

DOI: 10.16285/j.rsm.2016.0081

# 卸压区不同钻孔长度抽采条件下 瓦斯运移特性试验

许 江<sup>1,2</sup>, 苏小鹏<sup>1,2</sup>, 彭守建<sup>1,2</sup>, 刘义鑫<sup>1,2</sup>, 冯 丹<sup>1,2</sup>, 刘龙荣<sup>1,2</sup>

(1. 重庆大学 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 复杂煤层瓦斯抽采国家地方联合工程实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 研究抽采过程中瓦斯运移特性有助于了解抽采气体来源、不同位置对抽采效果的贡献及抽采降压规律, 为合理确定抽采时间、设计抽采位置和钻孔长度等提供依据。利用自主研发的多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统, 开展了卸压区不同钻孔长度条件下瓦斯抽采的物理模拟试验, 分析了抽采过程中煤层瓦斯运移相对速度和方向特征。研究结果表明: 抽采前期和钻孔周围区域分别是抽采量主要贡献时期和区域, 瓦斯压力梯度大, 流动快。卸压区瓦斯流动相对速度最快, 应力集中区使得瓦斯相对流动速度衰减加速, 且对原始区的瓦斯流动形成一道屏障, 使其相对流动速度趋于 0。随着抽采时间的增加, 瓦斯相对流动速度逐渐衰减, 对于瓦斯运移方向而言, 抽采一旦开始便在煤层中形成了较为固定的运移通道, 但在抽采后期和钻孔深部区域, 由于瓦斯压力梯度小, 流动缓慢, 运移方向的不稳定性增强。而随着钻孔长度增加, 卸压区内瓦斯相对流动速度表现出增大的趋势, 因此, 适当增大卸压区钻孔长度将有利于现场瓦斯开采。

**关 键 词:** 瓦斯抽采; 物理模拟; 瓦斯相对流动速度; 偏离角; 抽采时间; 钻孔长度

中图分类号: TD 325

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2018) 01—0103—10

## Test on gas migration characteristics during coal bed methane exploitation under different lengths of drilling hole in distressed zone

XU Jiang<sup>1,2</sup>, SU Xiao-peng<sup>1,2</sup>, PENG Shou-jian<sup>1,2</sup>, LIU Yi-xin<sup>1,2</sup>, FENG Dan<sup>1,2</sup>, LIU Long-rong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State and Local Joint Engineering Laboratory of Methane Drainage in Complex Coal Gas Seam, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The research on gas migration law during coal bed methane (CBM) exploitation is beneficial to understand the source of gas, impact of coal seam position on gas production and the law of gas pressure decay, thus providing foundation for design of exploitation time and the position and length of drilling hole. Using the multi-field coupling testing system for CBM exploitation developed by the authors, physical simulation experiments of CBM exploitation under different lengths of drilling hole in distressed zone were carried out, and relative gas flow speed and direction were analyzed. The results show that the initial stage of exploitation is the main contribution period to gas production and the surrounding area of drilling hole is the main contribution area to gas production, because gas pressure gradient is high and thus gas flows fast. Gas flow has the highest speed at the distressed zone. Existence of concentrated stress zone makes the relative flow speed attenuate quickly, and also creates a barrier to original stress zone, leading relative gas flow speed to be zero. Relative gas flow speed decreases with time while the migration direction does not change much because relatively stable seepage channels are formed at the beginning of exploitation. Due to gas pressure drop that leads gas pressure gradient and relative gas flow speed to decrease, the uncertainty of migration direction rises. With the length of drilling hole growing, the relative gas flow speed increases in the distressed zone, so it is meaningful to moderately lengthen the drilling hole.

**Keywords:** CBM exploitation; physical simulation; relative gas flow speed; deviation angle; exploitation time; length of drilling hole

## 1 引 言

我国煤层气资源丰富, 埋深 2 000 m 以浅煤层

气地质资源量约  $3.6 \times 10^9 \text{ m}^3$ , 居世界第 3 位<sup>[1]</sup>。煤层气作为一种潜在的清洁能源, 其大规模的开发利用对于矿井瓦斯灾害治理、能源综合利用、环境污

收稿日期: 2016-01-10

基金项目: 国家科技重大专项项目(No. 2016ZX05044002); 国家自然科学基金(No. 51474040, No. 51434003)。

This work was supported by the National Science and Technology Major Project (2016ZX05044002) and the National Natural Science Foundation of China (51474040, 51434003).

第一作者简介: 许江, 男, 1960 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程方面的教学与研究工作。E-mail: jiangxu@cqu.edu.cn

染防治以及改善能源结构等都有着重要的意义。

为将煤层气安全高效地从煤层中开采出来,探讨煤层气产出的渗流运移规律尤为重要,因此,学者们开展了大量的研究工作,提出了煤层中煤层气双孔隙流动模型和煤层气产出的“解吸—扩散—渗流”流动模型<sup>[2-6]</sup>。在国内,学者们结合相似理论并采用物理模拟手段,研究了包括地应力<sup>[7-9]</sup>、瓦斯压力<sup>[10-12]</sup>、温度<sup>[13]</sup>、电场<sup>[14]</sup>、吸附气体<sup>[15]</sup>等因素影响条件下的瓦斯渗流规律。赵阳升等<sup>[7]</sup>利用自制的煤岩渗透试验台和三轴渗透仪得到了三维应力作用下煤岩体孔隙裂隙中瓦斯气体渗流规律;尹光志等<sup>[10-11]</sup>利用含瓦斯煤热流固耦合三轴伺服渗流试验装置,研究得到了不同卸围压速度和瓦斯压力对瓦斯渗流规律的影响,表明煤样的瓦斯渗透速度增加率随着瓦斯压力的增大而减小,最终趋近于一恒定值附近。易俊等<sup>[13]</sup>通过试验得出轴向压力对煤样渗透的影响比围压要小;温度增加,煤样的渗透率增加;渗透率与轴向有效应力、有效围压、平均有效应力成负指数关系;王宏图等<sup>[14]</sup>则采用三轴渗流试验装置和电场实施装置研究了电场作用对煤中瓦斯气体渗流性质的影响。这些结果大多为小试件假三轴状态下的瓦斯渗流规律,在一定程度上探明了抽采过程中瓦斯的运移变化规律,但存在考虑条件单一的缺点,不能完全反映实际煤层气开采过程中瓦斯运移规律。许江等<sup>[15]</sup>开展了真三维应力状态下不同吸附性气体抽采的物理模拟试验,探讨了煤层瓦斯抽采过程中煤储层气压、温度及煤层变形等的时间演化规律,进一步丰富了室内大型瓦斯抽采物模试验研究。

