

超临界二氧化碳射流冲击短时浸泡煤体破坏特征分析

刘 勇^{1,2}, 张东鑫^{1,2}, 张宏图^{1,2}, 魏建平^{1,2}, 司磊磊^{1,2}

(1.河南理工大学 瓦斯地质与瓦斯治理国家重点实验室培育基地,河南 焦作 454000;2.煤炭安全生产与清洁高效利用省部共建协同创新中心,河南 焦作 454000)

摘要:煤体力学和物理性质在超临界二氧化碳氛围下容易劣化,尤其在长时作用下,超临界二氧化碳能够充分发挥其溶解和萃取能力,改变煤体力学强度和孔隙结构。超临界二氧化碳作为极具应用前景的钻井液,在钻井过程中与煤体接触时间极短。在较短接触时间内,超临界二氧化碳是否能够改变煤体力学强度和孔隙结构对超临界二氧化碳射流冲击破煤效率和钻井效率至关重要。为此,为进一步研究超临界二氧化碳短时浸泡对破煤效率的影响,开展了超临界二氧化碳冲击破碎短时浸泡煤体研究,分析了不同浸泡条件下煤体冲击破碎特征,通过对比分析浸泡前后孔隙结构和力学性质的变化,明确短时浸泡对煤体冲击破碎特征的影响。结果表明:在短时浸泡条件下,超临界二氧化碳射流对浸泡煤体的冲击破坏特征具有重要影响。仅浸泡 3 min,超临界二氧化碳便可使煤体发生吸附膨胀,影响煤体的孔隙结构和力学强度,使煤体累计孔体积降低了 5.54%,力学强度降低 13.10%,使煤体冲击破碎粒径小于 1 mm 煤屑增加了 5.76%。延长浸泡时间,煤体冲击破碎程度持续提高。浸泡 60 min 后,超临界二氧化碳对煤体虽仍以吸附膨胀为主,但煤体出现矿物溶蚀现象,致使煤体累计孔体积降低了 30.19%,单轴抗压强度降低 33.41%,导致煤体的破碎程度发生了大幅提高。相同浸泡时间条件下,提高浸泡温度和压力,煤体吸附膨胀作用增强,孔体积增大,抗压强度降低,使破碎程度规律性提高。但当浸泡压力超过 16 MPa 后,抗压强度降低了 38.43%,冲击破坏程度显著提升。综上所述,超临界二氧化碳射流辅助钻井过程中,其吸附膨胀作用是影响煤体物理和力学性质的主要形式,有效降低了煤体孔体积和抗压强度,提高了破碎程度,有利于钻井效率的提高。

关键词:超临界二氧化碳射流;短时浸泡;破坏特征;孔隙结构;力学强度

中图分类号:P618.11 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2022)09-3310-10

Analysis of damage characteristics of coal body with supercritical carbon dioxide jet impact short time soaking

LIU Yong^{1,2}, ZHANG Dongxin^{1,2}, ZHANG Hongtu^{1,2}, WEI Jianping^{1,2}, SI Leilei^{1,2}

(1.State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2.State Collaborative Innovation Center of Coal Work Safety and Clean-efficiency Utilization, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The mechanical and physical properties of coal are easily deteriorated under the supercritical CO₂ atmosphere. Especially under a long-time action, the supercritical CO₂ can fully utilize its dissolution and extraction

收稿日期:2022-05-19 修回日期:2022-06-15 责任编辑:王晓珍 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2022.0748

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52174170);河南理工大学基本科研业务费专项资助项目(NSFRF220205);河南省高校科技创新人才资助项目(21HASTIT009)

作者简介:刘 勇(1984—),男,山东临沂人,博士。E-mail:yoouliu@hpu.edu.cn

引用格式: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.



移动阅读

ability to change the physical strength and pore structure of coal. As a highly promising drilling fluid, the supercritical carbon dioxide has a very short contact time with the coal body during the drilling process. Whether the supercritical carbon dioxide can change the physical strength and pore structure of coal within the short contact time is crucial to the efficiency of supercritical carbon dioxide jet impact on coal breaking and drilling efficiency. In order to further study the effect of short-time immersion of coal body by supercritical CO₂ on coal breaking efficiency, this paper carried out a study on the short-time immersion of coal body by supercritical CO₂ on the impact crushing of coal body. It analyzed the impact crushing characteristics of coal body under different immersion conditions and clarified the effect of short-time immersion on the impact crushing characteristics of coal body by comparing the changes of pore structure and mechanical properties before and after immersion. The results show that the supercritical carbon dioxide jet has an important influence on the impact damage characteristics of the soaked coal body under short-time soaking conditions. After soaking for only 3 minutes, the supercritical carbon dioxide caused an adsorption and expansion of the coal body, which affected the pore structure and mechanical strength of the coal body. Thus, it reduced the cumulative pore volume of the coal body by 5.54% and the mechanical strength by 13.10%, and increased the impact crushing particle size less than 1 mm coal chips by 5.76%. The degree of coal body impact crushing continued to increase by extending the soaking time. After soaking for 60 minutes, although the supercritical carbon dioxide still mainly adsorbed and swelled the coal body, the coal body showed a mineral dissolution phenomenon. It resulted in the cumulative pore volume of the coal body decreasing by 30.19% and the uniaxial compressive strength decreasing by 33.41%, which led to a significant increase in the degree of coal body fragmentation. Under the same soaking time condition, when the soaking temperature and pressure increased, the adsorption and swelling effect of the coal body was enhanced, the pore volume increased and the compressive strength decreased, which made the degree of crushing increase regularly. However, when the soaking pressure exceeded 16 MPa, the compressive strength decreased by 38.43%, and the impact damage degree was significantly increased. In conclusion, the adsorption and swelling effect of the supercritical carbon dioxide jet-assisted drilling process is the main form of influence on the physical and mechanical properties of coal body, which effectively reduces the pore volume and compressive strength of coal body and increases the degree of fragmentation. It is beneficial to the improvement of drilling efficiency.

