

## Influence of cyclic stress ratio and effective confining pressure on dynamic characteristics of Beibu Gulf sea sand

WANG Jiaquan<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Taoyi<sup>1,2,3</sup>, TANG Yi<sup>1,2,3</sup>, TANG Ying<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Civil and Architectural Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Engineering Research Center of Geotechnical Disaster and Ecological Control, Liuzhou 545006, Guangxi, China; 3. Guangxi University Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation and Prestress Technology, Liuzhou 545006, Guangxi, China))

**Abstract:** As the filling material in reclamation engineering, it is particularly important to study the dynamic characteristics of sea sand under cyclic loading. In order to reveal the dynamic characteristics of the Beibu Gulf sea sand, the GDS dynamic triaxial test system was used to carry out the saturated undrained cyclic loading triaxial test of the Beibu Gulf sea sand under different cyclic stress ratios and effective confining pressures. The relationship between the dynamic strength and the failure vibration number of the sea sand was explored, and the development law of the axial cumulative strain, resilience modulus and dynamic pore pressure was analyzed. The results show that there is a good linear relationship between the dynamic strength and the failure vibration times, and the dynamic strength decreases with the increase of the cyclic vibration times. The axial accumulative strain of sea sand presents the development mode of “stable development–instable failure–incremental failure”, and the fitting curve of axial accumulative strain and vibration number can be described by power function. The change curve of resilient modulus with the axial cumulative strain presents the development trend of “sudden drop–slow decrease–basic stability”. Under the same vibration level, the resilient modulus increases with the increase of the cyclic stress ratio and the effective confining pressure. When the high cyclic stress ratio is 2.0, the relationship curve of resilient modulus with strain mainly presents the development law of “sudden increase–gradually decrease–stability”. The development modes of pore pressure are “sudden increase–stable–linear growth” and “sudden increase–stepwise growth”, and the two modes are converted to each other. The research results can provide some reference for the uneven settlement and seismic liquefaction of reclamation foundation in Beibu Gulf area.

**Keywords:** Beibu Gulf sea sand; dynamic triaxial test; cyclic stress ratio; effective confining pressure; dynamic characteristic

文章编号:1001-4888(2023)04-0517-13

## 液氮冷加载作用下煤样渗透特性研究\*

孙思洋, 李和万, 王来贵, 刘戩, 张子恒

(辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000)

**摘要:** 为了研究液氮冷加载对煤样渗透特性的影响,采用试验研究和理论分析相结合的方法,对不同冷加载周期煤样的孔隙、裂隙结构损伤破坏变化规律、各物理力学性质以及渗透特性展开研究,通过电镜扫描、波速测试、渗透试验和单轴压缩试验分别得到不同冷加载周期前后煤样裂隙的发育情况、波速衰减率、孔隙量、抗压强度以及渗透率的变化。试验结果表明:(1)液氮冷加载能促进煤样裂隙萌生和发育,有效地连接相对独立的裂隙结构,形成交织的裂隙网络,增大煤样气体流量,从而提高煤样渗透率。(2)温差效应与水冰相变的共同作用对煤样渗透性也有较强的促进作用。(3)随着冷加载周期的循环,煤样裂隙扩展宽度、扩展率均逐渐增大,力学性能减弱,抗压能力越来越差,煤样整体损伤程度严重,渗透率呈指数增长,比煤样初始渗透率提高了16.76倍。

**关键词:** 液氮冷加载; 煤样损伤; 波速衰减率; 孔隙量; 渗透率

**中图分类号:** TD821 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-265

### 0 引言

我国煤层具有地质结构复杂、煤基质致密、煤层气吸附率高、渗透率低、抽采效率低的特点<sup>[1-4]</sup>。随着开采深度的增加,储层渗透率不断降低,吸附容量逐渐增大,给我国煤层气开采带来了巨大的技术挑战<sup>[5]</sup>。煤层气是煤炭资源的伴生物,与石油、天然气不同,主要储集在低孔隙度、低渗透率的非常规储层中<sup>[6-8]</sup>。一方面,煤层气具有爆炸性,容易引起瓦斯爆炸而导致煤矿灾难,长期以来一直困扰着煤矿工人人身安全<sup>[9-10]</sup>;另一方面,煤层气作为一种高效清洁的绿色能源,发展前景可观,已引起了学者的广泛关注<sup>[11-13]</sup>。因此,提高煤层渗透率、实现煤层气高效开采是煤层气开采领域的一个重要环节。

任韶然等<sup>[14]</sup>分析了液氮冷冲击煤岩的作用机制,建立了煤岩基质冷缩应力计算模型,并通过不同条件下的冷冲击试验发现液氮会造成煤基质收缩产生热应力裂缝,导致处理后煤样波速大幅度下降。黄中伟等<sup>[15]</sup>研究了液氮压裂时低温对岩石力学性能的影响,通过液氮冻结处理不同含水状态的不同类型,对冻结前、后岩样进行抗拉及单轴抗压强度对比测试,发现经液氮冻结后,岩石的单轴抗压强度、抗拉强度和弹性模量都降低。张春会等<sup>[16-19]</sup>基于断裂力学理论分析了液氮溶浸或半溶浸不同煤阶、不同饱水度煤样的裂隙扩展机制,通过液氮冷冻试验发现液氮再溶浸作用会加剧煤样内缺陷结构发育、提高液氮作用效果。李和万等<sup>[20-22]</sup>利用冷加载不同饱水率、不同初始温度、不同围压下的煤样,分析煤样结构损伤与饱水率、温度和围压之间的关系,建立了多种耦合因素作用下的损伤判别式。李和万等<sup>[23-24]</sup>

\* 收稿日期: 2022-10-23; 修回日期: 2022-11-27

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51704142); 国家重点研发计划(2017YFC1503102); 辽宁省博士科研启动基金计划项目(2019-BS-115)

通信作者: 李和万(1983-), 男, 博士后, 副教授, 硕士生导师。主要研究领域: 固体及结构的变形与破坏; 岩土力学与工程。  
Email: lhw515ql@163.com

研究了液氮冷加载对不同节理煤样结构损伤、不同含水饱和度节理煤样损伤的影响,发现煤样表面以及内部节理扩展量随着低温循环冻融周期的增加而逐渐增大,且随着含水饱和度的提高,煤样破碎的冷加载周期减少,单轴抗压强度降低。李和万等<sup>[25]</sup>采用试验和数值模拟相结合的方法,研究不同循环冷浸周期煤样在单轴压缩过程中孔隙量和单轴抗压强度的耦合变化关系并建立损伤力学模型,发现在液氮冷浸环境下,煤基质收缩,煤样裂隙尖端出现了应力集中现象,当裂隙尖端的应力强度因子超过煤样断裂韧性时,裂隙就会发生扩展,结果表明液氮循环冷浸可以使煤样孔隙、裂隙结构发生损伤破坏,促使煤样的力学性质劣化。

综上所述,学者们对液氮低温致裂煤岩损伤进行了大量的研究并取得了相应的成果,但目前的研究主要集中在液氮低温冻结后煤岩孔裂隙结构演化等方面,而对于液氮低温冻结后煤岩渗透率变化情况涉及较少,因此,有必要对液氮冷加载后煤岩渗透率变化情况开展研究。

