



生物冶金中微生物系统耗散结构特征分析及演化

袁志华^{1,2}, 孙占学¹, 刘亚洁¹, 李江¹, 李泽兵¹, 周仲魁¹, 温桃³, 孙晓宇¹

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 南昌 330013;

2. 东华理工大学 土木与建筑工程学院, 南昌 330013;

3. 东华理工大学 长江学院, 抚州 344000)

摘要: 采用定性与定量相结合的方法对生物冶金中微生物系统在金属浸出过程中是否形成耗散结构进行分析, 并对生物冶金中微生物系统的演化过程进行推演。结果表明: 生物冶金中微生物系统具备耗散结构特征, 因此, 生物冶金中微生物系统满足耗散结构的开放系统、非线性关系、远离平衡态和涨落的四大条件, 生物冶金中微生物系统在金属浸出过程中存在耗散结构; 对生物冶金中微生物系统进行了演化, 得出了生物冶金中微生物系统演化过程图, 系统最终会自发地发展到稳定态 $x^*=(k-d)/\beta$, 其中 $k-d$ 越大, 饱和系数 β 越小, 这个稳定态数就越大, 越有利于微生物金属浸出。

关键词: 生物冶金; 微生物系统; 耗散结构特征; 演化

文章编号: 1004-0609(2021)-07-1979-10

中图分类号: TF18

文献标志码: A

引文格式: 袁志华, 孙占学, 刘亚洁, 等. 生物冶金中微生物系统耗散结构特征分析及演化[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(7): 1979–1988. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36621

YUAN Zhi-hua, SUN Zhan-xue, LIU Ya-jue, et al. Characteristic analysis and evolution of dissipative structure of microbial system in biometallurgy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 1979–1988. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-36621

热力学第二定律表明热永远都只能由热处转到冷处(在自然状态下), 因此我们看到了“时间箭头”, 一切演化必须沿着箭头的方向进行, 而反方向逆箭头的过程是不会自发产生的。热力学第二定律说明一个孤立的系统要朝均匀、简单、消除差别的方向发展, 这实际上是一种趋向低级运动形式的退化。克劳修斯把这一理论推广到全宇宙, 得出了“宇宙热寂说”的悲观结论, 这与达尔文的进化论显然是相矛盾的。退化与进化矛盾激发了自然科学家们的强烈意愿, 要在物理、化学系统中, 在热力学第二定律的范围内实现由低级运动形式到高级运动形式的演化。人们首先在流体系统中成功完成了这一过程, 以后又接二连三地在各种物理、化学

及其他系统实现了这一设想, 比如贝纳德对流、激光等自组织现象或协同作用。普利高津把这种自组织称为耗散结构, 原因是为了维持这类组织必须不断地对系统作某种形式的“功”, 即不断地“耗散”能量。普利高津分析了这些自组织现象, 说明了耗散结构的特点及其形成条件。耗散结构理论广泛的应用在众多领域, 揭示了其系统耗散结构特征及演化过程^[1-2]。

众多学者在微生物冶金领域也开展了与耗散结构相关的研究工作。EACELAR 等^[3]通过混合自养菌和异养菌对黄铁矿浸出进行研究, 发现异养菌的加入促进了自养菌对黄铁矿的浸出效率, 效率提高的原因是异养菌与自养菌间的协同作用。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41772266); 国防基础科研计划资助项目(JCKY2019401D003)

收稿日期: 2020-10-14; **修订日期:** 2021-01-28

通信作者: 孙占学, 教授, 博士; 电话: 0791-83897597; E-mail: sunzhanxue@aliyun.com

JOHNSON^[4]研究表明,浸矿细菌的一些自身代谢产物对细菌生长有抑制作用,所以加入以有机底物作为能源的异养菌混合培养会有助于这些微生物生长。在随后的实验中,发现用分离到的异养菌混合 *Acidithiobacillus thiooxidans*(简称 *A.t*)浸出黄铁矿,异养菌对其有明显促进效果。刘宏伟^[5]指出实际生物浸出环境中的微生物体系是微生物群落。这些自养型和异养型微生物存在竞争、吞噬、共生和协同关系,同时微生物与浸出环境之间同样存在物质和能量的交换。NGUYEN 等^[6]研究表明,微生物浸出中采用混合菌群要比单一菌种浸矿效果更优。XIAO 等^[7]研究表明,选择合适的微生物功能种群,提高生物冶金微生物群落的物种和代谢多样性,是构建高效生态功能网络的关键。在混合菌种中,除了主要的浸矿微生物外,另一部分非浸矿细菌能够加速金属浸出,这些微生物被统称为辅助浸矿微生物,它们在微生物浸矿过程中也起到了至关重要的作用,在一定程度上提高了细菌的浸矿效率,这也可能是微生物浸矿体系中,微生物之间存在协同作用的体现^[8-10]。GURUNG 等^[11]研究了在微生物浸矿过程中自养菌 *Acidithiobacillus ferrooxidans*(简称 *A.f*)与异养菌 *A. cryptum* 之间的协同作用,研究发现, *A.f* 能有效氧化各种化学形态的硫,使 *A. cryptum* 生长不受浸矿液中硫代硫酸盐的影响,同时,浸出体系中部分有机物可以被 *A. cryptum* 分解,阻碍有机物抑制 *A.f* 菌的生长。异养菌能够产生维生素类的生长因子对矿物的浸出起到促进作用。李江等^[12]在微生物柱浸试验中发现,混合菌群更能适应浸出体系,表现出对铁和硫的高氧化性能,循环利用尾液浸出不仅浸出率稳定也可降低成本,适合应用于低品位铀矿的开采。

