

三倍浓缩顺流低温多效海水淡化工工艺的模拟与优化

刘治川

(中国电子工程设计院有限公司 北京市低温多效热法海水淡化工程技术研究中心,
北京 100142)

摘要: 在海水淡化装置排放盐水资源化利用的条件下,提高盐水浓度成为一种优选的处理方式。以各效蒸发器均能避免形成硫酸钙垢为前提,借助 PROII 流程模拟软件,计算出已有大型逆流、平流低温多效海水淡化装置的最大浓缩倍率均约为 2.1 倍。建立大型装置顺流工艺模型后,其最大浓缩倍率可达 3 倍,为此提出三倍浓缩顺流新工艺。在此基础上,对蒸发器效数、海水预热器数量、蒸汽喷射器抽气位置等参数进行模拟优化,结果表明优化后的排出盐水浓度为 10%,设计造水比为 16,并考察了热损失、喷射系数、预热器热端温差对造水比的影响。另外,通过 1 000 m³/d 中试装置的实际运行,验证了模型的可靠性以及新工艺运行的稳定性。

关键词: 三倍浓缩; 顺流工艺; 低温多效海水淡化; 模拟与优化

中图分类号: TU99 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)11-0098-06

Simulation and Optimization of Triple-concentrated Cocurrent Low Temperature Multi-effect Seawater Desalination Process

LIU Zhi-chuan

(Beijing Low Temperature Multi-effect Thermal Desalination Engineering Technology Research Center, China Electronics Engineering Design Institute Co. Ltd., Beijing 100142, China)

Abstract: Under the condition that discharged brine from a desalination plant is reused, increasing the brine concentration is a preferred treatment method. The experiment was carried out under the premise that each effect evaporator could avoid the formation of calcium sulfate deposit, and it was found that the maximum concentration ratios of existing large countercurrent and crosscurrent low temperature multi-effect seawater desalination plants were both about 2.1 times by using PROII process simulation software. A concurrent process model was established for a large plant, and its maximum concentration ratio was up to 3 times. So, a new triple-concentrated process was put forward. On the base of this, the number of evaporator effect, seawater preheater and steam ejector position were simulated and optimized. Under the optimized conditions, the discharged brine concentration was 10% and the design gained output ratio (GOR) was 16, and the influence of heat loss, ejection coefficient and preheater temperature difference at the warm end on GOR was investigated. In addition, the reliability of the model and the stability of the new process was verified through the operation of a 1 000 m³/d pilot plant.

Key words: triple-concentrated; cocurrent process; low temperature multi-effect seawater desalination; simulation and optimization

某海水淡化装置的海水浓缩倍率为2倍,是目前国内浓缩倍数最高的装置。如果将浓缩倍率提高至3倍,在相同海水进料量条件下,淡水产量将提高33%,同时副产盐水排放量减少33%,并且浓度可提高50%,将有利于下游盐场和盐化工企业进一步节省土地及能源,促进循环经济发展。因此,在排放盐水可资源化利用的条件下,进一步提高盐水浓度成为一种优选的处理方式。

目前,对于低温多效海水淡化工艺的研究热点主要集中于提高性能方面^[1~4],也有学者关注提高排放盐水浓度^[5],但可工业化应用的高浓缩倍率低温多效海水淡化工艺未见报道。因此,开发出高效的大型三倍浓缩海水淡化新工艺富有挑战且意义重大。

笔者借助流程模拟软件对大型三倍浓缩海水淡化装置的设计进行工艺流程开发和优化,首先考察了国际通用工艺流程模拟软件 PROII 在海水淡化方面的适用性和准确性,再利用该模拟软件开发适合大型装置的新工艺流程,并通过对关键参数的分析为设计和生产提供指导。另外,将一套 1 000 m³/d 的两倍浓缩逆流中试装置改造为三倍浓缩顺流中试装置,并利用该装置验证了模拟计算的可靠性和新工艺运行的稳定性。

1 流程模拟软件 PROII 的适用性检验

1.1 沸点升预测检验

PROII 软件在石油、化工行业已有广泛的应用,而在海水淡化行业的工程应用则少见报道。因此,需检验该软件在海淡行业中的准确性。

盐水浓度越高,沸点升在效间温差中所占比重就越大。沸点升对各效蒸发器操作条件的确定及换热面积计算都有很大影响,当效间有效温差 < 1.5 °C 时,即使沸点升预测只有 0.1 °C 的偏差,对换热面积的影响也大于 6.7%,这对大型装置换热结构设计影响非常明显。

