# 高寒地区某金矿生物氧化预处理过程温度控制研究

南新元<sup>1</sup>,陈飞<sup>1\*</sup>,孔军<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 电气工程学院, 乌鲁木齐 830047; 2. 江南大学, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 传统的生物氧化预处理过程温度控制算法参数整定过程复杂,且受干扰后会使控制漂离最 佳状态。针对这一问题,以某金矿生物氧化预处理工艺为研究背景,分析了氧化槽内生物氧化反应 热、冷/水阀循环热、氧化槽与外界发生热传递的流失热之间的平衡关系,构建了以冷/热水调节阀 开度为控制目标,以环境温度、矿浆温度、冷/热水水温为状态参数的温度控制模型。经过验证,该 模型有效地解决了传统温度控制系统存在的问题,实现了氧化槽温度的稳定控制。 关键词: 冶金技术; 生物氧化预处理; 温度控制; 反应机理; 热量平衡; 热传导 中图分类号: TF831 文献标识码: A 文章编号: 1004-0676(2014)02-0038-05

## The Research on Temperature Control in Biological Oxidation Pretreatment Process of a Gold Mine in Alpine Region

NAN Xinyuan<sup>1</sup>, CHEN Fei<sup>1\*</sup>, KONG Jun<sup>1, 2</sup>

College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)
 Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: The parameter tuning process of temperature control algorithm in conventional biological oxidation pretreatment process is complicated. The control effect of the temperature control algorithm is easily drifted away from the best state after being interfered. A bio-oxidation pretreatment process was used as research background. The bio-oxidation reaction heat of oxidation tank, the cycle heat of hot/cold water valve and the balance of heat loss between oxidation tank and the outside world were analyzed. Through the analysis a temperature control model was established. Hot/cold water valve opening degree is the control target in the proposed model. Ambient temperature, slurry temperature and hot/cold water temperature are the state parameters. The results of simulation proved that the model has effectively solved the traditional problems of temperature control system and achieved a stable temperature control of the oxidation tank.

**Key words:** metallurgical technology; biological oxidation pretreatment; temperature control; reaction mechanism; heat balance; thermal conduction

生物氧化提金是一种对难处理金矿石预处理的 技术,可以解决其他常规选冶技术因回收率过低而 无法工业利用的低品位金矿的选冶难题。生物氧化 预处理过程主要利用氧化菌对含金银的黄铁矿、砷 黄铁矿、磁黄铁矿等矿石的氧化,从而将金暴露出 来,以利于氰化浸出<sup>[1-6]</sup>。因此,如何提高并保持氧 化菌的活性是提升提金率的有效手段。

受现有磨矿设备、氧化菌培养模式和地区水文 条件的限制,影响氧化菌活性的可控因素主要有: 矿浆浓度、Fe<sup>3+</sup>浓度、酸碱度、温度、进风量。温

收稿日期: 2013-08-02

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2012211A004)。

第一作者: 南新元, 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 计算机控制技术和现场总线技术。E-mail: nxyxd@sina.com

<sup>\*</sup>通讯作者: 陈 飞,硕士研究生,研究方向: 计算机技术。E-mail: chenfei071@163.com

度是生物氧化预处理过程中非常重要的工艺参数, 对氧化菌的生长、繁殖和活性有很大影响。受高寒 地区昼夜温差、氧化反应放热、外界极端天气和搅 拌电机的影响,导致了氧化槽温度控制十分困难。 传统的温度控制算法多为 PID 控制或其他算法与 PID 的复合控制,这些算法参数整定过程十分复杂 且受干扰后会使控制漂离最佳状态<sup>[7-8]</sup>。

#### 1 生物氧化预处理过程工艺

本文以中国西北某金矿生物氧化提金工艺为研 究背景,将矿石经过磨矿处理后配成一定浓度的矿 浆,矿浆经进料阀流入氧化槽,加入H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>将槽内 酸度调节为 pH=2,加入培养基和氧化菌种,空压 机将空气打入氧化槽内,搅拌电机对矿浆进行搅拌 使矿浆和氧化菌均匀分布、加速矿浆间的热交换并 使氧化菌能够充分接触氧气,如图1所示。





通过对工艺的分析,可知单位时间内氧化槽的 热量来源为两部分:① 冷/热水管线带来的能量 Q<sub>r</sub>; ② 生物氧化反应释放的热量 Q<sub>s</sub>。单位时间内氧化 槽的热量流失主要是氧化槽与外界热交换流失的热 量 Q<sub>j</sub>。温度达到工艺设定时,维持温度稳定的条件 是单位时间内氧化槽的热量得失保持平衡。

