



硫化矿石自热过程的分维特性

潘伟^{1,2}, 吴超², 李孜军², 杨月平³

- (1. 辽宁工程技术大学 矿山热动力灾害与防治教育部重点实验室, 阜新 123000;
2. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;
3. 南华大学 核资源工程学院, 衡阳 421001)

摘要: 为揭示硫化矿石自热过程的分形特征, 以从现场采集的矿石样品作为实验材料, 开展矿石自热特性实验, 集成小波技术和分形理论对实测温度数据进行研究。结果表明: 仅矿样 1、2、3 和 8 出现明显自热现象, 自热起始温度分别为 136.3、178.5、195.4 和 200 °C, 在正常采矿条件下, 矿石不易产生自热现象; 矿样自热过程具有稳定的关联维数, 验证了基于分形理论研究自热过程的可行性; 在实验条件基本一致的前提下, 随着自热起始温度的增大, 矿样自热过程的关联维数逐渐减小, 可采用关联维数来定性判断自热倾向性强弱; 自热效果明显的矿样, 其实验后期的关联维数大于实验前期的值, 因此, 可根据关联维数的变化特征来判定矿样出现明显自热的可能性, 从而可减少重复实验的工作量。

关键词: 硫化矿石; 自热过程; 小波技术; 分形理论; 关联维数; 自热倾向性

中图分类号: TD75

文献标志码: A

Fractal dimension characteristics of self-heating process of sulfide ores

PAN Wei^{1,2}, WU Chao², LI Zi-jun², YANG Yue-ping³

- (1. Key Laboratory of Mine Thermo-motive Disaster and Prevention, Ministry of Education, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;
2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
3. School of Nuclear Resources Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: To reveal the fractal characteristics of self-heating process of sulfide ores, ore samples from a copper mine were taken as experimental materials, and the self-heating characteristics were measured in laboratory. Furthermore, the measured temperature was studied by integrating wavelet technology and fractal theory. The results indicate that only the ore samples 1, 2, 3 and 8 appear obvious self-heating tendency, and their self-heating initiative temperatures are 136.3, 178.5, 195.4 and 200 °C, respectively, which mean that they are difficult to show self-heating tendency under normal mining conditions. The correlation dimension of self-heating process of ore samples is stable, meaning that it is feasible to study the self-heating process based on fractal theory. If the experimental conditions are basically consistent, the correlation dimension of self-heating process of ore samples decreases with the increase of the self-heating initiative temperature. So, the correlation dimension can be applied to qualitatively determine the self-heating tendency. For the ore samples appearing obvious self-heating tendency in the experiment, the correlation dimension of the late period is greater than that of the previous period. Therefore, the possibility for obvious self-heating tendency of ore samples can be determined according to the variation characteristics of the correlation dimension, which can reduce the workload of repeated experiments.

Key words: sulfide ore; self-heating process; wavelet technology; fractal theory; correlation dimension; self-heating tendency

采场中的硫化矿石堆积在潮湿的环境中, 将生成大量酸以及有毒有害重金属离子, 严重污染矿区周边环境^[1-2]。氧化过程中释放的反应热不仅会恶化井下作业环境, 还可能诱发矿石自燃火灾^[3-7], 严重影响国家矿产资源安全和井下作业人员的生命健康安全。随着地表矿产资源的逐渐匮乏, 深井开采已成大势所趋, 深井开采的高温问题可能导致高硫矿山自燃火灾的频发。因此, 对硫化矿石氧化自燃机制及预防控制技术进行研究是保证高硫矿山实现安全、高效生产的前提。

近年来, 对于硫化矿石自燃领域的研究主要集中在自燃倾向性评价方面^[8-14]。譬如, 李孜军^[8]研究了硫化矿石自燃倾向性的鉴定标准, 提出了鉴定指标体系和测试规范; 阳富强等^[10]建立了硫化矿石自燃倾向性综合判定的物元模型; 谢正文等^[11]基于信息熵和集对分析理论, 对硫化矿石自燃倾向性综合判定模型进行了研究; 胡汉华等^[12]建立了硫化矿石自燃倾向性等级分类的 Fisher 判别方法。

在对硫化矿石自燃倾向性进行综合评价时, 常用的一个评价指标是矿石的自热起始温度, 该值是通过开展自热特性实验得到。由于矿石氧化自热是一个多因素强耦合的非线性演化过程, 因此, 借助非线性动力学理论来研究其非稳态自热过程, 是值得深入研究的课题。关于该方面的研究工作, 迄今还未见相关报道。在此, 本文作者以现场采集的硫化矿石样品作为实验材料, 在室内开展矿石自热特性实验, 采用小波技术和分形理论对其自热过程进行分析, 从而为高硫矿山防治矿石自燃火灾提供一定的借鉴。

