

文章编号:1000-582X(2011)04-001-05

空化水射流声震效应强化煤层瓦斯解吸渗流的实验

李晓红,冯明涛,周东平,夏彬伟

(重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆400044)

摘要:针对含瓦斯煤层微裂隙、低透气性、高吸附的赋存状态以及煤层瓦斯难抽采的问题,提出了利用空化水射流声震效应强化瓦斯解吸渗流的方法。本文研究了空化水射流声震效应促进煤层瓦斯解吸渗流的机理,对空化声震效应作用下煤样的解吸渗流特性进行了对比实验研究。实验表明:在空化数为0.0200的条件下,空化声震效应作用下的煤样瓦斯解吸量增加36.9%,解吸时间缩短19.6%,空化声震效应作用下瓦斯的渗流速度明显增大,可达0.3833 mL/s,提高率为35.3%。

关键词:空化水射流;声震效应;瓦斯解吸;渗流

中图分类号:TD712

文献标志码:A

Experimental analysis of coal bed methane desorption and seepage under sonic vibrating of cavitation water jets

LI Xiao-hong, FENG Ming-tao, ZHOU Dong-ping, XIA Bin-wei

(Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: A way to enhance coal bed methane desorption and seepage by sonic vibrating of cavitation water jets is proposed because the gas coal seams have the intrinsic properties of micro-porosity, low permeability and high adsorption. The mechanisms of how the sonic vibrating effects promote methane desorption and seepage are analyzed, and the contrast experiments of methane desorption and seepage under sonic vibrating effects are also provided. The results show: when the cavitation number is 0.0200, under sonic vibrating effects, the volume of coal bed methane desorption increases by 36.9%, and the time for coal bed methane desorption reduces by 19.6%. The speed of coal seams methane seepage is significantly increased by 35.3% and arrives at 0.3833 ml/s.

Key words: cavitation water jets; sonic vibrating effects; desorption; seepage

我国可采煤层渗透率较低,煤层中80%~90%的瓦斯以吸附态赋存于煤体中,开采过程中容易诱发瓦斯灾害事故。随着浅部资源的不断开采,矿井向深部不断延伸,受地应力的影响,含瓦斯煤层低渗透性、高吸附、微裂隙的特征越来越明显。如何在低渗透性、高吸附、微裂隙煤层中强化瓦斯解吸、扩大煤层透气性以提高瓦斯抽采率是瓦斯灾害控制的关键问题^[1-4]。

为更好的利用瓦斯资源,控制瓦斯灾害,国内外许多专家学者对瓦斯解吸渗流进行了相关的研究。周世宁和林柏泉^[5]研究了在不同围压,瓦斯压力条件下煤体瓦斯吸附及渗透率变化规律;赵阳升等^[6]测量了三维应力作用下瓦斯在煤岩体孔隙裂隙中的渗透率,得到了渗透系数随有效体积应力和孔隙瓦斯压力

收稿日期:2010-12-10

基金项目:国家自然科学基金委专项创新研究群体基金资助项目(50621403);国家自然科学基金资助项目(50604019)

作者简介:李晓红(1959-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要研究方向为高压水射流及其在地下工程中的应用,
(E-mail)xhli@cqu.edu.cn。

的变化规律;梁冰等^[7]研究了在不同温度、不同瓦斯压力情况下煤的瓦斯吸附性能的变化规律;Kroos B M^[8]等人研究了水分对瓦斯吸附的影响;鲜学福、刘宝县、姜永东、何学秋^[9-12]等人研究了在外加物理场(地应力场,温度场,地电场,电磁场等)以及声场作用下对煤体瓦斯解吸及渗流特性的影响。提高煤层的透气性是强化瓦斯解吸渗流的核心内容,工程应用中常采用水力压裂、密集钻孔抽放、深孔爆破和酸液处理等方法来提高煤层的透气性^[4]。水力压裂受限于煤层的构造,而且不容易控制压裂裂隙的方向,封孔也比较困难;密集钻孔抽放增加了工作量和成本,而且对于低透气性煤层效果并不是很明显;深孔爆破线路连接较复杂,工艺较难掌握,控制不当极易诱发瓦斯突出。因此寻找一些简单有效的促进瓦斯解吸,提高渗流速度的方法显得非常重要。

