

114-119  
20 煤层冲击倾向性试验研究及模糊综合评判

The Study of Outburst-proneness of Coal Seam Via Experiments  
and fuzzy Comprehensive Judgement

金立平  
Jin Liping

鲜学福  
Xian xuefu

(重庆大学资源及环境工程学院, 重庆, 630044)

TD324

A 摘要 选用四项已有的冲击倾向性指标和一项修正的冲击能指标  $W_{or}$  对煤层的冲击倾向进行了试验研究, 并采用模糊数学方法对煤层的冲击倾向性进行了三级模糊综合评判, 得到了与工程实际相一致的结果。

关键词 冲击地压; 冲击倾向性; 冲击能; 模糊综合评判  
中国图书资料分类法分类号 TD324

煤层

ABSTRACT The four existing outburst-proneness indexes and a modified outburst energy index  $W_{or}$  were applied to study outburst-proneness of coal seam via experiments; the fuzzy mathematics method was used for fuzzy comprehensive judgement on outburst-proneness of coal seam; the results obtained in experiments were identical with engineering practice.

KEYWORDS rockburst; outburst-proneness; outburst energy; fuzzy comprehensive judgement

### 0 引 言

冲击倾向性是指煤岩体能够积聚弹性应变能并在超过其本身的强度后会突然释放出来时的各种物理力学性质的总和。冲击倾向性是产生冲击地压的煤岩体的固有属性, 决定了煤岩体产生冲击地压的能力, 是发生冲击地压的内因, 也是必要条件。冲击倾向性也是区别冲击地压和其他动力现象(如煤与瓦斯突出等)的重要标志之一。因此, 在预测煤层的冲击地压时, 煤层冲击倾向性的研究是必需的。

### 1 冲击倾向性的试验研究

煤岩冲击倾向性可用一个或一组指标来衡量, 即冲击倾向度。通常将冲击倾向性划分为三个等级, 即强烈冲击倾向性、中等冲击倾向性和无冲击倾向性。冲击倾向性的指标有很多,

\* 收文日期 1993-03-22

此文发表时, 已毕业分配至同济大学地下系任教

目前在我国研究比较成熟并得到应用的主要有弹性能指标  $W_{sr}$ 、冲击能指标  $W_{cr}$  和动态破坏时间  $\Delta t$  等。其他一些指标在各国也得到不同程度的研究和应用, 这些指标是弹性变形指数  $K_i$  ( $i = 1, 2, 3$ )、应变能指数、能量指数 (PES 指数)、有效冲击能指数  $\eta$  和脆性系数等。在实际应用中, 为提高准确性常采用多个指标进行鉴定。

1.1 冲击倾向性指标的选取

选用冲击倾向性指标要考虑两点, 一是指标具有较高的准确性和敏感性, 二是指标具有实用性, 即易于用实验测得。综合考虑这两点, 本文选取弹性能指标、弹性变形指标、冲击能指标和刚度比指标等四项指标来研究煤层的冲击倾向性。

1.1.1 弹性能指标  $W_{sr}$

弹性能指标也称弹性应变能指数或弹性变形能指数, 是由波兰采矿研究总院提出的, 是国内外较流行的一种冲击倾向性指标。它是一种以弹性能与永久变形消耗能之比值作为衡量煤体冲击倾向度的指标。具体作法是采用煤样进行常规抗压试验确定其平均单轴抗压强度, 然后用试件以  $0.04 \text{ MPa/s}$  的速度加载到抗压强度的  $80\% \sim 90\%$ , 再以同样速度卸载。根据加载卸载曲线 (如图 1 所示) 可得到弹性能指标  $W_{sr}$ :

$$W_{sr} = \varphi_{sr} / \varphi_{sp} = \frac{\int_{\epsilon_r}^{\epsilon} f_1(\epsilon) d\epsilon}{\int_{\epsilon_r}^{\epsilon} f(\epsilon) d\epsilon - \int_{\epsilon_r}^{\epsilon} f_1(\epsilon) d\epsilon} \quad (1)$$

