

焦煤和无烟煤的液氮冷冻致裂效果对比试验

张春会^{1,2}, 刘泮森¹, 王锡朝¹, 于永江², 郭晓康¹, 王来贵²

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

摘要:为了分析煤阶对液氮冷冻致裂效果的影响,对高阶无烟煤和中阶焦煤开展了液氮冷冻试验,利用超声波测试仪测试液氮冷冻致裂前后的波速变化,分析了煤阶、饱水对液氮冷冻效果的影响。结果表明:无烟煤饱水后波速下降,焦煤饱水后波速增长;对于干燥煤样,液氮作用后无烟煤的损伤程度要比焦煤的损伤程度严重;饱水煤样液氮冷冻致裂效果更好;饱水无烟煤液氮作用后,波速平均下降19.8%;饱水焦煤液氮冷冻致裂作用后,波速平均下降27.6%;在饱和状态下,液氮作用后焦煤的损伤程度比无烟煤更显著。

关键词:无烟煤;焦煤;煤阶;液氮冷冻;裂隙扩展

中图分类号:TD313 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-2336(2017)06-0030-05

Contrast test study on fracturing anthracite and coking coal by liquid nitrogen cooling

Zhang Chunhui^{1,2}, Liu Pansen¹, Wang Xizhao¹, Yu Yongjiang², Guo Xiaokang¹, Wang Laigui²

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: In order to investigate the effects of the coal ranks on fracturing low-permeability coal bed through liquid nitrogen cooling, the meta anthracite and the medium coking coal were obtained and immersed in liquid nitrogen. The wave velocities before and after liquid nitrogen cooling were measured by ultrasonic tester. The effects of coal ranks and saturation on liquid nitrogen fracturing coal samples are investigated. The results show that: after the saturation, the wave velocity of the anthracite decreases, and the wave velocity of the coking coal increases. For dried coal samples, after liquid nitrogen cooling the damage of the anthracite is more serious than that of the coking coal. Saturated coal samples after liquid nitrogen cooling are much effectively damaged and fractured. The average wave velocity of the saturated anthracite samples and coking coal samples after liquid nitrogen cooling decreased by about 19.8% and 27.6%, respectively. The damages of the later are much more significant.

Key words: anthracite; coking coal; coal ranks; liquid nitrogen cooling; cracks extension

0 引 言

我国煤层气储量丰富,2 000 m以浅的煤层气资源量约 $36.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,位居世界第3位。然而,我国煤储层埋深大,构造应力大,具有低渗透性、高含气量、低储层压力和低含气饱和度的“三低一高”特征^[1],煤层气单井抽采效率低,开发困难。如何提高低渗煤储层的渗透率已成为我国煤层气资源开发

的关键。

国内外先后尝试了多种技术提高低渗煤储层的渗透率。崔刚^[2]使用水力压裂增透煤储层,提高了煤储层的渗透率。郝春生等^[3]将径向井与水力压裂结合以提高煤储层的渗透性。李宗福等^[4]提出了水力压裂-水力割缝联合增透技术。王玉杰等^[5]开展了松软煤层水力冲孔增透试验研究。张延明^[6]使用深孔爆破方法提高煤储层渗透率。穆朝

收稿日期:2017-03-17;责任编辑:王晓珍 DOI:10.13199/j.cnki.cst.2017.06.005

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51574139,51274079,51474121)

作者简介:张春会(1976—),男,辽宁沈阳人,教授,博士。Tel:0311-81668890, E-mail:zhangchunhui789@126.com

引用格式: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 Xizhao, 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.

