

核电厂含硼水溶硅去除装置分析模型与参数优化

徐良旺, 刘斌, 蒋晓斌, 涂志剑

Analysis Model and Parameter Optimization of a Silica Removal System for Boric Acid in Nuclear Power Plant

Xu Liangwang, Liu Bin, Jiang Xiaobin, and Tu Zhijian

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13832/j.jnpe.2021.04.0228>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

CPR1000核电厂蒸汽发生器排污系统频繁隔离原因分析与优化措施

Analysis and Optimization of Frequent Isolation of Steam Generator Blowdown System in CPR1000 Nuclear Power Plant

核动力工程. 2019, 40(6): 163–167

核电厂主泵倒流工况转子动态特性分析与研究

Analysis and Research on Rotor Dynamic Characteristics of Nuclear Power Plant Reactor Coolant Pump under Reverse Flow Condition

核动力工程. 2018, 39(3): 134–137

基于HFR的核动力装置非能动系统敏感性分析方法研究

Research on Sensitivity Analysis of Passive System for Nuclear Power Plants Based on HFR

核动力工程. 2019, 40(2): 150–154

核电厂放射性贮存池钢覆面检漏系统关键设计参数分析与研究

Analysis and Research on Key Design Parameters of Leakage Detection System for Steel Liner of Radioactive Storage Pool in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2020, 41(2): 155–159

核电厂通风系统防火阀应用现状及维修优化分析

Application Status and Maintenance Optimization Analysis of Ventilation System Fire Damper in Nuclear Power Plants

核动力工程. 2018, 39(5): 149–153

核电厂屏蔽主泵Canopy密封环钻孔疏流装置设计与研究

Design and Research of Drilling and Draining Equipment for Canopy Seal Weld on CAP1400/AP1000 Canned Reactor Coolant Pump

核动力工程. 2019, 40(4): 145–148



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 0258-0926(2021)04-0228-05; doi:10.13832/j.jnpe.2021.04.0228

核电厂含硼水溶硅去除装置 分析模型与参数优化

徐良旺, 刘 斌, 蒋晓斌, 涂志剑

苏州热工研究院有限公司, 江苏苏州, 215004

摘要: 为了提高核电厂含硼水溶硅去除装置(简称除硅装置)的性能, 改进了分析模型, 并分别对截留分子量(MWCO)为 200 Da 和 250 Da 的反渗透膜除硅分离实验进行了理论计算。模型计算结果与实验测量值符合良好, 证明了该改进模型的准确性与适用性。在此基础上, 进一步对除硅装置参数优化进行了研究, 分析了相关参数对装置除硅性能的影响, 研究结论对除硅装置的设计与运行具有参考意义。

关键词: 反渗透膜; 富集硼酸; 除硅装置

中图分类号: TL353 **文献标志码:** A

Analysis Model and Parameter Optimization of a Silica Removal System for Boric Acid in Nuclear Power Plant

Xu Liangwang, Liu Bin, Jiang Xiaobin, Tu Zhijian

Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou, Jiangsu, 215004, China

Abstract: In order to improve the performance of the silica removal system for boric acid in nuclear power plants, the modified analysis model is established. The simulation of silica removal experiments using 200 Da and 250 Da molecular weight cut off (MWCO) reverse osmosis membranes is carried out by using this model. The calculation results meet the experimental data well, which demonstrates the accuracy and the applicability of the modified model. Further study on parameters optimization of this silica removal system based on this model is implemented as well; the effect of relevant parameters on the performance is analyzed. The conclusion is with reference significance for system design and operation.

Key words: Reverse osmosis membranes, Enriched boric acid, Silica removal system

0 引言

压水堆核电厂一回路中添加富集硼可优化一回路水化学, 降低一回路结构材料腐蚀和堆芯沉积风险, 减少硼和活化腐蚀产物排放量, 减少固体废物产生量^[1-2]。但随着核电厂的运行, 一回路含硼水中的溶硅也会逐年累积。溶硅中的硅酸和硅酸胶体将会与钙、镁、铝等离子在燃料包壳表面形成硅酸盐沉积, 增加传热恶化和轴向功率偏移的风险, 影响核电机组的安全运行。

富集硼价格昂贵, 为提高核电厂经济性, 有必要采取有效措施去除一回路含硼水中的溶硅。此外, 这也有助于降低核电厂的硼排放量, 提高核电厂环境友好度。

Liang^[3-4] 研究了一种含硼水溶硅去除装置(简称除硅装置), 利用反渗透膜从含硼水中分离溶硅, 并开展了相关实验研究和数学建模。本文在文献 [3] 研究的基础上推导了该除硅装置的改进型计算模型。为验证该模型的准确性, 对文