Key words: supercritical carbon dioxide jet; short-time immersion; damage characteristics; pore structure; mechanical strength

煤层气的高效开采能有效缓解我国能源紧张、推动能源结构转型^[1],同时减少煤层气排空,能够大力推动我国“双碳”战略的实施^[2-3]。钻井效率及井壁稳定性是煤层气高效开采的重要前提^[4-5]。超临界二氧化碳(SC-CO₂)作为极具应用潜力的钻井液,在提高钻井效率及维持井壁稳定性方面具有独特优势^[9-11]。SC-CO₂对煤体的溶解萃取和吸附膨胀作用是提高破煤效率和钻井效率的关键。但在钻井过程中,由于煤体处于动态揭露状态^[12],SC-CO₂与煤体接触时间短。而接触时间是SC-CO₂溶解萃取和吸附膨胀充分发挥作用的基础。在钻井时间尺度下,明确SC-CO₂射流是否能够提高破煤效率及其原因对其工业化应用具有重要意义。

由于SC-CO₂具有低黏度和高渗透性^[13-14],容易进入煤岩体微观裂隙和孔隙内,溶解和萃取煤中的矿物质和有机物,改变煤体物理和力学性质^[15-16]。浸泡时间是SC-CO₂发挥作用最重要的因素之一,其影

响权重大于浸泡温度和压力。目前对于浸泡时间的研究多集中在长时浸泡条件下。张倍宁等^[17]浸泡煤体24 h后,CO₂吸附引起的煤基质膨胀和外部应力的压缩的耦合作用,部分孔隙变得狭窄。溶蚀的碳氢化合物和矿物被困在孔隙和裂缝中,导致煤岩体的孔隙体积和比表面积分别下降了24%和12%。何立国等^[18]对浸泡7 h后的煤体进行力学强度测试,由于吸附在煤体表面的超临界CO₂会改变煤体表面的化学势,煤体表面能会发生改变,表面能的改变直接影响煤体孔裂隙的改变,弱化了煤体的力学强度,单轴抗压强度和弹性模量分别降低72.28%和68.04%。姜仁霞等^[19]对浸泡30 d的煤体进行X射线衍射实验,发现在超临界CO₂与水中,煤中矿物发生溶解和溶解元素的迁移现象,石英含量增加,高岭石、碳酸盐矿物和黄铁矿含量下降,导致煤体孔隙结构改变。杜玉昆等发现超临界CO₂浸泡时间越长,岩心不断膨胀,其强度越低,浸泡较长时间后抗压强度降低的趋

势减缓^[20-21]。煤体处于 SC-CO₂ 长时浸泡条件下, SC-CO₂ 与煤体充分发生反应, 溶解矿物质并萃取有机物, 使煤体孔隙结构和力学强度发生变化, 能够较大程度提高超临界二氧化碳射流冲击破煤效率。但在钻井时间尺度下, SC-CO₂ 是否能够改变煤体的孔隙结构和力学强度, 从而提高冲击破碎效率和钻井效率尚不得而知。为此, 笔者开展了超临界二氧化碳冲击破碎短时浸泡煤样研究, 分析了不同浸泡条件下煤体冲击破碎特征, 通过对比分析浸泡前后孔隙结构、矿物含量和力学性质的变化, 明确短时浸泡对煤体冲击破碎特征的影响。

1 实 验

1.1 实验原理

为研究超临界二氧化碳射流冲击浸泡煤体破坏特征, 采用超临界二氧化碳射流对不同浸泡温度、浸泡压力、浸泡时间条件下的煤柱进行冲击, 分析不同浸泡条件下煤体破碎特征。通过低温氮气吸附实验、X 射线衍射实验研究浸泡前后煤孔隙结构和煤样矿物的变化规律, 结合浸泡前后煤体力学性质对比实验, 综合分析浸泡对煤体冲击破碎特征形成原因及规律。

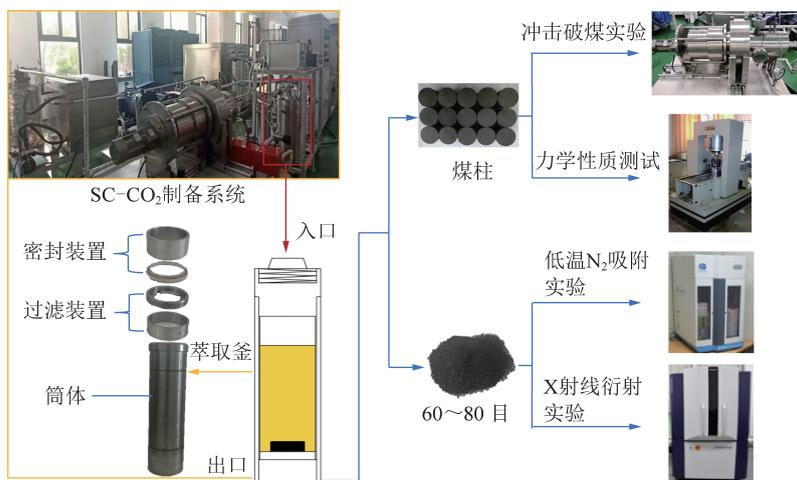


图1 超临界二氧化碳萃取实验系统流程

Fig.1 Flow of SC-CO₂ emission extraction experimental system

1.4 实验方案

(1) 选取部分圆柱煤样进行力学强度测试和超临界二氧化碳射流冲击破坏实验, 明确未浸泡煤体力学参数和冲击破坏特征。取 7 份颗粒煤样进行低温氮气吸附实验, 取孔隙分布平均值, 避免煤样离散性, 明确原始孔隙结构特征。取 7 份颗粒煤样进行 X 射线衍射实验, 明确原始矿物含量。

(2) 对剩余圆柱煤样进行浸泡, 浸泡实验方案见

1.2 实验样品制作

试样取自九里山煤矿无烟煤, 基础物性参数为: 水分 1.11%、灰分 18.20%、挥发分 8.92%、硫分 0.45%。将试样加工成圆柱原煤和颗粒煤样, 分别用于力学性质测试实验和低温氮气吸附实验。钻取直径 50 mm 的柱状煤样, 打磨成高度 (100±2) mm 的圆柱原煤煤样, 两端面的不平行度不超过 0.05 mm, 且颗粒煤样研磨至 0.177~0.250 mm (60~80 目)。将制备的煤样放入干燥箱中, 设置干燥温度 80 °C, 干燥 48 h 后备用。

1.3 实验系统

采用自主研发的超临界二氧化碳破煤实验系统进行冲击破煤实验和浸泡实验, 该系统主要由超临界二氧化碳制备系统和萃取系统组成, 如图 1 所示。超临界二氧化碳制备系统可制备压力为 100 MPa 和温度为 473 K 的超临界二氧化碳。萃取釜承压为 200 MPa, 温度最高可调节至 473 K; 破岩釜最大工作压力为 200 MPa, 靶距调节范围为 0~100 mm。超临界二氧化碳参数通过控制与监测系统自动化控制。低温氮气吸附实验所用仪器为 V-sorb 2800tp 比表面积及孔径分析测试仪; 力学性质测试实验所用仪器为 RMT-150B 电液伺服岩石实验系统; X 射线衍射实验所用仪器为 Smart Lab X 射线衍射仪。

