



## 液氮致裂时间对煤样力学性能、渗透性与致裂机理的影响

王菁瑞 赵耀江 李雨成 王浩 王江涛 张慧娟

### 引用本文:

王菁瑞, 赵耀江, 李雨成, 等. 液氮致裂时间对煤样力学性能、渗透性与致裂机理的影响[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(6): 101-110.

WANG Jingrui, ZHAO Yaojiang, LI Yucheng. Analysis of mechanical properties, permeability and fracturing mechanism of coal samples at different fracturing time of liquid nitrogen[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 101-110.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-0503>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 液氮致裂煤体技术研究现状及展望

Study and prospection of liquid nitrogen fracturing coal technology

煤炭科学技术. 2022, 50(7): 191-198 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/720ae74e-67a6-45ea-a9a3-cac9426b2626>

##### 液氮冻结和冻融循环作用下煤样力学特性试验研究

Study on evolution law of mechanical properties of coal samples subjected to freezing and freeze-thaw cycles of liquid nitrogen

煤炭科学技术. 2023, 51(5): 82-92 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021-1451>

##### 液氮冻融循环作用下饱水煤样力学特性试验研究

Experimental study on mechanical properties of saturated coal samples subjected to freezing-thawing cycles of liquid nitrogen

煤炭科学技术. 2020, 48(10) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/fade14e1-af3e-41be-952a-41f8f05ab60e>

##### 煤层气井液氮伴注压裂增透机制及应用研究

Study on mechanism and application of liquid nitrogen injection combined with fracturing to enhance permeability in CBM wells

煤炭科学技术. 2019(11) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/a7ea770e-36a7-41b0-8c9b-4d254fcb08bb>

##### 航天固体推进剂对煤储层致裂增透试验研究

Experimental study of aerospace solid propellant fracturing in simulated coal sample

煤炭科学技术. 2023, 51(9): 121-128 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1022>

##### 钻孔注水-注液氮冷裂煤的数学模型

Study on permeability-enhancing mathematical model of coal fracturing with borehole water injection and liquid nitrogen injection

煤炭科学技术. 2019(1) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/b4a2b00b-4737-435e-9149-944178b3dcaa>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息



移动扫码阅读

王菁瑞,赵耀江,李雨成,等.液氮致裂时间对煤样力学性能、渗透性与致裂机理的影响[J].煤炭科学技术,2023,51(6):101-110.

WANG Jingrui, ZHAO Yaojiang, LI Yucheng, *et al.* Analysis of mechanical properties, permeability and fracturing mechanism of coal samples at different fracturing time of liquid nitrogen[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(6): 101-110.

## 液氮致裂时间对煤样力学性能、渗透性与致裂机理的影响

王菁瑞,赵耀江,李雨成,王浩,王江涛,张慧娟

(太原理工大学安全与应急管理工程学院,山西晋中 030600)

**摘要:**为研究液氮致裂时间对煤样的力学性能和渗透率的影响,利用自主研发的WYS-800三轴瓦斯渗流试验装置及声发射检测系统,对4组不同液氮致裂时间处理的煤样分别进行三轴力学渗流试验并采集声发射信号,对三轴力学渗流试验中各组煤样的力学性能、渗透率的变化进行了分析,描述了声发射信号的特征;根据沸腾换热理论、一维圆柱导热理论、热应力理论分析了致裂机理,计算了不同致裂时间下产生的热应力,通过数据拟合揭示了平均温度降、平均热应力、初始渗透率与致裂时间的关系。研究结果表明:①液氮致裂时间对煤样的力学性能产生不同影响,抗压强度和弹性模量随致裂时间的增加呈现先减小后增大的趋势,泊松比则呈现先增大后减小的趋势,煤样三轴加载时轴向应力-轴向应变曲线的阶段性演化具有明显差异,与力学参数的改变相关。②不同液氮致裂时间煤样在三轴加载过程中的渗透率均呈U型变化,煤样的初始渗透率、最小渗透率、试验测得最大渗透率随致裂时间的增加而增大,致裂30 min时增幅分别为119.05%、437.5%、146.49%;声发射信号在压密和弹性阶段不活跃,主要产生于屈服阶段和破坏阶段,致裂后煤样的声发射振铃计数峰值产生于破坏点附近,均大于20 000次。③煤样与液氮之间的膜态沸腾换热系数为570.4 W/(m<sup>2</sup>·K),煤样平均温度降与致裂时间相关,对平均热应力和初始渗透率起主导作用,致裂30 min时煤样内部产生的平均温度降可达213.63 K,平均热应力可达5.850 MPa。④液氮处理后煤样的初始渗透率与平均温度降之间呈线性关系,与致裂时间呈负指数分布关系。改变参数取值,可推广至其他类似处理的煤样或实际生产评估。

**关键词:**液氮致裂;力学性能;渗透性;致裂机理;平均温度降

**中图分类号:**TD712;TK124

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-2336(2023)06-0101-10

### Analysis of mechanical properties, permeability and fracturing mechanism of coal samples at different fracturing time of liquid nitrogen

WANG Jingrui, ZHAO Yaojiang, LI Yucheng, WANG Hao, WANG Jiangtao, ZHANG Huijuan

(School of Safety and Emergency Management Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China)

**Abstract:** In order to study the influence of liquid nitrogen cracking time on mechanical properties and permeability of coal samples, the independently developed WYS-800 triaxial gas seepage test device and acoustic emission detection system were used to conduct triaxial mechanical seepage tests on four groups of coal samples treated with different cracking time and collect acoustic emission signals. The mechanical properties and permeability of coal samples in triaxial mechanical seepage experiment were analyzed, and the characteristics of acoustic emission signals were described. Based on boiling heat transfer theory, one-dimensional cylinder heat conduction theory and thermal stress theory, the cracking mechanism was analyzed, and the thermal stress under different cracking time was calculated. The relationship between average temperature drop, average thermal stress, initial permeability and cracking time was revealed by data fitting. The results show that: ① Liquid nitrogen fracturing time have different influence on the mechanical properties of coal samples, the compressive strength and elastic modulus with the increase of the crack time shows the tendency of increase with the decrease of the first, the pois-

收稿日期:2022-06-28

责任编辑:宫在芹

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0503

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52274245)

