

李昱昀,徐盛,程先明,等.硫酸镁亚型盐湖卤水生产硫酸钾工艺计算模型[J].盐湖研究,2024,32(6):32-40.

Li Y Y, Xu S, Cheng X M, et al. Calculation model of potassium sulfate production process from magnesium sulfate subtype salt lake brine[J]. Journal of Salt Lake Research, 2024, 32(6): 32-40.

DOI: 10.3724/j.ahy.2024034

CSTR: 32273.14.j.ahy.2024034

硫酸镁亚型盐湖卤水生产硫酸钾工艺计算模型

李昱昀*, 徐盛, 程先明, 曹伟, 杨三妹

(中蓝长化工程科技有限公司, 湖南 长沙 410116)

摘要:文章利用 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} — H_2O 五元介稳相图水盐体系理论数据和类似项目采集的工艺数据,基于物料平衡原理,建立了一种由硫酸镁亚型盐湖卤水生产硫酸钾全流程物料平衡的计算模型,并以我国西部某盐湖卤水生产硫酸钾为应用对象,证明该计算模型设计合理,简单明了,可操作性强。

关键词:计算模型;硫酸镁亚型;硫酸钾

中图分类号: TQ131.13

文献标志码: A

文章编号: 1008-858X(2024)06-0032-09

硫酸钾作为一种化工原料,主要用于制造钾明矾、钾水玻璃、碳酸钾等。作为肥料,硫酸钾是一种不含氯的优质钾肥,主要用在一些忌氯经济作物,如西瓜、茶叶、烟草、柑橘、葡萄等,使用硫酸钾可以改善其内在品质,如烟草,可提高其可燃性;葡萄、柑橘、西瓜,可提高其糖度等^[1]。

硫酸钾的生产在很大程度上依赖于钾矿资源,根据钾资源赋存形式,硫酸钾的生产方法可分为以下三类。一是从天然矿物(如钾镁矾、明矾石、杂卤石、钾芒硝等)中直接提取;二是转化法,以氯化钾、硫酸、含硫酸根的物质(如芒硝、硫酸铵、硫酸钙、硫酸镁等)为原料;三是复分解法,以硫酸盐型盐湖卤水为原料提取硫酸钾,如新疆罗布泊盐湖^[2,3]。其中盐湖卤水生产硫酸钾生产成本低、钾回收率高,目前,国内硫酸钾主要来源于硫酸镁亚型盐湖卤水生产。不同地理位置的硫酸镁亚型盐湖,卤水组成有所差别,但硫酸钾生产工艺大同小异,工艺主要流程如下:将采出的含钾卤水经盐田日晒分级结晶析出氯化钠和泻利盐后,再继续蒸发晒出钾混盐和光卤石,然后将这两种盐田矿在选矿厂分解转化—浮选得到软钾镁矾精矿和氯化钾精矿,最后将软钾镁矾和氯化钾精矿混合加水转化结晶得到硫酸钾产品^[4,5]。

盐湖卤水生产硫酸钾工艺,工艺流程长,工艺较复杂,涉及盐田分级摊晒、软钾镁矾浮选、氯化钾浮选、硫酸钾复分解转化等工段。在做工艺计算时,涉及的物料参数和工艺过程多,计算工作量大,特别是

物料闭路循环的计算,如兑卤工艺、软钾镁矾和氯化钾浮选母液的返回、硫酸钾转化母液的返回等,计算过程复杂,一般的计算过程是化工专业提供初始计算结果给选矿专业,选矿专业根据提资再把计算结果返给化工专业,依此类推,一般至少3次循环(循环次数越多,计算偏差越小),往往需要花费大量的时间和精力,严重影响着研究、设计的进度,给研究和设计者及生产管理者带来诸多困难。我国盐湖钾资源的开发已相当成熟,大规模生产硫酸钾技术已达到世界领先水平,查询国内外相关技术资料,盐田蒸发方面的相关计算模型有少量报道^[6,7],但对于用卤水盐田法生产硫酸钾闭路计算软件或计算模型均未见报道。针对该类型盐湖卤水生产硫酸钾工艺的计算,本文从实际应用出发,以我国西部某盐湖卤水为对象,结合已有的工艺参数和工程经验,设计开发了一种以硫酸镁亚型盐湖卤水生产硫酸钾全流程物料平衡的计算模型,该计算模型很好地解决了工艺计算过程中物料闭路循环计算复杂,工作量大,系统物料难平衡的棘手问题。

1 确定工艺路线

1.1 原卤组成

本文以我国西部某盐湖卤水为研究对象,该原料卤水组成如表1所示。

收稿日期:2023-08-04;修回日期:2023-10-18

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B01041)

(通信)作者简介:李昱昀(1979—),男,硕士,注册化工工程师,高级工程师,主要从事化工设计和研发工作。Email:lyyysm@163.com。

表1 原料卤水组成及J值

Table 1 Composition and phase diagram index J of raw brine

项目	组成						备注
	2K ⁺	Mg ²⁺	2Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	2Na ⁺	H ₂ O	
组成/(wt%)	0.73	3.20	13.15	7.62	5.69	69.61	其他组成忽略不计
J(2K ⁺ +Mg ²⁺ +SO ₄ ²⁻ =100 mol)	4.258	59.74	36.00	56.2	—	1 754.5	S ₀

