

文章编号:1000-582X(2009)03-0314-05

# 煤与瓦斯突出后对防突风门破坏的数值模拟

程卫民,王 刚,周 刚,陈连军

(山东科技大学 资源与环境工程学院,山东 青岛 266510)

**摘 要:**采用数值模拟的方法对煤与瓦斯突出后对防突风门的破坏特性进行研究,阐明突出时作用在门上的反射超压,给出其计算式;并以相似模拟实验所获得的风门压力数据为基础,运用 ANSYS 软件对防突风门的破坏特性进行了模拟,模拟结果表明:门垛最薄弱的地方就是风筒所在位置;同时表明,最先到达防突风门的冲击波压力并不呈现最大值,由于反射超压作用的,几百毫秒后防突风门所受压力会突然上升达到最大值,这与实验结果相近。

**关键词:**瓦斯突出;冲击波理论;反向防突风门;数值模拟

中图分类号:TD713

文献标志码:A

## Numerical simulation of outburst prevention air door destruction by coal and gas outbursts

CHENG Wei-min, WANG Gang, ZHOU Gang, CHEN Lian-jun

(College of Resource and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, P. R. China)

**Abstract:** We explore the destruction of outburst prevention air doors by coal and gas outbursts using numerical simulation. The reflective overpressure when an outburst acts on doors is elucidated, and its formula is obtained. The destruction of outburst prevention wind doors by coal and gas outburst are simulated using ANSYS software based on data of wind door pressure obtained by similarity simulation experiment. The simulation results show that the weakest place of gate posts is where the wind tube is. Simulation results also show the first shock wave pressure that acts on an outburst prevention wind door is not the maximum one. Due to the effect of reflected overpressure, the outburst prevention wind door pressure will reach the maximum in several milliseconds. This finding is similar to the experiment result.

**Key words:** gas outburst; shock wave theory; reverse outburst prevention air door; numerical simulation

国内外对煤与瓦斯突出的防治技术进行大量的研究,但由于煤与瓦斯突出是一种及其复杂的矿井瓦斯动力现象,迄今为止对各种地质开采条件下突出的规律还未完全掌握,尚难完全避免煤与瓦斯突出的发生<sup>[1-2]</sup>。而中国突出矿井的安全防护设施较薄弱,当发生大型和特大型突出时,其突出产生的冲

击波往往破坏反向风门和通风设施,造成瓦斯逆流并波及到其它区域,扩大了突出带来的人员伤亡等严重后果<sup>[3]</sup>。因此,在采掘突出煤层的过程中,除了采取防突技术措施外,还必须采取防突安全措施,加强井下作业人员的安全防护,提高矿井的抗灾能力<sup>[4]</sup>。

收稿日期:2008-11-18

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(50534080);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0605)

作者简介:程卫民(1966-),男,山东科技大学教授,博士生导师,主要从事矿井瓦斯、粉尘防治及降温技术方向的研究,  
(Tel)0532-86057013;(E-mail)chengmw@163.com。

## 1 煤与瓦斯突出形成冲击波对防突风门的力学响应

当发生大型或特大型煤与瓦斯突出时,喷出孔洞的粉煤瓦斯流处于高度欠膨胀状态,在该状态下粉煤和瓦斯一出孔洞就急速膨胀,并产生冲击波<sup>[5]</sup>。进行冲击波模型计算时,只考虑冲击波前、后状态,但是由于冲击波极薄,则认为煤粉—瓦斯与巷道等物体的热交换和摩擦小到可以忽略不计<sup>[6]</sup>。因此,从突跃过程的起始状态到终止状态,可以当成没有外部摩擦和导热作用的理想状态处理。由于气体的比热容远远大于固体,因而气体膨胀能力要远大于固体,所以考虑以理想的气体膨胀研究突出后产生的冲击波问题<sup>[7]</sup>。假设如下。

1) 突出前,井下巷道空气流速相对突出气流的初压为零,此时状态参数:空气压力为  $p_0$ , 密度为  $\rho_0$ , 温度为  $T_0$ , 冲击波阵面空间坐标以突出点为坐标原点, 距离以  $x$  表示。在波阵面上的参数为压力  $p_1$ , 密度为  $\rho_1$ , 波阵面上的气流速度为  $u_1$ , 则

