

循环冷冲击作用下煤的渗透性变化规律试验研究^{*}

王登科^{1,2,3}, 吕瑞环^{1,2}, 彭明^{1,2}, 魏建平^{1,2,3}, 孙刘涛^{1,2}

(1. 河南理工大学 河南省瓦斯地质与瓦斯治理重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地, 河南 焦作, 454000; 2. 河南理工大学 安全科学与工程学院, 河南 焦作, 454000; 3. 煤炭安全生产河南省协同创新中心, 河南 焦作, 454000)

摘要: 为了研究循环冷冲击处理对煤体增透作用的影响, 利用 SLX-80 型高低温处理系统对原煤煤样进行多次循环冷冲击处理, 并利用电子天平和三轴瓦斯渗流实验系统分别测定了煤样冷冲击处理前后的质量变化和渗透率增加幅度, 对比分析了冷冲击处理前后煤样表面的裂纹分布情况。试验研究表明, 循环冷冲击处理所产生的热应力超过煤体抗拉强度时会在煤体内部形成新的裂缝, 增加原始裂缝的有效宽度, 从而提高了煤体内部裂缝连通的有效性, 有效改善了煤体渗透性; 循环冷冲击处理后煤体渗透率的平均增幅为 16%~215%, 煤体渗透率增幅大小与处理后的裂纹增加数量及其连通性紧密相关; 煤岩材料的非均质性、外部应力载荷及“负损伤”效应的影响使得循环冷冲击处理后的煤体渗透率增幅具有明显的随机性, 并呈现出非均匀波动变化特征; 循环冷冲击处理所产生的收缩-膨胀效应会引起煤体部分碎块脱落, 最终导致煤体质量减小, 循环冷处理后煤体的平均质量减幅为 0.151%。

关键词: 循环冷冲击; 煤体渗透率; 裂纹扩展; 收缩-膨胀应力; 质量改变

中图分类号: TD712

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2019)02-0409-07

Experimental Study on the Change Rule of Coal Permeability under Cyclic Cold Impact

Wang Dengke^{1,2,3}, Lü Ruihuan^{1,2}, Peng Ming^{1,2}, Wei Jianping^{1,2,3}, Sun Liutao^{1,2}

(1. State Key Laboratory Cultivation Base for Gas Geology and Gas Control, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, P.R. China; 2. School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, P.R. China; 3. The Collaborative Innovation Center of Coal Safety Production of Henan, Jiaozuo, Henan 454000, P.R. China)

Abstract: To investigate the influence of cyclic cold impact treatments on improvement of coal permeability, the SLX-80 high and low temperature treating system was utilized to conduct the cyclic cold impact treatments on raw coal, then the change of mass variation and permeability increment before and after cyclic cold impact were measured respectively by the electronic balance and the triaxial gas seepage experimental system. At the same time, the distribution of cracks on the surface of coal samples were comparatively analyzed before and after cyclic cold impact treatment. The experimental results indicate that when the thermal stress caused by cyclic cold impact exceeding the

^{*} 收稿日期: 2018-10-27(修改稿)

作者简介: 王登科(1980-), 男, 湖南永州人, 博士/博士后, 教授, 主要从事安全工程、岩石力学和多场耦合方面的工作。E-mail: wdk@hpu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(51774118, 51574112, 51304072); 教育部“创新团队发展计划”(IRT_16R22); 河南省教育厅高校重点科研项目(18A620001); 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室开放基金(SKLGDEK1814); 河南理工大学杰出青年基金(J2018-1)

tensile strength of coal, several new cracks will be generated in coal body and the effective width of original cracks will increase, which can improve the efficiency of crack connectivity and usefully improve the permeability of coal. The average growth of coal permeability after cyclic cold impact is 16%~215% and the increasing magnitude of coal permeability is closely related to the quantity of the newly generated cracks and their connectivity. The influence of the heterogeneity of coal, the external loads and the “negative damage effect” will lead to the obvious randomness of the growth of coal permeability after cyclic cold impact. And the growth of coal permeability will present a characteristic of inhomogeneous fluctuating. The effect of shrinking and swelling caused by cyclic cold impact will lead to the breaking-off of part of coal fragments, which eventually results in the reduction of coal mass. The average mass reduction of coal after cyclic cold impact was 0.151%.

