

硫化矿石堆自热实验模拟和热场数值仿真

潘 伟, 吴 超, 刘 辉, 阳富强

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 为了研究硫化矿石堆氧化反应过程中温度场的动态变化, 提出基于实测温度数据重构温度场的新思路。以从某硫铁矿采集的矿石样品作为实验材料, 应用自主设计的实验装置, 测定模拟矿石堆各测点的温度变化。在对矿石堆温度场演化的混沌相关性进行验证后, 应用实测温度数据进行二维插值, 模拟得到矿石堆不同时段温度变化曲面。结果表明: 矿石堆内通风和蓄热的综合作用使得堆内温度分布呈现出显著的空间差异, 且根据升温幅度的变化情况, 可将矿石堆温度场的演化大致分为 3 个阶段, 在各个阶段矿石堆表层一定范围内的升温幅度始终最大; 分析测点平均升温率与深度的关系, 可确定矿石堆的自热层厚度约为 11.523 3 mm; 由于自热层的升温幅度明显大于其他区域的, 在采矿生产中应对该区域进行重点监控。

关键词: 硫化矿石堆; 自热实验; 温度场; 混沌相关性; 二维插值; 自热层; 仿真

中图分类号: TD 75

文献标识码: A

Self-heating test of sulfide ore heap and numerical simulation of temperature field

PAN Wei, WU Chao, LIU Hui, YANG Fu-qiang

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to investigate the dynamic changes of the temperature field of sulfide ore heap during the oxidation reaction process, a new idea for temperature field reconstruction based on measured temperature data was proposed. Ore samples from a pyrite mine were taken as the experimental materials, and the temperature variations of the measuring points of simulated ore heap were measured with an experimental apparatus designed by the authors. The temperature variation of the ore heap in different time sections was simulated by two-dimensional interpolating with measured temperature data after the chaotic correlation of temperature field evolvement of sulfide ore heap was validated effectively. The results indicate that comprehensive effects of ventilation and heat storage make temperature distribution in the ore heap present significant spatial difference and temperature field evolvements of the ore heap can be divided into three stages according to the variation of increasing extent of temperature. The thickness of the self-heating layer is about 11.523 3 mm, which can be determined by analyzing the relationship between the average temperature rise rate and the depth of the measuring points. Because the increasing extent of temperature of the self-heating layer is greater than that of other areas, the self-heating layer is the key monitoring area during the mining process.

Key words: sulfide ore heap; self-heating test; temperature field; chaotic correlation; two-dimensional interpolation; self-heating layer; simulation

矿石自燃是硫化矿床开采经常遇到的重大灾害之一。据统计, 我国约 30% 的有色金属矿山、10% 的铁

矿山(主要是硫铁矿)、10% 的非金属建材矿山存在矿石自燃的隐患^[1]。矿石自燃不仅会造成矿产资源损失,

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAK04B03)

收稿日期: 2009-03-24; 修订日期: 2009-09-14

通信作者: 吴 超, 教授, 博士; 电话: 0731-88876524; E-mail: wuchao@mail.csu.edu.cn

有时还会迫使矿山舍弃某些工程或更改采矿方法与工艺, 从而造成大量工程报废。矿石自燃所产生的高温有毒有害气体污染井下和地表环境, 降低劳动生产率, 影响工人的健康和生命安全。矿石氧化不但会改变矿石的性质, 增加选矿难度和成本, 而且自燃产生的酸性气体和酸性水会腐蚀井下各种设备, 从而可能引起炸药自爆和早爆事故。由此可见, 硫化矿石自燃对矿山安全生产危害极大。

鉴于此, 围绕硫化矿石自燃这一课题开展研究显得尤为必要。国内外很多学者在此领域做出了卓有成效的贡献, 研究方向主要集中在自燃机理^[2-4]、自燃倾向性评价^[5-7]和预防控制^[8-9]等方面。譬如 NINTEMAN^[2]提出硫化矿石氧化的电化学机理, 但当时只对这一理论进行定性的描述。吴超等^[4]系统地综述硫铁矿石氧化自燃的有关化学反应方程式, 并用化学热力学的原理计算有关反应过程的热效应, 同时应用实验方法研究该类矿石氧化过程所涉及的关键化学反应模式、反应速度及水的作用机理。李孜军等^[5]对硫化矿石自燃倾向性的鉴定标准进行研究, 并提出鉴定指标体系和测试规范, 探讨自燃倾向性的分级和参考标准。胡汉华^[8]探讨铜山铜矿矿石自燃发火特征及用稀水泥浆阻燃灭火的方法, 并通过井下灭火试验得出铜山铜矿合理的阻燃灭火参数。

