

# 采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型及应用

刘洪永<sup>1</sup>, 程远平<sup>1</sup>, 赵长春<sup>2</sup>, 王海锋<sup>1</sup>, 陈海栋<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 煤矿瓦斯治理国家工程研究中心, 江苏 徐州 221008; 2. 阳泉煤业(集团)有限责任公司 技术中心, 山西 阳泉 045000)

**摘要:** 为提高保护层开采的有效性、安全性和经济性, 通过引入理想弹脆塑性模型和内切圆准则, 采用 FLAC<sup>3D</sup> 技术, 在德鲁克-普拉格塑性流动格式基础上建立采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型的数值格式。利用 VC++2005 开发环境将本构模型编写成可供 FLAC<sup>3D</sup> 软件调用的自定义模型, 并通过试件单轴和三轴压缩数值试验的对比, 验证模型用于研究采动煤岩体脆性应变软化特征的正确性和合理性。将所建立模型用于阳泉新景矿超远距离保护层开采的数值模拟得出: 位于保护层上部 125 m 的超远距离被保护煤层处于裂隙带上边缘, 被保护层卸压瓦斯取得良好效果, 能利用保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采消除被保护层的突出危险。计算结果与物理相似模拟结果基本吻合, 表明所建立的采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型可用于保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采效果的预评价。模拟结果可为保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采设计提供合理建议。

**关键词:** 采矿工程; 弹脆塑性; 采动损伤; 本构模型; 保护层开采

**中图分类号:** TD 821

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2010)02-0358-08

## CONSTITUTIVE MODEL FOR ELASTO-BRITTLE-PLASTIC DAMAGE OF COAL ROCK MASS DUE TO MINING AND ITS APPLICATION

LIU Hongyong<sup>1</sup>, CHENG Yuanping<sup>1</sup>, ZHAO Changchun<sup>2</sup>, WANG Haifeng<sup>1</sup>, CHEN Haidong<sup>1</sup>

(1. *National Engineering and Research Center for Coal Gas Control, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China;* 2. *Technology Research Center, Yangquan Coal Industry Group Co., Ltd., Yangquan, Shanxi 045000, China*)

**Abstract:** The exploitation of the protective layer and pressure-relief gas drainage is an effective primary method to eliminate coal and gas outburst and it is widely used in many mineral fields. In order to improve the effectiveness, safety and economy of the protective layer mining, a set of numerical equations of elasto-brittle-plastic constitutive model of coal rock mass damage due to mining are set up based on the plastic flow format of Drucker-Prager constitutive model in fast Lagrangian analysis of Continua in 3-dimension continua(FLAC<sup>3D</sup>). And the model is modified by using the inscribed circle criterion and the ideal brittle-plastic model. The model is developed into DLL file in VC++2005 programming environment for FLAC<sup>3D</sup>; and the correctness and rationality of this model used to study the brittle strain-softening characteristics of coal rock mass due to mining are validated by comparing with uniaxial and triaxial compression numerical tests. This model is used to simulate the super-remote protected seams exploitation of Xinjing coal mine in Yangquan coal field. The results show that the protected layer lies in the top edge of fractured zone 125 m away from the protected layer; and the relieved gas in the super-remote protected layers could be better drained utilizing the mining influence of the protective layer. And the conclusions agree with that of the similar experiment, which indicates that the elasto-brittle-plastic constitutive model of coal rock mass damage due to mining could be used to preliminary evaluation of protective layer mining

**收稿日期:** 2009-07-27; **修回日期:** 2009-10-15

**基金项目:** 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2005CB221503); 国家自然科学基金资助项目(70533050, 50674089)

**作者简介:** 刘洪永(1982-), 男, 2005年毕业于中国矿业大学安全技术及工程专业, 现为博士研究生, 主要从事煤矿瓦斯防治理论及技术方面的研究工作。E-mail: Lhyeven@163.com

and relief-pressure gas drainage. Simulation results may bring forward reasonable suggestions for the design of protective layer mining and relief-pressure gas drainage.

**Key words:** mining engineering; elasto-brittle-plasticity; damage due to mining; constitutive model; protective layer mining

## 1 引言

保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采是目前突出危险煤层群开采的强制性首选防突技术<sup>[1-2]</sup>,也是最经济、最可靠的防突技术<sup>[3-5]</sup>。保护层开采引起顶、底板覆岩应力的重新分布,导致上覆煤岩层的移动、变形与破坏,在其顶板和底板一定范围内的煤(岩)层内形成了“卸压增透增流”效应<sup>[4]</sup>。保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采技术正是利用这一效应将被保护瓦斯含量和瓦斯压力降至一定水平,从根本上消除煤与瓦斯突出危险性。但保护层开采后,位于不同层位的被保护层变形与破裂形态有较大差异。而这直接决定了保护层开采和卸压瓦斯抽采的效果。研究保护层开采过程中上覆岩层冒落移动和裂隙的时空演化规律,构建符合采动煤岩体的本构模型,对保护层开采可行性和被保护层卸压瓦斯抽采效果的预评价以及卸压瓦斯抽放技术的优化具有一定的理论意义,对提高保护层开采的有效性、安全性和经济性具有重大的现实意义。