## 1 试验

### 1.1 样品收集

试验煤样采自辽宁阜新(121°67'E, 42°02'N)海州露天矿长焰煤,所有样品均为新鲜煤样,基本参数见表1。现场获得的大型煤块经过钻孔、切割、抛光处理制成直径为50mm、长度为100mm的圆柱形煤样,如图1所示。采集后的煤样立即用保鲜膜封存,以防止污染和氧化,避免对试验结果造成影响。

表1 煤样的基本性质

Tab.1 Basic properties of coal samples

名称	直径 /mm	长度 /mm	埋深 /m	密度 /(g/cm <sup>3</sup> )	近似分析/(wt%)			
					$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$
长焰煤	50	100	650	1.45	6.07	30.17	23.74	40.02

表中: $M_{ad}$ 为空气干燥后的水分含量; $A_{ad}$ 为空气干燥后的灰分含量; $V_{ad}$ 为空气干燥后的挥发物含量; $FC_{ad}$ 为空气干燥后的固定碳含量。



图1 试验煤样

Fig.1 Test coal sample

### 1.2 煤样选择

为确保煤样的均匀性,所有煤样均从同一区块钻孔得到,钻孔方向与层理方向平行。为了减少煤样的分散性对试验可能造成的影响,首先通过目视检查排除有缺陷的煤样,然后用非金属超声探测仪测量煤样的纵波速度,最后选择出纵波速度为1660m/s~1743m/s、表观密度为1.41g/cm<sup>3</sup>~1.53g/cm<sup>3</sup>、结构规整、表面完整的样品。由于样品筛选试验,个体之间的微小差异是不可避免的,所以,在可接受的范围内个体差异并不影响试验结果。

### 1.3 试验设备

试验使用的设备包括:

#### (1) 钢胆保温绝缘桶

绝缘桶容量1.4L,总高20.3cm,底部直径13.8cm,内胆深度13.2cm,内胆直径13.0cm。桶体为不锈钢,桶盖为PP级塑料,桶体和桶盖与液氮不发生反应。

## (2) 含水饱和和处理系统的真空泵

由微型气泵、真空不锈钢罐、橡胶软管以及可以显示不锈钢罐内部压力的压力表组成。

## (3) 天平电子秤

天平电子秤由上海力辰科技有限公司生产,型号为 LC-FA1004,精度为 0.0001g,量程为 100g~320g 可选。

## (4) LEXT OLS4000 激光共聚焦显微镜

该扫描系统能够针对不同属性材料进行扫描分析,其移动分辨率为 10nm,显示分辨率为 1nm,物镜为 100×、50×、20×、10×、5×(×表示物镜放大倍数);样品尺寸为 100mm×100mm,能够满足本次试验要求的精度。

## (5) 非金属超声检测分析仪

非金属超声检测分析仪由北京中交建仪科技发展有限公司生产,型号为 NM-4B,触发方式为自动触发,采样周期为 0.1μs~2.0μs,声时测读精度为 0.1μs。

## (6) 自主研发的气-固耦合煤岩三轴渗流试验装置

试验装置包括注气系统、温度控制系统、渗流系统、数据采集系统。注气系统由高压氮气气瓶、压力釜组成,压力釜可起到储气、稳压作用。将试验气体注入压力釜,使其温度、压力达到试验要求后备用。温度控制系统由水浴箱和外置温控器组成,以保证试验系统温度的稳定。渗流系统包括改进的三轴渗流仪、压力泵及气体流量计,试验过程中利用压力泵对煤样施加围压,气体流量计收集产出的氮气,并计算气体流量;数据采集系统能够实时记录试验中的流体压力和围压变化。采用自主研发的渗流试验装置对煤样在不同围压和注气压力条件下的渗透率进行测量,与传统的渗透率测量装置相比,自主研发的渗流试验装置可以测量大尺寸煤样的渗透率,从而有效地反映煤层的渗流特征。

## (7) 万能试验机

万能试验机由浙江计量设备制造有限公司生产,型号为 MH-25,试验力为 3004kN,试验力测量范围为 0.2%~100%,试验力示值相对误差小于示值的±0.1%,电机功率为 1.1kW,总重量为 1100kg。本次试验采用位移加载方式,加载速率为 0.05mm/min。

## 1.4 试验流程

试验流程如图 2 所示,具体过程如下:

(1) 将水和 8 块直径为 50mm、长度为 100mm 的煤样放入真空不锈钢罐内,利用气泵对钢罐进行排真空处理,将煤样孔隙、裂隙中空气排出,水由于压力作用进入煤样孔隙、裂隙中,形成含水煤样。使用天平电子秤称量煤样质量,每 0.5h 称重一次,当质量不再增加时,即认为煤样强制水饱和。根据水饱和和化时间和增重百分比定义煤样的含水饱和度。试验采用含水饱和 100%的煤样。



图 2 试验流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test process

(2) 试验选取 8 块煤样, 其中对 7 块煤样依次进行液氮冷加载 1~7 个冷加载周期, 另外 1 块煤样 N-0 (煤样 N-0 未进行冷加载处理, 保持初始状态) 用作对比试验。将煤样放入钢胆保温绝缘桶中, 然后将液氮倒入桶中, 使液氮可以完全包裹煤样。液氮浸泡煤样 4h 后, 室温 (20℃) 放置 20h 作为 1 个冷加载周期<sup>[20-25]</sup>, 冷加载 1~7 周期。将 7 块煤样同时放入钢胆保温绝缘桶中进行液氮冷加载处理, 每隔一个冷加载周期后, 取出一块煤样进行编号, 重复 7 次, 依次获得煤样 N-1、N-2、N-3、N-4、N-5、N-6 和 N-7, 煤样编号见表 2。每次液氮冷加载处理煤样完成后, 均用保鲜膜密封包裹煤样进行封存, 防止有水渗出。液氮冷加载处理要求钢胆保温绝缘桶能够保温隔热, 以便降低液氮与空气的热量交换, 减慢液氮汽化速度。试验过程中桶盖不能锁紧, 以保证液氮汽化后可以溢出, 防止液氮急速汽化而发生爆炸; 同时由于桶体内部具有保温隔热功能, 不会发生冷灼伤等安全事故。倾倒液氮过程中, 要保证液氮罐瓶口靠近钢胆保温绝缘桶桶口处, 防止液氮飞溅, 避免发生试验人员安全事故。

表 2 煤样编号

Tab. 2 Coal sample number

环境温度/℃	冷加载周期 T/d							
	0	1	2	3	4	5	6	7
-196℃	N-0	N-1	N-2	N-3	N-4	N-5	N-6	N-7

(3) 电镜扫描前, 先在煤样表面裂隙处圈定直径为 5mm 的观察区, 用白色染料标记并固定观察方向。使用 LEXT OLS4000 激光共聚焦显微镜, 放大 100 倍观测 7 块煤样表面镜像形貌, 以测定 1~7 个冷加载周期作用前后煤样表面裂隙的扩展宽度情况。在煤样表面裂隙处选择固定的测量位置 (A、B、C), 根据式 (1) 计算出煤样表面裂隙扩展宽度  $\Delta d$ :

$$\Delta d = d_n - d_0 \quad (1)$$

式中:  $\Delta d$  为冷加载前后煤样表面裂隙扩展宽度,  $\mu\text{m}$ ;  $d_0$  为冷加载前煤样表面裂隙宽度,  $\mu\text{m}$ ;  $d_n$  为第  $n$  个冷加载周期作用后煤样表面裂隙宽度,  $\mu\text{m}$ 。

