

# 含瓦斯煤岩突出流变分析及电磁辐射监测技术

王云刚, 魏建平, 刘明举

(河南理工大学安全科学与工程学院, 河南焦作 454003)

**摘要:** 根据材料破坏的时间效应分析了煤岩流变破坏过程, 特别是煤岩体的蠕变破坏过程, 从理论上提出了控制煤岩灾害性蠕变破坏的方法。从能量转化的角度和流变假说, 分析了含瓦斯煤岩体流变耗能过程和突出过程中的能量关系, 得出电磁辐射综合反映了含瓦斯煤岩体的应力状态、瓦斯压力的大小和含瓦斯煤体突出的危险程度。讨论了非平衡态瓦斯在突出过程中对电磁辐射的影响。应用突出的电磁辐射技术对淮南两矿进行了测试, 得到的结果与实际情况一致。

**关键词:** 安全技术及工程; 安全监测技术; 时间效应; 含瓦斯煤岩流变; 蠕变特性; 电磁辐射

**中图分类号:** TD76      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1674-2850(2008)06-0378-6

## Rheological analysis of coal and gas outburst and its noncontact prediction technology

WANG Yungang, WEI Jianping, LIU Mingju

(School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003)

**Abstract:** According to the time effect of material failure, the paper has analyzed the rheologic damage process of coal or rock, and especially its creep characteristics. The method of controlling the catastrophic creep failure is proposed abstractly. Based on the transformation of energy and rheological explanation of outburst phenomena, the relationship between the rheological energy dissipation process of coal or rock containing gas and the energy transformation is analyzed. The amplitude and pulse number of electromagnetic emission(EME) reflect comprehensively the danger of coal outburst before working faces. The effect of non-equilibrium gas on EME is discussed in the gas outburst process. Eventually, the EME monitor gets satisfied results in application.

**Key words:** safety technology and engineering; safety monitoring technology; time effect; coal or rock containing gas rheology; creep characteristics; EME

## 0 引言

煤矿灾害, 瓦斯为首。含瓦斯煤岩突出(以下简称突出)是煤矿井下最严重的自然灾害之一, 它是煤矿井下含瓦斯煤岩体以大部分煤岩呈粉碎状从煤岩层中向采掘空间急剧运动并伴随大量瓦斯喷出的一种强烈的动力过程。突出的发生给煤矿安全生产特别是井下工作人员的生命财产安全造成极其严重的威胁<sup>[1]</sup>。

目前, 工作面突出危险预测方法主要有钻屑量法、钻孔瓦斯涌出初速度法、钻屑瓦斯解吸指标法及其它综合指标法, 这些都是静态方法, 是通过钻孔来实现的, 故又称为钻孔法。采用这些方法使突出预测取得了一定的成果。然而, 这些方法在预测时取得的结果是静态的, 而含瓦斯煤岩体处于动态变化之中, 延期突出就是例证<sup>[2]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金 (50504008)

**作者简介:** 王云刚 (1978—), 男, 讲师, 主要研究方向: 矿山煤岩动力灾害监测, E-mail: cumtwyg@163.com

一般情况下，煤层比其它岩层的强度低，在目前开采深度条件下，煤层具有很强的流变性，特别是那些具有突出危险的煤层。随着矿井开采向更深的水平延伸，原岩地应力和瓦斯压力都会增强，地下硐室开挖后，煤岩体的地应力调整和变形破坏、采掘空间位移现象的时间效应表现得更为显著，流变已成为深矿井巷道变形的主要特征。同时，瓦斯压力对煤岩产生的膨胀力对地应力存在反作用。在采掘过程中，由于吸附瓦斯的解吸性，瓦斯压力对煤岩的“蚀损”作用随时间发生着动态变化。

