

# 细菌堆浸中流动-反应-传热耦合 过程数值模拟分析\*

吴爱祥<sup>1</sup>, 刘金枝<sup>1,2</sup>, 尹升华<sup>1</sup>, 王洪江<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院,北京 100083;  
2. 上海海洋大学 信息学院,上海 201306)

**摘要:** 针对辉铜矿微生物浸出过程进行数学建模,利用 Comsol Multiphysics 软件对浸堆中热量传递、氧气流动、目的金属离子分布以及氧化转化率等进行数值模拟分析.结果表明:沿堆体斜坡边界处氧的浓度较大,而在堆的中央部分,氧气的浓度非常小,导致这部分区域浸出反应缓慢;沿浸堆边坡处的温度偏低,温度最高的部分在底部区域附近靠近边坡位置处,且温度升高值超过 6℃;矿堆底部靠近边坡区域目的金属离子浓度最高;靠近底部和斜坡部分,浸出反应速率快、氧化转化率高.矿堆的其余部分,因氧浓度低,导致浸出反应速率缓慢、氧化转化率低.

**关键词:** 堆浸; 流动-反应-传热耦合模型; 细菌浸出; 数值模拟

**中图分类号:** TD953 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.3879/j.issn.1000-0887.2010.12.001

## 引 言

细菌浸出方法主要用于处理含有比较稳定的硫化矿物的矿石.其浸出过程十分复杂,整个采矿过程是建立在化学反应和物理化学作用的基础之上的,细菌加速溶液及矿物表面  $\text{Fe}^{2+}$  氧化为  $\text{Fe}^{3+}$ ,以及  $\text{Fe}^{3+}$  对硫化矿氧化浸出,此时浸出反应需要氧的参与<sup>[1]</sup>.

近来,微生物湿法冶金的基础研究引起了科技工作者的高度关注,针对该过程的数学建模提出过许多不同的建模思路与方法<sup>[2-11]</sup>.其中 Dixon 和 Petersen 发展了一种综合描述细菌运移、生长、吸附与解吸的生物堆浸模型<sup>[3]</sup>;Bouffard 和 Dixon 建立了一个一维的 Turner Structure 模型,对生物堆浸过程中的水动力学行为进行深入研究<sup>[4]</sup>;Sidborn 和 Moreno 讨论了二维瞬态条件下,生物浸出辉铜矿过程中的热流和气流行为,对对流-扩散影响下的溶质传递进行了数值模拟研究<sup>[8]</sup>.最近,Leahy,Davidson 和 Schwarz 在假设浸出速率受氧控制和矿堆内部恒温的条件下,提出了辉铜矿生物浸出过程中的三相计算流体动力学(CFD)模型<sup>[9]</sup>.

\* 收稿日期: 2010-03-28; 修订日期: 2010-10-09

**基金项目:** 国家自然科学基金(重点)资助项目(50934002);中国博士后科学基金资助项目(20090450014);博士点基金资助项目(20070008038);国家自然科学基金资助项目(50774011)

**作者简介:** 吴爱祥(1963—),男,湖北仙桃人,教授,博士,博士生导师

(E-mail: wuaixiang@126.com);

刘金枝,副教授,博士(联系人. E-mail: jzliu@shou.edu.cn).

实际堆浸过程中,因液流与气流传热以及化学反应放热等因素的影响,矿堆中不可能保持恒定的温度.本文将在已有研究工作的基础上,进一步考虑微生物浸出过程当中的热量传递,对与细菌生长与繁殖有关的浸矿动力学作进一步研究,建立堆浸过程中流动-反应-传热全耦合模型控制方程组.最后,基于 Comsol Multiphysics 数值模拟软件,对浸出过程进行数值模拟分析.

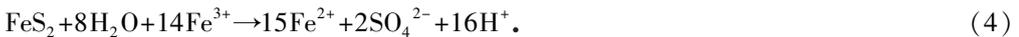
## 1 细菌浸出数学模型

### 1.1 浸出机理

含铜的硫化矿相对来说比较稳定,只有在强氧化条件或细菌的参与下才会被溶解浸出,细菌通过间接作用,加速溶液及矿物表面  $\text{Fe}^{2+}$  氧化为  $\text{Fe}^{3+}$  以及  $\text{Fe}^{3+}$  对硫化矿氧化浸出,此时浸出反应需要氧的参与:



因自然界的辉铜矿中通常会伴有黄铁矿 ( $\text{FeS}_2$ ) 存在,故实际浸出过程中除辉铜矿氧化外,同时还会发生黄铁矿的氧化:



因此,浸出一定量的铜必然有一定量的黄铁矿被同时浸出.通常,用  $F_{\text{PY}}$  代表被浸出的黄铁矿与辉铜矿的质量比.