1.2 盐田工艺

根据矿区的当地气象资料,主蒸发期为每年4—10月,平均气温为14.7℃,因此,该盐湖卤水盐田蒸发采用15℃Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻、SO₄²⁻—H₂O五元介稳水盐体系相图^[8]作为计算理论基础。

将原卤组成耶涅克指数J值标于15℃五元相图干基图中,原卤组成系统点落在干盐相图白钠镁矾相区内S₀点。随着卤水蒸发浓缩,析出矿物顺序依次为氯化钠(NaCl)、白钠镁矾混盐(NaCl+Na₂SO₄·MgSO₄·4H₂O)、泻利盐混盐(NaCl+MgSO₄·7H₂O)、钾混盐(NaCl+KCl+MgSO₄·7H₂O)、光卤石混盐(NaCl+MgSO₄·7H₂O+KCl·MgCl₂·6H₂O)、水氯镁石混盐(NaCl+MgSO₄·7H₂O+MgCl₂·6H₂O)。为提高析出的钾混盐矿钾品位,同时保证钾混盐硫酸根与钾离子含量配比达到转化—浮选软钾镁矾理想的工艺要求,通过兑卤(析钠后的卤水掺兑老卤)调整卤水组成点,缩短泻利盐阶段蒸发路线,同时将部分泻利盐阶段并入到钾混盐阶段。因此,卤水蒸发过程可划分为氯

化钠阶段、泻利盐阶段、钾混盐阶段、光卤石阶段,最终形成富含硼、锂的老卤,卤水蒸发结晶路线如图1中S₀(S₁)-A-B-F-E。

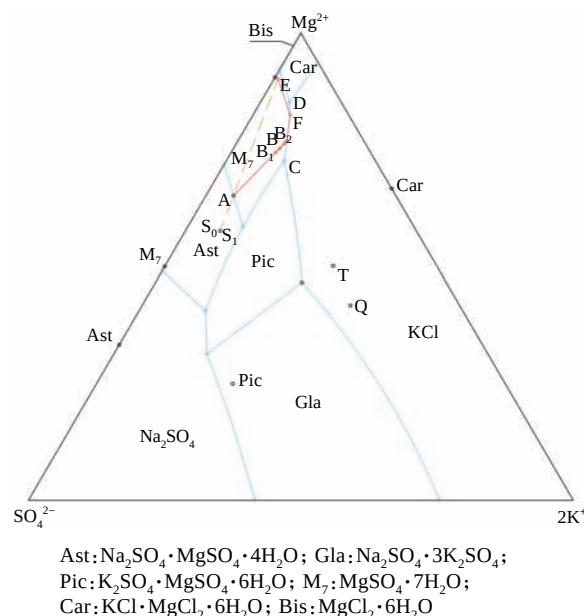


图1 15℃卤水蒸发结晶路线

Fig. 1 15 °C brine evaporation crystallization route

根据卤水蒸发过程中矿物成分分析出的先后顺序,盐田的布局被划分为氯化钠盐田、泻利盐盐田、钾混盐盐田、光卤石盐田以及最终形成的老卤池。钾混盐盐田和光卤石盐田产出的钾混盐矿和光卤石矿分别采收运送至钾肥浮选生产车间生产软钾镁矾和氯化钾。其盐田走水工艺流程如图2。

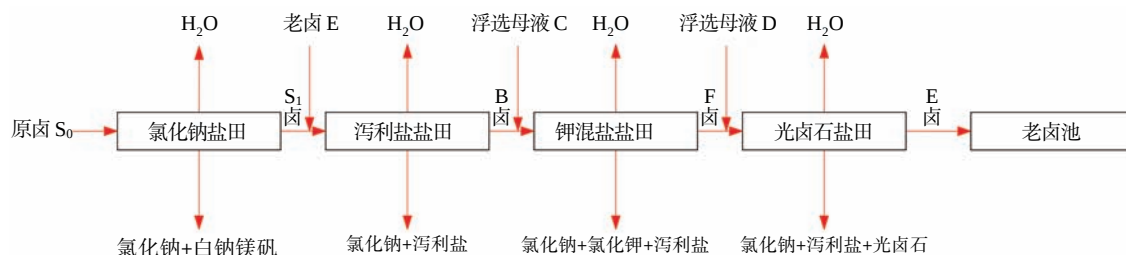


图2 盐田走水工艺流程

Fig. 2 Salt field process flow

1.3 加工工艺

首先分别通过软钾镁矾浮选装置和氯化钾浮选装置生产软钾镁矾精矿和氯化钾精矿,然后将这两种精矿按比例混合后形成混钾精矿,再通过转化结晶方式生产硫酸钾产品^[9]。在硫酸钾实际生产过程中,软钾镁矾精矿和氯化钾精矿可能存在不匹配的问题,根据卤水资源组分情况,最终的产品都可进行调整。如氯化钾精矿有富余,通过再浆洗涤过滤生

