

论文

一维煤与瓦斯突出波模型

陈力, 乔继延*, 丁雁生

中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190

*联系人, E-mail: qiao_jiyan@aliyun.com

收稿日期: 2013-03-11; 接受日期: 2013-07-04

摘要 郑哲敏等人 1993 年发表了考虑渗流破坏、两相流动和空气压缩波的一维瓦斯突出恒稳推进模型, 俞善炳等人 1997 年发表了考虑气固混相流动的强间断模型. 本文在这两个模型的基础上, 综合考虑渗流破坏、混相流动强间断和空气压缩波, 提出了一个关于一维煤与瓦斯突出恒稳推进的模型. 根据模型进行数值计算, 与实验结果大致相符, 利于看清煤与瓦斯突出的基本机理.

关键词 煤与瓦斯突出, 破坏阵面, 气固混相介质, 突出波

PACS: 46.40.Cd, 62.20.Mk, 91.60.Hg

doi: 10.1360/132013-113

煤与瓦斯突出, 是煤矿井下最严重的灾害之一, 严重威胁井下生产安全. 在发生突出时, 工作面的大量破碎的煤和瓦斯突然向巷道喷出, 掩埋人员和机械, 毁坏通风系统, 具有极大的破坏性.

发生煤与瓦斯突出的机理相当复杂. 国内外多数研究者承认, 煤与瓦斯突出是地应力、瓦斯压力和煤的物理性质三者综合作用的结果, 如文献[1-5]. 此外, 文献[6]最早提出流变假说, 提出了含瓦斯煤样蠕变行为的数学模型. 文献[7]考虑瓦斯解吸的两种模式, 建立了非均匀煤-瓦斯混合物在巷道内的非定常流动方程组, 并得到其数值解. 文献[8]通过室内瓦斯突出模拟实验, 研究了瓦斯的吸附特征对于突出启动的影响.

本文的“突出波”定义为瓦斯突出时由煤壁向煤层深部持续推进的破坏阵面, 阵面前方是尚未破坏的煤体, 阵面后方是已碎裂的煤体. 它不是应力波.

1953 年, 苏联的赫里斯基阿诺维奇院士给出一个破坏阵面向煤层中稳定推进的渗流解^[9], 这是关于“突出波”的最早文献. 1982 年, 郑哲敏^[10]分析中梁山煤矿一次瓦斯突出现场观测实验数据时看到, 煤层中两个相距 7 m 的瓦斯探头都观测到压力突然下降, 其压降时间相差 5 s. 他指出瓦斯压降推进速度约为 1.4 m/s, 远低于弹性波速, 远高于渗流区扩展速度. 随后, 在煤激波管实验中, 丁晓良^[11]观察到突然卸载时破坏阵面向煤体深部恒稳推进的现象, 其推进速度与中梁山的 1.4 m/s 量级接近. 在 1980-1990 年的一维煤与瓦斯突出模拟实验^[11-14]中, 观测到拉伸破坏是突出煤破坏阵面推进的基本破坏形式, 瓦斯压力梯度导致层裂和瓦斯压差导致粉化是瓦斯突出中煤体破坏的特征, 在三轴压缩实验中发现有效应力控制含瓦斯煤的变形和破坏^[15], 从而提出了含瓦斯煤的一维基本方程组^[16], 刻画了在一维模拟实验条件

引用格式: 陈力, 乔继延, 丁雁生. 一维煤与瓦斯突出波模型. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 68-78

Chen L, Qiao J Y, Ding Y S. A model of one-dimensional coal gas outburst wave (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2014, 44: 68-78, doi: 10.1360/132013-113

下破坏阵面的恒稳推进现象. 这些工作, 观测到了与赫里斯基阿诺维奇的假设一致的实验现象, 指出了瓦斯突出时煤体的破坏形式与特征, 引用有效应力概念并给出了基本方程组, 使得关于“突出波”的认识有了可靠的实验支持和理论描述.

俞启香和蒋承林在模拟实验中看到类似的现象^[1], 认为地应力破坏煤体, 瓦斯使裂隙扩张形成球壳状煤片抛向巷道. 2008年, 胡千庭、周世宁、周心权^[2]指出, 突出的发展是煤体由浅入深逐渐破坏并抛出的过程, 其破坏有层裂和粉化两种形式, 而这两种形式可能交替出现, 并认为拉伸与剪切破坏都有贡献. 胡千庭、文光才在专著^[17]中介绍, Yartsev, Ujihira, Gawor 等人在瓦斯突出物理模拟实验中曾观测到层裂现象; 作者认为地应力激发突出并与瓦斯共同对突出的发展起控制作用, 应力波是导致层裂的重要机制. 鉴于突出波速度远低于煤岩体的弹性波速, 本文认为应力波不适于刻画层裂.

瓦斯突出时在巷道空气中激发出压缩波. 鉴于这个压缩波较弱, 可以用声波近似^[18]. 文献[19-21]用强激波近似表述这个压缩波, 本文认为值得商榷.

在二维煤与瓦斯突出的模拟实验中^[22], 郑哲敏的团队发现煤粉在突出孔附近堵塞, 煤层内出现拱状破裂面, 突出波逐渐衰减而不再恒稳. 由此可以推断, 在煤矿井下不存在恒稳推进的突出波, 只有逐渐减速推进的突出波. 作为持续推进的破坏阵面, 在二维模拟实验或实际的煤与瓦斯突出中依然存在(例如中梁山煤矿瓦斯突出现场观测).

实际突出是三维的, 比一维模型复杂. 它的“复杂”不是基本机理比一维突出更复杂, 而是影响因素多, 很多参数的取值都不清楚. 瓦斯突出机理的核心问题是煤岩体的持续破坏, 其机制是瓦斯渗流与煤岩体破坏的耦合, 就此而言, 一维和三维相同. 一维模型简单明了, 能够反映瓦斯渗流与煤岩体破坏的耦合, 易于说明煤岩体持续破坏的基本机制, 利于认识瓦斯突出的基本机理. 但一维模型不易反映地应力的贡献, 是有一定局限的.

从大量的文献看, 瓦斯突出基本机理仍然是一个急需明确的科学问题.

鉴于研究恒稳推进的一维突出波具有重要意义, 郑哲敏团队对此做了较深入的研究^[11-16, 18, 22-27]. 处理恒稳推进的一维突出波可以采用两种方法: 一种方法是把破碎区的瓦斯和煤视为气-固两相介质^[18]; 另一种方法是把破碎区的瓦斯和煤视为气-固混相介质^[24]. 所以, 本文对一维突出做进一步探讨. 基于上述工作, 本文采用混相强间断方法, 既考虑煤中突出波, 又考虑空气中压缩波, 提出了描述一维煤与瓦斯突出破坏阵面恒稳推进全过程的简化模型, 导出定量关系, 与一维突出模拟实验作了对比, 使煤与瓦斯突出的基本机理更加清晰.

1 一维恒稳突出的流动图像

根据一维圆管煤与瓦斯突出的实验室模拟实验^[11-13], 文献[18]得到如下考虑两相流动和空气压缩波的一维恒稳突出图像(图 1).