作者简介:王菁瑞(1998—),男,湖北襄阳人,硕士研究生。E-mail: wangjingrui1482@link.tyut.edu.cn

通讯作者:赵耀江(1964—),男,山西太原人,教授,硕士生导师,博士。E-mail: zhaoyaojiang@tyut.edu.cn

son's ratio are increased after the first decreases, coal sample triaxial loading when the axial stress and axial strain curve of the periodic evolution has obvious difference, associated with the change of mechanical parameters. ② The permeability of coal samples with different cracking time changes in u-shape during the triaxial loading process. The initial permeability, minimum permeability and maximum permeability increase with the increase of cracking time, and the increase rate is 119.05%, 437.5% and 146.49% when the cracking time is 30min. Acoustic emission signals are not active in compaction and elastic stages, and are mainly generated in yield and failure stages. The peak value of acoustic emission ringing count of coal samples after cracking is generated near the failure point, which is more than 20 000 times. ③ The film boiling heat transfer coefficient between the coal sample and liquid nitrogen is 570.4 W/(m<sup>2</sup>·K). The average temperature drop of the coal sample is related to the cracking time, and the average thermal stress and initial permeability play a leading role. The average temperature drop of the coal sample can reach 213.63 K and the average thermal stress can reach 5.85 MPa after 30 min of cracking. ④ There is a linear relationship between initial permeability and average temperature drop, and a negative exponential relationship between initial permeability and cracking time of coal samples after liquid nitrogen treatment. Changing the parameter value can be extended to other similar coal samples or actual production evaluation.

**Key words:** liquid nitrogen; mechanical properties; permeability; fracturing mechanism; mean temperature drop

## 0 引言

多年以来,煤炭始终是人们的生产生活中不可或缺的能量之一,随着国家对能源结构的调整和能源产业的改革,对煤层气资源的开采和利用程度越来越高<sup>[1]</sup>。煤层气被视为洁净能源,是推动能源生产和消费革命的重要载体<sup>[2]</sup>。近年来,为了更加高效环保的开采煤层气,越来越多的学者转向高低温致裂煤岩增透技术研究,而低温无水致裂增透技术则应用的更加广泛。煤体的抗拉性能低,若降温过程中产生的拉应力足够大,很容易导致煤体破裂,提高煤体孔隙率和渗透性能,从而降低煤层气抽采难度和提高煤层气产量<sup>[3]</sup>。使用液氮作为压裂液具有不受水资源限制、不污染储层、致裂效果好保护储层、有效降低水化膨胀及滤失问题、有效防粉尘等优势<sup>[4]</sup>。因此,研究液氮致裂后含瓦斯煤岩力学性能、渗透性及致裂机理可为煤矿井下的注液氮致裂增透工艺提供参考。

在液氮致裂煤岩的增透效果和致裂后煤岩的渗流特性研究方面,前人已经进行过各种各样的研究。考虑煤阶的影响:AKHONDZADEH等<sup>[5]</sup>研究了煤阶对液氮压裂效率的影响,得出了在煤阶较低时,液氮压裂对煤的力学性能影响显著的结论。卢硕等<sup>[6]</sup>选择不同煤阶煤样进行液氮溶浸并进行注气驱替瓦斯试验测试渗透率,提出了适宜于不同煤阶煤层的液氮致裂增透方法。考虑含水率的影响:LI等<sup>[7]</sup>研究了液氮冷浸对不同含水率煤样的温度变化和渗流特性的影响,得出随着含水率的增加,液氮冷浸后的煤样透气性的增长速率呈指数型增长的结论。ZHAO等<sup>[8]</sup>用液氮处理不同含水饱和度煤样,证明含水饱和程度越高的煤岩经液氮冻融循环后其孔隙度越高,且孔裂隙的连通程度增大。考虑液氮处理方式的影

响:陈帅<sup>[9]</sup>开展了煤体单次和循环液氮致裂试验,验证了液氮单次致裂时渗透率随气压增大呈指数增大,液氮循环致裂渗透率随气压增大呈先减小后增大的二次函数变化。张春会等<sup>[10]</sup>对饱水煤样开展液氮冻融循环和力学特性试验,揭示了煤样结构损伤和力学性能劣化随着液氮冻融循环次数的增加而加剧的规律。从温度降的角度分析,张路路等<sup>[11]</sup>研究了冷冲击对煤岩的损伤和增透作用,结果表明渗透率变化量与温度降的大小成正比关系。从应力敏感性的角度分析:张磊等<sup>[12]</sup>为研究液氮致裂条件下烟煤渗透率及其应力敏感性演变规律,定义了渗透率离散度的概念。

前人的研究已经考虑到煤样的煤阶、含水率、液氮处理方式对液氮增透效果和渗流特性的影响,涉及了煤岩的内部和外部因素,因素考虑相对全面,基本得出了针对某一因素形成的规律,多为单因素分析;理论分析上已经从液氮致裂的温度降以及应力敏感性方面来研究液氮致裂对煤岩的孔裂隙变化和渗流特性的影响,但研究数量较少,分析还不够深入,对于造成温度降变化的原因和应力变化的原因的研究还不够完善,鲜有学者从液氮致裂时间的角度对煤样的力学性能和渗透性进行试验分析。

为了排除含水率、煤阶和液氮处理方式的干扰,描述不同液氮致裂时间对干燥无烟煤煤样的力学性能和渗透性的影响,笔者采用三轴加载力学渗流试验与声发射检测试验相结合的方法,测试了单次液氮致裂不同时间时干燥无烟煤煤样在三轴加载过程中的各种力学性能参数,采集了声发射信号,对数据呈现出的规律进行了归纳总结,参考热应力理论和传热学理论从致裂时间的角度进行了致裂机理的分析,研究为液氮致裂煤岩增透技术提供试验基础和理论支撑,对煤层瓦斯的抽采起到推动作用。



1 试验设备及方案

1.1 试验设备

本次试验需要经历煤样采集与加工、液氮处理、进行三轴力学渗流试验、声发射检测试验 4 个步骤,其中需要用到的试验设备和仪器包括:DL5640 数控砂线切割机、岩石端面切割机、恒温干燥箱、保温罐、液氮储罐、WYS-800 三轴瓦斯渗流试验装置、12CHsPCI-2 型声发射监测系统。

1.2 煤样制备

试验采集煤样取自阳泉市新景矿 3 号煤层,为变质程度相对较高的无烟煤,煤体大致呈钢灰色,存在黑色条痕,具有较强玻璃光泽或金属光泽。煤的结构均匀,表面伴有少量细纹。内生裂隙较发育,多呈阶梯状及锯齿状断口,存在微量眼球状断口。煤中裂隙多为剪性裂隙,孔隙类型以原生孔和变质孔为主。煤节理和孔隙之中有部分矿物质充填,节理和孔隙的连通性差。煤样采集点附近地质构造简单,采集的煤样尺寸大于 200 mm×200 mm×200 mm。

