

## SABC 碎磨过程的模拟与优化

寇 珏<sup>1</sup>, 孙春宝<sup>1</sup>, 刘洪均<sup>2</sup>, 徐 涛<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中铝集团 中国铜业有限公司, 北京 100082)

**摘 要:** 针对 SABC 的设计与设备选型不能用传统的经验公式和 Bond 功指数作为依据的问题, 利用先进的 JKSimMet 模拟软件建立了乌山一期铜钼矿选矿厂 SABC 碎磨流程的模型, 并以现场生产数据为基础进行了模型拟合、参数优化。通过计算得出乌山 SABC 系统最大处理能力为 850 t/h, 通过工艺参数优化使 SABC 碎磨系统生产能力提高了 26.7%, 同时, 碎磨的吨功耗降低 2 kW·h 以上, 年增加经济效益 3 亿元以上。由此可见, 通过 JKSimMet 软件的模拟和优化可以达到降低能耗和提高产能的目的, 这对正在和计划使用 SABC 半自磨工艺流程的国内矿山有一定的借鉴意义。

**关 键 词:** SABC; 碎磨; JKSimMet; 模拟; 优化

中图分类号: TD 921

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)12-1743-05

## Simulation and Optimization of the SABC Comminution Circuit

KOU Jue<sup>1</sup>, SUN Chun-bao<sup>1</sup>, LIU Hong-jun<sup>2</sup>, XU Tao<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. China Copper Group Holding Co., Ltd., Aluminum Corporation of China, Beijing 100082, China. Corresponding author: SUN Chun-bao, E-mail: suncb@ustb.edu.cn)

**Abstract:** Realizing the existing issues that traditional empirical equations and Bond crushing work index are no longer fit for the reference basis of SABC circuit design and equipment sizing, an advanced simulation software JKSimMet was applied in this study to model the SABC comminution circuit of Wushan phase I copper-moly concentrator. The model was fitted and optimized based on the operation parameters. According to the simulation results the maximum throughput of Wushan SABC circuit is 850 t/h. The throughput of SABC circuit showed an increase of 26.7% after optimizing the operational parameters. Meanwhile, the comminution power consumption was decreased more than 2 kW·h per ton, and the economic benefit was increased over 300 million yuan per year. Therefore, by using JKSimMet to simulate and optimize SABC circuit greatly increased the throughput and decreased the energy consumption. This result should shed some light on the domestic mining companies which are applying or plan to apply the SABC comminution circuit.

**Key words:** SABC; comminution; JKSimMet; simulation; optimization

乌努格吐山铜钼矿(简称乌山)是国内首次成功使用 SABC 碎磨工艺的大规模有色矿山。四年多的生产实践证明,该工艺优势明显,在行业内引起了强烈反响,形成国内 SABC 热潮。虽然乌山 SABC 碎磨流程的生产能力已经达到设计值,但设计 SABC 碎磨流程时,因为国内缺乏在该领域的研究及工业实践, SABC 碎磨流程设备选型

主要依据国内外类似工艺流程的情况推理计算,未进行科学合理的试验研究,导致设备选型及能耗配置未达最佳化, SABC 碎磨流程的磨矿效果欠佳,生产稳定性不高<sup>[1]</sup>。

本文在 JK 落重试验取得合理的矿石粉碎能耗参数之后,利用 JK 软件拟合重新验证乌山一期 SABC 碎磨流程。并在当前现实的乌山一期

收稿日期: 2014-04-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61240012)。

作者简介: 寇 珏(1981-),女,内蒙古呼和浩特人,北京科技大学讲师,博士;孙春宝(1963-),男,河北衡水人,北京科技大学教授,博士生导师。

SABC 碎磨流程,依据新的矿石粉碎能耗参数,利用 JK 软件拟合验证其实际生产能力,并以此指导实践。

## 1 SABC 碎磨流程

### 1.1 工艺流程

乌山铜钼矿选矿厂一期碎磨流程采用的是 SABC 碎磨工艺,设计生产能力 3 万 t/d,并首次采用国产最大的  $\phi 8.8 \text{ m} \times 4.8 \text{ m}$  的半自磨机、 $\phi 6.2 \text{ m} \times 9.5 \text{ m}$  溢流型球磨机和密闭式储矿堆(最大储矿量 12 万 t,有效储矿量 3.9 万 t)。SABC 碎磨流程设备见图 1。

