

## UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>技術在化工業上之應用

蘇弘毅\* 洪錫勳\*\*

### 摘要

高等氧化程序之技術經過多年的發展後已經廣泛的應用在各類工業廢水、地下水污染以及空氣污染之處理上；適用的污染物有揮發性有機物，半揮發性有機物，芳香烴，多環芳香烴及石化污染物等，範圍非常廣泛。其反應器之操作參數以pH、UV光強度、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>濃度、污染物初濃度為最重要。本文就高等氧化程序之背景簡介、原理、優缺點以及在染整業及地下水之應用各項逐一作簡單之介紹，以提供工業界在選擇防污程序時之參考。

#### 【關鍵字】

- 1.高等氧化程序(Advanced Oxidation Processes)
- 2.染整廢水(Dye Industrial Waste Water)
- 3.地下水整治(Groundwater Remediation)
- 4.紫外線(UV,Ulfraviolet)
- 5.過氧化氫(Hydrogen Peroxide)

---

\*弘光醫事護理專科學校工安科副教授

\*\*高雄工學院化工系副教授

## 一、前　　言

近年來環保意識高漲，人們對生活環境之要求亦日益提升，在發展工業同時，也應兼顧環境品質下。各界對環保技術之研發，不遺餘力，以減少工業發展帶來負面影響，及對社會經濟之衝擊。工業廢水或家庭污水雖有時量少，但長久累積或排放濃度高時，對自然生態經年累月的破壞，將造成無可補救之損害。近年來，有關環保技術之研發與投資，在學術及工業界已形成共識，在社會民眾心裡亦形成一股潮流。

工業廢棄物種類繁多，由於排放孔道亦多，伴隨受染之周遭環境實難以有效界定，除末端處理外，業主及現場工作人員之環保意識與警覺尤其重要。而廢棄物本身及受染之周遭環境之中間處理，經研究人員多年開發已有部份技術為工業界所廣泛引用，如焚化、水洗、活性碳吸附、生物消化及高等氧化等，其中高等氧化法-諸如氯化、臭氧氧化及紫外線臭氧氧化等，均有除臭、除味、除色、去毒或降解等實績-在應用去毒上具悠久歷史:高等氧化技術(AOP)係將適當強氧化劑加入受污染之飲用水、地下水、廢污水以及受污染固體、土壤或空氣等，使其藉由氧化、降解而淨化或轉化成低污染物質，其中紫外線臭氧氧化和紫外線過氧化氫氧化經實驗證實非常有效；而此一高等氧化技術特別適用於(1)降解低濃度有害性有機物質(如受污染之地下水體)。(2)快速預處理小體積高強度之廢污水使之適於生物處理。(3)處理含有生物處理不易降解物質之廢污水(如氰化物、金屬錯合物)。(4)與生物處理程序聯結使用〔作為其後處理程序〕以減低放流水之毒性。因此高等氧化法亦可結合其他處理技術以達到最適化及經濟性(Cost Effective)之處理。

目前在自來水淨化及廢水處理過程中加氯仍被普遍採用，主要是因氯在水中可轉化為次氯酸及氯化銨等化合物，使水在輸送過程中仍保有防污效果，但氯易與水中有機物反應形成難以去除之致癌物如三氯甲烷等，因此在飲用水應用上已較為謹慎，生化處理法在廢水處理使用上亦廣為人所接受，其經濟性高，亦可作大規模連續性處理，但菌種對環境條件之變遷，適應性不易掌握，如 pH、濃度及溫度之劇變引發之適應不良常導致其死亡；尤其部分重金屬之存在更影響其生存，若要用生化法將廢水濃度降至放流水排放標準，宜特別對

環境變數作適當而嚴格之控制，尤其對生化難降解或毒性物質，在處理流程中更應嚴格監控，以保有菌種活性；而在處理過程中所排放污泥之後續處理，亦應審慎納入評估；因此生化、高級氧化或活性碳法常交互串聯使用，使水質淨化處理之經濟效益增加。

化工製程、產生了多樣化之水污染物，而使得其廢水無法以簡單經濟之處理方法來處理(除污)。理論上各工業之廢污水必須先經預處理再排入公用之處理廠，在一項預處理方法評估報告中Goronszy等提出化學氧化法為最有效而簡易的預處理法<sup>(1)</sup>，此一技術可以有效地去除引起臭味的硫化物，控制細菌之成長，減少水中之化學需氧量(COD)，而最為有效的氧化處理則屬結合UV和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>或臭氧之高等氧化程序。理論上臭氧和H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>可以氧化無機物至其最高之氧化態，亦可將有機物氧化至最終產物CO<sub>2</sub>，H<sub>2</sub>O。但是由於其選擇性和對某些難降解物質之低反應速率，因而發展出了以紫外光激發O<sub>3</sub>，H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>產生OH·自由基之高等氧化法，用以降解頑強污染物。UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>程序可以消除不為H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>單獨降解之污染物，而且此一程序不會形成污泥、揮發性空氣污染等，可以節省後續的污染物處理問題。而UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>亦經證明可以用來處理地下水及工業廢水中之頑強有機物。

