

类砂岩型矿石浸出液质量浓度混沌时序重构与浸矿周期预测

刘超, 吴爱祥[✉], 尹升华, 柯锦福, 陈勋

北京科技大学金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: lehdaizi@163.com

摘要 以河砂、水泥和盐为原料制作类砂岩型矿石试件, 采用水浸的方式对不同品位矿石进行浸矿试验, 对浸出液质量浓度进行监测。考察了浸出液质量浓度和浸出率随浸矿时间演变规律; 将浸出液质量浓度时间序列进行相空间重构, 用混沌理论揭示了不同品位矿石浸出液质量浓度在相空间中相点距演化规律; 利用灰色理论, 建立了浸出液质量浓度相点距演化预测模型, 确定合理的浸矿周期。研究发现: 浸出液质量浓度表现出混沌特性, 对其进行相空间重构处理后, 细微变化特征得以放大, 内部规律得以充分展现; 不同品位矿石表现出不同的非线性动力学行为; 利用基于相空间重构的残差修正灰色模型预测了浸矿周期, 为溶浸采矿理论与技术提供了一种新的研究和探讨方法。

关键词 溶浸采矿; 浸出; 质量浓度; 时间序列分配; 相空间重构; 混沌理论; 预测方法

分类号 TD853.3

Chaotic time series reconstruction of the concentration of leaching solution and leaching period prediction of quasi-sandstone type ore

LIU Chao, WU Ai-xiang[✉], YIN Sheng-hua, KE Jin-fu, CHEN Xun

Key Laboratory of the Ministry of Education for High-efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: lehdaizi@163.com

ABSTRACT To simulate the sandstone ore leaching process, some specimens with different grades were made with river sand, cement and salt as the raw materials. On the basis of the monitoring of leaching solution concentration in a water-solution mining experiment, the time evolution of leaching solution concentration and leaching rate was examined. Through phase space reconstruction from the time series of leaching solution concentration, the distance evolution of points of specimens with different grades in the phase space was revealed by the chaotic theory. A prediction model of the distance evolution of phase points was established by using the grey theory, and a reasonable leaching period was ascertained. The results show that the leaching solution concentration holds chaotic characteristics. After the phase space reconstruction, the delicate changes of leaching solution concentration are enlarged, and the internal rules are fully demonstrated. The ores of different grades have different nonlinear dynamic behaviors. Based on the phase space reconstruction, the leaching period has been predicted by means of the residual modification grey model, which provides a new research method and theory to solution mining.

KEY WORDS solution mining; leaching; mass concentration; time series analysis; phase space reconstruction; chaos theory; prediction method

近年来, 在我国西部(西藏多不杂、内蒙古鄂尔多斯等地)发现多座大型砂岩型矿床^[1-2], 但低品位矿床

收稿日期: 2014-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51374035); 新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-13-0669)

不利于传统采矿方法开采。溶浸采矿是利用某些能溶浸矿石中有用成分的浸矿药剂,有选择性地浸出矿体中的有用组分,使其由固态矿物中转移到浸出液内,再从浸出液中提取出来的采矿方法。溶浸采矿法是集采矿、选矿及水冶为一体的综合技术,常用来回收低品位及难采矿体资源,具有环境友好、成本低、开采工艺简单等优点^[3]。浸矿技术可有效处理我国禀赋性差的矿产资源,为扩大资源综合利用率、缓解资源紧缺局面提供技术保障。浸矿技术在美国、澳大利亚等矿业发达国家已得到广泛的应用。目前,世界上采用溶浸法生产的铜金属占总产量的 20%,约 20% 左右的铀和 25% 的金为溶浸开采所得。我国在离子型稀土、铀、铜金矿的溶浸开采上也取得了较大进展,目前 30%~40% 的铀、90% 的离子型稀土来自溶浸开采^[4-5]。溶浸采矿已成为处理我国低品位矿产资源的重要技术手段。

矿石在浸出过程中,有用组分不断地发生着溶解、交换、结晶、氧化还原等物理化学作用,其内部结构发生变化,浸出液质量浓度不断增加,研究溶浸采矿技术的核心为浸出液质量浓度及浸出率的变化规律。为研究浸出液的变化特征,提高浸矿强度,降低成本,大批学者曾对溶质运移机制、浸出机理及影响因素进行了大量的研究,取得了较大进展^[6-7]。但以往工作大多利用已有的数学、物理及化学模型进行机理分析和人工干预,研究重心主要集中在对浸出过程的调控上,有关浸出液质量浓度变化的非线性特征研究较少,尤其是以混沌学角度分析浸出特性的成果鲜有报道。浸出体系包含着分子扩散、对流、溶解、结晶等多个过程,浸出作用即受到内在非线性因素影响,又受到外部随机作用的影响,是一个复杂的非线性动力系统。混沌学主要研究非线性体系的内在随机性,为确定性与随机性之间建立了纽带^[8]。

为此,本文根据配比试验,利用水泥、河砂、盐和水制作类砂岩型盐岩矿石试样,以水为浸出剂对不同品位矿石进行浸矿试验,监测浸出液质量浓度,利用混沌理论揭示浸出液质量浓度变化特征,将混沌、时间序列相空间重构与灰色预测技术相结合,分析相点距演化规律,预测浸出液质量浓度,实现对浸矿周期的合理预估,从而以新的视角为砂岩型矿床的溶浸开采提供新的理论依据及技术支持。混沌与灰色预测法相结合为研究溶浸体系特征提供一条新思路。

