

硫化矿石低温氧化性指标的相关性分析

李孜军, 王晓磊, 石东平

中南大学资源与安全工程学院国家金属矿安全技术研究中心, 长沙 410083

摘要 低温氧化性指标是硫化矿石自燃倾向性鉴定中的主要评价指标。针对多因素综合分析法在评价硫化矿石低温氧化性时测试指标数目过于繁多的问题,以冬瓜山铜矿7个矿样的评价指标为例,运用SPSS软件的相关性分析功能对指标间的相关性进行研究,并通过理论分析解释了相关关系的原因,以此达到对指标的简化目的。针对硫化矿石自燃倾向性鉴定指标的优化具有一定的指导意义。

关键词 硫化矿石;低温氧化;指标;SPSS;相关性

中图分类号 TD75

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.36.004

Analysis of the Correlation among Indexes of Sulfide Ores in Oxidation Process at Ambient Temperature

LI Zijun, WANG Xiaolei, SHI Dongping

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

Abstract Indexes of sulfide ores in oxidation process at ambient temperature are the main indicators in the identification of the spontaneous combustion tendency. The method of comprehensive analysis of multiple factors is widely used in evaluating the oxidizing strength of sulfide ores. However, this method needs lots of evaluation indexes and the process of determination is complicated and difficult. The multiple indexes need to be simplified. Correlation analysis is a way to solve this problem. In this paper, taking the sulfide ores of Dongguashan Copper as an example, the software SPSS is used to analyze the correlation of different indexes, including those of the weight gain, the rate of oxygen, the contents of SO_4^{2-} , the contents of $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ and the pH value, with theoretical interpretations. Based on this study, the main and important indexes can be chosen, to simplify indexes and to optimize the indexes in the identification of the spontaneous combustion tendency.

Keywords sulfide ores; oxidation at ambient temperature; index; SPSS; correlation

0 引言

硫化矿石低温氧化性指标是硫化矿石自燃倾向性鉴定中所采用的主要评价指标,硫化矿石低温氧化性的强弱直接反映其自燃倾向性的大小。目前,硫化矿石低温氧化性强弱的评价方法有很多,例如,前苏联以吸氧速度常数作为判定氧化性能指标;白银有色金属公司曾以 $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ 占全铁质量分数的比例作为评价指标等,但多数方法都是采用单一指标,评价结果过于片面,缺乏可信度。中南大学在总结已有评价方法的基础上提出多因素综合评判法^[1],将实验室条件下测定的吸氧速度、氧化增重率、水溶性 $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ 质量分数,

SO_4^{2-} 质量分数、pH 值等能够反映矿石氧化过程的指标进行综合分析,以此判定矿石氧化性能。多因素综合评判法能够克服单一指标评判存在的片面性和测量误差,结果更加精确可靠,但缺点在于多指标测定往往要花费大量的时间和精力,而且测试成本高。因此,为节省时间,节约成本,需对测试指标进行简化^[2-4]。

相关性分析是研究变量之间密切程度的一种统计方法,可以用于指标的简化。相关性强的指标说明在信息的反映上有重叠,可根据实际情况选其一进行测试。本文运用 SPSS 软件的相关分析功能对不同测试指标的相关性进行分析,得出

收稿日期:2011-05-13;修回日期:2011-12-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51074181);中南大学研究生学位论文创新资助项目(2010ssxt241)

作者简介:李孜军,副教授,研究方向为安全与环保研究,电子信箱:zijunli@mail.csu.edu.cn

相关系数。对于自燃倾向性指标体系的优化具有一定的参考价值。

1 SPSS 软件关于相关性分析功能简介

相关分析是统计学中非常成熟的基本理论之一。无论在自然科学领域,还是社会科学领域,现象与现象之间往往存在着相互依赖的关系,如果采用变量来反应这些现象的特征,则可表现为变量之间的函数关系或相关关系。

SPSS 软件是现今功能强大、应用极为广泛的统计软件之一,其实际应用范围为自然科学、社会科学、生物医学等领域,具有数据管理、统计分析、统计报表和图形显示等基本分析功能。在相关性分析方面,SPSS 软件具有强大的分析功能,可以进行双变量相关分析、偏相关分析和相似性测度 3 个过程。双变量相关分析是对指定的 2 个变量计算相关系数,进行显著性检验;偏相关分析是计算 2 个变量间在控制了其他变量的影响下的相关系数,进行显著性检验;相似性测度是对变量或观测量进行相似性或不相似性测度。其中,双变量相关分析适合硫化矿石低温氧化性指标中两两指标间的相关分析,因此本文采用此分析过程。SPSS 对于连续变量或等间隔测度变量的相关分析采用的是 Pearson 相关模型^[5]。