本文將就高等氧化法之原理，反應器操作及設計參數以及在染整工業，地下水處理等方面之應用加以介紹。以期能提供工業界在污染防治工程上之另一選擇。

## 二、原 理

### 2.1 過氧化氫之氧化特性與應用

過氧化氫為一強氧化劑在pH=0其標準電位為1.80V而pH=14為0.87V，可應用於無機與有機污染物之處理，諸如紙漿與紙之漂白以及利用H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>來去除無機污染物包括防止廢水收集處理系統中二氧化硫之臭味，去除亞硫酸鹽、過氯酸、亞硝酸鹽、氰化物和氯氣等。在處理氣相污染上，過氧化氫可以轉化SO<sub>x</sub>，NO<sub>x</sub>為硫酸，硝酸。其他相關工業之應用包括：

1. 含氰化物廢水及濃縮液之氧化成爲氰酸達到去毒之效果；
2. 用以去除地下水中之錳、鐵等一將重金屬轉化成非水溶性氫氧化物/氧化物再以化學沉降／沉澱法去除；
3. 將照相工業廢水中之亞硫酸鹽及銀轉化爲硫酸鹽和銀之錯鹽達到處理之效果。
4. 利用  $H_2O_2$  和氯之溶液沖洗以降解尾氣中之醛、酮。
5. 將硫化物(Sulfides)、硫醚(Thioethers)、二硫基化合物(Disulfides)、亞硫酸鹽(Sulfites)、硫代硫酸鹽(Thiosulfates)轉化爲元素硫與硫酸達到防止惡臭之目的。
6. 將焦煤、硫酸製造、醃製及其他化工程中  $SO_x$  及  $NO_x$  空氣污染物轉化爲硫酸、硝酸。
7. 去除廢水、空氣、漂白紡織品、及紙漿中過剩之氯酸、次氯酸並還原成氯化物。

$H_2O_2$  也常用於表面處理工業如清洗、裝飾、塗裝保護、切割金屬等。鋁之表面處理常用含毒性六價鉻之 Sulfochromic Acid，若改以  $H_2O_2$  為基礎之清潔浴則提供一個無毒的表面處理替代方法，達到污染預防之目的<sup>(2)</sup>。

在生物處理廠及土壤生物整治上， $H_2O_2$  可以分解成氧和水以提供微生物之氧源。因爲一般而言，氧濃度是 in-situ 生物降解有機污染物的速率決定因素。所以在一些土壤整治之應用上將  $H_2O_2$  注入地下水層，已證實可成功地提高了生物降解之速率。 $H_2O_2$  可以被酵素或非酵素途徑分解成水和氧。通常將  $H_2O_2$  以 500ppm 之高濃度注入地下以維持土壤內濃度 50-200ppm 來控制微生物之生長，作爲現地(in-situ)整治之應用<sup>(3)</sup>。

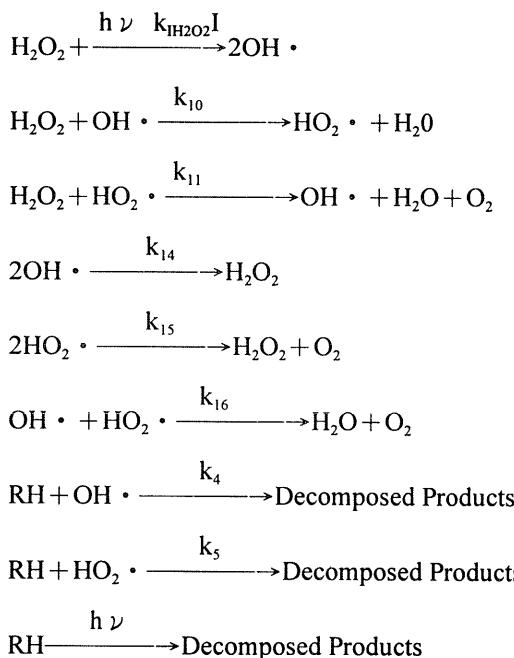
一般而言，無機物對  $H_2O_2$  之反應較有機物爲快，因爲質傳限制的關係，極微量有機物最不易處理；對於高濃度頑強性污染物（如含高氯芳香烴）而言僅使用  $H_2O_2$  氧化之程序是無效的，因爲在一般  $H_2O_2$  濃度下其反應速率非常低。過渡金屬鹽如鐵鹽可以將  $H_2O_2$  激化產生氫氧自由基(OH.)其作用如 UV/ $H_2O_2$  系統一般，以二價鐵鹽激化  $H_2O_2$  之氧化程序稱爲 Fenton's 氧化劑法，而利用 UV 光／臭氧／ $H_2O_2$  為共氧化劑之方法，利用產生氫氧自由基(OH.)進而氧化降解污染物之化學氧化法稱爲高等氧化程序(AOP)，此處，氫氧自由基(氧化電位

