

不同气压条件下瓦斯抽采效果物理模拟试验研究

许江^{1,2}, 唐勖培^{1,2}, 张超林^{1,2}, 彭守建^{1,2}, 冯丹^{1,2}, 刘龙荣^{1,2}

(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:为研究煤层瓦斯抽采过程中气压演化特性以及不同初始气压对抽采的影响规律,利用自主研发的多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统,开展了不同气压条件下瓦斯抽采的物理模拟试验研究,结果表明:抽采过程中,气压随时间呈现前期下降较快而后期下降缓慢的特点,同时气压在垂直钻孔的方向上梯度较大,在平行钻孔的方向上气压梯度较小;通过绘制气压三维曲面图发现,断面气压曲面呈以抽采钻孔为中心轴的漏斗状分布,层面或纵面气压曲面呈“V”形分布;初始气压越高,抽采过程中气压绝对下降量越大、气压下降速率越快,但是抽采过程中气压相对下降率相差不大,且抽采结束时残余气体压力相近。研究结果可为现场瓦斯抽采提供指导。

关键词:瓦斯抽采; 瓦斯压力; 地应力; 残余气体压力

中图分类号: TD712

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2017)05-0115-06

Experiment study on physical simulation of gas drainage effect under the condition of different gas pressure

Xu Jiang^{1,2}, Tang Xupei^{1,2}, Zhang Chaolin^{1,2}, Peng Shoujian^{1,2}, Feng Dan^{1,2}, Liu Longrong^{1,2}

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

Abstract: In order to study the gas pressure evolution features during the seam gas drainage process and the different initial gas pressure affected to the gas drainage, a self developed physical simulation test system of the multi coupling coalbed methane mining was applied to the physical simulation test study on the gas drainage under the different gas pressure. The results showed that, during the gas drainage process, the gas pressure would be quickly decreased with the time passed in the initial period and would be decreased slowly at the late period. Meanwhile, the gas pressure gradient would be high in the vertical borehole and the gas pressure gradient in the parallel direction drilling would be low. The 3D surface map prepared showed that the cross section gas pressure curve surface would be a funnel-shaped distribution with the gas drainage borehole as the central axis and the level and longitudinal gas pressure curve surface would be in a V shape distribution. The higher the initial gas pressure is, the higher absolute reduction would be during the gas drainage process, the decreased speed of the gas pressure would be faster. But during the gas drainage process, the relative decreasing rate of the gas pressure would not be high and the residual gas pressure would be closed when the gas drainage was ended. The results can provide guidance for the site gas drainage.

Key words: gas drainage; gas pressure; ground stress; residual gas pressure

0 引言

煤层气俗称瓦斯,是赋存于煤层及其邻近岩层中的一种自生自储式天然气^[1]。煤层瓦斯既是煤矿瓦斯灾害的罪魁祸首,又是非常好的一种清洁能源。因此煤层瓦斯抽采不但能及时预防煤矿瓦斯灾

害,还能变害为利,缓解我国能源危机^[2]。瓦斯抽采正是基于瓦斯抽放技术而形成的新的处理矿井瓦斯的方法,所以,瓦斯的安全抽采对于能源的有效利用以及矿井瓦斯灾害治理起着极其重要的作用^[3]。

在我国西南地区,煤层透气性和瓦斯渗透率极低,导致瓦斯抽采半径较小,钻孔密度大、施工工期

收稿日期: 2016-11-17; 责任编辑: 王晓珍 DOI: 10.13199/j.cnki.est.2017.05.020

基金项目: 国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044002); 国家自然科学基金资助项目(51474040, 51304255, 51434003)

作者简介: 许江(1960—),男,湖南永兴人,教授,博士生导师,博士。E-mail: jiangxu@cqu.edu.cn

引用格式: 许江,唐勖培,张超林,等.不同气压条件下瓦斯抽采效果物理模拟试验研究[J].煤炭科学技术,2017,45(5):115-120,186.

Xu Jiang, Tang Xupei, Zhang Chaolin, et al. Experiment study on physical simulation of gas drainage effect under the condition of different gas pressure[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(5): 115-120, 186.

