



基于层次分析法和集对理论的硫化矿自燃倾向性评定

李孜军,汪发松,马树宝

中南大学资源与安全工程学院,国家金属矿安全科学技术研究中心,长沙 410083

摘要 采用多因素综合鉴定法对某硫铁矿的 9 个矿样进行了实验室自燃倾向性鉴定,得到了矿样的化学成分分析结果,矿相分析结果,矿样中水溶性铁离子、硫酸根离子含量随氧化时间的变化规律结果,自热性指标、自燃性指标。建立了硫化矿自燃倾向性判定流程的结构图,根据确定的硫化矿石倾向性分级标准,利用 AHP 方法和集对分析理论确定了该矿 9 个矿样的同一度和对立度,并进一步分析评价了指标数值与自燃倾向性分级标准之间的数量关系,得到了 9 个矿样的平均联系度;根据联系度的同异反态势确定联系度所属的集对态势,最后根据集对态势得到了 9 个矿样的氧化程度及自燃倾向性程度分级,得到了量化的安全评价结果。该研究方法对硫化矿石自燃的安全评价具有指导意义。

关键词 硫化矿;自燃;自燃倾向性;层析分析法;集对理论;安全评价

中图分类号 TD75

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)19-0069-05

Safety Assessment of the Spontaneous Combustion Tendency of Sulfide Ores Based on AHP and SPA

LI Zijun, WANG Fasong, MA Shubao

National Research Center of Science and Technology for Metal Mines, School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

Abstract The prevention and the control of the spontaneous combustion of sulfide ores are always a major safety issue for sulfide ore deposits. It is very important to exactly measure the spontaneous combustion tendency of sulfide ores, in order to ensure the safety of miners' life, maintain the normal production of the mine and make good utilization of the natural resources. The spontaneous combustion tendency of the ore samples were identified by a multi-factor method. The chemical composition analysis, mineral analysis, and mineral sampling of water-soluble iron ions were carried out to obtain the sulfate ion content against oxidation time, self-heating index, indicators of spontaneous combustion. A structural chart of spontaneous combustion tendency of the sulfide ores is established. The grades based on the tendency factors of the sulfide ores are

identified by AHP. The oxidation indicator, indicator of self-heating and spontaneous combustion indicator based on calculations are selected to determine the spontaneous combustion tendency of the sulfide ores. The relationship between the spontaneous combustion tendency of indicator values and the number of classification standards are further analyzed and evaluated. Finally, the degree of oxidation and the classification are obtained according to the set pair trend of the samples, the quantitative results of the safety assessment are also obtained. The experiments show that No. 8, No. 3 ore bodies have a tendency of the spontaneous combustion. Those results are in line with the mine site's actual assessment. The results provide a theoretical basis for adopting measures against spontaneous combustion of sulfide ores.

Keywords sulfide ore; spontaneous combustion; spontaneous combustion tendency; analytic hierarchy process; set pair analysis; safety assessment

0 引言

硫化矿石爆堆自燃是高硫矿床开采中多发的重大灾害。矿井一旦发生矿石自燃火灾,将会对矿山的生产、设备和人员安全产生重要影响。因此,在高硫矿床开采设计之前,必须准确判定矿石的自燃倾向性,以便在矿床开拓、采矿方法、通风系统等设计的同时,采取积极、有效、经济的防火措施,实现安全与生产效益最优化^[1]。

收稿日期: 2009-07-17

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAK04B03-02)

作者简介: 李孜军,副教授,研究方向为硫化矿自燃预测预报及防火技术,电子信箱: zijunli@mail.csu.edu.cn



自燃倾向性预测法主要是根据硫化矿石自燃倾向性不同,划分硫化矿石自燃发火等级,以此来区分硫化矿石的自燃危险性程度,从而采取相应的防灭火措施。从20世纪30年代起不同国家在不同时期提出过很多判断自燃倾向程度的指标^[2-6]:苏联的吸氧速度常数和电化学性能指标、保加利亚的吸氧速度常数及热谱分析、长沙矿山研究院的胶状黄铁矿指标、长沙矿冶研究院的矿石氧化率和升温率指标、白银有色金属公司的硫化矿石 $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}>0.3\%$ 指标和原中南工业大学提出的类比综合指标和火灾指数等。这些评价方法都有各自的优缺点,并且应用时所采取的手段也有所不同。