1 硫化矿石自热特性实验

1.1 实验材料

实验矿样取自国内某铜矿, 采样方式为多点采样。本次实验选取矿样 10 个, 编号依次为矿样 1~10。表 1 所列为矿样 1 的化学成分。

表 1 矿样 1 的化学成分

Table 1 Chemical composition of ore sample 1 (mass fraction, %)

Fe _T	Fe ²⁺	Fe ³⁺	TS	S ⁰	Cu	Pb	Zn
34.710	0.035	0.010	38.330	0.074	2.650	0.041	0.110

Fe_T is total content of iron.

金属矿样 1 的主要化学成分为黄铁矿、闪锌矿、黄铜矿及少量方铅矿, 脉石矿物主要为石英。其中, 黄铁矿含量为 85%(质量分数), 呈碎裂状, 常被闪锌

矿和黄铜矿溶蚀交代, 或被黄铜矿和方铅矿连生穿插交代。图 1 所示为矿样 1 的光学显微组织。

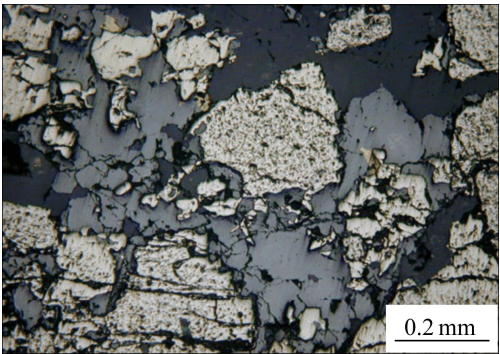


图 1 矿样 1 的光学显微组织

Fig. 1 Photomicrograph of ore sample 1

1.2 实验装置及方法

图 2 所示为实验装置示意图。每个矿样均取 100 g, 含水率为 4%~5%, 粒度小于 425 μm。由于矿区所在地属典型北温带大陆性气候寒冷区, 年平均气温为 4.7 ℃。考虑到采深增大会导致井下采场环境温度有所升高, 故设定实验初始温度为 15 ℃, 高温试验箱平均升温速度为 0.4 ℃/min 左右, 待试验箱内环境温度上升到设定温度后, 恒温等待约 30 min, 观察矿样有无产生明显自热, 实验最高温度不超过 220 ℃。实验完成后, 将测温仪采集的温度数据导入计算机, 对其作进一步分析处理。

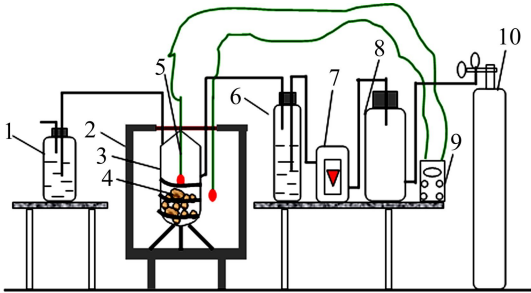


图 2 实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental apparatus: 1—Poisonous gas absorption bottle; 2—Automatic heating incubator; 3—Reactor; 4—Ores; 5—Temperature probe; 6—Humidifier; 7—Flow meter; 8—Buffering bottle; 9—Automatic temperature recorder; 10—Oxygen cylinder

2 研究方法

2.1 实测温度序列的小波变换

本次实验中采集的矿样温度变化数据是高温试验

箱梯度升温与矿样氧化自热共同作用的结果,且前者起主导作用。因此,将矿样自热信息从实测温度序列中分离出来非常必要。鉴于此,本文作者引入小波分析技术对实测温度序列进行小波分解与重构,温度序列的低频成分(大尺度逼近部分)反映的是梯度升温对矿样温度变化的影响,高频成分(细节部分)蕴藏着矿样的自热复杂信息。

小波分析技术源于函数的伸缩和平移,是 Fourier 变换、Gabor 变换发展的结果。对于任意一个信号函数 $f(t)$,其连续小波变换公式如下^[15]:

$$W_{\varphi}f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\varphi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \quad (1)$$

式中: $W_{\varphi}f(a,b)$ 为小波变换系数; $f(t)$ 为拟变换的信号; $\varphi(t)$ 为基小波; $*$ 为共轭; a 为尺度因子; b 为平移因子。