笔者在高压水射流本煤层钻孔割缝提高瓦斯抽放率,缩短抽放时间的基础上,提出射流在淹没条件下所产生的空化声震效应促进煤层瓦斯解吸渗流的新思路,并进行了在空化声震效应作用下的煤体中瓦斯解吸渗流的实验研究。

1 空化水射流声震效应强化煤层瓦斯解吸渗流的机理

1.1 空化产生机理

无论是理论分析,还是实验量测,都表明纯化液体可承受数值很大的抗拉强度,进一步的研究表明,在天然状态的液体中含有大量的极微小的肉眼看不到气泡,直径约为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm,一般不溶于水,一般称为气核或空化核。

在温度不变的情况下,如液体中某处的压强降到或低于某一临界压强,空化核膨胀长大产生可见的微小空穴(近似于球形的空穴又称为空泡,而非球形的较大的空穴又称为空腔),空穴中饱含液体的蒸汽和由液体中析出的原来溶解于液体中的某些气体。空穴初生后,随着时间的延长,空穴膨胀、生长空穴,当空穴周围的液体压强增高时,空穴会被压缩、溃灭。由于空穴中含有微量不凝结的永久气体,空穴不会立即完全溃灭,而是经过压缩、反弹多次交替发生直至减小到不为肉眼所见而消失。空穴的初生、膨胀、压缩、溃灭这一过程称为空化过程或者空化^[13]。

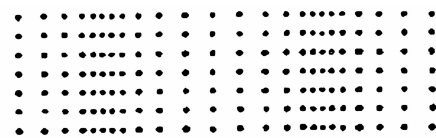
空化过程是液体液相与气相相互变化的极其复杂的过程。在空化生成的过程中,伴随着巨大能量的瞬时爆发,同时将产生高频噪、空化声震、压强脉动和高温高压现象。

1.2 空化声震强化煤层瓦斯解吸渗流的机理

1.2.1 声波效应

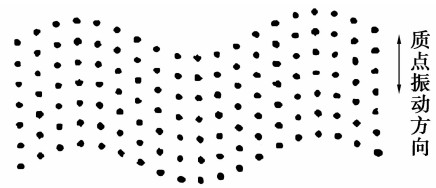
空穴溃灭时所产生的空化噪声,相当于向煤体中

辐射大功率声波。若声波的波型为纵波,煤体介质受到交替变化的拉应力和压应力作用,从而使煤体产生相应交替变化的伸长和压缩弹性形变,质点产生疏密相间的纵向振动,如图 1 所示;若声波的波型为横波,使煤体产生弹性剪切。当煤体受到交变的剪切力作用时,将会相应地发生交变的剪切形变,介质质点产生具有波峰和波谷的横向振动,如图 2 所示。



声波的传播和质点振动方向

图 1 纵波



波的传播方向

图 2 横波

在声波的振动作用下,导致毛细管半径发生时大时小的变化、煤岩骨架和其中的流体产生振动。由于骨架和流体的密度不同,产生的加速度和振幅不同,使流体-固体界面产生相对运动,达到一定的程度就有撕裂的趋势,使气体和煤岩的附着力减弱,有利于气体从煤体中解吸。

在空化噪声作用下,煤基质中的孔隙、裂隙以及有效应力会发生时大时小的变化。Gray^[14]对煤样的有效应力和渗透力之间的关系进行了测试和分析,认为:煤样在脱附过程中的收缩,将导致煤样应力释放,相应地引起有效应力的增加。Harpalani 和 Chen^[15]根据煤样渗透率变化值与有效应力变化的关系,在总结前人实验的基础上,提出表达形式

$$K = A \cdot 10^{-B\bar{\sigma}_j} \quad (1)$$

式中: K 为绝对渗透率; A, B 为取决于煤样的不同参数; $\bar{\sigma}_j$ 为煤样的有效应力。

因为渗透率是有效应力的函数,因此随着有效应力的增加,煤样的渗透率也将随之而增加。

1.2.2 温度效应

Nepprias 指出空泡溃灭时产生的最大理论压力 P_{\max} 和最大理论温度 T_{\max} 由下式计算得到^[16]

$$P_{\max} = P_{g0} \left[\frac{P_{amb}(k-1)}{P_{g0}} \right]^{\frac{k}{k-1}}, \quad (2)$$

