# 核电站硼回收系统蒸发塔分离技术研究与应用

郑 伟,林 鹏,刘夏杰,李 利

(中广核研究院有限公司,广州 深圳 518031)

摘 要:为进行核电站硼回收系统蒸发塔自主化设计,基于分离理论建立了蒸发塔塔板分离理论计算模型,分析了 蒸发塔塔板硼酸溶液中硼水的分离水平,并在搭建的小型试验台架上进行试验验证分析,同时分析并给出蒸发塔 塔底蒸发室雾沫夹带率的计算方法。将所研究的理论计算模型用于硼回收系统开展蒸发装置设计。结果表明:计 算分析结果较好吻合试验结果,证明理论分析采用的分离方法及模型建立的正确性。所设计的硼回收系统满足核 电站现场运行要求,且有较高的安全裕度。

关键 词:硼回收系统;核电站;蒸发塔;分离模型

第39卷第5期

2024年5月

中图分类号:TK221 文献标识码:A DOI:10.16146/j. cnki. rndlgc. 2024.05.022

[**引用本文格式**]郑 伟,林 鹏,刘夏杰,等. 核电站硼回收系统蒸发塔分离技术研究与应用[J]. 热能动力工程,2024,39(5): 188-194. ZHENG Wei,LIN Peng,LIU Xiajie, et al. Separation technology and application of evaporation tower in boron recycle system of nuclear power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2024,39(5):188-194.

# Separation Technology and Application of Evaporation Tower in Boron Recycle System of Nuclear Power Plant

ZHENG Wei, LIN Peng, LIU Xiajie, LI Li

(China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen, China, Post Code: 518031)

**Abstract**: To realize independent design of evaporation tower of boron recycle system of nuclear power plant, theoretical calculation model of evaporation tower tray separation was established based on separation theory, evaporator separation level of boron water of boron acid solution was analyzed, and small scale experimental device was used for test verification and analysis. Meanwhile, the calculation method of entrainment rate of entrainment of evaporation chamber in evaporation tower bottom was analyzed and given. The proposed theoretical calculation model was used for the design of evaporation equipment in boron recycle system. The results show that the numerical results agrees well with the experimental result, indicating the correctness of seperation method adopted by theoretical analysis and calculation model. The designed boron recycle system can satisfy the field operation requirement of nuclear power plant with a high safety margin.

Key words: boron recycle system, nuclear power plant, evaporation tower, separation model

# 引 言

核电站硼回收系统(简称 TEP)的主要功能是 收集可复用一回路的冷却剂,经系统过滤、除盐、除 气和硼水蒸发分离后,向反应堆硼水补给系统提供 含硼质量浓度小于5 µg/g的蒸馏水和硼质量浓度 约为7700 µg/g的浓硼酸溶液,使冷却剂能够实现 循环回收利用<sup>[1]</sup>。蒸发塔硼水蒸发操作是 TEP 系 统中最为重要的工序,其分离效率是影响整个硼回

收稿日期:2022-03-23; 修订日期:2022-05-06

作者简介:郑 伟(1986-),男,中广核研究院有限公司正高级工程师.

收系统功能的关键因素<sup>[2-5]</sup>。本文通过建立蒸发塔 分离模型进行分析计算,并搭建小型试验平台进行 试验探究,应用分离模型对核电站蒸发设备进行自 主化分析,探索蒸发塔内硼 – 水分离规律,从而实现 核电站 TEP 系统蒸发设备的自主化设计,并为国内 核电站运行提供参考依据。

## 1 TEP 系统蒸发塔简介

TEP系统基于蒸发浓缩原理建立,主要设备包括蒸发塔、加热装置、冷凝装置、再生式换热装置、浓缩液冷却装置、蒸馏液冷却装置、泵及管道、阀门、仪表等。其中,蒸发塔是TEP蒸发系统的核心设备,为多层筛板塔。TEP系统蒸发流程如图1所示。塔底的待处理料液经过强制循环泵送入再沸器,由再沸器加热至饱和状态,经蒸发塔入口降压,在底部室内产生上升蒸汽;回流液与塔内上升蒸气进行充分接触,将蒸气中夹带的微量液滴洗涤下来,从而使冷凝液中残留的硼酸组分逐步降低,最终使顶部冷凝液组分硼含量满足分离要求。