2.8V)是一比臭氧、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>更強的氧化劑，可非選擇性的以10<sup>9</sup>M<sup>-1</sup>S<sup>-1</sup>左右之高反應速率氧化目標污染物。

在AOP系統中氧化效率可能為自由基之捕捉劑所降低，捕捉劑如碳酸根、碳酸氫根和OH<sup>.</sup>之反應速率常數各為1.5×10<sup>7</sup>M<sup>-1</sup>S<sup>-1</sup>，4.2×10<sup>7</sup>M<sup>-1</sup>S<sup>-1</sup><sup>(4)</sup>。

## 2.2 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統

UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>氧化首先在紫外光激化下將H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>分解成2個OH<sup>.</sup>，此一自由基可將有機物(RH)氧化生成有機物自由基(R<sup>.</sup>)。有機物自由基反應性高，可以再進行氧化。在此系統中之反應機構可以表示如下<sup>(5)</sup>：



有機物之降解可以直接由UV激化發生，UV可以增加有機物被H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>或OH<sup>.</sup>，氧化之能力，有機物之激化則可以包括UV直接氧化，或生成有機物自由基及其他反應性中間物。UV之波長範圍為200-280nm可以分解H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，通常以254nm之紫外水銀燈最常用。如果反應物濃度沒有限制則有機物可以被完全氧化，去除毒性產生CO<sub>2</sub>，H<sub>2</sub>O以及無機鹽。

UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統可以有效地氧化毒性有機物如三氯乙稀(TCE)、四氯乙稀(PCE)、丁醇、氯仿、甲基乙酮、異丁酮、四氯化碳等，此外實驗室級之UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統也被應用於氧化醋酸、甲醇和苯酚類、氯化烷類、取代基苯酚、2,4,2-硝基甲苯、苯、氯化酚類、苯酚、4-氯化硝基苯、1,2,-二氯苯、atrazine等，UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統可以將98%苯降解成中間有機物，再加H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>連續處理可將中間產物一併完全去除。一氯、二氯、三氯苯酚在三小時之反應時間可以達到85～100%去除率<sup>(2,6)</sup>。Sundstrom等在文獻中亦發表了苯、甲苯、氯苯、酚，2-氯酚、2,4,6-三氯酚、Dimethyl Phthalate,Diethyl Phthalate之處理，其中以Phthalate為最難處理，在酚處理中產生之中間產物可以完全被去除<sup>(7)</sup>。

UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>氧化氯化丁烷(Butyl Chloride)之研究中提出氧化反應之控制因素如：反應物莫耳比，反應時間，UV強度，pH，無機碳、腐植酸等相對於氯化丁烷去除反應影響也使用實驗與數學方法來說明<sup>(2)</sup>。Prat表示此系統可去除紙漂白廢水70%色度，但無法完全去除色度，而設備及操作經費也不經濟<sup>(8)</sup>。

### 2.3 反應機制及動力學

UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>氧化氯酚反應中，產生含氯及不含氯之Catechol和Quinones中間產物，而苯則可以反應成酚、Catcchol, Hydroquinone和Resorcinol等中間產物均可再繼續降解到完全去除。在此系統中會產生腐植酸(Humic Acid)類似之化合物以及抗光分解化合物，主要原因是由自由基引起之聚合反應所產生<sup>(5)</sup>。

在UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統中含鹵烷類的完全降解所須反應時間的為數分鐘而反應為虛擬一階反應，在58ppm TCE初濃度下TCE之反應速率常數為0.0903min<sup>-1</sup>，在20°C下須50min則TCE可以從50ppm被降解為1ppm，在40°C下只須10min。降解速率可以為污染物之化學組成結構，H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>濃度，UV強度，pH所影響。反應速率可以由小而大排列如下：四氯化碳<四氯乙烷、溴化乙稀<二氯甲烷<氯仿<PCE<TCE。含氯烯類較烷類易於降解。

