



低温多效海水淡化系统的 Aspen Plus 模拟

郝冬青, 沙作良, 王彦飞, 舒 畅

(天津市海洋资源与化学重点实验室, 天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457)

摘 要: 应用 Aspen Plus 软件, 模拟低温多效蒸发海水淡化系统的操作单元, 建立完整的系统模型, 并对模型进行分析. 用法国 SIDEM 公司的四效低温多效海水淡化系统, 对建立模拟系统的可信性进行验证.

关键词: 低温多效蒸发; 海水淡化; Aspen Plus; 模拟计算

中图分类号: P747 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6510(2011)01-0047-04

Simulation of Low Temperature Multi-Effect Distillation Seawater Desalination with Aspen Plus

HAO Dong-qing, SHA Zuo-liang, WANG Yan-fei, SHU Chang

(Tianjin Key Laboratory of Marine Resources and Chemistry, College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Simulation models of operation unit of low-temperature multi-effect distillation (LT-MED) seawater distillation were built with Aspen Plus software, then LT-MED system was simulated and analysed. Finally, the four-effect LT-MED seawater desalination system of SIDEM corporation France was used as an example for evaluating dependability basing on the simulation model.

Keywords: LT-MED; seawater distillation; Aspen Plus; simulation calculation

随着人类社会的进步和经济的迅猛发展, 特别是世界人口急剧增加, 导致淡水资源的日益匮乏. 2009 年, 瑞士达沃斯世界经济论坛年会曾发布报告, 全球正面临“水破产”危机, 并预测在今后 20 年内, 人类争夺水资源的竞争将愈演愈烈. 各国能源生产领域和农业领域等对水资源的需求量将大增, 水资源今后可能比石油还昂贵. 中国人均水资源仅为世界人均量的 1/4, 是全球最缺水的 13 个国家之一^[1]. 发展海水淡化技术, 向大海要淡水已经成为当今世界各国的共识.

海水淡化技术起源于 20 世纪中叶, 经过几十年的发展, 现已遍及全世界一百多个国家. 其中, 多级闪蒸 (MSF)、低温多效 (LT-MED) 和反渗透 (RO) 已成为海水淡化领域的三大主流技术, 而低温多效海水淡化技术以其易实现大型化、运行维护成本低等特点, 成为海水淡化技术的主要研究方向^[2]. 近年来随

着海滨电厂的兴建, 水电联产成为海水淡化工程建设的主要模式.

水电联产模式最大的优点就是可以降低能耗, 而节能降耗正是当前全球最为热点的话题, 尤其是利用工程软件模拟系统来改善工艺降低能耗, 更是倍受关注. 美国 Aspen Tech 公司所开发的 Aspen Plus 软件具有完备的物性数据库, 可通过已经建立或者用户自行建立的单元操作模型, 对工艺流程进行模拟求解, 得到流程的详细信息, 以寻找合理的工艺条件. 西班牙的 Bruno 等^[3]使用 Aspen Plus 软件模拟过以太阳能为能源的反渗透淡化系统; 美国佛吉尼亚学院的 Al-Shayji 等^[4]利用神经网络算法和 Aspen Plus 建立的反渗透淡化模型分别对大规模海水淡化生产进行预测, 但尚未应用于低温多效蒸发海水淡化领域. 应用该软件建立海水淡化系统的模型, 可以评价已有装置优化操作和新建、改建装置的优化设计.

收稿日期: 2010-10-21; 修回日期: 2010-11-18

作者简介: 郝冬青 (1985—), 男, 山东人, 硕士研究生; 通信作者: 沙作良, 教授, zsha@tust.edu.cn.

1 低温多效海水淡化技术

低温多效海水淡化技术是使用真空技术降低海水的沸点,并多次利用蒸汽,降低能量消耗的一项海水淡化技术.一般来讲,低温多效蒸发海水淡化过程中浓盐水的最高蒸发温度低于 70 °C.其特征是将一系列的蒸发器串联起来,一定量的低温蒸汽(一般为 65 ~ 75 °C)进入首效蒸发器作为热源与海水进行换热后冷凝,而作为冷源的海水则蒸发产生二次蒸汽,作为下一效的加热蒸汽,并在下次换热后冷凝为淡水,如此逐效多次蒸发和冷凝^[5].

2 模型的建立

在系统庞大时,传统的建模方法会妨碍对系统进行深入的分析 and 研究^[6],模块化建模则不同,其基本思想是将复杂多变的热力系统看作由少数几个典型种类的部件或模块组成.根据这些模块的特性及系统的质量守恒和能量守恒建立模型.

