文章编号: 0253 - 9993(2010)10 - 1674 - 06

硫化矿石自燃倾向性等级分类的 Fisher 判别分析法

胡汉华[1,2],刘　征[1,2],李孜军[1,2],崔田田[1,2]

(1. 中南大学 资源与安全工程学院,湖南 长沙　410083;2. 中南大学 国家金属矿安全科学技术研究中心,湖南 长沙　410083)

摘　要: 将 Fisher 判别分析法(FDA)应用于硫化矿石自燃倾向性等级分类问题中,选用主要矿物及含量、吸氧速度常数平均值、自热点、自燃点 4 项指标作为判别因子,建立硫化矿石自燃倾向性等级分类的 FDA 模型。选取新桥硫铁矿 13 个矿样的实验数据作为学习样本进行训练,建立相应的线性判别函数,并用训练后的模型对天马山高硫金矿的 - 55 m 中段以上矿石自燃倾向性进行判别。结果表明: Fisher 判别分析模型分类性能良好,对硫化矿石自然发火潜势的划分结果统计意义明显,适用性强,说明该方法在硫化矿石自燃倾向性判别与分类中有较好的应用前景。

关键词: 硫化矿石; 自燃倾向性; 等级; Fisher 判别分析法; 分类

中图分类号: TD752　　**文献标志码:** A

Fisher discriminant analysis to the classification of spontaneous combustion tendency grade of sulphide ores

HU Han-hua[1,2], LIU Zheng[1,2], LI Zi-jun[1,2], CUI Tian-tian[1,2]

(1. *School of Resources & Safety Engineering, Central South University, Changsha* 410083, *China*; 2. *Nation Research Center of Safety Science and Technology for Metal Mines, Central South University, Changsha* 410083, *China*)

Abstract: Based on the principle of Fisher discriminant analysis, a classification model of spontaneous combustion tendency of sulphide ores was established, including four indexes reflecting the spontaneous combustion tendency of sulphide ores: compositions and contents of mineral, velocity constant of oxygen absorption, spontaneous heating point and spontaneous combustion point. Linear discriminant functions were obtained through training thirteen experimental data of ore samples from Xinqiao pyrite. Based on this, spontaneous combustion tendency of sulphide ores from Tianmashan high sulfur gold were discriminated. The results show that the classification model of Fisher discriminant analysis has excellent performance and a good applicability, and statistic significance of classifying is explicit, from which we can see that it has a good prospect for the identification and classification of spontaneous combustion tendency of sulphide ores.

Key words: sulphide ores; spontaneous combustion tendency; grade; Fisher discriminant analysis; classification

硫化矿床指含硫的金属或非金属矿物以及由硫元素和其它元素以化合物形式存在的矿物集合体,在我国高硫矿山占金属矿山总量近 1/3[1-2]。由于其显著的自热自燃性,自燃火灾成为开采过程中经常遇到的重大灾害。实践证明,由于对硫化矿石自燃倾向性判定不明而导致的自燃火灾会引发一系列安全与环境问题,并造成巨大的经济损失,如导致矿山停产,烧毁矿石和相关工程,产生的有毒有害气体严重腐蚀井下装备和材料,恶化井下和地表环境,降低劳动生产率,影响工人的健康和生命安全等。因此,硫化矿石自燃倾向性等级判别的研究具有十分重要的现实意义[2-3]。

国内外对硫化矿石自燃倾向性的判定主要是通过测试矿石的某些氧化性能表征指标,然后根据这些

收稿日期: 2010 - 05 - 24　　责任编辑: 毕永华
作者简介: 胡汉华(1957—),男,湖南益阳人,教授,博士。E - mail: hhhwjb@163.com