苯之降解在前20分鐘為虛擬一階反應而在90分鐘達到99%去除。增加H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>初濃度和UV強度，可以提高反應速率和氧化程度。增加H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>濃度可以提高OH·自由基產率而達到更有效之降解，但是在高H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>濃度下過量之H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>會

和OH·自由基反應產生水和氧反而降低反應速率。在pH5.5~7.9下，pH對反應速率影響很小<sup>(9)</sup>。

### 三、應用

#### 3.1 染料製造及染整業的廢水

染料製造業以及染整業的廢水往具有很高之色度，若未經完善之處理而直接排放，非常引起社區民眾之惡感，此為染整業之主要環境問題。通常染整廢水可以用活性碳吸附或化學混凝來處理，而此類之處理技術往往只是將污染物由液相轉移為固相。而最終沉降污泥，和使用後之活性碳必須進一步的經過最終處置，因此UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>可以提供業者更具吸引力之廢水處理選擇。

染料廢水較少使用生物或氧化法處理。若採用生物處理，大多數的合成有機染料並不能被生物處理法有效降解，因為目前大多商用染料對所使用之菌種具有毒性，會抑制菌種生長甚至殺死菌體。一項美國環保署水工程研究室之研究報告指出十八種偶氮染料經由傳統之活性污染法處理後，有十一種完全沒有任何效果，僅三種可以為生物分解<sup>(10)</sup>，是以吾人必須尋求可以替代生物處理之有效技術以處理染料廢水。Liu於論文中指出有些偶氮染料可以使用藻類(Algae)來處理<sup>(11)</sup>，惟此一結果乃實驗室級結果，且僅少數染料有正面效果，尚無法實際應用。而加氯或臭氧之化學氧化法則因為難以掌握此類活性氣體（需有貯存設備，以及氣液混合之分佈設施），此外加氯氧化又可能產生致癌性之中間物，以致降低此程序被採用之可能性。近來已經有一些研究利用Fenton氧化劑或TiO<sub>2</sub>光催化氧化法來處理染料廢水<sup>(12-13)</sup>，結果顯示有效去除染料廢水之色度。

以往UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，很少被用來去除含色度廢水，雖然此一AOP已經被証實可以成功地去除工業廢水及地下水中各種有機物。但是因為紫外光會被染料廢水大量吸收以至降低處理效率，是以一般認為此技術不適於處理染料廢水。然而在一項Shu之研究中，實驗廠規格(100 Liter Sized)之反應器被證明可以有效

的處理偶氮染料廢水<sup>(14-15)</sup>。其中pH，UV光強度，H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>，染料濃度，為最具影響之參數，其中各參數之影響分述如下：

### 3.1.1 pH之影響

當廢水水質為中性至酸性時，pH之影響並不明顯。如圖1所示，一般染料廢水為偏酸性，pH約為5~6之間，在調整pH初值之實驗中，發現pH越呈鹼性則反應速率越低，此一現象是因為在鹼性環境下，H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>會被分解成氧和水，因而降低了H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>被UV激化成自由基之濃度。在酸性範圍中，pH由5降至3時反應速率緩慢上升，到了pH低於3時反應速率則又降低。由以上之觀察，可以結論出在廢水pH為中性至酸性時建議不調整pH。而當廢水為鹼性時才需將pH調至中性以利反應之進行。

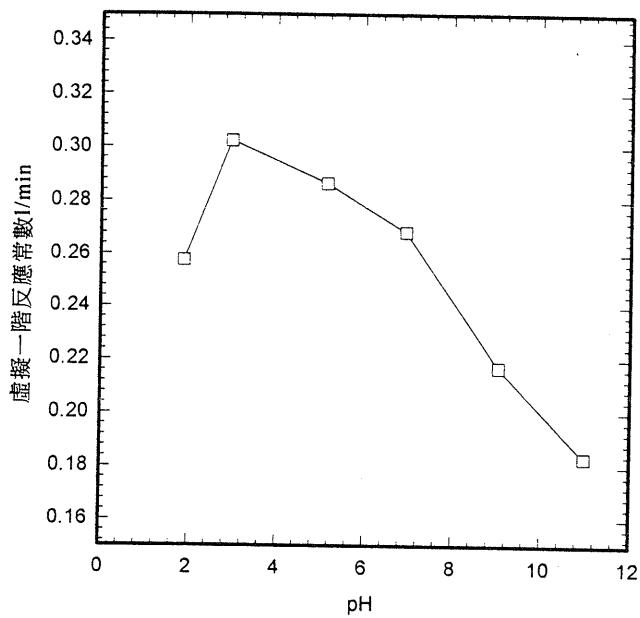


圖1 pH對UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統反應速率常數之影響 Acid Black 1染料廢水濃度  
 $2.758 \times 10^{-5}$ M H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>初濃度  $7.081 \times 10^{-3}$ M，UV強度350watts/L

