

# 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂煤体破坏行为及渗透特性

李 钊, 倪冠华, 付正麟, 巩 俐, 尚元梦, 崔迎雪, 李莱玉

(山东科技大学 安全与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘 要:** 深部低渗煤层瓦斯抽采效率低、治理时间长是制约煤炭安全高效开采的瓶颈问题。液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂作为一种无水化增透措施, 一方面可避免煤层水锁效应, 另一方面可置换煤中瓦斯, 强化抽采效果。为揭示液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂对煤体增透的作用机制, 以神木柠条塔和平煤十矿煤样为研究对象, 通过霍普金森压杆动态冲击试验、高压 CO<sub>2</sub> 致裂试验和三轴压缩渗流试验, 探究不同阶段的煤体破坏行为及渗透特性。结果表明: 随着冲击速度的增大, 煤样峰值应变率、动态峰值强度呈增加趋势, 神木柠条塔煤样破坏方式由劈裂破坏向压碎破坏转变, 应力-应变曲线不具有二次承压阶段, 平煤十矿煤样破坏模式以劈裂为主, 且具有明显的应变硬化现象; 垂直主应力和煤体起裂压力之间存在显著线性关系, 垂直主应力每升高 1 MPa, 起裂压力约增大 0.6 MPa, 对于裂隙发育程度较高的神木柠条塔煤样, 致裂作用主要体现在裂隙的贯通与扩展, 而对于结构致密的平煤十矿煤样则主要体现在新裂隙的形成; 倾斜裂隙对煤体力学强度具有较强的劣化作用, 可大幅降低煤体破坏所需的应力, 围压作用下, 含倾斜裂隙煤样其峰值应力较原煤降低约 50%, 其渗透率增大为原煤的 12.7~14.9 倍。研究揭示了液态 CO<sub>2</sub> 致裂“动态破碎—静态扩展—地应力挤压”3 阶段的协同增透机制, 可为液态 CO<sub>2</sub> 致裂增透技术的推广应用提供理论参考。

**关键词:** 煤层增透; 瓦斯抽采; 液态 CO<sub>2</sub>; 裂隙扩展; 渗透率

中图分类号: TD712 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2025)11-4940-15

## Behavior of coal failure and permeability characteristics caused by liquid CO<sub>2</sub> phase change fracturing

LI Zhao, NI Guanhua, FU Zhenglin, GONG Li, SHANG Yuanmeng, CUI Yingxue, LI Moyu

(College of Safety and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** Low methane extraction efficiency and prolonged treatment duration in deep, low-permeability coal seams constitute bottlenecks constraining safe and efficient coal mining. Liquid CO<sub>2</sub> phase-change fracturing, as a water-free permeability enhancement measure, simultaneously avoids the water-lock effect in coal seams and displaces methane within coal, thereby intensifying extraction efficacy. To elucidate the mechanism by which liquid CO<sub>2</sub> phase-change fracturing enhances coal permeability, coal samples from Shenmu Ningtiaota and Pingmei No.10 Mine were studied. Through Hopkinson bar dynamic impact tests, high-pressure CO<sub>2</sub> fracturing tests, and triaxial compression-seepage tests, the fracture behavior and permeability characteristics of coal at different stages were investigated. Results indicate: As impact velocity increases, peak strain rate and dynamic peak strength of coal samples exhibit an upward trend. The failure mode of Shenmu coal shifts from splitting to crushing, with stress-strain curves lacking a secondary compression phase. Pingmei coal

收稿日期: 2025-02-23 策划编辑: 韩晋平 责任编辑: 钱小静 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.W725.0197

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52404226); 国家自然科学基金面上资助项目 (52374212, 52174192)

作者简介: 李 钊 (1995—), 男, 山东鄄城人, 讲师, 博士。E-mail: 372929lz@sust.edu.cn

通讯作者: 倪冠华 (1988—), 男, 山东滕州人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: ngh0101@163.com

引用格式: 李钊, 倪冠华, 付正麟, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂煤体破坏行为及渗透特性[J]. 煤炭学报, 2025, 50(11): 4940-4954.

LI Zhao, NI Guanhua, FU Zhenglin, et al. Behavior of coal failure and permeability characteristics caused by liquid CO<sub>2</sub> phase change fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(11): 4940-4954.



移动阅读

primarily exhibits splitting failure accompanied by pronounced strain hardening. A significant linear relationship exists between the vertical principal stress and the coal's initiation pressure. For every 1 MPa increase in vertical principal stress, the initiation pressure increases by approximately 0.6 MPa. For the Shenmu coal sample with highly developed fractures, the fracturing effect primarily manifests as fracture connection and expansion. In contrast, for the structurally dense Pingmei coal sample, the effect mainly involves the formation of new fractures. Inclined fractures significantly degrade the mechanical strength of coal, substantially reducing the stress required for failure. Under confining pressure, peak stress in coal samples with inclined fractures decreased by approximately 50% compared to pristine coal, while permeability increased to 12.7–14.9 times that of pristine coal. The research reveals the three-stage synergistic permeability enhancement mechanism of “dynamic crushing-static expansion-geostress extrusion” of liquid CO<sub>2</sub> fracturing, which can provide theoretical reference for the popularization and application of liquid CO<sub>2</sub> fracturing permeability enhancement technology.

**Key words:** coal seam permeability enhancement; gas drainage; liquid CO<sub>2</sub>; fracture propagation; permeability

## 0 引 言

煤炭作为我国基础能源和工业原料,其长期以来的稳定供应为经济社会发展和国家能源安全提供了强有力的保障<sup>[1]</sup>。在能源结构调整和“双碳”目标下,必须充分释放煤炭的先进生产潜力,完成煤炭保供。我国 50% 以上的煤层属于低渗煤层,且近年来随着浅部煤炭资源的枯竭,煤炭开采深度正以 8~12 m/a 的速度增加,未来深部开采将成为常态<sup>[2-4]</sup>。在高地应力、高瓦斯、低渗透性等特征叠加下,深部煤层煤与瓦斯突出等动力灾害的隐蔽性、危害性、复杂性更加显著,瓦斯抽采难度更大,抽采时间更长,而这种长周期的瓦斯治理严重限制了煤炭的安全高效开采<sup>[5-6]</sup>。综上,开展深部低渗煤层强化增透与瓦斯高效促抽技术的相关研究对于保障矿井安全生产、确保煤炭资源可持续利用具有重要意义。

液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术起源于 20 世纪 80 年代采石场岩石破碎领域<sup>[7]</sup>,其原理是液态 CO<sub>2</sub> 受热相变为高能气体,瞬间产生巨大的动态压力波以破碎煤体并延展裂隙。该技术早期被应用于天然气开采以避免水锁、水敏等储层损害效应<sup>[8-11]</sup>,北美地区迄今为止已实施 2 000 余口井的工程实践<sup>[12-13]</sup>,但多用于页岩气开发,由于其煤层赋存条件较为简单,因此有关该技术在煤炭开采领域的应用研究较少。近年来,鉴于“低渗煤层煤与瓦斯安全高效共采”“碳中和、碳达峰”等目标的提出,国内学者开始将液态 CO<sub>2</sub> 应用于煤层致裂增透以强化瓦斯抽采,并取得了一系列研究成果。在机理层面,学者们从爆炸热力学角度计算了液态 CO<sub>2</sub> 致裂器的可释放能量,并将其等效为 2,4,6-三硝基甲苯 (2,4,6-Trinitrotoluene, TNT) 爆炸当量<sup>[14-15]</sup>;在此基础上, YANG 等<sup>[16]</sup>、周西华等<sup>[17]</sup>、KANG 等<sup>[18]</sup>基于煤岩损伤力学、空气动力学等理论,构建了裂隙延展准则,并借助 FLAC 软件数值模拟得出了爆炸波作

用下的破碎区、裂隙区范围;樊世星<sup>[19]</sup>、梁卫国等<sup>[20]</sup>通过开展应力条件下水力压裂、液态 CO<sub>2</sub> 压裂及超临界 CO<sub>2</sub> 压裂试验,探究煤体损伤及裂隙扩展特征,发现 CO<sub>2</sub> 压裂可形成更为复杂的裂隙网络结构。在工程实践方面,王兆丰等<sup>[21-25]</sup>在焦煤集团九里山矿开展了低渗煤层液态 CO<sub>2</sub> 压裂增透工程试验,并优化钻孔布置参数、工艺流程等,为液态 CO<sub>2</sub> 压裂技术在煤层增透强化预抽领域的推广应用奠定了基础;周西华等<sup>[26]</sup>以钻孔布置为切入点,提出多孔连续协同爆破的钻孔布置方式,分析确定了最优钻孔参数,显著提升了煤层透气性及瓦斯抽采效果;白鑫等<sup>[27]</sup>、张东明等<sup>[28-29]</sup>通过自研三轴试验装置揭示了主应力比对破裂方向的控制特征,提出了地应力条件下优势射孔致裂方向的确定方法,形成了液态 CO<sub>2</sub> 相变定向射孔致裂增透网格格式瓦斯抽采技术;文虎等<sup>[30]</sup>、KANG 等<sup>[18]</sup>分别在南屯煤矿 3 上煤层 (平均埋深约 250 m)、余吾煤矿 3 号煤层 (平均埋深约 440 m) 进行了液态 CO<sub>2</sub> 压裂工程应用,结果表明致裂半径分别在 10~20 m 和 3 m 左右。结合上述文献分析可知:液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂与炸药爆破具有一定相似性,但考虑到试验安全问题,学者们多通过计算等效炸药爆炸当量与数值模拟相结合的方法探究 CO<sub>2</sub> 相变致裂过程,鲜有关于液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂的试验研究;现有试验研究中的液态 CO<sub>2</sub> 压裂与液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂作用原理不同,前者通过高压液态 CO<sub>2</sub> 致裂煤体,而后液态 CO<sub>2</sub> 相变为气态,进一步扩展裂隙网络;后者通过外部加热使液态 CO<sub>2</sub> 相变为高压气体,而后通过气态 CO<sub>2</sub> 的冲击作用在煤体中形成复杂的缝网结构;由于致裂效果受地应力、煤层硬度、钻孔设计等诸多因素的影响,对于不同煤层致裂范围的差异性也较大。

综上所述,液态 CO<sub>2</sub> 致裂在无水化煤层增透领域得到较多关注,但其致裂效果对于不同埋深的煤层具有差异性,且相关理论研究尚处于起步阶段,制约了

