

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.06.010

不同地应力条件下平行钻孔 抽采瓦斯运移特性实验分析

彭守建, 贾立, 许江, 张超林, 郭世超

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

摘要:利用自主研发的“多场耦合煤层气开采物理模拟实验系统”,开展了不同地应力水平下平行钻孔瓦斯抽采的物理模拟实验,研究结果表明:1)平行钻孔瓦斯抽采中,抽采前期压降曲线斜率大,中、后期压降曲线斜率相对较小,并且相邻抽采管之间瓦斯解吸速率较边界抽采管快,任意时刻平行或垂直抽采管方向气压变化值均关于抽采管对称,离抽采管抽采段越近,瓦斯解吸速率越快,瓦斯解吸速率与距离抽采管连接段远近无关;2)瓦斯抽采中,随着地应力增加,瓦斯解吸速率减缓,压降漏斗收缩变小,瓦斯有效解吸面积变小,且地应力对消除突出危险区域出现时间影响差异不明显,但随着地应力增加,消突范围渐缩小;3)瓦斯抽采中,瞬时流量随时间演化可分为急速升高、快速衰减和极限抽采三个阶段,并且随着地应力增加,瞬时流量峰值减小,瞬时流量衰减速率减缓,瓦斯累积流量降低,累积流量增长速率减缓,抽采效率降低。

关键词:平行钻孔;地应力;物理模拟;抽采流量;瓦斯压力

中图分类号:TD712+.51

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2019)08-079-11

Experimental analysis on the characteristics of gas migration extracted by parallel boreholes under different stress conditions

PENG Shoujian, JIA Li, XU Jiang, ZHANG Chaoling, GUO Shichao

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

Abstract: With using the independently developed “multi-field coupling coalbed methane recovery physical simulation test system”, physical simulation tests by parallel borehole gas drainage under different stress levels are carried out. The results are as follows: 1) In parallel borehole gas extraction, the pressure drop curve slope in the early stage was large, while in the middle and late stage it was relatively small. The gas desorption rate between adjacent extraction pipes was faster than that of the boundary extraction pipe, and was parallel at any time. The change of pressure in the direction of vertical pumping pipe was symmetrical

收稿日期:2019-03-01

基金项目:国家科技重大专项资助项目(2016ZX05044);国家自然科学基金重点资助项目(51434003);重庆市基础科学与前沿技术研究资助项目(cstc2016jcyjA0117)。

Supported by National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(2016ZX05044), National Natural Science Foundation of China(51434003) and Fundamental Science and Advanced Technology Research of Chongqing(cstc2016jcyjA0117).

作者简介:彭守建(1983—),男,博士,重庆大学副教授,(E-mail)sjpeng@cqu.edu.cn.

about the pumping pipe. The closer to the pumping stage of the pumping pipe, the faster the gas desorption rate, which was not related to the distance between the connection sections of the pumping pipe; 2) In the process of gas drainage, with stress increasing, gas desorption rate slowed down, pressure drop funnel shrank, and gas desorption area became smaller. Stress influenced the elimination of outburst hazardous areas, and the difference it brought about was not obvious at first, but with the increase of it, the scope of eliminating the conflict gradually decreased; 3) In the process of gas drainage, instantaneous flow rate evolution over time can be divided into three stages: rapid increase, rapid decay and limit extraction, and with the increase of stress, instantaneous flow peak value decreased, and its attenuation rate slowed down. The cumulative flow of gas was reduced, and its growth rate slowed down, resulting in reduction of extraction efficiency.

Keywords: parallel borehole; stress; physical simulation; extraction flow rate; gas pressure

诸多研究实践证明瓦斯的抽采利用,不仅可以降低常规能源的使用比例,缓减环境污染,以此同时还可以降低煤层瓦斯含量,增加煤矿生产安全性^[1-5]。因此,在煤层瓦斯抽采中分析其运移规律有着重要意义。

掌握煤层瓦斯运移规律是进行煤与瓦斯安全共采的重要前提,研究抽采中的气压和流量演化则是掌握煤层瓦斯运移的基础,为研究其演化规律国内外学者进行了一系列研究^[6-14],取得了丰硕成果。田靖安等^[15]结合煤层瓦斯压力计算理论公式与安全线预测煤层瓦斯压力方法,得到煤层瓦斯压力分布规律;尹光志等^[16]基于工作面煤层支承应力与瓦斯抽采流量的相互关系,构建了瓦斯抽采流量的负指数表达式;秦跃平等^[17]采用朗格缪尔方程与抛物线方程表示瓦斯含量,建立了两种煤层瓦斯单向流动数学模型来定量分析煤层瓦斯流动模型简化求解所引起的误差;周睿等^[18]基于质量守恒定律、达西定律以及径向流场瓦斯的渗流方式,得出穿层钻孔瓦斯流量的衰减函数和衰减曲线;岑培山等^[19]研究了松软不稳定煤层顺层钻孔瓦斯流量衰减特征。在物理模拟试验方面,陈金刚等^[20]基于现代测试技术和煤层气井实测排采数据,探讨了开采中煤储层渗透率动态变化效应;马波等^[21]研究了抽采长度对瓦斯压力分布的影响,总结出不同抽采长度条件下的瓦斯压力分布及消突区域变化规律;袁梅等^[22]开展了不同抽采条件煤体瓦斯流量物理模拟试验,得到瓦斯流量与降压抽采之间的关系;王维忠等^[23]开展了不同钻孔位置条件下的煤层瓦斯抽采物理模拟试验,以探究瓦斯抽采中的流动特性及钻孔位置的影响规律和作用机制。

目前,已有不少学者针对煤层瓦斯抽采中瓦斯运移规律展开研究,但其主要以小试件煤样、数值模拟或垂直钻孔物理模拟来探讨^[24-25]。基于此,笔者在前人研究的基础上利用自主研发的多场耦合煤层气开采物理模拟实验系统,开展了不同地应力水平下顺层平行钻孔抽采瓦斯的大型物理模拟实验,分析瓦斯抽采中气压时空演化、地应力敏感性和瓦斯流量演化,以期为深入研究瓦斯抽采作用机制提供理论支撑。

