

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201806126

承压煤岩低气压渗流灾变

李 铁^{1,2}

(1. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室(北京科技大学),北京 100083;
2. 北京科技大学 土木与资源工程学院,北京 100083)

摘 要: 为探索含低压瓦斯煤层的瓦斯异常涌出灾变成因与机理,对目前该领域的文献进行了分析与总结,并通过工程案例实证分析,证明了此种灾变的存在;在流固耦合实验系统上,按背景工程约束与加载条件开展含低气压煤样承压物理试验,得到了灾变全程应力-声发射-流量实验数据及试样外表破坏情况;用 UDEC,按背景工程边界与加载条件开展气-固耦合离散元数值试验,得到了灾变全程应力-应变--流速-位移速率等实验数据及试样内部破裂情况. 研究结果表明:3 种研究方法获得了一致性较高的结果,0.4 MPa 气体压力下,煤层承压过程应力-煤-气耦合作用,可以导致发生喷出气体的灾变,在煤矿现场多表现为瓦斯异常涌出超限;在单自由度边界条件下施加单向压载,承压煤岩弹性变形前期,气体沿原生裂隙和孔隙呈常速稳态渗流;弹性变形后期,原生裂隙和孔隙被压密,气体呈减速稳态渗流;屈服阶段,扩容新生裂隙产生,气体呈加速非稳态渗流;达到极限荷载或峰后不久,发生气体喷出灾变;采、掘作业面正常通风条件下,气流瓦斯浓度持续降低,是煤层发生瓦斯异常涌出的警示信息,应引起高度重视.

关键词: 深部开采;耦合渗流;低瓦斯压力灾变;瓦斯异常涌出;离散元数值试验

中图分类号: TD713;TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)04-0146-07

Low gas pressure seepage and catastrophe of pressurized coal

LI Tie^{1,2}

(1. Key Laboratory of High-Efficiency Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education(University of Science and Technology Beijing), Beijing 100083, China; 2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the cause and mechanism of the disaster caused by abnormal gas emission in coal seams with low-pressure gas, the literature in this field was analyzed and summarized, and the existence of such disaster was verified by case study. Based on the fluid-solid coupling experimental system, the physical test of coal sample bearing pressure with low pressure was carried out according to the constraints and loading conditions of the engineering, and the overall stress-acoustic emission-flow experimental data and the external damage of the sample were obtained. Using UDEC software, the discrete element numerical experiments of gas-solid coupling were carried out according to the boundaries and loading conditions of the engineering, and experimental data such as stress-strain-displacement rate and internal cracking of the sample were gained. Results show that the three methods had a high consistency. With the gas pressure of 0.4 MPa, gas outburst occurred under stress-coal-gas coupling, and it generally appeared as the amount of gas emission exceeding the limit in coal mine. The unidirectional pressure load was applied under the single-degree-of-freedom boundary condition. At the early stage of the elastic deformation of the pressure-bearing coal rock, the gas flowed along initial cracks and pores at a normal steady speed. At the later stage of the elastic deformation, the initial cracks and pores were compacted and gas flowed at a slow steady speed. During the yield phase, the new fissures triggered by coal dilatancy were formed and gas flowed rapidly and unsteadily. When the coal mass bore approximately achieved ultimate load or shortly reached the peak, gas outburst disaster happened. The phenomenon of continuous decrease of gas concentration faced in the mining and excavating work under normal ventilation is a warning sign that coal seams have abnormal gas emission, and to which great importance should be attached.

Keywords: deep mining; gas seepage coupling; low gas pressure catastrophe; abnormal gas emission; discrete element numerical experiment

收稿日期: 2018-06-19
基金项目: 国家自然科学基金((51674016,51534002)
作者简介: 李 铁(1961—),男,教授,博士生导师
通信作者: 李 铁,liutie@ustb.edu.cn

瓦斯气体在煤层中渗流和运移规律的认识,一直是煤层气开发利用和煤矿瓦斯灾害治理研究的热点问题. 国内外学者为此开展了大量研究.