利用冷加载前后煤样表面裂隙扩展宽度可计算得到煤样表面裂隙扩展率  $\delta$  为

$$\delta = \frac{d_n - d_0}{d_0} \quad (2)$$

(4) 利用非金属超声检测分析仪测定煤样经过 1~7 个冷加载周期作用前后声波在煤样中的传播速度, 每块煤样测量 3 次取得平均值以减小试验误差, 通过式 (3) 可获得煤样波速衰减率  $\eta$ :

$$\eta = \frac{v_0 - v_n}{v_0} \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为煤样波速衰减率;  $v_0$  为冷加载前声波在煤样中的传播速度,  $\text{m/s}$ ;  $v_n$  为第  $n$  个冷加载周期作用后声波在煤样中的传播速度,  $\text{m/s}$ 。

根据 Willie 时间平均方程<sup>[24]</sup>可以定量算出煤样孔隙量  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{1}{v_0(1-\eta)} \cdot \frac{v_t v_{m0}}{v_{m0} - v_t} - \frac{v_t}{v_{m0} - v_t} \quad (4)$$

式中:  $v_t$  为声波在水中的传播速度,  $\text{m/s}$ ;  $v_{m0}$  为声波在煤样骨架中的传播速度,  $\text{m/s}$ 。

孔隙量表征煤样的非固体介质含量, 为无量纲。孔隙量与煤样初始结构损伤程度相关, 同一批试验煤样可以通过孔隙量进行比较, 若孔隙量越大, 则煤样孔隙、裂隙结构越大。在同一煤样中,  $v_{m0}$ 、 $v_0$  和  $v_t$  为定值, 孔隙量与波速衰减率为反比例函数, 波速衰减率在 (0, 1) 区间内单调递增, 即声波在煤样中的波速衰减率越大, 煤样孔隙量就越大<sup>[20]</sup>。

根据式 (3)、式 (4) 可以整理出孔隙量与波速衰减率的关系式:

$$\varphi = \frac{m}{1-\eta} - n \quad (5)$$

式中:  $m$ 、 $n$  为常数。

(5) 利用自主研发的气-固耦合煤岩三轴渗流试验装置对不同冷加载周期煤样进行渗透试验, 试验

装置如图 3 所示,渗透试验条件见表 3。

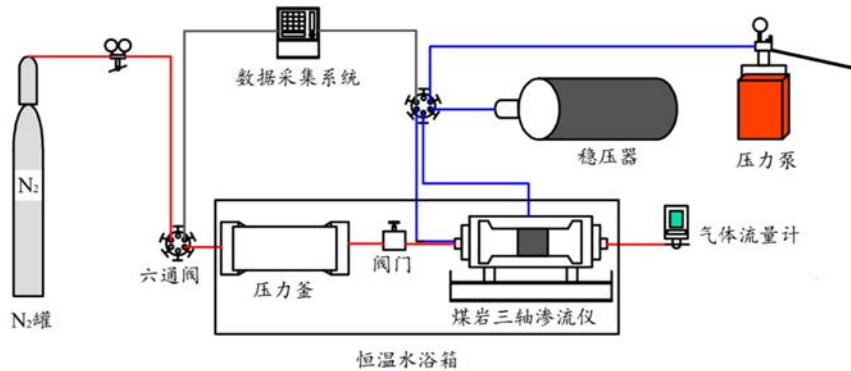


图 3 渗透试验示意图

Fig. 3 Schematic diagram of penetration test

表 3 渗透试验条件

Tab. 3 Penetration test conditions

试验温度	煤样直径	煤样长度	试验气体	气体纯度	体积应力	孔隙压力	围压	入口压力	出口压力
25℃	50mm	100mm	氮气	99.99%	15MPa	1MPa	5MPa	1MPa	0.1MPa

为了排除注入的氮气从煤样侧面溢出对试验结果的影响,进行渗透试验前,在制备煤样侧面均匀涂抹 Ty-704RTV-1 硅橡胶,然后用热收缩管紧紧包裹。在试验过程中,用手动计量泵对煤样加载 1MPa 孔隙压力和 5MPa 围压。高气体压力(入口压力,1MPa)在煤样一端加载,大气压(出口压力,0.1MPa)在另一端加载。两端之间的气压差使氮气可以渗透到煤样中,渗透流量信息由气体流量计收集,煤样中的气体流动服从达西定律,因此可以用达西方程来计算煤样渗透率<sup>[26]</sup>:

$$K = \frac{2QuLp_2}{A(p_1^2 - p_2^2)} \quad (6)$$

式中:K 为煤样渗透率,mD; Q 为气体流量,cm<sup>3</sup>/s; μ 为氮气动黏度,Pa·s; L 为煤样长度,cm; A 为煤样横截面积,cm<sup>2</sup>; p<sub>1</sub> 为入口压力,MPa; p<sub>2</sub> 为出口压力,MPa。

(6) 利用 MH-25 万能试验机进行煤样单轴压缩试验,测定不同冷加载周期煤样抗压强度,然后根据测量数据绘制应力-应变曲线如图 9(a)所示。

## 2 结果

### 2.1 煤样表面镜像形貌

为了研究液氮低温对煤样渗透特性的影响,使用 LEXT OLS4000 激光共聚焦显微镜进行电镜扫描,在煤样表面裂隙处选择固定的测量位置(A、B、C),放大 100 倍进行测量,记录不同冷加载周期作用前后煤样表面裂隙扩展情况如图 4 所示,不同冷加载周期煤样裂隙扩展宽度见表 4。液氮冷加载处理前观察到煤样表面有少量缺陷,经过 1 个冷加载周期后,原始裂隙尖端扩大,少量煤颗粒脱落。经过 3 个冷加载周期后,煤样表面被破坏,出现轴向裂隙贯通煤样表面。经过 5 个冷加载周期后,煤样表面裂隙长度和宽度进一步膨胀,同时大量煤颗粒严重脱落。经过 7 个冷加载周期后,煤样表面裂隙长度、宽度和连通性都有很大程度的提高,裂隙与裂隙之间形成了复杂的连通网络,改变了煤样的物理性质。此外,在不同冷加载周期后,观测区的煤颗粒分布发生明显的变化,表明液氮冷加载可以使煤颗粒从煤基体中剥离出来,并且这些煤颗粒会进入裂隙中,可有效地阻止裂隙闭合。当煤样暴露在一种超低温液氮中时,其内部的孔隙水会迅速结冰,引起煤样内部膨胀,产生冰楔膨胀应力,促进煤样裂隙的萌生和膨胀,从而使煤样的连通性和渗透性均得到有效改善。