产氯化钾产品,如软钾镁矾精矿有富余,通过分解转化生产硫酸钾产品或再浆洗涤生产钾镁肥。下面为以氯化钾富余为例,介绍浮选加工工艺流程,如图3。

整套工艺装置主要由软钾镁矾浮选系统、氯化钾浮选系统、硫酸钾系统、氯化钾(氯化钾富余)系统构成,简述如下。

(1) 软钾镁矾浮选系统:将钾混盐矿倒入料仓,经破碎、磨矿后料浆倒入转化槽,转化后进行浮选

元水盐体系介稳相图作为计算理论基础。

(2) 年蒸发量

该矿区年淡水蒸发量为 2 970 mm, 年降水量为 20 mm, 年净蒸发量为 2 950 mm。

(3) 渗漏系数

根据该地区类似盐湖卤水蒸发盐田运行结果, 氯化钠盐田渗漏系数取 0.70 mm/d, 泻利盐盐田渗漏系数取 0.60 mm/d, 钾混盐盐田渗漏系数取 0.40 mm/d, 光卤石盐田渗漏系数取 0.30 mm/d。

(4) 比蒸发系数

根据该地区类似盐湖卤水蒸发盐田运行结果, 氯化钠盐田比蒸发系数取 0.60, 泻利盐盐田比蒸发系数取 0.45, 钾混盐盐田比蒸发系数取 0.35, 光卤石盐田比蒸发系数取 0.30, 大面积盐田校正系数取 0.70。

(5) 盐田工作制度

氯化钠盐田、泻利盐盐田蒸发作业时间均按 365 d/a 计; 钾混盐盐田(旱采)、光卤石盐田(旱采)蒸发作业时间均按 270 d/a 计, 控卤和采收作业时间按 95 d/a 计, 采收作业安排在冬季进行。

(6) 盐田矿物母液夹带

氯化钠盐田、泻利盐盐田析出的矿物母液夹带按 25.0% 计(不考虑采收), 钾混盐盐田析出的矿物母液夹带按 15% 计(旱采), 光卤石盐田析出的矿物母液夹带按 20.0% 计(旱采)。

(7) 其他

钾混盐盐田、光卤石盐田采收及运输过程矿物

损失率按 2.0% 计。

3.2 加工厂输入参数

(1) 浮选精矿

软钾镁矾浮选精矿和氯化钾浮选精矿母液夹带均按 15% 计。

(2) 浮选尾矿

软钾镁矾浮选尾矿和氯化钾浮选尾矿母液夹带均按 15% 计。

(3) 干燥包装收率

硫酸钾、氯化钾干燥包装收率均按 99% 计。

3.3 说明

上述输入参数可根据不同项目的实际参数进行修改。

4 建立盐田工艺计算模型

模型建立的主要依据为盐田蒸发每个阶段物料平衡, 采用 15 °C Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} // Cl^- 、 SO_4^{2-} — H_2O 五元水盐体系介稳相图作为理论基础, 并结合类似项目的相关生产数据或经验数据, 通过盐田的进卤量、进卤组成、出卤组成、蒸发水量、析盐组成和渗漏量之间的平衡关系, 求解该盐田实际出卤量、析矿量及盐田面积等参数。其计算模型如表 2、表 3、表 4 和图 5 所示。

表 2 盐田工艺计算模型部分
Table 2 Part of the salt field process calculation model

阶段	卤水 质量/t	析盐 质量/t	蒸发 水量/t	相对 比重	组成/(wt%)					J(2K ⁺ +Mg ²⁺ +SO ₄ ²⁻ =100 mol)					相图点	
					2K ⁺	Mg ²⁺	2Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	2Na ⁺	H ₂ O	2K ⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	2Na ⁺		H ₂ O
原卤	10 000			1.26	0.73	3.20	13.15	7.62	5.69	69.61	4.258	59.74	36.00	56.2	1 754.5	S ₀
氯化钠 阶段	10 000			1.26	0.73	3.20	13.15	7.62	5.69	69.61	4.258	59.74	36.00	56.2	1 754.5	S ₀
	6 778	1 303	1 919	1.27	0.26	3.33	29.66	20.08	22.40	24.27	0.945	39.21	59.85	139.5	385.8	
泻利盐 盐田	6 549			1.27	1.01	4.19	13.92	7.27	3.98	69.62	4.944	66.08	28.97	33.1	1 480.0	A
	3 052	1 764	1 733	1.30	0.47	5.95	21.75	19.16	11.74	40.91	1.344	54.37	44.29	56.7	504.3	
钾混盐 阶段	3 042			1.30	1.96	5.41	17.07	4.61	1.88	69.07	8.491	75.29	16.22	13.8	1 296.0	B
	2 234	357	451	1.31	5.98	5.51	25.08	18.45	11.15	33.83	15.427	45.80	38.77	48.9	379.1	
Car阶段	2 665			1.31	1.39	6.93	19.74	3.08	0.32	68.54	5.306	85.12	9.57	2.1	1 135.9	F
	1 732	487	446	1.32	9.40	7.24	32.85	7.01	5.44	38.06	24.474	60.67	14.86	24.1	430.4	
Bis阶段				1.32	0.21	8.27	21.99	3.31	0.08	66.15	0.727	90.15	9.12	0.4	973.0	E

