

# 核电站蒸发塔分离效率试验研究

郑伟, 吕永红, 白冰, 杨明辉

(中核华核核电技术研究院有限公司, 广东 深圳 518124)

**摘要:** 通过对核电站的硼酸回收系统中蒸发塔分离效率进行理论分析, 设计蒸发分离试验平台, 对模拟料液进行蒸发试验, 结果表明: 回流比对蒸发效率影响较大, 操作压力对蒸发效率影响并不显著。蒸发塔的回流比为 20% 和 30% 优于回流比为 10% 的蒸馏分离效果; 蒸发塔在蒸汽流速超过额定流速 25.9% 的条件下, 蒸馏液含硼浓度仍然小于 5 mg/kg。放射性替代试验显示蒸发塔对不易挥发放射性核素的去污因子达到 1 150。试验塔在保持与在役设备具有相同气相流速和液相流速的条件下, 蒸馏液含硼浓度水平达到核电站的运行要求。

**关键词:** 核电站; 硼酸回收系统; 蒸发塔; 回流比; 去污因子

中图分类号: TL941+.12 文献标识码: A  
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.030

## 引言

核电站在排出或再利用放射性废物之前, 必须采用必要的工艺对其进行处理, 经检测符合国家标准才能进行排放或回收再利用。为此压水堆核电站设置了一整套排出物的处理和排放系统, 其中 TEP (硼酸回收系统) 的功能是使硼酸废液能够实现循环利用。蒸发塔蒸发操作是 TEP 系统中最为重要的环节, 其分离效率是影响整个硼酸回收系统效能的关键因素<sup>[1-4]</sup>。国内还未实现核电站 TEP 系统蒸发设备的自主研制, 为解决我国核电 TEP 蒸发设备依赖国外进口的现状, 本研究设计 TEP 蒸发试验平台, 探索硼酸-水的分离规律, 以确定适合核电站硼酸-水分离的适宜条件, 为国内 TEP 蒸发设备的自主设计提供理论依据和试验数据。

## 1 TEP 系统蒸发装置简介

TEP 系统的主要功能是收集来自化容系统下泄管线以及来自核岛排气和疏水系统的可复用一回路冷却剂, 经过滤、除盐、除气和硼水分离后, 向反应堆

REA (硼水补给系统) 提供含硼浓度小于 5 mg/kg 的蒸馏水和硼浓度为 7 700 mg/kg 左右的硼酸溶液。TEP 系统的硼酸-水分离功能由蒸发装置来完成, 主要由蒸发塔、立式再沸器、立式冷凝器、强制循环泵、再生式热交换器、2 台分别用于蒸馏液和浓缩液的冷却器、进料泵、蒸馏液输送泵和相应的管道、阀门及仪表组成, 其流程简图如图 1 所示。蒸发塔为连续精馏塔<sup>[3]</sup>, 原料液经过预热到指定温度后, 送入到再沸器中产生上升蒸汽。每层塔板上, 冷凝回流液体与上升蒸汽互相接触进行热量和物质的传递, 实现硼酸与水的分离。

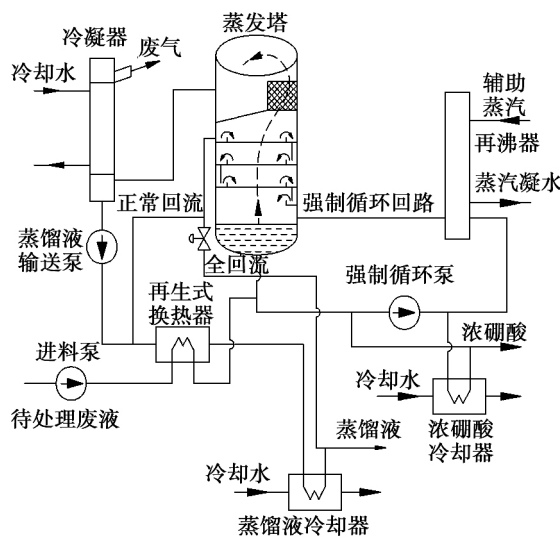


图 1 TEP 系统蒸发装置流程简图

Fig. 1 The flow schematic diagram of TEP system evaporation equipment

## 2 试验研究

### 2.1 试验条件

试验总体参数设置如表 1 所示。

收稿日期: 2014-10-16; 修订日期: 2014-12-09

作者简介: 郑伟 (1986-), 男, 四川达州人, 中核华核核电技术研究院有限公司工程师。

### 2.2 试验过程

试验使用高纯度硼酸或  $MgSO_4$ 。首先依比例配入去离子水中,配置成进料液。蒸发塔蒸馏试验主要完成预升温、充注、全回流升温、蒸馏液生产、浓缩液取样、冷却降温及倒灌 7 大工况。其中预升温、充注、全回流升温主要将系统调至稳定状态,为蒸馏液生产作准备。当试验系统进入蒸馏液生产稳定状态后,将每隔 15 min 取蒸馏液样品待检测。当完成蒸馏液生产工况后进行浓缩液取样,并取样检测。

