

再生水廠中空纖維超過濾膜化學現地清洗(CIP)效益之探討

施凱鐘，嘉南藥理大學環境工程與科學系專案講師
黃立維，嘉南藥理大學環境工程與科學系研究所碩士
林瑩峯，嘉南藥理大學環境工程與科學系教授

一、前言

受全球環境變遷的影響，常態性的缺水危機成為臺灣水資源保育的問題與挑戰，其中，都市產生的生活污水，經系統性下水道匯流與污水廠處理，再經由再生水廠進一步淨化後，可成為源源不絕的替代性水資源。其中，如何延長薄膜過濾程序中的薄膜生命週期，降低操作成本，為再生水廠操作營運的重要課題。

超過濾(ultrafiltration, UF)薄膜的其中一種形式為中空纖維薄膜(Hollow Fiber)，當中空纖維薄膜長時間過濾後，薄膜表面與膜孔內易產生結垢，導致過濾水量降低，致使薄膜內外的透膜壓差(Transmembrane Pressure, TMP)增加與薄膜的膜通量(Membrane Flux)降低，此時就必須透過水力沖洗程序，將薄膜內的結垢物沖離薄膜表面，然而薄膜經長期的過濾、水力沖洗程序後，仍無法將薄膜的結垢物沖離膜表面時，就必須以「在線清洗程序」(Clean in Place, CIP)，添加化學藥劑進行現地清洗，除去薄膜的結垢物，恢復薄膜的過濾效能。造成薄膜阻塞結垢的物質大致可分為 6 大類，分別懸浮固體結垢、膜面結垢、金屬氧化物沉澱、膠體阻塞、生物結垢(林隆甫，2009)，文獻報導也說明透過化學性的 CIP 程序可有效清除薄膜上的結垢(Woo, et al, 2015, Porcelli & Judd, 2010, 魏暉倫, 2016)，但是 CIP 清洗時使用的化學藥品種類，是否會影響 CIP 的清洗效益，以及是否可改善中空纖維 UF 薄膜的透膜壓差與膜通量，對以生活污水為處理目標的再生水廠而言，為再生水廠管理營運重要的實務操作課題。

本研究目的為淨化水源來自校園宿舍區污水處理廠放流水的再生水廠，探討中空纖維 UF 薄膜過濾單元進行 CIP 前後的效益差異性。

二、材料與方法

1. 研究廠址與單元概述

本研究再生水廠淨化的水源來自嘉南藥理大學藥宿舍區一期污水處的放流水，該座污水處理廠主要以接觸曝氣法處理宿舍區的生活污水，經二級處理程序後產生的放流水在流入嘉藥再生水工廠，該座再生水廠的處理水量約可達到 100~200m³/day，主要處理程序分別為第一道過濾單元(砂濾)，中空纖維 UF 薄膜過濾單元，以及 RO 逆滲透過濾單元，當平常無使用 RO 逆滲透過濾水的需求時，則將中空纖維 UF 薄膜過濾單元的過濾水經加氯消毒後送至儲水槽，再引流至宿舍區的中水道系統提供宿舍沖廁使用，每日最高可產生 200 m³/day 的 UF 單元過濾水。

表 1 本研究 CIP 清洗藥劑種類與濃度

化學藥劑種類	濃度
HCl	0.5 %
NaOH	0.5 %
NaOCl	1 %

本研究的中空纖維 UF 薄膜過濾單元，由 5 組中空纖維 UF 薄膜管柱構成，薄膜材質為 PTFE，每個中空纖維 UF 薄膜過濾管柱的膜表面積為 50 m²，總膜面積為 250 m²，設計總膜通量為 40 L/m²-h，為量測 UF 單元的水量與壓力，分別在 UF 薄膜單元的進水端、廢水出流端與透水出流端設置流量計與壓力計，以記錄該中空纖維 UF 薄膜過濾單元的壓力變化。

2.CIP 清洗系統與藥劑

本研究 CIP 清洗系統分別由 500L 的藥洗桶、加壓泵浦與進出流清洗管線構成，CIP 清洗時只要分別將清洗管線的進出口與被清洗單元的管線連結，形成可回流管線，即可利用加壓泵浦將配置的清洗藥劑送進薄膜管柱中。清洗的方法為啟動加壓泵浦，將配置好儲存於藥洗桶所的化學藥劑注入薄膜管柱中，並使其迴流循環半小時，之後停止加壓泵浦，使管柱內的薄膜浸泡於化學藥劑中 3 小時後，再啟動加壓泵浦使其循環半小時後，在請動清水使留存在單元的藥劑排出，整個 CIP 清洗流程共計為 4 小時，常態性 CIP 清洗的頻率約為半年 1 次，另外也視 UF 單元的過濾水量與壓力變化進行非常態性 CIP，表 1 為 CIP 清洗時配製之化學藥劑。