在硫化矿石堆氧化自燃过程中, 温度场是描述矿石堆状态的一个重要物理量, 它能反映矿石堆氧化的程度及矿石堆蓄热条件的优劣。因此, 研究硫化矿石堆的温度场变化规律, 对于分析矿石堆高温点及判定可能发生自燃的区域, 具有十分重要的指导意义。目前, 关于硫化矿石堆温度场的研究并不多, 如吴超和孟廷让^[10]通过在采场进行堆矿实验, 测定矿石堆内几个监测管的温度、SO₂及O₂浓度随时间的变化规律, 但受实验条件的限制, 没有对矿石堆整体的温度场进行探讨。YANG和WU^[11]根据传热学和多孔介质渗流理论, 建立硫化矿石堆温度场的数学模型, 并通过数值模拟研究矿石堆温度的分布状态, 但建模的前提是将实际问题进行简化。因此, 如果能通过实测温度数据来构造矿石堆温度场, 所得结果可能会更加具有实际意义。据此, 本文作者以现场采集的硫化矿石样品作为实验材料, 应用自主设计的实验装置, 测定模拟矿石堆中各测点的温度变化情况, 基于非线性动力学理论验证了矿石堆温度场演化的混沌相关性。以此为依据, 基于各测点的实测温度数据, 应用二维插值模拟了矿石堆不同时段温度变化。

1 实验

1.1 实验材料

实验矿样取自河南某硫铁矿, 表1所列为该矿样的化学成分分析。根据实验需要, 将矿样破碎至粒径小于10 mm并进行筛分。模拟矿石堆的粒度组成如表2所列, 测得模拟矿石堆的平均空隙率为33.13%。

1.2 实验装置及方法

图1所示为实验装置示意图。为了模拟井下采场的受限空间及便于确定测点坐标, 选用一个槽体模型

表1 矿样化学成分

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

Water-soluble iron ion	Total sulfur	Monomer sulphur	Sulfate ion
0.000 5	13.91	0.055	0.83

表2 模拟矿石堆粒度分布

Table 2 Particle size distribution of simulated ore heap

Diameter/mm	Mass fraction/%
<0.15	22.65
0.15-0.25	6.27
0.25-0.5	15.79
0.5-1.0	13.39
1-5	29.17
5-10	12.73

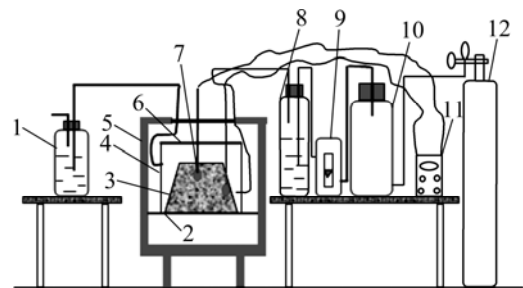


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus: 1—Poisonous gas absorption bottle; 2—Stent; 3—Simulated ore heap; 4—Slot model; 5—Automatic heating incubator; 6—Enclosing cover; 7—Temperature probe; 8—Humidifier; 9—Flow meter; 10—Buffering bottle; 11—Automatic temperature recorder; 12—Oxygen cylinder

进行室内二维探索性实验, 槽体模型的长、宽、高分别为 300、20 和 200 mm。通过向模型持续供氧来模拟采场通风, 并采用加湿器来模拟采场的空气湿度。实验时将含水率为 5% 的矿石颗粒堆置成一个近似等腰梯形的模拟矿石堆, 其上下底分别为 60 mm 和 300 mm, 高为 100 mm, 坡角 θ 为 39.8° 。