1 实验方法

1.1 实验装置

实验装置见图 1,主要包括^[26]主体承载支架、试件箱、伺服加载系统、侧向多管开采系统和控制与数据采集系统等,试件箱从上、右和后三向设有导向法兰套和压杆,可实现对试件箱内部煤岩的三向四级应力加载,为更真实地模拟煤层瓦斯来源,将实验系统的进气通道通至箱体底部,底部呈网格型,传统的管道“点充气”变为“面充气”,开采系统内装有流量计,考虑到瓦斯流量在实验前后期的变化范围大,为使流量计精度满足实验要求,减小误差,以大(0~200 L/min)、小(0~10 L/min)量程流量计并联的方式监测流量动态变化,2 个气体流量计组成一个气体流量监测组直接连接于出气端,且每个出气端连接一组流量计。

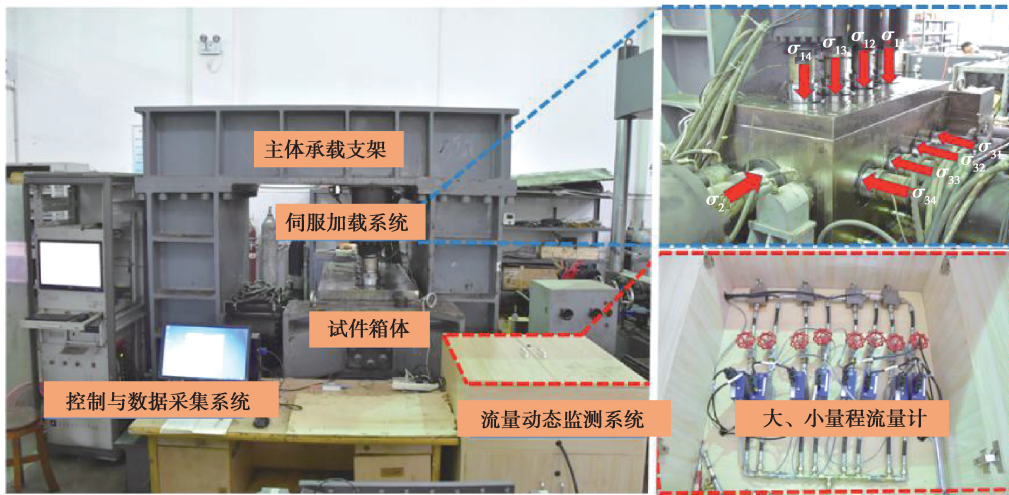


图 1 多场耦合煤层气开采物理模拟试验系统

Fig. 1 Multi-field coupling testing system for dynamic disaster in coal mine

1.2 抽采管及传感器布置

本实验设计侧向多管同时抽采(见图 2(a))。定义垂直 yOz 平面为断面,共 4 个断面,沿 z 轴减小的方向依次为 $D_1(z=925\text{ mm})$ 、 $D_2(z=645\text{ mm})$ 、 $D_3(z=395\text{ mm})$ 、 $D_4(z=141\text{ mm})$ 断面,在 D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4 的中部($x=200\text{ mm}$)分别布置 I、II、III、IV 钻孔,钻孔内连接有抽采管,抽采管包括两段:抽采段和连接段,连接段可使得抽采段能够随着煤体的移动而移动,从而避免抽采管受力折断,抽采管长度为 330 mm ,而抽采段为 $160\text{ mm}(z:170\sim 330)$,外径为 18 mm ,内径为 6.4 mm ,抽采管所在直线平行于 y 轴,I、II、III、IV 抽采管与箱体连接处的圆心坐标依次为 $(200,0,925)$ 、 $(200,0,645)$ 、 $(200,0,395)$ 、 $(200,0,141)$,每根抽采管路外都连接

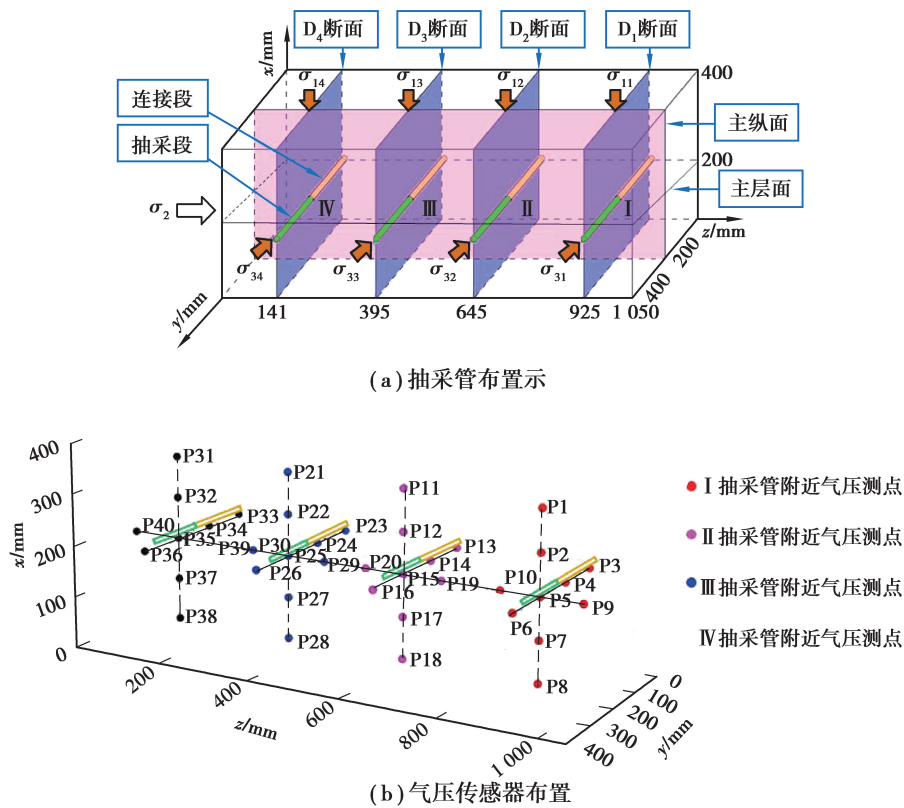


图 2 抽采管及气压传感布置示意图

Fig. 2 Pumping pipe and pressure sensing layout

有流量计来监测流量动态变化。图 2(b)为气压传感器三维空间布置示意图,图中的彩色圆点皆为煤层内部气压测点,传感器布置原则主要是围绕抽采管布置,在平行、垂直抽采管方向布置,为了后续清晰对比分析不同抽采管附近的气压演化规律,则以不同颜色表示不同抽采管附近的气压传感器。