Keywords: cycle cold impact; coal permeability; crack propagation; shrinking and swelling stress; mass changing

0 引言

煤层气作为煤炭形成过程中的伴生产物,不仅是煤矿安全事故的重要灾害源,更是一种宝贵的清洁能源。由于中国煤储层渗透率低下,必须要采取一定的增产措施。目前较为常用的煤层气增产方法是水力压裂^[1],但水力压裂会造成水资源的污染与浪费。引入高返排,且对储层伤害小的液氮、液态二氧化碳压裂煤层,正逐渐成为增产的常用技术手段。液氮压裂不仅会改变煤层孔裂隙特征^[2-3],且煤层中气化后的液氮还可以降低甲烷气体的分压^[4-5],促进煤层气的解吸,提高煤层气的抽采率。

煤的渗透率很大程度上取决于其孔隙大小及其连通程度^[6],对于低温流体致裂煤岩体,在改变煤岩孔裂隙特性方面一些学者进行了相关研究,任韶然等^[7]分析了液氮对煤岩冷冲击机制,并利用超声波测试手段,测试冷处理前、后煤岩的声波传播特性,分析冷冲击对煤岩力学性质的影响,认为液氮冷冲击作用能对煤岩的内部结构和力学强度产生较大改变。蔡承政等^[8-9]认为低温液氮对岩石的破坏机制有热力冲击机制和冻结破坏机制,并利用核磁共振技术,量化地研究了孔隙结构在低温处理后的变化。张春会等^[10-11]、李和万等^[12]建立了液氮冷却煤层变形-破坏-渗透率演化模型,对液氮注入引起的煤壁破裂及煤壁渗透率的变化进行了数值模拟,借助可视化实验手段,研究了裂隙在液氮处理后的发育状况,并采用断裂力学理论,研究了破裂机制。杨昊天等^[13]利用 MTS815 岩石力学试验系统研究了温度对岩石的强度特性、变形特性及破坏特征的影响。Wang 等^[3]利用压汞法,以煤岩渗透率测试手段研究了液氮注入对煤孔隙

结构与渗透率的影响,研究结果表明,液氮注入显著提高了煤总孔隙体积与渗透率。储小送等^[14]应用压汞法、低温液氮吸附法研究了构造煤孔隙特性对冰冻的响应,认为冰冻会对样品造成损伤,使较小的孔向大孔转变,在不同孔径范围及不同冰冻时间内造成的损伤程度不一,样品孔径分布与原样呈现协调变化,冰冻不会使孔径分布发生根本性的变化。

目前的冷冲击实验研究主要考虑一次冷冲击后的煤岩物性参数的变化,很少涉及循环冷冲击条件下煤岩渗透性变化的研究。本文不考虑水分对煤岩的冻结破坏机制,拟在对煤的超低温冷冲击作用基础上开展对煤的循环冷冲击处理试验,采用三轴瓦斯渗流试验系统对冷冲击前后煤样进行渗透率测定,研究循环冷冲击对煤体渗透率的影响,以期为我国煤层低温压裂增透技术提供理论基础。

1 试验设备与方案

1.1 试验装置

煤样的冷冲击试验设备采用北京中科法威普科技有限责任公司 SLX-80 型高低温处理系统(图1),该系统的有效空间为 500 mm × 400 mm × 400 mm,最大装置质量为 500 kg,温度控制范围为 -190 ℃~180 ℃,温度控制精度 ±2 ℃,升温速度为 0~10 ℃/min,降温速度为 0~40 ℃/min。

煤岩渗透率测试实验在三轴瓦斯渗流系统(图2)上进行,该实验系统包括 2 个手摇泵,向被夹持器固定的煤样分别施加轴压与围压,气体主要由瓦斯气瓶供给,利用调压阀调节进口气压,流量通过排水法统计。