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= p_0 + \frac{2\rho_0 D^2}{k+1} \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2}\right), \\ \rho_1 &= \frac{\rho_0(k+1)}{k-1 + \frac{c_0^2}{D^2}}, \\ u_1 &= \frac{2D}{k+1} \left(1 - \frac{c_0^2}{D^2}\right), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $k$  为气体压缩系数;  $c_0$  为声速;  $D$  为冲击波正面的速度。

2) 在突出过程中,被粉煤—瓦斯所席卷的气体,其质量都集中在波阵面附近厚度为  $\Delta x$  的薄层内,并认为等于波阵面上的密度  $\rho_1$ , 则在薄层  $\Delta x$  内的质量  $M$  等于原来巷道面积为  $s$ 、长度为  $x$  的巷道空气的质量,即

$$M = s\Delta x\rho_1 = sx\rho_0. \quad (2)$$

3) 在薄层  $\Delta x$  内的气流速度等于波阵面上的气流速度  $u_1$ , 薄层内部的压强为  $p_x$ , 同时令它等于波阵面上压强的  $\alpha$  倍。在薄层气流中建立冲量方程,即

$$\frac{d}{dt}(Mu_1) = s(p_x - p_0) = s(\alpha p_1 - p_0). \quad (3)$$

在不考虑其它能量损失时,瓦斯膨胀对空气介质做功应等于波阵面运动的动能和波阵面薄层包围空气的内能<sup>[8]</sup>,即

$$W = \frac{1}{2}Mu_1^2 + \frac{1}{k-1}sx p_x. \quad (4)$$

将式(1)代入式(4),可得

$$W = 2s\rho_0 \left[ \frac{1}{(k+1)^2} + \frac{\alpha}{k^2-1} \right] C_1^2 x^{-2(1-\alpha)+1}.$$

在不考虑能量损失的条件下,瓦斯膨胀做功的能量是常数,与  $x$  大小无关,故  $-2(1-\alpha)+1=0$ ,  $\alpha=\frac{1}{2}$ , 则

$$C_1 = \left( \frac{W}{s\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} \left[ \frac{(k+1)^2(k-1)}{3k-1} \right]^{\frac{1}{2}}.$$

对  $\frac{dx}{dt} = D = C_1 x^{-\frac{1}{2}}$  积分得

$$x = \left( \frac{3}{2} C_1 \right)^{\frac{2}{3}} t^{\frac{2}{3}} = \epsilon \left( \frac{W}{s\rho_0} \right)^{\frac{1}{3}} t^{\frac{2}{3}}, \quad (5)$$

式中,  $\epsilon = \left[ \frac{9(k+1)^2(k-1)}{4(3k-1)} \right]^{\frac{1}{3}}$ 。

突出后,在巷道产生的冲击波波阵面的速度为

$$u_1 = \frac{2D}{k+1} = \eta \left( \frac{W}{s\rho_0} \right)^{\frac{1}{2}} x^{-\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

式中,  $\eta = \left[ \frac{4(k-1)}{3k-1} \right]^{\frac{1}{2}}$ 。

根据冲击波速度和入射压的关系式

$$\Delta p_\lambda = \frac{2\gamma}{\gamma+1} \left[ \left( \frac{u_1}{v_0} \right)^2 - 1 \right] \times 0.098, \quad (7)$$

式中:  $\Delta p_\lambda$  为入射压, MPa;  $\gamma$  为空气的比热比, 取 1.4;  $v_0$  为介质中音速。

因为实际生产中,反向防突风门安设在进风侧,另一侧有通风回路,且回风巷道与安装反向防突风门的进风巷道有一定的夹角,因而作用在反向防突风门上的入射压将发生衰减<sup>[9]</sup>。当冲击波前进过程中,其衰减系数为  $\xi$ , 实际作用在门上的入射压为

$$\Delta p = \frac{\Delta p_\lambda}{\xi}.$$

根据冲击波理论,作用在门上的反射超压由下式计算<sup>[10]</sup>

$$\Delta p_m = 2\Delta p + \frac{6\Delta p^2}{0.7 + \Delta p}, \quad (8)$$

式中,  $\Delta p_m$  为反射超压, MPa。

## 2 冲击波对防突风门破坏的数值模拟

### 2.1 防突风门破坏模式与破坏准则

当煤与瓦斯突出大型或特大型突出时,产生强大的冲击波冲击防突风门和门垛,冲击波到达防突风门而受阻,便形成向巷道反射的冲击波。防突风门在冲击波载荷的作用下发生弹塑性变形,当材料的应力强度达到屈服极限时,风门和门垛就有可能变形或破坏。对于门垛而言,首先是在结构的薄弱部位发生裂缝并破坏。冲击波产生的超压还可能造成人员的伤亡<sup>[11]</sup>。