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

指标对其自燃性进行相对的评判。具体包括: 矿石中各种矿物的成分和含量、矿石的含硫量及其它有关成分的含量、矿石的吸氧速度、矿石中水溶性铁离子含量、矿石起始自热温度、自热幅度、矿石着火点等[1]。近年来,自然发火的评判方法主要有单一指标和综合评判法[2,4]、集对理论[3,5]、突变级数法[6]、未确知测度模型[7]、模糊聚类关联分析法[8]以及人工神经网络[9]等。判别分析法是根据已有的观测样本的若干数量特征对新获得的样本进行识别的一种统计分析方法。该方法由英国统计学家 Pearson 在 1921 年首先提出,已在自然科学和社会科学的各个领域得到广泛应用,包括教育学、地质学、农林学、气象学、经济学、管理学、考古学、环境科学[10-11]、岩土工程[12-13]等。然而,在矿山自然发火领域的应用至今鲜有文献报道。本文借鉴了判别分析理论的思想,并结合笔者所在课题组有关硫化矿石自燃倾向性的研究成果,建立硫化矿石自燃倾向性等级分类的 Fisher 判别分析模型,选用多项指标作为综合评判的判别因子,建立了相应的线性判别函数,并进行实例应用,为硫化矿石自燃倾向性等级判定提供新的思路。

1　硫化矿石自燃倾向性影响因素的分析

硫化矿石的自燃倾向性,即硫化矿石发生自燃的难易程度,是矿山防灭火等级划分和防灭火技术措施的主要依据[1]。综合国内外硫化矿石自燃的研究情况,影响自燃倾向性的主要特征是矿岩的物质组成、各组分的结构特征、氧化速度、自热特性、自燃温度等。

1.1　矿相及化学成分

研究表明,矿石的矿物成分及含量、结构构造、晶体颗粒等不同,其氧化性也不同[2]。因此,通过矿相分析掌握矿石所含的矿物及其品位、矿物的结构构造、矿物晶体颗粒尺寸等微观特征,从而分析其氧化特性; 用化学成分分析,定量掌握矿样的化学组成及其内在特征,包括矿样所含化学硫、单硫、有机碳、化学铁、水溶性铁离子(Fe^{2+}和Fe^{3+})、SO_4^{2-}、Cu、As 等成分。表 1 为单指标分类标准[14]。

1.2　矿物的低温氧化性

硫化矿石的低温氧化是其自热自燃的内在起因,是决定硫化矿石能否自燃的关键。目前,评价硫化矿石低温氧化性的指标很多,主要有水溶性铁离子(Fe^{2+}和Fe^{3+})含量、SO_4^{2-} 含量、pH 值等随氧化时间的变化、吸氧速度、氧化增重等。根据文献[15-16]中各指标的相关性分析结论,并对笔者所在课题组多年的实验测试数据进行整理分析,吸氧速度和氧化增重选择其一作为矿物低温氧化性的判据。吸氧速度常数 K 和单位时间吸氧量 P 计算公式[17]

$$K = \frac{Q}{MT}\ln\frac{(1-C_0)C_a}{(1-C_a)C_0} \tag{1}$$

$$P = \frac{Q}{MT}(C_0 - C_a) \tag{2}$$

式中,Q 为反应瓶中空气的体积,mL; M 为反应瓶中放入干燥矿样的质量,g; T 为反应瓶中矿样的吸氧时间,h; C_0为反应瓶中矿样的氧气的初始浓度,%; C_a为经吸氧时间 T 后反应瓶中氧气的浓度(常压下),%。

表 1　硫化矿自燃倾向性的单指标分类标准

Table 1　Standard of index classification for spontaneous combustion tendency of sulphide ores

指　标	不自燃	易自热不易自燃	易自燃
Fe^{2+}\$Fe^{3+}$含量/%	0 ~ 0.01	0.01 ~ 0.3	>0.3
pH 值	>4.5	2.5 ~ 4.5	<2.5
矿物的 ST 值	<80	80 ~ 115	>115
氧化增重率(1 个月)	0 ~ 3	3 ~ 6	>6
吸氧常数/(mL·(g·h)$^{-1}$)	<0.010	0.011 ~ 0.019	>0.020
自热点/℃	>175	75 ~ 175	<75
自燃点/℃	>450	250 ~ 450	<250

1.3　矿石的自热性和自燃性

研究经验表明,矿样温度超过环境温度 5 ~ 10 ℃时的环境温度可定义为矿样的自热点; 矿样大量冒烟燃烧时的环境温度为矿样的自燃点[1]。自热点、自燃点能反映矿石从氧化放热发展到自热、自燃的难易程度,是鉴定矿石自燃倾向性的重要参数(分级标准见表 1)。