# 2 塔板分离模型及试验

2.1 分离模型建立

2.1.1 模拟条件

蒸发塔内介质为硼酸溶液,其总体模拟参数设置为:溶液温度为102.5℃,压力为0.11 MPa,蒸汽

流量 342.8 kg/h,回流液流量 34.3 kg/h。

## 2.1.2 基本假设

由于蒸发塔内传热传质过程较为复杂,为简化 分离模型及计算求解,对蒸发塔内的蒸发分离过程 做如下假设<sup>[6]</sup>:(1)蒸发塔内的介质流动稳态,且 传热传质过程是平衡状态,忽略塔内压力及温度梯 度;(2)由于硼酸与水的沸点差异较大,塔内上升气 流全视为水蒸气,仅夹带的液沫和洗涤液中存在少 量硼酸。

2.1.3 分离模型原理

由于硼酸与放射性阳离子在水溶液中的饱和蒸 汽压力与水的饱和蒸汽压力均相差较大,所以蒸发 设备对于硼酸与放射性阳离子的分离度是一致的。 因此,硼酸回收系统中的蒸发设备分离度主要取决 于液沫在蒸汽中的夹带量,要进一步提高硼水分离 度,需降低最终冷凝蒸汽中夹带的液沫比率。

基于上述假设,上升蒸汽通过蒸发塔各层塔板, 其夹带液沫浓度逐渐降低,从而实现了蒸发塔洗涤 二次蒸汽,达到降低蒸馏液含硼浓度的目的<sup>[5-6]</sup>。

塔板的分离模型原理如图2所示。





图中:G<sub>i-1</sub>、E<sub>i-1</sub>、x<sub>i-1</sub>为进入第 *i* 层塔板的蒸气 流量、液沫夹带量及含硼质量浓度;L<sub>i+1</sub>、x<sub>i+1</sub>分别为 由上一层塔板进入第 *i* 层塔板的回流量及其硼酸质 量浓度;G<sub>i</sub>、L<sub>i</sub>、E<sub>i</sub>分别为离开第 *i* 层塔板的蒸气量、 液体回流量、液沫夹带量;液体在塔板上浓度分布均 匀,塔板上混合液浓度 x<sub>i</sub>。根据质量守恒定律,组分 浓度 x<sub>i</sub>公式为:

$$x_{i} = \frac{L_{i+1}x_{i+1} + E_{i-1}x_{i-1}}{L_{i+1} + E_{i-1} + (G_{i-1} - G_{i})}$$
(1)

#### 2.2 分离过程数学模型

应用质量守恒基本方程即可建立硼酸 - 水分离 过程的基本方程。 2.2.1 质量衡算图

蒸发塔的质量衡算图,如图3所示。



图 3 蒸发塔质量衡算图 Fig. 3 Mass balance chart of evaporation tower

不同于废液处理系统<sup>[6]</sup>,图 3 中  $L_{\rm B}$ 、 $x_{\rm B}$ 为进料 流量以及对应浓度; $L_{0}$ 、 $x_{0}$ 为塔底循环流量及其 对应浓度。 $e_n$ 是最顶层塔板夹带率, $\beta$ 是丝网除 沫器的拦截率, $x_{\rm T}$ 为冷凝液浓度,n为蒸发塔塔板 数量。

2.2.2 顶部冷凝器质量衡算

根据图 3 所示,冷凝器总体及溶质的质量衡算 方程为公式(2)和公式(3):

$$G_n[1 + e_n(1 - \beta)] = L_T + L_{out}$$
(2)

$$G_n e_n (1 - \beta) x_n = L_T x_T + L_{out} x_T$$
(3)

式中:
$$e_n$$
—第  $n$  层液沫夹带率(kg/kg)。

第 i 层液沫夹带率公式为:

$$e_i = E_i / G_i \tag{4}$$

根据汽液总体质量衡算可得顶层蒸汽量与冷凝 液的关系如下:

$$L_{\rm out} = G_n [1 + e_n (1 - \beta)] - L_{\rm T}$$
 (5)

将此代入质量衡算方程,即可求得目标值 x<sub>T</sub> 所 要求的顶层塔板组分浓度 x<sub>a</sub>:

$$x_n = \frac{\left[1 + e_n(1 - \beta)\right]}{e_n(1 - \beta)} x_{\mathrm{T}}$$
(6)