该技术的规模化推广应用。出于试验安全原则,文中结合液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂器工作原理,将煤体致裂过程分为动态破碎、静态扩展、地应力挤压 3 个阶段,并分别通过霍普金森压杆动态冲击试验、高压 CO<sub>2</sub> 致裂试验、三轴压缩渗流试验进行研究,探究煤体液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透机制。

## 1 试验与煤样制备

### 1.1 霍普金森压杆动态冲击试验

以陕西省榆林市神木柠条塔与河南省平顶山市平煤十矿的原煤为试验对象,渗透率分别为  $0.07 \times 10^{-15}$  和  $0.13 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ,均属于低渗透煤层,埋深分别为 300 和 800 m,分属于浅部煤层和深部煤层。神木柠条塔煤矿虽属于低瓦斯矿井,但其具有我国西部低瓦斯煤层的渗透率低、硬度高的共性特征,以其为研究对象对强化西部低瓦斯煤层抽采效果具有重要意义。笔者选用霍普金森压杆试验系统模拟液态 CO<sub>2</sub> 相变产生的冲击波对煤体的冲击破坏作用。设备由动力装置、荷载传递系统、数据采集系统 3 部分组成。动力装置由高压氮气气瓶、气压控制阀、冲头发射机构组成,工作压力为 0.08~5.00 MPa,可通过改变氮气压力实现子弹冲击速度的调节。荷载传递系统由子弹、入射杆、透射杆、吸收杆和阻尼器组成。数据采集系统由激光测速器、应变片、超动态应变仪组成。激光测速器测试范围为 0~100 m/s,测试精度为 0.01 m/s,用于测定子弹的撞击速度。应变片用于收集入射波、反射波、透射波的应变信号。超动态应变仪应变信号输入频率为 1 MHz,最大采样频率为 20 MHz,用于放大应变片采集的应变信号。

钻取尺寸为  $\phi 50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的神木柠条塔煤样和平煤十矿煤样各 4 个,将神木柠条塔煤样记作 A 组,平煤十矿煤样记作 B 组,如图 1 所示。文献[31]显示,液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂的应变率在  $10 \sim 100 \text{ s}^{-1}$ ,经试验调试,冲击压力为 0.3 MPa 时神木柠条塔煤样的峰值应变率为  $100 \text{ s}^{-1}$  左右,因此每组设置 0.15、0.20、0.25、0.30 MPa 四个冲击压力,以获得不同应变率加载下煤



图 1 动态冲击试验煤样

Fig.1 Coal sample for dynamic impact experiment

体的动态冲击破坏特征。试验前,对压杆系统进行冲击测试,保证压杆之间连接的紧密性和应力波传递的稳定性。将煤样两端与压杆连接处均匀涂抹凡士林后与压杆连接,减小顶端摩擦的影响。煤样安装后,利用标记好的推杆调整子弹至预定位置,同时调整发射气压,待准备完成,打开开关进行冲击试验。

### 1.2 高压 CO<sub>2</sub> 致裂试验

利用煤体高压 CO<sub>2</sub> 致裂测试系统开展试验,该系统由应力加载子系统、高压致裂子系统以及数据采集子系统组成。应力加载子系统使用伺服液压机进行垂直应力加载,可施加的最大压力为 80 MPa,水平应力使用单独的液压泵加载,最大应力可达 30 MPa。3 个方向上的集中应力经硬性传压板转化为均匀应力并作用于煤岩试件。高压致裂子系统由 CO<sub>2</sub> 气瓶、增压控制器、相变发生器、高压球阀组成。其中,相变发生器由高压钢瓶和加热电阻构成。数据采集子系统可通过传感器实现实时监测与记录致裂过程中各方向应力以及气体压力。系统启动后,缓冲罐中的 CO<sub>2</sub> 气体首先经过增压控制器转化为液态并进入高压气体发生器,当微电流通过加热发生器内部电阻时,液态 CO<sub>2</sub> 被瞬间转化为高压气体,而后经过高压球阀进入致裂钻孔,完成煤体致裂。该试验对应液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂的静态扩展阶段,煤体在高压气体作用下起裂,且裂隙持续扩展,形成破碎区之外的裂隙区。

为减少加工过程对煤样的破坏,采用水刀切割的方式将从工作面取出的块状煤加工成尺寸为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$  的立方体。同时,在煤样顶面中心加工直径为 6 mm、深度为 90 mm 的钻孔以模拟致裂钻孔。距钻孔孔口 30 mm 的区域内使用 7102 高强度特种密封胶进行密封,确保致裂过程中气体不会从钻孔泄露。钻孔底部预留 20 mm 空腔段作为初始起裂位置。密封后的煤样试件如图 2 所示。将密封好的试件安装在加载模块上,检测数据采集系统连接是否



图 2 密封后煤样试件

Fig.2 Sealed coal sample specimen

完好, 采用“围压-轴压-围压-轴压”的循环方式进行压力加载, 以防止试件破坏, 首先增大围压至 3 MPa, 而后升高轴压至 5 MPa, 依次将轴压围压升高至预定值, 启动高压致裂系统。

以神木柠条塔 (SM 组) 和平煤十矿煤样 (PM 组) 为研究对象, 分别模拟浅部煤层与深部煤层的致裂过程, 以垂直主应力为变量, 保持最小水平主应力与最大水平主应力恒定。根据康红普院士等<sup>[32]</sup>研究成果, 埋深与垂直主应力呈正相关关系, 比例系数为 0.024 5。据此, 将 SM 组最小与最大水平主应力设置为 10 和 14 MPa, 垂直主应力分别设置 10、12、15 MPa, 对应于埋深 400~600 m 的煤层, PM 组最小与最大水平主应力设置为 15 和 20 MPa, 垂直主应力分别设置 20、22、25 MPa, 对应于埋深 800~1 000 m 的煤层。应力加载方案见表 1。

表 1 高压 CO<sub>2</sub> 致裂试验压力加载方案

Table 1 Pressure loading for CO<sub>2</sub> fracturing experiments

组别	编号	最小水平主应力/MPa	最大水平主应力/MPa	垂直主应力/MPa
SM组	SM1	10	14	10
	SM2	10	14	12
	SM3	10	14	15
PM组	PM1	15	20	20
	PM2	15	20	22
	PM3	15	20	25

### 1.3 三轴压缩渗流试验

为得到载荷作用下致裂前后煤体力学损伤特征及渗透率演化特征, 以平煤十矿煤样为研究对象, 使用 Rock 系列全应力多场耦合三轴试验仪 (图 3) 开展不同围压下的三轴压缩及渗流试验, 仪器由控制系统、三轴压力室、轴压系统、围压系统、渗流系统、温度系统 6 个部分及专用高精度传感器 (位移、压力、温度) 组成, 可施加最大围压为 60 MPa, 最大轴向应力为 500 MPa, 渗透进口压力为 60 MPa, 出口回压 50 MPa, 控压精度±0.01 MPa。通过轴压室自平衡活塞压头, 以机械方式抵消围压的影响, 加载到试件上的力直接为应力差, 于此同时在压头不断下压的过程中, 受到挤出效应的围压油进入机械自平衡装置, 自动维持围压的稳定性。可实时记录荷载、应力差、径向位移、环向应变、流体压力及流量值, 并能够同步绘制荷载-位移、应力-应变、孔隙流体压力/流量-时间关系曲线。根据静态扩展阶段煤体的裂隙形态特征, 选用预制裂隙的方式加工得到不含裂隙的原始煤样、含倾斜裂隙煤样及含水平垂直裂隙煤样, 煤样均为直径 50 mm、

高度 100 mm 的标准圆柱形试样, 含裂隙煤样的裂隙宽度均为 1 mm, 如图 3 所示。



图 3 三轴压缩及渗流试验煤样

Fig.3 Coal samples for triaxial compression and percolation experiments

设计 A、B、C 三组试验, 分别对原煤、含倾斜裂隙煤样、含水平垂直裂隙煤样, 每组设置 10、15、20 MPa 三个围压梯度以模拟埋深 800~1 000 m 的煤层所处的围压环境, 见表 2。将试件安装在三轴压力室位置, 检查传感器、渗流通道连接, 以 1 MPa/min 的速度将围压加载至预设压力值, 而后施加渗透压, 渗透率测试以水为注入介质, 在预设围压下以 1 MPa/min 的速度将上端口压力加载至 3.1 MPa, 下端口压力稳定在 0.1 MPa, 使其在 3 MPa 的压差下渗流, 改变围压重复上述步骤, 完成所有测试。渗透率计算采用稳态法, 计算方法如式 (1) 所示。当流量-时间曲线斜率保持不变, 即煤样内部产生稳定渗流时使用位移控制的方式以 0.02 mm/min 的速度加载轴压, 直至煤样完全破坏。

$$K = \frac{\mu L \Delta Q}{S \Delta P \Delta t} \quad (1)$$

式中:  $K$  为渗透率,  $m^2$ ;  $\mu$  为动力黏度,  $Pa \cdot s$ ;  $L$  为试件

表 2 煤样三轴压缩及渗流试验方案

Table 2 Experimental protocol for triaxial compression and percolation of coal samples

编号	裂隙情况	围压/MPa
A1	无预制裂隙	10
A2	无预制裂隙	15
A3	无预制裂隙	20
B1	倾斜裂隙	10
B2	倾斜裂隙	15
B3	倾斜裂隙	20
C1	垂直水平裂隙	10
C2	垂直水平裂隙	15
C3	垂直水平裂隙	20

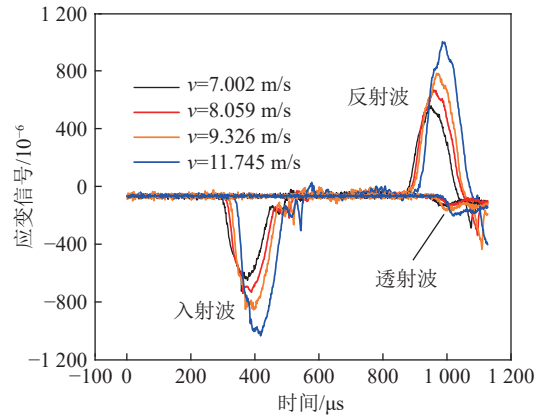
高度, m;  $\Delta t$  为记录点间隔时间, s;  $\Delta Q$  为  $\Delta t$  时间内流过的水体积,  $\text{m}^3$ ;  $S$  为试件横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\Delta P$  为上端口与下端口的压力差, MPa。