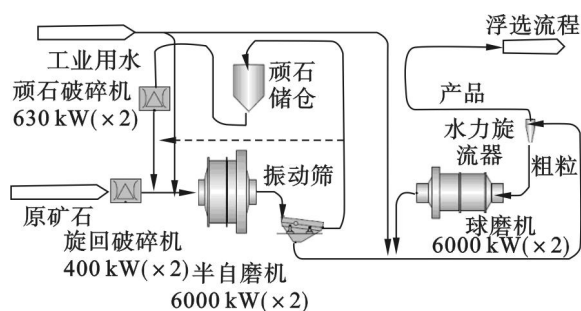


图 1 乌山一期 SABC 碎磨流程图

Fig. 1 Flow sheet of Wushan phase I SABC circuit

乌山一期主要磨矿工艺指标及参数参见表 1。

表 1 乌山一期单系列 SABC 碎磨工艺参数  
Table 1 Processing parameters of Wushan phase I SABC circuit

主要磨矿工艺参数	参数范围
处理能力	15 000 t/d
半自磨给矿粒度	-300 mm
半自磨机转速率	78%
半自磨磨矿浓度	80% ~ 85%
球磨产品细度	-0.074 mm 占 65%
球磨磨矿浓度	70% ~ 75%

### 1.2 存在的问题

SABC 碎磨流程设计中包括自磨设备、球磨设备的选型参数,顽石产率等均是依据国内外类似工艺数据,用 Bond 功指数和经验推理计算得到,未进行详细的试验与理论研究。因此,对半自磨机、球磨机和顽石破碎机的选型存在争议,对设计装机功率(如半自磨机和球磨机均是 6 000 kW)也存在争议,但又无法拿出合理的解决方案<sup>[2-3]</sup>。

通过流程考察,乌山一期 SABC 半自磨流程

存在的具体问题有:

1) 设备选型的不合理造成半自磨和球磨功率平衡异常。在试生产过程中,系统负荷量从 30% 到 100% 的试车运行中,球磨机功率始终保持在高位运行,而半自磨机功率则始终保持在中位运行。当系统负荷量达到 100% 时,球磨机的运行功效已在 90% 以上,半自磨机运行功效在 50% 左右;

2) 生产能力的问题。当系统达产后,该系统似乎还存在产能的提升空间。但由于球磨机功率已接近上限,形成瓶颈,是否还能提升产量,能提到多少,在安全运行的前提下采用什么手段提产,成了该工艺后续发展的困惑;

3) 在生产运行过程中,顽石破碎机运行不连续,导致系统运行不稳定,平均每个班只能运行两小时左右,从而导致半自磨生产能力、磨矿效率和能耗方面的不稳定。

在研究国内外 SABC 工艺的过程中认识到:JK 落重试验是获得 SABC 碎磨参数的科学有效方法;JKSimMet 软件是研究 SABC 碎磨流程的重要工具<sup>[4-5]</sup>。

## 2 JKSimMet 模拟软件的基本原理

澳大利亚昆士兰大学 JKMRRC 矿物研究中心利用数学模型和数值模拟来描述、分析和优化破碎和磨矿回路。该中心研发的半自磨、球磨和旋流器数学模型在过去 45 年中在半自磨机回路和 SABC 回路设计中得到较广泛应用<sup>[6-7]</sup>。世界各地 JKSimMet 用户已有三百多家,主要分布在澳大利亚和北美地区<sup>[8-9]</sup>。