随着煤层开采往深部发展,瓦斯压力升高,面临高地应力这一客观不利因素,决定了我国的瓦斯抽采应以卸压抽采为主。文献[16—19]考察了被保护层、采空区、工作面等卸压区瓦斯抽采过程中抽采量、瓦斯浓度等参数的变化规律,但目前往往只能对抽采效果进行评价,无法得知抽采过程中储层内瓦斯的运移特性,对抽采中瓦斯运移机制的认识也还存在一定的局限性。基于此,本文利用多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统<sup>[20]</sup>,模拟了工作面前方卸压区的瓦斯抽采过程,分析了煤层瓦斯运移速度大小和方向特征以及抽采时间与钻孔长度对其的影响,为揭示煤层气开采过程中瓦斯运移机制提供有力的理论支撑。

## 2 试验方法

### 2.1 试验装置

图1为多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统

部分实物图。该系统主要包括主体承载支架、试件箱体、伺服加载系统、成型压力机、流量测试系统以及数据采集系统<sup>[20]</sup>。试件箱体的内部尺寸为1 050 mm×410 mm×410 mm,如图2所示。为了实现钻孔长度的变化,单一管开采系统设计成由护壁管和开采管组成。护壁管用于支撑所模拟钻孔或钻井壁以免其免于塌孔,其内、外径分别为28、33 mm,长度为985 mm。开采管设计为沿轴向设置有前端开口后端封闭的盲孔,透气区前后两端分别设置有密封凸缘。密封凸缘外径接近28 mm,护壁管上设置有与凸缘对应的密封区(无孔区域),密封凸缘与护壁管之间设置有O形密封圈进行密封,具体可参见文献[20]。开采管的有效开采长度设计有3种不同尺寸:45、90、180 mm,每完成一次试验便更换一次开采管,开采管有效开采长度的中点始终与卸压区中点对齐。

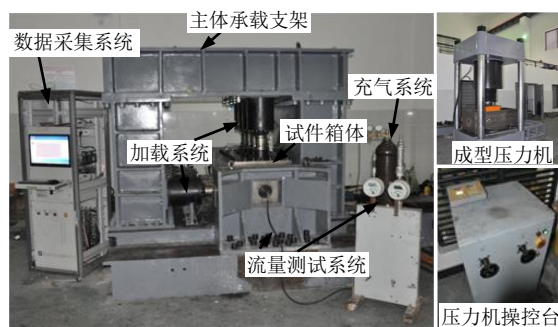


图1 多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统实物图

Fig.1 Multi-field coupling testing system for CBM exploitation

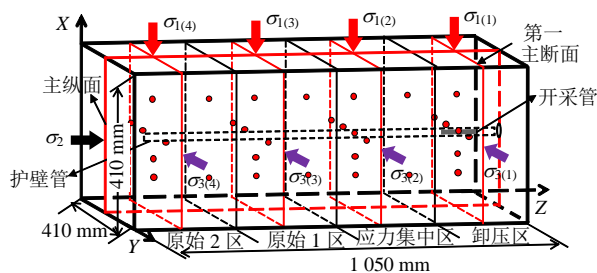


图2 箱体受力状态及传感器布置示意图

Fig.2 In-situ stress loading and schematic of sensor layout

### 2.2 试验方案

煤样取自重庆能投集团松藻煤电有限责任公司石壕煤矿K<sub>3</sub>煤层。矿区埋藏适中(300~800 m)。各开采煤层均有煤与瓦斯突出危险,均属高变质阶段无烟煤,富含瓦斯,总储量为2.27×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>,储量丰富,因此开展煤层气抽采具有现实意义<sup>[21-22]</sup>。本次模拟试验共设计3组,模拟卸压区不同钻孔长度

条件下的煤层瓦斯抽采情况。根据现场地应力实测经验公式<sup>[23]</sup>、设备参数及煤样参数，推导出试验中地应力的相似系数为 10.6，得到了煤层埋深为 700 m 条件下的现场应力水平及对应的试验应力水平，如表 1 所示，其中最大主应力中的  $\sigma_{1(1)}$ 、 $\sigma_{1(2)}$ 、 $\sigma_{1(3)}$  和  $\sigma_{1(4)}$  分别对应工作面前方的卸压区、应力集中区、原始 1 区和原始 2 区，各主应力方向如图 2 所示。表 1 中的气体压力为瓦斯吸附解吸平衡时的气体压力。为了研究抽采过程中煤层内瓦斯的运移规律，本次试验共布设气体压力传感器 34 个，其中

32 个布置于箱体内部，另外两个分别布置在箱体进、出气口端。箱体内传感器布置考虑了抽采钻孔轴向和径向上的参数变化情况，并且考虑了与模型地应力加载的相对位置。有关箱体纵面、层面、断面的划分以及传感器的编号见文献[20]。煤对  $\text{CO}_2$  的吸附性大于  $\text{CH}_4$ ，但充分吸附后，两种气体条件下煤样的渗透率-应变曲线变化趋势相近<sup>[24]</sup>，因此，用  $\text{CO}_2$  代替  $\text{CH}_4$ ，试验结果可以定性表征瓦斯的渗流运移特性；加之试验过程中室内排气量大，为避免甲烷所致的危险，试验所用气体为  $\text{CO}_2$ 。

表 1 试验方案  
Table1 Test scheme

卸压区钻孔长度 /mm	气体压力 /MPa	孔口压力	模拟埋深 /m	Table 1 Test scheme											
				应力水平											
				现场						试验					
				$\sigma_1$ /MPa				$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\sigma_1$ /MPa				$\sigma_2$	$\sigma_3$
$\sigma_{1(1)}$	$\sigma_{1(2)}$	$\sigma_{1(3)}$	$\sigma_{1(4)}$	/MPa	/MPa	$\sigma_{1(1)}$	$\sigma_{1(2)}$	$\sigma_{1(3)}$	$\sigma_{1(4)}$	/MPa	/MPa				
45, 90, 180	0.7	大气压	700	9.6	28.7	19.1	19.1	23.6	7.9	0.9	2.6	1.8	1.8	2.2	0.7

