

文章编号:1001-4888(2016)01-0119-08

液氮对含水煤样裂隙疲劳增扩作用的试验研究^{*}

李和万¹, 王来贵¹, 张春会^{1,2}, 杜伟¹, 李建澎¹

(1. 辽宁工程技术大学 力学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 河北科技大学 建筑工程学院, 河北石家庄 050018)

摘要: 为分析液氮注入对含水煤层裂隙疲劳增扩的影响, 分别取干燥煤样、50%水饱和煤样和100%水饱和煤样, 在室内开展了周期疲劳液氮浸泡试验, 利用激光显微镜和声波测试仪测试液氮作用前后煤样表面裂隙结构和波速的变化。结果表明: 1) 经过液氮浸泡后, 干燥煤样裂隙扩展效果不明显, 10个浸泡周期后煤样仍完整; 2) 含水煤样的裂隙主要在垂直节理方向发生扩展; 3) 饱水程度越高, 煤样裂隙扩展越显著; 4) 饱水程度越高, 煤样液氮浸泡破坏所需的浸泡周期越短。煤样的饱水程度对液氮致裂效果影响显著。

关键词: 液氮; 裂隙; 增透; 疲劳增扩; 含水煤样

中图分类号: TD821 文献标识码: A DOI: 10.7520/1001-4888-15-069

0 引言

煤储层的渗透性能是煤层气开发中的关键参数。煤层是一种地质材料, 自身存在裂隙、层理和孔洞等缺陷。煤层赋存于地下, 较大的挤压地应力、富水阻离、固体颗粒填充等极大地降低了煤层的渗透性能, 从而形成低透性煤层^[1], 煤层气不能顺利通过低透性煤层进入主井, 导致开采效率降低。寻找提高煤层透气性方法一直是煤层气抽采工程中的关键。

当前研究人员对煤层增透技术进行了较多研究, 主要有水力压裂、水力冲孔、水力割缝和深孔爆破预裂等^[2-5]。王思鹏^[6]等采用水力压裂增透技术使煤层裂隙增大, 透气性系数增加近千倍, 单孔瓦斯抽采量增加上百倍。徐东方^[7]等对底板巷水力冲孔卸压增透技术进行了研究, 发现增透半径是普通钻孔抽采影响半径的1.6~2.0倍, 提高了煤层透气性。方前程^[8]等研究发现水力割缝可以增强煤层透气性, 使煤层气抽采效果得到很大的提高。张延明^[9]等采用深孔爆破对低透气煤层的预裂纹进行增透, 可以增大钻孔抽放流量。上述技术的工艺比较复杂, 适用于产层较多、软分层或深度浅等实际工程运用, 因此亟待找到一种工艺简单、适用性更强的提高煤层透气性的技术。

液氮是一种低温流体, 气化温度为-195.8℃, 在室温下气化体积可膨胀694倍。近些年, 一些研究者尝试使用液氮冷冻煤岩等材料, 破坏煤岩结构, 提高其渗透性。如任韶然等^[10]研究了液氮对煤岩的冷冲击作用机制, 建立了煤岩基质的冷缩应力的计算模型。蔡承政^[11]等利用液氮冻结条件对岩石孔隙结构损伤进行了试验研究, 观察岩石孔隙结构产生的损伤情况, 取得了一定的效果。张春会等^[12-13]开展了液氮溶浸煤致裂的实验, 研究了液氮冷裂煤致裂的数值计算方法。但这些研究多采用单周期试验, 对于采用液氮致冷多周期疲劳冻结条件下煤样裂隙结构损伤的研究相对较少。本文采用液氮对煤样进行单周期和多周期液氮浸泡, 研究液氮浸泡对含水煤样裂隙扩展的规律, 这将对煤层增透和煤层气开采具有理论借鉴意义。

* 收稿日期: 2015-04-26; 修回日期: 2015-08-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51474121, 51274079, 51574139)资助

通讯作者: 李和万(1983—), 男, 博士研究生, 讲师, 主要从事地下煤岩结构和力学的研究。Email: lhw515ql@163.com

1 试验

1.1 试样制备

选取原生裂隙少、层理清晰的阜新盆地长焰煤制作煤试样。将原煤利用岩石切割机切成 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 表面平整的正方体煤样。将煤样在烘干箱中于 80°C 烘干 20h 获得干燥煤样,记为I型煤样。再利用真空泵进行饱和处理,每 0.5h 进行称重,多次称重直到煤样质量不再增加为止,即认为该煤样为水饱和度100%试样,记为III型煤样。在同块原煤取不同煤样,根据增重百分比确定并获取饱和度50%煤样,记为II型煤样。