表 1, 同一浸泡条件下同时浸泡 2 个煤样。对步骤 (1) 中的煤颗粒在孔隙结构测试实验和 X 射线衍射实验后进行浸泡, 浸泡方案见表 2。浸泡温度、压力和时间范围的选取均根据煤层埋深和实际钻井过程确定。

(3) 对同一浸泡条件下的 2 个圆柱煤样分别进行力学强度测试和冲击破碎实验。所有煤样的浸泡条件相同, 压力为 50 MPa, 温度 363 K, 靶距 12 mm。

(4)对浸泡后的颗粒煤试样分别进行低温氮气吸附实验和 X 射线衍射实验,明确不同浸泡条件对煤孔隙结构、矿物含量的影响。

表 1 超临界二氧化碳浸泡煤样实验方案
Table 1 SC-CO₂ coal sample soak test scheme

煤样	SC-CO ₂ 温度/ K	SC-CO ₂ 压力/ MPa	SC-CO ₂ 浸泡 时间/min
1	308	8	30
2	313	8	30
3	318	8	30
4	323	8	30
5	313	12	30
6	313	16	30
7	313	20	30
8	313	8	3
9	313	8	10
10	313	8	60
11	313	8	120

表 2 浸泡煤样低温氮气吸附实验方案
Table 2 Low-temperature N₂ adsorption for coal sample soaking experiment

煤样 编号	SC-CO ₂ 温度/K	SC-CO ₂ 压力/MPa	SC-CO ₂ 浸泡时间/min	备注
1	313	8	30	浸泡
2	323	8	30	浸泡
3	313	12	30	浸泡
4	313	16	30	浸泡
5	313	20	30	浸泡
6	313	8	3	浸泡
7	313	8	60	浸泡

