

煤与瓦斯突出的初次破坏特征分析

张均锋, 韩小波

中国科学院力学研究所, 北京 100190

摘要 针对煤矿煤与瓦斯突出动力现象的复杂过程, 对突出启动前煤体的初次破坏特征进行了分析。特别是对影响突出发生的煤体初次破坏的几何特征以及层裂拱壳形成的力学原理, 通过简化的力学模型做了分析, 同时讨论了影响初次破坏特性的主要因素, 包括与不同煤体结构相适应的煤体材料不同破坏准则的影响。为进一步认识煤与瓦斯突出的机理, 突出的启动、发展演化提供一种思路, 进而为突出的预测和防治提供基础。

关键词 煤与瓦斯突出; 初次破坏; 层裂; 影响因素

中图分类号 TD713+.1

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2008)16-0055-05

Analysis of the Incipient Failure During Outburst of Coal and Gas

ZHANG Junfeng, HAN Xiaobo

Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, China

Abstract The characteristics of incipient failure of coal body before the initial coal and gas outburst is analyzed, especially the geometric characteristics of the incipient failure influencing the outburst are studied by a simplified model, which can explain the fracture of coal body and the formation of arching lamina. The main influencing factors of the incipient failure is also discussed, including different failure rules for coal materials caused by different damaged coal structures. This study provides some ways to increase the knowledge on the mechanism of coal and gas outburst, to probe the initiation and the evolution of the process of coal and gas outburst. Furthermore, it can also provide a theoretical base for the prediction, prevention and treatment of disaster caused by coal and gas outburst.

Keywords coal and gas outburst; incipient failure; lamina fracture; influencing factor

0 引言

煤与瓦斯突出(简称突出)是煤矿生产中经常遇到的、危害极大的一种复杂的动力现象,它是一种能量突然释放、快速发展的动态过程。在瓦斯气体的参与下,煤体在很短时间内突然连续地自煤壁暴露面抛向巷道空间,突出的强度可达

几吨到上千吨,抛出的碎煤和煤粉可堵塞巷道数米到数百米,瓦斯气体充斥数千米巷道空间。突出的起因相当复杂,国内外学者提出了几十种关于突出机理的假说,如瓦斯作用假说、地应力作用假说、化学本质假说、综合假说等^[1]。但由于突出的发生发展受自然与人为因素的相互制约,用目前已有的各种突出发生机理的假说,尚不能完全解释其启动和发展演化的过程与规律。时至今日,对突出的机理研究还没有得出统一的认识,对各种因素所起的作用和各因素之间的制约关系仍存在不同的看法和争论,但一致认为突出的发生应考虑地应力和瓦斯气体的共同作用,以及煤的物理力学性质等。

煤与瓦斯突出是一个复杂的动力过程,之所以称其“复杂”,是因为从力学角度看,这个过程尽管时间很短,但还是可以分为以下几个阶段或子过程:初始状态(初始应力和初始边界条件)、边界条件或载荷施加条件改变(突然卸载、顶板来压)、煤体初次破坏、形成拱壳(破坏准则、模式、几何尺度特征)、拱壳的失稳和煤体的破碎、突出的启动、煤体内部持续层裂和拱壳持续失稳、突出的发展(瓦斯气体的迁移和对碎煤的搬运)、拱壳稳定和煤体止裂、突出停止。在掘进或回采面附近,由于各处的施工工艺、边界条件、初始应力状态、煤体材料性质及破坏准则不同,决定了突出发生后煤体内突出的破坏模式和空腔的产状不同。因此必须因地制宜,针对具体问题进行分析。

以上各个阶段或子过程,都需大量的力学分析和定量的计算工作。从研究突出机理角度来看,首先应分析各种条件下发生突出的特征,即应当从煤体初始破坏开始,这是因为初始状态可看作是突出介质的本体,而边界条件或载荷施加条件改变是诱发突出的外因;其次再研究煤矿开采中地质构造、开采煤层所处的应力环境、开采方式、掘进速度等因素对煤与