在硫化矿评价体系中,如果单纯采取定性或定量两种方式中的一种处理,很难将这些指标进行综合测量,舍弃任一部分都使评价体系不够完整。所以本文拟综合层次分析法(AHP)和集对分析(SPA)两种方法,对硫化矿自燃倾向性进行安全评价,首先采用层次分析法对硫化矿自燃倾向性实验过程中得到的各种指标进行评价,确定各指标的权重。然后利用集对分析中的同异反思想对硫化矿自燃倾向性中的氧

化性指标、自热性指标和自燃性指标等进行定量评价,使评价结果真实地反映相关硫化矿信息,较好地给出各矿样的自燃倾向性程度等级,进行更为准确的安全评价。

1 利用层次分析法确定各指标权重

层次分析法是美国运筹学家 T. L. Saaty 于 20 世纪 70 年代提出的一种定性与定量分析方法相结合的多目标决策分析方法^[7]。层次分析法经过多年的发展,衍生出了多种改进的方法,包括改进的层次分析法^[8-9]、模糊层次分析法^[10]、可拓模糊层次分析法和灰色层次分析法^[11-14]等。

利用层次分析法确定各指标权重的步骤如下。

1) 建立层次结构模型。这是 AHP 中最重要的一步,层次结构通常可分为目标层(顶层)、准则层(中间层)和方案层(底层)。根据参考文献[1]、[2]中的硫化矿石自燃倾向性综合判断流程,建立硫化矿自燃倾向性 AHP 结构示意图,如图 1 所示。

2) 构造两两比较判断矩阵。在建立递阶层次结构以后,

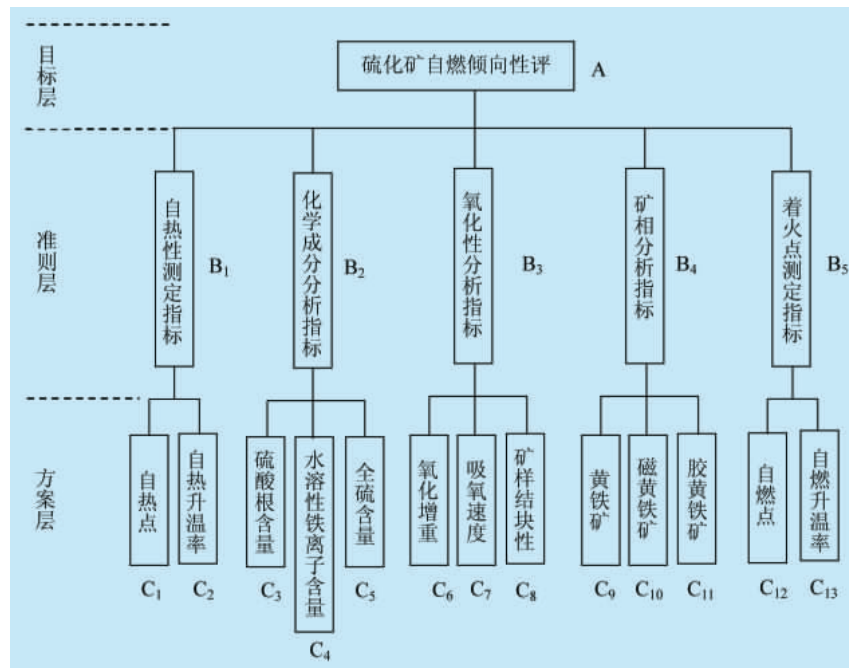


图 1 硫化矿自燃倾向性 AHP 结构示意图

Fig. 1 AHP structural chart of the spontaneous combustion tendency of sulfide ores