1.3 实验步骤及实验方案

本次实验所选用的煤样取自金佳煤矿,试件的制作步骤及实验过程参考文献[21]。本次实验分 3 组,对应 3 组地应力水平。第一组实验, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 2$ MPa;第二组实验, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 4$ MPa;第三组实验, $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 6$ MPa。3 组实验的瓦斯吸附解吸平衡气压均为 1 MPa(即煤层内部各点气体压力均达到 1 MPa),型煤含水率为 6%,由于实验箱体较大,出于安全考虑,实验中以 CO_2 代替 CH_4 ,当瓦斯吸附解吸平衡气压至 1 MPa 时,关闭气源阀门,即实验抽采过程中无气源补充,抽采负压为大气压。

2 实验结果及分析

2.1 抽采中气压时空演化特性

图 3 为瓦斯抽采过程中气压随时间的变化曲线,其中图 3(a)为 2 MPa 条件的 3 个测点随时间的演化曲线,0 时刻为瓦斯抽采开始时刻,即此时瓦斯从 1 MPa 开始解吸,抽采 6 h 后本次试验结束,从 3 个测点随时间的变化曲线可以发现:当瓦斯抽采开始后,气压下降迅速,而后下降较慢并趋于平缓,当抽采进行 10 min 时,P3、P5 和 P6 测点气压已分别降为初始气压的 66%、84%和 75%;当抽采至 6 h,P3、P5 和 P6 测点气压都已趋近大气压。为探究 2,4,6 MPa 地应力条件下气压随时间的演化规律是否相同,作者选取各级地应力条件下的部分测点随时间变化曲线绘制于图 3(b)、(c)、(d)中,不难发现 4 MPa 和 6 MPa 地应力条件下气压随时间的演化规律均符合以上规律,即瓦斯抽采中,各测点气压随时间的演化规律基本相同。分析认为:由于本次实验设计 4 个钻孔同时抽采,当抽采开始时,抽采钻孔与大气连通,即钻孔内气压为大气压,造成钻孔与煤层形成较大气压差,致使煤层内瓦斯开始解吸、扩散和渗流,游离瓦斯增多,流速较快,气压下降迅速,随着瓦斯抽采的不断进行,煤层瓦斯含量减少,气压差渐渐缩小,瓦斯流速减缓,气压下降就趋于平缓。

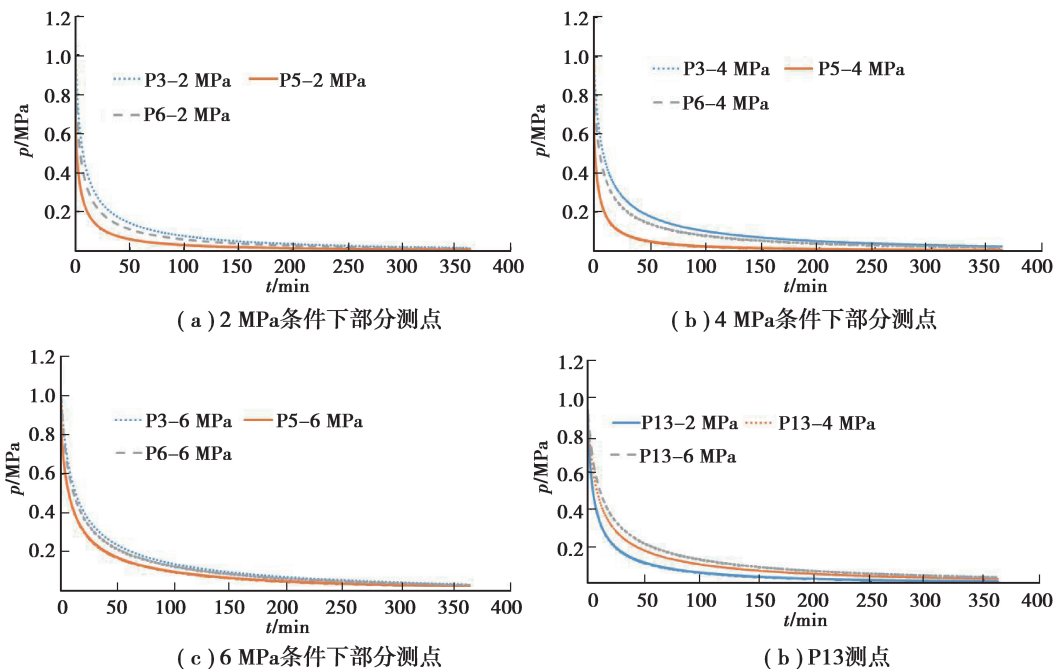


图 3 瓦斯抽采中气压随时间的变化曲线

Fig. 3 Curves of pressure changing with time during gas drainage

为便于反映瓦斯抽采中气压的空间演化规律,笔者将坐标值作为自变量,气压值作为因变量,绘制气压随坐标值的变化曲线,图中的小矩形框表示抽采管,黄色段表示抽采管的连接段,绿色段表示抽采管的抽采段,黄色圆框为抽采管端面,如图 4 所示。图 4(a)为第二断面沿 x 轴方向的 5 个测点,P8、P7、P5、P2 和 P1

的 y, z 值均相同, x 值依次增加, 图中呈现出: 在 0 时刻, 各测点气压皆为 1 MPa, 抽采至 0.5, 5, 15, 60 min 时刻, 且在区间 $40 \text{ mm} < x < 120 \text{ mm}$ 和 $280 \text{ mm} < x < 360 \text{ mm}$ 内气压下降幅度相对较小, 而在区间 $120 \text{ mm} < x < 280 \text{ mm}$ 内, 气压变化较为显著, 下降幅度相对较大; 抽采至 180 min 时刻, 各测点气压变化差异较小, 曲线趋于平缓, 这是因为抽采管位于 $x = 200 \text{ mm}$ 平面, 离抽采管近, 气压下降较快, 离抽采管远, 气压下降较慢, 所以第二断面沿 x 轴方向的气压值变化近似地关于直线 $x = 200 \text{ mm}$ 对称。图 4(b) 为第二断面沿 y 轴方向的 4 个测点, P3、P4、P5 和 P6 的 x, z 值均相同, y 值依次增加。从图中可以看出: 在 0 时刻, 各测点气压皆为 1 MPa, 抽采至 0.5, 5, 15, 60 min 时刻, 且在区间 $145 \text{ mm} < y < 360 \text{ mm}$ 内气压空间变化差异较大, 而在区间 $40 \text{ mm} < y < 145 \text{ mm}$ 内, 气压空间变化差异不显著; 抽采至 180 min 时刻, 各测点气压变化基本一致, 曲线趋于平行 y 轴, 这是由于抽采管布置在区间 $0 \text{ mm} < y < 330 \text{ mm}$ 内, 而抽采管的连接段在区间 $0 \text{ mm} < y < 170 \text{ mm}$, 抽采管的抽采段在区间 $170 \text{ mm} < y < 330 \text{ mm}$, 离抽采段近, 气压下降较快, 离抽采段远, 气压下降较慢, 所以在 $145 \text{ mm} < y < 360 \text{ mm}$ 内, 第二断面沿 y 轴方向的气压值变化近似地关于直线 $y = 250 \text{ mm}$ 对称。图 4(c) 为第二断面沿 z 轴方向的气压空间变化, 其变化规律与 (a)、(b) 规律较为相似, 将不再赘述。