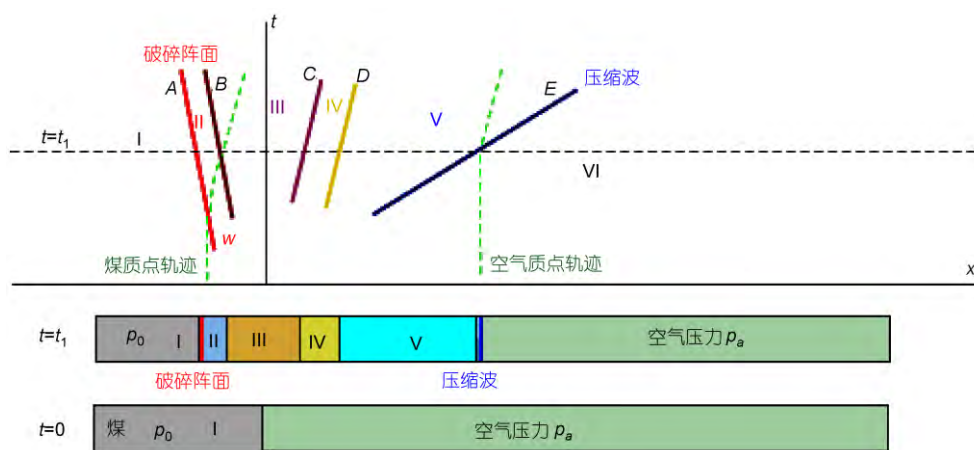


图 1 (网络版彩图)一维恒稳突出的 $x-t$ 图

Figure 1 (Color online) Graph of x versus t for one dimension constant outburst.

图 1 中 I 是渗流区, 瓦斯压力 p 由原始值 p_0 逐渐下降到 p_1 , 瓦斯流动速度 u 从零逐渐上升. 当瓦斯流动速度 u 足够大时, 煤体在有效拉应力最大处开裂. $t \leq 0$ 时刻, 煤壁在 $x=0$ 处. $t > 0$ 时刻, 煤从迹线 A 开始破碎(瓦斯压力为 p_1), 到迹线 B 破碎结束(瓦斯压力急降至 p_2), 称为破碎区(II 区). 破碎煤体速度由零急剧升至 \bar{u}_2 , 在 II 区形成两相流体. 实验发现, 在 $p_0 \gg p_a$ 条件下, 破坏阵面恒稳推进, 不同位置记录到的瓦斯压降波形不变. 因此, 可以认为 A, B 两条线平行, 都以恒稳速度 w 朝 $-x$ 方向煤体深部推进. p_2 大于空气压力 p_a , 破碎煤粒被瓦斯驱动, 形成 III 区的煤粉-瓦斯两相流、IV 区的纯瓦斯流. 迹线 E 是空气中的压缩波, V 区是压缩波后的空气流, VI 区是未扰动空气.

本文近似地将 II, III 区的流动视为混相流(IV 区将消失), 将空气压缩波视为声波.

2 关于 I 区的方程组和层裂^[18]

考虑骨架应力 σ 和瓦斯压力 p , 忽略吸附瓦斯, 含瓦斯煤在 I 区的一维方程组^[16]为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi \rho}{\partial t} + \frac{\partial \phi \rho u}{\partial x} &= 0, \\ \frac{\partial (1-\phi) \rho_s}{\partial t} + \frac{\partial (1-\phi) \rho_s u_s}{\partial x} &= 0, \\ \phi \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \phi \frac{\partial p}{\partial x} &= -f_i, \\ (1-\phi) \rho_s \left[\frac{\partial u_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[(1-\phi) \sigma \right] \\ + p \frac{\partial \phi}{\partial x} &= f_i - f_w. \end{aligned} \quad (1)$$

式中 ϕ 为煤的孔隙率, ρ 和 ρ_s 分别为瓦斯和煤的密度,

u_s 为煤的速度, f_i 为相间作用力, f_w 为侧壁阻尼. 侧壁阻尼的表达式为

$$f_w = \frac{s}{A} D_w. \quad (2)$$

式中 A 为煤体的横截面积, s 为横截面的周长, D_w 为单位壁面受到的切向阻力, f_w 以 x 的反向为正. 根据 Darcy 定律, 推导出相间作用力的表达式为

$$f_i = \frac{\eta}{k} \phi_0 v = \frac{\eta}{k} \phi_0^2 (u - u_s). \quad (3)$$

设总应力 $\sigma^* = (1-\phi)\sigma + \phi p$, 定义有效应力 $\sigma' = \sigma^* - p = (1-\phi)(\sigma - p)$, 应力以压缩为正, 下同. 联立式(1)中的第 3 和第 4 式, 得到

$$\begin{aligned} (1-\phi) \rho_s \left[\frac{\partial u_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial u_s}{\partial x} \right] + \phi \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) \\ + \frac{\partial \sigma'}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{s}{A} D_w. \end{aligned}$$

考虑突出阵面以速度 w 向 $-x$ 方向恒稳推进, 设坐标系以速度 w 向左移动, 原点在迹线 A 处. 做坐标变换 $\xi = x + wt$, 考虑到在渗流区 ($\xi \leq 0$) 煤体完整并且无形变, 设 $\rho_s = \text{const}$, $u_s = 0$, $\phi = \phi_0 = \text{const}$, 忽略加速度项, 得到

$$\frac{d\sigma'}{d\xi} + \frac{dp}{d\xi} = -\frac{s}{A} D_w.$$

从 ξ 到 0 积分此式, 在 $\xi=0$ 处, $\sigma'(0)=0$, $p(0)=p_1$, 得到有效应力式中各项随 ξ 变化的趋势如图 2 所示,

$$\sigma'(\xi) = -sD_w \xi / A + p_1 - p(\xi).$$

图 2 中, 在 $\xi < 0$ 的某一个区间内 $\sigma'(\xi) < 0$, 有效应力为拉应力; 在 T 点有效拉应力 σ'_T 最大. 设煤的抗拉强度为 σ_t . 当 $p_0 - p_1$ 足够大, 总会有 $\sigma'_T = -\sigma_t$, 导致煤体在 T 处拉断, 而 ξ_T 就是层裂煤的厚度.

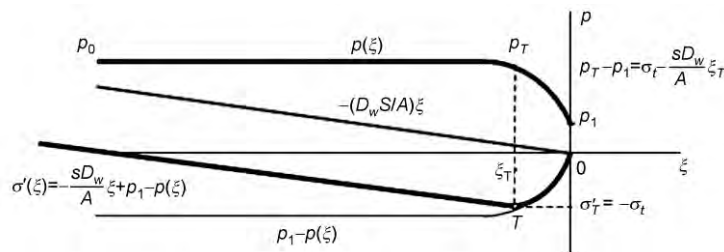


图 2 瓦斯压力、有效应力和阻力的变化曲线

Figure 2 Changes of gas pressure, effective stress and resistance.

