

文章编号: 1673-3363-(2015)05-0859-05

# 煤矸石充填体在不同参数条件下的 瓦斯透气性实验研究

朱川曲, 康付如, 谢东海, 欧懿, 杨党委

(湖南科技大学能源与安全工程学院, 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

**摘要** 为研究煤矸石充填体的瓦斯透气性, 根据压差法和达西定律构建了一种煤矸石充填体瓦斯透气性实验系统, 并利用该系统完成了煤矸石不同级配、不同围岩压力和不同瓦斯体积分数下的透气性实验。实验结果表明: 实验测定的煤矸石充填体瓦斯透气系数在区间 $[0.649, 3.206] \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 内, 属于可以抽放范围, 透气性较好。在实验基础上提出了通过适当增加煤矸石充填体的粒径和工作面风量、降低煤矸石充填体承载力和充填区域瓦斯含量的方法来增大煤矸石充填体的瓦斯透气系数, 从而为安全高效的保护层开采煤矸石充填应用技术提供理论指导。

**关键词** 煤矸石充填体; 不同粒径级配; 不同围岩压力; 不同瓦斯体积分数; 瓦斯透气系数

**中图分类号** TD 712 **文献标志码** A **DOI** 10.13545/j.cnki.jmse.2015.05.025

## An experimental research on gas permeability of coal gangue backfilling body under different parameters

ZHU Chuanqu, KANG Furu, XIE Donghai, OU Yi, YANG Dangwei

(School of Energy and Safety Engineering, Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

**Abstract** In order to study the gas permeability of coal gangue backfilling body, based on the pressure-difference method and Darcy's law, an experimental system for measuring the gas permeability has been proposed. And a series of experiments under various particle gradation, different surrounding rock pressures and different gas concentration have been conducted by using the system. The results have shown that the gas permeability coefficients of coal gangue backfilling body measured by the experiment are in the interval of  $[0.649, 3.206] \text{ m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ , which belong to the appropriate scope of gas drainage, and that the coal gangue backfilling body has good air penetrability. Based on the results of the experiments, the paper has put forward various methods such as appropriate increase of the grain size of coal gangue backfilling body and the ventilation quantity between working face ends, and decrease of the bearing capacity of coal gangue backfilling body and the gas concentration of packing area to increase the gas permeability of coal gangue backfilling body, and the experimental results have provided theoretical guidance for safe and highly effective gangue backfilling technology development under the circumstance of protective layer mining.

收稿日期: 2014-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51174086, 51474104)

作者简介: 朱川曲(1962—), 男, 湖南省长沙市人, 教授, 博士生导师, 从事地表沉陷控制与保水开采、巷道围岩控制方面的研究。

E-mail: cqzhu@hnust.edu.cn

Tel: 13507322251

**Key words** coal gangue backfilling body; different particle gradation; different surrounding rock pressure; different concentration of gas; gas permeability coefficient

煤层开采过程中,煤层卸压瓦斯涌出与运移异常复杂,容易引起瓦斯超限,对安全生产构成极大威胁。其中,煤岩体的透气性是影响瓦斯涌出的一个重要因素,而它又明显受制于采场围岩支承压力的变化。由于煤矸石充填开采与直接垮落法采场围岩压力有显著的差异,2 种方法下煤岩体透气性大小有明显的不同<sup>[1-5]</sup>。此外,保护层开采可以增加煤层的透气性,提高煤(岩)层瓦斯的排放能力。因此,保护层开采下煤矸石充填体透气系数<sup>[6]</sup>研究具有十分重要的意义。

目前,国内外透气性大小主要采用压差法<sup>[7-8]</sup>测试。周世宁等<sup>[9-12]</sup>指出瓦斯在煤层裂隙及大孔隙中的渗透流动符合达西定律,而煤矸石材料孔隙较大,可以利用达西定律进行研究。一般用作充填的煤矸石粒径小于等于 300 mm,且粒径分布具有一定的级配特征。本实验利用相似级配法<sup>[13]</sup>,从湖南某矿矸石山中选取煤矸石材料,相似比取 1:10,即将最大煤矸石粒径控制在 30 mm。然后,通过不同参数条件下的煤矸石充填体瓦斯透气性实验,得出不同参数条件(煤矸石粒径级配、围岩压力、瓦斯含量)下煤矸石充填体的瓦斯透气系数,找出影响煤矸石充填体瓦斯透气性大小的因素,为保护层开采下的煤矸石充填提供技术理论依据。