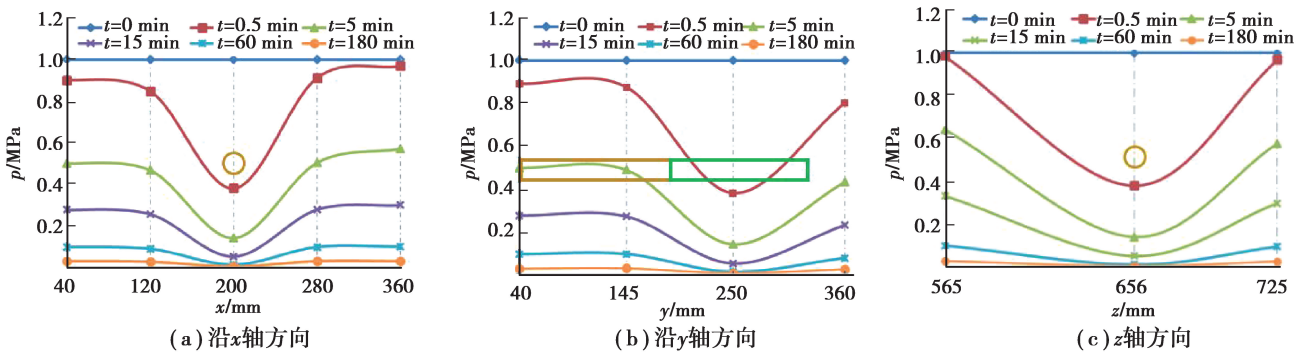


图 4 断面气压随坐标值的变化曲线

Fig. 4 Curves of section pressure changing with coordinate values

图 5 为主纵面上部分测点的气压值随坐标值的变化曲线, 选取了 12 个测点, P40、P35、P39、P30、P25、P29、P20、P15、P19、P10、P5、P9 只有 z 值不同, 依次为 40, 152, 221, 315, 406, 475, 565, 656, 725, 845, 936, 1 010 mm。从图 5 中不难发现: 主纵面气压随坐标值的变化规律与断面有相似之处, 同样地在 0 时刻, 各测点气压皆为 1 MPa, 抽采至 180 min 时刻, 气压随坐标值的变化曲线近似直线, 当抽采至 0.5, 5, 15, 60 min 时刻, 各测点气压变化幅度较大, 呈波浪形分布, 其中在区间 $315 \text{ mm} < z < 475 \text{ mm}$ 和 $565 \text{ mm} < z < 725 \text{ mm}$ 空间差异较为显著, 而在区间 $40 \text{ mm} < z < 221 \text{ mm}$ 和 $845 \text{ mm} < z < 1 010 \text{ mm}$ 空间变化次之, 这是因为在 $z = 141, 395, 645, 925 \text{ mm}$ 处分别布置了抽采管 IV、III、II、I, 而抽采管 III、II 可能存在抽采叠加区域, 抽采管 IV、III 位于边界区域, 可能存在边界效应, 从而致使主纵面中间段气压下降幅度大, 两翼则较小。

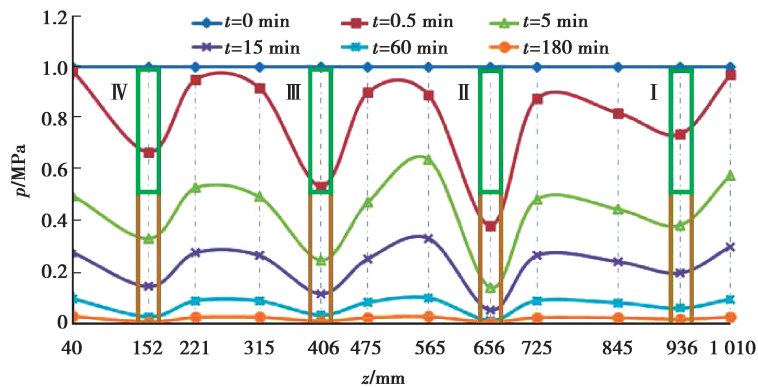


图 5 主纵面气压随坐标值的变化曲线

Fig. 5 Curves of the pressure on the main longitudinal surface changing with coordinate values

2.2 地应力敏感性分析

本节的地应力敏感性分析主要分两部分加以论述,第一部分是以前断面为分析面,借助三维彩色映射投影图分析地应力对气压演化的影响,为增强文章论证性,又以层面作为分析面,分析地应力对消突区域的影响。

为便于观察抽采中气压的三维空间演化,作者绘制了气压三维彩色映射投影图,如图 6 所示。图 6(a)、(b)、(c)分别为抽采至 1 min 断面所对应的 2,4,6 MPa 气压三维空间分布,图中的 x 轴、 y 轴表示气压测点的固定坐标值, z 轴为气压的动态变化值, xy 平面为上方气压动态变化投影图,图中不同的颜色表示不同的气压区间。

地应力为 2 MPa,瓦斯抽采至 1 min,断面气压演化近似呈三维漏斗状,漏斗顶的投影点在抽采段的中点,漏斗高度为此断面内的最大气压梯度,从漏斗面的颜色区间可知,从上到下,气压梯度逐渐减小,曲面向内收缩。观察投影图可知,漏斗的投影面是一个对称的平面,对称轴为 $x=200$ mm,表明漏斗关于抽采管对称,平面由内向外,气压梯度依次增大,向外扩张,即离抽采管越远,气压越大。当地应力为 4 MPa,同样抽采至 1 min,气压演化同样有上述规律,但以地应力为 2 MPa 相比,漏斗高度增大,出现了较大气压($1 \text{ MPa} > p > 0.85 \text{ MPa}$)区间,且同一气压值的区间投影面积减小。当地应力增加到 6 MPa 时,和 2 MPa、4 MPa 相比,漏斗高度更高,同一气压值的区间投影面积更小。综上,煤层瓦斯抽采过程中,在相同实验条件下,同一时刻,断面气压演化呈漏斗状,地应力越小,压降漏斗扩张越大,漏斗高度越小,煤储层压降漏斗传播越远,瓦斯解吸越充分,瓦斯有效解吸面积越大,气压影响范围更远。

