



移动扫码阅读

袁永, 陈忠顺, 梁小康, 等. 二氧化碳相变爆破致裂机理与应用研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(2): 63-78.

YUAN Yong, CHEN Zhongshun, LIANG Xiaokang, *et al.* Mechanism and application of carbon dioxide phase change blasting fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(2): 63-78.

二氧化碳相变爆破致裂机理与应用研究进展

袁永^{1,2}, 陈忠顺^{1,2}, 梁小康^{1,2}, 申海生^{1,2}, 左磊^{1,2}, 孟朝贵^{1,2}, 王圣志^{1,2}

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部煤炭资源开采教育部重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要:煤岩体结构改造是解决煤矿许多技术难题的共性核心科学问题, 二氧化碳相变爆破因其安全可控、能量易调节等优点成为煤岩体致裂的有效手段之一。为确定二氧化碳相变爆破致裂机理, 扩展相变爆破致裂工程应用, 分析了二氧化碳相变爆破原理和致裂器材与装备, 统计比较不同方式相变爆破能量计算方式, 相较于传统炸药爆破, 相变爆破属于一种低能量致裂方式; 通过分析二氧化碳相变射流传播特征, 探究相变爆破中等应力起裂和高压气体协同作用方式, 煤岩体在中等冲击作用下, 受到拉应力破坏产生径向初始断裂, 并在冲击波和卸载波综合作用下形成多重起裂特征, 高压气体在多重裂隙中进一步扩展, 驱动裂隙向外扩展, 明确了相变爆破应力气体协同致裂过程; 进一步研究了泄能方向、煤岩体性质、爆破参数、初始地应力、钻孔布置参数和钻孔切槽特性等因素对相变爆破致裂效果的影响, 泄能方向对煤岩体破坏起到直接作用, 引发非对称损伤破坏, 煤岩体抗压强度和致裂孔间距是影响致裂效果的关键因素, 初始地应力、钻孔布置参数和钻孔切槽特性等影响裂纹发育扩展特征; 在相变爆破致裂工程应用方面, 揭示了相变爆破多重裂隙渗流特征, 确定了高瓦斯煤层致裂增透效果, 对比了预裂前后煤体截割特征, 验证了预裂提升块煤率可行性, 并探究了相变爆破预裂顶板垮落特性。针对相变爆破致裂应从多速率冲击破碎、损伤破坏多尺度分析、致裂过程多物理场耦合及延时相变爆破技术等方向进一步扩展研究, 拓宽二氧化碳相变爆破应用场景。

关键词:相变爆破; 动态冲击; 致裂机理; 裂隙分布; 爆破因素

中图分类号: TD823

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2024)02-0063-16

Mechanism and application of carbon dioxide phase change blasting fracturing

YUAN Yong^{1,2}, CHEN Zhongshun^{1,2}, LIANG Xiaokang^{1,2}, SHEN Haisheng^{1,2}, ZUO Lei^{1,2},
MENG Chaogui^{1,2}, WANG Shengzhi^{1,2}

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. Key Laboratory of Deep Coal Resources Mining, Ministry of Education, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The structural transformation of coal and rock mass is a common core scientific problem to solve many technical problems in coal mines. Carbon dioxide phase change blasting has become one of the effective methods for coal and rock mass cracking due to its advantages of safety, controllability, and easy energy regulation. In order to determine the mechanism of carbon dioxide phase change blasting and expand the application of phase change blasting in engineering, the principle of carbon dioxide phase change blasting and the equipment for cracking were analyzed. Statistical comparisons were made between different methods for calculating the energy of phase change blasting. Compared to traditional explosive blasting, phase change blasting belongs to a low energy fracturing method. By analyzing the propagation characteristics of carbon dioxide phase change jet, the synergistic effect of medium stress initiation and high-pressure gas in phase change blasting is determined. Under medium impact, the coal and rock mass are subjected to tensile stress damage, resulting

收稿日期: 2023-12-02

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.12438/cst.2023-1842

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51974294); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20181358); 江苏高校“青蓝工程”资助项目(苏教师函[2022]29号)

作者简介: 袁永(1983—), 男, 河南泌阳人, 教授, 博士生导师。E-mail: yy20062006@163.com

通讯作者: 陈忠顺(1993—), 男, 江苏徐州人, 博士研究生。E-mail: chenzhongshun2016@163.com

in radial initial fracture. Under the combined action of shock wave and unloading wave, multiple initiation characteristics are formed, and high-pressure gas further expands in multiple fractures, driving them to expand outward, Clarified the synergistic cracking process of phase change blasting stress gas. Further research was conducted on the effects of factors such as energy release direction, coal rock mass properties, blasting parameters, initial geostress, drilling layout parameters, and drilling groove characteristics on the cracking effect of phase change blasting. The energy release direction plays a direct role in the failure of coal rock mass, leading to asymmetric damage and failure. The compressive strength and cracking spacing of coal rock mass are key factors affecting the cracking effect. The initial geostress, drilling layout parameters, and drilling groove characteristics affect the development and propagation characteristics of cracks. In terms of the engineering application of phase change blasting fracturing, the multiple crack seepage characteristics of phase change blasting were revealed, the crack and permeability enhancement effect of high gas coal seams were determined, the coal cutting characteristics before and after presplitting were compared, the feasibility of presplitting to increase lump coal rate was verified, and the collapse characteristics of presplitting roof in phase change blasting were explored. Further expansion should be made towards the direction of multi rate fracturing caused by phase change blasting, multi-scale analysis of damage and failure, coupling of multiple physical fields during the cracking process and carbon dioxide phase delayed change blasting, which will expand the application scenarios of carbon dioxide phase change blasting.

Key words: phase change blasting; dynamic impact; fracturing mechanism; crack distribution; blasting factors

0 引言

煤岩体结构改造是解决煤矿众多技术难题的共性核心科学问题^[1]。煤矿中的坚硬厚及特厚煤层综放开采、冲击矿压、低渗透性煤层瓦斯抽采、煤与瓦斯突出等是制约矿井安全高效生产的技术难题,而煤岩体致裂手段是实现煤岩性质弱化、卸压增透^[2]的有效方法。依据冲击应力产生的形式与特征,常用的致裂方式有炸药爆破、水压致裂和二氧化碳相变爆破。传统炸药爆破因其施工要求高,炸药材料受到严格管控,可控性、预见性较低等特点,使用的条件越发受到严格限制,如《煤矿安全规程》禁止在采动影响区内使用炸药爆破;水力压裂则存在形成裂缝单一^[3]、水资源需求大、保压困难,工作面易污染等问题;二氧化碳相变爆破作为一种非炸药破岩技术,在煤岩体结构改造中起到重要补充作用。

二氧化碳相变爆破是一种非炸药低扰动破岩技术,它将二氧化碳密闭于专用爆破管内,通过高热快速激发,将液态二氧化碳迅速转化为气态,瞬间产生强大的膨胀能量,快速释放的高压气体在岩体内产生拉应力场,从而达到致裂岩体的效果。该技术起源于1914年欧美的CARDONX技术,最开始应用于高瓦斯煤层的开采。在美国、英国和加拿大被广泛应用,曾被美国矿业局誉为当时煤矿领域最著名的技术发明^[4-5]。据统计,在20世纪40年代,相变爆破生产了美国25%的井工煤炭产量,年爆破量曾经达到了280万次之多^[6]。随着机械化采煤技术及相关综采设备的不断发展,该技术逐渐退出煤矿行业,逐渐转向城区土石爆破和水泥行业清堵等方面,现阶段共计100多个国家应用该项技术^[7]。相变爆破技术在20世纪90年代引入我国,21世纪初在我国高

瓦斯矿井采煤工作面进行采煤试验,经过相关实践发现了其应用后,巷道内瓦斯浓度增加,从而发现了该项技术应用于矿井瓦斯治理的可行性^[8]。2012年来,该项技术被广泛系统地应用于矿井瓦斯综合治理^[9],主要包括卸压掘进、卸压均化瓦斯场、卸压增透抽采瓦斯、顶板安全致裂、井筒揭煤和防治冲击矿压等多个方面^[10],在不同矿区均得到有效应用推广^[7,11]。2014年后从地下矿山拓展到露天矿山,应用于矿山、道路、基坑等露天岩石爆破工程^[12-13]。

尽管相变爆破在煤矿中的应用得到不断的发展,但其相关的基础理论尚处于起步阶段,相关的生产规范还没有形成,大规模的推广应用仍旧存在一定困难。笔者依据二氧化碳相变爆破技术特征,确定了相变爆破致裂机理,分析了相变爆破影响因素,探究了相变爆破应用场景,并提出二氧化碳相变爆破致裂技术研究展望,旨在推进相变爆破的进一步推广应用。

1 二氧化碳相变爆破技术特征

1.1 相变爆破原理

二氧化碳相变爆破是利用二氧化碳相变时产生的物理膨胀特性,将冲击能量直接作用在周围介质中,它主要由排气头、定压卸能片、储液管、发热管和注液头组成(图1)^[14]。爆破产生原理如图2所示,将液态二氧化碳充装进管内,利用发热管对二氧化碳进行加热,随着储液管内温度不断增加,二氧化碳发生汽化,体积急剧膨胀,压力也随之增加,当储液管内的压力大于定压卸能片的强度时,定压卸能片破裂,二氧化碳从排气头中喷出,周围介质受到二氧化碳冲击作用产生破裂,同时高压气体能够侵入裂隙,使之继续扩展^[15]。

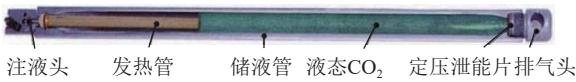
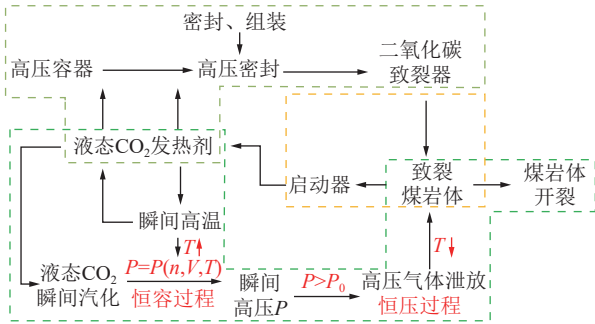


图 1 二氧化碳相变爆破系统示意

Fig.1 Schematic diagram of carbon dioxide phase change blasting system



T —温度； P —压强； n —物质的量； V —体积； P_0 —泄能片强度

图 2 二氧化碳相变爆破原理

Fig.2 Principle of carbon dioxide phase change explosion

1.2 相变爆破器材与装备

根据储液管的形式和泄气形式，相变爆破致裂管可分为重复使用致裂管和一次性致裂管(图 3)。重复使用致裂管采用管壁较厚(10 mm 以上)的钢管作为储液管、管内的高压气体通过管底卸压片破坏释放；一次性致裂管管壁较薄(1.5 mm)，采用管板工艺加固，致裂管侧面的焊缝为二氧化碳释放通道^[16]，二氧化碳气体是从致裂管侧面释放而不是从致裂管底部释放，这种气体释放方式，也有助于消除“飞管”问题，同时使得气体膨胀压力更加均匀地作用在炮孔壁上。虽然这两种形式结构不同，但其工作原理是相似的^[17]。