长,严重影响瓦斯抽采效果^[4]。为此,很多学者对瓦斯抽采进行了一系列的研究,如傅学海等^[5]通过煤层气排采过程中的传播特性,估算了煤层气单井排采范围内的重力水量、水溶气和游离气量;杨其奎^[6]和邵军等^[7]的试验验证了 E. M. Airey 建立的瓦斯吸附解吸数学模型的正确性;秦跃平等^[8]则根据煤粒瓦斯解吸放散的特点,基于达西定律,建立了圆柱形煤粒瓦斯放散微分方程;马东民等^[9]研究了煤层瓦斯解吸的温度效应,分析认为提高储层温度能促进解吸过程;赵东等^[10-11]研究了高压注水对煤体瓦斯解吸特性的影响机制,发现随着注水压力的增加,最终解吸率逐渐呈非线性的规律衰减,在注水压力达到一定极值后解吸率会保持稳定;张朝鹏等^[12]对不同瓦斯压力原煤全应力应变过程中的渗透特性进行了相关研究;张村等^[13]运用 FLAC^{3D} 内嵌的 FISH 语言对渗流模式进行二次开发,并进行了卸压开采地面钻井抽采的数值模拟研究;魏建平等^[14]基于裂隙平板模型,理论推导了瓦斯解吸、扩散及渗流过程中煤体渗透率的变化关系;王登科等^[2]基于 Kozeny-Carman 方程,建立了考虑有效应力变化、瓦斯解吸和煤基质收缩效应的煤层渗透率动态变化模型,并结合数值模拟分析了煤层瓦斯抽采过程中煤体透气性动态演化规律。

综上,目前关于瓦斯抽采的研究多集中在小尺度条件下的物理模拟试验研究或者借助计算机软件进行数值模拟分析,无论是瓦斯的赋存状态、煤层的受力情况,还是试件尺度等条件都较难以还原现场真实情况。而有关大型真三轴条件下瓦斯抽采的相关研究中,文献[15-16]对不同地应力及不同钻孔位置条件下瓦斯抽采过程中的气压变化进行了分析;文献[17]探讨了瓦斯抽采过程中煤岩的变形规律;文献[18]则重点研究了抽采过程中煤层温度演化规律。但是对于不同气压条件下瓦斯抽采过程中气压时空演化及三维空间分布等规律的研究还未开展,笔者在前人研究基础上,进一步优化试验条件,利用自主研发的多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统^[19],进行了不同气压条件下瓦斯抽采物理模拟试验研究。

1 试验方法

1.1 传感器布置

试验装置采用自主研发的多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统^[19],试件箱体有效尺寸为 1 050 mm×410 mm×410 mm,试验系统的进气气道通至箱

体底部,底部为透气钢板,可实现“面充气”。抽采钻孔外径为 33 mm,内径为 28 mm,长度为 985 mm。

图 1 为传感器布置示意,分别将垂直于 X 轴、Y 轴、Z 轴的平面定义为层面、纵面、断面。在箱体内部共布置 38 个气体压力传感器,其中第 1 断面($Z=919$ mm)、第 2 断面($Z=657$ mm)、第 3 断面($Z=395$ mm)、第 4 断面($Z=133$ mm)各布置了 9 个传感器,且位置相同,编号依次为 P2—P37,共计 36 个传感器,另外 2 个传感器坐标分别为 P1(205、102、1 025)和 P38(205、102、25),文中传感器测点坐标单位为 mm,为方便分析统一省略。文中不同测点气压分别用 $P_1—P_{38}$ 表示。

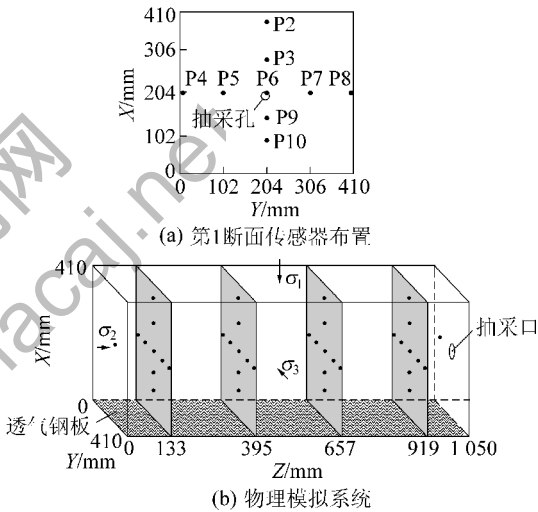


图 1 传感器布置示意

Fig. 1 Schematic of sensor layout

1.2 试件制备

由于试件尺寸较大,为方便布置传感器,试件采用煤粉压制而成的型煤,为了使型煤的物理力学性质更加接近原煤,在实验室进行了不同粒径配比、石膏含量、乳白胶含量、含水率等条件下煤样力学与渗透特性试验研究,综合得出最优型煤试件配比方案,见表 1。

表 1 试件配比方案

Table 1 Material proportioning program

项目	煤粉/mm				石膏	乳白胶
	0.425~0.250	0.250~0.180	0.180~0.150	>0.150		
质量分数/%	18.8	9.8	4.9	48.3	5.2	3.0
质量/kg	49.2	25.7	12.8	126.2	13.7	7.9

