

盐田高浓度卤水蒸发的数学模型 及动力学研究

张 军

(中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008)

摘要: 首次从化学工程的角度,将盐田系统作为一类特殊的化学反应器和无机盐分离设备进行了详细的论述。在大量试验基础上,系统地分析和研究了 Na^+ , K^+ , Mg^{2+} // Cl^- , $-\text{H}_2\text{O}$ 四元水盐体系卤水在天然蒸发状态下的宏观蒸发动力学参数。从理论上对与卤水蒸发相关的多种参数进行了分析和合理简化,概述了卤水蒸发过程中的质量传递规律。并在此基础上通过计算机模拟方法建立了四元水盐体系高浓度卤水在特定地域中进行天然蒸发的卤水宏观蒸发动力学模型,证明了多种简化和理论假设的合理性。对该数学模型在盐湖卤水开发中的盐田设计、盐田生产的现代化自动控制等进行了探讨。在卤水蒸发动力学模型建立的过程中,针对实际生产过程的需要,通过多种参数的分析,建立了多种参数关系。

关键词: 盐湖;卤水;蒸发;动力学;模型

中图分类号: T S343

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X (2000)04-0019-10

在现代无机盐化学加工过程中,由于分布广泛的盐湖中无机盐矿产资源以液态的特殊形式存在于晶间卤水或表面湖水中,这种贮存形式的无机盐矿物在其开采过程中有其特殊性。盐湖化学工程的实践和理论也随着盐湖无机盐开发加工业的兴起得到推动和发展。

国内外盐湖开发的成功经验^[1]证明,在盐湖无机盐开发过程中,应用盐田加工手段,具有极大的经济合理性。盐田在现代无机盐化工中作为一种特殊的化学反应器,不仅仅是传统意义上的通过蒸发进行一些盐类的结晶和其它盐类的浓缩富集,随着现代科学技术的发展,盐田这一体系也增加了新的内涵和新的应用前景,尤其是现代太阳池技术成为了利用太阳能的新的能源工程,并在国外得到了巨大的发展。同时,盐田在综合了其传统功能和新的太阳池技术的基础上,开始应用于湿法冶金、化学反应等方面。不论在那一方面,其蒸发规律的研究都是一个重要的内容。从其两个主要的功能来说,一是作为无机盐相分离目的的盐田(salina),它要求降低卤水水体内部的浓度梯度和温度梯度,强化蒸发,以快速蒸失水份进行结晶和浓缩,提高盐田生产能力和盐田矿产品的质量;而太阳池(Solar pond)的运行过程中要求尽可能减低蒸发强度,维护其浓度梯度和温度并减少用于维护其稳定的盐耗量。实际上,作为现代盐田系统的概念,它已基本上形成了一个开发盐湖资源和利用太阳能的综合性的技术系统。从这个意义出发,盐田和太阳池的研究过程可以认为是一个问题的两个相反方面,都与蒸发过程密切相关。如更深入对其进行分析,可比较全面地了解建立盐田卤水蒸发动力学模型在盐湖无机盐资源开发中的实际意义,同时也能预测其研究成果对进一步研究太阳池技术的巨大影响和借鉴作

收稿日期: 2000-08-20

作者简介: 张军(1965-),男,副研究员,主要从事化学工程专业。

用。

在盐湖无机盐矿产的开发过程中,盐田作为一种超大规模的化学反应器,其最传统和最突出的功能就是蒸发,通过蒸发可进行卤水液态矿的相分离。而且盐田作为一种特殊无机盐化工蒸发设施,其规模非常巨大。其蒸发方式是常温、天然、开放形式;其蒸发过程随季节变化。它的能量来源是直接利用太阳辐射能,蒸发条件依赖于当地的气象条件,如湿度、气压、温度变化等因素。盐田蒸发操作周期长,结晶过程复杂,生产控制比较困难。因此,研究盐田卤水动力学对盐田的设计及其运行过程的管理和控制具有重要的作用和意义。

