

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.021

高压脉冲放电激励超临界 CO₂ 压力动态响应分析*

王海东¹, 高佳慧¹, 陈学习¹, 梁忠秋², 管永明¹, 甄康哲¹

(1. 华北科技学院, 北京 101601; 2. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司, 抚顺 113122)

摘要: 我国煤层渗透率低、瓦斯压力高、含量大, 原始煤层瓦斯抽采困难。为提高煤层瓦斯抽采率、缩短预抽时间, 必须实施人工增透; 而众多压裂增透技术中, 超临界 CO₂ 压裂兼具压裂增透和驱替置换的双重瓦斯强化抽采作用, 是当前低渗透煤层压裂改造方法的一个研究热点。为探索高压脉冲放电激励 CO₂ (L-CO₂) 压裂增透技术压裂机理, 采用自主开发的高压脉冲放电激励超临界 CO₂ 试验装置, 对基于高压脉冲放电激励液态 CO₂ 相变过程的电、热、力多场耦合的复杂过程进行定量研究, 确定高压脉冲放电能量对液态 CO₂ 转化超临界态压力动态响应规律。通过 Span & Wagner CO₂ 状态方程, 对液态 CO₂ → 超临界 CO₂ 气化需要的能量进行了分析与计算, 得出在反应釜内放电能量达到 20 kJ、40 kJ、50 kJ 工况下超临界 CO₂ 压力将分别达到 11 MPa、18 MPa、26 MPa。通过改变起爆电压等级分别为 1500 V、2000 V、2500 V 实现三个等级放电能量实验, 放电能量分别为 20 kJ、40 kJ、50 kJ 三种工况下对反应釜内超临界 CO₂ 压力动态响应压力进行监测, 获得压力与时间关系曲线, 分析了压力曲线变化规律。研究表明: 不同放电能量下, 反应釜内液态 CO₂ 气化程度是不同的, 随着放电能量的增加反应釜内超临界 CO₂ 压力随之增大。研究成果对实现高压放电激励超临界 CO₂ 持续压裂煤层增透技术应用提供了一定的借鉴意义。

关键词: 超临界 CO₂; 增透; 状态方程; 压力响应; 爆炸能量

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)03-0139-06

Pressure Dynamic Response of Supercritical CO₂ under High Voltage Pulse Discharge Excitation

WANG Hai-dong¹, GAO Jia-hui¹, CHEN Xue-xi¹, LIANG Zhong-qiu², GUAN Yong-ming¹, ZHEN Kang-zhe¹

(1. North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2. China Coal Technology & Engineering Group Shenyang Research Institute,
Fushun 113122, China)

Abstract: Coal seams in China have many features, such as low permeability, high gas pressure and large gas content, so it is extremely difficult to extract gas from the original coal seam. The permeability has to be increased in order to improve the efficiency of extracting gas and shorten the time of extracting gas in advance. Among many technologies of increasing the permeability by cracking coal rocks, liquid CO₂ can not only contribute to the increase of permeability, but also substitute for gas, which can improve the efficiency of extracting gas significantly. In order to explore the application and effect of the L-CO₂ fracturing technology in high gassy and low permeability coal seams, a self-developed high voltage pulse discharge excitation supercritical CO₂ test device is used. The complex process of electric, thermal and force coupling in liquid CO₂ phase transformation induced by high voltage pulse discharge is quantitatively studied, and the dynamic response law in the supercritical state during the process is determined. According to the Span & Wagner equation state of CO₂, the energy needed for liquid CO₂ to supercritical CO₂ gasification is analyzed and calculated, and the results show that the pressure of the supercritical CO₂ will reach 11 MPa, 18 MPa and 26 MPa respectively under the condition that the discharge energy in the reactor reaches 20 kJ, 40 kJ and 60 kJ.

The pressure of supercritical CO₂ in the reactor is monitored by adjusting the initiation voltage level to 1500 V, 2000 V and 2500 V respectively, and discharge energy of 20 kJ, 40 kJ and 50 kJ respectively. The relation curve between pressure and time is then obtained, and the changing rule of the pressure curve is analyzed. The results show that the degree of liquid CO₂ gasification is different under varying amounts of discharge energy, and the supercritical CO₂ pressure in the reactor increases with the increase of discharge energy. The research results provide a reference for the application of anti-reflection technology of continuous and repeated cracking of coal seam under high pressure discharge excitation of supercritical CO₂.

