



移动阅读

曹运兴, 张新生, 张军胜, 等. CO₂ 相变致裂煤的显微构造特征与成因机制[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(2): 137–145. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.07.0570

CAO Yunxing, ZHANG Xinsheng, ZHANG Junsheng, et al. Characteristics and formation mechanisms of microstructures in coal treated with CO₂ phase transition fracturing[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(2): 137–145. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.07.0570

CO₂ 相变致裂煤的显微构造特征与成因机制

曹运兴^{1,2,3,4}, 张新生¹, 张军胜^{1,2,3,4}, 郭帅房¹, 孟兵兵¹

- (1. 河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454003; 2. 中原经济区煤层气(页岩)气河南省协同创新中心, 河南 焦作 454003; 3. 河南省非常规能源与开发国际联合实验室, 河南 焦作 454003; 4. 河南理工大学 煤层气/瓦斯地质工程研究中心, 河南 焦作 454003)

摘要: CO₂ 相变致裂是一种高效增渗、增抽和消突的新型煤矿瓦斯治理技术, 应用效果显著。该技术的核心是高压动力载荷作用于煤层的强化造缝及其卸压增渗效应。然而, 新生裂缝的形貌特征以及破坏成因机制研究薄弱。目前井下厘米—米级尺度裂缝的观察和描述, 主要用于揭示煤层的造缝增透机理。更小尺度的微米级显微裂隙研究, 可更系统和全面描述裂缝的形貌和发育规律, 揭示 CO₂ 相变致裂作用下煤的破坏机理。应用自行研制的高压 CO₂ 冲击大型物模试验装置系统, 对无烟煤试件进行了 120 MPa 高压 CO₂ 冲击, 基于场发射扫描电镜(FESEM)的观察, 研究了微米级裂隙特征、发育规律及其形成机理。结果表明: (1) 致裂后煤样的割理系统充分沟通, 形成多尺度的复杂微裂隙网络。(2) 煤基质破碎并发育大量微米尺度的新生显微构造, 发现了 3 种典型显微构造是“损伤坑”“三翼型”裂隙和“页理状构造”。(3) CO₂ 的超临界相、气相、或者二者的混合相态冲击破碎近喷孔端煤样, 冲击波可能是试件远端破坏造缝的主要力学机制。(4) 显微构造的形成和损伤演化机制为: 在煤基质表面形成损伤坑, 并以损伤坑为中心形成“三翼型”张性锯齿状分支裂隙, 多个“三翼型”裂隙组合形成复杂的微裂隙网络系统。强化造缝形成的复杂网状裂隙系统, 是煤层卸压、增渗、增抽和高效消突的内在原因。

关键词: 煤; CO₂ 相变致裂; 显微构造; 网状裂隙; 瓦斯治理; 消突机理

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 1001-1986(2023)02-0137-09

Characteristics and formation mechanisms of microstructures in coal treated with CO₂ phase transition fracturing

CAO Yunxing^{1,2,3,4}, ZHANG Xinsheng¹, ZHANG Junsheng^{1,2,3,4}, GUO Shuaifang¹, MENG Bingbing¹

- (1. School of Resources & Environment, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China; 2. Collaborative Innovation Center of Coalbed Methane and Shale Gas for Central Plains Economic Region, Jiaozuo 454003, China; 3. Henan International Joint Laboratory for Unconventional Energy Geology and Development, Jiaozuo 454003, China; 4. Gas Geology and Engineering Research Center, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: CO₂ phase transition fracturing (CPTF) is a newly developed technique for coal mine gas control and is characterized by high efficiency, high coal seam permeability, a high gas drainage rate, and outburst elimination. The core of CPTF is reinforced fracturing and the pressure-relief and permeability-enhancement effects of coal seams under high-pressure dynamic loading. Nevertheless, there is a lack of studies on the morphological characteristics and formation mechanisms of newly formed fractures. Current observation and description of the underground fractures on a centimeter-meter scale primarily aim to reveal the fracturing and permeability-enhancement mechanisms of low-permeability coal seams. However, the study of microfractures on a nanometer-micron scale formed by CO₂ fracturing can describe the morphology and occurrence patterns of fractures more systematically and comprehensively and reveal the failure mech-

收稿日期: 2022-07-19; 修回日期: 2022-12-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42230814); 国家科技重大专项任务(2016ZX05067-006-002)

第一作者: 曹运兴, 1955 年生, 男, 河南鲁山人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事煤层气开发和煤矿瓦斯治理研究. E-mail: yxcao17@126.com

anisms of coal seams under the action of CPTF. In this study, anthracite samples were subjected to high-pressure CO₂ impact (120 MPa) using an independently developed large-scale physical test facility. Based on the observations obtained using a field emission scanning electron microscope (FE-SEM), this study investigated the characteristics, occurrence patterns, and formation mechanisms of micron-scale fractures. The results are as follows: (1) The cleat systems in the fractured coal samples were fully interconnected and formed a multi-scale, complex microfracture network; (2) The coal matrix in the samples was fractured and developed numerous new nanometer-scale microstructures, of which three types of typical microstructures were discovered, namely damage marks, Y-shaped fractures, and foliation structures; (3) The CO₂ in the supercritical phase and in the gas phase or in the supercritical phase mixed with the gas phase impacted and fractured the coal samples near the nozzles, and the remote fracturing of the samples was supposed to be primarily induced by shock wave; (4) The microstructures formed and evolved in three steps. First, damage marks formed on the surface of the coal matrix. Then, Y-shaped tensile, dentate branch fractures formed centering around the damage marks. Finally, multiple Y-shaped fractures combined to form a complex microfracture network. The complex reticular fracture system formed by the enhanced fracturing is the underlying reason for the pressure relief, high permeability, high gas drainage rate, and outburst elimination of coal seams.