## 2 结果与讨论

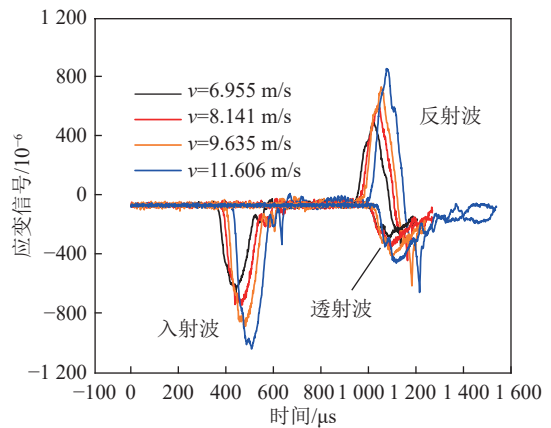
### 2.1 动态破碎阶段煤体损伤特征

试验过程中通过调节气体压力改变子弹撞击入射杆的速度, 以实现不同应变率的加载, 从而获得不同冲击速度下的煤体动态破坏特征。使用超动态应变仪采集获得冲击过程中神木柠条塔煤样和平煤十矿煤样的电压信号, 并将其转变为应变信号, 同时使用激光测速器测得冲击速度, 最终得到不同速度下的入射波、反射波、透射波曲线, 如图 4 所示。由图 4 可以看出, 2 种煤样的入射波、反射波以及透射波峰值均随冲击速度的增大而增加, 另外相比于神木柠条塔煤样, 平煤十矿煤样的透射波更加明显, 说明平煤十矿煤样破坏程度较低, 部分信号得以穿过煤样并传递至透射杆。

为进一步分析冲击波动态作用下煤体破坏特征, 需要降噪处理波形信号, 而后通过三波法计算得到峰值应变率、动态峰值强度、破坏应变等参数, 计算结果见表 3。由表 3 可知: 冲击速度介于  $7.002 \sim 11.745 \text{ m/s}$ , 且与冲击压力呈正相关关系。神木柠条塔煤样的峰值应变率介于  $61.495 \sim 106.16 \text{ s}^{-1}$ , 动态峰值强度为  $6.657 \sim 14.236 \text{ MPa}$ , 破坏应变为  $1.053 \times 10^{-3} \sim 2.193 \times 10^{-3}$ ; 平煤十矿煤样的峰值应变率介于  $54.175 \sim 87.876 \text{ s}^{-1}$ , 动态峰值强度为  $22.10 \sim 42.872 \text{ MPa}$ , 破坏应变为  $3.626 \times 10^{-3} \sim 4.88 \times 10^{-3}$ 。峰值应变率、动态峰



(a) 神木柠条塔煤样



(b) 平煤十矿煤样

图 4 不同冲击速度下煤样的波形曲线

Fig.4 Waveform curves at different impact speeds

值强度以及破坏应变整体上随冲击速度增大呈增加趋势。冲击速度相近时, 平煤十矿煤样的峰值应变率低于神木柠条塔煤样, 动态峰值强度与破坏应变则与之相反, 均高于神木柠条塔煤样。

表 3 霍普金森冲击试验结果统计

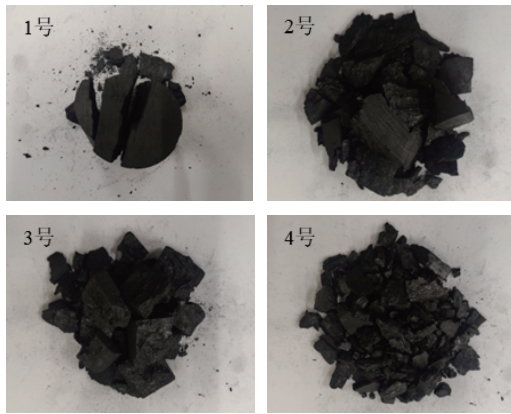
Table 3 Statistics of Hopkinson shock experiment results

试件编号	煤样产地	冲击压力/MPa	冲击速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	峰值应变率/ $\text{s}^{-1}$	峰值强度/MPa	破坏应变/ $10^{-3}$
1号	神木柠条塔	0.15	7.002	61.495	6.657	1.053
2号	神木柠条塔	0.20	8.059	73.261	7.028	1.728
3号	神木柠条塔	0.25	9.326	84.133	10.245	1.241
4号	神木柠条塔	0.30	11.745	106.160	14.236	2.193
5号	平煤十矿	0.15	6.955	54.175	22.100	3.626
6号	平煤十矿	0.20	8.141	64.770	29.952	3.744
7号	平煤十矿	0.25	9.635	75.936	36.647	4.516
8号	平煤十矿	0.30	11.606	87.876	42.872	4.880

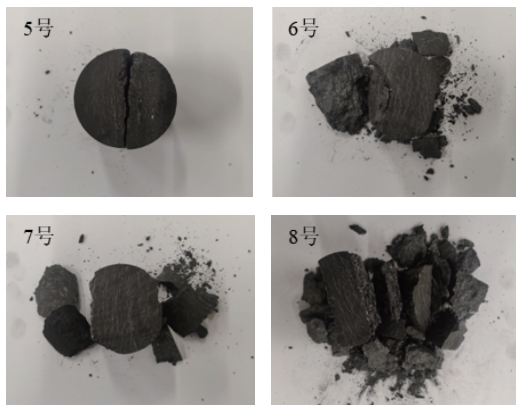
#### 2.1.1 动态冲击作用下煤样破坏形态分析

动态冲击作用下神木柠条塔和平煤十矿煤样的破坏特性均呈现出较强的冲击速度相关性, 不同冲击

速度下煤样的破坏形态如图 5 所示。随着冲击速度的增加, 煤样破坏后产生的碎块数量呈增加趋势, 破碎程度逐渐增大。冲击速度相近的情况下, 平煤十矿



(a) 神木柠条塔煤样的破坏形态



(b) 平煤十矿煤样的破坏形态

图 5 不同冲击速度下煤样的破坏形态

Fig.5 Damage patterns different impact velocities

煤样的破碎程度较小, 破坏后的碎块粒径较大。

对于神木柠条塔煤样, 当冲击速度较低时, 煤样破坏模式以轴向劈裂为主, 如图 5a 中的 1 号煤样所示, 此时煤样加载的峰值应变率为  $61.495 \text{ s}^{-1}$ , 破坏后煤样产生了 2 条轴向裂隙, 并未发生整体破碎。随着冲击速度的增大, 煤样出现了劈裂和压碎复合的破坏特征, 如图 5a 中的 2 号和 3 号煤样所示。当冲击速度为  $8.059 \text{ m/s}$  时, 煤样破碎程度增大, 块体数量增多, 且直径大于  $3 \text{ cm}$  的碎块居多。当峰值应变率增大至  $9.326 \text{ m/s}$  时, 破碎程度进一步增大, 碎块直径以  $2.0 \sim 2.5 \text{ cm}$  为主, 且伴有少量煤粉。当冲击速度较大时, 煤样破坏模式逐渐转变为压碎破坏, 如图 5a 中的 4 号煤样所示, 此时破坏后的煤样呈颗粒状, 粒径主要分布在  $0.5 \sim 1.5 \text{ cm}$  内, 且伴有大量煤粉。综上, 冲击速度由小增大的过程中, 神木柠条塔煤样由劈裂破坏逐渐向压碎破坏过渡; 冲击速度较小时压碎破坏不明显, 内部大尺寸裂隙贯通导致煤体开裂, 破坏后块度较大; 随着应变率的增大, 煤体内部小尺寸裂隙充分发育并贯通成大裂隙, 煤体破碎程度增大, 碎块尺寸呈现分级现象并产生大量煤粉, 表现出整体破坏特征。

对于平煤十矿煤样, 其本身致密、硬度较大, 内部

孔裂隙、层理等天然缺陷较少, 因此当冲击速度相近时, 其应变率明显低于神木柠条塔煤样, 且当应变率相近时, 其破坏程度也显著低于神木柠条塔煤样。从图 5b 中可以发现, 平煤十矿煤样的破坏主要发生在试件的两侧。当冲击速度较低时, 煤样在冲击作用下破坏为 2 块, 且破坏面较为平滑规整, 如图 5b 中 5 号煤样所示。随着冲击速度的增大, 煤样破坏程度逐渐增加, 破坏主要表现为煤样两侧劈裂为薄片状, 如图 5b 中 6 号和 7 号煤样所示。继续增大冲击速度, 煤样破碎形成的薄片逐渐增多, 主体部分逐渐减小, 但仍未出现整体上的破碎, 表明相近的冲击速度下平煤十矿煤样的破坏难度更大, 且其破坏主要以劈裂为主, 若要使其彻底破碎则需要增大冲击速度以提供更大的应变率。

### 2.1.2 动态冲击作用下煤样应变率变化特征分析

应变率与冲击速度的关系如图 6 所示。由图 6 可知, 随着冲击压力的升高, 子弹冲击速度逐渐增大, 煤样的峰值应变率也随之升高, 峰值应变率与冲击速度存在显著的线性相关关系, 说明试验得到的峰值应变率具有较高的可信度, 从侧面印证了动态冲击试验结果的可靠性<sup>[33]</sup>。

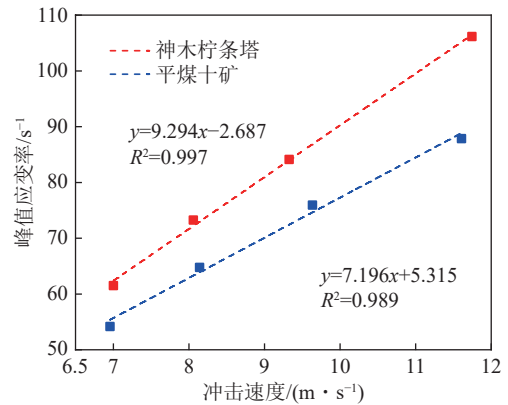
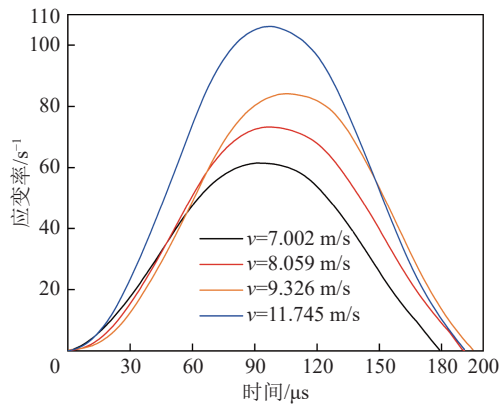


