

# 煤与瓦斯突出的层裂-粉碎模型\*

方健之 俞善炳 谈庆明

(中国矿业大学) (中国科学院力学研究所)

**摘要** 提出了描述煤与瓦斯突出的 1 维模型。该模型把煤体破坏分为 2 个阶段——层裂和层裂片的粉碎，并用粉碎率的概念来描述煤体的这种非均匀破坏。利用上述模型和从模拟实验得来的参数，对突出过程进行数值计算，得到了破裂阵面推进速度与瓦斯初始压力和煤初始粉碎率之间的拟合关系。计算结果与实验结果符合得很好。

**关键词** 煤与瓦斯突出 层裂 粉碎 破裂阵面

为了研究煤矿中开石门时发生煤与瓦斯突出的情形，氏平增之(1984)<sup>[1]</sup>首先建立了煤激波管来进行模拟实验。丁晓良(1989)<sup>[2]</sup>和郑哲敏等(1992)<sup>\*\*</sup>在煤激波管的实验中，揭示了一系列重要现象。值得提到的是，在严格控制实验煤样参数不变，仅改变充气气体压力的情况下，发现有 3 种典型现象：当充气气压  $p_g$  小于某一临界值  $p_{c1}$  时，煤样不发生破坏；当  $p_g > p_{c1}$  但小于另一临界值  $p_{c2}$  时，可观察到部分煤样破裂；而当  $p_g > p_{c2}$  时，观察到煤样全部破裂并被抛出，破裂阵面近似恒稳地推进。在建立本文的物理模型时，将利用这些实验事实。

## 1 物理模型

比照郑哲敏等的 1 维实验，研究图 1 所示装置破膜后的过程。

煤与瓦斯突出研究的关键问题是对煤体破裂的研究，即对煤的破裂准则和破裂阵面运动规律的研究。对此本文提出以下模型：

- (1) 把最大有效拉应力准则作为破裂准则，认为破裂是不连续的，破裂阵面跳跃式发展；
- (2) 引入混相流和粉碎率的概念来描述层裂片的运动；
- (3) 层裂片的形态在运动中不稳定，满足一定条件后将发生进一步的粉碎。

图 1 中当密封膜 B 突然破裂时，从 B 产生一道右行激波和一束左行稀疏波。当稀疏波传至煤面 A 后，A 右侧气体压力迅速下降，这时 A 左侧附近煤体内的气体在渗流作用下形成一个陡峭的压力剖面，使得这部分煤体中轴向的有效拉应力和煤侧壁上的剪应力也随之增大，在一定的条件下，煤就有可能在某处发生破裂。

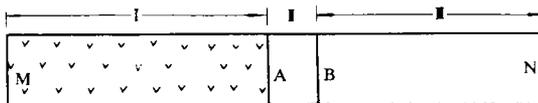


图 1 模拟装置

Fig. 1 Diagram of experimental configuration  
I —— 含气煤区；II —— 高压气体区；III —— 环境气体区；M —— 管底刚性壁；A —— 煤表面；B —— 密封膜；N —— 管端敞口

本文 1994-10-21 收到。廖灿平编辑。

\* 国家自然科学基金资助项目。

\*\* Cheng Chemin, Chen Li, Ding Yansheng, A laboratory study of coal and gas outburst. Proceedings of Int Symp on Intense Dynamic Loading and Its Effect. Chengdu, China, June, 1992. 3~15

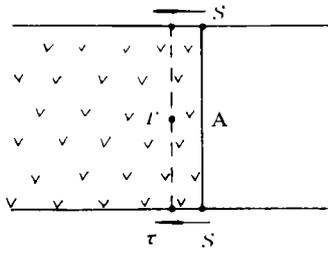


图 2 煤体层裂模型

Fig. 2 The spallation model of coal

考察煤截面 A 前 1 层煤(如图 2),轴线上 T 处有效拉应力最大,侧壁 S 处剪应力  $\tau$  最大. 如果 T 处拉裂,裂纹迅速扩展,致使煤在 T 所在的横截面上全部拉裂. 此时如果侧壁 S 上的煤又被剪裂,这一层煤才与煤体分离,称这层煤已发生破裂<sup>[3]</sup>. 应该说,实际的应力分布和破裂状况都是 3 维的,在作 1 维简化求解应力场时,还需引入一个附加条件,这里假设一旦 T 处达到拉裂条件,侧壁处的剪应力相应地达到了极限剪应力. 因此,本模型中煤的拉裂条件也就是煤的破裂条件. 这里采用有效拉应力准则.