因此，深入研究含瓦斯煤岩的流变破坏过程以及突出过程中能量耗散关系，对揭示突出机理和预测、预报突出具有重要的理论和现实意义。

## 1 煤岩流变破坏分析

### 1.1 材料破坏的时间效应

根据显微观察和损伤理论，煤岩的破坏要经历微裂纹的萌生、发育、成核等一系列演化过程。引入似化学平衡法，将晶体中有序—无序转化过程和缺陷的生成过程模拟为一个类化学反应<sup>[3]</sup>。根据阿累尼乌斯方程和过渡理论，当材料受到外力  $F$  时，可得到材料的寿命为

$$t = t_0 \exp\left[\frac{U_0 - \gamma F}{kT}\right] \quad (1)$$

其中， $U_0$  为活化能， $T$  为物体绝对温度， $k$  为玻尔兹曼常数， $\gamma$  为材料力学特征参数， $F$  为指数前因子或频率因子。

上式是由 ZHURKOV<sup>[4]</sup> 于 1965 年导出的，其中， $t_0$  为固体内原子自激振动的周期， $t_0 \approx 10^{-13}$  s。其后的一系列实验遍及各种材料，结果表明，该公式对各种材料（包括岩石）都可以满足<sup>[5]</sup>。

### 1.2 煤岩的蠕变特性

大量的现场实际现象和观测结果表明<sup>[6]</sup>，煤岩具有明显的蠕变性质，且除其它因素外，煤岩体的应力和变形状态与时间因素亦密切相关。而且受矿井开采破坏影响的煤岩体，其变形是在采掘后开始出现的，而最终变形却是在经过一段时间之后才能达到的。要理解这种现象，只能立足于煤岩的蠕变性质这一基础。

对于流变力学研究范围而言，可把煤岩在长时间恒载作用下的蠕变特性进一步归纳为两种：衰减蠕变和非衰减蠕变，分别如图 1、图 2 所示。在这两种情况下，总变形等于受载荷后立即发生的相对瞬时变形与随时间发展的变形之和，即

$$\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon(t) \quad (2)$$

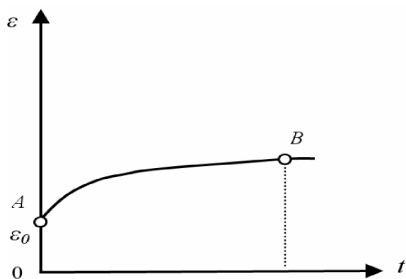


图1 衰减蠕变

Fig.1 Attenuation creep curve of coal or rock

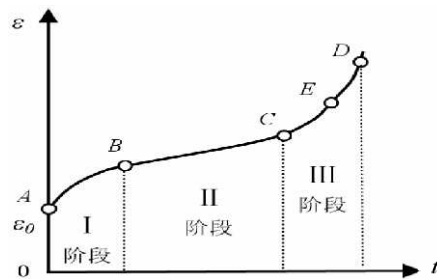


图2 非衰减蠕变

Fig.2 Non-attenuation creep curve of coal or rock

在较低应力水平作用下，衰减蠕变的过程如图 1 中 AB 所示，变形  $\epsilon(t)$  以减速发展，速度最后趋向于零，即  $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$ 。相应地，变形  $\epsilon(t)$  趋向于与载荷值相关的某一有限值。

在较高应力水平作用下,非衰减蠕变除发生相对瞬时变形外,还包括三个阶段(如图2所示):I为瞬时蠕变阶段,即不稳定蠕变(AB段);II为变形稳定发展阶段(BC段);III为变形加速发展直至破坏阶段(CD段)。I阶段对应衰减蠕变,应变速率由大逐渐减小,蠕变曲线上凸,即 $\dot{\epsilon}' < 0, \dot{\epsilon} > 0$ ; II阶段对应等速蠕变,应变速率近似为常数或为零,蠕变曲线为直线,即 $\dot{\epsilon}' = 0, \dot{\epsilon} = const$ ; III阶段为加速蠕变,应变速率逐渐增加,蠕变曲线下凹,即 $\dot{\epsilon}' > 0, \dot{\epsilon} > 0$ 。