综上所述,以上文献研究均表明生物冶金中微生物系统内浸矿微生物与辅助浸矿微生物两者间存在协同作用,这与耗散结构理论存在天然的契合点,但他们并没有对生物冶金中微生物系统是否形成耗散结构进行系统研究。耗散结构理论的诞生为探索自然界复杂系统、协同效应提供了一种科学有效的非线性系统理论^[13]。耗散结构是指在远离平衡非线性区的条件下,当外界条件达到某一阈值时,量变可能引起质变,系统通过不断地与外界交换能量和物质,会自动出现一种自组织现象,组成系统

的各子系统会产生一种互相协调的作用,借助于外界的能量和物质流而维持一种空间或时间的有序结构^[14]。本文将采用定性定量相结合的方法对生物冶金中微生物系统在金属浸出过程中是否形成耗散结构进行分析,并对生物冶金中微生物系统的演化过程进行推演。

1 生物冶金中微生物类型

生物冶金中微生物类型主要有浸矿微生物和辅助浸矿微生物。浸矿微生物有嗜酸性能自养的铁/硫氧化菌,承担将金属氧化浸出的作用,主要为自养型微生物,主要有氧化亚铁硫杆菌(*A.f*)、氧化亚铁硫杆菌微螺菌(*Leptospirillum ferrooxidans*, 简称 *L.f*)和氧化硫硫杆菌(*A.t*)等^[15-16]。其中嗜酸氧化亚铁硫杆菌(*A.f*)可以氧化 Fe^{2+} 离子、元素硫 S^0 和还原态硫化物;嗜酸氧化硫硫杆菌(*A.t*)能氧化元素硫,不能氧化 Fe^{2+} 离子;氧化亚铁微螺菌(*L.f*)能氧化离子,但不能氧化元素硫^[17]。除以上几种主要浸矿微生物外,目前许多研究发现,在硫化矿堆浸体系、硫化矿酸性废水以及酸性温泉中存在其他多种微生物(见表1)^[18-20]。

尽管在生物冶金过程中,嗜酸的浸矿微生物起着主导作用,但是通常在这些环境中也能找到辅助浸矿微生物。尤其是在酸性矿石排出液的沉淀物中更容易找到^[5]。辅助浸矿微生物是浸矿微生物共同生活在矿物环境,大多为异养型微生物,对金属浸出不起直接作用,但这是生物冶金中必不可少的一类微生物,能起到清除浸矿微生物代谢产物的作用。这些微生物的一些种类和主要生长条件见表2。

浸矿微生物能氧化 Fe^{2+} 或 S^{2-} 离子,而辅助浸矿微生物对 Fe^{3+} 或 S^{6+} 有还原能力,还可利用浸矿微生物自养代谢产物作为碳源和能源进行异养生长并解除有机物对浸矿微生物的抑制作用;在生物冶金体系中,辅助浸矿微生物能通过生长代谢分解矿物表面的有机物以提高浸矿微生物对矿物的浸出效率,而浸矿微生物则可以减轻硫化物对辅助浸矿微生物的抑制作用。浸矿微生物与辅助浸矿微生物间的这种协同作用,可以优化环境中群落活性,互相取长补短,使彼此更好地得到生长,进而促进矿物的氧化。

表 1 主要及其他一些浸矿微生物 pH 及温度生长条件表

Table 1 pH and temperature growth conditions of major and other leaching microorganisms

Species	Growth pH range	Optimum growth pH	Growth temperature range/°C	Optimum growth temperature/°C
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	0.5–6.0	2.0–2.5	10–37	30–35
<i>Leptospirillum ferrooxidans</i>	1.0–6.0	2.0	2–40	28–30
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	0.5–6.0	2.0–3.0	15–35	30–35
<i>Thiobacillus thioparus</i>	4.5–10.0	6.6–7.2	10–37	20
<i>Thiobacillus intermedius</i>	1.9–7.0	6.0–7.0	25–35	30
<i>Thiobacillus neapolitanus</i>	3.0–8.5	6.2–7.0	8–37	28

表 2 辅助浸矿微生物 pH 及温度生长条件表

Table 2 pH and temperature growth conditions of auxiliary leaching microorganisms

Species	Growth pH range	Optimum growth pH	Growth temperature range/°C	Optimum growth temperature/°C
<i>Acidiphilium spp.</i>	2.0–6.0	3.5	20–40	30
<i>Aph.acidophilum</i>	1.5–6.0	3.0–3.5	10–35	25–35
<i>A.cryptum</i>	1.5–5.9	3.0	20–41	35–41
<i>A.symbioticum</i>	1.5–5.0	3.0–4.0	–	37
<i>A.organovorum</i>	2.0–5.5	3.0	20–45	37
<i>A.multivorum</i>	1.9–5.6	3.5	17–42	27–35
<i>Thiobacillus acidophilus</i>	1.5–6.5	2.5–3.0	25–37	27–30
<i>Ferromicrobium acidophilus</i>	1.3–4.8	2.0–2.5	20–40	37

2 生物冶金中微生物系统耗散结构特征分析

普利高津提出了形成耗散结构的 4 个必要条件: 必须是一个开放系统; 系统状态变化是非线性关系; 系统远离平衡态; 系统从无序向有序演化是通过随机的涨落来实现。因此探讨生物冶金中微生物系统耗散结构特征, 需要解决 4 方面的问题:

1) 生物冶金中微生物系统是否是开放系统; 2) 生物冶金中微生物系统状态变化是否是非线性关系;

3) 生物冶金中微生物系统能否到达远离平衡态;

4) 生物冶金中微生物系统如何从不稳定状态跃迁到一个新的有序态?