由于冲击波对防突风门的瞬时冲击,在冲击过程中风门和门垛将产生应力和变形。冲击应力应变场存在着材料非线性、几何非线性等非线性问题,考

考虑到冲击应力过程的复杂性,为了计算的准确,将冲击应力场看作材料非线性瞬态问题<sup>[12]</sup>。选用弹塑性力学模型,用增量理论进行计算,并在此基础上作如下假定。

1) 材料的屈服服从米塞斯(Von Mises)屈服准则;

2) 塑性区内的行为服从塑性流动准则和强化准则。

## 2.2 防突风门的动力载荷

在突出冲击波反射超压载荷作用下,防突风门和门垛结构材料内部的应变速率与静态载荷作用时相比相差较大。随着应变速率的提高,材料的力学特性将有不同程度的变化。进行防突风门结构动力学响应分析首先要确定载荷<sup>[13]</sup>。

通过煤与瓦斯突出的灾变损害研究可知,由于突出产生冲击波的影响因素较多,再加上防突风门以及门垛几何形状和材料的不均衡。为了研究防突风门在冲击波反射超压得载荷作用下的动力学响应必须对其进行简化处理。简化模型即能在一定程度上反映载荷的真实特征,同时在工程中又易于应用,综合考虑提出近似载荷曲线模型为

$$p(t) = a \cdot t^n + b \cdot t^{n-1} + \dots + c \cdot t + d, \quad (9)$$

其中: $p(t)$ 为 $t$ 时刻作用在防突风门上的反射超压 $p$ ;  $a, b, c, d$ 为常数。

根据煤科总院重庆分院防突风门工业模拟试验资料,爆炸产生的爆炸冲击波波速从 227 m/s 递增到 850 m/s 以上。爆炸冲击波作用在门上的超压也随之增大,由 0.059 MPa 逐步增大到 0.765 MPa。每次试验结束后均对 FM 反向防突风门及门垛进行详细观测,在起爆室充 100 m<sup>3</sup> 的瓦斯,其浓度配到 8.20% 时,反向防突风门和门垛未发生任何变形破坏,完好无损。当在起爆室充 100 m<sup>3</sup> 的瓦斯,其浓度配到 9.16% 时,下铰页座与风筒和门垛毛料石结合处发生微小裂缝。门垛通道路面上的水沟盖板有十余块发生错动。反向防突风门和门垛的其他部位均未发生任何变形。堆放在风道口的柔性风筒也未产生位移和破坏,风道内防逆流装置完好。在起爆室充 100 m<sup>3</sup> 的瓦斯,其浓度配到 9.48% 时,起爆后测得冲击波波速大于 960 m/s,作用在反向防突风门上的载荷为 0.909 MPa。经观测发现门垛下铰页座从墙内拉出,风道后端的料石被冲垮,横梁悬吊。门垛风道右侧的前端上巷道产生约 40 mm 的位移痕迹,左侧和门垛后端未见位移痕迹。防逆流装置铁风筒受压变形。反向防突风门的第二拉板筋与门边框焊缝出现 50 mm 长的裂纹,门拱边框的悬臂端发生弯曲变形,其最大挠度为 3 mm,其它部分完好<sup>[14]</sup>。将其中第 4 次试验的 17 测试孔的反射超压

数据进行处理(表 1),求出近似的方程。

表 1 第 4 次试验第 17 测试孔防突风门反射超压原始数据

时间/ms	压力/kPa	时间/ms	压力/kPa
582	62.06	680	254.80
590	78.30	690	182.90
600	65.33	700	156.80
610	68.60	710	189.47
620	58.80	720	130.67
630	78.30	730	123.13
640	103.53	740	117.60
650	91.47	750	52.27
660	137.20	760	78.30
670	535.73	770	117.55

