

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.0754

不同含水率煤体液氮致裂渗透率变化规律 及应力敏感性分析

张磊^{1,2}, 田苗苗^{1,2}, 卢硕^{1,2}, 李明雪³, 李菁华^{1,2}

(1. 中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;
3. 中国矿业大学 材料与物理学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 液氮致裂煤体技术是一种新型的煤层增透技术, 含水率、煤阶、温度梯度等因素都会影响液氮的增透作用。其中, 煤体含水率对液氮致裂的增透效果影响尤为显著。为研究含水率对液氮致裂的影响效果和机制, 对含水率分别为 0%、2%、4%及 6%的 4 组煤样进行液氮溶浸处理, 使用渗透率测试仪进行气相渗透率测试, 对不同压力点煤样渗透率及应力敏感性变化规律进行讨论分析。试验结果表明: (1) 在相同围压条件下, 煤体气相渗透率随有效应力的变化趋势整体上符合负指数函数 $k = ae^{-b\sigma} + c$, 拟合后相关指数均大于 0.95; (2) 当有效应力超过一定临界值, 煤体气相渗透率会受克林伯格效应影响, 随有效应力的增大呈现上升趋势; (3) 煤体自身含水率的增加会对液氮致裂效果产生明显促进作用, 最明显的是, 当含水率从 2%提升到 4%时, 煤样液氮致裂前后渗透率增幅从 92.88%增大到 357.12%; (4) 对液氮致裂前后煤样的渗透率进行归一化处理, 发现煤体水分同时具有阻碍渗流的消极作用与提升致裂效果的促进作用, 在水分的复合作用下致裂前后煤样归一化渗透率变化规律比较复杂; (5) 在相同孔隙压力下, 煤体有效应力敏感性随有效应力的增大逐渐减小, 液氮致裂后, 煤体的有效应力敏感性显著提高。

关 键 词: 含水率; 液氮致裂; 渗透特性; 应力敏感性

中图分类号: TU452

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 增刊 1-0107-10

Analysis of permeability variation and stress sensitivity of liquid nitrogen fracturing coal with different water contents

ZHANG Lei^{1,2}, TIAN Miao-miao^{1,2}, LU Shuo^{1,2}, LI Ming-xue³, LI Jing-hua^{1,2}

(1. School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

3. School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: At present, the technology of fracturing coal by liquid nitrogen is a new type of anti-reflection technology of coal seam. Water content, coal rank and temperature gradient all affect the anti-reflection of liquid nitrogen. Among them, water content has a significant effect on the anti-reflection effect of liquid nitrogen cracking. In order to study the effect and mechanism of water content on liquid nitrogen cracking, four groups of coal samples with water contents of 0%, 2%, 4% and 6% were treated by liquid nitrogen leaching respectively, permeability tester is used to test gas phase permeability of coal samples, and the permeability and stress sensitivity of coal samples at different pressure points were discussed and analyzed. Some findings were obtained. (i) Under the same confining pressure, the variation trend of gas phase permeability with effective stress generally accords with negative exponential function $k = ae^{-b\sigma} + c$, and the correlation indexes are all greater than 0.95. (ii) When the effective stress exceeds a certain critical value, the gas permeability of coal sample is affected by Klinkenberg effect and presents an upward trend with the increase of the effective stress. (iii) The increase of water content of coal sample can significantly promote the fracturing effect of liquid nitrogen. The most obvious is that when water content increases from 2% to 4%, the increase of permeability before and after fracturing increases from 92.88% to 357.12%. (iv) The normalized permeability of coal samples before and after liquid nitrogen fracturing is

收稿日期: 2021-05-20

修回日期: 2022-03-09

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52174129); 中国科协“青年人才托举工程”项目 (No.2017QNRC001)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52174129) and the Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2017QNRC001).

第一作者简介: 张磊, 男, 1986 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事绿色开采与智能开采等方面的研究。E-mail: leizhangcumt@163.com

treated, and it is found that coal moisture has both a negative effect of blocking seepage and a promoting effect of improving the fracturing effect. The normalized permeability of coal samples before and after fracturing is complicated under the combined effect of moisture. (v) Under the same pore pressure, the effective stress sensitivity of coal decreases gradually with the increase of effective stress, and it can be significantly improved by liquid nitrogen fracturing.

Keywords: water content; liquid nitrogen fracturing; permeability characteristics; stress sensitivity

1 引言

煤层气作为煤在变质过程中产生的伴生气体^[1-3],在一定浓度下有易燃、易爆的性质,严重威胁煤矿的安全生产,同时煤层气作为燃料具有热值高、可清洁燃烧等优势^[4-5]。作为非常规天然气资源的一种,煤层气的开发利用对国家能源结构优化也有着重要意义^[6-8]。但中国大部分煤层渗透率相对较低,瓦斯抽采率低。现在常在抽采前使用水力压裂技术^[9]对煤层进行增透,压裂效果显著且工艺成熟,但在干旱地区较难实施。近年来,液氮致裂技术因其返排效果好、储层污染小、增产效果明显等优势成为研究热点^[10-11]。将大量低温液氮($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$)注入煤储层快速形成低温区,一方面使煤基质骨架收缩产生收缩应力,另一方面使储层孔裂隙水迅速凝结成冰,体积膨胀产生冻胀力。多种致裂效应复合作用致裂煤储层,促进煤层气的扩散流动进而提高抽采率。

煤体在自然状态下含有不同程度的水分,水分对于液氮致裂煤体起至关重要的作用,研究表明当煤岩内部产生的冻胀应力大于煤岩强度时,煤体内部将产生新裂隙,并发生扩展延伸^[12]。蔡承政等^[13]运用超声波发现饱水煤岩的超声波变化明显大于干燥煤岩。张春会等^[14]利用激光显微镜比较不同饱水度煤样的裂隙扩增量,发现 100%饱水煤样>50%饱水煤样>干燥煤样。闫道成^[15]运用比表面及孔径分析仪和渗透率测试装置发现:不同含水率煤体在液氮冻融后渗透率与含水率呈正相关,但比表面积和微孔体积随含水率呈现先缓慢增加后逐渐减小的趋势。秦雷^[16]运用核磁共振技术发现煤样的中孔和大孔以及可供自由水自由流动的空间在液氮冻融后增大,且与含水率呈正相关。

