

文章编号: 1673-3363-(2013)04-0578-05

煤矸石侧限加载-浸水-卸载实验研究

钱自卫, 曹丽文, 姜振泉, 孙强

(中国矿业大学资源与地球科学学院, 江苏 徐州 221116)

摘要 采用不同含水状态破碎矸石分别进行侧限压密、蠕变观测、慢速浸水、卸载实验。实验发现, 矸石轴向压缩时, 应力-压缩率曲线是一条非线性曲线, 可用指数函数拟合; 矸石在经过实验后, 发生明显的颗粒破碎, 不均匀系数增大, 有效粒度减小, 并且浸水试样破碎程度明显大于干燥及天然状态矸石; 矸石在经过浸水后, 发生明显的轴向附加压缩, 浸水过程中压缩率增长了 9.68%, 占试样压缩过程变形的 37%, 产生“湿陷”现象。分析认为, 矸石发生浸水湿陷的机制为水对矸石颗粒的软化及水的润滑作用使得颗粒重新破碎及位置再次调整, 导致矸石整体被再次压密。

关键词 煤矸石; 压密; 浸水; 湿陷

中图分类号 TD 315

文献标志码 A

Experimental study on confined loading-water immersion-unloading of coal gangue

QIAN Zi-wei, CAO Li-wen, JIANG Zhen-quan, SUN Qiang

(School of Resources and Earth Science, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jinagsu 221116, China)

Abstract Confined loading, creep observations, water immersion, unloading experiments about broken coal gangue which has different water content were performed. The results showed that during the compression process, the stress-compression ratio relation can be fitted as a non-linear curve by exponential function; after the test, the significant particle breakage phenomenon occurred, the non-uniform coefficient increased and the effective particle size decreased and the fragmentation degree of water immersion specimens was greater than that of dry and natural state of waste rock; the axial additional compression occurred to coal gangue after water immersion, the compression rate of this process increased by 9.68%, accounting for 37% of the whole process, “collapsibility” phenomenon occurred; through the analysis, the mechanism of water immersion collapsibility of coal gangue is that, water softening and water lubrication on the coal gangue particles made the particles re-broken and further adjustment of the position, resulting in the coal gangue compact once again.

Key words coal gangue; compaction; water immersion; collapsibility

煤矸石充填开采技术是矿山绿色开采的研究方向之一^[1-3], 是一种集沉陷控制与环境保护为一体的沉陷控制方法^[4-6]。随着矸石充填机械的研制成功, 该方法在我国的“三下”资源开采及沉陷控制

领域正得到越来越广泛的应用^[7]。

充填的煤矸石一般要经过破碎-充填-压密-浸水过程, 即矿井产出的煤矸石先进行破碎形成充填料, 然后运输到工作面进行充填, 充填后随着上覆

收稿日期: 2012-02-13

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41102201); 江苏省研究生培养创新工程项目(CXLX12_0963)

作者简介: 钱自卫(1986-), 男, 安徽省蒙城县人, 博士研究生, 从事煤矿工程地质及灾害治理方面的研究。

E-mail: ziweidav@163.com

Tel: 15896427831

岩层的沉陷对矸石产生压密作用,最后随着采空区浸水矸石逐渐被水浸没。在这个过程中主要涉及矸石的压实及浸水附加压缩的问题。目前,对煤矸石在不同条件下的压实特性进行了充分的研究,主要考虑到颗粒级配、含水状态及颗粒强度等因素,研究级配变化、应变、孔隙率及变形模量等与应力的关系;而对煤矸石在浸水过程中的附加变形研究很少。

本文将在常规煤矸石压密研究的基础上,研究矸石在压密后浸水过程中的附加压缩问题,共进行了12个试样、12/3=4个条件的实验,每一个条件的3个试样取平均值进行分析。

1 实验设计及控制

1.1 实验矸石样

实验所用的煤矸石样取自潘三煤矿矸石,岩性为砂质泥岩。将矸石重新破碎,制成粒径小于15 mm的破碎料。实验前测试煤矸石块点载荷强度在2.5~4.0 MPa,天然含水量为2.2%,饱和破碎矸石的含水量约为5.0%。其颗粒级配曲线如图1。