Keywords: coal; CO₂ phase transition fracturing; microstructure; fracture network; gas control; outburst elimination

我国煤矿瓦斯灾害严重, 瓦斯爆炸和突出是煤矿井下安全生产的最大挑战和技术难题。在我国, 95% 的煤矿属于地下开采, 40% 以上的矿井为高瓦斯矿井或煤与瓦斯突出矿井, 95% 以上的高瓦斯和突出矿井煤层属于低渗透煤层^[1-3]。随开采深度增加至 1 500 m, 瓦斯含气量、瓦斯压力和地应力增大, 瓦斯灾害趋势越发严重^[4-5]。抽采和卸压是防治瓦斯事故发生的根本性技术措施。

我国目前已经形成了多种井下强化增透、卸压和高效瓦斯抽采防治技术, 主要包括水力压裂^[6-7]、煤层水力冲孔^[8-12]、深孔爆破^[13-15]、煤层底板巷道预抽^[16]或上覆岩层抽采^[17]、煤层密集钻孔^[18-19]和 CO₂ 相变致裂煤层^[20-25]等。与上述技术相比, CO₂ 相变致裂增透技术的造缝、卸压、增渗效果显著, 瓦斯抽采和防突效果更好。自 2012 年以来, 在山西潞安和阳泉^[25-26]、河南平顶山^[27-28]、川煤^[29-30]等多个矿区的低渗透煤层进行了 CO₂ 相变致裂增透技术工业性试验, 结果表明, 该技术具有卸压充分、影响半径大、瓦斯抽采效率高等诸多优点, 是一项具有在全国高瓦斯煤矿推广应用价值的先进技术。鉴此, 研究该技术的基础理论, 即 CO₂ 相变致裂的破岩机理及其动力学特征, 十分重要和迫切的, 其成果将为深刻理解该技术的科学内核以及下一步技术创新提供理论依据。

CO₂ 相变致裂煤岩机理的核心内容之一, 是确定破岩的 CO₂ 相态和揭示岩石破坏的力学机制, 这是近期学术界一个研究热点。数值模拟和实际裂缝观测研究成为平行发展的 2 条研究路线。在数值模拟方面, 目前主要采用了基于成熟的传统炸药爆破理论的仿真软件, 模拟 CO₂ 致裂的动力冲击和准静态气楔作用过程, 揭示了裂缝多分支放射状发育特征, 以及受压缩冲击波、剪切波和拉伸波作用的损伤扩展机理^[31-33]。

在裂缝研究方面, 曹运兴等^[21]最早观察了煤矿井下 CO₂ 致裂煤层的宏观裂缝发育特征, 发现了环爆破钻孔的放射状裂隙发育规律, 提出了裂缝形成的时空与多尺度扩展模型。而目前主流研究已经转向实验室物理模拟试验: 采用阀门控制方法, 模拟超临界 CO₂ 对煤样的射流冲击破坏, 流体压力一般 ≤ 50 MPa, 然后观察煤样结构破坏特征。试验发现^[34-35], 超临界 CO₂ 射流冲击煤样的裂缝发育规律与高压气体和水射流冲击形成的宏观“冲蚀坑”及厘米级尺度裂缝形态相似, 均属于冲击载荷破碎和准静态载荷气楔扩展耦合破煤结果^[36-37]。但对比发现^[38], 不同于高压水射流冲击煤样后微米尺度上的光滑表面和阶梯状破坏形貌, 液态 CO₂ 射流冲击煤样形成了大量复杂的冲蚀或者溶蚀裂隙和孔洞, 且孔裂隙的复杂程度随着射流压力的增大而增加, 特别是在 37 MPa 条件下出现多条微裂隙相互贯通。造成微观构造差异的主要原因可能与 CO₂ 冲击煤体时的压力和相态有关^[39-41]。

综上所述, 现阶段关于 CO₂ 致裂煤岩机理研究仍处于探索讨论阶段, 如下三个问题亟待解决和进一步阐明: 第一, 构建大型 CO₂ 致裂试验装置, 进行实验室高压 CO₂ 破坏煤岩试验, 破解当前低压试验难以准确刻画真实致裂结果的困局; 第二, 精细观察和描述致裂煤岩微米尺度的典型显微构造特征, 这是理解煤岩破坏造缝和增渗机理的直接证据, 同时弥补当前的研究空白; 第三, 通过试验煤样观察, 探讨其破坏煤岩的 CO₂ 相态类型和动力学特征; 最后, 揭示高压 CO₂ 致裂煤岩的相态类型与动力学机制。

据此, 笔者采用自行研制的 CO₂ 相变致裂煤样试验装置, 对山西省玉溪矿煤样完成了 120 MPa 爆破压力的冲击试验, 对比分析致裂前后场发射电镜扫描 (Field Emission Scanning Electronic Microscope,

FESEM) 视域下煤的显微构造特征, 探索 CO₂ 冲击后煤中显微构造的形成机制和微裂隙演化规律, 并根据煤的微观破坏特征, 提出高压 CO₂ 相变致裂的多相态损伤动力学机制。

1 试样、试验装置和试验

1.1 试验煤样与试件制备

山西玉溪煤矿位于沁水煤田晋城矿区的沁水县, 含煤岩系是山西组和太原组, 山西组 3 号煤层为主采层, 煤厚为 5.12~7.20 m, 平均 5.85 m。试验煤样采集自 3 号煤层 1301 工作面回风 1 巷。煤体结构为原生结构煤, 煤样基础参数表 1。

表 1 沁水盆地玉溪煤矿 3 号煤层基础参数

Table 1 Basic parameters of coal seam No. 3 in the Yuxi coal mine, Qinshui Basin

镜质体最大 反射率 $R_{\max}/\%$	工业分析 $w/\%$		
	M_{ad}	A_{d}	V_{daf}
2.90~3.73/3.36	0.86~4.34/2.37	11.74~17.76/14.28	7.43~9.17/8.07

注: 2.90~3.73/3.36 表示最小~最大值/平均值, 其他数据同。

CO₂ 相变致裂试验用煤样为 $\phi 50 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 的圆柱(图 1), 使用线切割机制作而成。共计 4 个圆柱形试