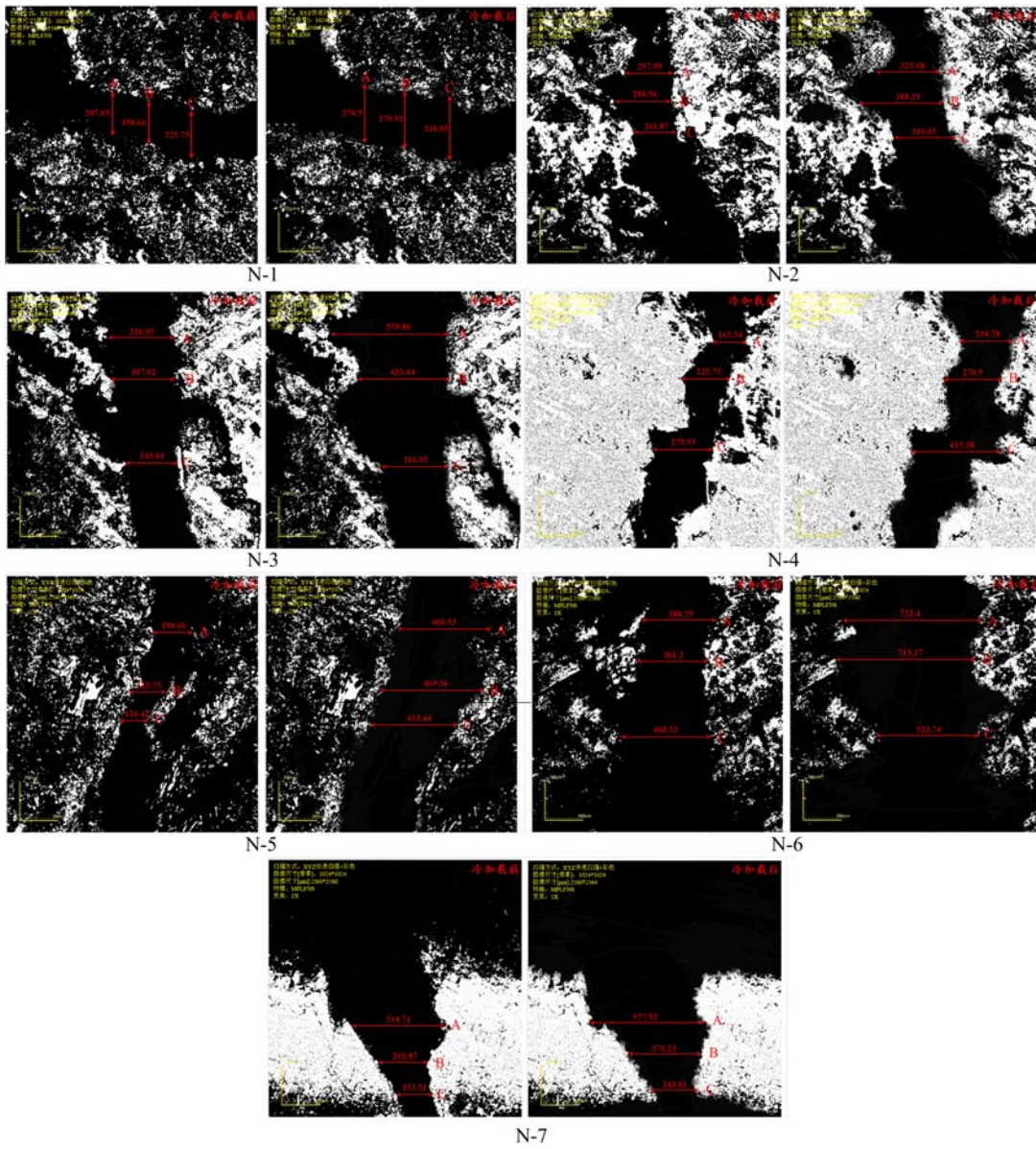


图 4 不同冷加载周期作用前后煤样表面裂隙扩展情况

Fig. 4 Surface crack propagation of coal samples before and after different cold loading cycles

表 4 不同冷加载周期煤样裂隙扩展宽度

Tab. 4 Crack propagation width of coal samples in different cold loading periods

煤样 编号	冷加载前 $d_0/\mu\text{m}$				冷加载后 $d_n/\mu\text{m}$				扩展宽度 $\Delta d/\mu\text{m}$
	A	B	C	平均	A	B	C	平均	
N-1	297.99	288.96	261.87	282.94	325.08	388.29	316.05	343.14	60.20
N-2	207.69	198.66	225.75	210.70	270.90	279.93	316.05	288.96	78.26
N-3	162.54	225.75	279.93	222.74	234.78	270.90	415.38	307.02	84.28
N-4	514.71	261.87	153.51	310.03	577.92	370.23	243.81	397.32	87.29
N-5	316.05	307.02	243.81	288.96	559.86	433.44	316.05	436.45	147.49
N-6	388.29	361.20	460.53	403.34	722.40	713.37	523.74	653.17	249.83
N-7	198.66	225.75	126.42	183.61	460.53	469.56	433.44	454.51	270.90

建立以冷加载周期为自变量,裂隙扩展宽度和裂隙扩展率为因变量的关系函数,对其进行拟合,拟合结果如图 5、图 6 所示。

由图 5 可见,煤样表面裂隙扩展宽度随着冷加载周期的增加逐渐增大。经过 1~4 个冷加载周期后,煤样表面裂隙扩展宽度缓慢增长了 87.29 $\mu\text{m}$ ;经过 4~7 个冷加载周期,煤样表面裂隙扩展宽度迅猛增长了 270.9 $\mu\text{m}$ 。拟合曲线是一条直线,煤样裂隙扩展宽度的变化为一条曲线。拟合曲线的斜率为正值,说明煤样表面裂隙扩展宽度与冷加载周期呈正相关,拟合结果为 0.81986,表明拟合效果较好。煤样表面裂隙扩展宽度经历了从缓慢增长到迅猛增长阶段,说明液氮循环冷加载能有效地致裂煤样。

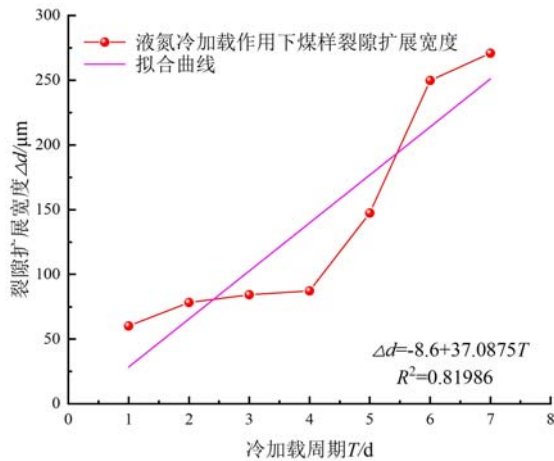


图 5 煤样裂隙扩展宽度与冷加载周期关系曲线  
Fig. 5 Relation curve between crack expansion width of coal sample and cold loading cycle