由此给出破坏阵面恒稳推进的条件: 渗流区有效应力存在极值点 T . 在该点, 有效应力 $\left. \frac{d\sigma'}{d\xi} \right|_T = 0$ 并 $\sigma'_T = -\sigma_t$, 瓦斯压力梯度 $\left. \frac{dp}{d\xi} \right|_T = -\frac{s}{A} D_w$, 瓦斯压差 $p_T - p_1 = \sigma_t - (sD_w/A)\xi_T$, 破坏阵面得以恒稳推进. 此时的瓦斯流速为 $u_T = ksD_w/\varphi_0\eta A$.

进一步可以推导出^[18]

$$P_T = \frac{1}{1+U_T}, \quad (4)$$

$$P_T - P_1 = \Sigma_t - \frac{s}{A} \frac{D_w}{p_0} \xi_T, \quad (5)$$

$$u_T = \frac{ksD_w}{\varphi_0\eta A}, \quad (6)$$

$$\frac{1-P_1}{1-P_T} - \ln \frac{1-P_1}{1-P_T} = 1 + \frac{\Sigma_t}{U_T}. \quad (7)$$

式中无量纲量 $P_T = p_T/p_0$, $P_1 = p_1/p_0$, $\Sigma_t = \sigma_t/p_0$, $U_T = u_T/w = ksD_w/\varphi_0\eta Aw$. 另外, 在 $\xi=0$ 处有

$$\frac{u_1}{w} = \frac{1}{P_1} - 1. \quad (8)$$

3 关于煤体破碎和 II 区的混相介质等温膨胀假设

实验显示, 含瓦斯煤在突然暴露时的破碎, 经历了层裂-粉化的过程. 根据第 2 节的分析, 在 $\xi = \xi_T$ 处煤体开裂. 在开裂瞬间, $\xi = \xi_T$ 处骨架应力急降, 而瓦斯压力降到 p_1 , 有效应力由 $-\sigma_t$ 突然升到零. 在瓦斯压差驱动下, 层裂煤粉碎成细粒, 瓦斯压力由 p_1 急降到 p_2 , 细煤粒的有效应力为零, 形成 II 区. 文献[24, 27]给出一个简化的处理方法, 把气-固两相介质作为混相介质, 其破碎表征为骨架脆性破坏, 破碎后混相介质等温膨胀. 该模型认为煤在破坏前是刚性骨架的多孔介质, 卸载到临界值时脆性破坏成为气固混相介质. 由于固相热容量显著大于气相, 气体膨胀降温很快被固相放热平衡, 所以温度变化可以忽略.

含瓦斯煤体突然开挖卸载, 发生一维破坏, 其状况如图 3 所示, 图中有效拉应力记作 $\sigma' = (1-\varphi_0)(p-\sigma)$. 卸载前 ($t = t_1^+$) 开挖面处法线方向煤体压应力 σ_1 等于当地瓦斯压力 p_1 , 初始有效拉应力 $\sigma'_0 = (1-\varphi_0)$

$(p_1 - \sigma_1) = 0$. 在 $t = t_1^+$ 时刻, 开挖面煤体的压应力卸载到 σ_2 , 幅度 $-\Delta\sigma \geq p_D$, 材料卸载点还在应变 $\varepsilon=0$ 的纵轴上, 表现为刚性. $t = t_1 + \Delta t$, 卸载到 $\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1$, 材料膨胀, 状态点落在等温曲线

$$\sigma_2 = p_2 = \frac{\varphi_0 P_1}{\varphi_0 + \varepsilon_2} \quad (9)$$

上, 或有效拉应力横轴上, 表现为气固混相膨胀性质, 式中 φ_0 为初始孔隙率.

突然卸载的含瓦斯煤体有两种可能的拉伸破坏形式^[14]: 层裂和突出.

层裂破坏时, 卸载幅度为 $p_D < -\Delta\sigma < p_B$, 破坏后的状态点落到应力-应变曲线的层裂段 $(\sigma_{2i}, \varepsilon_{2i})$. 由于侧向阻尼的作用, 状态点 $(\sigma_{2i}, \varepsilon_{2i})$ 逐渐沿层裂段向上移动, 推进速度逐渐衰减.

突出破坏时, $-\Delta\sigma = p_B$, 卸压后的状态点跳到 $(\sigma_M, \varepsilon_M)$ 点, 破碎煤粉化. 这时突出波速度达到极大值 w_M . 当 $-\Delta\sigma = p_0 - \sigma_2 > p_B$ 时, 将产生速度为 w_M 的左行恒稳突出波, 状态点先跳到 $(\sigma_M, \varepsilon_M)$, 然后应力-应变沿着突出段变化, 逐渐膨胀到 $(\sigma_2, \varepsilon_2)$ 点 (见图 3 的 $x-t$ 图). 因此, II 区运动又分为两个阶段.

4 关于 II 区的方程组和粉化

假设 II 区含瓦斯煤为混相流体, 速度和压力记作 \bar{u} 和 \bar{p} , 其基本方程为

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = 0, \quad (10)$$

$$\bar{\rho} \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} \right) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = 0. \quad (11)$$

式中 $\bar{\rho} = (1-\varphi_0)\rho_s + \varphi_0\rho$, 为混相流体密度, 孔隙气体密度 $\rho = p/a^2$.

设破坏阵面以恒定速度 w 沿 $-x$ 方向推进. 取运动坐标系 ξ , 原点取在破坏阵面上, 做坐标变换 $\xi = x+wt$. 基本方程改写为

$$w \frac{d\bar{p}}{d\xi} + \frac{d\bar{p}\bar{u}}{d\xi} = 0, \quad \bar{\rho}(w+\bar{u}) \frac{d\bar{u}}{d\xi} + \frac{d\bar{p}}{d\xi} = 0.$$

对 II 区的强间断阶段积分, 得到

$$\bar{\rho}_M (w + \bar{u}_M) = \bar{\rho}_1 (w + \bar{u}_1),$$

$$\bar{p}_M - \bar{p}_1 = -\bar{\rho}_1 (w + \bar{u}_1) (\bar{u}_M - \bar{u}_1).$$