表 1 蒸发塔试验总体参数

Tab.1 The overall parameters of evaporation column test

参 数	数 值
塔底温度/°C	100 - 104.6
塔顶温度/°C	100 - 104.3
试验压力/MPa	0.1 - 0.12
进料液流量/kg · h <sup>-1</sup>	0 - 430
进料液含硼、Mg <sup>2+</sup> 浓度/mg · kg <sup>-1</sup>	0 - 2 300
目标蒸馏液含硼浓度/mg · kg <sup>-1</sup>	<5

注:介质为硼酸或  $MgSO_4$  溶液。

### 2.3 试验结果

#### 2.3.1 压力影响试验

为研究操作压力对蒸发塔蒸发分离效率的影响,特分析蒸发塔在塔顶不同操作压力条件下的蒸馏液含硼浓度,将浓缩液含硼浓度为 7 700 mg/kg 时蒸馏液含硼浓度汇总如表 2 所示。

表 2 不同压力条件下的蒸馏试验

Tab.2 The evaporation experiments in different pressures

序号	回流比/%	平均压力/MPa	含硼浓度/mg · kg <sup>-1</sup>
A	10	0.103	3.94
B	10	0.110	3.13
C	20	0.110	1.54
D	20	0.117	2.33

对比试验 A 和 B,在回流比相同的情况下,B 试验压力相对于 A 的压力有较大提高,而对应的蒸馏液硼浓度有小幅度的减小,由 3.94 mg/kg 变至 3.13 mg/kg,操作压力对蒸发分离效率影响不大,且两种情况下蒸馏液的含硼浓度均小于 5 mg/kg,满足核电站运行要求。

以试验 A、C 与 D 蒸馏液含硼浓度值为纵坐标,取样标号为横坐标绘制成不同操作压力下蒸馏液含硼浓度变化曲线,如图 2 所示。

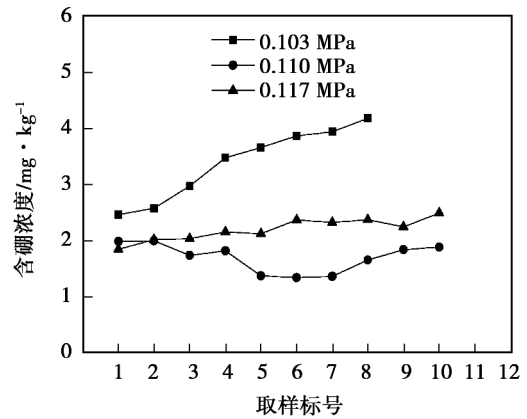


图 2 不同操作压力下硼浓度变化曲线

Fig.2 The curves of boric in different pressures

对比 A、C 和 D,试验压力从 0.103 MPa 变化至 0.110 和 0.117 MPa,蒸馏液含硼浓度从 3.94 mg/kg 变化至 1.54 和 2.33 mg/kg,变化不大,且均满足小于 5 mg/kg 的要求。在 0.1 - 0.12 MPa 的范围,试验压力对蒸发塔的分离效率影响较小。

#### 2.3.2 回流比试验研究分析结果

为研究操作回流比对蒸发塔蒸发分离效率的影响,特分析蒸发塔在不同操作回流比情况下蒸发塔产出的蒸馏液含硼浓度。将浓缩液含硼浓度为 7 700 mg/kg 时蒸馏液含硼浓度汇总如表 3 所示。

表 3 不同回流比条件下的蒸馏试验

Tab.3 The evaporation experiments in different reflux ratios

序号	回流比/%	平均压力/MPa	含硼浓度/mg · kg <sup>-1</sup>
a	0	0.103	16.64
b	10	0.103	3.94
c	10	0.110	3.13
d	20	0.110	1.54
e	30	0.110	1.77