将采集好的煤样使用 DL5640 数控砂线切割机和岩石端面切割机加工为φ50 mm×100 mm 的标准试

样,端面使用砂纸打磨,保证不平行度误差控制在 0.02 mm 范围内。加工好的试件放置于恒温干燥箱中,在 60 ℃ 环境下连续干燥 12 h 后,用保鲜膜包裹密封储存。试验共需制备 4 个煤样,将各煤样分别标号为 Y0、Y1、Y2、Y3。

1.3 煤样分析

将密封好的部分大块煤样送往试验室开展显微组分、工业分析以及镜质组反射率的基础参数测试。

表 1 为煤样的显微组分、工业分析和镜质组反射率参数,可以看出采集的煤样有机组分中镜质组含量最高达,其次是惰质组,壳质组和矿物含量极少,壳质组含量几乎无法测出。镜质组反射率达 2.38%,宏观煤岩组分以亮煤和镜煤为主,宏观煤岩类型以半光亮型为主。该煤层中镜质组以基质镜质组为主,且惰质组含量相对较高,由于微裂隙的组分选择性以及微裂隙密度与惰质组含量的负相关性,导致微裂隙在该煤层中不甚发育,微裂隙的密度相对较低。工业分析结果中,水分和挥发分含量较低,灰分和固定碳含量较高。将试验参数与已知标准比较,符合高阶无烟煤的特征。

表 1 煤样显微组分、工业分析和镜质组反射率参数

Table 1 Coal sample maceral, industrial analysis and vitrinite reflectance parameter

煤样	显微组分体积分数/%				工业分析/%				$R_{o,max}/\%$	煤阶
	镜质组	惰质组	壳质组	矿物	$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$		
新景矿3号	76.9	20.8	0	2.3	1.74	15.87	8.25	74.14	2.38	高阶煤

1.4 试验方案

试验的方案见 表 2, 试验所用的主要设备为 WYS-800 三轴瓦斯渗流试验装置、12CHsPCI-2 型声发射监测系统。将编号为 Y1、Y2、Y3 的 3 个煤样完全浸没于液氮中, 分别进行液氮致裂处理 10、20、30 min, 处理过后的煤样静置, 等待其温度升至室温, 编号为 Y0 的煤样不进行液氮处理, 保持常温干燥与其余 3 个试样形成对照。

表 2 不同致裂时间下的试验方案

Table 2 Experimental scheme under different cracking time

试样编号	液氮致裂 时间/min	围压/MPa	瓦斯压力/MPa	加载方式 及速率
Y0	0	5		
Y1	10	5	1	力加载0.02 kN/s
Y2	20	5		
Y3	30	5		

煤样准备好后, 对 4 个煤样依次进行三轴加载力学渗流及声发射检测试验, 试验中采用控制变量法和对照试验法, 控制围压、瓦斯压力、加载方式和速率保持不变。

试验后分析试验数据, 以液氮处理时间为自变量, 研究不同液氮致裂时间下煤样的应力-应变曲线的变化趋势, 抗压强度、弹性模量、泊松比等力学参数的变化规律, 煤样的初始渗透率、最小渗透率和试验测得最大渗透率等反应渗透性大小的数值变化, 声发射振铃计数、能量、幅值等声发射信号随轴向应变的产生和分布规律, 通过以上试验参数反应液氮致裂不同时间下煤样的致裂效果的优劣。

1.5 试验步骤

1.5.1 液氮处理煤样

试验所用液氮处理装置为不锈钢保温罐, 内径 13 cm, 外径 15.5 cm, 高 15.5 cm, 罐体不与液氮发生反应, 且倒入液氮后不会短时间内全部汽化。具体的液氮致裂煤样步骤为

1) 从液氮储罐中倒出足量的液氮至保温罐, 确保致裂过程煤样始终淹没于液氮中。

2) 将煤样用绳索固定, 缓慢放入保温罐, 使液氮的液面高于煤样上表面 2 ~ 3 cm, 并将保温罐盖好。

3) 等待煤样浸没达到设定时间, 将煤样缓缓提出保温罐并放置于阴凉干燥处等待煤样解冻, 并升至室温。

重复上述操作处理编号 Y1、Y2、Y3 的 3 个煤样, 从而获得液氮致裂时间 10、20、30 min 的 3 个煤样, Y0 煤样不做处理, 保持干燥, 于室温静置。由此本次试验所需煤样处理完毕。

1.5.2 三轴加载力学渗流及声发射试验

三轴加载力学渗流及声发射试验的具体步骤如下:

1) 在处理好的煤样侧面均匀涂抹硅胶放入热缩管内, 然后连同热缩管一并放置于三轴室的试样座上, 用热风枪由上至下烘烤, 使热缩管紧密贴合于煤样表面, 在热缩管的两端捆包猴箍, 在煤样的中部绑好岩石径向应变规。

2) 操纵控制台使三轴室下降, 将三轴室和试样座紧密贴合并用螺丝固定, 进行真空脱气处理 3 h, 然后向三轴室内充填液压油, 将声发射探头粘贴在三轴室外壁设定位置处, 打开声发射系统配套软件, 导入参数。

3) 使用计算机数控程序, 以 0.05 MPa/s 和 0.02 kN/s 的速率交替加载围压和轴压力, 直至围压至 5 MPa, 轴向力达到 5 MPa 轴压对应的稳定力值, 同时开始声发射信号采集, 当压力稳定后打开气路开关, 从试样底座通入 1 MPa 压力的瓦斯气体进行 12 h 吸附解吸。

4) 待煤样吸附解吸平衡后, 测定煤样初始渗透率, 测量完成后继续加载轴向力至下一设定值, 等待吸附解吸平衡后再次测量渗透率, 重复这一步骤直至试样破裂。

按照上述步骤完成所有煤样的三轴加载力学渗流及声发射试验。图 1 为试验装置。



图 1 WYS-800 三轴瓦斯渗流试验装置

Fig.1 WYS-800 triaxial gas seepage test device

2 试验结果与分析

由试验中记录的数据, 绘制出轴向应力-轴向应变曲线以及轴向应力、渗透率、振铃计数-轴向应变曲线, 将不同致裂时间下的煤样的数据曲线进行对比和分析总结出以下特性。

2.1 不同致裂时间煤样的力学渗流特性

2.1.1 不同致裂时间煤样在三轴加载下的力学参数特征

将依据试验方案所做三轴力学渗流试验得到的数据进行整理, 可以得到不同致裂时间煤样在相同三轴条件下进行力学渗流试验的各种力学参数, 见表 3。

表 3 不同致裂时间煤样三轴加载下的参数

Table 3 Parameters of coal samples under triaxial loading with different cracking times