Key words: supercritical carbon dioxide; permeability improvement; equation of state; pressure response; explosive energy

我国煤层气(煤层瓦斯)资源丰富,开发和利用潜力巨大,但煤层渗透率普遍偏低,一般在 $0.001 \sim 1.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 范围内^[1],致使瓦斯抽采困难,不仅商业开采面临挑战,而且制约煤矿安全高效生产^[2,3]。我国的煤炭工作者对提高煤层渗透性进行了长期探索和实践^[4-8],目前提高煤层渗透性的方法主要有开采解放层、水力压裂、水力割缝、深孔爆破、液态 CO₂(L-CO₂)爆破等为代表的孔裂隙重构技术以及注热、微波、声波等为代表的瓦斯强化解吸技术。

与以上众多压裂增透技术相比,L-CO₂压裂具有压裂增透和驱替置换的双重瓦斯强化抽采作用,是目前低透气性煤层压裂改造方法的研究热点。国内外现阶段关于 CO₂压裂增透的研究主要集中在物理相似模拟和油气增产现场试验。物理相似模拟实验方面:卢义玉等^[9]、JIANG 等通过实验研究了 L-CO₂和超临界 CO₂(SC-CO₂)压裂花岗岩和页岩试件过程起裂压力特征^[10],发现 CO₂压裂的起裂压力要低于水力压裂。樊世星等建立了 L-CO₂压裂煤岩起裂压力计算模型^[11],推导了水和 L-CO₂压裂注液量的量化表。赵胤翔等^[12]、鲍先凯等运用高压脉冲放电系统对不同强度的相似材料进行水中放电致裂实验得出^[13]:试样强度越大,形成贯通裂纹所需脉冲放电次数越多,所需要的能量也就越大;同时放电电压越高,煤样内部裂隙的数量和节点数量越多、总长度越长、平均宽度越宽以及裂隙率越大;放电电压越高,分形维数和裂隙分布初值的对数值越大纹后的试样钻孔内部裂隙发育越丰富。

综上所述,目前 L-CO₂压裂技术、电脉冲冲击致裂技术的应用仍主要集中在非常规油气资源开发行业,其在井下煤层增透方面的研究仍处于理论和实验探索阶段,相关工业试验在国内鲜见报道。鉴于此,笔者类比液态 CO₂相变气化的机理,提出利用

电脉冲放电过程的热效应直接气化液态 CO₂为超临界态 CO₂压裂煤体的思路,并根据自制的高压脉冲放电激励液态 CO₂压力响应实验装置对高压脉冲放电激励液态 CO₂相变过程电、热、力多场耦合的复杂过程进行定量研究,为该技术实现井下应用提供理论支撑。

1 高压脉冲放电激励超临界 CO₂ 试验能量分析

1.1 高压脉冲放电激励超临界 CO₂ 放电能量计算

高压电脉冲放电过程,主要原理是将电容中储存的电能为热能,形成高温高压冲击波; C 为脉冲电源的电容, U 为电容充电电压,则脉冲电源中电容存储的能量 W_c 可表示为

$$W_c = \frac{1}{2}CU^2 \quad (1)$$

本次实验组合 128 个 10 000 UF/400 V 电容,得出容量为 0.02 F/2500 V 的起爆容量。通过改变起爆电压等级分别为 1500 V、2000 V、2500 V 实现三个等级放电能量实验,放电能量分别为 20 kJ、40 kJ、50 kJ。

1.2 超临界态 CO₂ 反应能量计算

CO₂的物性状态与温度、压力密切相关,当温度超过 31.1℃且压力大于 7.38 MPa 时,处于超临界状态。该状态具有与其液态时相近的密度,粘度却与其气态时相似,气爆过程的 CO₂各状态参数,如温度、压力、密度等可利用其物态方程计算,该物态方程是科研工作者经过长期实践而总结出的较为准确的经验公式。

1996 年 Span 和 Wagner 针对 CO₂的 P-V-T 数据分析研究后,共同提出了一种适用于 CO₂物性参数计算的基于亥姆霍兹自由能的状态方程,简称 SW 方程,其温度适用范围为 216.59 ~ 1100 K,压力最高可达 800 MPa,计算 CO₂热力学参数具有很高的精度,为美国国家标准与技术研究院(NIST)所推荐。CO₂的物性参数计算方程的具体形式如下