2.1 基础模型的建立

Aspen Plus 软件含有几乎全部的单元操作模型,使用不同的基础模型,依据热量和物料平衡基本原理,可对不同工艺流程进行模拟.对于低温多效海水淡化工艺流程而言,其主要操作单元为蒸发.在 Aspen Plus 软件的基础模型中,并没有十分适合的单个单元模型可直接用来模拟海水淡化过程.为模拟海水淡化系统,本文在模拟中采用 Heater、Flash2 和 Mixer 模型的不同组合,模拟淡化工艺中的蒸发器、闪蒸罐等操作单元.

2.1.1 蒸发器模型的建立

本文蒸发器模型的建立选用 Aspen Plus 软件中的换热器模型 Heater 和分离器模型 Flash2.

如图 1 所示,模拟中冷、热物流的换热通过两个换热器(Heater),并在两者之间建立热流(Heat Stream)来完成.热物流(HOT-IN)通过模块 B2,降温、冷凝释放出的显热和潜热通过热流 HEAT 传递给冷物流(COLD-IN),冷物流接受热量后蒸发,并在模块 B3(Flash2)中进行气液分离获得二次蒸汽和浓盐水.

2.1.2 闪蒸罐模型的建立

低温多效海水淡化系统模拟中,闪蒸罐采用 Aspen Plus 软件的 Flash2. 在规定出口条件的情况

下,完成气液平衡的计算,见图 2.

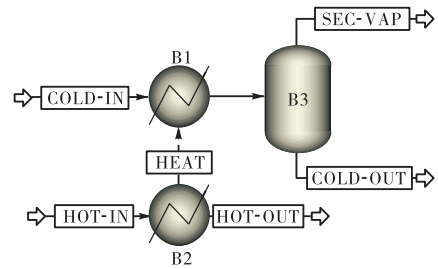


图 1 蒸发器模型

Fig.1 Simulation model of evaporator

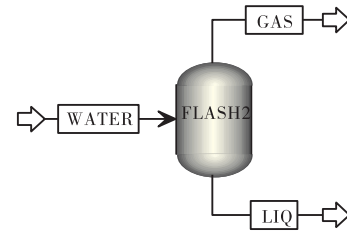


图 2 闪蒸罐模型

Fig.2 Simulation model of flash tank

2.2 系统的定义

2.2.1 组分的定义

海水组成复杂,本模拟以海水盐度为基础,采用与其等盐度的氯化钠水溶液.由于水(H₂O)和氯化钠(NaCl)是以电解质溶液的形式存在的,使用 Aspen Plus 软件的 Electrolyte Wizard(电解质智能工具)定义各种存在的组分,见表 1.

表 1 定义组分

Tab.1 Define components

组分 ID	类型	组分名称	化学式
NaCl	常规	氯化钠	NaCl
Water	常规	水	H ₂ O
Na +	常规	钠离子	Na ⁺
NaCl(s)	固体	氯化钠(固体)	NaCl
Cl-	常规	氯离子	Cl ⁻

2.2.2 物性方法的选择

物性方法的选择是 Aspen Plus 用来计算热力学性质和传递性质的基础,恰当的选取对流程模拟的准确性和可靠性具有至关重要的作用.本文的模拟体系属于无机电解质体系,选择ELECNRTL物性方法.

Aspen Plus 流程模拟中,对于有循环回流和设计规定的流程必须迭代收敛.海水淡化工艺流程后的浓盐水的综合利用对盐水的浓度有一定的要求^[7],本研究采用 Wegstein 收敛方法建立模型^[6].

求解方程组 $X = g(X)$ 的 Wegstein 迭代公式为^[8]

$$X^{(k+1)} = qg(X^{(k)}) + (1-q)X^{(k)} \quad (1)$$

式中:

$$q = \left(1 - \frac{g(X^{(k)}) - g(X^{(k+1)})}{X^{(k)} - X^{(k+1)}} \right)^{-1} \quad (2)$$

Wegstein 方法是一种松弛迭代法,其松弛因子为 q . 在流程模拟中,对于一维流程模拟方程 Wegstein 法是一种重要的收敛方法.

2.3 低温多效海水淡化模型分析

2.3.1 沸点升高

图 3 表示溶液的蒸汽压和水的蒸汽压随温度的变化关系. 图中曲线 AB 表示水, CD 表示溶液. 由图中可看出,溶液的蒸汽压比水的蒸汽压低. 即在同一压力下,溶液的沸点要高于水的沸点;溶液的浓度愈大,曲线 CD 的位置愈靠下. 这种现象被称之为溶液沸点升高,或被称为溶液的蒸汽压下降^[9].