选择适当的小波函数是进行小波分析的关键,本文作者参考桑燕芳等^[16]提出的方法对 7 个常用小波系中的 54 个小波函数进行优选。利用不同的小波函数将实测温度序列分解为低频和高频两个部分,然后对比低频重构序列和原序列的特征值,建立小波函数的选取准则如下。

1) 由于蕴含矿样自热信息的高频重构序列在原序列中所占的比例很小,低频重构序列和原序列的均值 \bar{x} 值相差不宜过大。

2) 由于去除了矿样自热过程中的复杂信息,因此相比较原序列,低频重构序列的变差系数 C_v 值应该有所减小。

3) 自热复杂信息的干扰会造成原序列的相关性减弱,消除这些干扰后,低频重构序列的自相关系数 r_1 值应该有所增大。

4) 低频重构序列在原序列中所占的比例大,因此,应大致保持原序列的基本特征,其偏态系数 C_s 值与原序列的 C_s 值应该差别不大。

2.2 矿石自热过程的分维提取

设研究序列为 $\{x_i\}_{i=1}^n$, 对其重构相空间后的元素为

$$X_i = \{x_i, x_{i+\tau}, \dots, x_{i+(m-1)\tau}, i=1, 2, \dots, N\} \quad (2)$$

式中: m 为嵌入维数; τ 为延迟时间; $N=n-(m-1)\tau$ 为重构后的相点数; n 为序列长度。

在重构相空间时,采用式(3)确定延迟时间:

$$C_{xx}^m(\tau) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m-1} \{[x_i - \bar{x}][x_{i+j\tau} - \bar{x}]\} \quad (3)$$

式中: $C_{xx}^m(\tau)$ 为复自相关函数; \bar{x} 为序列的均值。

关于延迟时间 τ 的选择,有研究者认为选择 $C_{xx}^m(\tau)$ 的第一个零点对应的时间^[17],还有研究者认为当 $C_{xx}^m(\tau)$ 的值变为其初始值的 $1/e$ 和 $1-1/e$ 时所对应的时间^[18]。

对于观测得到的数据序列,由于延迟时间计算方法的选择不同,计算结果相差会比较大。因此,实际在重构相空间时, τ 的选取存在一定的范围,即保证 τ 不能过大,也不能过小。这是由于当 τ 过小时,重构相空间中相似信息过多,导致有效信息较少;当 τ 过大时,重构相空间中的相点会变得毫不相关,对于较短的序列进行高维重构还会导致用于分析的相点数不足。由于采集的矿样温度数据有限,根据经验本文作者取 τ 的最大估计值为 10,从 1~10 逐渐增大 τ ,计算式(3)对应的函数值,找出第一个零点或最接近零点对应的 τ ,将其定义为最佳延迟时间。

采用 G-P 算法提取矿石自热过程的关联维数,计算步骤如下^[19]:

1) 对于 m 维相空间,定义其关联函数为

$$C(m,r) = \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \Theta[r - |X_i - X_j|] \quad (4)$$

式中: $|X_i - X_j|$ 为相点 X_i 与 X_j 的欧氏距离; Θ 为 Heaviside 函数; r 为临界距离,是设定的一个较小正数; $C(m,r)$ 表示相空间中两相点之间距离小于 r 的概率。

2) 适当调整 r 的取值,在一定区间内满足 $C(m,r) \propto r^{D(m)}$,这里的 $D(m)$ 称为关联维数估计值。

3) 当 m 从小到大取值时,相应的 $D(m)$ 也会发生改变。当 m 等于饱和嵌入维数 m_c 时, $D(m)$ 将趋于稳定,此时的 $D(m)$ 值即为该序列的关联维数 D_2 。

本计算中所有工作均在中南大学高性能网格计算平台上完成,计算编程软件为 Matlab7.4.0。

3 结果与分析

3.1 矿石自热测定结果分析

实验发现,部分矿样温度多次高于试验箱内的环境温度。在此条件下,确定矿样的自热起始温度是一个关键问题。经多次实验,本文作者认为,当试验箱升温时,若某时刻的矿样温度高于环境温度,可认为此时的环境温度即为自热起始温度;当试验箱恒温时,若某时刻的矿样温度高于环境温度,还需比较此时的矿样温度是否比试验箱开始恒温时的环境温度高。如果矿样温度高于该值,则认为该环境温度值为自热起

始温度; 否则, 则不认为矿样出现明显自热。这是因为试验箱恒温一段时间后, 箱内的环境温度有时会低于开始恒温时的值, 此种情况下矿样温度高于环境温度很有可能缘于试验箱梯度升温的滞后效应。