### 2.3 试验过程

(1) 前期准备 将取回的煤样破碎并筛分制得小于 0.85 mm 的全粒径煤粉，根据实测含水率，再加入适量的纯净水并搅拌均匀，使煤样含水率为 5%，将制备好的煤样分批次加入试件箱，使用成型压力机成型，每次成型加载稳定时间为 1.0 h，成型压力为 7.5 MPa。每成型完一层后，使用螺丝刀的楔形头端在煤层表面划动，使煤松散破碎，以避免层与层之间的分层现象。成型过程中根据参数采集设计，将各传感器植入型煤试件中，安装盖板密封试件箱，并连接传感器至电脑，连接流量计，将试件箱与瓦斯气源连接。部分试验步骤如图 3 所示。

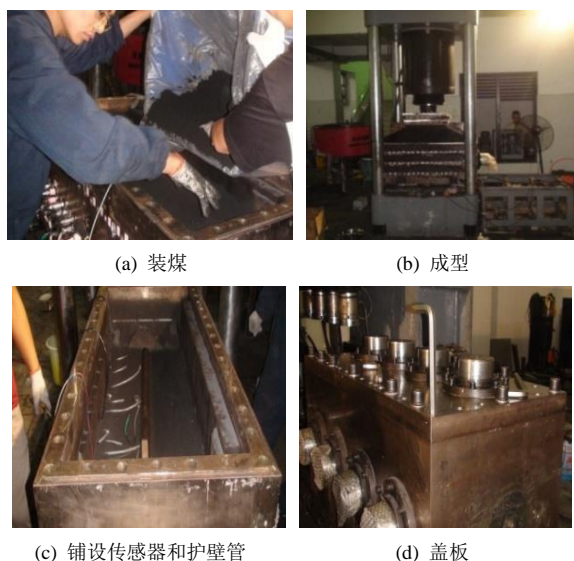


图 3 部分试验过程实物图

Fig.3 Parts of experimental procedures

(2) 抽真空与吸附瓦斯 关闭各阀门以密封箱体，启动数据采集系统及三向应力加载系统，对试件箱施加预定的应力水平；打开真空泵抽真空，使试件箱内的压力达到 0.1 kPa。打开气瓶充气，充气时间为 48 h；充气吸附过程以 1.5 h 为周期，周期性地打开充气阀充气，当第 1 次压力达到 0.7 MPa 时，保持瓦斯气瓶主阀打开 1 h，让煤体充分吸附瓦斯，然后关闭充气气阀和施加荷载的液压加载系统。从第 2 个周期开始的每个周期，箱体内瓦斯压力达到 0.7 MPa 时立即关闭气瓶主阀，依次循环，直至充气吸附 48 h<sup>[25]</sup>。

(3) 煤层气开采 打开出气口阀门，全程监测各参数变化及气体流量变化，试验过程中无气源补充，抽采负压为大气压。

(4) 试验结束 待试件箱体内瓦斯解吸完全后即停止三向加载，关闭数据采集系统，结束试验。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 抽采过程中瓦斯流场特性

瓦斯流场图可以反映不同位置瓦斯的流速和流向，进而了解抽采瓦斯的来源以及不同位置对抽采效果的贡献。将分析面（受篇幅所限，本文选取钻孔（开采管）长度  $L=45$  mm 条件下，与钻孔垂直的第一主断面和含钻孔的主纵面进行分析）内某一时刻所有传感器监测的瓦斯压力数据使用 Origin 软件里的 Kriging 插值法进行插值，由于传感器有效监测范围在 X、Y、Z 向上分别为 85~290、0~307、



133~919 mm (如图 4 和图 5 所示), 因此插值个数分别选取 205、307 和 786 个, 以使插值均匀。同时为了使图片便于分辨, 在主断面上选取了  $25 \times 21$  个数据, 主纵面上选取了  $50 \times 21$  个数据, 最后利用 Matlab 中 quiver 函数即可绘出该时刻瓦斯渗流场。所得结果如图 4 和图 5 所示。如图 4(a)所示, 抽采后  $t=1$  min 时刻瓦斯均向钻孔内流动, 且越靠近钻孔, 瓦斯流动箭头长度越长, 瓦斯流动越快; 瓦斯压力等值线更密, 说明瓦斯压力下降也越快。在  $X=205$  mm 层面上的瓦斯直接向钻孔运移, 而上、下侧瓦斯则绕过该区先向两侧散开, 后又逐渐合拢向钻孔运移, 这就说明  $X=205$  mm 层面是一个压密

区, 瓦斯运移较其他方向困难, 这与瓦斯压力等值线在此处发生内凹是一样的道理。图 4(b)、图 4(c)和图 4(d)分别表示 50、100、200 min 时刻的瓦斯流场图。对比可以得出: 抽采前 50 min 瓦斯压力下降迅速, 后期缓慢, 这是由于抽采瓦斯过程中, 当煤层中的某点瓦斯压力与抽采负压的压差超过渗流启动压力时, 瓦斯开始向钻孔流动, 游离瓦斯流走后, 吸附瓦斯解吸进行补充, 更远处的瓦斯也不断向该点扩散, 并且, 由于抽采初期压力梯度大, 瓦斯流动快, 压力迅速降低, 而随着解吸、扩散、渗流的不断进行, 压力梯度进一步降低, 相对流动速度减缓, 瓦斯压力下降减缓<sup>[25]</sup>。