民等^[7]尝试采用定向聚能爆破提高煤储层渗透率。李晓红等^[8]采用高压脉冲水射流的煤储层增透技术。这些新技术有效提高了我国低渗煤储层的渗透率。但目前我国煤层气整体开发水平还很低,仍需要深入研究低渗煤层致裂增透技术。在页岩气开发中,已开始使用低温流体如液氮冷裂增透岩石^[9-11]。任韶然等^[12]对型煤煤样开展了液氮冷冲击试验,研究了冷冲击前后煤样的微观结构变化及内在机制。张春会等^[13-15]对不同饱水度煤样开展了液氮溶浸试验,分析了饱水度和再溶浸对煤冷裂增透的影响,给出了含水煤裂隙扩展判据。李和万等^[16-17]分析了初始温度对液氮作用煤内裂隙扩展的影响,研究了液氮作用对煤强度的影响。

煤层气按赋存煤层的煤阶分为高煤阶煤层气、中煤阶煤层气和低煤阶煤层气。中国各煤阶煤类齐全,高煤阶煤主要分布在华北中部、沁水盆地、河南焦作、山西晋城等地,中煤阶煤分布较为分散,低煤阶煤主要分布在中国东部与西北地带。由于各地煤阶差异大,若使用液氮注入煤层致裂增透,需要了解煤阶对液氮注入致裂增透效果的影响。为此,笔者从山西晋城取代表性高阶无烟煤、从辽宁阜新取代表性中阶焦煤制作煤样,开展了液氮冷冻煤试验研究,分析了煤阶对液氮冷冻致裂效果的影响。

1 试 验

1.1 煤样制备

从辽宁阜新煤矿取大块中阶焦煤煤样,从山西晋城煤矿取大块高阶无烟煤煤样,在实验室加工成50 mm×50 mm×50 mm的煤样,尺寸误差不超过0.1 mm,煤样表面平整,各端面与轴线垂直,最大偏差不超过0.25 mm。焦煤煤样和无烟煤煤样各制备4个煤样。测试煤样的孔隙度,然后将煤样置于烘干箱内烘干48 h,取出后使用NM-4B非金属超声波测试仪测试每一煤样波速。然后取无烟煤和焦煤煤样各2个,进行抽真空饱和^[14]。

1.2 试验装置及试验过程

液氮冷冻试验装置由液氮罐、脚踏式液氮泵、真空保温试验容器和抽真空试验装置构成,如图1所示。

具体试验过程为:①对于饱水试样,擦干试样表面浮水,利用NM-4B非金属超声波测试仪测试试样波速。对于干燥试样,直接进入步骤②。②将试样轻放于保温不锈钢容器内,脚踏液氮泵,缓慢注入



图1 试验装置

Fig. 1 Experimental device

液氮,使液氮淹没试样5 cm,盖上桶盖,让液氮冷冻煤样40 min。③打开桶盖,小心取出试样,放置于室内4 h恢复至室温,这时煤样内的液氮已完全挥发,再使用NM-4B非金属超声波测试仪测试试样波速。④将试样再次轻放于保温不锈钢容器内,重复步骤②和③,测试二次冷冻后的波速变化情况。⑤取另一个试件继续进行试验。

1.3 测试方法及测试指标

Cha等^[18]给出了岩石波速与内部裂隙间距之间的关系,即:

$$V = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{kSG}{kS + G} \right)} \quad (1)$$

式中: V 为波速; ρ 为岩石密度; k 为裂隙切向刚度; S 为裂隙间距; G 为岩块剪切模量。

由式(1)可以得到:

$$\frac{1}{S} = \frac{k}{\rho V^2} - \frac{k}{G} \quad (2)$$

从式(2)可以看出,由于声波在空气中或水中的传播速度远小于煤基质,若煤样裂隙间距变小(裂隙密度增加),煤样内空隙空间(包括孔隙、微裂隙和裂隙)增加,则波速减小。因此,笔者使用波速来描述液氮冷冻后煤样内部空隙缺陷结构的发展。为了便于定量分析,定义超声波速变化率为

$$\eta = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为波速变化率,%; V_0 为液氮作用前煤样的波速; V_1 为液氮作用后煤样的波速。

结合式(3)和式(2)可以看出, η 越大,液氮冷冻作用后煤样的波速降低得越多,煤样内的空隙缺陷结构也就越多,煤样的渗透能力也就越大。

2 试验结果及分析

由液氮冷冻试验和波速测试,获得不同煤阶煤饱水和液氮冷冻前后试验结果见表1。

由表1可知,无烟煤的密度和孔隙度平均分别

为 1.455 g/cm³ 和 5.078%, 焦煤的密度和孔隙度平均分别为 1.345 g/cm³ 和 7.71%, 对比无烟煤和焦煤的密度和孔隙度, 可见无烟煤煤阶高, 密度大, 孔隙度小。