式中下标 1 表示破碎区前沿的参数, 下标 M 表示破碎

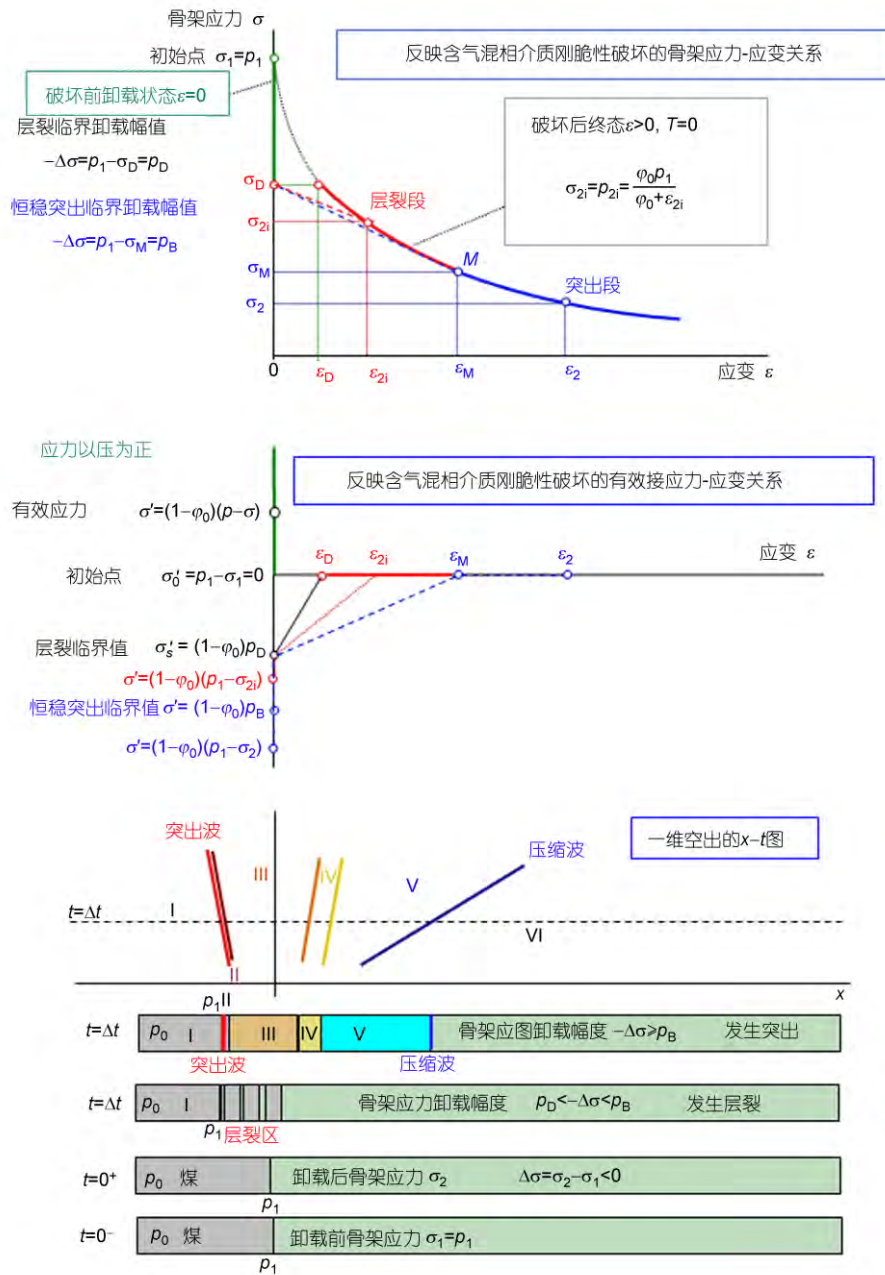


图3 (网络版彩图)用含气混相介质刚脆性破坏模型分析突出和层裂的示意图

Figure 3 (Color online) Schematic drawing of analyzing outburst and layer-fracture according to mixed phase rigid-brittle damage model.

区强间断参数. 应有 $\bar{p}_1 = p_1$.

对于渗流, 瓦斯流出 I 区的速度 $u_1 > 0$, 而煤体速度 $u_s = 0$. 这里采用混相介质模型, 近似认为流进 II 区的混相介质速度 $\bar{u}_1 = 0$. 于是左行破碎波的关系为

$$\bar{\rho}_M (w + \bar{u}_M) = \bar{\rho}_1 w, \quad (12)$$

$$\bar{p}_M - \bar{p}_1 = -\bar{\rho}_1 w \bar{u}_M. \quad (13)$$

为了讨论方便, 将式中的密度换成比容 $\bar{V} = 1/\bar{\rho}$, 于是强间断关系(12)和(13)改写为

$$\frac{w + \bar{u}_M}{\bar{V}_M} = \frac{w}{\bar{V}_1}, \quad \bar{p}_M - \bar{p}_1 = -\frac{w}{\bar{V}_1} \bar{u}_M.$$

类似于爆轰波理论, 可以导出 $\bar{p} \sim \bar{V}$ 图上的瑞利 (Rayleigh) 线, 斜率为

$$\frac{\bar{p}_M - \bar{p}_1}{\bar{V}_M - \bar{V}_1} = -\left(\frac{w}{\bar{V}_1}\right)^2 = -\left(\frac{w + \bar{u}_M}{\bar{V}_M}\right)^2.$$

考虑到状态方程 $\sigma_M = \bar{p}_M = \varphi_0 p_1 / (\varphi_0 + \varepsilon_M)$ 和 $\bar{V}_M - \bar{V}_1 = \bar{V}_1 \Delta\varepsilon$, 突出波的推进速度表达为

$$w = \sqrt{-\frac{1}{\bar{\rho}_1} \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}} = \sqrt{-\frac{1}{\bar{\rho}_1} \frac{\Delta\bar{p}}{\Delta\varepsilon}}.$$

根据图 3 所示的含气混相介质刚脆性破坏的骨架应力-应变关系, 瑞利线与等温曲线相切于 M 点, 于是得到

$$\frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_M - \sigma_D}{\varepsilon_M - 0} = \left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_M = -\frac{\varphi_0 p_1}{(\varphi_0 + \varepsilon_M)^2}.$$

式中 p_1 为 II 区前沿的瓦斯压力, $\sigma_D = p_1 - p_D$ 为临界应力, $p_D = \sigma_t + f_c \sigma_s$ 为煤体层裂时的有效拉应力, σ_s 为作用在煤体的侧压, f_c 为煤体的摩擦系数. 于是, 导出刚刚达到恒稳突出波的卸载破坏应变

$$\varepsilon_M = \varphi_0 \left[\frac{p_1}{\sigma_D} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\sigma_D}{p_1}} \right) - 1 \right]$$

和刚刚达到恒稳突出波的卸载骨架应力

$$\sigma_M = \frac{\sigma_D}{1 + \sqrt{1 - \frac{\sigma_D}{p_1}}}.$$

于是, 恒稳突出波的推进速度 w 记作 w_M , 为

$$w_M = \sqrt{\frac{p_1}{\varphi_0 \bar{\rho}_1} \frac{\sigma_D}{1 + \sqrt{1 - \frac{\sigma_D}{p_1}}}}. \quad (14)$$

按照(12)式, 切点 M 的质点速度为

$$\bar{u}_M = \frac{\bar{\rho}_1}{\bar{\rho}_M} w_M - w_M = w_M \frac{\varepsilon_M}{\varphi_0}.$$

将突出波参数用层裂参数无量纲化,

$$\frac{p_1}{p_0} = \frac{\rho_1}{\rho_0} = P_1, \quad \bar{\rho}_1 = (1 - \varphi_0) \rho_s + \varphi_0 \rho_0 P_1,$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{p_1}{\varphi_0 \bar{\rho}_1}} = \sqrt{\frac{p_0 P_1}{\varphi_0 [(1 - \varphi_0) \rho_s + \varphi_0 \rho_0 P_1]}}.$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{p_D}{p_1}} = \sqrt{\frac{\sigma_t + f_c \sigma_s}{p_0 P_1}},$$