Pearson 相关模型对于相关系数 r 的定义为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \times \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

其中, X_i, Y_i 为两个变量的样本值; \bar{X}, \bar{Y} 为 X, Y 变量的样本均值; n 为样本量,即测试数据的个数。

利用式(1)求得的相关系数 r 的绝对值表示线性相关关系的强度, r 接近于 0 表示没有线性相关关系, r 绝对值接近于 1 表示 2 个变量有强烈的线性依赖关系。由于相关系数 r 是根据样本数据而不是总体数据计算出来的,存在抽样误差,因此不能仅根据 r 值大小来确定相关关系,必须进行显著性检验。按照统计假设理论,原假设为总体相关系数 ρ 为 0,即

$$H_0: \rho = 0; H_1: \rho \neq 0$$

如果满足 H_0 的条件,就可构造统计变量 t 如式(2)检验相关系数的显著性。

$$t = r \cdot \sqrt{\frac{n-2}{1-r^2}} \quad (2)$$

式中各字母符号意义同前。

这个统计变量是服从具有 $n-2$ 个自由度的 t 分布。利用指标数据计算统计变量的值,通过查表(“ t 分布分位数表”)求出 $t_{(\alpha/2)}(n-2)$ 。若 $|t| \geq t_{(\alpha/2)}(n-2)$ 成立,则拒绝 H_0 。说明 r 不是来自 $\rho=0$ 的整体,变量具有相关关系。一般认为, $\alpha=0.05$ 时, X, Y 两变量有显著性相关关系; $\alpha=0.01$ 时 X, Y 两变量具有高度显著性相关关系^[6]。

2 SPSS 软件在指标相关性分析中的应用

为了研究硫化矿石在低温氧化过程中各项指标之间的相关性,本研究对安徽铜陵冬瓜山铜矿等数十个国内矿山的测定指标数据进行分析^[7]。本文仅以冬瓜山铜矿为例,运用 SPSS 软件对不同指标间的相关性进行分析,求取相关系数 r ,并进行显著性检验。

2.1 指标的选取

在冬瓜山铜矿自燃倾向性研究中,共采取 13 个矿样,本文选取其中具有自燃或自热性的 7 个矿样(编号分别为 D1, D3, D4, D5, D6, D7, D13)进行分析。分析指标包括吸氧速度,氧化增重速度,水溶性 $Fe^{2+}+Fe^{3+}$ 质量分数, SO_4^{2-} 质量分数, pH 值等 5 个指标^[8]。为方便比较,研究中用吸氧率(吸氧量占矿样质量的比例)、增重率(增重量占矿样质量的比例)代替吸氧速度和氧化增重速度。同时,选择相同测试条件下同一时间段(分别选取氧化时间为 0, 5, 10, 15, 21, 26, 33d 等 7 个时间段)的测试数据。以 D1 矿样为例,测试数据如表 1 所示。

表 1 D1 矿样各指标测试数据
Table 1 The indexes of D1 ores

时间/d	吸氧率/%	增重率/%	$w(\text{水溶性 } Fe^{2+} + Fe^{3+})/10^{-6}$	$w(SO_4^{2-})/10^{-6}$	pH 值
0	0	0	0.5	5300	5.4
5	0.59	0.63	160	10400	5.1
10	1.98	2.10	202	10400	5.0
15	3.01	3.21	227	10400	5.0
21	4.29	4.65	191	8800	5.0
26	4.97	5.14	144	8800	5.0
33	5.25	5.80	207	—	5.0

2.2 硫化矿石低温氧化指标相关性分析过程

2.2.1 散点图

在进行相关性分析时,散点图是非常重要的工具,分析前应先做散点图,以初步判断两变量之间是否存在相关趋势,该趋势是否为直线趋势,以及数据中是否存在异常点^[9]。图 1—图 4 给出了两个指标之间的散点关系图(pH 值在氧化过程中变化不明显,在此不做分析)。