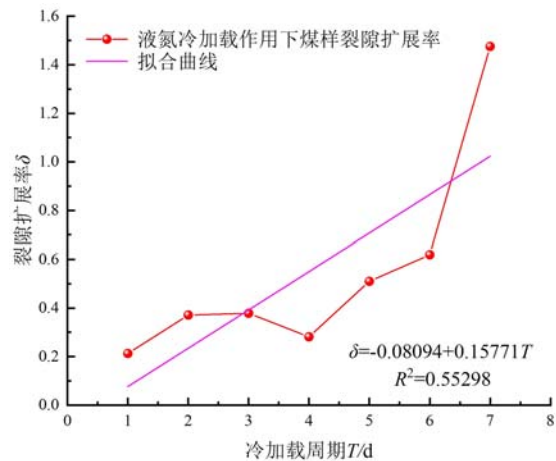


图 6 煤样裂隙扩展率与冷加载周期关系曲线  
Fig. 6 Relation curve between crack expansion rate of coal sample and cold loading cycle

由图 6 可见,煤样表面裂隙扩展率随着冷加载周期的增加逐渐增大。1~4 个冷加载周期时,煤样表面裂隙扩展率经历了从缓慢增加到缓慢减少的过程;4~7 个冷加载周期时,煤样表面裂隙扩展率逐渐增加,其中 6~7 个冷加载周期时迅速增加了 1.47541。拟合曲线是一条直线,其斜率为正值,表明煤样表面裂隙扩展率与冷加载周期呈正相关。对比图 5,可见两者变化趋势相似,但图 5 拟合效果更理想,说明煤样表面裂隙扩展宽度能更好地反映煤样裂隙扩展情况。

## 2.2 煤样整体结构损伤程度测定

### 2.2.1 波速衰减率

利用非金属超声检测分析仪测定煤样经过 1~7 个冷加载周期作用前后声波在煤样中的传播速度,并通过式(3)获得煤样波速衰减率  $\eta$ ,计算结果见表 5。

表 5 不同冷加载周期煤样波速衰减率

Tab. 5 Wave velocity attenuation rate of coal samples in different cold loading periods

煤样编号	冷加载周期 T/d	直径/mm	高度/mm	$\eta$
N-1	1	49.93	100.58	0.330161
N-2	2	49.92	101.20	0.360291
N-3	3	49.86	101.30	0.381675
N-4	4	49.90	99.75	0.462374
N-5	5	49.86	100.56	0.509239
N-6	6	49.95	101.20	0.520790
N-7	7	49.90	99.78	0.589822

建立以冷加载周期为自变量、波速衰减率为因变量的关系函数,对其进行拟合,拟合结果如图 7 所示。



由图7可知,煤样波速衰减率随着冷加载周期的循环逐渐增大,表明液氮冷加载前后煤样内部结构发生了变化,具体表现为煤样原生裂隙萌生和发育,且伴随着新裂隙的扩展,新旧裂隙之间形成交织网络,加剧了煤样整体结构损伤程度。拟合曲线是一条直线,其斜率为正值,表明煤样波速衰减率与冷加载周期呈正相关;拟合结果为0.96784,表明试验数据拟合效果较好。

### 2.2.2 孔隙量

根据式(5),可见波速衰减率与孔隙量存在一定关系,随着冷加载周期的循环,波速衰减率与孔隙量一一对应。因此,建立以冷加载周期为自变量、孔隙量为因变量的关系函数,对其进行拟合,拟合结果如图8所示。

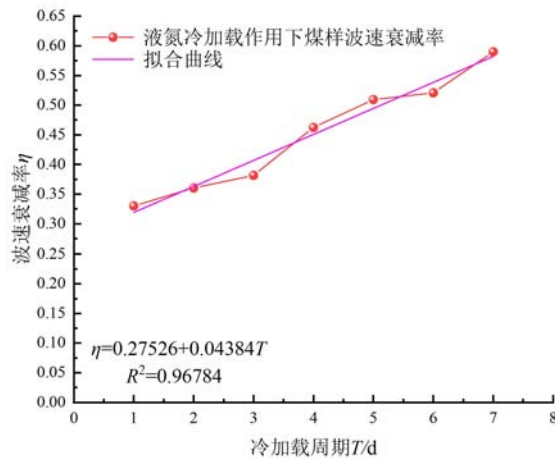


图7 煤样波速衰减率与冷加载周期关系曲线

Fig. 7 Relation curve between wave velocity attenuation rate of coal sample and cold loading cycle

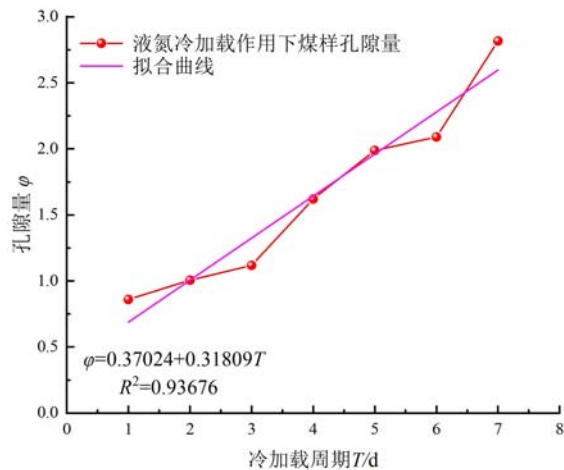


图8 煤样孔隙量与冷加载周期关系曲线

Fig. 8 Relation curve between coal sample porosity and cold loading cycle

由图8可知,煤样孔隙量随着冷加载周期的循环逐渐增大,说明液氮冷加载作用使煤样孔隙结构扩展,拓宽了内部渗流通道,加速了煤样损伤破坏,从而使煤样整体结构损伤加剧。随着波速衰减率的增大,煤样孔隙量也逐渐增大,两者存在线性关系。拟合曲线是一条直线,其斜率为正值,表明煤样孔隙量与冷加载周期呈正相关;拟合结果为0.93676,表明试验数据拟合效果较好。

### 2.2.3 单轴抗压强度

单轴抗压强度表征煤样在微观程度上抵抗外力破碎的能力。利用MH-25万能试验机进行不同冷加载周期煤样单轴压缩试验,加载速率为0.05mm/min,以测定煤样单轴抗压强度,根据试验数据绘制应力-应变曲线,建立以冷加载周期为自变量、单轴抗压强度为因变量的关系函数,将其进行拟合,拟合结果如图9(a)、(b)所示。

如图9(a)所示,煤样经过0~7个冷加载周期作用后,煤样抗压强度依次为11.513MPa、10.743MPa、10.266MPa、9.766MPa、9.648MPa、8.031MPa、7.335MPa、7.268MPa。随着冷加载周期的循环,煤样抗压强度逐渐降低,未经液氮冷加载处理的煤样,抗压强度最大,为11.513MPa;经过7个周期处理后的煤样,抗压强度最小,为7.268MPa。这说明液氮冷加载处理时间越久,煤样抗压强度越低,抗压能力越差,力学性能越弱,煤样整体结构损伤程度越严重。如图9(b)所示,拟合曲线中斜率为负值,可见煤样抗压强度与冷加载周期呈负相关,拟合结果为0.95025,表明试验数据拟合效果较好。煤样抗压强度随着冷加载周期的循环逐渐降低,分为缓慢下降阶段与快速下降阶段。0~4个冷加载周期为缓慢下降阶段,该阶段抗压强度下降了1.865MPa;4~7个冷加载周期为快速下降阶段,煤样抗压强度下降了2.38MPa。

### 2.3 煤样渗透率

渗透率表征煤岩本身传导流体的能力,是煤岩储层产能的评价依据,与煤岩的裂隙分布息息相关。本文利用自主研发的气-固耦合煤岩三轴渗流试验装置进行不同冷加载周期煤样渗透试验,建立了以冷

