

文章编号:0253-9993(2010)12-1979-05

冲击地压形成过程中能量耗散特征研究

赵毅鑫^{1,2},姜耀东^{1,2},田素鹏^{1,2}

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室,北京 100083;2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘要:在非平衡热力学和耗散结构理论的基础上,研究了冲击地压孕育过程中“煤-围岩”系统能量耗散特征和系统内熵的变化,初步建立了基于非平衡态热力学的冲击地压失稳判断方法;采用 X 射线衍射、顺磁共振、扫描电镜、显微组分测定等实验手段,获得了冲击地压发生前后煤岩样的细观结构差异,探求了冲击地压孕育、发生过程中能量耗散细观特征。研究发现:冲击地压是煤岩体内能量的涨落达到一定值后出现的自组织现象,其孕育过程是煤岩储能和耗能竞争的过程,该过程中强烈的挤压和剪切力加强了煤微元环缩合作用和拼叠作用,使煤超前演化,并促使煤岩内宏观裂纹非稳定扩展,加速了能量耗散的物理和化学的不可逆过程。

关键词:冲击地压;能量耗散;非平衡热力学;细观结构

中图分类号:TD324.1 **文献标志码:**A

Investigation on the characteristics of energy dissipation in the preparation process of coal bumps

ZHAO Yi-xin^{1,2},JIANG Yao-dong^{1,2},TIAN Su-peng^{1,2}

(1. State Key Lab. of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China;2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology(Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract:Based on the theory of the non-equilibrium thermodynamic and energy dissipation assumptions, the energy conservation and dissipation process of the “coal-surrounding rock” system was analyzed. The variety of the system entropy and the development of the dissipation structure in the coal seam were studied. Furthermore, the method adopted to evaluate the stability of the system was developed. Based on the XRD, EPR, SEM tests and petrology analysis, the variation of the coal microstructures before and after the coal bumps was discussed. Investigation results show that the coal bumps will begin as the fluctuation of strain energy reaches a threshold, which is satisfied with the minimum entropy principle. Coal bump is a kind of self-organized phenomenon. In the preparation process of coal bumps, the coal rank will be increased by concentrated compressive and shearing stress and associated chemical and physical processes will occur.

Key words: coal bump; energy dissipation; thermodynamic; microstructure

冲击地压现象之所以复杂,主要是由于“煤-围岩”系统结构的复杂性、地质构造的不确定性、煤岩结构的非均质性、冲击地压影响因素的多样性以及冲击地压从孕育到产生所伴随的多种非线性过程的耦合性等造成的。研究表明:煤岩变形破坏实质是能量耗散与能量释放的综合结果,能量耗散诱发煤岩体损

伤,导致煤岩性质劣化或强度丧失;能量释放则是引发煤岩体突然破坏的内在因素。冲击地压孕育和产生正是井下煤、岩系统在变形过程中的一种稳定态积聚能量和非稳定态释放能量的非线性动力学过程,其非稳态释放能量主要表现出时间上非连续、空间上非均匀特征,即只有当煤岩体中能量释放速率大于消耗

收稿日期:2010-07-25 责任编辑:常琛

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2010CB226804);国家自然科学基金资助项目(50704034);中央高校基本科研业务专项资金项目;煤炭资源与安全开采国家重点实验室自主课题资助项目

作者简介:赵毅鑫(1977—),男,河北乐亭人,副教授。Tel:010-51734825, E-mail:zhaoyx@cumtb.edu.cn

能量速率,系统才发生非稳态破坏;在总释放量相同的条件下,如果能量释放集中在某一点或某几点上,则在这些点上积聚的弹性能以非稳态释放,进而形成冲击失稳^[1-2]。

本文针对冲击地压形成过程中的能量耗散特征进行分析,通过理论研究、现场调研和室内实验,研究了冲击地压孕育过程中的耗散结构特征,初步构建了基于非平衡热力学的冲击地压孕育模型和失稳判别准则,并结合对冲击地压发生前后煤岩样品的一系列细观实验,探讨了冲击地压发生过程中的能量耗散细观特征,该研究将有助于深入认识冲击地压孕育过程和发生机理。