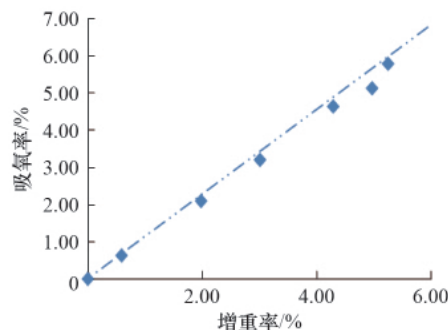


图 1 增重率与吸氧率散点关系图

Fig. 1 Correlation between weight gain and rate of oxygen

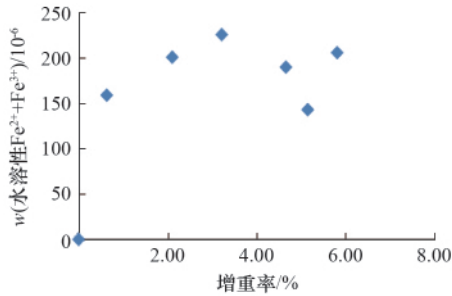


图2 增重率与水溶性 Fe²⁺+Fe³⁺质量分数散点关系图
Fig. 2 Correlation between weight gain and the contents of Fe²⁺+Fe³⁺

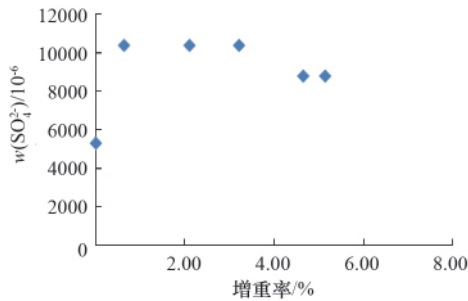


图3 增重率与 SO₄²⁻质量分数散点关系图
Fig. 3 Correlation between weight gain and the contents of SO₄²⁻

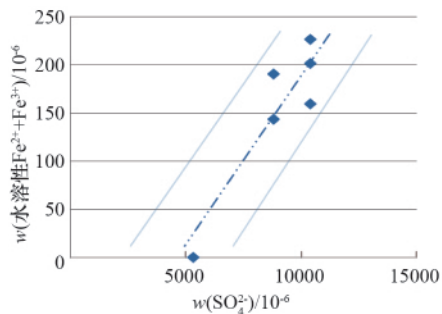


图4 SO₄²⁻质量分数与水溶性 Fe²⁺+Fe³⁺质量分数散点关系图
Fig. 4 Correlation between the contents of SO₄²⁻ and Fe²⁺+Fe³⁺

分析散点图可以发现,增重率与吸氧率的散点分布几乎呈一条直线,说明二者随时间的变化规律一致;增重率与水溶性 Fe²⁺+Fe³⁺质量分数、SO₄²⁻质量分数的散点分布杂乱无序,无明显的直线趋势;SO₄²⁻质量分数与水溶性 Fe²⁺+Fe³⁺质量分数的散点分布在总体趋势上呈现较明显的直线性,即二者随时间的变化规律也具有 consistency。

通过散点图的分析可以大致得到以下初步结论:(1) 吸氧率与增重率之间具有典型的线性相关性;(2) 水溶性 Fe²⁺+Fe³⁺质量分数与增重率以及 SO₄²⁻质量分数与增重率之间线性关系不明显;(3) 水溶性 Fe²⁺+Fe³⁺质量分数与 SO₄²⁻质量分数之间具有较明显的线性相关性。

2.2.2 基于 SPSS 软件的硫化矿石低温氧化性指标的相关分析

运行 SPSS 软件后,将时间(d)、吸氧率(%)、增重率(%)、水溶性 Fe²⁺+Fe³⁺质量分数 (×10⁻⁶)、SO₄²⁻质量分数 (×10⁻⁶)、pH 值等变量输入 SPSS 的数据编辑器中,如图 5。依次通过分析→相关→双变量菜单项启动分析程序。提交运行后,输出结果如表 2。