从表 1 波速测试结果可以看出, 不同煤阶煤孔隙度不同, 其波速也存在显著差异。无烟煤的平均

孔隙度为 5.078%, 其平均波速为 2 124.3 m/s, 焦煤的平均孔隙度为 7.71%, 其平均波速为 1 798.8 m/s。可见, 焦煤的孔隙度大, 超声波速低, 无烟煤的孔隙度小, 超声波速高, 这与式 (2) 描述的结果一致, 表明使用超声波速描述煤样内空隙缺陷结构扩展是合理的。

表 1 无烟煤和焦煤液氮冷冻前后波速变化

Table 1 The wave velocity change of anthracite and coking coal by liquid nitrogen cooling

编号	煤类型	密度 / (g · cm ⁻³)	孔隙度 / %	状态	饱水前后波速/(m · s ⁻¹)		液氮冷冻前后波速/(m · s ⁻¹)		η_1 /%	η_2 /%	η_3 /%
					饱水前	饱水后	冷冻后	二次冷冻后			
A1	无烟煤	1.47	5.12	饱水	2 135	2 112	1 744	1 434	1.07 ↓	17.4 ↓	32.1 ↓
A2	无烟煤	1.43	5.02	饱水	2 142	2 096	1 632	1 475	2.10 ↓	22.1 ↓	29.6 ↓
C1	无烟煤	1.44	5.04	干燥	2 096	—	1 963	1 945	—	6.3 ↓	7.2 ↓
C2	无烟煤	1.48	5.13	干燥	2 124	—	1 985	1 990	—	6.5 ↓	6.3 ↓
a1	焦煤	1.34	7.68	饱水	1 843	1 996	1 386	1 246	8.30 ↑	30.6 ↓	37.6 ↓
a2	焦煤	1.37	7.82	饱水	1 796	1 972	1 487	1 295	9.70 ↑	24.6 ↓	34.3 ↓
c1	焦煤	1.32	7.65	干燥	1 824	—	1 783	1 754	—	3.2 ↓	3.8 ↓
c2	焦煤	1.35	7.69	干燥	1 732	—	1 690	1 669	—	2.5 ↓	3.6 ↓

注: η_1 为饱水前后波速变化率, $\eta_1 = (\text{饱水前波速} - \text{饱水后波速}) / \text{饱水前波速}$; η_2 为液氮冷冻前后波速变化率, 对于饱水试样, $\eta_2 = (\text{饱水后波速} - \text{冷冻后波速}) / \text{饱水后波速}$; 对于干燥试样, $\eta_2 = (\text{干燥试样波速} - \text{冷冻后波速}) / \text{干燥试样波速}$; η_3 为二次冷冻前后波速变化率, $\eta_3 = (\text{冷冻后波速} - \text{二次冷冻后波速}) / \text{冷冻后波速}$; “↓”表示波速降低; “↑”表示波速增加。

2.1 不同煤阶煤饱水前后波速变化

从表 1 可以看出, 饱水前后无烟煤和焦煤煤样的波速呈不同变化规律。无烟煤饱水后波速出现下降, 而焦煤饱水后波速增加。这主要是由于: 焦煤孔隙度大, 大孔和中孔占比大, 饱水过程中, 水渗流进入焦煤的孔隙, 由于水中波速大于空气中波速, 使得饱水焦煤的波速增加。而无烟煤较为致密, 小孔与微孔占比大, 饱水过程中, 水分子主要通过吸附和扩散运动进入, 结合水分子, 发生“水楔作用”, 挤入煤颗粒间的微缝隙, 增大了颗粒间距离, 使得波速降低。