### 3.1.2 UV強度之影響

理論上越高之UV強度可以激化H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>產生越高濃度之自由基因此提高廢水之處理效率。由圖2可以得知，在UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統下，單位體積所受UV之光強度和虛擬一階反應常數成正比關係，由圖中實驗廠之結果和實驗室小規模實驗之結果有一致性。因此此一結論可以用於擴建(Scale-up)大型廠之設計。由此一結果，吾人可以結論出反應器之設計，應以高強度UV光源和小反應器體積為準則。一般傳統之設計均以大體積之連續式完全混合反應器(CSTR)為主。此地可以建議改用小體積之柱流式反應器(PFR)，利用短的滯停時間以達到高處理量之目的。

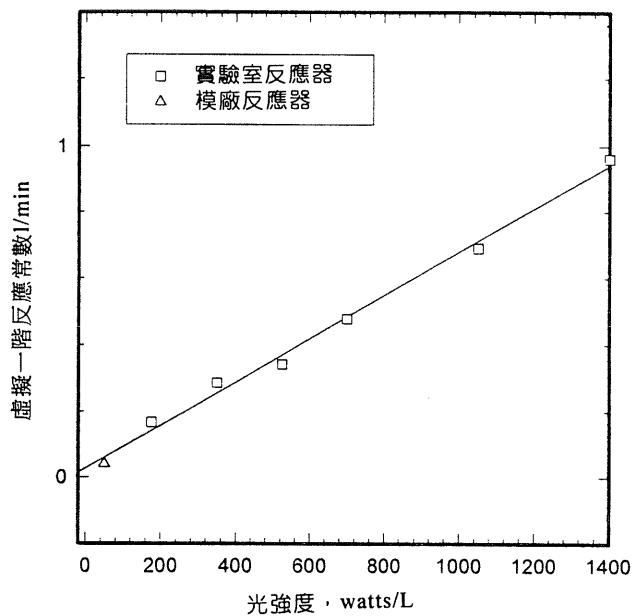


圖2 UV光強度對UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統反應速率之影響，反應條件參照圖1

### 3.1.3 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>初濃度之影響

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>初濃度為一UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統之重要操作參數。越高濃度之H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>在UV光之激化下應可產生越高濃度之OH<sup>·</sup>自由基，因而提高了廢水之處理效率。但

是由於自由基反應非常快速，過高之 $H_2O_2$ 濃度反而可能發生 $H_2O_2$ 和污染物競爭消耗自由基之現象。故自由基濃度和 $H_2O_2$ 濃度間應有一最適之關係存在。由圖3中可以發現當 $H_2O_2$ 濃度由3.54mg-mole/L升至21.24mg-mole/L之間反應速率隨時間增高。當 $H_2O_2$ 濃度升至28.32 mg-mole/L時則反應速率之上升趨緩。若再提高 $H_2O_2$ 濃度時反應速率則開始下降。因此最適之 $H_2O_2$ 濃度之獲得與採用可以節省 $H_2O_2$ 及UV光之消耗使反應速率達到最高值，而使廢水處理之效率最為有效。

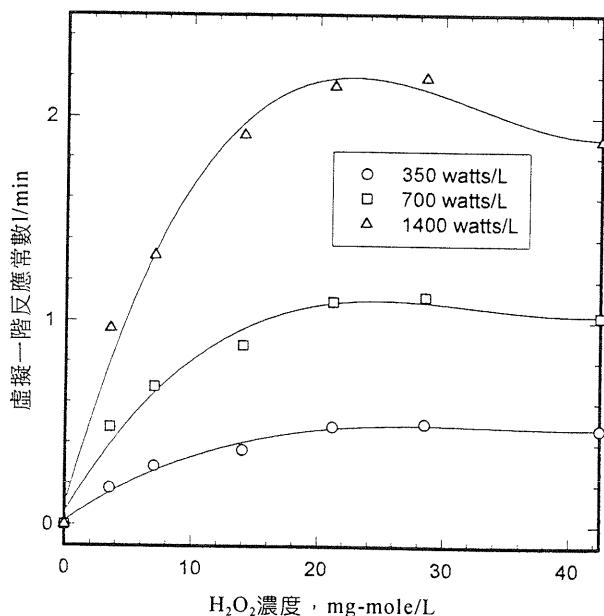


圖3  $H_2O_2$ 濃度在不同UV強度下對UV/ $H_2O_2$ 系統反應速率之影響，反應條件參照圖1

### 3.1.4 染料初濃度之影響

如圖4所示，染料初濃度越高則系統中反應速率越低。因為染料具有很高之色度對UV光之吸收非常強。所以在高濃度下UV可以穿透之距離就非常有限，因此反應器外圍不反應之無效區域就越大。所以在處理高濃度染料廢水時應以短UV穿透距離為反應器設計之原則。最好採用小間隙之柱流式反應器為