1.2 煤样制备

实验所用煤样为取自山西晋煤集团泽州天安

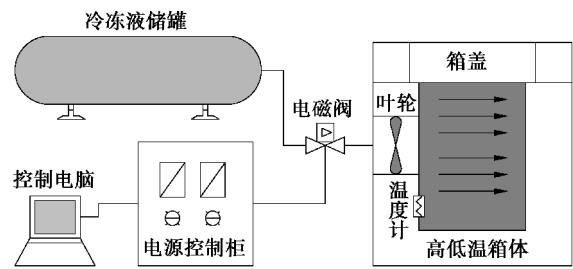


图 1 SLX-80 型高低温处理系统

Fig. 1 High and low temperature treating system of model SLX-80

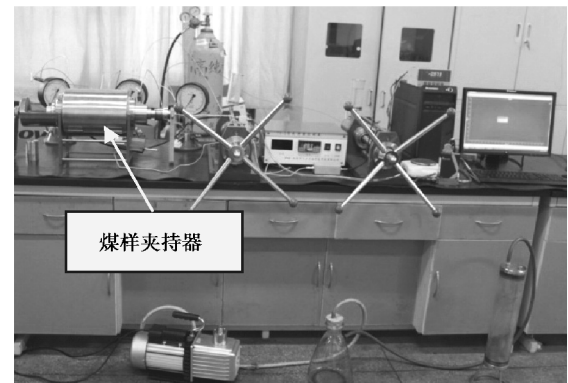


图 2 三轴瓦斯渗流实验系统

Fig. 2 The triaxial gas seepage testing system

苇町煤业有限公司的无烟煤,煤样一经取出,便进行岩心钻取工作。利用立式钻机,沿垂直层理方向下钻,从煤块中钻取直径为 50 mm 的柱状煤样,再利用切磨机切磨煤样的两个端面。因为主要进行渗流实验,切磨出的煤样长度为 50 mm±2 mm。钻取过程中主要保证连续匀速下钻,端面打磨过程中主要保证端面平整度,不平行度保持在 0.05 mm 以内。此外,选取一定量粒径为 3~6 mm 小煤粒。最后,将所有样品均干燥处理,制备好的煤样如图 3 所示。



图 3 制备好的煤样

Fig. 3 Coal samples for testing

1.3 试验方案与步骤

煤的工业分析参数如表 1 所示,煤的工业分析按照《煤的工业分析方法》(GB/T 212—2008)测定。

表 1 煤的工业分析结果

Table 1 Industrial analysis results of coal samples				
取样地点	Mad%	Aad%	Vad%	Fcad%
苇町矿	1.9	17.57	5.94	74.59

表 2 实验方案

Table 2 Experimental plan						
煤样气体渗透率测试实验			循环冷冲击实验			
围压/ MPa	轴压/ MPa	测试 气体	冲击 温度 /℃	冲击 时间 /h	冲击循环次数	
2	2	N ₂	-190	1	1 2 3 4 5	

实验方案如表 2 所示,具体实验步骤如下:

(1) 对干燥好的柱状煤样进行标号,利用电子天平对煤样进行称重,每个煤样称重 3 次,取平均值作为煤样的最终质量,并做好记录。

(2) 利用三轴瓦斯渗流实验系统测定煤样的气体渗透率,实验方法可参考文献[15,16],每个煤样测定 3 次,取平均值作为煤样初始状态下的渗透率。

(3) 启动 SLX-80 型高低温处理系统,将系统温度调节到-190℃后,将煤样放入实验系统的处理箱内进行冷冲击处理。

(4) 经低温冷冲击 1 h 后,取出煤样,待其温度回复常温,开始进行渗透率测定实验,并分别测量其质量和冷冲击后的渗透率,记录下所测实验数据。

(5) 第一次冷冲击实验完成后,重复上述(3)、(4)步骤,可进行多次冷冲击实验。

2 试验结果分析与讨论

2.1 冷冲击处理对煤样渗透性的影响

本文所用试验煤样均经充分干燥,排除水分冻胀对煤体作用,渗透率变化的影响因素主要为冷冲击的热力作用。由试验数据可以看出(表 3),经冷冲击后煤样渗透率均有所增加,但是各煤样的渗透率并不都是随冷冲击次数增加而增加的,而是具有一定的波动起伏(图 4),具有不均衡性。根据实测结果,M-1 号煤样冷冲击处理后的渗透率增幅为 76.7%~182.5%,平均增幅为 131.04%;M-2 号煤

样冷冲击处理后的渗透率增幅为 $-5.8\% \sim 37\%$,平均增幅为 16% ;M-3号煤样冷冲击处理后的渗透率增幅为 $20\% \sim 63.2\%$,平均增幅为 39.94% ;M-4号煤样冷冲击处理后的渗透率增幅为 $65.2\% \sim 388.3\%$,平均增幅为 215% ;M-5号煤样冷冲击处理后的渗透率增幅为 $13.9\% \sim 58.2\%$,平均增幅为 32.96% ;M-6号煤样冷冲击处理后的渗透率增幅为 $2.1\% \sim 62.9\%$,平均增幅为 37.12% ;M-7号煤样冷冲击处理后的渗透率增幅为 $84.5\% \sim 147\%$,平均增幅为 112.12% 。由图4和图5可知,M-4号煤样冷冲击后渗透率的增幅最大,并且随冷冲击次数增加而增加;M-2号煤样冷冲击后渗透率的增幅最小,并且在第5次冷冲后渗透率还出现了负增长现象(-5.8%)。