1 煤矸石充填体瓦斯透气性实验

1.1 实验材料的选取

根据粒径大小将煤矸石材料划分为 7 个小组。利用孔径大小分别为 30, 25, 20, 10 mm 的 4 组筛子对煤矸石进行筛分,选取使用粒径范围为 30~25, 25~20, 20~10, <10 mm 和以上 4 种粒径质量比分别为 1:1:1:1, 1:2:3:4 和 4:3:2:1 进行实验,级配方案见表 1。

表 1 煤矸石材料级配配比方案  
Table 1 Plans of coal gangue material blend

组别	质量分数/%			
	30~25 mm	25~20 mm	20~10 mm	<10 mm
1	100	0	0	0
2	0	100	0	0
3	0	0	100	0
4	0	0	0	100
5	25	25	25	25
6	10	20	30	40
7	40	30	20	10

1.2 实验装置研究

煤矸石充填体瓦斯透气性实验系统如图 1。

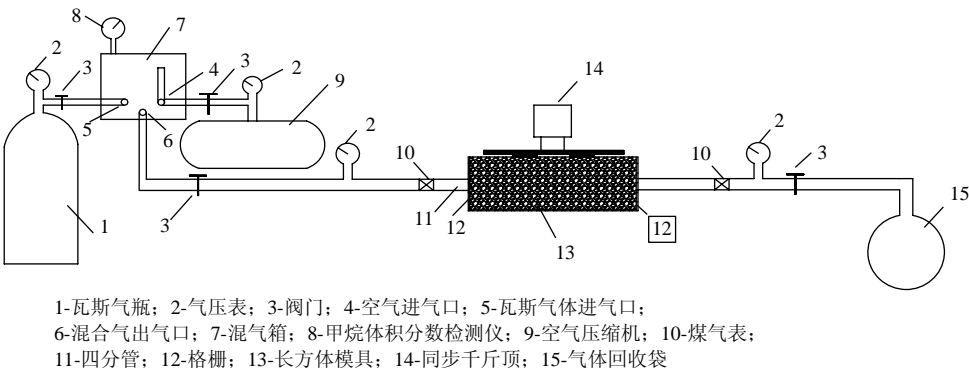


图 1 煤矸石充填体瓦斯透气性实验系统  
Fig.1 Test system of coal gangue backfill gas permeability

实验装置由压力加载系统、气体供给系统和量测系统组成。其中压力加载系统主要是同步千斤顶,气体供给系统由瓦斯气瓶、空气压缩机、混气箱、减压阀和若干导管组成,量测系统由甲烷浓度检测仪、煤气表和数字气压表组成。

1.3 实验过程

为使气流混合均匀,在长方体模具的进、出口端放入格栅,然后将第 1 组筛分好的煤矸石均匀地放入长方体模具中。用橡胶板对长方体模具上方敞开端进行密封,然后用强力万能胶均匀地涂抹橡胶

板与钢板接触处,涂约2 mm厚,再用橡皮套紧紧地套在模具上方敞开端,进行进一步的密封。将橡皮套上方盖1层14 mm厚的钢板,钢板和敞开端断面尺寸大小相同。由于空气的密度比瓦斯气体的密度大,为了使空气和瓦斯气体充分混合,将混气箱空气入口端的四分管插入混气箱内部的中间位置,再用弯头和另一根四分管连接,使出气口位于混气箱中上部距顶部1/4位置处。用四分管、弯头、三通等将各个部件连接起来,连接处用生料带密封好,防止气体泄漏,检查好电气设备使其能安全使用,同时要确保周边没有火源,然后准备实验。

打开排气阀门,启动同步千斤顶对钢板施加压力,将空气压缩机接通电源打开一段时间,然后同时打开空气压缩机、瓦斯气瓶和混气箱出气口的阀门。分别用瓦斯气瓶和空气压缩机向混气箱中通入一定压力的体积分数为99%的瓦斯气体和空气,在混气箱中将空气和瓦斯气体按照一定的比例混合均匀,用甲烷体积分数检测仪检测混合后的瓦斯气体体积分数,再将混合后的气体从长方体模具的一端通入,出口端用回收袋将气体回收,待气体达到吸附平衡后,计时一段时间 $t$ ,这段时间模具入、出口端的气压 $p_1$ 和 $p_2$ 保持不变,通过气压表读出此时的 $p_1$ 和 $p_2$ ,同时用煤气表测出这段时间气体的流量 $Q$ 。

改变不同的实验条件(压力、瓦斯体积分数)进行实验,然后按照同样的操作对其余6组方案进行实验。

## 2 煤矸石充填体瓦斯透气系数的计算

煤矸石充填体是多孔物质,可以认为煤矸石充填体中瓦斯气体的流动是单向稳定流动。根据实验室和前人的现场测定可知:在正常压力范围内,煤矸石充填体内的瓦斯流动状态属于层流运动,瓦斯的流速和压差成正比,与煤矸石充填体的瓦斯渗透率成反比,服从直线渗透定律,即达西定律