2.2 液氮冷冻前后煤样的波速变化

从表 1 还可以看出, 饱水和干燥无烟煤、饱水和干燥焦煤液氮冷冻前后煤样的波速变化。相比于饱水煤样, 干燥无烟煤和干燥焦煤液氮冷冻后波速变化小。干燥无烟煤液氮冷冻后波速平均下降 6.4%, 干燥焦煤液氮冷冻后波速平均下降 2.9%。然而饱水无烟煤和饱水焦煤液氮冷冻后波速平均分别下降 19.8% 和 27.6%。煤样饱水后液氮冷冻致裂增透效果更好, 这与文献 [13] 和 [14] 的结论一致。

在干燥状态下, 液氮冷冻后无烟煤的损伤程度

要比焦煤的损伤程度严重。这主要是由于: 原始干燥煤样内分布着大量的微裂隙、微孔隙, 液氮冷冻后, 由于煤样矿物颗粒热胀冷缩, 煤样内微裂隙扩展、新裂隙形成, 促使原生微裂隙之间相互联通。煤的热体积膨胀系数是影响干燥煤样损伤程度的主要因素。对于焦煤, 煤样孔隙度大, 初始损伤严重, 煤样热体积膨胀系数小, 使得液氮作用下致裂效果差, 煤样损伤程度小, 波速变化率低。对于无烟煤, 初始损伤小, 煤样孔隙度小, 热体积膨胀系数相对较大, 液氮作用下致裂效果较好, 损伤程度相对较大, 波速变化率大。

饱水无烟煤液氮冷冻作用后, 波速平均下降 19.8%。饱水焦煤液氮冷冻作用后, 波速平均下降 27.6%。说明在饱和状态下, 液氮作用后无烟煤的损伤程度远不如焦煤, 这与干燥组的试验现象相反, 其主要原因是: 对于饱水煤而言, 液氮冷冻作用下, 煤内水相变为冰的冻胀压力是引起煤裂隙扩展的主要原因 [13-14]。焦煤孔隙度大, 含水量高, 冻胀压力更显著。另外, 焦煤煤阶低, 矿物颗粒之间的胶接强度低, 在冻胀压力作用下煤更容易扩展, 因此在饱水状态下, 焦煤的损伤程度更大, 波速降低更显著。

2.3 液氮二次冷冻前后煤样的波速变化

对液氮冷冻后的煤样进行二次冷冻后,煤样的波速和波速变化率见表1。从表1可以看出,二次冷冻后,干燥的焦煤和无烟煤煤样的波速继续下降,但下降幅度微小,平均下降幅度约为0.6%。相比较而言,饱水煤样二次冷冻后波速下降幅度较大,约为9.7%,这与文献[13]结论一致。饱水焦煤二次冷冻后,波速下降幅度约为8.4%,饱水无烟煤二次冷冻后,波速下降幅度约为11.7%。可见,饱水无烟煤二次冷冻损伤程度更大,原因是第1次液氮冷冻后无烟煤损伤程度小,但无烟煤内部结构已遭到了很大程度破坏。当液氮二次冷冻时,无烟煤损伤加剧,其破坏程度有逐渐与焦煤相当的趋势。

3 液氮冷冻煤损伤机制分析

从上述试验结果可以看出,尽管高阶无烟煤和中阶焦煤在液氮冷冻后煤样内空隙缺陷结构扩展规律不尽相同,但总体上液氮冷冻后煤样内的损伤都得到了发展,煤样波速都有所降低。笔者结合前人研究,对液氮冷冻煤内结构损伤发展的力学机制予以分析。