### 1.2 气流动力学模型

堆中气体的流动用 Navier-Stokes 方程描述为<sup>[12]</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_g \rho_g \nu_g) + \varepsilon_g \rho_g \nabla \cdot \nu_g = -\varepsilon_g \nabla p + \varepsilon_g \rho_g \Delta \nu_g - \frac{\varepsilon_g^2 \mu_g}{K} \nu_g, \quad (5)$$

式中,  $\nu_g$  为气体的流速 (m/s),  $\varepsilon_g$  为气体所占矿堆总体积分数,  $\rho_g$  为气体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $p$  为气体压力 (Pa),  $\mu_g$  为气体粘度 ( $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ ),  $K$  为矿堆的透气性 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

### 1.3 液相传质

#### 1.3.1 数学模型

描述堆浸过程中水溶物种随溶浸液传输的模型为一般的对流-扩散方程,其中包括溶液中的氧  $C_L$  ( $\text{kg}/\text{L}$ ) 和细菌  $C_\phi$  ( $\text{mg}/\text{L}$ )、亚铁离子  $C_{\text{Fe}^{2+}}$  ( $\text{kg}/\text{L}$ )、铁离子  $C_{\text{Fe}^{3+}}$  ( $\text{kg}/\text{L}$ ) 和目的金属离子  $C_{\text{Cu}^{2+}}$  ( $\text{kg}/\text{L}$ ). 基于质量守恒原理的溶质传输方程为

$$\varepsilon_L \frac{\partial(C_i)}{\partial t} = D_L \varepsilon_L \Delta C_i - q_L \cdot \nabla C_i + R_i, \quad (6)$$

式中,  $C_i$  为溶质中物种  $i$  的浓度,  $\varepsilon_L$  为液体所占矿堆总体积比,  $q_L$  为液相 Darcy 速度,  $q_L = \varepsilon_L v_L$ ,  $v_L$  为液体的表面流速 (m/s),  $R_i$  为物种  $i$  的源/汇项,  $D_L$  为氧在液体中的扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $y$  为距离堆底的高度 (m).

若假设液体只有垂直向下的流动,则方程(6)可进一步写为

$$\varepsilon_L \frac{\partial C_i}{\partial t} = D_L \varepsilon_L \Delta C_i - q_L \frac{\partial C_i}{\partial y} + R_i. \quad (7)$$

若用  $\psi$  (mg/L) 表示吸附于矿石表面的细菌密度, 则满足方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon_{\text{ore}} \psi) = R_{\psi}, \quad (8)$$

式中,  $\varepsilon_{\text{ore}} = \rho_{\text{B}} \varepsilon_{\text{o}}$  为矿堆密度, 其中  $\rho_{\text{B}}$  为矿石密度,  $\varepsilon_{\text{o}}$  为固体骨架占矿堆总体积比. 显然有

$$\varepsilon_{\text{L}} + \varepsilon_{\text{g}} + \varepsilon_{\text{o}} = 1.$$

### 1.3.2 源/汇项

液相中氧浓度方程的源/汇项为<sup>[12]</sup>

$$R_{\text{CL}} = -\mu \frac{0.25M_{\text{O}_2}}{M_{\text{Fe}^{2+}} + Y}(\varepsilon_{\text{ore}} \psi + \varepsilon_{\text{L}} \phi) - k_{\text{L}}(C_{\text{L}} - H_{\text{e}} \cdot C_{\text{g}}), \quad (9)$$

式中,  $M$  表示摩尔重量,  $Y$  为细菌产出率,  $\mu$  为细菌生长比速率, 由双重的 Monod 生长动力学方程给出:

$$\mu = \mu_{\text{max}} \left( \frac{C_{\text{L}}}{K_{\text{M,O}} + C_{\text{L}}} \right) \cdot \left( \frac{C_{\text{Fe}^{2+}}}{K_{\text{M,Fe}^{2+}} + C_{\text{Fe}^{2+}}} \right),$$

式中,  $K_{\text{M,O}}$  (kg/L),  $K_{\text{M,Fe}^{3+}}$  (kg/L) 分别为氧气与亚铁离子的增长率常数,  $\mu_{\text{max}}$  为细菌最大生长速率.

