岩机理的讨论从未间断. Singh<sup>[10]</sup> 分析了致裂管 Cardox 的作用过程, 认为致裂释放的高压 CO<sub>2</sub> 气体通过对岩体施压产生拉应力场, 以较小的拉应力破坏岩石, 岩体内部随后产生锥形裂隙, 达到破岩目的(图 3). 现有观点普遍认为, 致裂时高压气体冲击钻孔壁, 激发强烈的应力波, 致裂孔近区岩体内部压应力远高于岩石的极限抗压强度, 岩石受压破碎, 形成压碎区. 压碎区外岩体内部压应力低于岩石动抗压强度, 但岩体受压产生的环向拉应力大于岩石的极限抗拉强度, 岩石受拉破坏; 高压气体随后进入拉破坏裂隙, 初始裂隙发生二次扩展, 这部分区域被称为裂隙区. 应力波在裂隙区外侧不断衰减, 该区域岩体仅受弹性波作用产生震动, 属于震动区(图 4)<sup>[11-13]</sup>. CO<sub>2</sub> 相变致裂荷载下的岩石破碎本质上是应力波与高压气体共同驱动下的岩体裂纹扩展行为. 冲击动应力在高压 CO<sub>2</sub> 气体释放的瞬间破坏岩石, 使其产生初始裂隙, 裂纹尖端进而在远场应力与高压气体压力作用下向前扩展. 裂纹扩展受气体压力、裂纹尺寸形状、射流方向等多因素共同控制<sup>[14-18]</sup>.

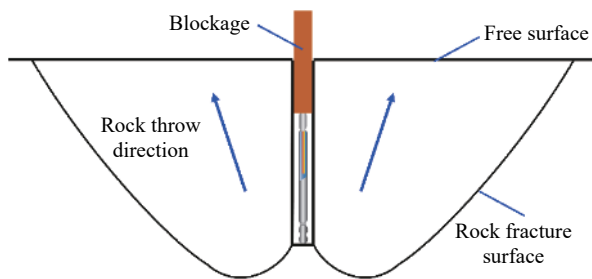


图 3 贯通式锥型破碎  
Fig.3 Penetrating cone fracture

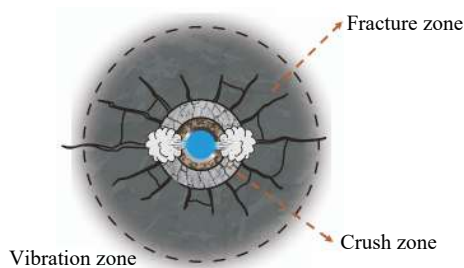


图 4 钻孔围岩分区示意图  
Fig.4 Surrounding rock zones of the borehole

## 2 二氧化碳相变致裂荷载

### 2.1 荷载特征

尽管 CO<sub>2</sub> 相变致裂压力曲线表现为类似爆破荷载的近三角形形式<sup>[18-21]</sup>, 但由于破岩能量来源不

同, CO<sub>2</sub> 相变致裂荷载与爆破荷载区别明显. CO<sub>2</sub> 相变致裂时, 气楔作用时长大于应力波作用时间, 较大部分能量的表现形式为气楔作用, 应力波能量占比较低, 加载率偏小. CO<sub>2</sub> 相变致裂峰值压力与升压时长介于爆破与水力压裂之间, 升压段斜率小于爆破荷载的升压段斜率, 高压作用持续时间较爆破荷载更长, 属于中应变率长时荷载<sup>[22]</sup>(表 1).

表 1 不同破岩技术荷载参数对比<sup>[22-24]</sup>

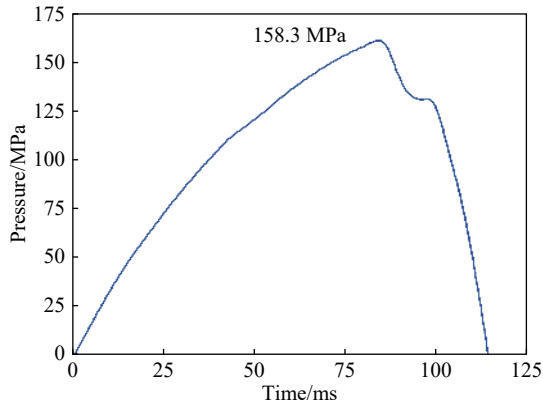
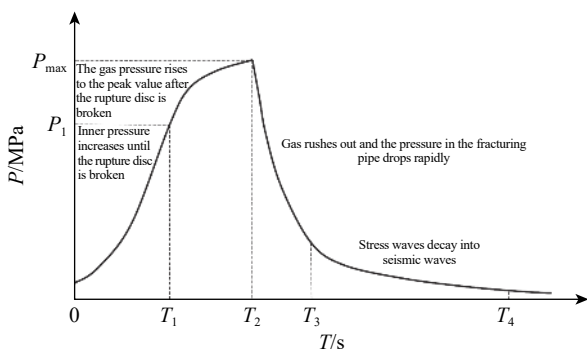
Table 1 Load parameters of different rock-breaking technologies

Methods	Peak pressure/MPa	Pressure rise time/s	Loading rate/(GPa·s <sup>-1</sup> )	Total time/s
Blasting	~10 <sup>4</sup>	~10 <sup>-6</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>6</sup>	>10 <sup>-6</sup>
CO <sub>2</sub> phase transition fracturing	~10 <sup>2</sup>	~10 <sup>-3</sup>	10-10 <sup>2</sup>	~10
Hydraulic fracturing	~10	~10 <sup>2</sup>	10 <sup>-1</sup> -10 <sup>-2</sup>	~10 <sup>4</sup>

### 2.2 致裂压力测试

CO<sub>2</sub> 相变致裂峰值压力是评价 CO<sub>2</sub> 相变致裂爆力的重要指标, 致裂压力曲线特征分析是致裂理论研究的基础. CO<sub>2</sub> 相变致裂峰值压力远低于爆破峰值压力, 在传感器可测量程内, 因此可直接开展致裂压力曲线测试. 为获取致裂孔内冲击压力变化规律, 谢晓锋等<sup>[25]</sup> 将 PVDF 压电薄膜传感器布置在致裂管外壁和泄能头腔内, 采集致裂孔内泄爆压力曲线, 测试结果如图 5 所示. 但由于采用 PVDF 压电薄膜传感器时, 无法直接测试泄爆口处钻孔壁受荷特征, 压力测试曲线的可用性仍有待验证. 现阶段, 大多数学者主要采用室内测试方法获取泄爆压力时程曲线, 主要分为管内测试和管外测试. 周西华等<sup>[26]</sup> 直接测试致裂管内部压力, 将压力测试曲线分为四段: ①管内二氧化碳受热升压至泄能片破断压力; ②剪切片破断后气体压力继续升高至峰值压力; ③气体冲出, 致裂管内压力和冲击波速度迅速下降; ④应力波衰减为地震波(图 6). 此外, 剪切片破断后致裂管与大气连通, 因此致裂管内压力测试曲线泄压段能在一定程度上反映相变致裂对目标介质的做功情况. 周科平等<sup>[27]</sup> 以此为依据分析致裂管内压力测试曲线, 发现 CO<sub>2</sub> 相变致裂时最大加载速率约为 227.19 ~ 299.34 GPa·s<sup>-1</sup>.