收稿日期: 2020-07-20; 修回日期: 2021-04-26

作者简介: 徐良旺(1979—), 男, 高级工程师, 现从事压水堆核电厂运行优化研究工作, E-mail: xuliang98@qq.com

文献 [3] 中开展的实验进行了模拟计算，并与原文模型及实验结果进行对比。

1 数学模型

文献 [3] 采用的除硅装置原理图见图 1，其中包括 1 个硼酸储存箱（BAST）、1 个浓缩箱（CHT）、1 个反渗透膜模块，以及浓缩液循环管线和透析液回流管线。该装置运行时，BAST 中的含硼水循环通过反渗透膜模块，达到反复透析的效果。由于反渗透膜对硼酸与溶硅的拦截效率大不相同，因此更多的溶硅将滞留在 CHT 中，从而实现硼酸与溶硅的分离。

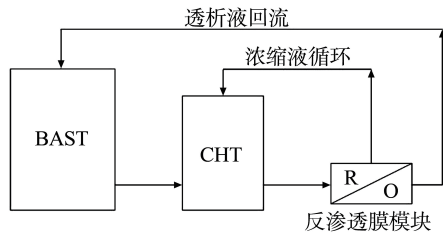


图 1 除硅装置原理图

Fig. 1 Schematic Diagram of Silica Removal System

假设除硅过程中含硼水密度无变化，且 BAST 和 CHT 中的溶液均匀混合，对 BAST 和 CHT 分别建立硼质量守恒方程：

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} = F_r f_b C_2 - F_i C_1 \quad (1)$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} = F_i C_1 - F_r f_b C_2 \quad (2)$$

式中， t 为时间； V_1 为 BAST 容积； V_2 为 CHT 容积； C_1 为 BAST 中的硼浓度； C_2 为 CHT 中的硼浓度； F_r 为透析液回流流量； F_i 为由 BAST 注入 CHT 的溶液流量； f_b 为硼的反渗透膜通过比，即反渗透膜下游硼浓度与上游硼浓度的比值。

该除硅装置运行过程中保持 BAST 与 CHT 中的溶液体积不变，因此可令：

$$F_r = F_i = F \quad (3)$$

该除硅装置运行过程中硼酸总质量（ M_B ）保持不变，计算式为：

$$M_B = V_1 C_1 + V_2 C_2 \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (1)，可得 BAST 中硼浓度方程为：

$$\begin{aligned} V_1 \frac{dC_1}{dt} &= F f_b \frac{(M_B - V_1 C_1)}{V_2} - F C_1 \\ &= \frac{F f_b M_B}{V_2} - \left(\frac{F f_b V_1}{V_2} + F \right) C_1 \end{aligned} \quad (5)$$

该方程是一阶线性非齐次微分方程，其解为：

$$C_1(t) = \frac{f_b M_B}{f_b V_1 + V_2} + \frac{(C_1^0 - f_b C_2^0) V_2}{f_b V_1 + V_2} e^{-\left(\frac{f_b V_1 + V_2}{V_1}\right) F t} \quad (6)$$

同样地，可得 CHT 中硼质量守恒方程为：

$$\begin{aligned} V_2 \frac{dC_2}{dt} &= \frac{F(M_B - V_2 C_2)}{V_1} - F f_b C_2 \\ &= \frac{F M_B}{V_1} - \left(\frac{F V_2}{V_1} + F f_b \right) C_2 \end{aligned} \quad (7)$$

该方程的解为：

$$C_2(t) = \frac{M_B}{f_b V_1 + V_2} - \frac{(C_1^0 - f_b C_2^0) V_1}{f_b V_1 + V_2} e^{-\left(\frac{f_b V_1 + V_2}{V_1}\right) F t} \quad (8)$$

式中，上标 0 表示初始状态，即 $t=0$ 时的参数值。

作为溶液中的溶质，溶硅与硼酸本质上并无不同。因此，上述推导过程及结果同样适用于溶硅，只需要将 M_B 替换为系统中的溶硅总质量 M_{Si} ； f_b 替换为溶硅的反渗透膜通过比 f_{Si} 。