1 浸出液质量浓度变化的混沌研究

由于非线性动力系统边界条件及结构参数的复杂性和时变性,通常较难建立完整的数学模型。对于现场采集的数据,首先要分析其非线性,再判断其混沌性,通常要计算 Lyapunov 指数、动力关联维数等。对于较为复杂的体系,还需要进行更深入的定量分析,相空

间重构技术为复原动力系统提供了可靠的保障^[9]。

1.1 浸出液质量浓度时间序列重构相空间

浸矿体系是一个耗散的非线性动力系统,浸出液质量浓度变化是矿石与外界物质和能量交换的结果。浸出过程中,任一状态的演化过程都是由与其相互作用的其他状态决定的,因此任意一个状态分量内部都隐含着与之相关的变量信息^[10]。所谓重构相空间,即按照特定的时间延迟点对原系统进行新维处理,通过“嵌入”的方式构造一个新的与原有系统等价的状态空间,同时恢复原有的动力系统,而后利用某些技术对新空间进行分析处理,即可得出原空间的状态特征。

浸出液质量浓度监测数据是一组单变量时间序列 $x_1, x_2, \dots, x_m$, 其中 m 为监测次数,时间间隔为 Δt 。由该序列可以得到 x_i 随时间演变的非线性动力学方程:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

式中 n 为状态变量个数, t 为浸矿时间, f 为非线性函数。

经消元处理,式(1)可用序列 $x(t)$ 表示为

$$x(t) = (x(t), x(t+\tau), x(t+2\tau), \dots, x(t+(n-1)\tau)). \quad (2)$$

式中 τ 为延滞时间参量, $\tau = k\Delta t$ ($k = 1, 2, 3, \dots$), 通常 $k = 1$ 。

对于实测的浸出液质量浓度时间序列,将 $x(t)$ 延拓成 n 维相空间相型分布如式(3)所示:

$$\begin{cases} X_1: & x(t_1), x(t_1+\tau), x(t_1+2\tau), \dots, x(t_1+(n-1)\tau), \\ X_2: & x(t_2), x(t_2+\tau), x(t_2+2\tau), \dots, x(t_2+(n-1)\tau), \\ X_3: & x(t_3), x(t_3+\tau), x(t_3+2\tau), \dots, x(t_3+(n-1)\tau), \\ \vdots & \\ X_N: & x(t_N), x(t_N+\tau), x(t_N+2\tau), \dots, x(t_N+(n-1)\tau). \end{cases} \quad (3)$$

式中,相点 X_i 为 n 维矢量,每个相点 X_i 的坐标为 $\{x(t_i), x(t_i+\tau), \dots, x(t_i+(n-1)\tau)\}$ 。相空间中,共有 N 个相点,其中 $N = m - (n-1)$, N 个 n 维相点构成一个相型。对于浸出液质量浓度时间序列,将各相点按照时间顺序连起来,则可以描述质量浓度在 n 维相空间中的演化轨迹。

对浸出液质量浓度时间序列进行重构相空间,根据 Takens 嵌入定律^[11],寻找合适的嵌入维数 n ($n \geq 2D+1$, D 为动力系统的维数),可以使重构相空间轨迹与原系统保持微分同胚^[12]。

1.2 动力系统维数

用 Grassberger-Procaccia 法计算动力系统关联维数 D_2 。设 $\{X_i, i = 1, 2, \dots, N\}$ 为实测相空间中的 N 个相点,相点 X_i, X_j ($i, j = 1, 2, \dots, N$) 之间的距离 $\rho(X_i, X_j)$ 为

$$\rho(X_i, X_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2}. \quad (4)$$

N 个 n 维相点中, 任意两点之间的距离小于 r 的概率 $c_n(r)$ 为

$$c_n(r) = \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^N \theta[r - \rho(X_i, X_j)]. \quad (5)$$

式中 θ 为 Heaviside 函数:

$$\theta[r - \rho(X_i, X_j)] = \begin{cases} 1, & r - \rho(X_i, X_j) \geq 0; \\ 0, & r - \rho(X_i, X_j) < 0. \end{cases} \quad (6)$$

相空间中, 距离小于某一给定临界距离 r 的相点成为关联相点, 则动力系统关联维数 D_2 为

$$D_2 = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln c_n(r)}{\ln r}. \quad (7)$$

D_2 随着嵌入维数 n 的增大而增大, 当 n 增大到饱和和嵌入维数后, D_2 变化很小或不再变化, 此时的 D_2 为重构相空间的动力关联维数^[13]. 若 D_2 大于 2 或为分数, 则表明浸出液质量浓度时间序列具有一定的混沌特征^[14].

1.3 混沌识别

若系统是能量耗散的、非可逆的, 则可能会出现混沌现象^[15]. 常用的混沌识别方法有功率谱法、相图法、Wolf 法等. 其中 Wolf 法较为简单实用, 且可实现计算机编程, 该方法的核心是计算序列的最大 Lyapunov 指数^[16]. Lyapunov 指数 λ 是体现相空间轨迹运动形式的固定参量. 当 $\lambda < 0$ 时, 轨迹收缩, 动力系统稳定; 当 $\lambda \geq 0$ 时, 轨迹扩张, 运动不稳定, 系统具有混沌特征^[17]. 对于 m 维的动力系统, 会存在 m 个 $\lambda_i (i=1, 2, \dots, m)$, 若最大的 Lyapunov 指数 $\lambda_{\max} \geq 0$, 则该系统一定具有混沌现象^[18].