管外压力测试较管内测试形式更加多样. Ke 等<sup>[28]</sup> 在射流方向上设置一系列压力传感器, 采集得到自由场中各位置处压力, 并将压力曲线正相段分为四段——射流压力迅速升高至峰值、压力略

图 5 致裂孔内压力测试曲线<sup>[25]</sup>Fig.5 Pressure test curve in the fracturing hole<sup>[25]</sup>图 6 致裂管内压力测试曲线示意图<sup>[26]</sup>Fig.6 Pressure test curve in the fracturing pipe<sup>[26]</sup>

降至某一固定压力、射流压力维持在固定值、压力逐渐衰减至 0。致裂管在钻孔中起爆后, 高压 CO<sub>2</sub> 气体在受限空间内发生聚集运移。为准确获取致裂孔内气体压力变化特征, 雷云<sup>[29]</sup> 与郑天照<sup>[20]</sup> 用无缝钢管模拟致裂孔, 测试轴向渗失条件下的气体压力变化, 发现射流核心冲击区压力具有峰前线性升高和峰后非线性下降的三角脉冲特点; 随着与泄爆口距离的增加, 致裂峰值压力呈指数形式降低。为模拟致裂高压气体在目标煤(岩)体中的渗失, 郑天照<sup>[20]</sup> 进一步在钢管侧壁增设径向渗失孔, 发现气爆能量在渗失孔周围聚集, 渗失孔周围压力表现为梯形脉冲。此外, 气楔压力是影响裂纹扩展长度的关键因素, 但由于岩石破裂时裂纹扩展具有随机性, 气楔压力曲线监测难度较大。孙可明等<sup>[16]</sup> 通过在混凝土试件中预制弱面的方式克服了这一问题, 发现气楔压力服从负指数衰减规律。

总体而言, 学者们提出了一系列 CO<sub>2</sub> 相变致裂压力测试方法, 分析了 CO<sub>2</sub> 相变致裂压力变化特征, 但上述测试方法的可靠性仍待探讨。随着荷载特征研究的深入, 系统分析不同压力测试方法的准确性, 对比优选合理的致裂压力测试方法, 是

未来二氧化碳相变致裂基础研究的重要发展方向。

### 2.3 致裂荷载表征方法

尽管压力测试曲线能直观表示二氧化碳相变致裂爆力, 但致裂压力测试试验条件要求高, 开展难度大。为方便理论分析和数值计算中对 CO<sub>2</sub> 相变致裂荷载进行定量描述, 学者们提出多种相变致裂荷载表征方法, 其中, 最常见的是用压力容器爆炸能量表征致裂总能量。董庆祥等<sup>[30]</sup> 对比三种常用的压力容器爆炸能量计算方法, 提出应选用压缩气体和水蒸气容器爆炸能量计算方法计算致裂总能量  $E$ :

$$E = \frac{PV}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{0.1013}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \times 10^3 \quad (1)$$

其中,  $E$  为致裂总能量, kJ;  $P$  为致裂器内气体的绝对压力, MPa;  $V$  为储液管容积, m<sup>3</sup>;  $k$  为二氧化碳的绝热指数, 取 1.295。

Ke 等<sup>[20]</sup>、郭勇等<sup>[31]</sup> 利用 Span Wagner 状态方程, 从爆炸热力学角度分析了致裂总能量。作为爆炸能量的外部表现形式, 致裂振动在一定程度上能反映爆源总能量大小, 郭杨霖<sup>[32]</sup>、Yang 等<sup>[33]</sup> 对比三硝基甲苯(TNT)爆炸和 CO<sub>2</sub> 相变致裂振动时程曲线的均方根值和振动能量, 计算得到 1 kg 二氧化碳的 TNT 当量分别为 430 g 和 380 g, 均能满足工程需求。孙可明等<sup>[34]</sup> 通过拟合气爆口的压力测试曲线得到了 CO<sub>2</sub> 气爆射流对应的 JWL 方程参数, 用 JWL 方程描述了致裂荷载。

上述研究表明, CO<sub>2</sub> 相变致裂荷载表征研究现阶段主要集中在致裂总能量计算方面, 忽略了致裂能量的作用过程, 具有一定局限性。因此, 有必要结合 CO<sub>2</sub> 相变致裂过程, 深入研究考虑能量作用过程的致裂荷载定量表征方法。

### 2.4 致裂荷载影响因素

CO<sub>2</sub> 相变致裂泄爆总能量主要由液态 CO<sub>2</sub> 充装量和剪切片厚度控制。CO<sub>2</sub> 充装量主要通过影响二氧化碳泄压持时和峰值致裂压力控制致裂总能量, 肖诚旭<sup>[35]</sup> 通过分析不同剪切片厚度、CO<sub>2</sub> 充装量下的膛压测试结果发现, 当 CO<sub>2</sub> 充装量由 1075 g 增至 1475 g 时, 峰值致裂压力仅提高 11.6%, 远小于剪切片厚度对峰值压力的影响。谢晓锋等<sup>[13]</sup> 拟合了致裂总能量与剪切片破断压力的特征曲线, 发现致裂总能量随剪切片破断压力的增大而增大。此外, Lu 等<sup>[7]</sup> 认为致裂总能量不仅与峰值致裂压力有关, 还与喷嘴射流速度、气体密度和管外压力有关。其中, 喷嘴射流速度是射流流场中的

关键参数,  $\text{CO}_2$  相变射流流场受喷嘴形状、数量和面积等因素共同控制. 黄晓实等<sup>[36]</sup> 研究认为, 楔形喷嘴压力场长而集中, 且峰值压力更大; 方形喷嘴压力场粗且密集, 压力分布更加分散. 周航<sup>[19]</sup> 研究发现, 双孔喷嘴的  $\text{CO}_2$  射流压力曲线经历应力激增、应力剧减、应力减速衰减三个阶段, 而四孔喷嘴压力曲线有应力升高、应力激增、应力剧减和应力衰减四个阶段; 泄爆喷嘴总面积越接近致裂管内截面面积, 致裂峰值压力越大.

可以看出, 现有研究主要围绕单一变量下致裂荷载的变化特征展开, 但  $\text{CO}_2$  相变致裂荷载受多因素共同控制, 分析不同因素对致裂荷载的影响权重, 建立多因素  $\text{CO}_2$  泄爆射流荷载数学模型, 对  $\text{CO}_2$  相变致裂工程应用有重要意义.