宜。此外染料之化學結構也會影響處理效率。故設計反應器前應先作小型實驗廠之試驗，以期獲得最適之操作條件。

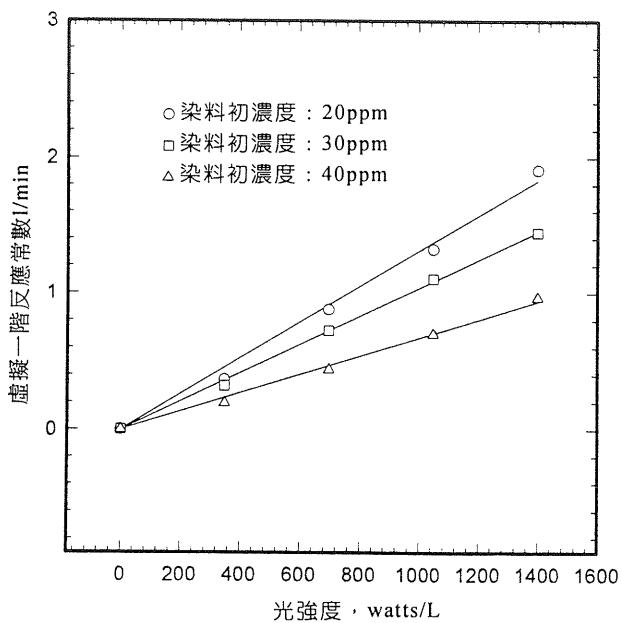


圖 4 染料初濃度對UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統反應速率之影響。反應條件除染料濃度外，其餘同圖1。

### 3.2 地下水處理

由於地下油槽及化學貯槽之洩漏，農藥，除草劑的累積，垃圾場之滲漏以及工業廢棄物，廢水之不當處理，在在都增加地下水被污染的嚴重程度。而地下水污染中包含有許多有害性的污染物使得傳統之處理方法面臨極大之挑戰。高等氧化程序目前已經提供了一個現地(on-site)處理受污染地下水的良好選擇，此一系統可以有效處理地下水污染使之達到地下水污染消除之相關法令要求。

目前被廣泛採用之商業化UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統計有Perox-pure、Solarchem以及Ultrox等，這些系統都已經有許多地下水污染之處理實績。其中所處理之污染

物包括揮發性有機物(VOC)，半揮發性有機物，芳香烴類，多環芳香烴類(PAH)，酚，石化污染物等<sup>(16-17)</sup>。

此一系統和氣提法，活性碳吸附等傳統方法相較有以下的優點：

- 1.無二次污染物（空氣，固廢）。
- 2.可以現地處理。
- 3.小而輕，低噪音，不會引起公眾反感。
- 4.對不被吸附物質和無法氣提物質都可有效處理。
- 5.可以和其他程序相結合。

通常，在處理地下水時必須有過濾，沈澱等預處理程序以去除水中無機物，固體物，濁度，藉以提升處理效率。此外也可加酸防止碳酸鹽沈降阻礙UV光之穿透。

在評估系統大小及操作參數時必須獲得以下資料做為設計AOP系統之依據。

- 1.污染水源之流量，污染產生率。
- 2.污染物種類，濃度。
- 3.處理之目的。
- 4.水質指標如TOC，COD·pH，鹼度，S.S.，T.S.，濁度，色度等。
- 5.是否有預處理或現有處理方式。

現今大約有四十家全量處理廠使用Perox-pure技術的UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>氧化程序，其特色為使用高強度之紫外燈，Perox-Pure之系統可處理64種有機物以去除BOD、COD、TOC。文獻中有四個個案研究使用UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>氧化處理含氯溶劑所污染之地下水<sup>(16)</sup>。其處理成本為US\$1.37~US\$8.51/1000gal地下水。此外，一個實驗廠和另一個全量廠操作，兩個個案研究的perox-pure系統以600gal/min處理量，地下水中為芳香烴污染之處理年成本為US\$2.59/1000gal地下水<sup>(16)</sup>。此外五個個案研究處理含氯烷烴芳香烴污染地下水，處理量從15-350gpm亦有記載。所有個案和氣提(Air Stripping)，活性碳吸附比較都更具經濟可行性。而放流水合乎標準並且沒有空氣污染問題。此外，UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>技術也可以用來處理空氣污染物，在處理氣相污染物之速率較水相之處理快很多，大概是因為UV在空氣中被吸收量較小，而可用之氧濃度較高，反應物及