3.CIP 清洗效益評估參數

由於本研究之再生水廠為實廠運作，每次試驗收集之數據依宿舍污水廠處理水質變化而有非常大的差異性，為評估每次 CIP 的效益，本研究以每次 CIP 前後膜通量與透膜壓差的上升率或下降率評估數據的良窳。

(1). 膜通量：

$$\text{Flux} = \frac{V}{A \times t} \quad (1)$$

其中，

V：取樣體積, L

A：薄膜表面積, m²

t：取樣時間, hour

(2). 透膜壓差：

$$\Delta P = \frac{(P_{in} + P_{out})}{2} - P_{pe} \quad (2)$$

其中，

P_{in}：濾膜進流水壓力，

P_{out}：濾膜廢水出流壓力

P_{pe}：過濾液出流壓力

三、結果討論

1.常態性固定頻率 CIP 試驗結果

表 2 本研究中空纖維 UF 薄膜單元常態性 CIP 後的各參數數據

評估參數	HCl			NaOH			NaOCl		
	CIP 前	CIP 後	下降或上升率	CIP 前	CIP 後	下降或上升率	CIP 前	CIP 後	下降或上升率
膜通量 (L/m ² -h)	27.8	28.5	2.5 %	28.8	29.2	1.4 %	29.2	29.7	1.7 %
透膜壓差, kPa	68.0	58.0	25.3 %	57.9	50.6	12.6 %	50.5	40.5	19.8 %

進行常態性 CIP 清洗時，分別以濃度為 0.5 % 的 HCl、0.5 % 的 NaOH 與 1 % 的 NaOCl 進行 CIP，本研究的之中空纖維 UF 薄膜單元經過三種不同化學藥劑 CIP 前後的參數如表 2 所示，第一次利用 HCl 為藥劑 CIP 前的 UF 單元膜通量為 27.8 L/m²-h，CIP 後的膜通量升高為 28.5 L/m²-h，UF 單元的膜通量於 CIP 後上升了 2.5 %，CIP 前透膜壓差為 68.0 kPa，CIP 後透膜壓差降低為 58.0 kPa，下降率為 25.3 %，以 NaOH 為藥劑 CIP 後的膜通量上升率為 1.4 %，透膜壓差的下降率為 12.6 %，利用 NaOCl 為藥劑 CIP 後的膜通量上升率為 1.7 %，透膜壓差的下降率為 19.8 %。本次試驗結果顯示，HCl 藥劑 CIP 清洗程序後的膜通量上升率與透膜壓差下降率比其他藥劑的 CIP 高，另外也發現隨著不同藥劑 CIP 後，膜通量逐漸上升，總上升率為 6.8 %，膜通量回復率可達 74 % (以設計膜通量為基準)，透膜壓差逐漸下降，總下降率為 50 %。

2. 非常態性 CIP 試驗結果

本研究使用之中空纖維 UF 薄膜可忍受之最大透膜壓差為 105 kPa，因此當 UF 單元的透膜壓差達到 90 kPa 以上時，即需要立即啟動非常態性的 CIP 程序。本研究的非常性 CIP 時機，為 UF 濾膜的透膜壓差已達 95 kPa，因此先以 NaOH 進行 1 次 CIP，之後再以濃度 NaOCl 再進行 1 次 CIP，收集之數據結果如表 3 所示，以 NaOH 為藥劑 CIP 後的膜通量上升率為 31.4 %，透膜壓差的下降率為 17.3 %，隨後第 2 次以 NaOCl 為藥劑 CIP 後，膜通量上升率為 37 %，透膜壓差下降率為 38 %。綜合非常態性 CIP 的結果，總膜通量上升率可達 83.4 %，膜通量回復率為 55 % (以設計膜通量為基準)，透膜壓差下降率為 47.8 %。