上述学者的研究都表明水分会增强液氮致裂煤岩的效果。但是,已有研究多聚焦于揭示液氮致裂前后煤岩体孔裂隙特征与力学性质的变化规律,鲜有对煤岩体渗流特性等方面的相关分析。因此,笔者在前人的研究基础上,选用山西阳泉矿生产的无烟煤,开展了不同含水率下煤样的液氮溶浸试验,

着重分析溶浸前后煤体渗流特性与应力敏感性的变化规律,为液氮致裂技术及煤层气增透理论研究提供参考。

2 试验方法

2.1 煤样的挑选和预处理

本次试验所使用圆柱形煤样来自山西省阳泉五矿 15 号煤层井下工作面的同一块原煤,沿垂直方向加工成直径 $\times$ 高度尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,加工误差满足国际岩石力学力学试样标准。15 号煤层位于太原组下部,是井田内最主要煤层,钻孔揭露煤厚最大为 9.23 m ,属复杂结构煤层,煤厚的变异系数为 12.38% 。煤样的显微组分主要为镜质组,变质阶段为 VII 阶段,属无烟煤三号。工业分析结果见表 1,煤样自然含水率为 $0.5\%\sim 4.02\%$,平均值为 1.63% ,可以进行含水率的相关试验。

从钻取得的煤样进一步挑选表面光滑完整、无明显裂隙的作为试验预备煤样后,利用渗流仪器对挑选出来的煤样进行轴向渗流试验,测试其在轴向围压=径向围压(后文统称为围压) $=1\text{ MPa}$,孔隙压力 0.5 MPa 时的渗透率,选择渗透率较小且相近的 4 组煤样(Y1、Y2、Y3、Y4)进行不同含水率煤体液氮致裂渗透率变化规律及应力敏感性分析的试验,渗透率差值小于 $0.15\times 10^{-3}\text{ }\mu\text{m}^2(0.15\text{ mD})$ 。

表 1 煤样工业分析

Table 1 Chemical parameters of sampling coal seam				
水分/%	灰分/%	硫分/%	磷分/%	挥发分/%
0.50~4.02	5.37~37.27	0.77~6.92	0.000 7~0.199 0	3.09~14.35

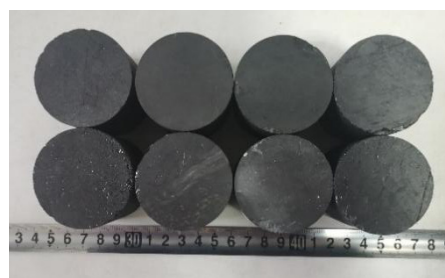


图 1 试验煤样实物图

Fig.1 Coal samples for test

2.2 试验方案

(1) 制备不同含水率煤样

利用真空饱水装置及恒温干燥箱测试煤样的最大含水率, 根据测得各组煤样的最大含水率分别为 5.36%、6.00%、4.06% 及 8.13%, 设计 4 组不同含水率煤样 (0%、2%、4%、6%), 分别对应煤样组别 Y1、Y2、Y3、Y4。具体制取方案: 将各组煤样利用温度为 105 °C 的恒温干燥箱进行完全干燥以及完全浸泡于盛有蒸馏水的真空饱水装置饱水后。继续将煤样放于恒温干燥箱中干燥一定时间, 得到含水率分别为 0%、2%、4% 及 6% 的煤样, 不同含水率煤样制备完成。

(2) 液氮致裂前渗流特性的测试

利用渗透率测试仪利用稳态渗流法对煤样进行渗流测试。试验的孔隙压力与轴围压设计值见表 2。设计规则为瓦斯压力设计值小于围压值 0.25 MPa。渗流试验后的煤样需要迅速放入真空袋中密封保存。

煤体轴向渗透率 k ^[17] 为

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

式中: k 为渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$); Q 为气体流量 (cm^3/s); P_0 为大气压力 (取 0.101 325 MPa); μ 为气体黏度系数 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) (本试验渗流气体采用的是高纯度氮气, $\mu = 0.017\ 805 \text{ Pa} \cdot \text{s}$); L 为煤样高度 (cm); A 为煤样直径 (cm^2); P_1 、 P_2 为系统上游气体压力和下游气体压力值 (MPa) (下游口直接排空, $P_2 = P_0$)。

表 2 渗流试验围压与孔隙压力设计值

Table 2 Design values of confining pressure and inlet pressure in the seepage tests

轴压=围压/MPa	孔隙压力/MPa
2	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75
3	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50, 2.75
4	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50, 2.75, 3.00, 3.50
5	0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25, 2.50, 2.75, 3.00, 3.50, 4.00, 4.50

(3) 液氮冻融处理

将液氮注入杜瓦瓶内, 待液氮稳定后, 将煤样置于杜瓦瓶内, 液氮持续溶浸煤样 15 min, 取出后立即置于真空袋中, 完成液氮冻融处理。

(4) 液氮致裂后渗流特性测试

静止煤样至恢复至室温, 重复步骤 (1), 恢复煤样含水率后, 重复步骤 (2), 完成试验。

3 液氮对不同含水率煤样渗流特性影响规律

3.1 同一煤样液氮致裂前后的渗流结果分析

由于渗流试验中涉及到围压、孔隙压力、渗透率等多个因素, 为了进一步探讨煤样的渗流特性, 故对变量进行统一。引入有效应力这一变量, 对其他因素进行控制讨论。不同煤样在液氮处理前后的渗流特性规律都具有 consistency, 故选择 Y2、Y3 煤样进行讨论。有效应力的计算公式为^[18]

$$\sigma_e = \frac{1}{3}(\sigma_a + 2\sigma_r) - \frac{1}{2}(P_1 + P_2) \quad (2)$$

