

# 煤与瓦斯突出潜在危险区(带)预测

鲜学福, 许江, 王宏图

(重庆大学采矿工程系, 重庆 400044)

**[摘要]** 煤矿的生产和实践证明, 发生在矿井中的动力现象具有分区和成带的特点。文章探讨了把煤、岩和瓦斯作为一个体系, 采用力学方法的划分问题。根据对煤岩复合样及含瓦斯煤样在复杂应力状态下力学性质的分析, 基于对 Drucker-prager 理论的修正和完善, 建立了它们的断裂判据, 并给出了计算稳定性系数和潜在弹性应变能密度的公式, 提出了按这两个指标划分煤与瓦斯突出潜在危险区(带)的基本方法。

**[关键词]** 矿井中的动力现象; 煤与瓦斯突出; 潜在危险区(带); 断裂判据; 稳定性系数; 弹性应变能密度

## 1 问题的提出

突出潜在危险区(带)的预测是研究突出矿井未采煤层的煤与瓦斯突出危险区(带)的划分问题。国内外的生产实践表明, 突出具有分区性和成带性的特点, 并且与地质构造有关<sup>[1,2]</sup>。但是, 生产实践也表明, 突出并不总是发生在地质构造变化处, 而且在危险区(带)内也不总是接连发生。这就提出了另一问题, 即发生突出的条件是什么。关于它, 早在文献[3]里就提出了: 突出的发生与煤的力学性质、煤层中的瓦斯和矿山压力有关, 即突出不仅决定于煤层赋存的地质条件, 而且还决定于开采的技术条件。这就是随后发展起来的煤与瓦斯突出综合作用假说的基本观点。它已被越来越多的人所认可了。

在研究中, 也有不少学者从能量的观点分析煤与瓦斯突出的问题。他们认为, 突出只不过是贮存在煤岩瓦斯体系中的潜能的转化, 或者说释放。这里, 采用文献[4]中的关系式(1)来说明:

$$W_{\Gamma} + W_M + W_{\Pi} = W_p + W_k + W_c + W_B \quad (1)$$

式中:  $W_{\Gamma}$  为瓦斯能;  $W_M$  和  $W_{\Pi}$  分别为被破坏材料和岩石先前的弹性变形能;  $W_p$  和  $W_k$  分别为消

耗在破坏材料上的破坏和移动能;  $W_B$  为破坏处附近吸收的能量;  $W_c$  为消耗在地震振动上的能量。它表明: 突出的能量不仅来自煤和瓦斯的贮能也来自其围岩的贮能; 材料破坏所需的能量小于体系中的贮能。

基于以上所述, 于是就可借鉴相关学科的研究方法和利用计算机技术, 提出一个有别于瓦斯地质预测突出区(带)的方法, 进行未采区煤与瓦斯突出潜在危险的预测, 并将其命名为力学预测方法。

下面将从煤岩瓦斯体系的力学性质、地应力和煤层中的瓦斯压力等诸方面来探讨未采煤层突出潜在危险区(带)的划分。

## 2 煤岩瓦斯体系的宏观力学性质

煤岩瓦斯体系指的是含瓦斯煤层与其上覆和下伏岩层组合成的复合体。对于未开采煤层, 煤岩瓦斯体系总是处于多向载荷作用下, 只有当采掘工作进行时, 它才能逐渐地由多向转为双向或单向受载。因此, 这里重点探讨复合煤岩体和含瓦斯煤体在三向载荷作用下的变形与强度特性。

### 2.1 复合煤岩体的变形与强度特性<sup>[5]</sup>

#### 2.1.1 复合煤岩的变形特性 复合煤岩样在单轴

应力状态下的应力应变关系如图1所示。从图1可以看出,单一煤岩和复合煤岩的应力应变全过程曲线十分相似。对于同一轴向应力水平,煤及复合煤岩试件的轴向变形接近,铝土泥岩次之,钙质泥岩最小;其初始弹性模量,煤和复合煤岩较接近,铝土泥岩稍高,钙质泥岩最大;峰值应力则明显是复合煤岩试件高于煤的,但又低于铝土泥岩和钙质泥岩的。

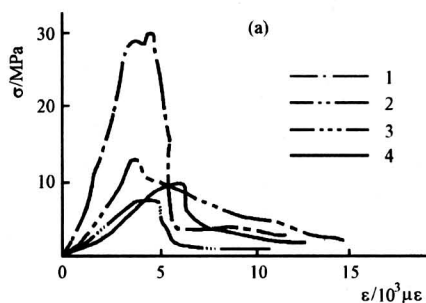


图1 煤、岩石及其复合试件在单向加压下的应力应变全过程曲线

1—钙质泥岩; 2—铝土泥岩; 3—煤; 4—复合煤岩

Fig.1 The complete stress-strain diagram of coals, rocks and composite rocks under a uniaxial compression

复合煤岩在一般三轴应力状态下的应力应变关系拟合曲线如图2(b)所示。为了作对比,在图2(a)