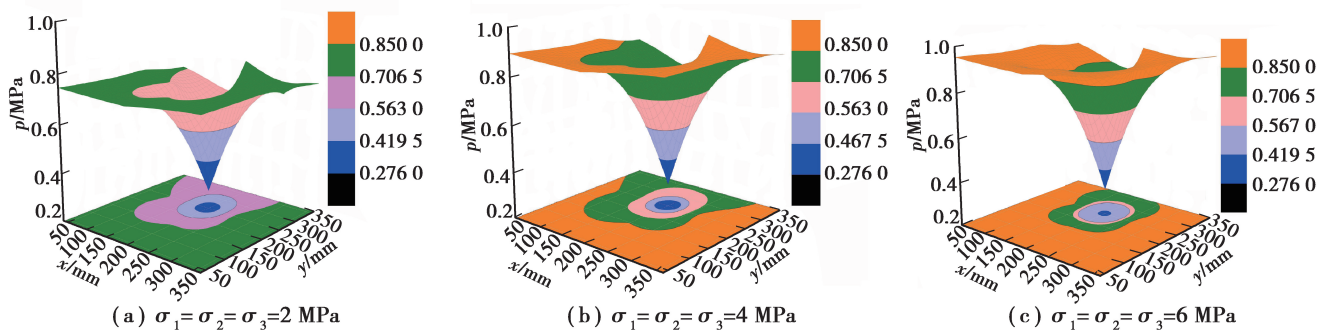


图 6 不同地应力下的气压三维空间分布

Fig. 6 Three-dimensional spatial distribution of atmospheric pressure under different ground stresses

抽采半径是煤层瓦斯抽采中需确定的一个重要参数,确定抽采半径的方法有多种,以残余气体压力为初始气压的 49% 来确定抽采半径^[27],即为 0.49 MPa,气压小于此值的区域可认为消除突出危险。由于不同分析面的规律有相似性,作者仅以主层面为例展开分析。以地应力 2 MPa 的主层面为例,首先借助 Matlab 中的 griddata 函数对主层面内的 36 个测点数据给予插值,然后用 contour 函数将不同时刻的有效抽采气压值 (0.49 MPa) 的等压线绘制于图中,即可得到最终的不同时刻消除突出危险区域图。图中外围矩形圈住区域为抽采监测区,各种颜色的闭合曲线表示不同时刻有效抽采气压值的等压线,小矩形框表示抽采管,黄色段表示抽采管的连接段,绿色段表示抽采管的抽采段,沿 z 轴减小方向,分别是 I、II、III、IV 抽采管。

由图 7 中消突曲线随时间演化规律发现,瓦斯抽采一定时间后就会出现突出危险性消除区域,且近似围绕抽采管呈对称分布。2 MPa 条件下,I、II、III 抽采管抽采 0.5 min 后,监测区域出现较小消突区域,IV 抽采管抽采至 1 min 后同样出现一个较小的一个消突区域,随着抽采时间的延长,其消突范围在逐渐扩张,抽采 4 min 后开始出现较大的消突区域。4 MPa 条件下,抽采 0.5 min 后 II、III 抽采管出现较小消突区域,1 min 后 I、IV 同样出现较小消突区域,同样地随着抽采时间的延长,其消突范围在逐渐增大,其中抽采至 4 min 时 II、III 抽采管的消突曲线连接成了一个整体,形成了一个较大的消突区域,与 2 MPa 条件相比,同一时刻的消突区域较小,有效抽采区域缩小幅度较明显。地应力为 6 MPa 时,其消突曲线随时间的变化比较均匀,但与 2 MPa、4 MPa 相比,同一时刻的消突区域更小,有效抽采区域缩小幅度更明显。综上所述,平行钻孔瓦斯抽采时,相同条件下,同一时刻中间相连抽采管出现的消突区域较大,两侧抽采管的较小,这是由于中间相连

抽采管可能存在抽采叠加区域,而两侧抽采管可能受到边界效应的影响,这与前文分析结果较为一致,其次,随着地应力的增大,消除突出危险性区域在缩小,分析认为:这是由于当地应力增加时,煤体的孔隙介质将会受到压缩,致使孔隙和裂隙收缩甚至闭合,从而使煤层的渗透率降低,瓦斯解吸减缓,气压下降速度变慢,瓦斯流速减小^[28]。

结合不同地应力条件下的气压三维彩色映射投影图与消突区域随时间变化规律可知:在瓦斯抽采过程中,地应力是影响瓦斯运移的重要因素,表现为地应力越小,压降漏斗扩展范围越大,漏斗高度越小,表明瓦斯解吸越较为充分,压降漏斗传播越远;同时,地应力还将影响消突曲线的演化规律,表现为地应力越大,消突区域越小,而随着地应力的减小,消突区域逐渐增大。

