

# 基于颗粒流理论的煤与瓦斯突出数值模拟研究

王 锐<sup>1</sup>, 修 毓<sup>2</sup>, 王 刚<sup>1,3</sup>, 武猛猛<sup>1</sup>, 杜文州<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 矿业与安全工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 青岛市黄岛区城市建设局, 山东 青岛 266555;  
3. 山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地, 山东 青岛 266590)

**摘 要:**针对煤与瓦斯突出机理的复杂性,基于颗粒流离散元理论,利用 PFC<sup>3D</sup>(particle flow code)软件对煤体进行 340 组单轴压缩及巴西劈裂试验,建立了煤体宏观参数与颗粒流数值模拟所需细观参数之间的关系。基于寺河矿煤样单轴压缩和抗拉物理实验的实测宏观参数,推算出模拟煤与瓦斯突出所需的细观参数。在 PFC<sup>3D</sup>流固耦合理论的基础上,利用 PFC 模拟软件进行了煤与瓦斯突出的数值模拟,再现了煤体的堆积过程。研究表明:在突出准备阶段,煤壁深部瓦斯压力较高,突出孔洞附近瓦斯压力梯度较高;发动及发展阶段,平衡状态被破坏,形成口小腔大的突出孔洞,破坏范围由巷道高度的中间位置向顶底板处扩展;在突出过程中,工作面前方煤体靠近煤壁的暴露面处的最大主应力向量逐渐偏离垂直方向,且应力向量连线形成一个凸向煤壁深部的圆弧。

**关键词:**颗粒流;煤与瓦斯突出;PFC<sup>3D</sup>;宏-细观参数

中图分类号: TD713 文献标志码: A 文章编号: 1672-3767(2016)04-0052-10

## Numerical Simulation of Coal and Gas Outburst Based on Particle Flow Theory

WANG Rui<sup>1</sup>, XIU Yu<sup>2</sup>, WANG Gang<sup>1,3</sup>, WU Mengmeng<sup>1</sup>, DU Wenzhou<sup>1</sup>

(1. College of Mining and Safety Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;  
2. Qingdao Huangdao District City Construction Bureau, Qingdao, Shandong 266555, China;  
3. State Key laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** In view of the complexity of coal and gas outburst mechanism and based on the particle flow discrete element theory, 340 uniaxial compression and Brazilian test were conducted on coal by using PFC<sup>3D</sup> (particle flow code). The relationship between the coal's macroscopic mechanical parameters and microscopic parameters needed by the particle flow numerical simulation was established. Based on the measured macroscopic parameters of uniaxial compression and tensile physics experiments on coal sample in Sihe coal mine, the microscopic parameters required by the simulation of coal and gas outburst. Based on the fluid-solid coupling theory of PFC<sup>3D</sup>, the coal and gas outburst numerical simulation was carried out with the help of PFC software and the accumulation process of coal was reproduced. The results show that in the preparatory stage of outburst, the gas pressure in the depth of coal seam is high and the gas pressure gradient near the outburst hole is big. During the launch and development stage, with the break of balance a small outburst holes with big cavities are formed and the damage expands from the middle to the roof and floor of coal wall. In the outbursting stage, the maximum principal stress vector of the exposed surface of coal in front of the working face gradually deviates from the vertical direction, and the stress vector attachment form

收稿日期: 2015-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51304128, 51304237); 山东省自然科学基金项目(ZR2013EEQ015); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20133718120013); 山东科技大学人才引进科研启动基金项目(2013RCJJ049)

作者简介: 王 锐(1992—), 男, 山东东营人, 硕士研究生, 主要从事煤矿通防灾害防治技术方面的研究。

王 刚(1984—), 男, 山东兰陵人, 副教授, 主要从事瓦斯灾害预测与防治方面的研究工作, 本文通信作者。

E-mail: gang.wang@sdust.edu.cn

a deep circular arc convex to the coal wall.

**Key words:** particle flow; coal and gas outburst; PFC<sup>3D</sup>; macro-microscopic parameters

煤与瓦斯突出是地应力和瓦斯压力共同作用使煤体发生破坏变形的一种复杂动力现象。我国是煤与瓦斯突出灾害最严重的国家之一,在过去的 150 年里,超过 1/3 的突出事故发生在我国<sup>[1]</sup>,严重威胁我国矿井的安全生产。因此研究煤与瓦斯突出机理,预防突出事故发生是实现煤矿行业可持续发展的重中之重。目前,煤与瓦斯突出机理尚不明确,世界各国的专家学者分别从现场调查、相似材料实验、历史资料统计分析、数值模拟等角度进行分析,而数值模拟是研究煤与瓦斯突出机理的主要途径,也是最为简便的方法之一。