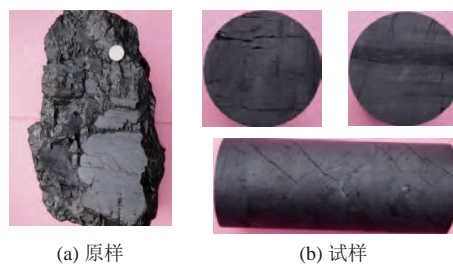


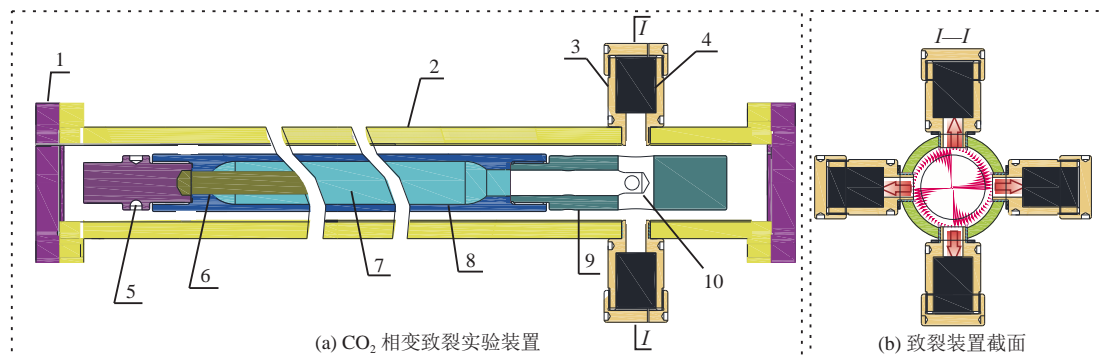
图 1 样品

Fig.1 Samples

样用于 CO₂ 冲击试验, 分两组进行, 每组 2 个煤样。从切割后剩余煤样选取 5 个直径 $\leq 10 \text{ mm}$ 的扫描电镜样品, 用于冲击前原生结构煤的显微构造观察。

1.2 试验装置

自行搭建的 CO₂ 相变致裂煤样试验装置如图 2 所示, 主要包括: 由爆破片、储液管、加热器、充气头、液态 CO₂、喷气头组成的 CARDOX 致裂装置; 固定 CARDOX 致裂装置的钢制模拟钻孔装置。模拟钻孔一端设置有煤样盒, 由盒盖与内径为 $\phi 52 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$ 圆筒状的箱体组成, 箱体顶部的开孔与 CARDOX 系统的喷气孔相对应, 保证高压 CO₂ 射流直接作用煤样。煤样盒能够完整保留冲击后的煤样。



1—密封法兰盘; 2—钻孔模拟钢管; 3—煤样盒; 4—煤样; 5—充气头; 6—加热器; 7—液态 CO₂; 8—储液管; 9—喷气头; 10—喷气孔

图 2 CO₂ 相变致裂煤样试验装置

Fig.2 Experimental setup for the CO₂ phase transition fracturing of coal samples

1.3 试验步骤

(1) 组装 CARDOX 爆破装置, 爆破压力为 120 MPa。将 CARDOX 致裂装置固定在钻孔模拟钢管中, 调整喷气孔的位置对准煤样盒顶端方向, 密封钢管两端的法兰。

(2) 将煤样装入煤样盒内, 并将其对称安装在钻孔模拟钢管壁上。

(3) 通电激发加热器启动储液管内 CO₂ 相变致裂, 高压 CO₂ 流体通过喷气孔直接冲击煤样。30 min 后取出冲击后的煤样, 手选直径 $\leq 10 \text{ mm}$ 的试验煤样颗粒, 进行扫描电镜观察分析, 研究致裂后煤显微构造

特征。

(4) 按照上述步骤, 依次完成两组煤样的致裂试验, 共选取冲击后的 6 个直径 $\leq 10 \text{ mm}$ 扫描电镜样品。

1.4 扫描电子显微镜参数

试验煤样的显微构造研究在河南省非常规能源地质与开发国际联合实验室完成, 使用场发射扫描电子显微镜 Merlin Compact (FESEM)。扫描观测采用高压 (10.0 kV) 高分辨率成像模型, 并利用背散射电子 (BSE) 成像提高分辨率。放大倍数: 12~40 万倍; 聚焦工作距离: 0.1~50.0 mm; 分辨率: 0.8 nm@15 kV。

2 FESEM 观察结果

2.1 原始煤样的显微构造特征

原始煤样扫描电镜下显微构造比较简单,其典型特征为平整断面、阶梯状断口,各种孔隙、显微裂缝和显微割理结构等,如图 3 所示。分类描述如下:

(1) 煤基质颗粒表面的局部平整断面,在毫米—微米尺度上,可见有弧形线理以及与其伴随径向线理(图 3a),高倍放大后,弧线线理呈阶梯状结构,由几个均匀光滑的平面台阶组合而成。