将文献[6]中沸点升数据与 PROII 热力学模型预测的沸点升数据进行比较,其中温度-浓度对应关系符合顺流流程中各效温度-浓度分布,比较结果见表1。

从表1可以看出,海水沸点升的模型值与文献值最大绝对偏差大于-0.05 °C,最大相对偏差大于-5%,说明在工程应用范围内,利用软件自带热力学模型预测各效操作条件和计算效间换热温差是合

适的。

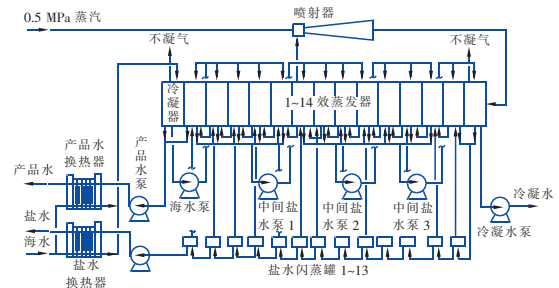
表1 沸点升模拟值与文献值比较结果

Tab. 1 Comparison results of boiling point between model value and literature value

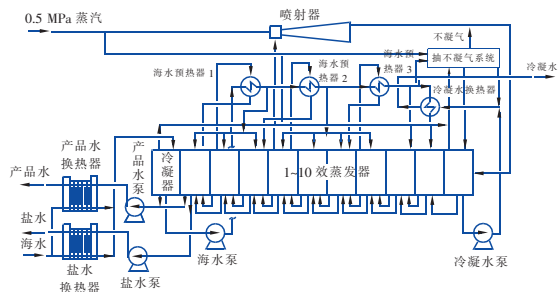
浓度/ %	温度/ °C	沸点升			
		模型值/ °C	文献值/ °C	绝对偏差/ °C	相对偏差/ %
4	75	0.523	0.513	0.010	1.95
6	65	0.747	0.762	-0.015	-1.97
8	55	0.969	0.999	-0.030	-3.00
10	45	1.181	1.221	-0.040	-3.28

1.2 模拟结果与设计结果比较

选取国内低温多效海水淡化逆流和平流装置中效数最多和造水比最高的代表性装置进行模拟计算。本试验采用的海淡装置规模为 2.5×10^4 m³/d, 海水流程为逆流分组^[7], 2倍浓缩, 首效蒸汽温度为 72 °C, 冷凝器海水出料温度为 42 °C, 具有 14 效蒸发器, 1 台冷凝器, 蒸汽喷射器从 9 效抽气。另一海淡装置规模为 2.5×10^4 m³/d, 海水流程为平流, 1.43 倍浓缩, 首效蒸汽温度为 65 °C, 末效盐水温度为 39 °C, 具有 10 效蒸发器, 1 台冷凝器, 蒸汽喷射器从 7 效抽气。依据上述数据利用 PROII 软件建立两套装置的数学模型, 逆流流程和平流流程见图1, 模拟数据和设计数据的对比结果见表2。



a. 14 效逆流 LT-MED 工艺流程



b. 10 效平流 LT-MED 工艺流程

图1 PROII 软件建立的装置模型示意

Fig. 1 Schematic diagram of device model established by PROII

表2 模拟数据与设计数据的对比结果

Tab.2 Comparison results of simulation value and design value

项 目	逆流流程		平流流程	
	模拟值	设计值	模拟值	设计值
海水进料量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	2 083.3	2 083.3	3 440	3 440
淡水产量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	1 041.7	1 041.7	1 041.7	1 041.7
进料海水 浓度/%	3.33	3.3	3.33	3.56
排出盐水 浓度/%	6.66	6.6	4.78	5.11
浓缩倍率/倍	2	2	1.43	1.43
喷射系数	0.67	0.67	0.96	0.96
蒸汽总进料量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	64.6 (无热损)	66.5	71.6 (无热损)	73.7

从表 2 可知,在海水进料量、浓缩倍率和喷射系数相同的条件下,蒸汽进料量的模拟结果与设计值吻合良好。综合表 1 和 2 可知,PROII 软件在低温多效海水淡化工艺流程模拟方面具有可靠性和实用性,可用于三倍浓缩海淡流程的开发和优化。