我国目前探明的已进行较大规模开发的国内最大钾镁盐矿床察尔汗盐湖^[2]位于青海省柴达木(Tsaidam Basin)盆地腹地,是一个以液相钾镁盐石盐为主的综合性矿床。大柴旦盐湖也是一个属硫酸镁亚型以硼锂资源为主的综合性矿床^[3,4]。在我国的西藏自治区、新疆自治区和内蒙古自治区及一些其它省份,都有大量不同类型的盐湖处于前期开发和等待开发。本文主要针对青海柴达木盆地察尔汗盐湖开展盐田卤水蒸发速率的各影响参数的测定试验,针对盐湖卤水开采过程中第一步——盐田初步矿物加工的盐田蒸发过程进行理论分析;依据试验结果,应用模拟方法建立盐田卤水宏观蒸发动力学的经验模型,进一步针对生产实际中的盐田设计、生产过程控制和将来实现计算机自动化管理中的应用问题进行了初步探讨。

1 高浓度卤水蒸发动力学基本模型的理论推导

1.1 卤水蒸发过程中的结晶形式和内部的传质过程分析

盐湖卤水主要是指贮存在盐湖盐层中储量巨大的无机盐矿床结晶体间的晶间卤水,由于这些液态矿的存在形式,它们都是饱和溶液。本文所讨论的察尔汗盐湖的晶间卤水基本上都处于石盐(氯化钠)或钾石盐(氯化钠和氯化钾)饱和卤水。针对察尔汗盐湖卤水,曾进行过多次不同温度的等温蒸发和天然蒸发试验,其相化学变化规律比较清楚。要了解卤水在盐田蒸发过程中结晶形式和内部的质量传递过程,首先必须将盐田作为一类特殊的化学反应器进行其性能和特征的考察,应用化学工程理论研究的一般方法进行研究。卤水在盐田中进行连续蒸发结晶的过程中,其实际状态不同于热力学研究条件下的相态,具有动态、非均相、连续相等特殊相态。

卤水在盐田蒸发过程中其内部结晶形式有两种可能,第一种是表层结晶;第二种是整体结晶。如图 1 所示。表层结晶是假定卤水表面蒸发失去水分子,处于饱和状态的无机盐由于在表层卤水水分子的不断蒸失而结晶出来,结晶物沉积到盐田池底,新的卤水层继续蒸发。整体蒸发是由于卤水在蒸发结晶过程中,存在卤水水体内部的质量传递,卤水中的水分子沿盐田的深度方向的负方向传递,在每一点由于水分子的传递,使饱和态的无机盐处于过饱和状态而结晶出来。在这种结晶模型中,卤水中沿深度方向的温度和浓度梯度分布同样存在。

这两种结晶模型的过程分析,将直接影响对蒸发过程的机理的认识。在实践中我们观察到,在处于连续蒸发的饱和卤水中,置入任何形状的物体,不久在其表面的任一方向任一表面,都形成比较均匀的无机物结晶。这样,我们认为,卤水在连续蒸发结晶过程中,卤水中的水分子沿垂直向上的方向扩散,在表面通过蒸发进入气相,而沿垂直方向的任一点同时发生结晶行