式中: σ_e 为煤样所受的有效应力 (MPa); σ_a 为轴向压力 (MPa); σ_r 为环向压力 (MPa)。

本试验中渗透率测试仪气体出口直接与大气接通, 即出口压力恒为大气压力。因此, 本文有效应力计算公式可简化为^[19]

$$\sigma' = \sigma - p_1 \quad (3)$$

式中: σ' 为有效应力 (MPa); σ 为围压 (MPa)。

3.1.1 相同孔隙压力

孔隙压力分别为 1 MPa 和 1.5 MPa 下 Y2、Y3 煤样分别在液氮致裂前后相同围压下渗透率随有效应力增大而变化的规律, 如图 2 所示。

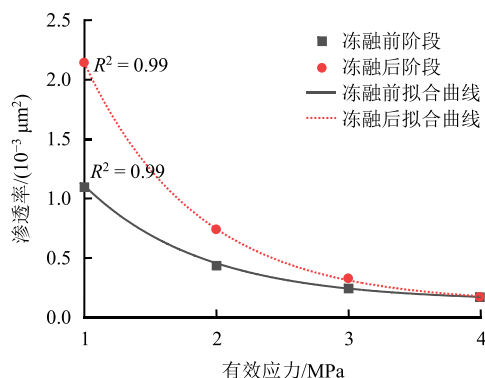
发现在相同孔隙压力条件下, 渗透率随着有效应力的增大逐渐降低, 但降低幅度在逐渐减小, 二者关系符合下式:

$$k = ae^{-b\sigma} + c \quad (4)$$

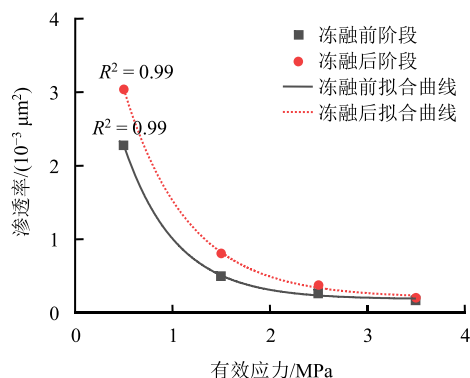
式中: a 、 b 、 c 为拟合参数。

液氮冻融后, 煤样的渗透率提高, 但渗透率增大水平随着有效应力的增大逐渐减小, 特别在有效应力为 4 MPa 时, 渗透率变化程度很小。这是因为在高有效应力作用下, 经液氮致裂产生的孔裂隙受到挤压闭合, 导致渗透率增大不明显。而随着孔隙压力的逐渐增大, 压力气体将孔裂隙重新打开, 此时的气相渗透率测试值较初始状态有明显改观。

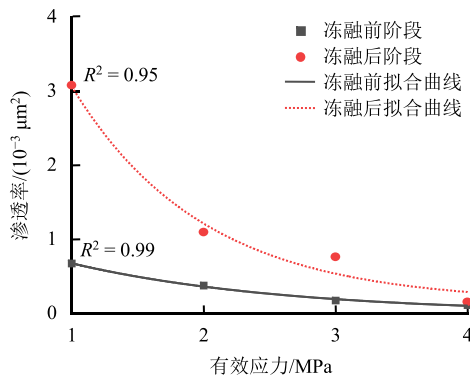
为了初步比较煤体自身含水率对液氮致裂效果的影响, 整理计算图 2 数据得到表 3, 即不同孔隙压力、有效应力下 Y2 和 Y3 煤样致裂前后渗透率增幅。观察表 3 可知, 含水率 4% 的 Y3 煤样液氮致裂效果要明显好于含水率 2% 的 Y2 煤样。在不同孔隙压力、有效应力下 Y3 煤样致裂前后渗透率增幅均大于 Y2。最明显的, 在孔隙压力与有效应力均为 1 MPa 时, Y2 煤样经液氮溶浸处理后渗透率较



(a) Y2 煤样, 孔隙压力 1 MPa



(b) Y2 煤样, 孔隙压力 1.5 MPa



(c) Y3 煤样, 孔隙压力 1 MPa

图2 相同孔隙压力下 Y2、Y3 煤样在液氮处理前后渗透率与有效应力的关系

Fig.2 Relationship between permeability and effective stress of coal samples Y2, Y3 before and after treatment with liquid nitrogen

表3 Y2、Y3 煤样液氮致裂前后渗透率增幅

Table 3 Comparison of permeability increase between coal samples Y2 and Y3 before and after liquid nitrogen fracturing

煤样编号	孔隙压力 /MPa	不同有效应力 (MPa) 下渗透率增幅/%			
		1	2	3	4
Y2	1.0	92.88	64.37	26.85	3.66
	1.5	33.38	61.28	42.86	21.17
Y3	1.0	357.12	193.07	337.14	41.07
	1.5	119.95	208.29	295.31	54.31

初始状态增幅是 92.88%, 这说明煤样中孔裂隙受到水分冻胀与热应力等作用发育明显, 透气性得到较大改观; 而相同应力条件下, Y3 煤样的渗透率增幅更是达到 357.12%, 处理后的煤样渗透率已达到初始状态的 4 倍多, 液氮致裂效果十分显著。而且, 煤样自身含水率从 2% 提升到 4%, 对液氮致裂效果的促进作用非常明显。在实际生产过程中, 可通过适当增加煤储层含水率的方法来提高低温液氮的致裂效果, 从而获得更好的卸压效果。

3.1.2 相同围压

根据 Y2、Y3 煤样液氮致裂前后的轴向渗流试验数据, 绘制得出在相同围压下, 煤样 Y2、Y3 初始及液氮处理后渗透率随有效应力的变化曲线, 如图 3 所示。由图可知, 当围压为 2 MPa 时, Y2 煤样液氮致裂前后、Y3 煤样致裂前的渗透率随有效应力的增大先减小后增大, Y3 煤样致裂后渗透率随有效应力的增大而减小; 当围压为 3、4、5 MPa 时, Y2、Y3 煤样液氮致裂前后, 随有效应力的增大渗透率逐渐减小, 但减小的速率在逐渐减小, 二者趋势也较为符合式 (4)。

煤体气相渗透率测试值除受有效应力的影响外, 还受到克林伯格效应的影响。Somerton^[20]发现渗透率 k 与有效应力 σ 关系符合负指数函数 $k = 1.03 \times 10^{-0.3\sigma}$, 即随着有效应力的增大, 煤体气相渗透率整体呈现下降趋势。但在高有效应力阶段, 由于此时孔隙压力很小, 气体在流动时相邻分子层间动能可以相互转化, 造成管壁处与中心处气体分子层流速不同程度上的均一化, 此时会出现管壁处气体分子层流速不为 0 的现象, 即克林伯格效应。这可以解释部分曲线在有效应力增大到一定数值, 煤体气相渗透率略微增大的现象。在有效应力较小的阶段, 气体分子间碰撞增多, 自由移动受到限制, 克林伯格效应不明显, 此时煤体气相渗透率由有效应力主导, 即随着有效应力的增大不断减小。促使煤体气相渗透率趋势发生改变的有效应力所对应的孔隙压力点被称为临界孔隙压力 (即曲线中极值点对应的孔隙压力值)。