收稿日期:2022-06-07

作者简介:王海东(1978-),男,黑龙江绥化人,副研究员、硕士生导师,(E-mail)38220125@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174181)

$$A(\rho, T)/(R_g T) = \phi(\delta, \tau) = \phi^0(\delta, \tau) + \phi^r(\delta, \tau) \quad (2)$$

$$\phi^0(\delta, \tau) = \ln \delta + \alpha_1^0 + \alpha_2^0 \tau + \alpha_3^0 \ln \tau + \sum_{i=4}^8 \alpha_i^0 \ln[1 - \exp(-\tau \theta_i^0)] \quad (3)$$

$$\phi^r(\delta, \tau) = \sum_{i=1}^7 n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} + \sum_{i=8}^{34} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\delta^{c_i}} + \sum_{i=34}^{39} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\alpha_i(\delta - \varepsilon_i)^2 - \beta_i(\tau - \gamma_i)^2} + \sum_{i=40}^{42} n_i \Delta^{b_i} \delta e^{-C_i(\delta - 1)^2 - D_i(\tau - 1)^2} \quad (4)$$

式中

$$\Delta = \{(1 - \tau) + A_i[(\delta - 1)^2]^{1/(2\beta_i)}\}^2 + B_i[(\delta - 1)^2]^{\alpha_i}$$

式中: A 为亥姆霍兹自由能; ϕ 为无量纲亥姆霍兹自由能; ϕ^0 为理想部分无量纲亥姆霍兹自由能; ϕ^r 为残余部分无量纲亥姆霍兹自由能; R_g 为气体常数, 0.188924 kJ/(kg · K); δ 为折算密度, $\delta = \rho/\rho_c$; τ 为折算温度, $\tau = T_c/T$; CO₂ 临界温度 $T_c = 304.1282$ K, 临界密度 $\rho_c = 467.6$ kg/m³。

$$\frac{p(\delta, \tau)}{\rho R_g T} = 1 + \delta \phi_\delta^r \quad (5)$$

$$\frac{s(\delta, \tau)}{R_g} = \tau(\phi_\tau^0 + \phi_\tau^r) - \phi^0 - \phi^r \quad (6)$$

$$\frac{u(\delta, \tau)}{R_g T} = \tau(\phi_\tau^0 + \phi_\tau^r) \quad (7)$$

$$\frac{h(\delta, \tau)}{R_g T} = 1 + \tau(\phi_\tau^0 + \phi_\tau^r) + \delta \phi_\delta^r \quad (8)$$

$$\frac{c_v(\delta, \tau)}{R_g} = -\tau^2(\phi_{\tau\tau}^0 + \phi_{\tau\tau}^r) \quad (9)$$

$$\frac{c_p(\delta, \tau)}{R_g} = -\tau^2(\phi_{\tau\tau}^0 + \phi_{\tau\tau}^r) + \frac{(1 + \delta \phi_\delta^r - \delta \tau \phi_{\delta\tau}^r)^2}{1 + 2\delta \phi_\delta^r + \delta^2 \phi_{\delta\delta}^r} \quad (10)$$

$$\frac{w^2(\delta, \tau)}{R_g T} = 1 + 2\delta \phi_\delta^r + \delta^2 \phi_{\delta\delta}^r - \frac{(1 + \delta \phi_\delta^r - \delta \tau \phi_{\delta\tau}^r)^2}{\tau^2(\phi_{\tau\tau}^0 + \phi_{\tau\tau}^r)} \quad (11)$$

式(5)为 p - v - T 关系式; 式(6) ~ 式(11)分别为熵 s 、内能 u 、焓 h 、定容热容 c_v 、定压热容 c_p 、声速 w 的计算式, 内能单位为 J/kg, 熵、焓、定容热容、定压热容的单位均为 J/(kg · K), 声速单位为 m/s。

根据上述计算公式, 计算使用 refprop 软件进行数据计算, 为方便将反应釜内 0.6 kg 液态 CO₂ 换算为 1 kg 标准情况下进行计算。表 1 为 20 kJ、30 kJ、50 kJ 能量气化后内能变化表。SW 方程计算参数见表 2。