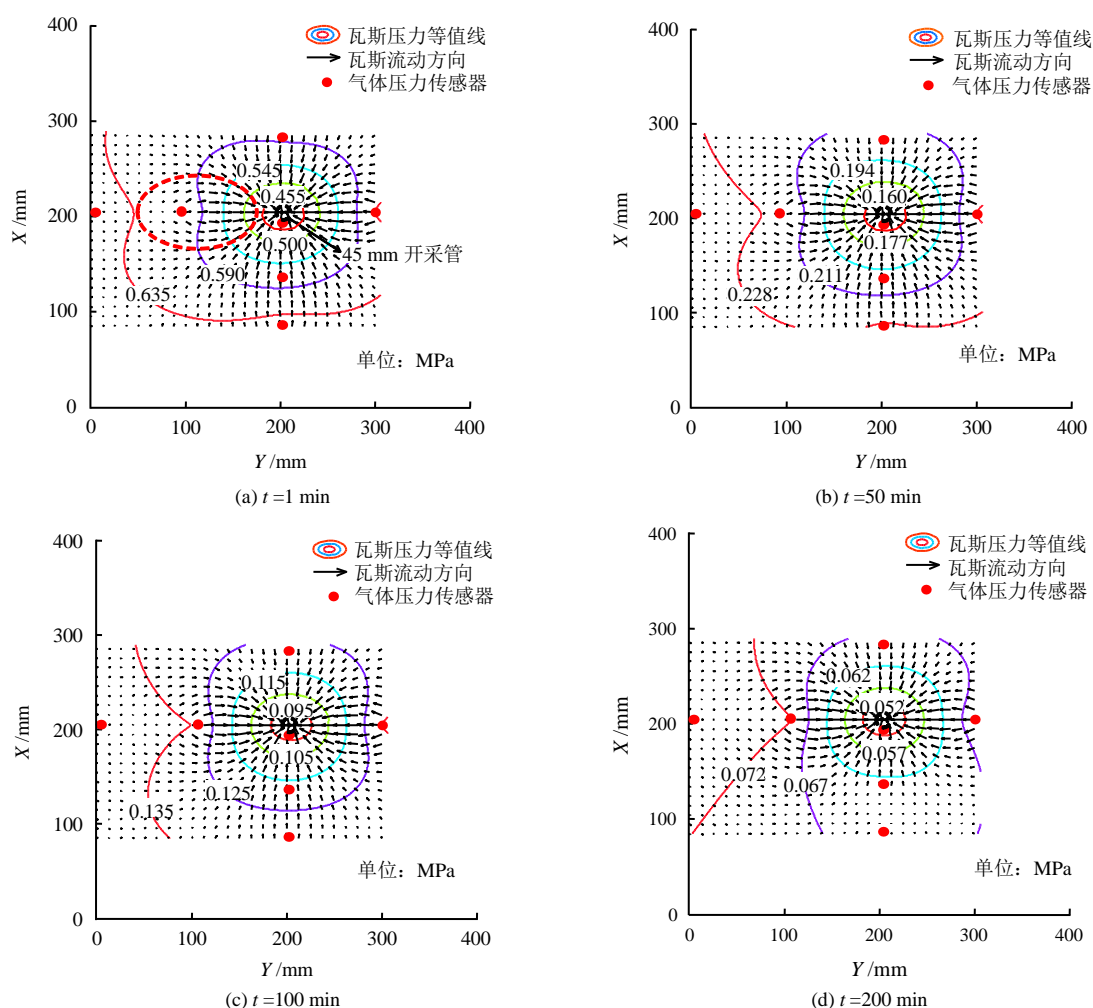


图 4  $L=45$  mm 第一主断面不同时刻瓦斯流场

Fig.4 Gas flow field chart of the first main cross-section surface when  $L=45$  mm

图 5 反映了瓦斯抽采过程中含钻孔的主纵面瓦斯流场在 1、50、100、200 min 时刻的演化规律。从图中可以看到, 当  $t=1$  min 时刻, 瓦斯运移表现出明显的位置特征。在卸压区和集中区内, 钻孔及其轴心线两侧的瓦斯流速, 流向及压力等值线基本对称。随着进一步向钻孔深部演化, 等值线发生变

形, 在与钻孔轴心线相交位置凹向钻孔, 原因是为实现不同钻孔长度的模拟试验, 开采管后端 (图中左端) 设计为封闭, 因此, 钻孔底部附近位置的瓦斯不能直接流向钻孔, 而是以钻孔轴心线为对称轴, 先向钻孔两侧瓦斯压力降低的位置运移, 再汇入钻孔, 进而排出箱体外部。而在远离钻孔的原始区中,

在对应的时刻,由于瓦斯压力梯度小,瓦斯流动缓慢,流动不稳定,从而瓦斯压力等值线不具有明显的对称性。

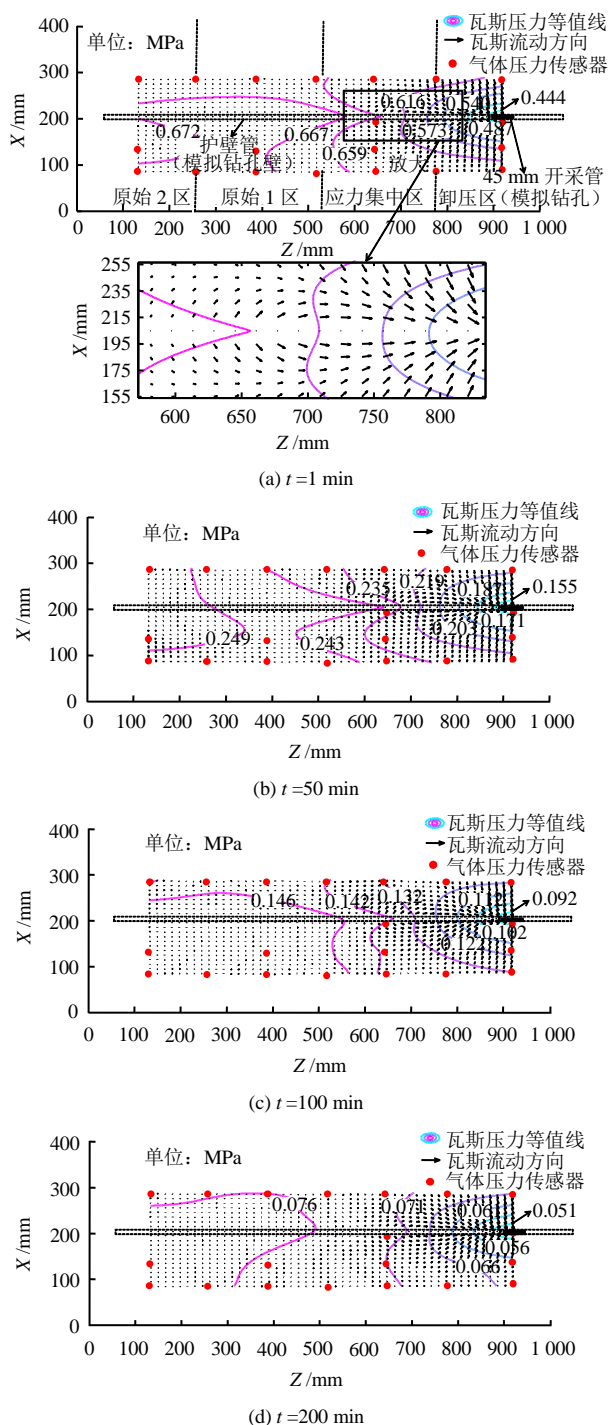


图5  $L=45$  mm 主纵面不同时刻瓦斯流场  
Fig.5 Gas flow field chart of the main longitudinal surface when  $L=45$  mm