2.1 生物冶金中微生物系统是一个开放系统

热力学第二定律告诉我们, 一个孤立系统的熵一定要随时间增大。熵达到最大值, 系统达到最无序的平衡态。所以, 孤立系统绝不会出现耗散结构。

即使原来的系统存在耗散结构, 一旦把系统孤立起来, 这个结构就要瓦解。开放系统本质上不同于孤立系统主要由系统同外界环境取得负熵。在开放条件下, 系统的总熵有负熵和正熵两部分组成。在负熵小于 0 的情况下, 只要这个负熵流足够强, 它除了抵消掉系统内部的正熵外, 还能够使系统的总熵减少, 从而使系统进入相对有序的状态。生物冶金中微生物系统需外界的 CO₂、O₂、黄铁矿等物质来源, 以满足微生物的生长, 这些物质是微生物系统的负熵。所以, 生物冶金中微生物系统是具有达到耗散结构的开放系统条件。

2.2 生物冶金中微生物系统状态变化是非线性关系

生物冶金中微生物系统状态变化的量叫状态变量 x , 这些变量用来说明系统的有序程度, 所以也叫做序参量。生物冶金中微生物系统状态变化可用浸矿微生物的数量来表征, 由于生物冶金中微生物系统浸出金属是由浸矿微生物来完成的, 浸矿生物与辅助浸矿微生物的协同结果也是促进浸矿

微生物的生长、繁殖。因此, x 也可表示浸矿微生物的个体数。

最简单的浸矿微生物方程便是以下线性方程

$$\frac{dx}{dt} = kx - dx \quad (1)$$

式中: x 为浸矿微生物的个体数; k 为浸矿微生物繁殖后代的能力; d 为浸矿微生物死亡率; x_s 为浸矿微生物初始数量。

这里 k 和 d 为两正数。增殖系数 k 代表浸矿微生物繁殖后代的能力, d 则表示其死亡率。

其定态解为

$$-(k-d)x = 0, x = 0$$

在初始条件下($x_s = a \neq 0$), 方程(1)的解是

$$x = ae^{(k-d)t} \quad (2)$$

式中: t 为时间。

如果 C 源、 O_2 、黄铁矿短缺等, 就会出现 $k < d$ 的情况。随着 $t \rightarrow \infty$, $x \rightarrow 0$, 浸矿微生物将会在系统中消失(见图 1)。

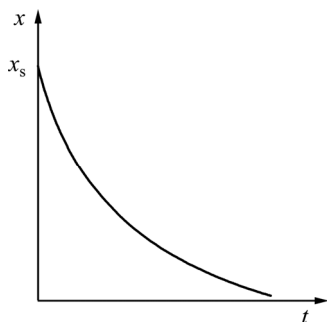


图 1 浸矿微生物消失

Fig. 1 Disappearance of leaching microorganisms

而当食品丰富, 环境优越, 条件有利于浸矿微生物的繁殖发展时, 便会有 $k > d$, 这时只要初始的 x_s 不为零, 以后浸矿微生物都会繁荣发达, 以至无穷(详见图 2)。

因此, 生物冶金中微生物系统在线性条件下, $k < d$ 时, 回到 $x=0$ 的解上来, 这时热力学分支是稳定的; $k > d$ 时, 这样序参量离 $x=0$ 的距离越来越远, 热力学分支不再稳定(见图 3)。这两种归宿我们都不感兴趣。我们希望看到的是, 在一定条件下, 系统能脱离序参量为零的热力学分支而发展到具有非

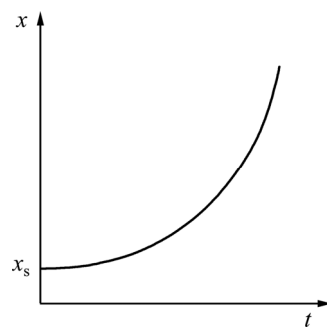


图 2 浸矿微生物发展

Fig. 2 Development of leaching microorganisms

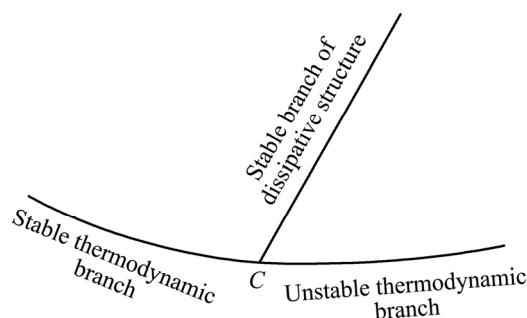


图 3 临界点 C 使系统失去稳定的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of system destabilized by critical point C

