

利用 RTD 方法诊断卷式 RO 膜污染的实验研究^{*}

刘锡文

(国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所 天津 300192)

摘要: 实时、在线检测反渗透(RO)膜的污染情况是一个关键问题,但是目前对于这方面的研究较少。概述了利用 RTD 技术测量 RO 膜内流体流动状况的研究进展,重点介绍了卷式 RO 膜 RTD 检测系统,利用 LabVIEW 软件完成了对 RO 膜浓水侧的 RTD 响应信号的数据采集、显示和处理,并对新、旧膜进行了相同条件下的检测实验和数据分析。研究表明,此方法能够实现 RO 膜污染状况的实时、在线诊断,可以广泛应用于反渗透海水淡化工程。

关键词: RTD; RO 膜; 污染; 诊断

中图分类号: TP306 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

Experiments research for using RTD method to diagnose the spiral-wound reverse osmosis membrane fouling

Liu Xiwen

(Institute of Seawater Desalination and Multipurpose Utilization, SOA<Tianjin>, Tianjin 300192, China)

Abstract: Real-time and on-line detection of reverse osmosis (RO) membrane pollution is a key problem, but few researches was done in this area home and abroad. In this paper, the research of measuring the fluidflow of RO membrane by using RTD is outlined, and the diagnose system of spiral-wound reverse osmosis is introduced, and data acquisition, display and processing of RTD response signal for RO membrane module are completed using LabVIEW software, and detection experiments and data analysis under the same condition of new and old membrane are done. The results showed that this method could realize real-time online diagnosis of RO system and be widely applied to RO seawater desalination projects.

Keywords: RTD; RO membrane; fouling; diagnosis

1 引言

卷式反渗透(RO)膜已经普遍应用于海水淡化工程,而膜污染是影响反渗透系统正常运行的重要原因之一。当存在膜污染问题时,会造成 RO 系统产水量下降,脱盐率降低。因此,需要我们准确地了解 RO 膜的污染状况,及时采取有效的措施,从而延长膜组件使用寿命和降低运行费用。

国内外很多专家学者采用平均停留时间(RTD)方法对 RO 膜壳内的流体流动情况进行了研究,以期得出 RO 膜的使用状况。Van Gauwbergen 和 Baeyens^[1-3]采用阶跃法注入示踪剂技术,利用 RTD 方法实验得出,浓水流动中平均停留时间(\bar{t})比理论计算的 \bar{t} 小,表明了 RO 膜内存在死体积,并由此减小了实验 \bar{t} 值。Roth 等人^[4]对新、旧 RO 膜进行了产水侧的 RTD 实验研究,发现新膜的 RTD 响应曲线为单峰的,而旧膜和结垢的膜由于膜破损而发生盐泄漏的影响,RTD 响应曲线为多峰的。Roth 等人^[5]的实验

结果还发现,RTD 曲线的分布情况与示踪剂的种类有关,对于同一支膜采用 3 种不同的示踪剂 NaOH、NaCl 和 HCl 进行测试,结果得出随着示踪剂种类的改变 RTD 曲线也会变化,而且,无论何种示踪剂,旧膜所对应的 \bar{t} 都比新膜要大。Hasson 等人^[6]实验测得浓水侧电导率变化的 NaCl 示踪剂 RTD 响应信号,用带指数修正的高斯模型将 RTD 数据进行拟合。实验结果表明,反渗透膜分散系数(D)随着雷诺数(Re)的增加而线性增大,并且旧膜的 D 值明显高于新膜。系统的 D 值在相对较小的情况下,仍会对流体流动造成明显影响,系统的浓差极化系数(C_p)会显著地增加,产水流量降低,并发生结垢现象。Hasson 等^[7]分别以 Mg(OH)₂ 和 CaCO₃ 污染过的卷式 RO 膜为实验对象,测量 RTD 响应信号。实验得出,随着膜渗透性损失的增加,系统 D 值也会增大,表明了膜污染的发生,也发现了利用 RTD 方法诊断污染沉积物种类的可能性。实验数据还表明,分散程度会随着污染程度的增加而增大,CaCO₃ 垢物