JK 数学模型的基础是自磨机的给矿,磨机中的负荷以及磨矿产品<sup>[8]</sup>,其数量变化过程如图 2 所示。

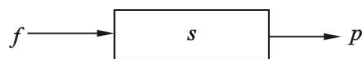


图 2 JK 数学模型的基础变量

Fig. 2 Variables of JKSimMet model

图中: $f$  为给矿量, t/h;  $s$  为磨机中的固体含量, t;  $p$  为磨机的排矿量, t/h。

如果设定

$$p_i = d_i s_i \quad (1)$$

式中, $d_i$  为  $i$  粒级矿物的排矿速率。图 2 中符号表达方式可以通过图 3 中不同粒级的破碎模型表述。

将图 3 中  $i$  粒级的给矿和排矿进行质量平衡,同时考虑磨矿过程中磨机内粗粒级对于  $i$  粒级的贡献,以及  $i$  粒级本身的减少,可以得到平衡模型:

$$f_i - r_i s_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} r_j s_j - d_i s_i = 0. \quad (2)$$

即  $i$  粒级的给矿量减去  $i$  粒级在磨机内经破碎后进入小于  $i$  粒级的固体量,加上大于  $i$  粒级的各个粒级在磨机内经破碎后进入  $i$  粒级的固体量,再减去排出磨机外的  $i$  粒级固体量的总和为零。

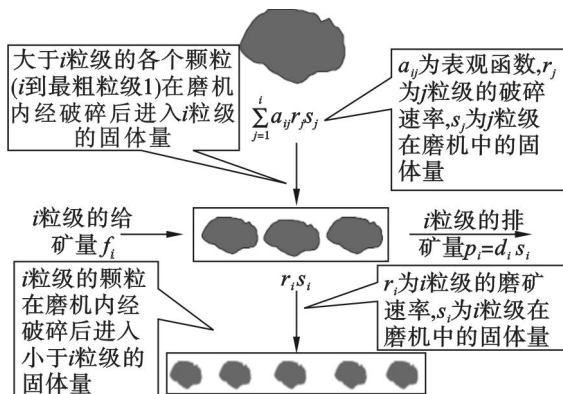


图 3 不同粒级的总体平衡模型

Fig. 3 Balance model at different particle size fraction

式(2)是 JK 半自磨机的核心方程,其关键参数为表观函数  $a_{ij}$  和磨矿速率  $r_j$ . 表观函数  $a_{ij}$  的物理意义为粗粒级  $j$  在第一次破碎后新产生的  $i$  粒级产品量. 磨矿速率  $r_j$  的物理意义为粒级  $j$  在单位时间内的消失量. 表观函数为矿石的固有性质,由 JK 落重试验在不同能量输入的条件下确定. 磨矿速率由磨机的作业条件决定,比如磨机功率、处理量、转速、球径、矿浆浓度、给矿粒度等. 一般根据磨矿条件通过数值分析方法计算得出。

依据半自磨结构特点和图 3 的总体平衡模型中参数与磨矿条件的关系,JK 矿物研究中心开发了半自磨数学模型软件,包含在 JKSimMet 软件包中,其结构如图 4 所示。

从图 4 可知,除了总体平衡模型外,JK 半自磨机模型还包括矿浆物料在磨机内的输送模型和矿浆产品的排放模型<sup>[8]</sup>。

JK 半自磨机数学模型在设计放大半自磨机过程中主要利用表观函数确定矿石比能耗(kWh/t),将磨机处理量与磨机功率代入计算过程中,磨矿速率反映各种磨矿条件对产品粒度的影响,物料输送和排放模型反映磨机尺寸和内部结构对矿浆流动的限制<sup>[9]</sup>。