1.2 试验方案

1.2.1 液氮浸泡试验及流程

(1) 不同饱和度煤样的单周期液氮浸泡试验

选择I型、II型、III型煤样各一组,利用 2.5L 钢胆保温桶进行液氮浸泡试验,煤样浸泡 4h ,室温放置 20h ,作为单周期液氮浸泡试验。

(2) 周期循环液氮浸泡煤样试验

在相同煤样饱和含水率条件下,采用多周期循环液氮浸泡煤样,每周期液氮浸泡后对饱和度进行补偿,并进行煤样称重,确定煤样内部裂隙容积在各周期的扩展量。

(3) 试验流程

具体试验流程见图1。

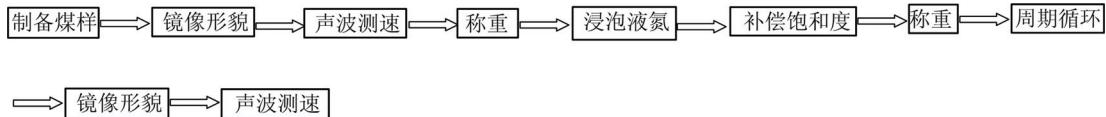


图1 周期循环试验流程图

Fig. 1 Flow chart of multi-cycles test

1.2.2 煤样测试仪器和方法

用OCS天平电子秤称量每次饱和后煤样增重,根据公式(1)换算煤样内部裂隙容积变化量 ΔV 。

$$\Delta V = \frac{M_1 - M_0}{\rho_H} \quad (1)$$

式中, ΔV 为煤样内部裂隙容积变化量, m^3 ; M_1 为饱和后煤样的质量,g; M_0 为煤样的原始质量,g; ρ_H 为水的密度, g/cm^3 。

利用OLS4000激光共聚焦显微镜观察煤样液氮浸泡试验前后表面的裂隙扩展情况,测量出裂隙增长量,放大倍数为200倍。

利用NM-4A非金属超声检测分析仪对比液氮浸泡试验前后声波在煤样中的传播速度,利用下式计算声波传播速度衰减率 Δv :

$$\Delta v = \frac{v_0 - v}{v_0} \quad (2)$$

式中, Δv 为声波传播速度衰减率; v 为浸泡后声波在煤样中的传播速度, m/s ; v_0 为浸泡前声波在煤样中的传播速度, m/s 。衰减率表征了浸泡前后声波速度在煤样中的变化率。

2 试验结果及分析

2.1 不同饱和含水率煤样液氮浸泡效果

采用镜像观测和声波传播速度检测两种方法研究I-1、II-1和III-1煤样表面和整体裂隙扩展情况。

2.1.1 煤样表面镜像观测

图2为I-1、II-1和III-1煤样经过单周期液氮浸泡前后的镜像表面形貌图,(a)、(b)、(c)分别为I-1、II-1和III-1煤样浸泡前裂隙形貌;(d)、(e)、(f)分别为I-1、II-1和III-1煤样浸泡后裂隙形貌。从图2中