2　Fisher 判别分析法的分类模型

Fisher 判别分析法的基本思想是将高维数据点投影到低维空间上。从 k 个总体中抽取具有 p 个指标的样本观测数据,借助方差分析构造判断函数: $y = c_1X_1 + c_2X_2 + \cdots + c_pX_p = \boldsymbol{c}'\boldsymbol{X}$,其中系数 $\boldsymbol{c}' = (c_1, c_2\cdots, c_p)$ 确定的原则是使两组间的区别最大,而使每个组内部的离差最小。有了判别式后,对于一个新的样品,将它的 p 个指标值代入判别式中求出 y 值,然后与判别临界值(或称分界点,后面给出)进行比较,就可以判别它应属于哪一个总体。

2.1　Fisher 判别分析法的求解[10]

设有 k 个总体 $G_1, \cdots, G_k$,各总体抽取样品数分别为 $n_1, n_2, \cdots, n_k$,每个样品观测 p 个指标,则 $n = n_1 + n_2 + \cdots + n_k$ 为样品总数, $\boldsymbol{x}_a^{(i)} = (x_{a1}^{(i)}, \cdots, x_{ap}^{(i)})$ $(a = 1,2,\cdots,n_i; i = 1,2,\cdots,k)$ 为第 i 个总体的第 a 个

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

样品的观测向量。线性判别函数 $y = c'x$，在 $x \in G_i$ 的条件下，样本均值 E 和样本方差 D 为

$$E(c'x) = E(c'x \mid G_i) = c'E(x \mid G_i) = c'\mu_i \quad (i = 1,2,\cdots,k) \tag{3}$$

$$D(c'x) = D(c'x \mid G_i) = c'D(x \mid G_i)c = c'\Sigma_i c \quad (i = 1,2,\cdots,k) \tag{4}$$

其中 μ_i 和 Σ_i $(i = 1,2,\cdots,k)$ 分别为总体 G_i 的样本均值向量和样本协差阵。若总体均值向量为 μ，根据 Fisher 准则就是要选取系数向量 c，使

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i (c'\mu_i - c'\mu)^2}{\sum_{i=1}^{k} q_i c'\Sigma_i c} = \frac{c'Ac}{c'Bc} \tag{5}$$

达到最大，其中 q_i 是人为的正的加权系数，可以取为先验概率 $(q_i = n_i - 1)$。B 为组内离差阵，A 为总体之间样本协差阵，即

$$B = \sum_{i=1}^{k} q_i \Sigma_i \tag{6}$$

$$A = \sum_{i=1}^{k} n_i (\mu_i - \mu)(\mu_i - \mu)' \tag{7}$$

为求 λ 的最大值，根据极值存在的必要条件，令 $\frac{\partial \lambda}{\partial c} = 0$，利用对向量求导的公式计算并化简可得

$$\frac{\partial \lambda}{\partial c} = 0 \Rightarrow \frac{2Ac}{c'Bc} - \frac{2\lambda Bc}{c'Bc} = 0 \Rightarrow Ac = \lambda Bc \tag{8}$$

因此，λ 及 c 恰好是 A、B 矩阵的广义特征根及其对应的特征向量。由于一般都要求加权协差阵 B 是正定的，因此由代数知识可知，上式非零特征根个数 m 不超过 $\min(k-1,p)$；又因为 A 为非负定的，所以非零特征根必为正根，记为 $\lambda_1 \geqslant \lambda_2 \geqslant \cdots \geqslant \lambda_m > 0$，于是可构造 m 个判别函数，即

$$y_l(x) = c^{(l)'}x \quad (l = 1,2,\cdots,m) \tag{9}$$

一般解第 1 个判别函数可以得到大部分样本的信息，若难以判别，则可结合后续的判别函数综合考虑。

2.2 判别准则[11]

2.2.1 不加权法

记 $\bar{y}_l^{(i)} = c^{(l)'}\mu_i$ $(l = 1,2,\cdots,m;\ i = 1,2,\cdots,k)$。对待判别样品 $x = (x_1,\cdots,x_p)'$，计算 $y_l(x) = c^{(l)'}x$。

$$D_i^2 = \sum_{l=1}^{m_0} [y_l(x) - \bar{y}_l^{(i)}]^2 \quad (i = 1,\cdots,k) \tag{10}$$