但在围压较大时, 煤体气相渗透率随有效应力的增大呈现只减小不增大的趋势。这是因为受围压增大的影响, 煤体受压缩, 孔隙裂隙空间逐渐变小, 临界孔隙压力减小, 对应的临界有效应力值增大, 渗流试验所设置的有效应力未达到临界值, 故煤体气相渗透率曲线没有出现上升的趋势。

3.2 液氮致裂对不同含水率煤样渗流特性影响

为探究不同含水率煤样液氮致裂渗流特性的影

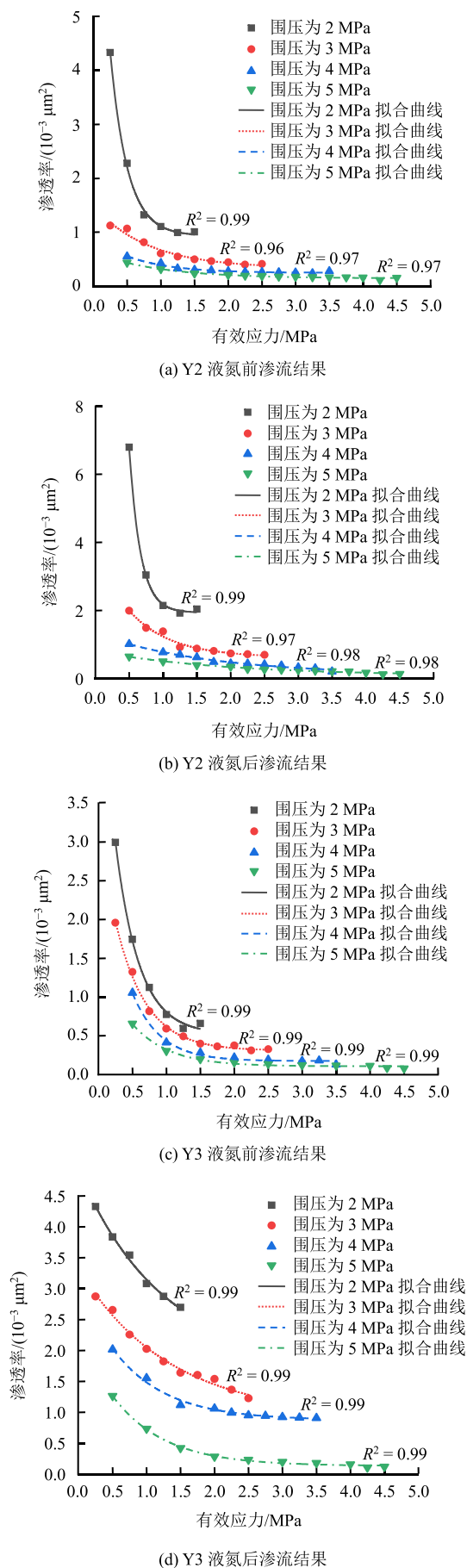


图3 相同围压下 Y2、Y3 煤样液氮致裂前后的渗透结果
Fig.3 Penetration results of coal samples Y2, Y3 before and after treatment with liquid nitrogen

响, 对试验所得煤样的渗透率进行归一化处理, 使用归一化渗透率进行相关的讨论。选择孔隙压力为 1、2 MPa 下, 不同围压时液氮致裂前后渗透率随含水率增大的变化情况, 如图 4、5 所示。选择围压 3、4 MPa 条件下, 不同有效应力时液氮致裂前后渗透率随含水率增大的变化情况, 如图 6、7 所示。

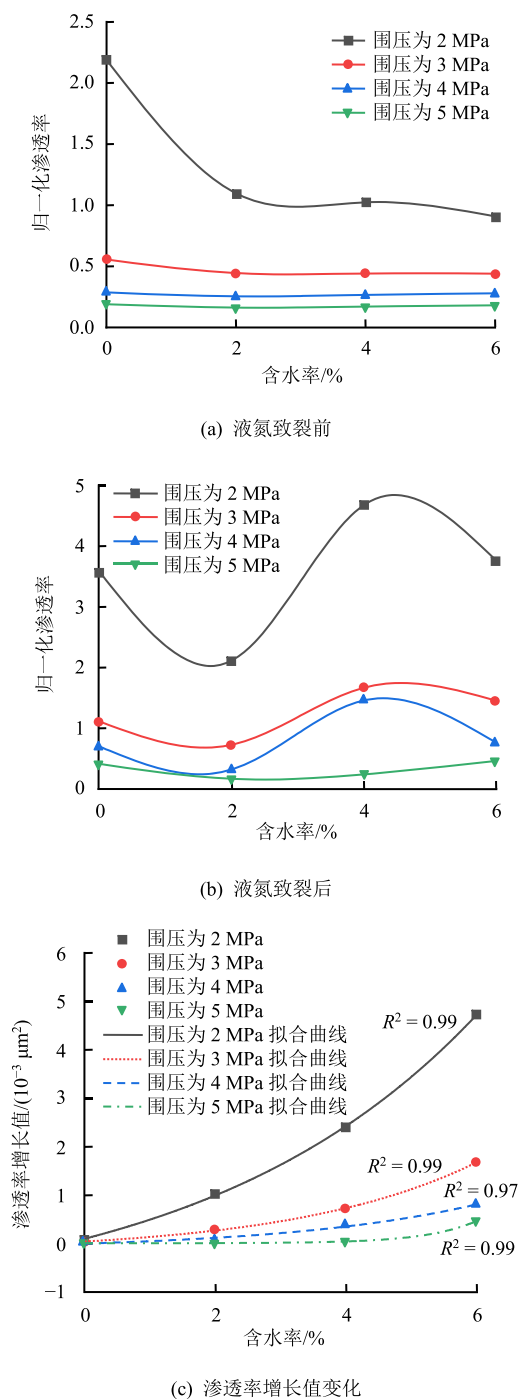


图4 1 MPa 孔隙压力条件下渗透率数值、增长值与含水率的关系

Fig.4 Relationship between permeability value, increase value and water content under the gas pressure of 1 MPa