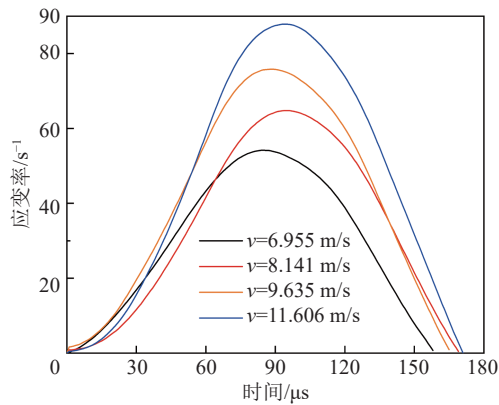
图 6 应变率与冲击速度的关系

Fig.6 Relationship between strain rate and impact velocity

动态冲击作用下, 神木柠条塔煤样和平煤十矿煤样的应变率时程曲线如图 7 所示。由图 7 可以看出, 动态冲击作用下 2 种煤样的应变率整体上随子弹速度的增大而增大, 加载过程中应变率曲线呈倒 V 形, 且应变率随着时间的增加逐渐增大至峰值而后开始减小。神木柠条塔煤样和平煤十矿煤样的峰值应变率均出现在  $90 \mu\text{s}$  左右, 且与冲击速度无关。  $0 \sim 90 \mu\text{s}$  内应变率上升, 且冲击速度越大, 应变率增加越快。  $90 \sim 180 \mu\text{s}$  内应变率降低, 但该阶段仍为加载过程。相比于神木柠条塔煤样, 平煤十矿煤样更为致密, 子弹冲击速度相近时其产生的应变更小, 因此平煤十



(a) 神木柠条塔煤样



(b) 平煤十矿煤样

图 7 动态冲击煤样应变率时程曲线

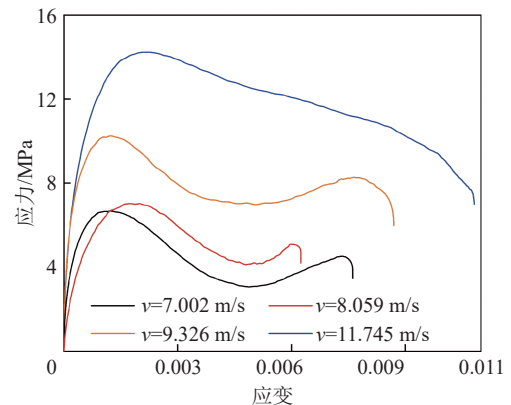
Fig.7 Dynamic impact coal sample strain rate time course curves

矿煤样应变率整体低于神木柠条塔煤样。

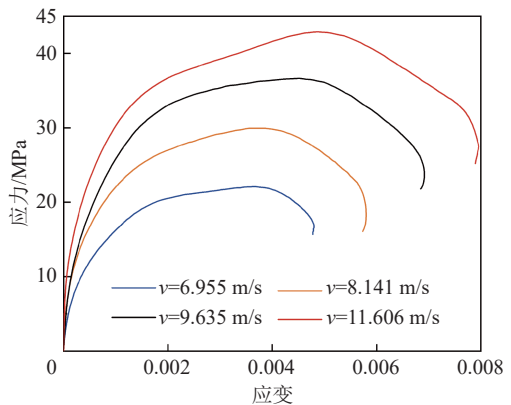
### 2.1.3 煤样动态应力-应变曲线特征分析

煤样在不同冲击速度下的动态应力-应变曲线如图 8 所示。根据动态应力-应变曲线特征,可将其划分为线弹性阶段、弹塑性阶段和塑性软化阶段。线弹性阶段,应力随应变的增大近似呈线性增长趋势,达到屈服强度后应变增长速度减缓,即曲线斜率减小;进入弹塑性阶段,应力增大至峰值强度后,煤样发生破坏,随应变增大应力开始降低,曲线进入塑性软化阶段。由于神木柠条塔煤样和平煤十矿煤样在子弹冲击下表现出不同的破坏特征,因此,其动态应力-应变曲线也存在较显著的差异。二者相同点在于,由于试验冲击速度较快,煤样内部孔裂隙迅速闭合,动态应力-应变曲线快速进入线弹性阶段,且线弹性阶段较短。二者不同点主要存在于弹塑性阶段和塑性阶段,神木柠条塔煤样弹塑性阶段较短而塑性阶段较长,平煤十矿煤样则与之相反,且在塑性阶段出现了应变回弹。

对于神木柠条塔煤样,随着应力的增加,煤样快速达到峰值应力,孔裂隙的失稳扩展产生局部应变和损伤,煤样应力开始下降,且在残余应力下变形加剧,应变迅速增大,随后煤样产生二次承压,但难以形成



(a) 神木柠条塔煤样



(b) 平煤十矿煤样

图 8 煤样动态应力-应变曲线

Fig.8 Dynamic stress-strain curves of coal sample

有效支撑,应力急剧下降,最终造成煤样粉碎。另外,当冲击速度较大时,残余应力也较大,应力-应变曲线不具有二次承压阶段,煤样直接粉碎。应力超过屈服强度后,需要施加更大的载荷以产生更大的应力,使材料出现更多的塑性变形,随着塑性应变的增加,材料的强度也变的更大,该现象称为应变硬化,因此屈服点之后、峰值强度之前也被称作应变硬化阶段。相比于神木柠条塔煤样,平煤十矿煤样由于自身较为致密,孔裂隙、节理等天然缺陷较少,冲击作用下产生的裂隙及损伤无法充分扩展,表现出明显的应变硬化现象,因此平煤十矿煤样的弹塑性阶段(应变硬化阶段)较长。另外,由于平煤十矿煤样自身强度较大,冲击过程中的弹性应变能只使其产生少量裂隙或局部龟裂,而未发生整体破坏,煤样仍具有一定的承载能力,达到峰值强度后,应力开始下降,煤样中积聚的弹性能快速释放,使煤样形变得以恢复,应变达到峰值后开始减小,在应力-应变曲线中呈现出应变回弹现象。

## 2.2 静态扩展阶段煤体裂隙起裂及形态演化特征

### 2.2.1 致裂过程压力-时间曲线分析

高压 CO<sub>2</sub> 致裂过程中压力-时间变化曲线如图 9 所示。整体而言,不同应力加载条件下压力-时间曲

线的变化特征较为一致, 液态 CO<sub>2</sub> 相变后气体压力迅速升高, 钻孔周围煤体在冲击作用下起裂, 但此时内部裂隙尚未与表面贯通, 因此压力下降相对较缓, 随

着时间的增加, 致裂形成的新裂隙及煤体内部的原生裂隙在气体压力作用下持续扩展, 直至裂隙与试样表面贯通后, 气体开始泄放, 压力迅速降低。

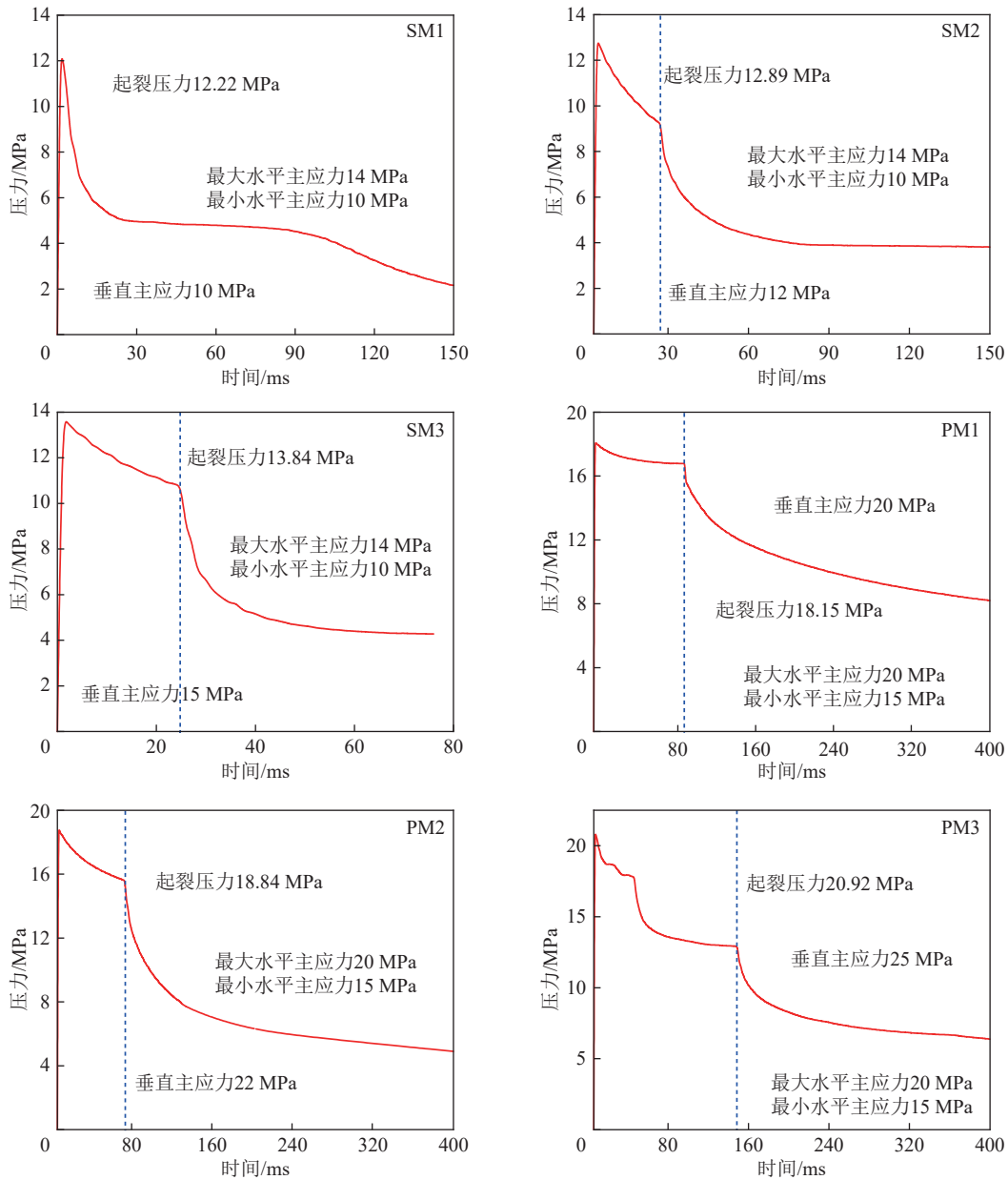


图 9 致裂过程压力-时间曲线

Fig.9 Pressure-time curves of fracturing process

图 9 中 SM 组试件为神木柠条塔煤, 煤层埋藏浅, 裂隙、层理发育程度高, 因此起裂压力相对较低, SM1、SM2、SM3 起裂压力分别为 12.22、12.89 和 13.84 MPa, 而 PM 组试件为平煤十矿煤样, 煤体致密且埋藏深度大, 因此起裂压力较大, PM1、PM2、PM3 起裂压力分别为 18.15、18.84 和 20.92 MPa。通过对垂直主应力和煤体起裂压力进行拟合发现, 二者之间存在显著的线性关系, 垂直主应力每升高 1 MPa 起裂压力约增大 0.6 MPa, 如图 10 所示。另外, 由于试样