收稿日期: 2008-06-25

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目

作者简介: 张均锋,北京市海淀区北四环15号中国科学院力学研究所,高级工程师, E-mail: zhangjf@mech.ac.cn

瓦斯突出的影响,特别是煤体结构及其力学特性的影响。

1 突出时煤体结构初次破坏特征

日本学者 M. 氏平和 K. 桶口^[2]采用相似材料,对煤与瓦斯突出的机理进行了实验研究。其实验结果表明瓦斯压力不仅具有搬运物料的力,而且还具有破碎岩石和煤的作用力。该试验得到的瓦斯突出过程如下:首先在开采面形成近似平面的层裂,然后依次向内部延伸;在层裂两侧瓦斯压力差的作用下,层裂片还可能由剪切和弯曲作用造成二次破坏;层裂片的分离和二次破坏逐步向煤体实体内部产生连锁反应;由于侧壁的影响,二次破坏点逐步移向层裂片的中心,并对下一层裂片的破坏产生影响;这些二次破碎点连接形成了抛物包络线,也就构成了瓦斯突出形成的锥形空洞形状(图 1)。

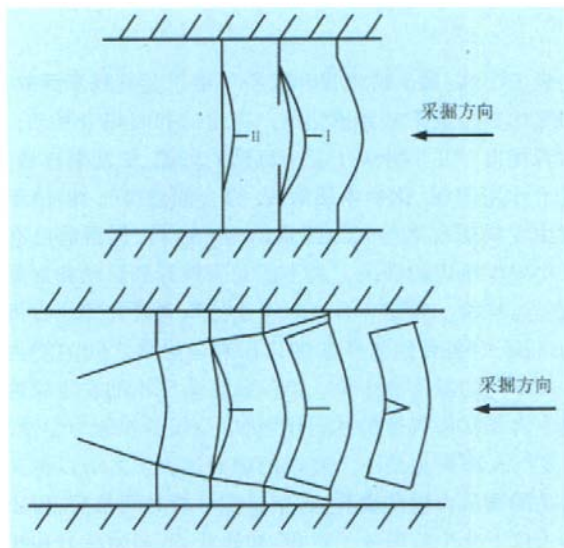


图 1 层裂形成与破坏过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laminar fracture and the failure process of coal body

蒋承林和俞启香^[3]通过假设论证和推导,认为在石门揭煤发生煤与瓦斯突出时,工作面前方的煤体在某一动态应力场作用下发生破坏,煤体和瓦斯不断飞向巷道,突出阵面(即不断形成的新暴露面)快速深入煤体内部,同时动态应力峰也移向煤体内部,如图 2 所示。煤体的破坏过程如下:煤体在集中应力峰的作用下内部形成 X 形裂纹,并在残余应力的作用下沿切向扩展,形成与暴露面近于平行的 I 型裂纹;煤体中与 I 型裂纹相通的小孔隙内游离瓦斯及通道表面煤体吸附的瓦斯向裂纹内释放;若煤体强度较低, I 型裂纹则在裂纹内瓦斯压力的作用下沿切向扩展,将相邻的各个 I 型裂纹连通起来形成与暴露面近于平行的大裂缝,即将表面煤体切割成与暴露面同形的球盖状煤壳;大裂缝周围煤体颗粒继续放散瓦斯,使得煤壳后部的大裂缝内也将保持一定的瓦斯压力;如果这个瓦斯压力足够高(但低于原始瓦斯压力),而形成的煤