综上可得单位时间内氧化槽的热量平衡方程, 如式(1)所示:

$$Q_{\rm s} + Q_{\rm r} - Q_{\rm j} = 0 \tag{1}$$

本文将分别对 *Q*<sub>s</sub>、*Q*<sub>r</sub>和 *Q*<sub>j</sub>进行研究和计算, 进而构造出高寒地区生物氧化预处理过程温度参数 的控制模型。

### 2 氧化菌氧化过程反应热分析

含硫砷难处理精金矿的化学组分主要包括: 黄铁矿(FeS<sub>2</sub>)、磁黄铁矿(FeS)、砷黄铁矿(FeAsS)。针对该类矿石一般选择铁氧化硫杆菌、硫氧化硫杆菌、 铁氧化螺旋杆菌作为氧化菌种。生物氧化过程中的 化学反应主要包括 2 种:① 由于微生物的酶解作用 而产生的直接氧化反应,② 由于中间产物硫酸高铁 的氧化特性而产生的间接氧化反应<sup>[8]</sup>。氧化反应方 程式如(2~4)式所示:

 $\begin{array}{ll} 4FeS_{2}+15O_{2}+2H_{2}O & \underline{\pi}\underline{k}\underline{m}, & \underline{m}\underline{m} & 2Fe_{2}(SO_{4})_{3}+2H_{2}SO_{4} & (2) \\ 4FeS+9O_{2}+2H_{2}SO_{4} & \underline{\pi}\underline{k}\underline{m}, & \underline{m}\underline{m} & 2Fe_{2}(SO_{4})_{3}+2H_{2}O & (3) \\ 2FeAsS+7O_{2}+H_{2}SO_{4} & \underline{\pi}\underline{k}\underline{m}, & \underline{m}\underline{m} & 2H_{3}AsO_{4}+Fe_{2}(SO_{4})_{3} & (4) \end{array}$ 

基于化学反应能量变化可知上述 3 个反应均为 强放热反应。其中: 1 mol FeS<sub>2</sub>反应可释放 1464 kJ, 1 mol FeS 反应可释放 605.6 kJ,1 mol FeAsS 反应可 释放 905.3 kJ<sup>[8-9]</sup>。通过分析矿浆反应前后各组分含 量可得氧化过程中释放的热量,进而构造出反应热 对氧化槽温度影响的机理方程。

对反应前后矿浆随机 10 次抽样鉴定,得各组分 平均含量如表 1 所示。

#### 表1 矿浆各组分平均含量

Tal	).1	F	Average	conte	ent of	f each	compor	ient i	n t	he s	lurry	
-----	-----	---	---------	-------	--------	--------	--------	--------	-----	------	-------	--

组分	FeS <sub>2</sub>	FeS	FeAsS
反应前/%	0.032	0.031	0.026
反应后/%	0.001	0.006	0.005

氧化槽中矿浆的容积为 300 t 据表 1 的数据可 得氧化过程共反应 FeS<sub>2</sub> 0.096 t, FeS 0.093 t, FeAsS 0.078 t。依据化学反应中物质的量计算方法可得, 共反应 FeS<sub>2</sub> 800 mol, FeS 1057 mol, FeAsS 479 mol。 由式(2~4)可得生物氧化反应过程共释放 2245278 kJ 热量。矿浆在氧化槽内共停留 6 天,搅拌电机使矿 浆均匀混合,氧化菌与矿石组分充分接触,因此氧 化槽内的生物氧化反应是均匀发生的。由此可得氧 化槽内生物氧化反应释放的热量 Q<sub>s</sub>=4.33 kJ/s。

#### 3 氧化槽热量流失分析

由工艺分析可知,氧化槽的热量流失主要是与 外界环境的热交换,从热量流失方面来讲,搅拌电 机只是加速了热量流失速度。因此,只要找到搅拌 电机转速与热量流失间的关系就能计算出单位时间 内氧化槽流失的热量 Q<sub>i</sub>。

#### 3.1 氧化槽热交换热量流失分析

高寒地区温差大,据气象资料表明,夏季昼夜 温差平均达21℃,冬季昼夜温差达43℃。因此,氧 化槽与外界间的热交换是导致温度变化的主要因素 之一。

氧化槽与外界的热量传递主要以热传导的方式 进行,单位时间内的热传导方程<sup>[10]</sup>如式(5)所示:

$$Q = KA\Delta T / (\Delta t \cdot L) \tag{5}$$

式中: K 为材料的热传导系数; A 为两物体的接触面积;  $\Delta T$  为两端的温度差;  $\Delta t$  为热量传递花费的时间; L 为两端的距离。