(2) 图 3b 是原生气孔,呈大小不一、形状不规则的圆形、椭圆形空心状,孔径尺度变化在微米尺度上,

呈单个孤立孔或者多个孔成群分布。这类孔隙在煤样中常见,是目前学界认为的热变质气孔^[42]。

(3) 图 3c 显示了孤立或者成群分布的孔隙。其断面形态多呈三角形、多角形及不规则特征,孔口张开而无充填物,多属于矿物溶蚀孔类。

(4) 图 3d 中显示为一组近于平直和正交的微米尺度显微割理,一组裂隙内被矿物质充填,另一组裂隙张开而无充填物。

总之,原始煤样显示了常见的未受人工改造的孔隙和裂隙构造,这与以往国内外学者的观察研究结果类似^[43-44]。

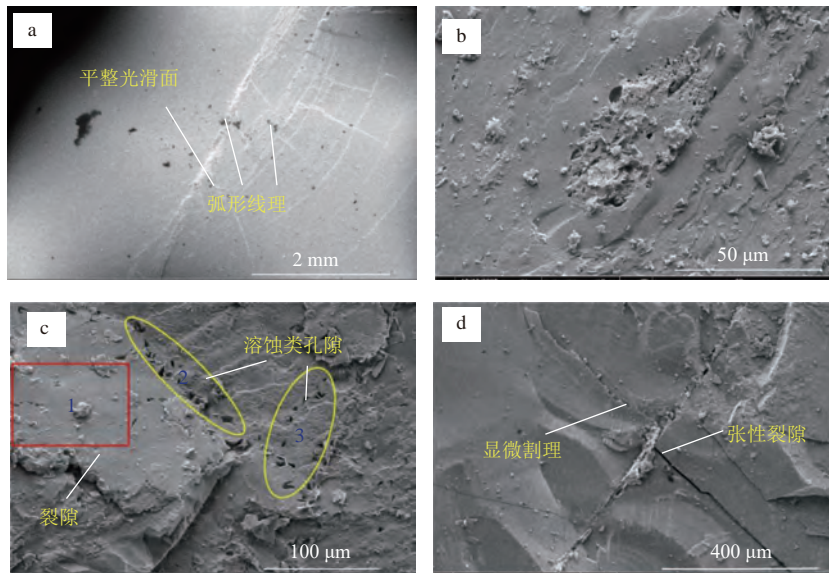


图 3 原始煤的显微构造
Fig.3 Microstructures in virgin coal

2.2 CO₂ 相变致裂后煤样的显微构造特征

高压 CO₂ 冲击后煤的显微构造特征,是理解煤岩破坏增渗机理的直接证据,并为提取其破坏煤岩的 CO₂ 相态组成和力学机理研究提供了依据。

与原始煤样对比,CO₂ 相变致裂作用形成了比较复杂的多种新生微米级显微构造,其中最具代表性的典型新生显微构造是“损伤坑”“三翼型”裂隙和“页理状”构造,其次是裂隙的“张性锯齿状”特征等。

(1) 2 种“损伤坑”(Damage Mark, DM)。图 4a 和图 4b 是第一种“损伤坑”的不同放大效果。这种“损伤坑(DM)”呈分散状均匀分布,坑的直径为微米级,一般在 2~5 μm。1 个大坑由多个甚至数十个次级小凹坑组成,形成所谓“复合损伤坑”,次级凹坑直径 1~2 μm(图 4b)。在“损伤坑”的四周散布很多破碎煤颗粒,由更小尺度的次级煤碎粒集合而成(图 4a 和图 4b),其次级碎粒大小与次一级损伤坑处于同一尺度

的 1~2 μm 级别。从损伤坑和碎粒集合体的几何形态和尺寸分析,可以推断这些碎粒是从“损伤坑”中剥离出来的,二者具有必然的成因联系。但是,在“损伤坑”周围,没有可识别的新生裂隙分布。

第二种“损伤坑(DM)”如图 4c 和图 4d 所示,坑的直径较大,但深度更浅,坑底不规则。坑的周围有分散状煤粒,但煤粒形态与坑底结构似乎没有密切联系。这类“损伤坑”总是和新生的张性裂隙相伴生(图 4c),发生煤的粉碎性破坏(图 4d)。这种“损伤坑”与“新生裂隙”具有密切的成生联系,特别是下面所述的“三翼型(Tri-Wing, TRW)”裂隙。

(2) “三翼型(TRW)”裂隙。该裂隙模式在冲击后的煤样中普遍存在,如图 5 所示。“三翼型(TRW)”裂隙具有两个重要特征:第一,三个分支裂隙共同存在,大致呈放射状延伸发育,并起源于一个中心点(图 5 中的黄圈标注),裂隙均呈张开状态。分支裂隙的长度不

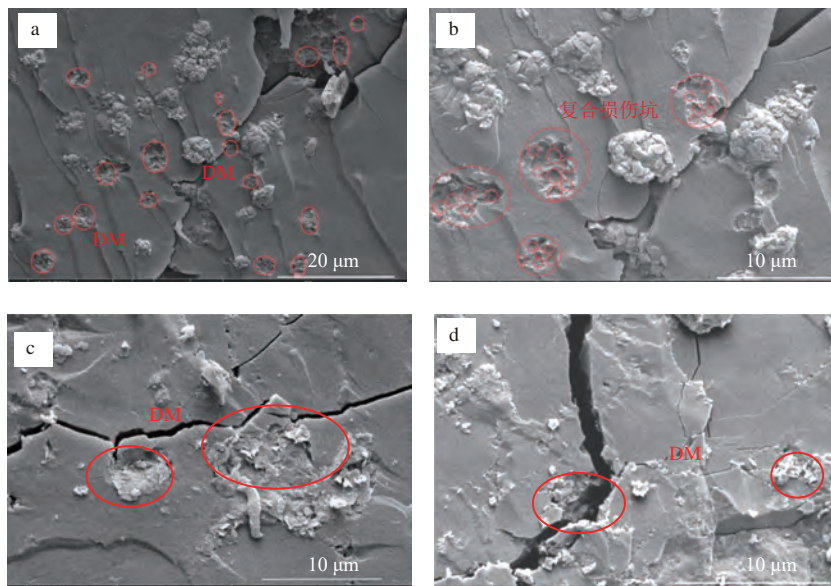


图4 冲击破坏后煤样中“损伤坑”

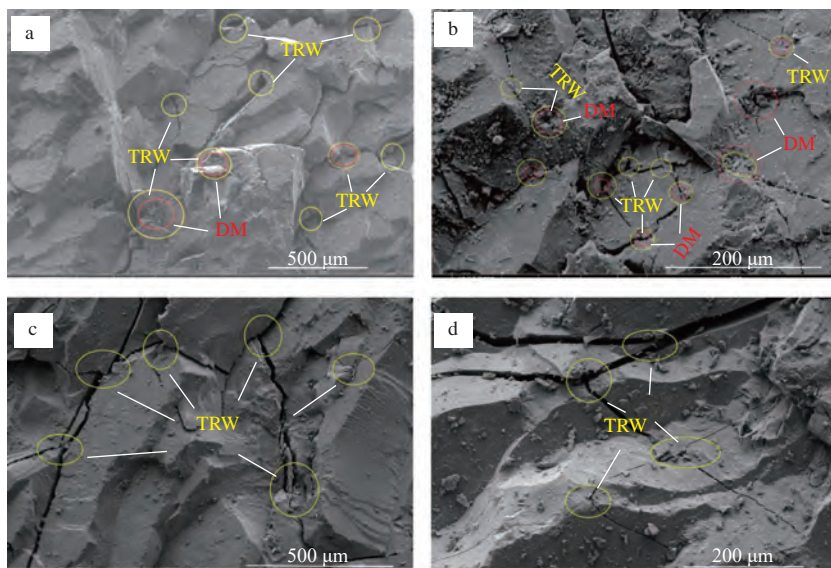
Fig.4 Damage marks in coal samples damaged by CO₂ impact