安丰华等<sup>[2]</sup>曾利用 COMSOL Multiphysics 软件对煤与瓦斯突出进行数值模拟,在研究孔隙度和渗透率受采掘活动影响的基础上,分析吸附瓦斯在突出灾变过程中对煤体性能的影响;为了解决煤与瓦斯突出机制尚不明确、影响因素复杂的问题,王刚等<sup>[3]</sup>对瓦斯突出的三维结构模型进行重构,引入围岩弹性潜能,构建了突出能量条件模型和突出强度预测模型,并结合突出案例对模型进行了验证,对突出影响因素的灵敏度进行了分析。而后王刚等<sup>[4]</sup>又将 FLAC<sup>3D</sup>(fast lagrangian analysis of continua)和 COMET<sup>3</sup> 两个商用软件相耦合;利用 FLAC<sup>3D</sup>进行应力分析,COMET<sup>3</sup> 模拟煤的瓦斯吸附与解吸、扩散,研制并完善了含量法预测瓦斯突出的计算机软件程序;黄达等<sup>[5]</sup>利用 PFC 颗粒流软件探讨了初始单轴静态压缩的细观损伤程度对单轴动态压缩下单裂隙岩样力学性质的影响规律,对其能量耗散机制进行了总结;崔峰等<sup>[6]</sup>借助 PFC 软件,构建了等效于煤体耦合致裂后强度的离散元模型,以此为基础研究了耦合致裂后离散态颗粒间的铰接关系及其对垮放程度的影响,注水压力和煤体垮放能力之间的映射关系,并结合工程实践进行了验证;王莉等<sup>[7]</sup>利用 PFC 软件构建了细观尺度上巴西劈裂试验声发射的细观模拟方法,并将试验和计算结果进行对比分析,验证了该方法的合理性;为了解揭煤区域内发生煤与瓦斯突出可能性,高端元等<sup>[8]</sup>运用 PFC 软件对煤层进行数值模拟,并对模拟结果和瓦斯压力进行加权计算处理,使模拟结果更真实地反映现场实际情况。胡莹莹等<sup>[9]</sup>曾在实验室内模拟煤与瓦斯突出现象,研究突出过程中地应力和瓦斯压力的变化情况;徐涛等<sup>[10]</sup>基于 RFPA<sup>2D</sup>(rock failure process analysis)流固耦合理论研究煤与瓦斯突出机理,在球壳失稳假说<sup>[11]</sup>的基础上分析了瓦斯压力和地应力对煤体的破坏变形。尽管煤与瓦斯突出机理的研究取得了多方面的进展,但突出灾变过程中煤体破坏是由内部开裂的微裂纹等细观缺陷逐渐发展的结果<sup>[12]</sup>,宏-细观参数选取的准确性很大程度上决定了煤与瓦斯突出数值模拟的精度。

Potyondy 等<sup>[13]</sup>基于颗粒离散元理论研究了花岗岩的细观参数;Yang 等<sup>[14]</sup>以岩石样本作为研究对象,研究了平行粘结模型中颗粒细观参数和样本弹性参数(弹性模量、泊松比)以及单轴抗压强度的关系;Hsieh 等<sup>[15]</sup>研究了砂岩变形机制,分析了细观组分含量与宏观力学特性之间的关系;Backstrom 等<sup>[16]</sup>利用颗粒流方法对花岗岩细观模拟结果与宏观应力-应变曲线的关系进行了研究。针对煤颗粒细观参数与其宏观力学参数相关性的研究则鲜为人知,因此如何有效选取煤体宏-细观参数是本研究的重点之一。

本文首先设计多组单轴压缩及巴西劈裂数值模拟试验,通过编制颗粒离散元 PFC<sup>3D</sup>程序并对其进行模拟计算,进而分析煤体宏观、细观力学参数之间的关系。然后以寺河矿原始应力条件下取得的煤样为例,进行单轴压缩及巴西劈裂物理试验,以期获得煤体宏观力学参数,根据所建立的煤体宏观、细观力学参数关系推算相对应的细观参数,在此基础上利用 PFC<sup>3D</sup>程序对煤与瓦斯突出进行数值模拟。

## 1 颗粒流数值模拟基本原理及细观力学参数确定

### 1.1 颗粒流数值模拟基本原理

在 PFC<sup>3D</sup>计算循环过程中,颗粒间的作用力主要遵循牛顿第二定律与力-位移定律(如图 1 所示),而颗粒的接触本构模型包含刚度模型、滑动模型和粘结模型三部分<sup>[17-19]</sup>。

利用 PFC<sup>3D</sup>进行单轴压缩和巴西劈裂数值模拟试验,在计算颗粒与墙体接触的平均刚度基础上,通过设定顶部或底部墙体的速度来实现模型的加载过程,通过伺服机制控制墙体的运动对试件进行压缩试验,将突出过程中瓦斯作用于煤颗粒的力等效为有效应力并考虑压力梯度的影响<sup>[20]</sup>。

### 1.2 单轴压缩及巴西圆盘劈裂数值模拟试验

根据物理力学试验提供的资料,结合相关的岩石力学性质进行取值,相关参数如表 1 所示,通过 PFC<sup>3D</sup> 软件生成的试样如图 2 所示。

设计多组单轴压缩和巴西圆盘劈裂试验,研究杨氏模量、法向与切向刚度之比对单轴抗压强度、泊松比、弹性模量以及单轴抗拉强度的影响。试样结果如图 3 所示,浅色部分代表模拟过程生成的裂隙,深色部分在颗粒及裂隙剖面图中代表煤体颗粒,在接触力及裂隙图中代表接触力。

表 1 单轴压缩及抗拉模拟试样尺寸

Tab. 1 The numerical simulation specimens size of uniaxial compression and tensile strength test

名称	单轴压缩试验	巴西劈裂试验
尺寸/mm	$H \times D = 100 \times 50$	$D \times T = 50 \times 50$
最小颗粒粒径/mm	0.4	0.4
孔隙率	0.15	0.15
密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1 635	1 635
颗粒粒径比	1.66	1.66