### 3.2 瓦斯运移速度和偏离角的时空演化

为了进一步分析抽采过程中煤层内瓦斯运移的快慢和方向特性,以主纵面为对象绘制了矢量箭头个数为  $25 \times 11$  的瓦斯流场图,且考虑到远离钻孔

瓦斯压力梯度小、流速小的特点,选择了钻孔长度  $L=45$  mm 条件下沿钻孔轴向方向的  $X=185$  mm (I区),沿径向方向的  $Z=919$  mm (II区,钻孔轴向中点对应的径向方向),  $Z=788$  mm (III区)和  $Z=657$  mm (IV区,瓦斯流动方向转向的区域)进行分析,如图6所示。瓦斯流场矢量箭头包含两个要素:①箭头长度,即瓦斯相对流动速度大小(最大值为单位1);②箭头方向,由于受钻孔出口位置、钻孔长度、钻孔底部封闭及瓦斯流动起点与钻孔相对位置等因素的影响,导致瓦斯并非完全沿着到钻孔最短距离方向运移,而是存在一定的偏离角度。本文以瓦斯流动偏离角来描述瓦斯流动的方向特征,如图6放大区域所示。以坐标位置  $Z=820$  mm,  $X=185$  mm 处矢量箭头为例,进一步说明瓦斯相对流动速度和偏离角的计算方法。利用 Matlab 软件的 Select Data 工具可以获取矢量箭头在  $Z$  方向和  $X$  方向上的投影长度,在图示例子中,  $Z=18.5$  mm,  $X=10.7$  mm, 因此矢量箭头与水平方向夹角为  $\arctan(10.7/18.5) = 30.2^\circ$ , 而该坐标位置到钻孔最短距离方向与水平方向夹角  $\arctan(20.0/76.5) = 14.7^\circ$ , 因此,偏离角为  $30.2^\circ - 14.7^\circ = 15.5^\circ$ , 偏离角的范围为  $[0, 180]^\circ$ 。

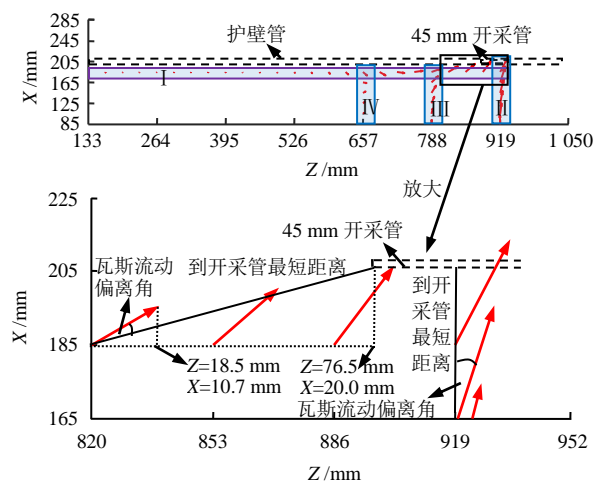


图6  $L=45$  mm,  $t=1$  min 时刻主纵面瓦斯运移特性分析图  
Fig.6 Analysis chart of gas migration characteristic on the main longitudinal surface when  $L=45$  mm and  $t=1$  min

#### 3.2.1 空间演化特性

图7反映了钻孔长度  $L=45$  mm 条件下  $t=1$  min 时刻沿钻孔轴向(图7(a)、7(b))和径向方向(图7(c)、7(d))瓦斯相对流动速度和偏离角。如图7(a)、7(b)所示,卸压区煤层渗透率大,瓦斯相对流动速度最快。应力集中区受地应力大,渗透特性减弱,瓦斯速度下降由慢变快。原始区则由于集中区的存在阻断了瓦斯的运移,因此,速度基本为0。在  $Z=919$  mm 位置处(钻孔轴向中点对应的位置),由于

受钻孔出气口端的影响, 瓦斯流动偏向出气口端。在  $787 \text{ mm} < Z < 919 \text{ mm}$  的卸压区, 随着瓦斯流动起点与钻孔之间的相对位置的变化, 偏离角存在一定的波动; 随着进一步远离钻孔 (由于  $Z < 395 \text{ mm}$  区域瓦斯相对流动速度基本为 0, 对抽采流量无贡献, 偏离角仅给出  $Z > 395 \text{ mm}$  区域), 瓦斯流动偏离角开始逐渐增大。由 3.1 节分析可知, 位于钻孔封闭端一定距离位置的瓦斯只有先向钻孔两侧瓦斯压力降低快的位置运移, 再逐步向钻孔运移, 最后才能汇入钻孔中排出煤层外部。

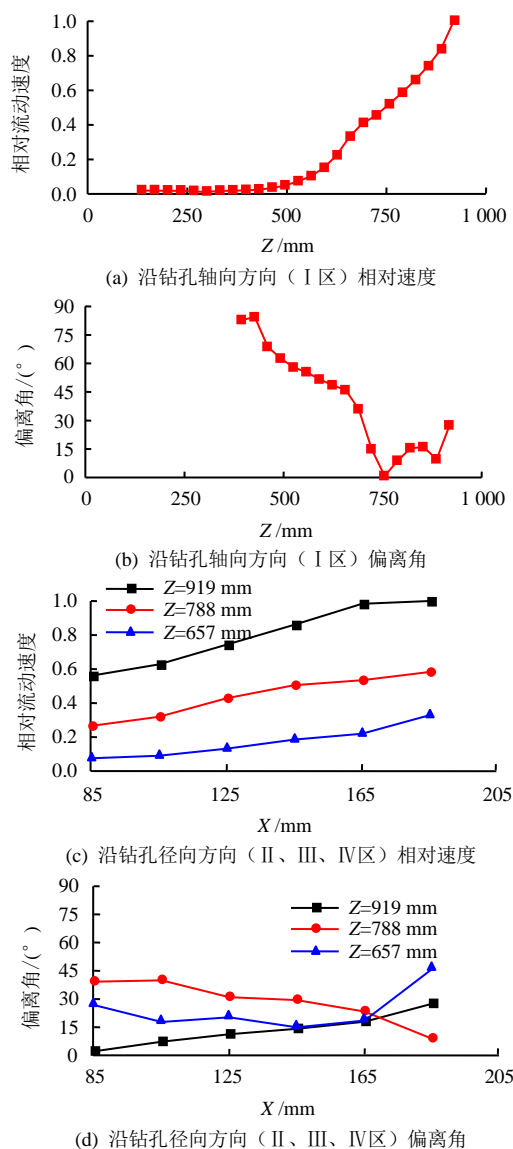


图 7  $L=45 \text{ mm}$ ,  $t=1 \text{ min}$  瓦斯相对流动速度和偏离角  
Fig.7 Relative gas flow speed and deviation angle when  $L=45 \text{ mm}$  and  $t=1 \text{ min}$