尹光志等^[1-2]在 4 MPa 瓦斯压力单调加载与卸载试验条件下,得出原煤渗透率随有效应力增加呈负指数关系下降.李树刚等^[3]开展的 1~5 MPa 气压条件下煤岩瓦斯“固-气”耦合物理相似材料模拟试验,揭示了瓦斯渗透速率与上覆岩层运动之间的规律.康向涛等^[4]研究了 2.5 MPa 气压条件下低透气性煤层中瓦斯渗流的各向异性,发现在峰值破坏前,平行层理煤样随轴压增加,渗透率在应力屈服点达到最小值,垂直层理煤样在弹性阶段初始时达到最小值;峰值破坏后,两个方向煤样的渗透率均呈非线性增长.王浩等^[5]3~5 MPa 不同气压作用下煤岩卸围压作用的瓦斯渗流实验结果显示,渗透率具有 3 段特征,第 1 阶段减小,第 2 阶段稳定,第 3 阶段加速.李文鑫等^[6]1 MPa 瓦斯压力条件下研究得出,弹性阶段,渗透率随着应变和主应力差的增大而降低;在弹-塑性阶段,渗透率继续降低,但变化速率明显减小;在试件破坏之前的塑性阶段,渗透率基本保持不变.

以往的研究,比较关心于 >0.74 MPa 突出临界瓦斯压力条件下的试验.近年开始有学者关注到 <0.74 MPa 瓦斯压力,但其目的是要揭示一个更宽泛瓦斯压力范围的渗流规律,较少针对低瓦斯压力渗流与灾变的专项研究.例如:尹光志等^[7]得出,0.5、1.0、1.5 MPa 瓦斯压力条件下,卸围压开始后煤岩渗透率的变化经历屈服前、屈服后、破坏失稳和残余应力 4 个阶段,渗透率单调增大.朱卓慧等^[8]得出,0.2~3.0 MPa 瓦斯压力条件下,在全应力-应变过程中,瓦斯渗透率近似为“V”型变化.祝捷等^[9]0.40、0.74、1.50 MPa 瓦斯压力条件下研究得出,煤体变形对渗透率的影响作用非常强,有效应力是研究这两者关系的一个重要参数.陈绍杰等^[10]研究了煤层瓦斯抽采和反向注水趋替瓦斯的多相渗流问题,类似的研究可见许多,是煤层渗流问题的另一个研究方向.

随着煤矿进入深部开采,未达煤与瓦斯突出灾变阈值的煤层发生瓦斯灾害的陆续报导,引起本文的持续关注.张福旺等^[11]报导,2007 年 11 月 12 日,平煤十矿已₁₅-24110 采煤工作面开采消突达标和预测无危险煤层时,发生一起底板冲击诱导的煤与瓦斯突出.李铁等^[12]报导,新安煤田某矿 2009 年 7 月至 2010 年 3 月间,在消突达标和预测无危险煤层掘进煤巷,发生 3 起底板冲击诱导的煤与瓦斯突出和瓦斯异常涌出.

本文通过煤层低压瓦斯灾变工程案例分析、含低气压煤样承压物理试验和离散元气-固耦合数值试验,研究 0.4 MPa 低气压条件,承压煤岩应力-

煤-气耦合作用下气体渗流和灾变过程,期望对煤矿深部开采消突煤层低瓦斯指标灾变问题引起重视.

1 低瓦斯灾变工程案例分析

抚顺煤田某矿为高瓦斯矿井,硬分层煤有冲击地压危险,软分层煤有煤与瓦斯突出危险.55002 采煤工作面开采二分层,埋深约 660 m,软分层煤坚固性系数 $f=0.33 \sim 0.58$,破坏类型 III、IV,经保护层开采和其他区域消突措施,煤层残余瓦斯压力为 0.14~0.41 MPa,各项指标经评价均达到安全开采条件,采煤过程连续进行局部危险性预测不超标.开采过程上隅角 T_0 瓦斯传感器监测到的风流瓦斯浓度常态为 0.5% 左右的普通涌出.

2010 年 02 月 17 日 07:58 风流瓦斯浓度开始出现低值异常(如图 1 所示),持续 33 min 14 s 到 08:31:14,发生一次 $M_L 0.3$ 级底板深部冲击,采面无显现.之后风流瓦斯浓度仍处于低值异常,最小值 0.04%,持续到 08:46 瓦斯浓度开始不稳定回升,低值异常总计持续 48 min.经过 19 min 56 s 的不稳定恢复,09:05:56 发生瓦斯异常涌出,最大值 2.05%,监控系统自动断电停记 1 min 49 s 后,经风排瓦斯浓度达到复电阈值自动重计.之前和后续开采均未发现地质异常.