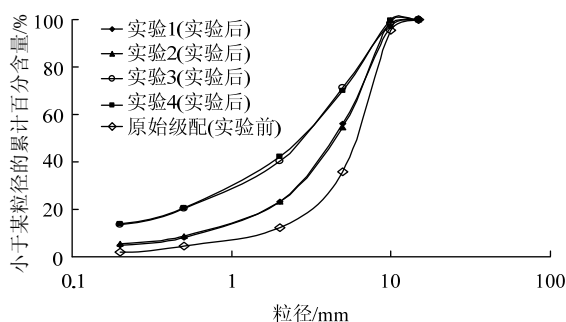


图1 实验前后试样颗粒级配统计曲线

Fig.1 The statistical curve of sample particle size distribution

1.2 实验过程

压密实验采用土样固结仪进行,破碎矸石集于土样置备器中进行压缩,土样制备器直径62 mm,高125 mm,如图2。压缩时均匀分步添加砝码,采用千分表记录矸石的轴向压缩量。实验前先将破碎矸石筛分成0~0.2, 0.2~0.5, 0.5~2, 2~5, 5~10, 10~15 mm 粒组,然后根据原颗粒级配曲线进行配比,保证每个试样的颗粒级配完全一致。共采用3种状态破碎矸石进行4个条件的实验,每个实验都配制天然含水状态矸石498.2 g,使得各试样的干密度均为1.2915 g/cm³。根据实验设计进行烘干或浸水饱和。实验1~3分别采用天然、干燥、饱和矸石进行,先进行侧限压密,轴向应力施加到设计值时,

停止增加轴压,等待48 h连续观测变形量,观测完毕后进行卸载;实验4采用天然状态矸石进行,先进行侧限压密,轴向应力施加到设计值时,停止增加轴压,等待轴向应变相对稳定时,从试样底部逐渐慢速浸水,观察浸水过程中试样变形量,浸水完成后还要连续观测变形量,观测完毕后再进行卸载。

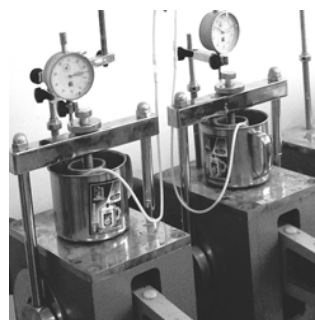


图2 实验仪器设备

Fig.2 Test equipment

2 实验结果及分析

2.1 压缩过程

压缩过程为各试样在侧限条件下均匀施加轴向载荷至5.0 MPa,记录试样的轴向压缩率,压缩过程曲线如图3所示,分析可知:

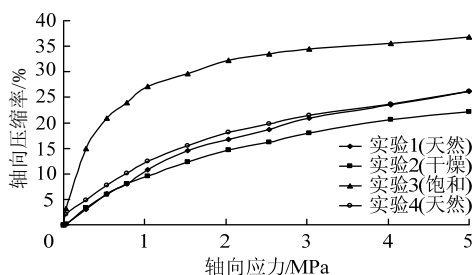


图3 轴向压缩过程曲线

Fig.3 Axial compression curve

1) 矸石轴向压缩时,压缩过程曲线是一条非线性曲线,可用指数函数拟合^[8-9];

2) 轴向应力-压缩率曲线所反映的矸石压缩过程,分为3个阶段^[6,10]: ① 压缩率快速增长的线性阶段,它以散体间隙压实为主; ② 斜率递减阶段,随着轴向应力的增加,压缩率增加梯度减慢,它对应于从散体间隙压实到矸石块体压碎压实的过程; ③ 轴向应力快速增长的线性阶段,这一阶段表现为散体完全被压实,应力随压缩率增加稳定且很快。

3) 矸石在不同的含水状态下压缩率不同,实验1~4的压缩率分别达到26.2%, 22.1%, 36.8%,

26.1%，总体表现为随着含水量增加压缩率变大的特点，其中试样在浸水饱和状态压缩率比天然状态下增加了 41%，这种现象主要由水的润滑及对矽石软化作用引起。

2.2 蠕变观测及浸水过程

实验 1~3 在进行压缩实验完成后持续 48 h 连续观察压缩率变化情况，实验 4 在等待 182 min 轴向变形基本稳定后，从试样底部均匀慢速浸水，浸水速度为 0.192 mm/min，至 593 min 试样完全浸入水中。实验曲线如图 4 所示，分析可知：

1) 实验 1~4 分别在 38, 40, 28, 38 min 内变形速度较快，且在此时间点后变形速度明显放缓，最终逐渐稳定。实验 1~3 在 48 h 的压缩率增长分别为 1.04%，1.07%，1.74%。