2.2.3 顶层塔板质量衡算

顶层塔板总体及溶质的衡算方程为:

$$L_{n} = L_{T} + G_{n-1}(1 + e_{n-1}) - G_{n}[1 + e_{n}(1 - \beta)]$$
(7)

$$L_{\rm T} x_{\rm T} + G_{n-1} e_{n-1} x_{n-1} = \left[ L_n + G_n e_n (1 - \beta) \right] x_n$$
(8)

可得顶层塔板降液量 L<sub>n</sub>:

$$L_{n} = L_{T} + G_{n-1}(1 + e_{n-1}) - G_{n}[1 + e_{n}(1 - \beta)]$$
(9)

对于上升蒸汽远大于回流量的条件下,认为热 质传递过程较快,冷凝放热即可将回流液加热至饱 和,即:

$$G_{n} = G_{n-1} - \frac{c_{p}L_{\rm T}(T_{\rm S} - T_{\rm L})}{\gamma}$$
(10)

式中: $T_{L}$ , $c_{p}$ —回流液相入口温度和对应比定压热 容; $T_{S}$ 、 $\gamma$ —操作压力条件下对应的饱和温度及潜热。 2.2.4 第*i* 层塔板质量衡算

对于第*i* 层塔板(*i*=*n*-1,…, 2, 1),汽液总体 及溶质质量衡算方程分别为:

$$L_{i+1} + G_{i-1} + E_{i-1} = L_i + G_i + E_i$$
(11)

$$L_{i+1}x_{i+1} + E_{i-1}x_{i-1} = L_ix_i + E_ix_i$$
(12)

按2.1.2 节假设条件,取 $G_i = G_{i-1} = G_{00}$ 

方程(11)和(12)递推 *i* = 1 时得到降液流量 *L<sub>i</sub>* 和液相浓度 *X*。

$$L_1 = L_2 + G_0(1 + e_0) - G_1(1 + e_1)$$
(13)

$$x_0 = \frac{\left[L_2 + G_0 e_0 + (G_0 - G_1)\right] x_1 - L_2 x_2}{G_0 e_0} \quad (14)$$

## 2.3 模型计算结果

应用所设计的分离模型,利用 Excel 软件编制 计算程序,将模拟参数代入式(1)~式(14),在此过 程中应用到的蒸发塔结构及物性参数如表1所示, 即可计算得到小型模拟蒸发塔模拟结果如表2所 示。其中塔板的液沫夹带率应用 Hunt<sup>[9]</sup>关联式计 算得到:*e*<sub>1</sub>~*e*<sub>3</sub>=3.0%。

#### 表1 蒸发塔结构及料液物性参数

Tab. 1 Evaporation tower structure and feed liquid physical property parameters

参数	数 值
蒸发塔内径/mm	500
塔板间距/mm	302
塔板孔径/mm	4.5
孔数	477
溢流堰长度/mm	165
溢流堰高度/mm	50
降液管半径/m	0.013
回流液温度/℃	95
回流液比热容/ kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup>	4.214
相变热/kJ.kg <sup>-1</sup>	2 257.3

#### 表 2 试验塔模拟计算结果

#### Tab. 2 Simulation results of evaporation tower

参数	数 值
塔板数	3
塔板雾沫夹带率 $e_i$	0.03
丝网除沫器拦截率 b	0.7
第3层塔板液体硼浓度 $x_3/mg \cdot kg^{-1}$	560.56
第3层塔板液体流量 $L_3/kg \cdot h^{-1}$	47.06
第2层塔板液体硼浓度 $x_2/mg \cdot kg^{-1}$	2 674.53
第2层塔板液体流量 $L_2/kg \cdot h^{-1}$	47.06
第1层塔板液体硼浓度 $x_1/mg \cdot kg^{-1}$	12 198.29
浓缩倍数 x1/xT	2 439.7

从表 3 数据可以看出,在设置丝网除沫器拦截 率为 0.7 及 3 块塔板的条件下,最底层塔板料液含 硼浓度 x<sub>1</sub>为 12 198 mg/kg。最底层塔板与蒸馏液的 浓缩倍数 x<sub>1</sub>/x<sub>T</sub> 为 2 439.7。