SM1 表面裂隙较多且加载应力较低, 致使部分裂隙在冲击作用下迅速与表面贯通, 压力骤然下降, 因此压力-时间曲线在致裂初期未出现明显的裂隙平稳扩展阶段。试件 SM2 和 SM3 的压力-时间曲线在致裂初期均表现出明显的平缓降低现象, 该阶段裂隙在气楔作用下扩展、贯通, 气体压力小幅降低, 直至试样表面形成可见裂隙, 气体开始大量泄放, 气体压力迅速降低。PM 组试样致裂初期同样呈现出明显的缓慢降低阶段, 由于 PM 组试样极为致密, 几乎不含原生裂隙,

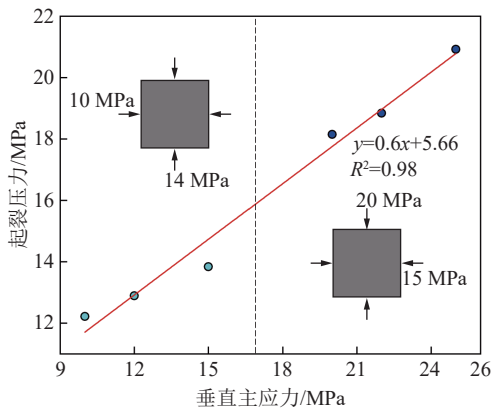


图 10 垂直主应力与起裂压力关系拟合

Fig.10 Fitting of vertical principal stress to fracture initiation pressure

且试验加载应力较高,因此裂隙扩展难度较 SM 组更

大,扩展所需时间更长。与常规水力压裂相比,CO<sub>2</sub>致裂具有降低起裂难度的优势。梁卫国等<sup>[20]</sup>研究发现轴压为 10 MPa 条件下,煤体水压致裂的起裂压力为 17.88 MPa,液态 CO<sub>2</sub> 致裂、超临界 CO<sub>2</sub> 致裂过程起裂压力分别为 14.54 和 12.35 MPa,笔者得出垂直应力为 10 MPa 时起裂压力为 12.22 MPa,显著低于水压致裂,王磊等<sup>[34]</sup>、李畅等<sup>[35]</sup>均得出了类似结论。

### 2.2.2 致裂煤体形态演化分析

为获得致裂煤体的裂隙扩展情况,使用数码相机记录煤样试件表面的裂隙形貌,并从中选取部分相邻表面进行展开,得到致裂后 SM、PM 组煤样裂隙形貌如图 11 所示。此处主要分析浅部煤体及深部煤体致裂后的裂隙形貌的异同点,以获得致裂作用下不同埋深煤层的裂隙起裂特征。

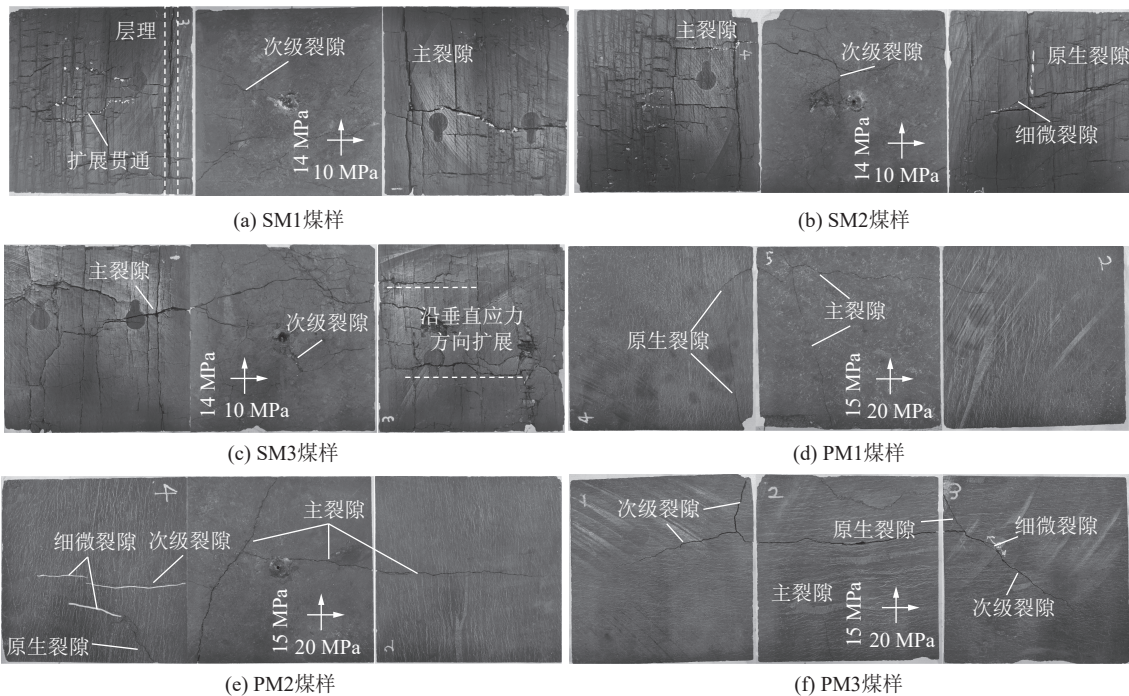


图 11 致裂后煤样的裂隙形态

Fig.11 Surface morphology of coal samples after fracturing

从 SM 组煤样的展开图可以看出,钻孔周围煤体在冲击作用下形成了一些次级裂隙,且裂隙端部在气体作用下扩展衍生出细微裂隙。从侧面图可以发现,煤样层理结构较为发育,含有较多的原生裂隙,致裂后原生裂隙沿最大水平主应力方向扩展形成长度、开度均较大的主裂隙。煤样 SM1 受冲击后沿主裂隙分成上下 2 部分,导致大部分 CO<sub>2</sub> 气体从裂隙面泄放,因此,其压力时间曲线没有出现平缓降低阶段。煤样 SM2 与 SM3 虽未沿主裂隙完全破裂,但也极大地增加了裂隙开度。另外,由于煤样 SM3 加载的垂直应力大于最大水平主应力,因此裂隙呈现了垂直方

向上的扩展。主裂隙扩展方向整体上与最大水平主应力方向一致,致裂后与原生裂隙组合成十字形态的裂隙网络。冲击作用形成的次级裂隙及其扩展衍生出的细微裂隙多与主应力方向呈一定角度,裂隙形态通常为 X 形或 Y 形。总体而言,SM 组煤样致裂后原生裂隙、主裂隙、次级裂隙以及细微裂隙组成了极其复杂的裂隙网络结构,但并没有形成新的大裂隙,因此对于神木柠条塔煤样,液态 CO<sub>2</sub> 致裂的作用主要体现在裂隙的贯通与扩展。

与 SM 组煤样不同,PM 组煤样极为致密,表面原生裂隙较少,致裂后仅形成 1 条或 2 条贯穿试件的主

裂隙以及少量的次级裂隙、细微裂隙。从图 11 中可以发现, 煤样 PM1、PM2、PM3 致裂后同样形成了沿最大水平主应力方向扩展的主裂隙, 但与 SM 组不同, PM 组垂直应力均大于最大水平主应力, 因此主裂隙为与垂直主应力方向大致相同、但具有一定夹角的倾斜裂隙。另外, PM2 中主裂隙在气楔作用下静态扩展形成了开度较小、方向与垂直主应力一致的细微裂隙, PM3 中主裂隙延伸扩展的同时出现了转向, 在试件边缘处形成了 1 条水平裂隙。由于煤体本身的致密性以及试验加载的应力较大, PM 组煤样的致裂难度也随之增大, 因此致裂后的试件中几乎不含相互交叉的裂隙, 裂隙形态多以 T 形或 Y 形为主。综上, 相比于神木柠条塔煤样, 平煤十矿煤样 CO<sub>2</sub> 致裂的作用主要体现在形成新的裂隙。

**2.3 地应力挤压阶段煤体力学损伤及渗透率演化分析**

现有针对不同煤的力学特征及渗透性的研究已开展了大量三轴压缩及渗流试验, 但研究对象多为原煤, 对于致裂后含裂隙煤体的研究相对较少。此处以平煤十矿煤样为研究对象, 从峰值应力、破坏形态、渗透率变化 3 个方面分析应力加载下含裂隙煤体的力学损伤特征和渗透率演化特征。试验得到不含预制裂隙煤样、含倾斜裂隙煤样以及含水平垂直裂隙煤样在不同围压下的全应力-应变及渗透率变化曲线如图 12—图 14 所示, 其中, 图 12—图 14 中  $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  分别为轴向应力、径向应力,  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_3$ 、 $\varepsilon_v$  分别为轴向应变、径

