

卸围压时含瓦斯煤力学性质演化规律试验研究

赵洪宝, 王家臣

(中国矿业大学(北京) 资源与安全工程学院, 北京 100083)

摘 要: 以固定轴向应变条件下的轴向应力和径向应变为研究参数, 对含瓦斯煤卸围压条件下的力学性质演化规律进行了试验研究, 并对各参数的演化规律进行了数学拟合。结果表明, 固定轴向应变被逐渐卸除含瓦斯煤的围压后, 含瓦斯煤的轴向应力呈分 2 个阶段逐渐减小的趋势, 其减小率与围压、瓦斯压力之差呈正向关系; 瓦斯压力越大, 卸除单位围压后轴向应力降低越大, 轴向应力对卸围压效应越敏感, 轴向应力与围压卸除量关系可用二次函数形式表征; 固定轴压而逐渐卸除围压时, 含瓦斯煤的径向应变呈逐渐增大趋势, 瓦斯压力越大卸除单位围压后产生的径向应变越大, 径向应变的变化是卸除围压量和瓦斯压力之和的综合作用, 径向应变与卸除后的围压关系可用修正对数函数表征。

关 键 词: 卸围压; 轴向应力; 径向应变; 演化规律; 拟合函数

中图分类号: TD 82

文献标识码: A

Experimental study of evolution law of mechanical properties of coal containing gas under unloading confining pressure

ZHAO Hong-bao, WANG Jia-chen

(School of Resources and safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Taking axial stress and radial strain under fixed axial strain as study parameters, the evolution law of mechanical properties of coal containing gas under unloading confining pressure is experimentally studied; and the relationship between test conditions and study parameters is fit. The results show: the axial stress of coal containing gas decreased with two stages if confining pressure is gradually unloaded under fixed axial strain; the relationship between decrease rate of axial stress and the difference between confining pressure and gas pressure is positive. The total decrease of axial stress is larger when the confining pressure is unloaded by unit value as gas pressure increasing; and sensitivity of the influence is stronger, the relationship between axial stress and confining pressure unloaded amounts can be show by quadratic function. The radial strain of coal containing gas shows gradually increases tendency when confining pressure is gradually unloaded under fixed axial strain; the total increasing of radial strain is larger when the confining pressure is unloaded by unit value as gas pressure increasing; the variable quantity of radial strain is influenced by sum of the confining pressure unloaded and gas pressure; the relation between radial strain and confining pressure unloaded can be show by modified logarithm function.

Key words: unloading confining pressure; axial stress; radial strain; evolution law; fitting function

1 引 言

煤岩类材料是一种非均质的各向异性材料, 且多处于特定的应力场环境中^[1-2]。煤岩类工程的开挖破坏了其所处的应力场, 使其某一方向或几个方向的应力释放, 导致该处原岩应力状态被破坏, 煤岩类材料发生变形, 甚至发生失稳、破坏。地下采

煤过程中的煤壁, 随着采掘工作的推移将不断有煤炭被剥离出来, 这一过程也改变了受采掘影响范围内且尚未被剥离出的煤壁煤体的应力状态^[3-4], 即围压被逐渐卸除时, 导致该部分煤体力学性质和内部结构发生明显变化。同时, 煤体内瓦斯及其在煤体内运移对煤壁造成的影响, 使得处于该类环境中的煤岩体力学性质演化更加复杂。

在卸围压岩石类材料的力学性质研究方面, 国内外学者进行了大量的研究工作, 如尤明庆等^[5]研究了大理岩三轴卸围压力学性质的演化特点; 陈卫忠等^[6]研究了脆性岩石卸围压与岩爆机制; 任建喜等^[7]研究了裂隙花岗岩卸围压作用下的损伤破坏特性; 丘士利等^[8]研究了不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性; 黄启翔等^[9]研究了地应力场中煤岩卸围压过程瓦斯渗透特性, 但对于卸围压条件下含瓦斯煤力学性质演化方面的系统研究, 涉及不多。本文以含瓦斯突出煤为研究对象, 对其在卸围压条件下轴向应力、径向应变演化特性进行了较系统的研究。

2 试验方案及方法

2.1 试验方案

为了获得卸围压条件下含瓦斯煤力学性质的演化特性, 首先应确定含瓦斯煤卸围压试验的试验条件, 根据所选取的试验设备及条件, 确定卸压起始点的围压为 8.0 MPa, 卸压速率为 0.1 MPa/min, 煤样内的瓦斯压力分别为 0.5、1.0、1.5 MPa, 每种设计试验条件下进行 4 块试件的试验。