严格地讲,第III阶段可分成两段<sup>[7]</sup>:发展着的塑性变形但还未引起介质破坏的第一阶段(CE段)和微裂隙强烈发展并导致破坏的崩溃性急剧变形的第二阶段(ED段)。引进这种区分原则是合理的,因为某些煤岩在上述第一阶段可能发展很长时间,而不失去它们的承载能力。

由非衰减蠕变曲线可知,为了控制含瓦斯煤岩的灾害性破坏,应该尽可能使其处于变形稳定发展的第II阶段,或通过二次支护使第II阶段的时间延展以使其退化到非衰减蠕变的第I阶段或衰减蠕变,这样便能满足安全生产的需要。

## 2 突出流变假说的能量分析

瓦斯突出的能量理论最早认为是因煤岩体被破坏而造成的,由前苏联的霍多特提出。文献[8]以Dirichlet能量最小原理作为煤岩失稳突出判据分析了含瓦斯煤失稳突出条件,得出煤体变形失稳不是发生在应力的最大峰值,而是发生在过了峰值之后的区域内。

研究表明,突出的能量来自煤岩的弹性变形能和瓦斯膨胀能,且主要来自瓦斯膨胀能(瓦斯内能要比煤体的变形能大1~3个数量级)<sup>[9]</sup>。瓦斯膨胀做功的能量来源是瓦斯和煤的内能,且以煤的内能为主(比例为99.34%)。含瓦斯煤岩体能否突出,不仅要看瓦斯膨胀过程中能做多少功,更重要的是看瓦斯是否具备膨胀做功的外在环境条件,这些膨胀功能以多大的速度释放出来。

流变假说<sup>[7]</sup>把突出过程从时间上划分为四个阶段,即准备阶段、发动阶段、发展阶段和结束阶段。对于突出的预测、预报就是要在突出发生之前对含瓦斯煤岩体所处的动力灾害危险程度做出判断,即在突出发生的前两个阶段对其危险程度做出判断,并采取适当的措施进行防突。当 $\sigma_1 \sim \sigma_3$ 大于屈服值时,含瓦斯煤体的蠕变产生3个阶段,突出的准备阶段对应于流变的第二阶段;突出的发动阶段对应于流变的第三阶段,这一转变过程的快慢是划分瞬时突出和延时突出的标准。

突出是含瓦斯煤体快速蠕变并发生破坏的一种物理学过程,是典型的不可逆耗能过程。从能量转化角度考虑,对含瓦斯煤岩体流变耗能过程可建立起如下能量平衡方程<sup>[7]</sup>

$$\dot{K} + \dot{U} = \dot{W} + \dot{Q} - \dot{I} \quad (3)$$

式中, $\dot{K}$ 、 $\dot{U}$ 、 $\dot{Q}$ 、 $\dot{I}$ 分别为含瓦斯煤岩的动能、内能、热能、表面能含量变化率; $\dot{W}$ 为力作用于物体所做功的功率。在突出发生前的两个阶段,含瓦斯煤岩体以各种形式耗散自外界获得的能量和自身储备的能量,电磁辐射就是一种重要的能量辐射形式<sup>[10~13]</sup>。

大量研究表明<sup>[2,10~13]</sup>,电磁辐射及煤的应力状态与瓦斯状态有关,应力、瓦斯压力梯度越大,突出危险性就越大,电磁辐射强度就越强,电磁辐射脉冲数就越大。因此,电磁辐射强度和脉冲数两个参数综合反映了含瓦斯煤岩体的应力状态,瓦斯压力的大小和含瓦斯煤岩体突出的危险程度。