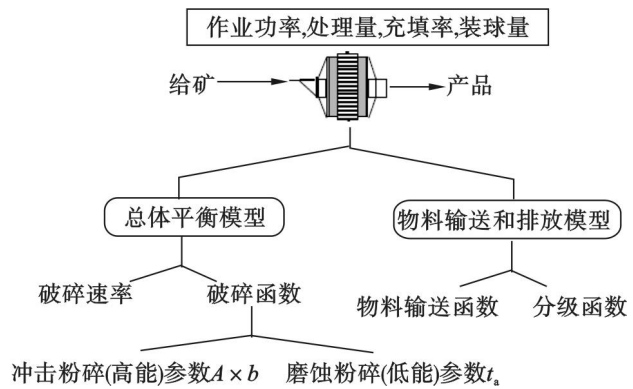


图 4 JK 半自磨机模拟的模型结构

Fig. 4 The model structure of the JK SAG mill simulation

### 3 流程拟合与优化

#### 3.1 拟合方法及参数设定

使用 JKSimMet 软件进行拟合、输出科学合理的拟合结果的前提是获得有针对性的矿石碎磨特性方面的研究试验数据<sup>[10]</sup>. 矿石的碎磨特性是确定碎磨工艺流程的重要依据,但碎磨特性参数需要通过试验来获得,这些试验方法中包括 JK 落重试验. 该试验是通过 JK 落重冲击试验和滚筒跌落试验获得矿石在半自磨机内的冲击粉碎(高能)参数  $A, b$  和  $A \times b$ ,以及磨蚀粉碎(低能)参数  $t_a$ . 此外,利用 Bond 球磨功指数试验还可获得用于球磨计算和设备选型的 Bond 功指数<sup>[7]</sup>以及半自磨流程中的磨机驱动功率的参数. 在用 JKSimMet 作设计与优化的过程中,首先需要进行流程的设定,之后输入矿石碎磨特性参数、设备参数、工艺参数等内容,然后通过调整参数设置实现流程的总体平衡,并得到平衡后的最佳设备选型参数如功率、最大处理量等。

通过以上选型流程,在承认现有流程存在缺陷的前提下,依据新的矿石粉碎能耗参数,利用 JKSimMet 软件对乌山一期正在使用的半自磨机与球磨机的最大处理量进行拟合计算,获得 SABC 最大的实际生产能力和最佳设备配置,并从理论上分析了现有系统的最大处理能力. 具体的拟合参数设定如下。

工艺流程仍采用乌山确定的 SABC 碎磨流程。

设备参数的确定:以乌山一期现有所有设备参数为依据(如表 2 所示)。

采用 JK 落重试验和 Bond 功指数试验研究所确定的矿石碎磨特性参数(如表 2 所示)。

工艺参数的确定:各阶段磨矿细度、加水量、



最终产品粒度均采用乌山一期的设计值.

表 2 设备和矿石碎磨特性参数

Table 2 The ore properties of grinding and equipment parameters

项目	参数	单位	数值
磨矿系统	处理能力	t/d	15 000
	给料粒度	mm	- 300
半自磨机	转速率	%	78
	磨矿浓度	%	80 ~ 85
	台数	台	1
	产品细度	mm	- 0. 074 mm (占 65%)
球磨机	磨矿浓度	%	70 ~ 75
	台数	台	1
	SG	t/m <sup>3</sup>	2. 62
	A	/	63. 08
	b	/	1. 08
矿石性质	$A \times b$	/	68. 13
	DW <sub>i</sub>	kWh/m <sup>3</sup>	3. 72
	$t_a$	/	0. 61
	BW <sub>i</sub>	kWh/t	14. 32

将上述设定值输入 JK 模拟软件,拟合各主要设备的处理量和合理的钢球充填率,并拟合运行功率的状况.

### 3.2 JK 软件拟合结果及分析

经过 JK 软件拟合得出,半自磨机最大处理量为 850 t/h,钢球充填率为 8%,总充填率为 25%;计算功率约为 4 300 kW.

