

振动诱发煤与瓦斯突出的机理

李祥春^{1,2)} 聂百胜^{1,2)} 何学秋^{1,2)}

1) 中国矿业大学(北京)资源与安全工程学院, 北京 100083 2) 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083
通信作者, E-mail: chinaixq23@163.com

摘要 振动是诱发煤与瓦斯突出的重要因素, 为此实验研究了振动对瓦斯吸附的作用并从理论上分析了振动对煤体结构的影响, 探讨了振动诱发煤与瓦斯突出的机理. 结果表明: 在振动作用下, 煤对瓦斯的吸附量有一定程度的减少, 吸附能力降低; 振动延长了煤样达到吸附平衡的时间, 使吸附平衡压力与未加振动时有所升高, 煤样中游离瓦斯增多; 振动使煤体内的裂隙增加并扩展, 当振动强度达到一定值时煤体内形成较大范围的连通裂隙网; 在振动对煤体和瓦斯产生的综合作用下, 煤与瓦斯突出的危险性大大增加.

关键词 煤矿; 瓦斯突出; 振动; 吸附; 裂隙

分类号 TD713

Mechanism of coal and gas bursts caused by vibration

LIXiang-chun^{1,2)}, NIE Baisheng^{1,2)}, HE Xue-qiu^{1,2)}

1) School of Resource and Safety Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China

2) State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Beijing 100083, China

Corresponding author, E-mail: chinaixq23@163.com

ABSTRACT For vibration is an important factor among all influencing factors of coal and gas bursts, gas adsorption experiments of coal were done and crack growth in coal was analyzed under vibration conditions. The mechanism of coal and gas bursts was discussed according to experimental and theoretical results. It is shown that under the action of vibration the gas content of coal and the adsorption ability decrease, and after vibration the time to reach the gas adsorption equilibrium in coal and the adsorption equilibrium pressure increase, indicating that vibration makes free gas increase and the gas content of coal reduce. Vibration also leads to the increasing of crack number and crack growth rate, and when the vibration strength arrives at some value a large scale connected crack network appears. The integrated influence of vibration on the coal and gas system increases the danger of coal and gas bursts.

KEY WORDS coal mines; gas bursts; vibrations; adsorption; cracks

煤与瓦斯突出是煤矿中一种极其复杂的动力现象, 严重威胁煤矿的安全生产^[1-3]. 在煤矿开采过程中, 其采煤方法、采煤工艺及施工方法都可能引起煤与瓦斯突出的发生. 在我国 8 669 次有明确作业方式记录的突出事例中, 有 8 362 次有放炮、支护、落煤和打钻等作业方式诱导了突出, 占 96.5%, 无作业突出 39 次, 仅占 0.45%^[3]. 在影响煤与瓦斯突出的因素中从突出发生的数量上看, 振动是诱发很多煤与瓦斯突出的重要因素. 因此, 本文实验研究了振动对煤体瓦斯吸附的影响, 并对振动对煤体结

构的影响进行了分析, 探讨了振动诱发煤与瓦斯突出的机理, 以期对煤与瓦斯突出的预防提供一定的理论基础.

1 振动对瓦斯吸附的影响

1.1 实验系统

由于原有的瓦斯吸附实验系统在进行改造设计过程中无法实现与振动系统的配合, 所以在传统解吸法测定的基础上, 结合国际先进技术, 自行设计加工了瓦斯吸附实验系统、数据采集系统和振动实验

收稿日期: 2010-05-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2005CB221502); “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (No. 2007BAK22B05); 霍英东高等院校青年教师基金资助项目 (No. 111053); 中国矿业大学(北京)基本科研业务费专项基金资助项目 (No. 2009QZ09)

系统. 瓦斯吸附实验系统采用国外进口的管路系统、阀门和连接三通, 密封性好, 吸附压力高, 实物照片如图 1 所示. 数据采集系统见图 2 设计订购了低频振动发生系统, 包括低频振动发生实验台和低频信号功率放大器, 实物照片见图 3 和图 4

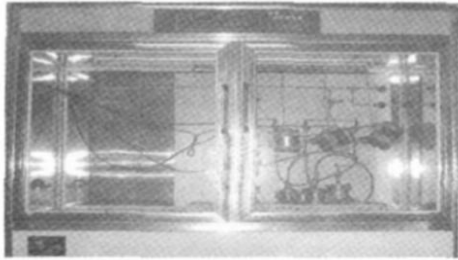


图 1 高压瓦斯等温吸附实验系统

Figure 1 High pressure gas adsorption isotherm experiment system

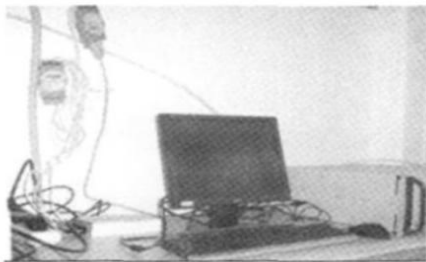


图 2 高压瓦斯等温吸附实验数据采集系统

Figure 2 Data acquisition system for high pressure gas adsorption isotherm experiments



