

紫外線/臭氧氧化程序在廢水處理上之應用

顧洋*

摘要

本篇將探討以紫外線／臭氧氧化程序處理廢水之可行性，分別就臭氧及紫外線光源之基本特性、程序之反應機制、影響程序效率之操作因素，和反應器設計所須注意事項進行說明，以做為工業界進行程序應用時之參考。

【關鍵字】

- 1.紫外線／臭氧(UV/O₃)
- 2.廢水(wastewater)
- 3.溶液pH值(pH)
- 4.光強度(light intensity)
- 5.臭氧劑量(ozone dosage)

一、緒論

在人類生活環境品質日益惡化的今天，許多有毒性或危害性有機污染物在水體中的存在及傳輸，已對人類的健康和安全造成極大的威脅，因此如何有效地處理與控制這些有機物所造成的環境污染問題，實為水污染防治工作中極具迫切性之課題。

* 國立台灣工業技術學院化學工程技術研究所教授

自水中去除低濃度有機污染物是件非常困難且昂貴的工作；傳統的生物、物理和化學的廢水處理方法通常無法有效地自水中真正地去除這些危害性的有機物，較常使用的處理技術有下列幾種：活性污泥、活性碳吸附法、化學氧化法(加入O₃、H₂O₂等)、光分解法及離子交換和薄膜等技術。以上所列之常用技術中，依其實用面而言，均有其應用之限制及缺點（如滯留時間過長、無法適用於高濃度廢水及需再處理等）。隨著污染物處理技術觀念的演進，結合紫外線(UV)和氧化劑或光觸媒之合併處理程序，為處理水中不易被氧化分解的有機物之高級氧化程序之一。所謂的高級氧化程序一般被歸納定義為：在溶液中進行之氧化反應中，能產生氫氧自由基等之活性中間物以破壞目標污染物或中間產物的程序。這些程序包括了UV/O₃、O₃/H₂O₂、UV/H₂O₂、UV/光觸媒、O₃/TiO₂、Fe²⁺/H₂O₂、Fe³⁺/H₂O₂/UV 等。

在已知的高級氧化程序中已商業化應用者有O₃、UV/O₃、O₃/H₂O₂及UV/H₂O₂/O₃等，其餘則受限於反應器設計及反應效率等因素而仍處於研究階段，而無法實用化，如UV/光觸媒等，唯近年來各相關的研究均呈現出相當令人樂觀之成果，更加提高了學者的研究興趣。因為臭氧處理程序在應用的歷史及技術上較其它程序為成熟，但由於臭氧在製造過程中非常耗能且效率不高（約2~5%），加上臭氧程序對乙醛、甲酸等含二碳的有機物的礦化效果差，因此在臭氧程序結合紫外線以產生氫氧自由基(OH·)，以有效礦化水中有機物為近十年來研究及應用的重點方向，故本篇以下將就紫外線／臭氧氧化程序處理水中有機物之可行性進行探討，分別就臭氧及紫外線光源之基本特性、程序之反應機制及影響程序效率之操作因素，和設計反應器所需注意之事項進行說明，以做為工業界進行程序應用時之參考。

二、臭氧的特性及其分析法

臭氧為化學性質相當不穩定的無色氣體，且具有刺激性氣味，其基本的物理化學性質如表1所示。從表可看出臭氧的氧化能力極強，其還原電位為2.07V，而當臭氧經由紫外線照射後，可以產生還原電位更高的氫氧自由基，表2即是臭氧、氫氧自由基及其他物質之還原電位之比較。

表1 臭氧之一般物化特性⁽¹⁾

性 質	特 性
形成	光化反應 高壓放電
比重(air=1)	1.658
重量(0°C,1atm)(g)	2.144
熔點(°C)	-251
沸點(°C)	-112
氧化電位(V)	-2.07
吸收波長(A)	2537
顏色	無(低濃度) 藍色(高濃度)
氣味(ppm)	類似青草味(<5ppm) 辛辣味(>5ppm)
毒性	有

表2 各種氧化物之氧化電位⁽²⁾

物 質 種 類	化學式	氧化電位(V)
氟(Flurine)	F ₂	3.06
氫氧自由基(Hydroxyl Radical)	OH [·]	2.80
激態氧原子(Atomic Oxygen)	O [·]	2.42
臭氧(Ozone)	O ₃	2.07
過氧化氫(Hydrogen Peroxide)	H ₂ O ₂	1.77
過氧化氫自由基(Perhydroxyl Radical)	HO ₂ [·]	1.70
次氯酸(Hypochlorous Acid)	HOCl	1.49
氯(Chlorine)	Cl ₂	1.36