试验煤样取自重庆松藻煤矿 K3 煤层,按表 1 中各成分质量配比混合倒入 JQ350 型搅拌机中进行搅拌,每次搅拌 30 min,分 4 次成型,成型压力 7.5

MPa,每层保压时间1 h。

1.3 试验方案及步骤

笔者共进行3次试验,初始气压分别为0.7、1.0、1.2 MPa,通过改变气体压力来模拟不同气压条件下瓦斯抽采试验,抽采模式为自然排放,即负压为大气压。其中最大主应力 σ_1 、中间主应力 σ_2 、最小主应力 σ_3 分别为2.2、1.8、0.7 MPa,加载方向如图1b所示,同时考虑安全问题,试验气体以二氧化碳代替甲烷。

试验步骤主要包括:材料准备、试件成型并布置传感器、密封箱体、连接传感器至数据采集系统、抽真空、充气吸附、瓦斯抽采等,详细步骤可参考文献[18]。

2 试验结果及分析

2.1 瓦斯抽采过程中气压时空演化特性

图2为第1次抽采过程中(气压 $P=0.7$ MPa)部分测点气压随时间 t 演化曲线,抽采开始为0时刻,此时 P_2 从0.7 MPa开始下降,抽采10 h后 P_2 下降至0.11 MPa左右,抽采20 h后试验结束,此时 P_2 下降至0.06 MPa左右,可见抽采过程中, P_2 在前期下降较快,后期下降缓慢,同时当气压下降至初始气压的1/2时,即0.35 MPa,抽采时间仅为1.7 h左右。表明在抽采过程中,随着煤层气压的不断下降,钻孔内外压差不断减小,导致煤层瓦斯的解吸、渗流速率逐渐减缓,气压下降越慢。

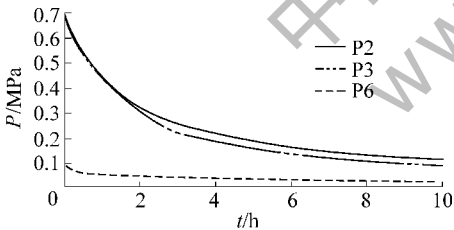


图2 第1次抽采过程中气压随时间的变化
Fig. 2 Gas pressure change with time during the first drainage process

P_2 (385, 205, 919)、 P_3 (290, 205, 919)、 P_6 (205, 205, 919) 3个测点位于同一断面内,且至钻孔

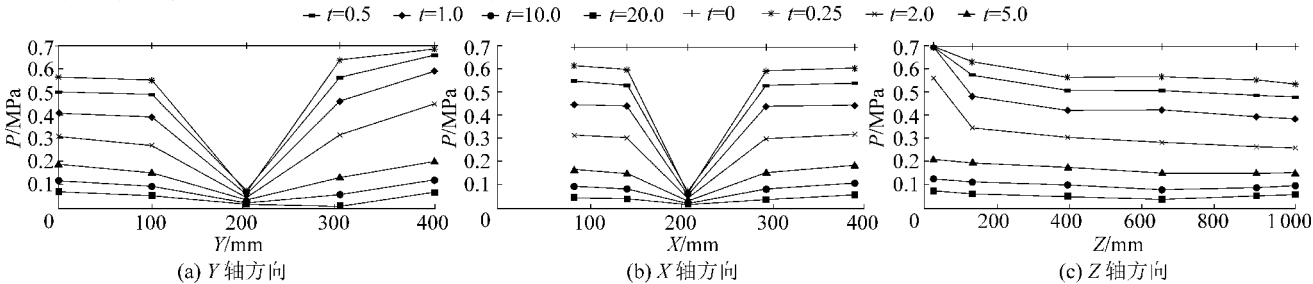


图3 第1次抽采过程中气压随距离的变化

Fig. 3 Gas pressure change with distance during the first drainage process

的距离依次减小,分别为180、85、0 mm,可见随着至钻孔距离的减小,气压下降速率逐渐增加。其中 P_2 、 P_3 测点气压下降趋势类似,而 P_6 测点在抽采瞬间下降到0.1 MPa左右,随后平缓下降,这是由于 P_6 测点位于钻孔表面,当打开抽采孔时,钻孔与大气相通,钻孔内部气压立即下降,而没有下降为0 MPa的原因是此时煤层内部吸附瓦斯开始解吸,并不断渗流到钻孔内,使钻孔内气压保持在一个相对稳定的状态,随着抽采的持续进行,渗流到钻孔内的瓦斯流量不断减小,因此气压也逐渐降低。