可看到,裂隙在垂直节理方向裂隙扩展明显。

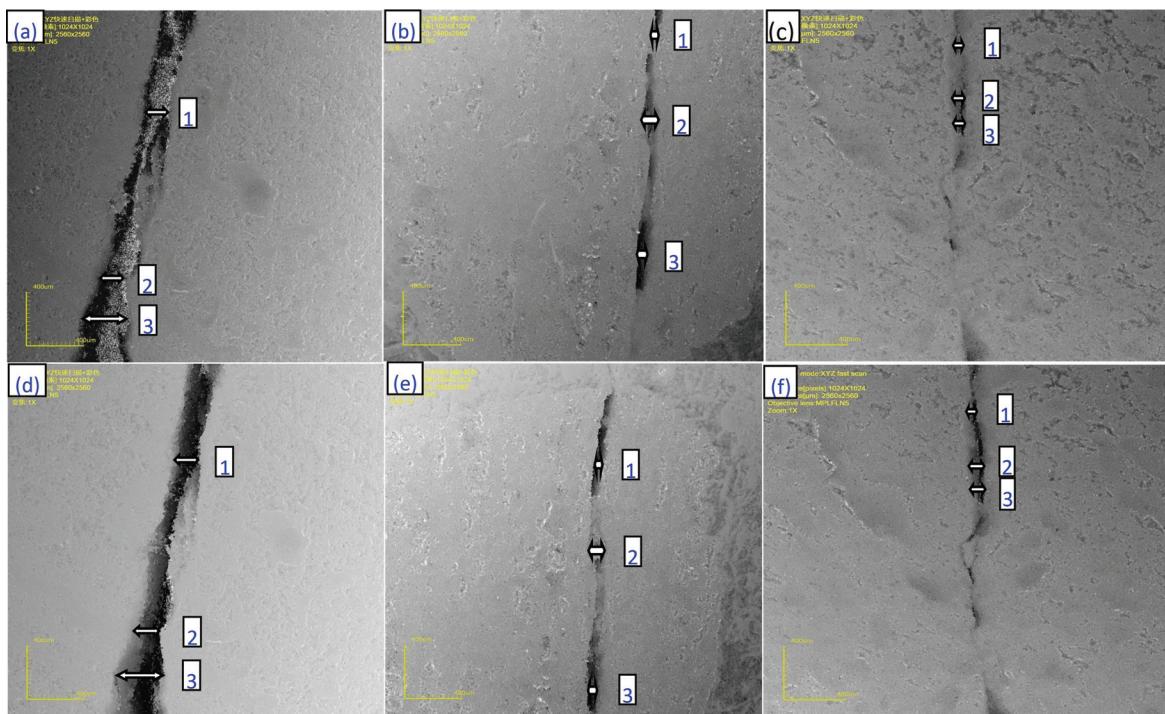


图 2 不同饱和含水率煤样液氮浸泡前后的镜像形貌

Fig. 2 The image morphology of different moisture content before and after liquid nitrogen soaking

从图 2(a)~(c)测量出 I-1、II-1 和 III-1 煤样浸泡前不同位置的裂隙宽度,从图 2(d)~(f)测量出 I-1、II-1 和 III-1 煤样浸泡后对应位置的裂隙宽度,得到的具体数据列于表 1。

表 1 液氮浸泡前后煤样裂隙扩展量

Tab. 1 The extend amount of the coal crack before and after liquid nitrogen soaking

煤样	液氮浸泡前, μm				液氮浸泡后, μm				扩展量
	1	2	3	平均	1	2	3	平均	
I-1	190.77	193.85	353.84	246.15	192.31	199.95	362.15	251.47	5.32
II-1	64.62	138.46	92.31	98.46	70.77	150.77	101.54	107.69	9.23
III-1	92.31	104.62	98.46	98.46	98.38	126.15	123.07	115.87	17.41

从表 1 可以看出,I-1 煤样液氮浸泡前的平均裂隙宽度为 246.15 μm, 液氮浸泡后为 251.47 μm, 裂隙扩展了 5.32 μm, 扩展率为 2.16%。II-1 煤样液氮浸泡前裂隙平均宽度为 98.46 μm, 液氮浸泡后为 107.69 μm, 裂隙扩展了 9.23 μm, 扩展率为 9.37%。III-1 煤样液氮浸泡前裂隙平均宽度为 98.46 μm, 液氮浸泡后为 115.87 μm, 裂隙扩展了 17.41 μm, 扩展率为 17.68%。液氮浸泡后, 煤样裂隙发育, 含水煤样的裂隙扩展效果明显大于干燥煤样, 且随着饱和含水率的提高而增大。

煤样裂隙的扩展与其内部水份冻结成冰体积膨胀和煤样热胀冷缩性质有关。水份以吸附态存在于煤样裂隙中, 由于水中存在氢键, 当水温从 4°C 开始下降时, 水中的氢键数量增加, 导致体积增大。因此水结成冰后体积增大约 1.1 倍, 并且 1g 水结冰时产生的膨胀压强为 96 MPa。试验中, 液氮气化温度为 -195.8°C, 可以在很短时间内将水冻结成冰, 使体积迅速膨胀, 对裂隙造成扩容作用。干燥煤样内部不含水, 经过液氮浸泡以后裂隙变化不明显。饱和度 100% 煤样中水在液氮作用下冻结成冰, 裂隙中没有缓冲空间, 因此膨胀压力使煤样中裂隙扩展增大。饱和度 50% 煤样中含有部分缓冲空间, 减小了膨胀压力对裂隙的扩展作用。