## 3 瓦斯在突出中的作用

从另一个角度来说,突出是瓦斯在煤体中的解吸、扩散、对流、渗流与煤体变形相耦合的动力学问题,其本质上是瓦斯在采动煤岩体中渗流运动的失稳。从宏观角度来讲,非平衡态瓦斯产生瓦斯压力梯度,形成渗流在煤体内产生拉伸并导致煤的破坏,这必然会产生电磁辐射。如果地应力梯度或瓦斯压力梯度较高,会引起突出。而在开采卸压过程中,瓦斯解吸和相变,引发孔隙压力增强,也是煤与瓦斯突出的重要触发条件<sup>[14]</sup>。我国规定煤层瓦斯压力达到0.74 MPa时,即为突出危险煤层。突出

发生后，瓦斯对突出能否连续具有决定性作用。另外，煤岩这种多孔材料具有非线性渗透特性，形成了气体非 Darcy 渗流系统，当在  $\pi_1=0$  处时发生跨临界 Hopf 分岔；在  $\pi_2=0$  处时发生切分岔；在  $\pi_1 < 0$  或  $\pi_2 < 0$  时，气体非 Darcy 渗流系统失稳，引发瓦斯突出灾害<sup>[15]</sup>。

从微观角度来讲<sup>[6]</sup>，瓦斯分子进入到微裂隙以后以固溶体的形式停留下来且不易脱附。吸附瓦斯使电荷分离现象减弱，并削弱了壁面间分子引力，使煤的强度降低。当瓦斯压力较高，瓦斯的能量高于煤分子（或原子）间的键能时，瓦斯分子能够楔开并进入到与瓦斯气体分子直径相当的煤物质大分子（或芳香层）之间，瓦斯在煤体内的流动形成了波动流动电势，它对电磁辐射会产生影响。

## 4 突出电磁辐射监测技术及应用

煤岩流变破坏电磁辐射信号是煤岩体变形破裂过程的能量释放现象，其不仅在煤岩体结构发生损伤破坏时产生，而且在受载变形、滑移摩擦时亦有可能产生电磁辐射。在煤岩受载变形煤岩微元体发生损伤破坏时电磁辐射信号是最强烈的。

### 4.1 突出电磁辐射监测技术

目前，含瓦斯煤岩突出电磁辐射的监测仪器有 KBD5 型便携式监测仪，其操作比较简单，可进行短时移动监测。这种监测技术适合于监测灾害危险范围大的地点，如采煤工作面。实际操作中，可按一定的距离间隔对可能发生灾害的地点分别进行多点短时监测，也可以在同一地点进行长时连续监测，连续监测时间可达 8 个小时。

典型的采煤工作面或巷道短时移动电磁辐射监测方式布置示意图如图 3 所示。

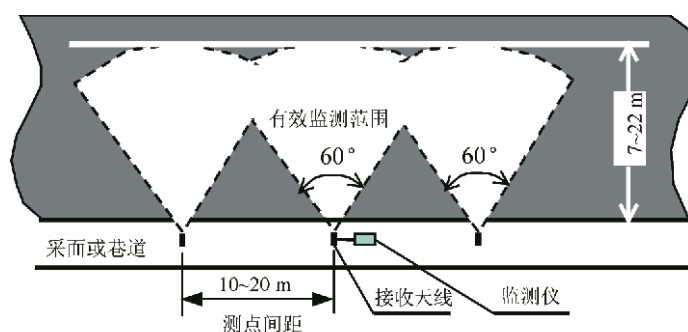


图 3 采面或巷道短时移动监测布置方式示意图

Fig. 3 The mobile monitoring arrangement sketch of mining face or laneway

该项技术是由中国矿业大学何学秋教授、王恩元教授等提出并推广应用的，是基于含瓦斯煤岩流变破坏机理和煤岩破裂电磁辐射效应理论的物理探测法，具有测试时间短、预测工作量小、不影响采掘工作面的高效生产的特点，可实现采掘工作面前方煤岩体突出危险性的动态连续预测和远程监测，反映的信息是工作面前方的空间综合信息，避免了只反映点信息的常规指标预测法的不足。