零、又有限的序参量值的耗散结构分支上。要在数学上实现这一前景, 所考虑的方程必须是非线性的。

在生物界, 旧的物种由于不适应环境的变化而被淘汰的现象司空见惯。然而, 作为适者生存下来的物种从未出现过无穷发展的现象, 原因仍在于线性方程(1)没有考虑极为重要的饱和因素。由于自然资源有限, 每一物种的发展要受到这种有限资源(如食物等)的制约。当个体数 x 很小时, 这种制约不明显。随着 x 的增大, 自然资源越来越被充分地应用, 对这种资源的竞争就越来越激烈。很多较弱的个体会因得不到生存所必要的物品而中途夭折, 不能参与繁殖后代。这样, 从增殖系数 k 中必须减去一项考虑到饱和效应的项。由于饱和效应随着 x 的增加而日趋显著, 这附加项应与 x 有关。于是 k 应被 $k \rightarrow k - \beta x$ 所代替。而浸矿微生物方程(1)最后变成:

$$\frac{dx}{dt} = (k - \beta x)x - dx = (k - d)x - \beta x^2 \quad (3)$$

式中: β 为饱和系数。

所以,生物冶金中微生物系统是具有达到耗散结构的非线性关系条件。

2.3 远离平衡态

从 2.2 线性方程分析可得,平衡态和近平衡态(线性区)的系统总倾向是趋于无序。所以出现耗散结构的另一重要条件是外界必须驱动开放系统跃出非平衡线性区,到达远离平衡态的区域去。

2.3.1 非线性稳定性分析

浸矿微生物方程为

$$\frac{dx}{dt} = f(x) \quad (4)$$

式中: $f(x)$ 是 x 的非线性函数。

在非线性方程中要判断一个定态解的稳定性,可以推广前面线性方程(1)的稳定性分析方法。假定方程(4)的定态解是 $x=x_0$, 即

$$f(x_0) = 0 \quad (5)$$

式中: x_0 为浸矿微生物的定态数量(可能稳定,可能不稳定); Δx 为浸矿微生物数量的微扰(微小变化)。

现在在定态 x_0 上加一个小小的微扰 Δx , 使

$$x = x_0 + \Delta x$$

在 $t > 0$ 后, x 是趋于 x_0 还是远离 x_0 。如是前者,则 x_0 是稳定的;如是后者,说明 x_0 不稳定。将 $x = x_0 + \Delta x$ 代入(4),由于 x_0 是常数,方程(4)变成

$$\frac{d(\Delta x)}{dt} = f(x_0 + \Delta x) \quad (6)$$

又由于 Δx 是极小的偏离,所以 $f(x_0 + \Delta x)$ 可以表示为

$$f(x_0 + \Delta x) = f(x_0) + f'(x_0)\Delta x = f'(x)\Delta x \quad (7)$$

其中

$$f'(x_0) = \left. \frac{df(x)}{dx} \right|_{x=x_0}$$

式(7)的第二个等号是因为考虑到式(5)。这样式(6)就化为线性方程:

$$\frac{d(\Delta x)}{dt} = f'(x_0)\Delta x \quad (8)$$

和式(1)一样,它的解为

$$\Delta x = \Delta x_0 e^{f'(x_0)t}$$

式中: Δx_0 是在 $t=0$ 时微干扰使 x 对定态 x_0 偏离的值。现在, x_0 的稳定性就决定于 $f'(x_0)$ 。如 $f'(x_0) < 0$, 则 x_0 稳定; $f'(x_0) > 0$, 说明 x_0 不稳定。

2.3.2 生物冶金中微生物系统的非线性定态分析

在生物冶金中微生物系统内存在浸矿微生物的生长存在式(3)非线性增长方式。

式(3)与式(1)的不同之处在于它增加了一个非线性项 x^2 。

式(3)的定态方程如下:

$$(k-d)x - \beta x^2 = 0$$

式(3)有两个解,即解为

$$x = 0 \text{ 和 } x = \frac{k-d}{\beta}$$

定态解是热力学分支解 $x=0$ 。在 $x=0$ 附近,式(4)通过式(8)的证明可线性化为

$$\frac{d\Delta x}{dt} = f'(0)\Delta x = (k-d)\Delta x \quad (9)$$

其解为

$$\Delta x = \Delta x_0 e^{(k-d)t}$$

当 $(k-d) < 0$, 随着 $t \rightarrow \infty$, $\Delta x \rightarrow 0$ 。因此, $x=0$ 的解是稳定的。然而当 $k > d$ 时, 尽管 $x=0$ 仍然是序参量方程(4)的定态解,但它已不再稳定,因为(9)式中 e 指数上 $k-d$ 为正,所以对 $x=0$ 的微小偏离都会使系统离热力学分支越来越远。非线性项 x^2 会把序参量限制在一个有限而非零的值上,这种偏离就不会无穷发展。可以对新的定态 $x_0 = \frac{k-d}{\beta}$ 进行线性稳定性分析。

x_0 在附近非线性方程式(4)通过式(8)的证明可线性化为

$$\frac{d\Delta x}{dt} = f'(x_0)\Delta x = \left[(k-d) - 2\beta \frac{k-d}{\beta} \right] \Delta x = -(k-d)\Delta x \quad (10)$$

