

# JKSimMet 模拟软件在某金矿磨矿分级系统多目标协同优化中的应用

龚道振<sup>1,2</sup>, 王培龙<sup>1,2</sup>, 孙春宝<sup>1,2</sup>, 寇珏<sup>1,2</sup>, 张瑞洋<sup>1,2</sup>, 胡阳<sup>1,2</sup>

1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;  
2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083

中图分类号: TD921<sup>+</sup>.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)01-0099-06  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.04.040

**摘要** 为了实现某金矿选厂的提产增效和节能降耗, 采用 JKSimMet 模拟软件对该金矿的磨矿分级系统进行了多目标协同优化。采取的优化措施包括降低磨矿分级系统给矿粒度, 调整球磨机和旋流器的关键工艺参数和增加粗磨旋流器底流给入再磨球磨机的比例。JKSimMet 模拟结果显示, 优化后磨矿分级系统的处理能力由 35 t/h 提升至 44 t/h; 粗磨比能耗从 11.09 kWh/t 降低至 9.94 kWh/t, 中矿再磨比能耗从 9.93 kWh/t 降低至 7.23 kWh/t; 粗磨产品细度  $P_{80}$  从 86  $\mu\text{m}$  减小至 80  $\mu\text{m}$ 。通过对整个磨矿分级系统各工艺参数的协同优化, 增加了磨矿分级系统的处理能力, 降低了磨矿比能耗, 并且提高了磨矿产品的质量, 达到了多目标协同优化的目的。

**关键词** JKSimMet; 磨矿分级; 金矿; 多目标协同优化

矿山生产处理单位矿石的能耗是衡量其矿产资源开发利用水平的重要指标之一<sup>[1]</sup>。矿石粉碎能耗占金属矿山生产总能耗的 35% ~ 50%<sup>[2-4]</sup>, 在矿石粉碎工艺流程中磨矿作业的能耗最高, 占到矿石粉碎总能耗的 80% ~ 85%<sup>[5]</sup>。磨矿分级系统的矿石处理能力往往决定了选厂的处理能力, 而且磨矿产品的质量直接影响后续选别作业的技术指标。因此, 优化磨矿分级系统是实现矿山节能降耗、提高资源开发利用水平的重要途径。

某金矿选厂采用一段闭路磨矿、一粗二扫二精浮选、中矿再磨返回粗选的选矿工艺。该金矿处理的矿石属于微细粒浸染型难选冶金矿石, 矿石中的金主要以黄铁矿包裹金形式赋存。矿石的邦德球磨功指数高达 19.76 kWh/t, 现场生产实践表明磨矿产品细度必须达到 -74  $\mu\text{m}$  占 75% ~ 80% 才能保证良好的浮选指标。矿石的高硬度加上浮选作业对磨矿产品细度的高要求导致选厂的磨矿能耗高, 同时也制约了选厂产能的提高。为了实现选厂的提产增效和节能降耗, 采用 JKSimMet 模拟软件对选厂的磨矿分级

系统进行了多目标协同优化。

## 1 JKSimMet 模拟软件简介

JKSimMet 是澳大利亚 Julius Kruttschnitt 矿物研究中心研发的专门针对碎磨流程的模拟软件<sup>[6]</sup>, 可以计算模拟矿石物料在各碎磨作业段或在整个碎磨系统中的运行状况, 包括处理量、物料粒度分布、矿浆浓度等<sup>[7]</sup>。该软件特别适合用于对现有的破碎磨矿流程进行优化, 通过利用 JKSimMet 软件分析实际碎磨流程的运行数据, 找出薄弱环节, 采取进行针对性的优化措施, 可提高流程的产能或使磨矿产品更好地满足后续选别作业的要求<sup>[8]</sup>。

### 1.1 磨矿单元计算模型介绍

JKSimMet 软件采用基于总量平衡的理想混合模型 (Perfect Mixing Model) 计算粉碎产品的粒度组成。在连续给料的条件下, 磨机内某一粒级  $i$  的总量平衡表达式如式(1)所示, 理想混合模型示意图如图 1 所示。