### 3 二氧化碳相变致裂效果影响因素

$\text{CO}_2$  相变致裂应用过程中, 其致裂效果是最主要的关注点之一.  $\text{CO}_2$  相变致裂效果受爆源参数与外部因素共同控制, 明晰不同因素对致裂效果的影响规律, 能有效指导孔网参数选取, 优化致裂效果, 对提高致裂破岩效率意义重大. 近年来, 部分学者通过理论分析、室内试验、现场试验和数值模拟等手段在此领域进行了初步探究.

#### 3.1 爆源参数

$\text{CO}_2$  充装量和峰值致裂压力是  $\text{CO}_2$  相变致裂爆源参数, 主要通过控制致裂管爆力影响致裂效果. 周西华等<sup>[37]</sup> 以井下相变致裂后瓦斯现场抽采效果为评价指标, 发现致裂有效半径与峰值致裂压力呈正相关, 当峰值压力增至 280 MPa 后, 致裂半径的增长趋于平缓 (图 7). 孙可明等<sup>[15]</sup> 统计了混凝土试件室内致裂试验的主裂纹条数  $N$  和裂纹累计长度  $D$ , 发现主裂纹数量和裂纹累计长度均与峰值致裂压力  $P$  呈对数函数关系 (图 8). 除峰值致裂压力外,  $\text{CO}_2$  充装量是保证致裂较长持时的关键因素, 对致裂效果的影响不容忽视. 田泽础<sup>[38]</sup> 研究发现,  $\text{CO}_2$  充装量越大时, 致裂压碎区范围越大, 裂缝数目越多, 破岩块度分布范围越广. 工程应用中, 综合考虑两种爆源参数对破岩效果的影响, 对提升破岩效果有重要意义.

#### 3.2 孔网参数设计

工程爆破中, 合理的孔网参数设计方案能有效控制爆炸能量分布, 得到理想的破岩效果. 矩形布孔和梅花形布孔是爆破中常用的布孔形式, 实践表明, 上述两种布孔方式下致裂破岩效果区别明显. 矩形布孔时, 致裂孔孔间贯通面积小, 大块

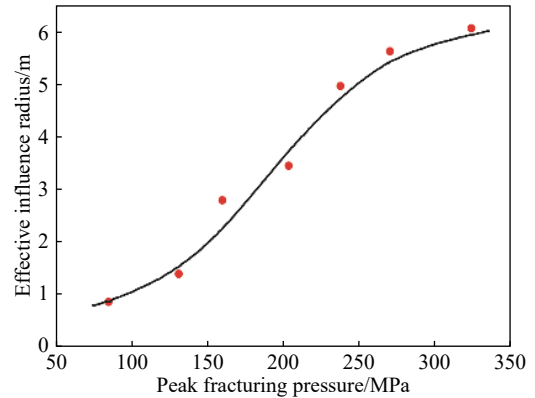


图 7 有效影响半径随致裂峰值压力的变化情况<sup>[37]</sup>

Fig.7 Variation of effective influence radius with varying peak fracturing pressures<sup>[37]</sup>

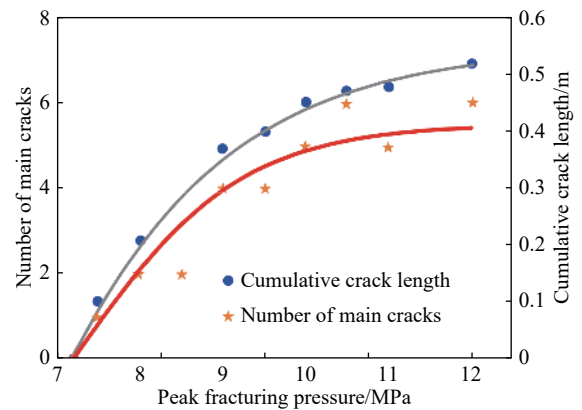


图 8 不同峰值压力下裂纹累计长度和主裂纹条数变化情况<sup>[15]</sup>

Fig.8 Variation in cumulative crack lengths and the number of main cracks with varying peak fracturing pressures<sup>[15]</sup>

率较高; 而梅花形布孔时, 裂纹在行、列与对角线方向上均能贯通, 是一种更优的布孔方式<sup>[39]</sup>. 王兆丰等<sup>[40]</sup>、李豪君等<sup>[41]</sup> 在平煤十三矿开展井下增透试验, 对比矩形和梅花形布孔时的煤层增透效果, 发现梅花形布孔时, 瓦斯抽采达标仅需 100 ~ 125 d, 较矩形布孔时短 15 ~ 20 d. 群孔  $\text{CO}_2$  相变致裂破岩时, 可考虑采用梅花形布孔优化破岩效果.

岩体爆破开挖时, 若设置有控制孔, 应力波会在控制孔处发生反射叠加, 促进爆生裂纹发育.  $\text{CO}_2$  相变致裂中, 无控制孔时裂纹一般受自由面应力波反射叠加作用发生贯通, 有控制孔时裂纹常沿致裂孔与控制孔连线方向发育, 控制孔对裂纹扩展有导向作用<sup>[39]</sup>. 谢晓锋等<sup>[13]</sup> 开展了三种含控制空孔的桩井开挖试验 (图 9), 发现控制空孔布置过多时 (方案 1), 会增加气体逸散途径, 减弱破岩效果; 控制空孔设置过少时 (方案 2), 致裂效果较差, 需要二次破裂; 仅当控制空孔数量设置合理时 (方案 3) 破岩效果较好, 说明控制孔过多与过少均会弱化破岩效果, 选择合适的控制孔数量有利

于提升破岩质量. 此外, 周西华等<sup>[42]</sup>、Kang 等<sup>[43]</sup>、题正义与陈波<sup>[44]</sup>借助数值模拟发现, 有控制孔时

致裂影响范围更大, 煤层 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透时, 可先利用控制孔优化致裂效果, 后利用控制孔抽采瓦斯.

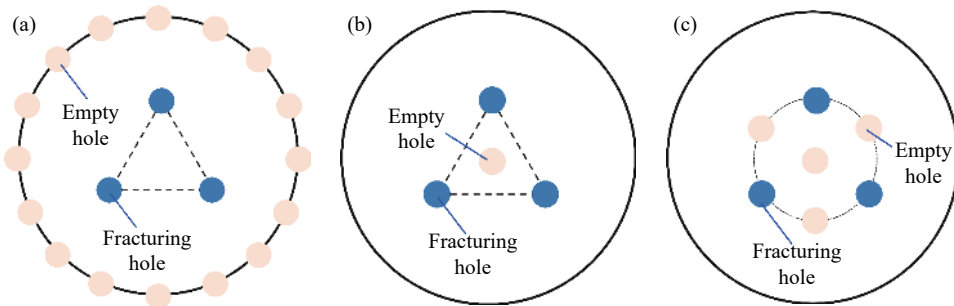


图 9 三种不同的桩井开挖方案<sup>[12]</sup>. (a) 方案 1; (b) 方案 2; (c) 方案 3

Fig.9 Three different pile well excavation schemes<sup>[12]</sup>: (a) scheme 1; (b) scheme 2; (c) scheme 3

针对 CO<sub>2</sub> 相变致裂孔网参数的定性研究已经明确了布孔方式与控制孔对致裂效果的影响, 但科学的致裂孔网参数设计标准尚未形成, 因此以既有研究为基础, 系统探究钻孔数量、间距、布置方式对致裂效果的影响规律, 建立一套 CO<sub>2</sub> 相变致裂孔网参数设计规范, 是未来 CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩应用研究的重点研究方向.