3.1 饱水煤

饱水煤样内水相变为冰产生的冻胀压力一般是液氮冷冻煤结构损伤发展的主要原因。张春会等^[13]不考虑煤裂隙壁与冰的弹性变形,给出了煤内水相变为冰的冻胀压力 P_f 为

$$P_f = \frac{E_i [\eta\beta - \Delta T\alpha(1-n)]}{3(1-2\nu_i)} \quad (4)$$

式中: E_i 和 ν_i 分别为冰的弹性模量和泊松比; n 为孔隙率; β 为水冰相变体积膨胀系数; ΔT 为温差; α 为热体积膨胀系数。

张春会等^[13-14]基于冻胀压力给出了液氮作用煤裂隙扩展的判据,即当冻胀压力超过煤的抗拉强度时,裂隙扩展。

无烟煤的孔隙度为5.07%,焦煤的孔隙度为7.75%,冰的弹性模量为600 MPa^[13],冰的泊松比为0.3,水冰相变体积膨胀系数为9%,温差为215.8℃,无烟煤和焦煤的热体积膨胀系数分别为 $3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $1.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$,将上述数据代入式(4)得到无烟煤的冻胀压力为1.97 MPa,焦煤的冻胀压力为3.3 MPa。

由抗拉强度试验,无烟煤的抗拉强度为0.71 MPa,焦煤的抗拉强度为0.44 MPa,可见冻胀压力大

于抗拉强度,无烟煤和焦煤都会发生裂隙扩展和结构损伤,且焦煤的裂隙扩展和结构损伤更显著。

3.2 干煤

液氮作用使得干燥煤的温度急剧变化,引起温度应力。从理论上,长半轴为 a 的椭圆形裂隙在温度梯度作用下裂隙尖端的应力强度因子可以表示为

$$K_I = \frac{\alpha E \Delta T}{(1-\mu)} \sqrt{2\pi a} \quad (5)$$

式中: E 为煤的弹性模量; μ 为煤的泊松比。

如果 $K_I > K_{Ic}$ (煤的断裂韧度),可以认为裂隙扩展。

无烟煤和焦煤的弹性模量分别为3.94、2.57 GPa,其弹性模量均取0.4,椭圆形裂隙长半轴为2.0 cm,则由式(5)获得无烟煤的应力强度因子为1.51 MPa·m^{0.5},焦煤的应力强度因子为0.59 MPa·m^{0.5}。

Dwivedi等^[19]通过试验获得煤的断裂韧度为0.242 MPa·m^{0.5},可见煤在液氮冷冻作用下将发生裂隙扩展,且无烟煤裂隙扩展和结构损伤比焦煤更显著,这与本文试验结果一致。

4 结论及展望

1)与焦煤相比,无烟煤煤阶高,致密,孔隙度小,煤样波速高。

2)无烟煤饱水后波速下降,焦煤饱水后波速增长。这主要是由于:焦煤孔隙度大,大孔和中孔占比大,饱水过程中水渗流进入焦煤的孔隙。无烟煤孔隙率小,小孔与微孔占比大,饱水过程中水分子主要通过吸附和扩散运动进入,发生“水楔作用”,挤入煤颗粒间的微缝隙,增大了颗粒间距离。

3)干燥无烟煤液氮冷冻后波速平均下降了6.4%,干燥焦煤液氮冷冻后波速平均下降了2.9%。液氮作用后无烟煤的损伤程度要比焦煤的损伤程度严重。这主要是由于:干燥原始煤样内分布着大量的微裂隙、微孔隙,液氮冷冻后,由于煤样矿物颗粒热胀冷缩,煤样内微裂隙扩展、新裂隙形成,促使原生微裂隙之间相互联通。煤的热体积膨胀系数是影响干燥煤样损伤程度的主要因素。对于焦煤,煤样孔隙率大,初始损伤严重,煤样热体积膨胀系数小,使得液氮作用下致裂效果差,煤样损伤程度小,波速变化率低。

4)饱水无烟煤和焦煤液氮冷冻后波速平均分别下降了19.8%和27.6%,煤样饱水后液氮冷冻致

裂效果更好。

5) 饱水无烟煤液氮作用后,波速平均下降19.8%。饱水焦煤液氮作用后,波速平均下降27.6%。在饱和状态下,液氮作用后焦煤的损伤程度比无烟煤更显著,这主要是由于:焦煤孔隙度大,含水量高,冻胀压力更显著。另外,焦煤煤阶低,矿物颗粒之间的胶接强度低,在冻胀压力作用下煤更容易扩展。