壳又足够薄,则这个大煤壳将在大裂缝中瓦斯压力的作用下失稳破坏,并抛向巷道形成突出(示意图见图 3)。

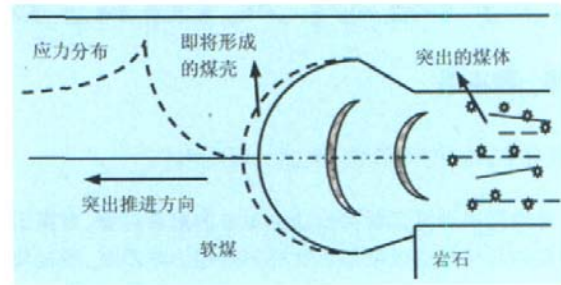


图 2 突出球面向内部推进及应力峰值推进

Fig. 2 Advancing of spherical surface of outburst and peak value of stress

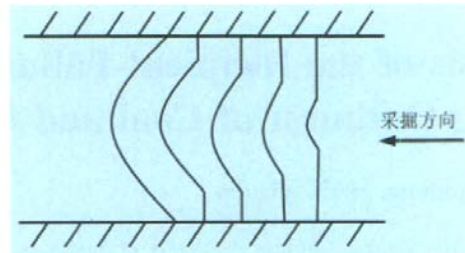


图 3 球壳形成过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the forming process of spherical shell

在丁晓良的实验中,发现煤样的初次破坏面呈拱状^[4]。黄弘读基于这个特征,建立了计算层裂特征长度的模型^[5],认为层裂破坏都经历了拱形结构的形成和破坏过程。一旦形成拱形结构,压力通过拱传递到侧壁。同时,拱受到侧壁的摩擦剪力,因此客观上存在一个拱的影响区,其有效厚度取决于煤的结构、管截面形状以及管壁与煤的接触特性。当瓦斯初压增加到某一数值时,拱结构即被破坏,于是出现一个层裂段,而拱的影响区长度就是层裂段的特征长度。如果气体初压足够高,则可能依次有多个拱结构的形成和破坏,出现多个层裂段(图 4)。当先形成的拱被破坏,原来由它承担的压力将转移到后形成的拱结构上,从而促使后形成的拱结构破坏,而

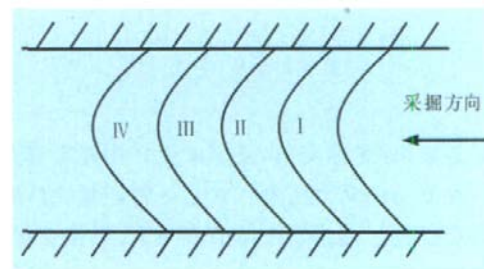


图 4 连续层裂破坏示意图

Fig. 4 Schematic diagram of continuous failure by laminar fracture

这些拱结构破坏的条件则是一致的。

由以上实验结果及井下瓦斯突出后煤体的产状(已破碎煤应除外)可知,突出发生时,煤体结构首先经历了初次破坏和层裂的阶段,无论层裂是平板形还是球壳形,最终突出发生前煤体结构的初次破坏在几何形态上都形成了某种形态的“拱壳”,这是突出前煤体结构破坏的共同特征。

2 煤体结构初次破坏特征分析

由 M.氏平的实验和初始破坏模式来看,应力拱形成前是板状破坏,这与煤岩压缩实验中的劈裂破坏模式一致,属张拉破坏类型;蒋承林的实验和分析认为是球壳状破坏,并认为裂隙是沿切向扩展,这与煤岩压缩实验的剪切破坏模式一致。因此实验证明张拉和剪切两种破坏模式都是存在的。无论是哪种破坏模式,最终都形成了“拱壳”。但不能简单地将拱壳一概看作球壳,因为既然煤体受载及边界条件不同,材料分布不均匀且物理力学性质不同,特别是其破坏准则不同,那么形成的层裂在几何形态上就会不同,初次破坏形成的拱的特征就必然不会一致。可以设想,板状煤岩应该是拉破坏准则,而球壳煤岩应该是压剪破坏准则,因此作为初次破坏形成的“拱壳”在几何特征上不会统一,它既可以是椭球壳(球壳仅是其中的一种),也可以是抛物型,还可以是双曲型。

由此可知,初次破坏形成的“优势拱壳”是与煤岩材料性质的变化分布、应力的初始状态、煤岩材料的破坏准则和破坏模式、突然卸载条件、瓦斯压力分布等相关的,是这些因素耦合作用的结果。