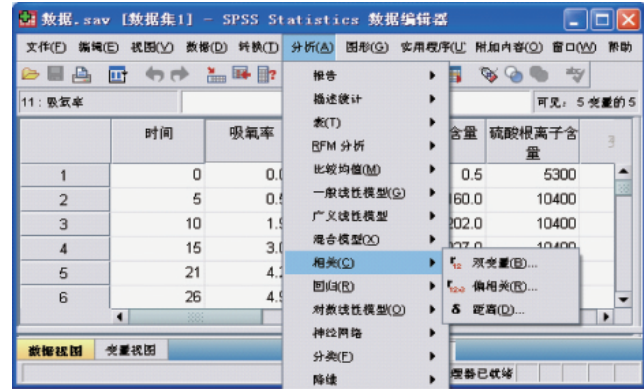


图5 指标数据的编辑
Fig. 5 Editing of index data

表 2 D1 矿样指标相关性分析结果
Table 2 Analysis of the correlations among indexes of D1 ores

低温氧化性指标	相关性	吸氧率	增重率	w(水溶性 Fe ²⁺ +Fe ³⁺)/10 ⁻⁶	w(SO ₄ ²⁻)/10 ⁻⁶
吸氧率	相关系数	—	0.999**	0.574	0.209
	显著性检验	—	0.000	0.178	0.577
增重率	相关系数	0.999**	—	0.582	0.294
	显著性检验	0.000	—	0.171	0.572
w(水溶性 Fe ²⁺ +Fe ³⁺)/10 ⁻⁶	相关系数	0.574	0.582	—	0.924**
	显著性检验	0.178	0.171	—	0.009
w(SO ₄ ²⁻)/10 ⁻⁶	相关系数	0.290	0.294	0.924**	—
	显著性检验	0.577	0.572	0.009	—

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关;*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。下同。

Notes: ** indicates significant correlation at the 0.01 level (two sides); * indicates significant correlation at the 0.05 level (two sides). The same as bellow.

通过表 2 可以看出,吸氧率和氧化增重率的相关系数基本接近于 1,显著性检验值为 0,即 2 个变量不相关的概率为 0,说明对于 D1 矿样 2 个指标具有高度的相关性;水溶性 Fe²⁺+Fe³⁺质量分数、SO₄²⁻质量分数的变化与吸氧率、增重率的相关系数较小,不具有显著的相关性;水溶性 Fe²⁺+Fe³⁺质量分

数和 SO_4^{2-} 质量分数的相关系数很高, 在 0.01 水平上显著相关。而从表 1 中可以发现, 在氧化过程中 pH 值变化不明显。

依此方法, 可对其余矿样 D3, D4, D5, D6, D7, D13 依次进行相关性分析。输出结果如表 3、表 4 所示。限于篇幅, 本文没有一一列举所有分析结果。

表 3 D3 矿样指标相关性分析结果
Table 3 Analysis of the correlations among indexes of D3 ores

低温氧化性指标	相关性	吸氧率	增重率	$w(\text{水溶性 Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})/10^{-6}$	$w(\text{SO}_4^{2-})/10^{-6}$
吸氧率	相关系数	—	0.0871*	0.854*	0.830*
	显著性检验	—	0.011	0.015	0.041
增重率	相关系数	0.871*	—	0.651	0.753
	显著性检验	0.011	—	0.113	0.084
$w(\text{水溶性 Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})/10^{-6}$	相关系数	0.854*	0.651	—	0.914*
	显著性检验	0.015	0.113	—	0.011
$w(\text{SO}_4^{2-})/10^{-6}$	相关系数	0.830*	0.753	0.914*	—
	显著性检验	0.041	0.084	0.011	—

表 4 D6 矿样指标相关性分析结果
Table 4 Analysis of the correlations among indexes of D6 ores

低温氧化性指标	相关性	吸氧率	增重率	$w(\text{水溶性 Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})/10^{-6}$	$w(\text{SO}_4^{2-})/10^{-6}$
吸氧率	相关系数	—	0.980**	0.855*	0.952**
	显著性检验	—	0.000	0.014	0.003
增重率	相关系数	0.980**	—	0.833*	0.949**
	显著性检验	0.000	—	0.020	0.004
$w(\text{水溶性 Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+})/10^{-6}$	相关系数	0.855*	0.833*	—	0.626
	显著性检验	0.014	0.020	—	0.184
$w(\text{SO}_4^{2-})/10^{-6}$	相关系数	0.952**	0.949**	0.626	—
	显著性检验	0.003	0.004	0.184	—

3 硫化矿石低温氧化性指标的相关性分析

通过 SPSS 软件对冬瓜山铜矿等数十个矿山的近百个矿样进行低温氧化性指标的相关性分析, 可以发现如下规律。

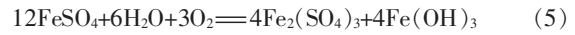
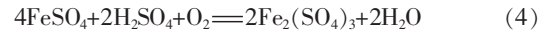
3.1 吸氧率与氧化增重率之间相关性