表 1 液态 CO₂ 气化内能计算参数表

Table 1 Calculation parameters of internal energy of liquid CO₂ phase transition

CO ₂ 质量/kg	气化所用能量/kJ		
0.6	20	30	50
1	33.33	50	83.33
初始状态内能	261.05	261.05	261.05
吸收能量后内能	294.3833	311.0500	344.3833

表 2 SW 方程计算参数表

Table 2 Technical parameters of Span & Wagner

温度/ K	压力/ MPa	密度/ (kg · m ⁻³)	体积/ (m ³ · kg ⁻¹)	内能/ (kJ · kg ⁻¹)	焓/ (kJ/kg ⁻¹)	熵/ (kJ · kg ^{-K})	定容热容/ (kJ/kg ^{-K})	定压热容 (kJ/kg ^{-K})	声速/ (m · s ⁻¹)	亥姆霍兹/ (kJ · kg ⁻¹)
293.15	7.72	600	0.00166	261.05	270.60	1.2380	Notcalculated	Undefined	Undefined	-101.86
305.68	11.80	600	0.00166	294.38	307.42	1.3495	1.17510	14.1000	214.24	-118.14
321.36	18.30	600	0.00166	311.05	330.70	1.4027	0.99077	4.7045	278.26	-139.73
356.53	26.10	600	0.00166	344.38	379.66	1.5012	0.91519	2.4976	353.44	-190.85

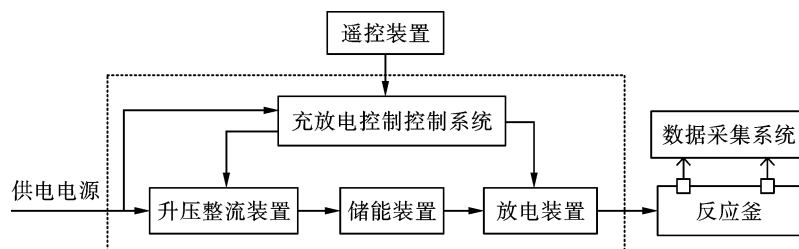
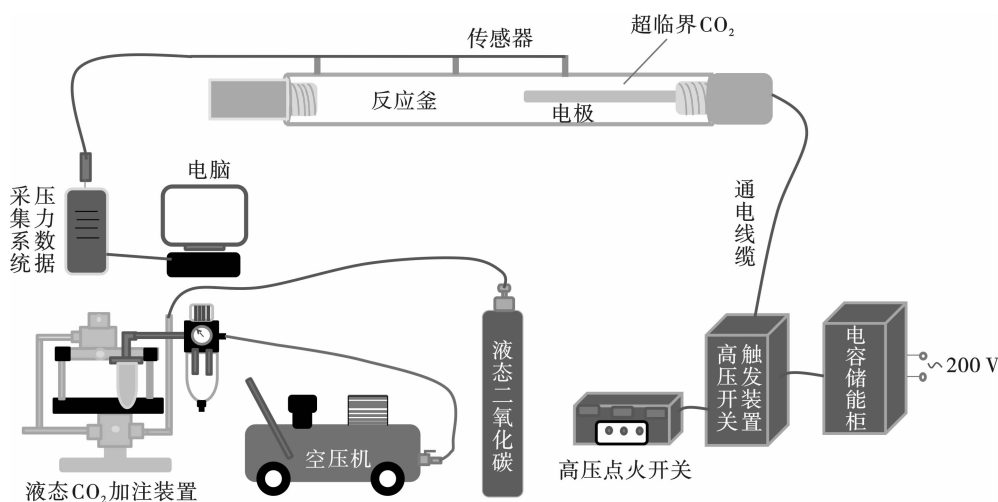
2 实验研究

研究高压放电过程中的能量转换关系, 根据放电能量 E 与储能电容 C 和充电电压 U 之间关系, 调整放电能量; 同时考察电极间距对放电能量的相关性。针对超临界 CO₂ 相变过程符合热力学理论、Span & Wagner 和等熵方程状态方程, 分析计算各因素对反应釜内超临界 CO₂ 压力变化的影响, 建立主