1 冲击地压孕育过程的耗散结构特征

所谓耗散结构,是指在开放和远离平衡的条件下,在与外界环境交换物质和能量的过程中,通过能量耗散过程和内部的非线性动力学机制来形成或维持的宏观时空有序结构^[3]。宏观上,“煤-围岩”系统本身就是一个开放系统,巷道开挖或煤层开采促使该系统向远离平衡的非线性区发展,最终表现为“煤-围岩”系统储能的缓慢释放(如流变等)或突然释放(如冲击地压等)并伴随着系统内的各类能量耗散过程,因此,“煤-围岩”系统表现为一种耗散结构;微观上,煤岩内部随机分布的微观缺陷在外界扰动应力场作用下,从无序分布向有序发展,最终形成沿某一方位发展的宏观裂纹,进而导致煤岩破坏、失稳。在该过程中,热传导、体积元形状和位置的变化,塑性应变硬化等物理、化学的不可逆过程则是能量耗散的不同表现,因此煤岩微元亦表现为一种耗散结构。

无论是煤岩微元还是“煤-围岩”系统在外界开采扰动影响下,应力或应变能的集中均会促使其结构自由能升高,系统进入亚稳定状态,宏观上可表现为片帮、煤与顶底板间的黏滑、煤炮等,微观上则表现为煤岩内部裂纹汇聚、成核、稳定扩展等。随着能量积聚的深入,当结构自由能达到一定程度时,煤岩微元结构发生失稳,裂纹扩展速度大于裂纹闭合速度,系统进入不稳定状态,并最终跃进到另一新的稳定有序状态。然而,由于煤岩的非均质性及其“煤-围岩”系统的复杂性,使得不同区域、不同煤岩结构的能量积聚和耗散特征存在差异,即系统中不同区域或不同的煤岩微元之间存在着能量涨落(或能量变化量)不同。也就是说,煤岩开挖促使部分区域总体能量升高的同时,能量涨落也被相应放大,当这些区域的能量涨落超过系统动力失稳的临界值时,就会发生冲击失稳,即冲击地压的必要条件并非是宏观上能量累积到某

种程度,而是能量涨落达到某一水平。

基于上述观点,可以解释煤岩体缓慢变形和冲击失稳的能量差异。煤岩体的缓慢变形是能量缓慢释放的表征,能量的涨落变化也比较缓慢,能量分布较均匀,且耗散能量更多;而煤岩冲击失稳的孕育则是因煤岩储能和能量积聚、耗散局部化综合作用的结果,此过程耗散能量相对较少,而储能较多。在开挖扰动条件下,煤岩体内初始能量涨落迅速被放大,使得局部能量迅速达到失稳激活能量,在动力失稳激活能(用于冲击的自由能)的诱导下,原有煤体突然进入不稳定阶段,巷道附近煤层内部产生自组织失稳现象,具体过程如图1所示。

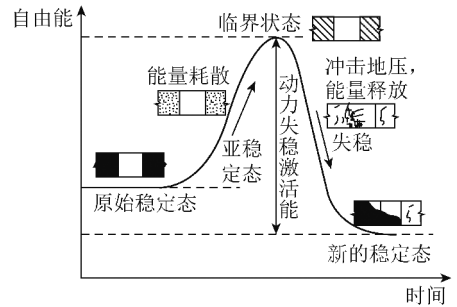


图1 冲击地压发生过程中能量的变化

Fig. 1 Different stages of free energy stored in the “coal-surrounding rock” system

同时,冲击地压孕育过程是一个不可逆热力学过程,能量的耗散也必然伴随着熵的产生。熵产生是“煤-围岩”系统内部有序和无序破坏与竞争的结果。对于开放系统,熵减小可使系统向有序的方向发展。降维和减熵过程的内涵表明系统的动态特征是一个从无序到有序的发展过程,说明系统的约束变得越来越强,即将表现出某种临界行为^[4]。

2 冲击地压孕育过程的非平衡热力学模型分析

从热力学和矿业工程的角度出发研究冲击地压产生过程,可将冲击地压孕育阶段分为:未受扰动阶段和开挖阶段。分析中考虑瓦斯存在,但瓦斯影响较小。

为了便于判断巷道开挖对巷道附近煤层的影响,按受开挖影响的大小及距巷道空间的远近,将煤层分为非平衡态的非线性区(I区)、非平衡态的线性区域(II区)和平衡态区(III区),如图2所示。

