

# 选别物料平衡计算数学模型的探讨

肖云 王海臣  
(西部矿业股份有限公司)

**摘要** 经典的多金属矿石选矿流程平衡数学模型充分尊重了化验的精矿品位,忽视了调整后的原矿和尾矿品位的合理性。针对经典数学模型的不完善之处,进行了升级改造,新的数学模型兼顾了原、精、尾品位,对各产物的品位进行了更系统、更全面、更贴近实际的调整,因而调整的结果更科学、更合理、更可靠,能满足矿山选别指标调整的需要。

**关键词** 金属量平衡 选矿数学模型 选矿

## Discussion on the Mathematical Model of Material Mass Balance Calculation for Mineral Processing

Xiao Yun Wang Haichen  
(Western Mining Co., Ltd.)

**Abstract** The classic mathematical model of multi-metallic mass balance fully respected the concentrate grade in testing, but ignored the reasonability of adjusted raw ores' and tailings' grade. In view of these disadvantages, this classical mathematical model was upgraded and improved. The upgraded mathematical model takes into account the grade of raw ores, concentrates and tailings. The grade analysis of each product is more systematic and comprehensive, making it closer to the actual adjustment. So after adjustment, the results are more scientific, rational, reliable, which can meet the needs of the index adjustment for beneficiation.

**Keywords** Metal mass balance, Mathematical model of mineral processing, Beneficiation

选矿数质量流程平衡无论对选矿厂设计、选矿厂生产与质量管理都有重要的意义。影响选矿厂金属平衡的因素主要有产物的质量、水分、金属含量等。加强多金属矿选矿厂的金属平衡管理、缩小理论金属量与实际金属量统计计算差距,有利于提高选矿厂的工艺技术与生产管理水平和更好地指导生产实践,因此,建立适合选厂理论指标计算的数学模型就具有重要的意义。

### 1 经典选别物料平衡数学模型的结论要点<sup>[1]</sup>

设矿石所含金属数为  $N$ , 产品数为  $M$ , 实测金属品位数据见图 1。

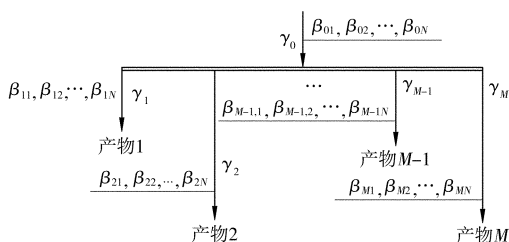


图1 选别作业及其化验品位数据

图中,  $\beta_{ji}$  为第  $j$  个产物第  $i$  个金属实测品位,  $\gamma_j$  为第  $j$  个产物的产率,  $j = 0$  表示流程给矿。其中,  $j = 0, 1, 2, \dots, M; i = 1, 2, \dots, N$ 。

#### 1.1 理论产率

假如化验品位数据没有误差,则金属平衡方程为

$$\gamma_0 \beta_{0i} - \sum_{j=1}^M \gamma_j \beta_{ji} = 0. \quad (1)$$

而实际测定的品位数据有误差。那么第  $i$  种金属量平衡的误差值应为

$$\Delta_i = \gamma_0 \beta_{0i} - \sum_{j=1}^M \gamma_j \beta_{ji}, \quad (2)$$

并令  $a_{ji} = \beta_{ji} - \beta_{Mi}$  ( $j = 0, 1, 2, \dots, M - 1; i = 1, 2, \dots, N$ ), 推算出的正规方程组的矩阵式为

肖云(1967—),男,西部矿业股份有限公司矿山事业部生产管理部,高级工程师,810001 青海省西宁市五四大街54号。

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N a_{1i}^2 & \sum_{i=1}^N a_{1i}a_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^N a_{1i}a_{(M-1)i} \\ \sum_{i=1}^N a_{2i}a_{1i} & \sum_{i=1}^N a_{2i}^2 & \cdots & \sum_{i=1}^N a_{2i}a_{(M-1)i} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^N a_{(M-1)i}a_{1i} & \sum_{i=1}^N a_{(M-1)i}a_{2i} & \cdots & \sum_{i=1}^N a_{(M-1)i}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{\gamma}_1 \\ \hat{\gamma}_2 \\ \vdots \\ \hat{\gamma}_{(M-1)i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^N a_{0i}a_{1i} \\ \sum_{i=1}^N a_{0i}a_{2i} \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N a_{0i}a_{(M-1)i} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