式中各参数如图 1 所示。 $W_{sr}$  值越大表明煤的冲击倾向性越大, 波兰采矿研究总院确定的标准为:

- $W_{sr} \geq 5.0$             强烈冲击倾向性;
- $2.0 \leq W_{sr} < 5.0$     中等冲击倾向性;
- $W_{sr} < 2.0$             无冲击倾向性。

这种方法的优点是比较简单, 采用常规压力试验机便可完成。

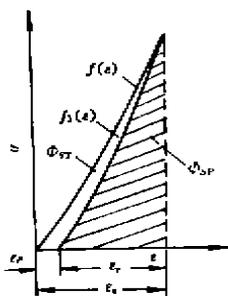


图 1 冲击倾向煤样的能量平衡

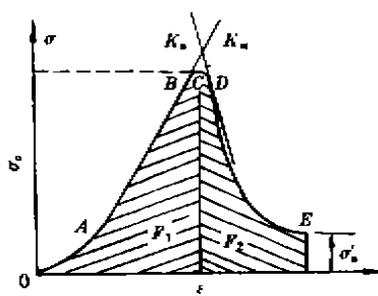


图 2 应力应变全过程曲线

1.1.2 弹性变形指标  $K_i$

全苏矿山测量研究总院提出, 在载荷不小于峰值强度的  $80\%$  的条件下用反复加载和卸载循环得到的弹性变形量与总变形量之比可作为衡量冲击倾向性的指标, 其表达式和界限值为:

$$K_i^* = \varepsilon_{ei} / \varepsilon_i \geq 0.7 \quad (2)$$

当  $K_i^*$  满足上式时有冲击地压危险。

式中:  $\varepsilon_{ei}$ ——第  $i$  次循环后试件的弹性变形量;

$\varepsilon_i$ ——第  $i$  次循环后试件的总变形量。

### 1.1.3 冲击能指标 $W_{cr}$

使用刚性试验机可得到煤的应力应变全过程曲线如图 2 所示。该曲线比较直观和全面地反映了试件蓄能、耗能到完全破坏的全过程,包含了有关冲击倾向性的丰富信息,对于揭示冲击倾向性的物理本质和分析其他冲击倾向性指标具有重要的意义。其中曲线的上升段面积  $F_1$  和下降段面积  $F_2$  之比实际上是试件蓄能和耗能之比,基本上反映了煤岩的冲击倾向性,称之为冲击能指标,并按下式计算:

$$W_{cr} = F_1 / F_2 \quad (3)$$

$W_{cr}$  值越大表示冲击倾向性越强,一般认为:

$W_{cr} > 2.0$  强烈冲击倾向性;

$1.0 \leq W_{cr} < 2.0$  中等冲击倾向性;

$W_{cr} < 1.0$  无冲击倾向性。

### 1.1.4 刚度比指标 $K_{cr}$

如图 2 所示,  $K_{cr}$  表示全过程曲线屈服点前后的刚度  $K_m$  和  $|K_s|$  之比值,即

$$K_{cr} = K_m / |K_s| \quad (4)$$

$K_{cr}$  值越小表示冲击倾向性越大。从理论上分析可知,  $K_{cr} \leq 1.0$  时有冲击倾向性;  $K_{cr} > 1.0$  时无冲击倾向性。

## 1.2 冲击能指标 $W_{cr}$ 的修正

冲击能指标  $W_{cr}$  将变形能的积累和释放联系起来,较好地反映了冲击地压发生过程中煤岩体内的能量转换关系,对于揭示冲击地压机理有重要意义。但是笔者认为它没有考虑到材料在破坏前因塑性变形而消耗的能量,因而该指标偏于保守。为能正确反映能量转换关系,可把应力应变全过程曲线中的能量信息分为  $F_s$ 、 $F_p$  和  $F_c$  三部分,如图 3 所示。由图可见,煤体破坏前积聚的能量包括塑性变形能  $F_p$  和弹性变形能  $F_s$ 。而塑性变形不可恢复,因此,在冲击地压发生过程中塑性变形能  $F_p$  不能释放出来,它对冲击地压的发生不起作用,因而需要扣除。据此对  $W_{cr}$  指标作如下修正,并称之为修正的冲击能指标,用  $W'_{cr}$  表示。