臭氧的製造是使用富有氧分子的氣體，通過高壓電管，使氧分子激發分裂成氧原子，氧原子再和氧分子結合形成臭氧分子，而富有氧分子的氣體通常は空氣和純氧，但二者臭氧之產率以純氧較高，空氣及純氧之臭氧產率比較如表3所示，在相同的電力消耗下，以純氧為進料所得之臭氧產率約為相同狀況下

以空氣為進料的兩倍，平均每製造1克的臭氧大約消耗電能16~19WH，若以空氣為進料氣體時，必須先經過乾燥處理的程序，以免空氣中的水份與氧化形成的氮氧化物反應生成為硝酸，造成高壓電管的腐蝕。

傳統常用來分析臭氧濃度的方法，如表4所示，主要包括KI-澱粉滴定法，DPD氧化法及Indigo法等，由於在選擇殘餘臭氧分析方法時，主要考慮的因素含以下幾點：1.試劑校正的難易。2.試劑的穩定性。3.滴定液的穩定度。4.滴定量的準確度，因此根據上述的考量，學者認為Indigo方法是較佳的選擇。

表3 空氣及純氣之臭氧產率比較⁽³⁾

攜帶氣體	產量		
	重量百分比	公克／立方公尺	磅／立方英呎
空氣	1~2	12~24	$7.4 \times 10^{-4} \sim 14.8 \times 10^{-4}$
純氣	2~5	24~60	$14.8 \times 10^{-4} \sim 37 \times 10^{-4}$

表4 傳統常用來分析臭氧濃度之技術⁽¹⁾

方 法	原 理	偵測極限範圍($\mu\text{g/L}$)	特 性
KI-澱粉滴定法	<ul style="list-style-type: none"> • $\text{I}^- + \text{O}_3 \rightarrow \text{I}_2 \rightarrow \text{I}_3^-$ • 以電化學滴定或光度計 • 測定 I_3^- 	2	<ul style="list-style-type: none"> • 高靈敏度 • 受氧化劑干擾大 • 測試樣品須大量
DPD氧化法	<ul style="list-style-type: none"> • $\text{O}_3 + \text{I}^- \rightarrow \text{I}_2$ • DPD與 I_2反應生成粉紅色陽離子 • 再以光譜或以FAS滴定 	—	<ul style="list-style-type: none"> • 易受氧化劑干擾 • 為總氧化力之測定
Indigo法	<ul style="list-style-type: none"> • O_3會使Indigo trisulfonate reagent脫色 • 再用分光光度計測定 $\lambda : 600\text{nm}$ 	0.005~30	<ul style="list-style-type: none"> • 選擇性高、靈敏度大、易操作 • 受基質干擾不顯著

三、紫外線特性

紫外線於光譜中屬於X光與可見光之間的輻射區域，波長介於100~400nm。此波長區域在電磁光譜上又區分為：1.近－紫外線(near-ultra violet)，波長400~300nm。2.遠－紫外線(far-ultra-violet)，波長300~200nm。3.極端－紫外線(extreme-ultra-violet)，波長200~100nm之間，又稱為真空－紫外線(vacuum-ultra-violet)。其物理化學性質或對生物的作用因波長長短而不同。近－紫外線會使人的皮膚發生單純的色素增加，遠－紫外線會使人的皮膚形成紅斑，皮膚不久會黑化。極端－紫外線的影響甚大。對生命有害，會使小老鼠皮膚發生癌症病變，會使微生物突然變異或致死。

被設計用來產生紫外線輻射的汞蒸氣體(mercury vapor lamp)，可分為三種不同型式的輻射源：

3.1 低度壓力汞燈(low pressure mercury lamp)

低度壓力汞燈所放射出的波長集中在253.7nm和184.9nm（能量為12和154kcal/mole）。所輸出的紫外線輔射（波長小於380nm）強度大約為2.5瓦特／每呎弧長(watt/foot of arclength)。

3.2 中度壓力汞燈(medium pressure mercruy lamp)