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

式中  $f_i$  为给料中  $i$  粒级物料的质量;  $r_i$  为磨机内  $i$  粒级物料的破碎速率;  $s_i$  为磨机内部  $i$  粒级物料的质量;  $a_{ij}$  为大于  $i$  粒级的物料被破碎至  $i$  粒级的比例;  $d_i$  为磨机内  $i$  粒级物料的排出速率。

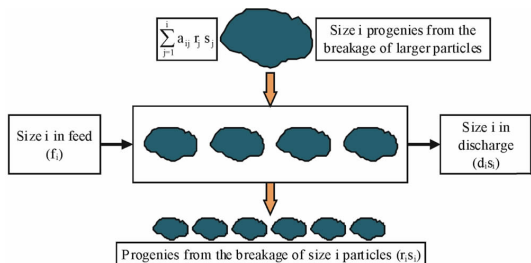


图 1 理想混合模型示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the ideal mixing model

在使用 JKSimMet 模拟碎磨流程时, 矿石在粉碎设备中的粉碎效果由矿石粉碎特征参数、磨机设备参数和操作参数共同决定。因此, 利用 JKSimMet 软件可以建立与现场磨矿分级系统流程结构特点、设备参数和矿石性质相吻合的模型, 并准确模拟该系统在不同工艺参数下的运行情况。

### 1.2 分级单元计算模型介绍

JKSimMet 软件中一般采用 Nageswararao 模型<sup>[9]</sup>来计算物料在水力旋流器中的分级指标。该模型能够计算出旋流器给矿中各个粒级的分级效率和给矿中的水在溢流、底流中的分配比例, 由以上数据便可计算出溢流和底流的浓度和粒度分布。Nageswararao 模型采用简化分级效率曲线 (Reduced Efficiency Curve) 计算物料分级效率。金属矿山磨矿分级系统中旋流器的典型简化分级效率曲线如图 2 所示, 图中

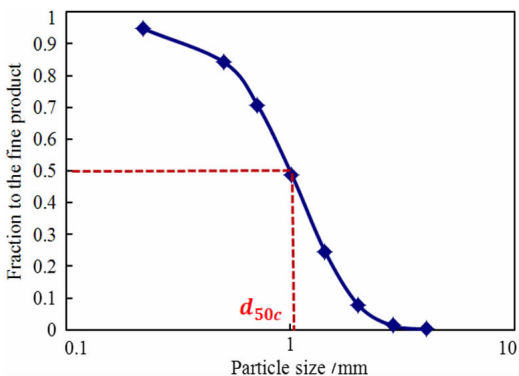


图 2 水力旋流器简化分级效率曲线  
Fig. 2 Simplified classification efficiency curve of hydrocyclone

各个粒级的分级效率按式(2)计算。分离粒度  $d_{50}$  决定了分级效率曲线的位置, 参数  $\alpha$  和  $\beta$  的值决定了分级效率曲线的形状。在输入旋流器结构参数、工作参数和旋流器给矿、底流、溢流的浓度和粒度分布等数据后, 通过不断调整模型各参数的值并将模拟结果与实际结果比较, 可建立该旋流器的分级模型, 用于后续模拟该旋流器在不同工作参数下的运行指标。

$$E_0 \left( \frac{d}{d_{50c}} \right) = C \cdot \frac{\left( 1 + \left( \beta \cdot \beta^* \cdot \frac{d}{d_{50c}} \right) \cdot (e^\alpha - 1) \right)}{e^{\left( \alpha \cdot \beta^* \cdot \frac{d}{d_{50c}} \right)} + e^\alpha - 2} \quad (2)$$

式中  $E_0$  是物料的分级效率;  $d$  是物料的实际粒度 ( $\mu\text{m}$ );  $d_{50c}$  是修正过的分级效率为 50% 对应的粒级 ( $\mu\text{m}$ );  $\alpha, \beta$  是定义效率曲线形状的参数;  $C$  是进入到溢流中的水占给料所含水的比例 (%);  $\beta^*$  由内部计算不属于拟合参数。