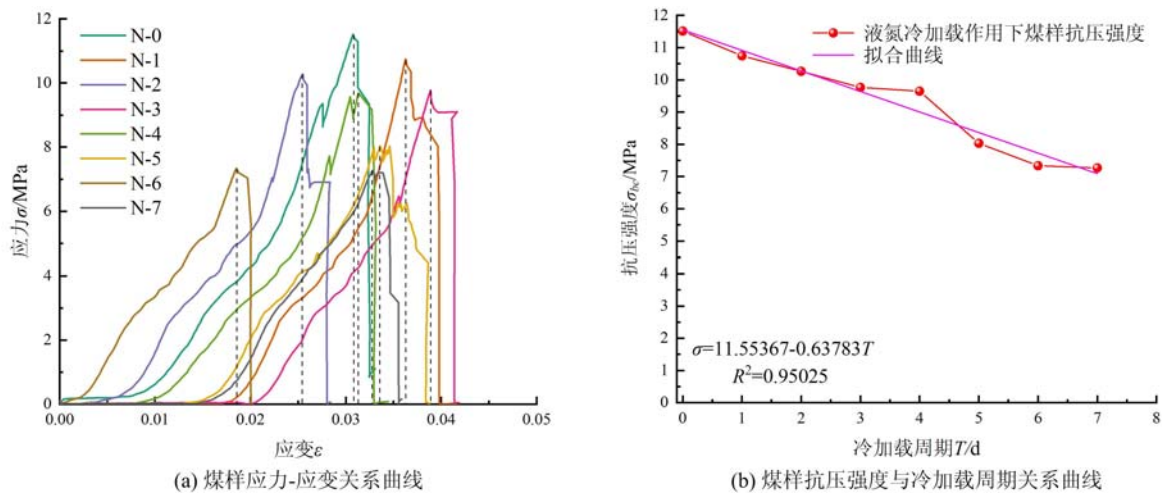


图 9 单轴压缩试验结果

Fig. 9 Results of uniaxial compression test

加载周期为自变量、渗透率为因变量的关系函数,对其进行拟合,试验结果如图 10 所示。

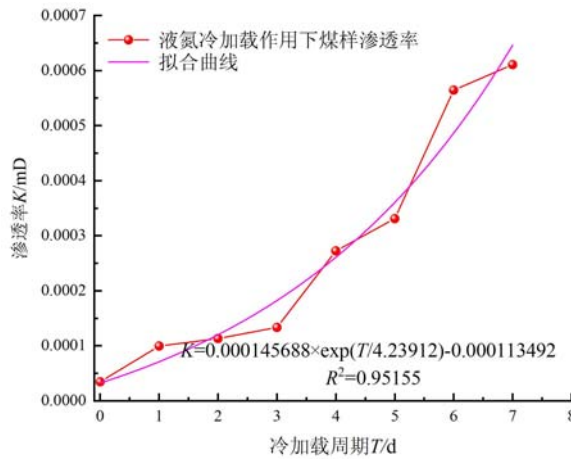


图 10 煤样渗透率与冷加载周期的关系曲线

Fig. 10 Relation curve between coal sample permeability and cold loading cycle

由图 10 可知,煤样渗透率在 0~3 个冷加载周期时呈现缓慢增长趋势,在 3~7 个冷加载周期时迅猛增长,说明液氮冷加载可以促进裂隙生长发育,形成交织断裂网络,并拓宽了煤样渗流通道,显著增加了煤样渗透性。煤样渗透率从初始状态的  $3.44 \times 10^{-5}$  mD 逐渐增加到  $6.11 \times 10^{-4}$  mD,增加了 16.76 倍。渗透率的增长速度反映了冷加载周期循环提高渗透率的效率,随着冷加载周期的循环,渗透率的增加呈现出从缓慢生长到迅猛发展的趋势,渗透率呈指数型增长。煤样在液氮冷加载作用下渗透率显著大于原始煤样的渗透率,表明液氮冷加载作用下煤样孔隙、裂隙结构损伤程度加剧,这也与电镜扫描、波速测试的试验结果相吻合。由于液氮冷加载作用会造成煤样孔隙、裂隙结构损伤,因此煤样波速衰减率和孔隙量不断增加,煤样原生裂隙也在不断扩展、连通形成次生裂隙,并最终相互连接形成裂隙网络,从而造成煤样孔隙连通性增强以及渗流通道增加,导致煤样渗透率随着液氮冷加载周期的增加而增加。

### 3 讨论

#### 3.1 液氮冷加载前后煤样裂隙发育情况

煤样中的裂隙网络是流体渗出和迁移的主要渠道和富集区。煤样渗透性主要取决于所含裂隙网络的渗透性,通过观察显微图像中标出的裂隙宽度,发现 N-7 在冷加载作用前裂隙宽度为  $183.61 \mu\text{m}$ ,在冷加载作用后裂隙宽度为  $454.51 \mu\text{m}$ ,裂隙扩展宽度为  $270.9 \mu\text{m}$ ,比冷加载作用前增加了 147.54%。根

据电镜扫描的显微图像以及波速测试结果,可以发现煤样裂隙扩展主要由以下几点原因:

(1) 在冷加载作用下,裂隙尖端的应力集中导致了裂隙的增长。

(2) 在冷加载作用下,液氮的气体膨胀侵入到裂隙内部,导致裂隙大大增加,促进了裂隙的二次发育。

(3) 在冷加载作用下,煤样中的水分在冻结过程中会迅速结冰,形成冻胀力,导致体积膨胀,引起煤岩内部挤压,从而促进裂隙萌生和拓展。

通过对不同冷加载周期作用前后煤样裂隙扩展宽度的分析,可以看出煤样裂隙扩展宽度均有所增加,并形成新的裂隙。结果表明,经过液氮冷加载处理,煤样裂隙的发育和扩展更加旺盛,并且裂隙在表面的比例显著增加,渗流特性变化也更大,明显改善了储层渗透性,本文电镜扫描、波速测试和单轴压缩试验结果与李和万<sup>[20-25]</sup>、王来贵<sup>[27]</sup>等液氮冻融处理煤样所得到的试验结果相似。

### 3.2 液氮冷加载致裂煤样影响因素分析

影响煤样孔隙、裂隙扩展的因素有4个:外应力、水冰相变产生的冻胀力、煤基质收缩和液氮汽化膨胀力。在液氮冷加载致裂煤样过程中只采用液氮低温处理煤样,没有施加外应力。液氮汽化膨胀力只对受限空间内的煤样产生压缩应力,而在液氮冷加载处理过程中煤样不受约束,因此,未考虑外应力和液氮汽化膨胀力的影响。

图11为液氮冷加载致裂煤样影响因素示意图。从图11中可以看出,在水冰相变产生的冻胀力和煤基质收缩的共同作用下,不仅发生了原始裂隙的扩张和延伸,还形成了新的孔隙和裂隙。本文试验采用含水饱和100%煤样,当煤样与液氮接触时,孔隙和裂隙中的水迅速冻结,产生9%的体积膨胀,导致孔隙和裂隙的扩展。此外,膨胀力会在裂隙尖端产生很大的拉应力,且其值明显大于煤的抗拉强度,导致裂隙的扩大和延伸。