对 10 个矿样的自热特性曲线进行分析, 结果发现仅矿样 1、2、3 和 8 出现明显自热, 自热起始温度分别为 136.3、178.5、195.4 和 200 ℃。图 3 所示为矿样 1 的自热特性曲线, 该矿样首次出现明显自热的时间约在 7~7.5h。由于矿区所在地位于寒带, 地表和井下采场的环境温度比南方矿山低很多, 对抑制矿石的氧化自热非常有利, 释放的少量反应热很容易散失, 可有效防止矿石快速氧化升温。

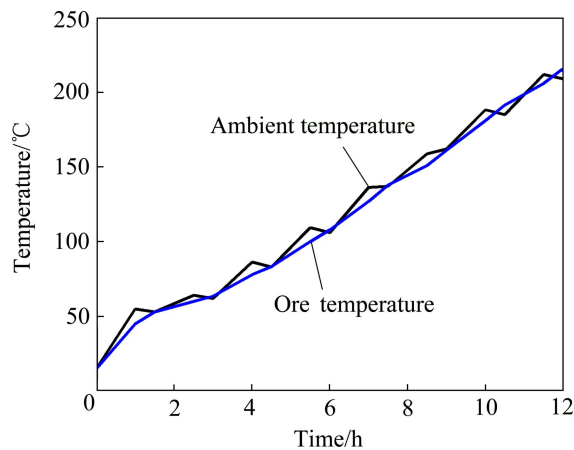


图 3 矿样 1 自热特性曲线

Fig. 3 Self-heating characteristic curves of ore sample 1

3.2 小波函数优选

由于实测温度数据有限, 采用 3 次样条插值对矿样 1、2、3 和 8 的实测温度序列进行扩充, 扩充后的序列长度均为 241。由于温度增量能够更为直观地反映矿石前后时刻的温度变化情况, 因此, 以温度增量序列作为研究对象, 对其进行小波函数优选。为使计算结果具有可对比性, 在满足前述小波选取准则的前

提下, 4 个矿样对应序列优先选择同一种小波函数。

小波优选结果表明, 对于 4 个矿样都适用的小波函数为 Rbio1.3。表 2 所列为各个矿样温度增量序列与低频重构序列特征值的变化情况。由表 2 可知, 各个矿样对应序列均具有很好的相关性, r_1 值大于 0.93。以正偏为主, 仅矿样 8 对应序列为负偏。 C_s 绝对值差别很大, 最大值为 0.9610, 最小值仅为 0.0638。小波变换后低频重构序列与原序列的特征值差别不大。

3.3 矿石自热过程的分形特征

以矿样 1 为例, 应用 3 次样条插值对其实测温度序列进行扩充, 并构造温度增量序列。选择 rbio1.3 小波对其温度增量序列进行小波分解, 将第一层分解的高频系数进行小波重构, 然后将重构得到的高频序列标准化, 进而计算该序列(以下简称为研究序列)的延迟时间 $\tau=7$ 。

采用 G-P 算法提取该矿样研究序列的关联维数 D_2 , 嵌入维数 m 从 2 依次增大, 反复求取关联积分 $C(m,r)$ 并绘制 $\ln C(m,r)-\ln r$ 关系曲线, 如图 4 所示。由图 4 可知, $\ln C(m,r)$ 先是随着 $\ln r$ 的增大而增大, 然后逐渐趋于稳定。对应不同的 m 值, $\ln C(m,r)-\ln r$ 曲线存在无标度区(即图中直线相关的部分), 由此可认为矿样 1 研究序列具有分形特征。

D_2 计算过程中发现, 关联维数估计值 $D(m)$ 随着 m 的增大逐渐收敛。程序设定当 $D(m)$ 与 $D(m-1)$ 的关系满足式(5)时终止运算, 此时的 m 即为该序列的饱和嵌入维数 m_c , 对应的 $D(m)$ 为所求的关联维数 $D_2^{[20]}$ 。

$$[D(m)-D(m-1)]/D(m)\leq 10\%$$

(5)

计算得到矿样 1 研究序列的 $m_c=9$, $D_2=2.59$, 计算结果如图 5 所示, 图中 RMSE 为均方差, SSE 为残差平方和, R 为相关系数; R_2 为可决系数。

同法计算其余 3 个矿样研究序列的 D_2 值, 并绘制 D_2 与自热起始温度的关系曲线如图 6 所示。由图 6 可

表 2 各个矿样温度增量序列与低频重构序列的特征值

Table 2 Characteristic values for temperature increment series and low frequency reconstructed series of ore samples