图3为抽采过程中气压随距离的变化曲线,图3a选取了 P_4 (205, 0, 919)、 P_5 (205, 102, 919)、 P_6 (205, 205, 919)、 P_7 (205, 307, 919)、 P_8 (290, 410, 919)等5个测点,5个测点的 X 、 Z 值均不变, Y 值依次增加,其中在 $100\text{ mm}<Y<300\text{ mm}$ 区间内,气压下降幅度较大,而在 $0<Y<100\text{ mm}$ 和 $300\text{ mm}<Y<400\text{ mm}$ 区间内气压下降幅度较小,由于抽采钻孔位于 $Y=200\text{ mm}$ 平面内,可知靠近钻孔区域气压下降速度大于远离钻孔区域气压,即在同一时刻不同位置抽采钻孔的抽采能力不同,距钻孔越远气压下降越缓慢。另外随着抽采时间的增加,钻孔两侧气压也迅速下降,当抽采5 h后,两侧气压约下降至0.2 MPa,说明随着抽采时间的增加,钻孔的抽采范围也逐渐加大。图3b选取了 P_2 (385, 205, 919)、 P_3 (290, 205, 919)、 P_6 (205, 205, 919)、 P_9 (140, 205, 919)、 P_{10} (85, 205, 919)等5个测点,随着 X 值的变化,其曲线演化规律和图3a相近。图3c选取了 P_1 (205, 102, 1025)、 P_5 (205, 102, 919)、 P_{14} (205, 102, 657)、 P_{23} (205, 102, 395)、 P_{32} (205, 102, 133)、 P_{38} (205, 102, 25)等6个测点,其 X 值、 Y 值均不变, Z 值依次增加,其中抽采钻孔位于 $65\text{ mm}<Z<1\,050\text{ mm}$ 区间内,和箱体相交于(205, 205, 1 050)处。可见,不同时刻 Z 轴方向上气压变化曲线比较平稳,基本保持同一水平,只在抽采前期 $0<Z<100\text{ mm}$ 时气压下降比较缓慢,应该是受抽采钻孔长度影响。

综上,气压在垂直钻孔的方向上梯度较大,且距钻孔越近气压下降越明显,而在平行钻孔的方向上气压梯度较小,气压下降速率基本一致。

2.2 瓦斯抽采过程中气压三维空间分布

为了更加直观描述瓦斯抽采过程中气压的三维空间分布,借助专业数据处理及绘图软件 ORIGIN 对数据进行处理并绘制曲面图,绘制方法如下:新建 Worksheet,将某一时刻某一断面(层面或纵面)上的气压导入,并输入各测点坐标值,选择 Convert to Matrix,即转换矩阵,插值方式选择 Kriging Correla-

tion,即克里金插值法。生成矩阵后点击 Plot,选择 3D Surface 下的 Color Map Surface,最后对图片进行调整即可。图 4a、图 4b 分别绘制了抽采 0.2、5.0 h 时 $Z=919\text{ mm}$ 断面的气压曲面图,图中 X 轴、 Y 轴表示测点在断面内的 (X,Y) 坐标值, Z 轴表示气压值。需要注意,由于采用内插法, X 轴范围为 $85\text{ mm}<X<385\text{ mm}$, Y 轴范围为 $0\text{ mm}<Y<410\text{ mm}$,即气压曲面图的投影是一个矩形。同样图 4c—图 4f 分别绘制了抽采 0.2、5.0 h 时 $X=205\text{ mm}$ 层面、 $Y=205\text{ mm}$ 纵面气压曲面图。