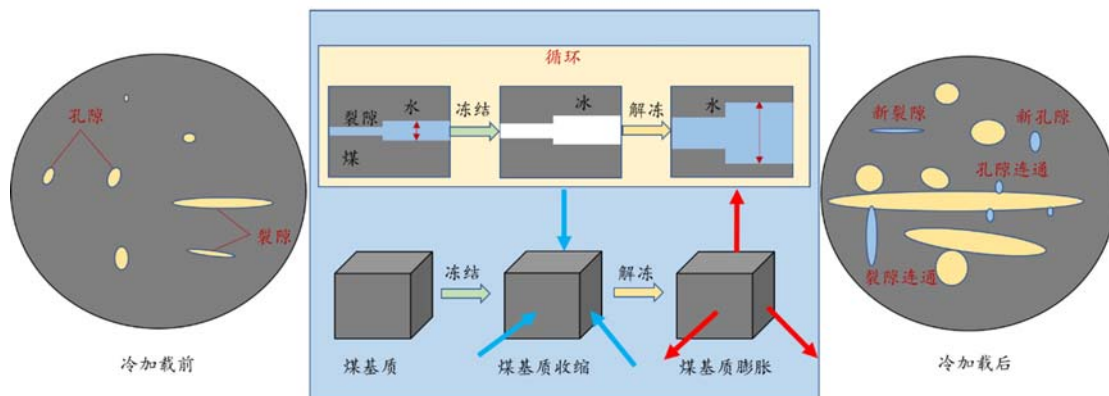


图11 液氮冷加载致裂煤样影响因素示意图

Fig. 11 Schematic diagram of influencing factors of cracking coal samples by liquid nitrogen cold loading

由于温度作用下矿物热膨胀系数的不均匀性,煤样与液氮接触时,煤样会发生不均匀收缩。考虑到煤样是一个连续体,煤样内部的矿物颗粒不能根据其固有的热膨胀系数自由变形,因此,矿物颗粒之间会产生一种约束,从而产生热应力,导致煤样被破坏。渗透试验结果与Chen等<sup>[26]</sup>液氮压裂烟煤渗流特性试验所得到的结果相似。

综上所述,在水冰相变产生的冻胀力和煤基质不均匀收缩的作用下,原有裂隙不断扩大延伸,并伴随着新孔隙和微裂隙的形成。液氮冷加载会促进煤样中宏观和微观裂隙的扩张,形成裂隙网络,从而提高煤样渗透率。

### 3.3 液氮冷加载作用下的煤样渗透特性

煤是一种含有孔隙、裂隙的多孔介质,而不是理想化的连续介质<sup>[28]</sup>。当煤被液氮浸泡冻结时,温差会产生不均匀的温度应力,煤中的水分会引起水冰相变,导致体积膨胀,从而引起煤中裂隙的膨胀和连通。为了研究液氮冷加载对煤样渗透特性的影响,本文对比分析了液氮冷加载前后煤样渗透率的变化。

如图10所示,所有煤样的渗透率在液氮冷加载后均呈现上升趋势,冷加载周期与渗透率之间存在指数型增长趋势。液氮冷加载对煤样渗透率的影响有以下2种情况(图11):

(1) 由温差效应引起的温度应力会导致煤样内部结构变化。当煤样暴露在低温介质中时,冷源接触面煤样的温度场会迅速发生变化,部分煤基体颗粒会发生体积收缩,形成局部温度应力,温度应力增加到一定程度时会促进煤样内部结构膨胀连通,使煤样渗透率增加。

(2) 由水冰相变产生的冻胀力和温差效应产生的温度应力会引起煤样内部结构变化。当煤样中的水分与低温介质接触时,煤样内部水分会产生约9%的体积膨胀,相变作用产生的冻胀力理论上可达到207MPa<sup>[5,17-19]</sup>。当冻胀力和温度应力的综合作用超过煤样的极限强度时,它们的协同作用会导致大量新裂隙的产生以及裂隙网络的连通,从而增强煤样渗透性的效果。

结合以上试验现象表明,冷加载周期越长,对增加煤样渗透率的影响越大,并且随着冷加载周期的循环,煤样裂隙扩展宽度增加,整体结构损伤程度严重,甚至破碎,这对增加煤样渗透性有明显的积极作用。

## 4 结论

为研究液氮冷加载对煤样渗透特性的影响,本文探讨了液氮冷加载作用下煤样的损伤情况及渗透特性,并通过裂隙扩展宽度、裂隙扩展率、波速衰减率、孔隙量、抗压强度和渗透率对煤样内部结构进行了表征。主要结论如下:

(1) 经过液氮冷加载处理后,煤样在原始裂隙的基础上萌生新的裂隙,与此同时,新旧裂隙会相互渗透,形成裂隙网络。

(2) 煤样中的水分对液氮冷加载期间煤样渗流特性有显著影响,水冰相变引起体积膨胀,产生冻胀力促进煤样裂隙的发展和连接,从而提高了煤样渗透性。温差效应与水冰相变的共同作用对煤样渗透性有较强的促进作用。

(3) 波速衰减率、孔隙量和抗压强度反映了煤样整体结构损伤程度,随着冷加载周期的循环,煤样波速衰减率与孔隙量逐渐增大,抗压强度逐渐降低,导致煤样整体结构损伤程度加剧。

(4) 在液氮冷加载作用下,渗透率随着冷加载周期的增加呈指数增长,渗透率比煤样初始渗透率提高了16.76倍。

## 参考文献:

- [1] Cheng Y P, Liu H Y, Guo P K, et al. A theoretical model and evolution characteristic of mining-enhanced permeability in deeper gassy coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(8):1650-1658.
- [2] Jin K, Cheng Y, Wang L, et al. The effect of sedimentary redbeds on coalbed methane occurrence in the Xutuan and Zhaoji Coal Mines, Huaibei Coalfield, China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2015, 137:111-123.
- [3] Liu J, Chen Z, Elsworth D, et al. Interactions of multiple processes during CBM extraction; a critical review[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2011, 87(3-4):175-189.
- [4] Xu J, Zhai C, Qin L. Mechanism and application of pulse hydraulic fracturing in improving drainage of coalbed methane[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 40:79-90.
- [5] Liu D, Yao Y, Tang D, et al. Coal reservoir characteristics and coalbed methane resource assessment in Huainan and Huaibei coalfields, Southern North China[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2009, 79(3):97-112.
- [6] Pan Z, Connell L D. Modelling permeability for coal reservoirs; a review of analytical models and testing data[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2012, 92:1-44.
- [7] Zhang L, Zhang C, Tu S, et al. A study of directional permeability and gas injection to flush coal seam gas testing apparatus and method[J]. *Transport in Porous Media*, 2016, 111(3):573-589.
- [8] Zhang P, Peterson S, Neilans D, et al. Geotechnical risk management to prevent coal outburst in room-and-pillar mining[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2016, 26(1):9-18.
- [9] Jiang J, Yang W, Cheng Y, et al. Application of hydraulic flushing in coal seams to reduce hazardous outbursts in