球磨机最大处理量为 850 t/h,钢球充填率为 27%,计算功率约为 5 700 kW.

1) 拟合结果说明乌山实际磨机(这里磨机是半自磨机和球磨机统称)最大处理能力可以达到 850 t/h(单系列处理能力为 2 万 t/d).从功率角度分析,拟合得到的球磨机功率约 5 700 kW,为球磨机装机功率的 95%,应该是半自磨机和球磨机两者达到平衡时可允许的状况.与选厂一期设计处理能力 625 t/h(单系列处理能力为 1.5 万 t/d)相比,理论上磨机处理能力可提高 36%.

2) 半自磨机钢球充填率仅有 8%,添加钢球还有很大的余地,同时其功率也有较大提升空间.如果继续添加钢球,半自磨机处理量还有很大的上升能力,但是球磨机能力已经接近极限.因此,优化的重点在半自磨机.

3) 拟合得到的球磨机功率比乌山实际球磨运行功率高,乌山球磨机实际运行功率上行空间不大,应主要从提高磨矿效率上下工夫.例如适当提升钢球充填率,改善球磨给矿的粒度特性等.

## 4 工业验证

通过实际生产运行检验,最终确定的 SABC 优化方案为:将半自磨机钢球充填率由 8% 调整至 10%;将球磨机钢球充填率调整至 27%,并将运行功率上限调整为 5 800 kW;将 HP 系列破碎机替换成没有衡功率控制器的杰弗朗破碎机,同时增加顽石矿仓.通过优化方案的实施,乌山一期碎磨流程达到了 2 万 t 的日处理能力,证明拟合研究结果是可行的.

该研究以理论优化指导实践,达到了预期的目的,起到了指导乌山一期生产的作用,产量得到有效提高,提高幅度为 26.7%.同时,经济效益也相应得到良好的体现.由于产能的优化提高,仅装机容量费一项就可节省 1 千多万元,矿石吨功耗降低 2 kW·h 以上.尤为重要的是,产量的提高为乌山一期所带来的效益更为巨大,每年可增加铜金属产量 6 000 t 以上,即增加产值 3 亿元以上.

研究与实践证明,Bond 功指数已不适用于半自磨机的选型.同时,乌山一期 SABC 工艺设计、建设与生产运行实践证明,SABC 碎磨流程设备的设计选型必须进行充分的矿石碎磨特性试验研究,并应以矿石的粉碎能耗参数等试验数值作为模拟碎磨过程的基本依据,而不应仅依据国内外类似工艺数据,用经验推理计算得出.

## 5 结 论

1) 通过 JK 落重试验,得到了矿石的冲击破碎参数 A、b 和磨蚀参数  $t_a$ ,结合 Bond 功指数等矿石碎磨参数,作为 SABC 碎磨流程设计选型的主要依据.并由此找出了乌山一期 SABC 设计的问题所在.

2) 根据乌山矿石碎磨特性参数、工艺流程和既定的设备型号、功率等参数,利用 JK 模拟软件,对乌山一期 SABC 碎磨流程进行反向拟合研究,即对 SABC 系统产能进行了优化拟合,结果表明:乌山实际磨机最大处理能力可以达到 850 t/h,理论处理能力提高了 36%.

3) 乌山一期 SABC 碎磨流程的优化实践结果表明:SABC 碎磨系统生产能力得到有效提高,提高幅度为 26.7%.同时,经济效益也相应得到良好的体现,其中矿石吨功耗降低 2 kW·h 以上,每年增加效益 3 亿元以上.因此,乌山一期 SABC 碎磨流程的模拟和优化达到了预期目标.