由于有效应力场在空间上是一个连续场,而煤面 A 上有效应力总为零,因此,满足破裂条件的面总是在离 A 面有一定厚度的煤层里,也就是说初始破裂的煤片是有有限厚度的. 煤层中产生破裂的地方形成破裂面,假设破裂面不再能承受有效载荷,该处有效拉应力就由破裂前的极限强度值下降到零,同时破裂面左侧附近煤体渗流区中有效应力场迅速达到新的平衡. 因为破裂面处有效应力为零,可以期待下一次破裂仍将产生有限厚度的破裂片. 以下将这种片状破裂称为层裂,破裂片称为层裂片.

从郑哲敏等的实验中可以看到,破裂阵面处压力下降非常迅速,初始压力  $p_0$  较高时还会有负压产生. 这是由于煤体破裂不均匀引起的. 由于层裂片里的气体最初来不及释放,而层裂片之间的空隙(以下简称空隙)内气体较少,空隙体积的膨胀即可导致气体压力的急剧下降. 假设层裂片刚产生时只有一部分煤已粉碎,为定量描述煤的不均匀破坏,定义粉碎率为:一块煤碎成煤粉的质量与这块煤的总质量的比. 已粉碎的煤粉释放出其中原来所含的全部游离气体. 因此,空隙实际上是由煤粉和从这些煤粉中释放出来的气体组成. 层裂片刚产生时的粉碎率称为初始粉碎率. 初始粉碎率越小(则空隙中的气体质量越少),层裂片间相对运动速度越大,空隙里的气体压降也就越迅速,煤体破坏也就越容易稳定地发展下去.

可以设想层裂片开始是以片状整体运动的,但薄片在运动中形态很不稳定,假设当薄片加速到某一速度值后,会发生进一步的粉碎从而失去整体性.

首先分析层裂片作整体运动阶段的特点:(1)由于层裂片的阻挡,空隙间的气体不能自由地穿过层裂片;(2)由于层裂片从形成到进一步粉碎之间的时间很短,可以忽略层裂片中的气体向空隙里的缓慢渗流,认为层裂片中所含的气体与层裂片之间没有相对运动. 这样,在同一截面处的气相和固相具有相同的运动速度,可以用混相流的概念来描述这一区域中的物质运动(图 3).

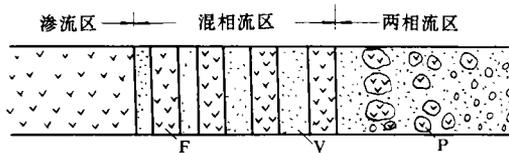


图 3 混相流区结构

Fig. 3 Structure in mixed flow region

F 层裂片; V——空隙; P 碎片

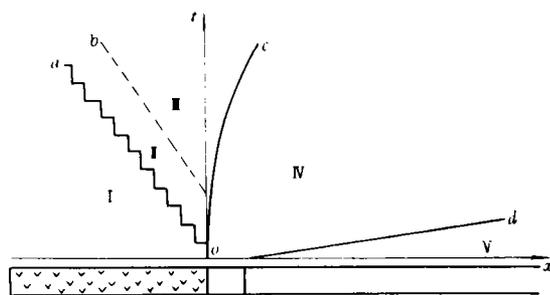


图 4 1 维流动图象

Fig. 4 Development of 1D outburst

I——渗流区; II——混相流区; III——两相流区; IV——激波后纯气相区; V——未扰气体区; a——破裂阵面; b——混相流区与两相流区界面; c——两相流前沿阵面; d——激波阵面; x——空间坐标; t——时间坐标

层裂片的粉碎使得片与片之间的空隙连通起来,空隙间的气体不再必须与固相具有相同的运动速度. 因此,层裂片的粉碎标志着两相流的形成.

假设粉碎产生的碎片内气体的压力和层裂片内时的压力一样,一直保持着层裂片刚形成时的压力值.如果碎片周围环境的气体压力比较低,这个压力差的存在将使得碎片不断发生从表面向深处发展的层层“剥落”,而且“剥落”下来的煤粉同时释放其中原来所含的全部游离气体.

至此,可以将煤和瓦斯突出的 1 维流动图象表示如图 4 所示.