钢筋混凝土的热传导系数 *K* 在 20~1200℃之间 时满足式(6)的变化关系<sup>[11-12]</sup>:

 K=0.012×(T/120)<sup>2</sup>-0.24×T/120+2

 (6)

 式中 T 为载热体温度。

本项目背景的氧化菌选择铁氧化硫杆菌、硫氧 化硫杆菌、铁氧化螺旋杆菌作为氧化菌种。该菌种 的最佳活性温度为 35~45℃<sup>[13]</sup>,工艺温度设定值为 42℃,由此可得出氧化槽的热传导系数 *K*=1.917。

综上可得氧化槽扩散的热量,如式(7)所示: Q'j=[0.012×( $T_c$ /120)<sup>2</sup>-0.24× $T_c$ /120+2]×A×( $T_c$ - $T_e$ )/L (7) 式中:  $T_c$ 为矿浆温度;  $T_e$ 为外界环境温度; A 为氧 化槽表面积, 314 m<sup>2</sup>; L 为氧化槽厚度, 300 mm。

#### 3.2 冷/热水管线热量传递分析

由于氧化菌氧化的化学反应热和外界热传递都 是不可控的量,因此,生物氧化预处理过程中冷/ 热水管线调节阀开度的控制是维持氧化槽温度平衡 稳定的关键。由图1可知冷/热水共用一组管线,当 矿浆温度高于设定值时,进水阀切入冷水以降低矿 浆温度;当矿浆温度低于设定值时,进水阀切入热 水以提升矿浆温度。其中,热水采用 100℃的高温 热水,冷水采用地下水。

冷/热水管线与氧化槽内矿浆间以热传导方式 进行热量传递,计算式如式(7)所示。本文项目背景 冷/热水管线采用管壁厚度 5 mm,直径 100 mm,长 度 80 m 的不锈钢管,热导率 *K*=1.521。

由此可得冷/热水管线阀门全开时单位时间内 与矿浆交换的热量 Q'r如式(8)所示:

 $Q'_r$ =1.521×8π×( $T_s$ - $T_c$ )/(0.005 $\Delta t$ ) (8) 式中:  $T_s$ 为管线中水的温度,热水为 100 ℃,冷水 为常温;  $T_c$ 为矿浆温度。

此处计算的 Q'r 是冷/热水阀全开时的热交换

量,调节阀开度不同单位时间内交换的热量也不相同。本文项目背景选取的调节阀是线性调节阀,管线内水流量与阀门开度呈线性关系。因此,单位时间内冷/热水管线与矿浆交换的热量 *Q*r 如式(9)所示:

 $Q'_{r}=1.521 \times 8\pi \times (T_{s}-T_{c}) \times l/(0.005\Delta t)$  (9) 式中 l 为调节阀开度。

#### 3.3 搅拌电机转速与氧化槽能量流失的关系分析

在氧化菌氧化预处理过程中搅拌电机起着十分 重要的作用,矿石颗粒的密度比水大,如果静置在 氧化槽内,矿石颗粒会沉积在底部导致氧化菌无法 与矿石颗粒完全接触,也会隔绝空气阻碍有氧氧化 菌对矿石的氧化分解过程。搅拌电机以一定转速搅 动矿浆使得矿石颗粒均匀地分布在矿液中,保证了 氧化菌能够可靠地与矿石和空气接触,提高了分解 效率<sup>[9]</sup>。

对于固定容积的氧化槽,如果按照工艺要求矿 浆液位达到要求时,矿浆的体积也就固定了。因此 对搅拌电机的转速也就有要求,如果转速太快会使 得矿浆溶液溅出,造成矿浆浪费降低提金率;如果 太慢会使得矿石颗粒无法均匀分布,造成氧化菌无 法与矿石颗粒有效接触,降低提金率。本文项目背 景金矿经过实验测试,发现搅拌电机转速设定为 300 r/min 时矿浆能很均匀地分布,但搅拌电机增大 了氧化槽的热量流失,也是影响氧化槽热量平衡的 关键因素。