图 7(c)、(d)所示为沿钻孔径向方向瓦斯运移特性。随与钻孔最短距离的增加, 瓦斯相对流动速度表现出较强的位置特征, 其强弱依次为  $Z=919 \text{ mm} > Z=788 \text{ mm} > Z=657 \text{ mm}$ , 也可以得出, 对于  $Z > 657 \text{ mm}$  范围, 钻孔抽采影响半径大于  $120 \text{ mm}$  ( $205-85=$

$120 \text{ mm}$ )。对于瓦斯流动偏离角而言,  $Z=919 \text{ mm}$  径向上, 距离钻孔越远, 受钻孔出气口端的影响程度减小, 因此偏离角逐渐减小;  $Z=788 \text{ mm}$  径向上不同位置则由于瓦斯流动起点与钻孔的相对位置的变化而造成偏离角逐渐增大。对于  $Z=657 \text{ mm}$  的径向, 由于瓦斯需先向压力降低较快的钻孔两侧区域运移, 因此偏离角表现出先减小、后增加的趋势。

### 3.2.2 时间演化特性

由 3.1 节分析可知, 随着抽采时间的增长, 监测区域内瓦斯压力不断下降, 这必将导致不同位置点间的瓦斯压力梯度减小, 从而引起瓦斯相对流动速度减缓。从图 8(a)可以看到, 抽采时间越长, 相对流动速度越小, 在卸压区内最为明显。偏离角演化规律较为一致(图 8(b)), 但  $t=100 \text{ min}$  和  $t=200 \text{ min}$  时刻的瓦斯流动偏离角出现较大的波动, 原因是随着抽采的不断进行, 煤层内瓦斯压力大大降低, 压力梯度减小导致瓦斯相对流动速度缓慢, 因此瓦斯不能较为稳定的流动, 从而与  $t=1 \text{ min}$  和  $t=50 \text{ min}$  产生较大差异。

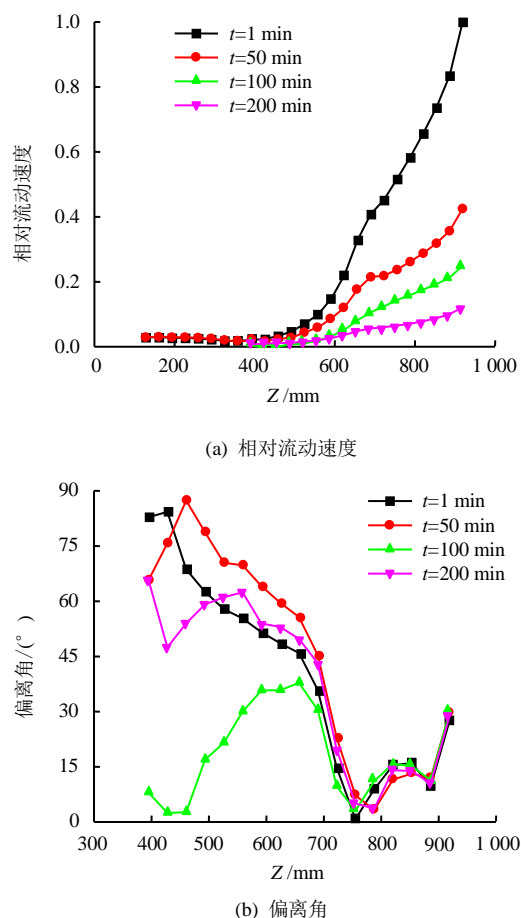


图 8  $L=45 \text{ mm}$  沿钻孔轴向瓦斯相对流动速度和偏离角的时间对比特性  
Fig.8 Time comparative characteristic of relative gas flow speed and deviation angle along the axial direction of drilling hole when  $L=45 \text{ mm}$

从图 9(a)可以看出,随着抽采时间增加,径向各分析区内瓦斯相对流动速度均减小,且减小的幅度越来越小,前 50 min 是速度减小的主要阶段。对于偏离角而言(图 9(b)),不同时刻条件下瓦斯运移的方向特征较为一致,说明煤层中形成了固定的瓦斯运移通道,但由于抽采时间的增长和与钻孔的距离增加,瓦斯相对流动速度逐渐变缓,偏离角也出现了波动,如 II 区中的  $t=200$  min 时刻,III 区中的  $t=100$  min 和  $t=200$  min 时刻,IV 区中的  $t=200$  min 时刻等。

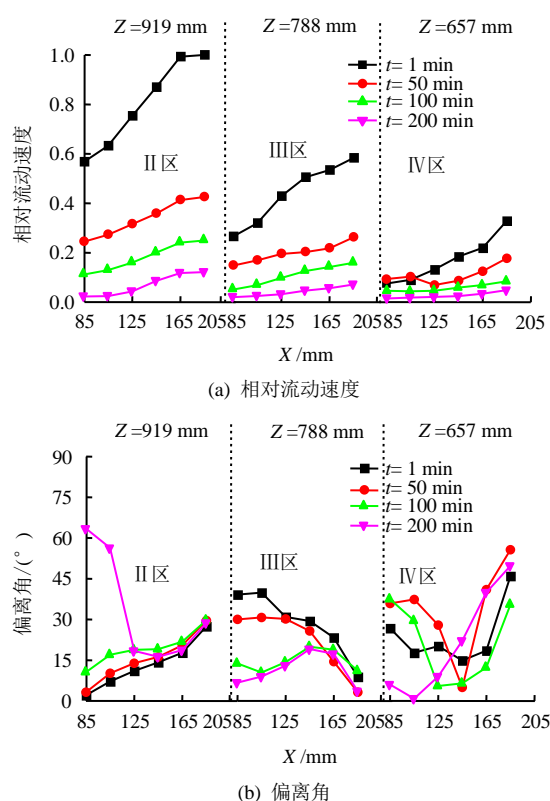


图9  $L=45$  mm 沿钻孔径向瓦斯相对流动速度和偏离角的时间对比特性

Fig.9 Time comparative characteristic of relative gas flow speed and deviation angle along the radial direction of drilling hole when  $L=45$  mm