对比试验 a 与 b,在操作压力均为 0.103 MPa 的情况下,回流比从 0(无回流液)变至 10%,蒸馏液含硼浓度从 16.64 mg/kg 变至 3.94 mg/kg。以试验 a 与 b 蒸馏液浓度值为纵坐标,取样标号为横坐标,如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 在无回流液的情况下, 蒸馏液的含硼浓度很快超过 5 mg/kg, 即不能满足小于 5 mg/kg 的分离目标。而将回流比变化至 10%, 蒸馏液浓度达到 3.94 mg/kg, 满足了分离目标。

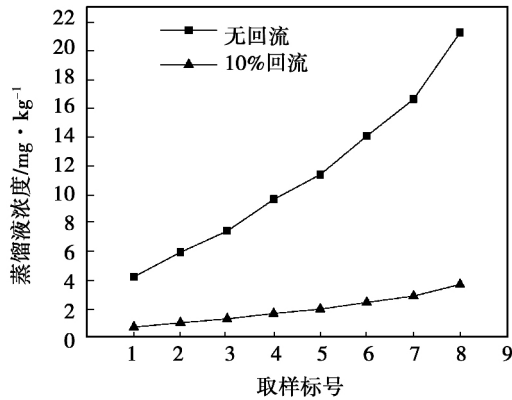


图 3 两种回流条件下硼浓度变化曲线  
Fig. 3 The curves of boric in two different reflux ratios

同样以试验 c、d 和 e 蒸馏液浓度值为纵坐标, 取样标号为横坐标, 如图 4 所示。

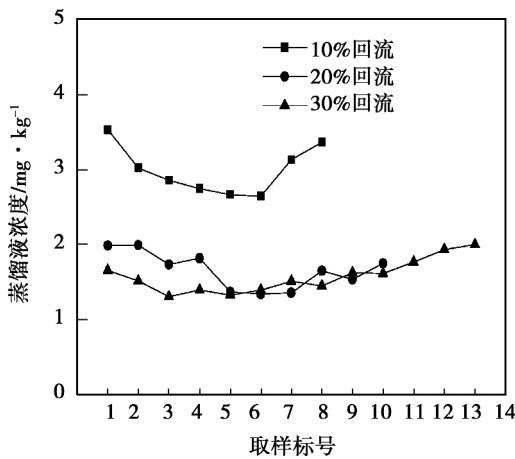


图 4 不同回流条件下硼浓度变化曲线  
Fig. 4 The curves of boric in different reflux ratios

结合表 3 与图 4 对比试验 c、d 和 e 操作压力均在 0.110 MPa 左右的情况下, 回流比从 10% 变化至 20% 和 30%, 蒸馏液浓度从 3.13 mg/kg 变化至 1.54 和 1.77 mg/kg, 变化不大, 且均满足小于 5 mg/kg 的要求。可以看出, 回流比在 20% 及 30% 的情况下, 蒸馏液浓度较低。因此得出, 蒸发塔的回流比大于

20% 时, 蒸馏分离效果优于回流比为 10% 时。

### 2.3.3 蒸汽流速试验研究

经过之前的试验研究, 蒸发塔在额定的蒸汽流速条件下 (342 kg/h), 能满足核电站分离要求。为考察蒸发塔在蒸汽流量增大的情况下的分离状况, 做了加大再沸器的热功率, 从而增大蒸发塔内的蒸汽流量的试验。相关参数如表 4 所示。

表 4 蒸汽流速试验参数

Tab. 4 The experiment of gas velocity of vapour

参 数	数 值
塔顶压力/MPa	0.115 - 0.117
塔底温度/℃	104.0 - 104.4
进料含硼浓度/mg · kg <sup>-1</sup>	2 242
平均蒸汽流量/kg · h <sup>-1</sup>	430.70
回流量/m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0.062
回流比/%	16.8
进料流量/m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup>	0.372 - 0.392

由表 4 可知, 平均流量约为 430.70 kg/h, 回流量约为 0.062 m<sup>3</sup>/h, 回流比为 16.8%, 进料液含硼浓度为 2 242 mg/kg, 进料量维持在 0.372 - 0.392 m<sup>3</sup>/h 左右时系统较为稳定, 相关试验数据结果如表 5 所示。

表 5 蒸汽超额定流量试验

Tab. 5 The over ranging flow test of vapour

样品	硼酸浓度/mg · kg <sup>-1</sup>	含硼浓度/mg · kg <sup>-1</sup>
进料液	12 368	2 242.6
蒸馏液	16.95	2.9
蒸馏液	15.75	2.7
蒸馏液	14.53	2.5
蒸馏液	15.51	2.6
蒸馏液	17.36	2.9
浓缩液	48 238	8 402.7