图5 冲击后破坏煤样中“三翼型”显微裂隙

Fig.5 Y-shaped microfractures in coal samples damaged by CO₂ impact

同,张开度也各不相同,其中一个或者两个分支的开度和长度大于其他分支。第二,“三翼型”裂隙起源的中心点多数具有“损伤坑”特征,如图4d和图5a—图5b中红线圈标注。图5a和图5b中的“损伤坑”与图4c和图4d中“损伤坑”的形态和结构相类似,均在周围形成“三翼型(TRW)”裂隙。图5b中裂隙密集发育,表明粉碎性破坏程度更高,在严重损伤区域出现了四分支裂隙发育情况。在图5c和图5d所示区域,“三翼型(TRW)”裂隙更为发育,其长度都在微米级,多组“三翼型(TRW)”裂隙相互沟通、交织成微裂隙网络。

(3)“页理状构造”。图6所示的页理状构造在原始煤样中没有发现,而在冲击作用后煤样中比较常见。页理的厚度在10~50 μm级,页理面之间为理想面理

或者为隐形裂隙。其页理面大小在 μm² 范围。在垂直页理面方向上,呈阶梯状断口构造。

3 高压 CO₂ 相变致裂煤体损伤机理

为进一步阐明高压 CO₂ 相变致裂技术的增渗机理,下面将根据前述观察到的主要显微构造特征,探讨分析 CO₂ 爆破致裂煤岩的相态特征和力学机制,这是 CO₂ 爆破致裂煤岩的关键科学问题之一,对该技术的进一步创新发展具有重要意义。

CO₂ 相变致裂是一种毫秒级高速和百兆帕级的高压冲击荷载作用,使煤柱形成独特的新生显微构造系统,其特征和成因机制以往都鲜见描述和报道。这不同于常规水基压裂裂缝,也不同于目前热点研究的多

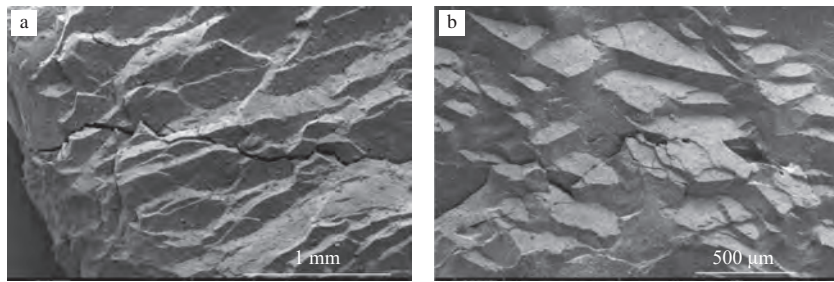


图 6 冲击后破坏煤样中“页理状”显微构造

Fig.6 Foliation structures in coal samples damaged by CO₂ impact

循环热胀/冷缩作用形成的裂隙,这些技术呈现为微米级的平直裂隙^[45-47]。

新生的典型微观构造损伤坑和三翼裂隙具有 3 种组合关系:第一是有坑无裂隙(图 4 a 和 4 b);第 2 种是坑和裂隙共生(图 4 c 和图 4 d,图 5),三翼型裂隙由损伤坑起始发育和延伸(图 5 a 和图 5 b);第 3 种是裂隙强烈发育而坑的发育较弱(图 5 c 和图 5 d)。3 种不同组合关系,预示着其具有不同的成因机理,即不同的 CO₂ 相态作用和动力学机制。

(1) 高压超临界 CO₂ 射流冲击损伤机制。这种机制形成了图 4 a 和 4 b 所示的损伤坑或复合损伤坑构造。其过程是,储液管内液态 CO₂ 受热后,其温度快速达到 300℃ 以上^[48],压力达到设定破裂压力 120 MPa,CO₂ 全部相变为超临界状态并破坏剪切片,从喷气阀喷出直接冲击煤样,形成损伤坑。这种高压超临界 CO₂ 是一种高压气-液均匀混合相,表面张力接近于零、黏度低,具有强扩散能力和渗透能力^[49],比单相气、液 CO₂ 的破坏作用更为强烈,在冲击煤体时表现为气-液空蚀损伤作用,形成了本文定义的损伤坑。这种损伤坑与林柏泉等^[50]发现的气-水混合相冲击煤体时形成的损伤坑形貌相同,形成机理相似,只是流体介质不同。更进一步,从复合损伤坑中的次级损伤坑大小、结构以及周边脱落煤粒集合体分析,其超临界 CO₂ 射流束由微米级尺度微细射流束所组成,且为一次性瞬间射流冲击。

(2) 高压气相和超临界 CO₂ 混合冲击损伤机制。这种机制下形成了“坑”和“三翼型”裂隙共生组合构造。在储液管内超临界 CO₂ 进入喷气阀至冲击煤体前一段时间内,由于储液管外的常压(0.1 MPa)和常温(不高于 30℃)环境影响,超临界 CO₂ 将发生 2 次相变,其中一部分相变为高压气相,与超临界 CO₂ 相混合,以射流方式直接冲击试件,形成第二种损伤坑和与其共生的三翼裂隙系统。第 2 种损伤坑鲜见空蚀现象^[51],但破坏强度更大,形成局部粉碎“坑”中心,进而在损伤坑周围产生放射状的张裂型三翼型裂隙。

(3) 冲击波损伤机制。该机制形成了图 5 c 和图 5 d

的无损伤坑类三翼型裂隙构造。所示的三翼型裂隙系统大量发育,并进一步构成了复杂裂隙网络结构,但没有观察到相关的“损伤坑”和其他直观的射流冲击痕迹。这种裂隙可能不是气相或超临界态 CO₂ 射流直接冲击作用的结果,而是高压超临界和单相 CO₂ 冲击煤体后所形成的冲击波作用的结果,这种裂隙系统发育在直接冲击界面的远端区域。