巷道未开挖时,在不考虑地质运动等因素的影响下,可认为煤层处于平衡态区;同时,假定煤中损伤对熵产生的贡献集中在弹性阶段,忽略塑性阶段损伤对熵产生的影响,并定义单轴压缩应力状态下损伤变量

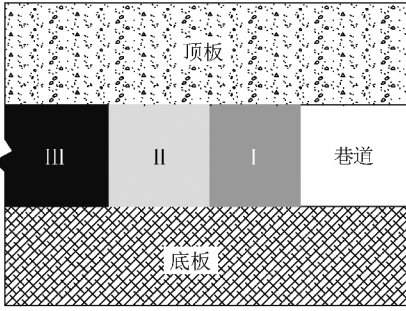


图 2 巷道附近煤层热力学区域划分示意

Fig. 2 The diagram of coal thermodynamic regions near roadway

为 $D, D = m\varepsilon^n$; 其中 m, n 为材料参数, ε 为轴向压应变。因此, 在平衡态, 稳定系统热力学过程满足热力学第二定律, 即 $\zeta \geq 0$, ζ 为单位体积煤体单元中产生熵的速率, 简称为熵产生, 其具体表达式^[5-6]为

$$\zeta = \mathbf{j}_q \cdot \nabla \left(\frac{1}{T} \right) + \frac{S}{T} : \boldsymbol{\varepsilon} + \frac{S}{T} : \boldsymbol{\omega} - \frac{R_\infty (1 - e^{-b\varepsilon^p})}{T} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p - \frac{2X_\infty \gamma \alpha_{ij}}{3T} \dot{\alpha}_{ij} - \frac{n\varepsilon^{n+1}}{2E\varepsilon_s^n D^2} \dot{\varepsilon} - \frac{A_r}{T} \omega_r \quad (1)$$

其中 \mathbf{j}_q 为通过煤体元的热流; T 为煤体元温度; S 为应力偏张量; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 和 $\boldsymbol{\omega}$ 分别为柯西应变张量和平均转动张量; R_∞ 和 b 为描述等向强化的参数; $\boldsymbol{\varepsilon}^p$ 和 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^p$ 分别为塑性应变张量及其随时间变化率; X_∞ 和 γ 为描述随动强化的参数; α_{ij} 和 $\dot{\alpha}_{ij}$ 分别为背应变张量及其随时间变化率; ε_s 为煤体材料参数, $\varepsilon_s = \frac{1}{\sqrt{m}}$; $\dot{\varepsilon}$ 为轴向压应变率; A_r 为化学反应的化学亲和势; ω_r 为化学反应速度; $\sum_r \frac{A_r}{T} \omega_r$ 为化学反应所产生的熵。

随着巷道的开挖, 靠近巷道空间的煤层进入非平衡态。从热力学角度, 假设非平衡态的线性区域是非平衡态的非线性区和平衡态的过渡阶段, 因此, 在巷道开挖初期, 巷道附近煤层内的热力学过程处于非平衡态的线性区域, 该过程系统的发展满足最小熵原理, 只有当 $\frac{d\zeta}{dt} < 0$ 时, 系统便偏离平衡定态, 发生失稳, 此时 $\zeta \geq 0$ 仍然成立。随着开挖对巷道附近煤层影响的加剧, 巷道附近煤层中的热力学过程又由非平衡态的线性区域进入到非平衡态的非线性区域。在该区域, 根据局域平衡假设和非平衡态非线性定态的稳定性理论, 巷道附近煤体的稳定性可以通过煤层内热力学过程中某一状态下超熵(熵的二级偏离)产生来判定; 同时, 在非平衡态非线性区域, 煤层内热力学过程发展满足 $\delta^2 s < 0$, 其中, s 是单位体积煤体单元的熵。此时, 系统的稳定性取决于煤体内动力学过程的