为。在此认为卤水内部扩散为主导因素,通过整体结晶的模型考察其特征。实际上,对宏观蒸发动力学结果而言,表面蒸发的效应已被包括在其中。

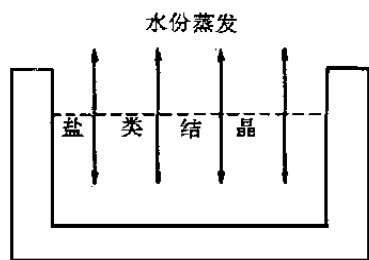


图 1-1 表层结晶示意图

Fig. 1-1 Surface crystallization

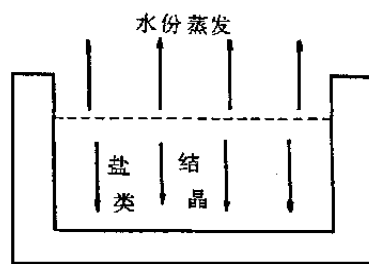


图 1-2 整体结晶示意

Fig. 1-2 Bulk crystallization

1.2 卤水蒸发过程考察中的参数选择

卤水在蒸发过程中,有外部影响因素和内部影响因素。外部影响因素中主要有大气相对湿度 (H),太阳辐射量 (R),风力资源 (W),大气压力 (P),环境温度 (T)等;内部影响因素主要有体系 (S),化学组成变化 (C_i),粘度 (V),卤水水体温度 (T_b)等。则它的基本函数关系为:

$$v_b = f(H, R, W, P, T, S, C, V, T_b)$$

v_b 为卤水蒸发速率。

从以上基本函数关系可以看出,其主要的影响因素有 9 个,这对卤水蒸发动力学研究是比较困难的。现对各参数逐个进行考察,以期通过合理的分析予以简化过程,减少参数。

1) 体系

在卤水蒸发结晶过程和行为的研究中,其对象都分别属于特定的水盐体系,针对某一特定体系而言,体系可不作为其影响因素,这样研究所得的卤水蒸发宏观动力学模型基本上仅限于某一个体系。而在对多个体系研究结果的基础上归纳其共同的性质比较容易实现。实际上,如果在卤水蒸发动力学分析中考虑全部组份的化学组成,即是从相化学的角度规定了所讨论对象的体系。

2) 粘度

对于特定的体系来说,卤水的粘度与化学组成的变化和卤水的温度有良好的相关性,这样,在考虑了卤水的化学组成时,对具有良好相关性的粘度可以不作为其表征的参数。

3) 卤水温度

应当说,卤水的温度是一个重要的参数。卤水水体的温度高,尤其是卤水表层温度高,说明卤水中水分子具有较高的能量,对水分子逸出水体表面进入空气的相际传递非常有利。但卤水水体的温度与太阳辐射量和辐射角度有关,这样,首先考虑太阳辐射作为主要的影响因素;从另一个角度来说,大气相对湿度是外界气象条件下气温和湿球温度的函数。淡水的温度与湿球温度相关,卤水同淡水一样,它的温度也必然与淡水一样,和湿球温度相关,也就是与大气相对湿度相关。由以上分析可知,在三者之间存在着关联性。在考虑了太阳辐射量和大气相对湿度的情况下,可以不再重复地考虑将卤水温度以及大气温度作为动力学的特征参数。

4) 大气压力

大气压力直接决定着来自外界的蒸发阻力。但大气压力对卤水蒸发的主要影响基本上是通过空气中的蒸汽压差来影响蒸发。从相对湿度的定义式可知,相对湿度间接地表征了这一气体压力影响

5) 风力资源

在实际生产过程中我们观察到,丰富的风力资源是对蒸发极为有利的外部条件。但风力资源的定性和定量在目前试验中的测定以及正确计量存在着诸多问题,由于客观条件的限制,目前对于实际过程中的风力资源的影响如同其本身一样只能作为一种不确定因素,在盐田卤水蒸发过程中不作为一个参数进行相关性规律研究

6) 化学组成

考虑了全部组份的化学组成变化时,即是规定了处理对象的体系。但在实际过程中,由于实际卤水的体系仅是取其主要的离子进行讨论,将其归入某个溶液化学研究的理论体系中进行分析。而实际上任何一种实际卤水中除了含有近似溶液体系所包含的离子组成以外,还有许多其它离子。另外蒸发过程是一个结晶和增浓的共同过程,这种人为规定的体系也是变化的,在不同的蒸发阶段体系也有所不同。这样,找出其中的关键组份来建立宏观蒸发动力学模型,则是非常理想的

