



缅甸蒙育瓦七星塘铜矿生物堆浸 黄铁矿氧化与酸平衡

张罗虎¹, 贾 炎², 钟传刚¹, 薛捷豪¹, 盛汝国¹, 王振堂¹, 孙和云², 谭巧义²

(1. 万宝矿产有限公司, 北京 100053;

2. 中国科学院过程工程研究所 湿法冶金清洁生产国家工程实验室, 北京 100191)

摘 要: 缅甸蒙育瓦铜矿采用生物堆浸-萃取-电积工艺生产 A 级(Cu-CATH-1)阴极铜, 矿石中主要铜矿物为辉铜矿, 同时黄铁矿含量较高。生物堆浸提取有价金属铜时, 部分黄铁矿氧化溶解生成硫酸高铁和硫酸, 酸和铁的不断累积将给生产系统带来不利影响。本文介绍了蒙育瓦七星塘铜矿(K 矿)生物堆浸特点, 其矿体黄铁矿含量约为 12.98%。当黄铁矿氧化率达到 3.31%时, 生产系统基本可以达到酸平衡。结合工业历史数据, 分析了黄铁矿氧化的关键影响因素, 对未来生产过程酸平衡情况进行了评估, 并针对酸过剩问题提出了一系列可能的解决方案。

关键词: 七星塘铜矿; 生物堆浸; 辉铜矿; 黄铁矿; 氧化; 酸平衡

文章编号: 1004-0609(2022)-02-0555-08

中图分类号: TF811; TF18; TF111

文献标志码: A

引文格式: 张罗虎, 贾 炎, 钟传刚, 等. 缅甸蒙育瓦七星塘铜矿生物堆浸黄铁矿氧化与酸平衡[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(2): 555-562. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40010

ZHANG Luo-hu, JIA Yan, ZHONG Chuan-gang, et al. Oxidation of pyrite and acid balance in heap bioleaching at Kyisintaung copper mine, Monywa, Myanmar[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(2): 555-562. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2022-40010

生物堆浸作为一种低成本技术, 已经成熟应用于低品位硫化铜矿的生产, 世界范围内有近 20% 的铜是通过堆浸的方式产出^[1-2]。次生硫化铜矿, 如以辉铜矿为主的矿石, 比较适合采用生物堆浸技术进行处理^[3]。在提取有价金属铜时, 矿石中的黄铁矿在三价铁和微生物共同作用下发生反应, 黄铁矿氧化提供了生物堆浸过程中所需氧化剂三价铁和硫酸, 但过量的黄铁矿氧化将造成堆浸生产体系的酸和铁过剩^[4]。目前, 全球有 20 余座次生硫化铜矿生物堆浸矿山在运行, 主要分布在南美洲干旱荒漠地区, 所处理矿石中辉铜矿含量较高, 而黄铁矿含量大部分小于 3%; 多数采用移堆作业(on-off), 在浸出-萃取电积过程中表现为净耗酸, 普遍在入堆前的团矿作业中补加硫酸^[4]。少量的工业堆浸项目,

如紫金山铜矿、缅甸蒙育瓦铜矿项目, 由于黄铁矿含量较高, 其氧化产生的酸和铁超过生物堆浸所需量^[4-5]。过量的黄铁矿氧化会给生产带来诸多问题, 包括严重影响萃取效率和电积效率, 增加药剂消耗, 降低设备利用率^[6-7], 增加环境事故风险等。

缅甸蒙育瓦斑岩型铜矿床共包括萨比塘(S 矿)、萨比塘南(S 南矿)、七星塘(K 矿)和莱比塘(L 矿)4 个矿体, 其中 S 矿和 S 南矿已开采完毕, K 矿和 L 矿正在开采生产。矿区处于缅甸中部中央沉降带的内火山弧上, 产于钦敦江冲积平原西侧的晚第三系火山碎屑岩和晚期的安山岩-英安岩体内, 为岩浆期后多期次中低温热液作用于安山斑岩形成的蚀变带高硫化型斑岩铜矿床。矿石结构主要有他形粒状结构、交代结构, 构造主要有浸染状、星状及角

基金项目: 中国科学院绿色过程制造创新研究院自主部署项目(IAGM-2019A08); 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2018-1)