$$W'_{cr} = F_s / F_c \quad (5)$$

上式的物理意义表示煤在破坏前积蓄的弹性应变能  $F_s$  和破坏过程中所消耗的能量  $F_c$  之比值。

为了测定煤样的  $W'_{cr}$  值,可采用两种方案:

方案一是根据刚性试验绘出应力应变全过程曲线,如图 3 所示。这样,  $F_c$  表示的面积容易求得,但  $F_s$  的面积不能直接求出,因为卸载路径  $CE$  是未知的。由图 3 中虚线  $CF$  左半边图形(即破坏前)很容易联想到图 1,它们非常相似。它们之间的区别在于图 1 中最大载荷为  $(80\% \sim 90\%) \sigma_c$ ,而图 3 中最大载荷为  $\sigma_c$ 。作为近似可以认为:

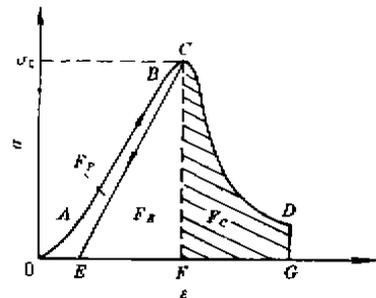


图 3 应力应变全过程曲线

$$W_{sr} \approx P_s/P_r \quad (6)$$

式中  $P_s$  和  $P_r$  的意义如图3所示。根据  $W_{or}$  的定义(3)式可写成:

$$W_{or} = (P_s + P_r)/P_c \quad (7)$$

联立求解(5)式、(6)式和(7)式可得:

$$W'_{or} = \frac{W_{sr}}{1 + W_{sr}} \cdot W_{or} \quad (8)$$

令  $\alpha = \frac{W_{sr}}{1 + W_{sr}}$ , 称之为修正系数, 代入上式得:

$$W_{or} = \alpha \cdot W_{or} \quad (9)$$

由于  $W_{sr}$  和  $W_{or}$  均可由实验求得, 因此  $W'_{or}$  也可求得。

方案二是一种近似的求解方法。试验研究表明, 煤岩材料卸载弹模和加载过程中线弹性阶段(如图3中的AB段)的弹性模量比较接近。据此可根据一个试件的应力应变全过程曲线从峰值应力点直接作出卸载路径CB(如图3所示), 使  $CB \parallel AB$ 。这样由定义式(5)式可直接求出  $W'_{or}$  值。这样求值虽然存在一定的近似性, 但和煤岩试件的试验结果所存在的离散度相比, 其误差仍然是比较小的, 并且实验工作量较小。

### 1.3 煤层冲击倾向性的试验研究

根据上述分析, 本文采用弹性应变能指标  $W_{sr}$ 、弹性变形指标  $K_i^*$  ( $i = 1, 2, 3$ )、冲击能指标  $W_{or}$ 、刚度比指标  $K_{or}$  和本文提出的修正冲击能指标  $W'_{or}$  等五项指标来研究煤层的冲击倾向性。由于  $W_{sr}$  和  $K_i^*$  指标可由循环加载试验获得, 其中  $W_{sr}$  指标只需取第一个循环就行了,  $W_{or}$ 、 $K_{or}$  和  $W'_{or}$  指标均可由同一个应力应变全过程试验求得, 因此上述五项指标只需两种类型的试验便可全部确定, 即单轴循环加载卸载试验和由刚试验机完成的单轴抗压应力应变全过程试验。