从以上的机理分析和简化结果,在盐田卤水蒸发动力学研究中,将化学组成、大气相对湿度、太阳辐射量作为主要的因素进行考察,这样,动力学的基本函数关系:

$$r_b = f(H, R, C_i)$$

即盐田卤水蒸发速率是化学组成、太阳辐射量和大气相对湿度的函数

1.3 卤水蒸发动力学模型的理论推导

卤水蒸发行为发生在气液相界面,卤水在连续蒸发过程中的结晶行为是整体结晶,传递过程在整个卤水水体中进行。现以微元分析方法对卤水中的质量传递过程进行分析并建立盐田卤水蒸发动力学的理论模型^[5]。

在三维坐标 $XYLO$ 中, L 为卤水深度的负方向,即是卤水的蒸发过程中水份的扩散方向。在连续蒸发的卤水水体中取一微元体如图 2

在卤水蒸发过程中,蒸发速率即是卤水中淡水从表面的蒸失速率。因此可以从分析水组份的传递过程作为基本出发点来进行过程分析。

设微元体 $dx dy dl$ 内水组份沿垂直向上的方向即 L 轴方向的传质速率系数为 D_w , 水的浓度为 C_w , 微元体内水组份的累积量为 $-r_b$ (一号表示微元体本身由于向上一层卤水贡献水份) 由此进行物料衡算:

进微元体水组份流量 $(D_w C_w \cdot dx dy)_1$

出微元体水组份流量 $(D_w C_w \cdot dx dy)_{1+dl}$

微元体内水组份累积量 $-dx dy dl \cdot r_b$

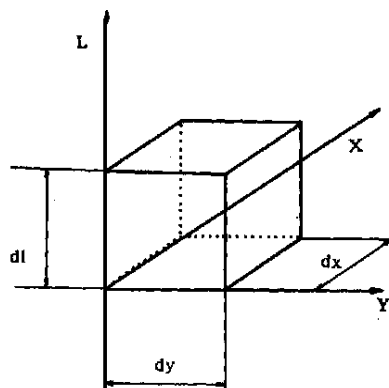


图 2 卤水微元体 $dx dy dl$ 座标示意图
Fig. 2 The sketch of differential element $dx dy dl$ of brine body

衡算可得: 微元体内累积量 = (进微元体水组份流量) - (出微元体水组份流量)

$$\text{即: } -dx dy dl \cdot r_b = (D_w C_w \cdot dx dy)_{l+dl} - (D_w C_w \cdot dx dy)_l$$

化简得:

$$r_b = \frac{(D_w C_w \cdot dx dy)_{l+dl} - (D_w C_w \cdot dx dy)_l}{dx dy dl}$$

由于蒸发只在卤水表面进行, 假定水组份的传递与水平方向无关, 则有:

$$r_b = \frac{dx dy (D_w C_w)_{l+dl} - dx dy (D_w C_w)_l}{dx dy dl}$$

化简得:

$$r_b = \frac{(D_w C_w)_{l+dl} - (D_w C_w)_l}{dl}$$

$$r_b = \frac{d(D_w C_w)}{dl}$$

这是微元体对整个卤水蒸发速率 R_b 的贡献, 也即是在深度为 l 处 ($0 \leq l \leq L$) 的卤水层对深度为 L 的整个卤水蒸发速率所占的分率。对此进行积分, 可得整体卤水的蒸发速率 R_t :

$$R_b = \int_0^L r_b \cdot dl = \int_0^L [d(D_w C_w) / dl] \cdot dl$$

这是卤水在某一蒸发阶段的瞬时蒸发速率, 在其它条件相同时, 不同蒸发浓缩阶段具有不同的 $[d(D_w C_w) / dl]$ 的分布

边界条件为: 在 $l = L$ 处, $C_w = C_{wu}$ (卤水表层浓度)

在 $l = 0$ 处, $C_w = C_{wl}$ (卤水底层浓度)