表 3 盐田工艺计算模型部分
Table 3 Part of the salt field process calculation model

序号	月份	NaCl 阶段	M7 阶段	Pic 阶段	Car 阶段
1	年淡水蒸发量/mm	2 950.0	2 950.0	2 950.0	2 950.0
2	天卤水蒸发量/t	5.13	4.56	1.64	1.618
3	天有用蒸发量/t	4.94	4.17	1.60	1.57
4	实际进卤量/m ³	21.71	14.11	8.68	7.53
	总量/m ³	1.06	1.08	0.33	0.29
	总量/t	1.34	1.38	0.43	0.38
	原卤总量/t	0.67	0.68	0.22	0.19
5	渗漏量/天	0.67	0.70	0.22	0.19
	A1 卤总量/t	0.129	0.404	0.035	0.053
	渗漏析盐/t	0.19	0.397	0.04	0.05
	W _{H₂O} /m ³				
6	因渗漏而应补充的卤量/(t/天)	1.66	2.18	0.51	0.48
7	实际可晒成品的卤量/(t/天)	25.72	15.74	10.77	9.38
	形成 A1 卤水/t	6 368	2 681	2 133	1 647.6
	累计形成 A1 卤水/t				
8	有用卤水	1 224.4	1 549.5	341.0	463.8
	可析出盐量/t	1 802.7	1 521.7	430.5	424.2
	蒸发水量/t				
9	本年析盐总量/t	1 271.6	1 697.0	350.3	478.2
10	厚度/cm(析出时的堆集密度取 1.5)	56.1	63.1	28.2	38.5
11	盐田累计结盐厚度/cm	56.1	63.1	28.2	38.5

表 4 盐田工艺计算模型部分
Table 4 Part of the salt field process calculation model

NaCl 阶段	基本 参数	盐田面积/m ²	1 509.9	S ₀ 原卤比重	1.261	比蒸发系数	0.60	S0 卤	100	A 卤成卤率	67.78			
		渗漏系数/(mm/d)	0.70	A 卤比重	1.270	大面积系数	0.70	析盐率	13.03	蒸失水率	19.19			
		原卤 S ₀ 组成/(wt%)	2Na ⁺	5.690	2K ⁺	0.734	Mg ²⁺	3.20	SO ₄ ²⁻	7.618	2Cl ⁻	13.147	H ₂ O	69.61
		S ₁ 卤水组成/(wt%)	2Na ⁺	3.979	2K ⁺	1.010	Mg ²⁺	4.194	SO ₄ ²⁻	7.270	2Cl ⁻	13.923	H ₂ O	69.61
泻利盐 阶段	基本 参数	盐田面积/m ²	1 791.9	A 比重	1.270	比蒸发系数	0.45	A 卤	100	B 卤成卤率	46.60			
		渗漏系数/(mm/d)	0.60	B 卤比重	1.300	大面积系数	0.70	析盐率	26.94	蒸失水率	26.46			
		a 卤组成/(wt%)	2Na ⁺	3.979	2K ⁺	1.010	Mg ²⁺	4.19	SO ₄ ²⁻	7.270	2Cl ⁻	13.923	H ₂ O	69.61
		b 点卤水组成/(wt%)	2Na ⁺	1.877	2K ⁺	1.965	Mg ²⁺	13.923	SO ₄ ²⁻	7.270	2Cl ⁻	3.979	H ₂ O	69.62
钾混盐 阶段	基本 参数	盐田面积/m ²	828.5	B 卤比重	1.300	比蒸发系数	0.35	B 卤	100	F 卤成卤率	73.44			
		渗漏系数/(mm/d)	0.40	F 卤比重	1.310	大面积系数	0.70	析盐率	11.74	蒸失水率	14.82			
		b 卤组成/(wt%)	2Na ⁺	1.877	2K ⁺	1.965	Mg ²⁺	5.413	SO ₄ ²⁻	4.612	2Cl ⁻	17.07	H ₂ O	69.07
		d 卤水组成/(wt%)	2Na ⁺	0.320	2K ⁺	1.390	Mg ²⁺	6.930	SO ₄ ²⁻	3.080	2Cl ⁻	19.74	H ₂ O	68.54
Car阶段	基本 参数	盐田面积/m ²	953.4	F 卤比重	1.310	比蒸发系数	0.30	F 卤	100	E 卤成卤率	64.98			
		渗漏系数/(mm/d)	0.30	E 卤比重	1.320	大面积系数	0.70	析盐率	18.29	蒸失水率	16.73			
		b 卤组成/(wt%)	2Na ⁺	0.320	2K ⁺	1.390	Mg ²⁺	6.930	SO ₄ ²⁻	3.080	2Cl ⁻	19.74	H ₂ O	68.54
		d 卤水组成/(wt%)	2Na ⁺	0.076	2K ⁺	0.215	Mg ²⁺	8.269	SO ₄ ²⁻	3.308	2Cl ⁻	21.99	H ₂ O	66.15