研究众多煤岩试样的全应力-应变曲线<sup>[6-9]</sup>发现,煤岩符合准脆性材料的力学特性,煤岩的采动损伤破坏可视为脆性应变软化。国内外学者对材料的应变软化进行了大量而卓有成效的研究。应变软化材料的弹脆塑性本构模型最早由 K. Dems 和 Z. Mroz<sup>[10]</sup>提出。根据应力跌落处理方式的不同又分为理想脆塑性模型<sup>[11-12]</sup>和非理想脆塑性模型<sup>[13-14]</sup>。根据理想脆塑性模型,假定应力跌落时发生零位移增量,建立了弹脆塑性本构积分的数值格式和增量型弹脆塑性有限元求解算法<sup>[15]</sup>,并应用于复合材料力学行为的研究<sup>[16]</sup>。彭永伟<sup>[9]</sup>基于莫尔-库仑(简称 M-C 准则)模型和理想脆性本构关系建立了煤体弹脆塑性本构关系;唐春安等<sup>[17-18]</sup>用理想脆性本构关系模拟材料准脆性的非线性变形,通过折减单元失效后的材料参数模拟细观损伤破坏过程,开发了 RFPA 软件;史贵才<sup>[14]</sup>提出了非理想脆塑性模型应力脆性跌落非零位移增量近似处理方法,并对大理岩、红砂岩、花岗岩<sup>[14-19]</sup>和粉砂岩<sup>[20]</sup>等脆性比较明显的岩石进行了应力脆性跌落系数的试验研究。

这些研究成果为脆塑性材料的研究奠定了基础。

随着煤矿机械化程度的提高,综采放顶煤、大采高综采等高强度采煤方法得到普遍应用。而这些采煤法均具有推进速度快、采动相对充分和对煤岩体扰动程度高等特点,传统本构模型无法模拟高强度开掘的实际情况<sup>[9]</sup>。目前能够反映采动煤岩破坏的本构模型较少,给保护层开采可行性和被保护层卸压瓦斯抽采效果的预评价及卸压瓦斯抽采方法的选择带来不便,制约了保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采技术的推广应用。

本文将内切圆准则和脆性损伤系数引入 D-P 准则,建立了能够反映高强度采掘条件下煤岩体的破坏特征的采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型,并在 VC++2005 中将其开发成 FLAC<sup>3D</sup> 软件可调用的模型,并将其应用于阳泉新景矿超远距离保护层开采的预评价研究。

## 2 采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型

### 2.1 理想弹脆塑性模型

将脆塑性材料应力-应变曲线中应力峰值尖锐化,省去应力跌落的过程和残余应力降,将煤岩全应力-应变曲线简化成 3 个阶段:理想弹性阶段  $OA$ ,脆性跌落阶段  $AB$  和残余塑性阶段  $BC$ ,如图 1 所示,此模型称为理想脆塑性模型<sup>[21]</sup>。模型可描述为:当介质点由初始弹性态加载到峰值强度点  $A$  时,如果满足屈服条件将发生损失迅速跌落至残余强度线上的点  $B$ ,此后若继加载,将产生塑性流动,即  $BC$  段。

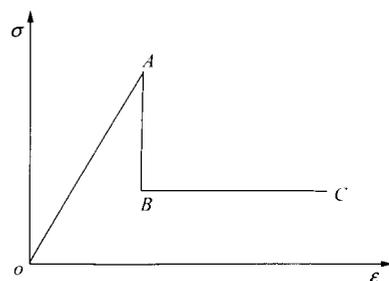


图1 理想弹脆塑性模型

Fig.1 Ideal elasto-brittle-plastic model

当煤岩应力由某一初始弹性态加载到峰值强度面后，将发生突变而迅速跌落至残余强度面上。对于脆性跌落的处理，目前使用较为普遍的是最短路径假定，即假定煤岩脆性跌落的应变软化为各向同性，煤岩应变软化是由偏应力造成，可将采动煤岩脆性跌落处理为应力由峰值屈服面的径向跌落至残余屈服面上，有且仅有各向应力偏量按同一比例  $\beta$  衰减<sup>[15]</sup>，若引入可直观表示脆性跌落程度的脆性损伤系数  $D$ ，则有

$$\Delta S = S - \beta S = (1 - \beta)S = DS \tag{1}$$

式中： $\Delta S$  为应力偏量增量， $S$  为应力偏量张量。

由于在跌落过程中总应变保持不变，产生的塑性应变的增加由弹性应变的减少所抵消，故其等效塑性应变增量和塑性应力增量分别为

$$\Delta \bar{\epsilon}^p = (1 - \beta)\sigma_s / E = D\sigma_s / E \tag{2}$$

$$\Delta S^p = \Delta S \tag{3}$$

式中： $\sigma_s$  为跌落峰值强度， $E$  为弹性模量， $\Delta S^p$  为塑性应力增量。

因此，在煤岩脆性跌落后，应力残余流动初始值为

$$\sigma = \beta S + \sigma_m = (1 - D)S + \sigma_m \tag{4}$$

式中： $\sigma_m$  为平均应力。

当应力点完成了从初始屈服面向残余屈服面的跌落之后，将在塑性不平衡力的作用下，继续在残余屈服面上作塑性流动，其塑性流动的计算与常规的理想塑性增量本构理论中所述相同。

### 2.2 采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型的构建

参考 FLAC<sup>3D</sup> 德鲁克 - 普拉格本构模型的定义规则<sup>[22]</sup>，在 FLAC<sup>3D</sup> 中建立采动煤岩体弹脆塑性本构模型遵守如下准则：

