

臭氧應用於水及廢水處理系統改良之整合型研究：總計畫（I）

Improvement of ozonation systems for the water and waste water treatments (I)

計畫編號：NSC 88-2211-E-002-049

執行期間：87年8月1日至88年7月31日

主持人：張慶源、陳重男、顧洋

主要參與研究人員：邱浚祐、倪振鴻

執行單位：國立台灣大學環境工程學研究所

一、中文摘要

本研究探討臭氧化系統之改良及臭氧尾氣之再利用。在系統改良方面，一則針對普遍使用的臭氧化氣液反應系統探討逆流式與順流式氣泡塔及多段連續攪拌槽操作對臭氧利用率、污染物去除率、及臭氧尾氣排放濃度的影響。此外，臭氧之氧化力雖然很高，但仍有未能將污染物完全礦化之時，其不完全礦化之產物須有進一步之後處理以符合排放標準。在實際應用方面，本研究針對實際工業廢水進行臭氧化效率評估及中間產物與毒性分析。另外，鑑於界面影響因子及污染物成分會影響氣液之溶解行為、質量傳送速率及反應速率，本研究亦探討以臭氧程序進行廢水處理之氣液界面現象及反應動力，以提供臭氧化反應器設計之依據參考。

基於上述之研究目的，本整合型研究進行三項子計畫：1). 逆流與順流式多段臭氧化處理程序之研究，2). 異相催化性臭氧化系統分解水溶液中 2-氯酚之研究，3). 以臭氧程序進行廢水處理液氣界面現象及反應動力之探討。所執行三項子計畫的結果可提供臭氧化系統改良及臭氧尾氣再利用之參考。成果有助於臭氧化程序在污染物處理之應用推廣。

關鍵詞：臭氧、臭氧化反應

Abstract

The improvement of ozonation systems

and the reuse of ozone off-gas are studied. The effects of operations using either countercurrent or cocurrent bubble column reactor (BCR) or countercurrent or cocurrent multi-stage continuous stirred tank reactors (CSTRs) on the ozonation performance are examined. The factors of ozonation performance under consideration include the utilization efficiencies of ozone, the removal efficiency of pollutants, and the emission concentration of ozone gas. For ozonation practice, the treatment of industrial wastewater with ozone is studied, and the evaluation of ozonation efficiency and the analysis of intermediates and toxics are performed. Further, the study on the effects of surface phenomena on the treatment of refractory organic compounds in aqueous solution by ozonation processes is conducted to provide the dissolution, mass transfer and intrinsic kinetic data for the process design. The results of this study can provide the useful information for the improvement of ozonation systems and the reuse of ozone off-gas, and are of importance for the application promotion of ozonation processes for the treatment of pollutants.

Keywords: ozone, ozonation

二、計畫緣由與目的

臭氧應用於污染物質的處理極受到學術界和實務界的重視，不但研究的課題和層面日益深廣，實際用途的開發上也日益廣泛。其應用範疇由液相而及於氣相的各類標的物質，如消毒殺菌、鐵錳去除、臭

味控制、高強度或高濃度不易分解之有機物的破壞分解、管線中黴菌與空氣中細菌消滅等，皆已有成功的文獻報告。其學理和機制上的探討研究更是累積了近一百年的成果。

國內在臭氧方面的相關研究也有了相當的累積。最早的研究亦係著眼於消毒殺菌，其後漸及於廢水中人工合成有機物(SOC)的氧化處理。並擴及其它相容程序的併用或激發，如UV激發、TiO<sub>2</sub>光解、活性碳處理等，使研究的內涵益加豐碩。而研究的人力，也由少數一、二人而至目前的十數人。為免此人力、研究設備和題材過於離散而致研究格局太小，並且缺少整合，因此亟須將此資源於既有的基礎上予以統合，以一中尺度規模的研究群體，將臭氧研究相關的課題先予以釐清劃分，進而可作充份的支援和合作，使研究的質量躍昇。

本研究群體繼「臭氧應用於污染物處理之機制及效應研究」重點研究群整合型計畫，再規劃提出「臭氧應用於水及廢水處理系統改良之整合型研究」以推廣並落實臭氧應用。本整合型計畫的人力及研究設備涵蓋三個研究單位，三名主持教授：台灣大學環境工程學研究所張慶源教授（總召集人及子計畫一“逆流與順流式多段臭氧化處理程序之研究”主持人）、交通大學環工所陳重男教授（子計畫二“異相催化性臭氧化系統分解水溶液中2-氯酚之研究”主持人）、台灣科技大學化工所顧洋教授（子計畫三“以臭氧程序進行廢水處理液氣界面現象及反應動力之探討”主持人）。此三單位皆位於北部地區，聯繫協商與支援上均甚便捷。