$$T_{\max} = T_o \left(\frac{P_{amb}}{3P_{g0}} \right). \quad (3)$$

式中: P_{g0} 为水的蒸汽压; P_{amb} 为围压; k 为水泡内气体的比热比。

实验研究表明^[17]:随着温度的升高,煤对瓦斯气体的吸附量将降低。瓦斯在煤物质表面包括孔隙表面上的吸附是一个放热过程,解吸是一个吸热过程。文献[18]研究温度对煤样渗透率的影响,研究得出:随温度的增加,煤样的渗透率线性增加,其表达式为

$$k(\sigma, T) = k_0(1 + T)^m e^{-B\sigma} \quad (4)$$

式中: T 为温度; B 为实验常数; k_0 为初始渗透率; σ 为平均的有效应力。

溃灭的空泡中含有相当数量的永久气体,空泡溃灭终了时气体的温度必然很高。由于溃灭过程进行得很快,以致在短时间内热交换不足以使空泡内的气体被周围的水冷却,这些热的气体与煤体接触时,热能迅速传播到煤层中去,使得煤体温度升高,促进煤体瓦斯解吸以及提高煤体瓦斯的渗透率。空化噪声声波辐射是一种能量的辐射,当声波穿过含瓦斯煤体时,由于煤体的粘滞性造成质点之间的内摩擦(内耗)而吸收一定量的声能,这部分声能将转变为热能,使煤体的局部温度升高,从而煤体的平均温度升高,有利于降低煤对瓦斯气体的吸附量和提高煤储层的渗透率。

2 实验研究

2.1 实验装置

本实验装置是用在现有的三轴应力瓦斯解吸试验台和空化水射流实验系统的基础上,进行改装设计的,可以模拟研究在不同空化参数的条件下、不同应力条件下和瓦斯压力条件下的煤样瓦斯解吸特性。煤样的下端面直接与空化腔的上端面接触,利用空化腔中空化产生后的空泡溃灭所形成的空化噪声,噪声振动通过空化腔的上表面传播到煤样中。空化水射流装置采用全密封的高压容器模拟淹没环境。该装置主要由以下几个部分组成:空化发生系统、地应力加载系统、瓦斯解吸渗流系统,如图3所示。

2.2 实验过程及方法

实验以典型的高瓦斯突出矿井重庆南桐矿的煤样为研究对象,将煤样置于空化声震效应下的解吸实验装置中,在不同的空化数、泵压、围压条件下进行实验,得到了在不同条件下的瓦斯解吸量、解吸时间、解吸速度之间的关系曲线,并对曲线进行拟合得到一些相关的规律认识。

实验过程及方法:严格按抗压强度测试的试样加工要求,在实验室加工 50×100 的圆柱体标准试样。实验前用热缩胶套将煤样裹好,并用吹风机将热缩胶套加热使其贴紧煤壁以保证良好的气密性,然后将煤样装在三轴应力瓦斯解吸试验台中,再次检查系统的气密性。实验过程中要保持围压大于瓦

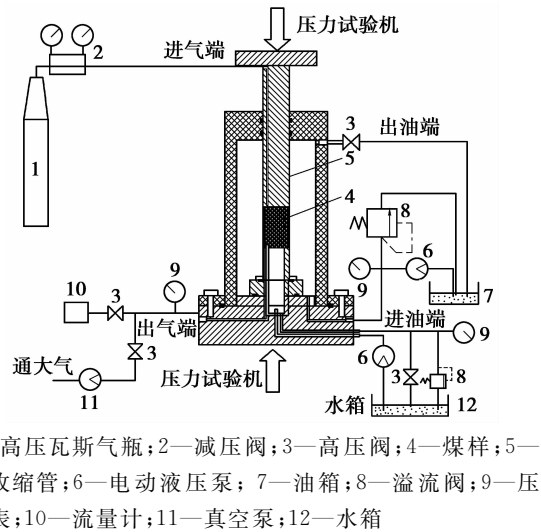


图3 空化声震效应作用下的解吸渗流实验装置

斯压力以保证瓦斯从煤体中通过。

实验步骤:

1)制作直径($\Phi = 50$ mm,高 $h = 100$ mm)规格的标准煤试样数块;

2)煤样称重后置于真空干燥箱内,加热到 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 以上恒温 8 h,在冷却至室温后取出称重,然后放入三轴应力瓦斯解吸试验台中,将两侧端盖拧紧,用真空泵使其脱气 3 h;