1.4 相点距演变规律

将浸出液质量浓度时间序列进行相空间重构, 每个相点代表浸出过程的一个状态. 假设相点 X_k 的最邻近相点为 X_a , 则 X_k 与 X_a 之间的距离 Z_k 为

$$Z_k = \min_{i=1, 2, \dots, (N-1)} (\|X_k - X_i\|) = \{ [x(t_k) - x(t_a)]^2 + [x(t_k - \tau) - x(t_a - \tau)]^2 + \dots + [x(t_k - (m-1)\tau) - x(t_a - (m-1)\tau)]^2 \}^{1/2}. \quad (8)$$

式中 t_a 和 t_k 分别为相点 X_a 和 X_k 对应的浸矿时间.

由 X_1 开始, 依次计算出每个相点的最邻近相点距, 可得到重构相空间的最邻近相点距演变序列 Z :

$$Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_j), \quad j=1, 2, \dots, N. \quad (9)$$

序列 Z 同样代表浸出过程的一种状态, 它可以反映出浸出液质量浓度序列 x_i 各元素间的相对关系^[19].

将最邻近相点距演变序列 Z 作傅里叶变换可得到:

$$Z_k = \frac{1}{\sqrt{m-n+1}} \sum_{i=1}^{m-n+1} Z_i e^{-\frac{2\pi i k}{(m-n+1)}}. \quad (10)$$

傅里叶变换后的 Z 为时间-功率谱, 用于表示能量随时间的演变规律^[20].

2 浸矿周期的灰色预测

由于浸出体系的每个状态体现在一个相点中, 则可以通过确定下一时刻相点位置来预测溶浸过程. 当已知数据较少时, 可根据现有的信息特征, 通过灰色理论预测体系未来的变化趋势^[21].

为了使重构相空间的最邻近相点距演变序列 Z 的规律性更强, 将其进行一阶累加, 得到序列 Z^* :

$$Z^* = [Z_1, (Z_1 + Z_2), \dots, (Z_1 + Z_2 + \dots + Z_j)]. \quad (11)$$

采用 GM(1, 1) 模型, 可得到 Z^* 的一阶线性微分方程:

$$d\hat{Z}_t^* / dt + c\hat{Z}_t^* = b. \quad (12)$$

解式(12)可得到通解:

$$Z_t^* = (Z_1 - b/c) \exp(-c(t-1)) + b/c. \quad (13)$$

式中 b 和 c 为常数, 可通过最小二乘法求出.

预测值与实测值的残差序列 q 为

$$q = [(Z_1 - \hat{Z}_1), (Z_2 - \hat{Z}_2), \dots, (Z_j - \hat{Z}_j)]. \quad (14)$$

同样, 根据灰色模型可进行残差预测, 通过残差模型修正以提高预测精度.

相点距 Z_k 确定后, 解二次方程式(8), 可得 $x(t_k)$, 即浸出液质量浓度预测值.

目前, 确定浸矿周期的方法主要有 2 种: 一种是基于设计浸出率; 另一种是根据浸出金属量的盈亏平衡点. 两种方法都是由浸出液质量浓度确定浸矿周期. 以第 1 种方法为例, 设目标浸出率为 R , 则浸矿周期 t_k 满足条件:

$$\begin{cases} \frac{x(t_k - 1) \cdot L}{V \cdot G} < R, \\ \frac{x(t_k) \cdot L}{V \cdot G} \geq R. \end{cases} \quad (15)$$

式中 L 为浸出液体积, V 为总矿石量, G 为矿石品位.

将预测浸出液质量浓度 $x(t_k)$ 代入式(15), 即可得到 t_k , 从而实现浸矿周期预测.

3 应用

3.1 砂岩型矿石浸出试验

为了考察堆浸过程中浸出液变化特征, 充分显现其内在规律, 试验以河砂为骨料、水泥为胶结剂、盐为有用组分制作类砂岩型矿石, 以水为溶浸液模拟浸矿过程. 试验中, 每隔固定时间测定一次浸出液质量浓度.

利用有机玻璃模具制作直径 25 mm、高 50 mm 的柱状类砂岩型矿石试件(如图 1 所示), 其中水泥与河砂质量比为 1:4, 品位分别为 0.1%、3% 和 5%^[21-23].

试件养护 28 d 后, 每种品位的试件各选取一个,



图 1 试样制作完成
Fig. 1 Sample completion

编号为 0、1、3 和 5 经烘干后放入 550 mL 纯净水中进行浸矿。每隔 12 h 测定一次浸出液质量浓度,共测量 126 次,从而得到各试件浸出液质量浓度时间序列 $x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_m)$, $m = 126$,结果见图 2。由图 2 可知,在品位为 0 的试件浸出液中同样检测到目标浸出物,说明试验所用原材料中含有盐成分。

图 3 为各试件浸出率随时间演变规律,计算式时已考虑原材料中含有的盐分。由图 3 可知:随着溶浸

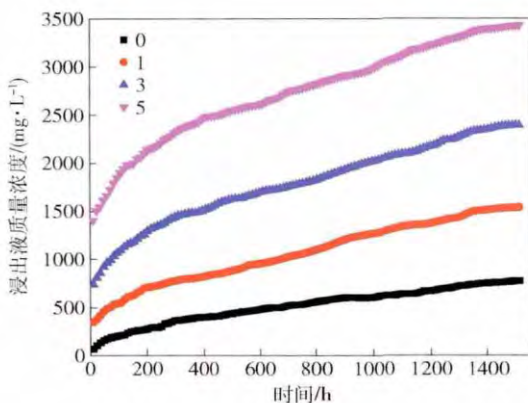


图 2 浸出液质量浓度与时间关系
Fig. 2 Relationship between leaching solution concentration and time