于是表示为

$$\varepsilon_M = \frac{\varphi_0 \zeta}{1 - \zeta}, \quad (15)$$

$$\frac{\sigma_M}{p_1} = \frac{\bar{p}_M}{\bar{p}_1} = 1 - \zeta, \quad (16)$$

$$\frac{w_M}{C_1} = 1 - \zeta, \quad (17)$$

$$\frac{\bar{u}_M}{C_1} = \zeta. \quad (18)$$

从图 3 的切点 M 到 II 区后沿, 混相介质仍然满足基本方程(10)和(11). 在运动坐标系 $\xi = x + w_M t$ 中, 基本方程表达为

$$w_M \frac{d\bar{\rho}}{d\xi} + \frac{d\bar{\rho}\bar{u}}{d\xi} = 0, \quad \bar{\rho}(w_M + \bar{u}) \frac{d\bar{u}}{d\xi} + \frac{d\bar{p}}{d\xi} = 0.$$

从 $(\sigma_M, \varepsilon_M)$ 到 $(\bar{p}_2, \varepsilon_2)$ 积分上述两个方程, 得到

$$\bar{\rho}_2 (w_M + \bar{u}_2) = \bar{\rho}_M (w_M + \bar{u}_M), \quad (19)$$

$$\bar{p}_2 - \sigma_M = -\bar{\rho}_M (w_M + \bar{u}_M) (\bar{u}_2 - \bar{u}_M). \quad (20)$$

式中 $\frac{\bar{\rho}_M}{\bar{\rho}_1} = \frac{\bar{p}_M}{p_1} = \frac{\varphi_0}{\varphi_0 + \varepsilon_M}$, $\frac{\bar{\rho}_2}{\bar{\rho}_1} = \frac{\bar{p}_2}{p_2} = \frac{\varphi_0 + \varepsilon_2}{\varphi_0 + \varepsilon_M}$.

假设 $\xi = -\xi_T \varepsilon(\xi)$, 考虑 $\bar{p}(\xi) = p_1 \varphi_0 / (\varphi_0 + \varepsilon(\xi))$,

则 $\xi = -\xi_T \varphi_0 (p_1 / \bar{p}(\xi) - 1)$. 于是, $\xi_M = -\xi_T \varepsilon_M$, 粉碎区厚度 ξ_2 表示为

$$\xi_2 = -\xi_T \varphi_0 \left(\frac{p_1}{\bar{p}_2} - 1 \right). \quad (21)$$

5 关于 III, IV, V 区的简化假设和压缩波

文献[10]指出, 单位体积煤中所含瓦斯能为 $\varphi \gamma p_g / (\gamma - 1)$, 将这些能量全部折算成抛煤的速度, 取孔隙率 $\varphi \sim 0.1$ 、多方指数 $\gamma \sim 1.2$, 当瓦斯压力 $p_g = 0.5 \sim 5.0$ MPa 时, 抛煤速度为 $6 \sim 20$ m/s. 如果把抛掷的煤当做一个漏气的活塞, 估计压缩波后气流速度 Δv 为 10 m/s 量级. 按照波动关系 $\Delta p = \rho_g c_a \Delta v$ 估计, 超压量级为 $\Delta p = 0.4$ kPa, 约为 140 dB. 这是一个强声波, 可以考虑声学近似. 据此假设 III, IV, V 区质点速度相等, 气相压力相同, 即压缩波以声速 c_a 恒速右行,

混相流前沿轨迹 C 与纯瓦斯流前沿轨迹 D 平行^[18].

III 区前沿应与 II 区后沿连续, 即 III, IV, V 区质点速度等于 \bar{u}_2 , 压力等于 p_2 , IV 区消失. 对于 V 区, 等温假设不再适用. 参照文献[18]的模型, 空气的声抗记作 $\rho_a c_a$, 则空气声波关系为

$$\bar{p}_2 = p_a + \rho_a c_a \bar{u}_2. \quad (22)$$

将(19)–(22)这三个方程联立求解, 并用参数 C_1 , ζ , $\bar{\rho}_1, p_1$ 无量纲化, 得到

$$\frac{\bar{u}_2}{C_1} = \varphi_0 \frac{(1-\zeta) \left(1 + \frac{\zeta}{\varphi_0} \right) - \frac{p_a}{p_1}}{\frac{\rho_a c_a}{\bar{\rho}_1 C_1} + 1 - \zeta}, \quad (23)$$

$$\frac{\bar{p}_2}{\bar{\rho}_1} = \frac{1-\zeta}{1-\zeta + \frac{\bar{u}_2}{C_1}}, \quad (24)$$

$$\frac{\bar{p}_2}{p_1} = \frac{p_a}{p_1} + \frac{\rho_a}{\varphi_0 \bar{\rho}_1} \frac{c_a}{C_1} \frac{\bar{u}_2}{C_1}. \quad (25)$$

综合上述分析, 在动坐标 $\xi=x+w_M t$ 上绘制瓦斯压力分布曲线 $p(\xi)$ 如图 4. 若给定 x , 则 $p(\xi)$ 是 $p(t)$ 曲线; 若给定 t , 则 $p(\xi)$ 是 $p(x)$ 曲线.

6 突出波理论与实验的比较

现在, 待求的未知量是 $p_1, p_T, \xi_T, w_M, \varepsilon_M, \bar{p}_M, \bar{u}_M, \bar{p}_2, \bar{\rho}_2, \xi_2$ 和 \bar{u}_2 , 总共 11 个. 联立 I 区的(4), (5), (7)式, II 区的(15)–(18), (21)式, 和 III, IV, V 区的(23)–(25)式, 只要给定相关的初始参数, 由(6)式给定

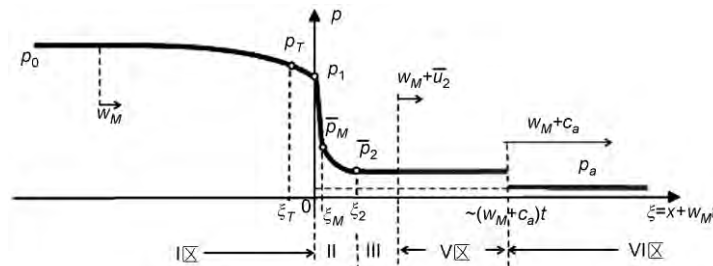


图 4 $p(\xi)$ 示意曲线(III、V 区随时间延长不断扩大)

Figure 4 Schematic curve of $p(\xi)$ (Region III and V enlarge with time).