2 工艺流程分析与建立

常规低温多效蒸发海水淡化工艺中,海水浓缩倍率 ≤ 2 倍,蒸发温度 $\leq 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。三倍浓缩工艺中各效盐水浓度进一步提高,经模拟计算,总沸点升比2倍浓缩时升高了 $2\sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高蒸发温度也相应升高,增大了海水在传热面上结垢的趋势,而硫酸钙垢难以用常规酸洗方式清除。为保障系统可靠运行,除使用阻垢剂外,首先需要在工艺设计上采用减少产生硫酸钙垢的措施。

本试验依据海水不同形态硫酸钙溶解度曲线,利用已经建立的逆流和平流模型,保持各效操作温度不变,在仅改变进料条件下,定量计算各效蒸发器海水在避开硫酸钙结晶区间时的温度及浓度,从而在可工程应用的基础上探索出料海水最大浓缩倍率。逆流流程通过提高蒸汽进料量来提高浓缩倍率,而平流流程为满足各效喷淋量要求,海水进料量大,导致浓缩倍率较低。为获得平流流程能够达到最大的浓缩倍率,本试验通过增加盐水循环线、减小海水进料量从而保持喷淋量不变的方式提高浓缩倍率。图2为温度-浓度组合区间和硫酸钙溶解度曲线。从图2(a)可以看出,逆流流程中,首效盐水浓度为6.7%,出料盐水的最大浓度为7%,浓缩倍率

只能达到 2.1 倍左右。由图 2(b) 可知, 平流流程中, 虽然首效盐水浓度为 7.5%, 但出料盐水是各效盐水的混合物, 其最大浓度仅为 7%, 浓缩倍率也只能达到 2.1 倍左右。

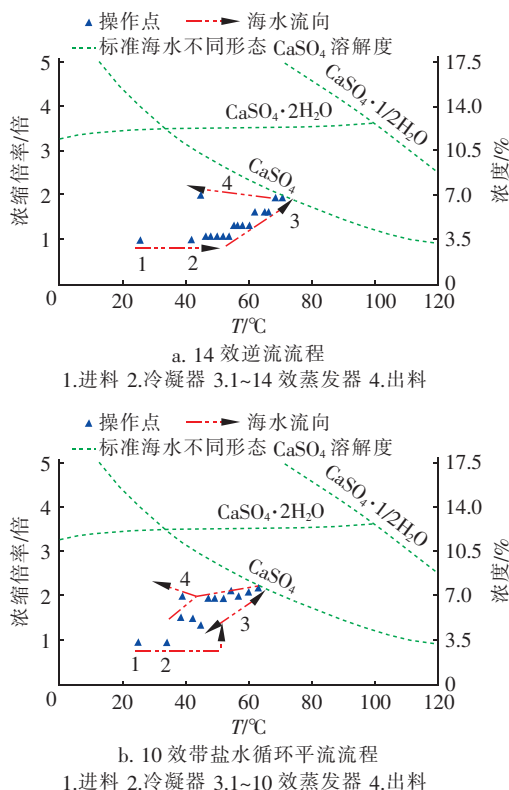


图2 温度-浓度组合区间和硫酸钙溶解度曲线
Fig.2 Limit of temperature-concentration and CaSO_4 solubility curve

新建 14 效顺流模型中,海水流程为顺流分组。分组依据为 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 装置的各效降膜蒸发器所需喷淋量。进料浓度为 3.33%,首效蒸汽温度为 75°C ,末效盐水温度为 43°C ,14 效蒸发器,1 台冷凝器,蒸汽喷射器从 10 效抽气,工艺流程见图 3。