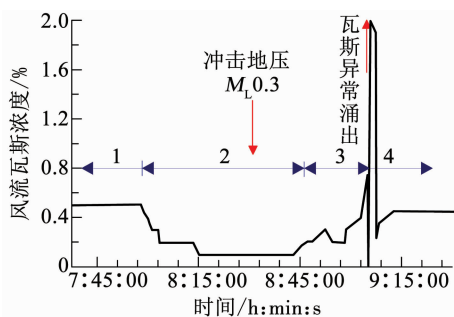


图 1 回采巷道 T_0 传感器瓦斯浓度监测曲线

Fig. 1 Gas concentration monitoring curve of Sensor T_0 in mining gateway

分析图 1 低瓦斯指标灾变过程,为一次底板来压过程所致.瓦斯渗流和涌出可分为 4 个阶段:第 1 阶段瓦斯普通涌出,反映瓦斯常态渗流,导气通道以原生裂隙为主,煤层压力处于弹性阶段前期,采面超前区段处于前次来压的峰后期,矿压处于卸压、稳压或少量增压状态,压力峰值已前移;第 2 阶段,气流瓦斯浓度持续 48 min 的稳定降低,反映回采推进,顶板悬臂加长,采动应力峰值增大,传递到底板卸压区,在残余构造应力和采动应力水平分量作用下,底板发生挠曲-对煤层施压-导气通道闭合-瓦斯减速稳态渗流-瓦斯低值异常涌出过程. $M_L 0.3$ 级的底板深部冲击证明了底板来压过程的存在,但由于

震源处于底板深部,冲击能量又较低,并未立即改变煤层压力和裂隙状态,开采继续推进,采动应力增强,但时间较短,没有充分时间使采动应力向前转移,对原承压煤层部位继续加压,处于弹性阶段后期,持续压密导气裂隙;第3阶段,有近20 min的气流瓦斯浓度不稳定回升,反映煤层内新生导气裂隙产生,瓦斯非稳态快速恢复渗流和涌出过程,说明煤层承压产生了塑性扩容,同时底板冲击应力波作用于煤层产生了效果,使煤层达到了临界灾变应力-应变条件;第4阶段,瓦斯异常涌出灾变,反映支撑压力区煤层在采动应力静压、水平构造应力和底板冲击动压联合作用下的快速破裂失稳—导气通道打通—瓦斯非稳态增速渗流—高值异常涌出灾变过程,如果第2、3阶段有充足的时间,使采动应力向前转移,也可能不会演变到第4阶段的灾变。该矿大量类似案例显示,正常通风条件下,气流瓦斯浓度持续降低,极大概率随后发生瓦斯异常涌出或复合冲击地压。但反之,发生瓦斯异常涌出或冲击地压复合的瓦斯异常涌出,不一定都能观测到瓦斯低值异常涌出过程。冲击能量较低、震源距较大时,诱发瓦斯灾变的延迟时间较长,而冲击能量较高、震源距较小时,诱发瓦斯灾变的延迟时间较短。分析灾变与瓦斯低值异常涌出过程持续的时间长短也有关,持续时间越长,说明受压致密的时间越长,密闭煤层中富集的游离瓦斯越多,后期发生瓦斯高值异常涌出灾变的概率越高,瓦斯涌出量越大。

本文持续跟踪调查表明,此类情况除在抚顺煤田多见外,平顶山煤田某矿^[11]、新安煤田某矿^[12]和淮北海孜井田也曾发生过此类灾变,并非偶然和随机现象。

2 承压煤样低气压灾变物理试验与分析

模拟煤巷掘进头和采面中部煤层的单自由度边界和受力条件,通过对含低气压煤样加压,考察灾变全程应力、声发射、渗流场演化特征,从物理试验角度认识受载煤样低气压灾变的成因机制。

2.1 试验条件

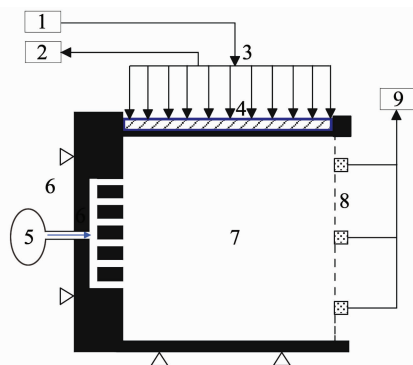
试验装置由岩石力学伺服试验机、双向加载渗透性试验装置、声发射系统、气体质量流量计、高精度压力传感器、静态电阻应变仪等构成。