Ore sample No.	Temperature increment series				Low frequency reconstructed series			
	\bar{X}	C_v	r_1	C_s	\bar{X}	C_v	r_1	C_s
1	0.8375	0.3752	0.9635	0.7199	0.8375	0.3751	0.9645	0.7223
2	0.7958	0.5351	0.9695	0.0638	0.7958	0.5349	0.9701	0.0650
3	0.8083	0.7411	0.9661	0.2612	0.8083	0.7409	0.9674	0.2637
8	0.7917	0.8166	0.9327	-0.9610	0.7917	0.8165	0.9351	-0.9626

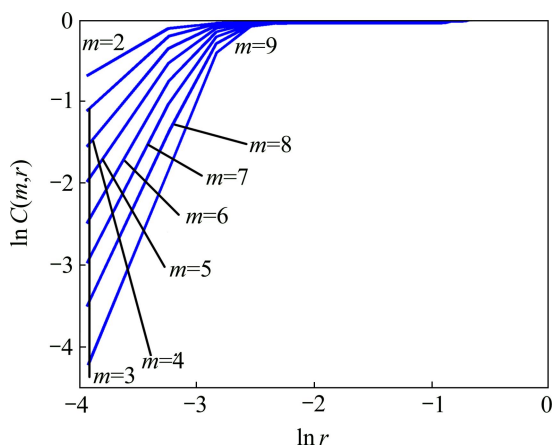


图 4 矿样 1 研究序列的 $\ln C(m,r)-\ln r$ 曲线

Fig. 4 $\ln C(m,r)-\ln r$ curves for research series of ore sample 1

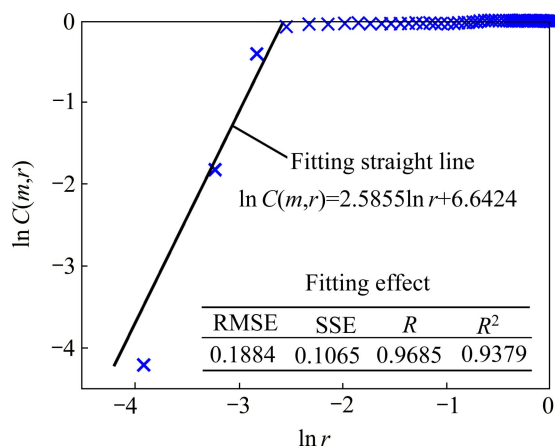


图 5 矿样 1 研究序列的 D_2 计算结果($m=9$)

Fig. 5 D_2 calculation results for research series of ore sample 1 ($m=9$)

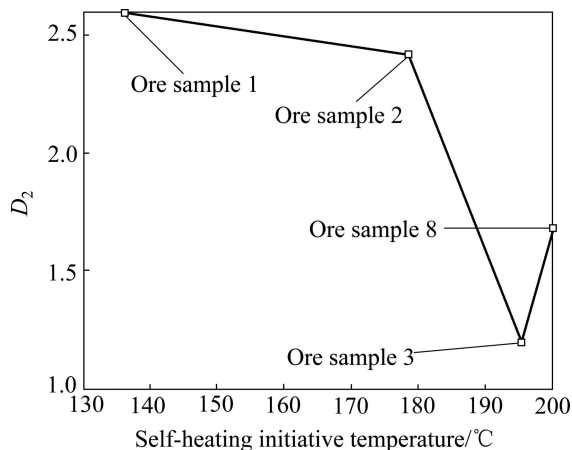


图 6 D_2 与自热起始温度的关系

Fig. 6 Relationship between D_2 and self-heating initiative temperature

知, 4 个矿样的氧化自热过程均具有稳定的 D_2 , 表明自热过程具有分形特征, 验证了基于分形理论研究自热过程的可行性。随着矿样自热起始温度的增大, 除了矿样 8, 其余矿样研究序列的 D_2 值呈逐渐减小趋势。实验条件基本一致, 但各个矿样的 D_2 值差别较大, 是因为尽管矿样取自同一个矿山, 但其内部的矿物组成和化学成分并不完全一致。