收稿日期:2015-01

^{*} 基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(K-JBYWF-2013-G5)、海洋公益性行业科研专项经费(201205019)

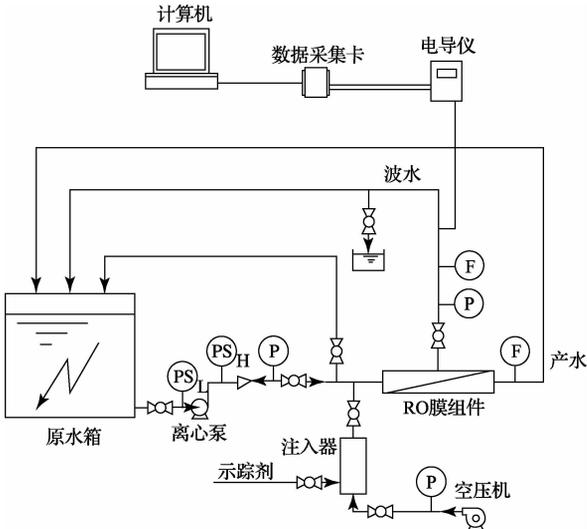
的分散数($D/\mu\text{L}$)比 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 垢物高。杨庆峰^[8]利用 RTD 技术表征了卷式反渗透膜内流体流动的均匀程度,实验结果表明膜器内实际流型同理想活塞流存在重大的偏离,旧膜内的流体流型较新膜器更不均匀,膜内流体流型会随着 Re 值的增大而使流体分布变得均匀,进水压力变化对膜内流体流型没有影响,也说明了 RTD 方法可以用来表征膜破损程度。

以海水淡化工程常用的 8"RO 海水淡化复合膜为实验对象,利用脉冲示踪法检测 RO 浓水侧的 NaCl 示踪剂的 RTD 响应曲线,比较新、旧膜的(\bar{t} 和 $D/\mu\text{L}$ 存在的差异,分析反渗透膜内的流体流动状况,诊断 RO 膜污染情况,保证反渗透海水淡化系统的运行的可靠性。

2 实验验证

2.1 实验装置及流程

本套实验装置中采用美国海德能公司的 8" 反渗透海水淡化复合膜,膜元件型号为 SWC5。实验装置包括反渗透系统和数据采集处理系统,反渗透系统主要包括膜组件、离心泵、水箱、水箱加热器、空压机、示踪剂注入器。数据采集处理系统采用基于 LabVIEW 软件开发的虚拟实验平台,硬件部分包括计算机、数据采集卡、在线电导率仪。在 RO 浓水管路上连接电导率仪的探头,在 RO 进水管路上连接示踪剂注入器。实验装置的工艺流程如图 1 所示。



(C—电导率仪,P—压力表,F—流量计,PS—压力开关)

图1 卷式RO膜RTD检测系统实验流程

2.2 实验方法

采用脉冲示踪法测定 RO 膜浓水侧的 RTD 信号。RO 进水为脱氯自来水,控制进水温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,将浓水调节阀全部打开,以使 RO 膜进水全部从浓水侧流出。调节供水泵变频器和 RO 进水阀门,使进水压力为 0.25 MPa ,进水流量为 90 LPM 。选用浓度为 25 g/L 的

NaCl 水溶液作为示踪剂,将容积为 150 mL 的示踪剂灌入示踪剂注入器内,迅速开启和关闭示踪剂注入阀,过程控制在 1 min 内,将空压机输出的压力为 0.8 MPa 的压缩空气注入到 RO 进水管路。与此同时,设置在 RO 浓水管路上的在线电导率仪把响应信号经数据采集卡传输到电脑。为了确保得到更为准确的实验结果,每组实验重复 5 次,计算其平均值作为一组实验的最终结果。

重复上述操作,调节 RO 进水流量分别为 110 LPM 、 130 LPM 、 150 LPM 、 170 LPM ,并保持进水压力为 0.25 MPa ,依次测定 RTD 曲线。

整个实验过程中分别选用了新膜和污染程度约为 15% 的旧膜为实验对象,进行了 0.25 MPa 、 0.30 MPa 、 0.35 MPa 、 0.40 MPa 进水压力条件下的实验测试,以期得到更准确、更详细的实验数据。