### 3.3 围压作用

深部岩体的破裂失稳往往受地应力场影响, 地应力既能提高目标破碎岩体强度, 又能对裂纹扩展起到导向作用, 不同地应力场对 CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩效果的影响规律是其用于深部岩体破碎开挖的核心问题. 孙可明等<sup>[34, 45-46]</sup>分析不同初应力下的致裂效果发现, 裂隙数量与长度均随初始应力的增大而减小, 压碎区和裂隙区范围也与初始应力呈负相关关系. 此外, 初始压应力能促进裂纹沿初始压应力方向起裂扩展, 同时通过阻碍高压气体进入方向与其垂直的裂隙, 抑制初始压应力垂直方向上的裂纹扩展. 试验表明, 控制垂直向初始应力不变, 逐渐增大水平向初始应力时, 水平向初始应力变化不影响该方向上裂纹的发育方向, 但控制垂直向裂纹扩展向水平方向发生偏转, 且偏转角度随着两方向应力差的增大而增大, 此外, 垂直向裂纹扩展长度随应力差的增大而减小. 田泽础<sup>[38]</sup>研究发现, 主应力差对非聚能方向上的裂纹发育有明显影响, 主应力差较大时, 非聚能方向上径向裂纹发育明显; 反之, 该方向上裂纹扩展范围较小.

学者们已围绕不同应力下致裂裂纹扩展变化规律开展了一些探索, 但研究中往往忽略 CO<sub>2</sub> 泄爆射流的定向致裂特点. 随着深部地下工程的发展, 综合考虑 CO<sub>2</sub> 相变射流定向致裂特点与岩体

应力赋存条件, 分析不同应力状态下射流方向对裂纹起裂扩展的影响规律, 提出不同地应力下 CO<sub>2</sub> 定向致裂控制方案, 是未来 CO<sub>2</sub> 致裂应用于深部岩体控制开挖的重要研究课题.

## 4 二氧化碳相变致裂有害效应研究

岩体开挖安全控制与环境保护是工程爆破领域的关键课题, 分析动力破岩过程中地震波、飞石、噪声、粉尘、空气污染等有害效应的形成与传播机制, 对复杂环境下岩体开挖工程安全与环保意义重大. 由表 1 可知, CO<sub>2</sub> 相变致裂峰值压力与加载率较低, 对应的应力波峰值强度较小, 致裂时高压 CO<sub>2</sub> 气体沿岩体裂隙和微裂缝扩散, 岩石以受拉破坏为主, 难以抛掷形成飞石, 噪声、振动也较小<sup>[4]</sup>.

尽管致裂激发的振动强度较低, 但由于 CO<sub>2</sub> 相变致裂常被用于复杂敏感环境下的岩体开挖工程中, 其振动控制要求较高, 振动效应不可忽视. 研究表明, CO<sub>2</sub> 相变致裂振动由气爆应力波激发, 振速与应力均随传播距离增大而减小<sup>[34, 47]</sup>, 振速曲线频率集中在 0~100 Hz 内<sup>[48]</sup>, 不发生高频振荡<sup>[25]</sup>, 强度远小于爆破振动<sup>[49]</sup>, 典型 CO<sub>2</sub> 相变致裂振速时程曲线如图 10 所示.

飞石、噪声、粉尘、空气污染是露天爆破安全控制中的重要内容, 部分学者针对上述露天施工有害效应进行了初步探索. 李启月等<sup>[50]</sup>在基坑致裂开挖时设置防爆毯, 发现致裂时无飞石产生, 扬尘较少, 16 m 外声音强度小于 76 dB, 能满足敏感区域开挖的要求. 此外, CO<sub>2</sub> 相变致裂低加载率的特点有利于岩石断裂, 岩石以受拉破坏为主, 从源头上抑制了破岩粉尘的产生. 刘光辉与王海亮<sup>[51]</sup>通过现场致裂试验发现, 致裂破岩产生的粉尘和

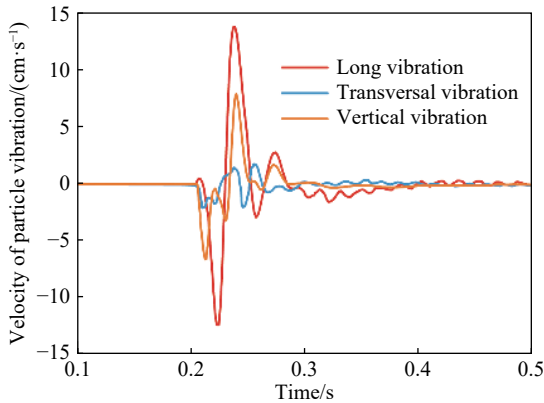


图10 典型CO<sub>2</sub>相变致裂振动速度时程曲线<sup>[25]</sup>

Fig.10 Velocity-time history curve of a typical carbon dioxide phase transition fracturing vibration<sup>[25]</sup>

炮烟较爆破减少了50%。整体而言,CO<sub>2</sub>相变致裂的飞石、噪声、粉尘较小,环保优势明显。陶明等<sup>[49]</sup>通过理论计算发现,每破碎1 m<sup>3</sup>的岩石,爆破生成气体总量约为0.202~0.217 kg,CO<sub>2</sub>相变致裂气体生成量为0.21 kg。尽管两种方法破岩生成的气体总量接近,但爆破时往往会产生CO、NO、NO<sub>2</sub>等多种有害气体,CO<sub>2</sub>相变致裂仅涉及CO<sub>2</sub>的相态转换,致裂时释放无毒无害无味的CO<sub>2</sub>气体,较爆破更加安全环保。

与爆破不同,浅孔CO<sub>2</sub>相变致裂时,若致裂孔封堵不密实,孔内的高压气体可推动致裂管向外运动,发生“飞管”,致裂管最高可脱离致裂孔向上抛出20~30 m。此时,致裂能量主要用于致裂管抛掷,岩体致裂效果较差,同时也对施工作业人员的安全造成一定威胁。为保证致裂效果,提高CO<sub>2</sub>相变致裂安全性,可采用封孔止飞、机械止飞、泄爆口止飞等方法进行控制<sup>[52]</sup>,保障致裂管起爆稳定性。