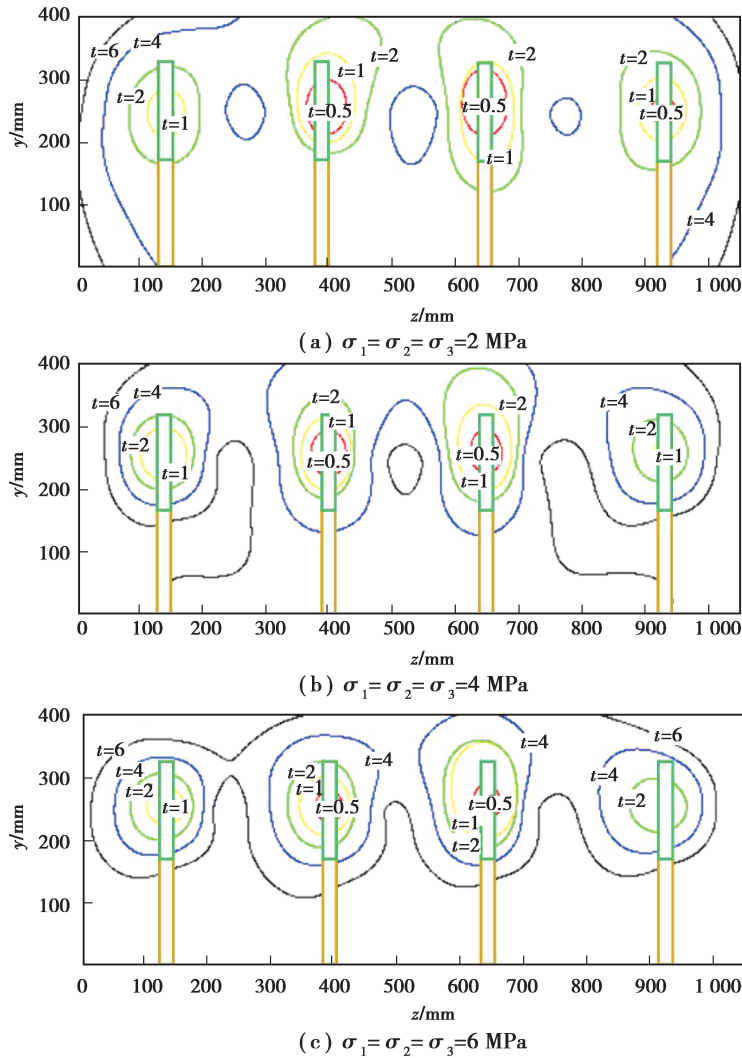


图 7 不同时刻消除突出危险区域

Fig. 7 Elimination of outburst hazardous areas at different times

2.3 抽采中流量演化规律

图 8 为不同抽采钻孔瞬时流量随时间的变化曲线。图中的 q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 分别对应 I、II、III、IV 钻孔煤层瓦斯抽采中的瞬时流量。其中,图 8(a)是 2 MPa 地应力水平下不同钻孔瓦斯瞬时流量,可以看出,4 个钻孔同时抽采时,各钻孔瞬时流量变化趋势基本一致,曲线近似重合。变化趋势皆可分为 3 个阶段:急速升高阶段、快速衰减阶段和极限抽采阶段;急速升高阶段为第一阶段,处于抽采初期(0~120 min),持续时间极短,大约 1 min;快速衰减阶段为第二阶段,主要集中在抽采中期(120~240 min),持续约 45 min;极限抽采阶段为第三阶段,处于抽采后期(240~360 min),持续时间相对前两阶段较长,直至抽采结束;结合图 8(b)和(c)

分析可知,4 MPa、6 MPa 地应力水平下不同钻孔瓦斯瞬时流量随时间的变化曲线同样表现出以上规律。分析认为:当抽采开始时,大量吸附在煤体中的瓦斯解吸,煤体瓦斯在气压差(箱体内密封的气压与箱体外的大气压之差)驱使下形成较高的瓦斯压力梯度,压力梯度越大,流量越大(急速升高阶段);由于瓦斯源有限及受卸压半径影响,在压差持续作用下钻孔周围卸压区域内煤体瓦斯压力梯度开始下降,导致流量急剧下降(快速衰减阶段),当瓦斯抽采量达到极限时,煤体气压已缓慢降低接近大气压,此时钻孔瓦斯流量维持在较低值(极限抽采阶段)。

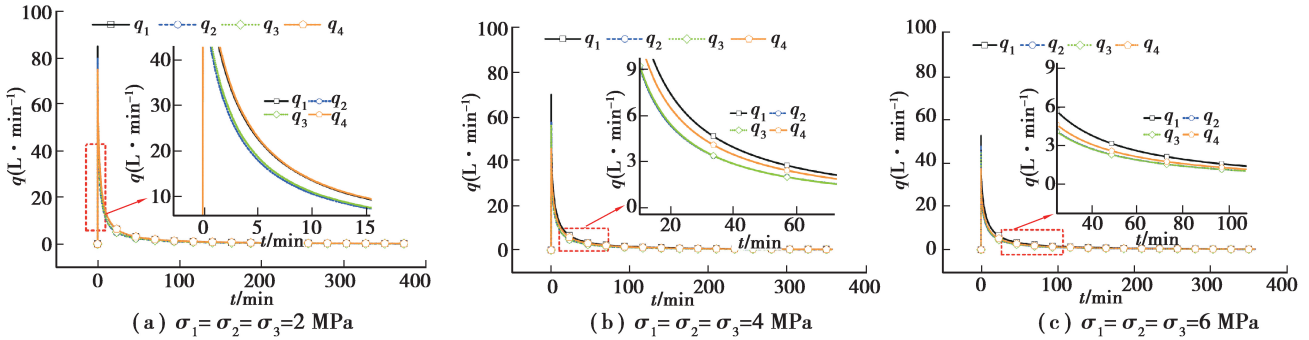


图 8 不同抽采钻孔瞬时流量随时间的变化曲线

Fig. 8 Curves of instantaneous flow rate changing with time for different pumping holes

为方便探讨瓦斯抽采中地应力对瞬时、累积流量的影响,将不同地应力条件下同一钻孔瞬时、累积流量随时间变化曲线绘制在同一图中,见图 9。此外,为能清晰对比地应力对瓦斯瞬时流量的影响,作者进行局部放大处理,如图 9 中红色虚线区域所示。图 9 中 $q_1-2\text{ MPa}$ 、 $Q_1-2\text{ MPa}$ 定义为 2 MPa 地应力水平下 I 钻孔