本研究探討臭氧化系統之改良及臭氧尾氣之再利用。在系統改良方面，一則針對普遍使用的臭氧化氣液反應系統探討逆流式與順流式多段氣泡塔及多段連續攪拌槽操作對臭氧利用率、污染物去除率、及臭氧尾氣排放濃度的影響。此外，臭氧之氧化力雖然很高，但仍有未能將污染物完全礦化之時，其不完全礦化之產物須有進一步之後處理以符合排放標準。在實際應

用方面，本研究針對實際工業廢水進行臭氧化效率評估及中間產物與毒性分析。另外，鑑於界面影響因子及污染物成分會影響氣液之溶解行為、質量傳送速率及反應速率，本研究亦探討以臭氧程序進行廢水處理之氣液界面現象及反應動力，以提供臭氧化反應器設計之依據參考。

基於上述之研究目的，本整合型研究進行三項子計畫：1).逆流與順流式多段臭氧化處理程序之研究，2).異相催化性臭氧化系統分解水溶液中2-氯酚之研究，3).以臭氧程序進行廢水處理液氣界面現象及反應動力之探討。所執行三項子計畫的結果可提供臭氧化系統改良及臭氧尾氣再利用之參考。成果有助於臭氧化程序在污染物處理之應用推廣。

### 三、研究方法與成果

#### 3.1 研究方法

本「臭氧應用於水及廢水處理系統改良之整合型研究」計畫包含以下三個子計畫：

- 1).逆流與順流式多段臭氧化處理程序之研究，
- 2).異相催化性臭氧化系統分解水溶液中2-氯酚之研究，
- 3).以臭氧程序進行廢水處理液氣界面現象及反應動力之探討。

各子計畫之主持人分別為：1)張慶源教授，2)陳重男教授，3)顧洋教授。

各子計畫研究人員以不定期之協調溝通及定期之成果進度報告為整合各子計畫研究方向為主要方式。計畫執行中將不斷與政府相關單位(如:環保機關、工業局等)、產業界(如:水與廢水處理廠、臭氧應用之相關廠商)、及研究單位等交換研究相關資訊、討論研究方向，以其落實研究成果。

#### 3.2 研究群發展之現況與成果

「臭氧應用於水及廢水處理系統改良之整合型研究」計畫研究群之本年度成果主要為：

子計畫一「逆流與順流式多段臭氧化處理程序之研究」成果為：

### 1. 順/逆流式氣泡塔反應器

利用Marinas et al. (1993)的氣泡塔模擬甲酚(O-cresol)的臭氧化。模擬所應用的相關參數如Marinas et al. (1993)所引用，包括： $Q_L = 278 \text{ cm}^3/\text{s}$ ， $Q_G = 100 \text{ cm}^3/\text{s}$ ， $d_R = 16.20 \text{ cm}$ ， $L = 488 \text{ cm}$ ， $T = 286 \text{ K}$ ， $C_{O_3} = 0.0019 \text{ M}$ ， $C_{BTlbo} = 0.001 \text{ M}$ ， $y_0 = 0.03$ ， $k_{am} = 0.00024 \text{ s}^{-1}$ ， $k_R = 12000 (\text{M s})^{-1}$ ， $He = 2.055$ ， $\beta_R = 0.5$ ，及利用Hughmark (1967)估計其 $k_L^0 = 0.015 \text{ cm s}^{-1}$ ， $a_c = 0.7$ 。經無因次群計算可得 $Pe_L = 8.19$ ， $Pe_G = 0.14$ ， $St_L = 3.88$ ， $St_G = 5.25$ ， $M_{am} = 0.0000186$ ， $M_R = 0.93$ ， $D_{am} = 0.085$ ， $D_R = 4240$ 。引用上述參數值於本模式中，則氣泡塔中包含有臭氣自解反應及臭氣與甲酚反應的模擬結果圖1(逆流式的氣液接觸)及圖2(順流式的氣液接觸)。由圖1可看出，液相一進入氣泡塔中，即因為分散效果及污染物與液相臭氣反應，使得液相中的污染物濃度快速降低。例如圖1在塔頂液相中污染物由無因次濃度1快降低至0.96，而後液相中污染物隨著塔高位置的下降，濃度逐漸降低。而氣相中臭氣的濃度由塔底進入後隨塔高位置上升而逐漸降低。液相中臭氣因與污染物快速反應，而一直維持在低值(如圖1液相中的臭氣濃度為0.0003變化至0.0001)。而圖2為順流式操作，液相中污染物的濃度隨塔高位置的上升而濃度下降。由圖1及圖2中氣相出口的濃度可計算氣相臭氣的利用率或利用液相中污染物出口的濃度可計算污染物的去除率。在圖1逆流的BCR操作中，其臭氣的利用率為88.7%，污染物的去除率為29.9%；而圖2順流式的BCR操作中其臭氣的利用率為88.6%，污染物的去除率為29.6%。因此在BCR操作上逆流式的臭氣利用率及污染物的去除率僅稍高於順流式。