上下层次之间元素的隶属关系就被确定了,目的是在准则下按元素的相对重要性赋予各元素相应的权重。在这一步中,一般使用 1~9 的比例标度^[7]。

3) 利用 Matlab 或方根法由判断矩阵计算被比较元素相对权重。

4) 计算各层元素的组合权重即权向量,并进行一致性检验。为避免其他因素对判断矩阵的干扰,在实际中要求判断矩阵满足大体上的一致性,需进行一致性检验。对判断矩阵

进行一致性检验,以确定权重分配是否合理。只有通过检验,才能说明判断矩阵在逻辑上是合理的,才能继续对结果进行分析。对判断矩阵进行一致性检验包括计算一致性指标和一致性比率。

计算一致性指标为

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

式中, n 为判断矩阵的阶数, $\lambda_{\max}$ 为判断矩阵的最大特征值。

计算一致性比率为

$$CR=CI/RI$$

式中, CI (Consistency Index) 为一致性指标; RI (Random Index) 为平均随机一致性指标, 是根据足够多个随机发生的判断矩阵计算得到的一致性指标的平均值, 1~10 阶矩阵的 RI 取值见表 1。

表 1 RI 取值
Table 1 Values of RI

矩阵阶数	RI	矩阵阶数	RI
1	0	6	1.24
2	0	7	1.32
3	0.58	8	1.41
4	0.90	9	1.45
5	1.1	10	1.49

一般而言, CR (Consistency Ratio) 越小, 判断矩阵的一致性越好。通常认为 $CR < 0.1$ 时, 判断矩阵具有满意的一致性。

2 利用集对理论进行安全评价

集对理论是中国学者赵克勤在 1989 年全国系统理论会议上提出的对不确定性进行研究的一种方法^[15-21]。该方法的核心思想是把被研究的客观事物的确定性联系与不确定性联系作为一个确定不确定系统来分析和处理。集对分析是在一定问题下对一个集对对子的特性展开分析,建立 2 个集合在特定问题下的同异反联系度表达式:

$$\mu=a+bi+cj \quad (1)$$

式中, a, b, c 分别称为同一度、差异度和对立度, 三者满足归一化条件: $a+b+c=1$; i 为差异度 b 的系数, 取值范围为 $[-1, 1]$; j 为对立度 c 的系数, 表示与同一度 a 相反的情况, 规定取值为 -1 。

对于某矿样而言,假定有 N 个评价指标,其中有 S, F, P 个指标分别符合硫化矿自燃倾向性等级中的自燃、易自燃、不自热自燃,则其联系度表达式为

$$\mu(W) = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \quad (2)$$

令 $S/N=a, F/N=b, P/N=c$, 式(2)可以进一步简写成式(1)。根据集对分析相关理论可以知道, 同一度 a 和对立度 c 是相对确定的, 而差异度 b 是相对不确定的, a, b, c, i, j 等诸多参数相互联系、相互影响、互相制约。很明显, a 值越大, c 值越小, 矿样的自然倾向性程度就越高, 由此可初步分析并确定待评价矿样自然倾向性程度等级。

进一步分析评价指标数值与自燃倾向性分级标准之间的数量关系,可以看出,即使不同矿样的自燃倾向性处于同一级别,也会因评价指标数值的差异,而使矿样的自燃倾向性程度有所不同,因此相对于分级标准继续进行集对分析,针对硫化矿自燃倾向标准而言,使用式(3)计算矿样的平均联系度。

$$\mu_{mp} = \begin{cases} 1+0i+0j & x \in [0, S_1] \\ \frac{S_2-x}{S_2-S_1} + \frac{S_2-x}{S_2-S_1}i+0j & x \in [S_1, S_2] \\ 0+0i+1j & x \in [S_2, +\infty] \end{cases} \quad (3)$$

式中, S_1, S_2, S_3 分别为不同评价指标的门限值; x 为各待评价矿样自燃倾向性实验的实际值。

由式(3)的计算结果,得到第 m 个待评价样本、第 p 个评价指标的平均联系度为

$$\bar{\mu}_m = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n \mu_{mp} \quad (4)$$