2 实验结果与分析

2.1 冲击破煤特征实验结果

2.1.1 浸泡时间对冲击破煤特征影响

浸泡温度为 313 K、浸泡压力为 8 MPa、浸泡时间为 3~120 min 的煤体冲击破碎特征如图 2 所示,煤屑质量分数累积分布如图 3(a) 所示。

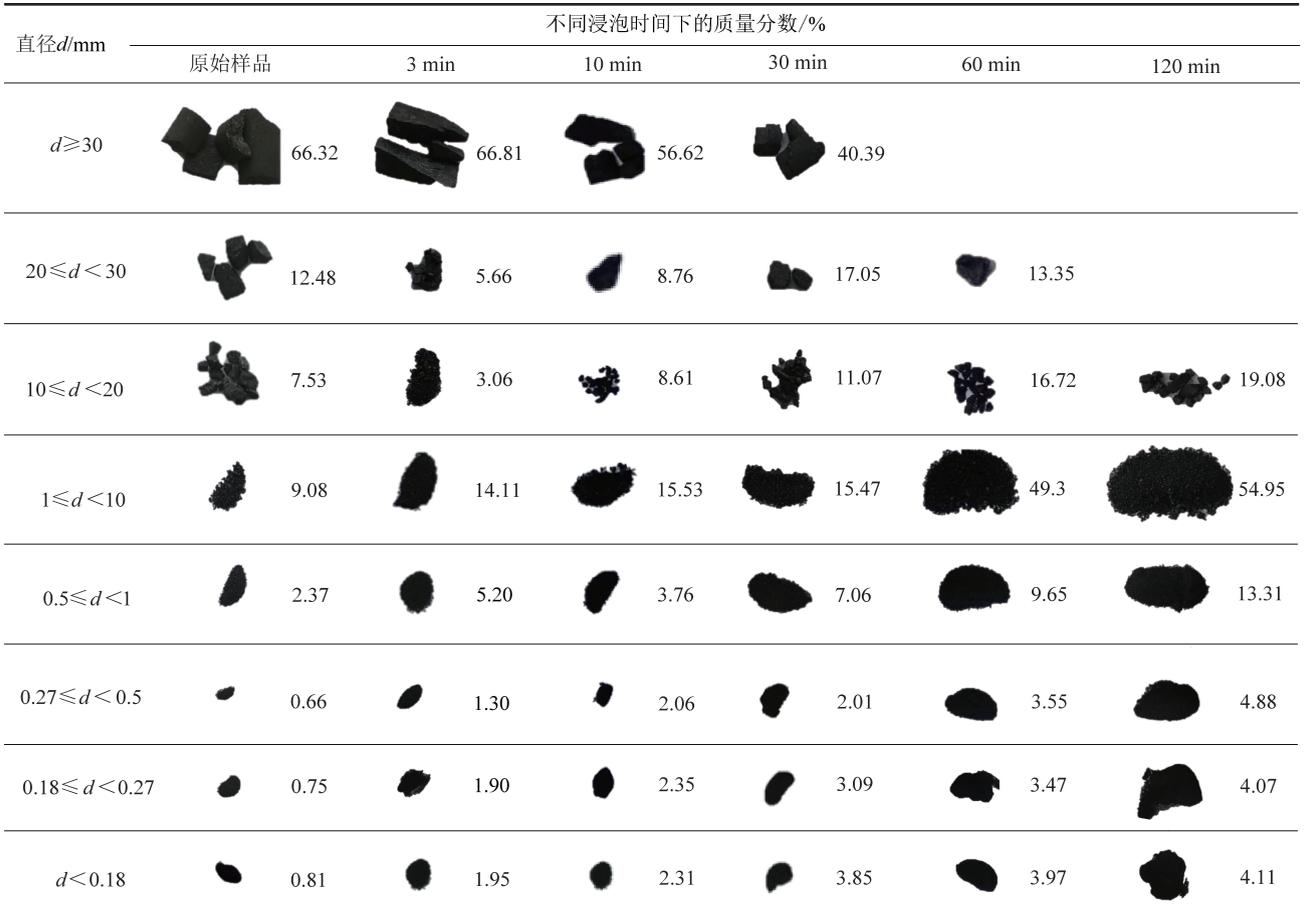


图 2 不同浸泡时间下射流冲击破煤效果

Fig.2 Effect of coal breaking by jet impact under different soaking time

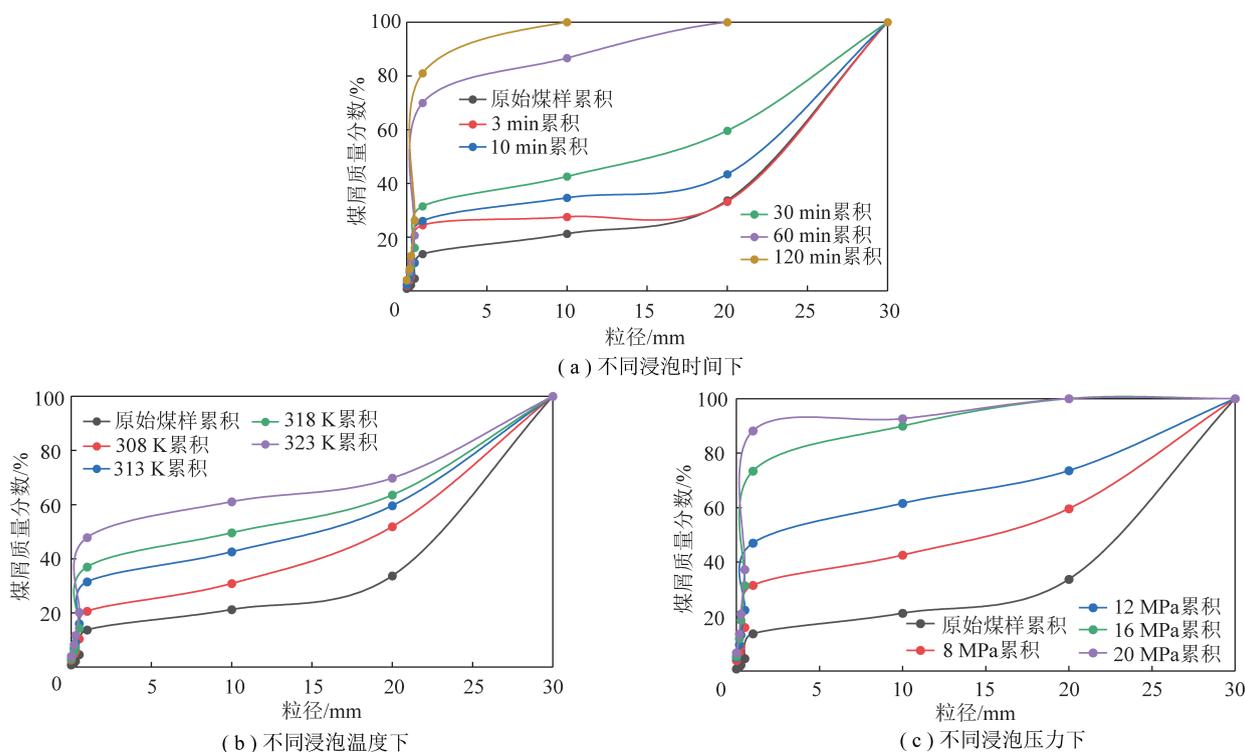


图3 冲击煤屑质量分数累积分布

Fig.3 Mass fraction accumulation distribution of impacted coal chips

不浸泡煤体冲击破碎后,粒径大于20 mm煤屑质量分数超过78.8%,粒径小于1 mm煤屑仅占4.59%。浸泡3 min后的煤体冲击破碎特征如图2第2列所示,从煤屑质量分数累积分布可以看出,在浸泡3 min后,粒径大于20 mm煤屑质量分数为72.47%,粒径小于1 mm煤屑为10.35%。对比原始煤样,分别降低了6.33%和增加了5.76%。随着浸泡时间的增长,这一变化特征总体上保持不变,即破碎煤屑粒径逐渐降低。但在浸泡时间小于30 min时,粒径降低的趋势并不明显。在浸泡时间达到1 h后,粒径的降低发生阶跃性变化。相比浸泡时间为30 min时,粒径小于1 mm煤屑占比由16.01%增加到20.64%。

2.1.2 浸泡温度对冲击破煤特征影响

浸泡压力为8 MPa、浸泡时间为30 min、浸泡温度为308~323 K的煤体冲击破碎特征如图4所示,煤屑质量分数累积分布如图3(b)所示。不浸泡煤体冲击破碎后,粒径大于20 mm煤屑质量分数超过57.44%,粒径小于1 mm煤屑仅占4.59%。浸泡308 K后的煤体冲击破碎特征如图4第2列所示,从煤屑质量分数累积分布可以看出,在浸泡313 K后,粒径大于20 mm煤屑质量分数为69.16%,粒径小于1 mm煤屑为16.01%。对比原始煤样,分别降低了9.64%

和增加了5.82%。在浸泡323 K后,粒径大于20 mm煤屑质量分数为38.92%,粒径小于1 mm煤屑为20.23%。相比313 K浸泡后的煤样,分别降低了43.72%和增加了78.3%。随着浸泡温度的增加,这一变化特征总体上保持不变,即破碎煤屑粒径逐渐降低。

2.1.3 浸泡压力对冲击破煤特征影响

浸泡温度为313 K、浸泡时间为30 min、浸泡压力为8~20 MPa的煤体冲击破碎特征如图5所示,煤屑质量分数累积分布如图3(c)所示。不浸泡煤体冲击破碎后,粒径大于20 mm煤屑质量分数超过78.80%,粒径小于1 mm煤屑仅占4.59%。浸泡8 MPa后的煤体冲击破碎特征如图5第2列所示,从煤屑质量分数累积分布可以看出,在浸泡8 MPa后,粒径大于20 mm煤屑质量分数为57.44%,粒径小于1 mm煤屑为16.01%。对比原始煤样,分别降低了21.36%和增加了11.42%。随着浸泡压力的增加,这一变化特征总体上保持不变,破碎煤屑粒径逐渐降低。但在浸泡压力小于12 MPa时,煤屑粒径降低趋势并不明显。在浸泡压力达到16 MPa后,粒径的降低发生大幅度变化。

相比浸泡压力为12 MPa时,粒径小于1 mm煤屑占比由22.33%增加到31.36%。

直径 <i>d</i> /mm	不同浸泡温度下的质量分数/%				
	原始样品	308 K	313 K	318 K	323 K
$d \geq 30$	 66.32	 48.14	 40.39	 36.44	 30.24
$20 \leq d < 30$	 12.48	 21.02	 17.05	 13.98	 8.68
$10 \leq d < 20$	 7.53	 10.26	 11.07	 12.64	 13.24
$1 \leq d < 10$	 9.08	 10.16	 15.47	 22.62	 27.62
$0.5 \leq d < 1$	 2.37	 4.69	 7.06	 7.08	 8.58
$0.27 \leq d < 0.5$	 0.66	 1.03	 2.01	 1.52	 3.32
$0.18 \leq d < 0.27$	 0.75	 2.15	 3.09	 2.74	 4.34
$d < 0.18$	 0.81	 2.54	 3.85	 2.99	 3.99