### 2. 單/多段氣泡塔反應器

圖3與圖4為單段BCR與4段BCRs串聯的比較。圖3為逆流式操作，圖4為順流式操作，其操作的條件與圖1、圖2相同，但

多段操作則限制其反應器的總體積與單段相同。由圖中可看出多段串聯的BCRs操作中，其臭氣體的利用率與污染物的去除率均與單段BCR的操作結果相同。因此在BCR的操作中，單段BCR與多段BCRs的操作結果相同。但單段BCR在維修上因其塔僅有一個，當BCR有損壞或阻塞時，必須使BCR操作完全停頓。而多段BCRs只要抽換部分管件即可，其他管件仍可持續使用，因此多段BCRs的維護比單段BCR便利。

### 3. 單槽BCR與串聯多槽CSTR的比較

Levenspiel (1972)以追蹤劑(tracer)進行單相流體流動實驗並提出單相的分散性模式及下列方程式。

$$1/Nte = 2(1/Pe) - 2(1/Pe)^2(1 - e^{-Pe}) \quad (1)$$

上式中， $Pe$  為  $Pe_L$  或  $Pe_G$ ， $Nte$  為連續攪拌槽(continuous stirred tank, CST)的個數。式(1)可用來估計達到與氣泡塔相同的氣相或液相流體狀態所需要的串聯式CSTR的個數。因此若要描述氣相的狀態則可將  $Pe_G$  代入上式中，若要描述液相的狀態則可將  $Pe_L$  代入上式估算。將圖1 BCR 模擬的出口污染物濃度與串聯的CSTR比較，結果如圖5。由圖中可看出BCR出口污染物的濃度明顯均比CSTR的濃度高。當  $Pe_L = 8.2$  時( $Nte = 4.67$ )，若要描述BCR中液相的行為則需要以5個CSTRs來描述；若要描述BCR氣相的行為則只需要1個CSTR( $Pe_G = 0.14$ ;  $Nte = 1.05$ )。因此若只利用1個CSTR來描述此時的BCR，顯然使液相中的行為不合。此時BCR污染物的出口濃度比1個CSTR出口的濃度僅高出約1.5% (BCR:0.7133, CSTR:0.7023)。但若有另一BCR其無因次群值除  $Pe_G$  外均與圖1相同，若其  $Pe_L = Pe_G = 8.2$ ，則利用此BCR與串聯的5個CSTR比較，其出口的污染物濃度亦僅高出約0.8%。因此在  $Pe_L > Pe_G$  的BCR中，模擬BCR所需串聯CSTR的個數，應可由  $Pe_G$  決定。

子計畫二「異相催化性臭氧化系統分解水溶液中 2-氯酚之研究」成果為：

1. 建立一個異相催化性臭氧化系統，藉著固相之金屬氧化物催化劑，結合吸附及氧化之特性於臭氧化系統中，促進水溶液中有機物之礦化。

2. 本研究中以 2-氯酚與草酸為目標污染物，探討催化劑種類、劑量、pH 值等因子，藉由分析其反應速率、礦化程度、臭氧消耗率與生物毒性變化等，評估此異相催化性臭氧化系統的效能，並進行反應動力之探討。

3. 以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  為主之異相催化性臭氧化系統，在中性條件下礦化 2-氯酚有最顯著之增強效果（從 22% 增加至 43%），臭氧的消耗率為傳統系統之二分之一。同時經長效性試驗，發現該催化劑可重複使用，且對於毒性之去除亦相當穩定，去毒效果更佳。