#### 2.4 试验研究

为验证理论计算模型的正确性,搭建了试验平台,按照表1中总体参数设置进行试验对比,分离模型准确性的判别标准为:底层塔板与蒸馏液的浓缩 倍数 x<sub>1</sub>/x<sub>1</sub>达到2439.7。

2.4.1 试验系统

搭建的试验系统主要包括进料回路、蒸汽发生 回路、蒸汽冷凝回路、冷却回路等几个主要功能回路 以及相应的仪器仪表,如图4所示。进料回路利用 计量泵进行恒定流量进料,蒸汽发生回路利用电加 热器加热循环回路中料液,使料液进入蒸发塔内形 成上升蒸汽;蒸汽冷凝回路利用冷凝器对蒸汽进行 冷凝形成蒸馏液;冷却回路利用换热器对最终蒸馏 液进行冷却。



图 4 试验系统 Fig. 4 Experimental system

## 2.4.2 试验过程及结果分析

试验过程中每 30 min 取蒸馏液样品进行检测, 最后将所得样品的试验检测结果汇总如表 3 所示。

表 3 蒸发塔试验结果汇总表 Tab. 3 Experiment results of evaporation tower

$x_{\rm T}/10^{-6}$	$x_1/10^{-6}$	$x_1 / x_T$	时间/min
2.65	5403.61	2039.1	30
3.23	8141.88	2520.7	60

从以上试验数据可得出,随着塔底料液浓度的 逐步增加,蒸馏液浓度  $x_{\rm T}$ 范围为 2.65 × 10<sup>-6</sup> ~ 3.23 × 10<sup>-6</sup>,对应底层塔板液相硼浓度  $x_{\rm I}$ 范围为 5 403.61 ~ 8 141.88  $\mu$ g/g。可得试验装置的  $x_{\rm I}/x_{\rm T}$  为 2 279.9,较好吻合了表 2 中理论分析值 2 439.7,即 从试验上验证了分离模型的准确性,误差小于 7%。

## 3 塔底蒸发雾沫夹带率计算

TEP 蒸发塔塔底中的蒸发属于闪蒸形式,但由 于进口管直径较小,进料蒸汽流量较大,进口处的蒸 汽流速非常大,同时蒸发室的分离高度比较低,所以 蒸发塔底(见图 5)蒸汽的运动形式是杂乱无章的, 与传统的闪蒸(见图 6)有较大差异。

传统的闪蒸形式是进料进入蒸发室后,由于温 度和压强发生变化,蒸汽压力变低,进料在进料口附 近迅速蒸发变成蒸汽。蒸发的蒸汽在蒸发室内很快 就会在分离空间内垂直向上升且均匀分布,并在上 升过程中,蒸汽夹带的雾沫和液滴由于重力作用开 始向下降落,所以在蒸发室的分离空间部分可以完 成部分雾沫与蒸汽的分离。



图 5 塔底蒸发工况

Fig. 5 Evaporation condition of tower bottom



图 6 传统蒸发工况 Fig. 6 Traditional evaporation condition

而 TEP 系统蒸发室的工况特点主要有以下两 个方面:(1) 二次蒸汽量较大,且进入蒸发室的进料 已经被加热器部分加热成气体,进料为气体和液体 的两相流,所以可以认为进料是以近乎喷射状态进 入的蒸发室,蒸汽分子能量较大,分子运动杂乱无 章,上升的蒸汽分布不均匀,运动状态较为混乱; (2) 蒸发室底部的分离空间较低,蒸汽不会出现均 匀分布垂直上升的现象,夹带的雾沫和液滴很难受 重力作用分离出来,大部分雾沫和液滴直接随蒸汽 进入底层塔板<sup>[7-8]</sup>。

根据以上两点得知,TEP系统蒸发塔底蒸发室 的雾沫夹带率要比用关联式计算得到的夹带率明显 大得多。由于工况十分复杂,雾沫夹带率的影响因 素也非常多,无法通过模拟计算得出,实际过程可放 大选取经验公式计算结果,作为塔底蒸发室雾沫夹 带率进行分析设计。

# 4 设备自主化设计应用

为实现蒸发设备自主化,将分离模型应用于现 场设备的设计。基于核电站现场运行要求,蒸馏液 目标浓度达到5 mg/kg,首先确定塔板雾沫夹带率 及塔底蒸发室雾沫夹带率。