几乎所有矿样的吸氧率和氧化增重率的相关系数都在 0.9 以上, 在 0.01 水平上显著相关, 表现出极强的相关性。这一结论可以用两个指标的测定原理解释: 吸氧速度指标测定的依据是硫化矿石氧化过程中消耗了氧, 那么空气中的氧气浓度就会减少, 因此, 通过测定矿石氧化过程中氧的消耗速

度, 可以判断氧化性的强弱。氧化增重指标的应用前提是“硫化矿石在低温氧化过程中几乎无 SO_2 气体的放出”^[10-11], 通过对硫化矿石低温氧化机理的研究和大量现场实测数据已证明了这一前提的正确性。例如, 黄铁矿 (FeS_2) 在低温氧化过程中发生如下反应:



其生成物可进一步发生氧化反应:



反应中无气体放出, 根据质量守恒定律, 矿样质量的增加应该来自于从空气中吸收的氧气。因此, 吸氧率和氧化增重率两个指标的测定依据在本质上是一致的, 它们的指标相关性必然很好。

3.2 水溶性 $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ 质量分数与吸氧率、增重率之间的相关性

水溶性 $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ 质量分数与吸氧率、增重率之间的相关性不明显。如表 5 所示, 不同矿样相关性变化很大。D1, D3, D5 等矿样相关系数很低, 不满足显著性检验。而 D4, D13 的相关性很强。从反应式(3)~式(5)可知, 在硫化矿石低温氧化初期会产生 Fe^{2+} , 然而随着反应进行 Fe^{2+} 会进一步氧化生成 $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 等物质, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 在水中的溶解度很低, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 则是不溶于水的固体凝胶。因此, 测得的水溶性 $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ 离子含量并不能反映氧化反应的实际情况。

表 5 各矿样水溶性 $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ 质量分数与增重率指标的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of the ores between the contents of $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ and weight gain

矿样编号	D1	D3	D4	D5	D6	D7	D13
相关系数	0.582	0.651	0.950	0.078	0.833	0.893	0.969
显著性	0.171	0.113	0.001	0.901	0.020	0.007	0.000

3.3 SO_4^{2-} 与吸氧率、增重率之间相关性

SO_4^{2-} 与吸氧率、增重率之间相关性也不稳定, 不同矿样间具有较大差距, 如表 6 所示。与水溶性 $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ 质量分数相同, SO_4^{2-} 质量分数指标的不稳定性也主要在于生成溶解度较低的硫酸盐, 如反应式(4)和式(5)所示, 造成的 SO_4^{2-} 离子损失。因此, SO_4^{2-} 也不能正确的反映硫化矿石低温氧化过程。

表 6 各矿样 SO_4^{2-} 质量分数与增重率指标的相关系数

Table 6 Correlation coefficients of the ores between the contents of SO_4^{2-} and weight gain

矿样编号	D1	D3	D4	D5	D6	D7	D13
相关系数	0.294	0.753	0.836	0.935	0.949	0.934	0.819
显著性	0.572	0.084	0.038	0.020	0.040	0.006	0.056

3.4 水溶性 $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ 质量分数与 SO_4^{2-} 质量分数相关性

大多数矿样的水溶性 $\text{Fe}^{2+} + \text{Fe}^{3+}$ 质量分数与 SO_4^{2-} 质量分数

相关性相对较好,如表 7 所示。通过 3.2 和 3.3 节的分析已经得出,由于氧化反应过程中水溶性 $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ 离子与 SO_4^{2-} 离子的消耗,导致二者与其他指标的相关性较差。同时,还可以从反应式(3)—式(5)中看出,氧化反应过程中水溶性 $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ 离子与 SO_4^{2-} 离子的产生与消耗具有一致性,即:水溶性 $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ 离子往往伴随着 SO_4^{2-} 离子以可溶性硫酸盐的形式共同产生,以难溶性或不溶性硫酸盐的形式同步消耗。这种同步性导致了水溶性 $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ 质量分数与 SO_4^{2-} 质量分数相关性相对较好。

表 7 各矿样 SO_4^{2-} 质量分数与水溶性 $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ 质量分数的
相关系数