### 3.3 钻孔长度对瓦斯运移规律的影响

对于瓦斯抽采钻孔来说,钻孔瓦斯流量主要表现在所有暴露孔壁瓦斯涌出量的累积,钻孔长度越长,单位时间内抽采的瓦斯就越多,那么煤层中钻孔抽采影响范围内的瓦斯相对流动速度大小和方向将发生相应变化。由图 10(a)可以看出,对于  $X=185$  mm 的轴向分析区(I区)内,在卸压区和集中区内( $Z>525$  mm),基本有钻孔长度越长,瓦斯相对流动速度越大。原始区( $Z<525$  mm)瓦斯相对流动速度则趋于 0。对于瓦斯流动偏离角,由于

钻孔长度不同,钻孔长度范围内分析的瓦斯流动起点个数不同(钻孔长度 45 mm 内 1 个,90 mm 内两个,180 mm 内 3 个),再加之瓦斯相对流动速度不同从而瓦斯压力下降不同,在  $Z>820$  mm 区域不同钻孔长度偏离角差异较大,在  $Z<820$  mm 区域偏离角演化规律基本一致。

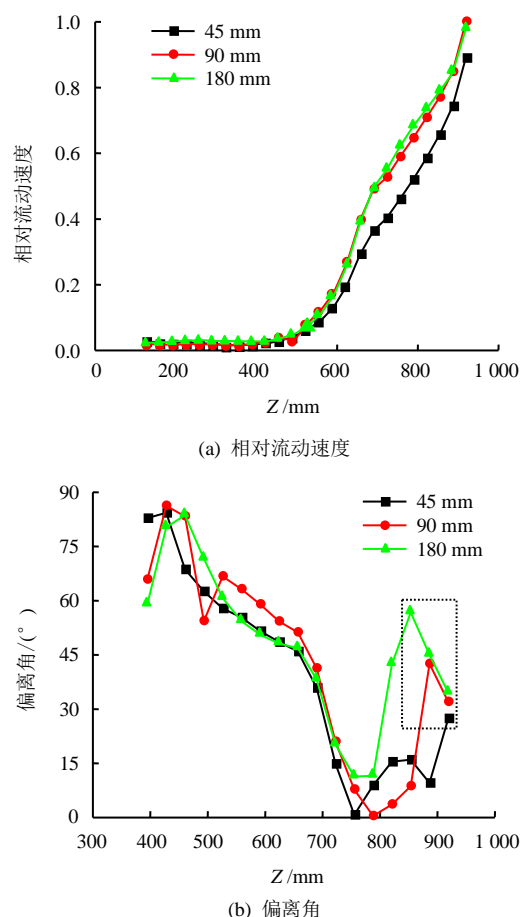


图10 不同钻孔长度下  $t=1$  min 沿钻孔轴向瓦斯速度和偏离角对比

Fig.10 Comparison of gas flow speed and deviation angle along the axial direction of drilling hole under different lengths of drilling hole when  $t=1$  min

由图 11(a)同样可以得出钻孔长度越长,对应径向分析区瓦斯流速越大。对于图 11(b)中偏离角的演化规律而言,位于钻孔长度范围内的 II 区( $Z=919$  mm),钻孔长度增加,单位时间内瓦斯压力下降越大,各位置受出气口端压力降影响程度越大,即偏离角越大。位于  $Z=788$  mm 的 III 区,则基本有钻孔长度越长,瓦斯偏离钻孔的程度越小,即偏离角越小。位于  $Z=657$  mm 的 IV 区,由于距离钻孔较远,从图 11(a)可以看到此时相对流动速度差异较小,且瓦斯流动较慢,所以偏离角随钻孔长度变化无明显规律。



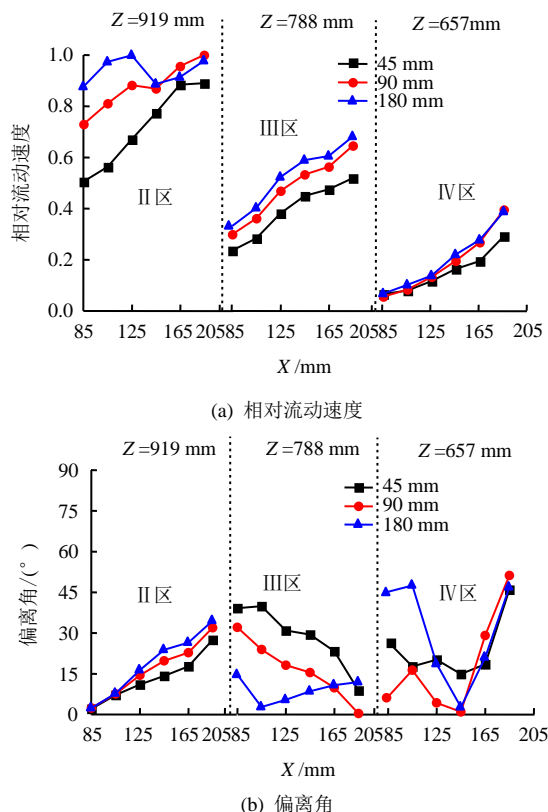


图 11 不同钻孔长度下  $t=1$  min 沿钻孔径向瓦斯流动速度和偏离角对比

Fig.11 Comparison of gas flow speed and deviation angle along the radial direction of drilling hole under different lengths of drilling hole when  $t=1$  min

## 4 结 论

(1) 基于抽采过程中的瓦斯流场, 分析了反映瓦斯运移特征的矢量箭头, 获得了瓦斯相对流动速度和运移方向的时空演化特性以及钻孔长度对其的影响。

(2) 钻孔周围区域由于钻孔对煤层的卸压作用, 瓦斯相对流动速度快, 压力梯度大, 形成抽采主要贡献区; 此外, 瓦斯流动还受所处应力区影响明显。卸压区瓦斯流动最快, 应力集中区使瓦斯相对流动速度衰减加速, 并对原始区的瓦斯流动形成一道屏障, 阻碍其流动。

(3) 抽采时间越长, 瓦斯流动速率越小; 钻孔长度越长, 瓦斯流动速率越大, 在钻孔附近的卸压区和集中区表现明显。而瓦斯运移方向则受以上两因素的影响小, 表明煤层中形成了较为固定的运移通道, 但由于抽采后期瓦斯压力梯度减小, 瓦斯流动缓慢, 远离钻孔的区域内瓦斯流动不稳定性增强。因此, 在工程实践中, 抽采前期将是抽采量的主要贡献时期, 长时间持续抽采可能会增加人员设备等的成本。此外, 卸压区抽采时适当增加钻孔长度是