若 $D_r^2 = \min\limits_{1 \leqslant i \leqslant k} D_i^2$，则判 $x \in G_r$。

2.2.2 加权法

考虑到每个判别函数的判别能力不同，记

$$D_i^2 = \sum_{l=1}^{m_0} [y_l(x) - \bar{y}_l^{(i)}]^2 \lambda_l \tag{11}$$

其中 λ_l 是由 $Ac = \lambda Bc$ 求出的特征根。若 $D_r^2 = \min\limits_{1 \leqslant i \leqslant k} D_i^2$，则判 $x \in G_r$。

2.3 判别检验

根据文献[10]分析，Fisher 判别对总体分布并不限制，只要总体的均值与总体协方差阵存在且总体的协方差阵可逆即可，因此统计检验可以省略。一般对经验样品的回判率大于 80% 即可投入使用，即将所有的训练样本作为 n 个新样本，依次带入建立的判别函数并且利用判别准则进行判别[15]。误判样本个数 N 与所有样本的比即为误判率 γ 为

$$\gamma = \frac{N}{\sum_{i=1}^{k} n_i} \tag{12}$$

3 硫化矿石自燃倾向性等级判定的 Fisher 判别分析模型及实例应用

3.1 Fisher 判别分析模型的建立

参考有关研究结果，经综合分析后，将硫化矿石自燃倾向性分为 3 级(类别)[2] 见表 2，确定主要矿物及含量(X_1)、氧化速度常数平均值(X_2)、自热点(X_3)、自燃点(X_4)作为 Fisher 判别分析模型的判别因子[2,18-19]。

表 2 硫化矿石自燃倾向性分级

Table 2 Spontaneous combustion tendency grade of sulphide ores

自燃倾向性等级	自燃倾向性	定性说明
Ⅰ(G_1)	容易自燃	低温氧化性强，自热温度低，自热量大，自燃点温度低
Ⅱ(G_2)	容易自热	低温氧化性较强，自热温度较低，但自燃点温度高
Ⅲ(G_3)	不易自燃	低温氧化性弱，自热点和自燃自燃点温度均高

从课题组多年的实验数据中选取新桥硫铁矿的 13 个矿样实验数据[2]作为学习样本进行训练，为了计算方便准确，其中主要矿物及含量采用文献[5]中的权重进行处理，不自热矿石的自热点按 350 ℃处理，经训练得到硫化矿石自燃倾向性预测的 Fisher 模型。

利用回代估计法对学习样本进行回判检验，并与文献[2]的综合判定法判定结果进行比较(表 3)。预测结果全部一致，即误判率 $\gamma = 0$，证明所建立的模型是完全可靠的。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

表 3　硫化矿石自燃倾向性的 Fisher 判别分析模型训练样本

Table 3　Training samples of FDA of spontaneous combustion tendency of sulphide ores

矿样编号	主要矿物及含量 X_1/%		吸氧速度常数平均值 X_2/(mL·(g·h)$^{-1}$)	自热点 X_3/℃	自燃点 X_4/℃	综合判定法	Fisher 判别法
1	胶黄铁矿	70	2.371 5	146	239	Ⅲ	Ⅲ
2	胶黄铁矿	45	1.394 9	60	296	Ⅲ	Ⅲ
3	黄铁矿	80	0.625 3	230	437	Ⅱ	Ⅱ
4	黄铁矿	75	0.161 9	127	453	Ⅱ	Ⅱ
5	黄铁矿	97	0.311 4	270	422	Ⅱ	Ⅱ
6	胶黄铁矿	48	1.175 3	140	270	Ⅲ	Ⅲ
7	黄铁矿	90	0.450 0	不自热	414	Ⅰ	Ⅰ
8	黄铁矿	80	0.622 8	122	436	Ⅱ	Ⅱ
9	黄铁矿 胶黄铁矿	32 28	0.529 0	243	301	Ⅱ	Ⅱ
10	黄铁矿	96	0.556 6	不自热	430	Ⅰ	Ⅰ
11	黄铜矿	82	0.178 8	297	385	Ⅱ	Ⅱ
12	黄铁矿	95	0.406 5	不自热	425	Ⅰ	Ⅰ
13	磁黄铁矿	93	2.803 7	56	233	Ⅲ	Ⅲ