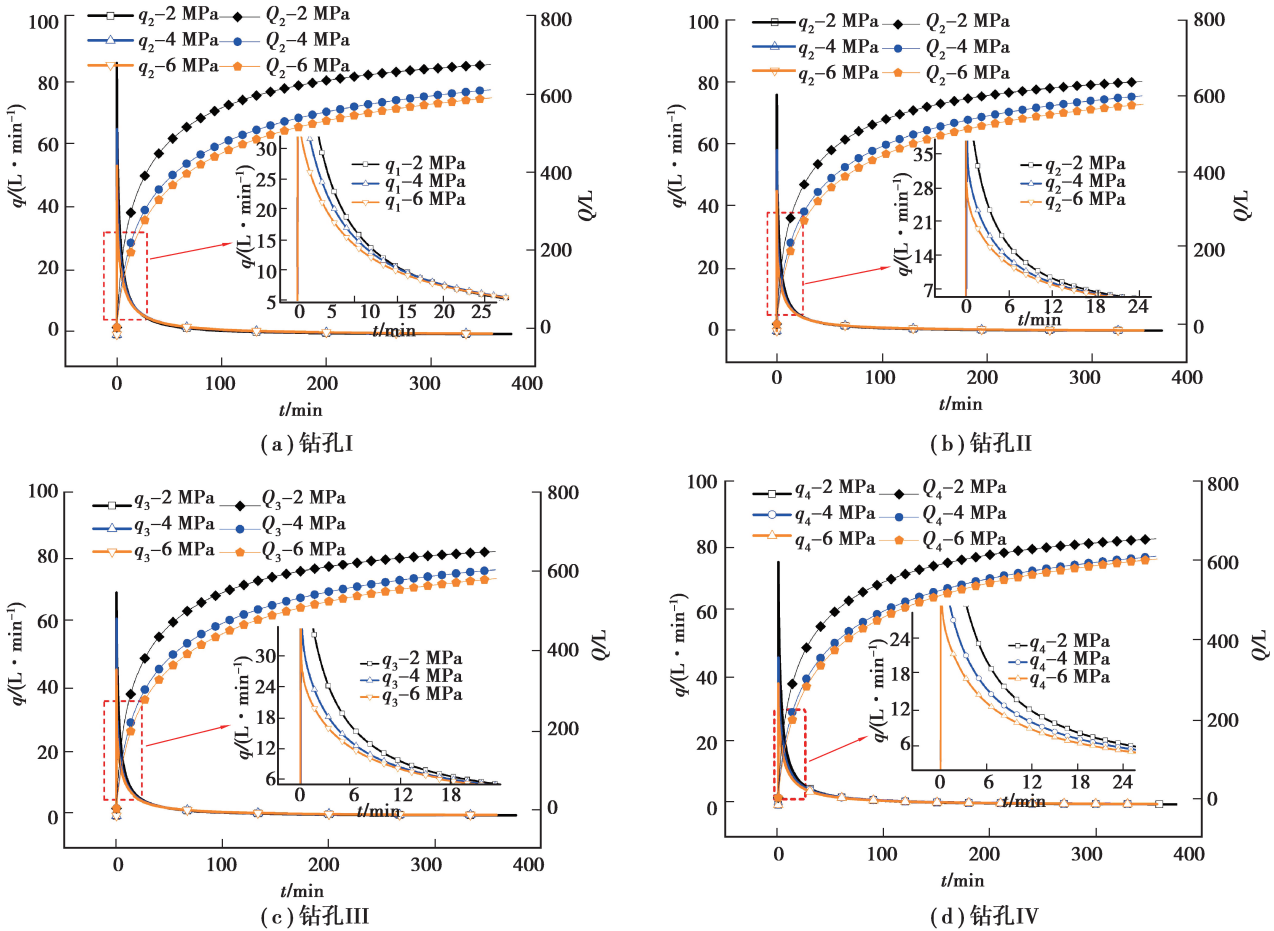


图 9 同一钻孔不同地应力水平下流量随时间的变化曲线

Fig. 9 Curves of the flow rate changing with time under different stress levels of the same borehole

的瞬时、累积流量,其他不同地应力水平下的钻孔瞬时、累积流量表示方法与此相同。图9(a)为钻孔I在3组地应力水平下瓦斯抽采中瞬时流量随时间的变化曲线,不难发现,尽管地应力不同,但是瞬时流量随时间变化曲线基本一致,不同在于:在相同试验条件下,随着地应力的增加,瞬时流量最大值在减小,瞬时流量下降速率在减小,2 MPa、4 MPa和6 MPa地应力水平下的瓦斯瞬时流量最大值分别为87.94 L/min、70.00 L/min和55.10 L/min,自瞬时流量最大值时刻的后20 min内,瞬时流量下降幅度分别为91.65%、89.37%、87.29%,累积流量同样表现出相似规律,各地应力条件下的累积流量随时间变化曲线大致相同,但最终累积流量有差异,在相同试验条件不同地应力水平下,表现为地应力越大,累积流量越小,地应力越小,累积流量越大。结合图9(b)、(c)、(d)分析,发现II、III、IV钻孔同样具有以上规律。经分析,这是因为随着煤层气开采向深部发展,当煤层瓦斯开始抽采时,气压开始下降,有效应力增加,煤层渗透率降低,最终致使瓦斯解吸逐渐减缓,流量降低。

3 结论

1)平行钻孔瓦斯抽采,前期压降曲线斜率变化快,中、后期曲线斜率变化相对不明显;相邻抽采管之间瓦斯解吸速率较边界抽采管快,平行、垂直抽采管方向的气压演化均呈现出任意时刻气压变化值关于抽采管对称,并且离抽采管抽采段越近,瓦斯解吸速率越快,反之,瓦斯解吸速率越慢,与距离抽采管连接段远近无关。

2)以气压三维彩色映射投影和不同时刻消除突出危险区域来判定地应力敏感性。平行钻孔瓦斯抽采中,随着地应力增加,瓦斯解吸速率减缓,压降漏斗收缩变小,瓦斯有效解吸面积变小;以残余气压为初始气压的49%判定抽采有效半径,且地应力对消除突出危险区域出现时间影响差异不明显,但是随着地应力增加,消突范围渐缩小。

3)煤层瓦斯抽采中,瞬时流量随时间的演化可分为急速升高、快速衰减阶段和极限抽采三个阶段;急速升高阶段和快速衰减阶段持续时间较短,处于抽采初期,极限抽采阶段持续时间较长,主要处于抽采中、后期;地应力作为瓦斯瞬时流量的重要影响因素,随着地应力增大,瞬时流量峰值减小,瞬时流量衰减速率减缓,抽采累积流量变小,瓦斯抽采效率降低。

参考文献:

- [1] Cheng Y P, Wang L, Liu H Y, et al. Definition, theory, methods, and applications of the safe and efficient simultaneous extraction of coal and gas[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(1): 52-65.
- [2] Zhang J Y, Liu D M, Cai Y D, et al. Carbon isotopic characteristics of CH₄ and its significance to the gas performance of coal reservoirs in the Zhengzhuang area, Southern Qinshui Basin, North China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2018, 58: 135-151.
- [3] 尹光志,王振,张东明.有效围压为零条件下瓦斯对煤体力学性质影响的实验[J].重庆大学学报,2010,33(11): 129-133.
YIN Guangzhi, WANG Zhen, ZHANG Dongming. Experiment of the gas effect on coal mechanical properties under zero effective confining pressure[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(11): 129-133.(in Chinese)
- [4] 鲜学福.我国煤层气开采利用现状及其产业化展望[J].重庆大学学报(自然科学版),2000,23(S1): 1-5.
XIAN Xuefu. The present situation of coal-bed methane mining and utilization in our country and looking forward to its industrialization[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2000, 23(S1): 1-5.(in Chinese)
- [5] 梁冰,秦冰,孙福玉,等.煤与瓦斯共采评价指标体系及评价模型的应用[J].煤炭学报,2015,40(4): 728-735.
LIANG Bing, QIN Bing, SUN Fuyu, et al. Application of evaluation index system of coal and gas co-extraction and evaluation model[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 728-735.(in Chinese)
- [6] Aifantis E C. On the problem of diffusion in solids[J]. Acta Mechanica, 1980, 37(3/4): 265-296.
- [7] Beskos D E, Aifantis E C. On the theory of consolidation with double porosity-II[J]. International Journal of Engineering Science, 1986, 24(11): 1697-1716.
- [8] Chen Z Y, Xiao Z X, Zou M. Research on mechanism of quantity discharge of firedamp from coal drift of headwork surface