传统相变爆破多采用重复使用的致裂管，其结构如图 4 所示。注液头内有一个充液阀和一个点火头，充液阀用于每次爆破后重新充装二氧化碳，点火头电极与外部导线连接后可对发热管加热。发热管是相变爆破过程中主要加热元件，内装化学物质，爆破时，点火头电极通电后产生的热能使化学物质发生迅速反应，释放大量的热量，使二氧化碳迅速汽化。定压卸能片在相变爆破过程中主要用于控制爆破压力，一旦汽化的二氧化碳压力超过爆破片强度，爆破片就发生破坏，气体从而得到释放，一般采用剪切型爆破片，这爆破片结构简单、安装方便，为保证密封效果，在爆破片和爆破筒主体之间加入起密封作用的垫片。排气头是二氧化碳是释放通道，设有排气孔，用于控制气体释放方式，依据其需求不同，可设置成不同形状的排气孔。储液管是相变爆破装置的主体，用来盛装高压的二氧化碳。

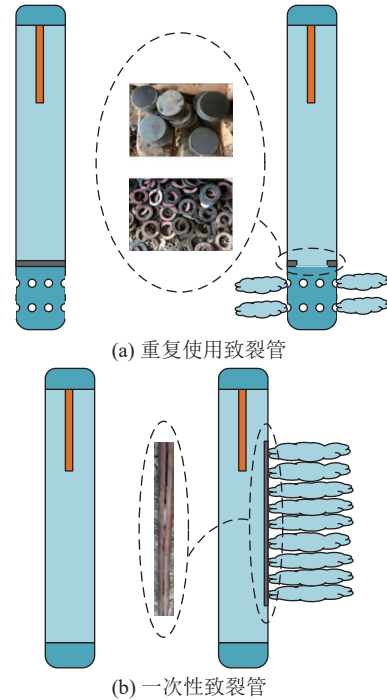


图 3 不同相变爆破装置结构及射流特征

Fig.3 Jet characteristics of different phase change blasting devices

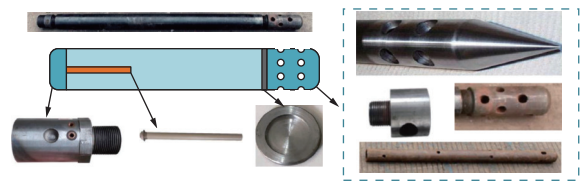


图 4 相变爆破装置

Fig.4 Phase change blasting device

1.3 相变爆破能量

相变爆破的能量密度比密实的化学炸药小，对于相变爆破能量的准确计算对相变爆破效果的评估至关重要，能够量化研究该技术爆破能力。关于相变爆破能量的计算有采用压缩气体和水蒸气容器爆炸能量、采用射流速度计算爆炸能量、采用爆容计算爆炸能量、采用爆破振动等效爆炸能量和采用真实状态方程计算爆炸能量方式，不同计算方式确定的相变爆破能量特征见表 1。

相变爆破影响因素众多，由于不同型号致裂管生产标准不统一，理论计算仅供参考^[25]，现统计不同相变爆破方式下爆破能量大小，绘制出单根相变爆破能量分布和单位质量二氧化碳相变爆破能量分布如图 5 所示^[15]，由于计算标准和试验方法的差异导致相变爆破能量数值存在差异，但呈现整体分布特征，单根致裂管爆破能量集中在 500 ~ 1 000 kJ，部分相变爆破能量计算数值较高，在 2 500 kJ 左右。经过对不同相变爆破能量统计可得，单根致裂管爆破能

表1 相变爆破能量计算方法
Table 1 Calculation method for phase change blasting energy

计算原理	计算公式	单位质量CO ₂ 爆破能量/kJ	TNT当量/g	评价
压缩气体和水蒸气容器爆炸能量 ^[18-20]	$E = \frac{P_1 V}{K-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]$	385.1 ~ 1 256.4	90.6 ~ 295.6	使用广泛, 参数易于获取, 计算简单, 爆炸能量计算结果较小, 未考虑温度对爆炸能量的影响, 容积对爆炸能量影响较大
射流速度计算爆炸能量 ^[6, 21]	$E = \frac{1}{2} v^2 + \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho} \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{1/k}$	562.8 ~ 641.3	132.2 ~ 150.6	公式没有考虑到体积和质量对爆炸能量的影响, 因此存在较大误差
爆容计算爆炸能量 ^[22]	$E = \frac{Q W_{TNT}}{Q_{TNT}}$	1 687.3	397.0	爆容分析受到炸药配比等因素的影响, 结果不一定会十分精确
爆破振动等效爆炸能量 ^[23]	$E = \frac{RMS}{RMS_{TNT}} W_{TNT}$	1 615 ~ 2 827.5	380.0 ~ 430.0	从爆破振动间接测试, 需现场爆破试验测试, 工程量大
真实状态方式计算能量 ^[24]	$E = \int_1^2 p dV \cong -\Delta A = A_1 - A_2 = R(\phi_1 T_1 - \phi_2 T_2)$	327.3 ~ 1 250	77.0 ~ 294.1	CO ₂ 热力学特性真实状态方程, 计算精度高, 计算复杂

注: E 为相变爆破能量; P_1 为致裂管内绝对压力; P_2 为外部环境绝对压力; V 为致裂管容积; K 为CO₂的绝热指数; v 为气体出气口速度; ρ 为气体密度; Q 为相变爆破的爆容; Q_{TNT} 为炸药的爆容; W_{TNT} 为单位TNT炸药爆破能量; RMS 为相变爆破振动波的均方跟振幅; RMS_{TNT} 为TNT炸药爆炸振动波的均方跟振幅; A 为亥姆霍兹自由能; R 为气体常数; T 为系统温度; ϕ 为无量纲亥姆霍兹能量。

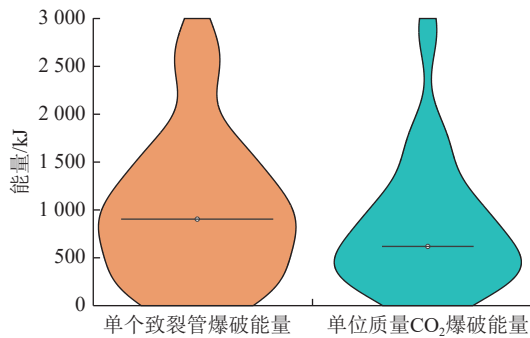


图5 相变爆破能量分布

Fig.5 Energy distribution diagram of phase change blasting

量平均值为 1 018.3 kJ, 中位数为 904 kJ。单位质量二氧化碳相变爆破能量平均值为 825.5 kJ, 中位数为 618.3 kJ。较传统炸药爆破, 相变爆破属于一种低能量致裂方式^[26]。

2 二氧化碳相变爆破致裂机理

2.1 二氧化碳相变射流传播特征

二氧化碳相变过后产生的射流是致裂煤岩体的根本动力^[27-28]。致裂管二氧化碳射流与岩体作用特征如图6所示。相变致裂管与围岩之间多为不耦合结构, 二氧化碳从致裂管射流过后在致裂管与钻孔孔壁之间衰减传播, 之后与孔壁碰撞形成冲击压力并在岩体中激发应力波^[29], 钻孔孔壁在应力波作用下产生初始裂隙, 随后高压二氧化碳进入初始裂隙中对裂隙进一步起到扩展作用。

为确定相变爆破引发钻孔孔壁应力波特征, 做出如下假设: 钻孔中间充填物质为空气, 因其作用较弱, 将其按照真空处理; 致裂管采用钢材制成, 将其视为刚体; 整个过程不考虑温度场的影响, 二氧化碳

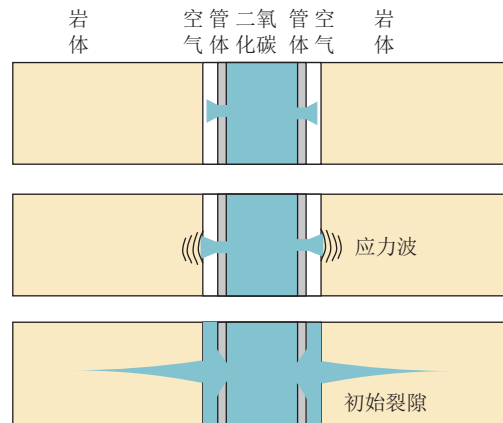


图6 二氧化碳射流与岩体作用特征

Fig.6 Characteristics of interaction between carbon dioxide jet and rock mass

在间隙发生等熵膨胀, 遇到孔壁后产生冲击应力, 在岩体中激发应力波。

高压二氧化碳与钻孔孔壁发生碰撞时, 产生透射和反射现象, 导致压力会增加 n 倍, 因此在不耦合结构下, 二氧化碳在钻孔孔壁上产生的初始压力^[29]为

$$P_2 = n P_m \left(\frac{d_g}{d_0} \right)^6 \quad (1)$$

式中: P_2 和 P_m 分别为孔壁压力和致裂管破裂压力; d_g 和 d_0 分别为致裂管和致裂孔直径; n 为压力增大倍数。

二氧化碳在碰撞孔壁后压力会迅速衰减, 在钻孔周围形成准静态应力场, 并且进入应力波产生的初始裂隙中并使裂纹扩展。钻孔中形成的初始准静态压力 P_3 ^[30] 为

$$P_3 = K P_m \quad (2)$$

式中: K 为二氧化碳气体衰减系数。

相变爆破的本质是二氧化碳爆破射流产生的动态应力波作用和准静态高压气体作用^[31-32]。相变爆破作为一种物理爆破,利用二氧化碳相态变化产生的膨胀能量,其应力波传播速度小(仅为炸药爆破的1/10左右),冲击应力峰值也远小于炸药爆破^[33]。水压致裂则是利用钻孔中高压水的作用对介质进行压力,其作用时间更长,压力也更低,可以将其视为准静态过程。不同致裂方式的压力特征见表2,其压力时间历程曲线如图7所示^[34]。依据不同冲击应力特征及所处的动态应变率范围,将炸药爆破致裂、相变爆破致裂和水压致裂分别确定为高应力快速冲击、中等冲击和准静态冲击。相变爆破能量偏低,产生应力波峰值小,加载速率低,形成的气楔作用时长大,高压作用持续时间长,属于中等加载速率长持时载荷^[35-36]。