收稿日期: 2020-08-13; **修订日期:** 2020-11-24

通信作者: 贾 炎, 副研究员, 博士; 电话: 010-82544992; E-mail: yjia@ipe.ac.cn

砾状构造。K 矿金属矿物主要有辉铜矿、铜蓝、蓝辉铜矿、黄铁矿，脉石矿物主要为长石、石英、绢云母、绿泥石、黏土矿物等。根据 2017 年七星塘铜矿生产勘探报告结果，查明保有铜资源矿石量 51206 万 t，铜金属量 159 万 t，铜平均品位 0.31%^[8]。目前 K 矿已进入稳定开发阶段，年生产 A 级阴极铜 5 万 t。

在蒙育瓦铜矿前期开发过程中，由于采出矿石中黄铁矿含量和氧化程度不同，生物堆浸时既出现过黄铁矿氧化产酸过剩，又出现过酸不足向系统补充硫酸的情况。为保证 K 矿生产系统未来稳定运行，需要在保证高效浸出铜的同时，维持适当的黄铁矿氧化产酸。近年来，国内外学者对黄铁矿氧化机理进行了大量研究^[9-12]，但对生产实践中如何调控黄铁矿氧化研究报道较少。本文作者通过对缅甸蒙育瓦 K 矿历史生产数据进行分析，结合矿石中黄铁矿的含量、分布及氧化机理，对生产系统进行酸平衡理论计算，为同类矿山进行酸调控研究及实践提供一定参考。

1 蒙育瓦铜矿堆浸特点

缅甸蒙育瓦铜矿作为亚洲规模最大湿法炼铜项目，采用绿色环保工艺，整个生产过程包括露天开

采—生物堆浸—萃取—电积环节(见图 1)，实现了零污染物排放。

生物堆浸作为整个生产的中间环节至关重要，具体包括矿石筑堆、喷滴淋作业及溶液管理。矿石筑堆分为原矿直接筑堆和破碎筑堆两种方式，直接筑堆是原矿经自卸式卡车将矿石从采场直接运至堆浸场，卡车卸下的矿石由推土机进行摊铺，完成一个单元筑堆后，进行下一单元筑堆，完成一层所有单元后，再升至上一层。破碎筑堆包括粗碎、二次破碎及筛分、破碎后矿石胶带运输，由布料机完成筑堆。筑堆完成后，通过溶液喷淋系统对矿石进行润湿、浸出，铜从矿石进入溶液，然后通过萃取电积工艺除杂、富集，最终生产出可供销售的阴极铜产品。

缅甸蒙育瓦铜矿根据矿石性质不同，分别采用原矿汽车筑堆、破碎矿石皮带运输—布料机筑堆的方式，浸出结束不拆堆，继续在堆上筑新堆层，堆内不鼓气，采用喷淋和滴淋相结合的布液方式，布液强度 6 L/(m²·h)，浸出周期约 400 天，平均浸出率为 70%~80%。与国际上其他同类堆浸项目相比，K 矿生物堆浸存在一定有利因素，分别总结如下。