其解 $\Delta x = \Delta x_0 e^{-(k-d)t}$

当 $k < d$ 时, 随 $t \rightarrow \infty$, $\Delta x \rightarrow \infty$, 这样序参量离 $x = (k-d)/\beta$ 距离越来越远, 热力学分支不再稳定。但是当 $k > d$ 时, 随 $t \rightarrow \infty$, $\Delta x \rightarrow 0$, 所以 $x_0 = (k-d)/\beta$ 是稳定的。这样, 我们看到了非线性项的奇特作用。它使热力学分支失稳后序参量并不向无穷发散, 而收敛到了序参量不为零的新的稳定态上, 这个稳定态就是图 3 中的耗散结构分支。

因此, 从以上分析可得出, 当 $k < d$ 时, 浸矿微生物在生物冶金中微生物系统内会慢慢消失。但当 $k > d$ 时, 浸矿微生物数量不会发展到无穷, 而只是发展到稳定态

$$x^* = (k-d)/\beta \quad (11)$$

式中: x^* 为浸矿微生物的稳定态数量。

$k > d$ 越大, 饱和系数 β 越小(即资源越丰富), 这个稳定态的数就越大。如果 β 很大(资源短缺, 而饱和效应显著), 即使 k 很大(浸矿微生物繁殖能力强), 最终浸矿微生物种群也不会很大。这个稳定态值就是生物冶金中微生物系统允许浸矿微生物所能维持的浸矿微生物的个体数目(见图 4)。

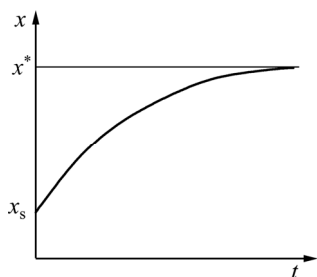


图 4 浸矿微生物数量

Fig. 4 Number of leaching microorganisms

在生物冶金中微生物系统的平衡态(孤立系统) $x=0$, 系统是稳定的。随着外界环境改变(加入辅助浸矿微生物、 CO_2 、 O^2 等), 系统成了开放系统, 浸矿微生物不断的生长、繁殖, 但由于饱和效应的存在, 浸矿微生物不可能一直在线性区, 系统会跃出非平衡线性区; 当浸矿微生物的 $k > d$ 时, 系统会发展到稳定态 $x^* = (k-d)/\beta$, 这个稳定态显然远离了平衡态。

以上是从定量角度分析生物冶金中微生物系

统存在远离平衡态。下面将从定性角度分析生物冶金中微生物系统存在远离平衡态。众多文献从实验角度, 观察到浸矿微生物与辅助浸矿微生物互为促进, 两者存在的协同作用, 浸矿微生物的生长、复制需要系统内的伴生矿体黄铁矿以及外界环境的 CO_2 和 O^2 等, 其代谢产生的 DOC 需要辅助浸矿微生物清除, 否则会抑制浸矿微生物的生长, 由于 DOC 恰好是辅助浸矿微生物的能源, 辅助浸矿微生物得到生长、繁殖又可以清理更多的浸矿微生物的代谢产物, 从而不断的提高系统内金属浸出效率。系统内浸矿微生物与辅助浸矿微生物的协同作用是系统到达远离平衡态的证明。

所以, 从定性与定量角度都得出了生物冶金中微生物系统是具有达到耗散结构的远离平衡态条件。

2.4 生物冶金中微生物系统涨落导致有序

涨落是系统要素的独立运动或局部产生的各种运动以及在环境的干扰下系统状态变量偏离平均值的一种随机现象。生物冶金中微生物系统从一开始浸出就存在的涨落, 这些涨落不会对系统产生大的影响, 还不会出现高效浸出。但是在临界点的涨落则十分不同, 这种涨落会不仅强度大, 而且具有时间和空间的协同, 热力学分支失去稳定。正是这个“失去稳定”联系着自组织。从上述证明中可得, 当浸矿微生物 $k > d$ 时, 浸矿微生物数量不会发展到无穷, 而是会发展到稳定态, $k=d$ 就是系统“失去稳定”进入自组织突变的临界点。

但在系统到达临界点之前, 系统需不断接受正反馈。在生物冶金中微生物系统内, 浸矿微生物通过自我复制、自我放大使无数个小分子的微观行为得到协同而产生出宏观的序, 浸矿微生物的自我复制、自我放大就是正反馈。浸矿微生物的自我复制、自我放大需系统是开放的、需辅助浸矿微生物的帮助, 由于辅助浸矿微生物可以清除浸矿微生物产生的 DOC, 但是数量不能太多, 若占了优势的话会影响自养型微生物生长, 否则就会出现负反馈, 最终影响金属浸出。热力学分支的稳定性取决于这种正反馈与耗散因素的竞争。当正反馈较弱而后者占优势时, 热力学分支是稳定的; 反之, 正反馈起支配

地位了, 原来的状态就要失稳, 使得系统涨落累积放大, 系统到达临界点附近, 这时, 很可能出现巨涨落, 而这种涨落可能不被耗散, 导致系统跃迁到一个新的有序态。

3 生物冶金中微生物系统的演化

通过生物冶金中微生物系统耗散结构特征分析, 可以得出生物冶金中微生物系统的演化过程。生物冶金中微生物作用浸出金属主要靠浸矿微生物, 但是在浸出的过程中会产生有机物质 DOC, DOC 会抑制浸矿微生物的增长, 使系统不断的产生正熵, 最后系统会达到平衡态, 无法实现微生物金属浸出。因此生物冶金中微生物系统需要加入外界