表 1 一维突出模拟实验参数表

Table 1 Parameters of one dimension outburst experiment

压制力(MPa)	孔隙率 φ_0	密度 $(1-\varphi_0)\rho_s$ (kg/m ³)	渗透率 k (10^{-12} m ²)	摩擦力 D_w (MPa)	抗拉强度 σ_T (MPa)	$\frac{sD_w}{A}$ (MPa/m)	u_T (m/s)
0.42	0.39	935	0.762	0.021	0.008	1.42	0.3
0.70	0.36	981	0.731	0.028	0.013	1.89	0.4

u_T , 就可以完成对一维突出波的全流场计算. 由于(7)式为超越方程, 没有解析结果, 而混合相仅有用渗流解表示的关系式, 所以没有全场的解析解.

针对一维突出模拟实验数据^[14], 用本文给出的突出波模型做了数值计算. 参数见表 1.

当煤样的压制力为 0.42 MPa, 抗拉强度 $\sigma_T=0.008$ MPa, 特征渗流速度 $u_T=0.3$ m/s 时见图 5–7.

当煤样的压制力为 0.70 MPa, 抗拉强度 $\sigma_T=0.013$ MPa, 特征渗流速度 $u_T=0.4$ m/s 时见图 8 和图 9.

图 6 和图 9 显示, 在瓦斯压力低端, II 区后沿瓦斯流速 \bar{u}_2 将小于前沿流速 u_1 , 这是不合理的. 据此推断, 后沿瓦斯流速 \bar{u}_2 等于前沿流速 u_1 时的 p_0 应当是恒稳突出的临界瓦斯压力 p_{cr2} . 低于它破碎阵面的恒稳推进就不可能了. 当压制力为 0.42 MPa, $\sigma_T=0.008$ MPa, $u_T=0.3$ m/s 时, 计算得到 $p_{cr2}=0.175$ MPa; 压制力为 0.70 MPa, $\sigma_T=0.013$ MPa, $u_T=0.4$ m/s 时, 计算得到 $p_{cr2}=0.205$ MPa. 实验的结果是 $p_{cr2} \approx 0.20$ MPa. 因此, 关于 p_{cr2} 的上述计算结果与实验数据大致符合.

7 结论

一维恒稳突出模型用于模拟实验现象, 基本物理过程是严格的, 数学描述则尽可能简化, 所得结果与实验数据基本符合.

7.1 煤与瓦斯突出时含瓦斯煤的破坏特征

瓦斯压力梯度足够陡时, 强渗流导致多孔介质

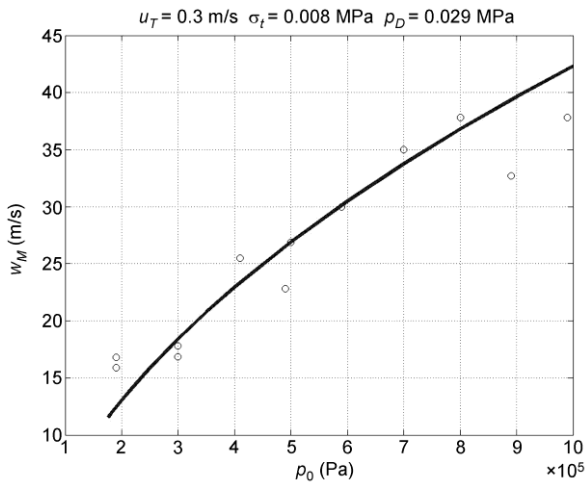


图5 原始瓦斯压力 p_0 ~破坏阵面推进速度 w_M 曲线(圆圈为实验点, 实线是理论曲线)

Figure 5 Curve of damage front velocity w_M versus original gas pressure p_0 (circles for experiment and lines for theory).

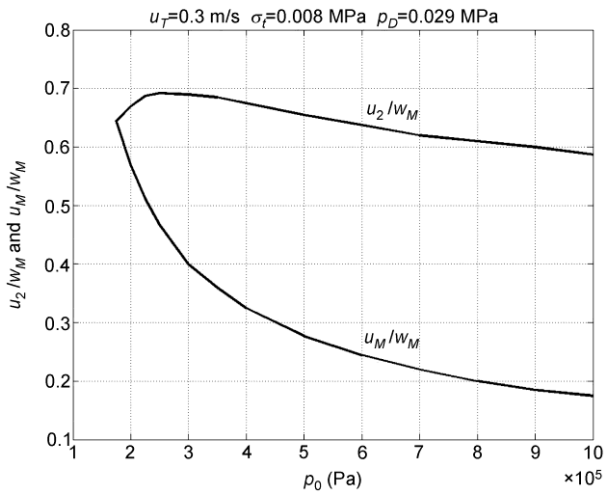


图6 原始瓦斯压力 p_0 ~无量纲流速 u/w_M 计算曲线

Figure 6 Curve of non-dimensional velocity u/w_M versus original gas pressure p_0 .

层裂-拉伸破坏. 由破裂点 T 到破坏阵面间的瓦斯压力差 $p_T - p_1$, 恰好等于煤层抗拉强度与侧向阻力之和 $\sigma_T - \xi_T (sD_w/A)$.

拉裂后高压瓦斯膨胀释能导致煤岩体迅速粉化抛出, 发生瓦斯突出. 这里有两个反向推进的间断, 一个是向煤体深部推进的拉伸强间断, 另一个是向地下开挖空间推进的空气压缩波. 拉伸强间断持续

向煤体深部推进, 使得煤岩瓦斯源源不断地抛出. 巷道空气压缩波虽然可用声波近似, 但波后的混相流密度远大于波后压缩空气的密度, 其冲量流远大于纯空气声波的冲量流, 对巷道有远大于纯空气声波的破坏能力.

瓦斯主导的层裂和粉化, 是瓦斯突出区别于冲

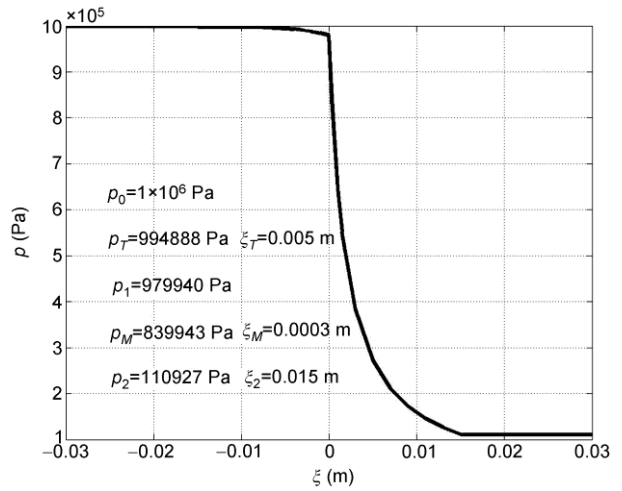


图7 $p(\xi)$ 计算曲线($p_0=1.0$ MPa. I 区 $\xi < 0$, II 区 $0 < \xi < \xi_2$, III 区 $\xi > \xi_2$)

Figure 7 Calculation curve of $p(\xi)$ ($p_0=1.0$ MPa. For region I $\xi < 0$, region II $0 < \xi < \xi_2$ and region III $\xi > \xi_2$).