由表 4 给出的系数可以写出训练样本,分别得到判别函数 1 和 2

$$y_1 = -5.407X_1 - 0.293X_2 + 0.016X_3 + 0.016X_4 - 7.947$$

$$y_2 = -4.021X_1 - 2.015X_2 + 0.013X_3 + 0.008X_4 - 8.285$$

分析函数 1 的系数可以看出,主要矿物及含量(X_1)的系数影响最大,表明判别函数对矿物含量值最敏感,吸氧速度常数次之,自热点和自燃点较低。研究表明,矿石的矿物成分及含量、结构构造、晶体颗粒等不同,其氧化自燃性也不同; 矿石氧化后的自热点会显著降低[20]。由此可见,训练函数能较好反映自燃倾向性潜势[13]。

表 4　判别函数系数

Table 4　The results of discriminant equation

指标	函数 1	函数 2
X_1	-5.407	4.021
X_2	-0.239	2.015
X_3	0.016	0.013
X_4	0.016	0.008
常数项	-7.947	-8.285

由表 5 可以看出,判别函数 1 的方差所占的比例为 93.6%,说明其可以完成绝大多数样品的判别,再结合函数 2 即可判别所有样本信息[11,13],可见判别函数的实用性较好。

表 5　判别函数方差及其意义

Table 5　The variance of discriminant equation and its significance

函数	特征值	方差比例/%	方差的累积/%	相关性
1	12.579	93.6	93.6	0.962
2	0.865	6.4	100.0	0.681

3.2　实例应用

天马山高硫金矿位于铜官山背斜倾伏端靠近南东翼,主要矿体有 5 个,其中Ⅲ号矿体的规模最大,占硫矿床元素量的 44.4%,金 60.5% 左右。矿床类型为高硫砷硫金矿床,矿石中主要的金属矿物有黄铁矿 40%,磁黄铁矿 20%,其次为磁铁矿、毒砂、方铅矿等; 矿石的构造有块状结构,条纹状构造,条带状结构; 矿石的自燃类型有块状黄铁矿、块状磁黄铁矿、浸染状黄铁矿、浸染状磁黄铁矿; 矿石工业类型有单质硫、硫金型、硫砷型。天马山矿区采用竖井、平硐、斜井联合开拓方法。采矿方法有全面法、分层空场法或房柱法,事后一次尾砂胶结充填。通风系统采用中央斜井进风,南北两翼抽风的对角通风方式。

为了对其矿石自燃倾向性进行判别,选取 5 个典型矿样进行实验测定,并带入所建立的 FDA 判别模型,相关参数和评判结果见表 6。

判别结果显示,只有矿样 4 与实际出现偏差。再分析判别函数散点图(图 1),可见有一预测样本介于 G_2 和 G_3 之间,分析原因可能有: ① 实验室测试条件与环境以及具体操作会与实际有一定偏差; ② 训练样本数据有限,所得到的训练函数精确度还不够高; ③ 研究表明,矿山硫化矿石自然发火受矿山实际情况影响较大,如采矿方法[2]、通风系统条件[9]、矿山地质

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

表 6 天马山高硫金矿矿石自燃倾向性判别分析结果

Table 6 The results of discriminant analysis spontaneous combustion tendency of sulphide ores for Tianmashan

矿样编号	主要矿物及含量 X_1/%		吸氧速度常数平均值 X_2/(mL·(g·h)$^{-1}$)	自热点 X_3/℃	自燃点 X_4/℃	实际情况	Fisher 判别法
1	磁黄铁矿	96	2.371 5	146	239	Ⅲ	Ⅲ
2	磁黄铁矿	32	0.625 3	230	437	Ⅰ	Ⅰ
3	磁黄铁矿	97	0.161 9	127	453	Ⅲ	Ⅲ
4	黄铁矿 磁黄铁矿	20 72	0.311 4	270	422	Ⅱ	Ⅲ
5	胶黄铁矿	66	1.175 3	140	270	Ⅲ	Ⅲ