选取原煤试样,力图保持煤的原始结构和孔隙、裂隙状态。煤样取自平顶山煤田已₁₅₋₁₆突出煤层中的偏硬层,坚固性系数 $f=0.65$,加工成精度满足岩石力学试验要求的 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 规格立方体大试样。

试验目的是考察承压煤样气-固耦合作用下瓦

斯渗流物理过程。考虑到甲烷和氮气吸附具有相似性^[13],且在低气压、常温、短时间(20 min)、块体原煤试样条件下,甲烷吸附作用有限,加之安全因素考量,试验气体选为0.4 MPa恒压氮气(N_2)。

如图2所示,在煤样顶部不渗透边界施加竖向压载(图中4)。法向一侧面密封刚性被动约束,经透气板施加恒压氮气供渗流(图中6),同轴另一侧面为可渗透自由边界(图中8)。法向正交另两侧面和底面密封刚性被动约束。这与背景工程煤巷掘进头和采面中部煤层的单自由度约束、受力和瓦斯条件完全一致。



1. 加压控制系统; 2. 采集控制系统; 3. 载荷; 4. 不渗透承压板; 5. 供气、控制及采集系统; 6. 不渗透支架及供气透气板; 7. 试样; 8. 可渗透自由边界及声发射传感器; 9. 声发射放大与数据采集系统

图2 物理试验加载和边界条件

Fig. 2 Loading and boundary conditions of physical experiments

当声发射计数达到显著峰值,煤样自由表面产生大量宏观裂缝,有碎块脱落,气流渗透显著加快,甚至气体伴有煤粒喷出,判定为发生灾变,终止试验。

2.2 结果分析

2.2.1 渗透率计算

渗透率服从 Darcy 定律为

$$q = -\frac{k}{\mu} \cdot \frac{dp}{dx} \quad (1)$$

式中: q 为流速; k 为渗透率; μ 为动力黏度系数(氮气取 $0.176 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}$); p 为气体压力。

dp/dx 为压力梯度,用 G_p 表示。由式(1)得渗透率表达式为

$$k = \frac{q\mu}{G_p}$$

试验中实测气体的瞬时流速,采用不同时间段的压力梯度变化,计算得到各时段煤样的渗透系数。

2.2.2 低气压渗流与灾变试验结果分析

低气压渗流与灾变过程显示出4个特征阶段,如图3所示。

1) 原生裂隙常速稳态渗流阶段. 压应力加载到 1.1 MPa 时, 通过透气板施加 0.4 MPa 恒压氮气. 加载到 1.3 MPa 弹性下限 (特征点 A), 出现一次显著应力降, 分析为取样卸载加工过程的裂隙受压闭合. 加气初期, 渗透率经躁动后趋于饱和平衡, 归于常态. 大致在前 40% 弹性阶段 (图 3 中第 1 阶段), 声发射事件数和计数较少, 气体沿原生裂隙呈相对恒速稳态渗流, 将其作为一个初始常速与后期进行对比, 为自由端气体普通涌出提供相对稳定的渗流通道.

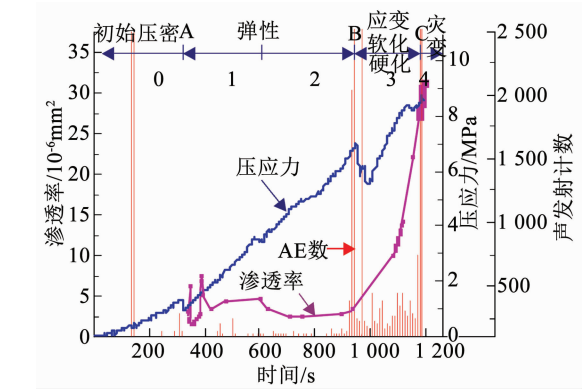


图3 渗流灾变试验综合成果图

Fig. 3 Comprehensive results of gas seepage developing to disaster experiments

2) 原生裂隙压密减速稳态渗流. 在后 60% 弹性阶段, 声发射事件数和计数仍较少, 气体渗透率显著持续降低, 减速稳态渗流, 煤样自由端仍未见显著变化, 表明原生裂隙显著压密, 气流通变道变小, 气体产生低值异常涌出.

3) 扩容新生裂隙增速非稳态渗流. 加载到 7.0 MPa 弹性上限或屈服点 (特征点 B), 声发射事件数和计数出现显著高峰, 再次出现显著应力降, 大体为该组煤样的单轴无侧限抗压强度. 因本试验 5 个面有约束, 因此, 煤样屈服强度软化后, 又继续压密, 表现为压密应变强度硬化. 气体呈增速非稳态渗流, 指示内部新生导气裂隙产生, 之后声发射事件数持续处于较高水平, 煤样自由端表面产生显著宏观裂纹, 并有溢出气感, 说明煤样新生裂隙不稳定发展.

