

核电站硼回收处理系统蒸发塔放大效应研究

李书周¹, 王腾蛟², 陆杰², 刘夏杰²

(1. 苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215000; 2. 中科华核电技术研究院有限公司, 广东 深圳 518124)

摘要: 针对核电站硼回收处理系统蒸发塔的实际和试验塔的放大效应, 分析确定了影响蒸发塔中汽液两相接触过程的主要参数, 并由此提出了原型塔与试验塔的相似准则; 对试验塔设计时直接采用了与原型塔相同的塔板结构参数, 由于试验介质和操作温度压力相同, 自行满足了放大准则的要求, 然后利用其余准则计算确定了满足放大要求的试验塔的参数, 通过对试验结果进行分析, 论证了试验塔设计的正确性与合理性。

关键词: 核电站; 硼回收系统; 蒸发塔; 放大效应

中图分类号: TL345 **文献标识码:** A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.033

引言

硼回收处理系统为核电站三废处理系统中的重要系统之一。该系统主要包含除盐、脱气和蒸发3个单元。其中, 蒸发单元采用蒸发塔蒸馏浓缩处理方式, 对反应堆冷却剂进行处理, 所得蒸馏液为纯净水, 用于反应堆冷却剂的补给水; 浓缩液为硼酸溶液, 用于调节反应堆功率。

化工行业中, 由于原型设备较大, 前期做试验时, 都会采用缩放的试验样机进行研究, 而后通过放大效应分析计算, 将试验结果应用到原型设备中去, 这一过程在业界已得到一致认可。然而在核电行业中, 出于对设备安全重要性的考虑, 十分关注放大效应对设备的影响, 本研究通过定量计算, 结合试验数据分析, 印证了放大效应在核电类蒸发塔上同样适用, 且可为核电设备的研制节省大量的时间和经济成本。

本研究参考压水堆核电站硼回收处理系统蒸发塔的结构形式, 进行试验塔的研制。试验塔的处理量、塔径、传质面积以及蒸汽流量等运行参数按等比例缩放, 其它结构参数和运行参数与原型塔保持一致。研究试验塔的放大效应需重点研究塔径和处理

量等比例缩放对蒸发塔硼水分离效果的影响^[1], 本研究选取了汽液接触形式和液沫夹带量作为主要影响因素进行分析比较^[2], 从而论证塔径和处理量的等比例缩放适用于该装置。

原型塔与试验塔运行参数如表1所示。

表1 原型塔和试验塔运行参数

Tab. 1 Operating parameters of the original and testing tower

基本参数	原型塔	试验塔	说明
处理量/kg·h ⁻¹	115 000	2 321.167	原型机比例缩小
塔内上升蒸汽流量/kg·h ⁻¹	3 850	342.651 7	原型机比例缩小
回流量/kg·h ⁻¹	350	31.150 15	原型机比例缩小
塔径/m	1.8	0.6	原型机比例缩小
传质面积/m ²	2.5	0.196 3	原型机比例缩小
塔板间距/m	0.35	0.302	原型机比例缩小
塔有效高度/m	0.604	0.604	原型机比例缩小
回流温度/℃	98.5	98.5	与原型机同
塔内操作压力(绝压)/MPa	0.11	0.11	与原型机同
塔内蒸汽温度/℃	102.6	102.6	与原型机同
进料液硼酸浓度/mg·L ⁻¹	0-2 300	0-2 300	与原型机同
蒸馏液含硼目标浓度/mg·L ⁻¹	0-5	0-5	与原型机同
浓缩液含硼目标浓度/mg·L ⁻¹	7 000-7 700	7 000-7 700	与原型机同
塔板	结构尺寸相同		

由表1可以看出, 试验塔的回流温度、塔内操作压力、塔内蒸汽温度、进料液硼酸浓度、塔板机构尺寸与原型塔保持相同; 与原型塔相比, 试验塔的处理量、塔内上升蒸汽流量、回流量、塔径、传质面积、塔板间距和塔有效高度同比缩小。