图 3 振动试验系统中的低频振动发生实验台

Figure 3 Low frequency vibration production equipment in the vibration experiment system

1.2 煤样采集和处理

实验煤样取自寿阳段王煤矿的 9# 煤和皖北祁东煤矿的 9# 煤. 采集煤层(或分层)全厚样品, 除去矸石, 新鲜煤样经严密封装后, 送至实验室. 取送样的一半全部粉碎, 通过 60 目和 80 目的筛网, 取 60 ~ 80 目网间的颗粒, 称出 100 g 放入称量皿. 其余的煤样送去测定水分、灰分和挥发分等. 为排除水分影响, 将称好的煤样置于真空干燥箱中, 干燥 6 h

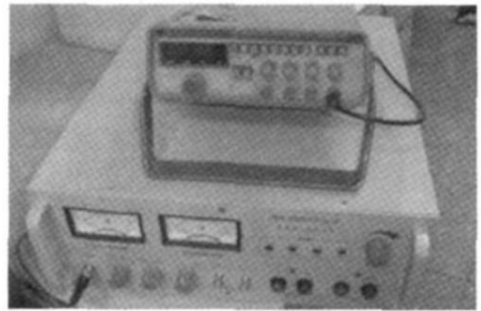


图 4 振动试验系统中的低频信号功率放大器

Figure 4 Low frequency power amplifiers in the vibration experiment system

(75 °C). 将干燥后的煤样在真空干燥箱中取出后用磨口瓶盛装, 然后放入干燥器内备用. 煤样工业分析结果见表 1.

表 1 煤样工业分析表
Table 1 Industrial analysis of coal samples %

样品	空气干燥基水分, Mad	干燥基灰分, Ad	干燥基挥发分, Vd
段王 9 煤	0.39	14.28	14.13
祁东 9 煤	0.30	14.29	26.25

1.3 实验结果

1.3.1 吸附等温线的测定

吸附等温线的测定温度为 30 °C. 煤样在振动场作用下得到的实验结果如图 5 和图 6 所示. 图 5 是段王矿煤样在加振动场和未加振动场作用下的等温吸附曲线; 图 6 是祁东矿煤样在加振动场和未加振动场作用下的等温吸附曲线. 通过对比可以看出, 在外加振动场的作用下煤对瓦斯的吸附量有一定程度的减少, 吸附能力降低, 等温吸附曲线比一般条件下的煤样等温吸附曲线有所降低, 不同的煤样变化情况不同.

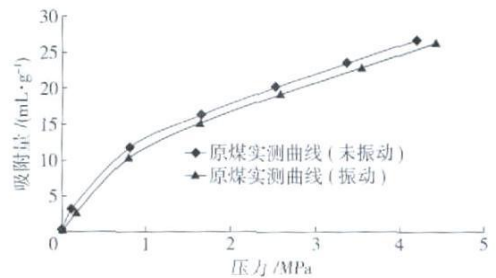


图 5 段王煤样等温吸附线对比

Figure 5 Comparison between adsorption isotherms of Duanwang coal samples

1.3.2 吸附平衡时间的测定

实验测定了祁东煤样不同初始气体压力情况下的

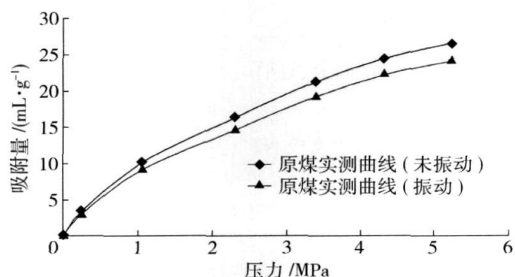


图 6 祁东煤样等温吸附线对比

Figure 6 Comparison between adsorption isotherms of Qidong coal samples

的吸附平衡时间, 利用数据采集系统每隔 1 采集一个数据, 直至吸附平衡. 从不加振动和加振动等温吸附平衡时间可以分析加振动对吸附平衡时间的影响. 吸附平衡时间实验曲线如图 7 和图 8 所示. 图 7 是初始气体压力为 0.488 MPa 时吸附平衡时间实验曲线, 图 8 是初始气体压力为 1.82 MPa 时吸附平衡时间实验曲线.