考虑到模拟矿石堆规模较小, 在矿石堆中随机布设 8 个测点, 编号依次为 A—H。各个测点的坐标为: A(-120, 15)、B(-80, 20)、C(-60, 60)、D(-20, 50)、E(0, 20)、F(30, 80)、G(90, 25)、H(130, 10)。测点温度采用自动温度记录仪进行测定。

因为硫化矿石堆在常温状态下, 氧化升温非常缓慢, 这样会导致实验周期过长, 且影响矿石自热的因素很多, 从而使得实验过程难以得到有效控制。针对这一情况, 本实验采用自动程序升温恒温箱对模拟矿石堆进行梯度升温来加快氧化自热的进程。

2 矿石堆温度场的混沌相关性

2.1 混沌相关性判定方法

对于相关性的证明, 一般是提取特性数据序列用最小二乘法求出相关系数来进行判定。但硫化矿石堆在氧化自燃过程中受矿石化学成分、物理特性、环境条件以及温度场、渗流场和化学场等多因素、多场的耦合作用^[1], 矿石堆能否发生自燃, 往往取决于初始条件(如通风强度和环境温度等)的微小变化, 这表明矿石堆氧化自燃过程是一个混沌演化过程。对于矿石堆温度场的混沌相关性研究, 可利用非线性动力学方法计算出各测点之间的混沌相关系数, 进而对其相关性进行分析。

许清海^[12]提出混沌相关性的基本理论, 并提出如下定义: 假设两个混沌时间序列 $\{u(t)\}_{t=1}^n$ 和 $\{w(t)\}_{t=1}^n$, 关联维数分别是 D_u 和 D_w , $z(t) = (u(t), w(t))^T$ 的关联维数是 D_z 。若 $D_z \approx D_u \approx D_w$, 则称 $\{u(t)\}_{t=1}^n$ 与 $\{w(t)\}_{t=1}^n$ 混沌相关; 若 $D_z \approx D_u + D_w$, 则称 $\{u(t)\}_{t=1}^n$ 与 $\{w(t)\}_{t=1}^n$ 混沌不相关; $\rho_{u,w} = [(D_u + D_w) - D_z] / D_z$ 称为 $\{u(t)\}_{t=1}^n$ 与 $\{w(t)\}_{t=1}^n$ 的混沌相关系数, 由于实测数据中存在噪声, 且在数据处理过程中不可避免会产生误差, 一般规定相关系数大于 0.7 时, 就认为两序列是混沌相关的, 相关系数越接近 1, 说明它们的混沌相关性越强。

从上述定义可以看出, 若要判定两个时间序列混沌是否相关, 首先必须求出两者的关联维数及由这两

个序列组成的多变量时间序列的关联维数, 并观察这 3 个值是否近似相等。若 3 个值近似相等, 则可判定这两个序列是混沌相关的。但上述定义没有对“近似相等”进行量化, 考虑到关联维数是系统复杂程度的一种度量, 且大于关联维数的下一个整数就是刻画系统所需的独立变量的个数, 因此可对计算得到的关联维数取整, 并认为只有这 3 个整数相等, 才可以通过计算两者的相关系数来判定是否混沌相关。据此, 提出时间序列混沌相关性的判定流程如图 2 所示。