3)先对煤样施加某一固定轴压值,然后施加围压和孔隙压力,检查装置气密性。拧开高压瓶的进瓦斯气阀,设定好瓦斯压力值,通入浓度为 99.9% 的瓦斯气体,检查渗透性,看是否有气体通过;

4)关闭出气端阀门,将标准吸附时间定为 5 h,保持瓦斯压力不变;

5)吸附 5 h后,先关闭瓦斯进气阀门,然后打空气阀门,利用流量计测试瓦斯速度,并记录解吸时间和速度,计算解吸气体积。

6)解吸完成后,继续通入瓦斯,在固定的孔隙压力和地应力下做渗流实验。

7)以上解吸和渗流实验均在未加空化声震的情况下进行的,待⑥步骤的渗流实验完成后,重复上面1)-4)步骤,并在解吸之前,开启高压水泵,调节合适的泵压和空化腔围压,做不同空化数、不同泵压和不同空化腔围压下的空化声震解吸实验。

8)待7)步骤空化声震下的解吸实验完成后,再做不同泵压和围压下的渗流实验。

实验假设:吸附 5 h后煤样即达到饱和状态,解吸至解吸速度低于 0.001 L/min时认为解吸结束,所得解吸量即为此状态下的煤体吸附量,实验室室温 $22\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温。

从实验设备和实验效果考虑,本文中所有的实验都选取轴压为 4 MPa,地应力围压为 2 MPa,瓦斯

压力(孔隙压力)为 0.5 MPa。

2.3 实验结果及分析

2.3.1 空化声震效应对煤层瓦斯解吸的影响

研究空化现象时,常采用无量纲参数空化数,来描述其空化状态和特性,其物理意义是:抑制空化产生的力与促使空化产生的力的比值。空化数 σ 是反映空化能力的强弱的物理量,其计算公式为: $\sigma = (p_0 - p_v) / (p_i - p_0)$,其中 p_i 与 p_0 分别空化腔进出口压力, p_v 为水的饱和蒸气压。

实验选择了在未加空化声震效应、最大空化系数 0.109 8(泵压 5 MPa,空化腔围压 0.5 MPa)、最小空化系数 0.003 8(泵压 25 MPa,空化腔围压 0.1 MPa)以及空化系数为 0.020 0(泵压 15 MPa,空化腔围压 0.3 MPa)的条件下进行试验,得到未加空化声震效应和不同空化系数条件下瓦斯解吸量、解吸速度与时间关系曲线(如图 4-5 所示)。

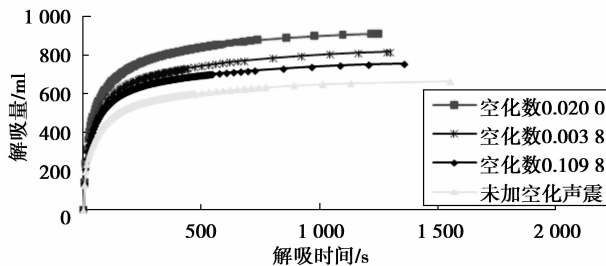


图 4 不同空化系数下解吸量与时间的关系曲线

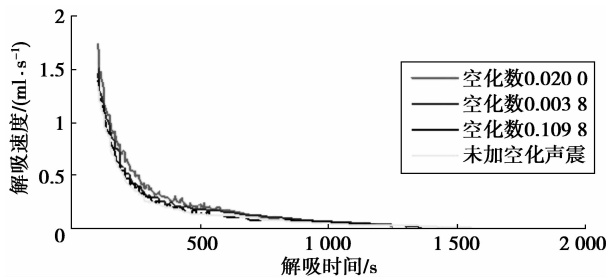


图 5 不同空化系数下解吸速度与时间的关系曲线

试验结果表明:1)空化声震的施加对解吸量和解吸速度均有提高,解吸时间均有缩短,但是没有改变解吸量与时间的关系规律,解吸量与时间的关系仍然符合经验公式: $Q(t) = \alpha_1 \beta_1 t / (1 + \beta_1 t)$,也没有改变解吸速度与时间的关系规律,解吸速度与时间的关系仍然满足负指数关系。

2)解吸量与空化系数呈线性关系,存在最佳空化系数使得解吸量达到最大,解吸时间达到最短。当空化系数为 0.020 0 时,解吸量达到最大,解吸量增加率为 36.9%;当空化系数为 0.020 0 时,解吸时间最短,解吸时间缩短率为 19.6%。