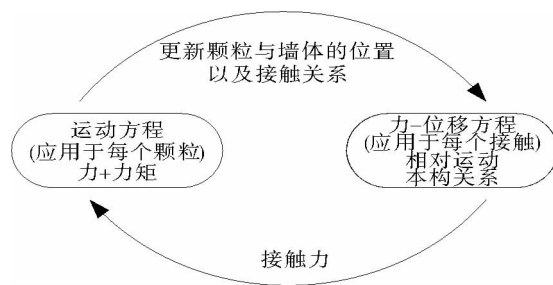


图 1 PFC<sup>3D</sup> 的计算循环过程

Fig. 1 Calculation cycle process of PFC<sup>3D</sup>

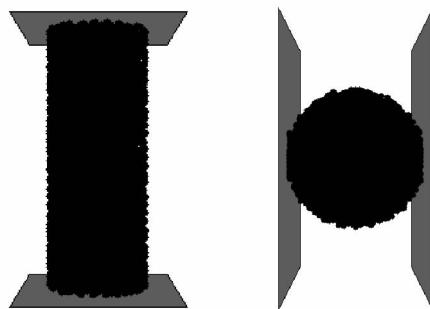


图 2 单轴压缩及巴西圆盘劈裂 PFC<sup>3D</sup> 模型图

Fig. 2 Model diagram of uniaxial compression and brazilian test

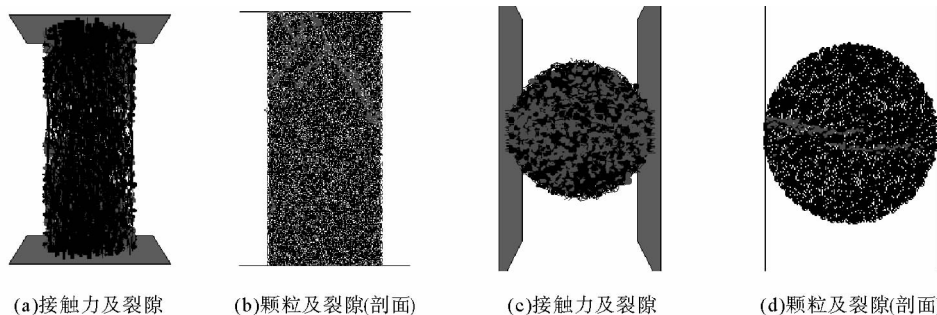


图 3 单轴压缩和巴西圆盘劈裂试验 PFC<sup>3D</sup> 模拟结果图

Fig. 3 Simulating graph of uniaxial compression test and brazilian test

#### 1.2.1 弹性模量的回归分析

由图 4 可以发现弹性模量与杨氏模量存在线性关系,与刚度比存在负对数相关关系。基于上述结论,对各方方案结果进行回归分析,得出弹性模量与细观参数关系式(式(1)),其相关系数为  $R = 0.9895$ ,两者拟合效果较好。回归分析结果与模拟数据对比如图 5 所示。

$$E/E_c = a + b \ln(k_n/k_s) \quad (1)$$

式中: $E$  弹性模量, GPa;  $E_c$  为杨氏模量, GPa;  $k_n/k_s$  为刚度比;  $a = 1.393$ ,  $b = -0.408$ 。

#### 1.2.2 泊松比的回归分析

由图 6 和图 7 可以发现泊松比与杨氏模量相关性较小,刚度比是影响泊松比的主要参数。对各方方案结果进行回归分析如图 8 所示,其函数关系如式(2)所示,相关系数为 0.9897。

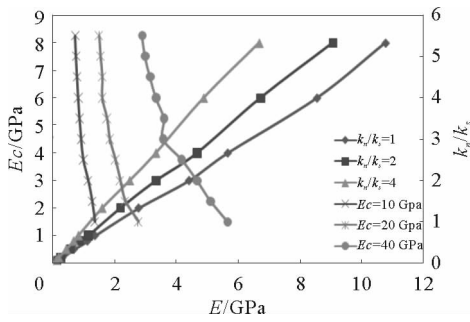


图 4 弹性模量与杨氏模量及刚度比关系曲线

Fig. 4 Relationship between elastic modulus, young modulus and stiffness ratio

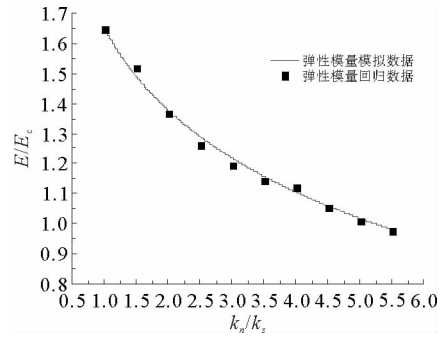


图 5 弹性模量实测与拟合关系曲线

Fig. 5 Relationship between experiment and fitting results of elastic modulus

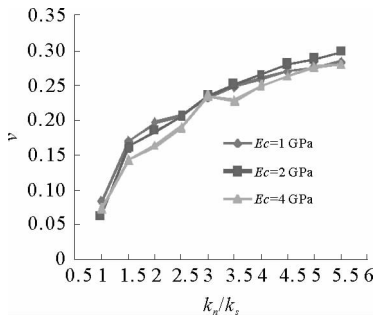


图 6 泊松比与刚度比关系曲线

Fig. 6 Relationship between poisson ratio and stiffness ratio

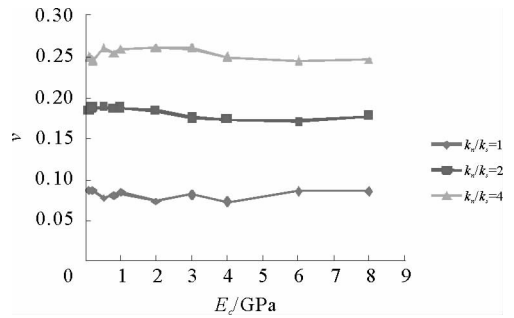


图 7 泊松比与杨氏模量关系曲线

Fig. 7 Relationship between poisson ratio and young modulus

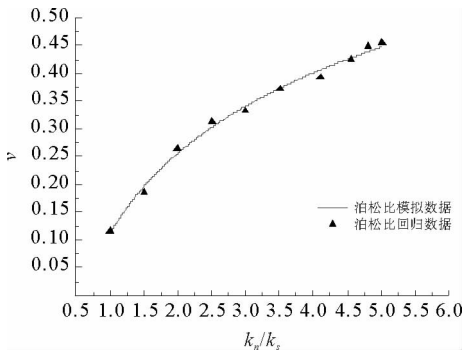


图 8 泊松比实测与拟合关系曲线

Fig. 8 Relationship between experiment and fitting results of poisson ratio

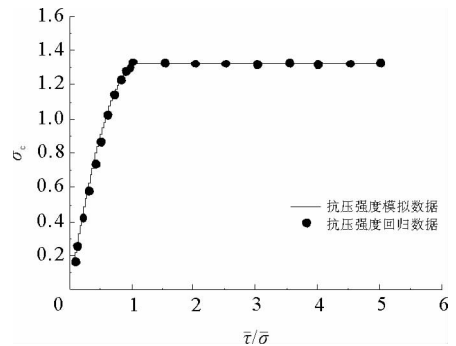


图 9 单轴抗压强度实测与拟合关系曲线

Fig. 9 Relationship between experiment and fitting results of uniaxial compressive strength

$$v = c \ln(k_n/k_s) + d. \quad (2)$$

式中： $v$ 为泊松比； $c=0.12$ ； $d=0.084$ 。

### 1.2.3 单轴抗压强度的回归分析

为了研究切向连接强度与法向连接强度不同时对单轴抗压强度的影响，设置杨氏模量与刚度比均为定值，切向连接强度与法向连接强度比值 $\bar{\tau}/\bar{\sigma}$ 取值0.1~5.5，杨氏模量取值为10 MPa，模拟结果与拟合曲线如