4. 臭氧化過程之毒性分析如圖 6（表示 5 分鐘的毒性單位隨時間的變化）。傳統性臭氧化反應之前期，毒性增強，推測在此期間所產生之中間產物為 chlorocatechol、chlorohydroquinone、hydroquinone 等毒性高於 2-氯酚之物種，或中間產物之間產生毒性協同效應所致。反應進行至三十分鐘，毒性下降，推測此時之中間產物中有 catechol 類物種產生，該物種之毒性較 2-氯酚低。反應持續進行至四十分鐘，2-氯酚在此時濃度已近乎零而進入末期反應，此時之中間產物為醛、酮類物種，毒性仍偏高。最末，醛類及酮類繼續被氧化成酸，故毒性再度漸減。加了催化劑之異相催化系統中，毒性自始至終為減毒的趨勢。

5. 在中性下，分別使用自製之三種催化劑、及其擔體（5 g），在中性下催化草酸之臭氧化，並與傳統程序比較，結果如表 1。比較之結果，以  $\text{MnO}_2$  具有較佳之結果。

6. 酸性下（ $\text{pH}=3$ ）以  $\text{MnO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{MnO}_2/\text{SiO}_2$  催化草酸之臭氧化，其催化效果非常快速，40 分鐘內即可將草酸完全分解。反應初期，水溶液中臭氧濃度很低，表示臭氧持續消耗，反應末期，草酸已幾乎完全分解，臭氧濃度使開始累積（圖 7）。

子計畫三「以臭氧程序進行廢水處理液氣界面現象及反應動力之探討」成果為：

1. 利用過氧化氫/臭氧程序處理水中不易被生物及化學氧化分解的氯酚類有機物。探討水溶液 pH 值、過氧化氫/臭氧劑量比對反應去除效率與反應完全性的影響。

2. 溶液 pH 值對於以過氧化氫/臭氧程序分解 2-氯酚的影響顯著，溶液愈趨向鹼性，其分解的反應速率愈快。

3. 水溶液中界面活性劑的添加能有效降低表面張力，使得水溶液中氣泡變小而增加質傳面積，進而增進液相臭氧的累積速率。因此，對於質傳控制的反應而言，添加界面活性劑能有效加快反應物種的去除速率。

4. 在臭氧的使用效率方面，固定溶液 pH 值及臭氧進料濃度之下，不同的過氧化氫進料濃度即代表不同進料過氧化氫/臭氧劑量比，由於過氧化氫同時具有產生及捕捉氫氧自由基的作用，因此過氧化氫的添加劑量比對臭氧使用效率有極大的影響（如圖 8 所示），隨著劑量比的增加，最終產物的生成速率降低，而當劑量比提高到 10 的時候，臭氧利用率最差。對於過氧化氫的添加量則有一最適值，在本研究範圍內之最適值為  $\text{H}_2\text{O}_2/\text{O}_3=0.1$ ，因為添加過量的過氧化氫時，可能由於水中已無剩餘的臭氧存在，過氧化氫轉而和水中的 OH 自由基反應，形成自由基捕捉劑，反而降低處理效果。本研究與臭氧單獨程序比較下，證明過氧化氫確有其促進效果，另外，在評估處理程序的效果時，不宜只採用反應物的去除效果，而必須同時考慮最終產物的生成情形，確認其達到完全反應的目的。

5. 本實驗即利用先前實驗的基礎，以過氧化氫/臭氧程序在固定氣體流速（200 ml/min）、pH 值（ $\text{pH}=3.0$ ）、臭氧質量流率（12.1 mg/min）、溫度（ $25^\circ\text{C}$ ）及攪拌速度（300 rpm）之下，個別添加 0.01 mM 之 CTAB、0.02 mM 之 SDS 及 0.005 mM 之 Brij35 三種界面活性劑來處理 2-氯酚有機物，而針對 2-氯酚的去除、氯離子的生成及礦化情形作一比較。實驗結果如圖 9 至