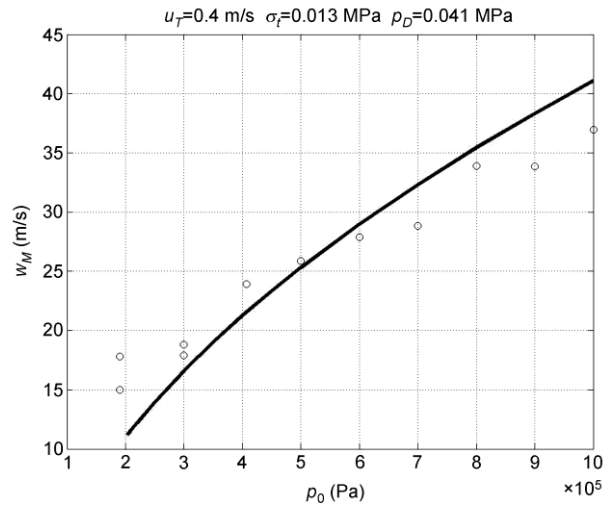


图8 原始瓦斯压力 p_0 ~破坏阵面推进速度 w_M 曲线(圆圈为实验点, 实线是理论曲线)

Figure 8 Curve of damage front velocity w_M versus original gas pressure p_0 (circles for experiment and lines for theory).

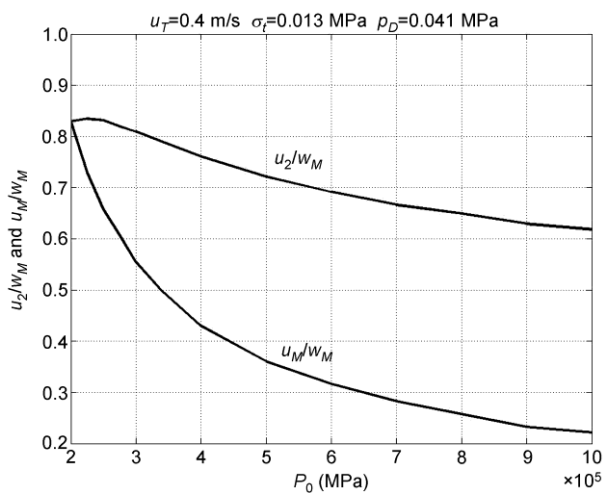


图9 原始瓦斯压力 p_0 ~无量纲流速 u/w_M 计算曲线

Figure 9 Curve of non-dimensional velocity u/w_M versus original gas pressure p_0 .

击地压(即岩爆), 区别于一般岩石破坏(拉伸破坏、压缩破坏、断裂、流变等)的特征现象。

7.2 两种突出波模型

描写突出波有两种力学模型, 两相流动和混相流动. 与文献[18]的两相流模型的 $p_{cr2} \approx 0.14-0.16$ MPa 相比, 混相流模型计算的 p_{cr2} 更接近实验值 $p_{cr2} \approx 0.2$ MPa. 空气声波远离变化急剧的 II 区, 属于远区效应, 主要取决于瓦斯能量释放. 两个模型计算的压缩波超压 $\Delta p = p_2 - p_a$ 相近.

与实验相比, 混相介质模型对波速的估计很好, 计算结果与实验大体一致, 说明混相介质突出波模型可以较好地描写一维恒稳推进的瓦斯突出. 特别好的是, 混相模型可以得到反映一维瓦斯突出波参数的简洁的表达式, 用起来更方便和清晰.

7.3 四个重要的特征量

本文引入了两个特征速度. $u_T = ksD_w / \varphi_0 \eta A$ 为层裂的特征渗流速度, 为 10^{-1} m/s 量级, 成为衡量渗流强度的尺子, 它反映了侧面阻尼(或摩擦)在层裂中的作用. $C_1 = \sqrt{p_1 / \varphi_0 \bar{\rho}_1}$ 是一个度量瓦斯突出抛掷速度和突出波速度的特征量, 可以改写为 $C_1 = a \sqrt{(\rho_0 P_1 / \rho_s \varphi_0) / (1 - \varphi_0 + \varphi_0 \rho_0 / \rho_s P)}$. 煤的密度 ρ_s 比瓦斯密度 ρ_0 大三个量级, 所以 C_1 比瓦斯等温声速 $a = \sqrt{p_0 / \rho_0}$ 小几十倍, 比混相介质等温声速 $\sqrt{p_1 / \bar{\rho}_1}$ 大 $\sqrt{1/\varphi_0}$ 倍, 是 10^1 m/s 量级. 如文献[17]所说, II 区混相流可能跨音速.

本文引入两个无量纲强度. σ_T / p_0 是控制渗流层裂的无量纲拉伸强度. $\zeta^2 = (\sigma_T + f_c \sigma_s) / p_0 P_1$ 是控制层裂粉化的无量纲强度, 其中 σ_s 是垂直于层裂面的侧压, 是地应力在一维模型中的表现, f_c 是侧壁摩擦系数. 侧压对煤岩体本构的影响间接体现在煤岩体的抗拉强度上.

需要说明, 无量纲压力 P_1 是因变量, 所以不能将特征速度 C_1 与无量纲量 ζ^2 理解为主定量.

7.4 本文的模型和概念有待于实践检验

本文的力学模型得到一维模拟实验的验证. 实际突出是三维的, 其应力应变均为张量, 地应力作用下的破坏与煤岩体的剪切和拉伸、断裂、流变等性质相关, 但是本文讨论的层裂粉化仍然是实际瓦斯突出的基本特征. 应用本文采取的混相流模型和无量纲量概念是否可以得到符合现场实际的结果, 有待今后检验.

参考文献

- 1 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术. 北京: 中国矿业大学出版社, 1998
- 2 Hu Q T, Zhou S N, Zhou X Q. Mechanical mechanism of coal and gas outburst process (in Chinese). J China Coal, 2008, 33(12): 1368-1372 [胡千庭, 周世宁, 周心权. 煤与瓦斯突出过程的力学作用机理. 煤炭学报, 2008, 33(12): 1368-1372]
- 3 Xian X F, Gu M, Li X H, et al. Excitation and occurrence conditions for coal and gas outburst. Rock Soil Mech, 2009, 30(3): 577-581 [鲜学福, 辜敏, 李晓红, 等. 煤与瓦斯突出的激发和发生条件. 岩土力学, 2009, 30(3): 577-581]
- 4 林柏泉. 矿井瓦斯防治理论与技术. 北京: 中国矿业大学出版社, 2010
- 5 Otuonye F, Sheng J. A numerical simulation of gas flow during coal/gas outburst. Geotech Geol Eng, 1994, 12: 15-34
- 6 Zhou S N, He X Q. Rheological hypothesis of coal and methane outburst mechanism. J China Univ Mining Technol, 1990, 19(2): 1-8 [周世宁, 何学秋. 煤和瓦斯突出机理的流变假说. 中国矿业大学学报, 1990, 19(2): 1-8]
- 7 Fedorchenko I A, Fedorov A V. Gas-dynamic stage of the coal and gas outburst with allowance for desorption. J Mining Sci, 2012, 48(1):