图4 不同浸泡温度下射流冲击破煤效果

Fig.4 Effect of coal breaking by jet impact at different soaking temperatures

直径 <i>d</i> /mm	不同浸泡压力下的质量分数/%				
	原始样品	8 MPa	12 MPa	16 MPa	20 MPa
$d \geq 30$	 66.32	 40.39	 26.44		
$20 \leq d < 30$	 12.48	 17.05	 11.98	 10.06	 7.33
$10 \leq d < 20$	 7.53	 11.07	 14.64	 16.53	 4.48
$1 \leq d < 10$	 9.08	 15.47	 24.62	 42.06	 50.96
$0.5 \leq d < 1$	 2.37	 7.06	 9.08	 12.67	 16.28
$0.27 \leq d < 0.5$	 0.66	 2.01	 3.52%	 6.83	 7.37
$0.18 \leq d < 0.27$	 0.75	 3.09	 4.74	 6.47	 6.92
$d < 0.18$	 0.81	 3.85	 4.99	 5.39	 6.67

图5 不同浸泡压力下射流冲击破煤效果

Fig.5 Effect of coal breaking by jet impact under different soaking pressure

2.2 冲击破煤特征原理分析

基于低温氮气吸附实验,分析不同浸泡时间、不同浸泡温度以及不同浸泡压力条件下,超临界二氧化碳浸泡煤体前后煤体孔隙结构变化规律。结合力学性质测试实验,分析超临界二氧化碳浸泡煤体抗压强度变化规律,得出超临界二氧化碳射流冲击浸泡煤体破坏特征机理。

2.2.1 浸泡时间对破煤特征的影响分析

浸泡温度为 313 K、浸泡压力为 8 MPa、浸泡时间为 3~60 min 的煤样累积孔体积和孔径分布如图 6 所示,煤样的单轴抗压强度如图 7(a) 所示,浸泡前后煤样 XRD 图谱如图 8 所示,矿物变化见表 3。

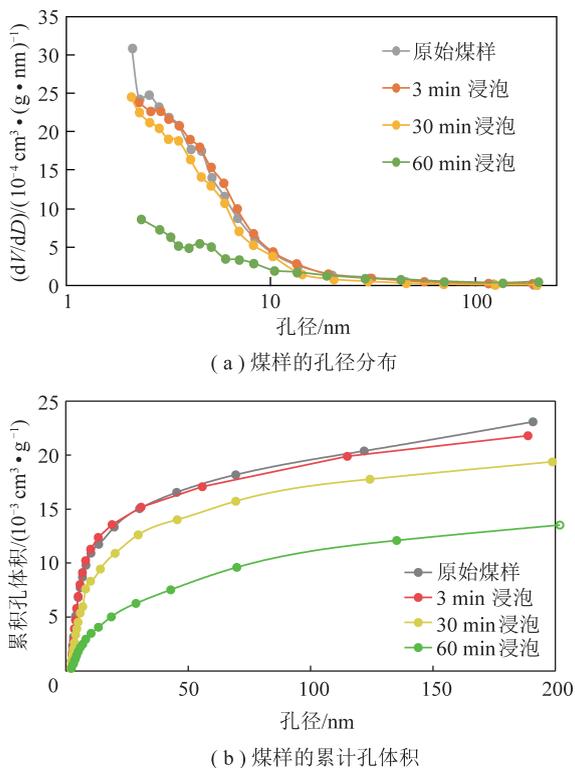


图 6 不同浸泡时间下煤样的孔径分布和累积孔体积
Fig.6 Pore size distribution and cumulative pore volume of coal samples under different soaking times

观察 XRD 图谱发现,超临界二氧化碳浸泡 30 min 前,煤样内矿物含量变化甚微。通过 BJH 法分析其煤样的平均孔径变化规律发现,不浸泡煤体的累计孔体积为 $0.023\ 085\ \text{cm}^3/\text{g}$ 。在浸泡 3 min 后,由于超临界二氧化碳作用时间较短,并未完全渗入煤体孔隙,煤基质与二氧化碳接触不充分,膨胀量较小,煤样的孔径小幅度降低,累计孔体积为 $0.021\ 807\ \text{cm}^3/\text{g}$,对比原始煤样,降低了 5.54%。煤基质膨胀后,煤颗粒间的胶结强度降低,黏聚力变差,致使煤体的单轴抗压强度由 17.33 MPa 降低至 15.06 MPa,降低了 13.10%,射流冲击后,小粒径煤屑增加了 5.76%。随着