理论上,在煤体初次破坏平衡拱形成之前,其所受外力为 3 部分:横向的瓦斯压力 q , 横向的构造应力 p 及竖向的顶板压力和底板的反力。当煤体层裂片受到 3 向的外力而成拱时,由于软煤的拉伸强度很低,层裂拱片最稳定的结构类型应是只承受压力的拱壳。煤体暴露面附近的破坏面从三维来

讲应该是一曲面,为分析方便,根据纵剖面的对称性,本文简化为二维模型。

先看竖直方向的纵剖面(图 5),此时顶/底板压力对于即将形成的层裂拱壳已退化为只作用于拱角处的集中力。拱在外荷载作用下,各截面上有 3 个内力分量,即弯矩、剪力和轴力(图 6)。若使各截面上的剪力为零(弯矩也为零),则各截面上只有轴向力,这样就可确定压力拱的轴线,即得到压力拱特征的数学描述。

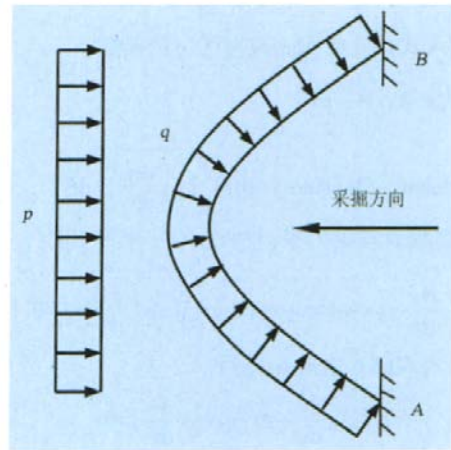


图 5 平面拱受力图

Fig. 5 Forces on the planar arching

对于拱脚处的约束反力,可根据三次超静定结构的分析方法得出,这里不做赘述。从分析中不难得知:两组约束反力 (X_A, Y_A, M_A) 和 (X_B, Y_B, M_B) 通过积分只与外荷载以及拱曲线几何特征(如拱跨长度、拱高等)相关。

下面对拱的几何特征进行分析,即确定受压拱的轴线形式。

坐标轴选取及内力分析如图 6,假设拱轴线方程为

$$y=y(x) \quad (1)$$

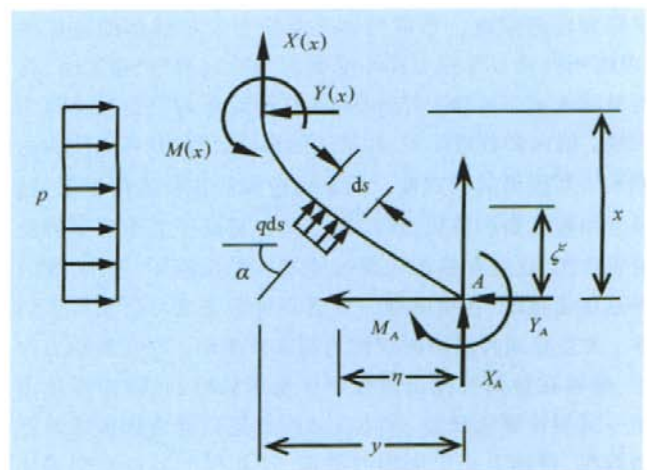
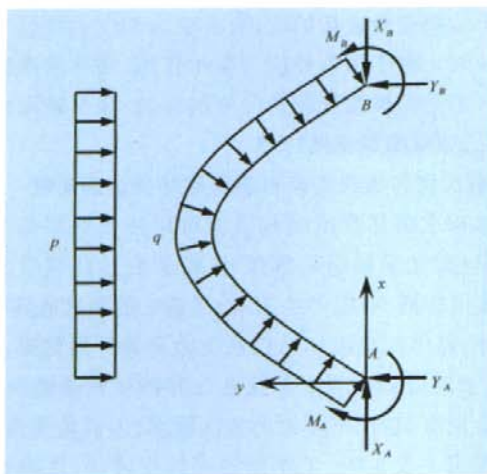