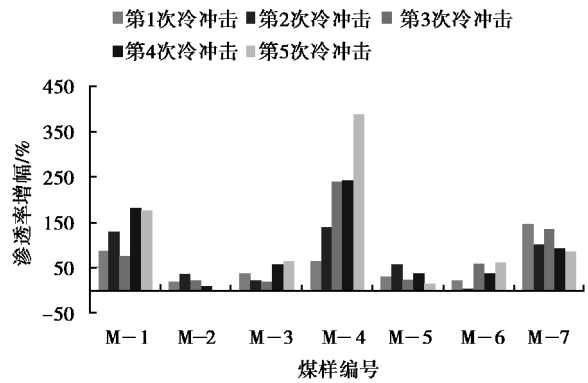


图4 煤样冷冲击渗透率变化情况

Fig. 4 Effects of low temperature impact on coal permeability

表3 冷冲击前后煤渗透率变化

Table 3 The coal permeability before and after cold impact treatment

编号	初始 渗透率/mD	第1次冷冲击后		第2次冷冲击后		第3次冷冲击后		第4次冷冲击后		第5次冷冲击后	
		渗透率 /mD	渗透率 增幅/%	渗透率 /mD	渗透率 增幅/%	渗透率 /mD	渗透率 增幅/%	渗透率 /mD	渗透率 增幅/%	渗透率 /mD	渗透率 增幅/%
M-1	1.862	3.491	87.5	4.293	130.6	3.290	76.7	5.259	182.5	5.172	177.9
M-2	58.875	69.745	18.5	80.887	37	71.083	20.7	64.508	9.6	55.444	-5.8
M-3	0.691	0.959	38.7	0.842	21.8	0.829	20	1.078	56	1.128	63.2
M-4	0.871	1.439	65.2	2.086	139.5	2.962	240	2.979	242	4.254	388.3
M-5	2.052	2.670	30.1	3.246	58.2	2.534	23.5	2.853	39.1	2.337	13.9
M-6	0.133	0.162	21.9	0.135	2.1	0.212	60.1	0.184	38.6	0.216	62.9
M-7	0.051	0.126	147	0.103	101.8	0.120	134.4	0.098	92.9	0.094	84.5

煤是一种典型的多孔非均质材料,作为连续体,其在变温条件下符合热胀冷缩变形规律。当煤岩受到外部冷冲击时,在煤岩壁面、裂隙表面和煤体内部产生很大的温度梯度,由于煤的导热率较低^[17],且具有较强的各向异性特征,因受约束,无法自由变形,产生应力^[7],这种应力被称为冷冲击应力。当冷冲击产生的应力超过煤岩抗拉强度时,煤岩内部便会引起结构破坏,产生热应力裂缝,最终导致煤样渗透率的普遍增加(图5)。

冷冲击处理后,导致煤岩渗透率呈现有升有降的非均匀变化规律(图4)的原因主要来自以下2个方面:

(1)在测定煤样气体渗透率需要施加载荷(表2),冷冲击后煤岩内部会形成裂缝,引起损伤,并

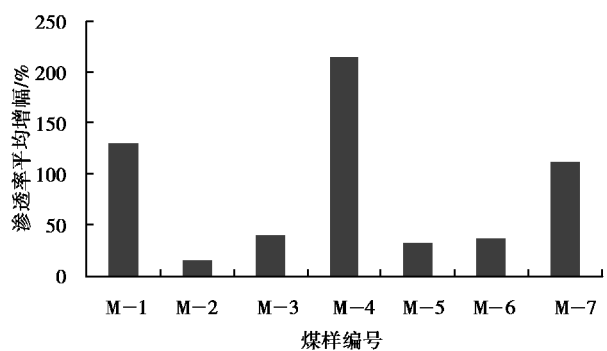


图5 煤样冷冲击后渗透率的平均增幅

Fig. 5 Mean increase amplitude of permeability after low temperature impact

导致强度降低^[8,10,18-19]。每次对煤样进行冷冲击处理后,在测定煤样渗透率时均需要通过手动加压泵

施加载荷,冷冲击处理2次对应于施加载荷2次,冷冲击处理5次对应于施加载荷5次,循环冷冲击处理后的渗透率测定实质上也是一种对煤样的循环加卸载过程。只要所施加的载荷远小于煤样的强度,便会产生一种“密实效应^[15,20]”。因载荷施加而产生渗透率的削弱,但同时因热应力作用而产生渗透率增加,这两种效应在实验过程中相互作用,若削弱大于增长,冷冲击处理后煤样渗透率则会变小,反之煤样渗透率则会增大。由于冷冲击处理对煤样渗透率的贡献大小具有一定的随机性,因此便导致了煤样渗透率随冷冲击次数的波动变化规律(图4)。

(2) 煤岩在冷冲击条件下会产生“负损伤^[21]”。蔡承政等^[8]利用液氮冻结方法发现了岩石在冻结处理后孔隙率确实存在负增长的现象,具体结果如图6。根据实验数据,M-2号煤样在第5次冷冲后渗透率还出现了负增长,幅度为-5.8%(表3)。因此,“负损伤”也是导致煤样渗透率变小的原因之一。

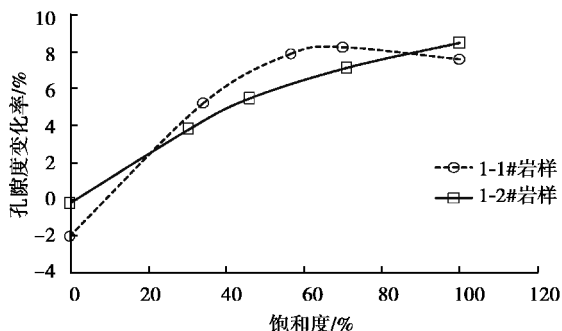
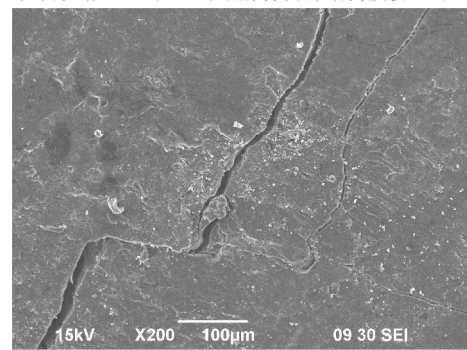


图6 饱和度对液氮冻结后岩石孔隙度变化的影响^[19]

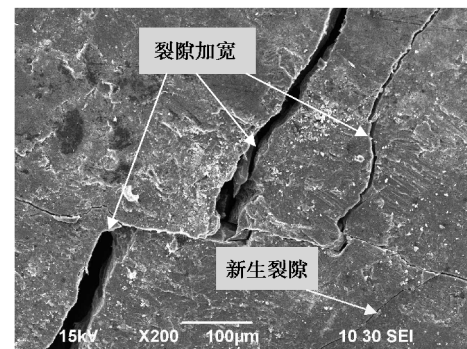
Fig. 6 Porosity variation rate at different water saturations after liquid nitrogen frozen^[19]

2.2 冷冲击处理对煤样和质量的影响

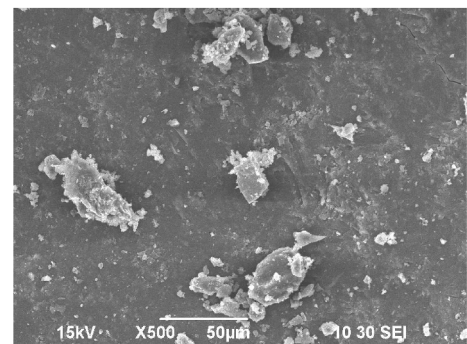
图7给出了冷冲击处理前后煤粒表面扫描电镜照片,可以看出:冷冲击处理之前,煤样中的原始裂纹比较发育,表明煤样为非均质的多孔介质材料。循环冷冲击处理之后,煤样裂缝数量和裂缝宽度均较处理前有所增加(图7(a)和7(b)),在冷冲击作用下煤样内部产生了收缩应力,在不均匀的收缩应力驱动下,煤样表面形成了新的裂纹,有效改善了煤样内部裂隙之间的连通性,从而使得煤样的渗透性普遍得以提高(图5)。循环冷冲击处理之后还导致煤样内部结构损伤,部分碎块从中脱落(图7(c)和7(d))。