1) 矿物适宜堆浸。主要铜矿物为辉铜矿、铜蓝和硫砷铜矿，其中易浸出的辉铜矿占 90%左右；主要脉石矿物为长石、石英、绢云母，耗酸低；黄铁

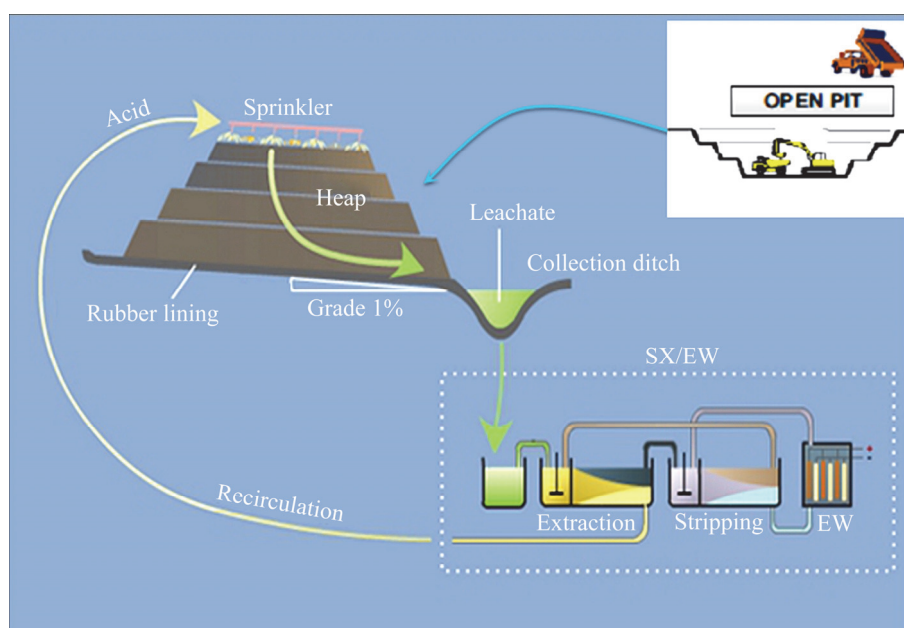


图 1 蒙育瓦七星塘铜矿生产工艺流程示意图

Fig. 1 Scheme of production processes of Kyisintaung copper mine, Myanmar

矿为主要的硫化矿物，硫化铜矿物与黄铁矿紧密共生；黄铁矿的氧化可以提供浸出所需的酸，减少了硫酸添加成本。

2) 气候条件适宜。矿山地处热带，常年气温较高，适合采用生物堆浸技术。矿山所在地年降雨量约 720 mm，年蒸发量在 1800 mm 以上，有利于矿山酸性水治理和水平衡。

3) 地形地貌适宜。矿区周边地势平坦，有利于建设大型堆场。

K 矿生物堆浸存在的不利因素，分别总结如下。

1) 铜品位低。K 矿主矿体的矿石平均品位仅为 0.3%~0.4%，属于低品位硫化铜矿，必须采用经济合理的生产工艺才能维系矿山的开发。

2) 矿石性质变化较大。矿体表层淋滤带矿石与下部主矿体矿石在浸出性能方面存在显著差异。堆浸作业操作参数，包括入堆粒度、筑堆方式、堆高、喷淋液浓度、布液方式等，均需要结合矿石性质科学选择。

3) 存在酸过剩的风险。在生产的不同时期，由于矿石性质的不同，酸浓度可能出现较大波动，酸平衡的问题需长期作为重点考虑。现阶段 K 矿主体矿石为原生带硬矿石，耗酸低，黄铁矿含量高，产酸趋势明显，存在酸过剩风险。

2 K 矿黄铁矿含量

2.1 K 矿地质成因及矿物学

自 LOWELL、HOLLISTER 等提出斑岩铜矿床蚀变分带模式后，斑岩型矿床中热液蚀变的研究逐渐趋于系统和完整^[13]。一般认为，岩浆热液流体沿控矿构造系统上升后，首先交代控矿构造带附近的岩石-成矿斑岩体本身以及接触围岩或先期形成的蚀变岩，而后向外逐步渗滤扩散。热流体渗滤扩散时，一方面交代围岩消耗热流体中的部分组分，另一方面又加入围岩被交代时所离解出来的部分物质，从而发生成分上的不断演化。随着温度和压力的降低，在空间上形成一套不同组合的蚀变矿物，组成各自的蚀变矿物群，表现出蚀变分带。主要蚀变类型包括钾硅酸盐化、绢英岩化、青磐岩化、泥化、碳酸盐化、角岩化等^[14]。

蒙育瓦斑岩铜矿主要为中低温热液蚀变浸染

型矿化，工业矿体赋存于安山斑岩蚀变带中。S 矿、K 矿和 L 矿因其蚀变发育的不同，主要矿化分别发生于泥化带、硅化带和黄铁绢英岩化带中。黄铁矿作为成矿期热液蚀变的主导者，外至泥化带，内至黄铁绢英岩化带，普遍发育^[15]。从 K 矿岩矿鉴定成果分析，泥化带中黄铁矿化相对较弱，硅化带中黄铁矿化较强，黄铁绢英岩化带中黄铁矿化最为强烈。

2.2 矿石铁、硫含量

使用 ICP-OES(OPTIMA 5300DV)检测仪器对 K 矿 17 件生产勘探岩石样品进行分析，其中含铜蚀变安山斑岩样品 12 件，总铁含量为 10.08%(见表 1)，火山热液角砾岩样品 5 件，总铁含量为 12.93%(见表 2)，样品 Fe_t 含量加权平均值为 10.92%。