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

式中: $u$ 为流速, m/s;  $\mu$ 为瓦斯动力黏度系数, Pa·s;  $K$ 为煤矸石充填体渗透率,  $m^2$ ;  $dx$ 为和流体流动方向一致的极小长度, m;  $dp$ 为在 $dx$ 长度内的压差, MPa。

煤矸石充填体均匀分布于模具中,整个实验系统无漏气,根据达西渗透直线定律可以定量计算煤矸石充填体瓦斯透气系数<sup>[14-15]</sup>,计算公式如下:

$$\lambda = \frac{2Q\mu p_{at} L \xi}{F(p_1^2 - p_2^2)} \quad (2)$$

式中: $\lambda$ 为煤矸石透气系数,  $m^2/(MPa^2 \cdot d)$ ;  $\mu$ 为在试验温度条件下,气体的绝对黏度, Pa·s;  $p_1$ ,  $p_2$ 为模具进气口和出气口的混合气体压力, MPa;  $p_{at}$ 为大气压力, 0.1 MPa;  $Q$ 为混合气体流量,  $m^3/d$ ;  $L$ 为煤矸石充填体长度, m;  $\xi$ 为在 $p_2$ 和 $p_{at}$ 压力下瓦斯压缩系数之比;  $F$ 为煤矸石充填体断面积,  $m^2$ 。

在实验室测定煤样渗透率时,由于所用的瓦斯压力一般较低,故 $\xi$ 近似为1,故从式(2)可得实验室测定煤样渗透率的计算公式为

$$\lambda = \frac{0.2Q\mu L}{F(p_1^2 - p_2^2)} \quad (3)$$

实验在20℃左右进行,空气黏度系数取 $1.808 \times 10^{-5}$  Pa·s,瓦斯黏度系数取 $1.087 \times 10^{-5}$  Pa·s;煤矸石充填体长度 $L=1$  m;煤矸石充填体断面积 $F=0.2 \times 0.2=0.04$   $m^2$ 。

## 3 实验结果及讨论

### 3.1 不同粒径级配对煤矸石充填体瓦斯透气性的影响

本次实验甲烷体积分数检测仪检测出的混合后瓦斯气体体积分数为30%,在施加30 MPa加载力条件下,对不同级配煤矸石充填体进行实验,并利用式(3)对实验数据进行计算,计算结果见表2。

表2 不同粒径级配对透气系数的影响结果  
Table 2 The effect of various particle graded on gas permeability coefficient

组别	千斤顶施力/ MPa	$p_1$ / MPa	$p_2$ / MPa	$Q$ / ( $m^3 \cdot d^{-1}$ )	$\lambda$ / ( $m^2 \cdot (MPa^2 \cdot d)^{-1}$ )
1	30	0.112	0.088	123.84	2.051
2	30	0.124	0.100	112.32	1.661
3	30	0.132	0.112	68.4	1.114
4	30	0.144	0.124	66.96	0.993
5	30	0.128	0.108	80.64	1.358
6	30	0.140	0.120	66.96	1.024
7	30	0.120	0.096	120.96	1.855

1~4组为单级别组。对表2所列的1~4组实验数据分析可知,当达到气体吸附平衡时,单位时间通过煤矸石充填体的气体流量越大,煤矸石充填体的透气系数越大;煤矸石充填体瓦斯透气系数与颗粒粒径大小成正比关系,且粒径大于20 mm时煤矸石充填体瓦斯透气系数大小随颗粒级配变化较大,粒径小于20 mm时煤矸石充填体瓦斯透气系数大

小随着颗粒级配变化较小, 瓦斯透气系数在区间[0.993, 2.051]内, 属于可以抽放范围。

5~7 组为混合级别组。由表 2 可以看出, 第 5~7 组单位时间通过气体的流量和煤矸石充填体瓦斯透气系数分别介于第 2 和第 3 组、第 3 和第 4 组、第 1 和第 2 组之间。由此得出: 较小粒径煤矸石所占比例越大, 煤矸石充填体的瓦斯透气系数越小; 单位时间通过气体的流量越大, 透气性系数越大。