为探寻搅拌电机对氧化槽热交换的影响,将矿 浆加热到 42℃,关闭热水管线,打开搅拌电机并间 隔一定时间对矿浆温度进行采样,数据如表 2 所示。

#### 表 2 匀速搅拌时矿浆温度变化表

# Tab.2 Temperature change of slurry under stirring with uniform speed

-	-	- <b>F</b>							
时间/h	2	4	6	8	10	12	14	16	18
矿浆	40.9	40.0	38.9	37.8	36.3	34.3	31.6	28.6	25.8
温度/℃									
自然	27.2	28.1	26.4	24.1	21.6	19.3	17.2	18.1	19.6
温度/℃									

依据表 2 数据和热量计算公式可得矿浆流失热 量 q<sub>i</sub>, 如式(10)所示:

$$q_i = Cm(T_i - T_{i-1}) \tag{10}$$

式中, C 为矿浆溶液的比热容, 经实验测定浓度为 18%的矿浆的比热容 C=4.5×10<sup>3</sup> J/(kg·℃); m 为矿浆 溶液的质量;  $T_i$ 为当前时刻矿浆温度;  $T_{i-1}$ 为前一时刻矿浆温度。

在生物氧化预处理过程中搅拌电机仅仅加速了 氧化槽热量的流失本身并没有吸收氧化槽内的热 量。因此我们认为搅拌电机的作用就是增加了氧化 槽的热传导系数,增量为 λ。依据式(7)、式(10)可 得 λ 的方程,如式(11)所示:

 $\{0.012 \times [(T_i - T_{i-1})/240]^2 - 0.24 \times [(T_i + T_{i-1})/240] + 2 + \lambda\} \times$ 

 $A \times (T_i + T_{i-1} - 2T_e)/2L = Cm(T_i - T_{i-1})/300$  (11) 代入表 2 数据,可解得  $\lambda = 0.075$ 。因此,可得在搅拌 电机作用下氧化槽单位时间内热交换流失的热量  $Q_i$ 如式(12)所示:

$$Q_{j} = [0.012 \times (T_{c}/120)^{2} - 0.24T_{c}/120 + 2 + 0.075] \times A \times (T_{c} - T_{c})/(L\Delta t)$$
(12)

#### 4 氧化槽温度控制模型

由工艺分析可知氧化槽温度控制的本质就是维持氧化槽温度稳定后单位时间内的热量平衡,即 *Q*<sub>s</sub>+*Q*<sub>r</sub>-*Q*<sub>j</sub>=0。代入可得热量平衡时调节阀开度*l*,计 算模型如式(13)所示:

 $l = \{ [0.012 \times (T_c/120)^2 - 0.24T_c/120 + 2 + 0.075] \times$ 

 $A \times (T_c - T_e)/L - 4330\Delta t$ }/2433.6 $\pi (T_s - T_c)$  (13) 式中,  $\Delta t$  为采样时间。

当*l* <0 时,切入冷水阀,调节阀开度为 |*l* |; 当*l* >0 时,切入热水阀,调节阀开度为 *l*。

本项目背景氧化槽工艺温度为 42℃,系统稳定 时调节阀开度计算模型如式(14)所示:

$$l_{\rm w} = \{1.99A \times [(42 - T_{\rm e})/L] - 4330\Delta t\} / [2433.6\pi(T_{\rm s} - 42)] \quad (14)$$

系统调节过程中调节阀开度增量变化 Δ*l* 计算 模型如式(15)所示:

$$\Delta l = l_{\rm w} - l \tag{15}$$

由式(13~15)可得氧化槽温度控制模型如式(16) 所示:

$$l' = A \times \{1.99 \times (42 - T_e) - [0.012 \times (T_c/120)^2 - 0.24T_c/ 120 + 2.075] \times (T_c - T_e) - 4330\Delta t \times L \times (42 - T_c)\}/$$

 $2433.6\pi (T_s - 42) \times (T_s - T_c)L$  (16)

由式(16)可知该模型是以实时矿浆温度 T<sub>c</sub>,外 界环境温度 T<sub>e</sub>,冷/热水管线水温 T<sub>s</sub>为输入信号; 以冷/热水管线调节阀的开度作为控制输出的温度 控制模型。该模型与传统 PID 控制系统的对比响应 曲线如图 2 所示。由图 2 可知该模型很好地解决了 传统控制系统控制超调的问题。更大限度地保护了 氧化菌的生长和繁殖。同时也有效地解决了传统控 制系统调整时间过长的问题,很大程度上提高了生 产效率。