4) 宏观裂隙气体非稳态渗流灾变. 继续加载到 8.7 MPa, 达到本试验边界条件的极限破坏荷载 (特征点 C), 声发射计数达到全程最高峰, 煤样自由端表面产生大量宏观裂缝, 有碎块脱落和声响, 气体伴有煤粒喷出, 判定为发生灾变, 停止试验.

综上所述, 含 0.4 MPa 氮气煤样, 在单自由度边界条件下施加单向压载, 渗透率经历了常速稳态渗流、减速稳态渗流、增速非稳态渗流、灾变异常涌出过程, 渗透率并非受加载作用单调下降过程. 这与

一些学者观察到的现象有所不同, 例如: Alexis 等^[14]得出, 有效应力与渗透率呈负相关. Geng 等^[15]得出, 煤的孔隙度和渗透率随有效应力的增加呈指数下降. 可能与他们的三轴加载和边界条件有关. 而 Alam 等^[16]得出, 相对软的岩石, 轴向压缩下的渗透率单调下降, 主要是由于孔隙闭合; 硬岩随着轴向应力增加, 渗透率先下降, 然后再增加, 然后保持在峰值后的一个近乎恒定值, 主要是由于新破裂面的形成. 本文的结果表现出文献^[16]观察到的硬岩渗流特征, 分析是单自由度边界加载条件下, 煤样应变硬化的原因.

单自由度边界条件下, 承压煤样屈服后发生强度软化—压密强度硬化—继续表现为弹性的现象, 从而可以积累超出煤样单轴压载积累的应变能力, 煤样破坏后的剩余能量, 可以搬运煤样做功, 发生冲击失稳, 诱导气体喷出. 现场掘进头和采面中部相当于单自由度边界条件, 可能是突出软煤发生冲击灾变的主要原因.

3 承压煤样低气压灾变数值试验与分析

应用离散元数值分析技术, 模拟煤巷掘进头和采面中部煤层相似的单自由度边界和受力条件, 建立数值计算模型. 通过对煤岩施压过程施加恒压气体渗流, 考察灾变全程相关的物理场气-固耦合演化特征, 从数值试验角度揭示受载煤样低气压灾变的过程与成因机制.

3.1 数值分析模型

使用 UDEC6.0 离散元数值分析软件, 构建几何尺寸高 2 m、宽 1 m 的数值分析模型. 岩层划分为 3 层, 中间为厚度 1.2 m 的煤, 上、下各为 0.4 m 厚度砂岩, 起到上、下夹持边界作用. 岩层节理网格剖分为砌砖形状, 离散成三角形单元.

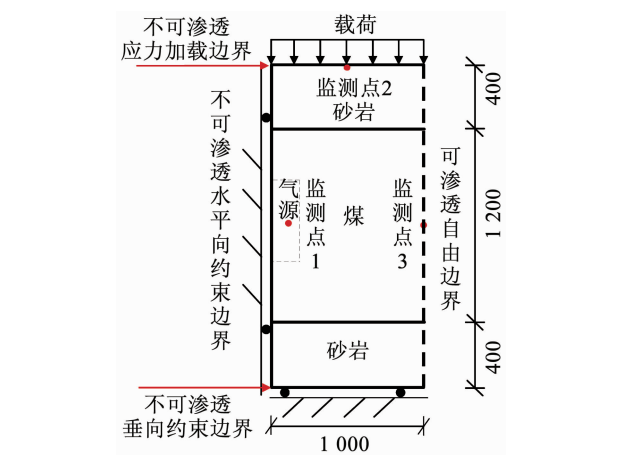


图4 数值试验模型与边界条件

Fig. 4 Model and boundary conditions of discrete element numerical experiments

模型上边界为不可渗透应力边界,容许水平和竖向移动,初始施加相当于大气压力的 0.1 MPa 压力;下边界为不可渗透垂向速度约束,容许水平向移动;左边界为不可渗透水平向速度约束,容许竖向移动;右边界为可渗透自由边界,施加 0.1 MPa 初始大气压力,容许水平向和竖向移动. 这与背景工程煤巷掘进头和采面中部煤层的单自由度边界、受力和瓦

斯条件完全一致.