上给出了钙质泥岩在同样加载路径下的曲线。从图2(a)和(b)上看出,二者的曲线非常相似,属于凹向下型,其发展一般也有4个阶段。

2.1.2 复合煤岩的强度特性与断裂破坏 根据实验中测定的在三轴应力状态下的峰值应力,经莱因达异常数据判定准则判定,取舍后取其算术平均值作为试件的峰值强度,就可以用它来研究复合煤岩体的强度了。

图3所示的是煤及复合煤岩试件在I型和II型应力路径下的峰值强度的  $I_1 - J_2^{1/2}$  关系曲线。从图3可以看出,无论是煤试件,还是复合煤岩试件,无论是I型,还是II型应力加载卸载路径,  $I_1$  与  $J_2^{1/2}$  的关系均可以用下述方程来描述:

$$J_2^{1/2} = a + bI_1 \quad (2)$$

式中:  $I_1$  为第一应力张量不变量;  $J_2$  为第二应力偏张量不变量;  $a$ 、 $b$  为实验常数

观测煤及煤岩复合体在复杂应力状态下和不同应力加载卸载路径的试件破坏类型后发现,试件主要有拉裂破坏、拉剪混合破坏和剪切破坏。究竟呈现什么样的破坏与围压有关。不过复合煤岩体的破坏,首先是从强度最低的层开始,因煤的强度相对较低,所以一般从煤开始破坏。而地层中的煤都充有压力瓦斯,因而研究复合煤岩体中包含的充瓦斯煤的变形与强度特性就特别重要了。

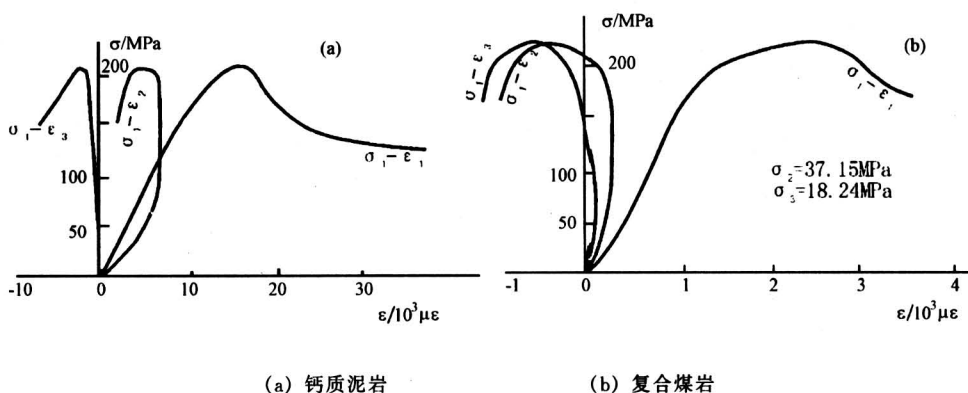


图2 煤岩样在一般三轴应力状态下的应力应变拟合曲线

Fig. 2 The stress-strain curve of coals and rocks under a general triaxial stress state

## 2.2 含瓦斯煤体的变形与强度特性<sup>[6]</sup>

2.2.1 含瓦斯煤的变形特性 图4所示为含瓦斯煤试件的应力应变关系拟合曲线。从图4可看出,含瓦斯煤的应力应变曲线为非直线关系。其弹性模

量  $E_i$  和泊松比  $\mu_i$  之值在试件整个受力过程中也并非为一定数,均将随应力水平  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  的变化而变化。一般,  $E_i$  之值将随着  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  的增加而逐渐地减小,且其减小的幅度将随着  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  的

增加而增大；而其  $\mu_i$  之值将随着  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  的增加而逐渐增大，且其增大的幅度将随着  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  的增加而增大。同时，还可以看出，含瓦斯煤的