### 4.1 雾沫夹带率

4.1.1 塔板雾沫夹带率

自主设计的现场蒸发塔塔板液沫夹带率采用 Hunt<sup>[9]</sup>关联式计算得到, $e_i = 3.4\%$ 。

4.1.2 塔底蒸发室雾沫夹带率

从保守设计考虑,选取 Reed 关联式计算结果的 10 倍作为塔底蒸发室雾沫夹带率进行设计。由 Reed 公式<sup>[10]</sup>得:

$$R = 284 \left(\frac{\mu_{\rm G} \times 10^6}{(\rho_{\rm L} - \rho_{\rm G})\rho_{\rm G}}\right)^2 \frac{u_{\rm G}\rho_{\rm G}}{323H^2 + 8.86H + 3.6}$$
(15)

$$f_{\mu} = \frac{R}{1 - R}$$
 16)

代入数据,求得  $e_r = 10e'_r = 5.32\%$ 

## 4.2 现场蒸发塔的设计

e'

现场蒸发塔内介质为硼酸溶液,其设计输入参数如表4,主要结构参数设计如表5所示。

#### 表 4 现场蒸发设备设计输入参数

## Tab. 4 Design input parameters of field

#### evaporation equipment

参 数	数值
介质	硼酸溶液
温度/℃	102.5
压力/MPa	0.11
蒸汽流量/kg·h <sup>-1</sup>	3 850
回流液流量/kg·h <sup>-1</sup>	350
回流液温度/℃	95
目标浓缩液硼浓度/mg·kg <sup>-1</sup>	7 700
目标蒸馏液硼浓度/mg·kg <sup>-1</sup>	5.0

#### 表 5 现场蒸发设备结构设计参数

# Tab. 5 Structural design parameters of field

evaporation equipment

参 数	数值
蒸发塔内径/mm	1 676
塔板间距/mm	302
塔板孔径/mm	4.5
孔数	5484
溢流堰长度/mm	470
溢流堰高度/mm	55
降液管半径/m	0.041 4

为确定现场蒸发塔设备塔板数的设计结果,利 用第2节中的分离模型,代入表4及表5中数据,同 时取不同的塔板数 *n* =4、3、2进行分析,得到不同塔 板数情况下各塔板料液硼浓度分布情况及相关参数 如表6~表8 所示。

#### 表6 现场设备设计结果(塔板数 n = 4)

#### Tab. 6 Design results of field equipment (n = 4)

项目			数 值	
丝网除沫器拦截率	率 $\beta$	0.3	0.5	0.7
第4层塔板液体硕	删浓度 x <sub>4</sub> /mg·kg <sup>-1</sup>	215.1	299.1	495.2
第4层塔板液体液	充量 $L_4/\text{kg·h}^{-1}$	394.2	420.4	446.5
第3层塔板液体研	删浓度 x <sub>3</sub> /mg·kg <sup>-1</sup>	784.8	1 096.6	1 824.2
第3层塔板液体液	充量 $L_3/\text{kg·h}^{-1}$	394.2	420.4	446.5
第2层塔板液体研	删浓度 x <sub>2</sub> /mg·kg <sup>-1</sup>	2 500.4	3 657.6	6 357.6
第2层塔板液体液	充量 $L_2/\text{kg·h}^{-1}$	394.2	420.4	446.5
第1层塔板液体研	删浓度 x <sub>1</sub> /mg·kg <sup>-1</sup>	7 667.4	11 882.0	21 821.7
第1层塔板液体液	充量 $L_1/\text{kg·h}^{-1}$	468.1	494.3	520.4
塔底硼浓度 $x_0/m$	g∙kg <sup>-1</sup>	17 612.5	28 761.7	55 534.3