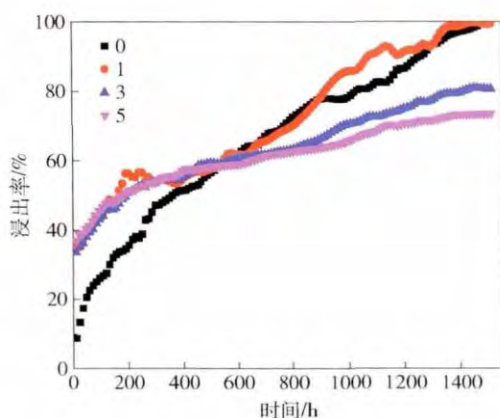


图 3 浸出率与时间关系
Fig. 3 Relationship between leaching rate and time

反应的进行,试件的浸出率有增加趋势,初期浸出率快速增加,而后逐渐变缓,最终趋于平稳;浸出反应的前 400 h,低品位试件浸出率低于高品位,但增速较快,400 h 后逐渐超过高品位试件浸出率;品位越低,浸出率增速越快,试件最终浸出率越高。

3.2 浸出液质量浓度时序重构与混沌识别

根据浸出液质量浓度监测数据,取 $\tau = 12$ h,用式(3)重构相空间,采用 Grassberger-Procaccia 法计算浸出液质量浓度时间序列的饱和嵌入维数和动力系统关联维数,见表 1。

表 1 各试件饱和嵌入维数和动力关联维数

Table 1 Saturated embedding dimension and correlation dimension of specimens

试件编号	饱和嵌入维数	动力关联维数
0	2	0.9118
1	2	0.9080
3	2	0.8833
5	2	0.8661

由表 1 可知,各试件的饱和嵌入维数 n 均为 2;四组监测数据的动力关联维数 D_2 均为分数,表明浸出液浓度时序具有混沌特征;矿石品位越低,动力系统关联维数 D_2 越大。

分别对 4 个试件的浸出液质量浓度时序用饱和嵌入维数 2 重构相空间,可以得到 4 个二维相空间向量,每个向量包含 125 个相点。采用 Wolf 法计算各向量的最大 Lyapunov 指数 $\lambda_{\max}$ 分别为: $\lambda_{\max}^0 = 0.0205$, $\lambda_{\max}^1 = 0.0126$, $\lambda_{\max}^3 = 0.0049$, $\lambda_{\max}^5 = 0.0021$ 。浸出液质量浓度时序的最大 Lyapunov 指数 $\lambda_{\max}$ 都大于 0,再次印证了该浸出系统具有混沌特征,且矿石品位越低, $\lambda_{\max}$ 越大,表明系统的混沌程度越高。

3.3 浸出液质量浓度重构相空间相点距演变规律

将重构相空间得到的二维相空间相点 $X(t_i)$ ($i = 1, 2, \dots, 125$),计算其最邻近相点距,可以得到一个包含 125 个最邻近点距离的数组 Z 。各试件浸出液质量浓度在相空间中最邻近相点距演变规律如图 4 所示。由图 4 可知,矿石品位越高,最邻近相点距演变空间范围越广,远离零点的迹线越多。

各试件浸出液质量浓度在相空间中最邻近相点距随时间演变规律如图 5 所示。由图 5 可以看出,矿石品位越高,相点距演变曲线起伏越明显。对比图 5 和图 2,在图 2 中,浸出液质量浓度变化的内在规律被掩盖,难以分辨其混沌特征;而图 5 中,对其进行相空间重构后,浸出液变化的细微特征被“放大”,其内在特征得以充分展示。根据式(10),分别对 Z^0 、 Z^1 、 Z^3 和 Z^5 进行快速傅里叶变换,从而得到各品位试件浸出液质量浓度的时间-功率谱曲线,如图 6 所示。由图 6 可以