要影响因素与超临界 CO₂ 压力反应特征参数(相变压力峰值、升压时间、降压时间)间的关系, 确定高压放电激励超临界 CO₂ 反应数学模型。

2.1 高压脉冲放电激励超临界 CO₂ 相变压力响应测试装置设计

高压脉冲放电激励超临界 CO₂ 压力响应测试装置压力测试部分由加注装置、放电装置、监测装置、反应釜等组成, 如图 1、图 2 所示。

图 1 高压脉冲放电激励超临界 CO_2 放电系统Fig. 1 Measurement circuit supercritical CO_2 phase-transition test system under high voltage electrical pulses discharge图 2 高压脉冲放电激励超临界 CO_2 压力响应测试装置Fig. 2 Supercritical CO_2 phase-transition pressure response testing device under high voltage electrical pulses discharge

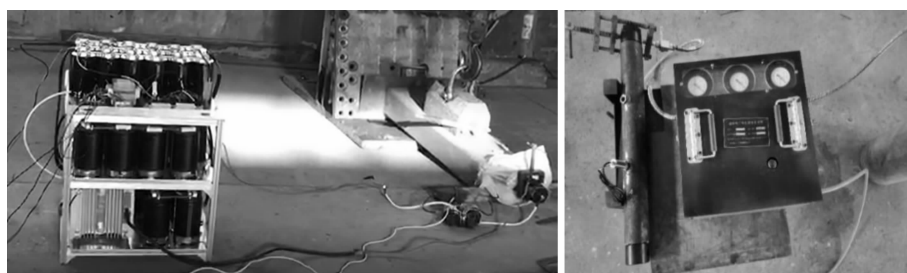
2.2 实验过程

(1) 接通 220V 交流电通过升压变压器将电压升高, 升高后的交流电通过可控整流装置变成直流电给储能装置充电, 达到预设值。

(2) 启动液态 CO_2 加注系统, 将液态 CO_2 加注进超临界 CO_2 相变反应釜。

(3) 调试压力数据采集系统, 检查各系统连接线路。

(4) 闭合点火开关使电路导通, 电能经过放电参数调节模块后在放电电极处释放, 通过控制平台的按键对整个过程进行控制, 信号采集则是通过示波器与系统中的电压传感器和电流传感器进行收集。该系统由成都泰斯特电子信息有限责任公司生产的 TST6200 瞬态信号测试仪、信号连接线、笔记本电脑和 TST6200 瞬态信号测试仪自带软件 DAP7.10, 主要采集液态 CO_2 相变全程中反应低釜内的超临界 CO_2 压力变化。见图 3。

图 3 超临界 CO_2 相变试验装置Fig. 3 Supercritical CO_2 phase-transition testing device

为得到高压脉冲放电激励超临界 CO_2 相变压力, 将高频压力传感器固定于反应釜壁上, 通过示波

器监测超临界 CO₂ 相变压力变化时程曲线。

2.3 试验结果与分析

高压点火开关通电后,瞬态信号测试仪记录压力传感器 A 的数据,得到液态 CO₂ 相变为超临界态 CO₂ 后反应釜内的压力变化情况,如图 4 所示。通电时,电极放电产生热量,使得液态 CO₂ 瞬时加热,部分液态 CO₂ 吸热气化,此时 CO₂ 分子运动速度加快,分子间间距增大,液态 CO₂ 迅速气化,放电结束后试验结束,整个液态 CO₂ 气化时间约为 0 ~ 1.8 ms 之间。为分析电极放电后反应釜内压力曲线变化特征,将试验曲线提取出来如图 4 所示。