2.3.2 空化声震效应对煤层瓦斯渗流的影响

对同一试件在相同的地应力(轴压 4 MPa 和围

压 2 MPa)和瓦斯压力(0.5 MPa)等条件下,就未加空化声震和不同空化数、不同泵压、不同空化腔围压下加空化声震的瓦斯渗流实验。未加空化声震时瓦斯的渗流速度为 0.283 3 mL/s,每次实验读数均为调整了不同的泵压和围压后,待渗流速度保持稳定后的读数。试验得到这不同空化系数与渗流速度的关系以及泵压、空化腔围压与渗流速度的关系,如图 6-8 所示。

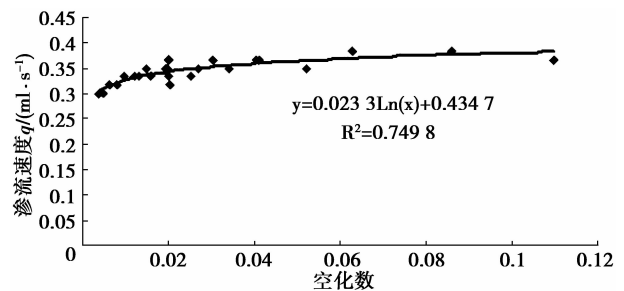


图 6 空化数与渗流速度的关系

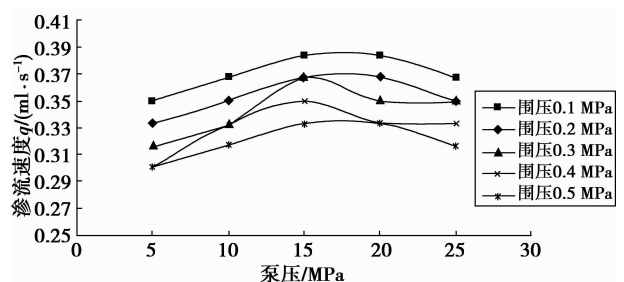


图 7 泵压与渗流速度的关系

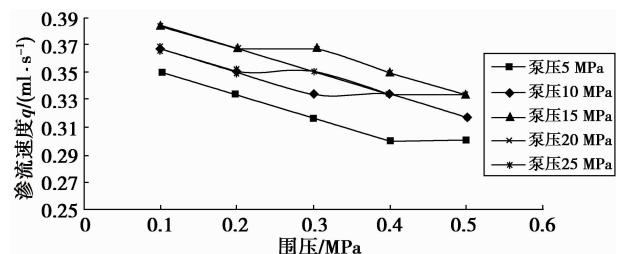


图 8 围压与渗流速度的关系

试验结果表明:1)空化声震的施加在不同程度上提高了煤样的渗透性,在未加空化声震时,渗流速度为 0.283 3 mL/s,加载空化声震后,在空化数为 0.062 6(泵压 15 MPa,空化腔围压 0.1 MPa)的情况下,渗流速度达到最大值 0.383 3 mL/s,提高率为 35.3%;在空化数为 0.003 8(泵压 5 MPa,空化腔围压 0.4 MPa)的情况下,渗流速度达到最小值 0.300 0 mL/s,提高率为 5.89%。

2)泵压与渗流速度呈二次多项式关系,存在最佳泵压使得渗流速度达到最大;围压与渗流速度呈线性递减关系,随着围压的增大,渗流速度减小。

3 结论

1)空泡溃灭所产生的空化声震和温度效应是促

进煤层瓦斯解吸渗流主要作用。

2)空化声震的施加对煤样瓦斯的解吸渗流均有一定的促进作用,与未加空化声震效应的煤样相比,当空化系数为0.0200(泵压15 MPa,空化腔围压0.3 MPa)时,解吸量达到最大,解吸时间最短,解吸量增加率为36.9%,解吸时间缩短率为19.6%;在空化数为0.0626(泵压15 MPa,空化腔围压0.1 MPa)的情况下,渗流速度达到最大值0.3833 mL/s,提高率为35.3%。

参考文献:

- [1] 袁亮. 松软低透煤层群瓦斯抽采理论与技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2004.
- [2] 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.
- [3] 于不凡. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2000.
- [4] 李晓红, 卢义玉, 赵瑜, 等. 高压脉冲水射流提高松软煤层透气性的研究[J]. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1386-1390.
LI XIAO-HONG, LU YI-YU, ZHAO YU, et al. Study on improving the permeability of soft coal seam with high pressure pulsed water jet[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(12): 1386-1390.
- [5] 林柏泉, 周世宁. 煤样瓦斯渗透率的实验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1987, 16(1): 21-28.
LIN BO-QUAN, ZHOU SHI-NING. Experimental investigation on the permeability of the coal samples containing methane[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1987, 16(1): 21-28.
- [6] 赵阳升, 胡耀青, 杨栋等. 三维应力下吸附作用对煤岩体气体渗流规律影响的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(6): 651-653.
ZHAO YANG-SHENG, HU YAO-QING, YANG DONG, et al. The experimental study on the gas seepage law of rock related to adsorption under 3-D stresses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(6): 651-653.
- [7] 梁冰. 温度对煤的瓦斯吸附性能影响的试验研究[J]. 黑龙江矿业学院学报, 2000, 10(1): 20-22.
LIANG BING. Research on temperature effects on the gas absorption performance[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 10(1): 20-22.
- [8] KROOSS B M, BERGEN F, GENSTERBLUM Y, et al. High-pressure methane and dioxide adsorption on dry and moisture-equilibrated pennsylvanian coals Geol[J]. International Journal of Coal Geology, 2002, 51: 69-92.
- [9] 易俊, 姜永东, 鲜学福. 应力场、温度场瓦斯渗流特性实验[J]. 中国矿业, 2007, 16(5): 113-116.
YI JUN, JIANG YONG-DONG, XIAN XUE-FU. An experimental research on the characters of methane seepage in stress field and temperature field[J]. China Mining Magazine, 2007, 16(5): 113-116.
- [10] 刘保县, 鲜学福, 王宏图, 等. 交变电场对煤瓦斯渗流特性的影响实验[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000, 23: 41-43.
LIU BAO-XIAN, XIAN XUE-FU, WANG HONG-TU, et al. Experimental investigation gas seepage characteristics in coal under alternating electric field[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000, 23: 41-43.
- [11] 何学球, 张力. 外加电磁场对瓦斯吸附解吸的影响规律及作用机理的研究[J]. 煤炭学报, 2000, 25(6): 614-618.
HE XUE-QIU, ZHANG LI. Study on influence and mechanism of gas adsorption and desorption in electromagnetic fields exerted[J]. Journal of China Coal Society, 2000, 25(6): 614-618.
- [12] 姜永东, 鲜学福, 易俊, 等. 声震法促进煤中甲烷气解吸规律的实验及机理[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 675-680.
JIANG YONG-DONG, XIAN XUE-FU, YI JUN, et al. Experimental and mechanical on the features of ultrasonic vibration stimulating the desorption of methane in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2008, 33(6): 675-680.
- [13] 吴玉林, 唐学林. 水利机械空化和固液两相流体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [14] GRAY I. Reservoir engineering in coal seams: part 1: The physical process of gas storage and movement in coal seams[J]. SPE Reservoir Engineering, 1987, 2: 28-34.
- [15] HARPALANI S, CHEN G. Effects of gas production on porosity and permeability of coal[C]// Symposium on coalbed methane research and development in Australia; Beamish, B. B. and Gamson P. D. (eds.): Townsville, Australia James Cook University of North Queensland, 1992: 67-79.
- [16] NEPPIRAS E A. Acoustic Cavitation [J]. Phys Rep, 1980, 61: 159-251.
- [17] 陈昌国, 鲜晓红, 张代钧, 等. 温度对煤和炭吸附甲烷的影响[J]. 煤炭转化, 1995, 18(3): 88-92.
CHEN CHANG-UO, XIAN XIAO-HONG, ZHANG DAI-JUN, et al. The dependence of temperature to the adsorption of methane on anthracite coal and its char[J]. Coal Conversion, 1995, 18(3): 88-92.
- [18] 程瑞端, 陈海焱, 鲜学福. 温度对煤样渗透系数影响的实验研究[J]. 煤炭工程师, 1998(1): 13-16.
CHEN RUI-DUAN, CHENG HAI-YAN, XIAN XUE-FU. Experiments on the Affection of Temperature on Permeability Coefficient of Coal Samples[J]. Coal Engineer, 1998(1): 13-16.