2.2 中等加载速率下多重起裂机理

致裂钻孔在动态应力波作用下会产生初始断裂。致裂钻孔周围介质受到外部原始地应力作用和钻孔

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{R^2}{r^2}P + \frac{\gamma H}{2}(1+\lambda)\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\gamma H}{2}(1-\lambda)\left(1 - 4\frac{R^2}{r^2} + 3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \\ \sigma_\theta = \frac{R^2}{r^2}P - \frac{\gamma H}{2}(1+\lambda)\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{\gamma H}{2}(1-\lambda)\left(1 + 3\frac{R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta \end{cases} \quad (3)$$

式中： σ_r 为径向应力； σ_θ 为切向应力； θ 为该点的水平夹角； λ 为水平侧压系数； H 为岩体埋深； γ 为岩层平均容重； R 为致裂孔半径； P 为冲击压力； r 为该点距离钻孔中心距离。

根据式3绘制出静水压力条件下钻孔周围受力特征如图9所示。冲击应力和地应力作用产生的径向应力方向相同起到叠加作用,致裂孔周围介质承受较大的压应力作用;冲击应力和地应力作用产生的切向应力作用相反起到相互削弱作用,但由于冲击应力数值较大、衰减较快,致裂周围较近处受到拉应力作用,随着距离增加,拉应力数值逐渐降低并逐渐转换为压应力。

由于煤岩体动态抗压强度远大于抗拉强度,相

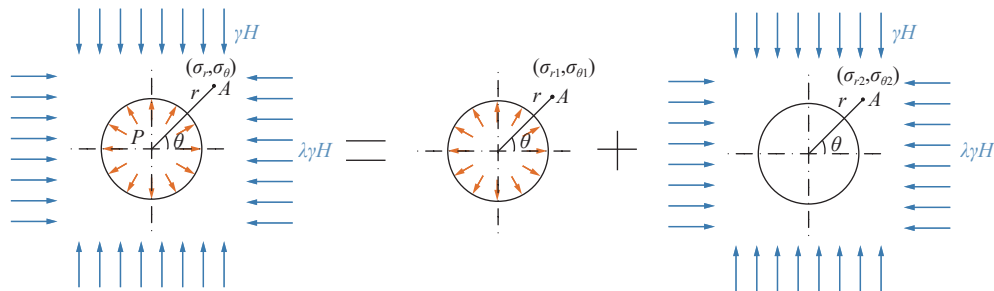


图8 钻孔受力分析

Fig.8 Stress analysis of borehole

表2 不同致裂方式技术参数

Table 2 Technical parameters of different methods

致裂类型	升压时间/s	峰值压力/MPa	加载速率/(MPa·s ⁻¹)	总时长/s
炸药爆破	10 ⁻⁷	>10 ⁴	>10 ⁸	10 ⁻⁶
相变爆破	10 ⁻³	10 ²	10 ² ~ 10 ⁶	10 ⁻²
水压	10 ²	10	<10 ⁻¹	10 ⁴

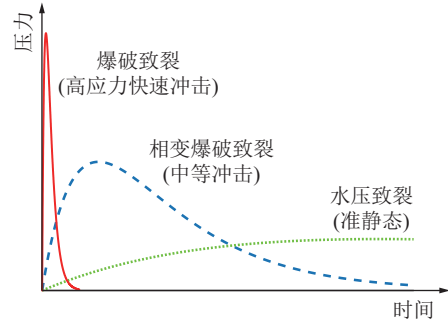


图7 不同致裂方式压力时间历程曲线

Fig.7 Pressure time history curve of different fracturing methods

内部冲击压力 P 。如图8所示,钻孔周围介质受力可以通过2种状受力特征叠加获得^[14]。

变爆破和地应力产生的应力峰值小于煤岩体抗压强度。钻孔周边介质受到径向压应力作用和切向拉应力作用,当应力超过其抗拉强度时,在钻孔周围发生拉断裂。

根据 Mott 理论^[10],当断裂产生过后,会在断裂周围产生卸载波并向四周传播,卸载波的传播能够有效释放应力,也就是说,卸载波传播过的区域即使受到冲击应力的作用也会产生卸载,不会产生新的断裂,断裂仅能产生在卸载波未影响的区域。

取钻孔周围一小段微元体分析(图10),该微元体在应力作用下产生断裂,当应变大于断裂应变(ϵ_c)时产生断裂,发生断裂后应力得到充分卸载到0。

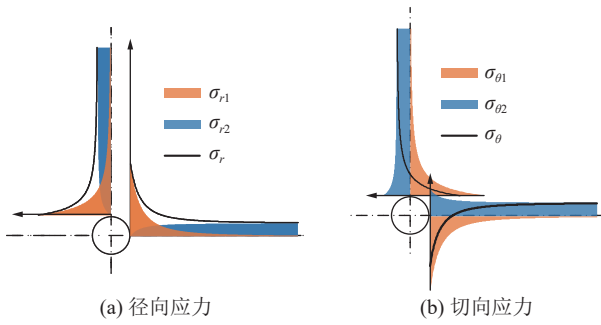


图9 钻孔受力特征

Fig.9 Stress characteristics of borehole

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_c & (\varepsilon < \varepsilon_c) \\ \sigma = 0 & (\varepsilon \geq \varepsilon_c) \end{cases} \quad (4)$$

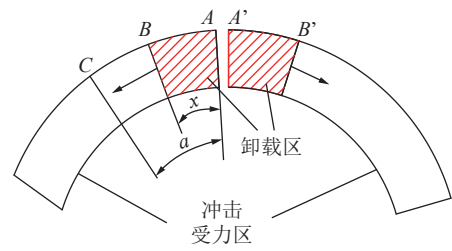
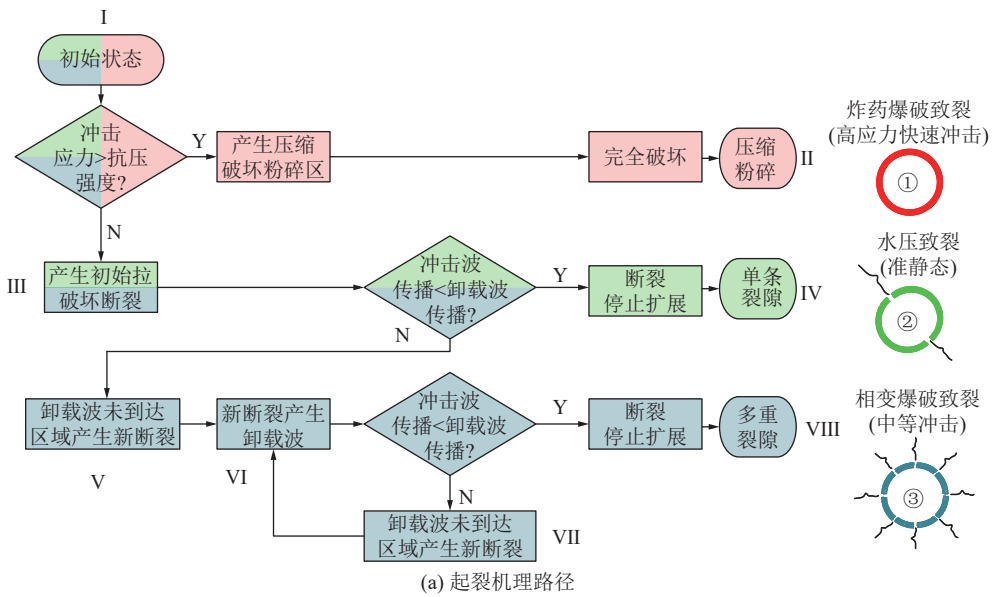


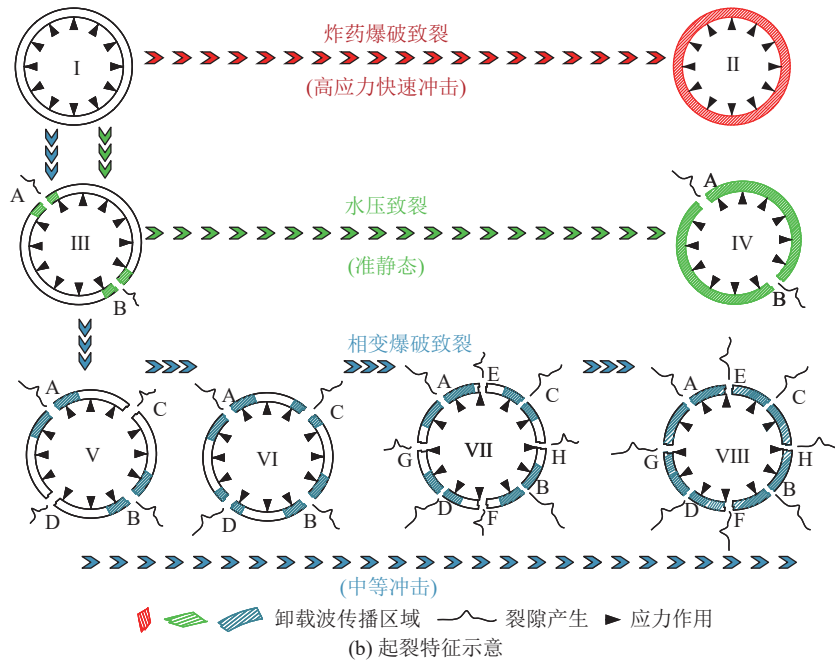
图10 卸载波传播过程

Fig.10 Unloading wave propagation process

相变爆破卸载波传播速度与材料本身性质和运动参数相关,对于相同材料的不同冲击特征作用下钻孔周围介质起裂特征如图11所示。依据冲击破



(a) 起裂机理路径



(b) 起裂特征示意

图11 不同冲击作用下致起裂机理

Fig.11 Crack initiation mechanism under different impact effects

裂起裂机理和最终状态,将不同冲击形成的破坏分为 3 条不同的路径:①高应力快速冲击($I \rightarrow II$);②准静态作用($I \rightarrow III \rightarrow IV$);③中等冲击($I \rightarrow III \rightarrow V \rightarrow VI \rightarrow VII \rightarrow VIII$):

①产生不同形式断裂的核心是冲击波传播速率和应力峰值大小的差异。当冲击应力数值大、速率快时,应力作用直接超过其抗压强度,煤体产生压缩破坏,同时冲击速率快,在卸载波还未完全形成时,煤体已经完全破坏,卸载波无法形成有效卸载作用($I \rightarrow II$),在钻孔周围形成粉碎破裂区。

②随着冲击应力峰值降低,达不到煤体动态抗压强度,但产生的切向应力大于抗拉强度时,煤体在冲击应力形成的切向拉应力作用下产生初始断裂(A, B),初始断裂产生过后,卸载波随之从断裂处向四周传播($I \rightarrow III$);如果冲击应力速率较慢,卸载波已经传至整个区域,煤体得到有效卸载,在钻孔内应力作用下也不会产生新的断裂,最终形成单条裂隙($I \rightarrow III \rightarrow IV$)。