一种较优化的布置方式。

## 参 考 文 献

- [1] 刘成林, 朱杰, 车长波, 等. 新一轮全国煤层气资源评价方法与结果[J]. 天然气工业, 2009, 29(11): 130—132. LIU Cheng-lin, ZHU Jie, CHE Chang-bo, et al. Methodologies and results of the latest assessment of coal-bed methane resources in China[J]. **Natural Gas Industry**, 2009, 29(11): 130—132.
- [2] AIFANTIS E C. On the problem of diffusion in solids[J]. **Acta Mechanica**, 1980, 37: 265—296.
- [3] BEKOS D E, AIFANTIS E C. On the theory of consolidation with double porosity-II[J]. **International Journal of Engineering Science**, 1986, 24: 1697—1716.
- [4] GRAY I. Reservoir engineering in coal seams: part 1-the physical process of gas storage and movement in coal seams[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 1987, 2(1): 28—34.
- [5] GRAY I. Reservoir engineering in coal seams: part 2-observations of gas movement in coal seams[J]. **SPE Reservoir Evaluation & Engineering**, 1987, 2(1): 35—40.
- [6] REEVES S, PEKOT L. Advanced reservoir modeling in desorption-controlled reservoirs[C]//Proceedings of the SPE Rocky Mountain Petroleum Technology Conference. Keystone: [s. n.], 2001.
- [7] 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 3D stresses[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(6): 651—653.
- [8] 李文鑫, 王刚, 杜文州, 等. 真三轴气固耦合煤体渗流试验系统的研制及应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2109—2118. LI Wen-xin, WANG Gang, DU Wen-zhou, et al. Development and application of a true triaxial gas-solid coupling testing system for coal seepage[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 2109—2118.
- [9] 王刚, 李文鑫, 杜文州, 等. 变轴压加载煤体变形破坏及瓦斯渗流试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 1): 175—182.



- WANG Gang, LI Wen-xin, DU Wen-zhou, et al. Experimental study of coal deformation and permeability characteristics of gas under variable axial compressive loadings[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Supp.1): 175—182.
- [10] 尹光志, 蒋长宝, 王维忠, 等. 不同卸围压速度对含瓦斯煤岩力学和瓦斯渗流特性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(1): 68—77.
- YIN Guang-zhi, JIANG Chang-bao, WANG Wei-zhong, et al. Experimental study of influence of confining pressure unloading speed on mechanical properties and gas permeability of containing-gas coal rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2011, 30(1): 68—77.
- [11] 尹光志, 李小双, 赵洪宝, 等. 瓦斯压力对突出煤瓦斯渗流影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 697—702.
- YIN Guang-zhi, LI Xiao-shuang, ZHAO Hong-bao, et al. Experimental study of effect of gas pressure on gas seepage of outburst coal[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(4): 697—702.
- [12] 康向涛, 黄滚, 宋真龙, 等. 三轴压缩下含瓦斯煤的能耗与渗流特性研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(3): 762—768.
- KANG Xiang-tao, HUANG Gun, SONG Zhen-long, et al. Research on characteristics of energy dissipation and seepage of coal containing gas under triaxial compression[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(3): 762—768.
- [13] 易俊, 姜永东, 鲜学福. 应力场、温度场瓦斯渗流特性实验研究[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.
- [14] 王宏图, 杜云贵, 鲜学福, 等. 地电场对煤中瓦斯渗流特性的影响[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000, (增刊 1): 22—24.
- WANG Hong-tu, DU Yun-gui, XIAN Xue-fu, et al. The influence of geo-electric field on gas seepage properties in coal[J]. **Journal of Chongqing University (Natural Science Edition)**, 2000, (Supp. 1): 22—24.
- [15] 许江, 刘龙荣, 彭守建, 等. 不同吸附性气体抽采过程中煤储层参数演化特征研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(6): 1647—1656.
- XU Jiang, LIU Long-rong, PENG Shou-jian, et al. Evolution characteristics of coal reservoir parameters in different adsorption gas extraction process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 38(6): 1647—1656.
- [16] 王海锋, 程远平, 吴冬梅, 等. 近距离上保护层开采工作面瓦斯涌出及瓦斯抽采参数优化[J]. 煤炭学报, 2010, 35(4): 590—594.
- WANG Hai-feng, CHENG Yuan-ping, WU Dong-mei, et al. Gas emission and parameter optimization of gas extraction in mining face of short distance protective seam[J]. **Journal of China Coal Society**, 2010, 35(4): 590—594.
- [17] 陈金华. 地面钻井抽采上覆远距离煤层卸压瓦斯的试验研究[J]. 矿业安全与环保, 2010, 37(2): 23—26.
- CHEN Jin-hua. Test study on pressure-relieved gas drainage and extraction from overlying coal seam by surface boreholes[J]. **Mining Safety & Environmental Protection**, 2010, 37(2): 23—26.
- [18] 袁亮, 郭华, 李平, 等. 大直径地面钻井采空区采动区瓦斯抽采理论与技术[J]. 煤炭学报, 2013, 38(1): 1—8.
- YUAN Liang, GUO Hua, LI Ping, et al. Theory and technology of goaf gas drainage with large diameter surface boreholes[J]. **Journal of China Coal Society**, 2013, 38(1): 1—8.
- [19] 付江伟, 傅雪海, 蒋玉玺. 单一低透气性煤层卸压带瓦斯抽采的基础研究[J]. 矿业安全与环保, 2012, 39(1): 4—7.
- FU Jiang-wei, FU Xue-hai, JIANG Yu-xi. Fundamental study on gas drainage and extraction from pressure-relieved zone of a single seam with low gas permeability[J]. **Mining Safety & Environmental Protection**, 2012, 39(1): 4—7.
- [20] 刘东, 许江, 尹光志, 等. 多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统的研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增刊 2): 3505—3514.
- LIU Dong, XU Jiang, YIN Guang-zhi, et al. Development and application of multi-field coupling test system for coal-bed methane (CBM) exploitation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Supp.2): 3505—3514.
- [21] 李日富, 李保东, 张军. 松藻矿区煤层气开发技术优选[J]. 煤矿安全, 2011, 42(4): 31—34.
- LI Ri-fu, LI Bao-dong, ZHANG Jun. The technology of coal-bed methane exploit in Songzao coal mine[J]. **Safety in Coal Mines**, 2011, 42(4): 31—34.