圖 10。由圖中發現，無論是 2-氯酚的去除、氯離子的生成亦或是總有機碳的去除，皆為添加 0.02 mM 之 SDS(陰離子界面活性劑)的效果為最佳，而添加 0.01 mM 之 CTAB(陽離子界面活性劑)最差，甚至較未加界面活性劑時來的更差。其中卻又以添加 0.01 mM 之 CTAB 所促進的表面張力影響最低，而添加 0.02 mM 之 SDS(陰離子界面活性劑)所造成之表面張力影響為最高。根據以上的觀察結果，推測可能是界面活性劑在過氧化氫/臭氧程序中不單只是扮演致表面張力下降劑，其可能與溶液中之 2-氯酚、中間產物，甚或過氧化氫、臭氧等物質產生某種程度的化學或物理行為，推測是界面活性劑也參與了自由基的捕捉，因而不能單以表面張力的角度來判斷其對臭氧相關程序處理有機物的影響，此外界面活性劑的親水性強度亦會影響質傳的效果親水性愈強，則會使得氣液薄膜厚度變薄，因而增進臭氧的質傳。

本計畫為上述研究群之整合運作計畫，在本年度之預期工作項目及成果主要為：

1. 協調各子計畫之執行，以使研究資源得以充分利用。
2. 定期舉行子計畫之進度協調會，確實瞭解各子計畫之進度，並設法盡可能解決其推動的困難。
3. 舉行子計畫之成果報告會。
4. 彙整各子計畫之報告內容，提供國科會及各相關單位參考。
5. 舉行各子計畫主持人與相關單位、業者之意見溝通，以瞭解不同領域之看法，調整研究內容及方向，期使研究成果能更容易推廣並落實應用。

#### 四、結果與討論

1. 各子計畫已依規劃項目，進行下列研究：  
(1) 逆流式單段氣泡塔及多段連續攪拌槽臭氧化處理程序，(2) 異相催化性臭氧化系統分解水溶液中 2-氯酚之研究，(3) 以臭氧程序進行廢水處理液氣界面現象及反應動力之探討等。

2. 總計畫已協調各子計畫在研究資源與成果上互相支援合作，發揮整合效果。
3. 出席於 1999 年 8 月 22-26 日在美國密西根舉行之 14th Ozone World Congress and Exhibition，於會中發表 4 篇論文。會議期間並與各國相關人員交換研究心得，達到與國外學術交流之成效。
4. 出席 1999 年 10 月在台北舉行的 IAWQ 會議，於會中發表論文。會議期間並與各國相關人員交換研究心得，達到與國外學術交流之成效。
5. 研究群執行計劃之成果論文發表：  
子計畫一「逆流與順流式多段臭氧化處理程序之研究」：  
參閱文獻 1, 2, 3, 4。  
子計畫二「異相催化性臭氧化系統分解水溶液中 2-氯酚之研究」：  
參閱文獻 2, 3, 4。  
子計畫三「以臭氧程序進行廢水處理液氣界面現象及反應動力之探討」：  
參閱文獻 2, 3, 4。

#### 五、參考文獻

1. Chang, C. Y., Hsu, H. Y., Chen, K. C., Chiu, C. Y., Lee, S. J. and Shih, S. M. (1999) "A film model for gas absorption with an irreversible chemical reaction of general order in the presence of interfacial resistance," J. Chin. Inst. Envir. Eng. (Taiwan), 9(3), 179~186.
2. Li, H., Chang, C. Y., Chiu, C. Y., Yu, Y. H., Chiang, P. C., Chen, Y. H., Lee, S. J., Ku, Y., and Chen, J. N. (1999) "Kinetics of ozonation of polyethylene glycol in printed wiring board electroplating solution" J. Chin. Inst. Envir. Eng. (Taiwan). (Accepted).
3. Chiu, C. Y., Chang, C. Y., Lee, S. J., Huang, W. H., Yu, Y. H., Liou, H. T., Ku,

Y. and Chen, J. N. "Ozone Mass Transfer with Combined Effects of Ozone Decomposition and Reaction with Pollutants in a Semibatch Stirred Vessel," appears in Proc., 14th Ozone World Congress of The International Ozone Association, Dearborn, Michigan, U.S.A., August, 22-26, 2, 459-471, 1999.

4. Li, H., Chang, C. Y., Chiu, C. Y., Yu, Y. H., Chiang, P. C., Ku, Y., Chen, J. N. and Lee, S. J. "Removal of polyethylene glycol in printed wiring board electroplating solution by O<sub>3</sub> process" appears in Proc., 7th IAWQ Asia-Pacific Regional Conference, Taipei, Taiwan, October, 18-20, 1, 664-669, 1999.