向应变和体积应变。

从图 12—图 14 可以发现, 围压为 10 MPa 时煤样 A1、B1、C1 的峰值应力分别为 126.69、57.66 和 96.77 MPa, 结合围压为 15 和 20 MPa 时的应力应变曲线可知原煤煤样的峰值应力最大, 含水平垂直裂隙煤样次之, 含倾斜裂隙煤样最小。现有关于浅部煤体的研究显示<sup>[36-37]</sup>, 围压为 10 MPa 时, 煤体的峰值应力为 30~70 MPa, 由于文中选用埋藏较深、硬度较大的深部煤体开展试验, 因此煤体的峰值应力较大。围压由 10 MPa 增加至 20 MPa 的过程中 3 组煤样的峰值应力分别增大 26.9%、44.7% 和 55.7%, 表明煤体发生破坏的难度随围压的增加而增大。相比于不含预制裂隙的原煤煤样, 不同围压条件下, 含有倾斜裂隙及水平垂直裂隙的煤样峰值应力明显较低, 表明裂隙对于煤体力学强度具有劣化作用。由于 B 组煤样为含倾斜裂隙煤样, 裂隙周围煤体较易于在围压作用下破坏, 从而使峰值应力降低。相比于同等围压下的原煤, B 组煤样的峰值应力分别降低 54.5%、47.6% 和 48.1%。C 组煤样为含水平垂直裂隙煤样, 裂隙在围压作用下更易于闭合, 且围压越大闭合程度越高, 从煤样 C3 的峰值应力与 A3 较为接近可知, 当围压足够大时, C 组煤样中的裂隙可视作完全闭合, 即裂隙失去了对煤体的劣化作用。

根据现有研究, 结合应力-应变曲线和渗透率曲线可将煤的压缩破坏及渗透率演化过程划分为孔隙

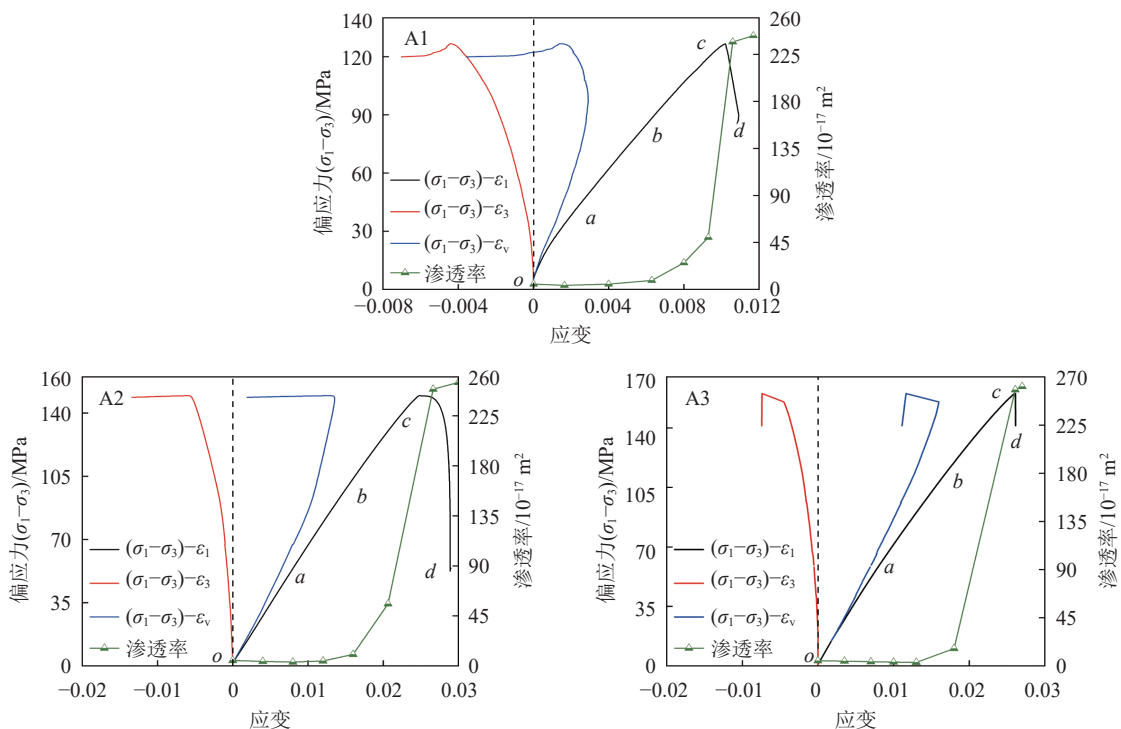


图 12 不含预制裂隙煤样的全应力-应变及渗透率变化曲线

Fig.12 Full stress-strain and permeability curves of coal samples without prefabricated fractures

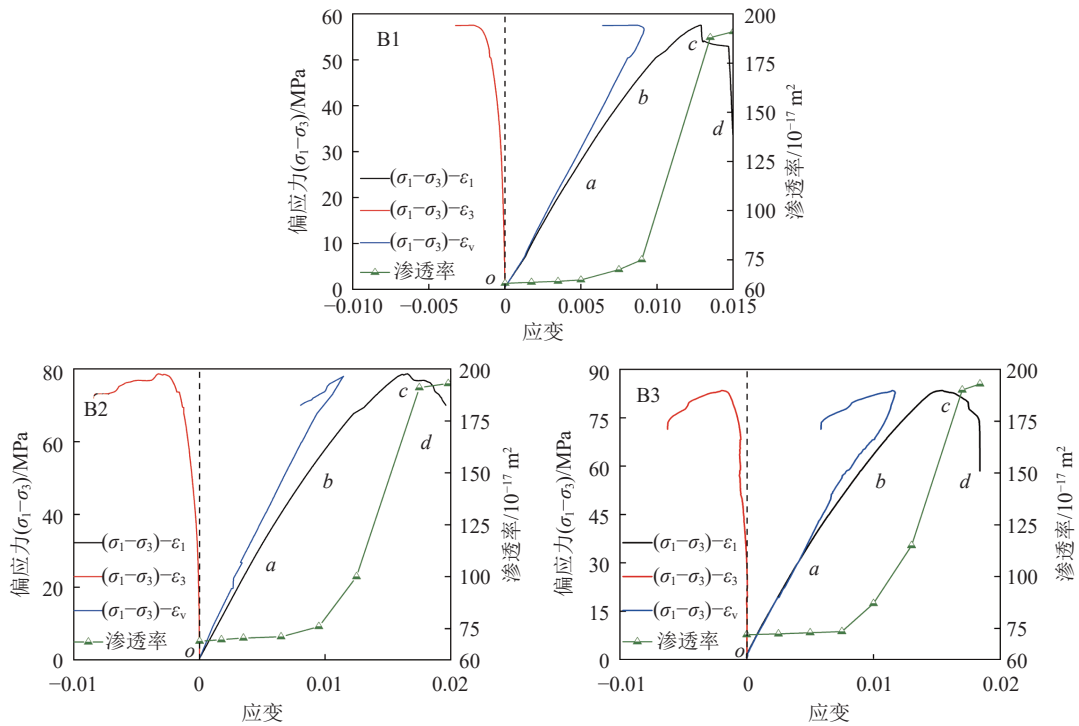


图 13 含倾斜裂隙煤样的全应力-应变及渗透率变化曲线

Fig.13 Full stress-strain and permeability curves of coal samples containing inclined fractures

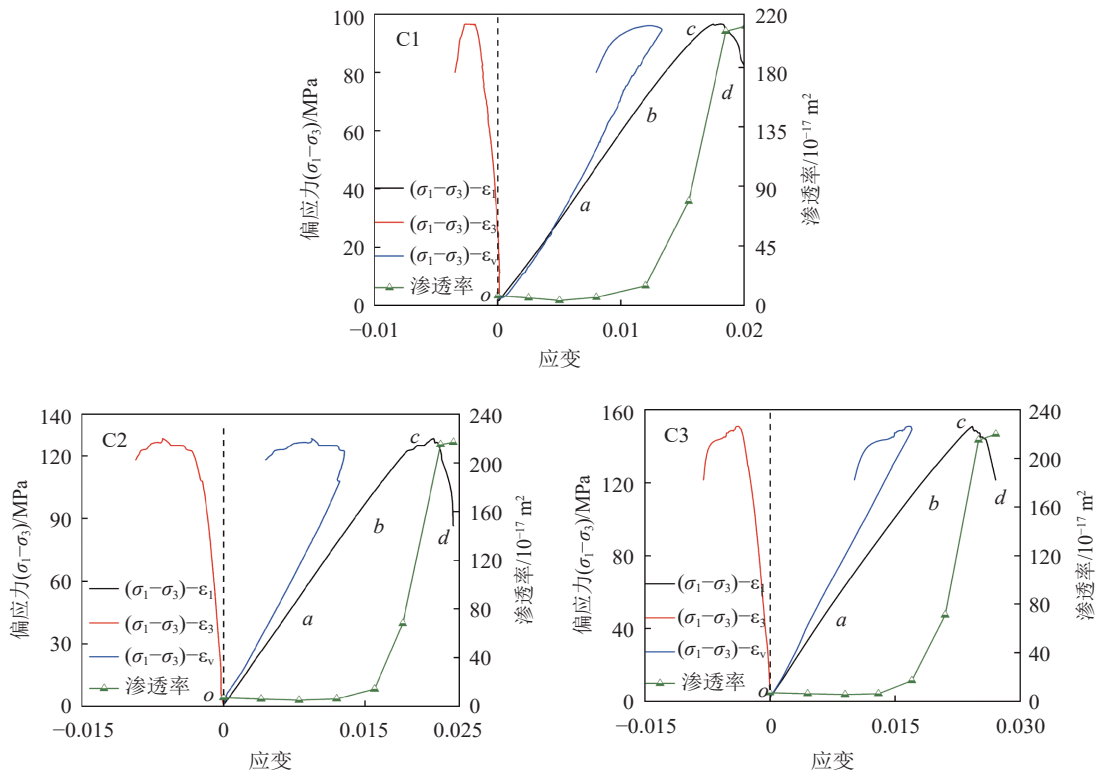


图 14 含水平垂直裂隙煤样的全应力-应变及渗透率变化曲线

Fig.14 Full stress-strain and permeability curves of samples containing horizontal vertical fractures

闭合的弹性阶段 ( $o-a$  段)、裂隙初步扩展的塑性阶段 ( $a-b$  段)、裂隙加速扩展的破坏阶段 ( $b-c$  段)、以及峰后失稳阶段 ( $c-d$  段)。 $o-a$  段, 孔裂隙结构在应力加载作用下被压缩闭合, 煤体被压实, 轴向应变随

应力的增大而增加, 渗流通道减少, 渗透率降低。随着轴向应力的升高, 应力-应变曲线进入  $a-b$  段, 该阶段煤体由弹性变形变为塑性变形, 内部开始有微裂隙产生, 渗透率缓慢上升, 但由于内部裂隙不足以形