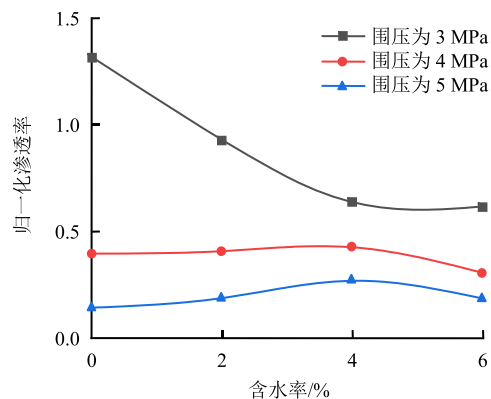
归一化渗透率 k_1 计算公式如下:

$$k_1 = \frac{k}{k_0} \quad (5)$$

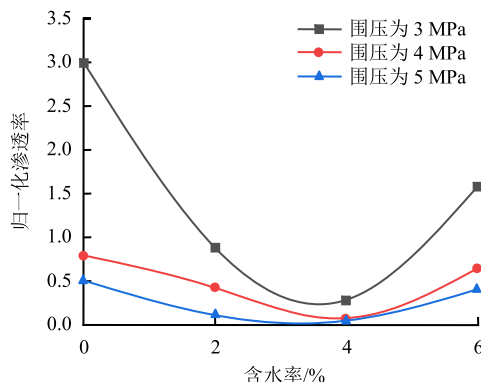
式中： k 为煤样任一状态下的渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)； k_0 为初始状态下煤样的渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$) (本试验中的 k_0 为各煤样在围压 2 MPa、孔隙压力为 0.5 MPa 加载下的原始渗透率)。

渗透率增长值 Δk 计算公式为

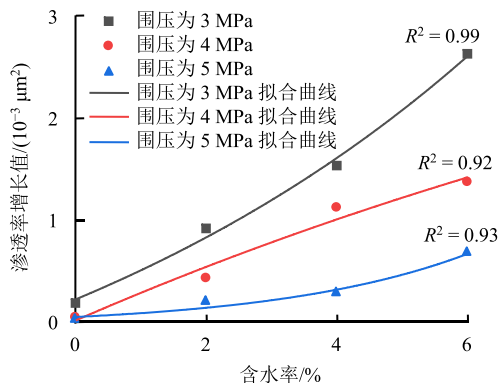
$$\Delta k = k' - k \quad (6)$$



(a) 液氮致裂前



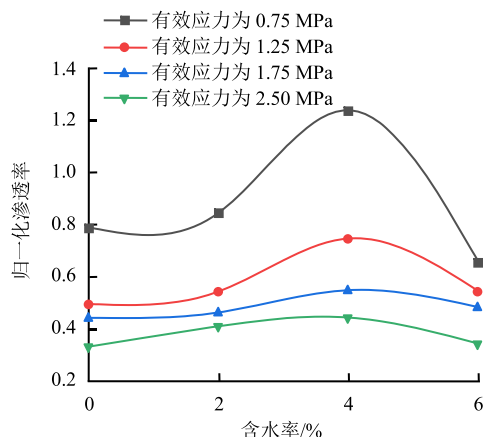
(b) 液氮致裂后



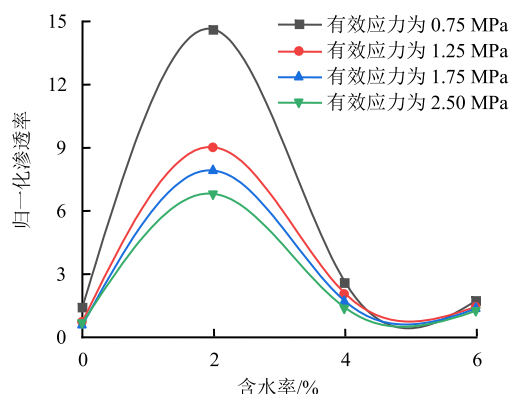
(c) 渗透率增长值变化

图 5 2 MPa 孔隙压力条件下渗透率数值、增长值与含水率的关系

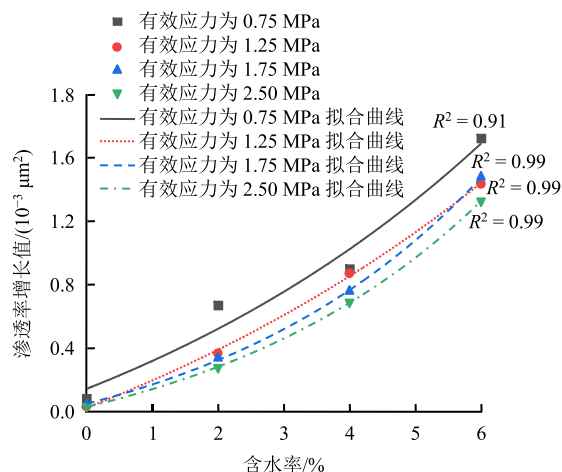
Fig.5 Relationship between permeability value, increase value and water content under the gas pressure of 2 MPa



(a) 液氮致裂前



(b) 液氮致裂后



(c) 渗透率增长值变化

图 6 3 MPa 围压条件下渗透率与含水率的关系
Fig.6 Relationship between permeability and water content under confining pressure of 3 MPa

式中： k 为初始状态下煤样的渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)； k' 为相同围压、孔隙压力下液氮致裂后煤样的渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)。