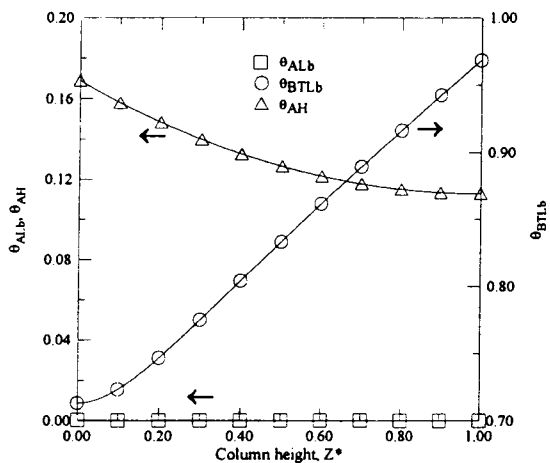


Figure 1.  $\theta_{ALb}$ ,  $\theta_{BTLb}$ ,  $\theta_{AH}$  vs. column height for operation in countercurrent mode of one-stage bubble column reactor (BCR).  $d_r = 16.20$  cm,  $L = 488$  cm,  $Q_L = 278$  cm<sup>3</sup>/s,  $Q_G = 100$  cm<sup>3</sup>/s,  $Pe_L = 8.20$ ,  $Pe_G = 0.14$ ,  $St_L = 3.88$ ,  $St_G = 5.25$ ,  $C_{AGi}^0 = 0.0019$  M,  $C_{BTLb0} = 0.001$  M,  $y_0 = 0.03$ ,  $m' = 1$ ,  $n' = 1$ ,  $a' = 1$ ,  $b' = 1$ ,  $M_{am} = 0.000019$ ,  $M_{bn} = 0$ ,  $M_R = 0.929$ ,  $D_{am} = 0.085$ ,  $D_{bn} = 0$ ,  $D_R = 4240$ .

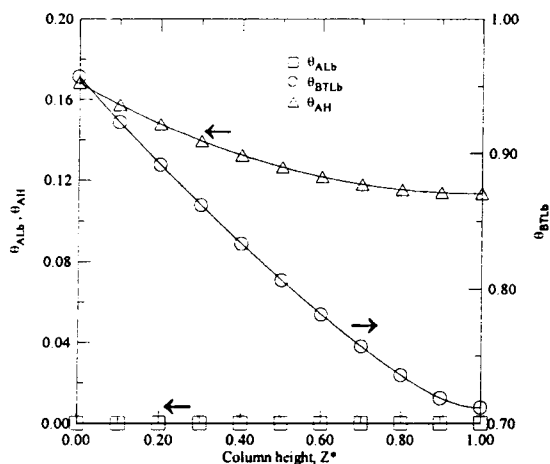


Figure 2.  $\theta_{ALb}$ ,  $\theta_{BTLb}$ ,  $\theta_{AH}$  vs. column height for operation in cocurrent mode of one-stage bubble column reactor (BCR). Other notations and values of parameters are the same as Figure 1.

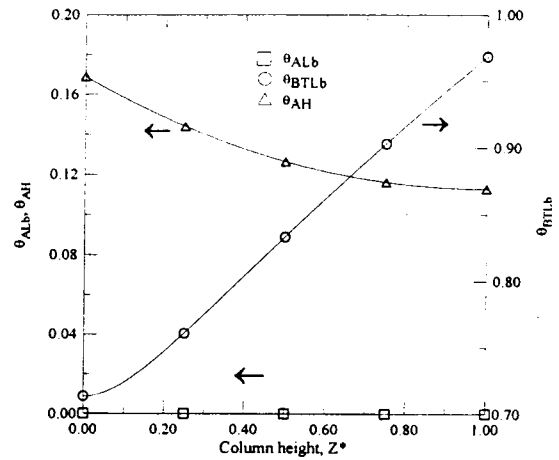


Figure 3. Comparison of predicted  $\theta_{ALb}$ ,  $\theta_{BTLb}$ ,  $\theta_{AH}$  by one-stage BCR (—) and four BCRs in series (symbols) for operation in countercurrent mode.  $L = 488$  cm for one-stage BCR,  $L_4 = L/4$  for four-stage BCRs. Other notations and values of parameters are the same as Figure 1.