情况, 则当 $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \delta^2 s \right) > 0$ 时, 系统渐近稳定; 当 $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \delta^2 s \right) = 0$ 时, 系统处于临界稳定点, 在微小的扰动下, 即可失稳; 当 $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \delta^2 s \right) < 0$ 时, 系统处于不稳定状态, 其中, $\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} \delta^2 s \right)$ 为超熵产生或超熵强度。

巷道开挖过程中, 离巷道较远、受巷道开挖扰动影响较小的煤层区域仍可认为处于平衡态。而巷道附近煤体内热力学过程则进入非平衡发展阶段, 煤体变形破坏过程的稳定性可以通过其内部热力学过程发展的稳定性来判断。在巷道附近煤体内热力学过程符合线性非平衡态热力学的基本假设时, 当熵产生随时间的变化小于 0 时, 系统偏离稳定态; 而当煤体内热力学过程符合非线性非平衡态热力学的基本条件, 且超熵产生等于 0 时, 在微小扰动下, 系统即失稳; 而超熵产生小于 0 时, 系统则已进入失稳阶段。

3 冲击地压能量耗散细观特征的分析

冲击地压孕育过程始终伴随着能量积聚和能量耗散, 而系统自由能的增加是能量积聚和能量耗散过程竞争的结果。冲击地压孕育过程在宏观上体现为“煤-围岩”系统结构的变化, 在微观上表现为煤岩内缺陷数量、状态和分布的改变。而煤岩是对温度、压力等环境条件十分敏感的有机岩, 因此在冲击地压发生前后其必然记录了冲击地压孕育、发生的过程信息。探求煤体在冲击地压发生前后微观结构的改变有利于深入认识冲击地压孕育、发生过程, 并为冲击地压机理研究提供基础。

实验选用大同忻州窑煤矿 8727 工作面冲击地压灾害发生前后煤岩试样, 利用 X 射线衍射 (XRD)、顺磁共振 (EPR)、扫描电镜 (SEM)、显微组分测定等手段, 研究冲击地压发生前后煤岩样的细观结构变化, 分析冲击地压能量耗散的细观特征。冲击地压发生前后煤岩样的 XRD 测量结果如图 3 所示。

采用芳香层单层之间的距离 d_{002} (002 面网间距)、微晶的层片平均堆砌厚度 L_c 和芳香层片直径 L_a 作为煤的微晶参数, 并以 $\Delta L = (L_a - L_c) / L_c$ 或 L_a / L_c 为冲击倾向性细观评价指标对冲击前后煤岩样进行评价, 结果见表 1。实验发现: 冲击地压发生后煤芳香分子层片在 L_a 方向上的强烈拼接, 在 L_c 方向上紧密堆砌, 向石墨层状分子发展, 结果使煤分子间距缩小, 有利于自由基结合, 最终减少了煤的自由基浓度, 进而促使煤级的升高 (表 2)。 ΔL 的降低也说明冲击后

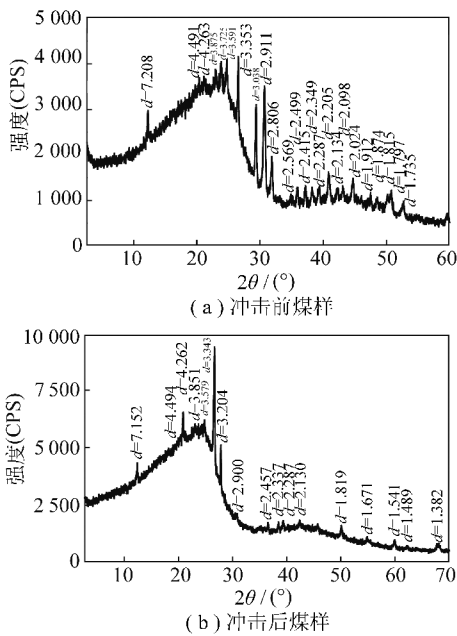


图 3 忻州窑煤矿冲击地压发生前后煤样的 X 射线衍射图
Fig. 3 The diffraction pattern of samples from Xinzhouyao Coal Mine before and after bumps

表 1 冲击地压发生前后煤样的 XRD 结构参数比较结果

Table 1 The comparison of XRD parameters of the coal samples before and after bumps