纵、横向变形还将随着气体压力  $p$  或围压  $\sigma_3$  的不同而有规律地变化。

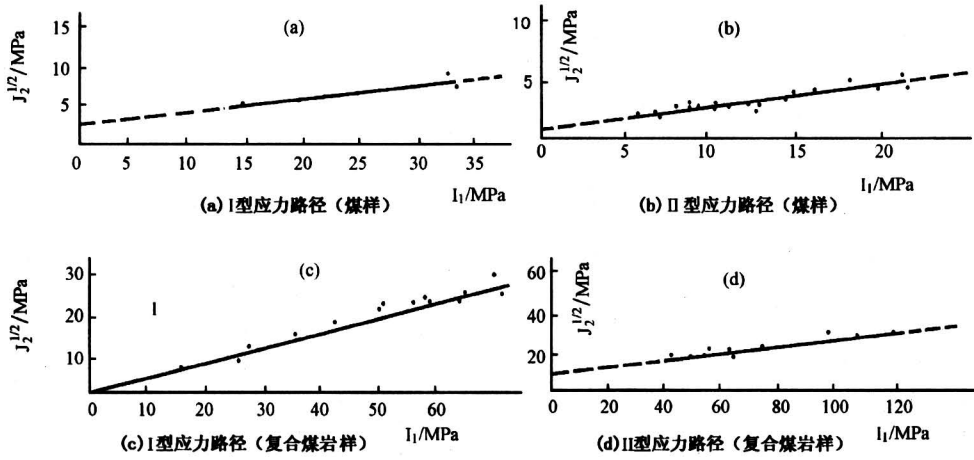


图 3 煤岩试件的  $I_1 - J_2^{1/2}$  峰值强度曲线

Fig. 3 The  $I_1 - J_2^{1/2}$  failure strength curve of coals and rocks

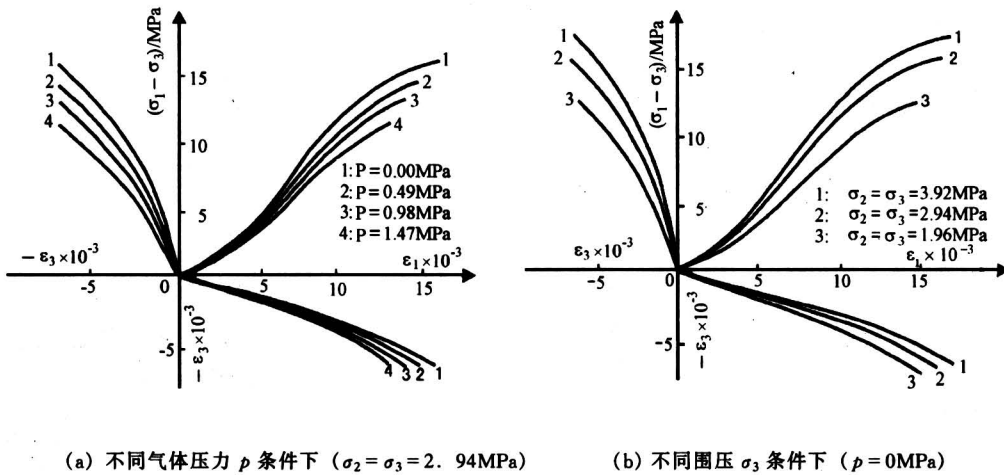


图 4 含瓦斯煤的应力应变拟合曲线

Fig. 4 The stress - strain curve of the coal contained the gas

图 5 所示为材料变形参数与气体压力和围压的关系曲线。从图 5 可以看出，其  $E_i$  之值将随着  $p$  的增加而减小，但将随  $\sigma_3$  的增加而增大；而  $\mu_i$  之值将随着  $p$  的增加而增大，但将随着  $\sigma_3$  的增加而减小。

图 6 所示为含不同气体煤试件的应力应变关系拟合曲线。充入气体分别为甲烷 ( $CH_4$ ) 和氮气 ( $N_2$ )，充气压力为  $p = 0.981\text{MPa}$ ，其余条件完全

相同。从图 6 可以看出，这种由于煤对不同气体的吸附程度不同所引起的宏观力学性质上的差异是比较小的。

2.2.2 含瓦斯煤的强度特性 图 7 所示为不同气体压力和不同气体类型条件下的 Mohr 强度包络线。从图 7 (a) 上可以看出，Mohr 强度包络线的截距，即内聚力  $c$  之值将随着气体压力  $p$  的增加而减小，而其斜率，即表征内摩擦角  $\varphi$  之值基本上

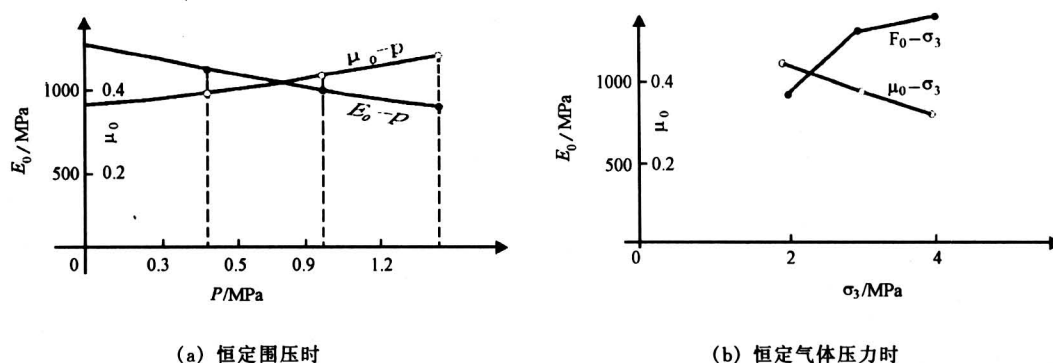


图5 材料变形参数与气体压力和围压之间的关系

Fig.5 The relation of the deformation parameters and the gas's compress, the confining pressure