2.2 试验方法

为保障煤样内瓦斯气体不从煤壁溢出, 试验除采取相关密封措施外, 还应满足围压大于瓦斯压力这一条件, 因此进行含瓦斯煤卸压试验时, 每组围压卸除后的最小值均应大于瓦斯压力, 本次试验取 0.5 MPa。试验时, 轴向载荷施加和围压施加交替进行, 先施加一定的轴压, 后施加一定的围压, 直至达到试验设定围压水平, 即轴压为 10.0 MPa, 围压为 8.0 MPa。然后, 通入瓦斯气体, 充分吸附 24 h 后进行含瓦斯煤卸围压力学性质演化试验研究。施加载荷的过程中轴压和围压的加载速率、施加轴压的大小均保持较高精度的一致性。

3 卸围压含瓦斯煤力学性质研究

卸围压试验时, 因煤样的轴向应变被严格控制且不变化, 故此时煤样仅可能在轴向应力和径向应变两方面发生变化, 试验研究时以这 2 个指标为考察对象, 以加载装置轴向反力为卸围压后煤样的轴向应力, 以煤样中部应变为煤样的径向应变。

3.1 含瓦斯煤样卸围压时轴向应力演化研究

根据设计的试验方案进行试验研究, 获得了含瓦斯煤不同瓦斯压力下卸围压时的轴向应力演化特性曲线, 如图 1 所示。由图可知:

(1) 在轴向应变保持不变的情况下, 含瓦斯煤

围压被逐渐卸除后, 其轴向应力均呈现逐渐减小趋势。这可能是因为轴向应变不变情况下逐渐卸除围压时, 煤样将在瓦斯压力和原轴向压缩作用的综合作用下侧向逐渐发生压缩变形的恢复, 导致煤样内整体应力状态发生降低, 并使煤样原始轴向应力减小所致, 如图 2 所示。

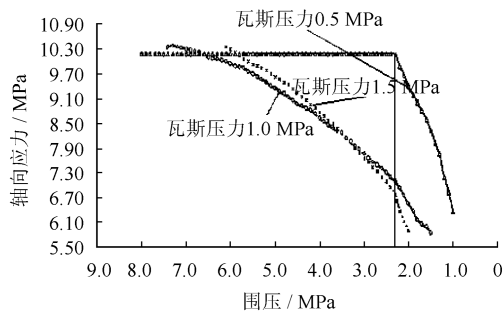


图 1 卸围压时轴向应力演化

Fig.1 Evolution law of axial stress under unloading confining pressure

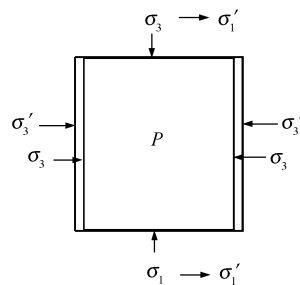


图 2 煤样应力变化

Fig.2 Stress change of coal sample

(2) 在轴向应变保持不变的情况下逐渐卸除围压时, 煤样的轴压变化基本可分为 2 个阶段, 即缓慢降低阶段和急剧降低阶段, 煤样轴向应力减小速率与围压、瓦斯压力之差呈正向变化关系。这是由于在较高围压作用下, 煤样侧壁受到的变形束缚作用将很大, 小幅度卸除围压后煤样侧向受到的变形束缚减小幅度较小而导致煤样内应力状态调整较小; 当围压卸除量较大后, 煤样侧壁受到的束缚减小幅度较大, 煤样侧壁变形将增加并导致其内应力状态调整较大, 其结果即为煤样轴向载荷减小速率较大。

(3) 煤样内瓦斯压力越大, 煤样卸除单位大小围压后产生的轴向应力降低越大。这可能是煤样被逐渐卸除围压后, 在孔隙瓦斯压力的作用下发生侧壁压缩变形的恢复而使煤样内应力状态得到调整。围压相同时, 煤样内的瓦斯压力越大, 其发生侧向变形越容易, 导致的煤样内应力状态的调整幅