根据式(3)、式(4)可得到不同评价指标对各待评价矿样的自燃倾向性程度的联系度及其平均联系度。

3 实例分析

3.1 矿山简介

某硫铁矿矿山在开采过程中,Ⅱ号矿体发生过多次自热自燃现象,矿山采用洒水、密闭等方法均未能灭火。至2007年9月,火区明显扩大,矿山被迫停止Ⅱ号矿体的开采。根据参考文献[1]、[2]的多因素综合评判方法对现场采的9个矿样进行实验室分析,实验结果如表2所示。

表2 矿样实验室分析结果
Table 2 Analysis results of the ore samples

编号	自热开始 温度/℃	自热最大 幅度/℃	着火点/℃	100 d 氧化 增重率/%
1	—	—	434	0.59
2	—	—	—	0.34
3	220	5	408	1.24
4	243	3	385	1.29
5	—	—	334	1.78
6	220	30	374	1.44
7	—	—	366	0.79
8	—	—	380	2.18
9	220	15	366	1.64

3.2 AHP 分析结果

通过 AHP 分析计算结果,在硫化矿自燃倾向性的综合评判实验中,各实验权重排列如下:氧化性分析指标(0.4474)>自热性测定指标(0.2240)>自燃性测定指标(0.2111)>化学成分分析指标(0.0678)>矿相分析指标(0.0497)。而在各实验测定指标中,权重依次为:氧化增重率分析指标(0.2034)=吸氧速度分析指标(0.2034)>自热点分析指标(0.1680)>自燃升温率分析指标(0.1407)>自燃点分析指标(0.0704)>自燃升温率分析指标(0.0560)。

3.3 自燃倾向性分级标准的确定

根据文献[2]中分析,吸氧率与增重率的相关性很好,因此这两个指标只要选择其中一个即可。由于氧化增重的测试

方法简单、容易操作、成本低,只要有一台高精度的天平在现场都可应用,因此采用增重速度(率)作为硫化矿石低温氧化性的主要评价指标。所以在整个自然倾向性评价中,主要选取氧化性指标、自热性指标和自燃性指标作为判断矿石是否容易发生自燃的主要依据。

根据文献[2]自热点的测定标准程序和自燃点测定的标准程序来看,如果在实验程序升温结束时,矿样仍然没有自热,那么就将矿样确定为没有自热。所以结合现场实际情况,并保证一定精度的条件下,将矿样自燃倾向性分级鉴定标准中Ⅱ级容易自热的温度确定为250℃;而自燃点的确定主要是根据文献[2]对近10个矿山测定数据的统计,并结合矿山实际情况确定的。矿样在实验室条件下的氧化过程中,特别是实验初期,由于水分蒸发等因素的影响,矿样的增重率很不稳定,有时可能产生负值,而在经过一段较长时间如1个月的氧化后,矿样的氧化增重则将保持一个较稳定的数值,所以氧化增重率选用30 d以后的数据进行分级鉴定,而本文采用100 d的氧化增重率作为参考,进行分级鉴定。自燃倾向性程度分级标准^[2]见表3。

表3 硫化矿石自燃倾向性分级鉴定标准				
Table 3 Classification standard of the sulfide ores				
自燃倾向性等级	自燃倾向性描述	自热点/℃	自燃点/℃	100 d 氧化增重率/%
I	容易自燃	<100	<220	>2.0
II	容易自热	<250	<350	>1.0
III	不易自燃	>250	>350	<1.0

3.4 集对分析结果

由式(1)、式(2)得到9个矿样的联系度和平均联系度,结果见表4。

表4 各矿样联系度			
Table 4 Connection degree of the sulfide ores			
矿样编号	a	b	c
1	0	0	1
2	0	0	1
3	0	0.67	0.33
4	0	0.67	0.33
5	0	0.67	0.33
6	0	0.67	0.33
7	0	0	1
8	0.33	0	0.67
9	0	0.67	0.33