5 建立加工厂计算模型

模型建立的主要依据为每个工段物料平衡,采用 15 ℃和 25 ℃的 Na⁺、K⁺、Mg²⁺//Cl⁻、SO₄²⁻—H₂O 五元水盐体系介稳相图^[10]和 55 ℃ K⁺、Mg²⁺//Cl⁻、

SO₄²⁻—H₂O 四元水盐体系相图^[11]作为理论指导,并结合类似项目的相关生产数据或经验数据,通过某装置的进料量、进料组成、出料组成等之间的平衡关系,求解出物料量及固液相组成等参数,其计算模型如表 5 和图 6 所示。

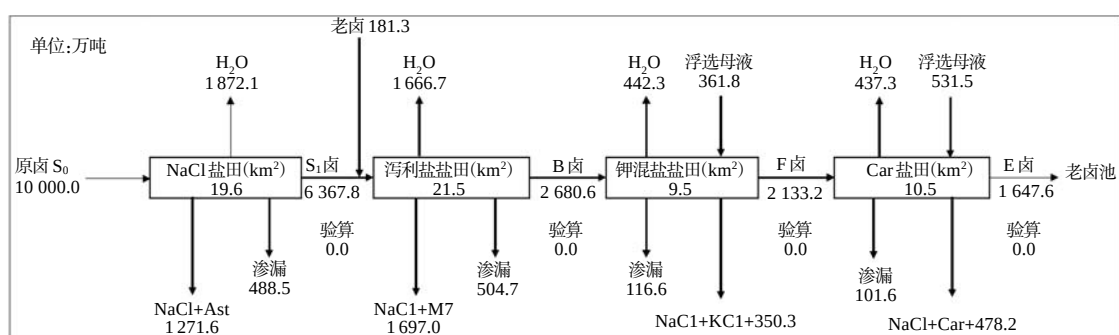


图5 盐田工艺计算模型部分

Fig. 5 Part of the salt field process calculation model

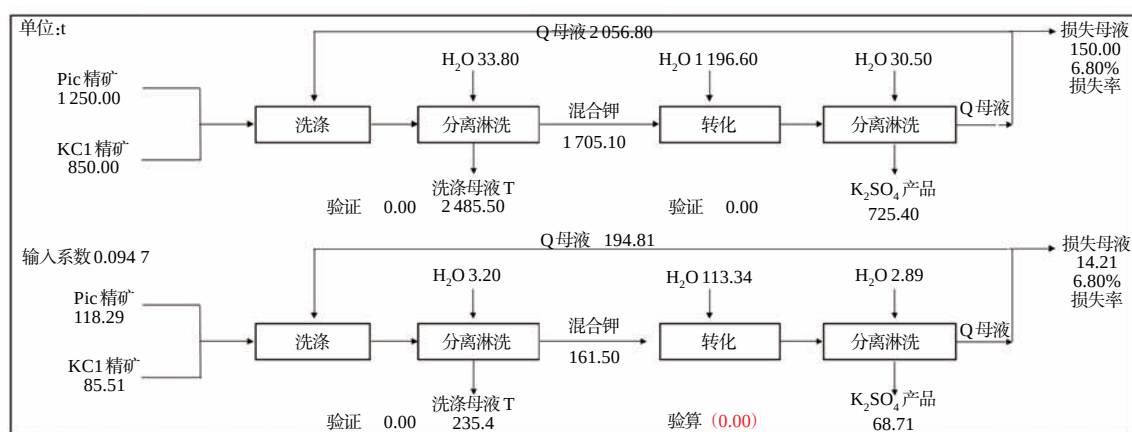


图6 硫酸钾合成工艺计算模型

Fig. 6 Calculation model of potassium sulfate synthesis process

6 建立平衡连锁关系

(1) 把盐田的基础参数输入盐田计算模型中,并与表6盐田物料平衡数据建立关联,计算得到的数据再与工艺流程图4关联。

(2) 软钾镁矾浮选、氯化钾浮选工艺物料平衡采用理论和经验数据输入,利用多元一次矩阵方程两次求解,求解得到的数据与工艺流程图4建立关联。

(3) 硫酸钾合成工艺流程图6物料平衡采用经验数据输入(或相图理论数据或实验数据),根据工艺流程图4数据求解,求解后的数据与表6建立关联。

(4) 工艺流程7物料平衡中浮选母液C和浮选母液D数据与表2计算数据通过迭代法使得两者数据一致。首先根据理论值假定C和D数据作为初始值,根据两者数据关联函数的收敛性,通过多次迭代使浮选母液C和浮选母液D数据与图4数据差值逼近零,实现物料循环闭路计算结果“归零”。