度越大,表现为轴向应力变化幅度越大。

(4) 煤样内瓦斯压力越大,卸除围压时轴向应力发生变化的敏感性越强。这可能是因为轴向变形固定情况下煤样内瓦斯压力的作用,促使其侧壁发生膨胀变形,而围压则是束缚其侧壁的膨胀变形,即煤样侧壁变形将在围压与孔隙瓦斯压力之差下进行。当瓦斯压力较大而降低相同围压时,煤样侧壁受到的变形束缚作用减小程度则等于减小围压和瓦斯压力之和的作用,故瓦斯压力大时煤样的轴向应力变化要敏感的多。

(5) 在采煤工作面瓦斯压力一定情况下,开采速度越大,导致发生煤与瓦斯压出、倾出的可能性越大。而在开采速度一定情况下,煤体内瓦斯压力越大,发生煤与瓦斯压出、倾出的可能性越大。

3.2 含瓦斯煤样卸围压时径向变形演化研究

煤岩类材料的变形,均是因为其所处的应力场发生变化所致,故考察其应力场变化可以在一定程度上反映煤样的变形规律,但无法从数量上得到其变形的确切规律,因此需对煤样的变形量进行详细研究。根据设计的试验方案,得到了逐渐卸除围压时煤样径向变形的规律曲线如图3所示(图中径向应变为膨胀应变)。分析图3可知,(1)固定轴向应变而逐渐卸除围压时,含瓦斯煤径向将发生明显膨胀应变。这可能是当煤样围压被逐渐卸除后,煤样所处的应力场应力减小,导致含瓦斯煤样在原应力状态产生的压缩应变发生膨胀恢复,而固定的轴向应变将导致煤样径向应变变化更明显。

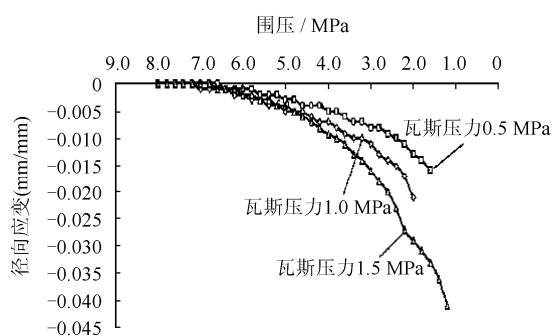


图3 卸围时压径向应变演化规律

Fig.3 Evolution law of radial strain under unloading confining pressure

(2) 固定轴向应变而逐渐卸除围压时,随着围压卸除量的增加呈增加趋势,基本可分为缓慢增加和急剧增加2个阶段。这可能是含瓦斯煤样在围压被卸除后将在瓦斯压力和减小围压量的综合作用下发生径向膨胀变形,当围压卸除量较小时促使煤样发生径向变形的作用不明显,导致含瓦斯煤样径

向变形变化不明显。随着围压卸除量的增加,促使煤样发生径向变形的作用增加,导致煤样径向变形量开始增加。

(3) 煤样内瓦斯压力越大,卸除单位围压后产生的径向应变越大。这是因为固定的轴向应变使煤样在所处应力场应力减小时不能发生轴向应变,而径向应变又是在瓦斯压力和卸除围压量的综合作用下产生的,故卸除相同围压时瓦斯压力越大,煤样产生的径向应变将越大。

(4) 煤样内瓦斯压力越大,围压卸除后煤样产生的径向应变越大。这可能是在试验开始前煤样所处的外加应力场相同而其内的瓦斯压力大小不同,当固定轴向应变时卸除围压,瓦斯压力大的煤样内的孔隙结构将会在较大瓦斯压力的作用下产生更大变形,而且较大的瓦斯压力也能促使更多的因外加应力场使煤样产生的径向压缩变形恢复。

(5) 瓦斯压力的大小对卸除围压后含瓦斯煤样径向应变变化的影响呈非线性关系,即瓦斯压力增加相同大小而煤样径向应变增加却不一致。

(6) 试验后煤样情况如图4所示。由图可知,煤样破坏后既有明显的拉伸破坏,又有明显的剪切破坏。



图4 煤样破坏情况

Fig.4 Failure model of coal sample

4 含瓦斯煤力学性质的卸围压效应研究

研究含瓦斯煤卸围压情况下的力学性质演化规律,其目的是建立卸围压程度与其各力学参数的数学关系模型,进而应用于生产现场来判别含瓦斯煤体结构的稳定性。根据试验结果,分别对其进行数学拟合处理,可以得到煤样轴向应力变化、径向应变变化与围压卸除量的数学关系,即固定轴向应变时,含瓦斯煤轴向应力变化与围压卸除量可用二次函数表述:

$$\sigma_1 = a(\Delta\sigma_3)^2 + b(\Delta\sigma_3) + c \quad (1)$$

式中: σ_1 为煤样轴向应力(MPa); $\Delta\sigma_3$ 为煤样围压卸除量(MPa); a 、 b 、 c 为拟合参数, 与含瓦斯煤样初始应力状态、瓦斯压力有关。