在模型顶边界中部设置监测点 1,监测应力加载情况;在预计加气位置设监测点 2,监测气体压力加载情况;在左边界设置一组监测点 3,监测气流压力、流速和煤的水平位移速率,判断灾变.

岩石块体和节理物理力学参数根据实验室测定的结果计算得出,见表 1.

表 1 岩体物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of rock mass

参数	密度 /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模量 /GPa	切边模量 /GPa	法向刚度 /GPa	切向刚度 /GPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)	抗拉强度 /MPa
煤块体	1 308	4. 13	1. 69			1. 0	23. 0	0. 5
煤节理				10. 0	10. 0	0. 2	5. 0	0. 2
砂岩块体	2 778	13. 33	6. 51			6. 0	36. 0	3. 0
砂岩节理				98. 5	98. 5	1. 0	30. 0	0. 5

块体本构模型选用摩尔-库仑塑性模型,节理关系采用面-面接触库仑滑移模型.

气体选择无黏性气体,采用稳态流计算模型. 每个节点按压差计算的流速乘以流体时间步长的代数和,为流入域中的流体体积为

$$V_f = \sum q \Delta t_f.$$

式中: V_f 为流体体积; t_f 为流体时步; q 为流体流速.

程序并不把这一体积立即转化成岩石位移,而是将过剩的流体储存在附于该区域上的虚拟“气囊”中,按程序内置的方程(2)耦合渗流为

$$P_1 = P_0 + F_p (\Delta V_s - \Delta V_d). \tag{2}$$

式中: P_0 、 P_1 分别为前、后力时步的域压力; ΔV_s 为最初储于虚拟气囊中的体积; ΔV_d 为域的体积增量; F_p 是常数因子.

在模型顶边界用位移速率形式匀速施加压载. 为保持试样初期不受施加气体压力作用产生水平位移,压力加到 1.0 MPa 左右,在模型左侧煤样中部(x 0, 0. 25; y 0. 8, 1. 2)开始施加 0. 4 MPa 气压,全程恒压,每 10 计算时步记录 1 个历史记录.

试验过程注意观察监测点 3,当气流压力明显高于大气压力,流速明显加快,煤的水平位移速率明显加快,煤样内部产生劈裂张开,判断灾变发生,终止试验.

3.2 数值试验分析

试验结果显示出低气压渗流与灾变过程呈现出与物理试验相似的 4 个特征阶段.

1)气体常速稳态渗流阶段. 在前 28% 弹性阶段(图 5、6 中第 1 阶段),自由边界监测到的气体压力和流速躁动饱和后均在一个相对较高水平渗流,将其作为常速与后期对比,相当于气体普通涌出,岩

体水平位移速率平稳增加.

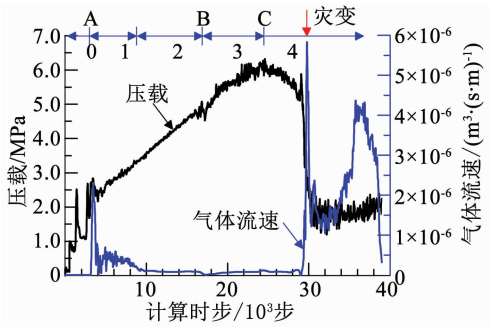


图 5 应力-气体流速演化关系

Fig. 5 Evolution diagram of stress-gas flow velocity

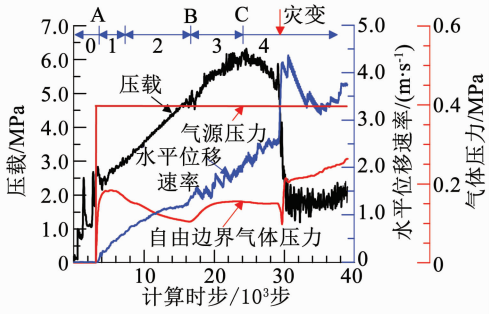


图 6 应力-气体压力-位移速率演化关系

Fig. 6 Evolution diagram of stress-gas pressure-displacement rate

2) 气体减速稳态渗流. 在后 72% 弹性阶段(图 5、6 中第 2 阶段),自由边界监测到的气体压力和流速均在一个相对较低水平呈相对恒速稳态渗流,在弹性极限达到最低值,相当于气体低值异常涌出,岩体水平位移速率平稳增加.