根据以上分析可知: 可以通过适当增加煤矸石充填体的粒径和工作面风量, 来提高煤矸石充填体的透气系数。

### 3.2 不同围岩压力对煤矸石充填体瓦斯透气性的影响

通过调节瓦斯气瓶和空气压缩机上的阀门, 使混合后的瓦斯气体体积分数为 30%, 分别对 1~7 组煤矸石充填体进行在千斤顶示数为 5, 10, 20, 30, 40, 50 MPa 下的瓦斯透气性实验, 通过计算得出在不同压力条件下的瓦斯透气系数, 以千斤顶示数  $\sigma$  为  $x$  轴, 以煤矸石充填体瓦斯透气系数  $\lambda$  为  $y$  轴, 运用 MATLAB 拟合出不同围岩压力条件下的煤矸石充填体瓦斯透气系数曲线, 见图 2。

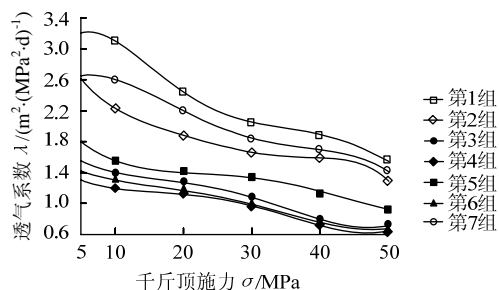


图 2 不同围岩压力对煤矸石充填体瓦斯透气系数的影响

Fig.2 The effect of different surrounding rock pressure on coal gangue backfill gas permeability coefficient

由图 2 可知, 随着千斤顶施加压力的增大, 由于煤矸石充填体被压实, 煤矸石充填体之间的孔隙缩小, 其压实应变量也逐步增大, 从而使 1~7 组煤矸石充填体瓦斯透气系数均随千斤顶施加压力的增加呈减少的趋势, 且 1~7 组的瓦斯透气系数均在加载力为 5 MPa 是其在 50 MPa 下的一半。第 1, 7, 2 组的煤矸石粒径偏大, 孔隙度高, 起到骨架支撑作用, 随着千斤顶施加压力的增大, 煤矸石充填体在压实的过程中有更大的压缩空间, 其应变较大, 所以第 1, 7, 2 组煤矸石充填体瓦斯透气系数随千斤顶施加压力的增加而减少的趋势较大。

对于粒径在 0~30 mm 范围内的煤矸石充填体,

在加载力分别为 5, 10, 20, 30, 40, 50 MPa 下, 其瓦斯透气系数在区间[0.649, 3.206]内, 属于可以抽放范围。

### 3.3 不同瓦斯体积分数对煤矸石充填体瓦斯透气性的影响

通过同步千斤顶对煤矸石充填体施加 30 MPa 的压力, 调节瓦斯气瓶和空气压缩机上的阀门, 分别对 1~7 组煤矸石充填体进行在瓦斯体积分数为 30%, 60%, 99.9% 下的瓦斯透气性实验, 通过计算得出不同体积分数条件下的瓦斯透气系数, 不同体积分数下的煤矸石充填体瓦斯透气系数曲线如图 3。

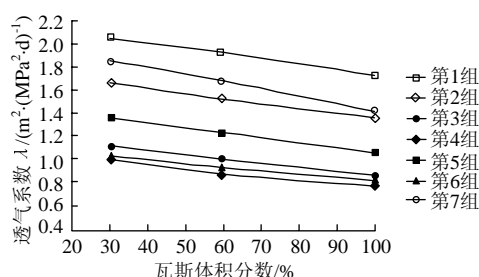


图 3 不同瓦斯体积分数对煤矸石充填体瓦斯透气系数的影响

Fig.3 The effect of different gas concentration on coal gangue backfill gas permeability coefficient

由图 3 可知: 1~7 组煤矸石充填体在瓦斯体积分数为 30% 的透气系数大于瓦斯体积分数为 60% 的透气系数, 瓦斯体积分数为 60% 的煤矸石透气系数又大于瓦斯体积分数为 99.9% 的煤矸石透气系数, 煤矸石充填体的透气系数受瓦斯气体的体积分数影响明显。这是由于瓦斯气体分子吸附能力比空气强, 单位时间内煤矸石充填体单位面积吸附气体分子的厚度增大, 透气通道变小, 从而导致煤矸石充填体在通入高体积分数瓦斯气体时的透气系数较小。煤矸石充填体瓦斯透气系数在区间[0.762, 2.051] $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 内变化。

## 4 结 论

1) 在保护层开采下的煤矸石充填时, 保护层的开采利于瓦斯向充填区域排放, 而实验测定的煤矸石充填体瓦斯透气系数在区间[0.649, 3.206] $\text{m}^2/(\text{MPa}^2 \cdot \text{d})$ 内, 属于可以抽放范围, 透气性较好, 利于解放被保护层。

