

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2020.04.009

煤与瓦斯突出过程中煤体破坏的有限元模拟

吉辰^a, 蹇开林^{a,b}, 郝忠^a

(重庆大学 a. 航空航天学院; b. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 研究了目前有限元软件难以计算的煤与瓦斯突出过程中煤体破坏问题。采用 Python 语言对 ABAQUS 前处理模块进行了二次开发, 通过 Python 脚本程序将煤体网格重新划分, 并且插入零厚度黏结单元。利用有效应力原理, 与 ABAQUS 基于摩尔库伦准则的摩擦接触结合, 实现了瓦斯压力对煤体影响的仿真。利用黏结单元模拟了煤体裂缝的产生与扩展, 以及煤体的突出过程。实际仿真计算结果符合实验规律, 证明了有限元二次开发技术可以很好地计算煤与瓦斯突出过程中煤体破坏问题, 也为 Python 的二次开发在其他领域的应用提供了参考和借鉴。

关键词: 煤与瓦斯突出; ABAQUS; Python; 有效应力原理; 二次开发

中图分类号: TD713

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2020)04-085-09

Finite element simulation of coal body failure in coal and gas outburst process

Ji Chen^a, Jian Kailin^{a,b}, Hao Zhong^a

(a. College of Aerospace Engineering; b. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: The failure of coal mass in the process of coal and gas outburst, which is difficult to calculate by finite element software at present, is studied in this paper. The pre-processing module of ABAQUS is redeveloped by Python language. The coal mesh is re-divided by Python script program, and the zero-thickness cohesive unit is inserted. According to the principle of effective stress and the friction contact of ABAQUS based on Mohr-Coulomb criterion, the simulation of the influence of gas pressure on coal body is realized. The generation and expansion of coal fracture and the outburst process of coal body are simulated by using the cohesive unit. The actual simulation results conform to the experimental law, which proves that the secondary development technology of finite element method can well calculate the failure of coal mass in the process of coal and gas outburst. And it can also provide a reference to the application of Python secondary development in other fields.

Keywords: coal and gas outburst; ABAQUS; Python; principle of effective stress; secondary development

收稿日期: 2019-11-15

基金项目: 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验室自主研究课题重点项目(2011DA105287-ZD201603)。

Supported by Key Project of Independent Research Paper of State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control(2011DA105287-ZD201603).

作者简介: 吉辰(1993—), 男, 重庆大学硕士研究生, (E-mail)494688583@qq.com。

通讯作者: 蹇开林(1964—), 男, 重庆大学教授, 主要从事结构动力学、多体系统动力学等方向的研究, (E-mail)cjjan@cqu.edu.cn。

煤与瓦斯突出是一种极其复杂的矿井瓦斯动力现象,指在压力的作用下,破碎的煤与瓦斯由煤体内突然向采掘空间大量喷出的现象,其特征是发生过程短,危害大,治理难度高^[1]。

国内外学者对煤与瓦斯突出问题开展了大量研究,提出了诸多的假说和理论,分为以下 4 类:以瓦斯为主导作用的理论^[2];以地应力为主导作用的理论^[3];化学本质理论;综合作用理论^[4]。这种划分对煤与瓦斯突出机理的发展有很大作用,但也存在一些问题,主要是很有价值的理论如粉碎波理论^[5],由于不属于综合作用理论而不被大家所认可。

影响煤与瓦斯突出的因素众多,除了瓦斯压力和地应力以外,还有煤岩体结构、煤材料性质等。因为煤与瓦斯突出机理的复杂性,加之对现场煤与瓦斯突出过程进行全方位实时跟踪研究的危险性,物理模拟实验成了研究煤与瓦斯突出的重要手段。现阶段的模拟实验在多维多场多尺度下,采用多种方式诱导突出,并且具有完善的数据采集系统^[6]。许江等^[7-8]做了不同瓦斯压力及不同载荷下煤与瓦斯突出的模拟实验,总结了瓦斯压力和载荷对煤与瓦斯突出的影响。