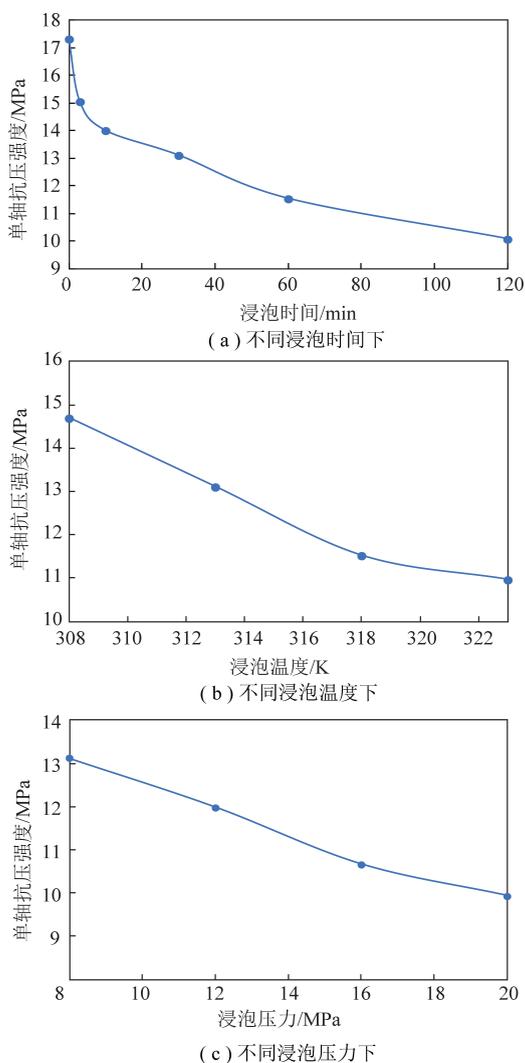


图 7 煤样单轴抗压强度
Fig.7 UCS of coal samples

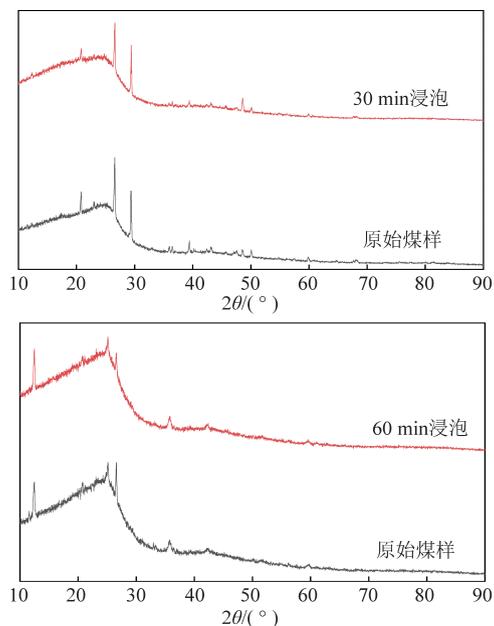


图 8 不同浸泡时间下煤样 XRD 图谱
Fig.8 XRD patterns of coal samples under different soaking time

表3 不同浸泡时间下煤样矿物质量分数变化
Table 3 Changes in mineral mass fraction of coal samples under different soaking times

样品	质量分数/%			
	石英	方解石	高岭石	黄铁矿
原样1	34.1	46.1	14.8	5.0
浸泡 30 min	33.8	46.3	14.9	5.0
原样2	30.5	46.9	16.5	6.1
浸泡 60 min	29.1	47.6	17.0	6.3

浸泡时间的增长,煤基质持续吸附二氧化碳,膨胀量不断增加,致使以上变化特征总体上保持不变。观察浸泡 60 min XRD 衍射图谱发现, θ 为 26.6° (石英) 的峰强度降低,其质量分数降低了 1.4%。浸泡时间为 30~60 min,超临界二氧化碳充分浸入煤体内部,与煤层中的水 (H_2O) 结合形成碳酸 (H_2CO_3),在弱酸环境中,煤中碳酸盐矿物 (方解石和白云石等) 易发生溶解、沉淀及碳酸化反应^[22]。矿物溶蚀脱落后沉积在较大孔隙内,煤体内的被溶蚀的矿物受限于孔口变窄的孔隙结构内,进而填充孔隙导致其孔径减小,矿物溶蚀和煤基质膨胀共同作用,煤样的累计孔体积由 $0.019\ 382\ \text{cm}^3/\text{g}$ 降低至 $0.013\ 531\ \text{cm}^3/\text{g}$,降低了 30.19%。一方面,煤基质膨胀后其胶结程度降低,黏聚力变差;另一方面,矿物溶蚀脱落促进微裂隙的生成,使煤体力学性质劣化,煤体单轴抗压强度大幅降低,由 13.11 MPa 降低至 11.54 MPa,对比 30 min 浸泡煤体,单轴抗压强度由降低 24.35% 减小到降低 33.41%。因此,随着浸泡时间的增长破碎煤屑粒径逐渐降低。但在浸泡时间 30~60 min 时,粒径的降低发生阶跃性变化,粒径小于 1 mm 煤屑占比由 16.01% 增加到 20.64%。

2.2.2 浸泡温度对破煤特征的影响分析

浸泡压力为 8 MPa、浸泡时间为 30 min、浸泡温度为 313~323 K 的煤样累积孔体积和孔径分布如图 9 所示,煤样的单轴抗压强度如图 7(b) 所示。通过 BJH 法分析其煤样的平均孔径变化规律发现,不浸泡煤体的累计孔体积为 $0.023\ 085\ \text{cm}^3/\text{g}$ 。通过 XRD 图谱发现,323 K 浸泡前后矿物质质量分数相对含量无明显变化,在 313 K 浸泡条件下,煤样累积孔体积为 $0.019\ 382\ \text{cm}^3/\text{g}$,对比原始煤样,降低了 16.04%。表明超临界二氧化碳吸附煤体使煤基质膨胀引发煤样孔隙结构发生局部变形,部分孔隙体积变小,导致孔径及累积孔体积下降。煤基质膨胀后,煤颗粒间的胶结强度降低,其黏聚力降低,煤体的单轴抗压强度由 17.33 MPa 降低至 13.11 MPa,降低了 24.35%,故射流冲击后,对比原始浸泡煤样的破坏特征,小粒径煤屑增加了 5.82%。在 323 K 浸泡条件下,煤样累积孔

体积为 $0.016\ 408\ \text{cm}^3/\text{g}$,对比 313 K 浸泡煤样,降低了 18.50%。随着浸泡温度增加, CO_2 分子活跃性增大,其扩散能力增强、渗透能力增强,单位时间内煤基质吸附二氧化碳量增大,致使煤基质膨胀速率增大,煤样孔隙结构发生局部变形,孔体积变小^[23-24];煤基质的膨胀量增大,胶结程度和黏聚力降低,使煤体力学性质劣化^[25-26],单轴抗压强度由 13.11 MPa 降低至 11.53 MPa,由降低 24.35% 减小到降低 33.48%,故对比 313 K 浸泡煤样的破坏特征,小粒径煤屑增加了 78.3%。因此,随着浸泡温度的升高,破碎煤屑粒径逐渐降低。

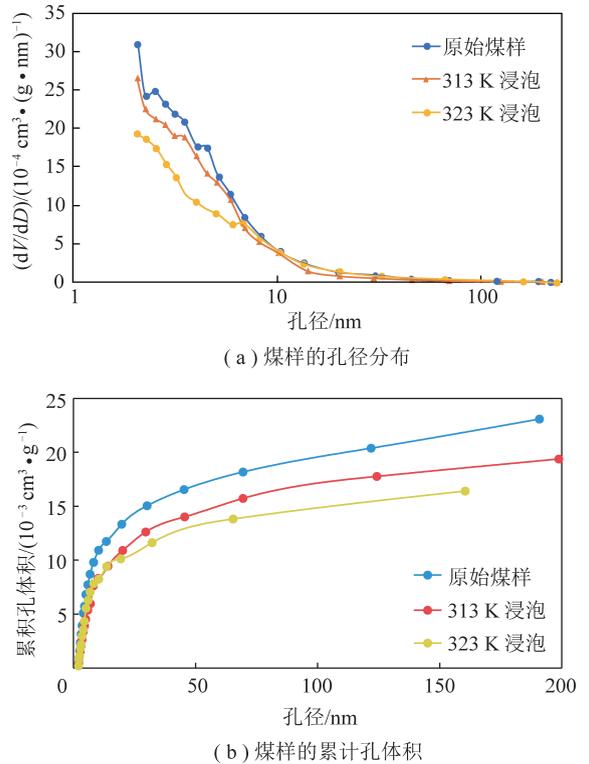


图9 不同浸泡温度下煤样的孔径分布和累积孔体积
Fig.9 Pore size distribution and cumulative pore volume of coal samples under different soaking temperatures