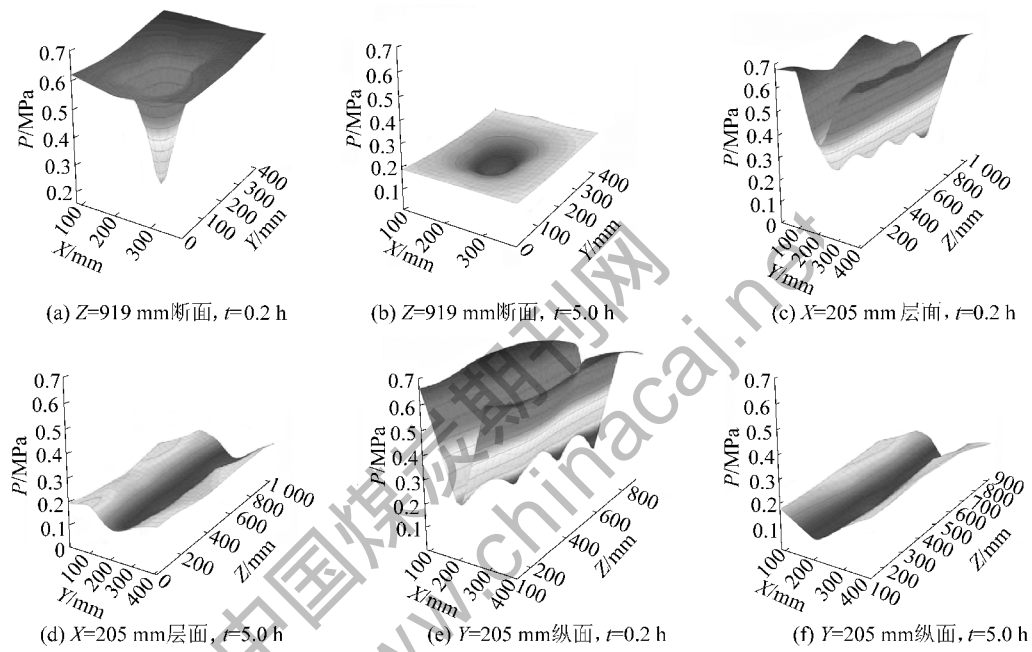


图4 第1次抽采过程中不同抽采时间下的气压曲面
Fig. 4 Surface figure of the first drainage process under different drainage time

由图 4a 可知,抽采 0.2 h,断面气压曲面图呈漏斗状分布,漏斗最下端在底部的投影点近似为 (205,205),即钻孔与断面的交点,说明气压曲面近似以钻孔为轴呈对称分布。由曲面颜色可知,从下至上,气压逐渐增大,曲面开始向外扩展,同时气压等压线也随之向外扩展,说明距钻孔距离越远,气压越大,此时钻孔的影响范围较小,对远距离煤层的抽采效果较弱。当抽采 5.0 h 后,气压曲面依然呈漏斗状分布,漏斗高度减小,此时整个区域气压已下降至 0.2 MPa 以下,钻孔的影响范围已达到整个断面。由图 4c 可知,抽采 0.2 h 时,层面内气压曲面近似呈现“V”形分布,谷峰位于两侧,气压较高,谷底位于中部,气压较低。在谷底有 4 个突出的区域,是因为抽采钻孔与图 1b 中 4 个断面相交处有 80 mm 段的不透气区域,是为了实现分段抽采而设计的^[23]。

至抽采 5.0 h 时,“V”形曲面的夹角明显增大,两侧谷峰气压下降至 0.2 MPa 左右,而中部谷底气压下降至 0.1 MPa 左右,此时谷峰与谷底气压接近,可推测,随着抽采的进一步进行,气压曲面将会接近平面分布。图 4e、4f 为 $Y=205\text{ mm}$ 纵面气压曲面图,其演化规律和 $X=205\text{ mm}$ 层面气压曲面图类似,不再赘述。综上,在瓦斯抽采过程中,垂直钻孔的断面气压曲面呈以钻孔为中心轴的漏斗状分布,而平行钻孔的层面或纵面气压曲面呈“V”形分布,同时随着抽采的进行,漏斗内外压差以及“V”形谷峰、谷底压差都在不断减小,钻孔的抽采影响区域不断扩大。

2.3 不同初始气压对瓦斯抽采过程中气压的影响

以 P3、P9 测点为例分析不同初始气压抽采过程中气压演化曲线,如图 5a、5b 所示,抽采开始后 3

条气压曲线分别从 0.7、1.0、1.2 MPa 开始下降,都表现为前期下降快后期下降慢的特点,在抽采约 5 h 后 3 条曲线逐渐接近,抽采 20 h 时刻,3 条曲线基本