试样编号	致裂时间/min	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
Y0	0	1.855	44.31	4 279	0.110
Y1	10	1.827	25.73	2 499	0.198
Y2	20	1.873	37.74	2 623	0.351
Y3	30	1.869	39.78	3 645	0.175

由表 3 看出, 随着致裂时间的增加, 煤样的抗压强度、弹性模量均呈现出先减小后增大的趋势, 而煤样的泊松比呈现出先增大后减小的趋势。与未经液氮致裂处理的煤样相比, 经过液氮致裂处理的煤样的抗压强度、弹性模量均有所减小, 而泊松比均有所增大。液氮致裂 10 min 时, 煤样的抗压强度和弹性模量降到所有试验组中的最小值, 分别下降了 41.93%、41.60%, 说明该处理方式下, 煤样的力学性能相对最差, 煤样容易受载破坏; 液氮致裂 20 min 时, 煤样的泊松比相对最大, 增大了 219.09%, 说明此时煤样的横向变形能力相对最大。

2.1.2 煤样三轴加载应力-应变曲线分析

对试验中采集到的轴向应力、轴向应变数据进行处理, 使用绘图软件绘制出轴向应力-轴向应变曲线, 并对曲线的变化趋势和阶段进行分析, 所得曲线如图 2 所示。

图 2 表明不同致裂时间煤样在三轴加载过程中轴向应力-轴向应变曲线的变化趋势大致相同, 煤样的压裂过程可以分为 4 个阶段, 即压密阶段、弹性阶段、屈服阶段、破坏阶段<sup>[13]</sup>。

压密阶段: 煤样内部孔裂隙受到应力的作用压密闭合, 应力-应变曲线的斜率不断增大, 大致呈二

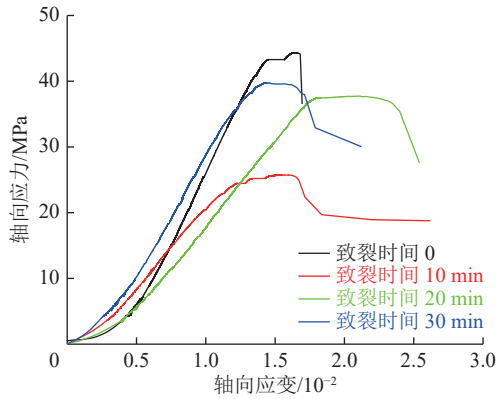


图2 不同致裂时间煤样轴向应力-轴向应变曲线  
Fig.2 Axial stress-axial strain curves of coal samples at different cracking times

次函数关系；经过液氮致裂处理组曲线斜率增速均大于未处理组曲线，导致压密阶段较短，且致裂时间30 min时，曲线斜率增速最大，说明致裂时间越长，煤样内部的原生孔裂隙延展程度更大，受载后更容易被压密。

**弹性阶段：**煤样在应力作用下进一步被压密并产生弹性形变，应力-应变曲线斜率保持不变大致呈一次函数关系；经过液氮致裂处理组弹性阶段曲线斜率均小于未处理组曲线，且斜率随致裂时间增加而增大，说明液氮致裂处理能使煤样的力学性能减弱。

**屈服阶段：**煤样所承载荷逐渐达到弹性极限，此时应力-应变曲线斜率开始迅速减小，当所承载荷超出弹性极限后，煤样产生塑性变形，此时应力-应变曲线斜率接近于0；经过液氮致裂处理组曲线屈服阶段均比未处理组长，致裂时间20 min时，曲线屈服阶段最长；屈服阶段煤样内部在应力作用下产生大量的新裂隙并不断扩展形成局部拉裂或剪裂面，由于液氮致裂时间对泊松比的影响，导致了裂隙扩展的速度有所不同，呈现出致裂时间20 min时，煤样屈服阶段最长。

**破坏阶段：**煤样所承载荷增大至极限载荷，煤样裂隙扩展至外壁，形成贯穿断裂面，煤样沿断裂面破坏，此时应力-应变曲线斜率变为负值并不断减小，应变增大，应力骤降，直至达到某一稳定值，即残余强度；经过液氮致裂处理组破坏时应力骤降程度均比未处理组小，致裂时间10 min时，煤样破坏表现出明显的延性特征，轴向应力维持残余强度，原因是液氮处理会使煤样内部摩擦力和内部结构改变，致裂时间10 min时，内部摩擦力较大，能够维持较长时间的残余强度。

### 2.1.3 煤样三轴加载过程中的渗透性及声发射特征

煤的内部结构可视为多孔介质，其渗透性大小主要是由孔隙度及其内部的压差决定的。在试验中，当轴压与围压加载至5 MPa时，从试样的下端通入瓦斯气体，上端与大气连通，在压差及密封的条件下，瓦斯气体会从试样的内部流过，根据吸附解吸平衡时测得的瓦斯气体流量及气体压力等参数计算得出试样的渗透率，其计算公式<sup>[14]</sup>如下：

$$k = \frac{2QP_0\mu L}{(P_1^2 - P_2^2)A} \quad (1)$$

式中： $k$ 为煤岩渗透率， $10^{-15} \text{ m}^2$ ； $Q$ 为瓦斯流量， $\text{cm}^3/\text{s}$ ； $P_0$ 为大气压，取0.1 MPa； $P_1$ 为通入试样的气体压力，MPa； $P_2$ 为流出试样的气体压力，MPa； $\mu$ 为瓦斯动力黏度， $\text{MPa}\cdot\text{s}$ ； $L$ 为煤样高度，cm； $A$ 为煤样横截面积， $\text{cm}^2$ 。

为了更好的将煤样的力学渗流特性和声发射特性对应，绘制了图3不同致裂时间煤样轴向应力、渗透率、振铃计数-轴向应变曲线。

从图3中可以看出液氮致裂不同时间后，煤样在三轴加载过程中的渗透率变化趋势相同均呈U型变化，即先减小后增大，在煤样压裂4个阶段渗透率的变化呈现出相同的特点，渗透率的大小与煤样的损伤程度有着直接的关系。