(1) 本构模型中所有涉及的应力均为有效应力，以实现多场耦合的支持。

(2) 屈服准则在有效应力空间表述为

$$F^s = \tau + q_\phi \sigma_m - k_\phi = 0 \tag{5a}$$

$$F^l = \sigma_m - \sigma_r \tag{5b}$$

其中，

$$q_\phi = \frac{3 \sin \phi}{\sqrt{3(3 + \sin^2 \phi)}} \tag{5c}$$

$$k_\phi = \frac{\sqrt{3} c \cos \phi}{\sqrt{3 + \sin^2 \phi}} \tag{5d}$$

$$\tau = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{11} - \sigma_m)^2 + (\sigma_{22} - \sigma_m)^2 + (\sigma_{33} - \sigma_m)^2 + \sigma_r]} \tag{5e}$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}\sigma_{ii} = \frac{1}{3}\sigma_{ij}\delta_{ij} \tag{5f}$$

其中，

$$\sigma_r = \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 + \sigma_{23}^2 \tag{5g}$$

式中： $F^s$  为初始剪切屈服函数； $F^l$  为初始拉伸屈服函数； $\sigma_r$  为材料的抗拉强度； $\tau$  为纯剪应力； $q_\phi$  和  $k_\phi$  均为材料参数，其以黏聚力  $c$  和内摩擦角  $\phi$  表述的表达式<sup>[23]</sup>根据内切圆准则拟合得到。

(3) 弹性阶段应力增量关系

$$\Delta \tau = G\sqrt{2\Delta \epsilon_{ij}\Delta \epsilon_{ij}} \tag{6}$$

$$\Delta \sigma = K\Delta \epsilon_{kk} \tag{7}$$

式中： $G$ ， $K$  分别为剪切模量和体积模量； $\Delta \epsilon_{ij}$  为剪应变增量； $\Delta \epsilon_{kk}$  为体应变增量。

(4) 将应变增量分解为弹性和塑性 2 部分，即

$$\Delta \epsilon_i = \Delta \epsilon_i^e + \Delta \epsilon_i^p \tag{8}$$

当应力从初始屈服面退回到后继屈服面时，应力可由式(4)计算，此产生的等效塑性应变增量按式(2)计算。在残余流动面上的塑性流动则计算为

$$\Delta \epsilon_i^p = \lambda^p \frac{\partial g^p}{\partial \sigma_i} \tag{9}$$

式中： $\lambda^p$  为塑性流动因子， $g^p$  为塑性流动函数。

(5) 残余流动满足残余屈服函数

在残余屈服面上，采用理想塑性流动。根据 D-P 准则，残余剪切屈服函数形式为

$$f^s = \tau + q_\phi^r \sigma_m - k_\phi^r = 0 \tag{10}$$

$$f^l = \sigma_m - \sigma_r \tag{11}$$

式中： $f^s$  为残余剪切屈服函数； $f^l$  为残余拉伸屈服函数； $\sigma_r$ ， $q_\phi^r$ ， $k_\phi^r$  均为材料残余强度参数。

(6) 塑性耦合流动法则

塑性流动仅发生在应力跌落后，应力点在残余屈服面上作塑性流动。

根据残余屈服函数可得对应于关联流动法则的残余剪切屈服塑性流动函数和塑性流动因子分别为

$$g^s = \tau + q_\phi^r \sigma_m \tag{12}$$

$$\lambda^s = \frac{\tau^l + q_\phi^r \sigma_m^l - k_\phi^r}{G + K(q_\phi^r)^2} \tag{13}$$

式中:  $\tau^l$  和  $\sigma_m^l$  分别前一时步的剪力和平均应力。

对应于关联流动法则的拉伸屈服塑性流动函数和塑性流动因子分别为

$$g^l = \sigma_m \quad (14)$$

$$\lambda^l = \frac{\sigma_m^l - \sigma_{tr}}{K} \quad (15)$$

残余塑性流动法则, 由  $\sigma_m$  和  $\tau$  确定的平面来描述, 如图 2 所示。

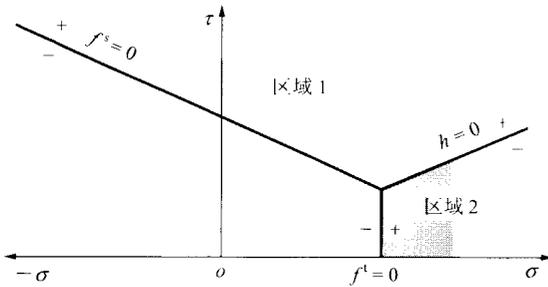


图 2 按残余塑性损伤流动法则定义的 D-P 模型

Fig.2 Drucker-Prager model defined by plastic damage flow rules

在平面有效区域内, 剪切屈服方程  $f^s = 0$ 、拉伸屈服方程  $f^l = 0$  和剪切与拉伸分界线  $h = 0$  将应力平面分成剪切破坏区(区域 1)和拉伸破坏区(区域 2)。剪切破坏区与拉伸破坏区分界线方程为

$$h = \tau - \tau^p - \alpha^p (\sigma_m - \sigma_t) \quad (16a)$$

其中,

$$\tau^p = k_\phi - q_\phi \sigma_t, \quad \alpha^p = \sqrt{1 + q_\phi^2} - q_\phi \quad (16b)$$