#### 表 7 现场设备设计结果(塔板数 *n* = 3)

#### Tab. 7 Design results of field equipment (n = 3)

项目		数 值	
丝网除沫器拦截率β	0.3	0.5	0.7
第3层塔板液体硼浓度 x <sub>3</sub> /mg·kg <sup>-1</sup>	215.1	299.1	495.2
第3层塔板液体流量 $L_3/kg\cdot h^{-1}$	394.2	420.4	446.5
第2层塔板液体硼浓度 x <sub>2</sub> /mg·kg <sup>-1</sup>	784.8	1 096.6	1 824.2
第2层塔板液体流量 $L_2/kg\cdot h^{-1}$	394.2	420.4	446.5
第1层塔板液体硼浓度 $x_1/mg \cdot kg^{-1}$	2 500.4	3 657.6	6 357.6
第1层塔板液体流量 $L_1/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	468.1	494.3	520.4
塔底硼浓度 x <sub>0</sub> /mg·kg <sup>-1</sup>	5 802.6	8 913.8	16 240.7

# 表 8 现场设备设计结果(塔板数 n = 2) Tab. 8 Design results of field equipment(n = 2)

项	目		数 值		
丝网	]除沫器拦截率β	0.3	0.5	0.7	
第2	层塔板液体硼浓度 $x_2/\text{mg·kg}^{-1}$	215.1	299.1	495.2	
第2	层塔板液体流量 $L_2/\text{kg·h}^{-1}$	394.2	420.4	446.5	
第1	层塔板液体硼浓度 $x_1/\text{mg·kg}^{-1}$	784.8	1 096.6	1824.2	
第1	层塔板液体流量 $L_1/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	468.1	494.3	520.4	
塔底	毛硼浓度 $x_0/\text{mg·kg}^{-1}$ 1	881.2	2 733.3	4 721.5	

针对硼回收系统分离要求,设置4块塔板及丝 网除沫器拦截率为0.3时,蒸发装置底部夹带液中 硼的浓度计算值 x<sub>0</sub>都显著大于分离要求允许的浓 度 x'<sub>0</sub>,即能满足核电站工艺要求;设置3块塔板,蒸 发装置顶部丝网除沫器拦截率则需大于0.5,x<sub>0</sub> > x'<sub>0</sub>,可满足核电站分离要求;设置2块塔板,即使蒸 发塔顶部丝网除沫器拦截率达到0.7,x<sub>0</sub>都小于 x'<sub>0</sub>, 即不能满足核电站分离要求。而拦截率0.5为常规 国标的丝网除沫器较易满足的要求<sup>[11-12]</sup>,具有较高 的安全裕度。目前核电站现场硼回收系统蒸发装置 设计选用3块塔板及拦截率达到0.5以上的丝网除 沫器,能够满足核电站运行工艺要求。

## 5 结 论

本文建立的硼回收系统蒸发装置分离模型,为 同类蒸发设备的设计及运行提供参考依据。基于本 文的分离模型及试验研究结果,得到如下结论:

(1)蒸发装置试验结果与理论分析结果基本吻合,本文分离模型采用的分析方法合理;

(2)核电站蒸发装置的设计采用3块塔板及拦截率达到0.5以上的丝网除沫器是合理的,满足核电站硼回收系统的硼水分离工艺要求。

## 参考文献:

- [1] 郑 伟,吕永红,白 冰,等. 核电站蒸发塔分离效率试验研究
   [J]. 热能动力工程,2015,30(6):941-945,978.
   ZHENG Wei,LYU Yonghong, BAI Bing, et al. Experimental study of the separation efficiency of a vaporization tower in a nuclear power station [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2015,30(6):941-945,978.
- [2] JACIMOVIC B M. Entrainment effect on tray efficiency[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(18): 3941 – 3949.
- [3] 雷志刚,陈标华,李成岳.塔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 Zhigang, CHEN Biaohua, LI Chengyue. Murphree efficiency of

sieve tray in a gas-liquid-solid system [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2002, 2(2):97 - 100.

- [4] 张秋香,姜元涛,熊丹柳,等. 塔板精馏塔的板效率研究[J]. 化 学工程,2011,39(7):18-21.
  ZHANG Qiuxiang, JIANG Yuantao, XIONG Danliu, et al. Research on tray efficiency of sieve tray [J]. Chemical Engineering, 2011, 39(7):18-21.
- [5] LIU Shixun. Theoretic analysis for gravity separation of water droplets in PWR steam generator[J]. China Nuclear Science and Tech-

nology Report, 1996:1 - 10.