CO<sub>2</sub>相变致裂有害效应较爆破更小,致裂破岩整体安全可控,相关研究多集中于定性描述与评

价方面。近年来,城市建筑物近接致裂破岩工程越来越多,系统探究CO<sub>2</sub>相变致裂动力响应特征,提出完整的致裂有害效应安全控制方法,是保障其应用安全的重点。

## 5 二氧化碳相变致裂应用现状分析

### 5.1 富瓦斯煤层增透与煤炭开采

近年来,CO<sub>2</sub>相变致裂在煤矿生产中成功应用的报道越来越多,尤其表现在富瓦斯煤层增透领域<sup>[43, 53-54]</sup>。CO<sub>2</sub>相变致裂用于煤层增透时,致裂产生的复杂裂缝破坏了瓦斯吸附平衡,原煤中瓦斯逐渐解吸为游离态;此外,致裂释放的CO<sub>2</sub>与甲烷形成竞争吸附关系,并能在煤岩裂缝中逐步驱替甲烷,能有效提高瓦斯抽采率。最初,王兆丰等<sup>[55]</sup>将CO<sub>2</sub>相变致裂引入九里山矿进行煤层增透试验,试验分别设置有致裂孔、控制孔、水力冲孔(图11);致裂当天致裂孔瓦斯抽采流量由0.004 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>提升至0.078 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>,10 d内致裂孔平均瓦斯抽采流量为0.057 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>,是致裂前的4.3倍,为水力冲孔抽采的2.3倍;此外,试验前后流量衰减系数由0.384 d<sup>-1</sup>降至0.046 d<sup>-1</sup>,表明CO<sub>2</sub>相变致裂增透不仅效果较好,瓦斯抽采可持续性也较好。随后,周西华等<sup>[37, 42]</sup>将该技术引入七台河煤矿增透中,致裂后煤层透气性系数提高了17.49~22.76倍,平均瓦斯抽采体积分数提高了56.4%。李丰亮等<sup>[56]</sup>将此技术用于玉溪煤矿的强化增透卸压消突,致裂后钻屑瓦斯解吸指标降低11倍,日均进尺提高92.8%,保证了矿井高效安全生产。Cao等<sup>[57]</sup>将多根致裂管前后相连,提出多簇气体相变致裂技术,并在李村煤矿等多个煤矿中取得了良好的抽采与掘进效果。此外,张嘉凡等<sup>[58]</sup>尝试将该技术用于开采煤炭,发现块煤率提高了20%~50%,在薄层煤岩中开采较好。

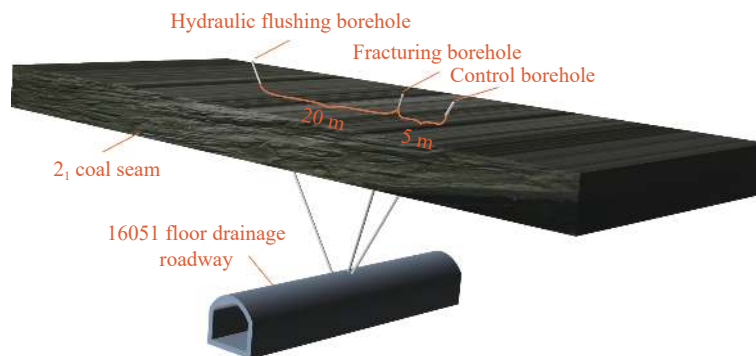


图11 九里山矿煤层增透试验钻孔布置图<sup>[55]</sup>

Fig.11 Borehole layout of the coal permeability improvement experiment in Jiulishan Mine<sup>[55]</sup>

上述研究主要集中在致裂作用下煤层增透效果分析与煤炭开采应用方面,忽略了井下 CO<sub>2</sub> 相变致裂带来的次生风险. 实践表明,尽管二氧化碳在煤层中能驱替瓦斯,但部分 CO<sub>2</sub> 气体仍可能沿钻孔及贯通煤层裂隙向巷道扩散,导致井下有限空间内二氧化碳超限,造成一定的安全风险. 因此,有必要开展井下二氧化碳超限防治研究,为井下致裂煤层增透施工提供安全保障.

## 5.2 工程建设与石方开采

针对不同破碎对象,CO<sub>2</sub> 相变致裂的破碎效率均能维持在较高水平,可充分满足各类工程需要. 除在煤矿应用较多外,该技术已被逐步引入工程建设与石方开采领域,在桩井开挖、路基开挖、隧道掘进等工程中展现出其优势. Caldwell<sup>[4]</sup>介绍了 Cardox 管在澳大利亚桩井开挖工程的成功实例,开挖 19.6 m 深的竖井时,单次致裂进尺 0.9 m,同一断面仅需 23 个致裂孔,且能较好地达到开挖目的. Parsakhoo 等<sup>[59-60]</sup>将此技术引入 Hyrcanian 森林路基开挖工程中,降低了飞石抛掷风险,成功保护了拟建区附近的树木. 此外,由于城市地铁营建的安全要求较高,长沙、广州、南京、乌鲁木齐等地的部分地铁车站与区间隧道中已采用 CO<sub>2</sub> 相变致裂进行开挖掘进,有效缩短了工期,降低了施工成本.

石方开采领域中,土耳其 Artem Insaat 采石场运用 Cardox 管开采方解石,日产量可达 1500 t; Bulawayo 的金矿中,两根 Cardox 管与五孔爆破采石方量相等<sup>[9]</sup>. 近年来,由于压碎区范围小,CO<sub>2</sub> 相变致裂技术在玉石开采领域也有应用,以提高玉石开采的完整性.

## 5.3 其他应用

CO<sub>2</sub> 相变致裂不仅能应用于岩石破碎开挖领域,也能应用于其他领域. 在汽车生产领域,CO<sub>2</sub> 相变致裂产生的高压 CO<sub>2</sub> 射流能有效应用于汽车喷漆前的清污处理<sup>[61]</sup>. 现有研究表明,地球物理勘探中,CO<sub>2</sub> 相变致裂激发的初至波传播距离能达到 1 km,对应的高频段有效反射信息较炸药震源资料剖面更丰富,是一种能有效替代炸药的绿色可靠震源<sup>[62-63]</sup>. 长时间以来,高纬度地区开辟航道的需求旺盛,大范围破冰作业是航道开辟的先决条件, Mellor<sup>[64]</sup>在 New Hampshire 和 Alaska 的湖泊上进行了气爆破冰尝试,发现 CO<sub>2</sub> 相变致裂能有效应用于破碎大体积浮冰. 此外,徐超等<sup>[65]</sup>提出 CO<sub>2</sub> 相变致裂和水力压裂可联合用于干热岩储层建造的构想,为深部地热能开发提供了新的思路. 整体而言,作为一种新型绿色环保的破碎技

术,CO<sub>2</sub> 相变致裂应用前景广阔,并有望在更多领域发挥功用<sup>[66]</sup>.