煤样编号	$2\theta_{002}/(^{\circ})$	β_{002}/rad	$2\theta_{100}/(^{\circ})$	β_{100}/rad	d_{002}/nm	L_c/nm	L_a/nm	L_a/L_c	$(L_a-L_c)/L_c$	备注
XZYCQ-1	22.1	0.241	43.4	0.258	0.402	0.613	1.183	1.930	0.930	冲击前样品
XZYCH-1	23.6	0.241	42.4	0.349	0.377	0.614	0.876	1.427	0.427	冲击后样品

表 2 冲击地压发生前后煤样镜质体反射率及 EPR 测量结果
Table 2 Reflectance ratio of vitrinites and EPR test results of coal samples before and after bumps

煤样编号	$R_{\min}/\%$	$R_{\max}/\%$	$R_{0,\max}/\%$	自由基浓度(Ng)/ (10^{18} 个· g^{-1})
XZYCQ-1	0.76	0.85	0.81	24.323 68
XZYCH-1	0.82	0.93	0.88	16.950 53

煤岩 SEM 观测发现:冲击后煤体中裂隙多以张性裂隙为主,裂隙宽度明显加大,并伴随大量微裂隙、碎粒煤及糜棱质的产生,说明煤体在突然失去围压的同时,内部微结构经历了煤体赋存能量的大量释放和耗散过程;另外,煤岩中裂隙扩展具有明显的非稳定特征^[9],如图 4 所示。

4 结 论

(1)冲击地压孕育过程中“煤-围岩”系统和煤岩微元均表现出耗散结构特征,冲击地压的发生是系统内部有序和无序破坏与竞争的结果;在开采扰动条件下,不同区域、不同煤岩结构的能量积聚和耗散特征存在差异,进而造成能量涨落(或能量变化量)不同。

煤的冲击倾向性明显降低。上述结果暗示冲击地压孕育、发生过程中强烈的挤压、剪应力促进和增强了环缩合作用和拼叠作用,促使煤超前演化,该过程必然伴随较强的热耗散和热传递以及化学的不可逆过程^[6-7]。

冲击前后煤样的显微组分分析发现:

- (1)冲击能量释放后,煤体中镜质体总体含量明显减少,均质镜质体和团块镜质体略有增加;相反惰质体总体含量以及其中半丝质体、丝质体、惰屑体、粗粒体含量均有不同程度的增加,见表 3。
- (2)冲击后煤体中的均质镜质体含量升高,而结构镜质体含量降低,说明冲击能量快速释放的过程中,煤体在高位应力和高温耦合作用下,本身发生了热变质作用,煤级也随之升高;这和冲击地压灾害后现场调研中所发现的冲出煤块烫手现象十分吻合;也和 XRD、EPR 实验结果相一致。由此可见,冲击地压孕育、发生过程中能量耗散主要表现为物理和化学的不可逆过程中的耗散^[8]。

表 3 冲击地压发生前、后煤岩样的显微组分定量统计
Table 3 The statistics of macerals in the coal samples before and after coal bumps

显微组分	煤样编号		
	XZYCQ-1	XZYCH-1	
镜质组	基质镜质体	19.5	7.1
	均质镜质体	11.0	13.5
	结构镜质体	41.2	30.4
	团块镜质 碎屑镜质	3.7	4.2
惰质组	半丝质体	10.2	16.6
	丝质体	5.3	12.20
	惰屑体	4.3	12.0
	粗粒体	0.2	1.1
	微粒体 菌类体		
壳质组	孢子体	1.8	2.5
	角质体		
	树脂体		
矿物	黏土矿物	2.2	0.4
	黄铁矿	0.2	
	碳酸岩矿物	0.4	
	其他矿物		