溶液中细菌浓度方程的源/项可表示为<sup>[2]</sup>

$$R_{\phi} = (\mu - k_{\text{death}}) \varepsilon_{\text{L}} \phi - k_1 \varepsilon_{\text{L}} \phi \left( 1 - \frac{\psi}{\psi_{\text{max}}} \right) + k_2 \varepsilon_{\text{ore}} \psi, \quad (10)$$

其中,  $k_{\text{death}}$  为细菌的死亡率,  $k_1, k_2$  为细菌吸附与脱附动力学系数,  $\psi_{\text{max}}$  为吸附于矿物表面的饱和细菌浓度.

依据守恒原理, 矿石表面吸附细菌浓度的源/汇项  $R_{\psi}$  可用下式表示:

$$R_{\psi} = (\mu - k_{\text{death}}) \varepsilon_{\text{ore}} \psi + k_1 \varepsilon_{\text{L}} \phi \left( 1 - \frac{\psi}{\psi_{\text{max}}} \right) - k_2 \varepsilon_{\text{ore}} \psi. \quad (11)$$

方程(10)和方程(11)中的第2项表示细菌从溶液中吸附至矿石表面, 第3项对应解吸作用下进入溶液中的细菌数.

最后, 从化学计量方程(1)、(3)和(4)推出的关于亚铁离子、铁离子和铜离子的质量平衡方程中的源/汇项为<sup>[2]</sup>

$$R_{\text{Cu}^{2+}} = \frac{2M_{\text{Cu}}}{M_{\text{cps}}} R_{\text{cps}}, \quad (12)$$

$$R_{\text{Fe}^{2+}} = -\frac{\mu}{Y}(\varepsilon_{\text{ore}} \psi + \varepsilon_{\text{L}} \phi) + \left( -\frac{4M_{\text{Fe}}}{M_{\text{cps}}} - \frac{15M_{\text{Fe}}}{M_{\text{PY}}} F_{\text{PY}} \right) R_{\text{cps}}, \quad (13)$$

$$R_{\text{Fe}^{3+}} = \frac{\mu}{Y}(\varepsilon_{\text{ore}} \psi + \varepsilon_{\text{L}} \phi) + \left( \frac{4M_{\text{Fe}}}{M_{\text{cps}}} + \frac{14M_{\text{Fe}}}{M_{\text{PY}}} F_{\text{PY}} \right) R_{\text{cps}}, \quad (14)$$

式中,  $R_{\text{cps}} = -\varepsilon_{\text{ore}} G d\alpha/dt$  为黄铜矿的浸出率,  $G$  为矿石品位,  $\alpha$  为矿石中剩余铜的分数, 收缩核方程为

$$\begin{cases} \frac{d\alpha}{dt} = \frac{3(1-\alpha)^{2/3} C_{\text{Fe}^{3+}}}{\tau_{\text{c}} + 6\tau_{\text{d}}(1-\alpha)^{1/3}(1-(1-\alpha)^{1/3})}, \\ \tau_{\text{c}} = \frac{\delta\varphi_{\text{B}} M_{\text{Fe}}}{\beta M_{\text{ore}}}, \quad \tau_{\text{d}} = \frac{\delta^2 \sigma G \varphi_{\text{B}} M_{\text{Fe}}}{D_{\text{eff}} M_{\text{ore}}}, \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $\varphi$  为颗粒形状系数,  $G$  为矿石品位,  $\beta$  为反应动力学系数,  $\sigma$  为化学反应计量系数,  $D_{\text{eff}}$  为  $\text{Fe}^{3+}$  通过矿石颗粒的有效扩散系数 ( $\text{m}^2/\text{s}$ )。

#### 1.4 能量平衡方程

浸出过程中, 参与矿堆热交换的有: 浸出液自上而下的渗透 (只考虑垂直流动), 气相流动并包括水分的蒸发, 浸出反应放出的热。

假定在每一局部, 固、液、气之间均处于热平衡状态, 则对单元矿堆, 可列出热平衡方程<sup>[12]</sup>

$$c_{p,B} \rho_B \frac{\partial T}{\partial t} = k_B \Delta T - \frac{\partial H_L}{\partial y} - \left[ \frac{\partial H_g}{\partial x} + \frac{\partial H_g}{\partial y} \right] + (-\Delta H_R R_{\text{ch}}), \quad (16)$$