如假定卤水中水组份在某一蒸发阶段沿卤水深度的传质系数相同或取其平均值 D_{WA} , 则卤水蒸发速率具有如下的形式:

$$R_b = \int_0^L r_b \cdot dl$$

$$= \int_0^L D_{WA} \cdot d[(C_w) / dl] \cdot dl$$

$$= D_{WA} \cdot \int_0^L d(C_w / dl) \cdot dl$$

即在传质系数一定时, 某一蒸发阶段卤水的蒸发速率与这一阶段的浓度梯度有关。实际上, 这种梯度的分布一方面是由于密度原因形成的; 另一方面是由于蒸发强度形成的。除去密度原因外, 梯度的分布由蒸发造成, 而不是梯度的分布决定其蒸发速率。这种形式中, 在相同的外部条件下, 蒸发速率可以认为是由不同的蒸发阶段卤水的化学组成和传质系数共同决定。但通过测定其不同蒸发阶段的浓度分布梯度和卤水的整体蒸发速率, 有助于了解卤水在连续蒸发过程中的传质特性

1.4 相对蒸发速率

卤水蒸发速率的影响因素很多, 如此众多参数对实际过程的宏观蒸发动力学模型的建立将是一个非常复杂的过程, 为简化这个过程, 引入相对蒸发速率的概念。相对蒸发速率是卤水和淡水在相同外部条件下蒸发速率的比值 F 。

$$F = R_b / R_w$$

其中 R_w 是淡水蒸发量。

在实际研究过程中,常将 F 取百分比值。同时,淡水蒸发量为方便在不同地域的比较,尤其在盐湖分布地区进行横向比较,淡水蒸发量常引用国家气象部门规定的标准淡水蒸发量。值得提出的是,由于盐田蒸发速率实际上非常低,其时间计量单位以天或一个蒸发期进行速率各参数的测定。

已知卤水蒸发速率是化学组成、大气相对湿度、大气压力、太阳辐射量的函数:

$$R_b = f_1(C_i, H, P, R)$$

同样,淡水蒸发的主要影响因素是大气相对湿度、大气压力、太阳辐射量,

$$R_w = f_2(H, P, R)$$

如果假定大气压力和太阳辐射量对卤水蒸发和淡水蒸发具有同样的影响程度和作用原理,则可通过构造新的多参数函数来建立卤水蒸发的相对速率。其形式为:

$$F = R_b / R_w = f(H, C_i)$$

即卤水蒸发的相对速率只受卤水化学组成 C_i 变化的影响(内部因素)和大气相对湿度 H 的影响(外部因素)。这样,只要测定单位时间内卤水蒸发量和淡水蒸发量及这个蒸发过程中卤水的化学组成变化规律,及其在每一蒸发阶段的大气相对湿度的变化规律,就可以比较方便地建立卤水蒸发过程的宏观动力学模型。

2 数据处理和卤水蒸发动力学模型的建立

根据以上分析和研究,针对柴达木盆地察尔汗盐湖 Na^+ , K^+ , $\text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$ 四元水盐体系的卤水,通过一系列试验测定^[6,7],建立了一套可以指导大规模盐田设计和生产操作控制的卤水蒸发模型。

2.1 试验数据处理

对实际测定的数据在计算机上进行处理,同时对卤水蒸发水位下降和卤水密度、卤水温度等进行每一蒸发期中的加权平均计算,计算某每一蒸发阶段各蒸发期的平均值。确定各蒸发期卤水在相化学变化过程中的相变范围未超出预计范围,得到蒸发过程中基本相化学变化参数(表 1)。对基本蒸发参数在计算机上作散点图(图 3)进行分析,确定函数基本形式,并检验各数据的分布状况和参数之间的相关性。建立卤水蒸发速率模型和多种参数相关性曲线拟合,并进行标准方程的数学方差分析,对测定值和计算值进行对比,检验模型结果。