3.2.1 相同围压

图 4(a)、5(a)为液氮致裂前归一化渗透率变化情况，图 4(b)、5(b)为液氮致裂后归一化渗透率变化

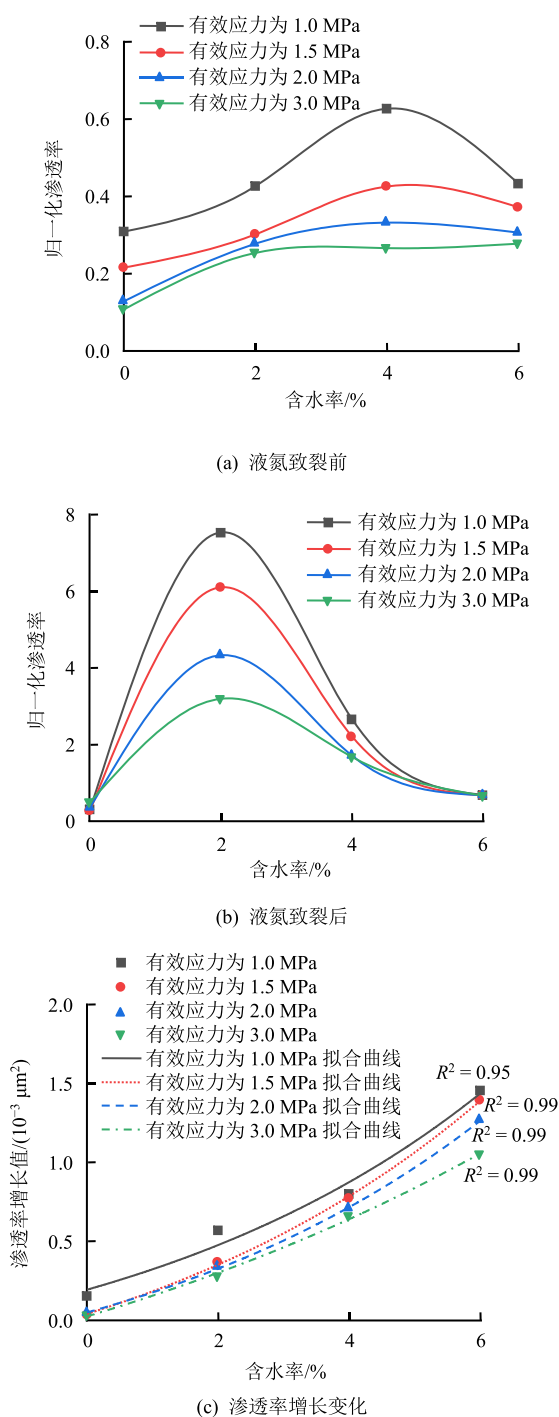


图 7 4 MPa 围压条件下渗透率与含水率的关系
Fig.7 Relationship between permeability and water content under confining pressure of 4 MPa

情况,图 4(c)、5(c)为相同围压下液氮致裂前后渗透率增长值与含水率关系。由图 4(a)、5(a)可知,在孔隙压力 1 MPa 下,相同围压加载时,归一化渗透率随含水率的增大而减小;在孔隙压力 2 MPa,围压 3 MPa 时,不同含水率煤样的渗透率在液氮致裂前随含水率的增大而减小,在围压 4、5 MPa 时,渗透率随含水率的增大先增加后减小,峰值在含水率 4%处。由图 4(b)、5(b)可知,在孔隙压力为 1 MPa

时,相同围压加载时,不同煤样在液氮致裂后渗透率随含水率的增大皆先减小后增大再减小;而孔隙压力为 2 MPa 时,渗透率随含水率的增大呈现先减小后增大的趋势,含水率 4%为最低点。由图 4(c)、图 5(c)可知,不同煤样的渗透率在液氮致裂后的增长值随含水率的增大而增大,且渗透率增长值随含水率呈指数形式增加。具体原因见后文讨论。

3.2.2 相同有效应力

图 6(a)、7(a)为煤样液氮致裂前归一化渗透率变化情况,图 6(b)、7(b)为液氮致裂后归一化渗透率变化情况,图 6(c)、7(c)为相同有效应力下液氮致裂前后渗透率增长值与含水率的关系。由图 6(a)、7(a)可知,在围压 3、4 MPa 时,相同有效应力加载下,渗透率在液氮致裂前随含水率的增大先增大后减小,峰值也在含水率 4%处。由图 6(b)、7(b)可知,围压为 3 MPa 时,不同煤样在液氮致裂后渗透率随含水率的增大先增大后减小再增大,最高点为含水率 2%的位置;围压为 4 MPa 时,不同煤样在液氮致裂后渗透率随含水率的增大先增大后减小,拐点和最高点为含水率 2%的位置。由图 6(c)、7(c)可知,在相同有效应力加载下,不同煤样的渗透率在液氮致裂后的增长值随含水率也呈指数形式增加。

3.3 讨论

从上述分析可见,水分对液氮致裂煤体的渗流特性的影响比较复杂,存在水分对煤体气相渗透率测试的抑制与对液氮致裂效果的促进共两个方面上的影响。一方面,煤样内部水分会从吸附和渗流上对煤体的渗透率造成影响。从吸附角度来说,试验中利用真空饱水装置控制煤样的含水率,主要改变的是煤样的游离水的浓度,进行轴向渗流试验时由于水分子比 N_2 分子具有更强的极性,二者产生“竞争吸附”作用,大量 N_2 被吸附,同时也会导致煤体的表面能降低,可压缩性减小。从渗流的角度来说,煤体内水分会阻塞渗流通道,同时也会造成煤体骨架吸水膨胀,进而导致其渗流能力的下降。另一方面,水分也会对液氮致裂煤体的增透效果造成积极影响,从而对煤体渗透率提升产生促进作用。据研究,水分在液氮致裂过程中主要起 3 个方面的促进效应:①煤体内的水分在液氮低温作用下凝结成冰,产生的冻胀压力高于煤颗粒间链接的最大抗拉强度便会使裂隙得以扩展;②煤体内的自由水先于游离水结冰,未冻水膜在虹吸作用下发生迁移,在水冰界面处冻结成冰,冰棱镜体积进一步增大,促进煤体开裂;③未冻结的水会在冻胀力作用下在煤体内部产生一定的孔隙水压力,水压促使裂隙发育。且

对于上述 3 个效应,水分对液氮增透煤体的作用与煤体自身含水率成正相关。

故上述图中煤样渗透率在液氮致裂前随含水率增大呈现先增大后减小的趋势,因为当煤样含水率低于临界含水率时,煤体孔隙仍有大量“吸附位”吸附大量 N_2 ,同时, N_2 渗流带走部分水分,此时水分对煤样渗透率的阻碍作用较小。含水率越大,吸附的 N_2 就越少,故此时表现为渗透率随含水率的增大而增大;而当含水率高于临界含水率时,煤基质内充满较多水分,吸附作用减弱,同时水分封闭部分细小的渗流通道,形成水锁效应对流体渗流造成阻碍作用,且煤体自身含水率越大,此阻碍作用就越明显,故此时表现为渗透率随含水率的增大而减小。而在孔隙压力 1、2 MPa,围压 3 MPa 时,渗透率随煤样的含水率而逐渐减小,这是因为煤体所受应力相对较小,此时主要表现为水分对渗流的阻碍作用。