表 1 K 矿含铜蚀变安山斑岩样品总铁含量

Table 1 Total Fe content in copper containing andesitic samples of K ore

Fe state	Mass fraction of Fe/%		
	Maximum	Minimum	Average
Fe ₂ O ₃	25.36	2.38	9.19
FeO	6.23	0.08	0.89
Fe _t	10.08		

表 2 K 矿火山热液角砾岩样品总铁含量统计结果

Table 2 Total Fe content in copper containing volcanic breccia samples of K ore

Fe state	Fe content/%		
	Maximum	Minimum	Average
Fe ₂ O ₃	33.61	2.50	12.56
FeO	0.97	0.10	0.37
Fe _t	12.93		

K 矿生产勘探共对 30 件组合样进行分析，共包含 183 件样品，取样范围广，代表性强。分析结果显示，矿体内工业矿石硫含量最高为 16.65%，最低为 1.2%，平均值为 10.09%。

2.3 岩矿鉴定

通过对 K 矿 22 件矿石的岩矿鉴定分析，黄铁矿含量最高值为 60%，最小值为 1%，其余 20 件样

品黄铁矿含量平均值为 12.98%。

2.4 统计数据研究分析

通过以上分析统计得出, K 矿矿石中总铁平均含量为 10.92%, 硫平均含量为 10.09%, 黄铁矿平均含量为 12.98%。

表 3 所示为 K 矿矿石金属硫化物组合及各元素理论含量统计表。K 矿矿石中黄铁矿平均含量 12.98%, 理论计算可得出黄铁矿所含铁、硫在矿石中的占比分别为 6.04%和 6.94%。矿石中剩余铁主要来源于矿石中其他铁矿物与镁铁质脉石矿物, 如针铁矿、钛铁矿、褐铁矿、透辉石、角闪石、黑云母等; 剩余硫主要来源于矿石中次要、微量金属硫化物和其他铅、锌、银、砷酸盐矿物。

综上所述, 主要金属硫化物-黄铁矿是最重要的产酸矿物。

表 3 K 矿矿石硫化物组成及各元素理论含量统计表

Table 3 Composition of sulfide minerals in K ore and their theoretical element content

	Sulfide mineral	Formula	Mass fraction/%		
			Fe _t	Cu	S
Main	Pyrite	FeS ₂	46.55		53.45
	Chalcocite	Cu ₂ S		79.86	20.14
Few	Digenite	4Cu ₂ S·CuS		77.20	22.80
	Covellite	CuS		66.48	33.52
Very few	Enargite	Cu ₃ AsS ₄		48.42	30.56
	Bornite	Cu ₃ FeS ₄	11.12	63.33	25.55
	Chalcopyrite	CuFeS ₂	34.56	30.52	34.92

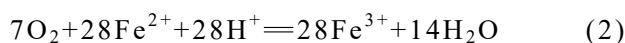
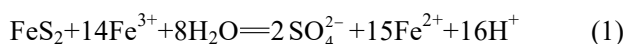
3 K 矿酸平衡计算

3.1 黄铁矿氧化机理

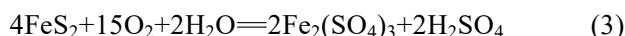
由于黄铁矿在资源环境领域的重要性, 国内外学者对黄铁矿化学氧化的机理及动力学进行了大量研究, 系统考查温度、酸度、三价铁浓度、溶解氧、电位等因素对黄铁矿氧化动力学的影响, 发现在酸性体系中溶液氧化还原电位是影响其氧化速率的最重要因素^[16-19]。虽然黄铁矿的氧化机理尚未完全清晰, 但普遍认为黄铁矿氧化受电化学反应控制, 并遵循硫代硫酸盐反应路径^[20]。黄铁矿的氧化主要包括以下两个过程: 黄铁矿晶格中的 Fe²⁺溶出

而被氧化为 Fe³⁺, 此过程伴随如硫单质、缺铁硫化物(Fe_{1-x}S₂)和多硫化物(FeS_n)等氧化中间产物的生成, 覆盖在黄铁矿的表面而形成一层钝化膜, 阻碍了其氧化溶解过程; 黄铁矿表面的钝化膜被进一步氧化为可溶性的 SO₄²⁻。在酸性条件下, 黄铁矿氧化反应的最终产物为 Fe³⁺和 SO₄²⁻^[21-23]。