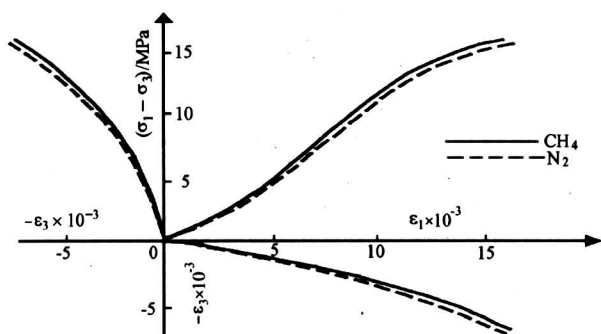


图6 充入不同气体时的应力-应变关系曲线

Fig.6 The contrast of the stress strain curves contained a different gas

不随气体压力  $p$  的增减而增减。从图 7 (b) 上还能看出, 气体类型对于由煤对气体的吸附作用不同引起的含瓦斯煤的强度变化是很小的。

### 3 含瓦斯煤层中的地应力

地应力不仅是发生煤与瓦斯突出的充分必要条件, 而且在地应力作用下的煤岩瓦斯体系的弹性变形能大小, 还能反映出未采煤层各处的危险程度以及煤层中气体孔隙压力的大小。

在文献 [7] 中曾经讨论过地层中一点的地应力。在各向同性的弹性岩石中, 其表达式可以写成:

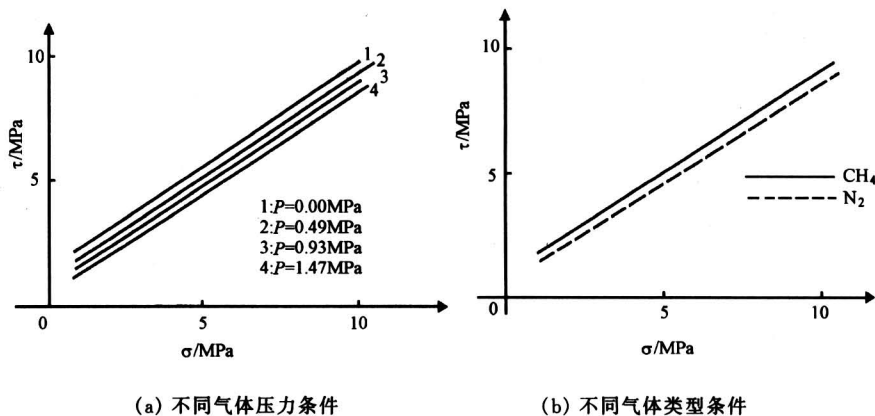


图7 不同气体压力及不同气体类型条件下的 Mohr 强度包络线

Fig.7 Mohr's strength envelope under a different pressure in a different gas

$$T_{\sigma} = T_{\sigma_{HH}} + T_{\sigma_r} = \begin{bmatrix} \xi\gamma H & 0 & 0 \\ 0 & \xi\gamma H & 0 \\ 0 & 0 & \gamma H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_H & 0 & 0 \\ 0 & \Psi T_H & 0 \\ 0 & 0 & \chi T_H \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $T_H$  为深度  $H$  时作用在地下岩体单元体  $M$  点上之构造应力； $\psi T_H$  为构造应力引起的水平侧向应力，其中， $\psi$  称为水平侧压系数，它的值为  $1 > \psi \geq \mu$ ， $\mu$  为该处岩石的泊松比； $\chi T_H$  为构造应力引起的纵向应力，其中， $\chi$  称为纵向侧压系数，其值大于等于 0，如介质为弹性体，根据平衡条件  $\chi = 0$ ； $\gamma$  为  $M$  点之上覆岩体容重的平均值； $\xi = \mu / (1 - \mu)$ 。

地应力的大小和方向实际上都是根据地应力的测定来确定的。现今测定地应力的方法很多，常用的是应力解除法。不过，如何在地勘时期就能比较经济而耗工较小的进行深部地层的地应力的测量，还是一个值得进一步探索的问题。

文献 [8] 中较详细地介绍了利用 Kaiser 效应测试三维地应力的方法。其原理是基于应力椭球的概念<sup>[9]</sup>。利用材料在重复加载过程中的声发射效应及其方向上的相互独立性，在取出的钻探岩芯的三维空间的各个方向上取样制成小试件，并在实验室内进行测试。然后，将测得的数据进行多元回归分析和二次正交变换处理，求得地应力椭球方程，由此来确定该点的 3 个主应力大小和方向。这一测试方法是利用地勘时期在钻孔不同深度取得的岩芯样，按上述方法加工成小试件来进行。它为地应力，特别是为未开采矿井和深部的地应力测量提供了一种新的方法。不过，这种地应力测试方法测得的是该点岩石曾经承受的最大应力值。

对于煤层，由于其孔裂隙中包含着瓦斯，因此其中各点地应力就包含了孔裂隙中瓦斯压力的作用。而且，含瓦斯煤岩体的宏观力学性质是发生突出的必要条件，在煤矿安全规程中也把瓦斯压力作为一个有无突出危险性的量化指标，因此很有必要在这里对其作一些研究。

国内外的文献 [10]、[11]、[12] 曾对煤层中的瓦斯孔隙压力作过一些研究，提出过一些经验的和解析的算式。这里，主要介绍文献 [13]、[14] 的研究成果。