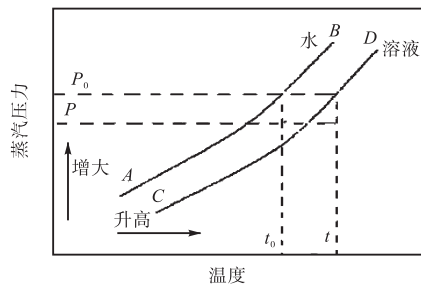


图 3 溶液的蒸汽压示意图

Fig.3 Schematic diagram of the vapor pressure of the solution

对于海水而言,沸点的升高值与海水的温度和浓度有关. 具体数值可由海水物性参数表查取,一般在多效蒸发系统应用的温度和浓度范围内,海水的沸点升高值取为 $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[10].

2.3.2 模拟的条件

在确定模拟条件的情况下,应用 Aspen Plus 分别建立简单串联流程,带沸点升高的串联流程,带沸点升高和闪蒸罐的流程,研究沸点升高和闪蒸罐对模拟结果的影响. 模拟条件见表 2.

表 2 模拟的主要参数

Tab.2 Main parameters of the simulation

项目	数值
加热蒸汽压力/kPa	30
进料海水温度/ $^{\circ}\text{C}$	20
进料海水氯化钠质量分数/%	3
末效排出海水氯化钠质量分数/%	6
进料海水流量/ $(\text{t}\cdot\text{h}^{-1})$	16 666
末效排出海水温度/ $^{\circ}\text{C}$	40
盐水的顶值温度/ $^{\circ}\text{C}$	67

2.3.3 不同流程的模型

图 4—图 6 分别为不同工艺流程的海水淡化模

型模拟图.

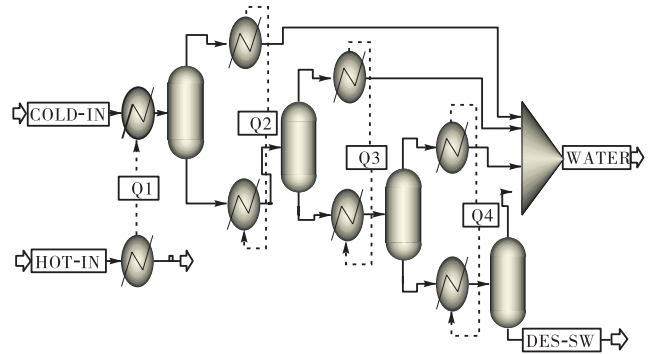


图 4 四效串联流程

Fig.4 Simulation model of the four-effect of serial flow

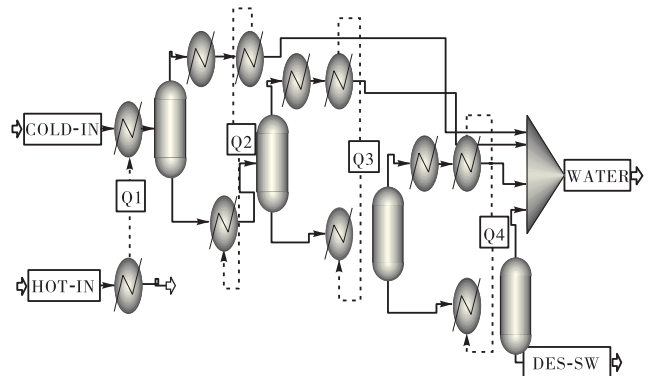


图 5 考虑沸点升高的串联流程

Fig.5 Simulation model of the four-effect of serial flow with the boiling point elevation

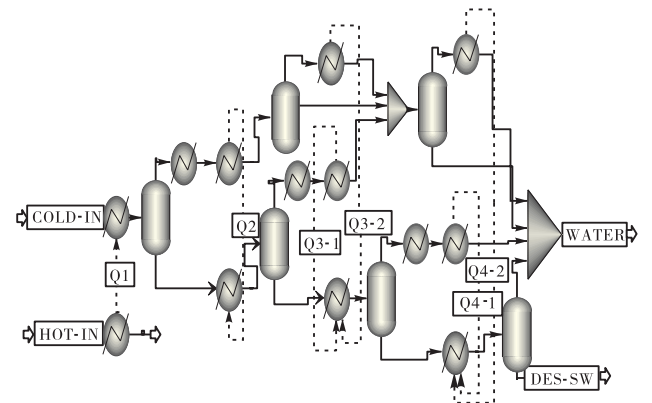


图 6 带有沸点升高和闪蒸罐的流程

Fig.6 Simulation model of the four-effect of serial flow with the boiling point elevation and flashing box