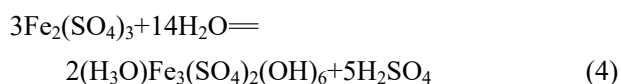
生物堆浸体系中, 存在大量的嗜酸铁硫氧化菌, 对黄铁矿的氧化起到关键作用^[24]。黄铁矿在氧化剂三价铁的氧化过程中生成中间价态硫以及二价铁, 而微生物驱动着铁和硫中间产物的氧化, 最终硫氧化为硫酸根, 二价铁氧化为三价铁, 从而保证了整个反应的可持续进行。反应化学式如下:



总反应:



生物堆浸生产体系中, 氧化还原电位基本恒定, 在一定 pH 值范围内, Fe³⁺会持续在堆场中成矾水解, 进而保证体系总铁浓度基本恒定。Fe³⁺成矾的反应方程式如下:



从以上分析可以看出, 黄铁矿氧化产酸包括两部分, 一部分来自其直接氧化产酸, 一部分来自 Fe³⁺成矾产酸。

3.2 黄铁矿氧化及酸平衡计算

为保持生产系统酸平衡, 需要分析系统酸来源和消耗途径。酸来源方面除了黄铁矿氧化, 还有铜萃取电积过程产酸以及反萃加酸; 酸消耗方面有脉石耗酸、辉铜矿浸出过程耗酸。各指标取值如表 4 所示。

1) 辉铜矿浸出-铜萃取电积

辉铜矿浸出:



铜萃取电积:

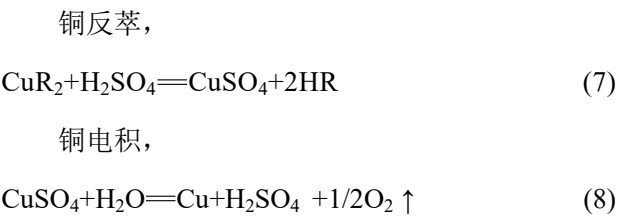
铜萃取,



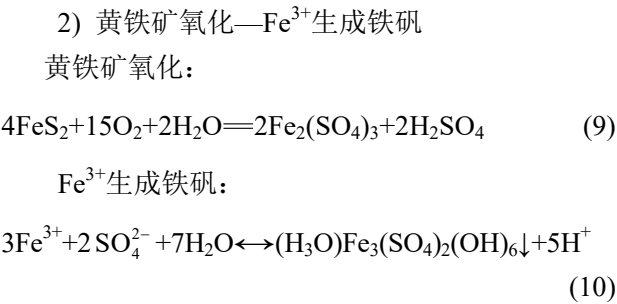
表 4 生产系统酸平衡计算选用指标取值

Table 4 Selected index value for acid balance calculation of production system

Item	Value	Remark
Acid consumption by chalcocite oxidation	0.77 kg/kg cathode copper	According to reaction formula
Acid generation during SX/EW process	1.54 kg/kg cathode copper	According to reaction formula
Acid generation by pyrite oxidation	1.09 kg/kg FeS ₂	According to reaction formula
Acid addition during SX/EW process	0.3 kg/ kg cathode copper	Industrial practice
Pyrite content in ore	129.8 kg/t ore	Chemical analysis
Cu content in ore	3.1 kg/ t ore	Average of ore body
Acid consumption by Gangue mineral	7 kg/t ore	Acid consumption tests
Cu recovery	70%	Industrial practice of K ore



根据以上化学方程式计算, 辉铜矿浸出-铜萃取电积过程中, 生产单位质量的阴极铜可以产出 0.77 倍的硫酸。



根据以上化学方程式计算, 黄铁矿氧化及 Fe³⁺生成铁矾过程中, 消耗单位质量的黄铁矿可以产出 1.09 倍的硫酸。

基于三价铁在堆场内成矾沉淀, 浸出的铜通过萃取-电积进行回收, 生产系统的理论净产酸量为辉铜矿浸出-铜萃取电积产酸、黄铁矿氧化—Fe³⁺生成铁矾产酸、反萃加酸总量减矿石脉石耗酸量。处理单位矿石所产出硫酸的计算公式如下。

$$Q_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 1.09 \times w_{\text{FeS}_2} \times \eta_{\text{FeS}_2} + 1.07 \times w_{\text{Cu}} \times \eta_{\text{Cu}} - Q_{\text{gm}} \quad (11)$$