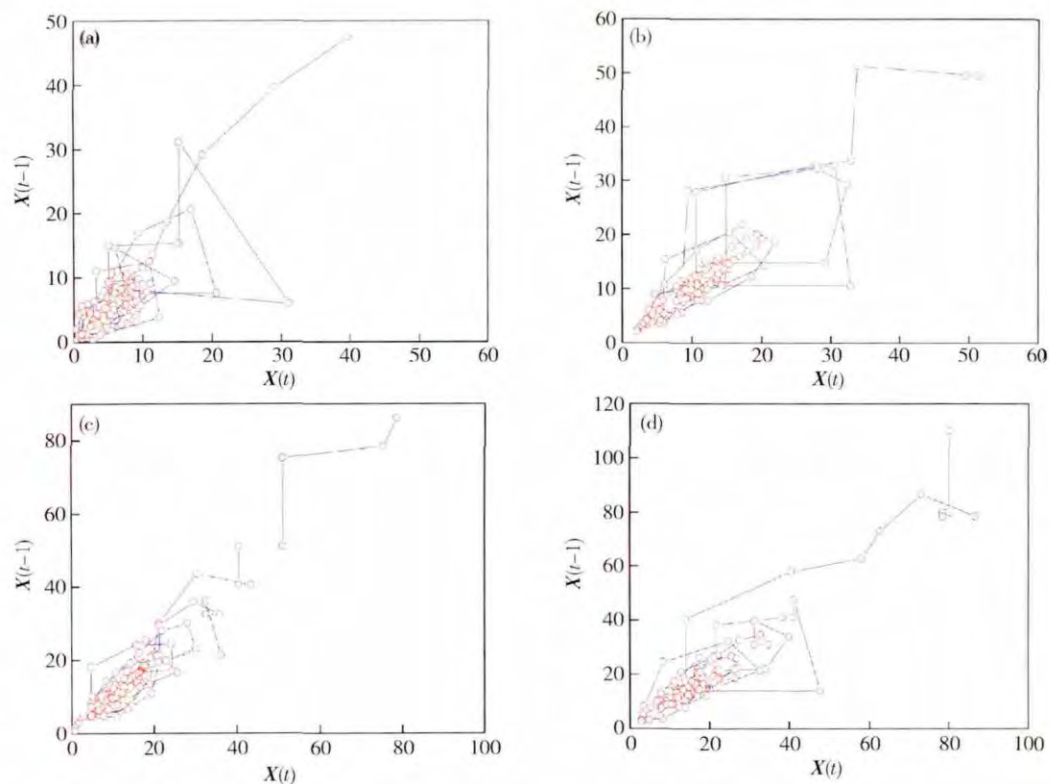


图4 最邻近相点距演变二维轨迹. (a) Z^0 ; (b) Z^1 ; (c) Z^3 ; (d) Z^5

Fig.4 Two-dimensional distance evolution curves of the nearest phase points: (a) Z^0 ; (b) Z^1 ; (c) Z^3 ; (d) Z^5

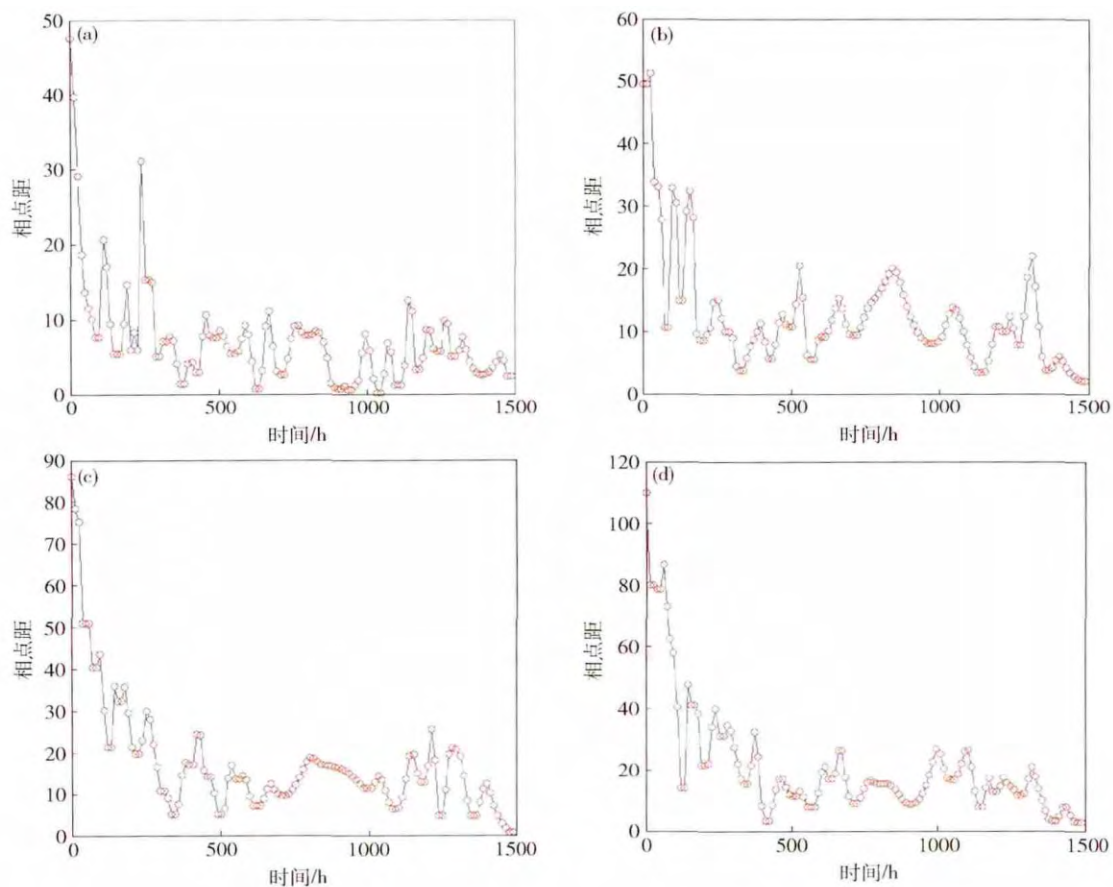


图5 相点距演变曲线. (a) Z^0 ; (b) Z^1 ; (c) Z^3 ; (d) Z^5

Fig.5 Distance evolution curves of phase points: (a) Z^0 ; (b) Z^1 ; (c) Z^3 ; (d) Z^5