3) 气体增速非稳态渗流. 进入塑性阶段(图 5、6 中第 3 阶段),自由边界监测到的气体压力升高明显,流速也有升高但不甚显著,趋于恢复常速稳态渗

流状态,岩体水平位移速率无大变化,但出现躁动.气源处的煤开始被气压劈裂拉开(如图7(a)所示).

4) 气体非稳态渗流灾变. 与物理试验相比,灾变不是出现在极限荷载处,而是在峰后不久发生(图5、6中第4阶段). 自由边界监测到的气体流速急速增大,压力最高达到0.24 MPa,是大气压的2.4倍,可以发生喷出效果. 气源处煤被劈裂持续拉开,自由边界产生显著位移,岩体水平位移速率出现一次快速增量,判断产生了煤与气的灾变(见图7(b)).

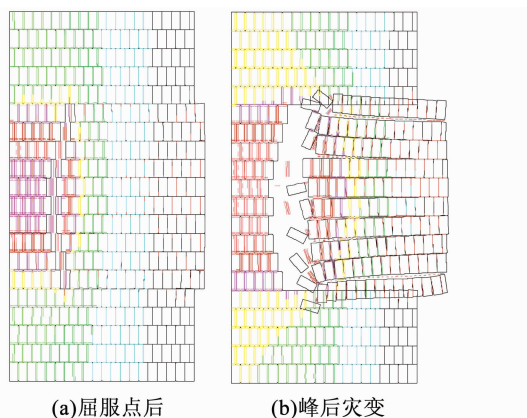


图7 煤体宏观裂隙启动和灾变图

Fig.7 Emergence and evolution of macro-cracks in coal mass

综上所述,含0.4 MPa 恒压气体煤岩,在单自由度边界条件下施加单向压载,与物理试验相似,也经历了常速稳态渗流、减速稳态渗流、增速非稳态渗流、灾变异常涌出的过程,但灾变点有延迟.

4 结 论

1) 工程案例、物理试验和数值试验获得了一致性较高的结果,0.4 MPa 气体压力条件,煤层承压过程应力-煤岩-气体耦合作用下,可以导致发生喷出气体和煤的灾变,在煤矿现场多表现为瓦斯异常涌出超限.

2) 灾变机理为:承压煤岩弹性变形前期,气体基本沿原生裂隙和孔隙呈常速稳态渗流;弹性变形后期,原生裂隙和孔隙被压密,气体呈减速稳态渗流;屈服阶段,扩容新生裂隙产生,气体呈加速非稳态渗流;达到极限荷载或峰后不久,封堵气体的煤墙破裂失稳,气体喷出灾变. 弹性阶段前后、期气体渗流速度改变的分界区间和成因,需通过后续进一步试验判定和认识.

3) 单自由度边界条件下,承压煤样发生屈服强度软化-压密强度硬化-继续表现为弹性的现象,从而可以积累超出煤样单轴压载积累的应变能,煤

样破坏有剩余能量,搬运煤样做功,发生冲击失稳,诱导气体喷出. 现场掘进头和采面中部相当于单自由度边界条件,可能是突出软煤发生冲击灾变的主要原因.

4) 正常通风条件下,气流瓦斯浓度持续降低,是发生瓦斯异常涌出的警示信息,应引起高度重视. 掘进工作面 T_1 瓦斯传感器对此项指标比较敏感,回采工作面 T_0 、 T_1 瓦斯传感器对此项指标比较敏感,应重点监控这些部位. 监控的指标为低于正常涌出量的百分比和持续时间. 根据目前的认识,掘进、回采工作面的指标阈值不同,矿井、煤层、工作面条件对指标阈值也有影响,需要有足够多的分类案例对这两项指标阈值进行判定.

5) 以往煤矿高度重视煤与瓦斯突出. 在技术不断进步和管理不断规范情况下,煤与瓦斯突出灾害已得到卓有成效的遏制,但瓦斯异常涌出超限由于其机理没有得到认识,容易被忽视,它是瓦斯灾害的潜在灾源,应引起重视.