式中: $Q_{\text{H}_2\text{SO}_4}$ 为单位矿石产硫酸, t/t; w_{FeS_2} 为黄铁矿含量, %; η_{FeS_2} 为黄铁矿氧化率, %; w_{Cu} 为铜含量, %; η_{Cu} 为铜浸出率, %; Q_{gm} 为矿石中脉石耗酸, t/t。

由于矿石中铜含量要远低于黄铁矿含量, 从式

(11)可以看出, 黄铁矿的氧化率对生产系统硫酸含量变化最为关键。通过计算得出, 黄铁矿氧化率为 3.31%时, 生产系统基本可以保持酸平衡。当系统基本稳定后, 黄铁矿氧化率低于或高于此值时将产生酸短缺或酸过剩。

4 未来 K 矿堆浸生产建议

蒙育瓦铜矿生产系统中, 黄铁矿氧化是主要产酸来源, 辉铜矿浸出-萃取电积产酸及反萃加酸。对系统酸增加影响有限; 脉石耗酸量能显著影响酸平衡, 高黏土矿石耗酸量大, 而低黏土矿石耗酸量小, 入堆矿石类型稳定时, 脉石耗酸量相对稳定。因此, 生产系统净产酸量主要取决于黄铁矿含量及其氧化率。未来蒙育瓦铜矿中黄铁矿含量高, 产酸潜势大, 以中和法为典型的末端治理路线, 技术成熟, 但存在运行成本高, 中和渣处理难, 对环境的影响大等诸多问题。

因此, 控制黄铁矿氧化即源头控酸是未来保证酸平衡的关键。可以采取覆堆的方式, 隔绝下层矿石, 抑制黄铁矿的氧化产酸^[25]; 采取分段多层、高堆的筑堆方式, 减少堆内含氧量, 抑制微生物亚铁氧化过程, 降低氧化还原电位, 控制黄铁矿的氧化。鉴于辉铜矿氧化依赖于硫酸化菌消除钝化层硫膜, 黄铁矿氧化依赖于亚铁氧化所引起的电位升高, 可以通过调节堆场内的微生物群落, 实现硫菌主导的微生物群落来抑制黄铁矿氧化; 引入亚铁还原菌来调控堆场内微生物亚铁氧化过程, 从而实现亚铁氧化过程的抑制, 降低黄铁矿的氧化。

同时, 可以考虑在生产过程中采取一些工业措

施来缓解酸浓度过高带来的负面影响。通过溶液的合理调配,产出酸度较低的合格液进行萃取;采用耐高酸的萃取剂,增加萃取级数,提高萃取铜传递量;提高合格液铜浓度,从而在较低的萃取率条件下,萃取铜传递量仍能得到一定保证,减少对阴极铜产量的影响;通过萃取或膜技术回收溶液中的硫酸,进行综合回收利用。