2.2.3 浸泡压力对破煤特征的影响分析

浸泡温度为 313 K、浸泡时间为 30 min、浸泡压力为 8~20 MPa 的煤样累积孔体积和孔径分布如图 10 所示,煤样的单轴抗压强度如图 7(c) 所示。通过 XRD 图谱发现,20 MPa 浸泡前后矿物质质量分数相对含量无明显变化。通过 BJH 法分析其煤样的平均孔径变化规律发现,8 MPa 浸泡条件下,煤样累积孔体积为 $0.021\ 937\ \text{cm}^3/\text{g}$,对比原始煤样,降低了 4.973%。在 12 MPa 浸泡条件下,煤样的累积孔体积为 $0.019\ 382\ \text{cm}^3/\text{g}$,对比 8 MPa 浸泡条件的煤样,降低了 11.65%。由于压力的增大,煤基质内部与外部的超临界二氧化碳压力梯度增大,其渗透率增大,故

随着浸泡压力的升高煤基质膨胀速率逐渐增大,煤基质膨胀挤压煤体孔隙,孔体积不断降低。煤基质的膨胀量增大,煤颗粒间的胶结强度降低,煤体内部黏聚力降低,使煤体力学性质劣化,单轴抗压强度由13.11 MPa降低至11.98 MPa,由降低24.35%减小到降低30.87%,射流冲击后,相比8 MPa浸泡煤样的破坏特征,小粒径煤屑增加了56.7%。随着浸泡压力的增大,煤基质单位时间内吸附二氧化碳量增加,其膨胀量增加,致使以上变化特征总体保持不变。当浸泡压力为12~16 MPa,浸泡压力的增大使煤基质表面出现扰动,微裂隙增多,吸附膨胀能力增大,致使煤样的累计孔体积由 $0.019\ 382\ \text{cm}^3/\text{g}$ 降低至 $0.015\ 357\ \text{cm}^3/\text{g}$,降低了20.767%。煤基质膨胀后其胶结程度降低,黏聚力变差,使煤体力学性质劣化,煤体单轴抗压强度大幅降低,由11.98 MPa降低至10.67 MPa,对比12 MPa浸泡煤体,单轴抗压强度由降低30.87%增大到降低38.43%。因此,随着浸泡压力的增大破碎煤屑粒径逐渐降低。但在浸泡压力12~16 MPa时,粒径的降低发生阶跃性变化,粒径小于1 mm煤屑占比由22.33%增加到31.36%。

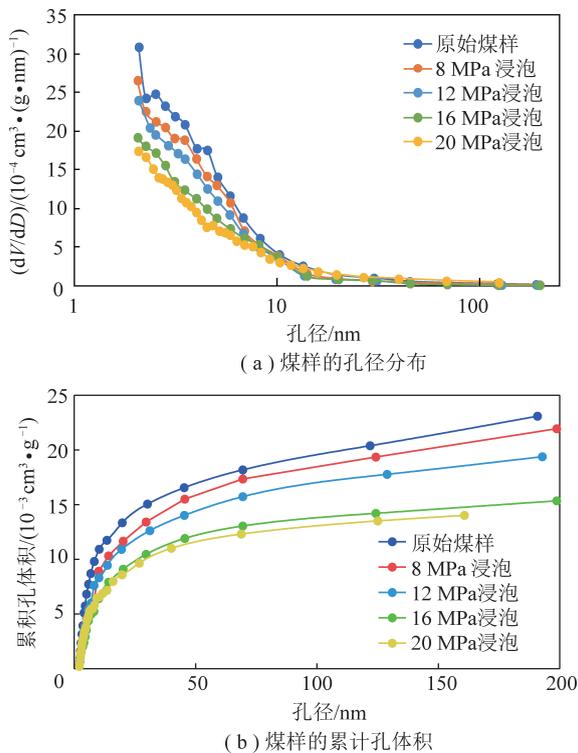


图10 不同浸泡压力下煤样的孔径分布和累积孔体积

Fig.10 Pore size distribution and cumulative pore volume of coal samples under different soaking pressures

3 结 论

(1)在短时浸泡条件下,超临界二氧化碳射流对浸泡煤体的冲击破坏特征具有重要影响。在浸泡

3 min后,煤体冲击破碎粒径小于1 mm煤屑增加了5.76%。延长浸泡时间,煤体冲击破碎程度继续提高,浸泡60 min后,破碎粒径的降低发生阶跃性变化。提高浸泡温度,使破碎程度规律性提高;但当浸泡压力大于16 MPa时,破碎程度明显提升。

(2)即使在短时浸泡条件下(如3 min),超临界二氧化碳仍然能够影响煤体的孔隙结构和力学强度,煤体力学强度降低13.10%,使超临界二氧化碳射流冲击破碎程度提高。在浸泡60 min时,煤体依然处于吸附膨胀阶段,矿物溶蚀现象同时出现,石英质量分数减少1.4%,但孔体积降低幅度发生较大程度变化,降低了30.19%,单轴抗压强度降低33.41%,使煤体的破碎程度发生了大幅提高。在实验条件下,提高温度和压力使煤体吸附膨胀作用增强,孔体积增大,抗压强度降低。当浸泡压力超过16 MPa后,抗压强度降低了38.43%,冲击破坏程度显著提升。

(3)超临界二氧化碳射流辅助钻井过程中,其吸附膨胀作用是影响煤体物理和力学性质主要形式,有效降低了煤体孔体积和抗压强度,提高了破碎程度,有利于钻进。

参考文献 (References):