图 9 所示。当  $0 < \bar{\tau}/\bar{\sigma} \leq 2$  时,单轴抗压强度受平行连接切向连接强度  $\bar{\tau}$  和法向连接强度  $\bar{\sigma}$  共同影响;当  $\bar{\tau}/\bar{\sigma} > 2$  时,平行连接切向连接强度对  $\sigma_c$  的影响较弱,此时平行连接法向连接强度与  $\sigma_c$  成线性关系。对该方案结果数据进行回归分析,得到单轴抗压强度与细观参数函数关系如式(3)所示,其相关系数为 0.988 4,拟合效果较好。

$$\frac{\sigma_c}{\bar{\sigma}} = \begin{cases} a\left(\frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}}\right)^2 + b\frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} + c, & 0 < \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} \leq 2 \\ d, & \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} > 2 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\sigma_c$  为单轴抗压强度,MPa;  $\bar{\sigma}$  为平行连接法向连接强度,MPa;  $\bar{\tau}$  为平行连接切向连接强度,MPa;  $a = -0.059$ ;  $b = 0.421$ ;  $c = 0.519$ ;  $d = 1.114$ 。

### 1.2.4 抗拉强度的回归分析

由图 10 可以得到与单轴抗压强度相类似的抗拉宏观细观参数相关性结论,对该方案结果数据进行回归分析,得到抗拉强度与细观参数函数关系如式(4)所示,其相关系数  $R = 0.959 7$ ,拟合效果较好。

$$\frac{\sigma_t}{\bar{\sigma}} = \begin{cases} a\left(\frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}}\right)^2 + b\frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} + c, & 0 < \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} \leq 2 \\ d, & \frac{\bar{\tau}}{\bar{\sigma}} > 2 \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_t$  为抗拉强度,MPa;  $a = -0.022$ ;  $b = 0.248 0$ ;  $c = 0.267 3$ ;  $d = 0.667$ 。

### 1.3 煤体细观参数的确定

在宏观参数相关性的基础上,利用 MTS815.03 岩石伺服试验系统对实际煤样试件进行单轴压缩和抗拉物理试验得出宏观参数的前提下,确定煤体的细观参数。试验所用煤样取自山西省晋城无烟煤集团矿业有限公司寺河矿,试件详细信息如表 2 所示,其中 AY-1 与 BL-1、AY-2 与 BL-2 分别取自矿井相同地点的同一钻孔。

单轴压缩试验及抗拉试验前后煤体试件见图 11。对寺河矿煤样进行单轴压缩和抗拉试验后,得出实际煤体的弹性模量、泊松比、单轴抗压强度和抗拉强度等宏观物理参数,利用式(1)~式(4)在宏观物理参数的基础上推算得到相应的煤体细观参数,如表 3 所示。

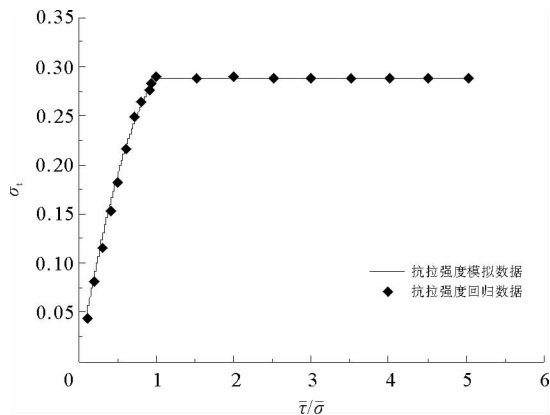


图 10 抗拉强度实测与拟合关系曲线  
Fig. 10 Relationship between experiment and fitting results of tensile strength

表 2 单轴压缩及抗拉试验试件尺寸  
Tab. 2 The specimens size of uniaxial compression and tensile strength test

参数	试件编号	高/mm	直径/mm
单轴压缩试验	AY-1	73.72	48.80
	AY-2	77.30	48.48
抗拉试验	BL-1	19.30	48.36
	BL-2	17.20	48.10

表 3 宏观试验及细观参数计算结果表

Tab. 3 The calculation result of macroscopic and microscopic parameters

试件编号	宏观参数				细观参数		
	弹性模量 MPa	泊松比	单轴抗压强度/MPa	抗拉强度 MPa	杨氏模量/MPa	刚度比	连接强度/MPa
AY-1、BL-1	2 650.1	0.214	17.02	1.225	2 786.8	3.609	19.32
AY-2、BL-2	2 384.5	0.227	14.92	1.426	2 628.7	3.293	16.94