5 结论

1) 蒙育瓦 K 矿矿石黄铁矿含量高,堆浸过程中产酸趋势明显,过量黄铁矿氧化将导致生产系统酸过剩,降低生产效率,增加生产成本。

2) 通过相关检验及分析,得出 K 矿矿石黄铁矿含量平均值约为 12.98%。K 矿矿石中的黄铁矿氧化率为 3.31%时,生产系统基本可以保持酸平衡。

3) 针对生产系统未来可能出现的酸过剩问题,提出了源头控酸的技术方案,同时建议通过相关工业措施,缓解酸过剩给生产带来的负面影响。

REFERENCES

- [1] 曾伟民,邱冠周. 硫化铜矿生物堆浸研究进展[J]. 金属矿山, 2010(8): 102-107, 111.
ZENG Wei-min, QIU Guan-zhou. Development of heap bioleaching of copper sulphide ores[J]. Metal Mine, 2010(8): 102-107, 111.
- [2] BRIERLEY J A. A perspective on developments in biohydrometallurgy[J]. Hydrometallurgy, 2008, 94(1/2/3/4): 2-7.
- [3] 张 仪, 文书明. 铜湿法冶金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 39-40.
ZHANG Yi, WEN Shu-ming. Copper hydrometallurgy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2013: 39-40.
- [4] JIA Y, RUAN R M, ZHONG S P, et al. Heap bioleaching of a net-acid generating copper sulfide: Comparison of high and low acidity leaching systems[C]//Heap Leach Mining Solutions. Nevada, USA: InfoMine, 2015: 357-368.
- [5] 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): 338-343.
WEN Jian-kang, RUAN Ren-man, ZOU Lai-chang, 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.
- [6] 张启修, 张贵清, 唐瑞仁. 萃取冶金原理与实践[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2014.
ZHANG Qi-xiu, ZHANG Gui-qing, TANG Rui-ren. Fundamentals and practice of solvent extraction in hydrometallurgy[M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [7] 温建康, 阮仁满, 陈景河, 等. 紫金山铜矿生物堆浸提铜酸铁平衡工艺研究[J]. 稀有金属, 2006, 30(5): 661-665.
WEN Jian-kang, RUAN Ren-man, CHEN Jing-he, et al. Acid and iron balance in bacterial heap-leaching of Zijinshan copper ore[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2006, 30(5): 661-665.
- [8] 缅甸实皆省蒙育瓦七星塘铜矿(K 矿)生产(补充)勘探报告[R]. 西南有色昆明勘测设计(院)股份有限公司, 2017: 15-16.
Production (supplementary) exploration report of Kyisintaung copper mine (K mine), Mongyuwa Shijie province, Myanmar[R]. Southwest Nonferrous Kunming Survey and Design (Institute) Co. Ltd, 2017: 15-16.
- [9] 刘 畅, 孙和云, 贾 炎, 等. 浸矿微生物在黄铁矿氧化中的“接触作用”研究进展[J]. 稀有金属, 2017, 41(3): 319-326.
LIU Chang, SUN He-yun, JIA Yan, et al. Research progress in “contact mechanism” of bioleaching bacteria on pyrite oxidation[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(3): 319-326.
- [10] 尚钰姣, 牛 奕, 陈先锋, 等. 不同升温速率下黄铁矿氧化动力学及补偿效应[J]. 安全与环境学报, 2016, 16(1): 77-81.
SHANG Yu-jiao, NIU Yi, CHEN Xian-feng, et al. Kinetics and compensation effects of pyrite oxidation at the different heating rates[J]. Journal of Safety and Environment, 2016, 16(1): 77-81.
- [11] GU G H, SUN X J, HU K T, et al. Electrochemical oxidation behavior of pyrite bioleaching by acidithiobacillus ferrooxidans[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(5): 1250-1254.
- [12] 卢 龙, 王汝成, 薛纪越, 等. 黄铁矿氧化速率的实验研究[J]. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2005, 35(5): 434-440.
LU Long, WANG Ru-cheng, XUE Ji-yue, et al. Experimental study on oxidation rate of pyrite[J]. Science in