收稿日期: 2014-11-25; 修订日期: 2015-03-27

作者简介: 李书周(1974-), 男, 重庆人, 天津大学高级工程师。

1 试验模型参数

蒸发塔的硼水分离过程是一个受汽液流体动力学控制、同时有传热传质发生的复杂两相流过程^[3-6],其过程相似准则尚不能完全确定。因此,为了用模型试验模拟原型系统硼水分离过程,并使其结果可放大应用于原型设备,试验蒸发塔尽可能地采用了与原型系统相同的参数,尽量减少试验变量。为此,试验塔系统设计在如下方面采用了与原型塔系统相同的参数:

(1) 相同结构的筛板塔及塔板结构参数

试验塔直接采用了与原型塔相同的汽液接触方式,即采用筛板实现气液接触,且筛板结构形式与参数亦与原型塔相同,包括相同的筛孔直径 d 、相同的开孔率 α 、相同的单位面积开孔数 n' 、相同的溢流堰高度 h (因为蒸发塔降液量很小,所以塔板液层高度与溢流堰高度 h 近似等同,可认为两塔具有相同的静液层高度)。

(2) 相同筛板数、筛板间距及蒸发室空间

两塔塔板数均为3块,板间距均为302 mm,且塔底蒸发室液面上方空间高度一致。

(3) 相同的试验介质及操作温度和压力

试验溶液采用与原型塔浓度相同的硼酸溶液,试验塔采用与原型塔相同的介质和操作温度与压力。

2 分析计算

2.1 硼水分离过程控制因素及主要特征参数

2.1.1 影响硼水分离过程的控制因素

蒸发塔硼水分离原理是液沫混合更新,其过程是一个受汽液两相流体动力学控制并同时有传热传质发生的过程。因此,在蒸发塔既定的汽-液介质、进出口压力-温度边界条件下,控制蒸发塔脱盐过程及效果的关键因素,包括:

(1) 液沫夹带行为——液沫夹带量大小的控制因素。

(2) 塔板汽液接触行为(方式、状态、时间)——液沫混合更新、汽液传热传质的控制因素。

2.1.2 影响汽液接触状态、时间和液沫夹带行为的主要参数

分析确定影响汽液接触状态、时间和液沫夹带行为的主要参数,即可建立蒸发塔放大准则,由此确定满足放大准则的试验模拟量之间的关系或模型试验变量的设计值。

在既定的筛板结构形式、汽液介质、操作温度和压力工况下,决定塔板上汽液接触状态和液沫夹带行为且相对独立的关键参数包括:

(1) 通过筛孔的蒸汽流速 u'_g (m/s)。设蒸汽质量流量为 G (kg/h),密度为 ρ_g (kg/m³),塔板面积为 A (m²),开孔率为 α ,则筛孔蒸汽流速 u'_g (m/s) 可表示为:

$$u'_g = G/\rho_g \alpha A \quad (1)$$

(2) 塔板单位面积的开孔数 n' 。设塔板总开孔数为 n ,则塔板单位面积开孔数 n' 可表示为:

$$n' = n/A \quad (2)$$

(3) 塔板上的汽液接触时间 τ_g (s)。在既定蒸汽流速 u'_g 下,汽液接触时间与液层厚度 h (m) 是相关参数,可表征为:

$$\tau_g = h/u'_g \quad (3)$$

(4) 塔板上液相的平均停留时间 τ (s)。设塔板降液管(回流液)流量为 L (m³/h),则塔板上液相平均停留时间可表示为:

$$\tau = hA/L \quad (4)$$

(5) 塔板数 n 。反映汽液接触总时间或液沫混合更新次数。

(6) 液沫夹带率 φ 。液沫夹带率指液沫夹带量与蒸汽量之比,是影响液沫夹带行为众多因素的综合反映。目前,文献提出的相关液沫夹带计算公式偏于简化,且主要针对鼓泡状和泡沫状汽液接触方式,对于本蒸发塔处于喷射型的汽液接触方式,其计算结果过于保守,且这些公式并非针对蒸发室的液沫夹带。针对蒸发室工况,经计算分析验算,在此采用李之光等人根据系统的相似准则数分析并结合大量试验数据提出的公式^[7]:

$$\varphi = 6.1 \times 10^9 \times \left(\frac{u'_g}{gH} \right)^{1.38} \times \left(\frac{\sigma}{\Delta\rho g H^2} \right)^{0.46} \times \left[\frac{g}{\nu_L^2} \left(\frac{\sigma}{\Delta\rho g} \right)^{3/2} \frac{\Delta\rho}{\rho_g} \right]^{-1.1} \quad (5)$$