煤样的裂隙扩展还与煤样热胀冷缩效应有关^[14]。煤样由无机质固体组分、有机质固体组分和裂隙中空气组成。在温度变化时产生温度应力 σ :

$$\sigma = 0.1125 \alpha E \Delta T (1 - \mu) \quad (3)$$

式中, σ 为温度应力, MPa; α 为材料线膨胀系数; E 为弹性模量, GPa; ΔT 为温度变化量, °C; μ 为泊松比。 σ 、 E 因材料的不同而不同, 对于干燥煤样, 在 -195.8°C 液氮骤冷条件下, 各组分的温度应力不同, 冷缩率就不同, 气体最明显, 液体其次, 固体不显著, 造成内部应变非均匀。当裂隙尖端的应力强度超过裂隙的断裂韧度时, 煤样内部裂隙扩展。

2.1.2 煤样液氮浸泡后声波传播速度测试结果

表 2 为 I-1、II-1 和 III-1 煤样单周期循环液氮浸泡前后在平行节理 x 、平行节理 y 、垂直节理 z 三个测量方向上计算得到的声波速度衰减率。

表 2 声波传播速度衰减率

Tab. 2 The attenuation rate of the acoustic wave velocity

煤样	$\Delta v_x \times 10^{-3}$	$\Delta v_y \times 10^{-3}$	$\Delta v_z \times 10^{-3}$
I-1	10.21	22.22	206.35
II-1	9.43	36.70	508.20
III-1	55.41	140.61	552.22

根据 Wyllie 的时间平均方程^[14], 煤样孔隙度与声波传播速度存在如下关系:

$$\phi = \frac{1}{V_0(1 - \Delta v)} \frac{V_t V_m}{V_{ma} - V_t} - \frac{V_t}{V_m - V_t} \quad (4)$$

式中, V_t 为声波在水中的传播速度, m/s; V_{ma} 为声波在煤样骨架中的传播速度, m/s; V_0 为声波在煤样中的传播速度, m/s; Δv 为声波传播速度衰减率; ϕ 为孔隙度。在相同煤样和水中, V_{ma} 和 V_t 为定值, 因此孔隙度 ϕ 是衰减率 Δv 的一元一次函数, 声波在煤样中声波传播速度的衰减率越大, 其孔隙度增加的就越多。

从表 2 中发现, 煤样饱和含水率越高, 声波在煤样中的传播速度的衰减率越大, 说明煤样整体的裂隙增多或者增大。由于裂隙终端沿着节理方向容易产生应力集中, 因此沿着节理方向容易扩展。同时发现, 同一试样声波在垂直节理方向的衰减率最明显, 在平行于节理方向的衰减率变化不明显。这表明煤样在垂直节理方向的裂隙扩展以后, 形成的空气介质区域增大, 声波在传递过程中反射或折射增多, 所以声波在垂直节理方向的衰减速率明显增大。在平行于节理方向的裂隙虽然有扩张, 但声波传播路径的介质基本没有发生变化, 因此声波在平行节理方向的衰减率变化小。

2.2 周期循环液氮浸泡煤样试验结果分析

2.2.1 煤样表面镜像观测

图 3 为 I-2 和 I-3 煤样分别经过 5 个周期和 10 个周期循环液氮浸泡前后的镜像表面形貌图, (a)、(b) 分别为 I-2 和 I-3 煤样浸泡前裂隙形貌; (c)、(d) 分别为 I-2 和 I-3 煤样浸泡后裂隙形貌。

从图 3(a)、(b) 测量出 I-2 和 I-3 煤样周期循环液氮浸泡前不同位置的裂隙宽度, 从图 3(c)、(d) 测量出 I-2 和 I-3 煤样分别浸泡 5 个周期和 10 个周期后对应位置的裂隙宽度, 得到的具体数据列于表 3。

表 3 干燥煤样周期循环液氮浸泡裂隙增长量

Tab. 3 The growth of crack in dry coal after multi cycle liquid nitrogen soaking

周期	液氮浸泡前, μm				液氮浸泡后, μm				扩展量
	1	2	3	平均	1	2	3	平均	
5	212.31	461.54	353.85	339.15	218.46	476.92	372.31	355.90	16.75
10	110.77	141.54	95.38	115.90	126.15	169.23	113.85	136.41	20.51