中間物之移動性強的原因。因此，對於VOC處理而言，氣提(Air Stripping)結合AOP之組合亦是另一種地下水處理之可行的技術。

#### 四、未來發展趨勢

UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統除了單獨應用於工業廢水，地下水之處理外，未來應可以與生物處理法結合作為傳統活性污染法之預處理程序，如此可以保有生物處理法大量處理及經濟兩大特性外，更可以延伸傳統生物處理法處理高濃度廢水之能力。若作為生物處理之後處理則可以去除生物處理出流水中微量濃度之有害性物質以確保水質。此外由於此一系統體積小，質量輕可以作為移動式，現地處理(On-Site)，配合抽取-處理(Pump-And-Treat)之方法可以用作地下水及土壤污染整治。茲就增加效率與優缺點兩項對此系統檢討如下：

##### 4.1 加強此程序之效率

近來由於UV燈的修改增加了UV氧化程序處理效率及經濟可行性，早期的程序使用低壓汞蒸氣燈，這種燈用在消毒系統中而其波長輸出在254nm，修改後之高強度紫外燈具有較高能量輸出和較高的電效率和低溫度敏感性較低設備費，產生寬波段光譜輸出，可以用來提升氧化程序之效率。此一寬波段光譜輸出較一般低強度燈可以氧化較多的化合物產生中間物。其他優點包括可用較小的反應器體積（六個燈在2ft×8ft系統中處理400gpm之地下水）、有較高反應速率、須較短停留時間。對揮發性物質處理可以防止其由氣相溢出。

另一項UV燈技術之提升為加dopant在汞蒸氣燈上，此舉可以提高在254nm以外的幾個波長上之輸出強度，此種燈稱為金屬鹵素燈，可以在H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>存在或不存在下處理有機污染物，儘管在H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>存在下有較高之效率。更進步的改進為連續波長UV燈，可以涵蓋所有有機物之吸收波長。此種燈可以用來處理多種混合有機污染物。連續光譜UV燈可以由Pulsed Xenon和訂做閃光燈產生。石油碳氫化物，多環芳香族，如Naphthalene Pyrene，飽和非飽和鹵烷類如TCE、四氯化碳和氯仿、農藥、氰化物、PCBS、戴奧辛、TNT等都有相關文獻報導使用此連續光譜UV燈來處理的。

#### 4.2 UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>程序之優缺點

UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>較其他新進技術為優良；如氣提法和活性碳吸附連結，此法只是將污染物從水相中轉移至固相與氣相中，而UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>則可將污染物完全地氧化為無害的產物。此一系統可用於處理非常廣泛的各類污染物。在幾個全量廠操作後也證明此法之經濟可行性。此一技術另有活動性之優點，可以採移動式短期設置以處理不同地點之污染水質。但是此技術無法用來處理被污染之土壤，因為紫外光無法穿透土壤粒子會降低效果。若使用界面活性劑將污染物從土壤中移至其表面再使其移至溶液內，然後再經由UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>程序之處理為另一可行之方法。

有些無機物如鈣、鐵鹽等可能會在UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>處理中沉降下來而附在燈管表面如此便造成紫外光穿透率之降低。因此進流水之預處理或軟化就為必須之程序。由固體或有機物、無機物所引起之色度對UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>之處理效率也有負作用，同時會增加操作費用。由Prat等之報告可知因有色物質之干擾可造成紙漿漂白廢水色度之不完全(70%)去除。過濾、沉澱等預處理可以去除懸浮固體物與濁度而增進處理效率，對於有機、無機物之干擾則須結合其他處理方法以確保UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>系統之有效處理。

與UV/O<sub>3</sub>系統相較，若UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>程序已足夠來達到所需之氧化能力則使用H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>會比用O<sub>3</sub>便宜。雖然 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 1磅 US\$0.75~1.50 比 O<sub>3</sub> (US\$0.6~1.1)微高，但O<sub>3</sub>是微溶性且不穩定之氣體，必須現場產生和貯存、使用，會增加設備及操作費。H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>可以完全溶於水中，不須加裝其他設備及貯存。而使用O<sub>3</sub>另須接觸設備且質傳效率低（水—氣）限制了反應效率。O<sub>3</sub>之低溶解度，低質傳效率限制了大型工業水處理之用途。此種大型處理設備則以UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>為更有效果。