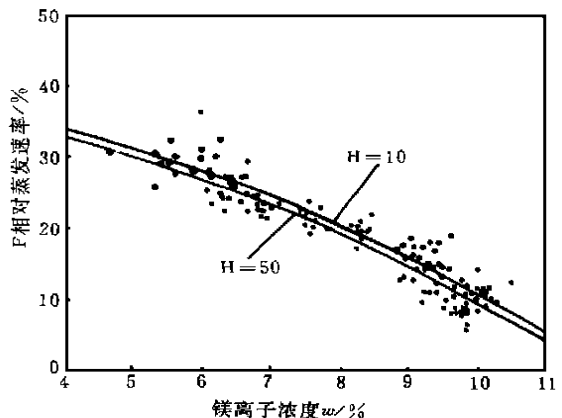


图 3 盐田卤水蒸发动力学模型拟合曲线

Fig. 3 Simulated Curve of brine evaporation dynamics models

表 1 数学方差分析结果

Table 1 Result of variance analysis

变差来源	平方和	自由度	均 方	F
回 归	6398. 759	3	2132. 92	378. 08
剩 余	823. 643	146	5. 641	
总 计	7221. 332	149		

2 2 卤水蒸发速率基本模型的建立

从散点图(图 3)上可以看出,卤水相对蒸发速率与卤水的镁离子组成变化具有良好的相关性,这种关系为抛物线性。设定其基本模型关系式为:

$$F = a' + b_1 w + b_2 w^2 \quad (1)$$

其中: F = 卤水蒸发量 (mm) / 淡水蒸发量 (mm) $\times 100\%$;

a' : 待定常数项;

b_1, b_2 : 待定系数;

w : 镁离子浓度, %。

另外,大气相对湿度、太阳辐射量或其它因素对卤水相对蒸发速率有一定的影响,在此选择大气相对湿度作为主要的影响因素。设大气相对湿度对卤水相对蒸发速率的影响为线性关系

$$\text{设: } a' = b_0 + b_1 H \quad (2)$$

其中: b_0 为待定常数项; b_1 为待定系数; H 为大气相对湿度

代入(1)式得:

$$F = b_0 + b_1 w + b_2 w^2 + b_3 H$$

通过计算机拟合,得关系式:

$$F = 39.465 + 0.011w + 0.339w^2 + 0.029H$$

从数学方差分析(表 1)可知,拟合结果高度显著。该模型的标准曲线如图 3。该关系式的取得,实际上可以用测定方便的镁离子浓度来近似和间接地表达卤水相对蒸发速率和卤水中含水量的变化规律,同时也可以从这个结果出发,在对多种水盐体系的卤水相对蒸发速率进行测定后,对卤水蒸发速率从含水量的角度进行更加普遍意义上的归纳分析,以期得到一般性的工程理论。

3 实际生产过程中的卤水蒸发动力学模型

在实际生产过程中,盐田中卤水的蒸发在遵循以试验数据为基础建立和讨论的基本动力学模型的同时,也由于一些其它原因不能直接用这样的模型作为生产过程中的运行模型。这是由于实际生产盐田超大规模的面积,具体生产过程中的生产方案以及一些其它原因所产生的作用所致。这些原因中,有些已经得到解决,有些需根据具体情况,而有些问题由于在此领域内技术水平的发展限制和应用程度的实际情况,仍需进一步的工作。但这些问题均可以通过对业

已建立的盐田蒸发动力学模型的逐步修正得以解决。

3.1 盐田面积和相对蒸发速率

从实验可知,大面积盐田的卤水蒸发速率和实验用蒸发池的卤水蒸发速率存在着比较明显的差异。在试验中,同时测定了盐田面积校正系数 A 在原始卤水至光卤石饱和阶段的面积校正系数 $A_1 = 0.76$ 在氯化镁饱和阶段及进一步蒸发阶段的面积校正系数 $A_2 = 1.50$ 这个校正系数是在实验测定值和数据的理论分析基础上确定的。本文正是在各阶段加上面积校正系数的基础上建立了盐田卤水蒸发动力学模型,即前面所建立的模型是已经消除了由于实际盐田面积变化影响的蒸发动力学模型

实际蒸发过程中,卤水的变化是一个连续的变化过程,主要影响卤水相对蒸发速率的因素是化学组成的变化。从结晶固相来说,卤水的结晶相区存在一系列的突变,但卤水液相的化学组成变化还是一个渐变过程,其变化过程无突变点或间断点。因此卤水蒸发速率的变化也应当是一个渐变过程,在考虑了面积因素后的实际盐田卤水蒸发动力学模型的结果是符合这一过程的。