式中: “-”表示放出热量;  $c_{p,B}$  为矿堆的平均热容 ( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ),  $k_B$  为矿堆的导热系数 ( $\text{J}/(\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{s})$ ),  $H_L, H_g$  为单位面积上的液相热焓流量与气相热焓流量 ( $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ),  $\Delta H_R$  为浸出反应的平均反应热 ( $\text{J}/\text{kg}$ ),  $R_{\text{ch}}$  为化学反应常数。

方程(16)右端的前3项为扩散、对流所造成的热量流失, 第4项代表化学反应放出的热。

$$\Delta H_R = \Delta H_{\text{ch}} + F_{\text{PY}} \cdot \Delta H_{\text{PY}},$$

式中,  $\Delta H_{\text{ch}}$  代表辉铜矿浸出反应的反应热,  $\Delta H_{\text{PY}}$  代表黄铁矿浸出反应的反应热。

$$H_L = -q_L \rho_L c_{p,L} (T - T_r),$$

$$H_g = G_{\text{air}} [-\lambda H_{\text{air}} + (c_{p,g} + c_{p,v} H_{\text{air}}) (T - T_r)],$$

式中,  $\rho_L$  为液体密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $q_L$  为单位面积上液体的体积流速 ( $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ),  $c_{p,L}, c_{p,g}, c_{p,v}$  分别为溶液、空气、水蒸气的质量定压热容 ( $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ),  $\lambda$  为水的蒸发热 ( $\text{J}/\text{kg}$ ),  $G_{\text{air}}$  为单位面积上干空气质量流速 ( $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ),  $T_r$  为参比温度, 可用矿堆表面的温度作为参比温度,  $H_{\text{air}}$  为空气湿度 (干空气中水的含量)。

矿堆中空气湿度的计算以堆中空气为水蒸气所饱和为准:

$$H_{\text{air}} = \frac{(M_w/M_{\text{air}}) \cdot P_{\text{sat}}}{P - P_{\text{sat}}},$$

式中,  $P$  为气体压力 (Pa),  $M_w, M_{\text{air}}$  分别为水和空气的摩尔质量 ( $\text{kg}/\text{mol}$ ),  $P_{\text{sat}}$  为水蒸气的饱和压力 (Pa)。

$$\lg P_{\text{sat}} = 8.07 - 1730/(T - 39.75).$$

方程(5)~(16)即组成堆浸场耦合的数学模型。

## 2 流动-反应-传热耦合过程数值模拟分析

方程组(5)~(16)为一高度非线性的偏微分方程系统。本文采用专门求解耦合偏微分方程组的有限元分析工具 Comsol Multiphysics 进行计算分析, 直接将控制方程和定解条件导入选定的模块, 就可以得到相应的数值结果。

考虑一10 m高的矿堆, 假设堆建在防渗和绝热的底板上, 堆的顶部为一平面, 侧面边坡的倾斜角为  $45^\circ$ 。浸出矿石为辉铜矿, 其中混有一部分黄铁矿。溶浸液从堆顶部采用均匀喷淋方式渗入矿堆。如图1所示, 为一堆浸矿堆的截面图, 因截面呈轴对称性, 故只需对其一边进行二维数值模拟, 并建立如图所示的直角坐标系。

氧的初始浓度以及初始温度与周围环境中一致, 矿石表面吸附的初始细菌数为0, 溶液中的初始细菌及亚铁离子浓度分别为  $2.82 \times 10^{-5} \text{ mg/L}$  和  $1 \times 10^{-3} \text{ kg/L}$ , 铁离子和铜离子的初始浓

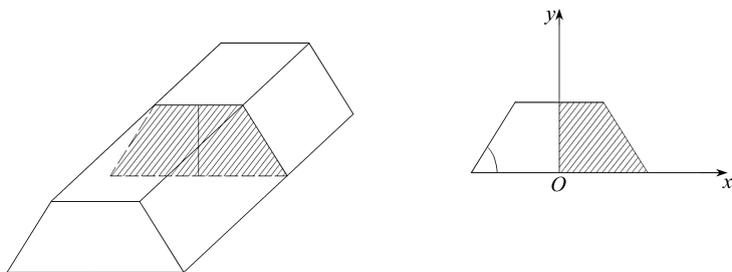


图1 堆浸矿堆截面示意图

度均为0,铜的初始浸出率  $\alpha = 0$ . 由于对称性以及绝热性,通过中心边界和外边界没有液流或气流发生,也不会出现质量扩散和热量传递,故沿各外法线方向的方向导数均为0. 边界上的温度与氧气浓度和周围环境保持一致. 数值模拟各物理参数取值列于表1<sup>[2-8]</sup>.