③如果冲击速率介于上述 2 种条件之间时,在产生初次断裂($I \rightarrow III$)之后,冲击波仍会持续对周围介质产生作用,冲击波传播快于卸载波传播,在卸载波未到达的区域由于拉应力的作用产生新的断裂(C, D)点($I \rightarrow III \rightarrow V$);新的断裂继续产生卸载波($I \rightarrow III \rightarrow V \rightarrow VI$);如果卸载波还未完全扩展到整

个区域时,仍旧会产生新的断裂(E, F)点($I \rightarrow III \rightarrow V \rightarrow VI \rightarrow VII$);直至卸载波传播至整个区域。在这种周而复始的卸载波和冲击波相互作用下,煤体最终形成多重断裂形态,在钻孔周围形成多个起裂点。

二氧化碳相变爆破应力峰值较传统炸药爆破小,较水压致裂大;作用时长较传统炸药爆破大,较水压致裂小。采用不同冲击波类型探讨了不同冲击特征下煤体裂隙分布特征,利用数值模拟方式确定了不同冲击载荷下裂隙分布特征,并与相关研究^[23]对比,得到如图 12 所示的不同冲击条件下煤体裂隙分布特征。数值模拟得出的结果和理论分析、实验得到效果具有一致性。

在高应力快速冲击致裂的传统爆破作用下,爆破产生的高强度冲击波远大于煤体抗压强度,在钻孔周围煤体中形成压缩粉碎区,爆破产生能量未能充分利用形成多裂隙状态;在相变爆破致裂条件下,冲击应力峰值降低,作用时长增加,钻孔周围的煤体产生拉破坏形成断裂,由于冲击作用时间较长,在钻孔周围形成多条裂隙,并有部分裂隙在应力持续作用下形成贯穿煤体的主裂隙;在水压致裂条件下,煤体受到准静态作用,仅在拉应力的作用产生单条裂隙。

2.3 高压气体多重裂隙扩展

二氧化碳相变射流产生的动态应力波会在致裂

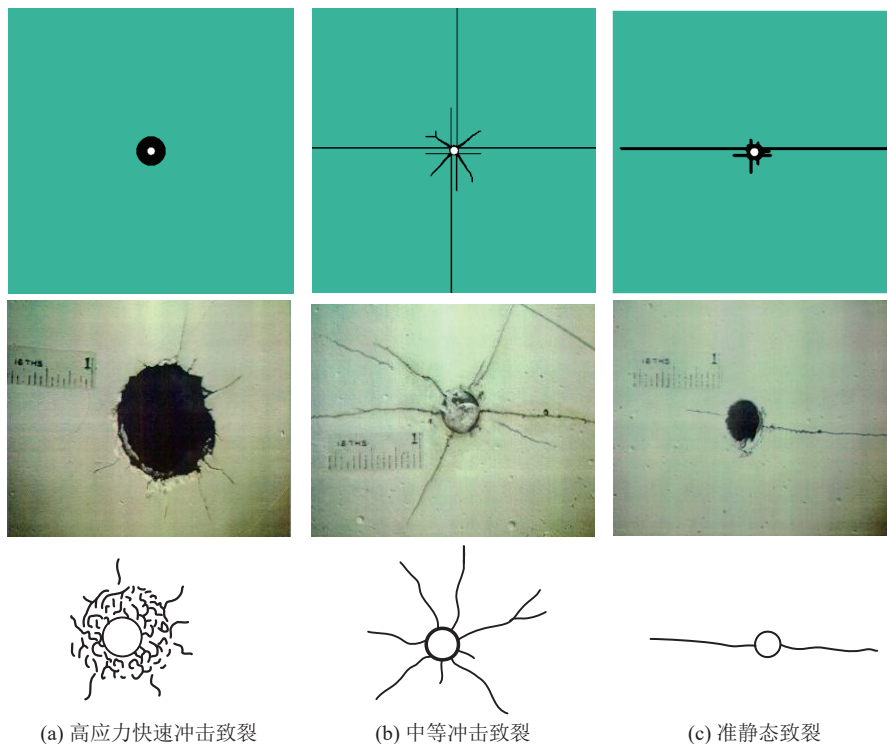


图 12 不同冲击致裂特征

Fig.12 Cracking characteristics under different impact effects

孔隙壁上产生初始的多重断裂,随后高压二氧化碳楔入,初始的多重裂隙会进一步扩展^[37]。动态应力波形成的初始裂隙可以简化为楔形,多重楔形裂纹的扩展模型如图13所示,由于在高压气体作用下裂纹传播速度较小,将多重裂纹的传播过程视为准静态过程。

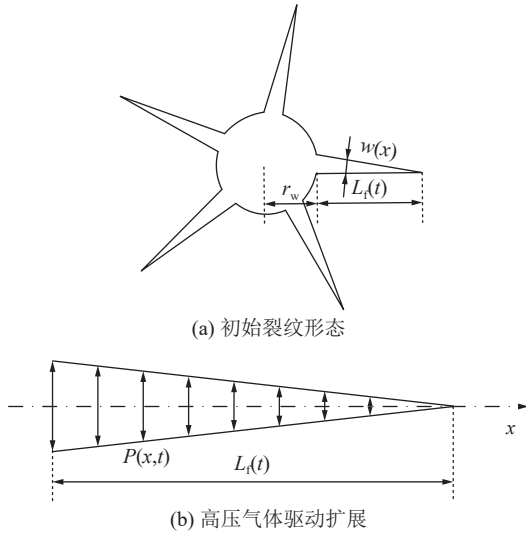


图13 多重裂隙扩展模型

Fig.13 Multiple crack propagation model

根据弹性理论,对称双翼裂纹扩展的裂隙宽度 w ^[38]为

$$w(\theta) = \frac{4(1-\nu)L_f}{\pi G} \int_{\theta}^{\theta_2} \int_0^{\theta_1} \frac{(p(\theta_1) - \sigma)}{\sqrt{\theta_2^2 - \theta_1^2}} f_N(\theta_1) f\left(\theta_1, \frac{L_f}{r_w}\right) d\theta_1 \frac{\theta_2}{\sqrt{\theta_2^2 - \theta^2}} f_N(\theta_2) f\left(\theta_2, \frac{L_f}{r_w}\right) d\theta_2 \quad (5)$$

式中: L_f 为裂纹长度; θ 为裂纹上某一点的相对位置; θ_1, θ_2 分别为裂纹扩展瞬间的相对长度和相对微段长度; ν 为泊松比; G 为剪切模量; r_w 为钻孔半径; $f(\theta, L_f/r_w)$ 为考虑裂纹位置与裂纹形状、钻孔尺寸的权重系数,可以表示为

$$f\left(\theta, \frac{L_f}{r_w}\right) = 1 + 0.3(1-\theta)\left(\frac{r_w}{r_w + L_f}\right)^2 \quad (6)$$

为实现相变爆破致裂多重裂隙的计算模型,在上述对称双翼裂纹模型上通过引入考虑裂纹数目的因子^[39]:

$$f_N = \frac{f_{N\theta} + f_{N\theta} \frac{L_f N_f}{\pi r_w}}{f_{N\theta} + \frac{L_f N_f}{\pi r_w}} \quad (7)$$

$$f_{N\theta} = 1 + \frac{\pi}{2} \left(\frac{2\sqrt{N_f - 1}}{N_f} - 1 \right) \sqrt{1 - \theta^2} \quad (8)$$

式中: L_f 为裂纹数目。

该因子同时考虑到了裂纹和钻孔形状的影响,当裂纹长度相对于裂纹之间的距离较小时,该因子是统一的,而当裂纹长度较大时,该因子接近 $f_{N\theta}$,与裂纹数目相关。

根据断裂力学理论和叠加原理,对称双翼型裂纹的应力强度因子可以由地应力作用下裂纹尖端的应力强度因子和高压气体作用下裂纹尖端的应力强度因子叠加得到:

$$K_{I1} = 2\sqrt{\frac{L_f}{\pi}} \int_0^1 \frac{[p(\theta, t) - \sigma]}{\sqrt{1 - \theta^2}} f\left(\theta, \frac{L_f}{r_w}\right) d\theta \quad (9)$$

同时在引入关于裂纹数目的权重因子 $f_{iN\theta}$,得到多重裂隙扩展作用下裂纹应力强度因子:

$$f_{iN\theta} = \left(1 + \frac{\pi}{4}\right) \frac{\sqrt{N_f - 1}}{N_f} \quad (10)$$

因此,二氧化碳相变爆破应力气体协同致裂过程如图14所示。二氧化碳相变会产生动态应力波和准静态的高压气体,由于动态应力波处于中等加载速率范围内,会在致裂孔壁形成多重初始裂隙,高压二氧化碳随后贯入到裂纹内,在气体压力函数和裂纹尖端应力强度因子相互作用下,驱动着裂纹不断向外扩展,最终到达破碎煤岩体的目的。

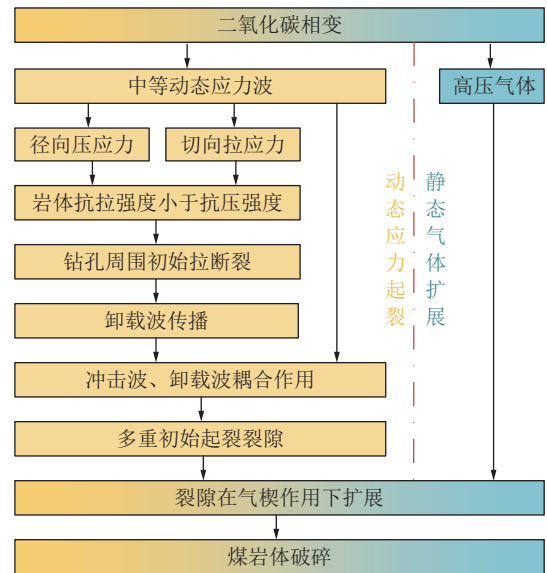


图14 相变爆破应力气体协同致裂过程

Fig.14 Phase change blasting stress gas coupling cracking process

3 相变爆破致裂影响因素

3.1 泄能方向

不同的二氧化碳相变爆破致裂装备会形成如图15

所示的底部泄能和侧壁泄能等不同的方式。采用数值模拟方式研究不同泄能方式损伤破坏特征如图 16 所示^[40]。

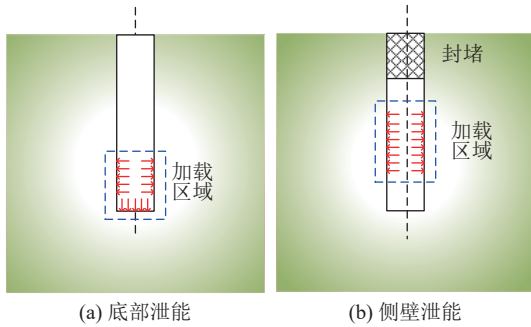


图 15 不同泄能方式加载示意
Fig.15 Schematic of loading with different energy release methods