从表4可以看得出,8#矿样自燃倾向程度最高,而1#、2#、7#矿样则明显没有自燃倾向性,3#、4#、5#、6#、9#矿样倾向性等级则相同。

根据式(3)和式(4)可以计算9个矿样的平均联系度。根据集对分析相关联系数态势表,对所得9个矿样的联系度进

行逐一分析,并根据联系度的同异反态势确定联系度所属的集对态势,结果如表5所示。

表5 各矿样的平均联系度及其集对态势			
Table 5 Average connection degree and state of every sulfide ores			
矿样编号	各指标联系度	平均联系度	集对态势
1	$\mu_{\text{自热}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{自燃}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{增重}}=0+0i+1j$	$\bar{\mu}_1=0+0i+1j$	准反势 1级
2	$\mu_{\text{自热}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{自燃}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{增重}}=0+0i+1j$	$\bar{\mu}_2=0+0i+1j$	准反势 1级
3	$\mu_{\text{自热}}=0.2+0.8i+0j$ $\mu_{\text{自燃}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{增重}}=0.76+0.24i+0j$	$\bar{\mu}_3=0.32+0.447i+0.333j$	微反势 4级
4	$\mu_{\text{自热}}=0.047+0.953i+0j$ $\mu_{\text{自燃}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{增重}}=0.71+0.29i+0j$	$\bar{\mu}_4=0.252+0.414i+0.333j$	微反势 4级
5	$\mu_{\text{自热}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{自燃}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{增重}}=0+0i+1j$	$\bar{\mu}_5=0+0i+1j$	准反势 1级
6	$\mu_{\text{自热}}=0.2+0.8i+0j$ $\mu_{\text{自燃}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{增重}}=0.56+0.24i+0j$	$\bar{\mu}_6=0.253+0.413i+0.334j$	微反势 4级
7	$\mu_{\text{自热}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{自燃}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{增重}}=0+0i+1j$	$\bar{\mu}_7=0+0i+1j$	准反势 1级
8	$\mu_{\text{自热}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{自燃}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{增重}}=1+0i+0j$	$\bar{\mu}_8=0.333+0i+0.667j$	准反势 4级
9	$\mu_{\text{自热}}=0.2+0.8i+0j$ $\mu_{\text{自燃}}=0+0i+1j$ $\mu_{\text{增重}}=0.36+0.64i+0j$	$\bar{\mu}_9=0.187+0.48i+0.333j$	微反势 4级

3.5 自燃程度分级结果

从表5可以看出,8#矿样具有很强的自燃倾向性。3#矿样虽然属于微反势4级,但 $a_3=0.32$ 略小于8#的 a_8 。这说明3#矿样的自燃倾向性程度相对8#来说稍小,但仍然具有很强的自燃倾向性,可以将其归入易自燃Ⅰ级。而硫铁矿现场Ⅱ号矿体已经发生自燃而封矿,3#矿样正是Ⅱ号矿体的样本,说明与实际情况吻合得很好。

对联系度属于同势的3#、4#、6#、9#矿样倾向性程度进一步分析,虽然四者同属准反势4级,但 $a_3>a_6>a_4>a_9$,说明在这4个矿样中,3#矿样的自燃倾向性程度较强,4#、6#到9#矿样自燃倾向性程度依次减弱。而1#、2#、5#、7#矿样没有自燃倾向性,所以就没有进一步详细划分的必要了。

综上分析,某硫铁矿9个矿样的氧化倾向性程度和分级如表6所示。

矿样编号	自燃倾向性	自燃分级	综合排序
8	易自燃	I 级	1
3	易自燃	I 级	2
4	易自热不易自燃	II 级	3
6	易自热不易自燃	II 级	4
9	易自热不易自燃	II 级	5
1	无自热自燃	III 级	6
2	无自热自燃	III 级	7
5	无自热自燃	III 级	8
7	无自热自燃	III 级	9