## 参考文献:

- [1] 刘洪均,孙春宝,赵留成,等. 乌努格吐山铜钼矿 SABC 碎磨流程的设计与应用[J]. 有色金属(选矿部分),2013(3):64-66.  
(Liu Hong-jun, Sun Chun-bao, Zhao Liu-cheng, et al. The design and application of SABC crushing & grinding process for treatment of copper-molybdenum ore of WuShan Mine [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2013(3):64-66.)
- [2] Stark S, Perkins T, Napier T J. JK drop weight parameters—a statistical analysis of their accuracy and precision and the effect on SAG mill comminution circuit design [C]//Proceedings Metallurgical Plant Design and Operating Strategies. Melbourne: The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 2008:147-156.
- [3] Napier T J, Morrell S, Morrison R, et al. Mineral comminution circuits: their operation and optimization [M]. Indorooopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, 1996:237-241.
- [4] Siddall G B. Analyzing power efficiency for crushing and grinding [C]//SAG Mill Conferences. Sydney, 1999: 423-443.
- [5] Dor A A, Bassarear J R. Design and installation of comminution circuits [M]. New York: Society for Mining Metallurgy, 1982.
- [6] Nelson M, Valery W, Morrell S. Performance characteristics and optimisation of the Fimiston (KCGM) SAG mill circuit [C]//Proceedings of International Conference on Autogenous and Semiautogenous Grinding Technology. Vancouver, 1996:237-241.
- [7] Katsabanis P, Gregersen S, Pelley C, et al. Small scale study of damage due to blasting and implications on crushing and grinding [C]//Proceeding of 29th Annual Conference. Explosives and Blasting Research. Nashville, 2003: 117-121.
- [8] 高明伟. 大型半自磨机的数学模型及工业应用[J]. 金属矿山, 2011(9):1-4.  
(Gao Ming-wei. The modeling and simulation of large-scale SAG mill and its industry practice [J]. *Metal Mine*, 2011(9):1-4.)
- [9] Gao M, Young M, Allum P. Isamill fine grinding technology and its industrial application at Mount Isa Mines [C]//Canadian Annual Mineral Processing Conference. Ottawa, 2002: 21-24.
- [10] Hart S, Valery W, Clements B, et al. Optimization of the Cadia Hill SAG Mill Circuit [C]//International Conference on Semi-autogenous Technology. Vancouver, 2001: 107-112.
- [5] 宋军,蔡九菊,张琦. 钢铁联合企业煤气系统动态仿真[J]. 东北大学学报:自然科学版,2010,31(5):685-688.  
(Song Jun, Cai Jiu-ju, Zhang Qi. Dynamic simulation of gas system in iron and steel complex [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2010, 31(5): 685-688.)
- [6] Zhao J, Wang W, Liu Y. A two-stage online prediction method for a blast furnace gas system and its application[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2011, 19(3):507-520.
- [7] Zhang X P, Zhao J, Wang W, et al. An optimal method for prediction and adjustment on byproduct gas holder in steel industry[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(4): 4588-4599.
- [8] Kong H N, Qi E S, Li H, et al. An MILP model for optimization of byproduct gases in the integrated iron and steel plant[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(7):2156-2163.
- [9] Kim J H, Yi H S, Han C. A novel MILP model for plantwide multiperiod optimization of byproduct gas supply system in the iron- and steel-making process [J]. *Chemical Engineering Research Design*, 2003, 81(8):1015-1025.
- [10] Sun W Q, Cai J J. Optimal dynamic dispatch of surplus gas among buffer boilers in steel plant [J]. *Journal of Central South University*, 2013, 20(9):2459-2465.
- [11] Larsson M, Wang C, Dahl J. Development of a method for analysing energy, environmental and economic efficiency for an integrated steel plant[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(13):1353-1361.
- [12] Chen K J, Ji P. A mixed integer programming model for advanced planning and scheduling[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 181(1):515-522.
- [13] Sun W Q, Cai J J, Song J. Plant-wide supply-demand forecast and optimization of byproduct gas system in steel plant[J]. *Journal of Iron and Steel Research International*, 2013, 20(9):1-7.

(上接第 1727 页)