表4中测量了不同致裂时间煤样特定渗透率参数，经过液氮致裂10、20、30 min后，煤样的初始渗透率与液氮致裂初始时相比增大了86.67%、106.67%、119.05%。煤样的压密过程从压密阶段开始至弹性阶段中期结束，整个压密过程煤样的渗透率持续减小，在弹性阶段中期，出现曲线的拐点，即煤样渗透率达到最小值，致裂时间10、20、30 min时，煤样的最小渗透率比未致裂煤样增大了150%、225%、437.5%，这源于液氮致裂产生的裂隙为不可逆损伤，裂隙难以被完全压密，裂隙扩展程度越大，压密的程度越低。从拐点开始，煤样渗透率开始逐渐增大，此时煤样内部开始产生新裂隙，当进入屈服阶段，煤样的渗透率开始陡然增大，说明内部已将形成大量新裂隙，并形成连通的瓦斯流动通道，在屈服阶段测得渗透率最大值，致裂时间10、20、30 min时，煤样试验测得最大渗透率比未处理时增大17.71%、44.28%、146.49%。在破坏阶段煤样的瓦斯渗流过程已经结束，此时测得渗透率的数量级已经改变，失去测量意义。通过对比特定渗透率参数，说明液氮致裂时间对煤样三轴加载过程中煤样的渗透率的影响显著，渗透率随致裂时间的增加而增大，由传热学理论可



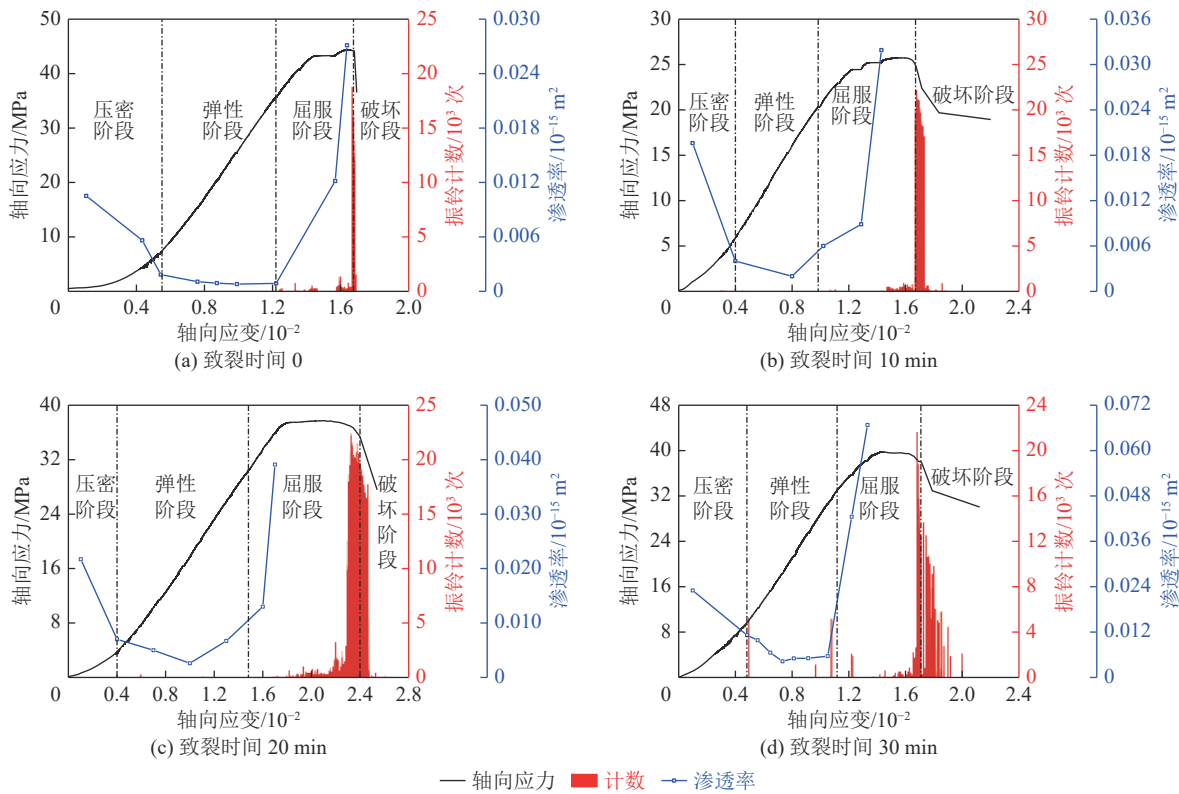


图3 不同致裂时间煤样轴向应力、渗透率、振铃计数-轴向应变曲线

Fig.3 Axial stress, permeability, ring count - axial strain curves of coal samples at different cracking times

以推断,煤样的渗透率会随着致裂时间的增大而稳定,稳定值小于未处理煤样的渗透率。

表4 不同致裂时间下煤样的特定渗透率

Table 4 Specific permeability of coal samples at different cracking time

试样编号	致裂时间/min	初始渗透率/ $10^{-15} \text{ m}^2$	最小渗透率/ $10^{-15} \text{ m}^2$	试验测得最大 渗透率/ $10^{-15} \text{ m}^2$
Y0	0	0.0 105	0.0 008	0.0 271
Y1	10	0.0 196	0.0 020	0.0 319
Y2	20	0.0 217	0.0 026	0.0 391
Y3	30	0.0 230	0.0 043	0.0 668

声发射振铃计数参数间接反应了煤样在三轴加载过程中孔裂隙的产生时间和剧烈程度。在压密阶段和弹性阶段前期,煤样内部被压密,孔裂隙闭合,新裂隙产生较少,因此声发射不活跃,产生的信号很少,仅在致裂时间 30 min 时的煤样,才能采集到明显的振铃计数数据。当进入屈服阶段,由于煤样塑性变形产生大量的新裂隙并不断扩展,煤样损伤严重,此过程中声发射事件逐渐增多,且信号产生密集,经液氮致裂煤样在屈服阶段的声发射事件均比未经致裂煤样多。在破坏阶段前后,煤样内部结构产生瞬间剧烈形变,且裂隙的产生和扩展十分频繁,因此声

发射事件往往较多,振铃计数的峰值也存在于破坏阶段前后,经过液氮致裂煤样的振铃计数峰值均大于 20 000 次。

3 煤样损伤与增透的作用机理

煤是由不同的矿物颗粒所组成的非均质体,组成煤的各种矿物颗粒的热膨胀系数各不相同。当液氮沿钻孔注入煤层,可在短时间内迅速吸热汽化,使煤层温度急剧降低。矿物颗粒之间存在约束,即使受温度降的影响,煤体内各种矿物颗粒也不能按各自固有的热膨胀系数随温度变化而自由变形,其中变形大的受压缩,变形小的受拉伸,由此在煤中形成一种由温度引起的热应力。热应力最大值往往发生在矿物颗粒的边界处,如果此处的热应力达到或超过煤的强度极限(抗拉强度),则沿此边界面的矿物颗粒之间的联接断裂,产生微裂隙,随着温度梯度的增加,这些裂隙扩展形成宏观裂隙,煤体的渗透率大幅增加<sup>[15]</sup>。