图 6 简化的平面拱受力分析图

Fig. 6 Analysis of forces on the simplified planar arching

可得垂直拱轴的任意截面上的弯矩表达式为

$$M(x) = M_A + Y_A x - X_A y - \frac{1}{2} p x^2 - \int_0^s [q \cos(\alpha) - q \sin(\alpha)] ds \quad (2)$$

其中, ds 为 (x, y) 处的微元长度, α 为该微元处的法向与水平方向夹角, 且

$$ds = \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (3)$$

$$\tan \alpha = \frac{dy}{dx} \quad (4)$$

将式(3)代入式(2), 使 $M(x)$ 改写为 x 的函数

$$M(x) = M_A + Y_A x - X_A y - \frac{1}{2} p x^2 - \int_0^x [q \cos(\alpha) - q \sin(\alpha)] \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (5)$$

令拱的任意截面弯矩为零, 并两边对 x 求导, 得

$$Y_A - X_A \frac{dy}{dx} - p x - q(x \cos \alpha + y \sin \alpha) \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = 0 \quad (6)$$

将式(4)带入式(6), 消去 α 得到

$$Y_A - X_A \frac{dy}{dx} - p x - q(x + y \frac{dy}{dx}) = 0 \quad (7)$$

式(7)积分并化简, 就得到只受压力的拱轴曲线方程

$$(p+q) \left(x - \frac{Y_A}{p+q}\right)^2 + q \left(y - \frac{X_A}{q}\right)^2 = \frac{X_A^2}{q} + \frac{Y_A^2}{p+q} \quad (8)$$

式(8)为标准的椭圆型方程, 由此可知压力拱的轴线为椭圆型。

同样的原理, 对于水平的剖面来说, 受力为横向构造应力和瓦斯压力, 分析过程同上, 也可得出拱轴线为椭圆型。

由式(8)可知, 当瓦斯压力 q 很小或远小于构造应力 p 时, 式(8)可近似为抛物型方程, 即初次破坏形成的拱壳接近于抛物锥面。

由此可知, 理想情况下, 构造煤最初形成的拱形层裂片应该是二次的椭球面或近似抛物锥面。因煤体的抗压强度高于抗拉和抗剪强度, 形成的拱壳将充分发挥煤体的抗压性能, 因而当拱壳只受压力而不受剪力、拉力(弯矩)作用时, 将保持暂时或瞬态的稳定结构形态, 这种瞬态的稳定拱壳称为过程拱。但大多数情况下, 在拱壳的形成过程中, 在媒体到达合理承压暴露面的形式前, 由于构造煤的抗拉强度很低, 随着层裂间隙瓦斯的解吸, 这些拱形壳在瓦斯压力作用下将受到弯矩作用, 在过程拱的内侧可能发生受拉破坏; 其次, 煤的抗剪强度也很低, 在拱脚处一旦达到抗剪强度也会发生剪切破坏。发生这两种破坏时统称为初次拱破坏。在瓦斯压力作用下, 媒体在被向外抛出过程中伴随着破碎, 且将向媒体内部下一层裂片继续开裂, 媒体在新的暴露面处继续形成的新的过程拱, 持续上一个周期的破坏, 且几何形心逐渐向媒体内部方向扩展, 直到后期瓦斯压力不足以使拱壳破坏, 形成稳定的能承受瓦斯压力和地应力的拱壳形态。

3 影响煤体初次破坏特性的主要因素

3.1 煤体的结构特性对初次破坏特征的影响

煤体结构是指煤层各组成部分的颗粒大小、形态特征及其相互关系。当煤层在构造应力作用下发生应变, 使煤体结构发生不同程度的破坏时, 煤的强度便相应地降低, 同时煤的其他物理性质也发生不同程度的改变。