- China, SerD, 2005, 35(5): 434–440.
- [13] 毛景文, 罗茂澄, 谢桂青, 等. 斑岩铜矿床的基本特征和研究勘查新进展[J]. 地质学报, 2014, 88(12): 2153–2175.
- MAO Jing-wen, LUO Mao-cheng, XIE Gui-qing, et al. Basic characteristics and new advances in research and exploration on porphyry copper deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 88(12): 2153–2175.
- [14] 王 凯, 杨 帆, 李 峰, 等. 云南普朗斑岩铜矿床热液蚀变及脉体系统研究[J]. 地质与勘探, 2016, 52(3): 417–428.
- WANG Kai, YANG Fan, LI Feng, et al. Study on the hydrothermal alteration and vein systems of the pulang porphyry copper deposit in Yunnan Province[J]. Geology and Exploration, 2016, 52(3): 417–428.
- [15] MITCHELL A H G, MYINT W, LYNN K, et al. Geology of the high sulfidation copper deposits, monywa mine, Myanmar[J]. Resource Geology, 2011, 61(1): 1–29.
- [16] BASSON P, GERICKE M, GREWAR T L, et al. The effect of sulphate ions and temperature on the leaching of pyrite. III. Bioleaching[J]. Hydrometallurgy, 2013, 133: 176–181.
- [17] 武 彪, 阮仁满, 温建康, 等. 黄铁矿在生物浸矿过程中的电化学氧化行为[J]. 金属矿山, 2007(10): 64–67.
- WU Biao, RUAN Ren-man, WEN Jian-kang, et al. Electrochemical oxidative behavior of pyrite during ore bioleaching[J]. Metal Mine, 2007(10): 64–67.
- [18] 周桂英, 阮仁满, 温建康, 等. 紫金山铜矿浸出过程黄铁矿的氧化行为[J]. 北京科技大学学报, 2008, 30(1): 11–15.
- ZHOU Gui-ying, RUAN Ren-man, WEN Jian-kang, et al. Bio-oxidation of pyrite during copper bioleaching in Zijinshan[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2008, 30(1): 11–15.
- [19] 孙小俊, 李建华. 黄铁矿在酸性体系下的电化学研究[J]. 金属矿山, 2011(9): 72–75.
- SUN Xiao-jun, LI Jian-hua. Electrochemical study on pyrite in acidic medias[J]. Metal Mine, 2011(9): 72–75.
- [20] CRUNDWELL F K. The dissolution and leaching of minerals: Mechanisms, myths and misunderstandings[J]. Hydrometallurgy, 2013, 139: 132–148.
- [21] 王 楠, 易筱筠, 党 志, 等. 酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究[J]. 环境科学, 2012, 33(11): 3916–3921.
- WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, et al. Investigation on mechanism of pyrite oxidation in acidic solutions[J]. Environmental Science, 2012, 33(11): 3916–3921.
- [22] 陈建华, 钟建莲, 李玉琼, 等. 黄铁矿、白铁矿和磁黄铁矿的电子结构及可浮性[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(7): 1719–1727.
- CHEN Jian-hua, ZHONG Jian-lian, LI Yu-qiong, et al. Electronic structures and floatability of pyrite, marcasite and pyrrhotite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(7): 1719–1727.
- [23] 马 骏, 汪菊香, 武 彪, 等. 晶体结构对黄铜矿、黄铁矿生物浸出差异性影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(10): 2898–2904.
- MA Jun, WANG Ju-xiang, WU Biao, et al. Effects of crystal structure on differences of chalcopyrite and pyrite bioleaching[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(10): 2898–2904.
- [24] 钟传刚, 石剑锋, 张罗虎, 等. 缅甸 S&K 矿浸矿微生物活性关键影响因素研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(2): 6–9.
- ZHONG Chuan-gang, SHI Jian-feng, ZHANG Luo-hu, et al. Study on key factors of microbial activity in S&K mine in Myanmar[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(2): 6–9.
- [25] 范道焱, 林海彬, 伍赠玲, 等. 硫化铜矿生物堆浸过程中的覆堆技术研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(5): 1–6.
- FAN Dao-yan, LIN Hai-bin, WU Zeng-ling, et al. Study on overlay technology in biological heap leaching process of copper sulfide ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(5): 1–6.

Oxidation of pyrite and acid balance in heap bioleaching at Kyisintaung copper mine, Monywa, Myanmar

ZHANG Luo-hu¹, JIA Yan², ZHONG Chuan-gang¹, XUE Jie-hao¹, SHENG Ru-guo¹,
WANG Zhen-tang¹, SUN He-yun², TAN Qiao-yi²

(1. Wanbao Mining Limited, Beijing 100053, China;

2. National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Clean Production, Institute of Process Engineering,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100191, China)

Abstract: Heap bioleaching-solvent extraction-electrowinning is applied in Monywa copper mine to produce A grade cathode copper in Myanmar. Chalcocite is the main copper mineral and quite high amount of pyrite is also included in the ore. During the process of extracting valuable copper from heap bioleaching, a part of pyrite was also oxidized and dissolved into the ferric sulfate and sulfuric acid, which has the adverse effect on the industrial production system. The main traits of Monywa Kyisintaung heap bioleaching practice were introduced. The pyrite content of Kyisintaung ore is about 12.98%. The acid balance during heap bioleaching is reached basically when the oxidation of pyrite reaches 3.31%. Combined with the historical industrial data, the critical factors related to pyrite oxidation were analyzed and the acid balance situation in the future was evaluated. It is suggested that the industrial heap bioleaching of Kyisintaung ore will probably be acid excessive. Some possible solutions are proposed to solve this challenge.

Key words: Kyisintaung copper mine; heap bioleaching; chalcocite; pyrite; oxidation; acid balance

Foundation item: Project(IAGM-2019A08)supported by the Innovation Academy for Green Manufacture, Chinese Academy of Sciences; Project(ZDRW-ZS-2018-1) supported by the Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences

Received date: 2020-08-13; **Accepted date:** 2020-11-24

Corresponding author: JIA Yan; Tel: +86-10-82544992; E-mail: yjia@ipe.ac.cn

(编辑 龙怀中)