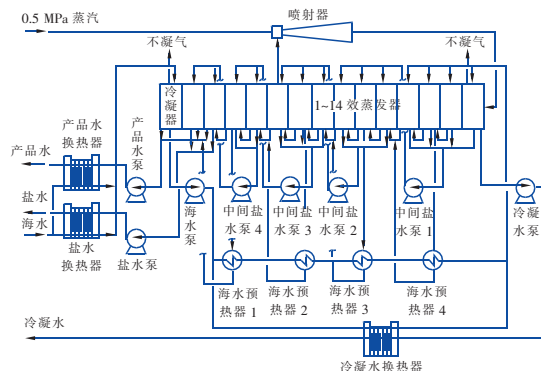


图3 14效顺流 LT-MED 工艺流程示意

Fig.3 Flow diagram of 14 effects cocurrent LT-MED process

该流程温度 - 浓度组合区间和硫酸钙溶解度曲线见图 4。

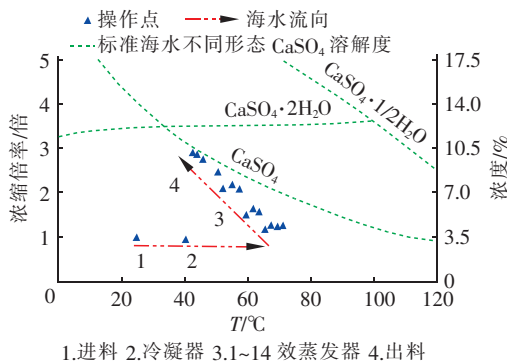


图 4 14 效顺流系统温度 - 浓度组合区间和硫酸钙溶解度曲线

Fig. 4 Limit of temperature-concentration and CaSO_4 solubility curve at 14 effects cocurrent flow

从图 4 可以看出,盐水排出浓度为 10%,整个系统的工作点都避开了硫酸钙结晶区间。通过上述分析可知,三倍浓缩采用顺流流程是可行的。但末两效的操作点接近硫酸钙结晶点,这两效阻垢剂的作用就变得非常重要,应当在后面几效的适当位置增加阻垢剂的加注点。也可以通过降低操作温度使这两效的操作点向左偏移,从而远离硫酸钙结晶曲线。

顺流流程中,后效操作的压力和温度比前效低,前效海水进入后效时会因过热而闪蒸,可以多产生一些二次蒸汽,这有利于提高造水比。但低温多效蒸发设备多采用水平降膜蒸发器,过热的水通过喷头喷淋到换热管时,会因闪蒸而对喷头产生冲蚀,因此需要控制进料海水过热度,并选择耐冲蚀的喷头材料。本试验过程中,顺流流程最大计算过热度约为 8°C ,气化率为 1.3%,经过调研,可以选择到合适的喷头。

3 流程结构优化

3.1 效数和海水预热器数量

海水进入系统的温度 $< 30^\circ\text{C}$,而首效组海水蒸发温度 $> 65^\circ\text{C}$,为减小进入首效组海水的过冷度,从能量梯级利用的角度考虑,可以利用不同温度的低品位二次蒸汽分级预热海水,避免直接用温度较高的动力蒸汽或首效二次蒸汽一次性预热海水,有利于提高造水比。目前国内海淡装置造水比最高为 15,其效数为 14。为获得较高造水比,以 14 效为基

准,当效数 + 预热器数分别为 $15 + 2$ 、 $14 + 4$ 、 $13 + 11$ 时,造水比分别为 16.33、16.49、16.56。相比于两倍浓缩工况,当产水量相同时,三倍浓缩工况的海水进料量减少了 25%。如果与两倍浓缩采用同样的效数和分組数,则喷淋密度会降低。此时如果增加效数将进一步降低喷淋密度,增加设备结垢危险,因此通过增加效数提高造水比的方法受到限制。可以看出, $13 + 11$ 方案造水比最高,是 13 效方案能够达到的最大值。 $14 + 4$ 方案造水比略低于前者,但该方案在满足各效喷淋密度前提下预热器数量少,安装操作简单,海水进料泵的扬程低,电耗少,因此选择 $14 + 4$ 方案。

3.2 蒸汽喷射器抽气位置

当加热蒸汽压力较高时,蒸汽喷射器是有效利用加热蒸汽压力能的重要手段。在动力蒸汽压力和首效压力一定的情况下,喷射系数大小与吸入口压力有关,抽吸位置越靠近蒸发器冷端,喷射器压缩比越高,所能提供的喷射系数越小,且其最大值受到喷射器的限制。根据不同位置下喷射器能达到的喷射系数,得到动力蒸汽压力为 0.5 MPa、首效蒸汽压力为 38 kPa 时,8 ~ 12 效抽吸位置下的造水比和首效加热蒸汽用量见表 3。

表 3 8 ~ 12 效抽气位置下的造水比和首效加热蒸汽用量

Tab. 3 GOR and heating steam consumption at 8 - 12 effects ejector position

抽吸位置	抽吸压力/ kPa	喷射系数	造水比	首效加热蒸汽用量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)
8 效	18.7	0.8	16.22	166
9 效	16.4	0.73	16.40	158
10 效	14.5	0.67	16.49	152
11 效	13.3	0.61	16.54	146
12 效	11.9	0.55	16.47	141