6) 液氮二次冷冻后,煤样内的损伤和裂隙扩展继续发展。

7) 利用水冰相变理论和断裂力学理论可以很好地解释液氮作用煤的损伤发展和裂隙扩展。

8) 笔者仅对山西无烟煤和辽宁焦煤2种煤阶煤开展了试验研究,试验煤样相对偏少。课题组正努力获得多个区域多种不同煤阶煤试样,将进一步深入开展试验研究,以丰富和完善相关结论。另外,笔者没有考虑地应力的影响,这是本文的一个不足。为了研究地应力的影响,已制备了液氮注入钻孔煤试验装置,相关研究成果将另文报道。

参考文献 (References):

- [1] 龙胜祥,李辛子,叶丽琴,等.国内外煤层气地质对比及其启示[J].石油与天然气地质,2014,35(5):696-703.
Long Shengxiang, Li Xinzi, Ye Liqin, *et al.* Comparison and enlightenment of coalbed methane geology at home and abroad[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(5): 696-703.
- [2] 崔刚.低透气性煤层群井下增透技术[J].煤炭科学技术,2016,44(5):151-154.
Cui Gang. Permeability improved technology of low permeability seams group in underground mine[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 151-154.
- [3] 郝春生,季长江.基于径向井技术的煤储层高效增透工艺研究[J].煤炭科学技术,2016,44(5):39-42,171.
Hao Chunsheng, Ji Changjiang. Study on high efficient permeability improved technique of coal reservoir based on radial well technology[J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(5): 39-42, 171.
- [4] 李宗福,孙大发,陈久福,等.水力压裂-水力割缝联合增透技术应用[J].煤炭科学技术,2015,43(10):72-76.
Li Zongfu, Sun Dafa, Chen Jiufu, *et al.* Application of permeability improving technology combined with hydraulic pressure fracturing and hydraulic slotting[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 72-76.
- [5] 王玉杰,杨继东.低透气性松软突出煤层水力冲孔增透效果试验研究[J].华北科技学院学报,2016,13(3):12-15.
Wang Yujie, Yang Jidong. Experimental research on permeability increasing effect of hydraulic flushing for low permeability soft outburst coal seam[J]. Journal of North China Institute of Science and

Technology, 2016, 13(3): 12-15.

- [6] 张延明.低透气煤层深孔爆破预裂增透技术实践[J].能源与环保,2010(10):11-13.
Zhang Yanming. Practice on permeability-increasing technology by deep boreholes pre-split blasting technology in low permeability coal seams[J]. China Energy and Environmental Protection, 2010(10): 11-13.
- [7] 穆朝民,王海露,黄文尧,等.高瓦斯低透气性煤体定向聚能爆破增透机制[J].岩土力学,2013,34(9):2496-2500.
Mu Chaomin, Wang Hailu, Huang Wenyao, *et al.* Increasing permeability mechanism using directional cumulative blasting in coal seams with high concentration of gas and low permeability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2496-2500.
- [8] 李晓红,卢文玉,赵瑜,等.高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究[J].煤炭学报,2008,33(12):1386-1390.
Li Xiaohong, Lu Yiyu, Zhao Yu, *et al.* Study on improving the permeability of soft coal seam with high pressure pulsed water jet[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1386-1390.
- [9] Cai Chengzheng, Li Gensheng, Huang Zhongwei, *et al.* Experimental study of the effect of liquid nitrogen cooling on rock pore structure[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2014, 21: 507-517.
- [10] 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 under cryogenic nitrogen freezing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 965-971.
- [11] Minsu Cha, Xiaolong Yin, Timothy Kneafsey, *et al.* Cryogenic fracturing for reservoir stimulation-Laboratory studies[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 124: 436-450.
- [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(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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 李和万,王来贵,张春会,等.液氮对含水煤样裂隙疲劳增扩作

(下转第49页)