成稳定的渗流通道,因此渗透率上升较小。*b—c*段,应力已达到煤体屈服强度,内部微裂隙以及原生裂隙迅速扩展贯通,形成稳定的渗流通道,因此该阶段渗透率呈迅速升高趋势。当应力达到峰值应力时,煤样失稳破坏而丧失承压能力,随着应变的增加,应力急剧下降,宏观裂隙形成,渗透率进一步增大。结合图 12—图 14 可知:含裂隙深部煤体的力学损伤特征及渗透率变化整体上仍符合这一特征。但含倾斜裂隙的 B 组煤样在渗透率变化方面表现出了一定的差异性,其渗透率在孔隙闭合的弹性阶段(*o— a*段)并没有随着应力的升高而降低,这一现象的原因将在下文进行分析。各阶段分界点处的偏应力见表 4,相比于 A 组煤样, B 组和 C 组煤样阶段分界点处的应力明显降低,且 B 组尤为明显,不同围压作用下进入裂隙初步扩展阶段的应力分别为 26.21、30.64、32.44 MPa,降低了 40% 左右,裂隙加速扩展和发生失稳破坏时的应力也表现出一致的变化特征,说明倾斜裂隙的劣化作用显著减弱了煤体的承压性能,降低了煤体破坏所需的应力。

根据试验结果可知, A 组煤样在 10、15、20 MPa 围压下的初始渗透率分别为  $4.98 \times 10^{-17}$ 、 $4.91 \times 10^{-17}$ 、 $4.85 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ,渗透率随围压的增大呈下降趋势,且低于  $9.9 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ (0.1 mD),说明煤层属于典型的低渗煤层。弹性阶段由于孔隙被压缩闭合,渗透率出现小幅度降低,随着微裂隙的扩展、贯通开始回升,完全破坏

后煤样的渗透率分别增大至  $2.43 \times 10^{-15}$ 、 $2.55 \times 10^{-15}$ 、 $2.60 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ 。B 组煤样在 10、15、20 MPa 围压下的初始渗透率分别为  $6.37 \times 10^{-16}$ 、 $6.94 \times 10^{-16}$ 、 $7.22 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ ,约为 A 组煤样的 14 倍,失稳破坏后分别增大至  $1.91 \times 10^{-15}$ 、 $1.94 \times 10^{-15}$ 、 $1.93 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ,渗透率增加幅度低于 A 组。另外,由于倾斜裂隙的存在使裂隙之间的煤体不再具有承压能力,承压面积减小,煤样中部产生应力集中,轴压作用下 *o— a* 阶段已经有少量细微裂隙产生,因此 B 组煤样的渗透率在弹性阶段出现了小幅度的增大。C 组煤样的初始渗透率分别为  $7.4 \times 10^{-17}$ 、 $7.1 \times 10^{-17}$ 、 $6.9 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ,略高于 A 组煤样,失稳破坏后分别增大至  $2.11 \times 10^{-15}$ 、 $2.17 \times 10^{-15}$ 、 $2.19 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ,介于 A 组与 B 组之间。

上述渗透率变化与煤样破坏程度以及裂隙形态相关,失稳破坏后的部分煤样如图 15 所示,从图 15 中可以发现, A 组煤样破坏较为彻底,形成的裂隙为上下贯穿的大裂隙。B 组煤样由于含有倾斜裂隙,施加围压预制裂隙周围煤体产生了细小裂隙,且围压越高裂隙越明显,因此 B 组煤样的初始渗透率高于 A 组。细小裂隙产生的同时也削弱了煤体的承压能力,当轴压加载时,煤样中部由于存在裂隙而产生应力集中,进而使煤体破坏,但 B 组煤样的破坏沿预制裂隙扩展,没有形成上下贯通的长裂隙,且破坏程度较 A 组低,因此其破坏后的渗透率低于 A 组煤样。C 组同为含有预制裂隙煤样,但其裂隙方向与应力方向一致,围

表 4 煤样各阶段分界点处的偏应力

Table 4 Deflective stresses at cut-off point of each phase of coal samples

编号	偏应力/MPa								
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
<i>o— a</i> 段	43.18	49.17	64.36	26.21	30.64	32.44	40.82	47.29	52.07
<i>a— b</i> 段	88.34	104.49	119.59	45.02	54.00	61.15	76.15	95.12	118.26
<i>b— c</i> 段	126.69	150.13	160.72	57.66	78.67	83.43	96.77	128.58	150.63

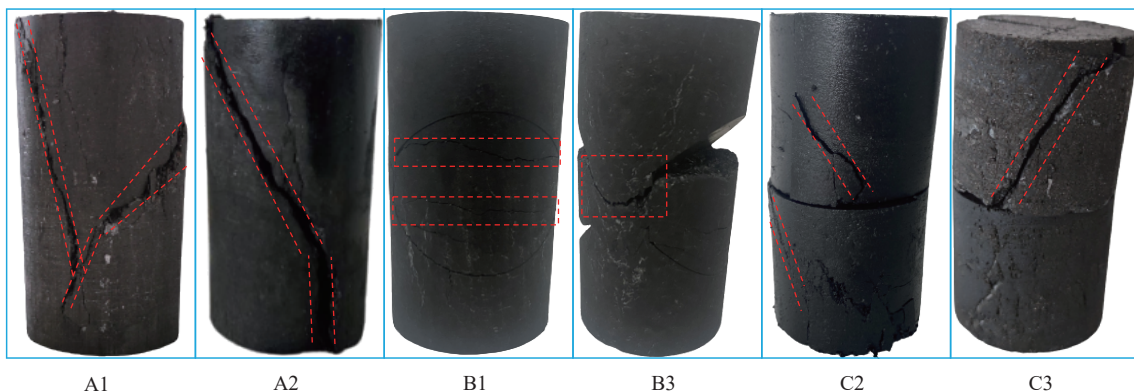


图 15 破坏后煤样的裂隙形态

Fig.15 Fracture pattern of coal samples after destruction

压加载后垂直裂隙闭合。但由于煤样切面较为粗糙,不能完全贴合,内部仍存在少量渗流通道,因此 C 组初始渗透率高于 A 组。随着轴向应力的增加,煤样逐渐破坏, C 组破坏后的裂隙形态与 A 组类似,但其裂隙仅贯穿上半煤样或下半煤样,未见整体贯穿裂隙,因此其破坏后的渗透率也低于 A 组。根据上述分析可知,煤体所处的地应力虽不能使致裂后煤体产生塑性破坏,但对致裂产生的裂隙具有一定的影响,与主应力方向一致的裂隙在地应力作用下容易被压缩闭合,致使增透效果减弱,与主应力方向具有一定夹角的裂隙在地应力条件下则易于扩展、贯通,从而进一步提升煤体渗透率。

#### 2.4 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透实质

液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透的动态破碎、静态扩展、地应力挤压 3 个阶段中,前 2 个阶段属于致裂过程,第 3 阶段属于致裂后的地应力重新分布过程。液态 CO<sub>2</sub> 相变为高压气体冲击钻孔壁,钻孔周围煤体所受的压应力远高于其抗压强度,产生动态冲击试验结果中所述的劈裂或压碎破坏,形成破碎区。破碎区外的煤体受到的压应力低于抗压强度,但其拉应力高于煤体极限抗拉强度,煤体受拉破坏产生裂隙<sup>[7]</sup>,高压气体作用下裂隙沿最大水平主应力方向扩展<sup>[34]</sup>,形成与最大主应力方向一致的主裂隙。静态扩展阶段,裂隙扩展至结构缺陷时会优先导通扩展阻力较小的方向,从而致使裂隙延伸或转向形成次级裂隙,以及部分细微裂隙,该区域即为裂隙区。致裂结束后,煤体应力场重新分布,致裂产生的裂隙劣化了煤体力学强度,由压缩渗流试验结果可知,含倾斜裂隙煤样抗压强度降低最为显著,约 50% 左右。裂隙周围煤体在应力挤压作用下剪切起裂,再次形成细微裂隙。最后,原生裂隙、主裂隙、主裂隙转向扩展形成的次级裂隙以及细微裂隙之间相互连接、贯通,形成十字形、T 形、X 形、Y 形等复杂裂隙网络,从而增加流体的运移通道并减小运移阻力,具体表现为渗透率增大 12.7~14.9 倍。综上,液态 CO<sub>2</sub> 致裂增透实质上为动态破碎、静态扩展、应力挤压的综合结果。

#### 2.5 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂待解决的问题

液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透以提高深部低渗煤层瓦斯抽采效果是涉及岩石力学、流体力学、吸附动力学、地球化学等多学科交叉的耦合问题,其理论及技术体系尚不成熟,笔者认为包括但不限于以下几点:① 地应力作用下,部分裂隙易闭合,导致透气性损失,研究与液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂技术相匹配的支撑剂材料及裂隙长效支撑技术,降低裂隙闭合,将进一步提升技术应用效果。② 当温度超过 31.1 °C、压力超过 7.39 MPa

时,CO<sub>2</sub> 相变为超临界态,该状态下 CO<sub>2</sub> 可与煤中部分有机质及无机矿物发生反应进而改变煤体孔隙结构及力学性能,反应的特征、时间效应及其对渗透率的影响尚需深入研究;③ 矿井 CO<sub>2</sub> 突出事故偶有发生,如何加强 CO<sub>2</sub> 气体监测预警及优化封孔工艺、减少 CO<sub>2</sub> 气体泄露是制约技术大范围推广应用的重要因素。

### 3 结 论

1) 动态冲击作用下煤样的峰值强度随冲击速度的增大而升高,神木柠条塔煤样和平煤十矿煤样的峰值强度分别介于 6.657~14.236 和 22.10~42.872 MPa,且平煤十矿煤样出现明显的应变硬化,使其峰值强度显著高于神木柠条塔煤样。随应变率的增大,神木柠条塔煤样的破坏模式由劈裂破坏逐渐向压碎破坏过渡,而平煤十矿煤样则主要为劈裂破坏,且破坏程度较低,动态应力-应变曲线呈现出应变回弹现象。