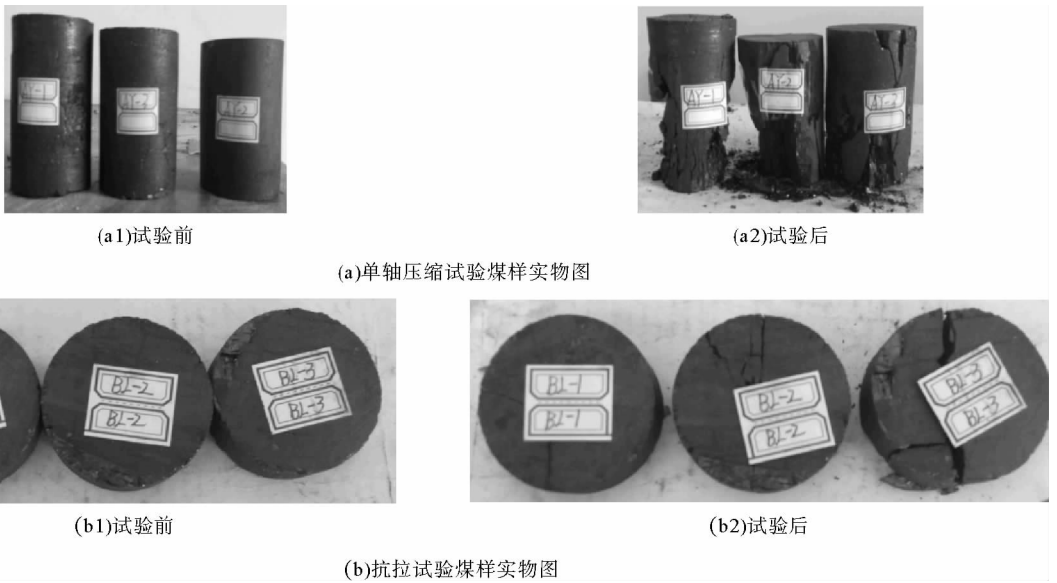


图 11 单轴压缩和抗拉试验煤样实物图

Fig. 11 The coal photo of tensile strength test and uniaxial compression test

## 2 煤与瓦斯突出数值模拟

### 2.1 数值模型

基于煤与瓦斯突出机理利用 PFC<sup>3D</sup> 程序进行颗粒流模拟,为了便于计算与分析将煤颗粒理想化为圆形颗粒。综合考虑计算量和计算的精度,模型尺寸为  $8\text{ cm} \times 15\text{ cm} \times 8\text{ cm}$ ,为了更好的模拟煤体颗粒分布的不均匀性,颗粒半径分布从  $R_{\min} = 0.35\text{ mm}$  到  $R_{\max} = 0.50\text{ mm}$  采用了均匀分布。针对煤颗粒由于粘结强度不够而四处逃逸的问题,在模型周围加入 6 面墙体,将模型的上下、前后边界设置为不透气边界。

在地应力为  $20\text{ MPa}$ ,瓦斯压力梯度(左( $3\text{ MPa}$ )到右( $0\text{ MPa}$ ))作用下的灾变过程,在设置模型孔隙率为  $0.077$  的前提下,根据表 3 颗粒的宏-细观参数建立突出模拟试样模型及网格划分如图 12 所示,模型包含颗粒数量  $8\ 000$  个,网格划分  $8 \times 15 \times 8$  个单元,黑色颗粒代表了煤颗粒,黑色线条表示所划分的网格。

### 2.2 模拟结果

#### 2.2.1 突出前后过程及瓦斯压力分析

由图 13(a)知,受到地应力和瓦斯压力的共同作用,使得部分煤体破碎并被带出孔洞,堆积在孔洞外附近且造成抛出通道的面积逐渐减小,使得孔洞内的煤体破碎过程缓慢,瓦斯流动的阻力增大且流速降低,此时瓦斯压力会急剧升高而突破阻止瓦斯流动的障碍,继续将煤体破碎抛出并进一步堵塞通道,该过程反复进行,直至煤颗粒将通道堵塞使得瓦斯压力不足以突破,达到基本平衡突出终止。

由图 13(b)知,煤体内部最大主应力一般接近垂直方向且越靠近抛出通道时,这些最大主应力越偏离垂直方向,其连线看起来更像一个凸向煤壁深部的圆弧。由于越靠近抛出通道,在煤层上下部位的水平剪应力越大,使得最大主应力不能再用垂直应力代替,所得结果与文献[21]中所提到的观点相一致。