由表 3 可知, I-2 煤样在液氮浸泡前的平均裂隙宽度为 $339.15 \mu\text{m}$, 5 个周期液氮浸泡后为 $355.90 \mu\text{m}$, 经过多周期循环浸泡, 煤样裂隙结构发生疲劳损伤, 裂隙扩展了 $16.75 \mu\text{m}$, 扩展率为 4.94% 。I-3 煤样液氮浸泡前的平均裂隙宽度为 $115.90 \mu\text{m}$, 10 个周期液氮浸泡后为 $136.41 \mu\text{m}$, 扩展了 $18.46 \mu\text{m}$, 扩展率为 15.93% 。干燥煤样 10 个周期的液氮浸泡与饱和度 100% 煤样单周期液氮浸泡的

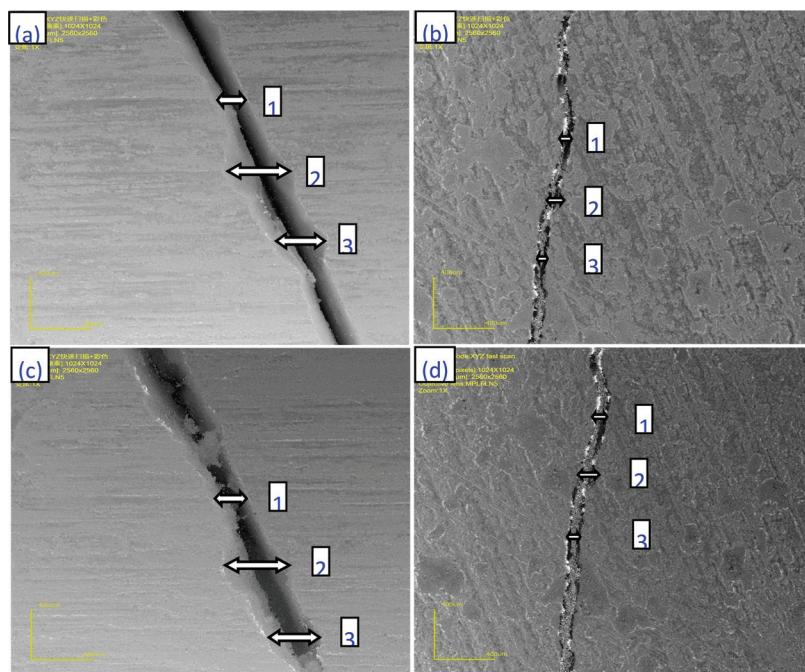


图3 干燥煤样周期循环液氮浸泡前后的镜像形貌

Fig. 3 The image morphology of dry coal before and after multi-cycles liquid nitrogen soaking 表面裂隙扩展效果相近。

II-2、III-2 煤样裂隙在多周期循环液氮浸泡中发生疲劳破坏,随着周期的增加,裂隙扩展更加明显,甚至宏观可见。水饱和度 50% 煤样经 6 个周期循环液氮浸泡,煤样沿裂隙有较大组织脱落。水饱和度 100% 煤样经 3 个周期液氮浸泡,煤样边缘沿裂隙有较大组织脱落,经 5 个周期液氮浸泡,煤样沿裂隙彻底碎裂。这表明随着饱和含水量的提高,煤样破坏的液氮浸泡周期降低。