(4) 振动波损伤机制。页理状构造可能是这种机制的产物。页理状构造是一种弱变形构造,可能是在冲击作用影响较小的末端或远端,由于剪切波作用而形成的一种变形构造。

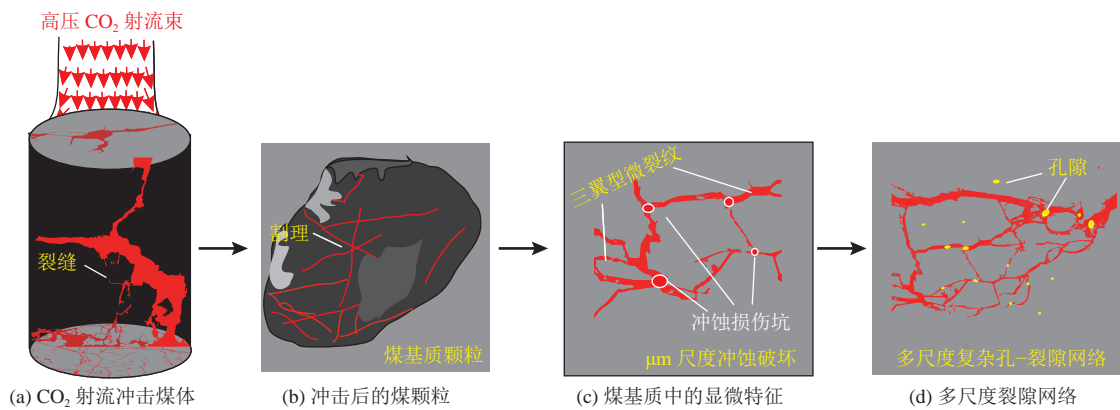
综上所述,工业性应用的高压 CARDOX 系统致裂煤体的作用过程中,存在两次相变,第一次发生在储液管内,液态 CO₂ 在受热作用下相变为超临界态。第二次发生在钻孔内,超临界 CO₂ 进入钻孔后,一部分为超临界态射流束直接冲击试件,而另一部分受钻孔温压影响而相变为气态,气态与超临界态一起,形成复杂混合相而直接作用于煤体。除了上述两种直接作用以外,还有第三种所谓冲击波损伤机制,这可能是煤岩破坏的最重要机制,形成了远离冲击端面的长距离造缝效果。也就是说,煤体损伤是两种相态 CO₂ 直接作用的结果,而超临界相始终参与煤岩的损伤过程。

这种多相态流体所致的煤基质颗粒破坏及其冲击波造缝效果,为卸压、增渗和瓦斯解吸、运移提供了多尺度的裂隙网络通道,这是该项技术实现瓦斯高效治理的核心机理。至此,提出高压 CO₂ 冲击作用下煤岩的损伤破坏机制和多尺度裂隙演化过程模型,概述如下(图 7):

(1) 剪切片破裂后,超临界 CO₂ 从储液管喷出进入钻孔,多相高压、高速 CO₂ 射流束作用于煤体(图 7 a)。

(2) 煤样的原始割理裂隙系统充分沟通,煤样被冲击破碎成毫米级的煤基质颗粒(图 7 b)。

(3) 煤基质颗粒表面形成损伤集中区,即损伤坑,以“损伤坑”为中心在周围形成微米尺度的三翼型分支裂隙(图 7 c),多相态 CO₂ 使裂隙尖端形成交变应力场,导致裂隙发生疲劳破坏,呈现张开的锯齿状延伸

图 7 多相 CO₂ 冲击煤岩的显微构造演化模型Fig.7 Evolutionary model of microstructures in a coal sample subjected to multi-phase CO₂ impact

规律。

(4) 基质颗粒上的多级、多尺度三翼型裂隙连通形成复杂裂隙网络(图 7d)。

这种复杂的裂隙网络为煤层气解吸、扩散与渗流提供了良好的通道系统,实现瓦斯高效抽采;裂隙网络同时缓解地应力集中条件,有利于消除和降低瓦斯突出危险性。

4 结论

a. CO₂ 相变致裂煤岩是一种复杂的多相态 CO₂ 冲击损伤机制。主要包括超临界 CO₂、气相 CO₂、超临界和气相混合态 CO₂。

b. 高压 CO₂ 冲击作用破坏了煤岩的原始割理和裂隙系统,新生构造主要发生在煤的基质颗粒上。CO₂ 冲击作用下形成了三种典型的新生显微构造:“损伤坑”“三翼型”裂隙和弱损伤“页理状构造”。新生显微构造尺度为微米级。

c. 3 种典型的新生显微构造具有不同的成因机理。“损伤坑”是以超临界或者和气相混合射流冲击作用形成的;其中与“损伤坑”共生的“三翼型”裂隙是气相与冲击波共同作用的结果;无坑“三翼型”裂隙是冲击波损伤机制形成的;以振动波为主弱损伤机制形成了“页理状构造”。

d. 本文重点以无烟煤样品为研究对象,开展了 CO₂ 相变致裂煤的微观破坏特征研究。今后将对不同煤阶的煤样进行实验研究,更全面地掌握致裂后煤岩微观孔裂隙的演化机理,解决更为复杂的地质条件下煤层瓦斯治理问题。

参考文献(References)

- [1] 袁亮. 我国煤矿安全发展战略研究[J]. 中国煤炭, 2021, 47(6): 1-6.
YUAN Liang. Study on the development strategy of coal mine

safety in China[J]. China Coal, 2021, 47(6): 1-6.