中度壓力汞燈所輸出的紫外線輻射強度大約為低度壓力汞燈的100倍，即220瓦特／每呎弧長。放射出的波長有578nm（黃色）、546nm（綠色光）、436nm（藍色光）、405~408nm（紫色光），以及屬於紫外線輻射的365、334、313、300、280、265、253、238nm。由於它有較廣的輻射波長及較高的輻射強度，因此被使用的機會增大。

3.3 高度壓力汞燈(high pressure mercury lamp)

高度壓力汞燈輸出的紫外線輻射強度為中度壓力汞燈的十倍。放射出的波長為265~291nm之間的連續波長。放射出之輻射並不像低度壓力汞燈那樣穩定，且使用壽命大約只有75小時；比起中度壓力汞燈的1,000小時及低度壓力汞燈的12,000小時，使用壽命太短是它的缺點。

四、紫外線／臭氧氧化程序之理論與機制

在紫外線／臭氧程序中，以氯酚類有機物為例，其氧化有機物之反應機制如圖1所示，其包括臭氧可直接氧化氯酚類有機物，形成含4個碳的中間產物並產生二氧化碳，臭氧並可進一步直接氧化含4個碳的中間產物為含2個的醛、酸等中間產物及二氧化碳，但由於臭氧對醛、酸等有機物之氧化力低，且遠小於對含6個碳氯酚有機物之氧化力，因此以臭氧對氯酚類有機物進行直接氧化，由於其對醛、酸等有機物之氧化效果差，因此完全礦化的效率受到限制。

在圖1中知，臭氧亦可在鹼性溶液條件下，經氫氧根離子(OH⁻)催化生成氫氧自由基(OH[·])，對氯酚類有機物進行間接氧化，由於氫氧自由基的氧化力(2.80ev)大於臭氧之氧化力(2.07ev)，因此臭氧可在高溶液pH(大於9)下，以氫氧自由基對氯酚類有機物進行間接氧化，形成含4個碳有機物，再氧化成含2個碳之醛、酸等有機物，並進一步氧化成二氧化碳，以達到完全礦化的目的，但由於在鹼性溶液條件下，礦化生成的二氧化碳，會在溶液中生成碳酸氫根(HCO₃⁻)及碳酸根等具有捕捉氫氧自由基之離子(scavenger)，導致降低紫外線／臭氧氧化系統之氧化效率。

而在圖1中亦可清楚了解，在紫外線／臭氧氧化程序中，臭氧亦可在任意溶液pH值下，經由吸收波長低於260nm之紫外線光能以形成氫氧自由基，如前所述，氫氧自由基之氧化力大於臭氧，且文獻亦指出，氫氧自由基與一般有機物之氧化速率遠大於臭氧對有機物之直接氧化^(4,5)，因此在紫外線／臭氧氧化程序中，經由紫外線照射臭氧所產生的氫氧自由基，不僅可以有效將氯酚類有機物分階段完全礦化成二氧化碳外，由於其可以在任意溶液pH下進行氧化反應，因此亦可避免在鹼性溶液條件，由於碳酸氫根或碳酸根離子累積，所造成氫氧自由基的捕捉效應，進而降低系統反應速率之情形。

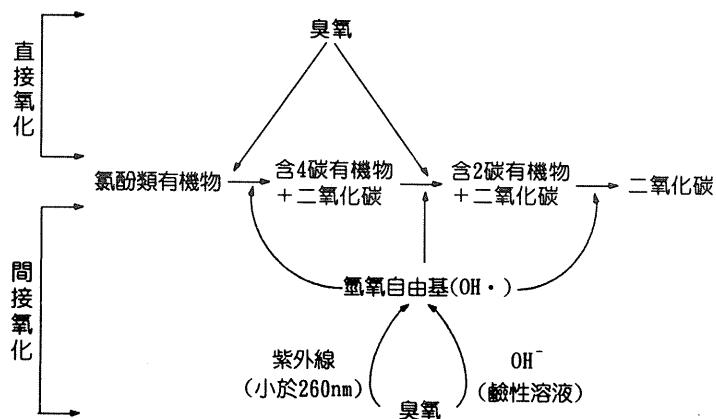


圖 1 紫外線／臭氧氧化程序整體反應機制圖

五、紫外線／臭氧氧化程序之應用

在紫外線／臭氧氧化程序中，不僅溶液中化學污染物的種類會影響反應程序之效率，且溶液特性及操作條件亦會影響反應的進行，以下即將針對溶液pH值、陰離子種類、紫外線光強度及臭氧劑量等操作因素對紫外線／臭氧氧化程序反應行爲的影響進行說明：