2.3 数据采集处理

由于 LabVIEW 软件特殊的图形化编程语言,缩短了开发周期,并且适用于各种不同的操作系统,因此被广泛应用于工业自动化、测试测量、图像处理、信号处理等很多领域^[9-11]。本研究中运用 LabVIEW 提供的 Sub VI 及其调用功能而实现主程序与各模块间数据的传输及调用,达到实时采集、实时显示、实时分析和实时保存。数据采集处理系统的数据采集界面和数据拟合界面如图 2(a)、2(b) 所示。

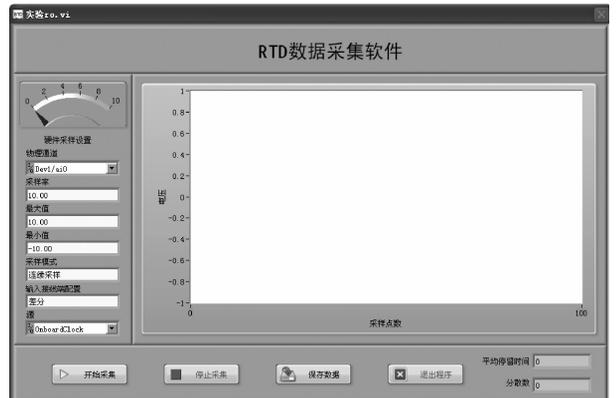


图2(a) 数据采集界面

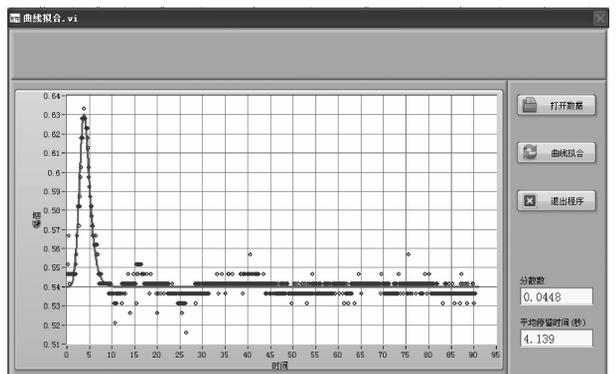


图2(b) 数据拟合界面

3 实验结果和分析

3.1 新膜与旧膜的 $D/\mu\text{L}$ 、 D 值的比较

在进水压力 0.25~0.40 MPa 范围内,通过将新膜和旧膜的 RTD 实验结果进行比较,如图 3(a)、3(b)所示。旧膜 $D/\mu\text{L}$ 、 D 值与新膜相比都明显增大了,并且旧膜的 $D/\mu\text{L}$ 、 D 都与 Re 呈近似线性关系。

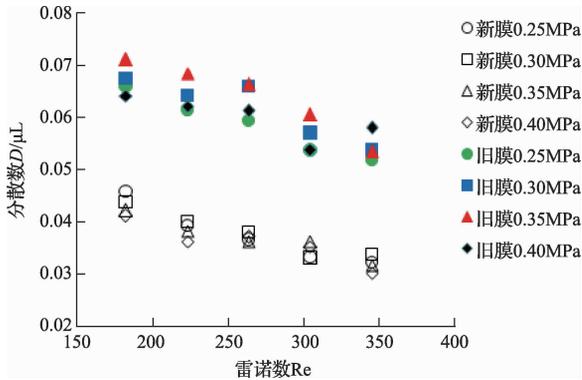


图 3(a) 新膜和旧膜的 Re 与 $D/\mu\text{L}$ 的关系

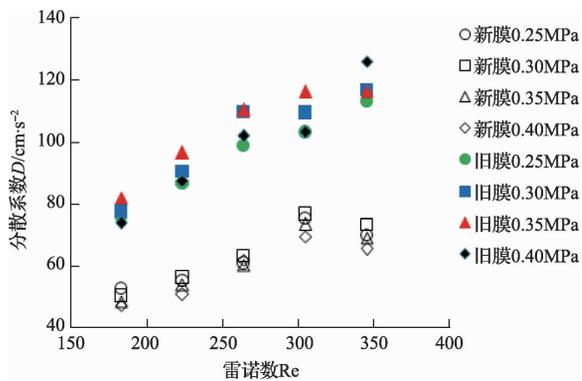


图 3(b) 新膜和旧膜的 Re 与 D 的关系

从图 3(a)中可以看出,新膜 $D/\mu\text{L}$ 为 0.03~0.05,旧膜 $D/\mu\text{L}$ 为 0.05~0.07,该结果说明旧膜内流体流型的轴向分散扩展成分增大了,即流型分布变得不均匀了。