看出: 在溶浸反应初期, 体系能量变化幅度较大, 且 $Z^0 < Z^1 < Z^3 < Z^5$, 表明矿石品位越高, 浸出作用越显

著, 系统释放的能量越大; 400 h 以后曲线趋于稳定, 系统能量变化较小。

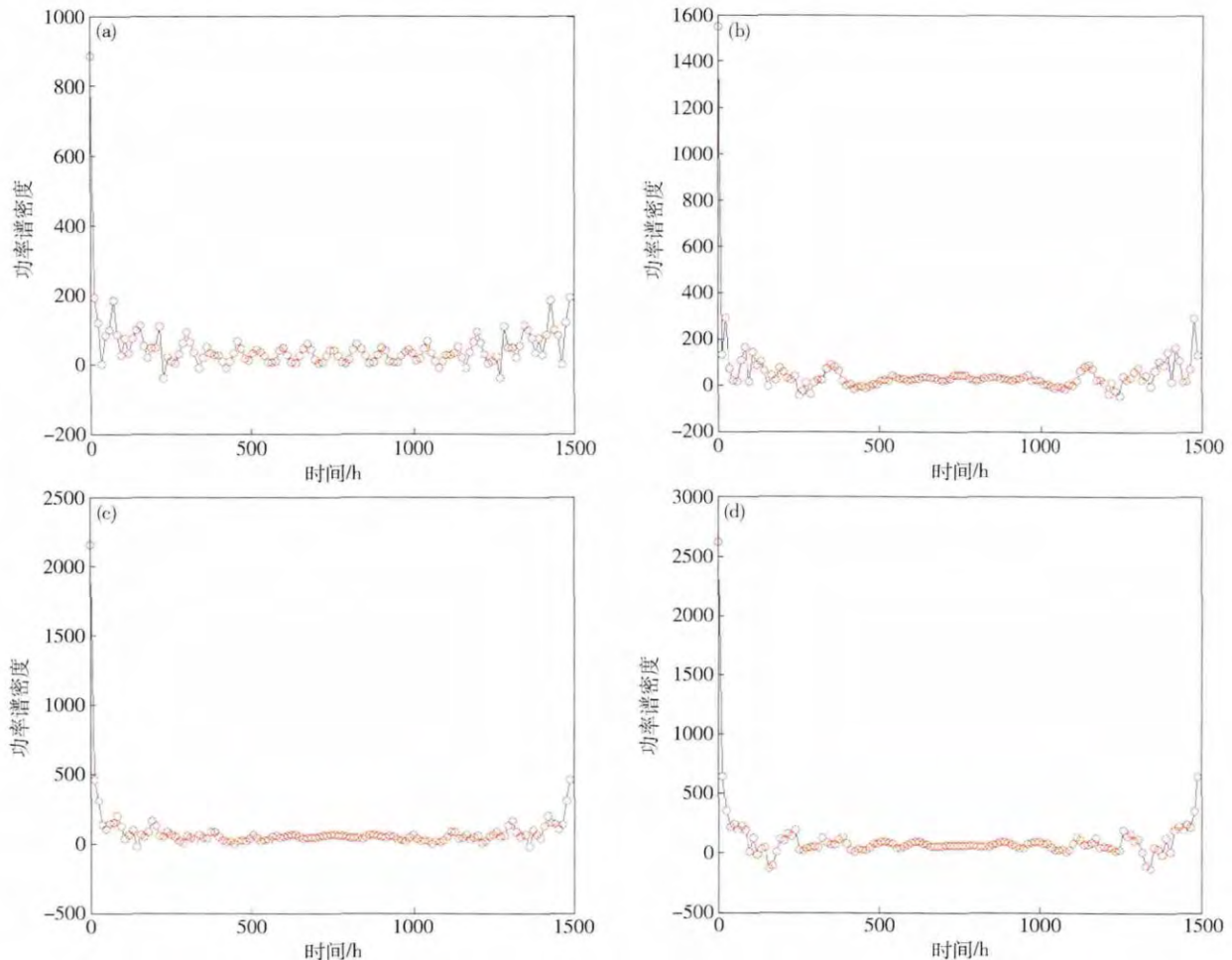


图 6 浸出液质量浓度时间-功率谱曲线. (a) Z^0 ; (b) Z^1 ; (c) Z^3 ; (d) Z^5

Fig. 6 Time-power spectrum curves of leaching solution concentration: (a) Z^0 ; (b) Z^1 ; (c) Z^3 ; (d) Z^5

3.4 浸矿周期预测

对 Z 分别作一阶累加, 得到图 7, 但图中曲线不够光滑. 对 Z 作二阶累加, 得到图 8. 对比图 7 和图 8 可知, 二阶累加曲线较为光滑, 规律性得以增强.

以试件 3 为例, 基于设计浸出率, 对浸矿周期进行残差修正的 GM(1, 1) 灰色预测, 为检验预测结果, 最后 20 个实测数据不参与建模. 相点距实测与预测结果如图 9 所示. 得到预测值后, 由式(8)可得到浸出液质量浓度预测值, 试件 3 的 1284 h 至 1512 h 实测与预测值对比见表 2.

由表 2 可知, 基于重构相空间的残差修正 GM(1, 1) 灰色预测方法精度较高, 能精确地预测浸出液质量浓度演化规律.

假设该矿石的设计浸出率为 80%, 根据式(15)可计算出实测和预测的浸矿周期分别为 1416 h 和 1368 h, 两者仅相差 2 d. 在现场应用中, 随着浸出反应