式中:  $\tau^p$  和  $\alpha^p$  分别为材料剪力和平均应力极限参数。

根据塑性流动准则, 在剪切破坏区内新有效应力表达式为

$$\left. \begin{aligned} \tau^N &= \tau^l - \lambda^s G \\ \sigma_m^N &= \sigma_m^l - \lambda^s K q_\phi^l \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

在拉伸破坏区, 新有效应力表达式为

$$\left. \begin{aligned} \tau^N &= \tau^l \\ \sigma_m^N &= \sigma_m^l - \lambda^l K \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

当根据应力和残余塑性流动法则得到新值时, 检查是否在残余屈服面上。若有偏离, 则将应力调

整到残余屈服面上, 最终的应力为

$$\sigma_i^N = \frac{\sigma_i \sigma^N}{\bar{\sigma}^N} \quad (19)$$

式中:  $\sigma_i$  为残余强度,  $\bar{\sigma}^N$  为等效应力值。

### 2.3 采动弹脆塑性损伤本构模型的开发

在 FLAC<sup>3D</sup> 中, 用 VC++ 编写动态链接库文件 (DLL 文件) 实现自定义本构模型。该模型的主要功能就是由应变增量(应变率)得到新的应力张量。弹脆塑性采动损伤本构模型的计算流程如图 3 所示。

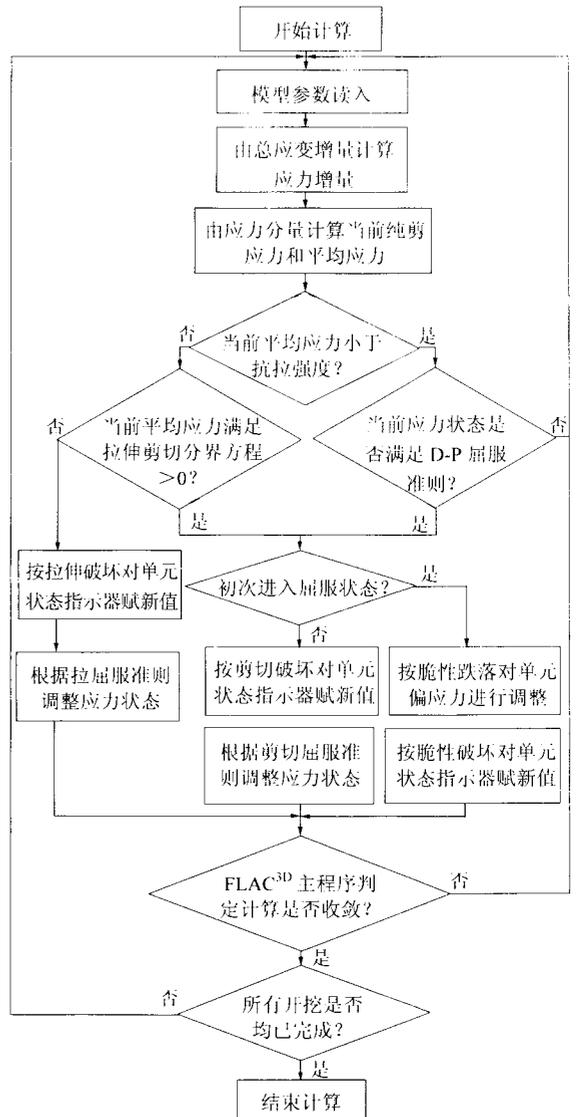


图 3 采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型计算流程

Fig.3 Program flowchart of constitutive model for elasto-brittle-plastic damage of coal rock mass due to mining

自定义 FLAC<sup>3D</sup> 本构模型主要包括: 基类、成员函数的定义、模型注册、模型与 FLAC<sup>3D</sup> 间的数

据传递以及模型状态指示。自定义模型主要通过修改头文件的私有变量与源文件函数的物理力学参数变量、状态关键字和计算流程等操作来实现。将编写好的头文件 Vcmcdp.h 和源文件 Vcmcdp.cpp 导入到 VC++工程文件(.sln)中,通过编译、链接和调试,形成了采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型的动态链接库文件 Vcmcdp.dll。

### 3 采动弹脆塑性损伤本构模型的验证

为了测试采动煤岩体弹脆塑性本构模型,本文进行了单轴和三轴数值模拟试验。

#### 3.1 三轴试验模拟

计算模型的尺寸采用标准圆柱体形试样,采用半径 25 mm、高 100 mm 的圆柱体 cylinder 单元,划分为 8 000 个单元,单元底面为竖向位移约束,周围的 4 个面采用应力边界条件,采动煤岩体弹脆塑性本构模型参数见表 1 所示。

表 1 采动煤岩体弹脆塑性本构模型参数

Table 1 Parameters of constitutive model for elasto-brittle-plastic damage of coal rock mass due to mining

密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	抗拉强度 $\sigma_t/\text{MPa}$
2 400	1.63	0.21	41	2.0	1.41
残余黏聚力 $c_r/\text{MPa}$	残余强度 $\sigma_r/\text{MPa}$	残余内摩擦角 $\varphi_r/(\text{°})$	残余抗拉强度 $\sigma_{tr}/\text{MPa}$	脆性损伤系数 $D$	
0.65	2.8	35	0.2	0.2	

模型顶部荷载使用 fish 函数分级施加,每级为 100 kPa,计算收敛的最大不平衡力比默认为  $10^{-5}$ ,力学模型采用本文开发的采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型。在不同围压下,试件底端面中心位置的轴向应变 - 偏应力关系如图 4 所示。