15-26

- 8 Sobczyk J. The influence of sorption processes on gas stresses leading to the coal and gas outburst in the laboratory conditions. *Fuel*, 2011, 90: 1018-1023
- 9 Khristianovich S A. Distribution of gas pressure close to an advancing coal face. *Tekhn Nauk Irv ANUSSR Otd*, 1953, 12: 1673-1678
- 10 Zheng Z M. A study of the mechanism of coal and gas outburst in view of dimensional analysis (in Chinese). In: *Mechanics and Construction*. Beijing: Peking University Press, 1982. 128-137 [郑哲敏. 从数量级和量纲分析看煤与瓦斯突出的机理. 见: 力学与生产建设. 北京: 北京大学出版社, 1982. 128-137]
- 11 Ding X L, Ding Y S, Yu S B. Incipient fracture of coal under one dimensional gas seepage (in Chinese). *Acta Mech Sin*, 1990, 22(2): 154-162 [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. 力学学报, 1990, 22(2): 154-162]
- 12 Chen L, Ding Y S, Cheng C M. Experimental study of steady state propagation of fracture front in one-dimensional coal gas outburst (in Chinese). In: *the Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects*. Chengdu, 1992. 154-157 [陈力, 丁雁生, 郑哲敏. 一维瓦斯突出破坏阵面恒稳推进的实验研究. 见: 强动载荷及效应国际研讨会论文集. 成都, 1992. 154-157]
- 13 Cheng C M, Chen L, Ding Y S. A Laboratory study of coal gas outburst (in Chinese). In: *the Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects*. Chengdu, 1992. 3-15 [郑哲敏, 陈力, 丁雁生. 关于瓦斯突出的实验研究. 见: 强动载荷及效应国际研讨会论文集. 成都, 1992. 3-15]
- 14 Ding Y S, Chen L, Meng X Y, et al. Simulated Test of One-Dimensional Coal and Gas Outburst (in Chinese). Research Report, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences. 1996 [丁雁生, 陈力, 孟祥跃, 等. 一维煤与瓦斯突出模拟实验. 中国科学院力学研究所研究报告. 1996]
- 15 Kou S Q, Ding Y S, Chen L, et al. The effect of around stress and porous liquid on the mechanical properties of outburst coal (in Chinese). *Sci Sin Math*, 1993, 23(3): 263-270 [寇绍全, 丁雁生, 陈力, 等. 周围应力与孔隙流体对突出煤力学性质的影响. 中国科学: 数学, 1993, 23(3): 263-270]
- 16 Yu S B. Steady advance of coal and gas burst (in Chinese). *Acta Mech Sinica*, 1988, 20(2): 97-106 [俞善炳. 恒稳推进的煤与瓦斯突出. 力学学报, 1988, 20(2): 97-106]
- 17 胡千庭, 文光才. 煤与瓦斯突出的力学作用机理. 北京: 科学出版社, 2013
- 18 Cheng C M, Chen L, Ding Y S. Steady propagation of fracture front in one-dimensional coal gas outburst (in Chinese). *Sci Sin Math*, 1993, 23(4): 377-384 [郑哲敏, 陈力, 丁雁生. 一维瓦斯突出破碎阵面的恒稳推进. 中国科学: 数学, 1993, 23(4): 377-384]
- 19 Cheng W Y. The Formation and model of coal gas outburst shock wave (in Chinese). *Safety Coal Mines*, 2000, 31(9): 23-25 [程五一. 煤与瓦斯突出冲击波的形成及模型建立. 煤矿安全, 2000, 31(9): 23-25]
- 20 Wu A J, Jiang C L. Research on the propagation of shock waves from coal and gas outburst (in Chinese). *J China Univ Mining Technol*, 2011, 40(6): 852-857 [吴爱军, 蒋承林. 煤与瓦斯突出冲击波传播规律研究. 中国矿业大学学报, 2011, 40(6): 852-857]
- 21 Hao Y. Researches on propagation law of coal and gas outburst in road-way network (in Chinese). *Coal Technol*, 2009, 28(11): 74-76 [郝宇. 煤与瓦斯突出沿井巷传播规律研究. 煤炭技术, 2009, 28(11): 74-76]
- 22 Meng X Y, Ding Y S, Chen L, et al. 2D simulation test of coal and gas outburst (in Chinese). *J China Coal Soc*, 1996, 21(1): 57-62 [孟祥跃, 丁雁生, 陈力, 等. 煤与瓦斯突出的二维模拟实验研究. 煤炭学报, 1996, 21(1): 57-62]
- 23 Fang J Z, Yu S B, Tan Q M. A lamination separation and fragmentation model of coal and gas outburst (in Chinese). *J China Coal Soc*, 1995, 20(2): 149-153 [方健之, 俞善炳, 谈庆明. 煤与瓦斯突出的层裂-粉碎模型. 煤炭学报, 1995, 2(2): 149-153]
- 24 Yu S B, Zheng Z M, Tan Q M, et al. Damage of porous media containing pressurized gas by unloading and the maximum damage principle for critical outburst (in Chinese). *Acta Mech Sin*, 1997, 29(6): 641-646 [俞善炳, 郑哲敏, 谈庆明, 等. 含气多孔介质的卸压破坏及突出的极强破坏准则. 力学学报, 1997, 29(6): 641-646]
- 25 Tan Q M, Yu S B, Zhu H Q. Fracture of coal containing pressurized gas by sudden relieving (in Chinese). *J China Coal Soci*, 1997, 22(5): 514-518 [谈庆明, 俞善炳, 朱怀球, 等. 含瓦斯煤在突然卸压下的开裂破坏. 煤炭学报, 1997, 22(5): 514-518]
- 26 Huang H D, Zheng Z M, Yu S B, et al. Layered fractures of coal containing pressurized gas by sudden unloading (in Chinese). *J China Coal Soci*, 1999, 24(2): 142-146 [黄弘读, 郑哲敏, 俞善炳, 等. 突然卸载下含气煤的层裂. 煤炭学报, 1999, 24(2): 142-146]
- 27 Zhou S N, Xian X F, Zhu W X. Strategy symposium on the theory of coal and gas outburst disaster prevention and cure (in Chinese). 2001 [周世宁, 鲜学福, 朱旺喜. 煤矿瓦斯灾害防治理论战略研讨. 2001]

A model of one-dimensional coal gas outburst wave

CHEN Li, QIAO JiYan* & DING YanSheng

*Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences,
Beijing 100190, China*

In 1993, in consideration of seepage damage, two phase flow and air compression wave, a model of one-dimensional coal gas outburst constant advance is published by Cheng Z M, etc., and in 1997 in view of air-solid mixed phase flow a strength discontinuity model published by Yu S B, etc. Based on the above researches, considering in factors of seepage damage, strength discontinuity of mixed phase flow and air compression wave, the paper proposed a new one-dimensional coal gas outburst constant advance. By the model, numerical simulations are in accord with the experimental results.

coal gas outburst, damage front, air-solid mixed phase, outburst wave

PACS: 46.40.Cd, 62.20.Mk, 91.60.Hg

doi: 10.1360/132013-113