近似载荷曲线模型为

$$p = -1.5515 \times 10^{-9} \times t^6 + 6.3155 \times 10^{-6} \times t^5 - 0.1069 \times t^4 + 9.6179 \times t^3 - 4.8574 \times 10^3 \times t^2 + 1.3051 \times 10^6 \times t - 1.4573 \times 10^8.$$

## 2.3 几何模型的构造与数值分析

工程问题一般是带有物理情况的数学模型,数学模型中的微分方程组是通过对系统或者控制体应用自然的基本定律和原理导出来的。有限元方法就是用于求解工程中各类问题的一种数值方法。在数值模拟中,简化模型和建模是关键。根据 FM 防突风门的具体尺寸和模拟的需求,几何模型可以分为以下几部分:门垛、风门及门框、巷道地面、巷道侧壁。根据防突风门、门垛和巷道的几何尺寸,在 ANSYS 中采用 APDL 命令流建立其实体模型。实体模型包括:门垛、门框、防突风门及与门垛接触的巷道地面,模型如图 1。

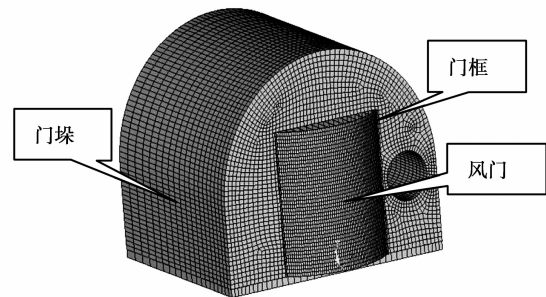


图 1 整体有限元模型

选取单元类型为 Solid45,对于门垛和巷道地面,在 ANSYS 中采用各向同性材料,材料参数为:弹性模量  $E = 4\ 000$  MPa,泊松比  $\mu = 0.25$ ,密度  $2\ 800$  kg/m<sup>3</sup>,对于风门和门框,其材料也为各向同性,材料参数为:弹性模量  $E = 2 \times 10^5$  MPa,泊松比

$\mu=0.3$ ,密度  $7\ 800\ \text{kg/m}^3$  [16]。

在风门、门垛迎爆面施加均布压力载荷,如果不考虑风道内部圆柱面对门垛结构的影响,模拟结果如图2。

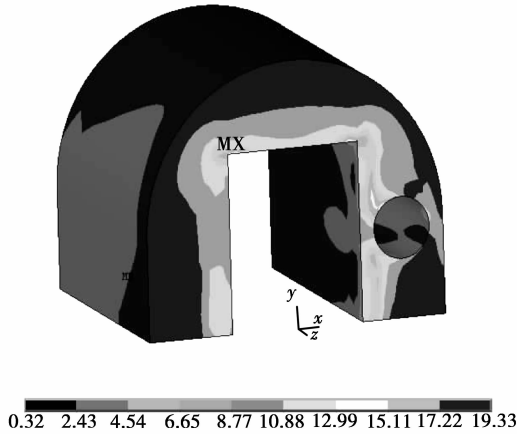


图2 门垛的应力云图

从图2可以看出,门垛在均布冲击载荷作用下,应力值较大的区域分布在右门框与风洞之间,这是由于:

- 1) 风门载荷通过门框传递到了该局部区域;
- 2) 门垛风道开孔附近,结构较弱。

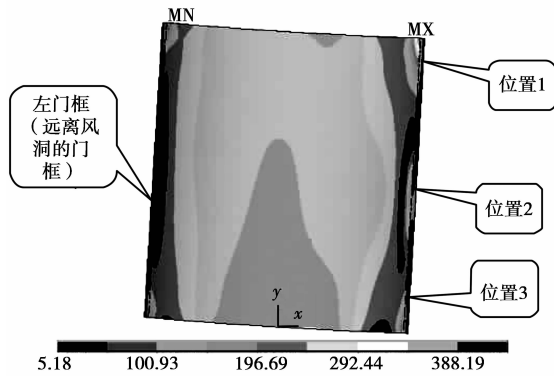


图3 风门与门框应力云图

从图3可以看出应力值较大的区域也是出现在右门框附近,这与试验结果总体上是一致的。针对风门右边出现应力较大的3个区域(见图3,1、2和3),图4-6给出其应力随时间的历程曲线。从应力云图和各特征点的应力时间历程曲线可以看出,风门和门框特别是他们的右侧应力很高,在某些时间已经超过了钢材料的屈服极限。所以,他们会产生塑性变形,这与实验中看到该区域应力很大,门框变形是很吻合的。需要指出的是,在模拟时使用的都是线弹性模型,本身并不能计算出塑性应变,需要根