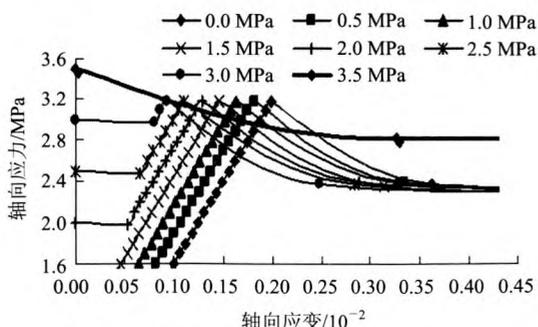


图 4 试件不同围压下轴向应力 - 应变关系

Fig.4 Relationships between axial stress and axial strain of testing specimen under different confining pressures

当材料达到屈服极限后,发生脆性跌落,由于加载增量较大,产生了少量塑性应变。从图 4 可以看出,随着围压的增加,岩石应变软化逐渐向理想塑性过渡;当围压小于 3.5 MPa 时,脆性材料强度峰值基本一致,为 3.19 MPa;当围压为 3.5 MPa 时,脆性材料在初始应力平衡计算过程中已经达到屈服极限,因此仅测得脆性损伤后的塑性变形。

对比图 1 和 4 可以看出,FLAC<sup>3D</sup>的计算结果与理想弹脆塑性模型基本吻合,表明所建立的采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型适用于采动影响下的煤岩体变形破坏分析。

#### 3.2 与其他本构模型的对比

为比较采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型,改进型 D-P 模型和 M-C 模型的不同,对上述试件进行单轴压缩数值模拟试验。单轴压缩条件下的应力 - 应变曲线如图 5 所示。

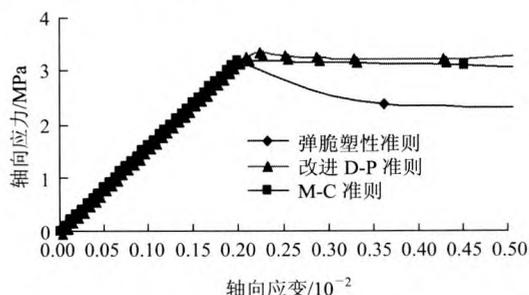


图 5 单轴压缩条件下不同本构模型的应力 - 应变曲线

Fig.5 Relationship curves between stress and strain of different constitutive models under uniaxial compression

从图 5 可以看出,当达到屈服极限时,采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型中应力发生跌落,而 M-C 模型和改进型 D-P 模型发生塑性变形。改进型 D-P 模型由于采用了内切圆准则,计算结果与 M-C 模型非常接近。

试件在压缩试验过程中,采用 M-C 模型和改进型 D-P 模型时,煤岩仅发生压剪破坏,而当采用采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型时,试件不但发生剪切破坏,而且由于部分单元的损伤,造成承载能力下降使其邻近单元应力集中并产生拉应力,出现了拉伸破坏。这与格里菲斯强度理论相符。因此,采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型更符合采动煤岩破坏的实际情况。

### 4 工程应用

阳泉矿区煤与瓦斯突出危险严重,尤以 3#煤层

为最。在新景煤矿井田内, 下距 3<sup>#</sup>煤层平均为 125 m 处有厚度为 6.14 m 的 15<sup>#</sup>煤层, 该煤层无煤与瓦斯突出危险, 可作为 3<sup>#</sup>煤层的下保护层。

根据《防治煤与瓦斯突出规定》<sup>[2]</sup>(下称《规定》)的要求, 保护层和被保护层之间的最大有效垂距不能大于 100 m。而新景矿 15<sup>#</sup>煤与 3<sup>#</sup>煤平均层间距达到了 125 m, 远大于《规定》的要求, 属超远距离保护层开采, 保护层开采的效果难以保证。因此, 若将 15<sup>#</sup>煤层作为下保护层, 需通过数值对其上覆煤岩采动裂隙发育、移动和变形进行研究, 对保护层开采可行性和被保护层 3<sup>#</sup>煤层卸压瓦斯抽采的效果进行预评价。

计算模型根据新景矿地质条件而建立。计算模型尺寸为 500 m×500 m×210 m。模型中的垂向均匀载荷根据上覆岩层重力确定, 即模型上边界为应力边界, 下边界垂直位移固定, 左右两侧水平位移固定。为了验证本文所开发本构模型的合理性, 计算模型分别采用采动煤岩体弹脆塑性损伤模型和 M-C 模型。模型中 15<sup>#</sup>煤层埋深为 380 m, 工作面长度为 300 m。模拟区域煤系地层的物理力学参数详见表 2。

经过运算得到了 2 个本构模型的计算结果(见表 3)。由于文章篇幅限制, 仅将采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型得到的上覆煤岩的裂隙发育和位移变化情况列出, 如图 6, 7 所示。下面详细阐述保护层岩层移动、裂隙发育及变形的测定过程。