硫化矿石产生明显自热的根本原因取决于其氧化反应的内在特点。研究结果显示, 硫化矿石的氧化反应速度会随着温度的升高而增大, 同时释放出更多的反应热, 这是一个动态的非线性反馈过程。当矿石温度高于其自热起始温度时, 矿石会进入更为复杂剧烈的高速氧化阶段(即快速自热阶段), 该阶段内矿石自热升温效果明显。 D_2 作为自热过程复杂程度的一个度量, D_2 越大, 表明自热过程越复杂。对于矿样 1~3, 实验时段均为 0~12 h(矿样 8 实验时段为 0~15 h), 梯度升温方式基本相同, 自热起始温度越低的矿样进入高速氧化阶段的时间会越早(矿样 1 明显自热的时间约在 7~7.5 h, 矿样 2 和矿样 3 明显自热的时间在 10 h 以后), 相同时段内, 其自热过程必然会更复杂, 宏观表现就是其研究序列的 D_2 值更大。因此, 在保证实验条件基本一致的前提下, 可采用 D_2 来定性判断矿石自热倾向性的强弱。

为揭示矿石自热过程中不同氧化时段 D_2 的变化情况, 将这 4 个矿样的研究序列拆分为等长度的 2 段子序列, 分别计算其对应的 D_2 值, 计算时所有子序列的 τ 和 m_c 都需重新确定, 所得结果如图 7 所示。由图 7 可知, 4 个矿样实验后期的 D_2 值均大于实验前期, 平均增幅达到 83.47%, 这是因为随着实验的进行, 试验箱内环境温度不断升高, 促使硫化矿石氧化自热反应加剧, 导致自热过程变得更为复杂。因此, 对于那

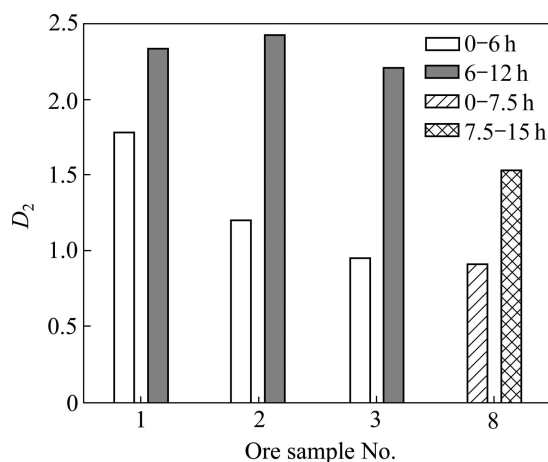


图 7 矿样不同时段 D_2 的变化

Fig. 7 D_2 variation of ore samples at different times

些实验过程中没有明显自热的矿样,可简单根据其自热过程中 D_2 的变化特征来判定矿样是否可能出现明显自热。具体判据为,如果实验后期的 D_2 大于实验前期的值,意味着矿样在温度升高的情况下能够加速氧化,该种情况下矿样可能出现明显自热;反之,则不认为矿样可能出现明显自热。对于第一种情况,可对实验条件进行微调(如增大供氧量等),再重复 1~2 次实验,观察矿样自热效果是否变得明显;对于第二种情况,则无需再进行实验,如此可减少重复实验的工作量。

在具体操作时,重点是如何对矿样研究序列进行分段。理论上,以环境温度与自热起始温度的关系作为分段标准,将矿样氧化自热过程分为低速氧化和高速氧化两个阶段,能够得到理想的判定结果,但这里自热起始温度未知。因此,在实际对某矿样研究序列进行分段时,应预先估测一下该矿样的自热起始温度,选取的分段参考值适当低于该估测值,如此能够将可能出现的高速氧化阶段包含在第二段子序列中,提高 D_2 的分段辨识效果。同时,在充分利用实测温度数据的前提下,为消除序列长度对计算结果的影响,保证分段子序列的长度一致。

以实验过程中未见明显自热的 6 个矿样(样品 4、5、6、7、9 和 10)进行验证。首先对这 6 个矿样的矿物组分进行分析,发现金属矿物以黄铁矿为主,有利用价值的组分包括黄铜矿和闪锌矿。参考本课题组多年来对国内多个高硫矿山典型矿样的测定结果,可知当矿样含水率为 5% 时,黄铁矿的氧化反应速度在环境温度高于 100 ℃ 时才会有所增大。结合矿样 1、2、3 和 8 的自热特性测定结果,充分考虑各个矿样实验条件的差异,本文作者认为分段参考温度介于 102~125 ℃ 为宜。