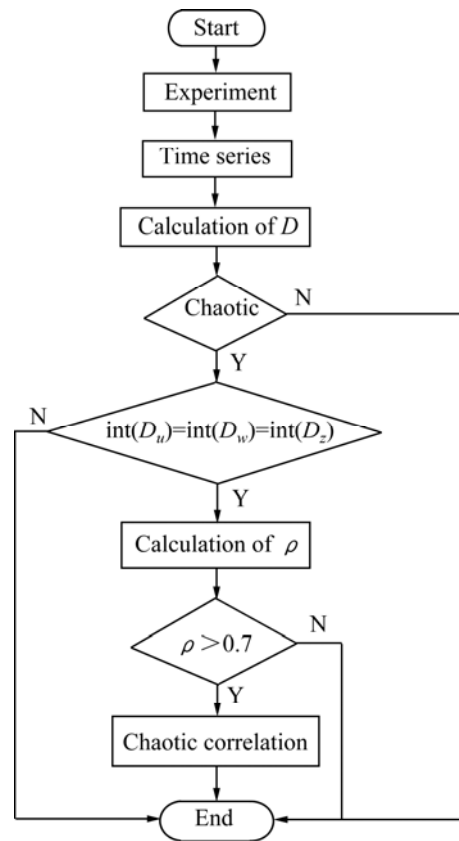


图 2 时间序列混沌相关性判定流程

Fig.2 Chaotic correlation decision process of time series

2.2 混沌相关系数计算

在对硫化矿石堆温度场演化进行动态分析时, 各测点的温度增量时间序列比原始温度序列要显得更有意义, 因为前者更加直观地反映各测点前后时刻的温度变化情况。本文作者根据各测点温度增量时间序列来展开研究。

为了判定矿石堆温度场的混沌相关性, 首先可通过室内实验提取出各测点温度增量时间序列, 然后对其进行相空间重构。相空间重构的依据是 TAKENS^[13]的延迟嵌入定理, 在重构相空间时, 采用复自相关法^[14]确定延迟时间。基于 G-P 算法^[15], 计算出各测点

温度增量时间序列的关联维数。以测点 *A* 为例, 图 3 所示为该测点温度增量时间序列的 $\ln C(r)$ — $\ln r$ 曲线, 嵌入维数 m 依次从 2 取到 14, 计算得到关联维数为 3.91, 饱和嵌入维数为 12。同理计算出测点 *B*—*H* 对应序列的关联维数, 分别为 3.43、3.57、3.86、3.19、3.24、3.35 和 3.82。8 个测点温度增量时间序列的关联维数均为分数, 证明 8 个测点的温度演化是混沌的。因为 8 个测点是随机选取的, 可以认为在矿石堆氧化自热过程中, 其温度场的演化是混沌的。

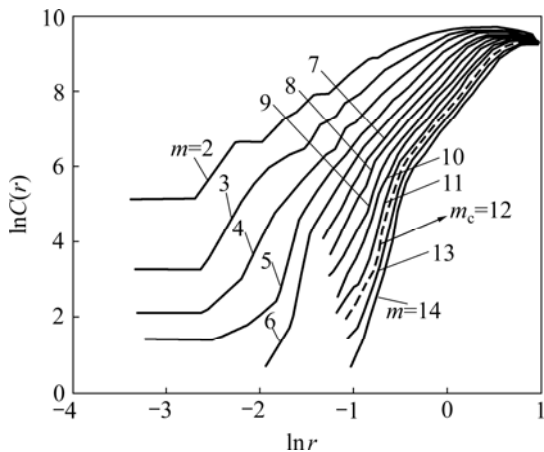


图 3 测点 *A* 的温度增量时间序列的 $\ln C(r)$ — $\ln r$ 曲线

Fig.3 $\ln C(r)$ — $\ln r$ curves of temperature increment time series of measuring point *A*

根据高后秀等^[16]介绍的算法, 取嵌入维数 $m=4$, 延迟时间 $\tau=2$ 计算得到各测点温度增量时间序列的相关系数如表 3 所列。由表 3 可以看出, 各测点之间的相关系数均大于 0.7, 8 个测点的温度变化与混沌相关性。从这 8 个测点的坐标位置来看, 即使是距离最远的测点 *A* 和测点 *H* 之间的相关系数也达到 0.721 6。

表 3 各测点之间相关系数

Table 3 Correlation coefficients of each pair of measuring points

Point	ρ							
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>	<i>G</i>	<i>H</i>
<i>A</i>	—	0.976 5	0.896 5	0.858 3	0.841 7	0.779 5	0.726 8	0.721 6
<i>B</i>	0.976 5	—	0.950 1	0.917 7	0.882 7	0.821 7	0.767 9	0.723 2
<i>C</i>	0.896 5	0.950 1	—	0.967 6	0.912 3	0.861 0	0.799 0	0.745 7
<i>D</i>	0.858 3	0.917 7	0.967 6	—	0.981 3	0.933 5	0.846 2	0.785 1
<i>E</i>	0.841 7	0.882 7	0.912 3	0.981 3	—	0.914 5	0.872 9	0.818 8
<i>F</i>	0.779 5	0.821 7	0.861 0	0.933 5	0.914 5	—	0.877 3	0.822 4
<i>G</i>	0.726 8	0.767 9	0.799 0	0.846 2	0.872 9	0.877 3	—	0.954 8
<i>H</i>	0.721 6	0.723 2	0.745 7	0.785 1	0.818 8	0.822 4	0.954 8	—