## 2 算例及分析

### 2.1 参数的确定

根据本文的物理模型,不难得到相应的数学表述.为了便于与实验结果进行比较,利用本文模型计算时采用郑哲敏等的实验所采用的煤样和气体的参数<sup>[1]</sup>: $\epsilon_0 = 0.3$ ,  $k_0 = 5 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ ,  $\sigma_t = 0.02 \text{ MPa}$ ,  $\tau_M = 0.016 \text{ MPa}$ ,  $\rho_s = 1600 \text{ kg/m}^3$ ;  $p_0 = 0.1 \text{ MPa}$ ,  $\gamma = 1.4$ ,  $C_0 = 300 \text{ m/s}$ ,  $\mu = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ . 其中  $\epsilon_0$ ,  $k_0$ ,  $\sigma_t$ ,  $\tau_M$  和  $\rho_s$  分别为煤样的孔隙率、渗透率、抗拉强度、抗剪强度和真密度;  $p_0$  为大气压;  $\gamma$ ,  $C_0$  和  $\mu$  分别为充气气体的绝热指数、等温声速和粘性系数.

另有一类参量由本文的模型引入,实验没有直接给出这些量的值,这类参量的确定,基于本文的一些假设.

#### (1) 两相流相互作用力 $H$

一般取如下形式<sup>[4,5]</sup>,即

$$H = 2C_f \rho (u - u_s) |u - u_s| \frac{1 - \epsilon}{\epsilon d}$$

式中,  $d$  为固体颗粒直径,本文中  $d \approx 1 \text{ mm}$ ;  $\epsilon$  为气体所占体积份数;  $u$ ,  $u_s$  分别为气、固相运动速率;  $\rho$  为气体密度;  $C_f$  为阻力系数.为了确定  $C_f$ ,借鉴研究流化床的成果,考虑到两相流区雷诺数  $Re$  比较大,  $C_f$  采用 Ergun 给出的方程<sup>[5]</sup>  $C_f = 75/Re + 0.875$ ,作一级近似,取  $C_f = 1$ .

#### (2) 层裂片粉碎的临界速度 $v_0$

实验发现\*,当超压  $\Delta p$  在  $0.05 \sim 0.1 \text{ MPa}$  时,煤体片状开裂(层裂),裂片不粉碎;而当  $\Delta p > 0.1 \text{ MPa}$  以后才可观察到有煤被粉碎的突出现象.

利用这一事实来确定  $v_0$ ,考察煤表面处形成的第一块层裂片,它首先在气体压力梯度作用下加速运动,随着压力梯度很快下降,侧壁摩擦力将占主导作用,层裂片转为减速运动.如果在加速阶段不粉碎,减速阶段也不应发生粉碎.因此,可以用  $\Delta p = 0.1 \text{ MPa}$  作为临界情况来计算实验煤样表面处层裂片的最大运动速度,并把这一速度作为此层裂片的粉碎条件.假定这一速度条件可以推广到同一次突出过程中产生的所有层裂片,从而得到  $v_0$ .不同的初始粉碎率  $\eta_0$  下的  $v_0$  值是不相同的(见表 1).

表 1 层裂片粉碎的临界速度

Table 1 Critical velocity of spalt laminae

$\eta_0$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
$v_0/10^{-3}C_0$	3.47	4.73	4.84	5.33	6.31	6.53	6.68	6.73	6.74

#### (3) 粉碎率 $\eta$

根据物理模型,粉碎率在两相流区的变化规律为

$$d(1 - \eta) = -C_f(1 - \eta) \frac{p_F - p}{p} dt,$$

\* 同 149 页脚注.

式中,  $p_F$  为碎片内气体压力;  $p$  为碎片周围环境中气体压力;  $C_7$  为待定常数,  $C_7$  对两相流区气体压力波形有影响, 经过试算, 取  $C_7=50$  比较合适。

## 2.2 算例分析

选定上述参数, 系统地计算了不同初始粉碎率  $\eta_0$  条件下不同初始压力  $p_{g_0}$  时的突出情况。

图 5 是典型的计算曲线, 可以看出, 计算结果与理论分析得到的流动图象是一致的。

通过 42 个算例的结果分析, 整理得到破裂阵面推进速度  $v_b$  与  $p_{g_0}$  和  $\eta_0$  之间的拟合关系, 即

$$v_b = 38(p_{g_0} - 0.15)\eta_0^{-0.56}.$$

上式说明, 煤初始粉碎率越小, 气体初始压力越高, 那么煤的破坏发展就越快。

将在不同  $\eta_0$  条件下计算得到的不同  $p_{g_0}$  时固相稳定运动的速度  $u_{s_0}$  和郑哲敏等用高速摄影得到的煤质点抛出速度绘制在图 6 上, 可以看到, 在可以比较的区域内两者符合得非常好。