3.2 盐田卤水的绝对蒸发速率模型

从相对蒸发速率及其经验的宏观动力学模型的建立过程出发,得:

$$\text{卤水绝对蒸发速率} = \text{卤水相对蒸发速率} \times \text{淡水蒸发速率}$$

针对察尔汗盐湖卤水的蒸发,卤水绝对蒸发速率 R_0 为:

$$R_0 = F \times R = R \times (21.920 + 2.616w + 0.083w^2 + 0.109H)$$

这个模型的优点是,淡水蒸发速率是根据国家气象部门标准测定的各地区的淡水蒸发量的测定值的结果,对于类似的盐湖,可参照当地气象部门的淡水蒸发量测定结果直接进行工艺设计和过程分析。可以进一步测定天然蒸发过程中卤水水体内部浓度、温度梯度的分布和变化规律,进而研究天然蒸发过程中各组份(主要是水份和总的盐份)的传递速率常数和与可测定参数相关的传递规律,以及由于卤水中水份蒸失引起的结晶规律,以便于在盐湖化学工程领域内形成完整的理论体系。

3.3 二维平面上浓度的分布影响

在大面积蒸发的盐田中,不同于小面积蒸发池的蒸发情况,卤水蒸发速率在整个盐田内的各个部分也不是均一的。这是因为,由于生产方案和一些目前尚不清楚的原因,盐田中卤水在盐田平面上存在着一定的浓度分布,结晶的固相在单位面积的数量和质量上存在着一定的分布,而卤水蒸发速率的主要影响因素是卤水的化学组成变化,由此可以推断,沿盐田平面,卤水的蒸发速率一定存在着某种分布。这种结果影响盐田生产中的生产质量控制尤其是现代化盐田矿物采收方案。但这些问题的解决要结合生产实际对盐田卤水蒸发动力学模型加以修正,以产量分布和质量分布的形式来应用盐田卤水蒸发动力学模型:

$$\text{产(质)量} = F(\text{蒸发速率,平面分布,生产方案})$$

这将是实现建立计算机管理和控制的实际模型的方向。目前这方面虽然具有良好的应用前景,但需要进一步进行大量的综合性的工作。

4 结论

本文的创新点就在于首次明确从化学工程理论的角度将盐田作为化工分离中一类特殊的化学反应器和分离设备进行了比较系统的论述。着眼于建立系统的盐湖化学工程理论体系,对盐田这一特殊的化学反应器进行其性能和过程特征的考察,对影响盐田蒸发过程的有关气象、环境、处理对象(不同水盐体系的卤水)的物理化学性质对盐田的影响过程和影响程度进行了尽可能深入的描述。结果表明,盐田作为一种超大规模特殊的化学加工设施或反应器,在环境温度和压力下进行卤水蒸发,其蒸发过程不但与气象条件有关,而且主要与卤水的化学变化有关。蒸发过程的内在传递机理为表面蒸发和卤水整体结晶的过程。并在大量模拟实际过程的试验及试验测定结果的数学分析基础上,建立了可直接用于实际盐田工程设计和盐田生产过程管理与控制的宏观蒸发动力学模型。盐田卤水连续蒸发的实际过程的宏观动力学模型建立过程中,相对蒸发速率的概念极大地简化了盐田卤水蒸发的过程分析和宏观蒸发动力学模型的建立。这个模型已经成为在高原地区分布众多的同类盐湖进行开发时行之有效的设计论据,同时也是盐湖化学工业向现代化发展中建立盐田生产的现代化计算机模拟管理和控制的一个核心模型;通过对工程理论方面的进一步研究,可望在此基础上解决高浓度卤水在盐田蒸发过程中的宏观结晶动力学的表征问题。柴达木盐湖可以认为属于 $\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$ 四元水盐体系卤水,影响这个体系卤水的相对蒸发速率的外部条件主要与大气相对湿度有关,内在原因主要与卤水的化学组成变化相关,而且与镁离子浓度变化有良好的相关性。