表1 数值模拟中各物理参数取值

参数	单位	参数值	参数	单位	参数值
$\rho_B$	kg/m <sup>3</sup>	2 350	$k_1$	s <sup>-1</sup>	$3.47 \times 10^{-5}$
$\rho_L$	kg/m <sup>3</sup>	1 050	$k_2$	s <sup>-1</sup>	$2.0 \times 10^{-7}$
$\rho_g$	kg/m <sup>3</sup>	1.16	$K_{M,O}$	kg/L	$7.6 \times 10^{-6}$
$D_g$	m <sup>2</sup> /s	$1.5 \times 10^{-5}$	$K_{M,Fe^{2+}}$	kg/L	$5.58 \times 10^{-6}$
$\mu_g$	kg/(m·s)	$1.85 \times 10^{-5}$	$v_g$	m/s	$1.1 \times 10^{-2}$
$\Delta H_{ch}$	J/kg	$-6 \times 10^6$	$v_L$	m/s	$2.646 \times 10^{-5}$
$\Delta H_{PY}$	J/kg	$-1.26 \times 10^7$	$\delta$	m	0.01
$c_{p,g}$	J/(kg·K)	$1.0 \times 10^3$	$G$		0.9%
$c_{p,L}$	J/(kg·K)	$4.0 \times 10^3$	$\beta$	m/s	$1.30 \times 10^{-7}$
$c_{p,v}$	J/(kg·K)	$1.864 \times 10^3$	$\varphi$		0.65
$\lambda$	J/kg	$583 \times 10^5$	$\sigma$		4
$k_B$	J/(m·K·s)	2.1	$D_{eff}$	m <sup>2</sup> /s	$9.5 \times 10^{-11}$
$\varepsilon_g$		0.2	$k_L$	s <sup>-1</sup>	$6.94 \times 10^{-2}$
$\varepsilon_{g,L}$		0.2	$T_1$	°C	20
$Y$		$2.2 \times 10^{14}$	$O_{2,g}$	kg/m <sup>3</sup>	0.26
$\mu_{max}$	s <sup>-1</sup>	$2.82 \times 10^{-5}$	$T$	K	298
$k_{death}$	s <sup>-1</sup>	$2.5 \times 10^{-6}$	$P$	Pa	$1.01 \times 10^5$

### 3 结果与分析

模拟结果给出了浸出过程中浸堆内的温度、氧气浓度、铜离子与铁离子浓度,以及氧化转化率的分布曲线。

图2为浸堆内温度变化曲线. 模拟结果表明:浸堆内靠近中央部分因氧气浓度低,浸出反应缓慢,且溶液的流动还将带走一部分热量,沿边坡处的散热效果好,故这些区域的温度偏低;温度最高的部分在底部区域附近靠近边坡位置处,且温度升高值超过6°C。

如图3所示,由于自然对流的作用,沿堆体斜坡边界处氧的浓度较大,而在堆的中央部分,氧气的浓度非常小,故在这个区域里的氧化反应有时可忽略不计。

图4为溶浸液中铜离子浓度分布等值线图. 随着矿堆深度的增大,由于流动液体的作用,铜离子汇聚在矿堆底部. 另外,因靠近边坡区域的温度最高,故反应进行的速率也最快,因此这部分的浓度最高. 随着浸出时间的推移,沿矿堆表面处的固相铜因反应而几乎耗尽,因此这个