相关研究表明,无烟煤相较低变质程度煤,其基本结构单元中凝聚芳香核的数量增加,主要由稠化芳香核组成,煤的结构单元排列整齐,连接紧密,组分颗粒间的连接更加坚固,具有大的抗拉强度,迫使连接发生断裂所需要的热应力更大,致裂的难度也

更高,以无烟煤为研究对象更具有研究意义。温度降是热应力和渗透率改变的主要驱动因素,对于高阶无烟煤,提升液氮处理温度降能够直接有效的提高液氮处理对无烟煤的致裂增透效果<sup>[6]</sup>。液氮致裂处理产生的温度降变化显然与液氮致裂时间有关,因此将在现存关系的基础上,引入致裂时间变量,并推导出与之相关的计算公式。

### 3.1 煤样平均温度降的计算公式

试验制备的煤样均为标准圆柱试件浸没于液氮中进行低温致裂所得,根据弗兰克<sup>[16]</sup>传热学著作中的知识,热量的传递过程可以简化为流体和固体之间的对流换热及圆柱体内部的热传导两个过程。为了便于理论推导和计算,将煤样性质简化为各向同性、均质且传热学性能不随温度而产生变化。

液氮处理前,煤样处于室温环境,液氮的沸点为 77 K,当把煤样浸入液氮时,煤样表面温度为 293 K,远远大于液氮的沸点,液氮在固液交界面上发生沸腾换热,定义过热温度为

$$\Delta T_e = T_s - T_{\text{sat}} \quad (2)$$

此时  $\Delta T_e = 216$  K,由许建俊<sup>[17]</sup>的研究得出,不同情况下液氮的沸腾曲线中的莱顿弗罗斯特点对应的平均过热温度  $\Delta \bar{T}_e = 26.8$  K,因此试验中液氮处于膜态池内沸腾换热状态,液氮与煤样表面之间的对流换热系数主要由氮气蒸汽膜内的沸腾换热系数和辐射换热系数决定,本试验煤样表面温度  $T_s = 293$  K,其温度远小于辐射换热的影响临界温度 573 K,因此液氮与煤样表面间的对流换热系数仅计算沸腾换热系数,计算时取液氮的温度  $T_\infty$  为 77 K,蒸汽的物性要用膜温:

$$T_f = \frac{T_s + T_{\text{sat}}}{2} \quad (3)$$

此时  $T_f$  为 185 K。

适用于直径为  $D$  的圆柱体上的膜态沸腾换热关系式:

$$\bar{h}_{\text{conv}} = C \left[ \frac{\lambda_v^3 \rho_v (\rho_l - \rho_v) g (h_{fg} + 0.8 c_{p,v} \Delta T_e)}{\mu_v D \Delta T_e} \right]^{0.25} \quad (4)$$

式中:  $\bar{h}_{\text{conv}}$  为液氮膜态沸腾换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $\lambda_v$  为氮气的导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $D$  为煤样直径,  $\text{m}$ ;  $C$  为常数,圆柱体取 0.62;  $\rho_v$  为氮气的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\rho_l$  为液氮的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$  为重力常数,  $9.8 \text{ m/s}^2$ ;  $h_{fg}$  为液氮的汽化潜热,  $\text{J/kg}$ ;  $c_{p,v}$  为氮气的定压比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\mu_v$  为氮气的动力黏度系数,  $(\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2$ 。

通过查表可对相关系数进行取值,  $T_\infty = 77$  K 时,  $\rho_l = 808.3 \text{ kg/m}^3$ ,  $h_{fg} = 199.176 \times 10^3 \text{ J/kg}$ ;  $T_f = 185$  K 时,

$\rho_v = 1.8244 \text{ kg/m}^3$ ,  $\lambda_v = 0.0171 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,  $c_{p,v} = 1.044 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,  $\mu_v = 120.97 \times 10^{-7} (\text{N} \cdot \text{s})/\text{m}^2$ ; 代入数值计算,最终得到  $\bar{h}_{\text{conv}} = 570.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

本试验研究的对象为圆柱体在对流边界条件下的一维瞬态导热问题,一般的研究方法为集总热容法,为了判断是否满足使用集总热容法的条件,需要计算传热过程中的 Biot 数,根据 Biot 数计算公式:

$$Bi = \frac{h L_c}{\lambda} \quad (5)$$

式中:  $h$  为对流换热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ;  $L_c$  为定性长度,对于圆柱体为半径,  $\text{m}$ ;  $\lambda$  为煤样的导热系数,取  $0.61 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

经过计算得到煤样的  $Bi$  为 23.38,远大于适用集总热容法的条件 0.1,因此需要进行空间效应的分析。

建立圆柱坐标系,基于前文简化条件,可以列出煤样内部的能量平衡关系式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (6)$$

为了解这个偏微分方程需要给出一个初始条件和两个边界条件,其中初始条件为

$$t = 0; T = T_i, 0 \leq r \leq R \quad (7)$$

边界条件为:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = 0, t \geq 0 \quad (8)$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = h(T - T_\infty) \quad (9)$$

式中:  $t$  为致裂时间,  $\text{s}$ ;  $T$  为煤样内部任意一点的瞬时温度,  $\text{K}$ ;  $T_i$  为煤样初始时刻温度,  $\text{K}$ ;  $R$  为煤样半径,  $\text{m}$ ;  $\alpha$  为煤样的热扩散系数,其值为煤样导热系数  $\lambda$  与煤样密度  $\rho$  及比热容  $c$  的比值,取  $5.467 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ 。为了便于计算,引入过余温度  $\theta$ :

$$\theta = T - T_\infty \quad (10)$$

该因变量的无量纲形式为

$$\theta^* = \frac{\theta}{\theta_i} = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad (11)$$