从图 3(b)中看出,新膜的 D 值为 45~80 cm^2/s ,旧膜的 D 值为 70~130 cm^2/s ,该结果表明,随着膜污染的发生,轴向分散扩展程度也增大了。

3.2 新膜与旧膜的 \bar{t} 值的比较

在操作压力为 0.3 MPa, RO 进水流量分别为 110 LPM、130 LPM、150 LPM、170 LPM 条件下,进行了新、旧膜的 RTD 实验。

通过数据采集系统对实验数据的拟合处理,得出了新、旧膜在相同条件下的 \bar{t} 值,如图 4 所示。从图中可以看出,新膜的 \bar{t} 较旧膜的大,表明由于污染物的存在,旧膜的膜表面变的粗糙,浓水流动变窄,导致膜间流道内有效体积减小。随着污染程度的增加,平均停留时间会减小。从图中

的曲线还可以看出,当进水流量(Q)在 110~150LPM 范围内时,旧膜的平均停留时间变化更明显,而进水流量大时曲线较平缓,即平均停留时间的变化较小,说明单支膜的进水流量为 110~150LPM 时更适合膜污染检测。

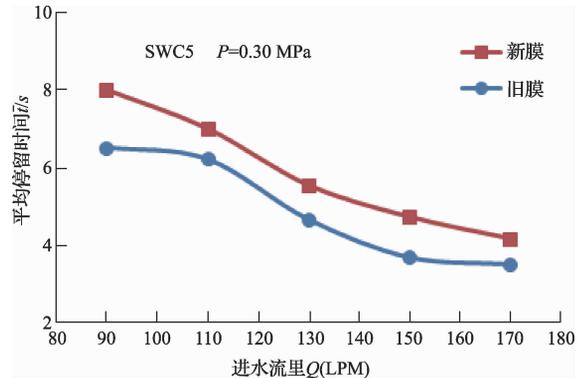


图 4 新膜和旧膜的 Q 与 \bar{t} 的关系

4 结 论

应用 RTD 方法对 RO 膜进行了检测实验,依据 $D/\mu\text{L}$ 、 D 、 \bar{t} 3 个参数可以诊断出 RO 膜的污染情况,并且确定了进水流量的设定范围。结果表明,利用 RTD 方法能够实现 RO 膜系统的实时、在线诊断,可以广泛应用于反渗透海水淡化工程。另外,对于 RO 膜的污染程度和污染物种类的诊断,还需要我们经过大量的实验数据作为理论依据。

参考文献

- [1] VAN GAUWBERGEN D, BAEYENS J. Macroscopic fluid flow conditions in spiral-wound membrane elements [J]. Desalination, 1997, 110(3): 287-299.
- [2] VAN GAUWBERGEN D, BAEYENS J. Assessment of the design parameters for wastewater treatment by reverse osmosis [J]. Water Science and Technology, 1999, 40: 269-276.
- [3] VAN GAUWBERGEN D, BAEYENS J. Macroscopic fluid flow conditions in spiral wound membrane elements: packed bed approach [J]. Water Science and Technology, 2000, 41: 85-91.
- [4] ROTH E, FABRE B, ACCARY A. Sodium chloride stimulus-response experiments in spiral wound reverse osmosis membranes: a new method to detect fouling [J]. Desalination, 1999, 121(2): 183-193.
- [5] ROTH E, FABRE B, ACCARY A, et al. Modelling of stimulus response experiments in the feed channel of spiral-wound reverse osmosis membranes [J]. Desalination, 2000, 127(1): 69-77.

(下转第 139 页)