## 2 磨矿分级系统考察与诊断分析

某金矿的磨矿分级系统流程结构如图 3 所示。其中粗磨作业采用格子型球磨机, 磨矿细度为  $-74 \mu\text{m}$  含量占 77% 左右; 中矿再磨作业采用溢流型球磨机, 磨矿细度为  $-74 \mu\text{m}$  含量占 75% ~ 80%。浮选各作业中矿合并后泵送至旋流器组进行预先分级, 溢流输送至浮选粗选给矿搅拌槽, 底流给入中矿再磨球磨机。粗磨分级作业旋流器底流的一部分 (约占粗磨球磨机处理量 10% ~ 15%) 直接给入再磨球磨机。

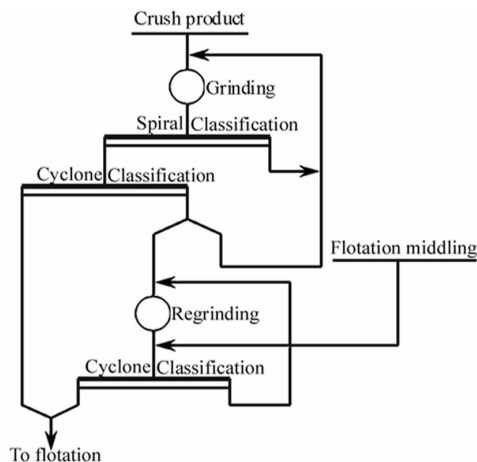


图 3 某金矿磨矿分级系统流程结构  
Fig. 3 Configuration of the grinding circuit at a gold mine

对磨矿分级系统中各关键产品的粒度进行了筛析, 结果如图 4 ~ 图 6 所示。由图 5 和图 6 可知, 粗磨作业和中矿再磨作业的旋流器给矿和底流的粒度组成差别并不明显, 这说明旋流器的运行参数与球磨机的运行参数没有充分匹配, 导致旋流器并未充分发挥

其物料分级的能力。若调整旋流器的结构参数和操作参数,保证磨机排矿中的合格粒级及时排出,可提高磨矿分级系统的处理能力。

磨矿分级工艺流程相匹配的数值模拟模型并对该模型进行了验证。磨矿分级系统中球磨机模型和旋流器模型的输入参数分别如表 1 和表 2 所示。磨矿分级系统 JKSimMet 模拟结果如图 7 所示,粗磨分级系统和 中矿再磨分级系统的模拟结果分别如表 3 和表 4 所示。可见模型模拟的关键产品的粒度和浓度与实际考察的偏差很小,模型吻合度很高。

表 1 JK SimMet 软件球磨机模型输入参数

Table 1 Input parameters of the ball mill model in JKSimMet software

工作参数	粗磨磨机	中矿再磨磨机
筒体有效内径/m	2.54	1.94
筒体有效长度/m	3.60	3.00
给矿端耳轴直径/m	1.0	0.7
转速率/%	79.4	83.3
钢球填充率/%	40.6	31.9
钢球最大直径/mm	100	40
磨机内矿浆浓度/%	73.3	70.9
新鲜给矿速率/(t · h <sup>-1</sup> )	35	13.4
给矿含水率/%	4.0	4.0
给矿 P <sub>80</sub> /μm	9 700	257
邦德球磨功指数/(kWh · t <sup>-1</sup> )	19.76	19.76

表 2 JK SimMet 软件旋流器模型输入参数

Table 2 Input parameters of the cyclone model in JKSimMet software

工作参数	粗磨旋流器	中矿再磨旋流器
运行台数	1	4
内径 Dc/mm	500	250
柱体高/mm	1 920	1 380
给料口径/mm	90	90
溢流管径/mm	105	115
溢流管插入深度/mm	300	300
底流口径/mm	70	34
锥角/(°)	20	15
给料压力/MPa	0.085	0.070

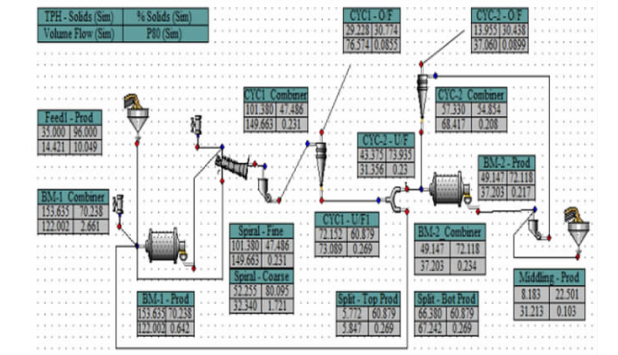


图 7 某金矿磨矿分级系统 JKSimMet 模拟结果  
Fig. 7 Simulation results of the grinding circuit at agold mine using JKSimMet