煤层在地表有露头或有通道的情况，即瓦斯在煤层中的运移是在既传热又传质的开放系统条件下进行的。文献 [14] 根据一维渗流力学理论，在利用了考虑到温度和应力影响的 Darcy 公式条件下，推导出一种煤层原始瓦斯压力的计算式：

$$P_H = \{A' [e^{\alpha DH} (B_1 + B_2 H + B_3 H^2) - B_1] + 1\}^{1/2} \quad (4)$$

式中： $P_H$  为埋深  $H$  处煤层中的原始瓦斯压力； $A'$ 、 $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$  为计算的当地的地层参数； $\alpha$  为材料（煤）的实验参数； $D$  为地应力梯度； $H$  为计算处煤层的埋深。

煤层在地表没有露头或通道的情况，即瓦斯存在于只传热而不传质的封闭系统条件下。文献 [13] 根据弹塑性力学和热力学理论，导出了另一种计算煤层原始瓦斯压力的计算式：

$$P_H = P_c + D(H - H_c) - \frac{1}{k} \{2 - [4 - 2\beta G(H - H_c)]^{1/2}\} \quad (5)$$

式中： $P_H$  为埋深  $H$  处煤层中的原始瓦斯压力； $D$  为地应力梯度； $G$  为地温梯度； $\beta$  为含瓦斯煤体的热膨胀系数； $k$  为含瓦斯煤体的体积压缩系数； $P_c$  为埋深  $H_c$  处煤层中的原始瓦斯压力； $H$  为计算处煤层的埋深

由于煤层的孔裂隙中存在着瓦斯压力的作用，所以煤层中一点的应力应为有效应力。有效应力最早由 Terzaghi 提出，它表示成：

$$(\sigma_{ef})_i = \sigma_i - p \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

式中： $\sigma_{ef}$  为有效应力； $\sigma_i$  为总应力； $p$  为孔隙介质中流体的压力

Terzaghi 提出的有效应力奠定了土力学的基础。然而，大量有关岩石在孔隙流体作用下变形的观测与实验研究认为，Terzaghi 公式并不适用于岩石类材料，于是又提出了修正的 Terzaghi 公式：

$$(\sigma_{ef})_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha p \delta_{ij} \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (7)$$

式中： $(\sigma_{ef})_{ij}$  为有效应力张量； $\sigma_{ij}$  为总应力张量； $\delta_{ij}$  为 Kroneker 函数； $\alpha$  为等效孔隙压力系数；

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

文献 [15]、[16] 研究了在瓦斯孔隙压作用下的煤体有效应力变化规律。他们共同的结论是，对孔裂隙岩体， $\alpha = 1$ 。由此可见，采用总应力与瓦斯压力差表示的有效应力，在某些情况下是合理的。

实际上式 (6) 中的  $\sigma_i$  是可以借助数值分析方法求得的，至于式中的  $p$ ，一方面可以从实测中得到，另一方面也可以根据公式 (4) 或 (5) 来计算。

#### 4 未采煤层煤与瓦斯突出潜在危险区预测的力学方法探讨

所谓用力学方法预测突出潜在危险区，就是用

选择的力学判据划分出未采煤层的突出区、突出威胁区和非突出危险区等区域。下面将首先讨论我们选择的含瓦斯煤体稳定性系数指标和弹性变形能密度指标。

4.1 含瓦斯煤体的稳定性系数<sup>[17]</sup>

由图3和图4可以看出，煤、含瓦斯煤及复合煤岩体，在三向压力作用的峰值强度的  $I_1 - J_2^{1/2}$  关系曲线，同目前在岩土力学领域中较为广泛使用的 Drucker-prager 强度判据是一致的。但是，考虑到该判据在实用上有一定的局限性，所以有必要作一些修正和完善，其作法是：

1) 考虑到三维静水压力能对岩土类材料产生破坏，所以在引入一个帽盖，使破坏面在三维应力空间中形成一个封闭曲面，且为数学上处理方便，帽盖选为球面；

2) 考虑到岩土类材料受拉破坏的情况，应引入一个材料受拉时的破坏判据，并选择材料达到其单轴抗拉强度时即发生破坏；

3) 根据含瓦斯煤层中一点地应力状态的研究，应将所提出的判据中的各主应力分量改写成为有效应力。

于是，修正和完善后含瓦煤岩的强度判据就可以表示成：

$$\left. \begin{aligned} F_1 &= \sigma'_3 - \sigma_t = 0 \\ &(I'_1 \leq \sigma_1) \\ F_2 &= J_2^{1/2} - \alpha' I'_1 - k' = 0 \\ &(\sigma_t < I'_1 \leq I'_0) \\ F_3 &= J_2 + (I'_1 - I'_0)^2 - (\alpha' I'_0 + k')^2 = 0 \\ &(I'_1 > I'_0) \end{aligned} \right\} (8)$$

式中： $\sigma'_i = \sigma_i - p$ ； $I'_i = \sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3$ ；