5.1 溶液pH值

Prengle等人(1975)⁽⁶⁾以紫外線／臭氧程序分別在起始pH為4和7下處理醋酸和酚溶液，對於醋酸而言，在pH=4時的處理效果較佳；而對於酚而言，兩者的去除效果差不多。作者認為由於有機酸是大部分有機物質臭氧化的重要中間產物，因此在應用紫外線／臭氧程序時，溶液pH的控制並不需要。

Kuo等人(1977)⁽⁷⁾以紫外線／臭氧分別在溶液pH值為5、7和9下分解草酸水溶液，結果在酸性溶性下，草酸很快地分解為二氧化碳。作者認為在高溶液pH下，無機碳容易在溶液中累積，因此會減緩草酸的分離。不同pH值下，草酸氧化速率大小為pH5 > pH9 > pH7。

Copyright © 2024 by the Chinese Society of Environmental Engineers. All rights reserved.

Otake等人(1979)⁽⁸⁾以臭氧及紫外線／臭氧程序在氣泡塔內分解酚類化合物，結果顯示在溶液pH值2-11之間，反應物的分解速率隨溶液pH值增加而增加，作者認為在高溶液pH值下，離子態的酚濃度增加，因此加速臭氧的親電子性反應。

Gurol和Vatistas(1987)⁽⁹⁾分別在不同溶液pH值下(2.5、7.0和9.0)，以臭氧及紫外線／臭氧程序分別處理酚類化合物的混合溶液（酚、對甲酚、2,3—二甲基酚和3,4—二甲基酚），結果顯示在中性或鹼性溶液下，四種酚類化合物的去除速率差不多，此時反應路徑主要為選擇性較低的自由基反應；而在酸性溶液下，四種酚類化合物的去除速率不同，此時反應以具有高選擇性的臭氧分子直接氧化有機物為主。而反應物及總有機碳的去除速率均隨溶液pH值增加而加速。

Ikemizu等人(1987)⁽¹⁰⁾利用紫外線／臭氧程序，在溶液pH值為2~8下，分別氧化草酸及醋酸溶液，結果氧化速率隨溶液pH值增加而加速，其分解速率與酸解離的程序成正比關係。

Xu等人(1989)⁽¹¹⁾利用紫外線／臭氧程序分別處理ONT(o-nitro toluene)、UNTS (p-nitrotoluene-2-sulfonic acid) 及 MAS (p-methylaniline-3-sulfonic acid)溶液，探討不同pH值下 (pH= 5~12) 對反應物、COD及TOC去除率的影響，實驗結果發現ONT和MAS的去除速率隨溶液pH值增加而加速，而NTS的去除率在反應前期隨溶液pH值增加而增加，但在反應後期(90分鐘)以後，則以低溶液pH值 (pH= 5) 最佳。而對於COD和TOC的去除速率而言，ONT和NTS在反應初期，以較高溶液pH值分解速率較快；而在反應後期，則以低溶液pH值較佳。作者認為在較高溶液pH值，反應初期生成的CO₃²⁻累積在溶液中，因此造成反應後期反應速率降低。作者建議在以紫外線／臭氧處理有機物時，反應初期在鹼性溶液下操作，而在反應後期則在酸性溶液下反應為宜。

馬鴻文(1991)⁽¹²⁾在溶液pH值為2、7和10下，以臭氧及紫外線／臭氧程序分別處理酚和2-氯酚溶液，結果顯示反應物去除速率的大小為：pH10>

pH7 > pH2。作者認為在較高溶液pH值下，經由臭氧分解產生的自由基反應佔優勢，且酚類化合物解離程度增加，因此使得反應速率增加。

蘇維正(1993)⁽¹³⁾以紫外線／臭氧程序處理不同酚類化合物時(2-CP、2-NP、2,4-DCP)，各反應物之去除速率均隨溶液pH值增加而增大，增加的程度則隨酚類種類之不同而異，在低溶液pH值及中性溶液條件下，各反應物之去除速率大小依次為2,4-DCP > 2-CP > 2-NP，但在高溶液pH值時彼此間之速率大小則十分相近。

張介林⁽¹⁴⁾以紫外線／臭氧程序處理大利松，結果發現由於大利松之親油性強，使得大利松在氣液界面的濃度遠大於溶液中之濃度，加上大利松與臭氧之氧化速率大，以致進行大利松分解之反應機制主要為臭氧直接氧化，因此溶液pH值對於大利松之分解行為幾乎沒有影響。