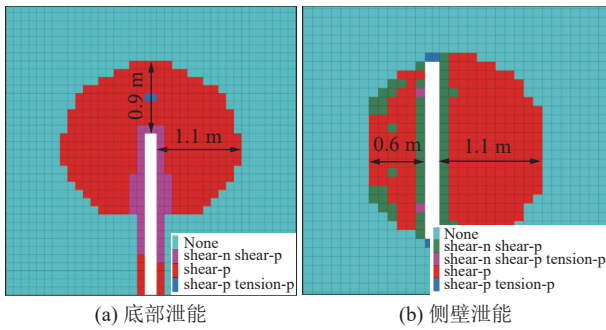


图 16 不同泄能方式损伤破坏特征

Fig.16 Damage and failure characteristics of different energy release methods

不同泄能方式形成的损伤破坏区域均成椭圆形分布,最大的损伤破坏区域半径为 1.1 m。底部泄能处形成水平方向为长轴,垂直方向为短轴的椭圆形,在煤岩体底部作用均匀,而远离卸压区域的位置损伤较小,当煤岩体受到侧壁泄能相变爆破影响时,由于致裂管周围不均匀释放,在爆破孔壁周围形成非对称分布,在靠近泄能槽处煤岩体损伤破坏区域更大。

3.2 煤岩体性质

煤岩体性质会受到所处的地质构造和形成原因的影响,这会对相变爆破致裂效果产生影响。以煤岩体弹性模量、泊松比和抗压强度 3 种因素(分别为 A_1 、 B_1 、 C_1)建立正交分析,选取三水平,各个因素水平见表 3。

根据正交表设置 9 种不同的方案,通过数值模拟方式研究不同方案下模型损伤破坏体积变化特征,分析各个因素的极差数据如图 17 所示^[41]。随着因素 A_1 弹性模量的增加,相变爆破破坏体积先增加后减小;随着因素 B_1 泊松比的增加,相变爆破破坏体

积逐步增加,但增加到一定值时增速减缓;随着因素 C_1 抗压强度的增加,相变爆破破坏体积先增加后减小,对于较小强度煤体,由于相变爆破会形成大量的破碎区消耗能量,煤体破坏效果反而会稍微降低。

表 3 煤岩体性质因素水平
Table 3 Level table of coal properties factors

水平	1	2	3
因素 A_1 /GPa	1.0	3.0	5.0
因素 B_1	0.1	0.25	0.4
因素 C_1 /MPa	5	15	25

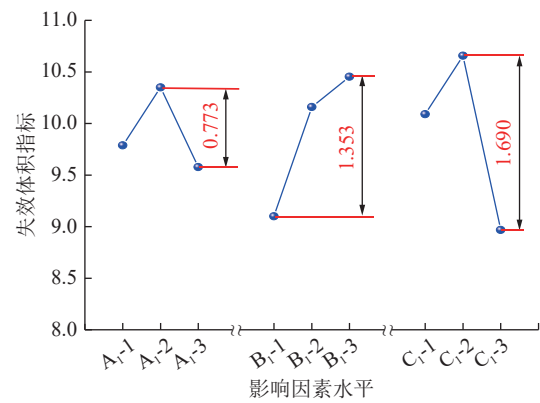


图 17 煤岩体性质极差分析

Fig.17 Range analysis of coal properties

对于不同因素引起的数据差异进行方差分析,计算各个因素的误差见表 4,其中 F 比是对应因素均方与误差均方的比值, F 的比值越大,表明该因素对试验效果的影响程度越大。因此,对于爆破效果的影响因素由大到小分别为抗压强度、泊松比和弹性模量。对于不同性质煤岩体进行相变爆破致裂方案设计时,应动态调整相应方案。

表 4 煤岩体性质方差分析
Table 4 Variance analysis of coal properties

来源	平方和S	自由度	均方和V	F比
因素 A_1	0.959	2	0.480	0.435
因素 B_1	3.041	2	1.521	1.378
因素 C_1	4.439	2	2.220	2.011
误差E	2.207	2	1.104	—

3.3 相变爆破参数

针对相变爆破参数,同样的采用正交分析研究二氧化碳充装量、泄能片爆破压力和致裂孔间距等 3 个因素(分别为 A_2 、 B_2 、 C_2)对致裂效果的影响,各个因素水平见表 5。

表5 相变爆破参数因素水平

Table 5 Level table of phase change blasting parameters

水平	1	2	3
因素A ₂ /kg	1.5	1.8	2.1
因素B ₂ /MPa	120	150	180
因素C ₂ /m	6	8	10

相变爆破参数因素影响下失效比例指标极差分析如图18所示^[41],由图可知,随着因素A₂充装量的增加,煤体失效比例指标增加;随着因素B₂爆破压力增加,煤体失效比例指标呈现先增加后减小的趋势,过高的爆破压力引起的能量高度集中反而不利于相变爆破致裂效果;随着因素C₂致裂孔间距的增加,煤体失效比例指标减小,相变爆破致裂效果与致裂孔间距呈现负相关关系。

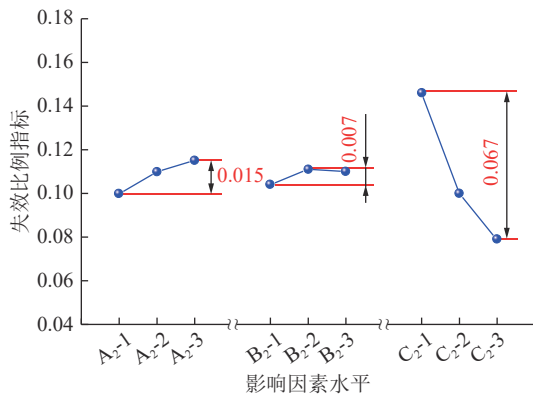


图18 相变爆破参数极差分析

Fig.18 Range analysis of phase change blasting parameters

对相变爆破各参数进行方差分析见表6,对于相变爆破二氧化碳充装量、爆破压力和致裂孔间距3个因素,相变爆破致裂孔间距对于爆破参数影响最大,其次是二氧化碳充装量,爆破压力对于相变爆破效果影响最小。在相变爆破参数设计时,应着重调整相变爆破致裂孔间距以适应不同条件。

表6 相变爆破参数方差分析

Table 6 Variance analysis of phase change blasting parameters

来源	平方和	自由度	均方和	F比
因素A ₂	3.3×10^{-4}	2	1.65×10^{-4}	3.11×10^{-3}
因素B ₂	8.4×10^{-5}	2	4.2×10^{-5}	8.49×10^{-4}
因素C ₂	7.1×10^{-3}	2	3.55×10^{-3}	6.70×10^{-2}
误差E	0.106	2	0.053	—

3.4 其他影响因素

除了二氧化碳泄能口方向、煤岩体性质和爆破

参数外,相变爆破还会受到初始地应力、钻孔布置参数和钻孔切槽特性等因素的影响。

在地下采矿过程中相变爆破通常受到初始地应力的影响,且随着开采深度的不断增加,地应力影响逐渐增加。因初始地应力会与爆破产生应力波产生叠加作用,会影响动态应力波的传播规律,进而影响裂纹传播特征。初始地应力产生的围压效应会对相变爆破致裂产生的裂隙起到抑制作用^[42],但地应力形成的主应力差会引导裂纹方向发生偏转^[35,43]。

多排钻孔进行相变爆破时,常用的布孔方式有矩形布孔和菱形布孔2种不同方式。在钻孔孔距和排距相同的条件下,菱形布孔较矩形布孔方式裂隙贯通范围更广^[35,44]。采用菱形布孔进行相变爆破后瓦斯抽采达标时间小于矩形布孔,致裂增透效果更优^[45]。为进一步提升相变爆破效果,可以考虑通过设置控制孔(空孔)的方式提升相变爆破效果。控制孔可以为相变爆破提供辅助自由面,应力波在控制孔处叠加反射,加速裂纹的扩展^[46]。但相变爆破依靠高压二氧化碳致裂岩样,当控制孔布置过多时,高压气体会沿着裂隙通过控制孔逸出,降低相变爆破致裂效果^[47]。

为控制相变爆破裂纹扩展方向,相关学者结合切槽定向爆破方式,提出了二氧化碳切槽定向致裂技术^[48]。对圆形致裂孔进行切槽后,切槽处会产生应力集中,同时降低了槽尖起裂应力,使得裂纹沿槽线方向起裂,对裂纹扩展方向起到了引导的作用。

4 相变爆破致裂工程应用

4.1 高瓦斯煤体相变爆破致裂增透

二氧化碳相变爆破过程会形成多重裂隙,不仅会促进瓦斯的有效解析,而且能够为瓦斯提供有效的流动通道。依据图12所做的相变爆破裂隙特征,建立多重裂隙煤体瓦斯渗流特征如图19所示^[14]。相变爆破过后裂隙区域煤体渗透率远大于原始煤体渗透率,相变爆破形成的多重裂隙形成瓦斯流动的有效通道,因其数目多,分布范围广,能够对整个煤体中的瓦斯起到卸压增透作用。

潞安集团高河煤矿主采3号煤层,原始瓦斯含量为 $11.16 \text{ m}^3/\text{t}$,采用二氧化碳相变爆破进行卸压增透提高抽采效率,通过实施二氧化碳相变爆破预裂过后瓦斯抽采效果如图20所示,压裂钻孔瓦斯抽采浓度提高3倍以上,煤层透气性系数整体提高10~20倍,提高了瓦斯抽采效率,保障了矿井安全生产。