- [2] 李全生. 我国井工煤矿开采技术现状和发展展望[J]. 煤矿开采, 2002, 7(3): 1-5.
LI Quansheng. Present situation of underground coal mining technology and its prospects in China[J]. Coal Mining Technology, 2002, 7(3): 1-5.
- [3] 王兆丰, 刘军. 我国煤矿瓦斯抽放存在的问题及对策探讨[J]. 煤矿安全, 2005, 36(3): 29-32.
WANG Zhaofeng, LIU Jun. Probe into the problems of methane drainage in China's coal mines and its countermeasures[J]. Safety in Coal Mines, 2005, 36(3): 29-32.
- [4] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 煤炭深部开采与极限开采深度的研究与思考[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 535-542.
XIE Heping, ZHOU Hongwei, XUE Dongjie, et al. Research and consideration on deep coal mining and critical mining depth[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(4): 535-542.
- [5] 谢和平, 鞠杨, 高明忠, 等. 煤炭深部原位流态化开采的理论及技术体系[J]. 煤炭学报, 2018, 43(5): 1210-1219.
XIE Heping, JU Yang, GAO Mingzhong, et al. Theories and technologies for in-situ fluidized mining of deep underground coal resources[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(5): 1210-1219.
- [6] 蔡峰, 刘泽功. 深部低透气性煤层上向穿层水力压裂强化增透技术[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 113-119.
CAI Feng, LIU Zegong. Simulation and experimental research on upward cross-seams hydraulic fracturing in deep and low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 113-119.
- [7] 孙炳兴, 王兆丰, 伍厚荣. 水力压裂增透技术在瓦斯抽采中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(11): 78-80.
SUN Bingxing, WANG Zhaofeng, WU Hourong. Hydraulic pressurized cracking and permeability improvement technology applied to gas drainage[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(11): 78-80.
- [8] 范迎春, 王兆丰. 水力冲孔强化增透松软低透突出煤层效果分析[J]. 煤矿安全, 2012, 43(6): 137-140.
FAN Yingchun, WANG Zhaofeng. Effect analysis of strengthening permeability in soft and low permeability outburst coal seam by hydraulic flushing[J]. Safety in Coal Mines, 2012, 43(6): 137-140.