表1 循不加载试验结果

试件号	1	2	3	4	5	6	临界值
$W_{sr}$	1.98	1.82	2.43	2.89	3.30	2.70	2.0 ~ 5.0
冲击倾向性	无	无	中等	中等	中等	中等	
$K_1^*$	0.69	0.60	0.84	0.83	0.85	0.80	
$K_2^*$	0.63	0.60	0.73	0.80	0.78	0.76	0.7 ~ 0.83
$K_3^*$	0.54	0.59	0.69	0.75	0.70	0.65	
冲击倾向性	无	无	中等	中等	中等	中等	

表2 应力应变全过程试验结果

试件号	7	8	9	临界值
$W_{or}$	0.87	1.80	1.38	1.0 ~ 2.0
冲击倾向性	无	中等	中等	
$K_{or}$	1.47	0.53	0.61	1.0 ~ 0.5
冲击倾向性	无	中等	中等	
$W'_{or}$	0.76	1.65	1.12	1.0 ~ 2.0
冲击倾向性	无	中等	中等	

试验煤样取自四川南桐矿区硃石台煤矿六号煤层。煤样加工成  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 100$

mm的长方体标准试件。单轴循环加载试验由普通压力机完成,循环次数取3次。应力应变全过程试验由 INSTRON1346 型刚性压力机完成。试验结果列于表 1 和表 2。

由试验结果可以看出,  $W_{cr}$  指标的鉴定结果和其他指标的鉴定结果基本上是一致的,但在数值上,  $W_{cr}$  值比  $W_{cr}$  值小,即更偏向安全。由表 1 和表 2 还可以看出,虽然试样取自同一煤层,但试验结果的离散度仍然比较大。

### 2 煤层冲击倾向性的模糊综合评判

由于煤岩结构的复杂性以及冲击倾向性指标的过渡界限存在着“不分明性”,因而使试验结果离散度较大。为了对该煤层的冲击倾向性给出一个结论性的判断结果,在此根据上述试验结果采用模糊数学的方法进行三级模糊综合评判。

#### 2.1 模糊综合评判的数学模型

综合评判问题必须具备三个要素:

(1) 因素集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$

(2) 决断集  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$

(3) 单因素决断进行从  $U$  到  $V$  的模糊映射  $f: U \rightarrow V$  即选定一个单因素  $u \in U$ , 便存在一个模糊决断  $B(u) \in F(V)$ , 一一映射获得一个模糊关系  $\tilde{R}$ , 以  $\tilde{R} = (r_{ij})_{m \times n}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$  矩阵表示, 于是称  $(U, V, \tilde{R})$  为综合评判模型或综合决策模型。

由于人们对问题认识不同,侧重不同,反映人们对各因素的权衡不同,于是定义一个因素的权重  $\tilde{A}, A \in U$ , 以向量表示,  $\tilde{A}(u)$  为  $u$  对  $\tilde{A}$  的隶属度, 称  $\{\tilde{A}(u_i)\}$  为各因素的权数分配。 $\tilde{R}$  与  $\tilde{A}$  都由隶属函数刻画, 并归一化。然后求出  $\tilde{R}$  与  $\tilde{A}$  矩阵的乘积, 得到  $V$  上的一个新的模糊子集  $\tilde{B}$ , 即  $\tilde{B}$  综合评判结果, 由下式表示:

$$\tilde{A} \cdot \tilde{R} = \tilde{B} \tag{10}$$

式中  $\tilde{B}$  表示为  $\tilde{B} = (b_j)_{1 \times n}$ 。上述的求解过程称之为综合评判的正问题。

对于多级综合评判(或称多层次综合评判), 则把第一级综合评判结果  $\tilde{B}$  看作是  $U$  中的  $n$  个单因素评价, 以第一级综合评判结果  $\tilde{B}$  作为第二级综合评判的模糊矩阵  $\tilde{R}$ , 又设置新的权重分配  $\tilde{A}$ , 又利用(10)式可得到二级综合评判结果  $\tilde{B}$ 。同理可得三级综合评判结果。