式中: u_g 一蒸汽的空塔气速(塔体横截面平均流

速), m/s; H —蒸发液面至塔板的距离, m, 或塔板间距 H_T (m) 减去液层高度 h , m; σ —液滴的表面张力, N/m; $\Delta\rho = \rho_L - \rho_g$ 是液与蒸汽的密度差, kg/m³; ν_L —液相运动粘度, m²/s。

2.2 试验塔放大设计基本准则

此处的设计放大基本准则指的是在两系统既定筛板结构形式、汽液介质、操作温度和压力工况相同情况下, 由影响塔板汽液接触状态和液沫夹带行为关键参数所确定的放大设计准则。

根据上述条件下确定的影响汽液接触行为和液沫夹带行为的控制参数可知, 为了保证试验塔塔板汽液接触状态和液沫夹带行为与原型塔相同, 使试验塔结果可放大应用于原型塔, 必须按上述关键参数相等的方法设计试验塔, 即试验塔的筛孔蒸汽流速 u'_g 、塔板单位面积开孔数 n' 、汽液接触时间 τ_g 、液相平均停留时间 τ 、塔板数 n 和液沫夹带率 φ 应分别与原型塔同名参数相等, 此即试验蒸发塔放大设计的基本准则。用下标“e”代表试验塔, 下标“o”代表原型塔, 则放大设计基本准则可表示为:

$$u'_{g,e} = u'_{g,o} \tag{6}$$

$$\tau_{g,e} = \tau_{g,o} \tag{7}$$

$$n'_e = n'_o \tag{8}$$

$$\tau_e = \tau_o \tag{9}$$

$$n_e = n_o \tag{10}$$

$$\varphi_e = \varphi_o \tag{11}$$

2.3 试验塔试验模拟量之间的关系

上述放大准则是根据影响汽液接触行为和液沫夹带行为的控制参数确定的。由于试验塔系统直接采用了与原型塔相同的塔板结构参数, 且试验介质和操作温度压力相同, 故上述放大准则中部分已经满足(相当于减少了要求的准则):

(1) 由于试验塔采用了与原型塔相同的塔板数 n , 且单位面积开孔数 n' 也与原型塔相同, 所以等式(8)和等式(10)已经满足。

(2) 因为汽液接触时间 $\tau_g = h/u'_g$, 且试验塔塔板液层高度与原型塔相同, 故等式(7)等价于等式(6); 另一方面, 由于试验塔筛板开孔率 α 与原型塔相同, 且采用与原型塔相同的介质和操作温度与压力(两塔介质物性参数对应相等), 因此, 由等式(6)可得:

$$\begin{aligned} \left(\frac{G}{\rho_g \alpha A}\right)_e &= \left(\frac{G}{\rho_g \alpha A}\right)_o \rightarrow \frac{G_e}{A_e} = \frac{G_o}{A_o} \rightarrow G_e = \frac{A_e}{A_o} G_o \\ &= \frac{D_e^2}{D_o^2} G_o \end{aligned} \tag{12}$$

由放大准则确定的试验模拟量(蒸汽量 G 、塔板直径 D) 之间的关系, 可根据不同的试验塔直径确定相应的试验蒸汽量。

根据设计, 原型蒸发塔筛板直径 $D_o = 1\ 676$ mm, 蒸汽量 $G_o = 3\ 850$ kg/h, 现试验塔筛板直径设计取值 $D_e = 494$ mm, 由式(12)可得试验塔蒸汽量应为 334.5 kg/h。

这与试验塔蒸汽操作流量的设计取值 348.2 - 342.8 kg/h 基本相符。

(3) 由等式(9)并考虑两塔液层厚度相同可得:

$$\left(\frac{hA}{L}\right)_e = \left(\frac{hA}{L}\right)_o \rightarrow \frac{A_e}{L_e} = \frac{A_o}{L_o} \rightarrow L_e = \frac{A_e}{A_o} L_o = \frac{D_e^2}{D_o^2} L_o \tag{13}$$