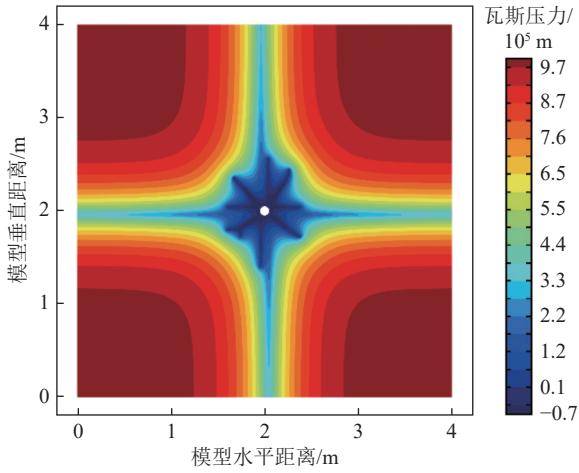


图 19 多重裂隙煤体瓦斯渗流特性

Fig.19 Gas seepage characteristics of coal bodies with multiple fractures

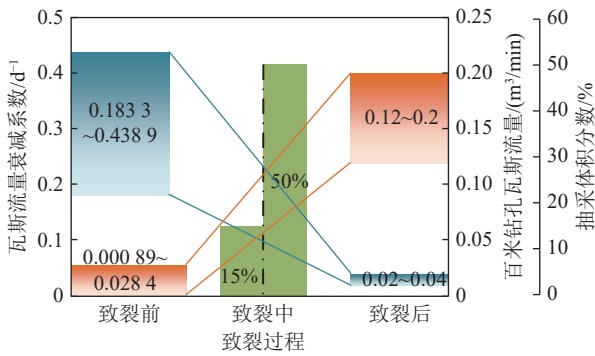


图 20 相变爆破致裂增透效果

Fig.20 Permeability enhancement of phase change blasting fracturing

4.2 相变爆破预裂提升块煤率

块煤率是煤矿井下开采的煤炭资源成块状的比率,是衡量煤炭品质的一个重要指标。在我国西北部赋存的浅埋煤层中,由于煤体本身硬度较大,综采时煤体不易从煤壁剥落^[49],导致采煤机效率低、截割速度慢、块煤率降低。采用人工干预手段降低煤体硬度、增加煤体裂隙发育程度,能够有效地提升工作面块煤率,降低采煤设备的比能耗和提高设备的工作效率。

采用 PFC 数值模拟软件,研究煤体预裂前后截割特征如图 21 所示^[50]。煤体预裂过后,经过滚筒截割时,原本形成的大块煤进一步破碎为小块煤,形成的块煤间尺寸差异性降低,截割力分布更加均匀。

榆神矿区 40105 工作面回采 4-2 煤层,煤层硬度为 3.0,在回采巷道两侧平行于工作面布置 2 排钻孔进行二氧化碳相变爆破,二氧化碳相变爆破过后,块煤粒级变化如图 22 所示^[51]。相变爆破预裂过后粒度大于 100 mm 的煤块占比减小,而粒度小于 100 mm

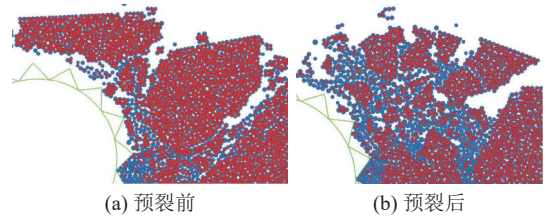


图 21 截割块度变化

Fig.21 Change in cutting block size

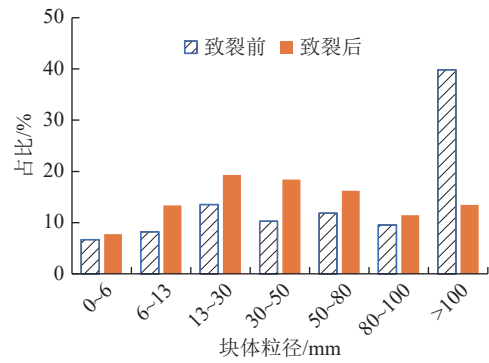


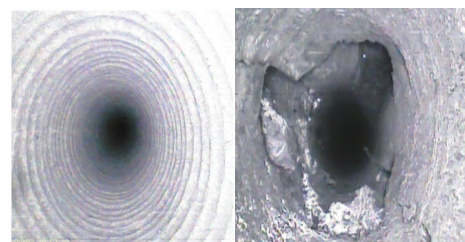
图 22 相变爆破预裂煤体块度变化

Fig.22 Change in block size of pre cracked coal body in phase change blasting

块体粒度增大,与数值模拟结论一致。现场应用效果表明相变爆破能够有效提升回采的块煤率。

4.3 工作面相变爆破预裂顶板

工作面回采过程中上隅角悬顶不仅会引起瓦斯积聚,而且大面积悬顶的突然垮落会引起其他次生灾害的发生^[52]。采用二氧化碳相变爆破的方式预裂顶板,能够在顶板中产生裂隙,在工作面回采过后上隅角区域会随之垮落。沙坪煤矿 9204 工作面相变爆破预裂效果如图 23 所示。通过钻孔窥视仪对顶板钻孔进行窥视,致裂前煤层顶板完整、裂隙不发育,



(a) 钻孔窥视



(b) 采空区顶板

图 23 相变爆破预裂顶板效果对比

Fig.23 Comparison of effect of phase change blasting on pre-splitting the roof

致裂过后,致裂孔内出现多条裂隙。工作面推进过预裂区域后采空区顶板垮落较好。

由于矿压较小,顶板坚硬完整,综放工作面在初采期间底板难以垮落。为了避免工作面悬顶大面积的突然垮落,减少初采期间放煤损失,在磁窑沟煤矿进行相变爆破的预裂试验。在初采开切眼位置及端头两巷布置相变爆破致裂孔,对工作面基本顶进行预裂,最终效果对比如图24所示。采用相变爆破致裂过后,工作面基本顶内产生贯通裂隙,破坏了顶板完整结构,随着开采的不断推进,工作面采空区全部垮落、正常放煤推进距离和初次来压步距均减小了50%左右。

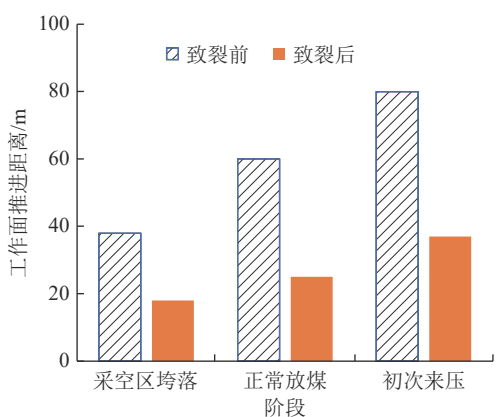


图24 相变爆破致裂初采放顶效果

Fig.24 Effect of phase change blasting on initial mining and topping

5 相变爆破致裂研究展望

对于二氧化碳相变爆破致裂机理的研究得到了初步进展,同时在高瓦斯煤层卸压增透、块煤率提升及工作面顶板预裂等场景中得到成功应用。未来在相变爆破致裂机理方面应在致裂多速率研究、多尺度分析和多物理场耦合方面等方面进一步研究。同时开展延时相变爆破技术研究,拓宽相变爆破应用场景。

1)进一步明晰煤岩体多速率作用下起裂机理。各种致裂手段的本质是煤岩体在不同应力作用下破坏断裂特征,煤岩体裂隙分布特征与不同致裂手段形成的加载速率相关(图25)。进一步研究不同应变率作用下断裂特征与冲击应力的关系,能够为致裂方式的选择提供更科学理论基础。采用岩石动力学测试方法构建煤岩体在相变爆破中等速率条件下的本构关系,开展不同加载速率下中心圆孔受力破坏特征试验,建立煤岩体裂纹数目、破碎块度与加载速率之间的定量关系。

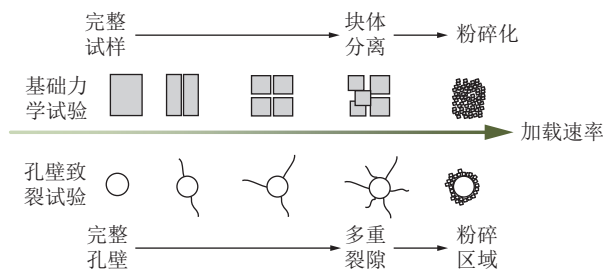


图25 不同加载速率冲击破碎特征

Fig.25 Impact fragmentation characteristics at different loading rates

2)进行相变爆破致裂煤岩体多尺度分析。二氧化碳相变爆破致裂在宏观上表现为裂隙的扩展,在微观层面上,二氧化碳相变作用对于孔隙的影响也是不可忽略的重要因素^[53],另外,二氧化碳会与部分矿物发生反应,改变煤岩体矿物特征,也会影响煤岩体性质的变化,对于相变爆破致裂效果分析仍需要建立宏微观统一模型来评价。通过图像识别、微震监测反演等方式确定宏观裂隙的扩展特征,采用扫描电镜、CT扫描、核磁共振、低温氮吸附、压汞实验等方法建立致裂前后孔隙变化特征,通过XRD、FTIR、GCMS等仪器测定煤岩体矿物成分及微晶结构变化特征^[3],如图26所示。最终利用分形的方法建立不同表征方法跨尺度之间的联系,形成相变爆破致裂煤岩体多尺度模型。

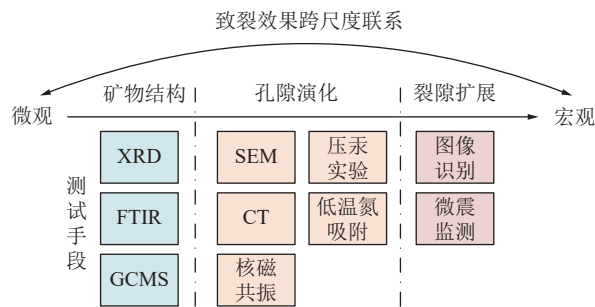


图26 相变爆破致裂效果多尺度分析

Fig.26 Multiscale analysis of phase change blasting fracturing

3)研究相变爆破致裂过程中多物理场耦合特征。二氧化碳相变爆破过程中不仅涉及到煤岩体固体力学物理场,还包括二氧化碳流场变化特征^[54],同时相变过程会引发温度场相应变化^[55],二氧化碳与矿物的反应^[56]涉及化学场,整个相变爆破致裂应从热-流-固-化等多场耦合特征进行进一步分析。另外,可以进一步引入相场损伤的方式来表明裂纹扩展特征。通过研究4个物理场之间的耦合关系(图27),建立多物理场PDE方程,采用COMSOL等多场耦合软件,研究不同物理场在相变爆破过程中演化规

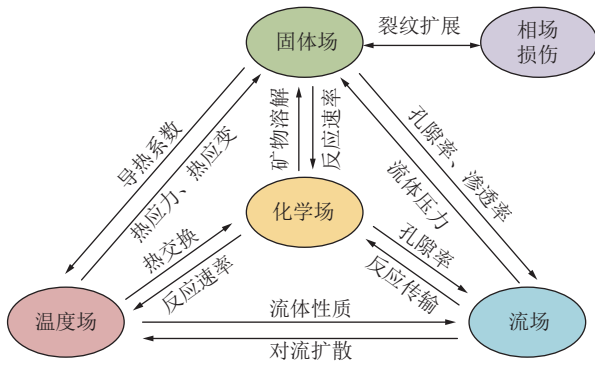


图 27 相变爆破致裂多场耦合特征

Fig.27 Multi field coupling characteristics of phase change blasting fracturing

律, 确定不同因素对于致裂效果影响大小, 从不同物理场角度针对性提出提升相变爆破致裂效果方法。

4) 开展延时相变爆破致裂技术研究。目前, 相变爆破多采用小规模、一次性爆破方式, 单次破岩体量较小, 随着电子雷管的开发与普及, 使得大规模延时相变爆破技术具备了可行性^[57], 能够达到提升爆破效果和降低爆破振动的双重目的, 进一步拓宽相变爆破技术应用范围。煤岩体中原生静态裂隙和爆破产生的动态裂隙之间也会产生相互影响(图 28), 不同阶段的裂隙一方面会形成后续爆破的自由面, 另一方面也可能成为二氧化碳泄气通道, 需要研究裂隙与相变爆破致裂的互馈影响关系, 并确定延时相变爆破网络时空演化规律, 明确裂隙网络的演化特征及其与相变爆破参数的相关性, 最终形成基于爆破参数合理设计的相变爆破裂隙网络调控方法。