綜合以上的討論，以紫外線／臭氧氧化程序處理一般有機溶液時，在反應初期，宜在鹼性溶液條件下進行反應，以有效提高原反應物之分解效率；而在反應後期則宜在酸性條件下進行操作，以避免碳酸氫根或碳酸根離子之累積，進而提高系統之礦化效率。

5.2 陰離子

Xu等人(1989)⁽¹¹⁾利用紫外線／臭氧程序處理ONT溶液(o-nitrotoluene)結果顯示Na₂CO₃會降低ONT及其COD值之去除速率。

Guittonneau等人(1990)⁽¹⁵⁾利用臭氧及紫外線／臭氧程序分別處理CNB(4-chloronitrobenzene)溶液，在以磷酸鹽(phosphate buffer)控制溶液pH值為7.5下，比較臭氧和紫外線／臭氧程序在添加及無添加4mM HCO₃⁻的狀況下CNB的去除效果，實驗結果顯示兩種程序在溶液中存在HCO₃⁻的狀況下CNB的去除率明顯變差。

綜合以上的研究結果，當溶液本身存在CO₃²⁻或HCO₃⁻等自由基捕捉劑，或由於在較高溶液pH值下氧化有機物產生CO₃²⁻或HCO₃⁻的累積，均會降低有機物的氧化效率。

5.3 紫外線效應

單獨以臭氧氧化有機物時，反應速率除了受溶液pH值影響外，由於臭氧的氧化能力強，在溶液中的消耗快，使得臭氧程序的反應速率決定步驟常為質傳控制；而在處理某些較難分解之物質時，由於臭氧的氧化速率相當慢，此時的反應速率決定步驟為反應控制，因此如何提高臭氧的使用率及氧化速率，以增進污染物分解速率相當受重視，而紫外線配合臭氧程序則是有效提高反應效率的一種方式。

Prengle等人(1975)⁽⁶⁾分別以1.5、3.0、4.5 W/l三種不同的光強度，探討光強度對紫外線／臭氧系統處理醋酸溶液的影響，結果發現總有機碳的去除速率隨光強度提高而加快。

Kuo等人(1977)⁽⁷⁾以臭氧及紫外線／臭氧程序分別氧化2-西醇、醋酸及草酸水溶液，結果顯示紫外線的添加可以有效促進有機物的分解速率。

Otake等人(1979)⁽⁸⁾分別以臭氧及紫外線／臭氧程序分解酚類化合物溶液，在不同光強度下（光源為40W中壓汞燈），反應物的分解速率常數與光強度的關係如下：

$$K_{UV/O_3} = KO_3 + 1.75 \times 10^3 (I/I_0)$$

Glaze等人(1982)⁽¹⁶⁾利用紫外線／臭氧程序，以2.1mg/l-min的臭氧進料濃度，0.1~0.4W/l的光強度，去除美國南方表面水中的三鹵甲烷先驅物，結果顯示在較高光強度下，污染物的去除速率較快。

Gurol和Vatistas(1987)⁽⁹⁾分別以紫外線、臭氧及紫外線／臭氧三種程序氧化酚溶液，結果顯示酚及總有機碳去除速率的大小為：紫外線／臭氧 > 臭氧 > 紫外線。

Takahashi(1990)⁽¹⁷⁾分別以紫外線、臭氧及紫外線／臭氧三種程序氧化低分子量的有機物(1-6個碳的醇類、醛類和酸類化合物)，經由TOC分析，顯示紫外線及臭氧兩種程序對低分子量的去除能力相當差，而紫外線／臭氧程序能將有機物有效地分解，尤其對低分子量的有機物能將其完全礦化。

由以上的研究結果，可以發現紫外線／臭氧程序比臭氧程序更有效率，而增加紫外線光強度可有效促進系統反應速率。但由於紫外線及臭氧的添加都是耗費能源的，因此如何尋求在紫外線／臭氧程序中最適化的操作條件應是日後可行之研究方向。

5.4 臭氧劑量效應

殷榮堅(1994)⁽¹⁸⁾以紫外線／臭氧氧化程序處理氯酚類有機物，增加臭氧進料速率對提高2-氯酚的去除速率及前階段礦化速率均有助益，在酸性條件下，增加臭氧進料速率對後階段礦化速率仍有助益；但在鹼性條件下，增加臭氧進料速率則對後階段礦化速率幾乎沒有影響。