因此, 根据这 8 个随机选取的测点的相关性可以推断, 整个矿石堆温度场存在着相关性。

3 矿石堆温度场演化的二维模拟

3.1 模拟方法

根据前述分析可以发现, 矿石堆温度场的演化存在着混沌相关性, 这说明矿石堆系统中任意一点的温度变化均受其它点的温度变化影响, 因此为了探明矿石堆的温度场演化规律, 可以通过在矿石堆中布设测点的方式来获得实测温度数据, 然后再根据这些数据来模拟矿石堆温度场的变化。

因为本次实验堆置的模拟矿石堆可视为一个二维模型, 故可以采用二维插值^[17]对实测数据进行处理, 从而得到矿石堆的温度变化曲面。进行二维插值的基本思路是: 首先构造一个二元函数 $T=f(x, y)$, 其中 x 和 y 分别表示矿石堆各点的横坐标和纵坐标, T 为温度值, 并使得该二元函数通过全部已知节点, 即 $f(x_i, y_i)=T_i (i=1, 2, \dots, n)$; 再利用 $f(x, y)$ 进行插值, 即 $T^*=f(x^*, y^*)$, 这样即可得到矿石堆任一时段的温度变化曲面。二维插值的方法有很多, 如最近邻点插值、线性插值、三次样条插值和三次插值等, 本文作者采用三次插值的方法来进行模拟。

3.2 模拟结果及分析

图 4 所示为模拟得到的矿石堆温度变化曲面。每个模拟时段均为 10 min。从图 4 可以看出, 在 1~100 min 内, 矿石堆每个模拟时段里的温度场变化并不一致, 这表明矿石堆内部各点温度在氧化过程中出现显著的空间差异。分析图 4 还可以发现, 矿石堆温度场