重合,说明不同气压条件下抽采结束时残余气压相同。为了进一步定量分析,本文定义气压绝对下降量和气压相对下降率 2 个参数。

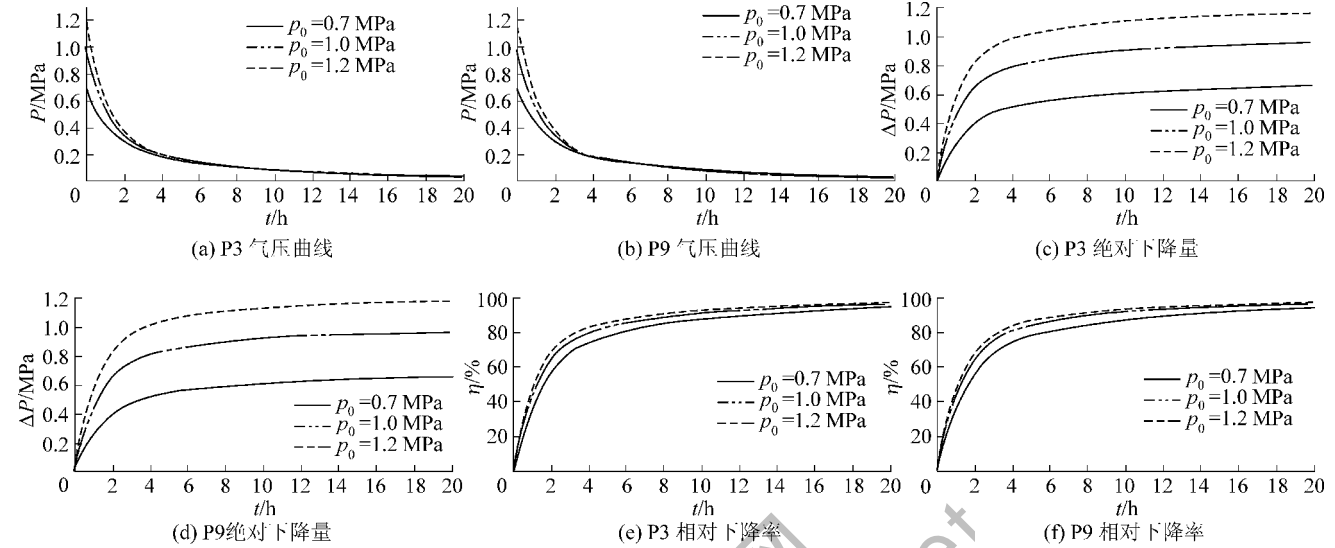


图5 不同初始气压下 P3、P9 测点气压曲线

Fig. 5 Gas pressure curves of P3 and P9 with different initial gas pressures

定义气压绝对下降量 ΔP 为初始气压与某时刻残余气压之差,即:

$$\Delta P = p_0 - P_t \quad (1)$$

式中: p_0 为初始气压,3 次试验分别为 0.7、1.0、1.2 MPa; P_t 为抽采 t 时煤层某测点残余气压,MPa。

定义气压相对下降率 η 为气压绝对下降量与初始气压比值,即:

$$\eta = \frac{\Delta P}{p_0} \times 100\% \quad (2)$$

将气压数据代入式(1)、式(2),即可绘制不同测点的气压绝对下降量和相对下降率曲线,如图 5c—5f 所示,以 P3 测点为例进行分析,不同初始气压条件下气压绝对下降量在前期迅速增加,且相差越来越明显,而抽采后期基本稳定,3 次试验结束后对应气压绝对下降量分别为 0.66、0.96、1.16 MPa,表明初始气压越高,同一测点气压绝对下降量越大,气压下降速率也越快。这是由于在抽采过程中,钻孔外部气压始终为大气压,而初始气压越高,钻孔内外气压差也越高,对应气压下降量会越大,下降速率越快。而由图 5e 可知,初始气压越高,气压相对下降率也越大,但是不同初始气压对应气压相对下降率差别较小,在抽采过程中相差最大不超过 10%,抽采结束时分别约为 94%、96%、97%。通过绘图并分析,箱体其他测点规律类似。综上可得,不同初

始气压对抽采过程中气压变化规律影响如下:初始气压越高,抽采过程中媒体气压绝对下降量越大,气压下降速率越快,但是抽采过程中气压相对下降率相差不大,且抽采结束时残余气压接近。

3 结 论

1) 抽采过程中,气压随时间呈现前期下降较快而后期下降缓慢的特点,同时气压在垂直钻孔的方向上梯度较大,且距钻孔越近气压下降越明显,而在平行钻孔的方向上气压梯度较小,气压下降速率基本一致。

2) 借助 ORIGIN 软件绘制抽采过程中气压三维曲面图,得到垂直钻孔的断面气压曲面呈以抽采钻孔为中心轴的漏斗状分布,而平行钻孔的层面或纵面气压曲面呈“V”形分布,随着抽采的进行漏斗内外压差以及“V”形谷峰、谷底压差都在不断减小。

3) 不同初始气压条件下瓦斯抽采,气压下降趋势相近,都表现为“先快后慢”。初始气压越高,气压绝对下降量越大,气压下降速率越快,但是抽采过程中气压相对下降率相差不大,且抽采结束时残余气压接近。

参考文献 (References):