2) 实验 4 在经过浸水后，发生明显的轴向压缩，浸水过程中压缩率增长达到 9.68%，占试样压缩过程变形的 37%，产生“湿陷”现象，这也就意味着在采用矽石充填时，如果采空区后期浸水，那么地表将产生附加沉陷。

3) 浸水压缩过程曲线可明显地分为 3 个阶段：① AB 段，压缩率急速增长阶段，此阶段毛细润湿速度大于浸水水平增长速度，压缩率的增长主要由于浸水段及毛细润湿段内水对试样的润滑软化作用引起；② BC 段，压缩率快速增长，B 点开始毛细润湿速度等于浸水水平增长速度，压缩率增长主要由于浸水段及毛细润湿段内水对试样的润滑软化作用引起；③ CD 段，压缩率稳定增长，C 点开始，毛细润湿作用达到试样顶面，压缩率增加主要由于浸水段内水的润滑软化作用引起。

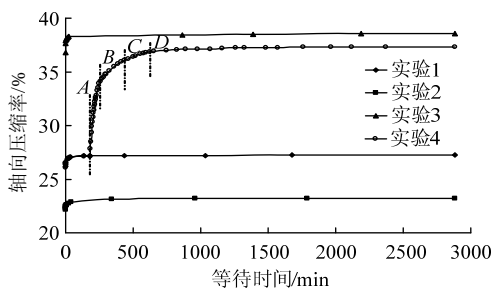


图 4 等待及浸水过程压缩率变化曲线
Fig.4 Waiting and water immersion process compression rate curve

2.3 卸载过程

在进行稳定 48 h 观测后进行匀速卸载实验，卸载过程曲线如图 5 所示，分析可知：

1) 实验 1~4 卸载压缩率减少分别达到 0.96%，

0.83%，1.09%，1.53%，总体表现为随着试样含水率增大而压缩率减少量逐渐增长的特点。

2) 卸载过程曲线可分为 2 个阶段：① 压缩率稳定增长的线性阶段；② 按指数函数变化的非线性阶段。

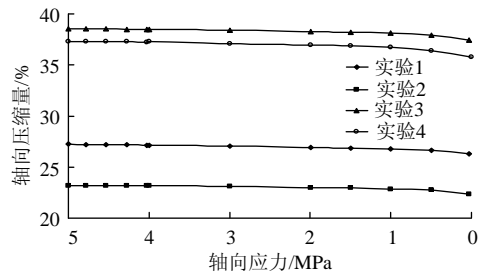


图 5 轴向卸载过程曲线
Fig.5 Axial unloading process curve

2.4 颗粒级配变化

实验前后分别对各试样进行了筛分，实验后的试样筛分在烘干后进行。各实验的颗粒级配曲线如图 1 所示。采用公式 $D_0=\sum Dq$ 计算颗粒有效粒度，式中： D 为颗粒筛分的直径； q 为筛分直径对应的百分比；采用 $C_u=d_{60}/d_{10}$ 计算不均匀系数，式中 d_{10} ， d_{60} 分别相当于 10%，60% 的粒径， d_{10} 称为有效粒径， d_{60} 称为限制粒径。计算结果如表 1 所示，分析可知：

表 1 有效粒度及不均匀系数统计
Table 1 Statistics of effective particle size and nonuniform coefficient

实验编号	有效粒度/mm		不均匀系数	
	实验前	实验后	实验前	实验后
1		4.79		7.33
2	5.98	4.72	4.00	7.92
3		3.62		18.95
4		3.57		19.00

1) 矽石在经过实验后，发生明显的破碎，实验 1~4 有效粒度分别减小 19.9%，21.1%，39.5%，40.3%，不均匀系数分别增大 83.3%，98.0%，373.8%，375.0%。

2) 实验 3, 4 的有效粒度减少比例明显大于实验 1, 2，说明浸水过程加剧了颗粒的破碎。

3) 各试样实验前的不均匀系数均小于 5，属于级配不良颗粒，实验后各试样的不均匀系数明显增大，均大于 5，说明颗粒粒组分布范围增大，其中浸水试样明显大于其他试样，说明浸水使颗粒进一步破碎。