六、紫外線／臭氧氧化和程序反應器之設計

紫外線／臭氧氧化程序反應器之設計，基本上和單獨使用臭氧處理程序相似，只是多加裝了一些紫外線燈管，這些紫外線燈管之波長大多使用254nm，紫外線燈管外之夾層材質須為石英，才可使紫外線穿過。圖2為UV/O₃反應器之設計圖。UV/O₃程序處理效果比單獨使用臭氧程序好很多，而且隨著臭氧濃度及紫外線光強度之增加而增加。

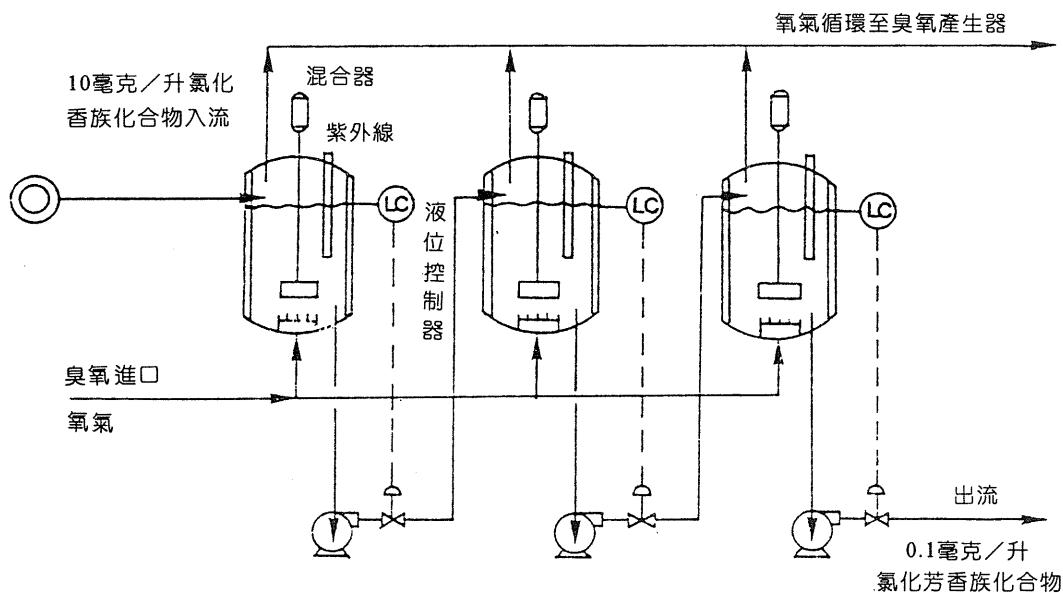


圖2 UV/O₃氧化程序之流程圖

而以紫外線／臭氧氧化程序進行受有機物污染廢水之處理，以氯酚類有機物為例，可能影響程序之處理效率除了系統的一般操作條件如溶液pH值、光強度、氧化劑添加量等因素外，由於受污染廢水中可能含鐵離子及微生物膠羽，會在石英管或其它光穿透佳的玻璃上積垢，影響光的穿透，進而降低光氧化程序的處理效果，而以上的問題均是在程序操作一段時間後才會逐漸被發現，因此在進行成本估算時經常被忽略，進而造成成本低估之現象⁽¹⁹⁾。

七、結論

在紫外線／臭氧氧化程序中，具有高能量的紫外線可激發臭氧形成具高氧化能力之氫氧自由基，以攻擊污染物，使得分解速率顯著地加快，在適當操作條件下，更可將有機物分解並氧化成最終產物－二氧化碳和水。就整體廢水處理操作程序而言，紫外線／臭氧氧化程序經常是被安排作為最終處理的操作(polishing operation)，或是作為氧化不易分解(recalcitrant)物質程序中的起始步驟，而所生成之部份氧化的中間產物可再配合成本較低的處理技術（如生物處理等）來加以去除。高級氧化程序的主要優點為具高氧化速率、可適用之水質範圍大及操作設備較小等，缺點則是操作成本高、消耗能量大及需特殊的安全部備（如O₃、OH⁻等高化學活性物質）。因此在面對各項環境污染標準要求日益嚴格的趨勢，和處理效率及經濟效益的雙重考量之下，紫外線／臭氧氧化程序因其程序本身具有對處理中低濃度有機廢水相當良好的去除效率及氧化完全性的優越性，將在廢水處理技術中漸受重視，應用範圍也將愈廣，故就國內水污染問題的需要性，非常值得對此氧化程序投入更多的研究與開發應用。