- the Mengjin Mine, China[J]. *Environmental & Engineering Geoscience*, 2018, 24(4):425–440.
- [10] Zhang C, Zhang L. Permeability characteristics of broken coal and rock under cyclic loading and unloading[J]. *Natural Resources Research*, 2019, 28(3):1055–1069.
- [11] Su X, Wang Q, Lin H, et al. A combined stimulation technology for coalbed methane wells: Part 2. Application [J]. *Fuel*, 2018, 233:539–551.
- [12] Zhang C, Zhang L, Tu S, et al. Experimental and numerical study of the influence of gas pressure on gas permeability in pressure relief gas drainage[J]. *Transport in Porous Media*, 2018, 124(3):995–1015.
- [13] Zhang L, Ye Z, Li M, et al. The binary gas sorption in the bituminous coal of the Huaibei Coalfield in China[J]. *Adsorption Science & Technology*, 2018, 36(9-10):1612–1628.
- [14] 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(S2):3790–3794 (REN Shaoran, FAN Zhikun, 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(S2):3790–3794 (in Chinese))
- [15] 黄中伟, 位江巍, 李根生, 等. 液氮冻结对岩石抗拉及抗压强度影响试验研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(3):694–700 (HUANG Zhongwei, WEI Jiangwei, LI Gensheng, et al. An experimental study of tensile and compressive strength of rocks under cryogenic nitrogen freezing[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(3):694–700 (in Chinese))
- [16] 张春会, 李伟龙, 王锡朝, 等. 液氮溶浸煤致裂的机理研究[J]. *河北科技大学学报*, 2015, 36(4):425–430 (ZHANG Chunhui, LI Weilong, WANG Xichao, et al. Research of fracturing mechanism of coal subjected to liquid nitrogen cooling[J]. *Journal of Hebei University of Science and Technology*, 2015, 36(4):425–430 (in Chinese))
- [17] 张春会, 郭晓康, 李和万, 等. 液氮溶浸对饱水煤裂隙扩展的影响研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(6):99–105 (ZHANG Chunhui, GUO Xiaokang, LI Hewan, et al. Study on influence of liquid nitrogen infiltration to saturated water coal fracture expanded[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(6):99–105 (in Chinese))
- [18] 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(S2):400–406 (ZHANG Chunhui, ZHANG Haixia, YU Yongjiang, et al. Effects of saturation and re-submersion on coal fracturing subjected to liquid nitrogen shock[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2):400–406 (in Chinese))
- [19] 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 Chunhui, LIU Pansen, WANG Xichao, 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 (in Chinese))
- [20] 李和万. 循环冷加载作用下煤样结构损伤实验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017 (LI Hewan. Experimental study on structural damage of coal samples under cyclic cold loading[D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2017 (in Chinese))
- [21] 李和万, 王来贵, 张春会, 等. 冷加载作用下不同围压煤样结构损伤规律研究[J]. *应用力学学报*, 2017, 34(4):788–794, 823 (LI Hewan, WANG Laigui, ZHANG Chunhui, et al. Structural damage mechanism for cold loaded coal samples under different confining pressures[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2017, 34(4):788–794, 823 (in Chinese))
- [22] 李和万, 王来贵, 张春会, 等. 液氮对含水煤样裂隙疲劳增扩作用的试验研究[J]. *实验力学*, 2016, 31(1):119–126 (LI Hewan, WANG Laigui, ZHANG Chunhui, et al. Experimental study of the fatigue crack extension influences of liquid nitrogen on water cut coal sample[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(1):119–126 (in Chinese))
- [23] 李和万, 刘戡, 王来贵, 等. 节理煤体低温损伤机理及影响范围研究[J]. *实验力学*, 2022, 37(5):675–688 (LI Hewan, LIU Jian, WANG Laigui, et al. Research on low temperature damage mechanism and influence scope of intermittent joint coal body[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2022, 37(5):675–688 (in Chinese))
- [24] 李和万, 刘戡, 高熹才, 等. 液氮冷加载对不同含水饱和度节理煤样损伤的影响[J]. *采矿与安全工程学报*, 2022, 39(2):413–420 (LI Hewan, LIU Jian, GAO Xicai, et al. Effect of cold loading by liquid nitrogen on damage of coal samples with varied joint angles and water saturation levels[J]. *Journal of Mining & Safety*

- Engineering, 2022, 39(2):413–420 (in Chinese))
- [25] 李和万, 张子恒, 王来贵, 等. 循环冷浸致煤样结构损伤的力学性质演化规律[J]. 煤炭学报, 2021, 46(S2):770–776 (LI Hewan, ZHANG Ziheng, WANG Laigui, et al. Evolution law of mechanical properties of coal sample structure damage caused by cyclic cold leaching[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(S2):770–776 (in Chinese))
- [26] Chen S, Zhang L, Zhang C, et al. Experimental study on the seepage characteristics of bituminous coal under the conditions of liquid nitrogen fracturing[J]. Energy Science & Engineering, 2019, 7(5):2138–2154.
- [27] 王来贵, 甘超超, 李和万, 等. 液氮作用下煤样结构损伤规律研究[J]. 实验力学, 2020, 35(1):109–117 (WANG Laigui, GAN Chaochao, LI Hewan, et al. Study on the law of coal-sample structural damage under liquid nitrogen[J]. Journal of Experimental Mechanicals, 2020, 35(1):109–117 (in Chinese))
- [28] 吕伏, 徐曾和, 梁冰, 等. 考虑煤岩变形和煤对瓦斯吸附特性的煤体渗透规律试验研究[J]. 实验力学, 2018, 33(3):469–476 (LÜ Fu, XU Zenghe, LIANG Bing, et al. Experimental Study on the seepage law of coal considering deformation of the coal rock and the adsorption characteristics[J]. Journal of Experimental Mechanicals, 2018, 33(3):469–476 (in Chinese))

## Study on permeability characteristics of coal samples under liquid nitrogen cold loading

SUN Siyang, LI Hewan, WANG Laigui, LIU Jian, ZHANG Ziheng

(Department of Mechanics and Science Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

**Abstract:** To study the influence of liquid nitrogen cold loading on the permeability characteristics of coal samples, the research method combining experimental research and theoretical analysis was used to study the change law of pore and fracture structure damage and damage, physical and mechanical properties, and permeability characteristics of coal samples under different cold loading cycles. The development of coal samples' cracks before and after different cold loading cycles were obtained by scanning electron microscope, wave velocity test, permeability test, uniaxial compression test, change of wave velocity attenuation rate, pore volume, compressive strength, and permeability. The test results show that (1) cold loading with liquid nitrogen can effectively promote the initiation and development of coal sample fractures, effectively connect relatively independent fracture structures, form interwoven fracture networks, increase the gas flow of coal samples, and thus improve the permeability of coal samples; (2) The combined effect of temperature difference effect and water ice phase change also has a strong promoting effect on the permeability of coal samples; (3) With the cycle of cold loading cycle, the crack expansion width and expansion rate of coal samples gradually increase, the mechanical properties are weakened, the compressive strength is getting worse and worse, the overall damage degree of coal samples is serious, and the permeability increases exponentially, increasing by 16.76 times.

**Keywords:** liquid nitrogen cold loading; coal sample damage; the attenuation rate of wave velocity; porosity; permeability