#### 2.2 煤层冲击倾向性的模糊综合评判

本文对煤层冲击倾向性的试验结果即表 1 和表 2 采用模糊数学的方法进行三级模糊综合评判。在单个指标的各实验值之间进行一级模糊综合评判; 在  $K_1^*, K_2^*$  和  $K_3^*$  之间进行二级模糊综合评判; 在所有指标  $W_{sr}, K_1^*, W_{cr}, K_{cr}$  和  $W_{cr}$  之间进行三级模糊综合评判。因此, 一级评判的因素集  $U = \{\text{单个冲击倾向性指标的各实验值}\}$ ; 二级评判的因素集  $U = \{K_1^*, K_2^*, K_3^*\}$ ; 三级评判的因素集  $U$

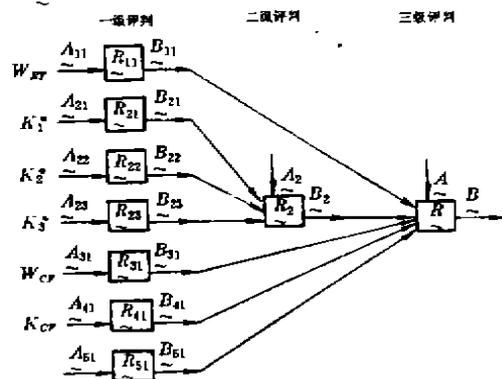


图 4 模糊变换框图

$= \{W_{gr}, K_i (i=1,2,3), W_{cr}, K_{cr}, W'_{cr}\}$ , 各级评判的决断集均为  $V = \{\text{无冲击倾向性、中等冲击倾向性、强烈冲击倾向性}\}$ 。

一级评判时  $\tilde{B}$  矩阵中各元素(即隶属度)一般是采用专家打分来确定的,但因条件所限,本文则主要是根据已有的冲击地压资料,分析各临界值的波动范围,绘出冲击倾向性指标的隶属函数图形,然后根据隶属函数图形确定  $\tilde{B}$  矩阵中各元素的值<sup>\*</sup>。各级评判的权重  $\tilde{A}$  矩阵是根据冲击倾向指标在工程实际中的使用频率及其精度来确定的。三级模糊综合评判的模糊变换框图如图4所示。最终的模糊综合评判结果即第三级评判结果为<sup>\*</sup>:

$$\tilde{B} = [0.33, 0.65, 0.02] \quad (11)$$

上式表示,评判结果属于无冲击倾向性的隶属度为0.33;属于中等冲击倾向性的隶属度为0.65;属于强烈冲击倾向性的隶属度为0.02。根据最大隶属度原则可知,该煤层具有中等冲击倾向性。

现场的大量记录资料表明,这一结论和煤矿实际发生的冲击地压规模是吻合的。表明对煤层的冲击倾向性进行模糊综合评判是可行的。

### 3 结 论

1) 本文分析了冲击能指标  $W_{cr}$  所存在的不足之处,提出了修正方案,称之为修正的冲击能指标  $W'_{cr}$ 。同时提出了求取  $W'_{cr}$  值的两种可行的方案。 $W_{cr}$  指标的物理含义准确,试验结果表明该指标是正确和合理的,能用于工程实际。

2) 由于煤岩结构的复杂性和冲击倾向性指标的过渡界限存在着“不分明性”,因此冲击倾向性的试验结果存在着较大的离散度。为此本文对煤层冲击倾向性采用模糊数学的方法进行了三级模糊综合评判,评判结果表明该煤层具有中等冲击倾向性,这与生产实际是相吻合的。表明对煤层的冲击倾向性进行模糊综合评判是可行的。

3) 冲击倾向性条件只是发生冲击地压的必要条件,为预测煤层是否会发生冲击地压还需进一步研究强度条件和能量条件。

### 参 考 文 献

- 1 Singh S P. Burst energy release index. Rock Mech Rock Eng. 1988, 21(2): 149~155

\* 金立平. 冲击地压的发生条件及预测方法的研究. 重庆大学博士学位论文, 1992年9月