(5) 根据表2计算的矿物组成情况特别是钾混

盐组成情况,通过内插法调整B点组成来调整析出矿物组成。

(6) 当钾混盐矿物和光卤石矿物组成满足要求后,再对母液C和母液D数据进行修正,使图7和表4中两者数据一致。

盐田与加工厂物料平衡连锁关系如表6所示,表中数值单位均为吨。

7 输出结果

图7为计算模型输出结果,包括各级盐田面积、各工段物料平衡数据及各工段之间的联络关系,其每个工段进出物料平衡,整个系统物料闭路循环计算实现“归零”,计算误差基本为零。

在原卤组成变化不大的情况下,针对不同生产规模的工艺计算,通过该计算模型,输入原卤量即可得到相应的计算结果。当原卤组成变化较大(白钠镁矾或泻利盐相区)时,输入相应的蒸发结晶数据(相图理论数据或实验数据)即可得到相应的计算结果。

表 5 浮选加工工艺计算模型
Table 5 Calculation model of flotation processing technology

一、盐田矿物		析出盐质量/t						
矿物名称	母液夹带	NaCl	Ast/M7	M6	KCl	Car	总量	
NaCl 矿	0	563.69	413.77				977.47	
泻利盐矿	0	565.51	910.59				1 476.10	
钾混盐矿	0	145.57	239.12		56.63		441.32	
光卤石矿	0	104.79		114.71	42.84	345.68	608.02	
		组成/(wt%)						
矿物名称	母液夹带	K ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	H ₂ O	合计
NaCl 矿	0	0.000 0	0.030 8	0.349 8	0.243 2	0.285 1	0.091 2	1.00
泻利盐矿	0	0.000 0	0.060 8	0.232 4	0.240 5	0.150 7	0.315 6	1.00
钾混盐矿	0	0.067 3	0.053 4	0.261 1	0.211 2	0.129 8	0.277 2	1.00
光卤石矿	0	0.116 9	0.069 8	0.355 7	0.079 3	0.067 8	0.310 4	1.00
		组成/(wt%)						
矿物名称	母液夹带	K ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	H ₂ O	合计
NaCl 矿	0.25	0.002 2	0.031 1	0.291 3	0.205 1	0.224 8	0.245 5	1.00
泻利盐矿	0.25	0.004 7	0.059 5	0.217 5	0.191 6	0.117 4	0.409 1	1.00
钾混盐矿	0.15	0.059 8	0.055 1	0.250 8	0.184 5	0.111 5	0.338 3	1.00
光卤石矿	0.20	0.094 0	0.072 4	0.328 5	0.070 1	0.054 4	0.380 6	1.00

二、软钾镁矾浮选		组成							母液名称 A B F E
名称	单位	K ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	H ₂ O	合计	
钾混盐矿	t	20.52	18.93	86.10	63.35	38.26	116.15	343.32	
母液 T	t	9.61	4.85	24.06	7.26	4.13	132.60	182.51	
合计	t	30.13	23.78	110.17	70.61	42.40	248.74	525.83	
		组成							
钾混盐矿分解	单位	NaCl	Pic	M7	KCl	合计			
分解固体	t	79.14	103.10			182.24			
	t	4.75	95.89			100.63			
Pic 浮选精矿	wt%	4.72	95.28			100.00			
	t	74.39	7.22			81.61			
Pic 浮选尾矿	wt%	91.16	8.84			100.00			
		组成/(wt%)							
名称	夹带母液	K ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	H ₂ O	合计	
Pic 浮选精矿	0	18.5	5.8	2.9	45.5	1.9	25.6	100.0	
Pic 浮选尾矿	0	1.7	0.5	55.3	4.2	35.9	2.4	100.0	
Pic 浮选精矿	0.15	16.1	5.5	4.7	39.4	2.0	32.2	100.0	
Pic 浮选尾矿	0.15	1.8	1.1	49.3	4.4	30.9	12.5	100.0	

三、氯化钾浮选		组成						
名称	单位	K ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	H ₂ O	合计
光卤石矿	t	44.04	33.92	153.94	32.84	25.49	178.36	468.59
母液 T	t	2.79	1.40	6.98	2.10	1.20	38.44	52.90
合计	t	46.82	35.33	160.92	34.95	26.69	216.80	521.50
		组成						
光卤石矿分解	单位	NaCl	KCl	M7	Pic	合计		
分解固体	t	38.42	67.56	47.35		153.3		
	t	4.61	64.52	9.47		78.6		
KCl 浮选精矿	wt%	5.87	82.09	12.05		100.0		
	t	33.81	3.04	37.88		74.7		
KCl 浮选尾矿	wt%	45.24	4.07	50.69		100.0		
		组成/(wt%)						
名称	夹带母液	K ⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	H ₂ O	合计
KCl 浮选精矿	0	43.046	1.188	42.598	4.697	2.307	6.164	100.0
KCl 浮选尾矿	0	2.133	4.998	29.378	19.760	17.798	25.934	100.0
KCl 浮洗精矿	0.15	36.883	1.800	38.926	4.417	2.257	15.717	100.0
KCl 浮选尾矿	0.15	2.107	5.038	27.689	17.220	15.423	32.521	100.0