2 模型验证

为了验证溶硅去除方法的有效性，Liang 设计建造了如图 2 所示的除硅实验装置。

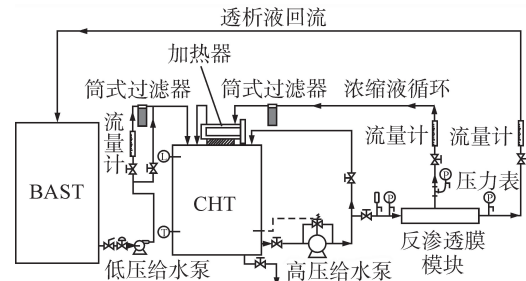


图 2 除硅实验装置示意图

Fig. 2 Diagram of Experimental Silicon Removal System

该分离装置分别用截留分子量（MWCO）为 200、250 和 300 Da 的薄膜型聚酰胺反渗透膜（tf-PA RO）进行实验。实验结果表明，MWCO 为 200 和 250 Da 的反渗透膜均能够实现硼与溶硅的分离，而 MWCO=300 Da 的反渗透膜则没有明显的分离效果^[3]。

本文采用改进型计算模型，不再将从 BAST 流入 CHT 的溶液浓度近似为常数，而是将其视为随时间变化的量。对 MWCO 为 200 Da 和 250 Da 的工况进行了模拟，并将得到的计算结果与文献 [3] 中的实验值和计算值进行比较。除硅装置及实验工况的参数汇总如表 1。

表 1 除硅装置参数及工况

Tab. 1 Parameters and Conditions of Experimental System

参数		MWCO	
		200 Da	250 Da
BAST	容积/L	500	500
	初始硼浓度/ppm ^①	7537	8294
	初始SiO ₂ 浓度/ppm	11.83	9.97
CHT	容积/L	500	500
	初始硼浓度/ppm	7507	8277
	初始SiO ₂ 浓度/ppm	11.25	10.71
透析液回流流量 F_r /(L·min ⁻¹)		1.5	3.0
浓缩液循环流量/(L·min ⁻¹)		70	70
反渗透膜硼通过比		0.60	0.65
反渗透膜SiO ₂ 通过比		0.03	0.03

注：①1 ppm = 10⁻⁶

透析液流量较低时，系统需要较长的时间才能达到平衡状态。采用 MWCO=200 Da 的反渗透膜的实验持续了 12 h，本文模型计算值与实验测量值以及文献 [3] 计算值的对比见图 3~图 6。

由于 MWCO=250 Da 的反渗透膜的透析阻力更小，因而，同等条件下透析流量比 200 Da 的反渗透膜更大，系统到达平衡状态所需的时间也更短。本文采用 250 Da 的反渗透膜实验持续了 7 h，模型计算值与实验测量值以及文献 [3] 计算值的对比如图 7~图 10 所示。

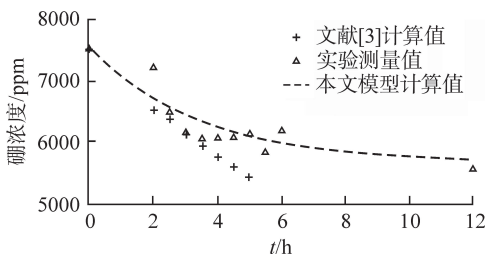


图 3 BAST 中的硼浓度 (MWCO=200 Da)

Fig. 3 Boron Concentration in BAST(MWCO=200 Da)

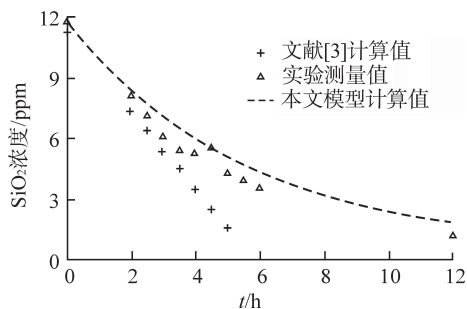


图 4 BAST 中的 SiO₂ 浓度 (MWCO=200 Da)

Fig. 4 SiO₂ Concentration in BAST(MWCO=200 Da)

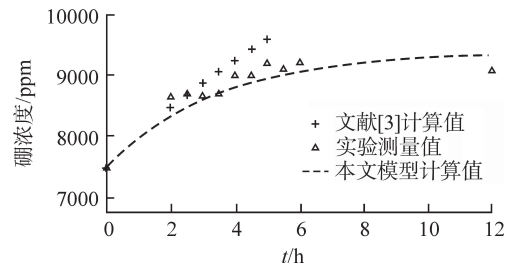


图 5 CHT 中的硼浓度 (MWCO=200 Da)

Fig. 5 Boron Concentration in CHT(MWCO=200 Da)