八、參考資料

- 1.楊耀名、蔣本基，臭氧質量傳送對水中揮發性有機物生成與控制之影響，碩士論文，國立台灣大學環境工程研究所，民國80年。

- 2.何淑珠、顧洋，以紫外線／氧化劑程序處理氯酚有機類廢水之研究，碩士論文，國立台灣工業技術學院工程技術研究所化學工程技術學程，民國78年。
- 3.Langlais, B.; Reckhow D.A.; Brink D.R., Ozone in Water Treatment-Application and Engineering, Lewis Publishers, Inc., Michigan, 1991.
- 4.Hoigen, J.; Bader, H., Rate Constants of Reactions of Ozone with Organic and Inorganic Compounds in Water- I . Non-Dissociating Organic Compounds. Water Res. 1983a, 17, 173.
- 5.Hogne, J.; Bader, H.; Hagg. W.R.; Stehelin, J., Rate Constants of Reactions of Ozone with Organic and Inorganic Compounds in Water- III . Inorganic Compounds and Radicals. Water Res. 1985, 19, 993.
- 6.Prengle, H. W. Jr.; Mauk, C.E.; Legan, R.W.; Hewes, C.G., III . Ozone/UV Process Effective Wastewater Treatment. Hydrocarbon Processing. 1975, October, 92.
- 7.Kuo, C.H.; Li, K.Y.; Wen, C.P.; Weeks, J.L. Jr., Absorption and Decomposition of Ozone in Aqueous Solutions. AIChE Sym. 1977, 73, 230.
- 8.Otake, T.; Tone, S.; Kono, K.; Nakao, K., Photo-Oxidation of Phenols with Ozone. J. Chem. Eng. Jpn. 1979, 12, 289.
- 9.Gurol, M.D.; Vatistas, R., Oxidation of Phenolic Compounds by Ozone and Ozone + UV Radiation: A Comparative Study. Water Res. 1987, 21, 895.
- 10.Ikemizu, K.; Morooka, S.; Kato, Y., Decomposition Rate of Ozone in Water with Ultraviolet Radiation. J. Chem. Eng. Jpn. 1987, 20, 77.
- 11.Xu, S. C.; Zhou, H.D.; Wei, X.Y.; Lu, J., The pH Dependence and Effects of the Oxidative Products of Some Aromatic Compounds in Ozonation under UV Irradiation. Ozone. Sci. Eng. 1989, 11, 281.
- 12.馬鴻文，處理酚類化合物過程中有關色源問題之探討，國立台灣大學環境工程學研究所碩士論文，民國80年。

- 13.蘇維正、顧洋，以紫外線／臭氧程序處理酚類溶液反應行爲之研究，國立台灣工業技術學院工程技術研究所化學工程技術學程碩士論文，民國82年。
- 14.張介林、顧洋，以臭氧及紫外線／臭氧程序處理含有機磷農藥水溶液反應行爲之研究，國立台灣工業技術學院工程技術研究所化學工程技術學程碩士論文，民國84年。
- 15.Guittonneau, S.; De Laat, J; Duguet, J.P.; Bonnel, C.; Dore, M. Oxidation of Parachloronitrobenzene in Dilute Aqueous Solution by O₃ + UV and H₂O₂ + UV: A Comparative Study. *Ozone Sci. Eng.* 1990, 12, 73.
- 16.Glaze, W.H.; Peyton, G.R.; Lin, S.; Huang, R.Y.; Burleson, J.L., Destruction of Pollutants in Water with Ozone in Combination with Ultraviolet Radiation. 2. Natural Trihalomethane Precursor *Environ. Sci. Technol.* 1982, 16, 454.
- 17.Takashashi, N., Ozonation of Several Organic Compounds Having Low Molecular Weight Under Ultraviolet Irradiation. *Ozone Sci. Eng.* 1990, 12, 1.
- 18.殷榮堅、顧洋，以紫外線／臭氧程序處理2-氯酚溶液反應行爲之研究，國立台灣工業技術學院化學工程技術研究所碩士論文，民國82年。
- 19.Nyer, E.K.; Bitter P., Evaluation of Ultraviolet(UV)-Oxidaion Treatment. *Ground Water Mdiation Reviews.* 1991, 11, 88.