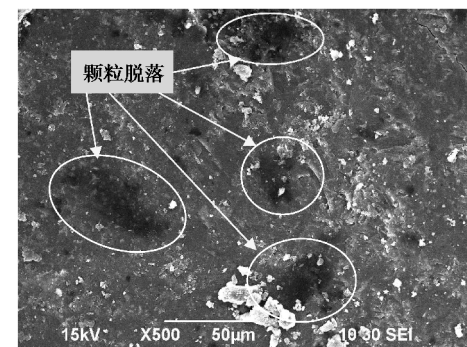
(a) 处理前



(b) 处理后



(c) 处理前



(d) 处理后

图7 煤粒表面形貌变化扫描电镜图

Fig. 7 SEM photos of coal particle surface variation

在本次循环冷冲击试验中,煤样不断经历从室温(20℃)→-190℃→室温(20℃)的温度加载过

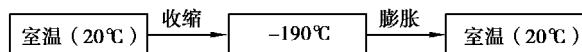


图8 冷冲击过程中的温度路径示意图

Fig. 8 Temperature path schematic diagram of cold impact treatment

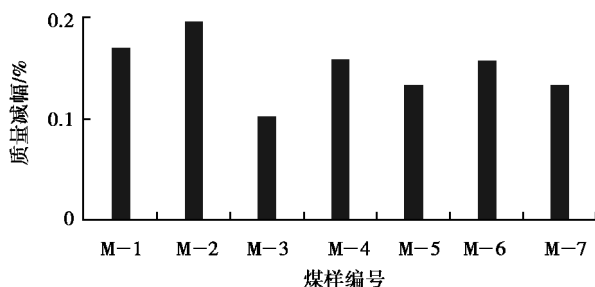


图9 冷冲击处理后煤样的质量减小情况

Fig. 9 Mass decrease of coal samples after cold impact treatment

程(图8),相当于对煤样进行了5次收缩-膨胀的循环处理。图9给出了煤样的质量减小幅度情况, M-1煤样的质量减幅为0.170%, M-2煤样的质量减幅为0.196%, M-3煤样的质量减幅为0.103%, M-4煤样的质量减幅为0.159%, M-5煤样的质量减幅为0.134%, M-6煤样的质量减幅为0.158%, M-7煤样的质量减幅为0.134%,总体上煤样的平均质量减幅为0.151%。在降温过程中煤样内部产生收缩应力,导致煤基质的收缩变形,在升温过程中煤样内部产生膨胀应力,导致煤基质的膨胀变形,在这种收缩-膨胀的循环处理过程中会导致煤样内部不同程度的损伤,煤样局部碎块会从中脱落,从而引起煤样质量的减小。

3 结论

(1)循环冷冲击对煤体产生热应力作用,热应力超过煤体抗拉强度时便会在煤体内部形成热应力裂缝,导致循环冷冲击后的煤体内部的裂缝数量和裂缝宽度均较处理前有所增加,连通性得到了有效提高,改善了渗流空间;循环冷冲击处理后煤体渗透率的平均增幅为16%~215%,煤体渗透率增幅大小与处理后的裂纹增加数量及其连通性有关。

(2)受煤体材料的非均质性、外部载荷和“负损伤”影响,冷冲击处理对煤体渗透性的改善作用表现出较强的随机性,从而导致煤体渗透率增幅随冷冲击次数的增加呈现出一种非均匀的波动变化规律。

(3)循环冷冲击处理后,煤体所经历的温度循

环加卸载过程在煤体内部形成循环收缩-膨胀效应,引起煤体内部的裂缝数量和裂缝宽度的增加,并使得煤体中部分碎块脱落,导致煤体质量的减小,煤体的平均质量减幅为0.151%。

参考文献(References)