瓦斯地质煤体结构按遭受构造应力破坏的程度分为 4 种类型: 原生结构煤(I)、碎裂煤(II)、碎粒煤(III)和糜棱煤(IV)^[9]。遭受构造应力破坏的碎裂煤、碎粒煤和糜棱煤被称为构造煤, 其破坏程度依次增高, 其中破坏程度较高的碎粒煤和糜棱煤又称构造软煤(即通常所说的软煤)。

煤的坚固性系数 f 值是常用的表征煤强度的相对指标之一。汤友谊等^[10]研究了不同煤体结构煤的 f 值分布特征和统计规律并认为: 煤体结构在原生结构煤—碎裂煤—碎粒煤—糜棱煤的破坏变化过程中, 随着煤体结构破坏程度的增加, 煤的坚固性系数逐渐下降, 煤的强度、硬度及其他物性的量值变化也是逐步的渐变过程, 蕴含了煤体从脆性变形—脆韧性变形—韧性变形逐步过渡的过程。在此过程中, 煤组分子甚至煤分子的结构及其排列均可能发生重大变化, 从而形成了有利于煤与瓦斯突出的构造软煤。该过程也使煤岩材料的破坏准则发生改变, 而不同煤体材料的破坏准则恰恰是决定煤体初次破坏特征的关键所在。

由于地质构造的作用使煤体结构发生了变化, 当煤体受构造运动的影响较小时, 煤体能够保持原有的结构, 结构面只有原生结构面。当上部岩层的压力均布时, 煤体将沿软弱结构面破坏, 即沿它的原生结构面(或割理面)破坏, 而煤体的割理一般是相互正交的两组结构面。因此 I 类(非破坏煤)可能产生 M. 氏平理论的初次拱形成前的层状破坏。

当煤体受构造运动的影响较大时, 煤的原生结构遭受构造作用破坏, 煤体成为层理紊乱、煤质松软的构造软煤。当煤的结构是以构造煤为主, 柔褶系数较高时, 则煤层卸荷面最初容易发生拱壳式破坏。

对于结构完全破坏的煤体, 其受力和变形特性往往受剪切强度控制。由于拱角处应力集中作用, 煤体初次破坏形成的过程拱将受到拱角处应力分布的影响, 也可能形成其他类型的拱壳, 如双曲型或抛物型。

3.2 荷载类型和边界约束对初次破坏特征的影响

煤体初次破坏形成过程拱的过程还受到卸荷类型和方式的影响, 譬如采用炮采落煤时, 由于突然卸载形成的卸荷波向媒体内传播, 可能产生 M. 氏平理论的初次破坏拱。

此外, 煤体初次破坏特性还受边界条件的约束。煤巷掘进时, 由于巷道剖面的上下左右边界都受较强的约束, 因此基本不会发生 M. 氏平理论的初次破坏, 但对炮采落煤, 尤其是大范围突出发生时, 工作面边界约束较弱, 这种锥形破坏型式将是主要的。

根据上述煤体初次破坏特征分析, 煤体的结构相对完

整、强度和硬度越高、边界约束相对较强,则初次破坏形成拱壳的曲率半径就越大;反之,煤体结构完全破坏、强度和硬度越低、边界约束相对较弱,则初次破坏形成拱壳的曲率半径相对就越小。

当然,影响煤体初次破坏特征的因素很多,如地质构造因素、瓦斯压力与赋存情况、顶底板的几何和物理力学特性等,在不同的工况下这些因素也可能起到主要的支配作用。

4 结论

本文依据煤与瓦斯突出机理、对煤与瓦斯突出过程的分析,针对突出煤体的破坏模式,首先将复杂的过程划分为几个阶段(或子过程),认为在采掘过程中,由于各处的施工工艺、边界条件、初始应力状态、煤体材料性质、破坏准则等的不同,煤体初次破坏的特征必然不同。通过简化的力学模型,对突出前煤体发生初次破坏的几何结构特征进行了分析,同时讨论了影响初次破坏特性的几个主要因素。

根据煤体初次破坏的特性,可进一步分析层裂拱壳形成、拱壳的失稳和煤体的破碎等,以便增强对煤与瓦斯突出机理的认识,为突出的启动、发展演化提供一种思路,进而为突出的预测和治理方案设计提供基础。

参考文献 (References)

[1] 于不凡. 煤矿瓦斯灾害防治及利用技术手册 [M]. 修订版. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.
Yu Bufan. Technological handbook on prevention, treatment and application of coal and gas outburst [M]. Rev ed. Beijing: Coal Industry

Publishing Company, 2005.