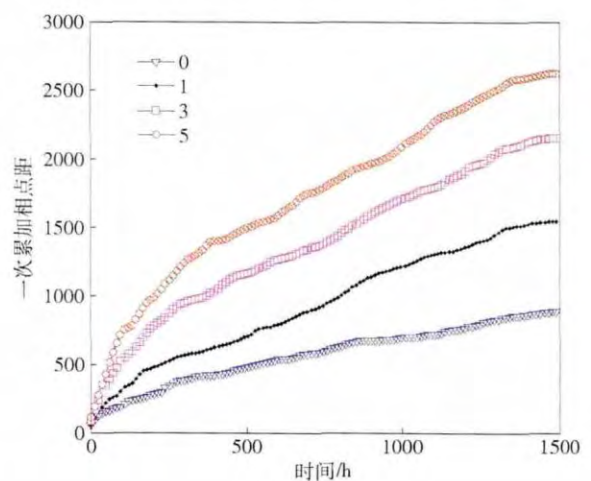


图 7 相点距一阶累加曲线

Fig. 7 First-order accumulated distance curves of phase points

的进行, 对浸出液质量浓度进行实时监测, 并采用残差修正的灰色预测方法, 可以较为准确地预测浸矿周期,

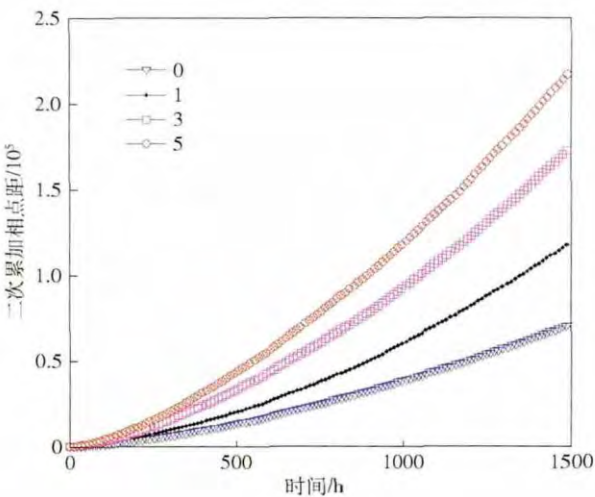


图8 相点距二阶累加曲线

Fig. 8 Second-order accumulated distance curves of phase points

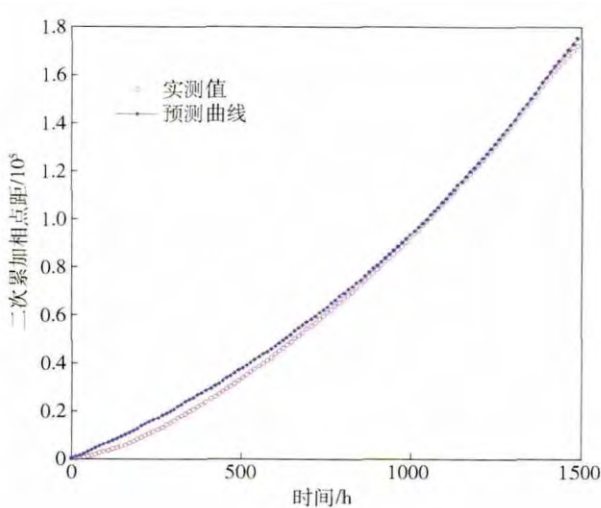


图9 残差修正的二阶相点距实测与预测曲线

Fig. 9 Measured and predicted curves of the residual-modified second-order accumulated distance of phase points

表2 试件3 浸出液质量浓度实测与预测值

Table 2 Predicted and measured leaching solution concentration of No. 3 sample

时间/h	实测值		预测值		误差/%
	质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-3}$)	浸出率/%	质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-3}$)	浸出率/%	
1284	1543	76.87	1559	77.66	1.02
1296	1551	77.26	1561	77.76	0.64
1308	1562	77.82	1578	78.61	1.01
1320	1574	78.41	1584	78.91	0.64
1332	1584	78.89	1591	79.26	0.46
1344	1590	79.21	1597	79.55	0.44
1356	1593	79.34	1603	79.85	0.65
1368	1593	79.36	1612	80.30	1.19
1380	1593	79.36	1619	80.65	1.62
1392	1595	79.45	1630	81.20	2.19
1404	1600	79.70	1643	81.85	2.69
1416	1607	80.04	1658	82.59	3.19
1428	1614	80.40	1663	82.84	3.03
1440	1620	80.70	1676	83.49	3.46
1452	1623	80.87	1680	83.69	3.49
1464	1624	80.90	1689	84.14	4.00
1476	1622	80.82	1694	84.39	4.41
1488	1620	80.70	1695	84.44	4.63
1500	1618	80.62	1697	84.54	4.86
1512	1619	80.65	1698	84.59	4.88

有助于尽早采取相应的技术措施. 当对浸矿周期进行提前预估后,可以有序安排后续筑坝、配制溶浸液、喷淋管线移设、萃取等工艺,使浸矿生产工序得以合理衔接.

4 结论

(1) 浸矿体系是一个复杂的非线性动力系统,浸

出液质量浓度变化表现出混沌特征,重构相空间能“放大”其内在细微特征,使浸出液质量浓度时间序列内在规律得以充分展示.

(2) 矿石品位不同,其浸出液质量浓度在相空间中表现出不同的非线性混沌特征. 品位越低,动力系统关联维数 D_2 越大,最大 Lyapunov 指数亦越大,混沌程度越高,但各试件的饱和嵌入维数相同.