由表 3 可知,喷射器抽吸位置越靠近冷端,设备总换热面积越小,而造水比则有最高值,总体上位置靠后造水比高。但在蒸发器运行期间,若设备结垢导致换热温差增加时,喷射器位置越靠后,压缩比增加越快,喷射系数下降越多,对造水比的不利影响越大。因此,要根据操作运行的稳定性合理确定抽吸位置,不能一味追求高造水比。本试验中确定喷射器抽吸二次蒸汽的最佳位置为 10 效,此时造水比较高,换热面积适中,对压力变动的适应性适中。

3.3 热量回收

首效热侧排出的冷凝水温度 $> 72^\circ\text{C}$,将热量回

收,用于预热海水,可减少海水预热使用的二次蒸汽用量。较优的预热方式有两种:一是预热部分进料海水,将其与用二次蒸汽预热后的海水混合后进入首效组,平均分配至各效;二是预热部分进料海水,将其与用二次蒸汽预热后拟进入首效的海水混合,再进入首效。分别计算这两种方式以及海水不被冷凝水预热的造水比,结果见表 4。

表 4 冷凝水预热海水方式的对比结果

Tab. 4 Comparison results of condensate preheating seawater

项 目	二次蒸汽预 热后海水温 度/℃	冷凝水预 热后海水温 度/℃	首效海 水温 度/℃	造水比
和首效海水混合	65.74	66.83	66.08	16.493
和前 4 效海水混合	65.74	66.83	65.83	16.489
海水不被冷凝水预热	65.74	—	65.74	16.032

由表 4 可知,和首效海水混合方式造水比高于和前 4 效海水混合方式造水比,但二者差别很小。这是因为冷凝水量仅为海水进料量的 7%,能够预热的水量有限,被预热的水采用这两种方式混合对海水的升温作用差别不大,但如果冷凝水热量不被利用,造水比差距就比较明显。从方便操作与控制流量角度选择和前 4 效海水混合方式。由表 4 还可知,进入首效海水的温度越高,造水比越大,故应尽量提高进入首效海水的温度。

此外,为充分利用系统内温度较高的热量,将淡水和盐水逐效向下一效闪蒸,以回收其中的二次蒸汽。最后将仍高于海水进料温度的淡水和盐水与进

料海水换热,预热进料海水。所有这些措施都可减少高品位动力蒸汽用量,提高造水比。

4 关键参数对设计操作的影响

在实际运行过程中难以有效控制热损失、喷射系数、预热器热端换热温差,这些因素与设计的偏离都将影响造水比。通过已建数学模型分析上述因素对造水比的影响,结果表明热损失、喷射系数和预热器热端温差对造水比的影响较大,且近似呈线性关系。在进料量不变的条件下,热损失每增加 1%,造水比将减少 1.41;喷射系数每减少 0.1,造水比将减少 0.88;预热器热端温差每增加 1℃,造水比将减少 0.33。因此在设计过程中一定要注意保温材料的选择,并对保温层施工提出考核要求,严格控制热损失在工艺设计允许范围内;选择在较宽范围内喷射性能稳定的喷射器,结合其特性选择适合的控制方法,保证运行操作过程处于高效区;选择预热器时要留出足够的面积余量,以保证运行热端温差不大于设计值。

5 中试装置验证

将原有 14 效逆流两倍浓缩 1 000 m³/d 中试装置改造为顺流三倍浓缩 1 000 m³/d 中试装置。改造只能顺应原有结构进行调整,因此改造后的中试装置流程与大型装置的流程不完全一致。尽量保持中试装置各效操作条件与大型装置接近,重新建立中试装置数学模型,计算造水比,并考察计算值和运行值的偏差。大型装置设计数据和中试装置的运行结果见表 5。

表 5 大型装置和中试装置流程对比

Tab. 5 Process comparison between large-scale plant and pilot-scale plant

项 目	效数	效组数	喷射器 位置	预热器 数量	产品水闪 蒸数量	盐水闪蒸 罐数量	冷凝水热 量回收	计算 造水比	造水比	计算盐水 浓度/%	盐水浓 度/%
大型装置	14	5	10 效	4	12	5	有	17.25 (无热损)	16 (设计)	10	10 (设计)
中试装置	14	9	9 效	3	12	无	无	15.34 (无热损)	14.5 (实际)	10	10 (实际)