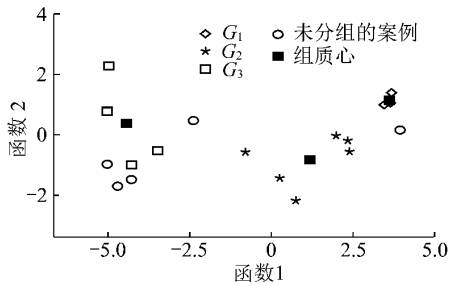

图 1 判别函数分组图

Fig. 1 The grouping figure of discriminant functions

特征[17]、周围环境温度湿度[21]、矿石堆积体积等;④仅选用矿物含量一个指标来界定不同矿山的硫化矿石,可行性还有待进一步研究来验证。

由此可见,Fisher 判别分析法用于硫化矿石自燃倾向性预测是完全可行且高效的。

4 结 论

(1) 结合 Fisher 判别分析法,选用主要矿物及含量、吸氧速度常数平均值、自热点及自燃点作为判别因子,建立了评判模型,为硫化矿石自燃倾向性等级判定提供了一条数学化、定量化的新途径。

(2) 建立线性判别函数,根据系数可确定指标对硫化矿石自燃倾向性的敏感程度,其中主要矿物及含量和吸氧速度常数能较好反映自燃倾向性。

(3) 训练结果与综合判定法进行比较,显示 FDA 模型在判别分类中排除了评分时人为主观因素的影响,具有较强的判别能力,用天马山高硫金矿的实际工程数据进行验证,取得了满意的判别结果,表明该模型适用性好。

参考文献:

[1] 吴 超,孟廷让. 高硫矿井内因火灾防治理论与技术[M]. 北京:冶金工业出版社,1995.
Wu Chao, Meng Tingrang. Theory and technology for control of the mine spontaneous combustion of sulphide ores [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995.

[2] 李孜军. 硫化矿自燃机理及其预防关键技术研究[D]. 长沙:中南大学,2007.
Li Zijun. Investigation on the mechanism of spontaneous combustion of sulphide ores and the key technologies for preventing fire [D]. Changsha: Central South University, 2007.

[3] 汪发松. 硫化矿自燃影响因素分析及安全评价研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
Wang Fasong. Research on spontaneous combustion of sulphide ores and safety assessment [D]. Changsha: Central South University, 2009.

[4] 李孜军,吴 超,周 勃. 硫化矿石氧化性的实验室综合评判[J]. 铜业工程,2003(1):40-43.
Li Zijun, Wu Chao, Zhou Bo. Laboratory comprehensive judgement of the oxidation of sulfide ores [J]. Copper Engineering, 2003(1):40-43.

[5] 李孜军,汪发松,马树宝. 基于层次分析法和集对理论的硫化矿自燃倾向性评定[J]. 科技导报,2009,27(19):69-73.
Li Zijun, Wang Fasong, Ma Shubao. Safety assessment of the spontaneous combustion tendency of sulphide ores based on AHP and SPA [J]. Science & Technology Review, 2009, 27(19):69-73.

[6] 高 科,李 明,吴 超,等. 突变级数法在硫化矿爆堆自然发火预测中的应用[J]. 金属矿山,2008(2):20-24.
Gao Ke, Li Ming, Wu Chao, et al. Application of catastrophe progression method in forecasting spontaneous combustion of blasted muck-pile of sulphide ore [J]. Metal Mine, 2008(2):20-24.

[7] 阳富强,吴 超,李孜军. 未确知测度模型在矿仓硫精矿自燃危险性评价中的应用[J]. 煤炭学报,2010,35(2):264-268.
Yang Fuqiang, Wu Chao, Li Zijun. Application of uncertainty measurement model in risk evaluation on spontaneous combustion of sulfur concentrate in storehouse [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(2):264-268.

[8] 秦书玉,陈长华,李 健. 煤炭自燃早期预报的模糊聚类关联分析法[J]. 辽宁工程技术大学学报,2003,22(3):289-291.
Qin Shuyu, Chen Changhua, Li Jian. Fuzzy gathering classification connected analysis method for early forecast of coal spontaneous combustion [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2003, 22(3):289-291.

[9] 李 明,吴 超,李孜军. 多因素耦合条件下硫化矿自燃神经网络动态预测模型研究[J]. 中国安全科学学报,2007,17(8):32-36.
Li Ming, Wu Chao, Li Zijun. Research on ANN dynamic prediction

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

model for spontaneous combustion of sulfide ores with multi-factors coupling [J]. China Safety Science Journal,2007,17(8):32 - 36.