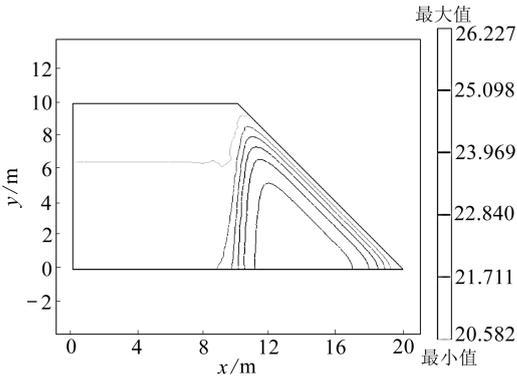


图2 温度(°C)等值线分布图

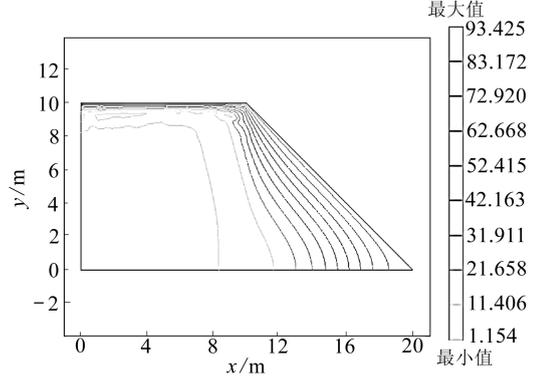
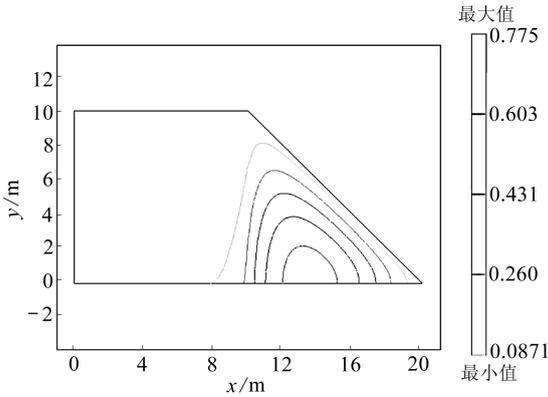
图3 氧相对浓度( $C_g/C_{g,0}$ )等值线图

图4 铜离子浓度(kg/L)分布等值线图

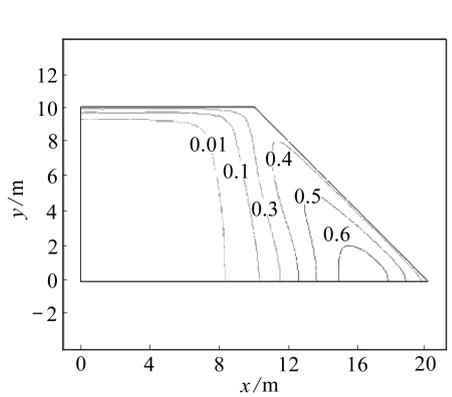


图5 铁离子浓度(kg/L)分布等值线图

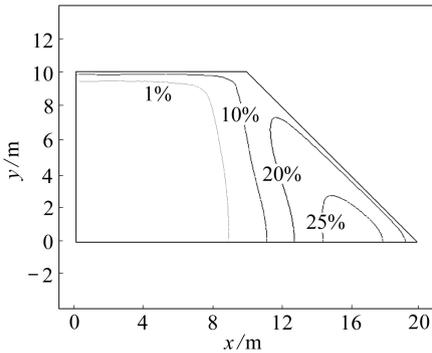


图6 氧化转化率分布图

区域的铜离子浓度最低,而其它区域的铜离子浓度低是因为氧浓度低,限制浸出过程进行的速率。

图5为溶浸液中铁离子浓度分布等值线图。浸出初期,溶液中的铁离子浓度几乎为0,在氧气的参与下,细菌将亚铁氧化成铁,随着氧气的不断消耗,铁离子产生的速率下降。另外,铁离子通过扩散进入矿石颗粒,与铜矿石进行置换反应。随着未反应核的收缩,扩散阻力增加,大部分铁离子随溶液的流动往下迁移,因此,矿堆底部靠近斜坡处的铁离子浓度最高,而且随着浸出时间的延长,扩散阻力增加,铁离子浓度增加。

图6为铜的氧化转化率分布等值线图。靠近底部和斜坡部分,因氧气浓度大,浸出反应速率快,氧化转化率高;矿堆的其余部分,因氧浓度低,导致浸出反应速率缓慢,仅有一小部分颗粒发生反应。另外,由方程(15)可知,因铜的氧化转化率与铁离子浓度成正比,故氧化率分布曲线与铁离子的分布曲线图形状相似。

## 4 结 论

1) 针对硫化铜矿生物浸出机理,发展了描述其多相、多场交互作用的流动-反应-传热全

耦合系统的控制方程组,并基于 Comsol Multiphysics 软件进行数值模拟分析;