$\text{Na}^+, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+} // \text{Cl}^- - \text{H}_2\text{O}$ 四元水盐体系盐湖卤水蒸发过程的基本函数关系可表达为:

$$F = R_b / R_w = f(H, C)$$

其中: 卤水绝对蒸发速率为 $R_b = f_1(C, H, P, R)$

卤水相对蒸发速率与大气相对湿度和卤水中镁离子浓度相关的能满足实际工艺设计和生产需求的半经验的卤水天然蒸发过程中的宏观蒸发动力学模型为:

$$F = 21.920 - 2.616w + 0.083w^2 + 0.109H$$

应当指出,这个领域中有关工程理论体系的研究虽然尚在不断进行,但目前还未形成系统的工程理论体系,诸多方面仍然缺乏对实际生产过程直接的有效指导,本文的研究工作和一些结论在试图解决一些工程生产中的实际问题的同时,希望能够抛砖引玉,进一步促进这个领域的发展。

参考文献:

- [1] 张军. 盐湖卤水蒸发过程的研究进程[J]. 盐湖研究, 2000, 8(1): 63-71.
- [2] 张彭熹, 等. 柴达木盆地盐湖[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [3] 高仕扬, 柳大纲. 大柴旦盐湖夏季组成卤水的天然蒸发[J]. 盐湖研究, 1996, 4(3, 4): 73-86.
- [4] 高仕扬, 柳大纲. 大柴旦盐湖冬季组成卤水的天然蒸发[J]. 盐湖研究, 1996, 4(3, 4): 87-91.
- [5] R. Byron Bird. Transport Phenomena [M]. New York London, John Wiley & Sons, inc.
- [6] 中国科学院盐湖研究所分析室. 卤水和盐的分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [7] 中央气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 1974. 6.

Theoretical Model and Dynamics Study of Highly Concentrated Brine Evaporation in Solar Pond

ZHANG Jun

(*Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China*)

Abstract This paper is the first to treat the solar pond system as a special kind of chemical reactor and separation equipment in the light of theory of chemical engineering and has discussion on it in detail. Based on a great number of experimental data carried out outside field, the paper analyses and studies systematically the parameters of dynamics of brine of the quaternary system Na^+ , K^+ , Mg^{2+} // Cl^- - H_2O during the evaporation period from the stage of sodium chloride to the stage of bischofite, and then analyses all the parameters theoretically and make some proper assumption that is proved by analysis of field data to deduce a theoretical relation of evaporation dynamic of highly concentrated brine in solar ponds, finally the paper develops a actual experimental model that describes the evaporation of the brine of the system of Na^+ , K^+ , Mg^{2+} // Cl^- - H_2O .

The experimental model can be changed simply into an other form that can be effectively used in the design and management of solar ponds system production. The paper also discusses some way of using the experimental model in a computer automatic management system of solar ponds in the production in the industry in future. By analyzing all the experimental data tested in the outside field and the meteorological data, also the paper deals with the some relationship of the parameters above and give a result that will be significant for the effective.

Key words Salt lake; Brine; Evaporation; Dynamics; Model

《盐湖研究》合订本征订启事

《盐湖研究》自 1993 年公开发行人以来,受到了广大读者的厚爱。现已完成 1993-1995 年合订本、1996-1997 年合订本、1998-1999 年合订本的装订工作,每本定价 90 元,需邮购者加邮资 10 元/本。数量有限,欲购从速。

欲购者请直接与《盐湖研究》编辑部联系。

汇款地址: 青海省西宁市新宁路 18 号中科院青海盐湖研究所

收款单位:《盐湖研究》编辑部

邮政编码: 810008

也可通过银行信汇

收款单位: 中国科学院青海盐湖研究所

开户银行: 中国工商银行西宁市虎台支行

银行帐号: 15326404313

本刊编辑部