但是实验毕竟只是一定条件下的部分结果,要更深入地研究煤与瓦斯突出发生机制还需从力学理论和计算方法着手,建立煤与瓦斯突出发生机制的力学理论和计算方法,利用数值计算对突出过程进行动态仿真。张伟等^[9]建立了煤层巷道预排瓦斯带流固耦合数学模型。郭龙等^[10]结合 Comsol Multiphics 和 MATLAB 对模型进行模拟,得出掘进巷道周围煤岩渗透率的演化过程。郭平等^[11]基于固气耦合作用的基本理论,从孔隙率和渗透率的基本定义出发,推导出孔隙率与渗透率的动态参数模型。解北京等^[12]确定了含瓦斯煤本构模型的主要参数并开展含瓦斯煤落锤冲击破坏的数值模拟研究。徐学锋等^[13]通过流变模型和摩尔库仑弹塑性模型转换技术,研究了在水平构造应力作用下,逆断层运动过程中断层区域塑性破坏区的分布及变化规律。上述数值模拟可以分为 2 种:采用渗流分析,通过计算得到应力云图,配合摩尔库仑准则,判断破坏产生的区域;采用动态分析,同样采用摩尔库仑准则,将失效单元删除,从而产生裂纹并不断扩展。这 2 种方法都有其局限性:方法 1 只计算了破坏产生可能的区域,并没有实际裂纹产生,当裂纹产生后应力必然发生变化;方法 2 采用删除单元的方法模拟破坏,而删除单元会使结构内部产生空隙,在剪切破坏为主时影响格外明显。上述两种方法的局限性是采用常规有限元方法所致。

笔者基于 ABAQUS 的二次开发功能,用 Python 语言在媒体单元之间插入黏结单元模拟煤体的破坏,将有限元与离散元思想相结合,仿真煤与瓦斯突出的过程,实现煤与瓦斯突出问题的有限元仿真。最后将仿真所得结果,与许江等^[7-8]的实验结论进行对比,结果与实验结论相符合。

1 ABAQUS 二次开发简介

ABAQUS 是一款功能强大的通用有限元软件,包括非常丰富的材料模型、单元模式、载荷及边界条件,尤其求解非线性问题的能力非常优异,对岩土工程有非常好的适用性。ABAQUS 不仅提供标准的有限元分析程序,而且具有良好的开放性,可利用它提供的用户子程序接口生成非标准的分析程序来满足用户的需要。

ABAQUS 的二次开发一般分 2 种,求解器层次的 FORTRAN 和前后处理层次的 Python^[14-15],如图 1 所示。ABAQUS/Python 二次开发的作用是快速自动建模并形成 INP 文件或者是处理先有的 ODB 文件并提取所需结果。而像 Abaqus standard/Abaqus explicit 等求解器都是使用 FORTRAN 语言实现的^[16]。对于一些比较复杂的问题,必须使用 FORTRAN 语言进行二次开发,编写子程序对 ABAQUS 求解器进行扩展。笔者主要通过编写 Python 脚本对媒体间插入黏结单元,并通过等效应力原理模拟瓦斯压力对于媒体强度的

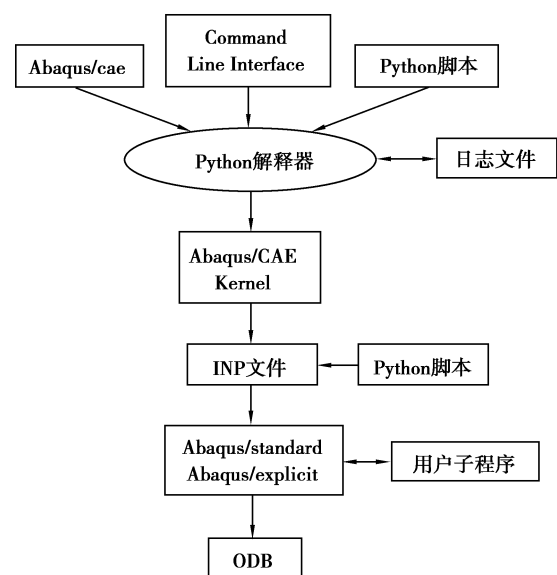


图 1 ABAQUS 软件环境结构

Fig. 1 ABAQUS software environment architecture

影响,最终实现对煤与瓦斯突出的仿真计算。

2 煤与瓦斯突出中的二次开发

采用 Python 语言编写脚本对 ABAQUS 进行二次开发,目的是在煤体单元中插入零厚度黏结单元,以模拟煤体裂纹的产生。本次计算的煤体采用楔形单元,故 Python 脚本也是针对楔形单元编写,不适用于其他单元。

为了方便展示二次开发对于单元的具体作用,将把由 2 个楔形单元组成的模型作为示范。图 2 为模型以及其结点序号,单元 1 的结点编号:4,2,1,8,6,5,单元 2 的结点编号:3,2,4,7,6,8。它们之间的公共结点有 4 个,为 2,4,6,8。

采用 Python 脚本二次开发分为以下几步:

1) 在 ABAQUS 中建立模型,划分成楔形单元,并生成 inp 文件。

2) 利用 Python 语言读取 inp 文件中单元与结点信息,并以字典(dict)的形式存储。结点字典中,结点序号对应结点的 3 个维度的坐标分量;单元字典中,单元序号对应单元中的 6 个结点序号。求得单元字典为