[1] 郭大立,贡玉军,李曙光,等.煤层气排采工艺技术和展望

- [J].西南石油大学学报,自然科学版,2012,34(2):91-98.
- Guo Dali, Gong Yujun, Li Shuguang, *et al.* Research and prospect about the CBM drainage technology[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(2): 91-98.
- [2] 王登科, 彭明, 付启超, 等. 瓦斯抽采过程中的煤层透气性动态演化规律与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 35(4): 1-9.
- Wang Dengke, Peng Ming, Fu Qichao, *et al.* Evolution and numerical simulation of coal permeability during gas drainage in coal seams[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 35(4): 1-9.
- [3] 谢和平, 周宏伟, 薛东杰, 等. 我国煤与瓦斯共采: 理论、技术与工程[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1391-1397.
- Xie Heping, Zhou Hongwei, Xue Dongjie, *et al.* Theory, technology and engineering of simultaneous exploitation of coal and gas in China[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1391-1397.
- [4] 周声才, 李栋, 张凤舞, 等. 煤层瓦斯抽采爆破卸压的钻孔布置优化分析及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 807-813.
- Zhou Shengcai, Li Dong, Zhang Fengwu, *et al.* Optimization analysis of drilling layout based on blasting releasing pressure and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 807-813.
- [5] 傅学海, 秦勇, 韦重韬, 等. QNDN1井煤层气排采的流体效应分析[J]. 天然气工业, 2010(6): 48-51.
- Fu Xuehai, Qin Yong, Wei Chongtao, *et al.* Analysis of fluid effect of coalbed methane drainage in QNDN1[J]. Natural Gas Industry, 2010(6): 48-51.
- [6] 杨其銮, 王佑安. 煤屑瓦斯扩散理论及其应用[J]. 煤炭学报, 1986, 11(3): 87-94.
- Yang Qiluan, Wang Youan. Theory of methane diffusion from coal cuttings and its application[J]. Journal of China Coal Society, 1986(3): 87-94.
- [7] 邵军. 关于煤屑瓦斯解吸经验公式的探讨[J]. 煤炭工程师, 1989(3): 21-27.
- Shao Jun. Discussion on empirical formula of coal gas desorption[J]. Coal Engineer, 1989(3): 21-27.
- [8] 秦跃平, 王健. 基于有限体积法的煤粒瓦斯放散无因次分析[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 399-405.
- Qin Yueping, Wang Jian. Dimensionless analysis of gas emission in coal particles based on finite volume method[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 399-405.
- [9] 马东民, 张遂安, 蔺亚兵. 煤的等温吸附-解吸实验及其精确拟合[J]. 煤炭学报, 2011, 36(3): 477-480.
- Ma Dongmin, Zhang Suian, Lin Yabing. Isothermal adsorption and desorption experiment of coal and experimental results accuracy fitting[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(3): 477-480.
- [10] 赵东, 冯增朝, 赵阳升. 高压注水对煤体瓦斯解吸特性影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(3): 547-555.
- Zhao Dong, Feng Zengchao, Zhao Yangsheng. Experimental study of effects of high pressure water injection on desorption characteristic of coalbed methane(CBM)[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(3): 547-555.
- [11] 赵东, 赵阳升, 冯增朝. 结合孔隙结构分析注水对煤体瓦斯解吸的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(4): 686-692.
- Zhao Dong, Zhao Yangsheng, Feng Zengchao. Analysis of effect of water injection on methane desorption in coal combining pore structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(4): 686-692.
- [12] 张朝鹏, 高明忠, 张泽天, 等. 不同瓦斯压力原煤全应力应变过程中渗透特性研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 836-842.
- Zhang Zhaopeng, Gao Mingzhong, Zhang Zetian, *et al.* Research on permeability characteristics of raw coal in complete stress-strain process under different gas pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 836-842.
- [13] 张村, 屠世浩, 袁永, 等. 卸压开采地面钻井并抽采的数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S2): 392-400.
- Zhang Cun, Tu Shihao, Yuan Yong, *et al.* Numerical simulation of surface gasventhole extraction in pressure relief mining[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 392-400.
- [14] 魏建平, 秦恒洁, 王登科, 等. 含瓦斯煤渗透率动态演化模型[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1555-1561.
- Wei Jianping, Qin Hengjie, Wang Dengke, *et al.* Dynamic permeability model for coal containing gas[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1555-1561.
- [15] 彭守建, 张超林, 梁永庆, 等. 抽采瓦斯过程中煤层瓦斯压力演化规律的物理模拟试验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 571-578.
- Peng Shoujian, Zhang Chaolin, Liang Yongqing, *et al.* Physical simulation experiment on the evolution of gas pressure during CBM drainage[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 571-578.
- [16] 王维忠, 刘东, 许江, 等. 瓦斯抽采过程中钻孔位置对煤层参数演化影响的试验研究[J]. 煤炭学报, 2016, 41(2): 414-423.
- Wang Weizhong, Liu Dong, Xu Jiang, *et al.* Experimental study on the influence of drainage borehole position on dynamic parameters of coal seam in CBM recovery process[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 414-423.
- [17] 许江, 刘龙荣, 刘东, 等. 煤层瓦斯抽采过程中煤岩变形的物理模拟实验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(3): 562-570.
- Xu Jiang, Liu Longrong, Liu Dong, *et al.* Physical simulation of coal and rock deformation in the process of coal seam gas extraction[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(3): 562-570.
- [18] 彭守建, 张超林, 许江, 等. 抽采瓦斯过程中煤层温度演化规律的物理模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(7): 1325-1333.