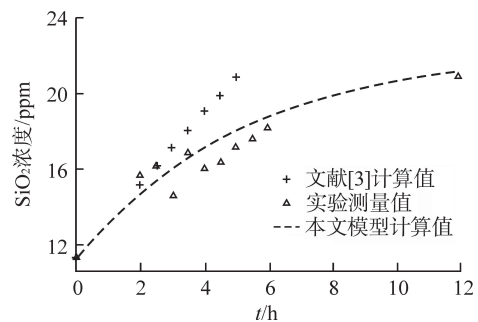


图 6 CHT 中的 SiO₂ 浓度 (MWCO=200 Da)

Fig. 6 SiO₂ Concentration in CHT(MWCO=200 Da)

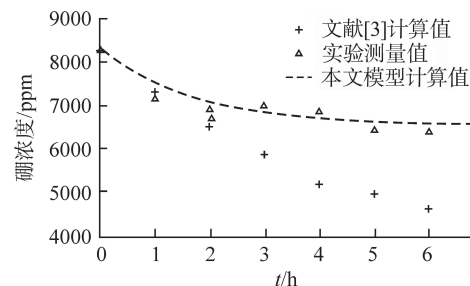


图 7 BAST 中的硼浓度 (MWCO=250 Da)

Fig. 7 Boron Concentration in BAST(MWCO=250 Da)

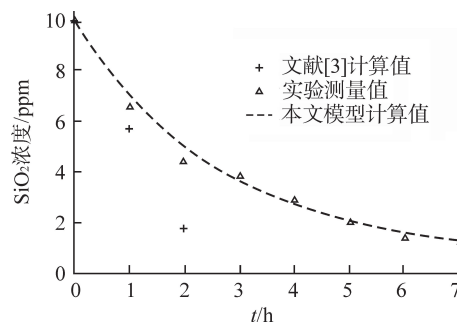


图 8 BAST 中的 SiO₂ 浓度 (MWCO=250 Da)

Fig. 8 SiO₂ Concentration in BAST(MWCO=250 Da)

从本文模型计算值与实验测量值的对比中可以看出，改进后的计算模型与实验结果符合良好，计算精度优于文献 [3] 中的模型。本文提出的改进型计算模型可以用于该含硼水溶硅去除装置

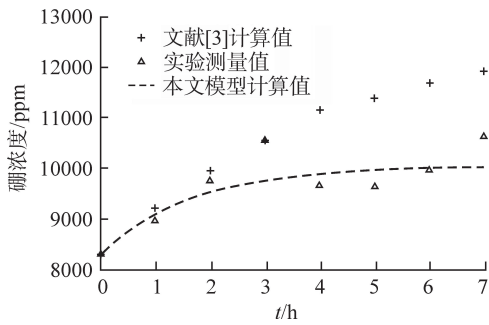


图9 CHT中的硼浓度 (MWCO=250 Da)
Fig. 9 Boron Concentration in CHT(MWCO=250 Da)

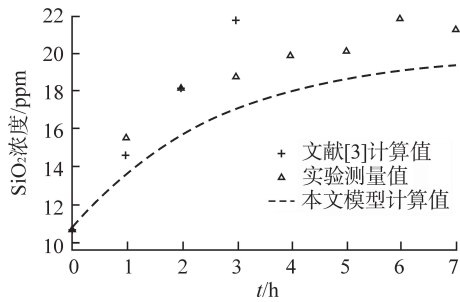


图10 CHT中的SiO₂浓度 (MWCO=250 Da)
Fig. 10 SiO₂ Concentration in CHT(MWCO=250 Da)

的分析与计算，并可作为开展参数优化的模型基础。

3 参数优化

3.1 分离效果

从图3~图10可以看出，随着透析的进行，BAST中的硼浓度与溶硅浓度均下降，而CHT中的硼浓度与溶硅浓度均增加。

为了评价分离效果，定义评价函数 R 为：

$$R = \frac{C'_B/C'_{Si}}{C_B/C_{Si}} \quad (9)$$

式中， C'_B 为透析后的平衡硼浓度； C'_{Si} 为透析后的平衡SiO₂浓度； C_B 为透析前的初始硼浓度； C_{Si} 为透析前的初始SiO₂浓度。