负熵, 一定量的辅助浸矿微生物, 清除系统内的 DOC, 而且生物冶金中微生物作用过程中也需要外界的 CO_2 和 O_2 。因此要使得生物冶金中微生物系统出现耗散结构, 首先是生物冶金中微生物系统需是一个开放系统, 向系统输入外界负熵, 除了抵消系统内正熵, 还能使系统总熵减少。然后系统慢慢远离平衡态, 处在非线性区 $\frac{dx}{dt} = (k-d)x - \beta x^2$, 浸

矿微生物不断地自我复制、自我放大的正反馈, 使得系统涨落累积放大, 当参量 $k > d$ ($k=d$ 是突变的临界点) 时, 涨落累积引发突变, 系统发展到稳定态 $x^* = (k-d)/\beta$, 形成了新的有序结构进入新的演化轨道, 生物冶金中微生物系统出现耗散结构, 实现微生物金属高效浸出, 以上演化过程如图 5 所示。

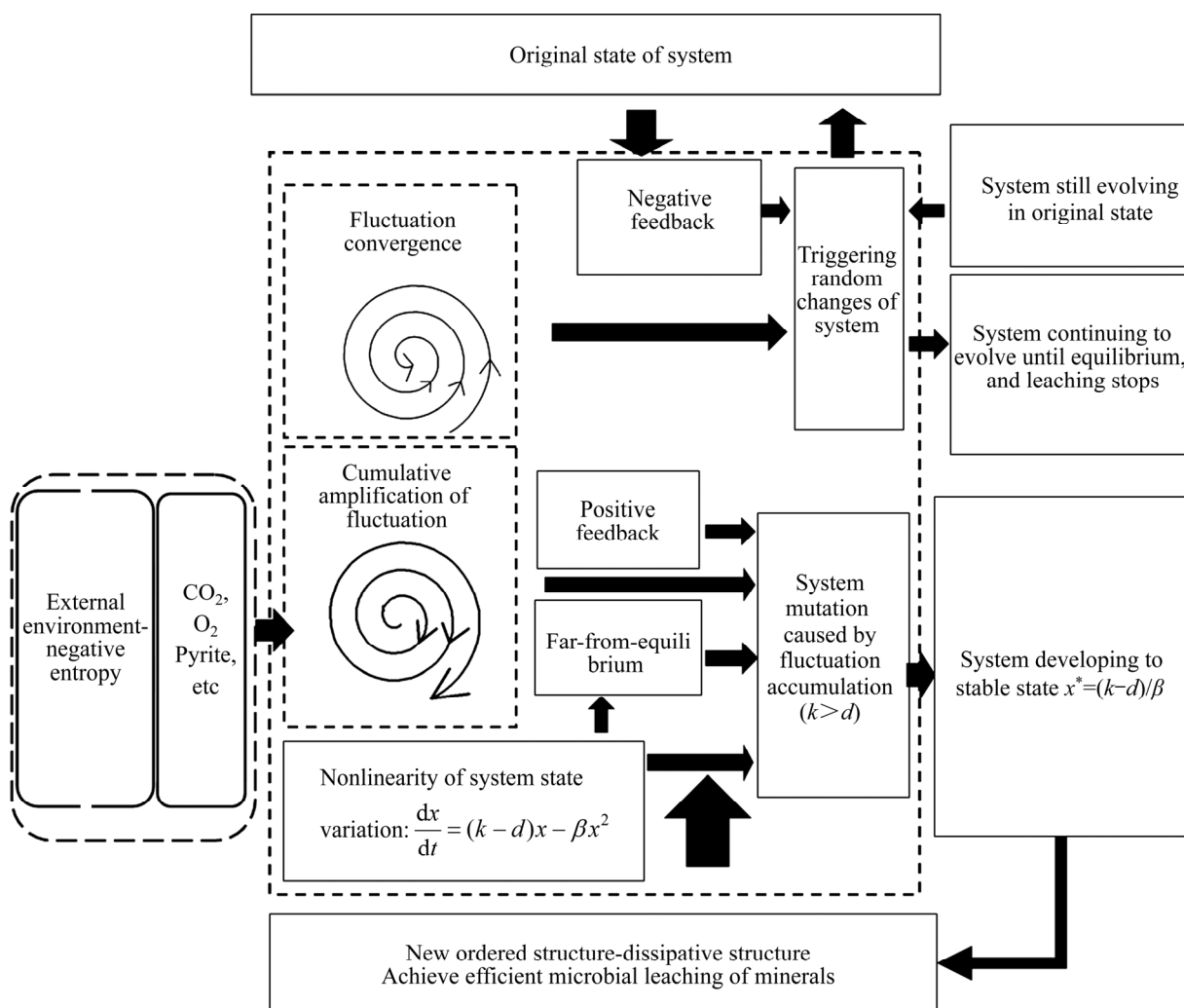


图 5 生物冶金中微生物系统演化过程图

Fig. 5 Evolution process diagram of microbial system in biometallurgy

4 结论

1) 生物冶金中微生物系统具备耗散结构特征。因此,生物冶金中微生物系统满足耗散结构的开放系统、非线性关系、远离平衡态和涨落的四大条件,生物冶金中微生物系统在金属浸出过程中存在耗散结构。