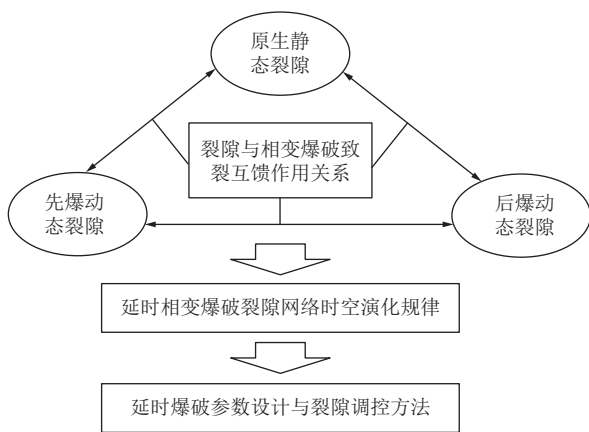


图 28 延时相变爆破裂纹扩展研究

Fig.28 Research of delayed phase change blasting crack propagation

5) 扩展二氧化碳相变爆破工程应用范围。相变爆破致裂虽然在一些工程中得到了成功应用, 但多依据工程经验进行施工, 相关技术规范还未形成, 相变爆破致裂优势没有得到充分发挥。在相变爆破设

备装置、参数设计规范和智能管控等方面还需要进一步研究, 开发适用于不同工况的致裂管体和释放喷嘴, 研究相变爆破直接定向致裂设备, 形成相变爆破孔网布置和爆破参数设计规范, 建立相变爆破致裂全过程智能管理监控系统, 能够为二氧化碳相变爆破进一步扩展应用提供指导。

6 结 论

1) 二氧化碳相变爆破能量的本质是二氧化碳相变时物理膨胀。根据相变爆破装置可分为重复使用致裂管和一次性致裂管, 二者工作原理相似, 泄能方式不同。二氧化碳相变爆破能量采用不同能量计算方式均表明, 相较于传统炸药爆破, 相变爆破属于一种低能量爆破方式。

2) 二氧化碳相变射流能够产生动态应力波和高压气体双重作用, 煤岩体在中等冲击作用下, 受到拉应力破坏产生径向初始断裂, 并在冲击波和卸载波综合作用下形成多重起裂特征, 高压气体在多重裂隙中进一步扩展, 驱动裂隙向外扩展, 相变爆破裂隙在应力气体协同作用下扩展演化。

3) 泄能方向、煤岩体性质、相变爆破参数、初始地应力、钻孔布置参数和钻孔切槽特性等因素均会对二氧化碳相变爆破致裂效果产生影响。泄能方向对煤岩体破坏起到直接作用, 引发非对称损伤破坏, 煤岩体性质对于爆破效果的影响因素由大到小分别为抗压强度、泊松比和弹性模型, 相变爆破参数对于爆破效果的影响因素由大到小分别为致裂孔间距、充装量和爆破压力, 初始地应力、钻孔布置参数和钻孔切槽特性等影响裂纹发育扩展特征。

4) 二氧化碳相变爆破致裂在各种工程中得到了成功应用。揭示了相变爆破多重裂隙渗流特征, 多重裂隙形成了瓦斯流动的主要通道, 对低渗煤体卸压增透能够起到有效作用; 对比了预裂前后煤体截割特征, 预裂爆破能够减少特大块煤体的产生, 形成更加均匀的块煤; 相变爆破预裂顶板产生的裂隙能够促进顶板的垮落。

5) 未来对于相变爆破致裂基础理论的研究应主要集中在煤岩体多速率下起裂机理、相变爆破致裂多尺度分析、致裂过程中多物理场耦合特征和延时相变爆破技术, 进一步揭示二氧化碳相变爆破致裂机理, 拓宽二氧化碳相变爆破致裂工程应用场景。

参考文献(References):

[1] 黄炳香, 程庆迎, 刘长友, 等. 煤岩体水力致裂理论及其工艺技术

- 框架[J]. *采矿与安全工程学报*, 2011, 28(2): 167-173.
- HUANG Bingxiang, CHENG Qingying, LIU Changyou, *et al.* Hydraulic fracturing theory of coal-rock mass and its technical framework[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2011, 28(2): 167-173.
- [2] 岳立新, 孙可明, 郝志勇. 超临界 CO₂ 提高煤层渗透性的增透规律研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(2): 319-324.
- YUE Lixin, SUN Keming, HAO Zhiyong. Study on increased permeability law of coal seam by supercritical CO₂[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(2): 319-324.
- [3] 刘佳佳, 聂子硕, 于宝种, 等. 超临界二氧化碳对煤体增透的作用机理及影响因素分析[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(2): 204-216.
- LIU Jiajia, NIE Zishuo, YU Baozhong, *et al.* Analysis of the mechanism and influencing factors of supercritical carbon dioxide on coal permeability enhancement[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 204-216.
- [4] CAO Y, ZHANG J, ZHAI H, *et al.* CO₂ gas fracturing: A novel reservoir stimulation technology in low permeability gassy coal seams[J]. *Fuel*, 2017, 203: 197-207.
- [5] WEIR P, EDWARDS J H. Mechanical loading and Cardox revolutionize an old mine[J]. *Coal Age*, 1928, 33: 288-290.
- [6] LU T, WANG Z, YANG H, *et al.* Improvement of coal seam gas drainage by under-panel cross-strata stimulation using highly pressurized gas[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2015, 77: 300-312.
- [7] 曹运兴, 张军胜, 田林, 等. 低渗煤层定向多簇气相压裂瓦斯治理技术研究与实践[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2631-2641.
- CAO Yunxing, ZHANG Junsheng, TIAN Lin, *et al.* Research and application of CO₂ gas fracturing for gas control in low permeability coalseams[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2631-2641.
- [8] 聂政. 二氧化碳炮爆破在煤矿的应用[J]. *煤炭技术*, 2007(8): 62-63.
- NIE Zheng. Application of cardox dioxide blasting technique in coal mines[J]. *Coal Technology*, 2007(8): 62-63.
- [9] 韦善阳, 孙威, 苗青, 等. 液态 CO₂ 相变致裂技术在金佳煤矿的应用[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(2): 94-100.
- WEI Shanyang, SUN Wei, MIAO Qing, *et al.* Liquid carbon dioxide phase transition fracturing technology applied to Jinjia Mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(2): 94-100.
- [10] 张宏伟, 宋峰, 李云鹏, 等. 液态 CO₂ 致裂技术在冲击地压防治中的应用[J]. *煤炭科学技术*, 2017, 45(12): 23-29.
- ZHANG Hongwei, ZHU Feng, LI Yunpeng, *et al.* Application of liquid CO₂ fracturing technique in rock burst control[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(12): 23-29.
- [11] 倪昊. 竖井二氧化碳“二阶二段”筒形掏槽爆破技术及应用[J]. *煤炭科学技术*, 2023, 51(10): 65-71.
- NI Hao. Application and carbon dioxide two-step barrel cut blasting technology in coal mine shaft[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(10): 65-71.
- [12] 周明安, 周晓光, 夏军, 等. 二氧化碳膨胀爆破技术现状及发展[J]. *采矿技术*, 2020, 20(6): 100-102.
- ZHOU Mingan, ZHOU Xiaoguang, XIA Jun, *et al.* The current status and development of carbon dioxide expansion blasting technology[J]. *Mining Technology*, 2020, 20(6): 100-102.
- [13] 孙小明. 液态二氧化碳相变致裂掏槽破岩试验研究[J]. *煤炭科学技术*, 2021, 49(8): 81-87.
- SUN Xiaoming. Experimental study on cutting and rock breaking by liquid CO₂ phase transition fracturing technology[J]. *Coal Science and Technology*, 2021, 49(8): 81-87.
- [14] 陈忠顺. 低渗煤层二氧化碳相变爆破裂隙—渗流演化规律[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- CHEN Zhongshun. Fracture-seepage evolution law by carbon dioxide phase change blasting in low permeability coal seam[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [15] CHEN Z, YUAN Y, YAN C, *et al.* A Novel Carbon Dioxide Phase Transition Rock Breaking Technology: Theory and Application of Non-Explosive Blasting[J]. *Processes*, 2022, 10(11): 2434.
- [16] 梅比, 高星, 方莹, 等. 二氧化碳膨胀爆破新型致裂管与安全技术研究[J]. *爆破*, 2021, 38(2): 153-159.
- MEI Bi, GAO Xing, FANG Ying, *et al.* Study on a new type of fracturing tube and safety technology of carbon dioxide expansion blasting[J]. *Blasting*, 2021, 38(2): 153-159.
- [17] LI Q, CHEN G, LUO D, *et al.* An experimental study of a novel liquid carbon dioxide rock-breaking technology[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 128: 104244.
- [18] 董庆祥, 王兆丰, 韩亚北, 等. 液态 CO₂ 相变致裂的 TNT 当量研究[J]. *中国安全科学学报*, 2014, 24(11): 84-88.
- DONG Qingxiang, WANG Zhaofeng, HAN Yabei, *et al.* Research on TNT equivalent of liquid CO₂ phase-transition fracturing[J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(11): 84-88.
- [19] 李文炜, 狄刚, 王瑞欣. 船运液态二氧化碳储罐爆炸事故的原因分析[J]. *安全与环境工程*, 2010, 17(1): 95-98.
- LI Wenwei, DI Gang, WANG Ruixin. Analysis of a liquid CO₂ tank explosion on a ship[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2010, 17(1): 95-98.
- [20] YANG Z, ZHOU Y, XU X, *et al.* Numerical modeling of liquid CO₂ phase transition blasting based on smoothed particle hydrodynamics algorithm[J]. *Thermal Science*, 2019, 23(S3): 693-702.
- [21] 王旭锋, 牛志军, 张磊, 等. 超声振动在矿山煤岩致裂中的研究进展与展望[J]. *煤炭科学技术*, 2024, 52(1): 232-243.
- WANG Xufeng, NIU Zhijun, ZHANG Lei, *et al.* Research progress and prospects of ultrasonic vibration in coal rock fracturing[J]. *Coal Science and Technology*, 2024, 52(1): 232-243.
- [22] 郭杨霖. 液态二氧化碳相变致裂机理及应用效果分析[D]. 焦作: 河南理工大学, 2017.
- GUO Yanglin. Fracturing mechanisms and functions of improvement of gas drainage of highly pressurized carbon dioxide gas system[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2017.
- [23] YANG X, WEN G, SUN H, *et al.* Environmentally friendly techniques for high gas content thick coal seam stimulation—multi-discharge CO₂ fracturing system[J]. *Journal of Natural Gas Sci-*