3. 討論

本研究常態性 CIP 前 UF 單元的膜通量為 27.8 L/m²-h，大於第 2 次非常態性 CIP 後中空纖維 UF 薄膜單元的膜通量 (22.2 L/m²-h)，常態性 CIP 前 UF 薄膜單元的進流水 TOC 濃度為 1.41±0.23 mg/L，非常態性 CIP 前進流水 TOC 濃度 6.07±0.51 mg/L，顯示兩種 CIP 程序所面臨的水質具差異性，導致薄膜阻塞的狀況也

表 3 本研究中空纖維 UF 薄膜單元非常態性 CIP 後的各參數數據

評估參數	NaOH			NaOCl		
	CIP 前	CIP 後	下降或上升率	CIP 前	CIP 後	下降或上升率
膜通量 (L/m ² -h)	12.1	15.9	31.4 %	16.2	22.2	37 %
透膜壓差, kPa	95.1	78.6	17.3 %	80.0	49.6	38 %

具差異性，進而影響 CIP 的結果。中空纖維 UF 薄膜上結垢物的種類影響 CIP 的結果，例如 Nicandro. Porcelli 與 Simon. Judd 指出，利用酸性化學藥劑清洗薄膜的宗旨主要是為了去除多價陽離子物質的結構物(Porcelli & Judd, 2010)，本研究常態性 CIP 程序，過濾前的水中 TOC 濃度並不高，所以利用 HCl 藥劑進行 CIP 後的膜通量與透膜壓差的回復表現比另外 2 種藥劑略為優異，CIP 清洗之結構物可能如文獻所述以多價陽離子物質的結構物居多，可能為懸浮固體物或金屬氧化物沉澱形成之結垢物，疏水性結構物次之。

反觀非常態性 CIP 清洗，當時即因過濾水質 TOC 濃度偏高，導致 UF 單元的薄膜阻塞狀況迅速惡化，透膜壓差上升，由 TOC 濃度評估 UF 薄膜上的結垢物可能以有機膠體與生物結垢居多，利用 NaOH 與 NaOCl 可迅速清洗膜上的疏水性有機物與生物性結垢，因此並無進行無酸性藥劑 HCl 的 CIP 程序，直接分別以 NaOH 與 NaOCl 藥劑進行 CIP，試驗結果收集的數據也說明 UF 薄膜單元的透膜壓差的確迅速降低，NaOCl 清洗的效益比 NaOH 佳，驗證文獻說明 NaOCl 的氧化性質比 NaOH 的水解催化作用更顯著(魏暉倫，2016)，但是雖然透膜壓差的下降率幅度大，但是 CIP 後的膜通量回復率僅達 55 %，顯示可能還有其他結垢物仍無法以 NaOH 與 NaOCl 去除，可能仍需要利用 HCl 酸性藥劑進行 CIP 程序。

本研究受限於篇幅與時間的影響，仍有相當多的疑點未說明，未來將持續收集研究廠址 CIP 的數據，提供再生水廠實務性操作之依據。

四、結論

本研究試驗結果顯示，常態性 CIP 後，HCl 藥劑 CIP 清洗程序後的膜通量上升率與透膜壓差下降率比其他藥劑的 CIP 高，另外也發現隨著不同藥劑 CIP 後，膜通量逐漸上升，總上升率為 6.8 %，膜通量回復率可達 74 %，透膜壓差逐漸下降，總下降率為 50 %。非常態性 CIP 後，總膜通量上升率達 83.4 %，膜通量回復率為 55 %，透膜壓差下降率為 47.8 %。CIP 的效率因進流水質的差異呈現差異性。

五、致謝

本研究之再生水廠主要承教育部「優化技職校院實作環境計畫-建置類水資源產業再生水智慧工廠暨人才培育計畫」經費補助設置，在此一併致謝。

六、參考文獻

1. 林隆甫，“薄膜清洗之研究”，碩士論文，成功大學環境工程系(2009)。
2. Y.C., Woo, J.J., Lee, L.D., Tijing, H.K., Shon, M., Yao, H.S., Kim, Characteristics of membrane fouling by consecutive chemical cleaning in pressurized ultrafiltration as pre-treatment of seawater desalination. Desalination, Volume 369, pp. 51-61(2015).
3. Nicandro. Porcelli & Simon. Judd, Chemical cleaning of potable water membranes: A review, Separation and Purification Technology Volume 71, Issue 2, pp.137-143(2010).
4. 魏暉倫，“再生水處理系統操作技術探討”，碩士論文，崑山科技大學環境工程系(2016)。