按前述方法对这 6 个矿样的实测温度数据进行处理,得到分段温度区间及计算结果如表 3 所列。由表 3 可知,矿样 4、5 和 7 实验后期的 D_2 均大于实验前期的 D_2 值,表明矿样有可能出现明显自热。因此,对这 3 个矿样进行重复实验,实验过程中仍未发现矿样有明显自热迹象,表明这 3 个矿样的自热起始温度偏高。在着火点实验中得以证实,这 3 个矿样只有在接近着火点时才能出现明显自热,以大量冒烟作为着火标准,3 个矿样的着火点分别为 442、382 和 442 ℃。由于正常采矿条件下不可能有如此高的环境温度,因此,不认为这 3 个矿样有明显自热的可能。实验后期,矿样 6、9 和 10 的 D_2 小于实验前期的 D_2 值,可能原因在于经过前一阶段的氧化反应之后,矿样表面已逐渐被氧化,导致自热过程复杂程度降低(矿样 9 体现得尤其明显)。对其进行重复实验,未发现这 3 个矿样有明显自热迹象。

进行硫化矿石自热特性实验的主要目的是为了揭示矿石自热效果与试验箱内环境温度之间的关系,确定导致矿石快速氧化的最低环境温度。理论上,随着环境温度的升高,矿石氧化放热量增多,与此同时,散热条件变差。当环境温度达到某一临界值时,会出现放热量大于散热量的情况,此时,矿石因聚热升温而产生明显自热。但在实际测定过程中,由于矿样产热量少和其他影响因素的制约,常会出现矿样温度不超过环境温度的情况,这样就很难确定矿样的自热起始温度。为得到相对精确的测定结果,一般采用多次重复实验。本文作者从硫化矿石氧化自热过程的复杂程度变化角度,结合室内实验,提出基于分段 D_2 比较的硫化矿石自热可能性的判定方法,能够避免大规模的重复实验,但矿样的含水率、粒度分布和矿物组分等对自热测定结果有一定的影响,因此,研究结论的

表 3 分段温度区间及计算结果

Table 3 Temperature range and calculation results for subsection research series of ore samples

Ore sample No.	Temperature range/℃		Calculation result					
			Subsection I			Subsection II		
	Subsection I	Subsection II	τ	m_c	D_2	τ	m_c	D_2
4	[15.0,102.6)	[102.6,203.0]	2	7	0.77	8	7	3.65
5	[15.0,114.4)	[114.4,216.0]	9	8	1.10	8	8	2.99
6	[15.0,110.6)	[110.6,210.0]	8	8	2.90	9	8	2.85
7	[15.0,120.2)	[120.2,204.0]	8	8	1.72	9	8	1.96
9	[15.0,124.6)	[124.6,212.0]	8	6	1.07	8	4	0.39
10	[15.0,115.0)	[115.0,193.0]	3	8	2.94	8	6	2.86

普适性有待进一步验证。

4 结论

1) 自热特性实验结果表明: 仅矿样 1、2、3 和 8 出现明显自热, 自热起始温度分别为 136.3、178.5、195.4 和 200 °C。考虑到矿区所在地位于寒带, 井下采场的环境温度偏低, 在正常采矿条件下矿石的自热倾向性较弱。

2) 矿样氧化自热过程具有分形特征, 验证了基于分形理论研究自热过程的可行性。在实验条件基本一致的前提下, 随着自热起始温度的增大, 矿样自热过程的 D_2 逐渐减小, 此种情况下可采用 D_2 来定性判断矿石自热倾向性强弱。

3) 实验过程中自热效果明显的矿样, 其实验后期的 D_2 均大于实验前期的 D_2 值, 因此, 可根据自热过程中 D_2 的变化特征来判定矿样出现明显自热的可能性, 如此可减少重复实验的工作量。