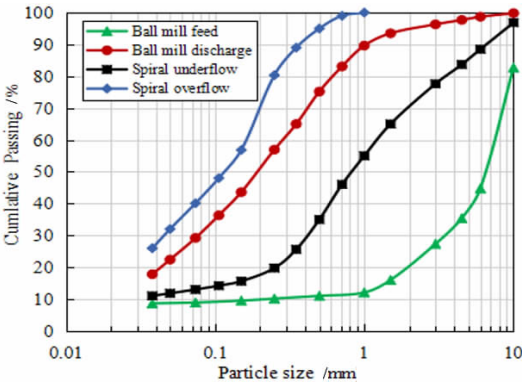


图 4 粗磨螺旋分级各产品粒度组成  
Fig. 4 Particle size distribution of the products in the coarse grinding - spiral classification circuit

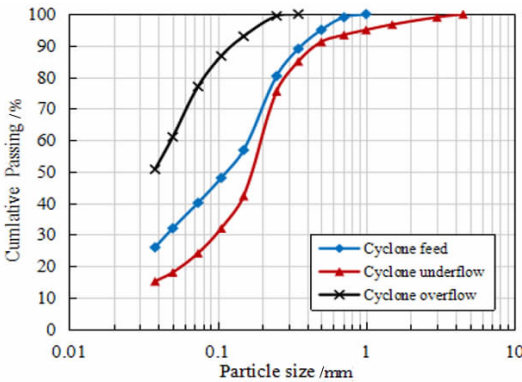


图 5 粗磨旋流器各产品粒度组成  
Fig. 5 Particle size distribution of products in the coarse grinding - cyclone circuit

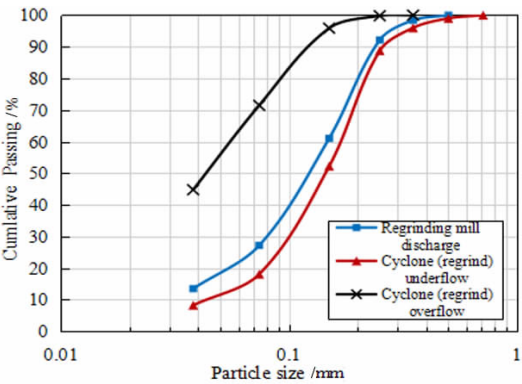


图 6 中矿再磨分级作业各产品粒度组成  
Fig. 6 Particle size distribution of the products in the middlings regrinding - classification circuit

### 3 JKSimMet 模型建立及验证

采用 JKSimMet 软件建立了与该金矿矿石性质和

表3 粗磨分级系统 JKSimMet 模拟结果

Table 3 JKSimMet simulation results of the coarse grinding and classification system

设备名称	工作参数	测量值	模拟值
粗磨球磨机	运行功率/kW	381	388
	新鲜给矿量/(t·h <sup>-1</sup> )	35.0	35.0
	给矿粒度 $F_{80}$ /mm	10.0	10.0
	排矿浓度/%	73.3	70.2
螺旋分级机	底流浓度/%	82.6	80.1
	溢流浓度/%	47.0	47.5
	底流 $P_{80}$ /μm	3 596	1 721
	溢流 $P_{80}$ /μm	249	231
	返砂比/%	63	52
粗磨旋流器	给料压力/MPa	0.085	0.088
	给矿浓度/%	47.0	47.5
	底流浓度/%	58.7	60.9
	溢流浓度/%	30.3	30.8
	给矿粒度 $P_{80}$ /μm	249	231
	底流粒度 $P_{80}$ /μm	299	269
	溢流粒度 $P_{80}$ /μm	86	86
	返砂比/%	231	247

表4 中矿再磨分级系统 JKSimMet 模拟结果

Table 4 JKSimMet simulation results of the middlings regrinding - classification system