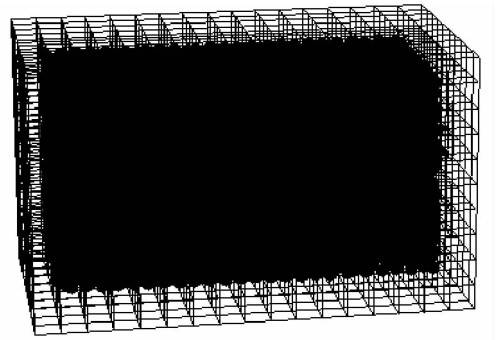


图 12 突出数值模型

Fig. 12 Numerical model for outbursts



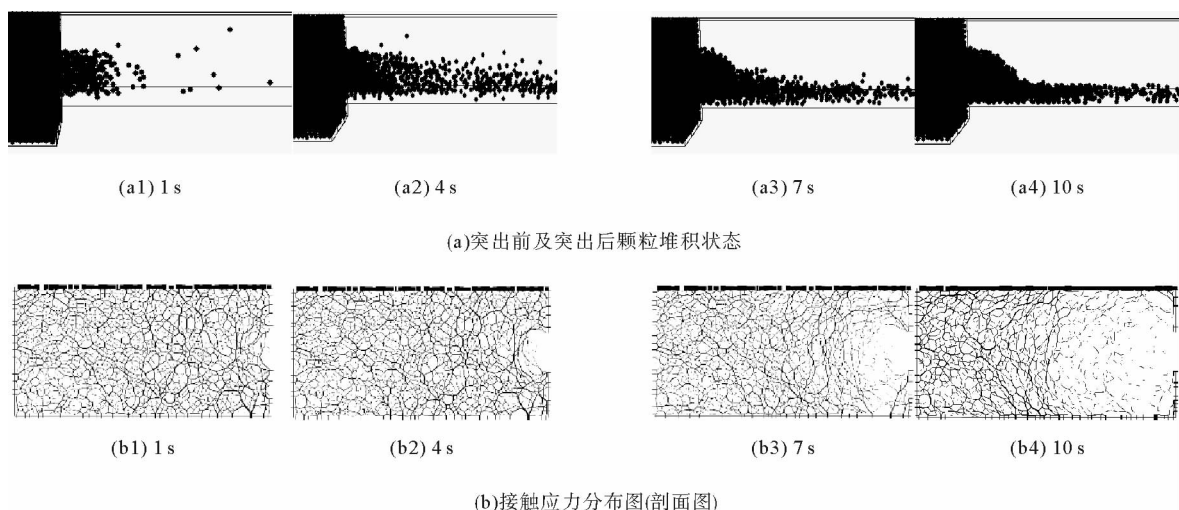


图 13 PFC<sup>3D</sup> 突出模拟

Fig. 13 Outbursts simulation in PFC<sup>3D</sup>

图 14 为煤与瓦斯突出过程中,  $4 \times 10 \times 4$  单元(4<sup>#</sup>测点)、 $4 \times 8 \times 4$  单元(3<sup>#</sup>测点)、 $4 \times 4 \times 4$  单元(2<sup>#</sup>测点)以及  $4 \times 2 \times 4$  单元(1<sup>#</sup>测点)处瓦斯压力变化情况(瓦斯压力设置为 3 MPa)。图 15 显示了煤与瓦斯突出过程中, 各测点处瓦斯压力变化情况(瓦斯压力设置为 5 MPa)。

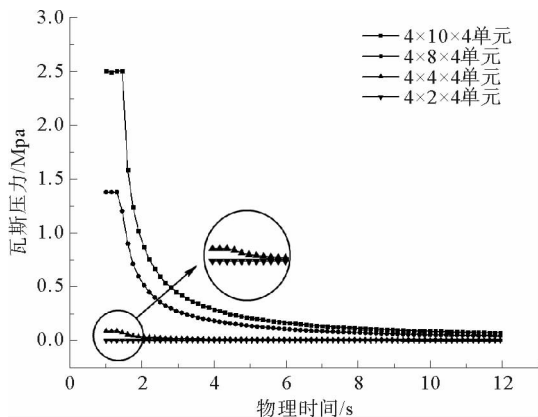


图 14 瓦斯压力变化图 ( $p=3$  MPa)

Fig. 14 Change chart of gas pressure

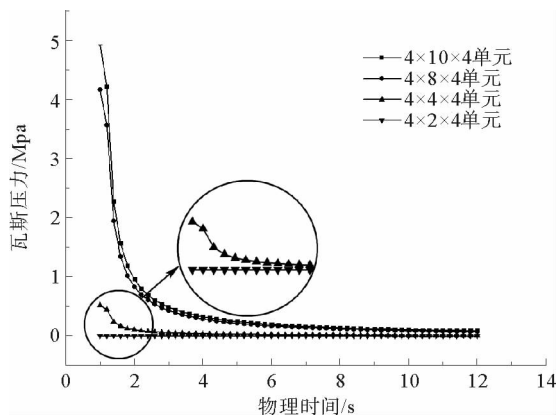


图 15 瓦斯压力变化图 ( $p=5$  MPa)

Fig. 15 Change chart of gas pressure

从图 14~15 可以看出, 4<sup>#</sup>测点瓦斯压力测点随着充气过程的不断充入, 瓦斯压力最终稳定在 2.4 MPa 左右。4<sup>#</sup>测点变化是最大的, 突出完成后瓦斯压力稳定在 0.6 MPa。原因是由于该点处在巷道突出口的内部, 相当于内部瓦斯向外涌出, 也与现场实际情况相吻合。3<sup>#</sup>瓦斯压力测点随着充气过程的不断充入, 瓦斯压力最终稳定在 1.4 MPa 左右。3<sup>#</sup>测点变化趋势和 4<sup>#</sup>相似, 突出完成后瓦斯压力稳定在 0.4 MPa。但最终稳定的数值要明显低于 1<sup>#</sup>测点, 主要是由于该测点距离突出口相对较近, 突出发展的强度较低。1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>测点由于距离开采工作面较近, 瓦斯压力测点随着充气过程的不断充入, 瓦斯压力最终稳定值略大于巷道大气压。突出完成后瓦斯压力略微增大, 主要是由于深部煤层及巷帮侧瓦斯向外涌出, 巷道中瓦斯压力及含量增大, 使得 1<sup>#</sup>和 2<sup>#</sup>出现增长趋势。当瓦斯压力增大至 5 MPa 时, 各压力曲线变化趋势与 3 MPa 时相同。

因此, 越靠近煤壁深部瓦斯压力越大, 煤壁表面的瓦斯压力接近于巷道的大气压力; 突出准备阶段瓦斯压力基本保持不变。在发动以及发展阶段时, 瓦斯压力在很短的时间内急剧下降, 导致煤体破坏及抛出。突

出后煤壁深部的瓦斯压力略高于煤壁表面的巷道压力。

### 2.2.2 颗粒运动轨迹图

数值计算过程中 3 个监测颗粒的位置如图 16 所示。对颗粒轨迹进行分析,位于突出口上部的 5 和下部的 7 号颗粒最先受到影响,由于实验初期瓦斯压力较大,并且位于突出口附近,所以颗粒间的阻碍作用较小,两个颗粒沿试验槽运动,分别相对于突出口( $x=0.83\text{ m}$ )产生了 0.2 和 0.16 m 的水平位移;随着突出的发展,6 号颗粒被剥蚀出来,沿试验槽分别产生了 0.2 m 的水平位移,由运动轨迹可以看出试验槽上颗粒的淤积对其水平运动产生限制,运动轨迹也表现出了突出后中后部分颗粒的堆积情况;所有监测的颗粒运动轨迹均向突出口移动且水平方向以及垂直方向的移动位移较大。