[2] 氏平 M, 桶口 K. 煤和瓦斯突出机理的模型研究及其理论探讨[C]//第21届国际采矿安全会议论文集. 《世界煤炭技术》编辑部, 译, 北京: 煤炭工业出版社, 1985: 80-85.
Shiping M, Tongkou K. Model research and theoretical discuss on mechanism of coal and gas outburst[C]// 21th International Conference of Safety in Mines Research Institutes. Editorial office of Coal Technology in the World, trans. Beijing: Coal Industry Publishing Company, 1985: 80-85.

[3] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出机理的球壳失稳假说 [J]. 煤矿安全, 1995, 26(2): 17-24.
Jiang Chenglin, Yu Qixiang. Safety in Coal Mines, 1995, 26(2): 17-24.

[4] 丁晓良, 丁雁生, 俞善炳. 煤在瓦斯一维渗流作用下的初次破坏[J]. 力学学报, 1990, 22(2): 154-162.
Ding Xiaoliang, Ding Yansheng, Yu Shanbing. Acta Mechanica Sinica, 1990, 22(2): 154-162.

[5] 黄弘读, 郑哲敏, 俞善炳, 等. 突然卸载下含气煤的层裂[J]. 煤炭学报, 1994, 24(2): 142-146.
Huang Hongdu, Zheng Zhemin, Yu Shanbing, et al. Journal of China Coal Society, 1994, 24(2): 142-146.

[6] 焦作矿业学院瓦斯地质研究室. 瓦斯地质概论[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991.
Laboratory of Gas Geology of Jiaozuo Coal Mining College. Introduction of gas geology[M]. Beijing: Coal Industry Publishing Company, 1991.

[7] 汤友谊, 张国成, 孙四清. 不同煤体结构煤的 f 值分布特征 [J]. 焦作工学院学报: 自然科学版, 2004, 23(2): 81-84.
Tang Youyi, Zhang Guocheng, Sun Siqing. Journal of Jiaozuo Institute of Technology: Natural Science Ed, 2004, 23(2): 81-84.

(责任编辑 代丽)

· 学术动态 ·

“2009 国际藏医药学术会议”征文

由中国民族医药学会主办的“2009 国际藏医药学术会议”将于 2009 年 8 月 8-10 日在西宁市举行。

“2009 国际藏医药学术会议”是继“2000 拉萨国际藏医药学术会”之后第二次在中国召开的国际性藏医药学术会议。会议将围绕藏医药学“继承、创新、发展”的主题,从基础理论、医史文献、临床实践、药物研究、公共卫生等方面进行交流。除国内专家以外,还将邀请美国、英国、法国、德国、丹麦、日本、俄罗斯、瑞士、印度、新加坡、奥地利、意大利、以色列、泰国、蒙古国等国专家学者参会。

会议将围绕藏医药学理论、天文历算及其他传统医学的比较研究,藏医药学的发展历史和文献整理,藏医特色诊疗方法及临床研究,传统制剂研究与新药开发、药材资源保护与利用,以及藏医预防、养生、保健方面的研究等议题进行交流。特面向相关专家学者征收论文,论文截稿日期为 2009 年 3 月 31 日。会议网站: <http://www.tmst.org/2009yantaohui/tibetaninfo/view.asp?id=972>。

联系地址: 西宁市南山东路 97 号青海省藏医药学会 昂青才旦

电 话: 0971-8200897

传 真: 0971-8200893

电子信箱: angqcd@yahoo.com.cn