固定轴向应变时, 含瓦斯煤径向应变变化与围压可用修正的对数函数表述, 即

$$\Delta\epsilon_3 = a \ln(\Delta\sigma_3) + b \quad (2)$$

式中: $\Delta\epsilon_3$ 为含瓦斯煤样径向应变; $\Delta\sigma_3$ 为煤样围压卸除量 (MPa); a 、 b 为拟合参数, 与含瓦斯煤样初始应力状态、瓦斯压力有关。

为验证拟合公式与试验曲线的拟合程度, 将拟合曲线和试验曲线绘同一图中对比分析, 发现式(2)可以较好地表征各自关系, 拟合系数均在0.97以上, 如图5所示。

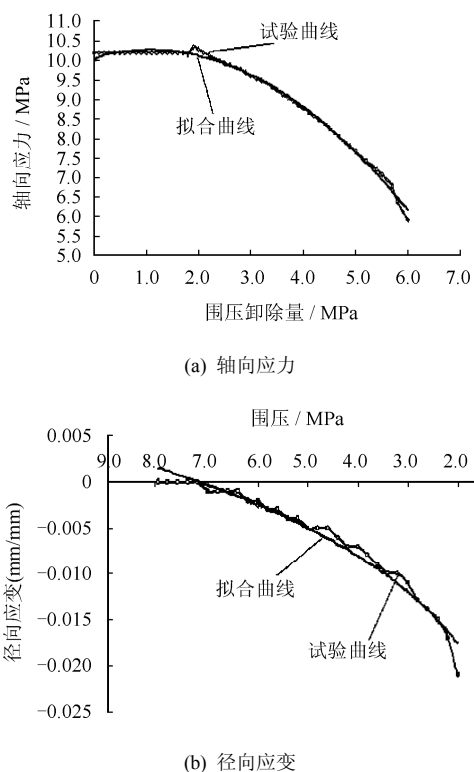


图5 试验曲线与拟合曲线对比研究

Fig.5 Comparative study between test curve and fitting curve

5 结 论

(1) 在轴向应变保持不变的情况下, 含瓦斯煤在围压被逐渐卸除后其轴向应力均呈现逐渐减小趋势, 基本可分为缓慢降低阶段和急剧降低阶段, 煤样轴向应力减小速率的大小与围压和瓦斯压力之差呈正向变化关系。

(2) 煤样内瓦斯压力越大, 煤样卸除单位大

小围压后产生的轴向应力降低越大, 卸除围压时轴向应力发生变化的敏感性越强。

(3) 固定轴向应变而逐渐卸除围压时, 含瓦斯煤径向将发生明显膨胀应变, 随着围压卸除量的增加呈增加趋势, 可以分为缓慢增加和急剧增加 2 个阶段。

(4) 煤样内瓦斯压力越大, 卸除单位围压后产生的径向应变越大, 围压卸除后煤样产生的径向应变越大。

(5) 瓦斯压力的大小对卸除围压后含瓦斯煤样轴向应力变化、径向应变变化的影响均呈非线性关系, 分别可用二次函数和修正的对数函数表征。

参 考 文 献

- [1] 周世宁, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存与流动理论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.
- [2] 俞启香. 矿井瓦斯防治[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992.
- [3] 李新元, 陈培华, 王吴一. 极松软顶板工作面矿山压力活动规律[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, (4): 4—7.
LI Xin-yuan, CHEN Pei-hua, WANG Wu-yi. Ground pressure activity law of extremely lofty roof face [J]. **Ground Pressure and Strata Control**, 2004, (4): 4—7.
- [4] 王家臣. 厚煤层开采理论与技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [5] 尤明庆, 华安增. 岩石试样的三轴卸围压试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(1): 24—29.
YOU Ming-qing, HUA AN-zeng. Triaxial confining depressure test of rock sample[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(1): 24—29..
- [6] 陈卫忠, 吕森鹏, 郭小红, 等. 脆性岩石卸围压试验与岩爆机理研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(6): 963—969.
CHEN Wei-zhong, LÜ Sen-peng, GUO Xiao-hong, et al. Unloading confining pressure for brittle rock and mechanism of rock burst[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2010, 32(6): 963—969.
- [7] 任建喜, 杨更社, 葛修润. 裂隙花岗岩卸围压作用下损伤破坏机理 CT 检测[J]. 长安大学学报(自然科学版),