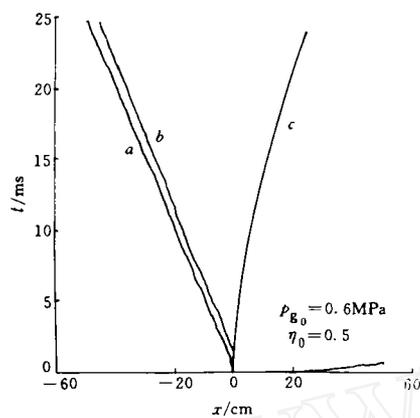


图 5 各界面随时间的变化

Fig. 5 The development of various interface with time

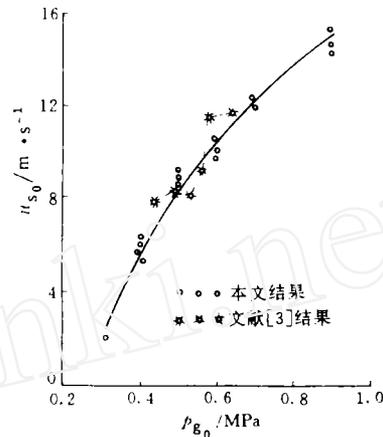


图 6  $u_{s_0}$  与  $p_{g_0}$  的关系

Fig. 6  $u_{s_0}$  vs  $p_{g_0}$

## 3 结 论

(1) 层裂-粉碎模型能够比较客观地反映煤在突出过程中的破坏规律。利用该模型, 运用数值计算方法得到的结果, 与文献报道的实验结果一致。

(2) 引入粉碎率可以定量地描述煤体破坏的非均匀性, 初始粉碎率对破裂阵面的发展速度影响较大, 可以作为表征破裂阵面特性的一个参数。

致谢: 作者对郑哲敏、丁雁生先生的帮助深表谢意。

## 参 考 文 献

- 1 氏平增之・内部がス圧による多孔質材料の破壊プロセスについて—ガス突出に関する研究。(第二報). 日本鉱業會誌, 1984, 100: 397~403
- 2 丁晓良, 俞善炳, 丁雁生等. 煤在瓦斯渗流作用下持续破坏的机制. 中国科学(A辑), 1989(6): 600~607
- 3 俞善炳. 煤与瓦斯突出的一维流动模型和启动判据. 力学学报, 1992, 24(4): 418~431
- 4 谈庆明, 丁雁生, 郑哲敏. 受压固、气两相介质一维膨胀运动. 力学学报, 1984, 16(4): 340~350
- 5 张远君编译. 两相流体动力学基础理论及工程应用. 北京: 北京航空学院出版社, 1987

## 作者简介

方健之,男,28岁,助教.1990年毕业于中国科学技术大学近代力学系;1993年于中国科学院力学研究所获硕士学位.江苏省徐州市中国矿业大学采矿系,邮政编码:221008.

俞善炳,男,52岁,副研究员.1963年毕业于复旦大学数学力学系.北京市海淀区中国科学院力学研究所,邮政编码:100080.

## A LAMINATION SEPARATION AND FRAGMENTATION MODEL OF COAL AND GAS OUTBURSTS

Fang Jianzhi

(China University of Mining and Technology)

Yu Shanbing Tan Qingming

(Institute of Mechanics, CAS)

**Abstract** A 1D model for coal and gas outbursts is proposed. The coal solid fragmentation can be divided into two phases—Lamination spallation and pulverization of the laminae, and the pulverization rate is used to describe inhomogeneous failure of coal. The parameters obtained from the model and simulation test are used for numerical calculation of the outburst process. The relation between propagation velocity of fracturing front and the initial gas pressure and pulverization rate was obtained. The calculated results agree with the test results.

**Keywords** coal and gas outbursts, lamination spallation, pulverization, fracturing front

## 《洁净煤技术》杂志正式创刊

《洁净煤技术》杂志是由煤炭科学研究总院与洁净煤工程技术研究中心联合主办,经国家科委与新闻出版署正式批准向国内外公开发行的刊物。

本刊宗旨是宣传和普及清洁、高效的洁净煤技术及与之有关的法规、政策和标准,致力于促进我国洁净煤技术的发展.使《洁净煤技术》成为洁净煤信息的传播媒介,与国外有关组织、研究机构、大专院校及工矿企业合作交流的纽带。

本刊以广大与煤炭利用有关的科研、生产部门、工矿企业、能源与环境的管理人员和工程技术人员、科研设计人员、大专院校师生为主要读者对象,并与国外同行交流。

主要刊载煤炭洗选加工、转化(焦化、液化、气化)、燃烧及烟气处理、开发和利用中的污染控制等洁净煤技术的学术论文、研究报告、专题评述、国外技术动态和政策、法规等文章。

欢迎广大从事洁净煤技术研究、管理人员,以及大专院校师生踊跃投稿。

来稿请寄:北京市和平里煤炭科学研究总院内《洁净煤技术》编辑部,邮政编码:100013。