{'Element_1':[4,2,1,8,6,5],'Element_2':[3,2,4,7,6,8]}。

3) 通过单元字典,找出每个单元的 5 个单元面,并建立成为一个单元面列表(list),即

{'Element_1':[[4,2,1],[8,5,6],[4,8,6,2],[2,6,5,1],[1,5,8,4]],'Element_2':[[3,2,4],[7,8,6],[3,7,6,2],[2,6,8,4],[4,8,7,3]]}。

统计每个单元面出现的次数,出现 2 次的即为 2 个楔形单元之间的公共面,即[2,4,8,6]。

4) 建立新的单元字典,为每个楔形单元分配 6 个独立结点。经过调整结点顺序,建立新的煤体单元,即{'Element_1':[1,2,3,4,6,5],'Element_2':[7,8,9,10,12,11]}。

5) 楔形单元本来具有的 4 个公共结点,变为 4 组不同结点,但是仍然具有相同坐标。将上述 4 组结点建立为黏结单元,即

{'COH_1':[1,2,6,4,9,8,12,11]}。

6) 将新建立的煤体单元和黏结单元写入 inp 文件,并将 inp 文件输入 ABAQUS 建立新的模型。

建立的新模型如图 3 所示。

楔形单元的结点序号进行重新排列,公共结点被拆分为 2 个坐标相同的结点,并且通过黏结单元相互连接。黏结单元厚度为 0,失效删除后不会造成空洞,从而影响煤体结构强度。

在完成 Python 插件时,需要在 ABAQUS 目录下的 plugins 文件夹中添加 3 个 Python 文件,分别是注册文件 coh_plugin.py、图像界面文件 cohDB.py 以及内核执行文件 coh.py。

内核执行文件是插件程序的核心,包含了上述 Python 对 inp 文件的修改功能。下面抽取部分重要代码进行说明。

```
i = 0
for j in lines[elementline:endline - 1]:
    elementlist.append(j.split(',')[0])
    for k in j.split(',')[1:7]:
```

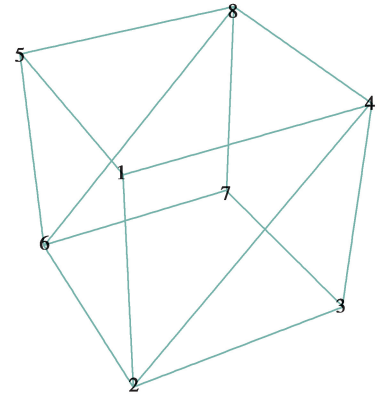


图 2 楔形单元结点示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wedge element nodes

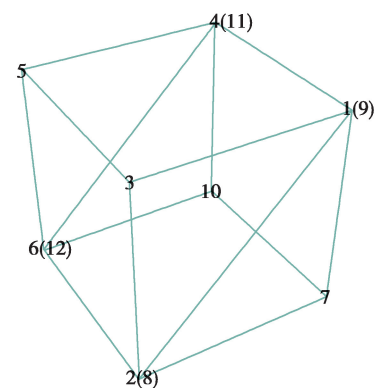


图 3 新楔形单元及黏结单元结点示意图

Fig. 3 Node Diagram of New Wedge Element and Cohesive Element

```

elementnolist.append(int(k))
elementname = 'Element_' + elementlist[i]
elementdict[elementname] = elementnolist[6 * i:6 * (i + 1)]
i += 1

```

读取 inp 文件中包含单元数据的部分,将其通过','拆分,第 1 个元素为单元序号,后 6 个元素为单元的结点编号。最后将其建立为单元字典。

```

for i in elementface:
    for j in i:
        face_sort.append(tuple(sorted(j)))
        sort_list = dict(Counter(face_sort))

```

将所有单元面读取,并且将其内部序号按大小排列,以方便统计。将每个单元面出现的次数进行统计,并建立为字典,以便拆分。

```

elementcoh = {}
for i in range(0, len(elementfacedict), 6):
    no = int(1 + (i + 1)/6)
    elementcoh['Elm_' + str(no)] = list(range(i + 1, i + 7))

```

成立新的媒体单元,每个单元分配 6 个新结点。要注意的是,此时结点顺序并不是最终结点顺序,由于楔形单元的 2 个三角形面的方向不同,所以需要修改单元结点顺序。

```

elecoh_dict = {}
for i in range(0, len(coh_face), 8):
    cohno = int(1 + (i + 1)/8)
    elecoh_dict['COH_' + str(cohno)] = coh_face[i:i + 8]