## 6 研究展望

随着安全生产与绿色建造理念不断深入人心,安全环保的气爆破岩技术较传统炸药爆破将更有发展潜力. 尽管国内外学者借鉴爆破理论研究方法,针对 CO<sub>2</sub> 相变致裂开展了诸多有益探索,但实际工程应用中,仍存在致裂成缝控制难度大,致裂效果不稳定等问题. 此外,由于 CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩速度快、致裂管结构复杂,CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩理论体系仍未完善,孔网参数设计标准尚未建立,一定程度上制约了该技术的大规模推广应用. 为提高破岩效率,优化破岩方法,仍需进一步开展工作:

### (1) 二氧化碳相变致裂破岩机理分析.

CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩过程中,一般认为致裂裂纹由应力波与高压气体协同驱动扩展,但应力波与高压气体在岩体内部的传播衰减特点、破岩能量占比仍未明确,二者协同破岩的力学机制有待进一步探究. 此外,现阶段一般将 CO<sub>2</sub> 相变致裂假定为同断面等压爆破,实际破岩时,泄爆口正对的岩体受到的冲击应力更大,表现出明显的聚能特点. 分析 CO<sub>2</sub> 相变致裂冲击力学模式,定量描述相变致裂泄爆压力曲线,建立 CO<sub>2</sub> 泄爆力学模型,探究应力波与高压气体的传播衰减规律,能为明晰岩体致裂破坏模式提供理论支撑.

### (2) 致裂管结构优化设计与参数优选.

CO<sub>2</sub> 相变致裂时,致裂总能量大小由剪切片厚度与液态 CO<sub>2</sub> 充装量共同控制,CO<sub>2</sub> 射流压力曲线还受泄爆喷嘴尺寸、数量、设计位置等因素影响,各参数对泄爆荷载的影响规律现阶段仍未明确. 有必要开展致裂管结构优化设计研究,确定不同规格致裂管的剪切片强度、充装量、喷嘴直径的优选匹配关系,降低泄爆射流能量损失,全方位提高致裂管爆力,为 CO<sub>2</sub> 相变致裂大范围推广应用提供设备支持.

### (3) 致裂孔网参数设计规范建立.

由于炸药管控日益严格,岩石破碎的需求依旧旺盛,工程师们已尝试在各类岩体破碎开挖工程中使用 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术. 直至今日,系统的致裂破岩技术指导规范仍未形成,致裂孔网参数选取方法尚未达成共识,应用时只能依据工程经验进行孔网参数设计,CO<sub>2</sub> 相变致裂破岩优势还未得到充分挖掘,能量利用率整体偏低. 针对赋存于复杂工程地质环境中的各类目标岩体,分析揭示

岩体强度、裂隙、层理等多因素对破岩效果的影响规律, 建立完整的 CO<sub>2</sub> 相变致裂孔网参数设计规范, 能为 CO<sub>2</sub> 相变致裂的工程应用提供有效指导, 是满足 CO<sub>2</sub> 相变致裂条件下岩石高效破碎开挖需求的必由之路。

## 参 考 文 献

- [1] Xia B W, Gao Y G, Liu C W, et al. Experimental study on rock-breaking load in slot-hydraulic blasting. *Chin J Eng*, 2020, 42(9): 1130  
(夏彬伟, 高玉刚, 刘承伟, 等. 缝槽水压爆破破岩载荷实验研究. 工程科学学报, 2020, 42(9): 1130)
- [2] Armaghani D J, Hajihassani M, Sohaei H, et al. Neuro-fuzzy technique to predict air-overpressure induced by blasting. *Arab J Geosci*, 2015, 8(12): 10937
- [3] Zhang Z X. Kinetic energy and its applications in mining engineering. *Int J Min Sci Technol*, 2017, 27(2): 237
- [4] Caldwell T. *A Comparison of Non-explosive Rock Breaking Techniques* [Dissertation]. Queensland: The University of Queensland, 2004
- [5] Schooler D R. *The Use of Carbon Dioxide for Dislodging Coal in Mines* [Dissertation]. Missouri: Missouri School of Mines and Metallurgy, 1944
- [6] Gao F, Tang, L H, Zhou K P, et al. Mechanism analysis of liquid carbon dioxide phase transition for fracturing rock masses. *Energies*, 2018, 11(11): 2909
- [7] Lu T K, Wang Z F, Yang H M, et al. Improvement of coal seam gas drainage by under-panel cross-strata stimulation using highly pressurized gas. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2015, 77: 300
- [8] Mellor M. Icebreaking Concepts[J/OL]. *Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover Nh*, (1980-01)[2020-11-05]. <https://erdc-library.erd.c.dren.mil/jspui/bitstream/11681/11985/1/SR-80-2.pdf>
- [9] Campbell Sr R L. A review of methods for concrete removal [J/OL]. *Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Ms Structures Lab*(1982-04-01)[2020-10-02]. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA114100.pdf>
- [10] Singh S P. Non-explosive applications of the PCF concept for underground excavation. *Tunn Undergr Space Technol*, 1998, 13(3): 305
- [11] Sun K M, Xin L W, Wu D. Experimental study on fracture mechanism of coal caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion. *Explos Shock Waves*, 2018, 38(2): 302  
(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. 爆炸与冲击, 2018, 38(2): 302)
- [12] Sun K M, Xin L W, Wang T T, et al. Simulation research on law of coal fracture caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion. *J China Univ Min Technol*, 2017, 46(3): 501  
(孙可明, 辛利伟, 王婷婷, 等. 超临界CO<sub>2</sub>气爆煤体致裂规律模拟研究. 中国矿业大学学报, 2017, 46(3): 501)
- [13] 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  
(谢晓锋, 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)
- [14] Han Y B. *Mechanism Research on Increase Coal Gas Permeability by Liquid CO<sub>2</sub> Phase Transition Fracturing Technique* [Dissertation]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2014  
(韩亚北. 液态二氧化碳相变致裂增透机理研究 [学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2014)
- [15] 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)
- [16] Sun K M, Wang J Y, Xin L W. Experimental study of variation pattern of gas pressure from explosion along fracture surface in supercritical CO<sub>2</sub> gas explosion. *J Exp Mech*, 2019, 34(4): 693  
(孙可明, 王金彧, 辛利伟. 超临界CO<sub>2</sub>气爆致裂爆生气体压力沿破裂面变化规律实验研究. 实验力学, 2019, 34(4): 693)
- [17] Zhou S T, Jiang N, He X, et al. Rock breaking and dynamic response characteristics of carbon dioxide phase transition fracturing considering the gathering energy effect. *Energies*, 2020, 13(6): 1336
- [18] 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
- [19] Zhou H. *Experimental Study on the Variation Rules of the Flow and Nozzle Impact Stress of Supercritical CO<sub>2</sub> Gas Explosion* [Dissertation]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2019  
(周航. 超临界CO<sub>2</sub>气爆爆生气体管内流动及喷嘴冲击应力变化规律实验研究 [学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019)
- [20] Zheng T Z. *Distribution Characteristics of Gas-Phase Shock Energy Deriving from Liquid CO<sub>2</sub> Phase Transition in the Borehole* [Dissertation]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2019  
(郑天照. 液态CO<sub>2</sub>相变气爆破孔爆能分布特征研究 [学位论文]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2019)
- [21] Ke B, Zhou K P, Xu C S, et al. Thermodynamic properties and explosion energy analysis of carbon dioxide blasting systems. *Min Technol*, 2019, 128(1): 39
- [22] 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
- [23] Sun J Z. *Applied Research on Permeability Increasing by Liquid Carbon Dioxide Phase Transition Blasting Based on Different Initiating Condition* [Dissertation]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2015  
(孙建中. 基于不同爆破致裂方式的液态二氧化碳相变增透应用研究 [学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2015)
- [24] Chi L Y, Zhang Z X, Aalberg A, et al. Measurement of shock