图 2 温度控制模型输出响应曲线 Fig.2 The output response curves of temperature control models

#### 5 结论

传统的温度控制多以 PID 控制为主,根据控制 对象的不同分为 PI 控制和 PID 控制。但现场 PID 的参数整定过程十分繁琐,且外界干扰会使控制漂 离最佳状态。本文通过深入分析氧化预处理过程中 热量平衡机理,构造了较精确的氧化槽工艺温度参 数控制模型,实现了温度的稳定控制,有效解决了 传统 PID 控制参数整定困难及干扰后会使控制漂离 最佳状态的问题,在生物氧化冶金领域有很好的应 用前景。

#### 参考文献:

- 吕重安, 安娟. 生物氧化预处理提金新工艺研究[J]. 湖 南有色金属, 2010, 26(1): 28-30.
   Lv C, An J. Study on new techniques for bio-oxidation pretreatment of Au extraction[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2010, 26(1): 28-30.
- [2] 韩晓光,郭普金, 具滋范. 生物氧化提金工艺应用研究 与生产实践[J]. 黄金, 2008, 27(11): 38-41.
  Han X, Guo P, Ju Z. Industrial practice of bio-oxidization gold recovery technique[J]. Gold, 2008, 27(11): 38-41.
- [3] Li Q, Li D, Qian F. Pre-oxidation of high-sulfur and high-arsenic refractory gold concentrate by ozone and ferric ions in acidic media[J]. Hydrometallurgy, 2009, 97(1): 61-66.
- [4] 陈勃伟, 温建康. 生物冶金中混合菌的作用[J]. 金属矿山, 2008(4): 24-27.

Chen B, Wen J. Role of bacterial mixture in biohydrometallurgy[J]. Metal Mine, 2008(4): 24-27.

- [5] 姚国成,阮仁满,温建康. 生物冶金常用浸矿菌种及改良育种的基本方法[J]. 金属矿山, 2002(11): 26-29.
  Yao G, Ruan R, Wen J. Ore leaching bacterin commonly used in biological metallurgy and basic methods of their culture improvement[J]. Metal Mine, 2002(11): 26-29.
- [6] 温建康,阮仁满,邹来昌,等.紫金山铜矿生物浸出过 程酸平衡分析研究[J].稀有金属,2008,32(3):335-335.
  Wen J, Ruan R, Zou L, et al. Analysis and practice of acid balance during bioleaching process of Zijinshan copper ore[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008, 32(3): 338-343.
- [7] 刘子龙,秦晓鹏.影响生物氧化提金工艺的主要因素 与措施[J]. 黄金科学技术, 2010, 18(2): 57-60.
  Liu Z, Qin X. The main influence factors and measures of gold extraction process of bio-oxidation[J]. Gold Science and Technology, 2010, 8(2): 57-60.
- [8] 訾建威. 噬温菌氧化高砷金矿的脱砷试验研究[D]. 沈阳:东北大学, 2004.
- [9] 金世斌. 难处理金精矿生物氧化预处理工艺的工业应用现状及其工艺因素分析[J]. 黄金, 2001, 22(10): 28-31.

Jin S. The current situation of commercial-scale application of the bio-oxidation pretreatment technology

of refractory gold concentrate and the analysis of its technological factors[J]. Gold, 2001, 22(10): 28-31.

- [10] 王胜, 张强, 张鸿. 稀疏植被地表反照率及土壤热传导率特征研究[J]. 中国沙漠, 2008, 28(1): 119-124.
  Wang S, Zhang Q, Zhang H. Characteristics of surface albedo and soil heat conductivity in sparse vegetation site[J]. Journal of Desert Research, 2008, 28(1): 119-124.
- [11] 傅传国, 王广勇, 王玉镯. 火灾作用下钢筋混凝土框架 节点温度场分析[J]. 山东建筑大学学报, 2009, 24(1):
  1-8.
  Fu C, Wang G, Wang Y. The temperature field analysis

of reinforced concrete frame joints under fire[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2009, 24(1): 1-8.

- [12] Huang Z F, Tan K H, Phng G H. Axial restraint effects on the fire resistance of composite columns encasing I-section steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(4): 437-447.
- [13] 高丙朋,南新元,魏霞.基于迭代LS-SVM 生物氧化提 金预处理工艺参数优化算法的研究[J].贵金属,2012, 33(2):40-43.

Gao B, Nan X, Wei X. Study on optimization algorithm of process parameters for gold extraction pretreatment based on iterative LS-SVM[J]. Precious Metals, 2012, 33(2): 40-43.