```

建立黏结单元字典,其中顺序同样需要修改。

3 含瓦斯煤本构关系及材料参数

3.1 含瓦斯煤破坏准则

煤体的破坏有 2 种,即拉伸破坏与剪切破坏。并且由于煤体一般受三向压力,所以一般以剪切破坏为主。煤体的剪切强度 τ_0 与拉伸强度 σ_0 均由实验直接测得。

地应力与瓦斯压力都会对煤体的强度产生影响。根据摩尔库伦准则,煤体的剪切强度为

$$\tau_f = \tau_0 + \sigma \tan \varphi, \quad (1)$$

式中: τ_f 代表煤体的剪切破坏强度; τ_0 是煤体无正应力下的剪切强度,也即内聚力; φ 为煤体的内摩擦角; σ 为煤体受到的压应力。

而根据有效应力原理,煤体所受到的总应力有部分来自于瓦斯压力,这部分压力对于煤体的强度和变形没有贡献。即瓦斯压力会降低煤体的有效应力,并同时影响其拉伸强度和剪切强度。煤体的有效应力为

$$\bar{\sigma} = \sigma - p, \quad (2)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为有效应力; p 为瓦斯压力。煤体的有效剪切强度会随着煤体间摩擦力减少而降低:

$$\bar{\tau}_f = \tau_0 + (\sigma - p) \tan \varphi, \quad (3)$$

将其通过等式 $\sigma \bar{\varphi} = (\sigma - p) \tan \varphi$ 可将内摩擦力的降低等效为内摩擦系数的降低。其中 $\bar{\varphi}$ 为有效摩擦角。

煤体的实际拉伸强度也会由于瓦斯压力而降低。当煤体处于拉伸状态下,煤体所受到的有效应力为外界拉力与内部瓦斯压力之和。相比于无瓦斯压力下实验测得的煤体拉伸强度 σ_0 ,瓦斯压力下煤体的有效拉伸强度为

$$\bar{\sigma}_0 = \sigma_0 - p. \quad (4)$$

根据有效应力原理,在 ABAQUS 中瓦斯压力的施加同时降低了煤体的抗剪强度和抗拉强度,与理论和实验一致。

3.2 有限元模型材料参数

煤体的模型包含煤体单元和零厚度黏结单元。煤体单元用于模拟煤体的运动和变形,采用线弹性模型。黏结单元用于模拟煤体的裂纹产生与扩展,采用内聚力模型。

黏结单元可以视作二维壳单元,其计算厚度单独输入,与几何厚度无关,从而可以实现零厚度。黏结单元参数中包含拉伸强度和剪切强度,可作为判断煤体是否破坏的依据。黏结单元由变形产生的误差可以通过减小计算厚度与提高弹性模量来降低,所以可以忽略其变形。

由于煤体单元之间插入了零厚度黏结单元,所以相邻煤体单元没有公共结点,但是结点坐标重合。经过仿真测试,煤体单元之间会受摩擦力影响。这意味着煤体单元之间存在接触,所以可以建立摩擦接触,以满足摩尔库伦准则。

含瓦斯煤的破坏同时需要满足有效应力原理。瓦斯压力对剪切强度的影响,可以通过计算有效摩擦系数 $\tan \bar{\varphi}$ 实现:

$$\tan \bar{\varphi} = \frac{(\sigma - p)}{\sigma} \tan \varphi。 \quad (5)$$

至此,可以通过建立 ABAQUS 中的内聚力模型以及摩擦接触,得到满足地应力与瓦斯压力对煤体强度的双重影响的煤体破坏准则。

所需材料参数如表 1、表 2 所示。

表 1 煤体材料参数

Table 1 Coal material parameters

密度/(kg · m ⁻³)	弹性模量/MPa	泊松比
1 500	1 200	0.2

表 2 煤体破坏强度

Table 2 Failure strength of coal body

拉伸强度/MPa	剪切强度/MPa	断裂能/mJ
1.43	1.00	0.08

其中表 2 拉伸强度 σ_0 与剪切强度 τ_0 为无应力状态下煤体强度极限。断裂能为单位面积断裂所需能量。

4 仿真结果及分析

本次仿真设置了围压与瓦斯压力 2 个变量,通过控制变量的方法展示这 2 种变量对煤与瓦斯突出所产生的影响,计算总时长为 0.1 s。模型建立参考陶云奇、许江等^[7-8]的文献。由于三维模型计算时间过长,所以将模型近似为二维模型,如图 4 所示。煤体 XY 方向的尺寸为 1 050 mm × 205 mm, Z 方向尺寸为 5 mm。边界条件为:煤体整体限制 Z 方向位移;底边限制 X 方向位移,其他 3 条边由刚体壳约束,左下方开一个高为 50 mm 的突出口,计算总时长均为 0.1 s。