2) 温度、氧气及铜离子浓度分布的模拟结果表明:溶液流动影响浸堆内的热、质传递,从而对浸出行为带来显著影响;

3) 浸堆内氧气分布的影响导致氧化转化率随浸堆深度的增加而递增,且分布曲线形状与铁离子相似;

4) 本文的数值模拟结果与文献[14]中的试验结论在总体趋势上基本相符,这也就表明所建立的数学模型及参数的取值能够较好地描述堆浸场中的多因素耦合过程。

#### 参考文献:

- [1] 刘汉钊,张永奎. 难处理低品位金矿细菌堆浸的现状和前景[J]. 四川地质学报, 1998, **18**(3): 234-240.
- [2] Neuburg H J, Castillo J A, Herrera M N, Wiertz J V, Vargas T, Badilla-Ohlbaum R. A model for the bacterial leaching of copper sulphide ores in pilot-scale columns[J]. *Int J Min Proc*, 1991, **31**(2):247-264.
- [3] Dixon D G, Petersen J. Comprehensive modeling study of chalcocite column and heap bioleaching[J]. *Hydrometallurgy of Copper*, 2003, **26**(3): 493-515.
- [4] Bouffard S C, Dixon D G. Investigative study into the hydrodynamics of heap leaching processes[J]. *Met Mat Trans B*, 2001, **32**(5):763-776.
- [5] Dixon D G. Heap leach modeling-the current state of the art[J]. *Hydrometallurgy*, 2003, **17**(5): 289-314.
- [6] Casas J M, Vargas T, Martinez J, Moreno L. Bioleaching model of a copper-sulfide ore bed in heap and dump configurations[J]. *Metallurgical and Materials Transaction, B*, 1998, **29**(4):889-909.
- [7] Moreno L, Martinez J, Casas J. Modeling of bioleaching copper sulphide ores in heap and dumps[J]. *Hydrometallurgy*, 1999, **42**(5): 443-452.
- [8] Sidborn M, Moreno L. Model for bacterial leaching of copper sulphides by forced aeration [C]//*Proceedings of the 15-th International Biohydrometallurgy Symposium*. Singapore, 2003:52-55.
- [9] Leahy M J, Davidson M R, Schwarz M P. A two-dimensional CFD model for heap bioleaching of chalcocite[J]. *Journal of ANZIAM*, 2005, **32**(8): 439-456.
- [10] Perry R H, Green D W. *Perry's Chemical Engineers' Handbook* [M]. 6th ed. Japan: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- [11] Tan Y, Gannon J T, Baveye P, Alexander M. Transport of bacteria in an aquifer sand: experiments and model simulations[J]. *Wat Resour Res*, 1994, **30**(12):3243-3252.
- [12] Khlaifat A A, Arastoopur H. Simulation of two-phase flow through low-permeability porous media[C]//*A Technology International User Conference '97*. AE, 1997.
- [13] 肖国屏. 热学[M]. 上海:高等教育出版社,1989: 74-84.
- [14] 王洪江. 大型矿山排土场细菌强化浸出机理及新工艺研究[D]. 博士学位论文. 长沙:中南大学, 2006.

# Analysis of Coupled Flow-Reaction With Heat Transfer in Heap Bioleaching Processes

WU Ai-xiang<sup>1</sup>, LIU Jin-zhi<sup>1,2</sup>, YIN Sheng-hua<sup>1</sup>, WANG Hong-jiang<sup>1</sup>

(1. *School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China;*

2. *College of Information & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, P. R. China*)

**Abstract:** A mathematical model for heap bioleaching was developed to analyze heat transfer, oxygen flow, target ions distribution and oxidation leaching rate in the heap, and the model equations were solved by Comsol Multiphysics software. The numerical simulation results show: the concentration of oxygen is comparatively higher along the boundary of the slope, and lower in the center part where leaching rate is slow; the temperature is comparatively low along the slope and the highest along the bottom region near the slope, and the difference is more than 6 °C; the concentration of target metal ions is highest in the bottom region near the slope; the oxidation leaching rate is bigger in the bottom and slope part with quicker reaction rate, and comparatively smaller in the rest part with lower oxygen concentration.

**Key words:** heap leaching; model of coupled flow-reaction with heat transfer; bioleaching; numerical simulation