Table 7 Correlation coefficients of the ores between the
contents of $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ and SO_4^{2-}

矿样编号	D1	D3	D4	D5	D6	D7	D13
相关系数	0.924	0.914	0.908	0.905	0.626	0.847	0.713
显著性	0.009	0.011	0.012	0.011	0.184	0.033	0.112

此外,从表 1 可以看出,pH 值在反应过程中变化不明显。一方面是由于 pH 值的测试精度不是很高,另一个主要原因也是反应过程中 H^+ 的生成与消耗问题,例如反应式(3)和反应式(4)中 FeS_2 与氧气和水反应生成 H^+ 和 FeSO_4 ,在进一步的氧化过程中反应过程中 FeSO_4 又与 H^+ 和氧气反应生成 H_2O 。

4 结论

通过 SPSS 软件对多个矿山大量矿样的低温氧化性指标进行相关性分析,结合硫化矿石低温氧化机理,可得出以下结论。

(1) 氧化增重率与吸氧率的指标测定是以硫化矿石低温氧化反应机理为依据的,能够正确的反映低温氧化过程。因此,氧化增重率和吸氧率应该作为反映硫化矿石低温氧化性的主要测定指标。同时,由于氧化增重率与吸氧率的相关性很好,二者随时间的变化规律一致,在实际应用中可根据实际情况选其一进行测定。

(2) 水溶性 $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ 质量分数、 SO_4^{2-} 质量分数和增重率、吸氧率的相关性不明显,不同矿样的差别很大。因此一般情况下不能作为主要指标采用。而 pH 值由于反应过程中的消耗以及测试精度的原因也不能作为主要测试指标。

综合以上分析,在硫化矿石低温氧化性的 5 个指标中,吸氧率和氧化增重率应作为主要指标;水溶性 $\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$ 质量分数、 SO_4^{2-} 质量分数及 pH 值等测试指标可作为参考指标。

参考文献 (References)

- [1] 吴超,孟庭让.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,1995:50-63.
Wu Chao, Meng Tingrang. Theory and technology for control of the mine spontaneous combustion of sulphide ores [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 50-63.
- [2] 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. Copper Engineering, 2003(1): 40-43.
- [3] Wu C, Li Z J, Zhou B. Correlations among factors of sulfide ores in oxidation process at ambient temperature [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2004, 14(1): 175-179.
- [4] Wu C, Li Z J, Zhou B. Coincidence on relevant substances of sulfide ores in the oxidation process at ambient temperature and a new method for predicting fire [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2003, 13(6): 633-638.
- [5] 黄润龙,管于华.数据统计与分析技术-SPSS 软件实用教程[M].北京:高等教育出版社,2004:160-161.
Huang Runlong, Guan Yuhua. Data statistics and analysis technique[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004: 160-161.
- [6] 王国富,王志忠.应用统计[M].长沙:中南大学出版社,2003:70-73.
Wang Guofu, Wang Zhizhong. Applied statistics [M]. Changsha: Central South University Press, 2003: 70-73.
- [7] 中南大学矿石自燃课题组.冬瓜山高温高硫矿床矿石自燃性与预防技术研究[R].长沙:中南大学,2002.
Central South University Discussion Group. Dangerousness assessment of ores spontaneous combustion in high temperature high sulfur deposits[R]. Changsha: Central South University, 2002.
- [8] 贺兵红,吴超.硫化矿石自燃倾向性的实验室测定方法与应用[J].安全与环境工程,2006,13(1):92-95.
He Binghong, Wu Chao. Safety and Environmental Engineering, 2006, 13(1): 92-95.
- [9] 林杰斌,林川雄.SPSS 12 统计建模与应用实务[M].北京:中国铁道出版社,2005:384-387.
Lin Jiebin, Lin Chuanxiong. Statistical modeling and application practice of SPSS12[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2005: 384-387.
- [10] 蔡美芳,党志.实验室条件下磁黄铁矿的氧化机理[J].华南理工大学学报:自然科学版,2005,33(11):10-14.
Cai Meifang, Dang Zhi. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2005, 33(11): 10-14.
- [11] 孙浩,阳富强,吴超,等.硫化矿自燃机理及防治技术研究进展[J].金属矿山,2009(12):5-10.
Sun Hao, Yang Fuqiang, Wu Chao, et al. Metal Mine, 2009(12): 5-10.

(责任编辑 张军,岳臣)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。