本文把集对分析理论中的同异反思想和层次分析法应用到硫化矿自燃倾向性程度评价中,充分考虑不确定性因素的干扰,比较全面地处理定性指标和定量指标的关系,并利用实验得到的数据,得到了符合实际情况的评价结果。同时对硫化矿自燃倾向性程度细化分级,得到了属于同一级别的硫化矿矿样的自燃倾向性程度的排序。该方法适合在实际工程中推广和应用。

- Xu Songbo. The theory of a practical decision-making method-AHP[M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1986.
- [8] Al-Subhi Al-Harbi K M. Application of the AHP in project management [J]. *International Journal of Project Management*, 2001, 19(1): 19-27.
- [9] 秦波涛, 李增华. 改进层次分析法用于矿井安全性综合评价 [J]. *西安科技学院学报*, 2002, 22(2): 126-129.
Qin Botao, Li Zenghua. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2002, 22(2): 126-129.
- [10] 何正风. 模糊数学建模以及层次分析法在矿山安全评价中的应用[J]. *科技信息: 学术版*, 2006(11): 227-231.
He Zhengfeng. *Scientific and Technical Information*, 2006 (11): 227-231.
- [11] Tam C M, Tonga T K L, Chiu G C W. Non-structural fuzzy decision support system for evaluation of construction safety management system [J]. *International Journal of Project Management*, 2002, 20(4): 303-313.
- [12] 赵伏军, 谢世勇, 杨磊, 等. 基于层次分析法-模糊综合评价 (AHP-FCE)模型优化矿井通风系统的研究[J]. *中国安全科学学报*, 2006, 16(4): 91-96.
Zhao Fujun, Xie Shiyong, Yang Lei, et al. *China Safety Science Journal*, 2006, 16(4): 91-96.
- [13] 陈立杰, 赵士华, 张玉红, 等. 煤矿安全性评价模糊数学方法[J]. *煤矿安全*, 2005, 36(12): 58-61.
Chen Lijie, Zhao Shihua, Zhang Yuhong, et al. *Coal Mine Safety*, 2005, 36(12): 58-61.
- [14] 李凡修, 陆晓华, 梅平, 等. 煤矿安全预评价的集对分析模型及应用 [J]. *安全与环境学报*, 2005, 5(2): 118-120.
Li Fanxiu, Lu Xiaohua, Mei Ping, et al. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(2): 118-120.
- [15] 赵克勤. 集对分析及其初步应用 [M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000.
Zhao Keqin. *Set Pair Analysis and its preliminary application* [M]. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 2000.
- [16] 赵克勤. 集对分析中的不确定量及其确定不确定性方程组[J]. *吉林师范学院学报*, 1997(5): 381.
Zhao Keqin. *Journal of Jilin Teachers College*, 1997(5): 381.
- [17] 赵克勤. 集对分析中的联系数与不确定量 [J]. *大自然探索*, 1997, 16(1): 91.
Zhao Keqin. *Discovery of Nature*, 1997, 16(1): 91.
- [18] 赵克勤. 集对分析对不确定性的描述和处理 [J]. *信息与控制*, 1995, 24(3): 162-166.
Zhao Keqin. *Information and Control*, 1995, 24(3): 162-166.
- [19] 赵克勤, 宣爱理. 集对论——一种新的不确定性理论方法与应用[J]. *系统工程*, 1996, 14(1): 18-23, 72.
Zhao Keqin, Xuan Aili. *System Engineering*, 1996, 14(1): 18-23, 72.
- [20] 赵克勤, 黄德才. 基于 $a+bi+cj$ 型联系数的网络计划方法初探 [J]. *系统工程与电子技术*, 2000, 22(2): 29-31.
Zhao Keqin, Huang Decai. *Systems Engineering and Electronics*, 2000, 22(2): 29-31.
- [21] 赵克勤. 联系数及其应用[J]. *吉林师范学院学报*, 1996, 17(8): 50-53.
Zhao Keqin. *Journal of Jilin Teachers College*, 1996, 17(8): 50-53.

科技导报 2009.27(19) 73