此外,上文中煤样经液氮溶浸后的渗透率随含水率增大呈现出的多种变化趋势同样是水分带来的复杂影响。例如,液氮致裂后,孔隙压力为 1 MPa 时,恒定围压下,煤体的归一化渗透率随含水率的增大呈现先减小后增大再减小的趋势,是因为在含水率为 2% 以及 6% 时水分对煤样渗透率的负面阻碍作用大于水分对液氮致裂煤体的正面增透作用,在含水率为 4% 时水分对煤样渗透率的负面阻碍作用

小于对液氮致裂煤体的正面增透作用。

4 液氮对不同含水率煤样应力敏感性影响分析

观察试验数据发现煤体渗透率随有效应力的增大按负指数函数规律减小。将有效应力敏感性系数作为判断一定瓦斯压力下,渗透率在单位有效应力增量作用下的变化程度。有效应力敏感性系数越大,表明有效应力变化对渗透率影响更明显。有效应力敏感性系数计算公式为^[21]

$$C_e = \frac{k_{i+1} - k_i}{k_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中: C_e 为有效应力敏感性系数; k_0 为相同瓦斯压力条件下,第 1 个有效应力值点对应的渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$); k_i 为相同瓦斯压力条件下,第 i 个有效应力值点对应的渗透率 ($i = 0, 1, \dots$) ($10^{-3} \mu\text{m}^2$); k_{i+1} 为相同瓦斯压力条件下,第 $i+1$ 个有效应力值点对应的渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$)。

各个瓦斯压力条件下,液氮前后不同有效应力对应的有效应力敏感性系数如表 4 所示。可以发现,对于同一煤样,相同孔隙压力下,有效应力敏感性系数随有效应力的增大逐渐减小,这是因为煤基质形变存在一定极限,随着有效应力逐渐增大,煤基质的形变逐渐困难,直观表现为单位有效应力增量

表 4 各煤样在不同孔隙压力条件下液氮致裂前后有效应力敏感性系数变化表

Table 4 Variation of effective stress sensitivity coefficient of each coal sample before and after liquid nitrogen fracturing under different gas pressures

煤样	孔隙压力 /MPa	有效应力 /MPa	有效应力敏感性系数		孔隙压力 /MPa	有效应力 /MPa	有效应力敏感性系数	
			致裂前	致裂后			致裂前	致裂后
Y ₁	1	1	74.64	68.89	1.5	0.5	91.87	83.64
	1	2	11.56	12.32	1.5	1.5	5.73	9.11
	1	3	4.35	8.00	1.5	2.5	1.07	3.16
	2	1	69.88	80.62	2.5	0.5	80.00	88.07
	2	2	12.40	19.28	2.5	1.5	6.04	11.79
Y ₂	1	1	59.55	65.53	1.5	0.5	78.03	87.10
	1	2	17.30	19.24	1.5	1.5	6.31	10.85
	1	3	7.38	8.29	1.5	2.5	2.21	4.90
	2	1	54.08	68.16	2.5	0.5	71.48	68.76
	2	2	14.99	16.16	2.5	1.5	10.35	17.90
Y ₃	1	1	44.36	64.33	1.5	0.5	68.18	77.01
	1	2	26.67	29.06	1.5	1.5	11.81	22.94
	1	3	4.35	8.48	1.5	2.5	4.36	4.38
	2	1	63.01	68.72	2.5	0.5	80.38	82.00
	2	2	16.55	20.47	2.5	1.5	8.52	9.70
Y ₄	1	1	51.59	61.36	1.5	0.5	66.61	—
	1	2	17.73	18.32	1.5	1.5	13.71	48.57
	1	3	7.99	10.82	1.5	2.5	6.98	19.88
	2	1	50.49	58.66	2.5	0.5	51.65	—
	2	2	15.60	19.53	2.5	1.5	22.18	37.60

作用下煤体渗透率变化程度逐渐减小;液氮致裂后煤样有效应力敏感性明显提高,在图2中表现为同一煤样在相同孔隙压力下有效应力随渗透率变化曲线,其液氮致裂后的斜率大于液氮致裂前,这是煤体裂隙结构对煤体应力敏感性产生的影响。当煤体在低温液氮浸泡后,内部原生裂隙都有不同程度的延伸扩展并伴随新裂隙的产生^[16],导致煤体整体强度的降低和内部可压缩自由体积的增大。与初始状态相比,致裂后的煤体渗流通道更容易被压缩,直观表现为随单位有效应力增量作用煤体渗透率变化程度增大。

有效应力敏感性的变化会直接影响到煤层气抽采过程中储层的渗透率水平,根据试验研究规律可知,在对储层进行致裂增透处理后,储层的有效应力敏感性会大幅升高,在后续的煤层气抽采过程中,会因储层内孔隙压力持续降低导致有效应力不断升高,高有效应力敏感性的煤储层渗透率水平会显著降低,非常不利于后续的高效抽采工作。但采用液氮致裂方法向储层注入的大量液氮会持续剧烈气化,及时为储层补充孔隙压力,持续维持煤储层的高渗透率水平,为煤层气的高效抽采提供保障^[22-23]。

5 结 论

(1) 在相同围压条件下,煤体气相渗透率随有效应力的变化趋势整体上符合负指数函数 $k = ae^{-b\sigma} + c$,拟合后相关指数均大于0.95。但当有效应力超过一定临界值,煤体气相渗透率会受克林伯格效应影响随有效应力的增大呈上升趋势。

(2) 煤体自身含水率的增加会对液氮致裂效果产生明显促进作用。当含水率从2%提升到4%时,煤样液氮致裂前后渗透率增幅从92.88%增大到357.12%。对液氮致裂前后煤样的渗透率进行归一化处理,发现煤体水分同时具有阻碍渗流的消极作用与提升致裂效果的促进作用,在水分的复合作用下致裂前后煤样归一化渗透率变化规律比较复杂。

(3) 在相同孔隙压力下,由于煤基质变形存在极限,煤体有效应力敏感性随有效应力的增大在逐渐减小;液氮致裂会降低煤体整体强度并增大内部可压缩自由体积,从而明显提高煤体的有效应力敏感性。

参 考 文 献

[1] 傅雪海, 张小东, 韦重韬. 煤层含气量的测试、模拟与预测研究进展[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(1): 13-31.