将蒸馏液含硼浓度变化绘制成曲线, 如图 5 所示。从图 5 可以看出, 在表 4 设置的条件下, 蒸馏液含硼浓度达到了 5 mg/kg 以下。随着蒸馏过程不断进行, 强制循环回路的硼浓度不断升高, 被蒸汽携带进入蒸馏液的微量液滴则含有更多硼酸, 因而蒸馏液的硼浓度会逐渐升高。从表 5 可以看出, 浓缩液含硼浓度达到 8 402.7 mg/kg 时, 蒸馏液浓度小于 3

mg/kg。总的来说,在表 4 设置的总体参数条件下,蒸馏液含硼浓度均达到了小于 5 mg/kg,满足了分离要求。在蒸汽流量增至 430.70 kg/h,仍然能够实现硼酸与水的分离,并达到了蒸馏液硼酸浓度小于 5 mg/kg 的要求。即蒸汽流量超过正常工况额定值的 25.9%,蒸馏液含硼浓度仍然满足小于 5 mg/kg 的要求,表明蒸发塔具有较高的操作弹性。

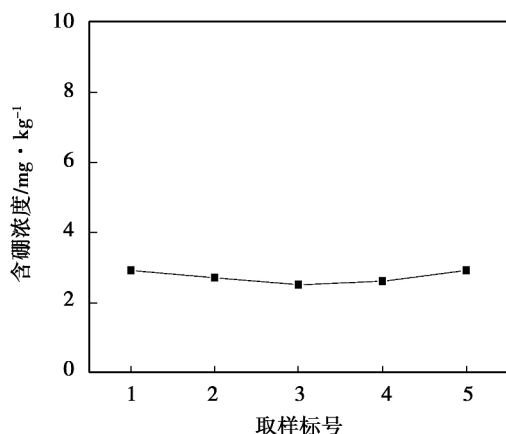


图 5 不同取样标号的含硼浓度变化曲线

Fig. 5 The curves of the changes of boric acid concentration varying by sample number

### 2.3.4 放射性替代分离试验

为考察蒸发塔对其它放射性核素的分离状况,放射性盐类试验用硫酸镁 MgSO<sub>4</sub> 进行替代试验。相关参数设置如表 6 所示。

表 6 硫酸镁和硼酸的蒸发试验

Tab. 6 The evaporation experiment of MgSO<sub>4</sub> and boric acid

参 数	数 值
塔顶压力/MPa	0.111 - 0.119
塔底温度/℃	103.6 - 105.0
进料液含 Mg <sup>2+</sup> 浓度/mg · kg <sup>-1</sup>	2 300
进料液含硼浓度/mg · kg <sup>-1</sup>	2 300
蒸汽流量/kg · h <sup>-1</sup>	339.93
回流比/%	20
进料流量/m <sup>3</sup> /h	0.281 - 0.304

由表 6 可知,平均流量为 339.93 kg/h,回流量约为 0.062 m<sup>3</sup>/h,回流比为 20%,进料液含硼浓度为 2 300 mg/kg,含 Mg<sup>2+</sup> 浓度为 2 300 mg/kg,进料量维持在 0.281 - 0.304 m<sup>3</sup>/h 左右时系统较为稳

定,相关数据如表 7 所示。

表 7 硫酸镁和硼酸试验结果

Tab. 7 The evaporation experiment result of MgSO<sub>4</sub> and boric acid

样 品	含硼浓度/mg · kg <sup>-1</sup>	含 Mg <sup>2+</sup> 浓度/mg · kg <sup>-1</sup>
进料液	2 300	2 300
蒸馏液	2.5	2.1
蒸馏液	2.1	2.6
蒸馏液	2.0	1.5
蒸馏液	2.2	2.9
蒸馏液	2.3	1.6
蒸馏液	2.3	2.5
蒸馏液	2.4	1.8
蒸馏液	2.6	1.6
蒸馏液	2.8	1.6
蒸馏液	2.1	2.1
蒸馏液	2.2	2.0
浓缩液	7 820	7 780