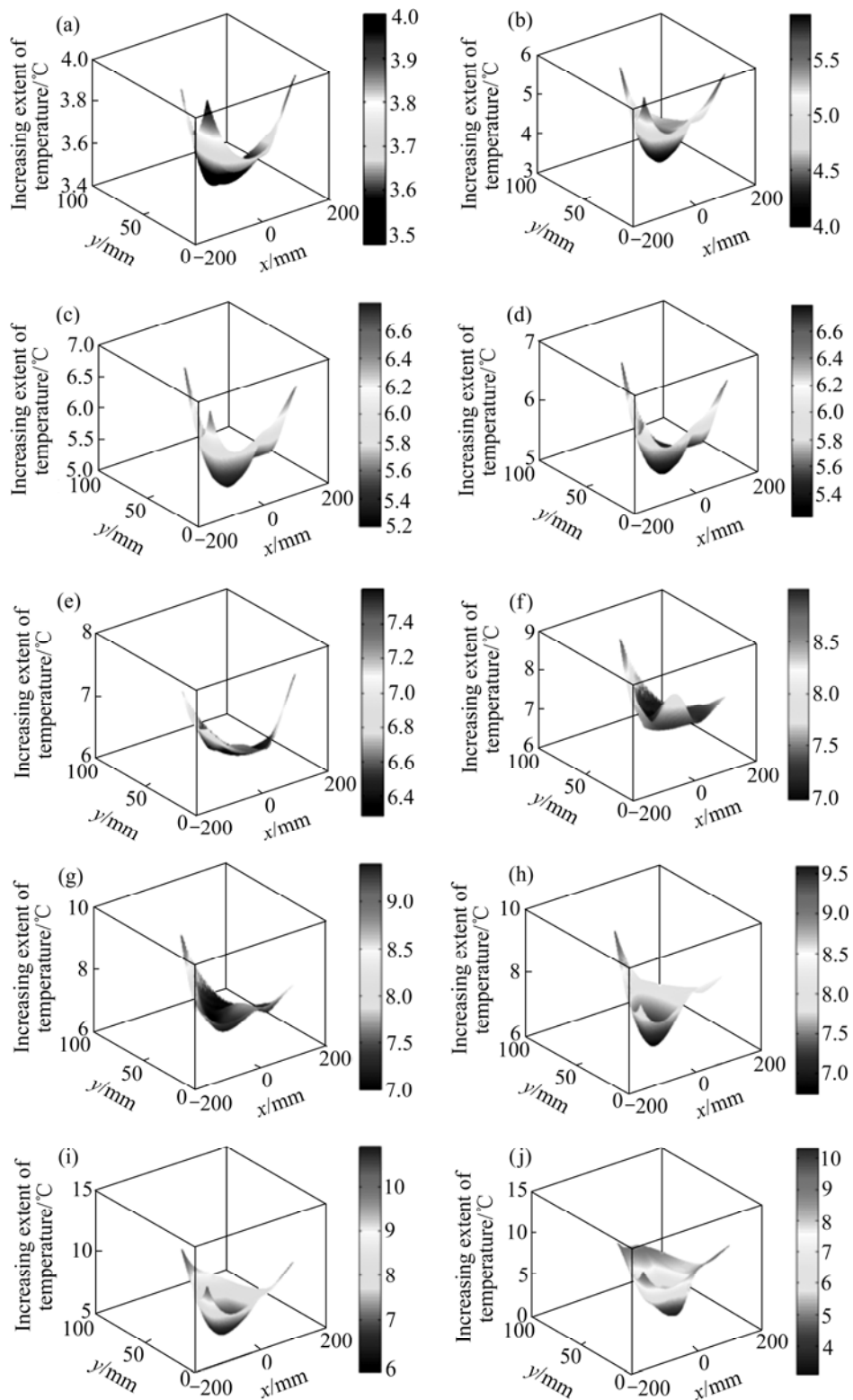


图4 不同模拟时段内矿石堆的温度变化曲面

Fig.4 Temperature variation faces of ore heap at different simulating times: (a) 1–10 min; (b) 11–20 min; (c) 21–30 min; (d) 31–40 min; (e) 41–50 min; (f) 51–60 min; (g) 61–70 min; (h) 71–80 min; (i) 81–90 min; (j) 91–100 min

的演化大致可分为3个阶段:第一阶段是40 min以前,在此阶段,随着深度的增加,升温幅度逐渐减小;第

二个阶段是41~70 min内,在此阶段,虽然矿石堆表层的升温幅度仍然是最大,但矿石堆底层的升温幅度

显著增大,甚至大于部分浅层区域的升温幅度;第三个阶段是70 min以后,在此阶段,矿石堆表层的升温幅度明显大于矿石堆底层的升温幅度,且升温幅度随着深度的增加而减小。

结合本次实验对这一现象进行初步解释:因为本次实验采用梯度升温的方式来加热矿石,因此在实验刚开始的一段时间内,由于梯度升温的作用,矿石堆表层的矿石吸热引起自身温度升高。而在实验初期,矿石堆底层的升温幅度不是太明显,这是因为矿石的导热性较差,使得热量很难在较短时间内传递到矿石堆底层,因此,在该阶段矿石堆整体的升温幅度随着深度的增加而减小。随着实验的进行,由于矿石堆内水分的蒸发散失,矿石堆空隙率逐渐增大,易于空气渗流,从而便于传热,会导致矿石堆底层的温度迅速升高,再加之矿石堆底层的蓄热条件良好,因此在特定时间段内,矿石堆底层的升温幅度会大于部分浅层区域的升温幅度。但当实验进行到一定程度,即矿石堆表层温度达到矿石高速氧化的临界温度时,该部位矿石的氧化放热强度明显增大,而矿石堆底层由于氧含量不足,很难产生明显自热现象,从而导致该区域的升温幅度明显小于矿石堆表层的升温幅度。

通过上述分析及观察图4的曲面特征可以推测,在矿石堆内部应存在一定厚度的氧化自热层,在氧化自热过程中该区域的升温效果最明显。计算各测点的平均升温率及各测点的深度可以很好地证实这一推断。图5所示为各测点平均升温率与深度的关系。计算各测点的深度可以采用如下步骤:首先确定矿石堆边界直线方程分别为