中试装置运行值与计算值的偏差约为 5.5%。中试装置处在室外海边环境,闲置 3 年且多年未运行维护,保温层受损,难以定量预估热损失,为此模拟计算中没有考虑热损失。若包括热损失的影响,偏差将进一步缩小。由表 5 可知,中试结果验证了模型的准确性,也进一步说明模拟软件 PROII 及其热力学模型用于三倍浓缩工艺的可靠性。中试装置 3 个月的运行结果也验证了顺流工艺的稳定性。

虽然大型装置和中试装置效数一样,但与造水比密切相关的结构参数,如喷射器位置、预热器数量、冷凝水热量回收和盐水闪蒸罐数量等却比后者好。二者皆以无热损造水比计算值为基准进行对比,前者设计余量为 7.2%,大于后者的运行偏差,而且同样外部环境条件下,理论上大型装置热损失百分比小于小型装置的,因此大型装置造水比设计值定为 16 是合理的。

中试装置蒸发冷凝设备直径为2.6 m,总长为80 m,换热管直径为18 mm,属于工业规模的装置。

6 结论

① 所选电解质热力学模型能准确预测沸点升,已建装置模拟结果与设计结果相符,流程模拟软件PROII可用于描述三倍浓缩低温多效海水淡化过程。

② 通过模拟计算,逆流及平流工艺流程的最大浓缩倍率约为2.1倍,顺流流程为3倍,并提出了三倍浓缩顺流新工艺。优化流程结构参数,优化后排出盐水浓度为10%,造水比为16。定量分析了热损失、喷射系数及预热器热端温差等关键参数对造水比的影响,并提出了设计和生产注意事项。

③ 通过1 000 m³/d三倍浓缩顺流中试装置的运行,验证了新工艺运行的稳定性以及为大型装置所建数学模型的可靠性。该流程可为大型三倍浓缩海水淡化装置提供工艺流程设计依据,也可为盐水零排放和资源化利用提供参考。

参考文献:

- [1] 周士鹤. 低温多效蒸发海水淡化系统热力性能分析与优化研究[D]. 大连:大连理工大学,2016.
Zhou Shihe. Thermal Performance Analysis and Optimization of Low Temperature Multi-effect Evaporation Desalination System[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2016(in Chinese).
- [2] 孙小军,王晓攀,刘克成,等. 低温多效海水淡化进料方式的比较与分析[J]. 水处理技术,2010,36(11):120-122,127.
Sun Xiaojun, Wang Xiaopan, Liu Kecheng, et al. Comparison and analysis of LT-MED feed water arrangements [J]. Technology of Water Treatment, 2010, 36(11): 120-122, 127(in Chinese).
- [3] 齐春华,邢玉雷,孙鹏浩,等. 余热驱动低温蒸馏海水淡化系统工艺流程及性能分析[J]. 太阳能学报, 2017, 38(6): 1692-1698.
Qi Chunhua, Xing Yulei, Sun Penghao, et al. Process flow and performance analysis of low temperature distilled seawater desalination system driven by waste heat[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017, 38(6): 1692-1698(in Chinese).
- [4] 江浩,阮奇,周江建. 高效节能海水淡化热泵并流多效蒸发系统研究[J]. 计算机与应用化学,2015,32(9):1129-1134.
Jiang Hao, Ruan Qi, Zhou Jiangjian. Research on high efficiency and energy-saving concurrent multi-effect evaporation system with heat pump for desalination[J]. Computers and Applied Chemistry, 2015, 32(9): 1129-1134(in Chinese).
- [5] 郑飞飞,杜亚威,刘燕,等. 多相流蒸发法高浓缩率海水淡化系统的热力学性能分析[J]. 水处理技术, 2014, 40(11): 52-56.
Zheng Feifei, Du Yawei, Liu Yan, et al. Thermodynamic analysis of multiphase flow evaporation seawater desalination system with high concentration rate[J]. Technology of Water Treatment, 2014, 40(11): 52-56(in Chinese).
- [6] Sharqawy M H, Lienhard V J H, Zubair S M. Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data[J]. Desalination and Water Treatment, 2010, 16(1/3): 354-380.
- [7] 张怀军. 低温多效海水淡化装置调试问题的分析及处理[J]. 水处理技术, 2012, 38(7): 111-114, 118.
Zhang Huaijun. Analysis and solution of the problems during commissioning of MED desalination system[J]. Technology of Water Treatment, 2012, 38(7): 111-114, 118(in Chinese).



作者简介:刘治川(1971-),女,黑龙江密山人,本科,高级工程师,主要研究方向为海水淡化工艺技术。

E-mail: liuzhichuan@ceedi.cn

收稿日期:2017-12-13