2.3.4 结果分析

在限定出口条件的情况下,应用 Aspen Plus 软件的灵敏度分析,将系统的最终淡水累积量设定为被采集流程变量,控制流程变量选择加热蒸汽量,计算在不同加热蒸汽量的情况下,淡水累积量的值,得到满足要求的出口条件时的加热蒸汽量,并计算造水比和单位蒸馏产物热消耗,见表 3. 由表 3 可知,在原有简

单串联流程模型的基础上考虑沸点升高、闪蒸罐闪蒸等因素对系统的模拟结果影响并不显著,加热蒸汽的需求量、造水比以及单位蒸馏产物的热消耗等在不

同工艺流程下的模拟结果很接近. 为了确保模型的可信性,在模型的建立过程中加入沸点升高和闪蒸罐.

表3 模拟计算结果
Tab.3 Simulated results

流程	加热蒸汽需要量/(t·h ⁻¹)	淡水累积量/(t·h ⁻¹)	出口海水氯化钠质量分数/%	造水比	单位蒸馏产物热消耗/(J·kg ⁻¹)
流程 1	2 994	8 333.6	0.060 0	2.783 4	206.71
流程 2	3 009	8 332.5	0.059 9	2.769 2	207.77
流程 3	2 985	8 334.7	0.060 0	2.792 2	206.06

3 模型的验证

以全球著名的海水淡化公司法国 SIDEM 公司^[7]典型的四效装置为例,根据该公司提供的基础数据建立模型,模型入口输入与实际生产相同的条件下,进

行模拟运算. 模拟计算所得结果与 SIDEM 公司所示数据对比见表 4. 模型计算的结果与实际生产中的测定值基本吻合. 考虑到 SIDEM 公司给出的系统实际生产数值是设备多次运行后的平均值,实际生产中数据也会有一定的波动,可以认为本研究建立的低温多效蒸发海水淡化模型是可信的.

表4 实际生产值与模拟计算结果的比较
Tab.4 Contrast of the actual production data and simulated results

效数	实际数值		模拟计算值	
	出口浓盐水排放量/(t·h ⁻¹)	淡水累积量/(t·h ⁻¹)	出口浓盐水排放量/(t·h ⁻¹)	淡水累积量/(t·h ⁻¹)
1	234.17	0	224.44	0
2	473.46	109.83	469.65	119.56
3	714.69	213.90	731.83	218.35
4	953.89	316.12	1 006.94	300.17
冷凝器	-	360.91	-	369.06
造水比	2.52		2.58	

4 结 语

本文通过应用 Aspen Plus 软件的 Heater、Flash2 和 Mixer 模块建立低温多效海水淡化系统的模型,并运用软件的灵敏度分析功能对多种模型进行了分析,得知体系的沸点升高和闪蒸罐对系统模型建立的影响. 并用法国 SIDEM 公司四效低温多效海水淡化装置进行可信性验证,证明采用 Aspen Plus 软件建立的低温多效蒸发海水淡化系统的模型是可信的.

参考文献:

[1] 谢冬雷. 带热压缩的低温多效蒸发海水淡化系统研究[D]. 大连:大连理工大学,2007.

[2] 刘克成,孙心利,马东伟,等. 低温多效海水淡化技术在发电厂的应用[J]. 河北电力技术,2008,27(4):5-6.

[3] Bruno J C,López-Villada J,Letelier E,et al. Modelling and optimisation of solar organic rankine cycle engines for reverse osmosis desalination[J]. Applied Thermal

Engineering,2008,28(17/18):2212-2226.

[4] Al-Shayji K A,Liu Y A. Predictive modeling of large-scale commercial water desalination plants: data-based neural network and model-based process simulation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2002, 41(25):6460-6474.

[5] 刘晓华,沈胜强,Klaus Genthner,等. 多效蒸发海水淡化系统模拟计算与优化[J]. 石油化工高等学校学报, 2005,18(4):16-19.

[6] 古雯雯. 基于 Aspen Plus 的太阳能与火电机组集成与性能分析[D]. 北京:华北电力大学,2009.

[7] 张宁,苏营营,苏华,等. 海水淡化中浓海水的综合利用研究[J]. 海洋科学,2008,32(6):85-88.

[8] 周宇阳,胡念苏,阚为民. 热力系统流程模拟计算的模块序贯及动态收敛技术[J]. 热力发电,1998(6):36-41.

[9] 柴晓军. 电厂低温多效海水淡化系统优化设计[J]. 电力技术,2010,19(3):42-45.

[10] 王永青. 低温多效蒸发海水淡化系统性能估算方法及公式[J]. 化工学报,2009,60(8):1889-1893.