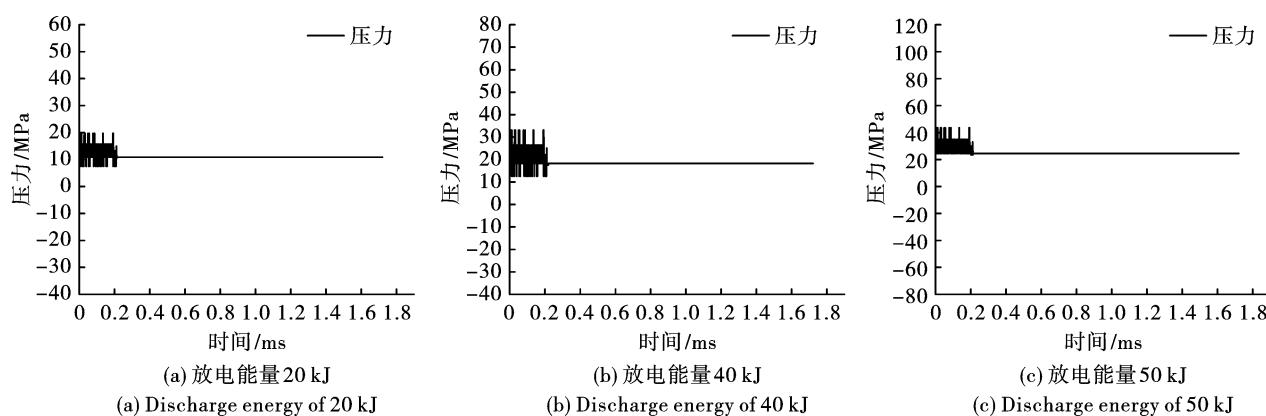


图 4 反应釜内超临界态 CO₂ 压力监测曲线

Fig. 4 Supercritical carbon dioxide autoclave pressure monitoring curve

3 结论

(1) 采用 Span&Wagner 状态方程,从热力学角度出发,结合 refprop 数值计算软件分析计算,得出理论气化压力与实验测试数据相符,说明高压电脉冲放电热效应对液态 CO₂ 有气化作用。

(2) 通过改变起爆电压,测得反应釜内超临界 CO₂ 压力动态响应压力值随电脉冲能量增大而增大,同时冲击压大也呈增大趋势。结果表明理论计算反应釜气化能量的准确性,结果显示反应釜内的压力与放电能量相关性较好。

(3) 通过实验研究表明,采用高压脉冲放电激励超临界 CO₂ 过程中,既有高压脉冲波作用,同时由于脉冲放电热效应使反应釜内部分液态 CO₂ 气化产生相变压力,说明高压脉冲放电激励超临界 CO₂ 应用于低渗透煤层增透是可行的。

参考文献 (References)

[1] 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.

(1) 从图中可以看出,在三种放电能量下反应釜内超临界态 CO₂ 压力变化状态,在 0 ~ 0.3 ms 范围内监测曲线为脉冲波形曲线,该范围内电脉冲快速振动,压力波动较大,主要是因为电脉冲影响所致。

(2) 在 0.3 ~ 1.8 ms 范围压力曲线接近直线,该阶段表明电脉冲放电阶段结束,部分液态 CO₂ 快速吸热气化的过程,压力上升并稳定。

(3) 在 20 kJ、40 kJ、50 kJ 放电能量下压力监测曲线显示的压力值与计算得出数据相关性较好,说明采用电脉冲放电产生的能量对激励液态 CO₂ 相变具有良好的促进作用。

[1] SUN Ke-ming, XIN Li-wei, WANG Ting-ting, 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. (in Chinese)

[2] 刘见中,孙海涛,雷毅,等. 煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 258-267.

[2] LIU Jian-zhong, SUN Hai-tao, LEI Yi, et al. Current situation and development trend of coalbed methane development and utilization technology in coal mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(1): 258-267. (in Chinese)

[3] 王磊,梁卫国. 超临界 CO₂ 压裂下煤岩体裂缝扩展规律试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(2): 65-70.

[3] WANG Lei, LIANG Wei-guo. Experimental study on crack propagation of coal rock mass under supercritical CO₂ fracturing[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(2): 65-70. (in Chinese)

[4] 贾进章,李斌,王东明. 煤层液态 CO₂ 相变致裂半径范围的影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(4): 57-63.

[4] JIA Jin-zhang, LI Bin, WANG Dong-ming. Study on influencing factors of cracking radius range caused by liquid