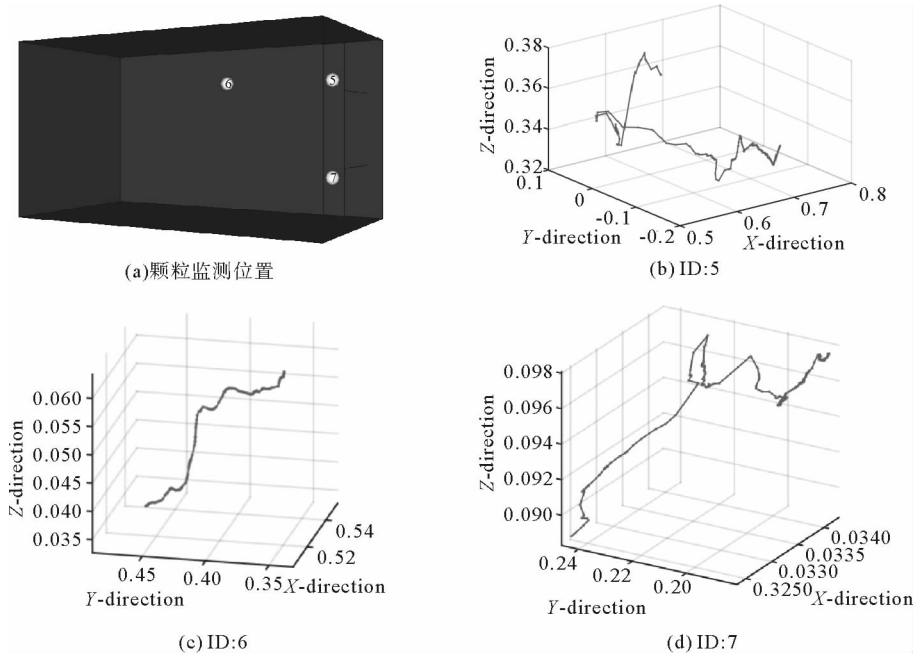


图 16 颗粒运动轨迹图

Fig. 16 Trajectory chart of particles motion

### 2.2.3 喷出口速度图

喷出口速度对研究突出过程有着重要意义。煤与瓦斯突出过程中颗粒抛出速度越大时,颗粒所受到的力就越大,然而在室内试验中很难对某个颗粒速度进行监测追踪。

数值模拟过程中通过设置 fish 函数对喷出口处 289、387、772、902 号颗粒速度进行监测,监测结果如图 17 所示。总体上看,颗粒最大抛出速度为 30.2、66.2、37.5 和 29.5 m/s,平均速度为 5.3、9.8、8.2 和 6.7 m/s。颗粒刚被抛出时,速度为整个过程中的最大值,且随着向前的移动,能量逐渐被耗散,速度较低。

## 3 结论

在物理实验得到宏观参数及模拟实验得到宏-细观参数关系的基础上,利用 PFC 模拟软件进行了煤与瓦斯突出的数值模拟,再现了煤体的堆积过程,得到如下结论:

1) 突出的准备阶段,煤体内部最大主应力接近垂直方向且越靠近煤壁时,这些最大主应力越偏离垂直方向,煤壁深部瓦斯压力较高且基本相等,突出孔洞附近瓦斯压力梯度较高;在发动以及发展阶段,高压瓦斯对煤体进行破坏、抛出,并在很短的时间内急剧下降;突出后孔洞周围存在一定范围的塑性区,并再现了突出煤体的堆积过程。



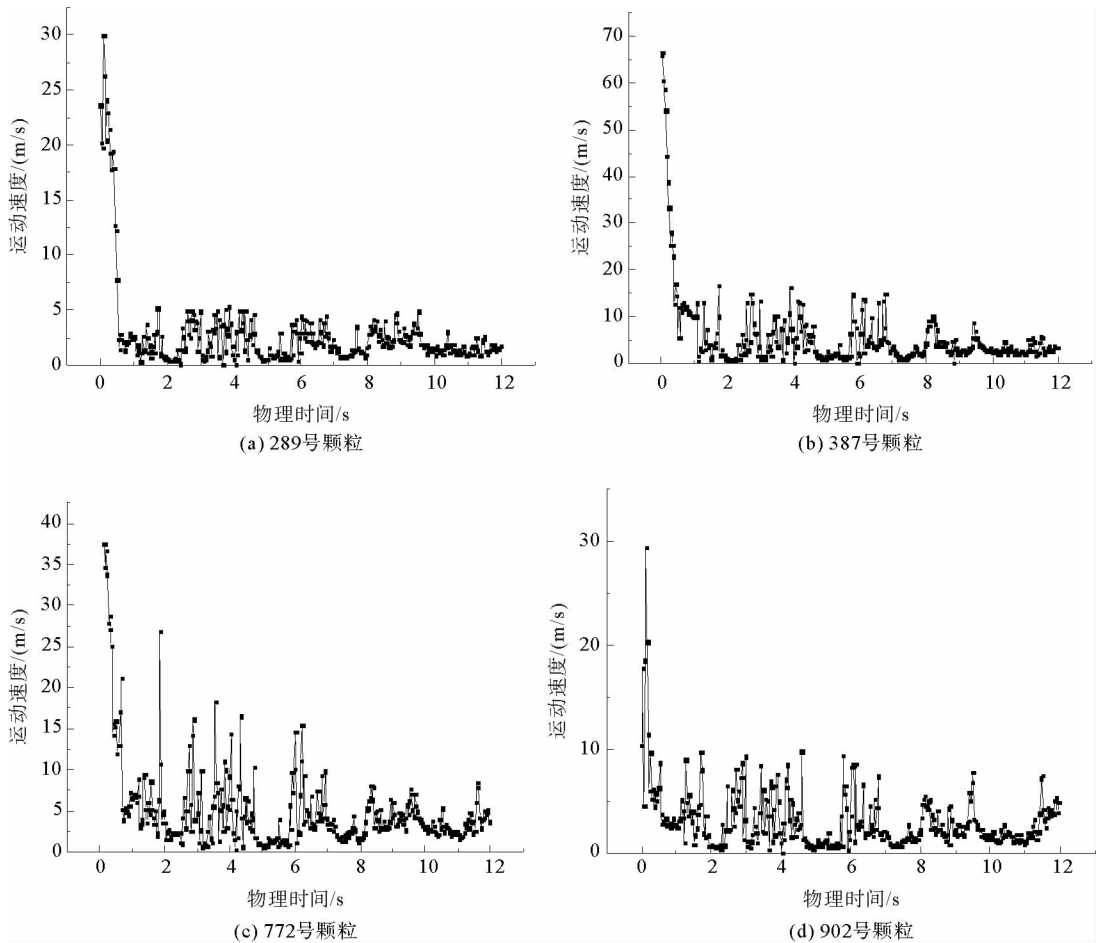


图 17 突出口颗粒抛出速度图

Fig. 17 Speed chart of particles in the door of outburst

2) 突出发动和发展阶段,突出孔洞附近煤体的极限平衡状态被打破,煤岩体破坏失稳并被抛出,形成了口小腔大的突出孔洞,随着突出过程的发展,掘进面前方煤体的破坏范围和突出孔洞增大,破坏范围由巷道高度的中间位置向顶底板处扩展。