### 4.2 突出电磁辐射监测技术的应用

该项技术的测试指标主要有电磁辐射强度和电磁脉冲数。2005 年，笔者在淮南潘三和谢一矿分别进行了电磁辐射监测，测试结果如图 4、图 5 所示。

由图 4 可知，淮南潘三矿 10 月 8 日夜班 2:00~3:00 常规效检超限，此时的电磁辐射指标明显增大，与常规指标变化趋势非常一致。

图 5 表示了淮南谢一矿石门揭煤过程中电磁辐射与煤层瓦斯压力的变化曲线。9 月 29 日开始放炮进尺，随着掘进工作面向前推进，煤层瓦斯压力和电磁辐射呈同样趋势变化，说明电磁辐射能够反映煤体内瓦斯压力和煤体应力的变化趋势。

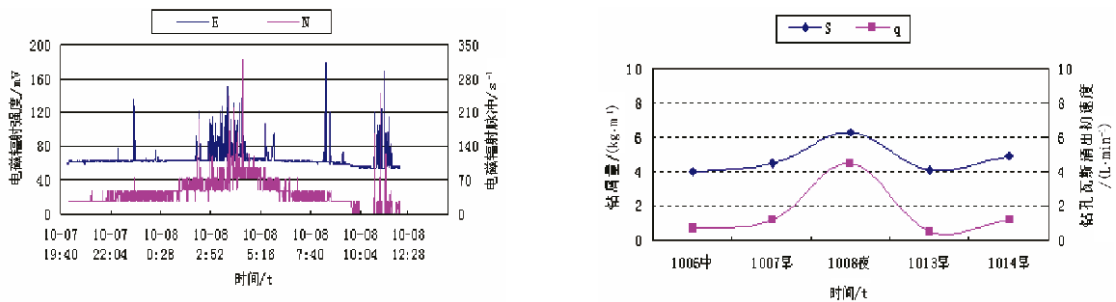


图4 淮南潘三矿电磁辐射与常规指标对比图

Fig. 4 The contrast diagram between the EME and conversional indexes in Pansan coal mine

经现场实践检验,电磁辐射监测技术实现了真正的非接触,无需打钻,不受传感器与煤岩体的接触程度影响,同时,实现了定向接收,且受监测区域外围环境干扰较小。因此,电磁辐射法预测煤与瓦斯突出是一种很有发展前途的地球物理方法,在现场推广使用必将产生巨大的经济效益和社会效益。

### 5 结论

- 1) 由显微观察和损伤理论可知,任何材料(包括煤岩)的破坏都存在时间效应;
- 2) 通过分析煤岩破坏的蠕变特性,从理论上提出了控制煤岩灾害性破坏的方法;
- 3) 从能量转化角度,应用突出流变假说分析了煤岩流变过程与突出的耗能关系,并提出了电磁辐射技术预测突出的方法;
- 4) 从宏观角度和微观角度研究了瓦斯在突出过程中的作用;
- 5) 采用突出的电磁辐射预测技术对淮南潘三煤层和谢一矿石门揭煤进行监测,得到了满意的效果。

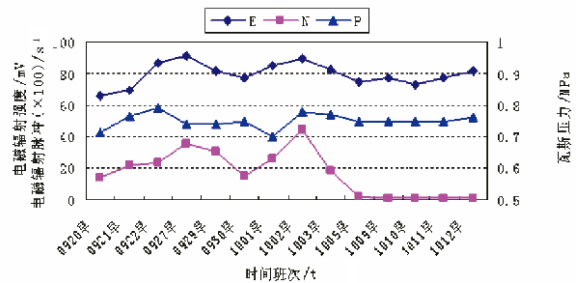


图5 淮南谢一矿石门揭煤过程中电磁辐射与煤层瓦斯压力曲线图

Fig. 5 The curve diagram between the EME and gas pressure of cross-measure cutting coal in Xieyi coal mine

### [参考文献] (References)

[1] 何学秋,王恩元,聂百胜,等.煤岩流变电磁动力学[M].北京:科学出版社,2003.  
HE X Q, WANG E Y, NIE B S, et al. Rheology electro-magnetic dynamics of coal or rock[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)

[2] 王恩元,何学秋,聂百胜,等.电磁辐射法预测煤与瓦斯突出原理[J].中国矿业大学学报,2000,29(3):225~229.  
WANG E Y, HE X Q, NIE B S, et al. Principle of predicting coal and gas outburst using electromagnetic emission [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(3): 225~229. (in Chinese)

[3] JAEGER J C, COOK G W. Fundamentals of rock mechanics (Third Edition)[Z]. London: Chapman and Hall, 1979.