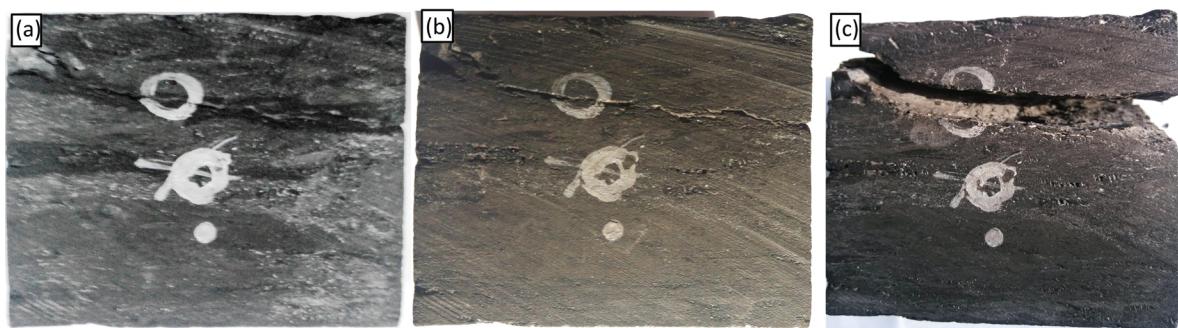


图4 饱和度 50% 煤样多周期循环液氮浸泡前后形貌

Fig. 4 The morphology of 50% water saturation coal samples before and after multi-cycles liquid nitrogen soaking
2.2.2 声波在干燥煤样中的传播速度测量

测量得到 I-2 煤样经过 5 个和 10 个周期液氮浸泡后声波在平行节理 x 、平行节理 y 和垂直节理 z 三个方向的传播速度衰减率见表 4,由于 II-2 煤样、III-2 煤样在多周期液氮浸泡后发生了疲劳碎裂,声波传播速度测量不能反映煤样内部裂隙的增长情况,故未给出。

表4 干燥煤样液氮浸泡声波传播速度衰减率

Tab. 4 The attenuation rate of soaked dry coal samples' acoustic wave velocity

周期	$\Delta v_x \times 10^{-3}$	$\Delta v_y \times 10^{-3}$	$\Delta v_z \times 10^{-3}$
5	12.28	39.71	232.14
10	41.79	176.06	428.57

由表 4 可知,声波在煤样中的传播衰减速率随浸泡周期的增加而增大,垂直节理方向声波传播速度

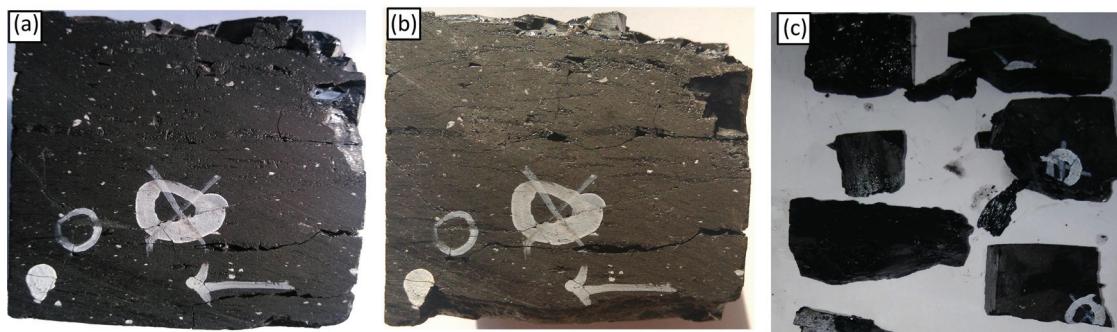


图5 饱和度100%煤样周期循环液氮浸泡前后形貌

Fig. 5 The morphology of 100% water saturation coal samples before and after multi cycles liquid nitrogen soaking
衰减率最大。对比表4和表2中干燥煤样的声波传播速度衰减速率发现,5周期液氮浸泡比1周期液
氮浸泡声波传播速度衰减速率增幅较小,水饱和度100%煤样10周期液氮浸泡后比1周期液氮浸泡声
波传播速度衰减率低。

2.2.3 饱和度100%煤样在液氮浸泡过程中裂隙扩展量测量

表5为饱和煤样液氮浸泡后裂隙体积增加量。从表5可知,水饱和度100%煤样内部裂隙的增长是疲劳累积的过程,当达到强度极限时,发生破坏。在3个周期液氮浸泡后,裂隙体积反而减小,是因为对煤样饱和度进行补偿的过程中,煤样表面有组织脱落,其质量大于水的增重,所以裂隙体积通过质量换算后减小。

表5 饱和煤样液氮浸泡后裂隙体积增加量

Tab. 5 The volume increasing of saturated coal samples after soaked

饱和次数	煤样质量 M(g)	裂隙体积 V(m ³)	裂隙体积增加量 ΔV(m ³)
0	264.83	4.52×10^{-6}	0
1	269.35	4.75×10^{-6}	0.23×10^{-6}
2	269.58	5.44×10^{-6}	0.69×10^{-6}
3	270.27	5.1×10^{-6}	—
4	269.93	—	—