对于线段 l_1 :

$$5x-6y+750=0 \quad (1)$$

对于线段 l_2 :

$$y-100=0 \quad (2)$$

对于线段 l_3 :

$$5x+6y-750=0 \quad (3)$$

再根据点到直线的距离公式求出各测点到模拟矿石堆边界的最小距离即为所求深度。

观察图5可以发现,随着测点深度的增加,平均升温率呈现先增大后减小的趋势,其中测点C的平均升温率最大,测点E的平均升温率最小,这表明矿石堆内存在一定厚度的氧化自热层。

之所以在矿石堆内部会存在氧化自热层,可以这样进行解释:在堆置模拟矿石堆时,由于粒度偏析及矿石自身重力作用,所形成的矿石堆内部空隙率的分布是不均匀的。总体而言,矿石堆松散表层及矿石堆边坡下角区域的空隙率一般较大,而矿石堆深部由于比较密实,空隙率相对较小。当空气从矿石堆表层向内入渗时,由于内部空隙率小,通风阻力较大,导致空气很难渗透至矿石堆深部。因此,可以认为矿石堆内通风和蓄热条件的综合作用是导致氧化自热层形成的主要原因。以本次实验为例,测点E的平均升温率最小,是因为其深度最大,难以获得足够的氧气参与反应,所以即便它的蓄热条件最优,其平均升温率也最小。反观测点C,由于其位于矿石堆表层,有良好的供氧条件,且与测点H和测点A比较,又有一定的蓄热厚度,所以其平均升温率最大。据此,可界定本次实验矿石堆氧化自热层范围为距矿石堆表面约11.5233 mm的区域。

4 结论

1) 硫化矿石堆内各点温度变化存在着相关性,因此根据测点实测温度数据来模拟矿石堆温度场是可行的。在采矿生产中,则可以通过加强通风、向矿堆洒水等措施,降低矿石堆表面温度,根据矿石堆温度场的混沌相关性达到降低矿石堆整体温度的目的,从而有效抑制自燃火灾的发生。

2) 硫化矿石堆各点的温度演化出现显著的空间差异,且按照矿石堆内各部位升温幅度的变化,可将矿石堆的温度场演化大致分为3个阶段。在这3个阶段里,矿石堆表层一定范围内的升温幅度始终是最大。

3) 分析各测点的平均升温率证实,矿石堆在氧化反应过程中存在一个自热层,其范围为自矿石堆表面向内延伸一定的距离,该区域的升温幅度明显大于其它区域的升温幅度,验证了数值模拟结果的合理性。

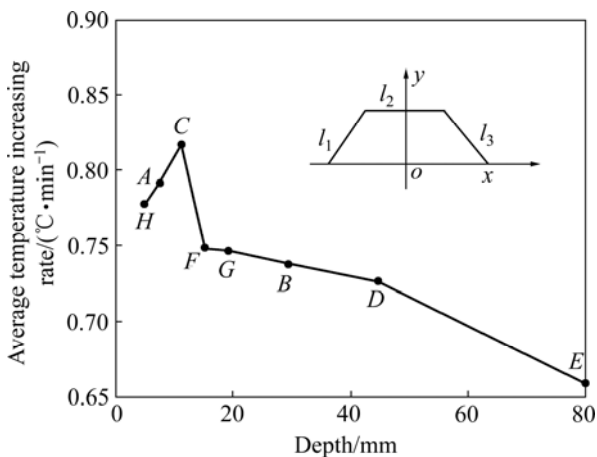


图5 矿石堆内各测点平均升温率与深度的关系

Fig.5 Relationship between average temperature increasing rate and depth for different measuring points in ore heap