[4] 郑哲敏.从数量级和量纲分析看煤和瓦斯突出的机理[A].郑哲敏.郑哲敏文集[C].北京:科学出版社,2004. 380~392.  
ZHENG Z M. A preliminary study of gas bursts[A], ZHENG Z M. Collected Works of ZHENG Z M[C]. Beijing:

- Science Press, 2004. 380~392. (in Chinese)
- [5] 唐有祺. 统计力学及其在物理化学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1979.  
TANG Y Q. Statistical mechanics and its application in physical chemistry[M]. Beijing: Science Press, 1979. (in Chinese)
- [6] 何学秋, 刘明举. 含瓦斯煤岩破坏电磁动力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.  
HE X Q, LIU M J. Fracture elector-magnetic dynamics of coal or rock containing gas[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1995. (in Chinese)
- [7] 何学秋. 含瓦斯煤岩流变动力学[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1995.  
HE X Q. Rheological dynamics of coal or rock containing gas[M]. Xuzhou: China University of Mining & Technology Press, 1995. (in Chinese)
- [8] 张国民, 傅征祥, 桂燮泰, 等. 地震预报引论[M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
ZHANG G M, FU Z X, GUI X T, et al. Introduction of earthquake prediction[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)
- [9] 景耀光. 煤与瓦斯突出时固态烃转化为气态烃的假说验证[J]. 矿业安全与环保, 2001, 28(增): 143.  
JING Y G. Hypothesis verification of solid hydrocarbon transforming gaseous hydrocarbon while coal and gas outburst[J]. Safety of Mining and Environment Protection, 2001, 28(Suppl.): 143. (in Chinese)
- [10] 何学秋, 周广来, 刘贞堂. 含瓦斯煤的能量耗散过程及突出非接触预测[J]. 煤炭科学技术, 1993, 21(12): 18~21.  
HE X Q, ZHOU G L, LIU Z T. Energy releasing process of coal containing gas and non-contact prediction of outburst[J]. Coal Science and Technology, 1993, 21(12): 18~21. (in Chinese)
- [11] BRADY B T, ROWELL G A. Laboratory investigation of the electrodynamic of rock fracture[J]. Nature, 1986(321): 488~492.
- [12] 王恩元, 何学秋. 煤岩变形破裂电磁辐射的实验研究[J]. 地球物理学报, 2000, 43(1): 131~137.  
WANG E Y, HE X Q. An expeimental study of the electromagnetic emission during the deformation and fracture of coal or rock[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43(1): 131~137. (in Chinese)
- [13] 王恩元, 何学秋, 刘贞堂, 等. 煤岩变形破裂电磁辐射规律及其应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(2): 35~39.  
WANG E Y, HE X Q, LIU Z T, et al. The regularity electromagnetic radiation of coal or rock under load and its application[J]. China Safety Science Journal, 2000, 10(2): 35~39. (in Chinese)
- [14] 张建博, 王红岩, 赵庆波. 中国煤层气地质[M]. 北京: 地质出版社, 2000.  
ZHANG J B, WANG H Y, ZHAO Q B. Coal bed gas geology in China[M]. Beijing: Geology Press, 2000. (in Chinese)
- [15] 缪协兴, 刘卫群, 陈占清. 采动岩体渗流理论[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
MIAO X X, LIU W Q, CHEN Z Q. Rock mass under mining seepage theory[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)