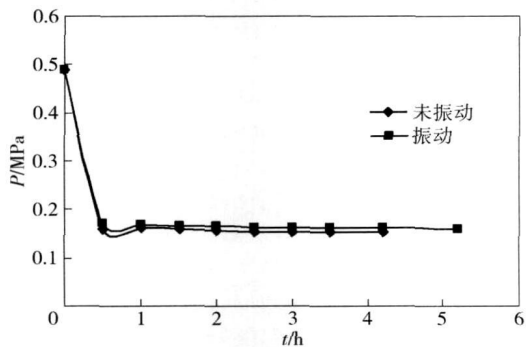


图 7 祁东煤样吸附平衡时间对比实验结果

Figure 7 Comparison of the time to the adsorption equilibrium for Qidong coal samples

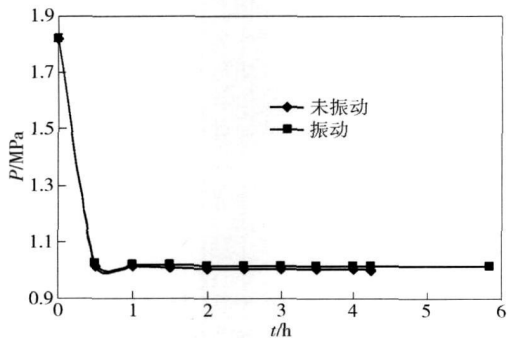


图 8 祁东煤样吸附平衡时间对比实验结果

Figure 8 Comparison of the time to the adsorption equilibrium for Qidong coal samples

从图 7 和图 8 中可以看出: 加振动后, 延缓了煤样达到吸附平衡的时间; 吸附平衡压力与未加振动

相比, 吸附平衡压力升高. 这说明振动使煤样中游离瓦斯增多, 吸附瓦斯减少, 需要更长时间达到吸附动态平衡. 在实际中振动便可使部分吸附瓦斯转变为游离瓦斯, 而游离瓦斯则可通过裂隙运移得以排放, 提高瓦斯运移的速度和流量, 也就可以提高瓦斯抽放的效果, 进而可以达到减小突出煤层的突出危险性.

2 振动对煤体结构的影响

振动作用于煤体后, 导致煤体裂隙扩展发育, 而且煤体的强度降低^[4-7]. 这将使煤与瓦斯突出发生的三个要素 (应力、瓦斯和煤体) 中的一个要素煤体更具备了促使突出的条件; 尤其是振动对煤体裂隙的影响使煤体极易形成贯通裂隙, 导致煤体在高压瓦斯作用下瞬间失稳. 为此, 对煤体在振动作用下的裂隙扩展情况进行分析^[8-11]. 假设煤体为线弹性体, 裂隙壁承受准静态压力作用, 故可用线弹性断裂力学进行描述, 其断裂力学模型如图 9 所示, 其中 r 为裂隙半径.

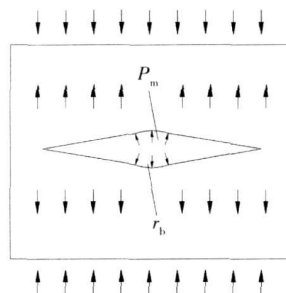


图 9 裂隙扩展的断裂力学模型

Figure 9 Fracture mechanics model of crack propagation

由线弹性断裂力学可知, 在振动应力作用下裂隙尖端的应力强度因子

$$K_I = \sqrt{\pi l} [(1 - 2/\pi) P_m - \sigma] \quad (1)$$

式中: l 为裂隙扩展瞬间长度, m ; P_m 为振动应力, Pa; σ 为地应力, Pa

从式 (1) 中可以看出, 随着地应力的增大, 应力强度因子 K_I 呈线性下降趋势. 振动强度越大, 振动应力越大, K_I 也就越大. 当随着振动减小, K_I 衰减到一定值时, 裂隙将停止扩展. 裂缝失稳扩展条件为

$$K_I \geq K_{Ic} \quad (2)$$

式中, K_{Ic} 为动态断裂韧性, $N \cdot m^{-3/2}$.

岩石的动态平面断裂韧性可由其静态断裂韧性求得

$$K_{Ic} = 1.6 K_{Ic} \quad (3)$$

式中, K_s 为静态断裂韧性, $N m^{-3/2}$.

从以上分析可知, 振动将使煤体内的大量裂隙更易扩展失稳, 这也正是振动诱导煤与瓦斯突出发生的重要原因.