3 浸水湿陷机理分析

姜振泉、季梁军等^[11]曾对煤矸石的压密机制进行分析, 把矸石的压密分为破碎压密和固结压密 2

个阶段。在受压初期, 矸石处于相对疏松的状态(图 6a), 通过施加轴压应力使得颗粒发生重新破碎及位置调整, 最终形成图 6b 的状态^[11]。

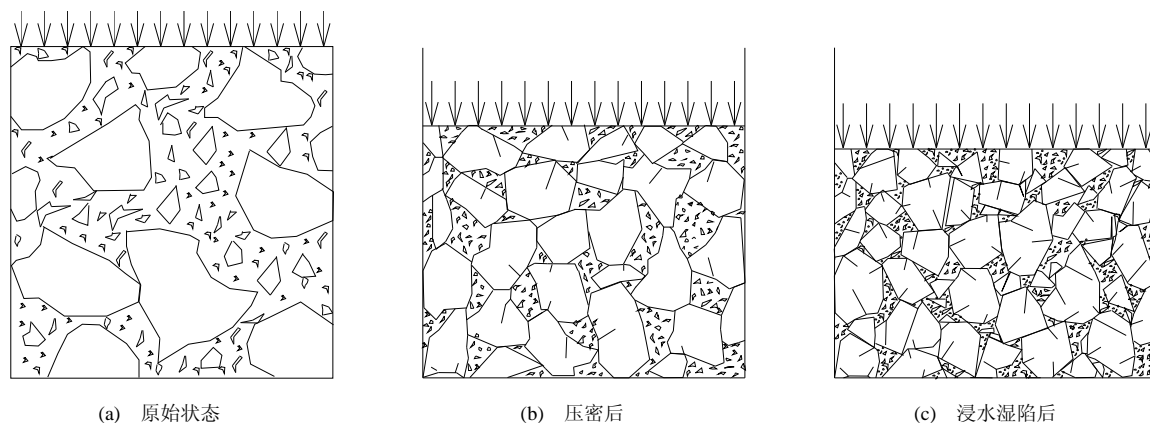


图6 矸石压密及浸水湿陷过程示意图

Fig.6 Schematic diagram of coal gangue compaction and soaking collapsibility process

在经过压密实验后, 矸石所承受的应力由大颗粒形成的骨架及粒间小颗粒共同承担, 应力-应变曲线(图 3)表现为轴向应力快速增长的线性阶段^[9]。在经过浸水后, 水对矸石作用表现为两方面^[8]:

1) 水分子在浸润作用下, 减弱了颗粒内部的分子间作用力, 使岩块更易破碎^[9], 在载荷作用下棱角被挤碎或进一步发生破碎。

2) 水浸入矸石时^[8], 由于溶解作用, 可以导致矸石颗粒之间的连接力减弱, 并使摩擦力减低, 起到润滑剂的作用, 使得矸石颗粒之间发生滑动, 颗粒相对位置调整; 在经过颗粒重新破碎及位置再次调整后, 矸石整体被再次压密, 其机理如图 6 所示。

4 结 论

1) 矸石轴向压缩时, 压缩过程曲线是一条非线性曲线, 可用指数函数拟合, 表现为随着含水量增加压缩率变大的特点, 其中试样在浸水饱和状态矸石压缩率明显高于天然状态下的压缩率。

2) 矸石在经过浸水后, 发生明显的轴向压缩, 浸水过程中压缩率增长达到 9.68%, 占试样压缩过程变形的 37%, 产生“湿陷”现象。浸水压缩过程曲线可明显地分为 3 个阶段: 压缩率急速增长阶段、快速增长阶段及稳定增长阶段。

3) 矸石在经过实验后, 发生明显的颗粒破碎, 不均匀系数增大, 有效粒度减小, 并且浸水试样破碎程度明显大于干燥及天然状态矸石, 浸水过程加剧了颗粒的破碎。

4) 分析认为矸石发生浸水湿陷的机制为水对

矸石颗粒的软化及水的润滑作用使得颗粒重新破碎及位置再次调整, 导致矸石整体被再次压密。

参考文献:

- [1] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴. 煤矿绿色开采技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 343-348.
QIAN Ming-gao, XU Jia-lin, MIAO Xie-xing. Green technique in coal mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 343-348.
- [2] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 1-7.
QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, XU Jia-lin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 1-7.
- [3] 缪协兴, 钱鸣高. 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(1): 1-14.
MIAO Xie-xing, QIAN Ming-gao. Research on green mining of coal resources in china: current status and future prospects[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2009, 26(1): 1-14.
- [4] 缪协兴, 张吉雄, 郭广礼. 综合机械化固体充填采煤方法与技术研究[J]. 煤炭学报, 2010, 35(1): 1-6.
MIAO Xie-xing, ZHANG Ji-xiong, GUO Guang-li. Study on waste-filling method and technology in fully-mechanized coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(1): 1-6.
- [5] 查剑锋, 吴兵, 郭广礼. 充填矸石级配特性及其压缩性质试验研究[J]. 矿业快报, 2008 (12): 40-42.
ZHA Jian-feng, WU Bing, GUO Guang-li. Experimental investigation on gradation characteristics and compres-