- Yuan Guangming, Chen Yutao, Tian Weidong, *et al.* Experimental study on hydraulic fracturing technology in outburst coal seam with low permeability in Yutianbao mine [J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(4): 9-12.
- [34] 魏国营, 郭中海, 谢伦荣, 等. 煤巷掘进水力掏槽防治煤与瓦斯突出技术[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(2): 172-176.
- Wei Guoying, Guo Zhonghai, Xie Lunrong, *et al.* Hydraulic slotting technology to prevent coal and gas outburst during heading excavation [J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(2): 172-176.
- [35] 郭相斌, 王玉杰, 杨继东. 压降法测试水力割缝有效影响半径应用分析[J]. *煤矿现代化*, 2013(3): 22-24.
- Guo Xiangbin, Wang Yujie, Yang Jidong. Application of pressure-drop testing hydraulic cutting seam effective radius [J]. *Coal Mine Modernization*, 2013(3): 22-24.
- [36] 冯文军, 苏现波, 王建伟, 等. “三软”单一煤层水力冲孔卸压增透机理及现场试验[J]. *煤田地质与勘探*, 2015, 43(1): 100-103.
- Feng Wenjun, Su Xianbo, Wang Jianwei, *et al.* The mechanism and field test of permeability improvement by hydraulic flushing in three-soft and single coal seam [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2015, 43(1): 100-103.
- [37] 陈向军. 外加水对煤的瓦斯解吸动力学特性影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2013.
- [38] 马骏驰, 陈中华, 周杨洲, 等. 突出煤层煤巷掘进水力挤出综合效益研究[J]. *煤炭技术*, 2012, 31(10): 57-59.
- Ma Junchi, Chen Zhonghua, Zhou Yangzhou, *et al.* Study on comprehensive benefit of tunneling hydraulic extrusion in outburst coal seam [J]. *Coal Technology*, 2012, 31(10): 57-59.
- [39] 王兆丰, 李宏. 煤巷水力疏松措施合理注水参数研究及应用[J]. *煤炭工程*, 2011(2): 42-45.
- Wang Zhaofeng, Li Hong. Applied study on rational water injection parameters of hydraulic relaxing measures for mine seam gateway [J]. *Coal Engineering*, 2011(2): 42-45.
- [40] 孟筠青. 煤层高压脉动注水防治煤与瓦斯突出理论与技术研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2011.
- [41] 何涛. 水分对煤瓦斯解吸性能及力学特性的影响研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [42] 邱吉龙. 不同含水率煤体的物理力学性质试验研究[J]. *华北科技学院学报*, 2013, 10(1): 6-9.
- Qiu Jilong. Experimental study on physical and mechanical properties of coal with different moisture content [J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2013, 10(1): 6-9.
- [43] 魏风清, 史广山, 张铁岗. 基于瓦斯膨胀能的煤与瓦斯突出预测指标研究[J]. *煤炭学报*, 2010, 35(S1): 95-99.
- Wei Fengqing, Shi Guangshan, Zhang Tiegang. Study on coal and gas outburst prediction indexes base on gas expansion energy [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(S1): 95-99.
- [17] 李和万, 王来贵, 张春会, 等. 冷加载循环作用下煤样强度特性研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(4): 10-14.
- Li Hewan, Wang Laigui, Zhang Chunhui, *et al.* Study on characteristic of coal sample strength under cyclic cold loading [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2016, 12(4): 10-14.
- [18] Cha M, Cho G C, Santamarina J C. Long-wave length P-wave and S-wave propagation in jointed rock masses [J]. *Geophysics*, 2009, 74(5): E205-E214.
- [19] Dwivedi R D, Soni A K, Goel R K, *et al.* Fracture toughness of rocks under sub-zero temperature conditions [J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2000, 37(8): 1267-1275.

(上接第34页)

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 influence of liquid nitrogen on water cut coal sample [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(1): 119-126.

- [16] 李和万, 王来贵, 牛富民, 等. 液氮对不同温度煤裂隙冻融扩展作用研究[J]. *中国安全科学学报*, 2015, 25(10): 121-126.

Li Hewan, Wang Laigui, Niu Fumin, *et al.* Study on effect of freeze-thaw cycle with liquid nitrogen on crack extension of coal at different initial temperatures [J]. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(10): 121-126.