设备名称	运行参数	测量值	模拟值
再磨球磨机	运行功率/kW	165	139
	处理量/(t·h <sup>-1</sup> )	13.4	14.0
	排矿浓度/%	70.9	72.1
	给料压力/MPa	0.070	0.055
	给矿浓度/%	53.5	54.9
再磨旋流器	底流浓度/%	73.8	73.9
	溢流浓度/%	29.1	30.4
	给矿粒度 $P_{80}$ /μm	203	208
	底流粒度 $P_{80}$ /μm	226	230
	溢流粒度 $P_{80}$ /μm	94	90
	返砂比/%	388	309

## 4 磨矿分级系统整体模拟优化

大量的矿山生产实践已证明,以“多碎少磨”为理念的碎磨流程优化是提高矿石粉碎效率的有效措施。由于破碎作业的能量利用效率远高于磨矿作业的能量利用效率,因此让破碎作业尽可能多的承担矿石粉碎任务,降低球磨机给矿粒度能够提高整个碎磨流程的粉碎效率。考虑到现场细碎圆锥破碎机设备作业率较低,可进一步将细碎排矿口从 10 mm 减小至 7 mm,减小球磨给矿粒度,将更多矿石粉碎任务分配给细碎作业。优化前后粗磨球磨机新给矿粒度组成变化如图 8 所示,通过减小细碎排矿口尺寸可将球磨给矿粒度  $F_{80}$  从 10.0 mm 降低至 7.0 mm。

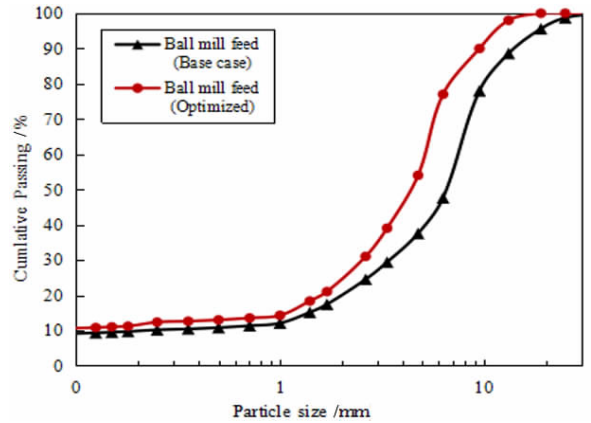


图8 优化前后粗磨球磨机新给矿粒度组成对比  
Fig. 8 Comparison of particle size distribution of new feed for coarse grinding mill before and after optimization

水力旋流器的结构尺寸和操作参数对物料分级效果有重要的影响<sup>[10]</sup>。现场粗磨作业和中矿再磨作业的旋流器分级效果不理想,旋流器给矿与底流产品粒度差异小,因此针对性地调整了旋流器的结构参数和工作参数,提升了物料的分级效率。采用 JKSimMet 软件分别模拟了粗磨旋流器组在不同给矿浓度和不同沉砂口直径下的运作指标。模拟结果显示:增大沉砂口直径后旋流器分离粒度  $d_{50}$  减小,溢流产品  $P_{80}$  减小,分级效率得到了提升,但是旋流器给矿压力显著上升;增大旋流器给矿浓度后旋流器分离粒度  $d_{50}$  增大,溢流产品  $P_{80}$  增大,分级效率降低,但是旋流器给矿压力显著降低。旋流器正常工作时的给矿压力应不超过 0.13 MPa,压力过大会增加旋流器给矿端的磨损,影响设备寿命和设备工作效率。综合考虑,采取了增大沉砂口直径同时适当增加给矿浓度的优化方案,以保证提高旋流器分级效率的同时将旋流器给矿压力保持在合适的范围内。采取的具体优化措施为:将粗磨作业旋流器的给矿浓度由 47.5% 提高至 49.3%,旋流器沉砂口直径由 70 mm 增大至 75 mm;将中矿再磨作业旋流器的给矿浓度由 54.9% 提高至 59.9%,旋流器沉砂口直径由 35 mm 增大至 40 mm。