- reflect coal and gas outburst[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(30): 19395-19401.
- [9] Cheng Y P, Wang L, Liu H Y, et al. Definition, theory, methods, and applications of the safe and efficient simultaneous extraction of coal and gas[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(1): 52-65.
- [10] Wang J C, Wu R L, Zhang P. Characteristics and applications of gas desorption with excavation disturbances in coal mining[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2015, 2(1): 30-37.
- [11] 卢义玉, 刘小川, 汤积仁, 等. 热流固耦合作用下页岩渗透特性实验[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(1): 65-71.
LU Yiyu, LIU Xiaochuan, TANG Jiren, et al. Effects of heat flow fluid-solid coupling on the characteristics of shale permeability[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(1): 65-71. (in Chinese)
- [12] 刘超, 黄滚, 赵宏刚, 等. 复杂应力路径下原煤力学与渗透特性试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 191-198.
LIU Chao, HUANG Gun, ZHAO Honggang, et al. Tests on mechanical and permeability characteristics of raw coal under complex stress paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(1): 191-198.(in Chinese)
- [13] 曹运兴, 张军胜, 田林, 等. 低渗煤层定向多簇气相压裂瓦斯治理技术研究与实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2631-2641.
CAO Yunxing, ZHANG Junsheng, TIAN Lin, et al. Research and application of CO₂ gas fracturing for gas control in low permeability coal seams[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2631-2641.(in Chinese)
- [14] 孙四清, 张群, 闫志铭, 等. 碎软低渗高突煤层井下长钻孔整体水力压裂增透工程实践[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2337-2344.
SUN Siqing, ZHANG Qun, YAN Zhiming, et al. Practice of permeability enhancement through overall hydraulic fracturing of long hole in outburst-prone soft crushed coal seam with low permeability[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2337-2344.(in Chinese)
- [15] 田靖安, 王亮, 程远平, 等. 煤层瓦斯压力分布规律及预测方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(4): 481-485.
TIAN Jing'an, WANG Liang, CHENG Yuanping, et al. Research on distribution rule and forecast method of gas pressure in coal seam[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2008, 25(4): 481-485.(in Chinese)
- [16] 尹光志, 何兵, 李铭辉, 等. 采动过程中瓦斯抽采流量与煤层支承应力的相关性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(4): 736-741.
YIN Guangzhi, HE Bing, LI Minghui, et al. Coupling mechanism between flow rate of gas drainage and coal seam abutment stress under mining conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(4): 736-741.(in Chinese)
- [17] 秦跃平, 刘鹏. 煤层瓦斯流动模型简化计算误差分析[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(1): 19-26.
QIN Yueping, LIU Peng. Research on calculation error of simplified mathematical model of gas emission in coal seam[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2016, 45(1): 19-26.(in Chinese)
- [18] 周睿, 闫斌移. 穿层钻孔径向流场瓦斯流量推算煤层瓦斯压力方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3147-3152.
ZHOU Rui, YAN Binyi. Research on calculating gas pressure with gas flow in crossing borehole[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 3147-3152.(in Chinese)
- [19] 岑培山, 李占五, 程洪亮, 等. 松软不稳定煤层顺层钻孔瓦斯流量衰减特征分析[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(11): 72-74.
CEN Peishan, LI Zhanwu, CHENG Hongliang, et al. Analysis on gas flow attenuation features from borehole along soft and unstable seam[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(11): 72-74.(in Chinese)
- [20] 陈金刚, 徐平, 赖永星, 等. 煤储层渗透率动态变化效应研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(8): 2512-2516.
CHEN Jingang, XU Ping, LAI Yongxing, et al. Research on dynamic variation effect of coal reservoirs permeability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(8): 2512-2516.(in Chinese)
- [21] 马波, 许江, 刘龙荣, 等. 抽采长度对煤层气开采效果的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 175-185.
MA Bo, XU Jiang, LIU Longrong, et al. Analysis of the effect of the borehole length on the efficiency of coal-bed methane exploitation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(1): 175-185.(in Chinese)
- [22] 袁梅, 许江, 李波波, 等. 不同抽采条件煤体瓦斯流量物理模拟试验[J]. 煤炭技术, 2016, 35(6): 127-129.
YUAN Mei, XU Jiang, LI Bobo, et al. Physical simulation experiment of gas flow in coal body under different drainage

- conditions[J]. *Coal Technology*, 2016, 35(6): 127-129.(in Chinese)
- [23] 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.(in Chinese)
- [24] Zhang C L, Xu J, Peng S J, et al. Dynamic evolution of coal reservoir parameters in CBM extraction by parallel boreholes along coal seam[J]. *Transport in Porous Media*, 2018, 124(2): 325-343.
- [25] Tao Y Q, Liu D, Xu J, et al. Investigation of the Klinkenberg effect on gas flow in coal matrices: a numerical study[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2016, 30: 237-247.
- [26] 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和应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(S2): 3505-3514.
- LIU Dong, XU Jiang, YIN Guangzhi, 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(S2): 3505-3514.(in Chinese)
- [27] 陶云奇, 张超林, 许江, 等. 水力冲孔卸压增透物理模拟试验及效果评价[J]. *重庆大学学报*, 2018, 41(10): 69-77.
- TAO Yunqi, ZHANG Chaolin, XU Jiang, et al. Effect evaluation on pressure relief and permeability improvement of hydraulic flushing physical experiment[J]. *Journal of Chongqing University*, 2018, 41(10): 69-77.(in Chinese)
- [28] 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.(in Chinese)

(编辑 郑洁)