FU Xue-hai, ZHANG Xiao-dong, WEI Chong-tao. Review of research on testing, simulation and prediction of coalbed methane content[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2021, 50(1): 13-31.

[2] QIN L, ZHAI C, LIU S, et al. Changes in the petrophysical properties of coal subjected to liquid nitrogen freeze-thaw: a nuclear magnetic resonance investigation[J]. **Fuel**, 2017, 194: 102-114.

[3] 聂百胜, 马延崑, 何学秋, 等. 煤与瓦斯突出微观机理探索研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(2): 207-220.

NIE Bai-sheng, MA Yan-kun, HE Xue-qiu, et al. Micro-scale mechanism of coal and gas outburst: a preliminary study[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2022, 51(2): 207-220.

[4] WU X, HUANG Z, LI G, et al. Experiment on coal breaking with cryogenic nitrogen jet[J]. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, 2018, 169: 405-415.

[5] WU X, HUANG Z, ZHANG S, et al. Damage analysis of high-temperature rocks subjected to LN2 thermal shock[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2019, 52(8): 2585-2603.

[6] 张春会, 刘泮森, 王锡朝, 等. 焦煤和无烟煤的液氮冷冻致裂效果对比试验[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 30-34, 49.

ZHANG Chun-hui, LIU Pan-sen, WANG Xi-chao, et al. Contrast test study on fracturing anthracite and coking coal by liquid nitrogen cooling[J]. **Coal Science and Technology**, 2017, 45(6): 30-34, 49.

[7] 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 Jun-hua, 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.

[8] 袁亮, 王伟, 王汉鹏, 等. 巷道掘进揭煤诱导煤与瓦斯突出模拟试验系统[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(2): 205-214.

YUAN Liang, WANG Wei, WANG Han-peng, et al. A simulation system for coal and gas outburst induced by coal uncovering in roadway excavation[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2020, 49(2): 205-214.

[9] 李全贵, 武晓斌, 翟成, 等. 脉动水力压裂频率与流量

- 对裂隙演化的作用[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(6): 1067-1076.
- LI Quan-gui, WU Xiao-bin, ZHAI Cheng, et al. Effect of frequency and flow rate of pulsating hydraulic fracturing on fracture evolution[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2021, 50(6): 1067-1076.
- [10] XU J, ZHAI C, QIN L, et al. Characteristics of pores under the influence of cyclic cryogenic liquid carbon dioxide using low-field nuclear magnetic resonance[J]. **Geofluids**, 2018, 2018: 1682125.
- [11] ANONYMOUS. Field applications of cryogenic nitrogen as a hydraulic-fracturing fluid[J]. **Journal of Petroleum Technology**, 1998, 50(3): 38-39.
- [12] 任韶然, 范志坤, 张亮, 等. 液氮对煤岩的冷冲击作用机制及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增刊 2): 3790-3794.
- REN Shao-ran, FAN Zhi-kun, ZHANG Liang, et al. Mechanisms and experimental study of thermal-shock effect on coal-rock using liquid nitrogen[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2013, 32(Suppl.2): 3790-3794.
- [13] 蔡承政, 李根生, 黄中伟, 等. 液氮冻结条件下岩石孔隙结构损伤试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 965-971.
- CAI Cheng-zheng, LI Gen-sheng, HUANG Zhong-wei, et al. Experimental study on damage of rock pore structure under freezing conditions of liquid nitrogen[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(4): 965-971.
- [14] 张春会, 张海霞, 于永江, 等. 饱水度和再溶浸对液氮冷冻煤致裂的影响[J]. 煤炭学报, 2016, 41(增刊 2): 400-406.
- ZHANG Chun-hui, ZHANG Hai-xia, YU Yong-jiang, et al. Effects of saturation and re-submersion on coal fracturing subjected to liquid nitrogen shock[J]. **Journal of China Coal Society**, 2016, 41(Suppl.2): 400-406.
- [15] 闫道成. 不同含水率煤体液氮冻融损伤效应实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
- YAN Dao-cheng. Experimental study on the effects on the liquid nitrogen freezing and thawing damage in coal with different water content[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [16] 秦雷. 液氮循环致裂煤体孔隙结构演化特征及增透机制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2018.
- QIN Lei. Pore evolution after fracturing with cyclic liquid nitrogen and the mechanism of permeability enhancing[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [17] 余楚新, 鲜学福, 谭学术. 煤层瓦斯流动理论及渗流控制方程的研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1989, 12(5): 1-10.
- YU Chu-xin, XIAN Xue-fu, TAN Xue-shu. Study about flow theory and governing equation of gas seepage flow in coal beds[J]. **Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)**, 1989, 12(5): 1-10.
- [18] 刘泉声, 康永水, 刘滨, 等. 裂隙岩体水-冰相变及低温温度场-渗流场-应力场耦合研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(11): 2181-2188.
- LIU Quan-sheng, KANG Yong-shui, LIU Bin, et al. Water-ice phase transition and thermo-hydro-mechanical coupling at low temperature in fractured rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(11): 2181-2188.
- [19] 唐书恒. 煤储层渗透性影响因素探讨[J]. 中国煤炭地质, 2001, 13(1): 28-30.
- TANG Shu-heng. Probe into the influence factors on permeability of coal reservoirs[J]. **China Coal Geology**, 2001, 13(1): 28-30.
- [20] SOMERTON W. Effect of stress on permeability of coal[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1975, 12(5-6): 129-145.
- [21] 王宏图, 杜云贵, 鲜学福, 等. 地球物理场中的煤层瓦斯渗流方程[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(5): 644-646.
- WANG Hong-tu, DU Yun-gui, XIAN Xue-fu, et al. Seepage equation of coalbed gas in geophysical field[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(5): 644-646.
- [22] 卢硕. 液氮致裂煤体渗流特性及影响因素实验研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- LU Shuo. Experimental study on seepage characteristics and influencing factors of liquid nitrogen fracturing coal[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [23] 田苗苗. 液氮冻融作用对不同含水率煤体渗流特性影响规律研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- TIAN Miao-miao. Effect of liquid nitrogen freeze-thaw action on the seepage characteristics of coal with different water content[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.