- Yang Xinhui. Characteristics of CBM reservoir in Huangling - Longxian coalfield [J]. Coal Geology and Exploration, 2015, 43 (4): 41-45.
- [8] 刘会彬, 胡少博, 尹润生, 等. 鄂尔多斯盆地彬长矿区煤层气赋存特征[J]. 煤田地质与勘探, 2011, 39(4): 21-23.
- Liu Huibin, Hu Shaobo, Yin Runsheng, *et al.* Occurrence features of coalbed methane of Binchang mining area in Ordos basin [J]. Coal Geology and Exploration, 2011, 39(4): 21-23.
- [9] 薛 鸣, 许 敏. 焦坪矿区煤层气地面开发实践与思考[J]. 陕西煤炭, 2014, 32(4): 42-44.
- Xue Ming, Xu Min. CBM surface development practice and thinking [J]. Shaanxi Coal, 2014, 32(4): 42-44.
- [10] 茹 亭. 焦平区块煤层气水平井井型优化研究[D]. 西安: 西安石油大学, 2013.
- [11] 林柏泉, 李庆钊, 原德胜, 等. 彬长矿区低煤阶煤层气井的排采特征与井型优化[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 135-141.
- Lin Baiquan, Li Qingzhao, Yuan Desheng, *et al.* CBM production character and surface well selection in Binchang low rank coal field [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 135-141.
- [12] 杜玉娥. 煤的孔隙特征对煤层气解吸的影响[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
- [13] 蔺亚兵, 贾雪梅, 马东民, 等. 不同变质成因无烟煤孔隙特征及其对瓦斯突出的影响[J]. 煤炭工程, 2013(5): 99-102.
- Lin Yabing, Jia Xuemei, Ma Dongmin, *et al.* Study on the pore properties of different metamorphic causes anthracite body structure coals and the effects on gas outburst based [J]. Coal Engineering, 2013(5): 99-102.
- [14] 马东民, 张 辉, 王贵荣, 等. 胡家河井田煤层气等压吸附/解吸特征研究[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(4): 119-123.
- Ma Dongmin, Zhang Hui, Wang Guirong, *et al.* Study on isobaric adsorption/desorption features of coalbed methane in hujiahe coal field [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(4): 119-123.
- [15] 马东民, 李来新, 李小平, 等. 大佛寺井田4号煤 CH₄ 与 CO₂ 吸附解吸实验比较[J]. 煤炭学报, 2014, 39(9): 1938-1944.
- Ma Dongmin, Li Laixin, Li Xiaoping, *et al.* Contrastive experiment of adsorption-desorption between CH₄ and CO₂ in Coal Seam 4 of Dafosi Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(9): 1938-1944.
- [16] 段利江, 唐书恒, 刘洪林. 煤储层物性对甲烷解吸及采出的影响[J]. 西安科技大学学报, 2008, 28(4): 680-684.
- Duan Lijiang, Tang Shuheng, Liu Honglin. Impact of coal reservoir physical property on CBM desorption and production [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2008, 28(4): 680-684.
- [17] 郑德顺, 周 璐, 李明龙, 等. 煤层气储存富集主控因素简述[J]. 中州煤炭, 2013, 34(3): 23-26, 36.
- Zheng Deshun, Zhou Lu, Li Minglong, *et al.* A review on controlling factors of storage and enrichment CBM [J]. Zhongzhou Coal, 2013, 34(3): 23-26, 36.
- [18] 蔺亚兵, 贾雪梅, 马东民. 基于液氮吸附法对煤储层孔隙特征研究与应用[J]. 煤炭科学技术, 2016, 44(3): 135-140.
- Lin Yabing, Jia Xuemei, Ma Dongmin. Research and application of liquid nitrogen adsorption pore characteristics of coal [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 135-140.
- [19] 张 慧. 中国煤的扫描电子显微镜研究[M]. 西安: 地质出版社, 2003: 4-6.
- 试验系统研制与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 966-975.
- Liu Dong, Xu Jiang, Yin Guangzhi, *et al.* Development and application of multi-field coupling testing system for dynamic disaster in coal mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(5): 966-975.

(上接第120页)

Peng Shoujian, Zhang Chaolin, Xu Jiang, *et al.* Physical simulation experimental on the evolution of temperature during CBM drainage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1325-1333.

[19] 刘 东, 许 江, 尹光志, 等. 多场耦合煤矿动力灾害大型模拟