- [1] 张抗,苗森,张立勤.“双碳”目标与中国能源转型思考(二)——能源转型中的化石能源[J].中外能源,2022,27(4):1-7.
ZHANG Kang, MIAO Miao, ZHANG Liqin. The “double carbon” target and China’s energy transition (II)-Fossil energy in the energy transition [J]. Sino-Global Energy, 2022, 27(4): 1-7.
- [2] 中国煤层气资源综合评价与勘查关键技术研究[N].中煤地质报,2021-11-18(002).
- [3] 徐凤银,杨赞.“双碳”目标下中国煤层气产业高质量发展途径[J].石油知识,2022(2):24-26.
XU Fengyin, YANG Yun. High-quality development of China’s coal-bed methane industry under the goal of “double carbon” [J]. Petroleum Knowledge, 2022(2): 24-26.
- [4] 顾军,秦磊斌,汤乃千,等.煤层气井内隔水层界面水窜通道形成演化过程[J].中国矿业大学学报,2019,48(1):87-98.
GU Jun, QIN Leibin, TANG Naiqian, et al. Evolutionary process of water channeling pathway along cement-aquifuge interface in coal-bed methane well [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(1): 87-98.
- [5] 刘勇,代硕,魏建平,等.低压磨料空气射流破硬岩规律及特征实验研究[J].岩石力学与工程学报,2022,41(6):1172-1182.
LIU Yong, DAI Shuo, WEI Jianping, et al. Experimental study of the laws and characteristics of low-pressure abrasive air jet for breaking hard rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(6): 1172-1182.
- [6] 刘勇,陈长江,魏建平,等.磨料水射流与磨料气体射流破岩压力对比分析[J].煤炭学报,2018,43(9):2510-2517.
LIU Yong, CHEN Changjiang, WEI Jianping, et al. Comparison

- analysis on the rock breakage pressure induced by abrasive water jets and abrasive gas jets [J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(9): 2510-2517.
- [7] RANJITH P G, LIU Y, WEI J P, et al. Effect of abrasive mass flow on the abrasive acceleration and erosion rates of abrasive gas jets [J]. *Rock Mech RockEng*, 2019, 52(9): 3085-3102.
- [8] ZHAO J C, GUO D Y. Cracking mechanism of coal under high-pressure water jet and its applications for enhanced coalbed methane drainage [J]. *Arab Journal of Geoscience*, 2018, 11(15): 14.
- [9] LI M K, NI H J, WANG R H, et al. Comparative simulation research on the stress characteristics of supercritical carbon dioxide jets, nitrogen jets and water jets [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2017, 11(1): 357-370.
- [10] 刘勇, 崔家玮, 魏建平, 等. 自激振荡脉冲超临界二氧化碳射流发生机制研究 [J]. *煤炭学报*, 2022, 47(7): 2643-2655.
LIU Yong, CUI Jiawei, WEI Jianping, et al. Study on generating mechanism of self-excited oscillation pulsed supercritical carbon dioxide jet [J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(7): 2643-2655.
- [11] LIU Y, GUO X H, WEI J P, et al. Application of supercritical carbon dioxide jet: A parametric study using numerical simulation model [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 201: 108422.
- [12] 窦亮彬, 李根生, 沈忠厚, 等. 地层超临界 CO₂ 侵入时井筒流动与传热研究 [J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(11): 2086-2092.
DOU Liangbin, LI Gensheng, SHEN Zhonghou, et al. Wellbore flow and heat transfer during formation supercritical CO₂ intrusion [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(11): 2086-2092.
- [13] 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.
- [14] LIU Y, ZHANG J, WEI J P, et al. Impact pressure distribution of an SC-CO₂ jet used in rock breakage [J]. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8(1): 27.
- [15] 张宇杰, 郭红光, 李治刚, 等. 超临界 CO₂ 萃取提高褐煤生物甲烷产气模拟实验 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10): 3278-3285.
ZHANG Yujie, GUO Hongguang, LI Zhigang, et al. Simulation of supercritical CO₂ extraction to enhance biomethane production from lignite [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10): 3278-3285.
- [16] 孙泽东, 冯滢, 宋选民, 等. CO₂ 状态与各向异性对烟煤渐进破坏特征影响的实验研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2022, 41(1): 70-81.
SUN Zedong, FENG Gan, SONG Xuanmin, et al. Experimental study on the effect of CO₂ state and anisotropy on the progressive damage characteristics of bituminous coal [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2022, 41(1): 70-81.
- [17] ZHANG B N, LIANG W G, RANJITH P G, et al. Coupling effects of supercritical CO₂ sequestration in deep coal seam [J]. *Energy Fuels*, 2019, 33(1): 460-473.
- [18] 何立国, 杨栋. 超临界 CO₂ 对煤体力学特性劣化影响研究 [J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(2): 94-99.
HE Ligu, YANG Dong. The effect of supercritical CO₂ study on the effect of supercritical CO₂ on the deterioration of physical properties of coal [J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(2): 94-99.
- [19] JIANG R X, YU H G. Interaction between sequestered supercritical CO₂ and minerals in deep coal seams [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 202: 1-13.
- [20] 杜玉昆. 超临界二氧化碳射流破岩机理研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2012.
DU Yukun. Research on the mechanism of rock breaking by supercritical carbon dioxide jet [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2012.
- [21] YANG J F, LIAN H J, LIANG W G, et al. Experimental investigation of the effects of supercritical carbon dioxide on fracture toughness of bituminous coals [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 107: 233-242.
- [22] 张登峰, 李超, 李艳红, 等. 封存过程中 CO₂ 流体与煤中矿物作用关系研究进展 [J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(1): 297-309.
ZHANG Dengfeng, LI Chao, LI Yanhong, et al. Progress of research on the relationship between CO₂ fluids and minerals in coal during sequestration [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(1): 297-309.
- [23] 马海军, 李彬, 李恒, 等. 基于低温氮吸附的动态超临界 CO₂ 对煤纳米孔隙结构的影响 [J]. *煤矿安全*, 2021, 52(1): 30-35.
MA Haijun, LI Bin, LI Heng, et al. Effect of dynamic supercritical CO₂ on coal nanopore structure based on low-temperature nitrogen adsorption [J]. *Safety in Coal Mines*, 2021, 52(1): 30-35.
- [24] 薛卉, 舒彪, 陈君洁, 等. 高温高压下超临界二氧化碳作用对花岗岩力学性质影响的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(2): 377-384.
XUE Hui, SHU Biao, CHEN Junjie, et al. Mechanical properties of granite after reaction with ScCO₂ at high temperature and high pressure [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(2): 377-384.
- [25] 汤积仁, 卢义玉, 陈钰婷, 等. 超临界 CO₂ 作用下页岩力学特性损伤的试验研究 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(3): 797-802.
TANG Jiren, LU Yuyi, CHEN Yuting, et al. Experimental study of mechanical property damage of shale under the action of supercritical CO₂ [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(3): 797-802.
- [26] 王海涛, 左罗, 郭印同, 等. 二氧化碳对页岩力学性质劣化规律的影响 [J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(29): 12536-12542.
WANG Haitao, ZUO Luo, GUO Yintong, et al. Effect of carbon dioxide on the degradation of shale mechanical properties [J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(29): 12536-12542.