- [6] 郑 伟,李 晴,林 鹏,等. 核电厂废液处理系统净化塔分离 模型及试验研究[J]. 核动力工程,2017,38(1):126-130. ZHENG Wei,LI Qing, LIN Peng, et al. Separation model and experimental research on purification column in liquid waste treatment system of nuclear power plants [J]. Nuclear Power Engineering,2017,38(1):126-130.
- [7] 路秀林,王者相.塔设备[M].北京:化学工业出版社,2004.
   LU Xiulin, WANG Zhexiang. Tower equipment [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2004.
- [8] 张志荣,冉景煜. 废水液滴在低温烟气中的蒸发特性数值研究 [J]. 环境工程学报,2011,5(9):2048-2053.

ZHANG Zhirong, RAN Jingyu. Numerical study on evaporation characteristics of waste water droplet in low temperature flue gas [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2011, 5(9): 2048 – 2053.

[9] 袁江涛,杨 立,孙 嵘,等.高温气流内雾滴运动与蒸发特性的理论分析[J].海军工程大学学报,2008,20(2):5-8.
 YUAN Jiangtao,YANG Li,SUN Rong, et al. Water droplet move-

## (上接第182页)

- [27] 孟春玲,饶寿期. 涡轮叶片蠕变寿命预测方法研究[J]. 北京 工商大学学报(自然科学版),2002,20(2):52-55.
  MENG Chunling, RAO Shaoqi. Study on predict methods about creep break life of turbine blade[J]. Journal of Beijing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2022, 20(2):52-55.
- [28] 周益春,刘奇星,杨 丽,等. 热障涂层的破坏机理与寿命预 测[J]. 固体力学学报,2010,31(5):504-531.
  ZHOU Yichun,LIU Qixing, YANG Li, et al. Failure mechanisms and life prediction of thermal barrier coatings[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics,2010,31(5):504-531.
- [29] 王 正.基于四要素的机械零部件失效率计算模型[J].中国机械工程,2011,22(12):1472-1476.
  WANG Zheng. Failure rate model of mechanical components based on four elements [J]. China Mechanical Engineering, 2011,22(12):1472-1476.
- [30] 雷世英,孙见忠,刘 赫.涡轮叶片累积损伤指数模型及服役 可靠性评估[J].航空学报,2022,43(3):252-268.
   LEI Shiying, SUN Jianzhong, LIU He. Cumulative damage index

ment and its evaporation characteristics in high temperature gas flow [J]. Journal of Naval University of Engineering, 2008, 20(2):5-8.

- [10] 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 Shaoyi, CHAI Zhijing. Chemical mass transfer and separation process [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2005.
- [11] 黄彬杰,袁希钢. 丝网除沫器分离性能实验研究[J]. 化学工业与工程,2017,34(2): 89-95.
  HUANG Binjie, YUAN Xigang. Experimental study on the separation performance of wire-mesh mist eliminator [J]. Chemical Industry and Engineering,2017,34(2):89-95.
- [12] 沈胜强,甄 妮,牟兴森. 丝网除沫器除沫效率的数值模拟
  [J]. 核动力工程,2014,35(5):172-177.
  SHEN Shengqiang, ZHEN Ni, MU Xingsen. Determination of separation efficiency in wire mesh mist eliminator by CFD [J]. Nuclear Power Engineering,2014,35(5):172-177.

(姜雪梅 编辑)

model and service reliability evaluation of turbine blade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(3):252 - 268.

- [31] 火建卫,张亚丹,谢 伟,等. 零件疲劳平均失效率计算方法 研究[J]. 航空工程进展,2023,14(3):178-186,198.
  HUO Jianwei,ZHANG Yadan,XIE Wei, et al. Research on calculation method of fatigue average failure rate of parts[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(3):179-186,198.
- [32] 龚文强,王庆韧. 燃气轮机热端部件寿命的等效运行时间分析[J]. 电力技术,2010,19(8):28-30.
  GONG Wenqiang, WANG Qingren. Analysis on service life of hotend components of gas turbine using equivalent operation time method[J]. Electric Power Standardization & Construction Cost Control Information,2010,19(8):28-30.
- [33] 史进渊. 基于设计寿命的汽轮机检修周期优化方法的研究 [J]. 动力工程学报,2020,40(7):530-539.

SHI Jinyuan. Maintenance interval optimization based on design life of steam turbines [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(7): 530 - 539.

(姜雪梅 编辑)