2) 煤矸石充填体的透气性较差时, 可以通过适当增加煤矸石充填体的粒径和工作面风量, 来提高煤矸石充填体的透气系数, 从而为安全高效矸石充填应用技术提供理论指导。

3) 煤矸石充填体的瓦斯透气系数受加载力影响较大, 在加载力为 5 MPa 是其在 50 MPa 时瓦斯透气系数的一半, 提出了通过降低煤矸石充填体承载力来增大其瓦斯透气系数的方法。

4) 对煤矸石充填体进行不同瓦斯体积分数下的透气性实验, 结果表明其瓦斯透气系数随瓦斯气体的体积分数减小而增加。可通过降低充填区域瓦斯体积分数来增加煤矸石充填体瓦斯透气系数。

#### 参考文献:

- [1] 吕闰生, 彭苏萍, 徐延勇. 含瓦斯煤体渗透率与煤体结构关系的实验[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(7): 114-118.  
LU Runsheng, PENG Suping, XU Yanyong. Experiments on the relationship between permeability of gas-bearing coal and coal body structure[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(7): 114-118.
- [2] 高建良, 刘佳佳, 张学博. 采空区渗透率对瓦斯运移影响的模拟研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(9): 9-14.  
GAO Jianliang, LIU Jiajia, ZHANG Xuebo. Simulation study on the influence of permeability on gas migration in gob[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(9): 9-14.
- [3] 汪有刚, 李宏艳, 齐庆新, 等. 采动煤层渗透率演化与卸压瓦斯抽放技术[J]. 煤炭学报, 2010, 35(3): 406-410.  
WANG Yougang, LI Hongyan, QI Qingxin, et al. The evolution of permeability and gas extraction technology in mining coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(3): 406-410.
- [4] 姜福兴, 孔令海, 刘春刚. 特厚煤层综放采场瓦斯运移规律[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 407-411.  
JIANG Fuxing, KONG Linghai, LIU Chungang. Gas emission laws of fully-mechanized sublevel caving mining in extra-thick coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 407-411.
- [5] 梁赛江, 王同旭, 王太茂. 采空区瓦斯渗透影响的综放面瓦斯运移模拟研究[J]. 山东科技大学学报, 2012, 31(6): 15-19.  
LIANG Saijiang, WANG Tongxu, WANG Taimao. Modeling and research about gas transport based on the influence of high gas in the neighboring coal seam[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology, 2012, 31(6): 15-19.
- [6] 张铁岗. 矿井瓦斯综合治理技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001: 43-59.
- [7] 刘孝锋. 基于压差法的透气性测试装置关键技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012.
- [8] 闵宝乾, 陈斌, 耿新柱, 等. 压差法测试成品鞋透气性能的实验研究[J]. 检验检疫学刊, 2010, 20(3): 33-36.  
MIN Baoqian, CHEN Bin, GENG Xinzhu, et al. Study on the test of air permeability of finished shoes with "Air Pressure Variable" method[J]. Journal of Inspection and Quarantine, 2010, 20(3): 33-36.
- [9] 周世宁. 瓦斯在煤层中流动的机理[J]. 煤炭学报, 1990, 15(1): 61-67.  
ZHOU Shining. The mechanics of methane flow in coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 1990, 15(1): 61-67.
- [10] 周世宁. 电子计算机在研究煤层瓦斯流动理论中的应用[J]. 煤炭学报, 1984, 19(2): 29-35.  
ZHOU Shining. Application of computer in research of gas flow equation[J]. Journal of China Coal Society, 1984, 19(2): 29-35.
- [11] 周世宁, 孔辑正. 煤层瓦斯流动理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1965, 2(1): 24-37.  
ZHOU Shining, KONG Jizheng. Gas flow theory and its application in coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 1965, 2(1): 24-37.
- [12] 王志亮, 杨仁树. 现场测定煤层透气性系数计算方法的优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(3): 23-28.  
WANG Zhiliang, YANG Renshu. Optimization study on calculation method on coal seam gas permeability coefficient in locale measurement[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(3): 23-28.
- [13] 题正义, 秦洪岩, 李树兴. 矸石充填的压实特性试验分析[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(4): 129-131.  
TI Zhengyi, QIN Hongyan, LI Shuxing. Experimental analysis of compaction characteristics filled by coal gangue[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2012, 23(4): 129-131.
- [14] 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, 1999: 60-83.
- [15] 张东明, 胡千庭, 袁地镜. 成型煤样瓦斯渗流的实验研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(2): 288-292.  
ZHANG Dongming, HU Qianting, YUAN Dijing. An experiment research on gas seepage of standard coal briquette specimen[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(2): 288-292.