参考文献

- [1] 尹光志, 李文璞, 李铭辉, 等. 不同加卸载条件下含瓦斯煤力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(5): 891
YIN Guangzhi, LI Wenpu, LI Minghui, et al. Experimental study of mechanical properties of coal containing methane under different loading-unloading conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanical and Engineering, 2013, 32(5): 891. DOI:10.3969/j.issn.1000-6915.2013.05.006
- [2] 尹光志, 李文璞, 李铭辉, 等. 加卸载条件下原煤渗透率与有效应力的规律[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1497
YIN Guangzhi, LI Wenpu, LI Minghui, et al. Permeability properties and effective stress of raw coal under loading-unloading conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1497. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2014.9011
- [3] 李树刚, 赵鹏翔, 林海飞, 等. 煤岩瓦斯“固-气”耦合物理模拟相似材料特性实验研究[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 80
LI Shugang, ZHAO Pengxiang, LIN Haifei, et al. Study on character of physical simulation similar material of coal-rock and gas solid-gas coupling[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(1): 80. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0032
- [4] 康向涛, 尹光志, 黄滚, 等. 低透气性原煤瓦斯渗流各向异性试验研究[J]. 工程科学学报, 2015, 37(8): 971
KANG Xiangtao, YIN Guangzhi, HUANG Gun, et al. Experiment research on gas seepage anisotropy in low-permeability coal [J]. Chinese Journal of Engineering, 2015, 37(8): 971. DOI:10.13374/j.issn2095-9389.2015.08.001
- [5] 王浩, 尹光志, 张先萌, 等. 卸围压作用下煤岩破断及渗透特性[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 113
WANG Hao, YIN Guangzhi, ZHANG Xianmeng, et al. Study on relationship of raw coal deformation and permeability during unloading confining pressure tests [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S1): 113. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2014.0948

- [6]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
LI Wenxin, WANG Gang, DU Wenzhou, 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. DOI: 10.16285/j.rsm.2016.07.036
- [7]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
YIN Guangzhi, JIANG Changbao, WANG Weizhong, 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 Mechanical and Engineering, 2011, 30(1): 68
- [8]朱卓慧,冯涛,谢东海,等. 不同应力路径下含瓦斯煤渗透特性的实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 570
ZHU Zhuohui, FENG Tao, XIE Donghai, et al. Seepage property of coal containing gas under different paths in laboratory[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2012, 29(4): 570
- [9]祝捷,姜耀东,孟磊,等. 载荷作用下煤体变形与渗透性的相关性研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(6): 984
ZHU Jie, JIANG Yaodong, MENG Lei, et al. Pertinence study on deformation and permeability of coal containing methane during loading process[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(6): 984. DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2012.06.023
- [10]陈绍杰,陈举师,汲银凤,等. 煤层注水促抽瓦斯及其影响因素的数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(11): 87
CHEN Shaojie, CHEN Jushi, JI Yinfeng, et al. Numerical simulation of coal seam water infusion promoting methane drainage and its influence factors [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(11): 87. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201703016
- [11]张福旺,李铁. 深部开采复合型煤与瓦斯动力灾害的认识[J]. 中州煤炭, 2009(4): 73
ZHANG Fuwang, LI Tie. Cognizance on compound dynamic disaster of coal and gas in deep mining[J]. Zhongzhou Coal, 2009(4): 73. DOI:10.3969/j.issn.1003-0506.2009.04.037
- [12]李铁,梅婷婷,李国旗,等. “三软”煤层冲击地压诱导煤与瓦斯突出的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1283
LI Tie, MEI Tingting, LI Guoqi, et al. Mechanism study of coal and gas outburst induced by rockburst in “three-soft” coal seam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1283
- [13]杨程,齐金山,崔杏雨,等. A 型沸石/活性炭复合材料的制备及甲烷/氮气吸附分离性能[J]. 应用化学, 2018, 35(4): 462
YANG Cheng, QI Jinshan, CUI Xingyu, et al. Synthesis of zeolite a/activated carbon composite and CH₄/N₂ adsorption separation performance[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2018, 35(4): 462. DOI: 10.11944/j.issn.1000-0518.2018.04.170102
- [14]ALEXIS D A, KARPYN Z T, ERTEKIN T, et al. Fracture permeability and relative permeability of coal and their dependence on stress conditions[J]. Journal of Unconventional Oil and Gas Resources, 2015, 10: 1. DOI:10.1016/j.juogr.2015.02.001
- [15]GENG Yunguang, TANG Dazhen, XU Hao, et al. Experimental study on permeability stress sensitivity of reconstituted granular coal with different lithotypes[J]. Fuel, 2017, 202: 12. DOI:10.1016/j.fuel.2017.03.093
- [16]BADRUL ALAM A K M, NIIOKA M, FUJII Y, et al. Effects of confining pressure on the permeability of three rock types under compression[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2014, 65: 49. DOI:10.1016/j.ijmms.2013.11.006

(编辑 张 红)