中矿再磨磨机的运行功率为 139 kW,电机安装功率为 210 kW,电机利用系数仅为 66%。目前磨机钢球充填率为 31%,而溢流型球磨机的钢球充填率最大可达 45%~50%。因此中矿再磨磨机的能力还有富余,可增加该磨机的给矿量,同时应提高钢球充填率,以保证在磨机处理量增加的情况下磨矿细度不变。采取的具体优化措施为将粗磨旋流器底流分给中矿再磨磨机的比例从当前的 8% 提高至 13%,同时将该磨机的钢球充填率由 31% 提高至 40%。

磨矿分级系统整体优化调整的参数如表 5 所示。

磨矿分级系统整体优化前后磨矿分级系统的运行效率对比如表 6 所示。通过采取表 5 中的优化措施,磨矿分级系统的处理能力提升至 44 t/h,并且优化后粗磨产品细度  $P_{80}$  从 85  $\mu\text{m}$  降至 80  $\mu\text{m}$ 。优化后明显提高了球磨机的磨矿效率。在增加流程处理量 25% 的情况下将粗磨比能耗从 11.09 kWh/t 降低至 9.94 kWh/t,并且磨矿产品细度从 86  $\mu\text{m}$  降低至 80  $\mu\text{m}$ ;将

表 5 磨矿分级系统整体优化调整参数

Table 5 Adjusted parameters of the grinding and classification system before and after optimization

设备	参数	优化前	优化后
细碎圆锥破碎机	排矿口尺寸/mm	10	7
球磨机 (粗磨)	新给矿量/( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	35	43.75
	给矿粒度 $F_{80}$ /mm	10	7
	粗磨旋流器底流给入比例/%	8	13
球磨机 (中矿再磨)	球磨机钢球充填率/%	31	40
	磨矿浓度/%	72.1	74.9
	沉砂口直径/mm	70	75
旋流器 (粗磨)	给料压力/MPa	0.087	0.108
	给矿浓度/%	47.5	49.3
	沉砂口直径/mm	35	40
旋流器 (中矿再磨)	给料压力/MPa	0.055	0.124
	给矿浓度/%	54.9	59.9

表 6 磨矿分级系统整体优化前后运行指标对比

Table 6 Comparison of the operating indices of the grinding and classification system before and after the optimization

设备名称	运行参数	优化前	优化后
	运行总功率/kW	388	391
球磨机 (粗磨)	新给矿量/( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	35	44
	磨矿比能耗/( $\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ )	11.09	8.94
	运行总功率/kW	139	159
球磨机 (中矿再磨)	新给矿量/( $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$ )	14	22
	磨矿比能耗/( $\text{kWh} \cdot \text{t}^{-1}$ )	9.93	7.23
	底流粒度 $P_{80}/\mu\text{m}$	269	274
旋流器 (粗磨)	溢流粒度 $P_{80}/\mu\text{m}$	86	80
	返砂比/%	247	288
	分级粒度 $d_{50}/\mu\text{m}$	111	104
	底流粒度 $P_{80}/\mu\text{m}$	230	226
旋流器 (中矿再磨)	溢流粒度 $P_{80}/\mu\text{m}$	90	91
	返砂比/%	311	362
	分级粒度 $d_{50}/\mu\text{m}$	78	75

中矿再磨比能耗从 9.93 kWh/t 降低至 7.23 kWh/t,并且中矿再磨细度基本保持不变。通过优化流程各工作参数,旋流器的分级效率也得到了明显的改善,粗磨旋流器的分级粒度由 111  $\mu\text{m}$  降低至 104  $\mu\text{m}$ ,中矿再磨旋流器的分级粒度由 78  $\mu\text{m}$  降低至 75  $\mu\text{m}$ 。优化后球磨机的排矿粒度变粗,旋流器的返砂比增加,减少了矿石的过磨。

## 5 结论

采用 JKSimMet 模拟软件对某金矿磨矿分级系统进行了多目标协同优化,采取的主要优化措施为:降低球磨机给矿粒度,增加中矿再磨球磨机钢球充填率,调整旋流器的沉砂口尺寸、给矿压力、给矿浓度,增加粗磨旋流器底流给入再磨球磨机的矿量等。模拟结果显示优化后磨矿分级系统的处理能力由 35 t/h 提升至 44 t/h,粗磨比能耗从 11.09 kWh/t 降低至 9.94 kWh/t,中矿再磨比能耗从 9.93 kWh/t 降低至 7.23 kWh/t,并且粗磨产品细度  $P_{80}$  从 86  $\mu\text{m}$  降至 80  $\mu\text{m}$ 。通过对磨矿分级系统中各工艺参数的协同优化,增加了磨矿分级系统的处理能力,降低了磨矿比能耗,并且提高了磨矿产品的质量,达到了选厂提产提质、节能降耗的目标,为类似矿山磨矿分级系统的优化提供了参考和借鉴。