由放大准则确定的试验模拟量(回流量或降液量 L 、塔板直径 D) 之间的关系, 可根据不同的试验塔直径确定相应的试验降液量。

因为原型塔冷凝液回流量 $L_o = 350$ kg/h, 故按以上放大关系可得 $D_e = 494$ mm 的试验塔对应的冷凝液回流量应为 30.41 kg/h。

这与试验塔冷凝液回流量现行设计取值 31.15 kg/h 基本相符。

(4) 根据等式(11), 并考虑上述设计参数下等式(6)已经满足, 且试验塔采用与原型塔相同的介质和操作温度与压力试验塔设计中塔板间距和液层厚度均对应与原型塔相同, 两塔物性参数对应相等, 可得 $H_e = H_o$ 。

3 试验结果对比分析

由表 1 可知, 原型塔蒸馏液含硼浓度目标要小于 5 mg/L, 浓缩液含硼浓度目标在 7 000 - 7 700 mg/L 之间。

试验时, 经过优化试验条件, 选取进料液含硼浓度为 2 053 mg/L, 蒸汽流量为 324.44 kg/h, 回流比选取为 20%, 进料流量维持在 0.27 m³/h 左右, 系统在此试验条件下较为稳定。得到的蒸馏液含硼浓度

随蒸馏时间的变化关系绘制成曲线,如图1所示。

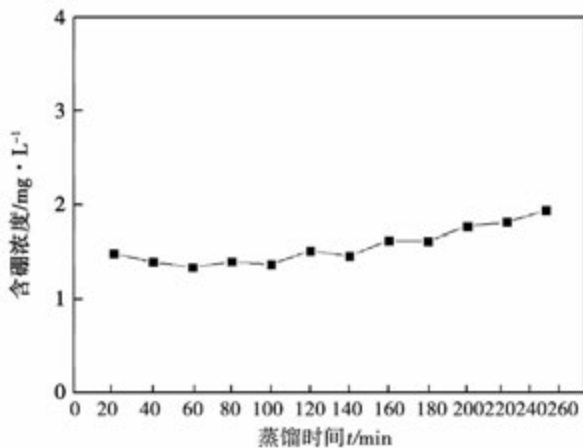


图1 蒸馏液含硼浓度随蒸馏时间的变化趋势

Fig. 1 The change trend of the distilled liquid boron concentration with the distillation time

系统运行稳定后,每隔 20 min 取一组蒸馏液样品,每组取 3 次,共取 12 组,并测量各组样品的含硼浓度,求平均值,绘制成如图 1 所示曲线。从图中可以看出,在回流比为 20% 的条件下,蒸馏液均达到了 5 mg/L 以下的硼浓度。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。

试验结束后,取 3 次蒸馏液样品,分别测量这些样品的含硼浓度,并求平均值,所得浓缩液含硼浓度为 7 691 mg/L。该浓度值在原型机目标浓缩液含硼浓度 7 000 - 7 700 mg/L 之间,由试验结果可以看出,在与原型塔相同的操作条件下,试验塔蒸馏效果满足原型机工况要求,因此上述论证的蒸发塔放大效应是正确的。

4 结 论

(1) 由于试验塔汽液介质、操作温度和压力工况与原型塔相同,且满足以汽液接触行为和液沫夹带行为控制参数而建立的相似准则,故试验塔塔板上的汽液接触状态和液沫夹带行为与原型塔相同,试验塔结果可放大应用于原型塔。

(2) 分析上述过程可以推知:对于与原型系统介质相同、操作温度与压力相同、汽液接触方式相

同、汽液接触部件单位横向面积结构参数和汽液流动参数相同、设备纵向结构参数相同的汽液两相流过程模型试验,其满足放大准则的模拟试验量之间的关系,即:模型与原型系统单位塔板面积的汽液介质流量对应相等。

(3) 通过试验数据分析,在满足与原型塔相同的操作条件时,试验塔所得试验数据满足原型机工况要求,由此论证了蒸发塔放大效应分析计算的正确性和合理性。

参考文献:

- [1] 任夫健,凌永社,王庆志. 化工放大技术方法的研究[J]. 现代化工,2011,31(1):1-3.
REN Fu-jian, LING Yong-she, WANG Qing-zhi. Research on chemical amplification technology [J]. Modern Chemical Industry, 2011,31(1):1-3.
- [2] 尹华东,张海涛,应卫勇,等. 淤浆鼓泡床反应器中的液沫夹带[J]. 华东理工大学报(自然科学版),2005,31(3):273-276.
YIN Hua-dong, ZHANG Hai-tao, YING Wei-yong, et al. Liquid entrainment in slurry bubble column reactor [J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2005,31(3):273-276.
- [3] 皇民,刘马群,高波. 隧道地震动力模型试验相似准则和参数设计[J]. 交通科技与经济,2011,64(2):64-66.
HUANG Min, LIU Ma-Qun, GAO Bo. Research of similar guidelines and parameters for tunnel seismic model test [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2011,64(2):64-66.
- [4] 顾平道,梁小强,汤国芳,等. 纵向翅片扁管的传热性能分析[J]. 建筑热能通风空调,2011,30(4):68-70.
GU Ping-dao, LIANG Xiao-qiang, TANG Guo-fang, et al. Performance analysis of vertical fin and flat tube heat transfer [J]. Building Energy & Environment, 2011,30(4):68-70.
- [5] 王营,李肖华,李育敏,等. 喷射式超重重力旋转床传质模型及实验研究[J]. 石油化工,2011,40(4):392-396.
WANG Ying, LI Xiao-hua, LI Yu-min, et al. Mass transfer model and experiment for rotating jet high-gravity bed [J]. Petrochemical Technology, 2011,40(4):392-396.
- [6] 苏高辉,杨自春. 管道多层隔热系统的传热分析及优化设计[J]. 武汉理工大学报,2011,33(8):58-61.
SU Gao-hui, YANG Zi-chun. Optimal design and heat transfer analysis of multilayer thermal insulation for pipeline [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011,33(8):58-61.
- [7] 李之光. 锅炉强度计算标准应用手册[M]. 北京:中国标准出版社,1999.
LI Zhi-Guang. Application manual of calculation standard of boiler strength [M]. Beijing: Chinese Standard Press, 1999.

(姜雪梅 编辑)

favorable, the linear correlation coefficient is 0.973, and the heat loss coefficient is $1.693 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; the optimum temperature value of the collector is $180 \text{ }^\circ\text{C}$, the energy efficiency is 0.15. **Key words:** two-axis sun-track, domestic parabolic trough receiver, PTC, thermal performance, energy efficiency

核电站硼回收处理系统蒸发塔放大效应研究 = **Magnification Effect Study on Boron Recycling System's Evaporator of Nuclear Power Plant** [刊,汉] LI Shu-zhou (Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou of Jiangsu, China, Post Code: 215000), WANG Teng-jiao, LU Jie, LIU Xia-jie (China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen of Guangdong, China, Post Code: 518124) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4) . -628 -631

By studying the similar principle of device model testing the transfer process, aiming at the working condition of the boron recycling's evaporator system in nuclear power plant and the magnification effect of testing evaporator, the main parameters that affect gas-liquid phase contact process in the evaporator is analyzed and determined. Thus, the similarity criterion between the evaporator and the testing evaporator is put forward. According to the similarity criterion that put forward in this paper, it is used in the design of the testing evaporator the same plate structure parameters, testing medium, operating temperature and operating pressure of prototype tower. And this meets the magnification criterion Then, it is calculated that the diameter, backflow volume and steam flow of testing evaporator meeting the requirements of amplification are determined according to the remaining similarity criterion. The correctness and rationality of testing evaporator design is verified by analyzing the experimental results. **Key words:** nuclear power plant, boron recycling system, evaporator, magnification effect

垂直轴风力机叶片的流固耦合作用研究 = **Study on Fluid-structure Interaction of a Vertical-axis Wind Turbine** [刊,汉] SUN Fangjin , LIANG Shuang , FENG Xu (College of Architecture and Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning, China, Post Code: 123000) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4) . -632 -638

Vertical-axis wind turbines are promising, but the lagging behind of study on fluid-structure interaction between wind and wind turbine blade has become one of the key factors limiting their application. Thus, fluid-structure interaction of a vertical-axis wind turbine blade is studied in the present work. To overcome the excessive distortion of