根据离层中的上层体拉应力集中、下层体压应力集中的特点, 由图 6 可以看出, 保护层 15<sup>#</sup>煤层

开采后, 上覆岩层 136 m 范围内均有离层出现, 离层量因上下位岩层厚度的不同而不同。

由图 7 竖向位移场的分析得到, 保护层采动冒落带的高度为 41 m, 裂隙带的高度为 94 m, 分别为采高的 6.7 倍和 15.3 倍, 3<sup>#</sup>煤层最大下沉量达到了 3.5 m, 这与阳泉矿区的实测值和经验值<sup>[24]</sup>一致。3<sup>#</sup>煤层距 15<sup>#</sup>煤平均达到 125 m, 而导水裂隙带的高度(即冒落带和裂隙带高度之和)达到了 135 m, 由此可以断定超远距离被保护层 3<sup>#</sup>煤层处于裂隙带上边缘, 采动裂隙较为发育, 透气性增加显著, 卸压瓦斯抽采将取得良好效果, 能消除被保护层的煤与瓦斯突出危险。

为了更全面地研究阳泉新景矿超远距离下保护层开采的可行性, 为卸压瓦斯抽采设计提供较为准确基础参数, 根据表 2 的煤岩层的物理力学参数和矿井地质柱状图进行了物理相似模拟试验。相似模拟试验的照片和变形的测量结果如图 8, 9 所示。

将 2 个本构模型的计算结果与相似模拟结果进行了汇总, 见表 3。从表 3 可以看出, 由于采动弹脆塑性损伤本构模型中应变软化的存在使计算收敛的时步数大大增加, 除屈服单元总体积略小于 M-C 本构模型外, 冒落带高度、裂隙带高度、卸压角和 3<sup>#</sup>煤层最大下沉量等均大于 M-C 本构模型。采动弹脆塑性损伤本构模型的计算结果与相似模拟结果一致性较好, 这说明本文建立的采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型较 M-C 模型更能反映高强度采掘条件下覆岩的采动损伤破坏特征。

现场工程实践考察证实, 新景矿 15<sup>#</sup>煤层开采

表 2 模拟区域煤系地层物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters of coal strata in simulated domain

编号	岩性	厚度 /m	累厚 /m	体积模量 K/GPa	剪切模量 G/GPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/MPa	抗拉强度 $\alpha$ /MPa	残余摩擦角 $\varphi_r/(^\circ)$	残余黏聚力 $c_r$ /MPa	残余强度 $\alpha_r$ /MPa	残余抗拉强度 $\alpha_{tr}$ /MPa	脆性损伤系数 D
1	中粒砂岩	27.0	210.3	27.40	18.800	38	6.40	4.17	33	2.50	11.50	0.3	0.10
2	泥岩	3.4	183.3	1.80	0.929	30	2.67	2.50	24	1.13	0.62	0.4	0.30
3	砂质泥岩	7.8	179.9	2.03	1.040	33	3.20	3.34	27	1.00	0.69	0.4	0.25
4	煤层	2.6	155.5	2.58	1.190	26	1.23	1.28	22	0.62	0.84	0.2	0.40
5	石灰岩	3.2	66.7	10.50	6.910	37	4.70	6.83	31	1.12	4.70	0.8	0.15

表 3 不同本构模型结果与相似模拟的对比

Table 3 Comparison between different constitutive models with similar experiment

本构模型	计算时步数/步	屈服单元总体积/m <sup>3</sup>	冒落带高度/m	裂隙带高度/m	卸压角/( $^\circ$ )	3 <sup>#</sup> 煤层最大下沉量/m	3 <sup>#</sup> 煤层所处位置
采动弹脆塑性损伤本构	475 300	5.644×10 <sup>3</sup>	41.0	94.0	68.0	3.5	裂隙带上边缘
M-C 本构	164 220	5.662×10 <sup>3</sup>	29.0	64.0	61.0	3.0	弯曲下沉带
物理相似模拟试验	-	-	40.7	97.5	71.3	3.6	裂隙带上边缘

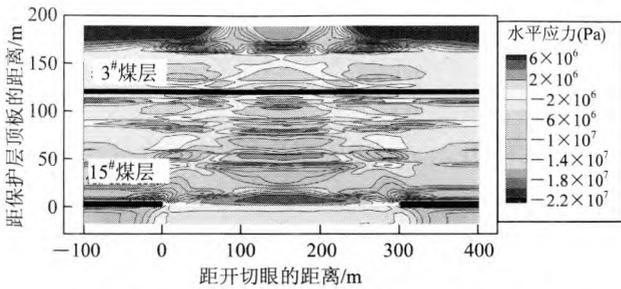


图6 保护层上覆煤岩层离层和水平应力分布图

Fig.6 Flood distribution of separation and horizontal stress of the overburden

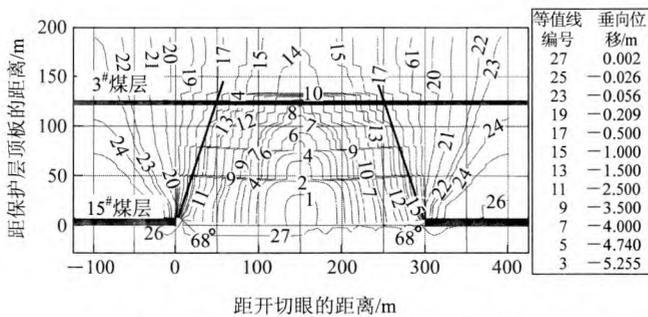


图7 保护层上覆岩层竖向位移场及卸压范围

Fig.7 Isoclines distribution of vertical display and protected areas of the overburden