REFERENCES

- [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: 3–78.
WU Chao, MENG Ting-rang. Theory and technology for control of the mine spontaneous combustion of sulphide ores[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 3–78.
- [2] MURPHY R, STRONGIN D R. Surface reactivity of pyrite and related sulfides[J]. Surface Science Reports, 2009, 64: 1–45.
- [3] NINTEMAN D J. Spontaneous oxidation and combustion of sulfide ores in underground mines[R]. Information Circular 8775, USA: Bureau of Mines, 1978: 1–40.
- [4] WU C, LI Z J. A simple method for predicting the spontaneous combustion potential of sulfide ores at ambient temperature[J]. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section A, 2005, 114(2): 125–128.
- [5] 潘 伟, 吴 超, 李孜军, 汪发松, 郭 宁. 硫化矿石堆动态自热过程模拟[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(7): 2126–2131.
PAN Wei, WU Chao, LI Zi-jun, WANG Fa-song, GUO Ning. Simulation experiment of dynamic self-heating process of sulfide ore heap[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(7): 2126–2131.
- [6] YANG F Q, WU C, LI Z J. Investigation of the propensity of sulfide concentrates to spontaneous combustion in storage[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, 24: 131–137.
- [7] WU C, LI Z J, LI M. Chemical thermodynamic mechanism of sulfide ores during oxidation and self-heating process[C]// Proceedings of the 2007 International Symposium on Mining Safety Science and Technology. Beijing: Science Press, 2007: 2435–2439.
- [8] 李孜军. 硫化矿石自燃机理及其预防关键技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007: 91–94.
LI Zi-jun. Investigation on the mechanism of spontaneous combustion of sulphide ores and the key technologies for preventing fire[D]. Changsha: Central South University, 2007: 91–94.
- [9] 李孜军, 古德生, 吴 超. 高温高硫矿床矿石自燃危险性的评价[J]. 金属矿山, 2004(5): 57–59.
LI Zi-jun, GU De-sheng, WU Chao. Dangerousness assessment of ore spontaneous combustion in high temperature high sulfide deposits[J]. Metal Mine, 2004(5): 57–59.
- [10] 阳富强, 吴 超, 李孜军. 硫化矿石自燃倾向性综合判定的物元模型及其应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(11): 3459–3464.
YANG Fu-qiang, WU Chao, LI Zi-jun. Matter-element model and its application to comprehensive determination on spontaneous combustion tendency of sulfide ores[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(11): 3459–3464.
- [11] 谢正文, 吴 超, 李孜军, 阳富强. 基于信息熵和集对分析理论的硫化矿石自燃倾向性判定[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(15): 1858–1863.
XIE Zheng-wen, WU Chao, LI Zi-jun, YANG Fu-qiang. Evaluation on spontaneous combustion tendency of sulfide ores based on entropy and set pair analysis theory[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(15): 1858–1863.
- [12] 胡汉华, 刘 征, 李孜军, 崔田田. 硫化矿石自燃倾向性等级分类的 Fisher 判别分析法[J]. 煤炭学报, 2010, 35(10): 1674–1679.
HU Han-hua, LIU Zheng, LI Zi-jun, CUI Tian-tian. Fisher discriminant analysis to the classification of spontaneous combustion tendency grade of sulphide ores[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10): 1674–1679.
- [13] 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评价中的应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(2): 264–268.
YANG Fu-qiang, WU Chao, LI Zi-jun. 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.
- [14] 李孜军, 吴 超, 周 勃. 硫化矿石氧化性的实验室综合评价[J]. 铜业工程, 2003(1): 40–42.

- LI Zi-jun, WU Chao, ZHOU Bo. Laboratory comprehensive judgement of the oxidation of sulfide ores[J]. *Copper Engineering*, 2003(1): 40–42.
- [15] 崔世林, 田 斐, 李德华. 基于指数尺度间隔连续小波变换的相位提取算法[J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 1–8.
- CUI Shi-lin, TIAN Fei, LI De-hua. Phase retrieval method with continuous wavelet transform based on exponent spacing scales[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 1–8.
- [16] 桑燕芳, 王 栋. 水文序列小波分析中小波函数选择方法[J]. *水利学报*, 2008, 39(3): 295–300.
- SANG Yan-fang, WANG Dong. Wavelets selection method in hydrologic series wavelet analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(3): 295–300.
- [17] 林嘉宇, 王跃科, 黄芝平, 沈振康. 语音信号相空间重构中时间延迟的选择—复自相关法[J]. *信号处理*, 1999, 15(2): 220–225.
- LIN Jia-yu, WANG Yue-ke, HUANG Zhi-ping, SHEN Zhen-kang. Selection of proper time-delay in phase space reconstruction of speech signals[J]. *Signal Processing*, 1999, 15(2): 220–225.
- [18] 马 莎, 肖 明. 基于混沌理论的地下厂房围岩变形特征参数分析[J]. *水力发电学报*, 2008, 27(6): 84–89.
- MA Sha, XIAO Ming. Analysis on characteristic parameters of deformation of rock around underground powerhouse based on chaos theory[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2008, 27(6): 84–89.
- [19] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Dimension and entropy of strange attractors from a fluctuating dynamic approach[J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1984, 13: 34–54.
- [20] 赵 晶, 徐建华. 1950~1997年我国洪涝灾害成灾面积的分形特征研究[J]. *自然灾害学报*, 2003, 12(1): 31–35.
- ZHAO Jing, XU Jian-hua. Study on fractal characteristics of inundated area of flood disaster in China from 1950 to 1997[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2003, 12(1): 31–35.

(编辑 龙怀中)