表6 平衡连锁关系
Table 6 Balanced chain relationship

工段	方程	进项		出项				
NaCl+Ast		原卤 S ₀		蒸发水	NaCl	Ast	母液 A	
阶段蒸发	方程 1	10 000.00		1 918.79	563.69	413.77	7 103.74	
兑卤+M7		卤水 S ₁	老卤 E	蒸发水	NaCl	Ast	母液 A	
阶段蒸发	方程 2	7 103.74	-202.24	1 932.93	565.51	910.59	3 896.95	
钾混盐		母液 B	Pic 浮选母液 C	蒸发水	NaCl	M7	KCl	母液 F
阶段蒸发	方程 4	3 896.95	526.01	655.47	145.57	239.12	56.63	3 326.18
		母液 F		蒸发水	NaCl	M6	KCl	母液 D
	方程 5(1)	3 326.18		165.09	38.53	39.71	28.15	3 054.70
光卤石		KCl 浮选母液		蒸发水	NaCl	M6	KCl	母液 D
阶段蒸发	方程 5(3)	828.88		153.55	36.54	10.92	14.70	613.19
		母液 D		蒸发水	NaCl	M6	Car	母液 E
	方程 5(2)	3 939.36		647.93	29.72	64.09	345.68	2 851.95
		母液 F	KCl 浮选母液	蒸发水	NaCl	M6	Car	母液 E
	合计	3 326.18	828.88	966.56	104.79	114.71	345.68	2 851.95
		3 326.18						42.84
Pic 浮选		钾混盐矿	母液 T	加水	NaCl		Pic	浮选母液 C
(计算精尾矿组成)	方程 6	343.32	-182.51	-61.59	79.14		103.10	405.18
钾混盐浮选		钾混盐矿	母液 T	加水	Pic 尾矿		Pic 精矿	浮选母液 C
	方程 7	343.32	-182.51	-61.59	96.01		118.39	373.02
KCl 浮选		光卤石矿	母液 T	加水	NaCl	M7	KCl	浮选母液 D
(计算精尾矿组成)	方程 8	468.59	0.00	-237.05	36.25	43.34	62.96	563.09
KCl 浮选		光卤石矿	母液 T	加水	KCl 尾矿		KCl 精矿	浮选母液 D
	方程 9	468.59	0.00	-237.05	81.65		86.05	537.94

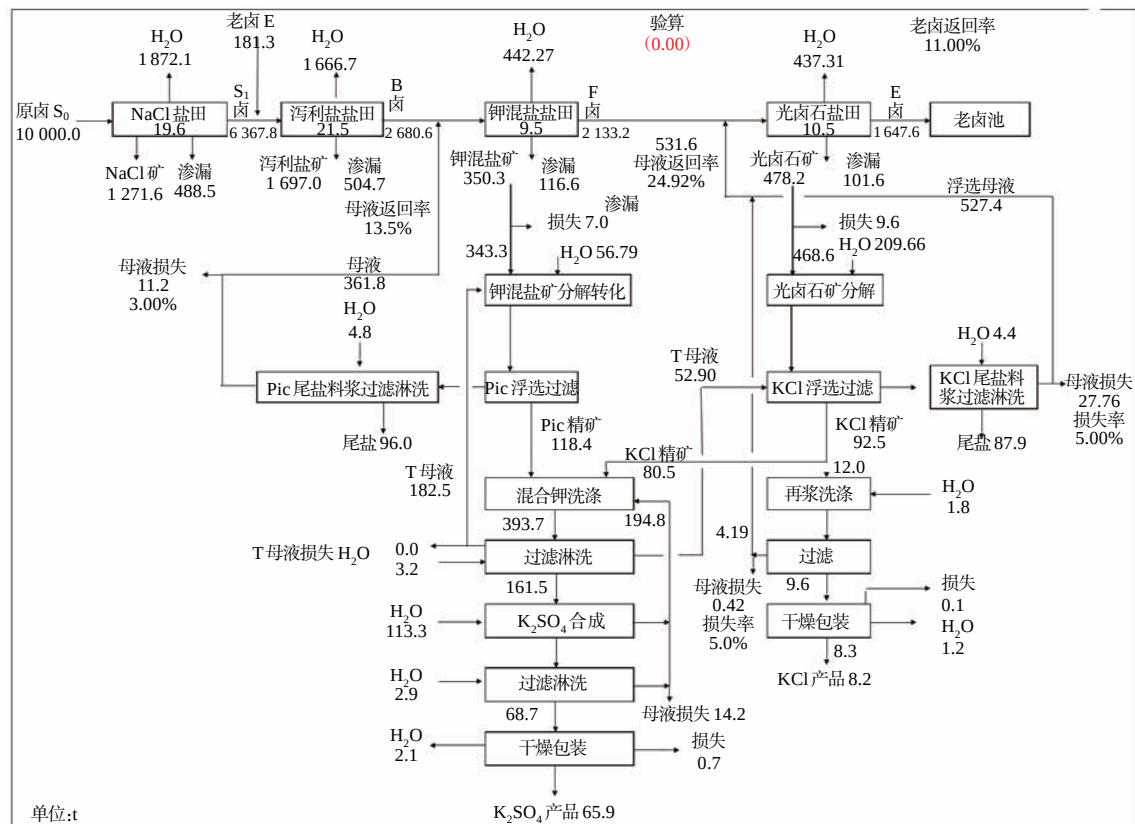


图7 模型计算结果输出

Fig. 7 Output of model calculation results

针对不同区域的硫酸镁亚型盐湖,还需要根据当地的气候条件如气温、淡水年净蒸发量、盐田防渗要求等对模型中的参数进行调整。比如温度,需要根据不同温度相图数据调整模型中相应的理论数据。比如淡水年净蒸发量和盐田防渗要求不同,需要对年蒸发量、渗漏系数等输入参数作相应的调整。