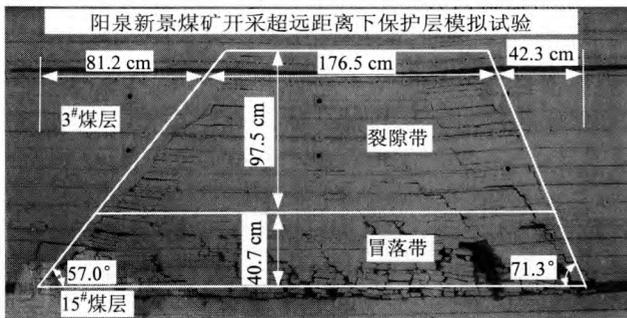


图8 保护层开采完后煤岩层充分垮落的图片

Fig.8 Photo of rock movement and mining fissure after protective layer mining

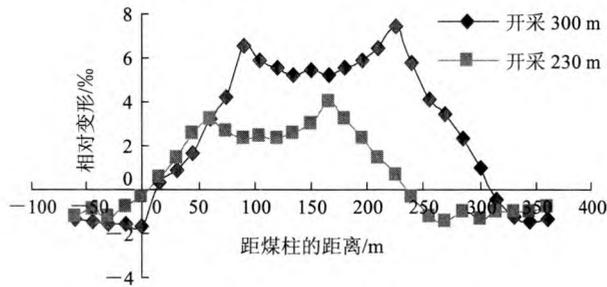


图9 相似模拟试验中被保护层相对变形曲线

Fig.9 Relative deformation curves of protected layer in similar experiment

后, 超远距离上被保护层 3#煤层的卸压瓦斯抽采取得了良好效果, 卸压瓦斯综合抽采率达到了 70.1%,

煤层瓦斯含量由 18.17 m<sup>3</sup>/t 降至 5.4 m<sup>3</sup>/t。

因此, 本文建立的采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型可用于保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采效果的预评价。模拟结果可为保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采设计提供合理建议, 为矿区保护层开采及卸压瓦斯抽采技术的适用性评价提供了科学依据。

### 5 结论

(1) 通过引入理想弹脆塑性模型和内切圆准则, 在 FLAC<sup>3D</sup> 德鲁克 - 普拉格(Drucker-Prager)塑性流动格式基础上建立了采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型的数值格式, 并采用 VC++2005 将其开发成 FLAC<sup>3D</sup> 能够调用的模型。该模型描述了采动煤岩体的脆性应变软化过程, 能正确反映煤岩体的采动损伤破坏。

(2) 通过三轴和单轴数值压缩试验对比并结合阳泉新景矿保护层开采的数值模拟分析, 验证了采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型的正确性和合理性, 同时发现建立的采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型适用于采动影响下的煤岩体变形破坏分析。

(3) 阳泉新景矿超远距离保护层开采数值模拟发现, 采高为 6.14 m 时, 上覆岩离层最大发育高度为 135 m, 冒落带高度为 41 m, 裂隙带的高度为 94 m, 位于保护层上部 125 m 的超远距离被保护煤层处于裂隙带上边缘, 被保护层采动裂隙较为发育, 透气性增加显著, 卸压瓦斯抽采将取得良好效果, 能从根本上消除被保护层的煤与瓦斯突出危险。上述结论与物理相似模拟结果基本吻合, 并得到了现场实践的验证。

(4) 本文建立的采动煤岩体弹脆塑性损伤本构模型可用于保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采效果的预评价。模拟结果可为保护层开采及被保护层卸压瓦斯抽采设计提供合理建议, 为矿区保护层开采及卸压瓦斯抽采技术的适用性评价提供了科学依据。

**致谢** 本文得到了中国矿业大学(北京)工程专业王宏伟博士的大力帮助, 在此表示感谢!

### 参考文献(References):

[1] 国家煤矿安全监察局. 国有煤矿瓦斯治理规定[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.(State Administration of Coal Mine Safety of China. Rules of gas control for state-owned coalmine[M]. Beijing: China