$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2]$ ； $\sigma_t$  为材料的单轴抗拉强度； $I'_0$  为第一应力张量不变量  $I'_1$  之临界值； $p$  为煤层中的瓦斯压力； $\alpha'$  和  $k'$  为待定系数，可由实验确定

上述式(8)的判据在三维主应力空间中的破坏面，为一以图8的迹线绕  $I'_1$  轴旋转而成的轴对称旋转曲面。从图8上可以看出，若代表含瓦斯煤层应力状态的一点落在图8迹线  $F_1$ 、 $F_2$  和  $F_3$  所围区域内，则含瓦斯煤体处于稳定状态；反之，则处于非稳定状态。为此，引入一个系数  $R$ ，称之为含瓦斯煤体的稳定性系数，定义为：

$$\left. \begin{aligned} R &= \frac{\sigma_t}{\sigma'_3} \quad (I'_1 \leq \sigma_1) \\ \text{或} \\ R &= \frac{(\alpha' I'_1 + k')^2}{J_2^{1/2}} \quad (\sigma_t < I'_1 \leq I'_0) \\ R &= \frac{(\alpha' I'_0 + k')^2}{J_2 + (I'_1 - I'_0)^2} \quad (I'_1 > I'_0) \end{aligned} \right\} (9)$$

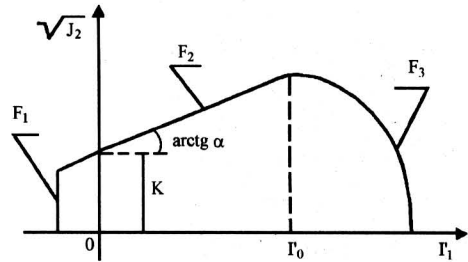


图8 强度迹线示意图

Fig.8 The sketch of the failure strength locus

显然， $R \geq 1.0$  时，含瓦斯煤体处于稳定状态； $R < 1.0$  则处于非稳定状态。就物理意义而言，它反映的是三维主应力空间以静水轴为法线的  $\pi$  平面上，含瓦斯煤体所承受的最大剪应力与实际承受的剪应力之比值。

4.2 含瓦斯煤岩体的弹性变形能密度<sup>[17]</sup>

关系式(1)已经表明，若煤岩瓦斯体系中所贮存的弹性变形潜能只能使煤体产生断裂破坏，还不足以使煤体产生移动的话，就不一定会发生突出。但是，若煤岩瓦斯体系中所贮存的弹性应变潜能很大时，达到了发生煤与瓦斯突出要求的能量，则突出就会出现，而且贮能越大，突出强度也会越大。因此，含瓦斯煤岩体的弹性变形能密度是表示突出潜在危险程度的指标。

众所周知，由于地应力作用而贮存在煤岩瓦斯体系中的能量，是以弹性变形能和塑性变形能两种形式存在的，而释放出来的能量只能是弹性变形能，并以弹性变形能密度予以描述：

$$We = \frac{1}{2E'_0} [(\sigma_1'^2 + \sigma_2'^2 + \sigma_3'^2) - 2\mu'(\sigma_1'\sigma_2' + \sigma_2'\sigma_3' + \sigma_3'\sigma_1')] \quad (10)$$

式中： $We$  为煤岩瓦斯体系中贮存的那部分在卸载时能释放出来的弹性变形能密度； $\sigma_1'$ 、 $\sigma_2'$ 、 $\sigma_3'$  为煤岩瓦斯体系卸载时所对应的3个有效主应力分量； $E'_0$  为含瓦斯煤岩体受载变形时的初始弹模，

实验表明，它与其卸载弹模是近似一致的； $\mu'$  为含瓦斯煤岩体变形的泊松比

### 4.3 未采煤层煤与瓦斯突出潜在危险区预测方法的探讨

从以上的研究可以看出，用力学方法作煤与瓦斯突出潜在危险区的预测，就是要利用所获得的实验参数进行地应力场的计算。然后，将计算出的各点的 3 个主应力值和实验中求得的相应材料参数，分别代入稳定性系数判据和弹性变形能密度指标，求得煤层中各点的  $R$  和  $We$  值，并画出它们的等值线。根据稳定性系数等值线，就可划分出煤层中突出的潜在危险区、威胁区和非突出危险区，并了解到区中的相对危险程度。

文献 [19] 根据地应力数值分析计算的结果和鱼田堡煤矿实测瓦斯压力值，随煤层埋深变化的统计规律（实际上也可按公式 (5) 计算），引入有效应力的关系式进行了地应力和煤层瓦斯压力的耦合分析，得到了该矿 6 号煤层的弹性变形能密度和稳