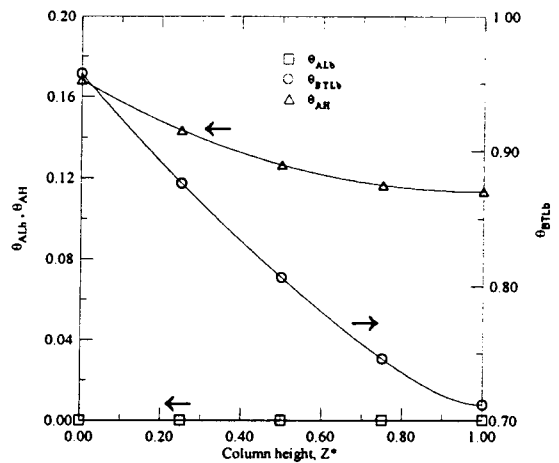


Figure 4. Comparison of predicted  $\theta_{ALb}$ ,  $\theta_{BTLb}$ ,  $\theta_{AH}$  by one-stage BCR (—) and four BCRs in series (symbols) for operation in cocurrent mode.  $L = 488$  cm for one-stage BCR,  $L_4 = L/4$  for four-stage BCRs. Other notations and values of parameters are the same as Figure 1.

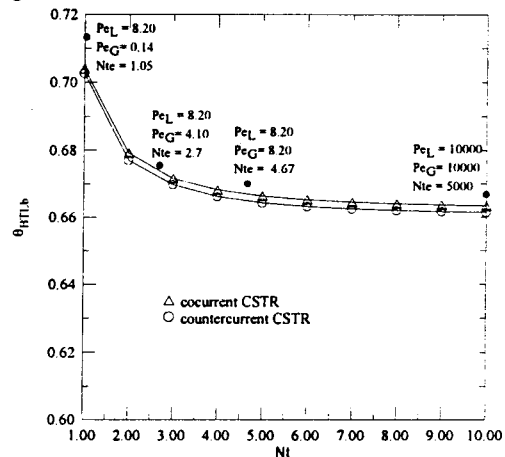


Figure 5. Comparison of  $\theta_{BTLb}$  for cocurrent ( $\Delta$ ) and countercurrent ( $\circ$ )  $Nt$ -stage CSTRs in series with those for countercurrent one-stage BCR ( $\bullet$ ).  $d_r = 16.20$  cm,  $L = 488$  cm,  $Q_L = 278$  cm<sup>3</sup>/s,  $Q_G = 100$  cm<sup>3</sup>/s,  $St_L = 3.88/Nt$ ,  $St_G = 5.25/Nt$ ,  $C_{AGi}^0 = 0.0019$  M,  $C_{BTLb0} = 0.001$  M,  $y_0 = 0.03$ ,  $m' = 1$ ,  $n' = 1$ ,  $a' = 1$ ,  $b' = 1$ ,  $M_{am} = 0.000019$ ,  $M_{bn} = 0$ ,  $M_R = 0.929$ ,  $D_{am} = 0.085$ ,  $D_{bn} = 0$ ,  $D_R = 4240$ .  $Nt = Nte$  estimated by Eq. (40) with  $Pe_G$ .

表 1a. 異相催化性臭氧化程序對草酸分解之綜合評估( $\text{Al}_2\text{O}_3$  系).

催化劑	$\text{O}_3$ alone	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$
草酸總去除率(%)	10.3	14.0	7.2	9.0	13.8
吸附(%) / 氧化(%)	0/10.3	8.5/5.5	4.2/3	2.5/5.5	9.6/4.2
$\Delta \text{O}_3 / \Delta \text{ox acid}$	2.00	1.03	2.7	2.34	1.42

表 1b. 異相催化性臭氧化程序對草酸分解之綜合評估( $\text{SiO}_2$  系).

催化劑	$\text{O}_3$ alone	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$	$\text{MnO}_2/\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$
草酸總去除率(%)	10.3	2.5	3.5	9.5	3.9
吸附(%) / 氧化(%)	0/10.3	0/2.5	1.0/2.5	0/9.5	0/3.9
$\Delta \text{O}_3 / \Delta \text{ox acid}$	2.00	6.57	6.41	1.56	5.88

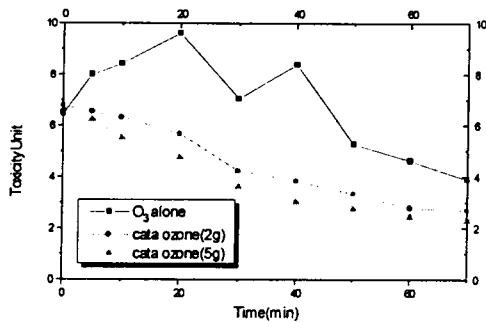


圖 6. 2-氯酚在傳統及催化性臭氧化分解過程中毒性之變化(5 min).