- 2002, 22(6): 46—49.
- REN Jian-xi, YANG Geng-she, GE Xiu-run. Real-time CT test of meso-damage evolution law of jointed granite on unloading confining pressure[J]. **Journal of Xi'an Highway University**, 2002, 22(6): 46—49.
- [8] 丘士利, 冯夏庭, 张传庆, 等. 不同卸围压速率下深埋大理岩卸荷力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(9): 1807—1817.
- QIU Shi-li, FENG Xia-ting, ZHANG Chuan-qing, et al. Experimental research on mechanical properties of deep-buried marble under different unloading rates of confining pressure[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(9): 1807—1817.
- [9] 黄启翔, 尹光志, 姜永东. 地应力场中煤岩卸围压过程力学特性试验研究及瓦斯渗透特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(8): 1639—1848.
- HUANG Qi-xiang, YIN Guang-zhi, JIANG Yong-dong. Experimental study of mechanical characteristics of coal specimen in process of unloading confining pressure in geostress field and analysis of gas seepage characteristics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(8): 1639—1848.

第五届海峡两岸结构与岩土工程学术研讨会（第一号通知）

会议背景：继 1994 年杭州第一届会议、1997 年香港第二届会议、2003 年台北第三届会议和 2007 年杭州第四届会议之后，第五届海峡两岸结构与岩土工程学术研讨会将于 2011 年 7 月 13~15 日在香港理工大学举行。本次会议由香港理工大学建设及地政学院主办，浙江大学及台湾大学协办，旨在促进和推动两岸结构和岩土工程界的学术交流和合作，共同探讨学科发展和工程实践之趋势。

主办单位：香港理工大学 **协办单位：**浙江大学 台湾大学

会议议题：（1）高层结构；（2）空间结构；（3）桥梁结构；（4）混凝土结构；（5）钢结构及组合结构；（6）新型结构材料及体系；（7）结构抗风、抗震及控制；（8）结构耐久性及可靠性；（9）结构健康监测、评估及加固；（10）复杂荷载作用下的岩土力学；（11）环境土工；（12）边坡稳定；（13）隧道工程；（14）地基处理；（15）基础设计；（16）桩基工程；（17）地震工程；（18）其他相关领域。

语言：论文撰写语言和会议期间的报告语言采用汉语或英语。

论文集出版：会议论文摘要将以印刷版形式出版；全文将以光盘形式出版。

论文注册：作者请在论文摘要提交截止日期前向各地区秘书处提交论文摘要（中文 600~1 000 字或英文 200~300 单词）及论文注册回执各一份。会议代表注册费为每位 2 000 元港币，缴纳方法将另行通知。

重要日期：摘要提交截止日 2010-12-31；摘要接受通知日 2011-2-1；论文提交截止日 2011-4-1；论文接受通知 2011-5-1；会议注册截止日 2011-5-31。

电子文件格式 论文摘要和正文的电子文件请采用 Microsoft Word 编排，并以 .doc 格式通过 E-mail 提交给秘书处。

秘书处：

（1）香港和澳门作者联系方式

通信地址：香港 九龙 红磡 香港理工大学土木及结构工程学系

电 话：+852-2766 4473 或 +852-2766 4812 传 真：+852-2334 6389

电子邮件：cexwye@polyu.edu.hk 联系人：周华飞、叶肖伟、余涛

（2）大陆作者联系方式

通信地址：浙江杭州余杭塘路 338 号 浙江大学紫金港校区建筑工程学院空间结构研究中心

邮政编码：310058 电 话：+86-571-88208696 或 +86-571-88208753 传 真：+86-571-88208753

电子邮件：suliang@zju.edu.cn 联系人：邓华、苏亮、段元锋

（3）台湾作者联系方式

通信地址：106 台北市罗斯福路 4 段 1 号台湾大学土木工程学系

电 话：+886-2-2369 0411 传 真：+886-2-2363 1558

电子邮件：ljleu@ntu.edu.tw 联系人：吕良正

会议网页：<http://www.polyu.edu.hk/fclu/SGE5/>