- ence and Engineering, 2019, 61: 71–82.
- [24] 柯波. 超临界二氧化碳相变动力学及其破岩机理试验研究[D]. 长沙: 中南大学, 2017.
KE Bo. Experimental study on phase transition dynamic of supercritical carbon dioxide and its rock breaking mechanism[D]. Changsha: Central South University, 2017.
- [25] 苏凯凯. 二氧化碳致裂器露天破岩机理研究及施工参数优化[D]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
SU Kaikai. Mechanism of action and the optimization of the optimization of construction parameters of opencast mining of rock with carbon dioxide fracturer [D]. Qingdao: Shandong University of science and technology, 2019.
- [26] 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[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S1): 24–27.
ZHANG Jiafan, CHENG Shufan, GAO Zhuang, et al. Practice and simulation of coal-rock mining by liquid carbon dioxide blasting[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S1): 24–27.
- [27] 魏建平, 崔家玮, 张铁岗, 等. 腔径比对自激振荡脉冲超临界二氧化碳射流性能影响[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3239–3249.
WEI Jianping, CUI Jiawei, ZHANG Tiegang, et al. Effect of cavity diameter ratio on the pulse performance of self-excited oscillation pulsed supercritical carbon dioxide jet[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3239–3249.
- [28] 白鑫, 张东明, 王艳, 等. 液态 CO₂ 相变射流压力变化及其煤岩致裂规律[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(4): 661–670.
BAI Xin, ZHANG Dongming, WANG Yan, et al. Pressure variation and coal fracturing law of liquid CO₂ phase transition jet[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(4): 661–670.
- [29] 李必红, 夏军, 陈丁丁. CO₂ 液-气相变膨胀破岩机理及其安全效应测试研究[J]. 采矿技术, 2017, 17(1): 61–63.
LI Bihong, XIA Jun, CHEN Dingding. Research on the mechanism of CO₂ liquid gas phase change expansion and rock breaking and its safety effect testing[J]. Mining Technology, 2017, 17(1): 61–63.
- [30] 邵鹏, 徐志伟, 周金生, 等. 非炸药破岩新技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2012.
SHAO Peng, XU Zhiwei, ZHOU Jinsheng, et al. New technology for non explosive rock breaking [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2012.
- [31] SHANG Z, WANG H, LI B, et al. Experimental investigation of BLEVE in liquid CO₂ phase-transition blasting for enhanced coalbed methane recovery[J]. Fuel, 2021, 292: 120283.
- [32] 彭然, 霍中刚, 温良. 二氧化碳致裂器止飞技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(S1): 134–139.
PENG Ran, HUO Zhonggang, WEN Liang. Study on anti-flying technology of carbon dioxide fracturer[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(S1): 134–139.
- [33] GAO F, TANG L, ZHOU K, et al. Mechanism analysis of liquid carbon dioxide phase transition for fracturing rock masses[J]. Energies, 2018, 11(11): 2909.
- [34] WANG H, CHANG L, LIU Q. Enhanced CMM drainage with high-pressure gas fracturing: a novel way to control greenhouse gas emissions in the coal mine. [J]. Journal of Residuals Science & Technology, 2017, 14(2): 57–66.
- [35] 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.
ZHOU Shengtao, LUO Xuedong, JIANG Nan, et al. A review on fracturing technique with carbon dioxide phase transition[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 883–893.
- [36] HU S, PANG S, YAN Z. A new dynamic fracturing method: deflagration fracturing technology with carbon dioxide[J]. International Journal of Fracture, 2019, 220(1): 99–111.
- [37] 丛日超, 王海柱, 李根生, 等. 超临界 CO₂ 聚能压裂开发煤层气可行性研究[J]. 煤炭学报, 2023, 48(8): 3162–3171.
CONG Richao, WANG Haizhu, LI Gensheng, et al. Feasibility on exploitation of coalbed methane by SC-CO₂ shock fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(8): 3162–3171.
- [38] 吴飞鹏. 高能气体压裂过程动力学模型与工艺技术优化决策研究[D]. 青岛: 中国石油大学, 2009.
WU Feipeng. The Kinetic model and the technology optimization of HEGF process [D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2009.
- [39] JIANG K, DENG S, JIANG X, et al. Calculation of fracture number and length formed by methane deflagration fracturing technology[J]. International Journal of Impact Engineering, 2023: 104701.
- [40] 左磊. 侧壁泄能式二氧化碳相变爆破致裂机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
ZUO Lei. Mechanism of carbon dioxide phase change blasting with side wall energy release[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [41] 孟朝贵. 二氧化碳相变爆破致裂煤体的影响因素与参数优化研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
MENG Chaogui. Study on the influencing factors and parameter optimization of coal body caused by carbon dioxide phase change blasting [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [42] 孙可明, 辛利伟, 吴迪, 等. 初应力条件下超临界 CO₂ 气爆致裂规律研究[J]. 固体力学学报, 2017, 38(5): 473–482.
SUN Keming, XIN Liwei, WU Di, et al. Mechanism of fracture caused by supercritical CO₂ explosion under the impact of initial stress[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2017, 38(5): 473–482.
- [43] 孙可明, 王金瓒, 辛利伟. 不同应力差条件下超临界 CO₂ 气爆煤岩体气楔作用次生裂纹扩展规律研究[J]. 应用力学学报, 2019, 36(2): 466–472.
SUN Keming, WANG Jinyu, XIN Liwei. Research on the law of secondary cracks propagation in coal and rock caused by gas wedging during supercritical CO₂ explosion under different stress differences[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2019, 36(2): 466–472.
- [44] 李亚东. 二氧化碳爆破作用下砂岩裂隙扩展规律研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2023.
LI Yadong. Study on the expansion law of sandstone fractures under the action of Carbon Dioxide blasting[D]. Shijiazhuang:

- Shijiazhuang Tiedao University, 2023.
- [45] 王兆丰, 李豪君, 陈喜恩, 等. 液态 CO₂ 相变致裂煤层增透技术布孔方式研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11(9): 11-16.
WANG Zhaofeng, LI Haojun, CHEN Xien, *et al.* Study on hole layout of liquid CO₂ phase-transforming fracture technology for permeability improvement of coal seam[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2015, 11(9): 11-16.
- [46] 潘红宇, 王康, 张天军, 等. CO₂ 气爆含控制孔煤层裂隙演化颗粒流模拟[J]. 西安科技大学学报, 2021, 41(2): 230-236.
PAN Hongyu, WANG Kang, ZHANG Tianjun, *et al.* Particle flow simulation of CO₂ explosion fracture evolution in coal seam with control holes[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2021, 41(2): 230-236.
- [47] 谢晓锋, 李夕兵, 李启月, 等. 液态 CO₂ 相变破岩桩井开挖技术[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(8): 2031-2038.
XIE Xiaofeng, LI Xibing, LI Qiyue, *et al.* Liquid CO₂ phase-transforming rock fracturing technology in pile-well excavation[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(8): 2031-2038.
- [48] 刘全保, 王飞, 闫晶晶, 等. CO₂ 切槽定向致裂机理实验研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(5): 23-26.
LIU Quanbao, WANG Fei, YAN Jingjing, *et al.* Directional fracturing caused by Carbon Dioxide[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(5): 23-26.
- [49] 宋水舟, 张昌锁, 薛剑, 等. 提高综采块煤率的爆破卸载技术研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(3): 52-54.
SONG Shuizhou, ZHANG Changsuo, XUE Jian, *et al.* Research on application of blast-unloading in increasing lump coal rate of fully-mechanized mining face[J]. Coal Technology, 2018, 37(3): 52-54.
- [50] 王圣志. 超前预裂爆破提高硬煤综采面块煤率机理[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
WANG Shengzhi. Mechanism of pre-splitting blasting to increase lump coal rate in hard coal fully mechanized mining face [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [51] 邓广哲, 张少春. 煤炭开采粒级控制理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- DENG Guangzhe, ZHANG Shaochun. Theory and application of particle size control in coal mining [M] Beijing: Science Press, 2021.
- [52] 李树刚, 乌日宁, 赵鹏翔, 等. 综采工作面上隅角瓦斯流动活跃区形成机理研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 207-213.
LI Shugang, WU Rining, ZHAO Pengxiang, *et al.* Study on formation mechanism of gas flow active area in upper corner of fully-mechanized mining face[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1): 207-213.
- [53] 田时锋, 周军平, 鲜学福, 等. 超临界 CO₂ 作用下页岩抗拉强度的变化规律[J]. 煤炭学报, 2023, 48(7): 2728-2736.
TIAN Shifeng, ZHOU Junping, XIAN Xuefu, *et al.* Effect of supercritical CO₂ on alteration of tensile strength of shale[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(7): 2728-2736.
- [54] 高亚楠, 高峰, 谢晶, 等. 温度-围压-瓦斯压力作用下煤岩力学性质及有限变形行为[J]. 煤炭学报, 2021, 46(3): 898-911.
GAO Yanan, GAO Feng, XIE Jing, *et al.* Mechanical properties and finite deformation behavior of coal under temperature, confining pressure and gas pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(3): 898-911.
- [55] 胡少斌, 蔡余康, 王恩元, 等. 高温高压 CO₂ 反应流动相变致裂机理[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(6): 1203-1215.
HU Shaobin, CAI Yukang, WANG Enyuan, *et al.* Mechanism of phase change cracking in high temperature and high pressure CO₂ reaction flow[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2023, 52(6): 1203-1215.
- [56] 刘勇, 张东鑫, 张宏图, 等. 超临界二氧化碳射流冲击短时浸泡煤体破坏特征分析[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3310-3319.
LIU Yong, ZHANG Dongxin, ZHANG Hongtu, *et al.* Analysis of damage characteristics of coal body with supercritical carbon dioxide jet impact short time soaking[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3310-3319.
- [57] 尤秀, 巢光华. 电子点火头在二氧化碳爆破技术中的应用[J]. 科技创新导报, 2020, 17(25): 50-52.
YOU Xiu, CHAO Guanghua. Application of intelligent electronic ignition element in carbon dioxide blasting technology[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2020, 17(25): 50-52.