将蒸馏液含硼浓度、Mg<sup>2+</sup> 浓度的变化绘制成曲线,如图 6 所示。

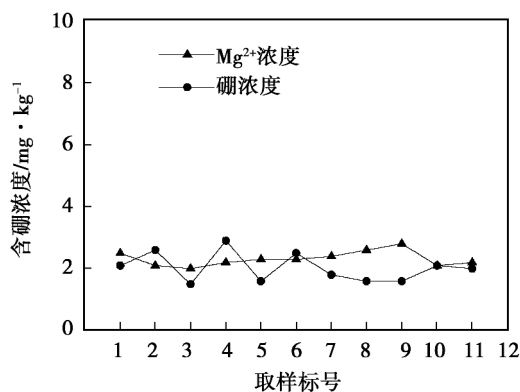


图 6 硼浓度、Mg<sup>2+</sup> 浓度的变化曲线

Fig. 6 The changing curves of boric and Mg<sup>2+</sup>

从图 6 可以看出,在表 6 设置的条件下,蒸馏液含硼浓度与 Mg<sup>2+</sup> 浓度均达到了 5 mg/kg 以下。随着时间的推移,蒸馏过程不断进行,强制循环回路的硼浓度不断升高,被蒸汽携带进入蒸馏液的微量液滴则含有更多硼酸,因而蒸馏液的硼浓度会逐渐升高。由表 7 可以看出,进料液在含硼与 Mg<sup>2+</sup> 浓度相同的水平下,对应蒸馏液含硼与 Mg<sup>2+</sup> 浓度也处于同

等水平。浓缩液在含硼浓度为 7 820 mg/kg 的条件下,对应蒸馏液含硼浓度为 2.2 mg/kg。浓缩液在含  $Mg^{2+}$  浓度为 7 780 mg/kg 的条件下,对应蒸馏液含  $Mg^{2+}$  浓度为 2.0 mg/kg。

综上所述,浓缩液含硼与  $Mg^{2+}$  浓度均为 7 800 mg/kg左右的情况下,相应蒸馏液浓度均达到了 5 mg/kg以下,且均在 2 mg/kg 附近。因此在总体条件一致的条件下,蒸发塔对硼酸及  $Mg^{2+}$  的蒸发效率近似相同,这与理论分析的结论一致:由于硼酸、各种盐类与水的沸点相差很大,硼酸及各盐组分均不会挥发,因而认为塔底蒸发出的气相中不含盐蒸汽,均为水蒸汽。而塔顶蒸出的气相冷凝后,冷凝液中所含微量盐分是由塔内蒸汽上升携带的含一定盐浓度的液滴所致<sup>[5-8]</sup>。因此,若盐类与操作温度下蒸汽压相差较大的前提下,塔内液相浓度降低与蒸汽流速、塔板结构及丝网除沫器效率有关,而与溶质种类无关。故可用其中一种盐组分(如  $MgSO_4$ )作为代表来试验,通过试验测得数据,即可反映出其它盐类组分的分离情况。因此可由  $MgSO_4$  溶液试验结果判断蒸发塔对其它不易挥发放射性核素的蒸发分离水平。由此可得:不易挥发放射性核素在表 5 所示的总体条件下,蒸发塔的去污因子约为 1 150。

### 3 结 论

经过多次试验,考察了不同进料浓度、不同回流比、操作压力以及蒸汽流量对蒸馏液产品含硼浓度的影响。得到如下结论:

(1) 筛板塔加丝网除沫器的蒸发塔在表 1 中设置的总体参数条件下,蒸馏液含硼浓度达到了小于 5 mg/kg 的核电站运行要求,并能长期稳定运行;

(2) 蒸发试验系统在蒸汽流量 342 kg/h 时以及在增加蒸汽流量至 430 kg/h 的情况下,蒸馏液均达到了分离要求,满足核电站运行要求,蒸发塔具有较高的操作弹性,证明筛板塔适于硼酸与水的分离;

(3) 经过对不同进料浓度、不同回流比、操作压力以及蒸汽流量进行试验得知,进料浓度、回流比以及蒸汽流量对蒸发塔的分​​离效果影响较为显著,操作压力在一定范围内对蒸发塔的分​​离效果影响不

明显;