该系数矩阵为对称矩阵。

当  $M = 2$  时,正规方程组是一元线性方程,即

$$\hat{\gamma}_1 = \frac{\sum_{i=1}^N a_{0i}a_{1i}}{\sum_{i=1}^N a_{1i}^2}; \quad (4)$$

当  $M > 2$  时,正规方程是  $M - 1$  元线性方程组,用主元消去法求解,即可求得各产物理论产率值  $\hat{\gamma}_j$ 。

### 1.2 理论品位

基于实测品位数据有误差,需进一步调整,使其最有可能接近真值,即所求的理论品位值。

推算出的实测品位的理论值为

$$\hat{\beta}_{ji} = \beta_{ji} + \Delta\beta_{ji} = \beta_{ji} \mp \frac{\Delta_i \hat{\gamma}_j}{\sum_{j=0}^M \beta_{ji}^2 \hat{\gamma}_j}, \quad (5)$$

当  $j = 0$  时取负号,当  $j > 0$  时取正号。

### 1.3 理论回收率

由理论产率  $\hat{\gamma}_j$  和理论品位  $\hat{\beta}_{ji}$  计算的理论回收率  $\varepsilon_{ji}$  为

$$\varepsilon_{ji} = \frac{\hat{\beta}_{ji} \hat{\gamma}_j}{\hat{\beta}_{0i}}. \quad (6)$$

## 2 优化后的理论品位计算模型

原数学模型是以“品位修正量的平方和最小”为寻求目标的修正函数为基础推算出来的。为了使修正后的品位更接近真实值,优化的数学模型是以品位的修正量与化验品位的比值  $(\Delta\beta_{ji}/\beta_{ji})$  的平方和最小为寻求目标的函数,推算出来的实测品位的理论值为

$$\hat{\beta}_{ji} = \beta_{ji} + \Delta\beta_{ji} = \beta_{ji} \mp \frac{\beta_{ji}^2 \Delta_i \hat{\gamma}_j}{\sum_{j=0}^M \beta_{ji}^2 \hat{\gamma}_j}, \quad (7)$$

当  $j = 0$  时取负号,当  $j > 0$  时取正号。

## 3 优化前后数学模型的适用性对比

为了分析比较优化前后两种数学模型在多金属矿选矿的金属平衡中的科学性、准确性,笔者以 Visual Basic 软件为基础,分别编制了这 2 种模型的选矿生产指标计算器,见图 2,计算结果自动保存为 Excel 文件。模型的科学性、准确性与否,将通过两个生产实例作为判据加以判断。

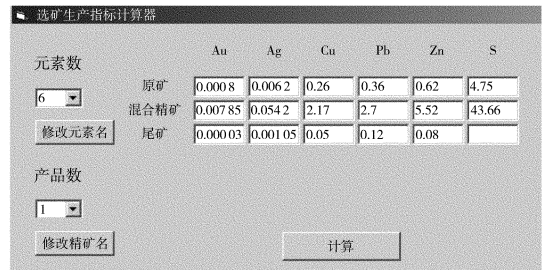


图 2 选矿生产指标计算器

(1) 生产实例 1。某铅锌矿,产品为铅锌混合精矿,由于矿石性质的原因,生产指标波动较大,用经典数学模型计算的结果见表 1,用优化后的数学模型计算的结果见表 2。

表 1 经典数学模型计算结果 %

产 品	产 率	化验品位		模型调整后品位		调整后回收率	
		Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
原 矿	100.00	2.60	10.25	4.37	9.30	100.00	100.00
混合精矿	21.88	20.67	36.87	20.28	37.08	101.62	87.22
尾 矿	78.12	1.29	0.78	-0.09	1.52	-1.62	12.78

表 2 优化后数学模型计算结果 %

产 品	产 率	化验品位		模型调整后品位		调整后回收率	
		Pb	Zn	Pb	Zn	Pb	Zn
原 矿	100.00	2.60	10.25	3.30	9.28	100.00	100.00
混合精矿	21.88	20.67	36.87	10.97	39.61	72.67	93.40
尾 矿	78.12	1.29	0.78	1.16	0.78	27.33	6.60

从表 1 和表 2 可以看出,两种数学模型均完成了 Pb, Zn 的质量平衡和它们对精矿产率指标的共享。经典数学模型充分尊重了化验取得的精矿品位,对精矿品位调整甚微,重点对原矿和尾矿品位进行了调整,但调整的结果却违背了客观实际,即将尾矿中铅的品位调整成了负值、混合精矿中铅的回收率超过了 100%,显然不符合客观实际,这是这种经典模型的致命弱点。新生成的数学模型兼顾了原