不同的生产企业,在生产工艺或设备选型上可能存在差别,比如盐田矿物采收方式有水采或旱采,采收方式不同,采收的盐田矿物母液夹带不同,则需根据类似生产经验对数据进行修正。比如采用不同的固液分离设备,其母液夹带也存在差别等等。

因此,针对不同类型的项目,应当根据项目具体情况调整计算模型中的相关参数,以确保模型计算结果更加符合项目实际。

8 结 论

该计算模型简化了系统物料循环计算复杂过程,模型结构设计直观合理,其无穷次物料闭路循环计算结果“归零”。建立后的模型操作简单、高效,只需手动输入很少的参变量,例如盐田大面积校正系数、盐田渗漏系数、比蒸发系数、母液夹带、固液相组成等参数,就可以得到相应的计算结果,包括工艺参数和系统物料平衡等。该模型灵活,易变通,在实际生产操作过程中,可根据实际的生产数据对计算模型中的参数进行修改或调整,也可以根据实际生产情况调整或增减计算模型中工艺流程的物料平衡关系,使计算模型与实际生产情况更加吻合。还可以在工艺允许的条件下,调整相应的工艺控制参数,如兑卤量、导卤点来调整产品方案。

该计算模型相对全面,涵盖了盐田工艺、钾盐浮选工艺和硫酸钾合成工艺内容。该计算模型快速便捷,通过该计算模型能够快速有效地获得盐田面积、物料组成、物料平衡、控制参数等,很大程度地提高了工作效率。该计算模型不仅可应用于项目的前期决策、试验研究、方案设计、方案优化及施工图设计阶段,而且对生产企业的生产管理、生产过程的工艺分析诊断、工艺优化、生产考核及生产前景预测都有很好的分析引导作用。

参考文献

- [1] 程怀德,马海州.中国硫酸盐型盐湖资源及无氯钾肥开发展望[J].无机盐工业,2008,40(3):8-10.
- [2] 何红丽.我国硫酸钾工业的现状与未来发展展望[J].盐湖研究,2002,10(3):61-71.
- [3] 宋彭生.盐湖及相关资源开发利用进展(续一)[J].盐湖研究,2000,8(2):33-58.
- [4] 李浩,唐中凡,尹新斌,等.利用罗布泊盐湖卤水制取硫酸钾工艺试验研究[J].盐业与化工,2008,37(2):9-12.
- [5] 李浩,唐中凡,刘传福,等.新疆罗布泊盐湖卤水资源综合开发研究[J].地球化学,2008,29(4):517-524.
- [6] 王石军.察尔汗盐湖盐田卤水管理的数学方法探讨[J].化工矿山技,1998,(1):56-60.
- [7] 田红斌.察尔汗盐湖卤水相图数学模型的建立及应用[J].盐业与化工,2002,(6):28-31.
- [8] 金作美,周惠南,王励生. $\text{Na}^+/\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}/\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ 五元体系15℃介稳相图研究[J].高等化学学报,2002,(4):690-694.
- [9] 秦兆明.罗布泊盐湖卤水制取软钾镁矾技术工艺研究[J].现代盐化工,2016,(1):27-29.
- [10] 金作美,肖显志,梁式梅. $(\text{Na}^+/\text{K}^+/\text{Mg}^{2+}),(\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}),\text{H}_2\text{O}$ 五元系统介稳平衡的研究[J].高等化学学报,1980,(4):313-321.
- [11] 牛自得,程芳琴.水盐体系相图及其应用[M].天津:天津大学出版社,2002.

Calculation Model of Potassium Sulfate Production Process from Magnesium Sulfate Subtype Salt Lake Brine

LI Yuyun*, XU Sheng, CHENG Xianming, CAO Wei, YANG Sanmei
(Chonfar Engineering and Technology Co., Ltd., Changsha, 410116, China)

Abstract: This article uses K^+ , Mg^{2+} , Na^+/Cl^- , $\text{SO}_4^{2-}-\text{H}_2\text{O}$ five element metastable phase diagram data and process data collected from similar projects to establish a material balance calculation model for the entire process of producing potassium sulfate from magnesium sulfate subtype salt lake brine. The calculation model is applied to the production of potassium sulfate from a salt lake brine in western China, proving that the design of the calculation model is reasonable, simple clear and has strong operability.

Key words: Computational model; Magnesium sulfate subtype; Potassium sulfate