- sion property of filling refuse[J]. Express Information of Mining Industry, 2008 (12): 40-42.
- [6] 张德辉, 李辉. 连续级配矸石压缩性能的试验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2011, 30(3): 337-340. ZHANG De-hui, LI Hui. Experimental study on compression performance of continuous grading gangue[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2011, 30(3): 337-340.
- [7] 张文海, 张吉雄, 赵计生, 等. 矸石充填采煤工艺及配套设备研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 79-82. ZHANG Wen-hai, ZHANG Ji-xiong, ZHAO Ji-sheng, et al. Research on waste filling technology and its matching equipment in coal mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(1): 79-82.
- [8] 马占国, 肖俊华, 武颖利, 等. 饱和煤矸石的压实特性研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, 21(1): 106-108. MA Zhan-guo, XIAO Jun-hua, WU Ying-li, et al. Experimental study on the characteristics of compaction of the saturated broken coal waste[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004, 21(1): 106-108.
- [9] 马占国, 郭广礼, 陈荣华, 等. 饱和破碎岩石压实变形特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 24(7): 1139-1144. MA Zhan-guo, GUO Guang-li, CHEN Rong-hua, et al. An experimental study on the compaction of water-saturated over-broken rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 24(7): 1139-1144.
- [10] 胡炳南, 郭爱国. 矸石充填材料压缩仿真实验研究[J]. 煤炭学报, 2009, 34(8): 1176-1180. HU Bing-nan, GUO Ai-guo. Testing study on coal waste back filling material compression simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(8): 1176-1180.
- [11] 姜振泉, 季梁军, 左如松. 煤矸石的破碎压密作用机制研究[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(2): 139-142. JIANG Zhen-quan, JI Liang-jun, ZUO Ru-song. Research on mechanism of crushing-compression of coal waste[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(2): 139-142.
- [12] LI Jian-ping, DU Chang-long, BAO Jian-wei. Direct-impact of sieving coal and gangue[J]. Mining Science and Technology, 2010, 20(4): 611-614.
- [13] KARFAKIS M G, BOWMAN C H, TOPUZ E. Characterization of coal-mine refuse as backfilling material[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1996, 14: 129-150.

(上接第 577 页)

- DAI Hua-yang, ZHAI Jue-cheng, HU You-jian. Research on similar simulation test of surface movement in mountain area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 501-504.
- [4] 单晓云, 姜耀东, 王乐杰, 等. 地下采煤对巍山山体裂缝影响的有限元分析[J]. 煤炭学报, 2008, 33(1): 23-27. SHAN Xiao-yun, JIANG Yao-dong, WANG Le-jie, et al. Finite element analysis of effect of underground coal mining on landslide of the Wei mountain[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(1): 23-27.
- [5] 夏元友, 熊海丰. 边坡稳定性影响因素敏感性人工神经网络分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2704-2707. XIA Yuan-you, XIONG Hai-feng. Sensibility analysis of slope stability based on artificial neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2704-2707.
- [6] 唐晓松, 郑颖人, 叶海林. 涉水岸坡稳定性影响参数的敏感性分析[J]. 后勤工程学院学报, 2008, 24(2): 22-26. TANG Xiao-song, ZHENG Ying-ren, YE Hai-lin. The sensibility analysis of influencing factors of the paddle slope stability[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2008, 24(2): 22-26.
- [7] 苟海军, 袁继国, 何伟, 等. 三峡库区危岩稳定性影响因素敏感性分析[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(2): 47-50. GOU Hai-jun, YUAN Ji-guo, HE Wei, et al. The sensitivity analysis of factors affecting three gorges reservoir perilous rock belt[J]. Power System & Clean Energy, 2008, 24(2): 47-50.
- [8] 朱婷. 基于三维刚体极限平衡法的岩质边坡参数敏感性分析和工程应用[D]. 宜昌: 三峡大学土木与建筑工程学院, 2010.
- [9] 付宏渊, 吕东滨, 刘建华. 震区岩质边坡地震稳定性影响因素敏感性分析[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(3): 14-19. FU Hong-yuan, LV Dong-bing, LIU Jian-hua. Sensitivity analysis on factors of seismic stability of rock slope in the earthquake zone[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010, 26(3): 14-19.