[10] 袁志发,宋世德. 多元统计分析 [M]. 北京: 科学出版社,2009.
Yuan Zhifa,Song Shide. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: Science Press,2009.

[11] 何晓群. 多元统计分析 [M]. 北京: 中国人民大学出版社: 2004.
He Xiaoqun. Multivariate statistical analysis [M]. Beijing: China Renmin University Press,2004.

[12] 白云飞,邓　健,董陇军,等. 深部硬岩岩爆预测的 FDA 模型及其应用 [J]. 中南大学学报(自然科学版),2009,40(5):1 417 - 1 421.
Bai Yunfei,Deng Jian,Dong Longjun,et al. Fisher discriminant analysis model of rock burst predition and its application in deep hard rock engineering [J]. Journal of Central South University(Science and Technology),2009,40(5):1 417 - 1 421.

[13] 余　颂,陈善雄,余　飞,等. 膨胀土判别与分类的 Fisher 判别分析方法 [J]. 岩土力学,2007,28(3):499 - 504.
Yu Song,Chen Shanxiong,Yu Fei,et al. Fisher's discriminant analysis method for identification and classification of expansive soil [J]. Rock and Soil Mechanics,2007,28(3):499 - 504.

[14] 夏长念,吴　超. 采场硫化矿石爆堆自燃危险性评价研究 [J]. 火灾科学,2005,15(2):106 - 110.
Xia Changnian,Wu Chao. Study of risk assessment technique for evaluating the spontaneous cobbustion of sulfide ore in mining stope [J]. Fire Safety Science,2005,15(2):106 - 110.

[15] Wu Chao,Li Zijun. A simple method for predicting the spontaneous combustion potential of sulphide ores at ambient temperature [J]. Transactions of the Instituteions of Mining and Metallurgy(Section A),2005,114(2):125 - 128.

[16] Wu Chao,Li Zijun,Zhou Bo. Correlations among factors of sulfide ores in oxidation process at ambient temperature [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China(English Edition),2004,14(1):175 - 179.

[17] 阳富强. 硫化矿石堆自燃预报技术研究 [D]. 长沙: 中南大学,2007.
Yang Fuqiang. Technical development on prediction and forecast of spontaneous combustion for sulfide ore piles [D]. Changsha: Central South University,2007.

[18] Wu Chao,Xia Changnian,Li Zijun. Safety assessment system for evaluating spontaneous combustion of sulfide ores in mining stope [A]. Proceedings of the 2006 International Symposium on Safety Science and Technology [C]. Changsha,2006:1 599 - 1 604.

[19] 赵国彦,古德生,吴　超. 硫化矿床内因火灾综合防治措施研究 [J]. 矿业研究与开发,2001,21(1):17 - 19.
Zhao Guoyan,Gu Desheng,Wu Chao. Research on comprehensive preventive and controlling measures for spontaneous fire hazards in sulphide deposit [J]. Mining Research and Development,2001,21(1):17 - 19.

[20] 周　勃,吴　超,李茂楠,等. 硫化矿石预氧化前后自燃倾向性的比较研究 [J]. 中国矿业,1998,7(5):77 - 79.
Zhou Bo,Wu Chao,Li Maonan,et al. A comparative study of the spontaneous combustion potential of sulfide ores before and after pre-oxidizing [J]. China Mining Magazine,1998,7(5):77 - 79.

[21] 仇勇海,陈白珍. 水在金属硫化矿体自燃中的作用 [J]. 中国有色金属学报,1996,6(3):5 - 10.
Qiu Yonghai,Chen Baizhen. Role of water in spontaneous combustion of metallic ore body [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,1996,6(3):5 - 10.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

关于本刊收取稿件审理费的通知

承蒙广大作者的厚爱,近年来《煤炭学报》收稿量急剧增加,由于本刊采取严格的审稿制度,外审工作量很大,因此本刊的稿件审理费从 2010 年 1 月 1 日起由原来 100 元/篇提高到 200 元/篇,以补充办刊经费的不足,敬请广大作者理解与支持。

本刊编辑部