- pressure and shock-wave attenuation near a blast hole in rock. *Int J Impact Eng*, 2019, 125: 27
- [25] Xie X F, Li X B, Li Q Y, et al. Research and review about the liquid CO<sub>2</sub> phase-transforming rock fracturing technology. *J Railway Sci Eng*, 2018, 15(6): 1406  
(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. *铁道科学与工程学报*, 2018, 15(6): 1406)
- [26] Zhou X H, Men J L, Song D P, et al. Research on optimal borehole parameters of antireflection in coal seam by liquid CO<sub>2</sub> blasting. *Chin J Rock Mech Eng*, 2016, 35(3): 524  
(周西华, 门金龙, 宋东平, 等. 液态CO<sub>2</sub>爆破煤层增透最优钻孔参数研究. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(3): 524)
- [27] Zhou K P, Ke B, Li J L, et al. Pressure dynamic response and explosion energy of liquid carbon dioxide blasting system. *Blasting*, 2017, 34(3): 7  
(周科平, 柯波, 李杰林, 等. 液态CO<sub>2</sub>爆破系统压力动态响应及爆炸能量分析. *爆破*, 2017, 34(3): 7)
- [28] Ke B, Zhou K P, Ren G F, et al. Positive phase pressure function and pressure attenuation characteristic of a liquid carbon dioxide blasting system. *Energies*, 2019, 12(21): 4134
- [29] Lei Y. *A Theoretical and Experimental Study on Carbon Dioxide Phase Transition Induced Fracturing and Antireflection in Low-Permeability Coal Seams with Gas-Rich* [Dissertation]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2018  
(雷云. 低渗透高瓦斯煤层二氧化碳相变致裂增透理论及实验研究 [学位论文]. 成都: 西南石油大学, 2018)
- [30] 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)
- [31] Guo Y, Ke B, Wu Z M, et al. Thermodynamic properties of liquid carbon dioxide blasting system in process of phase transformation. *Blasting*, 2018, 35(4): 108  
(郭勇, 柯波, 吴著明, 等. 液态CO<sub>2</sub>爆破系统相变过程的热力学特性研究. *爆破*, 2018, 35(4): 108)
- [32] Guo Y L. *Fracturing Mechanisms and Functions of Improvement of Gas Drainage of Highly Pressurized Carbon Dioxide Gas System* [Dissertation]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017  
(郭杨霖. 液态二氧化碳相变致裂机理及应用效果分析 [学位论文]. 焦作: 河南理工大学, 2017)
- [33] Yang X L, Wen G C, Sun H T, et al. Environmentally friendly techniques for high gas content thick coal seam stimulation—multi-discharge CO<sub>2</sub> fracturing system. *J Nat Gas Sci Eng*, 2019, 61: 71
- [34] Sun K M, Xin L W, Wu D, et al. Simulation of fracture law of supercritical CO<sub>2</sub> explosion under initial stress condition. *J Vib Shock*, 2018, 37(12): 232  
(孙可明, 辛利伟, 吴迪, 等. 初应力条件下超临界CO<sub>2</sub>气爆致裂规律模拟研究. *振动与冲击*, 2018, 37(12): 232)
- [35] Xiao C X. *Experimental Study of Phase-Transforming Fracturing of Liquid Carbon Dioxide* [Dissertation]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2018  
(肖诚旭. 液态二氧化碳相变致裂的试验研究 [学位论文]. 武汉: 湖北工业大学, 2018)
- [36] Huang X S, Zhang F L, Zhang Z, et al. Study on application of CO<sub>2</sub> fracturing apparatus in pre-splitting blasting of rock deep hole. *Blasting*, 2017, 34(3): 131  
(黄晓实, 张范立, 张政, 等. 二氧化碳致裂器在岩石中深孔预裂爆破中的应用研究. *爆破*, 2017, 34(3): 131)
- [37] Zhou X H, Men J L, Wang P H, et al. Industry experimental research on improving permeability by underground liquid CO<sub>2</sub> blasting. *J Saf Sci Technol*, 2015, 11(9): 76  
(周西华, 门金龙, 王鹏辉, 等. 井下液态CO<sub>2</sub>爆破增透工业试验研究. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(9): 76)
- [38] Tian Z C. *Crack Form and Influencing Factors of Liquid Carbon Dioxide Phase Transition Fracturing* [Dissertation]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018  
(田泽础. 液态二氧化碳相变致裂裂缝形态及影响因素研究 [学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2018)
- [39] 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)
- [40] Wang Z F, Li H J, Chen X E, et al. Study on hole layout of liquid CO<sub>2</sub> phase-transforming fracture technology for permeability improvement of coal seam. *J Saf Sci Technol*, 2015, 11(9): 11  
(王兆丰, 李豪君, 陈喜恩, 等. 液态CO<sub>2</sub>相变致裂煤层增透技术布孔方式研究. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(9): 11)
- [41] Li H J, Wang Z F, Chen X E, et al. Optimization of borehole layout parameters based on fracturing technology of liquid CO<sub>2</sub> phase. *Coal Geol Explor*, 2017, 45(4): 31  
(李豪君, 王兆丰, 陈喜恩, 等. 液态CO<sub>2</sub>相变致裂技术在布孔参数优化中的应用. *煤田地质与勘探*, 2017, 45(4): 31)
- [42] Zhou X H, Men J L, Song D P, et al. Research on increasing coal seam permeability and promoting gas drainage with liquid CO<sub>2</sub> blasting. *China Saf Sci J*, 2015, 25(2): 60  
(周西华, 门金龙, 宋东平, 等. 煤层液态CO<sub>2</sub>爆破增透促抽瓦斯技术研究. *中国安全科学学报*, 2015, 25(2): 60)
- [43] 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): 1
- [44] Ti Z Y, Chen B. Application of pressure relief technology of liquid CO<sub>2</sub> fracturing roadway in Tingnan coal mine. *Met Mine*, 2019(4): 48  
(题正义, 陈波. 亭南煤矿液态CO<sub>2</sub>致裂巷道卸压技术的应用研究. *金属矿山*, 2019(4): 48)
- [45] Sun K M, Wang J Y, Xin L W. Aerodynamic selection research of bridge girder section in three-dimensional wind field. *Chin J Appl Mech*, 2019, 36(2): 466