3 讨论

在煤与瓦斯突出发生的很多事例中, 振动对含瓦斯煤体的干扰引起煤与瓦斯突出事故占了很大比例. 根据上面的分析可知, 振动作用煤体后, 将增加煤体应力改变煤体的应力状态, 并能促使吸附瓦斯大量解吸, 使游离瓦斯压力升高. 煤体裂隙大大发育, 在裂隙扩展的同时会产生电磁场^[12-13], 电磁场同样会加速瓦斯的解吸和释放, 使瓦斯压力的快速升高. 在采掘工作面的前方卸压区内煤体受振动作用, 强度降低, 承受瓦斯压力和煤体产生的侧压的能力降低, 同时卸压区内由于应力的降低, 煤体渗透率升高, 而在应力集中区内煤体的渗透率在高应力作用下降低, 这使得煤体内的瓦斯流动受阻, 瓦斯压力梯度剧增, 使煤与瓦斯突出事故极易发生. 因此, 很多煤与瓦斯突出事故都是由振动引起的.

4 结论

(1)在振动作用下煤对瓦斯的吸附量有一定程度的减少, 吸附能力降低.

(2)振动延长了煤样达到吸附平衡的时间; 吸附平衡压力与未加振动相比有所升高. 这说明振动使煤样中游离瓦斯增多, 吸附瓦斯减少, 需要更长时间达到吸附动态平衡.

(3)振动使煤体内的裂隙增加并扩展, 当振动强度达到一定值时, 煤体内能够形成较大范围的连通裂隙网, 使煤体强度降低, 更易失稳.

(4)在振动对煤体和瓦斯产生的综合作用下, 煤与瓦斯突出的危险性大大增加.

参 考 文 献

[1] Yu Q X Gas Disaster Prevention in Mine Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1992
(俞启香. 矿井瓦斯防治. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1992)

[2] Lana R D, Boczko J Management of outburst in underground coal mines Int J Coal Geol 1998, 35(1-4): 83

[3] Cai C G, Wang Y A Qualitative and quantitative analysis of general regularity of coal and gas outburst J China Saf Sci 2004, 14

(6): 109
(蔡成功, 王佑安. 煤与瓦斯突出一般规律定性定量分析研究. 中国安全科学学报, 2004, 14(6): 109)

[4] Liwiniszyn J A model for the initiation of coal-gas outbursts Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 1985, 20(1): 39

[5] Ren W J, Du G L, Pan Y S The experimental study of rockburst prevention through vibration inducing crevasse in coal mass J Fuel in Min Inst 1997, 16(6): 687
(任伟杰, 杜广林, 潘一山. 振动对煤体裂隙分布和力学性能的影响. 阜新矿业学院学报, 1997, 16(6): 687)

[6] Ren W J, Pan Y S, Song S L The experimental study of the coal mass crevasse growing after coal mass vibrated with different frequency J Liaoning Tech Univ 1998, 17(6): 565
(任伟杰, 潘一山, 宋绍楼. 振动频率对煤体裂隙发育影响的试验研究. 辽宁工程技术大学学报, 1998, 17(6): 565)

[7] Jiang Y D, Zhao Y X, Song Y Q et al Analysis of blasting vibration impact on roadway stability in coal mining Chin J Rock Mech Eng 2005, 24(17): 3131
(姜耀东, 赵毅鑫, 宋彦琦, 等. 放炮震动诱发煤矿巷道动力失稳机理分析. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3131)

[8] Yu B F, Wang Y A The Technical Manuals of Coal and Gas Disaster Prevention and Use Beijing: Coal Industry Press, 2000
(于不凡, 王佑安. 煤与瓦斯灾害防治及利用技术手册. 北京: 煤炭工业出版社, 2000)

[9] Liu J The Outburst Prevention Technology of Long-hole Pre-splitting Blasting in the Low Permeability Outburst Coal Seam [Dissertation], Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2003
(刘健. 低透气性突出煤层深孔预裂控制爆破防突的技术研究 [学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2003)

[10] Song X S The Improving Permeability Technology by Deep-hole Pre-splitting Explosion in High Gas and Low Permeability Coal Seam [Dissertation], Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2003
(宋贤生. 高瓦斯低透气煤层深孔松动预裂爆破增透技术研究 [学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2003)

[11] He X Q Rheological Dynamics of Coal or Rock Containing Gas Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1995
(何学秋. 含瓦斯煤岩流变动力学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995)

[12] He X Q, Wang E Y, Nie B S et al Coal or Rock Rheology Electromagnetic Dynamics Beijing: Science Press, 2003
(何学秋, 王恩元, 聂百胜, 等. 煤岩流变电磁动力学. 北京: 科学出版社, 2003)

[13] Nie B S, He X Q, Chen W X et al Electromagnetic emission characteristics and mechanism of the deformation and fracture of coal // International Young Scholar Symposium on Rock Mechanics 2008, Beijing, 2008, 925