$r$  的无量纲形式为

$$r^* = \frac{r}{R} \quad (12)$$

引入另一个描述瞬态导热问题特性的参数,即傅里叶数  $Fo$ :

$$Fo = \frac{at}{L_c^2} \quad (13)$$

对于无限长圆柱,在  $Fo > 0.2$  时,即可求得近



似解:

$$\theta^* = C_1 \exp(-\zeta_1^2 Fo) J_0(\zeta_1 r^*) \quad (14)$$

从顾祥红<sup>[18]</sup>的研究可知,圆柱体平均温度始终等于某一点处瞬时温度时的坐标位置,即 $\bar{\theta} = \theta_{r^*=0.695}^*$ ,式中 $J_0(x)$ 为第一类贝塞尔函数, $\zeta_1$ 为下面的超越方程的根:

$$\zeta_1 \frac{J_1(\zeta_1)}{J_0(\zeta_1)} = Bi \quad (15)$$

其值可查表取得,当 $Bi=23.38$ 时, $C_1=1.595$ , $\zeta_1=2.304$  rad;查第一类贝塞尔函数表可得此时 $J_0(\zeta_1 r^*)=0.4549$ 。代入数据后,可得平均过余温度的表达式为

$$\bar{\theta} = \theta_{r^*=0.695}^* = 0.7255 \exp(-0.002328t) \quad (16)$$

经过变换可以求得煤样的平均温度降与致裂时间的关系式:

$$\Delta \bar{T} = -156.7 \exp(-0.002328t) + 216 \quad (17)$$

### 3.2 不同致裂时间下产生的热应力

煤样在经过液氮致裂处理后,其内部因温度降的迅速升高而产生逐渐增大的热应力,从康健<sup>[19]</sup>的著作中可以得出,煤样内部各组分相互约束不同自由变形而产生的平均热应力公式如下:

$$\bar{\sigma} = \alpha \delta E \Delta \bar{T} \quad (18)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为平均热应力,MPa; $\alpha$ 为煤样线膨胀系数,取 $6.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ;  $E$ 为煤样的弹性模量,取未经液氮致裂处理煤样的弹性模量4279 MPa。

由式(17)、式(18)对致裂时间进行等距取值计算,将计算数据整理并作图可得煤样平均温度降、热应力-致裂时间曲线,如图4所示。

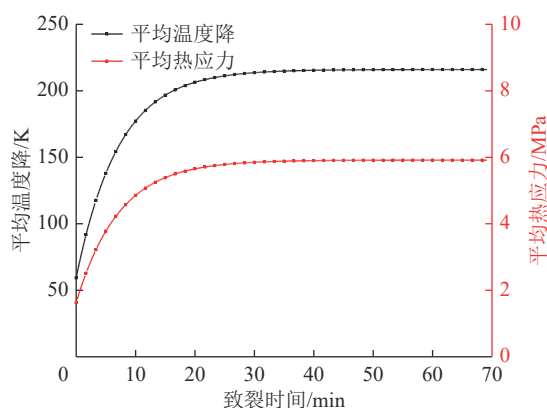


图4 煤样平均温度降、平均热应力-致裂时间曲线

Fig.4 Average temperature drop and average thermal stress-cracking time curves of coal samples

由图4可知,液氮致裂处理煤样的平均温度降由0开始逐渐递增至最大温度降216 K,液氮处理初期增速较大,整个处理过程平均温度降增速不断衰

减,30 min后平均温度降增速接近于0,煤样在69 min后平均温度降已达到最大值并保持不变,说明煤样内部已经达到液氮温度77 K。

试验煤样经过巴西劈裂试验测得抗拉强度为1.52~2.01 MPa,当煤样产生的热应力超过其抗拉强度时,由于应力集中,内部已有的孔隙破裂、裂隙延伸,新裂隙在拉应力的作用下发育。随致裂时间的增加,煤样的平均热应力先增大后趋于稳定,增速不断减小至0,最大平均热应力可达5.915 MPa;致裂时间10、20、30 min时,所对应的平均热应力 $\bar{\sigma}_{10}$ 、 $\bar{\sigma}_{20}$ 、 $\bar{\sigma}_{30}$ 为4.853、5.652、5.850 MPa,均已大于煤样的抗拉强度。结合不同致裂时间煤样在三轴加载过程中的声发射数据可以看出,致裂时间增加影响了煤样内部平均热应力的大小,从而影响了孔裂隙的发育程度,达到煤样增透的目的<sup>[20]</sup>。

### 3.3 致裂时间对煤样渗透率的影响

从表3中可以看出煤样经过不同致裂时间处理后的初始渗透率的变化趋势,与平均温度降的变化趋势大致相同,前文已经推导出有关平均温度降随致裂时间变化的表达式,可假定其余条件不变时,煤样初始渗透率与煤样平均温度降之间呈线性关系,设定以平均温度降为中间变量的拟合公式:

$$K = A \Delta \bar{T} + B \quad (19)$$

式中: $A$ 、 $B$ 为拟合参数, $K$ 为煤样初始渗透率;利用式对初始渗透率的数据进行拟合,通过Origin软件进行拟合的拟合结果如图5所示。

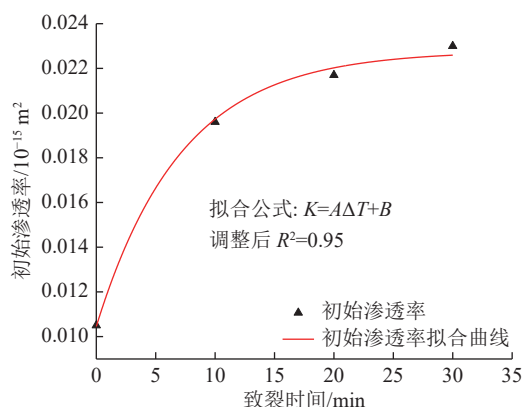


图5 液氮致裂煤样初始渗透率与致裂时间的关系

Fig.5 Relationship between initial permeability and cracking time of coal samples induced by liquid nitrogen

拟合出参数 $A$ 的值为 $-7.86 \times 10^{-5}$ ,参数 $B$ 的值为 $5.79 \times 10^{-3}$ ,通过整理可得出渗透率随致裂时间变化的表达式:

$$K = -0.012324 \exp(-0.002328t) + 0.022778 \quad (20)$$

可靠性参数  $R^2=0.99$ , 说明初始渗透率与煤样平均温度降之间的线性关系成立, 由此推出初始渗透率与致裂时间之间呈负指数分布关系。

## 4 结 论

1) 液氮致裂改变了煤样原本的力学性能, 煤样的抗压强度和弹性模量随致裂时间的增加呈现出先减小后增大趋势, 煤样的泊松比呈现出先增大后减小的趋势。煤样三轴加载时轴向应力-轴向应变曲线的阶段性演化具有明显差异, 与力学参数的改变相关。