定性系数等值线分布图，如图 9 所示。从而划分出了该矿 6 号煤层的非突出危险区、突出威胁区和突出危险区。具体作法是将  $R > 1$  的区域定义为非突出区，将  $0.9 < R < 1.0$  区域定义为有突出威胁区，将  $R < 0.9$  的区域定义为突出潜在危险区。由于在数值计算中，井田中部一个大的压扭性断层  $F_1$  对该区地应力场的影响未计入，所以作了如图示的处理，即  $F_1$  断层影响的区域也定为了突出的潜在危险区。结果表明，已突出点均分布在  $R$  值圈定的突出潜在危险区内，并且从图上的弹性变形能密度等值线图可以看出，能量密度值愈高的地段，发生突出强度就会愈大，也就是说危险程度愈大。事实上，利用这种方法所作的鱼田堡煤矿 6 号煤层 - 100 米标高以下未采区，靠近东林煤矿部分具有突出威胁性很小的预测（原认为突出危险性很大，不敢向下延深），已得到向下延深开拓和生产的证实，解除了上百万吨的压煤。

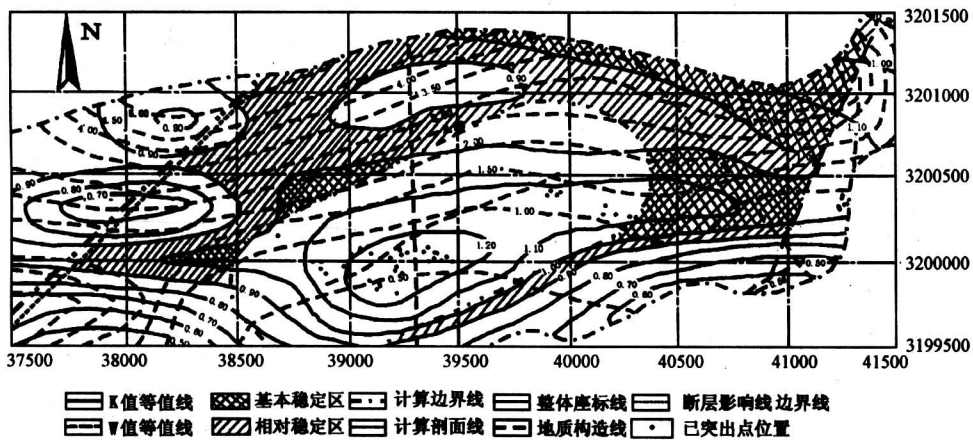


图 9 鱼田堡矿 6 号煤层突出潜在危险区的预测图

Fig.9 The forecasted map of the potential danger - zone of coal - and - gas outburst in 6 seam of YUTIANBAO COAL MINE

文献 [20] 利用同样的预测方法进行了砚石台煤矿 6 号煤层区域稳定性研究，其预测结果如图 10 所示。其作法是采用  $R > 1.0$  时，煤层处于稳定状态； $R \leq 1.0$  时，煤层处于非稳定状态，且图

上标出的特殊动力现象发生处，均位于根据稳定系数  $R$  划分出的非稳定区内。再次以实例证明了用力学方法作危险区预测的可能性。

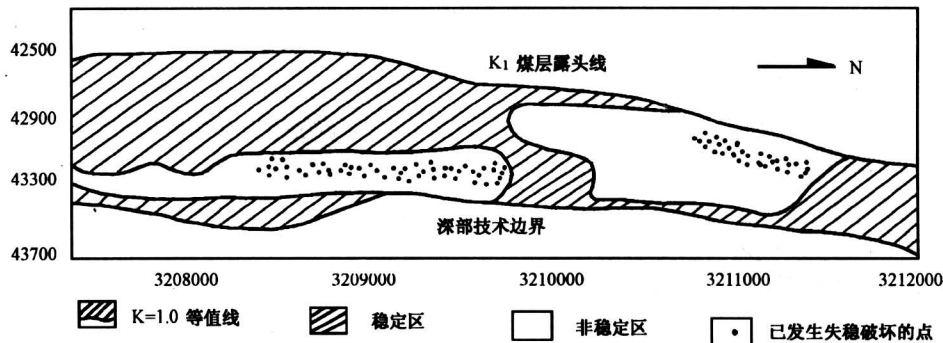


图 10 砚石台煤矿六号煤层区域稳定性分布图

Fig10 The regional stability map in 6 seam of YANSHITAI COAL MINE

## 5 认识与讨论

1) 从本文所介绍的实验和理论研究可以看出,用力学方法来作煤与瓦斯突出和矿井中动力现象的区域预测是有较坚实的依据的。

2) 发生在煤矿井下的动力现象只不过是集聚在煤岩(瓦斯)体系中的一种潜能转化或释放。

3) 由于地质体非常复杂而且多变,所以与区域预测相配套,在进入威胁区和突出区时应适时开展以声、电、热等各种物理方法和机械方法的现场预测预报。

4) 区域预测的结果能对突出矿井的向下水平延深、新矿井的开拓部署和矿井动力现象(包括煤与瓦斯突出及其它各类动力现象)的区域治理等提供指导。

5) 众所周知,用力学方法作危险区的预测,其预测的准确可靠性,在很大程度上取决于所提供的地质资料和各种力学参数的可信性和精确程度,但这在地学中是有一定难度。因此,还应与其它研究方法(如地质方法)相配合。