推导BAST和CHT的评价函数 R 分别为：

$$R_{BAST} = \frac{(V_1/V_2) + (1/f_{Si})}{(V_1/V_2) + (1/f_B)} \quad (10)$$

$$R_{CHT} = \frac{1 + f_{Si}(V_1/V_2)}{1 + f_B(V_1/V_2)} \quad (11)$$

由式(10)和式(11)可知，当 V_1 和 V_2 不变时， f_B 越大且 f_{Si} 越小则分离效果越好。

为了评价BAST和CHT的容积对分离效果的影响，只关注溶液浓度变化是不够的。还需要

在评价函数 R 的基础上增加容积项，以体现除硅溶液的产量。因此，定义改进型评价函数 J 为：

$$J = R \left(\frac{V_1}{V_1 + V_2} \right) \quad (12)$$

V_1/V_2 改变时，BAST的评价函数 J_{BAST} 曲线如图11所示。

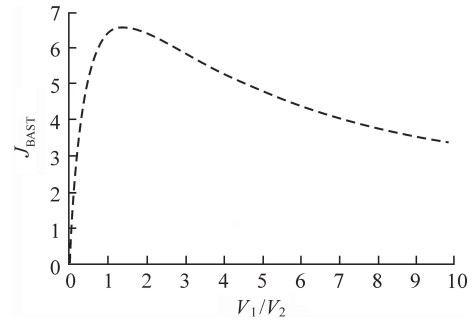


图11 BAST的 J 评价函数
Fig. 11 J Evaluation Function of BAST

根据计算结果可知，当 $V_1/V_2 \approx 1.40$ 时， J_{BAST} 取到最大值6.6069，此时分离效果见表2。

表2 装置分离效果

Tab. 2 System Separation Performance

参数		透析前	透析后
BAST	硼浓度/ppm	7522	5886.8
	SiO ₂ 浓度/ppm	11.50	0.80
	硼浓度/SiO ₂ 浓度	654.09	7404.8
CHT	硼浓度/ppm	7522	9811.3
	SiO ₂ 浓度/ppm	11.50	26.49
	硼浓度/SiO ₂ 浓度	654.09	370.38

3.2 透析时间

从式(6)和式(8)可以看出，随着透析的进行，BAST和CHT中的溶质浓度均以指数函数的形式逼近最终平衡浓度。考虑到 e^{-3} 约等于0.498， e^{-4} 约等于0.0183，从经济性的角度选择 e^{-3} 作为确定透析时间的准则。基于该准则分别确定硼酸与溶硅要求的透析时间要求如下：

$$t_B \geq \frac{3V_1V_2}{(f_B V_1 + V_2)F} \quad (13)$$

$$t_{Si} \geq \frac{3V_1V_2}{(f_{Si} V_1 + V_2)F} \quad (14)$$

从上式中可看出，透析流量越大越有利于缩短透析时间。由于 $f_{Si} < f_B$ ，故 $t_{Si} > t_B$ ，分离装置运行时间应当根据式(14)来确定。

3.3 浓缩液循环流量

虽然式(6)和式(8)中不包括浓缩液循环流量,但由于在模型推导过程中隐含了BAST与CHT中的溶液均匀混合的假设,因此浓缩液循环应有足够的流量,以保证CHT中溶液的均匀性,这也有利于缩短系统到达平衡状态的时间。

4 结论

本文对Liang提出的核电厂含硼水溶硅去除装置建立了改进型计算模型,并通过与实验结果的对比确认其准确性和适用性。基于该模型开展的参数优化研究,为含硼水溶硅去除装置的设计与运行提供如下建议:

(1) 反渗透膜的性能对系统分离效果有重要的影响,在不改变其他条件的情况下, f_b 越大且 f_{Si} 越小则分离效果越好。

(2) BAST和CHT的容积对系统分离效果同样有影响,系统设计时可采用评价函数 J 来寻找最优值。

(3) 透析时间应根据溶硅平衡来确定,推荐采用 e^{-3} 为准则来确定透析时间。

浓缩液循环流量与最终平衡浓度无关,但较大的浓缩液循环流量能够促进CHT中的溶液浓度均匀,有利于加快系统透析除硅的进程。

参考文献:

- [1] 方岚,刘新华,徐春艳,等.压水堆核电厂采用富集硼的优势与可行性分析[J].辐射防护,2019,39(1):19-26.
- [2] 王琳,任云.富集硼酸在压水堆一回路水化学中的应用研究[J].核科学与工程,2013,33(1):44-48.
- [3] LIANG C H. Separation properties of high temperature reverse osmosis membranes for silica removal and boric acid recovery[J]. Journal of Membrane Science, 2005, 246(2): 127-135.
- [4] LIANG C H, SU K H. A cleanup machine using reverse osmosis method to remove silica from boric acid tank at maanshan nuclear power station[J]. Nuclear Technology, 2008, 162(3): 333-341.

(责任编辑:刘君)