由于煤样每周期液氮骤冷产生变形,内部裂隙扩展,当试验条件恢复原始状态时,会留有残余变形,每个周期变形的累积超过煤样的极限应变,则发生疲劳破坏,见公式(5)最大伸长线应变理论。含水煤样每周期裂隙扩展较大,残余变形较多,所以比干燥煤样更容易疲劳破坏。干燥煤样若要发生疲劳碎裂要10个以上周期的液氮浸泡。

$$[\sigma] < \sigma_i - \mu(\sigma_e + \sigma_s) \quad (5)$$

式中,[σ]为煤样的破坏极限,MPa; σ_i 为垂直节理方向正应力,MPa; σ_e 、 σ_s 为平行节理方向正应力,MPa; μ 为泊松比。由于干燥煤样内部裂隙中只有空气,在液氮骤冷条件下,对裂隙扩展较小,残余变形也较小,变形积累缓慢,所以5个周期比1个周期声波传播速度增幅小。煤样表面没有围压,其表面裂隙容易扩展,从图2(c)、(f)和图3(b)、(d)中可以观测到两者表面裂隙扩展接近。而煤样内部裂隙存在较大围压,其内部裂隙变化较外部困难,所以饱和煤样内部裂隙扩展水平要高于干燥煤样。

3 结论

- (1) 干燥煤样经过多周期液氮浸泡裂隙扩展效果不明显,经过10个液氮浸泡周期未破碎。
- (2) 含水煤样经过液氮浸泡后裂隙主要在垂直节理方向发生扩展,随着饱和含水量的提高,裂隙扩展程度显著,并且煤样表面裂隙比内部裂隙容易扩展。
- (3) 随着饱和含水量的提高,含水煤样的破坏浸泡周期减少,饱和含水率为50%和100%的煤样分

别经过6次和5次发生破裂。

(4) 实际煤层处于一定的地应力环境中,然而本文没有考虑围压对液氮处理效果的影响,主要研究了液氮对不同饱水度无约束煤样的作用效果,这是本文的不足之处。在下一步的研究工作中,将深入考察地应力对液氮作用效果的影响。

参考文献:

- [1] 胡刚,王晓波,王维维. 低透气性煤层长钻孔爆破增透技术[J]. 黑龙江科技学院学报, 2013, 23(2):159—162 (HU Gang, WANG Xiaobo, WANG Weiwei. Study on technology of increasing permeability of lowgas permeability coal seam by long-drilling explosion[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Science & Technology, 2013, 23(2):159—162(in Chinese))
- [2] 王新新,石必明,穆朝民. 水力冲孔煤层瓦斯分区排放的形成机理研究[J]. 煤炭学报, 2012(3):467—471 (WANG Xinxin, SHI Biming, MU Chaomin. Study on formation mechanism of gas emission partition inhydraulic flushing coal seam[J]. Journal of China Coal Socoety, 2012(3):467—471(in Chinese))
- [3] 张英华,倪文,尹根成等. 穿层孔水压爆破法提高煤层透气性的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(3):298—302 (ZHANG Yinghua, NI Wen, YIN Gencheng, et al. Study on improving the penetrability of coal seam with the water pressure blasting in the through beds hole[J]. Journal of China Coal Socoety, 2004, 29(3):298—302(in Chinese))
- [4] 赵岚,冯增朝,杨栋等. 水力割缝提高低渗透煤层渗透性实验研究[J]. 太原理工大学学报, 2001, 32(2):109—111(ZHAO Lan, FENG Zhengchao, YANG Dong, et al. Testing study of improving seepagef low laws of lowseepage coalbed by hydritic-cutting seams[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2001, 32(2):109—111(in Chinese))
- [5] 弓美疆,池鹏,张明杰. 低透气性高瓦斯煤层深孔控制预裂爆破增透技术[J]. 煤炭科学技术, 2012, 10:69—72 (GONG Meijiang, CHI Peng, ZHANG Mingjie. Permeability increase with deep borehole controlled pre-cracking blasting technology in low permeability and high gassy seam[J]. Coal Science and Technology, 2012, 10:69—72 (in Chinese))
- [6] 王思鹏. 低渗煤层压裂增透新技术研究[J]. 中国煤炭, 2010(7):101—103(WANG Sipeng. Study on fracturing technology to improve permeability in coal seams with low permeability[J]. China Coal, 2010(7):101—103 (in Chinese))
- [7] 徐东方,黄渊跃,罗治顺等. 底板巷水力冲孔卸压增透技术的研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(2):42—44, 48(XU Dongfang, HUANG Yuanyue, LUO Zhishun, et al. Study and application on pressure releasing and permeability improved technology with hydraulic flushing in floor gateway[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(2):42—44, 48(in Chinese))
- [8] 方前程,王兆丰,杨利平. 利用水力割缝提高低透气性煤层瓦斯抽放的试验研究[J]. 煤, 2007, 16(5):1—2, 38 (FANG Qiancheng, WANG Zhao Feng, YANG Liping. Study on utilizing the hydraulic cutting seam technology to improve the low gas permeability coal seam and gas drainag[J]. Coal, 2007, 16(5):1—2, 38(in Chinese))
- [9] 张延明. 低透气煤层深孔爆破预裂增透技术实践[J]. 中州煤炭, 2010, 178(10):11—13(ZHANG Yanming. Practiceon permeability-increasing technology by deep boreholes pre-split blasting technology in low permeability coal seams[J]. Zhongzhou Coal, 2010, 178(10):11—13(in Chinese))
- [10] 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(2): 3790—3794(REN Shaoran, FAN Zhikun, ZHANG Liang, et al. Mechanisms and experimental study of thermal-shockeffect on coal-rock using liquid nitrogen[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32 (2):3790—3794(in Chinese))
- [11] 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 Chengzheng, LI Gensheng, HUANG Zhongwei, et al. Experiment study of rock porous structure damage undercryogenic nitrogen freezing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4):965—971(in Chinese))
- [12] 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 Xizhao, 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))