2) 对生物冶金中微生物系统进行了演化,得出了生物冶金中微生物系统演化过程图。前面已经说明生物冶金中微生物系统是一个开放系统,需向系统输入外界负熵,以此抵消系统内正熵,使系统总熵减少。然后系统慢慢远离平衡态,处在非线性区 $\frac{dx}{dt} = (k-d)x - \beta x^2$, 浸矿微生物不断的自我复制、自我放大的正反馈,使得系统涨落累积放大;当参量 $k > d$ ($k=d$ 是突变的临界点)时,涨落累积引发突变,系统发展到稳定态 $x^* = (k-d)/\beta$, 形成了新的有序结构进入新的演化轨道,生物冶金中微生物系统出现耗散结构,实现微生物金属高效浸出。

3) 稳定态方程中 $k-d$ 越大,饱和系数 β 越小,这个稳定态的数就越大,越有利于微生物金属浸出。首先系统内需提供一定量的 CO_2 和 O_2 , 为浸矿微生物提供 C 源和载体;其次系统内需有充足的伴生矿体黄铁矿,为浸矿微生物提供能源,若系统内不够,在经济允许的条件下需向系统内加入外源黄铁矿。

REFERENCES

- [1] 徐丽娟, 赵焱, 张文鸽, 等. 基于耗散结构理论的水资源复杂系统演化研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(11): 56-61.
XU Li-juan, ZHAO Yan, ZHANG Wen-ge, et al. Study on complex water resources system evolutionary mechanism based on dissipative structure theory[J]. People's Yellow River, 2018, 40(11): 56-61.
- [2] 范钢伟, 张东升, 陈铭威, 等. 采动覆岩裂隙体系统耗散结构特征与突变失稳阈值效应[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(6): 1093-1101.
FAN Gang-wei, ZHANG Dong-sheng, CHEN Ming-wei, et al. Dissipative structure feature of mining fractured overburden system and threshold effect of catastrophic instability [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2019, 36(6): 1093-1101.
- [3] BACELAR-NICOLAU P, JOHNSON D B. Leaching of pyrite by acidophilic heterotrophic iron-oxidizing bacteria in pure and mixed cultures[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1999, 65(2): 585-590.
- [4] JOHNSON D B. Biodiversity and ecology of acidophilic microorganisms[J]. FEMS Microbiology Ecology, 1988, 27: 307-317.
- [5] 刘宏伟. *Acidithiobacillus ferrooxidans* 与 *Acidiphilium acidophilum* 共培养体系的协同作用及其生物浸出研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
LIU Hong-wei. Studies on synergetic interaction of co-cultured *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidiphilium acidophilum*, and the application of bioleaching[D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [6] NGUYEN V K, LEE M H, PARK H J, et al. Bioleaching of arsenic and heavy metals from mine tailings by pure and mixed cultures of *Acidithiobacillus spp*[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2015, 21: 451-458.
- [7] XIAO Y H, LIU X D, MA L Y, et al. Microbial communities from different subsystems in biological heap leaching system play different roles in iron and sulfur metabolisms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(15): 6871-6880.
- [8] 冯光志, 石玉, 舒玉凤. 微生物浸出技术及其在尾矿开发中的应用[J]. 生物学杂志, 2016, 33(1): 92-97.
FENG Guang-zhi, SHI Yu, SHU Yu-feng. Microbial leaching technology and its application in the exploitation of the tailings[J]. Journal of Biology, 2016, 33(1): 92-97.
- [9] 文旭祥, 孙占学, 周义朋, 等. 微生物浸铀研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(2): 411-420.
WEN Xu-xiang, SUN Zhan-xue, ZHOU Yi-peng, et al. Advances in research on microbial leaching of uranium[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(2): 411-420.
- [10] 朱宏飞, 李辉, 刘东奇. 三种浸矿细菌协同作用的回顾及展望[J]. 微生物学通报, 2016, 43(12): 2730-2737.
ZHU Hong-fei, LI Hui, LIU Dong-qi. A review of synergy development and prospect of three leaching bacteria[J]. Microbiology China, 2016, 43(12): 2730-2737.
- [11] GURUNG A, CHAKRABORTY R. The role of *Acidithiobacillus ferrooxidans* in alleviating the inhibitory effect of thiosulfate on the growth of acidophilic