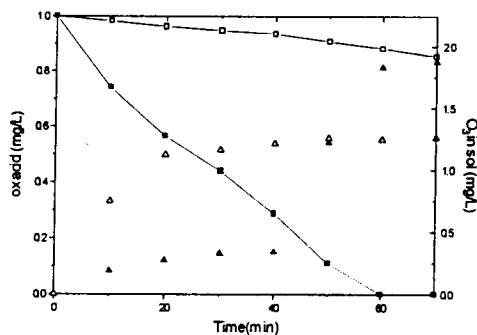


圖 7. 酸性下傳統及催化性臭氧化系統分解草酸之比較(triangle: 水溶移中臭氧濃度; square: 草酸濃度; open: 傳統臭氧化; solid: 催化性臭氧化).

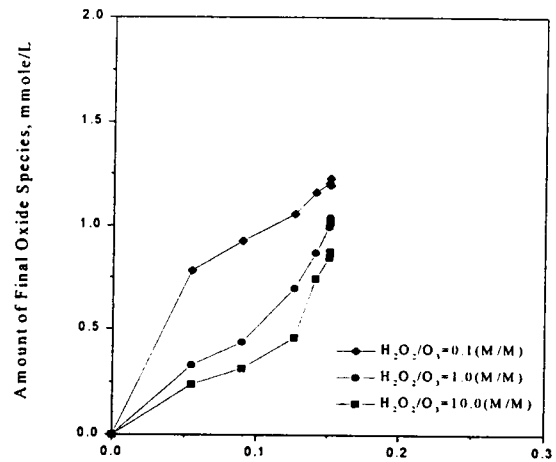


圖 8. 不同過氧化氫/臭氧劑量比時, 臭氧使用總量與最終氧化態生成總量的關係圖.

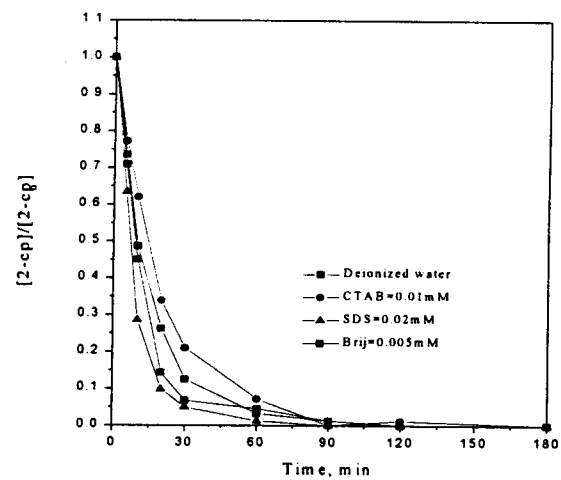


圖 9. 在添加不同型式界面活性劑下, 2-氯酚濃度剩餘比例隨時間之變化情形.

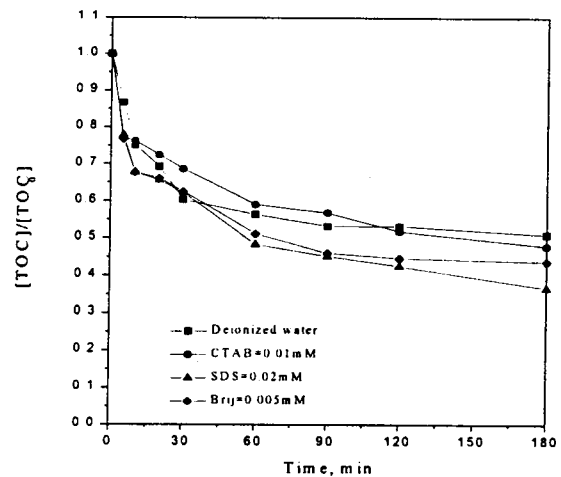


圖 10. 在添加不同型式界面活性劑下, 總有機碳濃度剩餘比例隨時間之變化情形.