- CO₂ phase transition in coal seams[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(4): 57-63. (in Chinese)
- [5] 胡秋嘉, 李梦溪, 贾慧敏, 等. 沁水盆地南部高煤阶煤层气水平井地质适应性探讨[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 1178-1187.
- [5] HU Qiu-jia, LI Meng-xi, JIA Hui-min, et al. Discussion of the geological adaptability of coal-bed methane horizontal wells of high-rank coal formation in southern Qin Shui Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 1178-1187. (in Chinese)
- [6] 赵善坤, 李英杰, 柴海涛, 等. 陕蒙地区厚硬砂岩顶板定向水力压裂预割缝倾角优化及防冲实践[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 150-160.
- [6] ZHAO Shan-kun, LI Ying-jie, CHAI Hai-tao, et al. Pre-existing crack angle optimization of thick sandstone roof during directional hydraulic fracturing and its application to anti-rock-burst[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(4): 150-160. (in Chinese)
- [7] 吴迪, 耿阳阳, 肖晓春, 等. 页岩储层超临界 CO₂ 增透规律实验[J]. 特种油气藏, 2022, 29(1): 66-72.
- [7] WU Di, GENG Yang-yang, XIAO Xiao-chun, et al. Experimental study on variation pattern of enhanced permeability of supercritical CO₂ in shale reservoirs[J]. Special oil & Gas Reservoirs 2022, 29(1): 66-72. (in Chinese)
- [8] WANG Hai-dong, CHENG Zhi-heng, ZOU Quan-le, et al. Elimination of coal and gas outburst risk of an outburst-prone coal seam using controllable liquid CO₂ phase transition fracturing[J]. Fuel, 2021(284): 119091.
- [9] 卢义玉, 廖引, 汤积仁, 等. 页岩超临界 CO₂ 压裂起裂压力与裂缝形态试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(1): 175-180.
- [9] LU Yi-yu, LIAO Yin, TANG Ji-ren, et al. Experimental study on fracture initiation pressure and morphology in shale using supercritical CO₂ fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(1): 175-180. (in Chinese)
- [10] JIANG Yong-dong, QIN Chao, KANG Zhi-peng, et al. Experimental study of supercritical CO₂ fracturing on initiation pressure and fracture propagation in shale under different triaxial stress conditions[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 55: 382-395.
- [11] 樊世星, 文虎, 程小蛟, 等. 井下高压液态 CO₂ 压裂增透煤岩成套装备研制与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(2): 801-812.
- [11] FAN Shi-xing, WEN Hu, CHENG Xiao-jiao, et al. Research and application of a complete set equipment of permeability enhancements induced by high-pressure L-CO₂ fracturing[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(2): 801-812. (in Chinese)
- [12] 赵胤翔, 赵金昌, 马忠忠, 等. 水中高压电脉冲放电致裂不同强度煤体效果研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(10): 175-180.
- [12] ZHAO Yin-xiang, Zhao Jin-chang, MA Zhong-zhong, et al. Research on effect of high-voltage electric pulse discharge in water on cracking different strength coal[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(10): 175-180. (in Chinese)
- [13] 鲍先凯, 刘源, 郭军宇, 等. 煤岩体在水中高压放电下致裂效果的定量评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 715-725.
- [13] BAO Xian-kai, LIU Yuan, GUO Jun-yu, et al. Quantitative evaluation of fracturing effect of coal-rock masses under high-voltage discharge actions in water[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 715-725. (in Chinese)

英文编辑: 黄刚

(上接第 132 页)

- [11] 孙金山, 贾永胜, 姚颖康, 等. 拆除爆破数值模拟中钢筋混凝土构件的建模及参数取值方法[J]. 爆破, 2020, 37(3): 115-121.
- [11] SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Simplification and parameter selection of reinforced concrete component for numerical simulation of demolition blasting[J]. Blasting, 2020, 37(3): 115-121. (in Chinese)
- [12] 李志忠. 基于 LS-DYNA 的隧道爆破模拟分析[J]. 公路, 2017, 62(8): 316-320.
- [12] LI Zhi-zhong. Simulation analysis of tunnel blasting based on LS-DYNA[J]. Highway, 2017, 62(8): 316-320. (in Chinese)
- [13] 齐鹏, 尚修瑞, 刘川, 等. 复杂环境下跨路桥梁拆除爆破方案优化研究[J]. 爆破, 2021, 38(3): 104-111.
- [13] QI Peng, SHANG Xiu-rui, LIU Chuan, et al. Optimization of blasting schemes for demolition of cross-road bridges in complicated conditions[J]. Blasting, 2021, 38(3): 104-111. (in Chinese)
- [14] GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [14] GB 6722—2014 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: China Standards Press, 2015. (in Chinese)
- [15] 周家汉. 爆破拆除塌落振动速度计算公式的讨论[J]. 工程爆破, 2009, 15(1): 1-4, 40.
- [15] ZHOU Jia-han. Discussion on calculation formula of collapsing vibration velocity caused by blasting demolition[J]. Engineering Blasting, 2009, 15(1): 1-4, 40. (in Chinese)

英文编辑: 李立峰