REFERENCES

- [1] 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 Zi-jun. Research on ANN dynamic prediction model for spontaneous combustion of sulfide ores with multi-factors coupling[J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(8): 32-36.
- [2] NINTEMAN D J. Spontaneous oxidation and combustion of sulfide ores in underground mines[R]. Information Circular 8775, USA: Bureau of Mines, 1978: 1-40.
- [3] 宋学义, 文彦. 硫化矿岩自燃机理的研究[J]. 湖南冶金, 1989(4): 1-7.
SONG Xue-yi, WEN Yan. Investigation on the mechanism of spontaneous combustion of sulphide ores[J]. Hunan Metallurgy, 1989(4): 1-7.
- [4] 吴超, 孟廷让, 王坪龙, 刘勇. 硫化矿石自燃的化学热力学机理研究[J]. 中南矿冶学院学报, 1994, 25(2): 156-161.
WU Chao, MENG Ting-rang, WANG Ping-long, LIU Yong. Research on the chemical thermodynamics mechanism for the spontaneous combustion of sulphide ores[J]. Journal of Central South Institute of Mining and Metallurgy, 1994, 25(2): 156-161.
- [5] 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 sulfide ores and the key technologies for preventing fire[D]. Changsha: Central South University, 2007: 91-94.
- [6] 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
- [7] WU C, XIA C N, LI Z J. Safety assessment system for evaluating spontaneous combustion of sulfide ores in mining stope[C]//Proceedings of the 2006 International Symposium on Safety Science and Technology. Changsha, 2006: 1599-1604
- [8] 胡汉华. 铜山铜矿采场防灭火试验研究[J]. 金属矿山, 2001(5): 48-51.
HU Han-hua. Experimental research of fire protection and extinguishment in Tongshan cooper mine's pit[J]. Metal Mine, 2001(5): 48-51.
- [9] 李志超, 吴超, 艾幼孙. 关于预防硫化矿床矿石氧化自燃的措施[J]. 湖南有色金属, 2008, 24(6): 6-8.
LI Zhi-chao, WU Chao, AI You-sun. Study about the measures of preventing spontaneous combustion of sulphurating oxidizing ore of mineral deposit[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2008, 24(6): 6-8.
- [10] 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: 74-78.
WU Chao, MENG Ting-rang. Theory and technology for control of the mine spontaneous combustion of sulphide ores[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 74-78.
- [11] YANG F Q, WU C. Fire-extinguishing techniques research on spontaneous combustion of a sulfide iron ore dump in mining stope[C]//Proceedings of the Progress of the 2008 International Symposium on Safety Science and Technology. Beijing, 2008: 869-874.
- [12] 许清海. 混沌时间序列的相关性及其应用[J]. 泉州师范学院学报(自然科学), 2000, 18(6): 4-7.
XU Qing-hai. The correlation of chaotic time series and its applications[J]. Journal of Quanzhou Normal College(Natural Science), 2000, 18(6): 4-7.
- [13] TAKENS F. Detecting strange attractors in turbulence[M]//RAND D A, YONG L S. Dynamical Systems and Turbulence, Warwick 1980 (Vol.898). Heidelberg: Springer Berlin, 1981: 366-381.
- [14] 杨云升, 刘志华, 李博章. 利用相空间重构时间延迟特性进行语音音质分析[J]. 应用声学, 2009, 28(1): 71-75.
YANG Yun-sheng, LIU Zhi-hua, LI Bo-zhang. Evaluating speech quality based on the time delay of phase space reconstruction[J]. Applied Acoustics, 2009, 28(1): 71-75.
- [15] GRASSBERGER P, PROCACCIA I. Measuring the strangeness of strange attractors[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1983, 9(1/2): 189-208.
- [16] 高后秀, 温榜, 张贵杰. 铜锌铝合金表面非线性振荡的混沌相关性[J]. 天津大学学报, 2006, 39(4): 507-510.
GAO Hou-xiu, WEN Bang, ZHANG Gui-jie. Chaotic correlation of nonlinear oscillation on Cu-Zn-Al alloy surface[J]. Journal of Tianjin University, 2006, 39(4): 507-510.
- [17] 潘强, 江帆, 童大力, 王开发. 降雨量预报方法评价模型[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(11): 1-6.
PAN Qiang, JIANG Fan, TONG Da-li, WANG Kai-fa. The mathematical model of evaluation on the methods of rainfall forecast[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2007, 37(11): 1-6.

(编辑 李艳红)