2) 静态扩展阶段煤体的起裂压力与垂直主应力呈线性关系,垂直主应力每升高 1 MPa,起裂压力需增大 0.6 MPa 左右。对于浅部煤体,液态 CO<sub>2</sub> 致裂的作用主要体现在原生裂隙的贯通与扩展,而对于深部煤体则体现在新裂隙的产生。裂隙的形成对煤体的力学强度具有劣化作用,含倾斜裂隙煤样其峰值应力较原煤降低 50% 左右,其渗透率为原煤的 12.7~14.9 倍,起到了显著的增透效果。

3) 动态破碎阶段煤体沿内部天然结构缺陷形成主裂隙,随后进入静态扩展阶段,流体沿裂隙流动并扩宽裂隙,形成次级裂隙及细微裂隙,致裂结束后,应力场重新分布,但由于致裂产生的裂隙劣化了煤体力学强度,裂隙周围煤体在应力挤压作用下剪切起裂,再次形成细微裂隙,最后,各类裂隙相互连接、贯通。因此,液态 CO<sub>2</sub> 致裂增透实质上为动态破碎、静态扩展、应力挤压的综合结果。

#### 参考文献(References):

- [1] WANG H, WANG H T, TAN J L, et al. Recent progress of coal seam water injection technology for dust prevention: A comprehensive review[J]. *Advances in Geo-Energy Research*, 2025, 16(3): 181-198.
- [2] 齐庆新,潘一山,李海涛,等. 煤矿深部开采煤岩动力灾害防控理论基础与关键技术[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(5): 1567-1584.  
QI Qingxin, PAN Yishan, LI Haitao, et al. Theoretical basis and key technology of prevention and control of coal-rock dynamic disasters in deep coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(5): 1567-1584.
- [3] 夏同强,王有湃,周福宝,等. 煤岩体应力-渗流-温度多过程耦合试验系统[J]. *中国矿业大学学报*, 2021, 50(2): 205-213.

- XIA Tongqiang, WANG Youpai, ZHOU Fubao, et al. The stress-seepage-temperature multi-process coupling test system for coal and rock mass[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2021, 50(2): 205–213.
- [4] 钮月, 王恩元, 高峰, 等. 深部矿井掘进工作面煤体突出危险电位反演精细判识[J]. *采矿与安全工程学报*, 2021, 38(5): 988–996.
- NIU Yue, WANG Enyuan, GAO Feng, et al. Fine identification of coal and gas outbursts based on electric potential inversion method ahead of driving face of deep mine[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2021, 38(5): 988–996.
- [5] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(1): 1–6.
- YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(1): 1–6.
- [6] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 716–725.
- YUAN Liang. Research progress of mining response and disaster prevention and control in deep coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 716–725.
- [7] 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.
- [8] 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[J]. *Fuel*, 2017, 203: 197–207.
- [9] ER V, BABADAGLI T, XU Z H. Pore-scale investigation of the matrix-fracture interaction during CO<sub>2</sub> injection in naturally fractured oil reservoirs[J]. *Energy & Fuels*, 2010, 24(2): 1421–1430.
- [10] 王海柱, 李根生, 郑永, 等. 超临界 CO<sub>2</sub> 压裂技术现状与展望[J]. *石油学报*, 2020, 41(1): 116–126.
- WANG Haizhu, LI Gensheng, ZHENG Yong, et al. Research status and prospects of supercritical CO<sub>2</sub> fracturing technology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(1): 116–126.
- [11] LI X J, LI G S, WANG H Z, et al. A unified model for wellbore flow and heat transfer in pure CO<sub>2</sub> injection for geological sequestration, EOR and fracturing operations[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2017, 57: 102–115.
- [12] 孙宝江, 王金堂, 孙文超, 等. 非常规天然气储层超临界 CO<sub>2</sub> 压裂技术基础研究进展[J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2019, 43(5): 82–91.
- SUN Baojiang, WANG Jintang, SUN Wenchao, et al. Advances in fundamental research of supercritical CO<sub>2</sub> fracturing technology for unconventional natural gas reservoirs[J]. *Journal of China University of Petroleum : Edition of Natural Science*, 2019, 43(5): 82–91.
- [13] 毛金成, 张照阳, 赵家辉, 等. 无水压裂液技术研究进展及前景展望[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47(11): 52–58.
- MAO Jincheng, ZHANG Zhaoyang, ZHAO Jiahui, et al. Research progress and prospect of the waterless hydraulic fracturing technology[J]. *Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica)*, 2017, 47(11): 52–58.
- [14] 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[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 CO<sub>2</sub> phase-transition fracturing[J]. *China Safety Science Journal*, 2014, 24(11): 84–88.
- [15] 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]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019, 61: 71–82.
- [16] YANG Z B, ZHOU Y J, XU X D, et al. Numerical modeling of liquid CO<sub>2</sub> phase transition blasting based on smoothed particle hydrodynamics algorithm[J]. *Thermal Science*, 2019, 23(Suppl.3): 693–702.
- [17] 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[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(2): 60–65.
- ZHOU Xihua, MEN Jinlong, SONG Dongping, et al. Research on increasing coal seam permeability and promoting gas drainage with liquid CO<sub>2</sub> blasting[J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(2): 60–65.
- [18] 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[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(4): 1687814018768578.
- [19] 樊世星. 液态 CO<sub>2</sub> 压裂煤岩增透及裂缝形成机制研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40(8): 1728.
- FAN Shixing. Study on the mechanism of fractures propagation and permeability enhancements induced by liquid CO<sub>2</sub> fracturing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(8): 1728.
- [20] 梁卫国, 贺伟, 阎纪伟. 超临界 CO<sub>2</sub> 致煤岩力学特性弱化与破裂机理[J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2557–2568.
- LIANG Weigu, HE Wei, YAN Jiwei. Weakening and fracturing mechanism of mechanical properties of coal and rock caused by supercritical CO<sub>2</sub>[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2557–2568.
- [21] 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[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 CO<sub>2</sub> phase-transforming fracture technology for permeability improvement of coal seam[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2015, 11(9): 11–16.
- [22] 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[J]. *河南理工大学学报: 自然科学版*, 2015, 34(1): 1–5.
- WANG Zhaofeng, SUN Xiaoming, LU Tingkan, et al. Experiment research on strengthening gas drainage effect with fracturing technique by liquid CO<sub>2</sub> phase transition[J]. *Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science*, 2015, 34(1): 1–5.
- [23] 王兆丰, 周大超, 李豪君, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂二次增透技术[J]. *河南理工大学学报: 自然科学版*, 2016, 35(5): 597–600.
- WANG Zhaofeng, ZHOU Dachao, LI Haojun, et al. Research on secondary fracturing technology by phase transformation of liquid CO<sub>2</sub>[J]. *Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science*,

- 2016, 35(5): 597-600.
- [24] 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[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(4): 31-37, 43.  
LI Haojun, WANG Zhaofeng, CHEN Xien, et al. Optimization of borehole layout parameters based on fracturing technology of liquid CO<sub>2</sub> phase[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(4): 31-37, 43.
- [25] 赵龙, 王兆丰, 孙矩正, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 相变致裂增透技术在高瓦斯低透煤层的应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 75-79.  
ZHAO Long, WANG Zhaofeng, SUN Juzheng, et al. Application of permeability improvement technology with liquid CO<sub>2</sub> phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 75-79.
- [26] 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[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(3): 524-529.  
ZHOU Xihua, MEN Jinlong, SONG Dongping, et al. Research on optimal borehole parameters of antireflection in coal seam by liquid CO<sub>2</sub> blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(3): 524-529.
- [27] 白鑫, 张东明, 王艳, 等. 液态 CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> phase transition jet[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(4): 661-670.
- [28] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 低渗煤层液态 CO<sub>2</sub> 相变定向射孔致裂增透技术及应用[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1938-1950.  
ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Research and application on technology of increased permeability by liquid CO<sub>2</sub> phase change directional jet fracturing in low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1938-1950.
- [29] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 低渗煤层液态 CO<sub>2</sub> 相变射孔破岩及裂隙扩展力学机理[J]. 煤炭学报, 2018, 43(11): 3154-3168.  
ZHANG Dongming, BAI Xin, YIN Guangzhi, et al. Mechanism of breaking and fracture expansion of liquid CO<sub>2</sub> phase change jet fracturing in low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3154-3168.
- [30] 文虎, 李珍宝, 王振平, 等. 煤层注液态 CO<sub>2</sub> 压裂增透过程及裂隙扩展特征试验[J]. 煤炭学报, 2016, 41(11): 2793-2799.  
WEN Hu, LI Zhenbao, WANG Zhenping, et al. Experiment on the liquid CO<sub>2</sub> fracturing process for increasing permeability and the characteristics of crack propagation in coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2793-2799.
- [31] 张权. 瞬时膨胀定向破岩原理及应用研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.  
ZHANG Quan. Investigation on principle and application of directional rock breaking by instantaneous expansion[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [32] 康红普, 伊丙鼎, 高富强, 等. 中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 23-33.  
KANG Hongpu, YI Bingding, GAO Fuqiang, et al. Database and characteristics of underground in situ stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 23-33.
- [33] 苗磊刚. 动载作用下煤岩组合体力学及损伤特性试验研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2018.  
MIAO Leigang. Study on mechanics and damage characteristics of coal-rock combination under dynamic loading[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2018.
- [34] 王磊, 梁卫国. 超临界 CO<sub>2</sub>/清水压裂煤体起裂和裂缝扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 2680-2689.  
WANG Lei, LIANG Weiguo. Experimental study on crack initiation and crack propagation of coal by supercritical CO<sub>2</sub>/clean water fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 2680-2689.
- [35] 李畅, 梁卫国, 侯东升, 等. 水、ScCO<sub>2</sub> 致裂煤体裂纹形态与形成机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 761-772.  
LI Chang, LIANG Weiguo, HOU Dongsheng, et al. Morphology and formation mechanism of fractures in coal using hydraulic/ScCO<sub>2</sub> fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 761-772.
- [36] 孟召平, 章朋, 田永东, 等. 围压下煤储层应力-应变、渗透性与声发射试验分析[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7): 2544-2551.  
MENG Zhaoping, ZHANG Peng, TIAN Yongdong, et al. Experimental analysis of stress-strain, permeability and acoustic emission of coal reservoir under different confining pressures[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2544-2551.
- [37] 荣腾龙, 刘克柳, 周宏伟, 等. 采动应力下深部煤体渗透率演化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1106-1114.  
RONG Tenglong, LIU Kelu, ZHOU Hongwei, et al. Permeability evolution of deep coal under mining stress[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1106-1114.