(4) 通过对比蒸发塔对硼酸以及硫酸镁的放射性替代分离试验,蒸发塔对不易挥发放射性核素组分的去污因子达到 1 150。

### 参考文献:

- [1] 张秋香,姜元涛,熊丹柳,等.筛板精馏塔的板效率研究[J].化学工程,2011,39(7):18-21.  
ZHANG Qiu-xiang,JIANG Yuan-tao,XIONG Dan-liu,et al. Research on tray efficiency of sieve tray[J]. Chemical Engineering, 2011,39(7):18-21.
- [2] 雷志刚,陈标华,李成岳.筛板塔气液固三相塔板效率的实验[J].过程工程学报,2002,2(2):97-100.  
LEI Zhi-gang,CHEN Biao-hua,LI Cheng-yue. Murphree efficiency of sieve tray in a gas-liquid-solid system LEI[J]. The Chinese Journal of Process Engineering 2002,2(2):97-100.
- [3] 贾绍义,柴致敬.化工传质与分离过程[M].北京:化学工业出版社,2005.  
JIA Shao-yi,CHAI Zhi-jing. Chemical mass transfer and separation process[M]. Chemical Industry Press,2005.
- [4] 郑伟,林鹏,陆杰.CPR1000蒸发塔硼酸-水分离效率研究[J].应用化工,2013,38(42):5-7.  
ZHENG Wei,LIN Peng,LU jie. Research on boric acid-water separation efficiency of evaporation column of CPR1000[J]. Applied Chemical Industry,2013,38(42):5-7.
- [5] 裘俊红.筛板流体力学性能研究新进展[J].石油化工设备,2001,30(3):27-35.  
QIU Junhong. Recent advances in hydrodynamic performance of sieve trays[J]. Petro-chemical Equipment,2001,30(3):27-35.
- [6] Jacimovic B M. Entrainment effect on tray efficiency[J]. Chemical Engineering Science,2000,55(18):3941-3949.
- [7] Liu Shixun. Theoretic analysis for gravity separation of water droplets in PWR steam generator[J]. China Nuclear Science and Technology Report,1996,(00):1-10.
- [8] 李群生,刘静,许莉,等.新型导向筛板-浮阀复合塔板的流体力学性能研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2011,38(3):1-5.  
LI Qunsheng,LIU Jing,XU Li,et al. A new flow guided sieve-floating valve tray and hydromechanics[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition),2011,38(3):1-5.

(姜雪梅 编辑)

duction capacity and efficiency. It has been found that the temperature in the oxidation zone increases from 500 °C to 800 °C ,the hydrogen content increases by 12.23% ,the CH<sub>4</sub> content increases by 98% and the total fuel gas content increases from 15% to 34% . The heating value of the fuel gas will increase according to a linear law with an increase of the temperature. When the temperature is 800 °C ,the heating value of the fuel gas will slightly decrease after attaining its maximum value of 6.76 MJ/Nm<sup>3</sup> . The magnitude of the heating value is mainly influenced by the magnitude of the CH<sub>4</sub> content. After the operation of the gasifier has been stable ,the gasification efficiency will be in a range from 71.64% to 76.64% ,thus enjoying a good adaptability to the fuels having big densities and high heating values such as biomass particles and attaining relatively ideal gasification performance. **Key words:** biomass downdraft type gasifier ,pyrolytic gasification technology ,heating value ,gas constituent ,gas production efficiency

**核电站蒸发塔分离效率试验研究 = Experimental Study of the Separation Efficiency of a Vaporization Tower in a Nuclear Power Station** [刊 汉] ZHENG Wei ,LU Yong-hong ,BAI Bing ,YANG Ming-hui ,LU Jie ( China Kehua Nuclear Power Technology Research Institute Co. Ltd. ,Shenzhen ,China ,Post Code: 518124) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 ,30(6) . -941 -945

Through a theoretical analysis of the separation efficiency of a vaporization tower in a boric acid recovery system in a nuclear power station ,a vaporization and separation test rig was designed for performing a vaporization test of the liquid simulated. It has been found that the return flow ratio has a relatively big influence on the vaporization efficiency and the operating pressure has no remarkable influence on the vaporization efficiency. The distillation and separation efficiency when the return flow ratio of the vaporization tower is 20% and 30% respectively is superior to that when the return flow ratio of the vaporization tower is 10% . Under the condition of the steam flow speed in the vaporization tower exceeding the rated flow speed by 25.9% ,the boron content of the distillate remains less than 5 mg/kg. The radiation alternative test results show that the decontamination factor of the vaporization tower to the radionuclides difficult to be volatile attains 1 150. It has been found that under the condition of the gas phase flow speed and liquid phase flow speed in the test tower keeping identical to those in the in-service equipment items ,the boron content of the distillate can meet the requirements for operation of nuclear power stations. **Key words:** nuclear power station ,boric acid recovery system ,vaporization tower ,return flow ratio ,decontamination factor