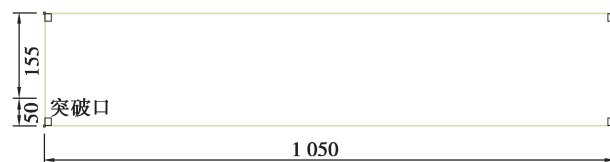


图 4 煤体整体模型

Fig. 4 Integral model of coal body

4.1 不同围压下煤体裂纹形态

图 5 展示了瓦斯压力为 0 MPa、地应力为 1~6 MPa 时煤体的裂纹扩展及突出情况。

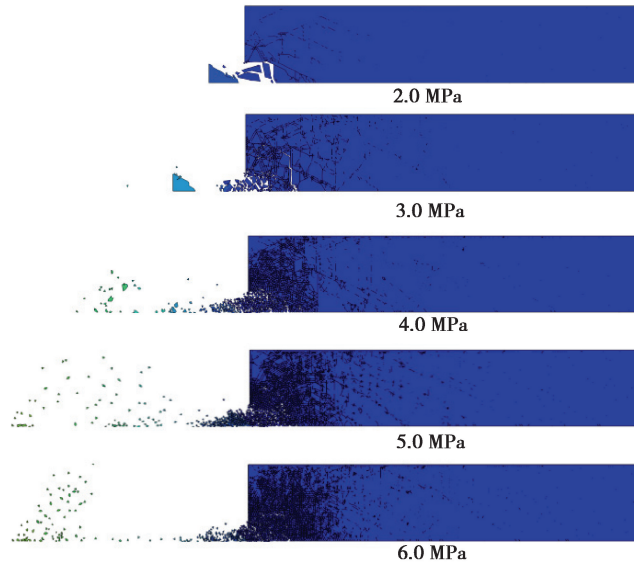


图 5 不同地应力下煤与瓦斯突出情况

Fig. 5 Coal and gas outbursts under different in-situ stresses

由图 5 可见,随着地应力的增大,煤体的裂纹密度提高,突出的大块煤体变成细小碎块;煤体的裂纹范围提高,但都聚集在洞口,并向煤体深处蔓延;煤体突出的速度变快,相同时间产生了更大的位移。

上述仿真结论与文献[8]的实验结果相同。图 6 为不同应力作用下洞内煤体碎裂程度对比。由图 6 可见煤体在地应力增加时,碎裂程度也随之上升,由大块煤体之间包含大型裂缝,转为细碎煤体以及无数细小裂缝。

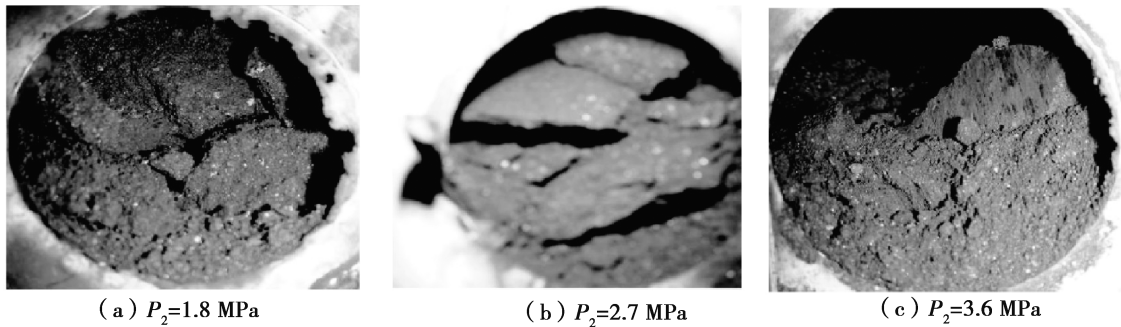


图 6 不同地应力下洞口煤体碎裂程度对比

Fig. 6 Contrast of coal fragmentation degree at the entrance of cave under different in-situ stress

将裂纹产生数量与时间做成曲线,如图 7 所示,随着地应力的提高,裂纹产生速度提升并不明显,与地应力 3~6 MPa 时开始速度相差不大。低地应力下煤体会更早停止破坏,高地应力下煤体的稳定时间变长,甚至在计算时间截止时仍未稳定。

根据 ABAQUS 计算煤体总能量与地应力采用二次方程拟合曲线如图 8 所示,可见图形拟合度非常高,即地应力与总能量之间呈现二次关系。

而由于裂纹数量与破坏能量成正比,所以也采用二次方程拟合裂纹数量与地应力曲线,如图 9 所示。

由图 9 可见,当地应力为 0~4 MPa 时拟合度很高,当地应力为 5~6 MPa 时出现了明显的误差。误差可能有两点:

- 1) 煤体体积有限,破坏到达边界时不再蔓延。
- 2) 计算时间有限,地应力 5~6 MPa 时破坏未停止。

得到的拟合方程为

$$y = 270x^2 - 320x + 12. \quad (6)$$

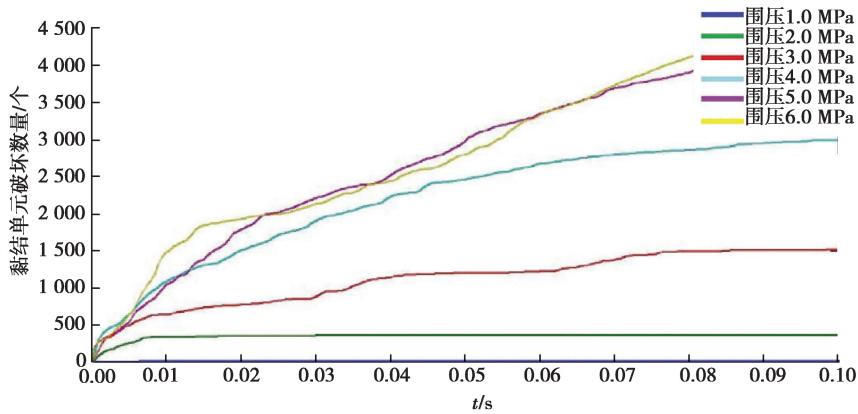


图 7 不同地应力下黏结单元破坏数量曲线

Fig. 7 Failure Quantity Curves of Cohesive Elements under Different Ground Stresses

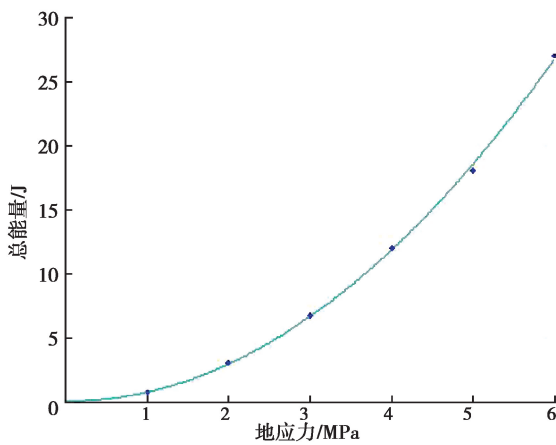


图 8 不同地应力下总能量拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of total energy under different crustal stresses

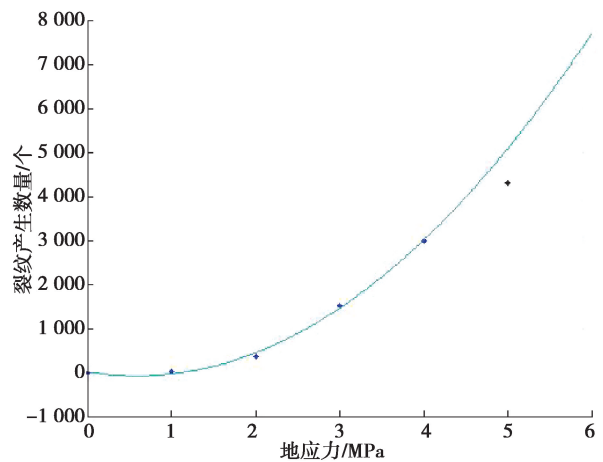


图 9 不同地应力下裂纹数量拟合曲线

Fig. 9 Fitting curves of crack number under different crustal stresses

4.2 不同瓦斯压力下煤体裂纹形态

图 10 展示了地应力为 2 MPa、瓦斯压力为 0~1 MPa 时煤体的裂纹扩展及突出情况。由图 10 可见,随着瓦斯压力的增大,煤体裂纹的变化与增大地应力不同:煤体的裂纹不再局限于突破口,当瓦斯压力提高时,煤体的破坏会很快蔓延到深处;煤体的碎裂程度更高,突出速度也更快。

仿真所得结果与文献[13]中实验结果相符的部分为:

1) 瓦斯压力不仅提供突出发生的动力,而且还起着粉碎和抛出煤粉的作用。

2) 煤体突出区域产生大量裂隙,且强度较低,突出域附近煤体产生位移。

不同点在于仿真计算中煤体裂纹扩散到了煤体整体,而实验中周围煤体则比较完整,由此

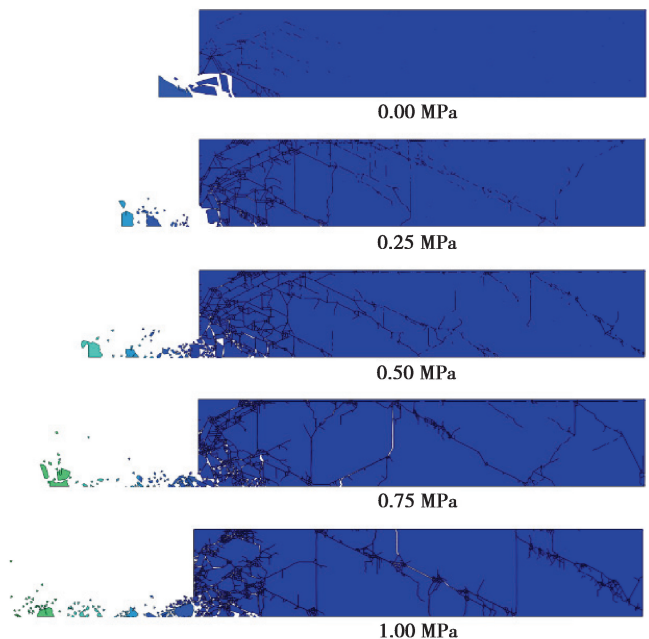


图 10 不同瓦斯压力下煤与瓦斯突出情况

Fig. 10 Coal and Gas Outburst under different gas pressure

可见仿真模型的结构强度较实验偏低。原因是模型洞口面积所占比例是 $\frac{100 \text{ mm}}{410 \text{ mm}} = 24.4\%$ ，而三维模型比例则是 $\frac{50 \text{ mm}^2 \times \pi}{410 \text{ mm}^2} = 4.7\%$ ，洞口比例提高导致整体结构强度下降。

将裂纹产生数量与时间做成曲线，如图 11 所示。采用三次方程拟合曲线如图 12 所示。随着瓦斯压力的提高，裂纹产生速度提升明显，并且都在极短时间内停止破坏。裂纹破坏数量在 0.00~0.25 MPa 之间最大，之后随瓦斯压力增大而增大。

得到的拟合方程为

$$y = 5\,800x^3 - 11\,000x^2 + 7\,500x + 370. \quad (8)$$

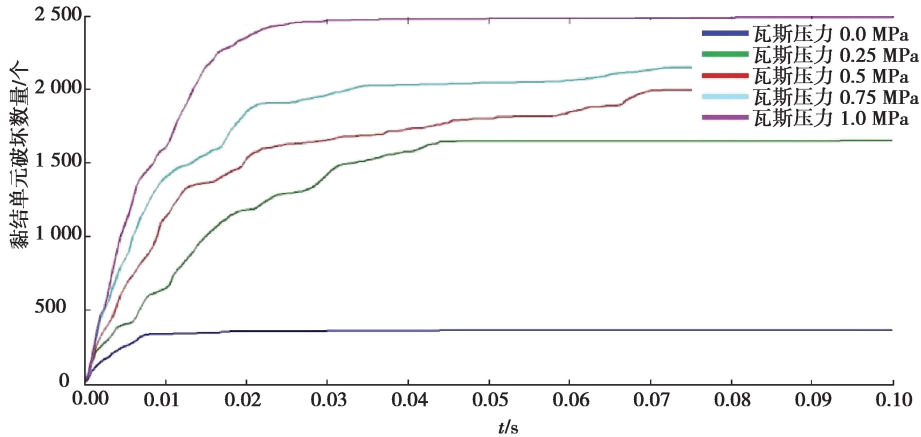


图 11 不同瓦斯压力下黏结单元破坏数量曲线

Fig. 11 Number curve of failure of cohesive unit under different gas pressures

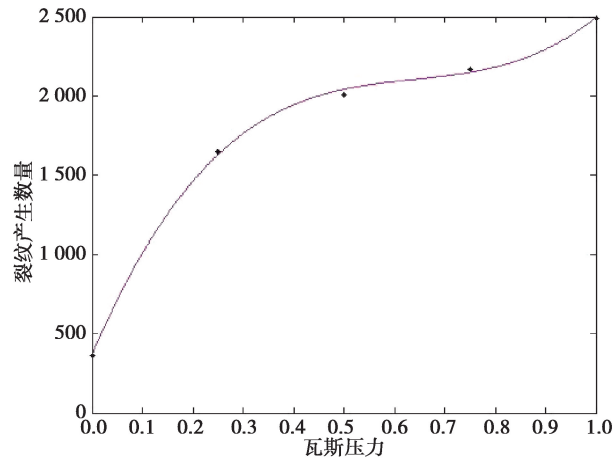


图 12 不同瓦斯压力下裂纹数量拟合曲线

Fig. 12 Fitting Curve of Crack Number under Different Gas Pressure

5 结 论

1) 传统有限元法在计算固体大变形破坏时，会简单地将失效单元删除，影响结构强度从而产生误差。利用 python 脚本语言在煤体间插入零厚度黏结单元，可以很好地弥补这一点。

2) 地应力会增加煤体抗剪强度，但也同时增大煤体应力集中情况。煤体所受地应力越大，煤体碎裂程度越高，煤体突出速度越快，并且煤体破坏时间越长。裂纹多集中在洞口。

3) 瓦斯压力同样起着粉碎煤体和抛送煤体的作用。与地应力不同，瓦斯压力会降低煤体强度，从而使裂纹延伸到煤体深处。

参考文献:

- [1] 缪协兴, 钱鸣高. 中国煤炭资源绿色开采研究现状与展望[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(1): 1-14.
MIAO Xiexing, QIAN Minghao. Research on green mining of coal resources in China: current status and future prospects[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(1): 1-14. (in Chinese)
- [2] 于不凡. 煤和瓦斯突出机理[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1985.
YU Bufan. Coal and gas outburst mechanism[M]. Beijing: Coal Industry Press, 1985. (in Chinese)
- [3] Rice G S. Introductory notes on origin of instantaneous outbursts of gas in certain coal mines of Europe and Western Canada[J]. The American Institute of Mining and Metall Engineers, 1931, 94: 75-87.
- [4] Skochinski A A. Modern concepts on the nature of sudden outbursts of gas and coal and control techniques[J]. Ugol, 1954(7): 4-10.
- [5] 于不凡. 煤和瓦斯突出发生过程的现场考察[J]. 川煤科技, 1980(3): 50-61.
YU Bufan. Field investigation of coal and gas outburst occurrence process[J]. Sichuan Coal Science and Technology, 1980(3): 50-61. (in Chinese)
- [6] 张超林, 许江, 彭守建, 等. 煤与瓦斯突出物理模拟实验研究进展及展望[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(4): 28-34.
ZHANG Chaolin, XU Jiang, PENG Shoujian, et al. Advances and prospects in physical simulation of coal and gas outburst[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(4): 28-34. (in Chinese)
- [7] 王维忠, 陶云奇, 许江, 等. 不同瓦斯压力条件下的煤与瓦斯突出模拟实验[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(3): 86-90.
WANG Weizhong, TAO Yunqi, XU Jiang, et al. Simulation experiment of coal and gas outburst under different gas pressure conditions[J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(3): 86-90. (in Chinese)
- [8] 许江, 刘东, 尹光志, 等. 非均匀荷载条件下煤与瓦斯突出模拟实验[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 836-842.
XU Jiang, LIU Dong, YIN Guangzhi, et al. Simulation experiment of coal and gas outburst under non-uniform load[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 836-842. (in Chinese)
- [9] 张伟, 许开立, 雷云. 煤层巷道预排瓦斯带的流固耦合效应数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(11): 1628-1632, 1642.
ZHANG Wei, XU Kaili, LEI Yun. Numerical simulation of the flow solid coupling effect in the seam roadway pre-exhaust gas zone[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(11): 1628-1632, 1642. (in Chinese)
- [10] 郭龙. 汪家寨煤矿巷道围岩变形规律数值模拟研究[J]. 煤炭技术, 2015, 34(12): 78-80.
GUO Long. Experimental modeling study of tunnel surrounding rock deformation laws in Wangjiashai coal mine[J]. Coal Technology, 2015, 34(12): 78-80. (in Chinese)
- [11] 郭平, 曹树刚, 张遵国, 等. 含瓦斯煤体固气耦合数学模型及数值模拟[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S2): 330-335.
GUO Ping, CAO Shugang, ZHANG Zunguo, et al. Analysis of solid-gas coupling model and simulation of coal containing gas[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 330-335. (in Chinese)
- [12] 解北京, 赵泽明, 徐晓萌, 等. 含瓦斯煤锤击破坏 HJC 本构模型及数值模拟[J]. 煤炭学报, 2018, 43(10): 2789-2799.
XIE Beijing, ZHAO Zeming, XU Xiaomeng, et al. HJC constitutive model and numerical simulation of hammer damage with gas-containing coal[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(10): 2789-2799. (in Chinese)
- [13] 徐学锋, 刘军, 张银亮. 基于煤层巷道开挖卸荷效应的底板冲击孕育过程研究[J]. 煤田地质与勘探, 2015, 43(2): 77-82.
XU Xuefeng, LIU Jun, ZHANG Yinliang. Preparatory process of floor shock caused by unloading effect during excavation of coal roadway[J]. Geology & Exploration, 2015, 43(2): 77-82. (in Chinese)
- [14] 曹金凤, 石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
CAO Jinfeng, SHI Yiping. FAQ for ABAQUS finite element analysis [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [15] 曹金凤, 王旭春, 孔亮. Python 语言在 Abaqus 中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
CAO Jinfeng, WANG Xuchun, KONG Liang. The application in Abaqus of python language[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
- [16] 苏景鹤, 江丙云. ABAQUS Python 二次开发攻略[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
SU Jinghe, JIANG Binyun. Second development strategy of ABAQUS Python [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Publishing House, 2016. (in Chinese)