Chinese))

- [13] 张春会, 王来贵, 赵全胜 等. 液氮冷却煤变形—破坏—渗透率演化模型及数值分析[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(1) :90—99 (ZHANG Chunhui, WANG Laigui, ZHAO Quansheng, et al. Permeability evolution model and numerical analysis of coupled coal deformation, failure and liquid nitrogen cooling [J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2015, 36(1) :90—99(in Chinese))
- [14] 叶雯, 杨永民. 大体积混凝土施工温度监测及其温度应力分析[J]. 混凝土, 2008, 277(9):104—107(YE Wen, YANG Yongmin. Temperature monitor and temperature stress analys is of big bulk concrete structure [J]. Concrete, 2008, 277(9):104—107(in Chinese))
- [15] 史谔, 沈联蒂. 根据波速—压力关系评价岩石岩性、物性的实验研究[J]. 地球物理学报, 1990, 33(2):212—218 (SHI Ge, SHEN Liandi. Evaluations of the lithological character and physical property of rocks from rhe relation between wave velocity and pressure—an experimental study[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1990, 33(2):212—218(in Chinese))

Experimental Study of the Fatigue Crack Extension Influence of Liquid Nitrogen on Water Cut Coal Sample

LI He-wan¹, WANG Lai-gui¹, ZHANG Chun-hui^{1,2}, DU Wei¹, LI Jian-peng¹

(1. Liaoning Technical University Mechanics and Engineering Academy, Fuxin 123000, Liaoning, China; 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technical, Shijiazhuang 050018, Hebei, China)

Abstract: In order to analyze the influence of liquid nitrogen immersion on the fatigue crack extension in water cut coal seam, dry coal samples, 50% water saturated coal samples and 100% water saturated coal samples were collected respectively, and a cyclic fatigue liquid nitrogen immersion experiment was carried out in laboratory. The changes of crack structure on coal sample surface before and after liquid nitrogen immersion was observed by laser microscope and the crack extension velocity was measured by sound wave tester. Results show that 1) liquid nitrogen immersion has no obvious effect on the dry coal samples, which were still intact after 10 immersion cycles; 2) the crack extension is mainly along the vertical direction to joint; 3) the higher the water saturated degree is, the more obvious the crack extension of coal sample; 4) the higher the water saturated degree is, the shorter the immersion period required by liquid nitrogen immersion. The water saturation percentage of coal specimen has remarkable effect on the coal crack growth due to liquid nitrogen immersion.

Keywords: liquid nitrogen; fracture; increased permeability; fatigue crack extension; water cut coal sample