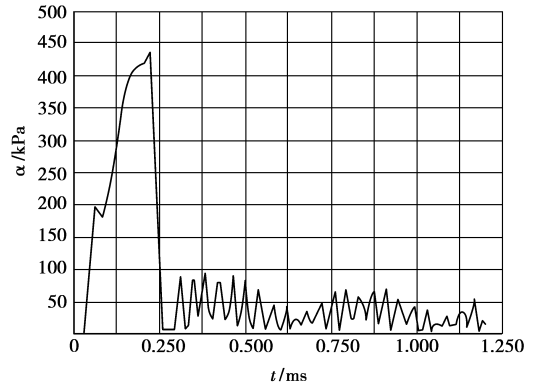


图4 位置1处应力随时间的历程曲线

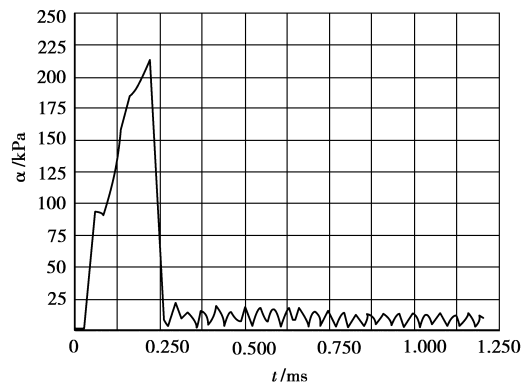


图5 位置2处应力随时间的历程曲线

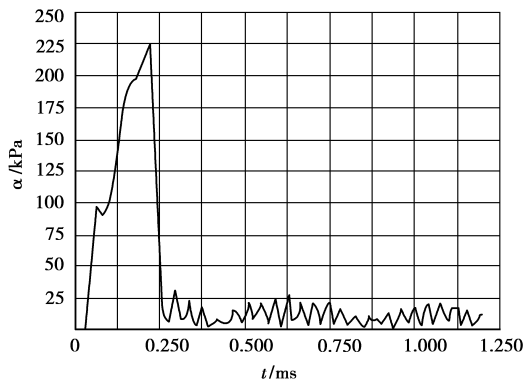


图6 位置3处应力随时间的历程曲线

据材料的屈服极限进行判断。

### 3 数值模拟结果分析

通过门垛和风门的应力云图可以看出,试验中破坏的位置与模拟中应力比较大的区域是吻合的。但是有些试验现象还是没有模拟出来主要的原因有以下几个方面:

#### 1) 载荷曲线

在模拟时为了添加载荷把测得的原始数据通过软件求出类似的通用公式,但是公式的一部分并不适合数值模拟。载荷曲线在时间轴上的积分(冲

量),可以看作冲击能量的代表,可以认为,几乎有一半的冲击能量没有统计到。这是数值模拟和试验经常不相符合的原因之一。

### 2) 材料模型

门垛是由石方和砂浆做成,在数值模拟时,只能用各向同性材料。实际上门垛的加工是很粗糙的,既不是各向同性的,甚至不是连续的,与理论计算模型相差很远,况且实际风门的厚度 330 mm,但是在模拟的时候为了计算方便只选择风门中的钢板厚度,即 6 mm。这是数值模拟与实验差别大的又一重要原因。即使是风门、门框等钢材料的材料模型,数值模拟和试验数据吻合亦是很难。

### 3) 门垛与巷道壁面、地面的摩擦

在试验中,门垛一侧沿巷道方向有整体位移,致使后端料石冲垮,横梁悬吊。这就需要考虑门垛与四壁的摩擦力。实际试验模型中,门垛与四周面都有接触,并且有摩擦力。但是在数值模拟中,在所有接触面的法线方向上,只有巷道地面有由于门垛重力而存在的法向压力,所以只有门垛与地面的摩擦面间存在摩擦力。

数值模拟时,由于存在接触面即考虑了状态非线性,而且是动力计算,所以其收敛性很难控制,原因在于:载荷作用在迎爆面,可能使门垛产生轴向滑移,从而形成刚体位移,以致计算不收敛。