(3) 矿石品位越高,最邻近相点距演变空间范围越广,相点距演变曲线起伏越明显,反应初期其浸出作用越显著,系统释放的能量越大。

(4) 基于重构相空间技术,建立了残差修正的灰色理论 GM(1,1) 预测模型,实现了浸出液质量浓度及浸矿周期的精确预测,为浸矿采矿的现场应用提供理论支撑。

参 考 文 献

- [1] He Y Y, Wen C Q, Liu X F, et al. Chemical component characteristics and tectonic setting of sandstone from Quse Group in Duobuza copper deposit, Tibet, China. *J Chengdu Univ Technol Sci Technol Ed*, 2014, 41(1): 113
(何阳阳, 温春齐, 刘显凡, 等. 西藏多不杂铜矿区曲色组砂岩化学组分特征及构造背景. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(1): 113)
- [2] Ma Y P, Liu C Y, Zhang F X, et al. Genesis and characteristics of the Dongsheng kaolin deposits in Ordos Basin. *J Jilin Univ Earth Sci Ed*, 2007, 37(5): 929
(马艳萍, 刘池洋, 张复新, 等. 鄂尔多斯盆地东胜砂岩型高岭土矿特征及成因机制. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(5): 929)
- [3] Liu Z X, Yin Z L. Study on oxidative ammonia leaching of copper mine tailings in ammonia-ammonium sulphate solution. *Min Metall Eng*, 2012, 32(2): 88
- [4] Liu X Y, Chen B W, Wen J K, et al. Leptospirillum forms a minor portion of the population in Zijinshan commercial non-aeration copper bioleaching heap identified by 16S rRNA clone libraries and real-time PCR. *Hydrometallurgy*, 2010, 104(3-4): 399
- [5] Watling H R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides: a review. *Hydrometallurgy*, 2006, 84(1-2): 81
- [6] Yin S H, Wu A X, Hu K J, et al. Solute transportation mechanism of heap leaching and its influencing factors. *J Cent South Univ Sci Technol*, 2011, 42(4): 1092
(尹升华, 吴爱祥, 胡凯建, 等. 堆浸过程中溶质运移机制及影响因素. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(4): 1092)
- [7] Hernandez J, Patino F, Rivera I, et al. Leaching kinetics in cyanide media of Ag contained in the industrial mining-metallurgical wastes in the state of Hidalgo, Mexico. *Int J Min Sci Technol*, 2014, 24(5): 689
- [8] Sivakumar B. Chaos theory in geophysics: past, present and future. *Chaos Solitons Fractals*, 2004, 19(2): 441
- [9] Sun B B. *Analysis of Characteristics of Chaotic Time Series and Research of Phase Space Reconstruction* [Dissertation]. Shenyang: Northeastern University, 2008
(孙彬彬. 混沌时序的特征量分析及相空间重构研究[学位论文]. 沈阳: 东北大学, 2008)
- [10] Zeng K H, Lu Z Z. Study on chaos and fractal in the prediction of slope deformation destruction. *J Hohai Univ Nat Sci*, 1999, 27(3): 9
(曾开华, 陆兆溱. 边坡变形破坏预测的混沌与分形研究. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(3): 9)
- [11] Jian X C, Zheng J L. Prediction of frequency parameters in short wave radio communications based on chaos and neural networks. *J Tsinghua Univ Sci Technol*, 2001, 41(1): 16
(简相超, 郑君里. 混沌和神经网络相结合预测短波通信频率参数. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(1): 16)
- [12] Liu Z X, Guo Y L, Liu C, et al. Laws of strata energy release and corresponding safety warning system in metal mine. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2011, 21(11): 2508
- [13] Albano A M, Muench J, Schwartz C, et al. Singular-value decomposition and the Grassberger-Procaccia algorithm. *Phys Rev A*, 1988, 38(6): 3017
- [14] Sherif J, Singhanian R. Extracting order from chaos. *Kybernetes*, 2009, 38(6): 1010
- [15] Quan X Z, Jiang C W, Zhang Y C, et al. Theory and its application of the chaos neural network in the runoff forecast. *J Urban Constr Inst*, 1999, 16(3): 33
(权先璋, 蒋传文, 张勇传, 等. 径流预报的混沌神经网络理论及应用. 武汉城市建设学院学报, 1999, 16(3): 33)
- [16] Wolf A, Swift J B, Swinney H L, et al. Determining Lyapunov exponents from a time series. *Phys D*, 1985, 16(3): 285
- [17] Chen S H, Lu J A. *Chaotic Dynamics of Agency*. Wuhan: Wuhan University of Water Conservancy and Electric Power Press, 1998.
(陈士华, 陆君安. 混沌动力学初步. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1998)
- [18] Li X B, Liu Z X. Research on chaos and intelligent identification of acoustic emission in rock mass. *Chin J Rock Mech Eng*, 2005, 24(8): 1296
(李夕兵, 刘志祥. 岩体声发射混沌与智能辨识研究. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(8): 1296)
- [19] Li X B, Liu C, Liu Q, et al. Chaotic time series reconstruction and security alarm system of rock mass deformation in undersea mining. *Chin J Geotech Eng*, 2010, 32(10): 1530
(刘志祥, 刘超, 刘强, 等. 海底开采岩层变形混沌时序重构与安全预警系统研究. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1530)
- [20] Vretblad A. *Fourier Analysis and Its Applications*. New York: Springer-Verlag New York Inc., 2003.
- [21] Lee Y C, Wu C H, Tsai S B. Grey system theory and fuzzy time series forecasting for the growth of green electronic materials. *Int J Prod Res*, 2014, 52(10): 2931
- [22] Liu X Y, Liu A H, Li X B. Experimental study of permeability of rock-like material with filling fractures under high confining pressure. *Chin J Rock Mech Eng*, 2012, 31(7): 1391
(刘欣宇, 刘爱华, 李夕兵. 高围压条件下含充填裂隙类岩石水渗流试验研究. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1391)
- [23] Wu A X, Liu C, Yin S H, et al. Leaching properties of quasi-sandstone type ore. *Chin J Nonferrous Met*, 2014, 24(7): 1856
(吴爱祥, 刘超, 尹升华, 等. 类砂岩型矿石的浸出特性. 中国有色金属学报, 2014, 24(7): 1856)