- [9] 刘明举, 赵文武, 刘彦伟, 等. 水力冲孔快速消突技术的研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(3): 58–61.
LIU Mingju, ZHAO Wenwu, LIU Yanwei, et al. Research and application of hydraulic flushing borehole to quickly eliminate outburst[J]. Coal Science and Technology, 2010, 38(3): 58–61.
- [10] 刘彦伟, 任培良, 夏仕柏, 等. 水力冲孔措施的卸压增透效果考察分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2009, 28(6): 695–699.
LIU Yanwei, REN Peiliang, XIA Shibo, et al. Analysis of pressure-relief and permeability improvement effect of hydraulic flushing[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2009, 28(6): 695–699.
- [11] WANG Hao, WANG Enyuan, LI Zhonghui, et al. Varying characteristics of electromagnetic radiation from coal failure during hydraulic flushing in coal seam[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(14): 644.
- [12] CHEN Dongdong, HE Wenrui, XIE Shengrong, et al. Increased permeability and coal and gas outburst prevention using hydraulic flushing technology with cross-seam borehole[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2020, 73: 103067.
- [13] 曹树刚, 李勇, 刘延保, 等. 深孔控制预裂爆破对煤体微观结构的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 673–678.
CAO Shugang, LI Yong, LIU Yanbao, et al. Influence of deep-hole controlled pre-cracking explosion on microstructure of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 673–678.
- [14] 胡刚, 王晓波, 王维维. 低透气性煤层长钻孔爆破增透技术[J]. 黑龙江科技学院学报, 2013, 23(2): 159–162.
HU Gang, WANG Xiaobo, WANG Weiwei. Study on technology of increasing permeability of low gas permeability coal seam by long-drilling explosion[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science and Technology, 2013, 23(2): 159–162.
- [15] MA Li, LAI Xingping, ZHANG Jianguo, et al. Blast-casting mechanism and parameter optimization of a benched deep-hole in an opencast coal mine[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 1–11.
- [16] LI He, LIN Baiquan, YANG Wei, et al. Effects of an underlying drainage gallery on coal bed methane capture effectiveness and the mechanical behavior of a gate road[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27: 616–631.
- [17] SZLAZAK N, OBRACAJ D, SWOLKIEN J. Methane drainage from roof strata using an overlying drainage gallery[J]. International Journal of Coal Geology, 2014, 136: 99–115.
- [18] 易丽军, 俞启香. 突出煤层密集钻孔瓦斯预抽的数值试验[J]. 煤矿安全, 2010, 41(2): 1–4.
YI Lijun, YU Qixiang. Numerical test of gas pre-drainage with dense boreholes in outburst coal seam[J]. Safety in Coal Mines, 2010, 41(2): 1–4.
- [19] KARACAN C Ö. Integration of vertical and in-seam horizontal well production analyses with stochastic geostatistical algorithms to estimate pre-mining methane drainage efficiency from coal seams: Blue Creek Seam, Alabama[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 114: 96–113.
- [20] 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 coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2631–2641.
- [21] 曹运兴, 田林, 范延昌, 等. 低渗煤层CO₂气相压裂裂隙圈形态研究[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 46–51.
CAO Yunxing, TIAN Lin, FAN Yanchang, et al. Study on cracking ring form of carbon dioxide gas phase fracturing in low permeability coal seam[J]. Coal Science and Technology, 2018, 46(6): 46–51.
- [22] 张宏伟, 朱峰, 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.
- [23] 程小庆, 王兆丰, 李豪君. 液态CO₂相变致裂强制煤层顶板垮落技术[J]. 煤矿安全, 2016, 47(6): 67–70.
CHENG Xiaoqing, WANG Zhaofeng, LI Haojun. Liquid CO₂ phase-transforming fracture technology in forcing coal seam roof collapse[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(6): 67–70.
- [24] 王海东. 突出煤层掘进工作面CO₂可控相变致裂防突技术[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 70–74.
WANG Haidong. CO₂ controllable phase transition fracturing and outburst prevention technology of gateway driving face in outburst seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 70–74.
- [25] CAO Yunxing, ZHANG Junsheng, ZHAI Hong, et al. CO₂ gas fracturing: A novel reservoir stimulation technology in low permeability gassy coal seams[J]. Fuel, 2017, 203: 197–207.
- [26] 杨百舸, 张军胜, 令狐建设, 等. 突出煤层CO₂气相压裂高效抽采防突掘进技术[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 85–94.
YANG Baige, ZHANG Junsheng, LINGHU Jianshe, et al. An advanced CO₂ gas-phase fracturing technology for efficient methane drainage, outburst prevention and excavation in outburst coal seam[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 85–94.
- [27] 赵龙, 王兆丰, 孙矩正, 等. 液态CO₂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 CO₂ phase transition fracturing to high gassy and low permeability seam[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 75–79.
- [28] 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 Xi'en, 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.
- [29] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 低渗煤层液态CO₂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 CO₂ phase change jet fracturing in low-permeability coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(11): 3154–3168.
- [30] 张东明, 白鑫, 尹光志, 等. 低渗煤层液态CO₂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 CO₂ phase change directional jet fracturing in low-permeability coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(7): 1938–1950.
- [31] HU Guozhong, HE Wenrui, SUN Miao. Enhancing coal seam gas using liquid CO₂ phase-transition blasting with cross-measure borehole[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 60: 164–173.
- [32] KANG Jianhong, ZHOU Fubao, QIANG Ziyang, et al. Evaluation of gas drainage and coal permeability improvement with liquid CO₂ gasification blasting[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(4): 2072045945.
- [33] 陈鹏, 孙可明, 张宇. 超临界CO₂气爆非均质煤体破裂规律模拟研究[J]. *计算力学学报*, 2021, 38(6): 770–778.
CHEN Peng, SUN Keming, ZHANG Yu. Simulation of fracturing law of heterogeneous coal caused by supercritical CO₂ explosion[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2021, 38(6): 770–778.
- [34] 孙可明, 辛利伟, 王婷婷, 等. 超临界CO₂气爆煤体致裂规律模拟研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2017, 46(3): 501–506.
SUN Keming, XIN Liwei, WANG Tingting, et al. Simulation research on law of coal fracture caused by supercritical CO₂ explosion[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2017, 46(3): 501–506.
- [35] 孙可明, 辛利伟, 吴迪. 超临界CO₂气爆煤体致裂机理实验研究[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 302–308.
SUN Keming, XIN Liwei, WU Di. Experimental study on fracture mechanism of coal caused by supercritical CO₂ explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 302–308.
- [36] 刘勇, 何岸, 魏建平, 等. 高压气体射流破煤应力波效应分析[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(7): 1694–1700.
LIU Yong, HE An, WEI Jianping, et al. Analysis of stress wave effect during coal breakage process by high pressure gas jet[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(7): 1694–1700.
- [37] GE Zhaolong, DENG Kai, ZHOU Zhe, et al. Fracture characteristics of coal jointly impacted by multiple jets[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 235: 107171.
- [38] 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.
- [39] 杜玉昆, 庞飞, 陈科, 等. 超临界二氧化碳喷射破碎页岩试验[J]. *地球科学*, 2019, 44(11): 3749–3756.
DU Yukun, PANG Fei, CHEN Ke, et al. Experiment of breaking shale using supercritical carbon dioxide jet[J]. *Earth Science*, 2019, 44(11): 3749–3756.
- [40] 黄飞, 卢义玉, 汤积仁, 等. 超临界二氧化碳射流冲刷页岩试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(4): 787–794.
HUANG Fei, LU Yiyu, TANG Jiren, et al. Research on erosion of shale impacted by supercritical carbon dioxide jet[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(4): 787–794.
- [41] SHANG Zheng, WANG Haifeng, LI Bing, et al. The effect of leakage characteristics of liquid CO₂ phase transition on fracturing coal seam: Applications for enhancing coalbed methane recovery[J]. *Fuel*, 2022, 308: 122044.
- [42] 张慧. 煤孔隙的成因类型及其研究[J]. *煤炭学报*, 2001, 26(1): 40–44.
ZHANG Hui. Genetical type of pores in coal reservoir and its research significance[J]. *Journal of China Coal Society*, 2001, 26(1): 40–44.
- [43] LAUBACH S E, MARRETT R A, OLSON J E, et al. Characteristics and origins of coal cleat: A review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 1998, 35(1/2/3/4): 175–207.
- [44] 杨昌永, 常会珍, 邵显华, 等. 扫描电镜下不同煤体结构煤微孔隙特征研究[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(12): 194–200.
YANG Changyong, CHANG Huizhen, SHAO Xianhua, et al. Study on micro-pore characteristics of structural coal in different coal bodies under scanning electron microscopy[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(12): 194–200.
- [45] MOU Pengwei, PAN Jienan, WANG Kai, et al. Influences of hydraulic fracturing on microfractures of high-rank coal under different in-situ stress conditions[J]. *Fuel*, 2021, 287: 119566.
- [46] SU Shanjie, GAO Feng, CAI Chengzheng, et al. Experimental study on coal permeability and cracking characteristics under LN₂ freeze-thaw cycles[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 83: 103526.
- [47] ZHANG Lei, LU Shuo, ZHANG Cun, et al. Effect of cyclic hot/cold shock treatment on the permeability characteristics of bituminous coal under different temperature gradients[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, 75: 103121.
- [48] 周科平, 柯波, 李杰林, 等. 液态CO₂爆破系统压力动态响应及爆炸能量分析[J]. *爆破*, 2017, 34(3): 7–13.
ZHOU Keping, KE Bo, LI Jieli, et al. Pressure dynamic response and explosion energy of liquid carbon dioxide blasting system[J]. *Blasting*, 2017, 34(3): 7–13.
- [49] SHANG Zheng, WANG Haifeng, LI Bing, et al. Experimental investigation of BLEVE in liquid CO₂ phase-transition blasting for enhanced coalbed methane recovery[J]. *Fuel*, 2021, 292: 120283.
- [50] 林柏泉, 王正, 王瑞. 高压气液两相射流裂纹扩展及致裂机理[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(1): 1–12.
LIN Baiquan, WANG Zheng, WANG Rui. Fracture extension and coal breaking performance by high-pressure gas-liquid jet flow[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(1): 1–12.
- [51] DING Yang, LYU Yuting, ZHAO Bingjie, et al. Response relationship between loading condition and corrosion fatigue behavior of nickel-aluminum bronze alloy and its crack tip damage mechanism[J]. *Materials Characterization*, 2018, 144: 356–367.

(责任编辑 范章群)