- Acidiphilium* species isolated from acid mine drainage samples from Garubathan, India[J]. Canadian Journal of Microbiology, 2009, 55(9): 1040–1048.
- [12] 李江, 刘亚洁, 周谷春, 等. 低品位铀矿石微生物柱浸试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(6): 36–39.
LI Jiang, LIU Ya-jie, ZHOU Gu-chun, et al. Column bioleaching of low-grade uranium ore[J]. Nonferrous Metals (Smelting Section), 2012(6): 36–39.
- [13] G尼科里斯, I普利高津. 探索复杂性[M]. 罗久里, 陈奎宁, 译. 成都: 四川教育出版社, 2010: 22–41.
NIKOLIS G, PRIGOGINE I. Explore complexity[M]. LUO Jiu-li, CHEN Kui-ning, transl. Chengdu: Sichuan Education Press, 2010: 22–41.
- [14] 申维. 耗散结构、自组织、突变理论与地球科学[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
SHEN Wei. Dissipative structure, self-organization, catastrophe theory and earth science[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008.
- [15] 赵凯, 黎广荣, 周义朋, 等. 砂岩型铀矿浸出研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(6): 40–48.
ZHAO Kai, LI Guang-rong, ZHOU Yi-peng, et al. Research progress of leaching of sandstone-type uranium ore[J]. Nonferrous Metals (Smelting Section), 2019(6): 40–48.
- [16] 郭勤, 韩文艳, 李江, 等. 氯离子对氧化亚铁硫杆菌和氧化亚铁钩端螺菌活性的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(1): 42–45.
GUO Qin, HAN Wen-yan, LI Jiang, et al. The effect of chloride ion on the activity of *Thiobacillus ferrooxidans* and *Leptospira ferrooxidans*[J]. Non-ferrous Metals (Smelting Part), 2015(1): 42–45.
- [17] 钱林. *Acidithiobacillus ferrooxidans* 和 *Acidiphilium* spp. 细菌的分离鉴定及其协同浸出黄铜矿能力研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
QIAN Lin. *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidiphilium* spp. isolation and identification of bacteria and their ability to co-leach chalcopryrite[D]. Changsha: Central South University, 2008.
- [18] ZANE G M, YEN H C B, WALL J D. Effect of the deletion of qmoABC and the promoter-distal gene encoding a hypothetical protein on sulfate reduction in *Desulfovibrio vulgaris hildenborough*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2010, 76(16): 5500–5509.
- [19] URBIETA M S, RASCOVAN N, VÁZQUEZ M P, et al. Genome analysis of the *thermoacidophilic archaeon Acidianus copahuensis* focusing on the metabolisms associated to biomining activities. BMC Genomics, 2017, 18: 445.
- [20] GIAVENO M A, URBIETA M S, ULLOA J R, et al. Physiologic versatility and growth flexibility as the main characteristics of a novel *thermoacidophilic Acidianus* strain isolated from Copahue geothermal area in Argentina[J]. Microbial Ecology, 2013, 65(2): 336–346.
- [21] 李宏煦, 王淀佐. 生物冶金中的微生物及其作用[J]. 有色金属, 2003, 55(2): 58–62.
LI Hong-xu, WANG Dian-zuo. Review of investigation on microorganism behaviors in ore bio-leaching[J]. Nonferrous Metals, 2003, 55(2): 58–62.
- [22] 刘亚洁, 柳建设, 李江, 等. 含氟铀矿石酸法堆浸与生物堆浸体系微生物群落多样性比较[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(3): 26–31.
LIU Ya-jie, LIU Jian-she, LI Jiang, et al. Comparison of microbial community diversity in acidic heap leaching and bio-heap-leaching with fluoride-bearing uranium ores[J]. Nonferrous Metals (Smelting Section), 2016(3): 26–31.
- [23] 孙占学, 刘媛媛, 马文洁, 等. 铀矿区地下水及其生态安全研究进展[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 158–167.
SUN Zhan-xue, LIU Yuan-yuan, MA Wen-jie, et al. A review on the study of groundwater and its ecological safety in uranium mining areas[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(4): 158–167.
- [24] 邱冠周, 刘学端. 用生物技术的钥匙开启矿产资源利用的大门[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1848–1858.
QIU Guan-zhou, LIU Xue-duan. Biotech key to unlock mineral resources value[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1848–1858.
- [25] LIU Hong-wei, XU Liang-feng, GUO Xue, et al. Comparative genome analysis on intraspecific evolution and nitrogen fixation of *Leptospirillum ferriphilum* isolates[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(6): 1635–1646.
- [26] 余润兰, 石丽娟, 周丹, 等. 生物浸出过程中微生物协同作用机制的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(10): 3006–3014.
YU Run-lan, SHI Li-juan, ZHOU Dan, et al. Research development of microorganism synergy mechanisms during bioleaching[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(10): 3006–3014.

Characteristic analysis and evolution of dissipative structure of microbial system in biometallurgy

YUAN Zhi-hua^{1,2}, SUN Zhan-xue¹, LIU Ya-jue¹, LI Jiang¹, LI Zhe-bing¹,
ZHOU Zhong-kui¹, WEN Tao³, SUN Xiao-yu¹

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology,
Nanchang 330013, China;

2. School of Civil and Construction Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;

3. Yangtze River College, East China University of Technology, Fuzhou 344000, China)

Abstract: A combination of qualitative and quantitative methods was used to analyze whether the microbial system in biometallurgy forms a dissipative structure during the metal leaching process, and the evolution of the microbial system in biometallurgy was deduced. The microbial system in biometallurgy has the characteristics of dissipative structure. Therefore, the microbial system in biometallurgy satisfies the four major conditions of dissipative structure: open system, nonlinear relationship, far from equilibrium and fluctuations. The microbial system in biometallurgy has dissipative structure in metal leaching process. There is a dissipative structure in the leaching process. The microbial system in biometallurgy is evolved, and the evolution process diagram of the microbial system in biometallurgy is obtained. The system will eventually develop spontaneously to a new steady state $x^*=(k-d)/\beta$, Where the larger the $k-d$, the smaller the saturation coefficient β , and the larger the steady-state number, which is more conducive to microbial metal leaching.

Key words: biometallurgy; microbial system; dissipative structure characteristics; evolution

Foundation item: Projects(41772266) supported by the National Natural Science Foundation of China; Project (JCKY2019401D003) supported by the National Defense Basic Research Program, China

Received date: 2020-10-14; **Accepted date:** 2021-01-28

Corresponding author: SUN Zhan-xue; Tel: +86-791-83897597; E-mail: sunzhanxue@aliyun.com

(编辑 李艳红)