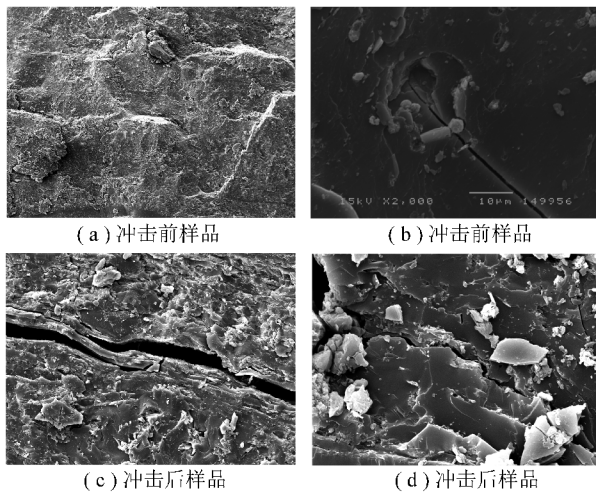


图4 冲击地压发生前后煤样的SEM观测图

Fig.4 The SEM observation results to the coal samples before and after bumps

当能量涨落超过系统动力失稳的临界值时,就会发生冲击失稳,即煤岩冲击失稳的必要条件并非是宏观上能量累积到某种程度,而是能量涨落达到某一水平。

(2)冲击地压的发生与开采扰动直接相关,结合非平衡热力学和开采扰动理论,对冲击地压发生前巷道附近煤层热力学区域进行划分,给出了与能量耗散直接相关的熵产生的主要形式,并利用煤岩内部热力学过程发展的稳定性来判断“煤-围岩”系统的稳定性,即在线性非平衡态热力学区域,当熵产生随时间的变化小于0时,系统偏离稳定态;而在非线性非平衡态热力学区域,当超熵产生等于0时,系统失稳。

(3)冲击地压发生前后煤岩样的XRD、EPR、SEM、显微组分分析表明:冲击地压孕育、发生过程中能量耗散包含物理过程和化学过程。强烈的挤压和剪切力造成储能的升高,热耗散的增强,并增加了煤微元环缩合和拼叠作用,使煤超前演化,煤级升高,促使煤岩内裂纹非稳定扩展,最终形成宏观煤岩失稳。

参考文献:

- [1] 邹德蕴,姜福兴. 煤岩体中储存能量与冲击地压孕育机理及预测方法的研究[J]. 煤炭学报,2004,29(2):159-163.
Zou Deyun, Jiang Fuxing. Research of energy storing and gestation mechanism and forecasting of rockburst in the coal and rock mass [J]. Journal of China Coal Society, 2004, 29(2): 159-163.
- [2] 姜耀东,赵毅鑫,何满潮,等. 冲击地压机制的细观实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(5):901-907.
Jiang Yaodong, Zhao Yixin, He Manchao, et al. Investigation on mechanicism of coal mine bumps based on mesoscopic experiments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 901-907.
- [3] 李如生. 非平衡态热力学和耗散结构[M]. 北京:清华大学出版社,1986.
Li Rusheng. Non-equilibrium thermodynamic theory and dissipative structure[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986.
- [4] 陈先国. 隧道失稳及判据研究[D]. 成都:西南交通大学,2002.
Chen Xianguo. Study on failure and criteria of tunnel structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002.
- [5] 彭瑞东. 基于能量耗散及能量释放的岩石损伤与强度[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2005.
Peng Ruidong. Damage and strength research for rocks based on the analysis of energy dissipation and energy release[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2005.
- [6] 赵毅鑫. 煤矿冲击地压机理研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2006.
Zhao Yixin. Investigation on the mechanism of coal mine bumps [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2006.
- [7] 徐龙君,鲜学福,刘成伦,等. 用X射线衍射和FTIR光谱研究突出区煤的结构[J]. 重庆大学学报,1999,22(4):23-27.
Xu Longjun, Xian Xuefu, Liu Chenglun, et al. Study on structure of the outburst zone coal by X-Ray diffraction of FTIR spectrometry [J]. Journal of Chongqing University, 1999, 22(4): 23-27.
- [8] Shepherd J, Rixqn L K, Griffiths L. Outbursts and geological structures in coal mines: a review [J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 1981, 18(1): 267-283.
- [9] 蒋承林,俞启香. 煤与瓦斯突出过程中能量耗散规律的研究[J]. 煤炭学报,1996,21(2):173-178.
Jiang Chenglin, Yu Qixiang. Rules of energy dissipation in coal and gas outburst [J]. Journal of China Coal Society, 1996, 21(2): 173-178.