- [1] 秦勇,袁亮,胡千庭,等.我国煤层气勘探与开发技术现状及发展方向[J].煤炭科学技术,2012,40(10):1-6. (Qin Yong, Yuan Liang, Hu Qianting, et al. Status and development orientation of coal bed methane exploration and development technology in China[J]. Coal Science and Technology, 2012, 40(10):1-6. (in Chinese))
- [2] Kiyama T, Nishimoto S, Fujioka M, et al. Coal swelling strain and permeability change with injecting liquid supercritical CO₂ and N₂ at stress-constrained conditions[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 85(1):56-64.
- [3] Wang H C, Fu X H, Jian K, et al. Changes in coal pore structure and permeability during N₂ injection[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 27(2):1234-1241.
- [4] Zhou F D, Hussain F, Cinar Y. Injecting pure N₂ and CO₂ to coal for enhanced coalbed methane: Experimental observations and numerical simulation[J]. International Journal of Coal Geology, 2013, 116-117:53-62.
- [5] Shi J Q, Durucan S, Fujioka M. A reservoir simulation study of CO₂ injection and N₂ flooding at the Ishikari coalfield CO₂ storage pilot project, Japan[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2008, 2(1):47-57.
- [6] 段品佳,王芝银.煤岩孔隙率与渗透率变化规律试验研究[J].地下空间与工程学报,2013,9(6):1283-1288. (Duan Pinjia, Wang Zhiyin. Experimental research on variations of permeability and porosity for coals[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(6):1283-1288. (in Chinese))
- [7] 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2):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(Supp.2):3790-3794. (in Chinese))
- [8] 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. Experimental study of rock porous damage under cryogenic nitrogen freezing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (4): 965-971. (in Chinese))
- [9] 蔡承政, 李根生, 黄中伟, 等. 液氮压裂中液氮对岩石破坏的影响试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38(4): 98-103. (Cai Chengzheng, Li Gensheng, Huang Zhongwei, et al. Experimental study on effect of liquid nitrogen on rock failure during cryogenic nitrogen fracturing [J]. Journal of China University of Petroleum, 2014, 38(4): 98-103. (in Chinese))
- [10] 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))
- [11] 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]. Hebei University of Science and Technology, 2015, 36 (4): 425-430. (in Chinese))
- [12] 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. (in Chinese))
- [13] 杨昊天, 徐进, 王璐, 等. 花岗岩力学特性温度效应的实验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(1): 96-101. (Yang Haotian, Xu Jin, Wang Lu, et al. Experimental study on temperature effect of the mechanical properties of granite[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(1): 96-101. (in Chinese))
- [14] 储小送, 屈争辉, 郭志军, 等. 碎粉煤中孔隙特性及对冰冻响应试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(9): 117-121. (Chu Xiaosong, Qu Zhenghui, Guo Zhijun, et al. Study on fine coal porosity features and response to seam freezing [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(9): 117-121. (in Chinese))
- [15] 王登科, 魏建平, 尹光志. 复杂应力路径下含瓦斯煤渗透性变化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(2): 303-309. (Wang Dengke, Wei Jianping, Yin Guangzhi. Investigation on change rule of permeability of coal containing gas under complex stress paths [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 303-309. (in Chinese))
- [16] Wang D K, Wei J P, Fu Q C, et al. Seepage law and permeability calculation of coal gas based on Klinkenberg effect [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(5): 1973-1978.
- [17] 彭担任, 程普军. 煤与岩石的导热性能及热导率研究[J]. 煤, 1999, 8(4): 13-15. (Peng Danren, Cheng Pujun. Thermal conductivity and thermal conductivity of coal and rock [J]. Coal, 1999, 8(4): 13-15. (in Chinese))
- [18] 张慧梅, 张蒙军, 谢祥妙, 等. 冻融循环条件下红砂岩物理力学特性试验研究[J]. 太原理工大学学报, 2015, 46(1): 69-74. (Zhang Huimei, Zhang Mengjun, Xie Xiangmiao, et al. The experimental study on the physical and mechanical properties of red sandstone under the action of freeze-thaw cycles [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2015, 46(1): 69-74. (in Chinese))
- [19] 路亚妮, 李新平, 肖家双. 单裂隙岩体冻融力学特性试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(3): 593-598, 649. (Lu Yani, Li Xinping, Xiao Jiashuang. Experimental analysis on mechanical characteristic of single cracked rock mass under freeze-thaw condition [J]. Chinese Journal of underground Space and Engineering, 2014, 10 (3): 593-598, 649. (in Chinese))
- [20] 王登科. 含瓦斯煤岩本构模型与失稳规律研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009. (Wang Dengke. Research on constitutive models and instability rules of gas-saturated coal [D]. Chongqing: Chongqing University, 2009. (in Chinese))
- [21] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度对岩石微观损伤特性的影响[J]. 西安科技学院学报, 2003, 23(2): 139-142. (Yang Gengshe, Zhang Quansheng, Pu Yibin. On the microdamage characteristics of rock under the frost and thaw conditions [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003, 23(2): 139-142. (in Chinese))