## 参考文献:

- [1] 曹进成,冯安生,吕振福,等. 矿产资源开发利用水平评估方法研究[J]. 矿产保护与利用,2018(4):22-27.
- [2] La Nauze, R. D., Temos, J. Technologies for sustainable operation [C]. CMMI congress. Cairns Queensland, AusIMM, 2002: 27-34.
- [3] Curry, J. A., Ismay, et al. Mine operating costs and the potential impacts of energy and grinding[J]. Miner. Eng. 2014(56): 70-80.
- [4] 杨松荣,蒋仲亚,刘文拯. 碎磨工艺及应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2013.
- [5] 张锦瑞,唐伟. 选矿厂破碎磨矿节能降耗途径探讨[J]. 河北冶金,1998,5:104-107.
- [6] Morrison R. D., Richardson J. M. JKSimMet - a simulator for analysis, optimization and design of comminution circuits[C]. Mineral processing plant design, practice and control conference, SME, Vancouver, 2002, 442-460.
- [7] 张萌,于伟涛,姬建钢,等. JKSimMet 粉磨流程模拟软件的建模原理及其应用[J]. 矿山机械,2016,44(9):51-57.
- [8] 刘建远. 国外几个矿物加工流程模拟软件述评[J]. 国外金属矿选矿,2008,45(1):4-12.
- [9] Nageswararao, K. Further developments in the modelling and scale up of industrial hydrocyclones[D]. Australia: The University of Queensland, 1979.
- [10] 戚厚永. 大峪口磷选矿厂磨矿分级流程的评述[J]. 矿产保护与利用,2003(4):29-31.



# The Application of JKSimMet Software in the Multi – objective Collaborative Optimization of the Grinding and Classification System at a Gold Mine

GONG Daozhen<sup>1,2</sup>, WANG Peilong<sup>1,2</sup>, SUN Chunbao<sup>1,2</sup>, KOU Jue<sup>1,2</sup>, ZHANG Ruiyang<sup>1,2</sup>, HU Yang<sup>1,2</sup>

1. Key Laboratory of Ministry of Education of China for Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

**Abstract:** The grinding and classification system at a gold mine was optimized using JKSimMet software in order to increase the throughput and reduce the energy consumption of the concentrator. The optimization measures taken include reducing the feed size of the grinding circuit, adjusting the key process parameters of the ball mill and cyclone, and increasing the proportion from the coarse grinding circuit to the regrinding mill. The simulation results showed that some indicators had been improved after optimization. The processing capacity of the grinding classification system was increased from 35 t/h to 44 t/h. The specific energy consumption of the coarse grinding circuit reduced from 11.09 kWh/t to 9.94 kWh/t. The specific energy consumption of the middling regrinding circuit reduced from 9.93 kWh/t to 7.23 kWh/t, and the  $P_{80}$  of the coarse grinding product reduced from 86  $\mu\text{m}$  to 80  $\mu\text{m}$ . The multi – objective optimization of the grinding products which included the improvement of processing capacity of the grinding classification system as well as the quality of the grinding products and the reduction of grinding specific energy consumption were achieved by the collaborative optimization of various process parameters of the entire grinding and the classification system.

**Key words:** JKSimMet; grinding and classification; gold mine; multi – objective collaborative optimization

**引用格式:** 龚道振, 王培龙, 孙春宝, 寇珏, 张瑞洋, 胡阳. JK SimMet 模拟软件在某金矿磨矿分级系统多目标协同优化中的应用[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(1): 99 – 104.

Gong DZ, Wang PL, Sun CB, Kou J, Zhang RY and Hu Y. The application of JKSimMet software in the multi – objective collaborative optimization of the grinding and classification system at a gold mine[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(1): 99 – 104.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E – mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)