### 参考文献

- [1] Ольховиченко А. Е. Прогноз выбороопасности угольных пластов [M]. М. Недра, 1982
- [2] Айруни А. Т. Прогнозирование и предотвращение газодинамических явлений в угольных шахтах [J]. Наука, 1987
- [3] Скочинский А. А. Современные представления о природе внезапных выбросов угля и газа в шахтах и меры борьбы с ними [J]. Уголь, 1954, 4~10
- [4] Зорин А. Н., Колесников В. Г., Софийский К. К.,

Папырин А. Ф., Прусова А. А. Механика и физика динамических явлений в шахтах. Киев Наукова думка, 1979. 26~29

- [5] 鲜学福, 许江, 李贺. 层状复合煤岩力学特性的实验研究 [M]. 见: 矿山岩体工程地质力学研究. 北京: 中国科技文献出版社, 1993. 201~206
- [6] 许江, 鲜学福, 杜云贵等. 含瓦斯煤的力学特性的实验分析 [J]. 重庆大学学报, 1993, 16 (5): 42~48
- [7] 多尔恰尼诺夫 И. А. 等著. 构造应力与井巷工程稳定性 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984. 8~9
- [8] 王宏图, 鲜学福, 尹光志. 声发射凯塞尔效应岩体地应力测试的研究 [J]. 煤炭学报, 1997, 22 (5): 486~489
- [9] Means W. D. Stress and strain. Springer - Verlag New York Inc., 1976
- [10] 刘玄恭. 北票矿区煤与瓦斯突出预测预报的实践与回顾 [A]. 煤与瓦斯突出预测资料汇编 [C]. 煤炭科学研究总院重庆分院, 1987. 47~52
- [11] 俞启香. 煤层发生煤与瓦斯突出瓦斯压力最小值的研究 [A]. 煤与瓦斯突出预测资料汇编 [C]. 煤炭科学总院重庆分院, 1987. 93~98
- [12] Скляров Л. А. Изменение давления газа в угольном массиве с увеличением глубины его залегания [A]. Дегазация Угольных Пластов [M]. ГОСГОРТЕХИЗДАТ, 1961. 222~224
- [13] 鲜学福, 许江. 煤层中原始瓦斯压力的探讨 [J]. 中国矿业, 1993, 2 (2): 38~41
- [14] 王宏图, 鲜学福, 尹光志等. 煤矿深部开采瓦斯压力计算的解析算法 [J]. 煤炭学报, 1999, 24 (3): 279~283
- [15] 赵阳升. 矿山岩石流体力学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994. 68~71

(下转第 51 页)



## An Intelligent Expert System on Rough Sets

Zeng Huanglin

*Electric and Information Department, Sichuan Institute of Light Industry  
and Chemical Technology, Zigong, Sichuan 643033, China)*

[Abstract] The basic topology, knowledge representation and inductive learning of an intelligent expert system on rough sets are introduced in this paper. Based on the indiscernibility relation of system knowledge expression, a compatible algorithm is proposed to simplify the knowledge expressions and to induce the system decision rules. In order to extract the significant attributes from elementary knowledge and to reduce the dimensions of the system representation, inductive learning is also introduced by means of reasoning the dependency of knowledge between the teacher and the learner.

[Key words] rough sets; intelligent expert system; indiscernibility relation; knowledge expression simplification; decision rules

(上接第 46 页)

- [16] 孙培德. 煤层气越流的固气耦合理论及其计算机模拟研究 [J]. 重庆大学学报, 1998
- [17] 鲜学福, 许江, 李贺. 煤和瓦斯突出危险区划分的力学机制 [M]. 见: 矿山岩体工程地质力学研究. 北京: 中国科技文献出版社, 1993. 195~200
- [18] 许江, 鲜学福. 鱼田堡煤矿矿区地应力场的非线性有限元数值分析 [M]. 见: 矿山岩体工程地质力

学研究. 北京: 中国科技文献出版社, 1993. 271~281

- [19] Xu Jinag, Xian Xuefu. Division of potential danger zone of coal and gas outburst. West - China Exploration Engineering, 1994, 6 (5): 81~88
- [20] 金立平, 鲜学福. 煤层区域稳定性的研究 [J]. 煤炭工程师, 1994, (3): 14~16

## Predication of Potential Danger Region (Zone) of Coal and Gas Outburst

Xian Xuefu, Xu Jiang, Wang Hongtu

( (Mining Engineering Dept. of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

[Abstract] The production and practice of coal mines have proved that the dynamical phenomenon in mines have divisional and zoned characteristics. In this paper the division which treats coal, rock and gas as an integrate system by mechanical method is studied. Under study By the analysis of the mechanical property of the coal-rock composite samples and coal simples containing gas under complex stress state, the failure criterion, on the basis of the modification and consummation of the Dracker - Prager's theory, is set up, and the formulas computing the coefficient of stability and the density of latent elastic strain energy are given. Finally, the fundamental method for deviding the potential danger region (zone) of coal and gas outburst based on the formulas is put forward.

[Key words] dynamical phenomenon in mine; coal and gas outburst; potential danger zone; failure criterion; coefficient of stability; density of elastic energy