2) 煤样渗透率的大小与煤样的损伤程度直接相关, 不同致裂时间煤样在三轴加载过程中的渗透率均呈 U 型变化, 煤样的初始渗透率、最小渗透率、试验测得最大渗透率随致裂时间的增加而增大, 致裂 30 min 时, 增幅分别为 119.05%、437.5%、146.49%; 煤样三轴加载过程中, 压密及弹性阶段的声发射不活跃, 声发射信号密集产生于屈服阶段和破坏阶段, 致裂后煤样的声发射振铃计数峰值产生于破坏点附近, 均大于 20 000 次。

3) 煤样与液氮之间的膜态沸腾换热系数为  $570.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , 煤样平均温度降与致裂时间相关, 对平均热应力和初始渗透率起主导作用, 致裂 30 min 时煤样内部产生的平均温度降可达 213.63 K, 平均热应力可达 5.850 MPa。

4) 液氮处理后煤样的初始渗透率与平均温度降之间呈线性关系, 与致裂时间呈负指数分布关系。改变参数取值, 可推广至其他类似处理的煤样或实际生产评估。

## 参考文献(References):

- [1] 孙海涛, 舒龙勇, 姜在炳, 等. 煤矿区煤层气与煤炭协调开发机制模式及发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(12): 1-13.  
SUN Haitao, SHU Longyong, JIANG Zaibing, *et al.* Progress and trend of key technologies of CBM development and utilization in China coal mine areas[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(12): 1-13.
- [2] 王登科, 张 平, 刘淑敏, 等. 温度冲击下煤层内部孔隙结构演化特征试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3395-3403.  
WANG Dengke, ZHANG Ping, LIU Shumin, *et al.* Experimental study on evolutionary characteristics of pore-fissure structure in coal seam under temperature impact[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(12): 3395-3403.
- [3] 唐世斌, 罗 江, 唐春安. 低温诱发岩石破裂的理论及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1596-1607.  
TANG Shibin, LUO Jiang, TANG Chunan. Theoretical and numerical study on the cryogenic fracturing in rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(7): 1596-1607.
- [4] 田苗苗, 张 磊, 薛俊华, 等. 液氮致裂煤体技术研究现状及展望[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(7): 191-198.  
TIAN Miaomiao, ZHANG Lei, XUE Junhua, *et al.* Study and prospect of liquid nitrogen fracturing coal technology[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(7): 191-198.
- [5] AKHONDZADEH H, KESHAVARZ A, AWAN F U R, *et al.* Liquid nitrogen fracturing efficiency as a function of coal rank: A multi-scale tomographic study[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 95: 104177.
- [6] 卢 硕, 张 磊, 薛俊华, 等. 液氮溶浸作用对不同煤阶煤样渗流特性的影响[J]. 煤炭学报, 2020, 45(5): 1835-1844.  
LU Shuo, ZHANG Lei, XUE Junhua, *et al.* Influence of liquid nitrogen immersion on seepage characteristics of different rank coal samples[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(5): 1835-1844.
- [7] LI B, ZONG C, HUANG L, *et al.* Study on the influence of liquid nitrogen cold soaking on the temperature variations and seepage characteristics of coal samples with different moisture contents[J]. Geofluids, 2021: 8924016.
- [8] ZHAO D, WANG Q, LI D, *et al.* Experimental study on infiltration and freeze-thaw damage of water-bearing coal samples with cryogenic liquid nitrogen[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 60: 24-31.
- [9] 陈 帅. 液氮致裂烟煤裂隙结构演变及渗流特性试验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.  
CHEN Shuai. Characterization of bituminous coal fracture structure and permeability evolution by liquid nitrogen fracturing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [10] 张春会, 耿 哲, 徐 刚, 等. 液氮冻融循环作用下饱水煤样力学特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(10): 218-224.  
ZHANG Chunhui, GENG Zhe, XU Gang, *et al.* Experimental study on mechanical properties of saturated coal samples subjected to freezing-thawing cycles of liquid nitrogen[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(10): 218-224.
- [11] 张路路, 李 波, 张 强, 等. 液氮冷浸煤岩孔隙损伤和渗透率演化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S2): 3938-3946.  
ZHANG Lulu, LI Bo, ZHANG Qiang, *et al.* Study on pore damage and permeability evolution properties of coal rock caused by liquid nitrogen soaking[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S2): 3938-3946.
- [12] 张 磊, 陈 帅, 薛俊华, 等. 液氮致裂烟煤渗透率及其应力敏感性研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(2): 401-408.  
ZHANG Lei, CHEN Shuai, XUE Junhua, *et al.* Permeability of bituminous coal and its stress sensitivity under liquid nitrogen fracturing[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(2): 401-408.
- [13] 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.

- [14] 王 浩. 低温致裂煤体力学演化与数值模拟研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021.  
WANG Hao. Research on mechanical evolution and numerical simulation of low temperature fracturing coal[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [15] 魏建平, 孙刘涛, 王登科, 等. 温度冲击作用下煤的渗透率变化规律与增透机制[J]. 煤炭学报, 2017, 42(8): 1919–1925.  
WEI Jianping, SUN Liutao, WANG Dengke, *et al.* Change law of permeability of coal under temperature impact and the mechanism of increasing permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(8): 1919–1925.
- [16] 弗兰克P. 英克鲁佩勒, 大卫P. 德维特, 狄奥多尔L. 伯格曼, 等. 传热和传质基本原理[M]. 第6版. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [17] 许建俊, 华泽钊, 刘宝林, 等. 用淬冷法确定饱和液氮中的池沸腾热流密度曲线[J]. 上海理工大学学报, 1998, 20(2): 11–15.  
XU Jianjun, HUA Zezhao, LIU Baolin, *et al.* The pool boiling heat flux curve in saturated liquid nitrogen was determined by quenching method[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 1998, 20(2): 11–15.
- [18] 顾祥红. 无限长圆柱非稳态导热平均温度坐标位置求解[J]. 大连交通大学学报, 2010, 31(2): 101–103.  
GU Xianghong. Coordinate position of mean temperature analysis for infinite cylinder under unsteady-state conduction[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2010, 31(2): 101–103.
- [19] 康 健. 岩石热破裂的研究及应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2008.
- [20] 王春霞, 张学博, 卢方超. 基于核磁共振与应力分析的液氮冷浸致裂煤岩研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(11): 156–163.  
WANG Chunxia, ZHANG Xuebo, LU Fangchao. Study on coal cracking under liquid nitrogen soaking based on nuclear magnetic resonance and stress analysis[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(11): 156–163.