矿、精矿、尾矿的品位,对各产物的品位进行了更系统、更贴近实际的调整,因而调整结果更科学、更合理、更可靠,能满足该矿选别指标调整的需要。

(2)生产实例2。某含金银多金属矿,其主要产物及金属含量见表3,用经典数学模型计算的结果见表4,用优化后的数学模型计算的结果见表5。

表3 某含金银多金属矿产品化验结果 %

产 品	品 位					
	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	S
原 矿	0.000 8	0.006 2	0.26	0.36	0.62	4.75
混合精矿	0.007 85	0.054 2	2.17	2.7	5.52	43.66
尾 矿	0.000 03	0.001 05	0.05	0.12	0.08	0.22

表4 经典数学模型计算结果 %

产 品	产 率	调整品位						回 收 率					
		Au	Ag	Cu	Pb	Zn	S	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	S
原 矿	100.00	0.000 83	0.006 41	0.27	0.38	0.63	4.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
混合精矿	10.42	0.007 85	0.054 18	2.17	2.70	5.52	43.66	99.13	87.99	84.96	74.78	90.56	95.80
尾 矿	89.58	0.000 01	0.000 86	0.04	0.11	0.07	0.22	0.87	12.01	15.04	25.22	9.44	4.20

表5 优化后数学模型计算结果 %

产 品	产 率	调整品位						回 收 率					
		Au	Ag	Cu	Pb	Zn	S	Au	Ag	Cu	Pb	Zn	S
原 矿	100.00	0.000 82	0.006 41	0.27	0.38	0.63	4.75	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
混合精矿	10.42	0.007 63	0.052 54	2.13	2.60	5.40	43.69	96.73	85.40	83.23	71.88	88.73	95.85
尾 矿	89.58	0.000 03	0.001 04	0.05	0.12	0.08	0.22	3.27	14.60	16.77	28.12	11.27	4.15

从表3,表4和表5对照可以发现,两种数学模型都能很好地完成对 Au, Ag, Cu, Pb, Zn, S 的质量平衡和它们对精矿产率指标的共享,且对原矿、精矿、尾矿中 Cu, Pb, Zn, S 的品位的处理,两模型达到了高度的一致。本例中经典数学模型仍然充分体现了对化验取得的精矿品位的尊重,着重对原矿和尾矿品位进行了调整。但作为本矿石的主要有价金属 Au, Ag, 经典数学模型对尾矿中的品位调整幅度过大,即将尾矿中金、银的品位从化验值的 0.3 g/t 和 10.4 g/t 调整为 0.1 g/t 和 8.6 g/t, 导致混合精矿金、银的回收率与实际回收率偏差较大,这一结果再次证明了经典数学模型的局限性。

## 4 结 论

多金属矿的金属平衡对矿山的生产管理意义重大。通过对金属量平衡的经典数学模型中品位修正模块的升级,生成的新数学模型对各产物的品位进行了更系统、更全面、更贴近实际的调整,因而调整结果更科学、更合理、更可靠,能满足选别指标调整的需要。

## 参 考 文 献

- [1] 《选矿设计手册》编委会. 选矿设计手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1988.

(收稿日期 2010-08-02)

(上接第16页)

## 参 考 文 献

- [1] 张成良,杨绪祥,李 风,等. 大型采空区下持续开采空区稳定性研究[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(8):117-120.  
 [2] 张安兵,高井祥,张兆江,等. 老采空区地表沉降混沌特征及时变规律研究[J]. 中国矿业大学学报,2009,38(2):170-174.  
 [3] 付士根,李全明,王云海,等. 采空区对地表建筑物的影响评价方法研究[J]. 中国安全科学学报,2007,17(8):143-147.

- [4] 瞿群迪,姚强岭,李学华. 充填开采控制地表沉降的空隙量守恒理论及应用研究[J]. 湖南科技大学学报,2010,25(1):8-12.

- [5] 郭广礼. 老采空区上方建筑地基变形机理及其控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2001.

- [6] 王清来,许振华,朱利平,等. 复杂采空区条件下残矿回收与采区稳定性的有限元数值模拟研究[J]. 金属矿山,2010(7):37-40.

(收稿日期 2010-08-19)