- (孙可明, 王金瓒, 辛利伟. 不同应力差条件下超临界CO<sub>2</sub>气爆煤岩体气楔作用次生裂纹扩展规律研究. 应用力学学报, 2019, 36(2): 466)
- [46] Sun K M, Xin L W, Wu D, et al. Mechanism of fracture caused by supercritical CO<sub>2</sub> explosion under the impact of initial stress. *Chin J Solid Mech*, 2017, 38(5): 473  
(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. 固体力学学报, 2017, 38(5): 473)
- [47] Liu X X, Li Q Y, Feng G W, et al. Vibrational energy distribution of rock broken by phase transition of liquid carbon dioxide. *Min Metall Eng*, 2018, 38(3): 5  
(刘小雄, 李启月, 冯国伟, 等. 液态二氧化碳相变破岩振动能量分布研究. 矿冶工程, 2018, 38(3): 5)
- [48] Chen G, Li Q Y, Liu X X, et al. Research on energy distribution characters about liquid CO<sub>2</sub> phase-transition broken rock vibration signal. *Blasting*, 2018, 35(2): 155  
(陈冠, 李启月, 刘小雄, 等. 液态CO<sub>2</sub>相变破岩振动信号能量分布特征. 爆破, 2018, 35(2): 155)
- [49] Tao M, Zhao H T, Li X B, et al. Comprehensive comparative analysis of liquid CO<sub>2</sub> phase change fracturing and explosive rock fracturing. *Blasting*, 2018, 35(2): 41  
(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. 爆破, 2018, 35(2): 41)
- [50] Li Q Y, Liu X X, Wu Z Y, et al. Application of liquid CO<sub>2</sub> phase change rock breaking technology in metro foundation pit excavation. *J Railway Sci Eng*, 2018, 15(1): 163  
(李启月, 刘小雄, 吴正宇, 等. 液态CO<sub>2</sub>相变破岩技术在地铁基坑开挖中的应用. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(1): 163)
- [51] Liu G H, Wang H L. Application of carbon dioxide fracturing technology. *Highway*, 2018, 63(12): 72  
(刘光辉, 王海亮. 二氧化碳致裂技术的应用研究. 公路, 2018, 63(12): 72)
- [52] Peng R, Huo Z G, Wen L. Study on anti-flying technology of carbon dioxide fracture. *Coal Sci Technol*, 2020, 48(Special): 134  
(彭然, 霍中刚, 温良. 二氧化碳致裂器止飞技术研究. 煤炭科学技术, 2020, 48(特刊): 134)
- [53] Chen H D, Wang Z F, Qi L L, et al. Effect of liquid carbon dioxide phase change fracturing technology on gas drainage. *Arab J Geosci*, 2017, 10(14): 314
- [54] Chen H D, Wang Z F, Chen X E, et al. Increasing permeability of coal seams using the phase energy of liquid carbon dioxide. *J CO<sub>2</sub> Util*, 2017, 19: 112
- [55] Wang Z F, Sun K M, Lu T K, et al. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO<sub>2</sub> phase transition. *J Henan Polytech Univ Nat Sci*, 2015, 34(1): 1  
(王兆丰, 孙小明, 陆庭侃, 等. 液态CO<sub>2</sub>相变致裂强化瓦斯预抽试验研究. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 1)
- [56] Li F L, Cao Y X, Liu G F, et al. Technology of high-speed driving and outburst elimination by CO<sub>2</sub> gas fracturing in Yuxi coal mine. *China Min Mag*, 2020, 29(4): 146  
(李丰亮, 曹运兴, 刘高峰, 等. 玉溪煤矿CO<sub>2</sub>气相压裂煤巷防突快速掘进技术. 中国矿业, 2020, 29(4): 146)
- [57] Cao Y X, Zhang J S, Zhai H, et al. CO<sub>2</sub> gas fracturing: A novel reservoir stimulation technology in low permeability gassy coal seams. *Fuel*, 2017, 203: 197
- [58] Zhang J F, Cheng S F, Gao Z, et al. Practice and simulation of coal-rock mining by liquid carbon dioxide blasting. *Coal Sci Technol*, 2020, 48(Special): 24  
(张嘉凡, 程树范, 高壮, 等. 煤岩液态二氧化碳爆破开采实践与模拟. 煤炭科学技术, 2020, 48(特刊): 24)
- [59] Parsakhoo A, Lotfalian M. Demolition agent selection for rock breaking in mountain region of hyrcanian forests. *Res J Environ Sci*, 2009, 3(3): 384
- [60] Parsakhoo A, Lotfalian M, Hosseini S A. Forest roads planning and construction in Iranian forestry. *J Civil Eng Constr Technol*, 2010, 1(1): 14
- [61] Miller R C. *Fundamental Study of Carbon Dioxide Blasting: An Experimental and Numerical Analysis of Surface Cleaning by A Particle-laden Turbulent Jet* [Dissertation]. Michigan Technological University, 1994
- [62] Li H J, Gao B, Shi Y, et al. Application of super-critical CO<sub>2</sub> source in seismic exploration. *Equip Geophys Prospect*, 2019, 29(1): 67  
(李海军, 高斌, 史颖, 等. 超临界二氧化碳震源在地震采集中的应用. 物探装备, 2019, 29(1): 67)
- [63] Li W, Chen Y, Wang F Y, et al. Feasibility study of developing one new type of seismic source via carbon dioxide phase transition. *Chin J Geophys*, 2020, 63(7): 2605  
(李稳, 陈颀, 王夫运, 等. 二氧化碳相变技术应用于新型震源研发的可行性研究. 地球物理学报, 2020, 63(7): 2605)
- [64] Mellor M. *Breakage of Floating Ice by Compressed Gas Blasting*. Twin Cities: The Laboratory, 1972
- [65] Xu C, Dou B, Tian H, et al. Process of carbon dioxide blasting to build EGS thermal reservoir. *Geol Sci Technol Inf*, 2019, 38(5): 247  
(徐超, 窦斌, 田红, 等. 二氧化碳爆破致裂建造增强型地热系统热储层工艺探讨. 地质科技情报, 2019, 38(5): 247)
- [66] Fan Y C, Qin B T, Zhou Q, et al. Liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing technology and its application in enhancing gas drainage of coal mines. *Adsorpt Sci Technol*, 2020, 38(9-10): 393