- Coal Industry Publishing House, 2005.(in Chinese)
- [2] 国家煤矿安全监察局.防治煤与瓦斯突出规定[M].北京:煤炭工业出版社,2009.(State Administration of Coal Mine Safety of China. Rules of coal and gas outburst prevention[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2009.(in Chinese))
- [3] 俞启香,程远平,蒋承林,等.高瓦斯特厚煤层煤与卸压瓦斯共采原理及实践[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):128-131.(YU Qixiang, CHENG Yuanping, JIANG Chenglin, et al. Principles and applications of exploitation of coal and pressure relief gas in thick and high gas seams[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(2): 128 - 131.(in Chinese))
- [4] 程远平,俞启香,袁亮.上覆远程卸压岩体移动特性与瓦斯抽放技术研究[J].辽宁工程技术大学学报,2003,22(4):483-486.(CHENG Yuanping, YU Qixiang, YUAN Liang. Gas extraction techniques and movement properties of long distance and pressure relief rock mass upon exploited coal seam[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(4): 483 - 486.(in Chinese))
- [5] 程远平,俞启香,袁亮,等.煤与远程卸压瓦斯安全高效共采试验研究[J].中国矿业大学学报,2004,33(2):132-136.(CHENG Yuanping, YU Qixiang, YUAN Liang, et al. Experimental research of safe and high efficient exploitation of coal and pressure relief gas in long distance[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2004, 33(2): 132 - 136.(in Chinese))
- [6] 姜振泉,季梁军.岩石全应力-应变过程渗透性试验研究[J].岩土工程学报,2001,23(2):153-156.(JIANG Zhenquan, JI Liangjun. The laboratory study of behavior of permeability of rock along the complete stress-strain path[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(2): 153 - 156.(in Chinese))
- [7] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.(CAI Meifeng, HE Manchao, LIU Dongyan. Rock mechanics and engineering[M]. Beijing: Science Press, 2002.(in Chinese))
- [8] 李树刚,钱鸣高,石平五.煤样全应力应变过程中的渗透系数-应变方程[J].煤田地质与勘探,2001,29(1):22-25.(LI Shugang, QIAN Minggao, SHI Pingwu. Permeability-strain equation relation to complete stress-strain path of coal sample[J]. Coal Geology and Exploration, 2001, 29(1): 22 - 25.(in Chinese))
- [9] 彭永伟.高强度开采煤体采动裂隙场演化及其与瓦斯流动场耦合作用研究[博士学位论文][D].北京:煤炭科学研究总院,2008.(PENG Yongwei. Study of evolution of mining-induced fractures field and its coupling effect with gas seepage under the conditions of high-strength underground mining[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2008.(in Chinese))
- [10] DEMS K, MROZ Z. Stability condition for brittle plastic structure with propagation damage surface[J]. Journal of Structure Mechanics, 1985, 13(1): 85 - 122.
- [11] 刘文政.脆塑性结构极限载荷的计算与工程应用[博士学位论文][D].北京:清华大学,1989.(LIU Wenzheng. Load bearing capacity calculation of brittle-plastic structures and its application to engineering practice[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 1989.(in Chinese))
- [12] 郑宏,葛修润,李悼芬.脆塑性岩体的分析原理及其应用[J].岩石力学与工程学报,1997,16(1):8-21.(ZHENG Hong, GE Xiurun, LEE C F. Analysis principle for rock mass with brittle-plasticity and its applications[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(1): 8 - 21.(in Chinese))
- [13] GE X R. Post failure behaviour and a brittle-plastic model of brittle rock[C]/Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam: Balkema, 1997: 151 - 160.
- [14] 史贵才.脆塑性岩石破坏后区力学特性的面向对象有限元与无界元耦合模拟研究[博士学位论文][D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2005.(SHI Guicai. Research on post-failure mechanical properties of brittle-plastic rocks by OOFEM coupled with IEM[Ph. D. Thesis][D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2005.(in Chinese))
- [15] 沈新普,岑章志,徐秉业.弹脆塑性软化本构理论的特点及其数值计算[J].清华大学学报,1995,35(2):22-27.(SHEN Xinpu, CEN Zhangzhi, XU Bingye. The characteristics of elasto-brittle-plastic softening constitutive theory and its numerical calculation[J]. Journal of Tsinghua University, 1995, 35(2): 22 - 27.(in Chinese))
- [16] 王晓纯,沈新普,薛明德,等.复合材料结构弹脆塑性力学行为数值研究[J].中国有色金属学报,1997,7(3):85-89.(WANG Xiaochun, SHEN Xinpu, XUE Mingde, et al. Numerical study of the elasto-brittle-plasticity mechanical behavior of composite structures[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(3): 85 - 89.(in Chinese))
- [17] 唐春安.岩石声发射规律数值模拟初探[J].岩石力学与工程学报,1997,16(4):368-374.(TANG Chun'an. Numerical simulation of AE in rock failure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(4): 368 - 374.(in Chinese))
- [18] 陈忠辉,唐春安,傅宇方.岩石微破裂损伤演化诱导突变的数值模拟[J].岩土工程学报,1998,20(6):9-15.(CHEN Zhonghui, TANG Chun'an, FU Yufang. Infinite element simulation of catastrophe induced by evolution of rock microfracturing damage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(6): 9 - 15.(in Chinese))
- [19] 史贵才,葛修润,卢允德.大理岩应力脆性跌落系数的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(8):1625-1631.(SHI Guicai, GE Xiurun, LU Yunde. Experimental study of coefficients of brittle stress drop of marble[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(8): 1625 - 1631.(in Chinese))
- [20] 张黎明,王在泉,李华峰,等.粉砂岩峰后破坏区应力脆性跌落的试验和本构方程研究[J].实验力学,2008,23(3):234-240.(ZHANG Liming, WANG Zaiquan, LI Huafeng, et al. Theoretical and experimental study of siltstone brittle stress drop in post-failure region[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(3): 234 - 240.(in Chinese))
- [21] LO K Y, LEE C E. Stress analysis and slope stability in strain-softening material[J]. Geotechnique, 1973, 23(1): 1 - 11.
- [22] Itasca Consulting Group Inc.. FLAC<sup>3D</sup> users' manual[R]. Minneapolis: Itasca Consulting Group Inc., 2005.
- [23] 段斌,何江达,李莉.关于岩土材料塑性屈服准则中材料参数取值条件的研究[J].红水河,2005,24(3):32-35.(DUAN Bin, HE Jiangda, LI Li. Study of conditions for taking value of parameters of plasticity yielding criterion to rock and soil[J]. Hongshui River, 2005, 24(3): 32 - 35.(in Chinese))
- [24] 任强,刘伟韬.覆岩采动裂隙带发育规律的数值模拟分析[J].安全与环境学报,2006,6(7):76-78.(REN Qiang, LIU Weitao. Numerical simulation analysis of overburden crack belt developing disciplinary[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(7): 76 - 78.(in Chinese))