3) 突出过程中,工作面前方煤体靠近煤壁的暴露面处的最大主应力向量逐渐偏离垂直方向,且应力向量连线形成类似一个凸向煤壁深部的圆弧。突出口处颗粒最大抛出速度为 30.2、66.2、37.5 和 29.5 m/s,平均速度为 5.3、9.8、8.2 和 6.7 m/s。

参考文献:

[1]ZHOU A T,WANG K,WU Z Q. Propagation law of shock waves and gas flow in cross roadway caused by coal and gas outburst[J]. International Journal of Mining Science and Technology,2014,24(1):23-29.  
 [2]AN F H,CHENG Y P,WANG L,Li W. A numerical model for outburst including the effect of adsorbed gas on coal deformation and mechanical properties[J]. Computers and Geotechnics,2013,54:222-231.  
 [3]王刚,武猛猛,王海洋,等. 基于能量平衡模型的煤与瓦斯突出影响因素的灵敏度分析[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(2):238-248.  
 WANG Gang,WU Mengmeng,WANG Haiyang, et al. Sensitivity analysis of factors affecting coal and gas outburst based on a energy equilibrium model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2015,34(2):238-248.  
 [4]王刚. 瓦斯含量法预测煤与瓦斯突出技术研究[D]. 青岛:山东科技大学,2012.  
 [5]黄达,岑夸丰. 单轴静-动相继压缩下单裂隙岩样力学响应及能量耗散机制颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(9):1926-1936.

- HUANG Da, CEN Duofeng. Mechanical responses and energy dissipation mechanism of rock specimen with a single fissure under static and dynamic uniaxial compression using particle flow code simulations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1926-1936.
- [6] 崔峰, 来兴平, 曹建涛, 等. 煤体耦合致裂后整体-散体的等效转化及其垮放能力评估[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 565-571.
- CUI Feng, LAI Xingping, Cao Jiantao, et al. Intact-loose medium equivalent transformation after coupled cracking and assessment of caving capability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 565-571.
- [7] 王莉, 谭卓英, 周喻, 等. 煤样巴西劈裂试验中声发射特性的细观模拟[J]. 北京科技大学学报, 2014, 36(3): 275-282.
- WANG Li, TAN Zhuoying, ZHOU Yu, et al. Mesoscopic simulation of the acoustic emission characteristic of coal samples in Brazilian test[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2014, 36(3): 275-282.
- [8] 高瑞元, 蒋承林, 孟京京. 石门揭煤过程颗粒流模拟的探讨[J]. 煤矿安全, 2014, 45(1): 147-150.
- GAO Ruiyuan, JIANG Chenglin, MENG Jingjing. Investigation of particle flow simulation during uncovering coal seam in cross-cut[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(1): 147-150.
- [9] HU Y Y, HU X M, ZHANG Q T, et al. Analysis on simulation experiment of outburst in uncovering coal seam in cross-cut [J]. Procedia Engineering, 2012, 45: 287-293.
- [10] XU T, TANG C A, YANG T H, et al. Numerical investigation of coal and gas outbursts in underground collieries[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2006, 43(6): 905-919.
- [11] 蒋承林, 俞启香. 煤与瓦斯突出的球壳失稳机理及防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
- [12] 张浪. 煤与瓦斯突出预测的一个新指标[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 616-620.
- ZHANG Lang. A new prediction index of coal and gas outburst[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 616-620.
- [13] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329-1364.
- [14] 徐强, 陈健云, 李静, 等. 基于贝叶斯理论的大坝体系可靠度计算方法[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(1): 84-89.
- XU Qiang, CHEN Jianyun, LI Jing, et al. Calculation method for system reliability of dam based on bayes theory[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(1): 84-89.
- [15] HSIEH Y M, LI H H, HUANG T H, et al. Interpretations on how the macroscopic mechanical behavior of sandstone affected by microscopic properties: Revealed by bonded-particle model[J]. Engineering Geology, 2008, 99(1/2): 1-10.
- [16] BACKSTROM A, ANTIKAINEN J, BACKERS T, et al. Numerical modelling of uniaxial compressive failure of granite with and without saline porewater[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(7): 1126-1142.
- [17] 黄达, 岑奇丰, 黄润秋. 单裂隙砂岩单轴压缩的中等应变率效应颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 535-545.
- HUANG Da, CEN Duofeng, HUANG Runqiu. Influence of medium strain rate on sandstone with a single pre-crack under uniaxial compression using PFC simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 535-545.
- [18] 王培涛, 杨天鸿, 于庆磊, 等. 节理边坡岩体参数获取与 PFC<sup>2D</sup>应用研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 560-565.
- WANG Peitao, YANG Tianhong, YU Qinglei, et al. On obtaining jointed rock slope geo-parameters and the application of PFC<sup>2D</sup>[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 560-565.
- [19] 张孟喜, 张石磊. H-V 加筋土性状的颗粒流细观模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 625-631.
- ZHANG Mengxi, ZHANG Shilei. Behaviour of soil reinforced with H-V inclusions by PFC<sup>2D</sup> [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 625-631.
- [20] Itasca Consulting Group. PFC<sup>3D</sup> theory and back-ground[M]. Minnesota, Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2004.
- [21] 胡千庭. 煤与瓦斯突出的力学作用机理及应用研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2007.