### 五、結論

由於環境法規日益嚴格而社會大眾也越來越注重環境品質，水質複雜，多樣的工業廢水已經無法只經傳統處理或是未做處理只管排入公用之廢水處理廠

了。因此預處理和後處理程序已經逐漸受到工業界之重視。如前述的在染整廢水，地下水污染之處理上，AOP已經展現了其優越性。相信對於其他各類工業所產生之廢水處理上，也會是一個可以信賴之技術。高等氧化程序為一有效處理技術，可提供業界做為廢水處理，預處理或是和其他程序結合以期使排放水達到排放標準，減少環境污染。

## 參考文獻

- 1.Goronszy, M.C., W.W. Eckenfelder, and E. Froelich, 1992. "Waste water--a guide to industrial pretreatment," Chem. Eng., July, 78-83.
- 2.Venkatadri, R., and R.W. Peters, 1993. "Chemical Oxidation Technologies: Ultraviolet Light/Hydrogen Peroxide, Fenton's Reagent, and Titanium Dioxide-Assisted Photocatalysis. "Haz. Wast. & Haz. Mat., 10(2): 107-149.
- 3.Kerr, R.S., 1994. Handbook of Bioremediation, Lewis Publishers, Fl.
- 4.Buxton, G.V., W. Greenstock, P. Helman, and A.B. Ross. 1988. "Critical Review of Rate Constants for Reaction of Hydrated Electrons, Hydrogen Atom and Hydroxyl Radicals in Aqueous Solution." J. Phys. Chem. Ref. Data 17: 513 - 886.
- 5.Huang, C.R. and H.Y. Shu, 1995. "The Reaction Kinetics, Decomposition Pathway and Intermediate Formations of Phenol in Advanced Oxidation Processes" J. of Haz. Mat., 41(1):47-64
- 6.Lewis, N., K. Topudurti, G. Welshans, and R. Foster, 1990. "Removal of organics in water using hydrogen peroxide in presence of ultraviolet light," Water Res., 24, 540-547
- 7.Sundstrom, D.W., B.A. Weir and H.E. Klei, 1989. "Destruction of aromatic pollutants by UV light catalyzed oxidation with hydrogen peroxide," Environ. Progress, August, 6-11

- 8.Prat, C., M. Vicente, and S. Esplugas. 1988. "Treatment of Bleaching Waters in the Paper Industry by Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation." *Wat. Res.*, 22: 663-668.
- 9.Sundstrom, D.W., H.E. Klei, T.A. Nalette, D.J. Reidy, and B.A. Weir. 1986. "Destruction of Halogenated Aliphatics by Ultraviolet Catalyzed Oxidation with Hydrogen Peroxide." *Haz. Wast. & Haz. Mat.* 3:101-110.
- 10.Shaul, G.M., C.R. Dempsey, and K.A. Dostal, 1988. "Fate of Water Soluble Azo Dyes in the Activated Sludge Process." *EPA/600/S2-88/30*, Water Engineering Research Lab. Cincinnati, OH.
- 11.Liu, J. and H. Liu, 1992. "Degradation of azo dyes by algae," *Environ. Pollution*, 75, 273-278
- 12.Kou, W.G., 1992. "Decolorizing dye wastewater with Fenton's reagent," *Water Res.*, 26, 881-886
- 13.Matthews, R.W., 1991. "Photooxidative degradation of coloured organics in water using supported catalysis TiO<sub>2</sub> on sand," *Water Res.*, 25, 1169- 1176
- 14.Shu, H.Y., C.R. Huang and M.C. Chang, 1994. "Decolorization of Mono-Azo Dyes in Wastewater by Advanced Oxidation Process: A Case Study of Acid Red 1 and Acid Yellow 23," *Chemosphere*, 29:(12) 2597-2607
- 15.Shu, H.Y., C.R. Huang and M.C. Chang, 1994. "Photooxidative Degradation of Azo Dyes in Water Using Hydrogen Peroxide and UV Radiation," in Industrial and Hazardous Wastes: Proceedings of the 26th Mid-Atlantic Industrial Waste Conference, edited by C.P. Huang, Technomic Publishing Co., Inc., Lancaster, PA
- 16.EPA, 1993. Perox-pure Chemical Oxidation Technology Systems, Inc- Application Analysis Report, EPA/540/AR-93/501, USEPA, DC
- 17.EPA, 1990. Ultrox Internation Ultraviolet Radiatio/Oxidation Techno- logy- Application Analysis Report, EPA/540/A5-89/012, USEPA, DC