## 4 结 论

数值模拟是研究力学的一种方法,同时它也可以与实验进行比较。模拟重点考查了风门和门垛的应力分布情况。结合试验原始数据拟合出爆炸试验产生冲击波作用在防突风门上的载荷曲线模型,并用 ANSYS 选取三维坐标对冲击波对防突风门破坏的数值模拟。从模拟结果可以得出如下结论:

1) 门垛最薄弱的地方就是风筒所在的地方,这与实验结果一致;

2) 最先到达防突风门的冲击波并不是压力最大的,而稍后的几百毫秒防突风门所受压力突然上升,这是反射超压产生的结果;

3) 有些试验的破坏特征没有模拟出来,这主要是为了保证模拟结果计算时收敛而忽略了门垛与巷道壁的接触,并且约束了门垛尾端的位移。但是如此处理,并不影响分析风门、门垛在冲击载荷作用下的动力响应。

### 参考文献:

[1] LI S, ZHANG H W, CHENG Y Q, et al. Coal and gas outburst model recognition and regional prediction [C] // Proceedings in Mining Science and Safety Technology, April, 2002, Beijing, China. Beijing: Science Publishing House, 2002:331.

[2] OLCHOVICZENKO A E. Prediction of rock and gas outbursts in coal seams [M]. Moscow: Nedra

Publishing House, 1982: 315.

- [3] FRID V. Electromagnetic radiation method for rock and gas outburst forecast [J]. Journal of Applied Geophysics, 1997, 38(2): 97-104.
- [4] 蒋承林. 煤与瓦斯突出阵面的推进过程及力学条件分析[J]. 中国矿业大学学报, 1994, 23(4): 1-9.  
JIANG CHENG-LIN. The advancing process and the mechanical conditions of coal and gas outburst array plane [J]. China University of Mining Journal, 1994, 23(4): 1-9.
- [5] CHENG M, CHEN K N. Coal and gas outburst and the formation of shock wave model [J]. Coal Mine Safety, 2000(9): 23-25.
- [6] LIN B Q, ZHOU S N, ZHANG R G. The influence of barriers on flame and explosion wave in gas explosion [J]. Journal of Coal Science and Engineering, 1998, 4(2): 53-57.
- [7] 程五一, 陈国新. 煤与瓦斯突出冲击波的形成及模型建立[J]. 煤矿安全, 2000(9): 23-25.  
CHENG WU-YI, CHEN GUO-XIN. The formation and model of shock-wave for coal gas outburst [J]. Coal Mine Safety, 2000(9): 23-25.
- [8] 程五一, 刘晓宇, 王魁军, 等. 煤与瓦斯突出冲击波阵面传播规律的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 57-60.  
CHENG WU-YI, LIU XIAO-YU, WANG KUI-JUN, et al. Study on regulation about shock-wave-front propagating for coal and gas outburst [J]. Coal Journal, 2004, 29(1): 57-60.
- [9] 田儒家. 矿井防突风门的受力分析及强度设计[J]. 煤矿安全, 1991(2): 4-10.  
TIAN RU-JIA. Force analysis and strength calculation of mine air door for outburst prevention [J]. Coal Mine Safety, 1991(2): 4-10.
- [10] 李国军, 邓良泽, 王德全, 等. FM 防突风门在古宋煤矿的应用[J]. 煤炭工程师, 1998(3): 43-44.  
LI GUO-JUN, DENG LIANG-ZE, WANG DE-QUAN, et al. FM air door for outburst prevention of the mine of ancient Song [J]. Coal Engineers, 1998(3): 43-44.
- [11] 廖黎, 苏文叔. FM 反向防突风门的试验研究[J]. 煤炭工程师, 1998(S1): 26-29.  
LIAO LI, SU WEN-SHU. Experimental study of FM reverses air door for outburst prevention [J]. Coal Engineers, 1998(S1): 26-29.
- [12] CORTESE R A, SAOKO M J. Flame-powered trigger device for activating explosion suppression barrier RI9375 [S]. USA: Department of the Interior in US, 1990.
- [13] 王国强. 实用工程数值模拟技术及其在 ANSYS 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1999.
- [14] ZHAO G J, DING J H. Non-linear numerical simulation of coal and gas outburst as a coupling instability problem of solid-fluid diphase media[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1988, 18(2): 194-198.
- [15] 王瑁成. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

(编辑 赵 静)