

電漿技術於空氣污染控制之發展潛力

以往人類科學研究電漿 (plasma) 者，主力多集中在「高溫電漿」，如一般熟知的「核融合實驗」方面，但自 1980 年代起，美國環保署開始研究以低溫電漿技術去除氣態污染物質及揮發性物質的研究，其主要目的乃在發展一套低成本、低操作費用及可在常溫常壓下進行的先進空氣污染防制技術，近年來，相關技術已被陸續研究發展；以下茲就電漿技術應用現況與未來發展趨勢作一介紹。

一、電漿基本理論

電漿產生的方式一般是藉由外加電場或電磁場提供足夠的能量，氣體分子吸收這些能量後會產生氣體原子、離子、電子、受激態物種、自由基、可見光、紫外光、真空紫外光等等多種複雜的物種，且因為各項控制電漿產生的參數不同，所產生的物種比例也有所不同，而這種電子、自由基、離子、激發態分子及氣體原子同時存在的狀態就稱為電漿狀態，又被稱為固、液、氣三態外具較高能量的第四態。

因電漿為一種能量的非平衡態，屬於動態激發狀態，故要產生及維持電漿狀態必須具備下列三點條件：

(一) 電漿必須符合準電中性的原則

電漿中有一種迪拜遮蔽效應，而這種遮蔽效應會使電漿有準電中性的特性，簡單來說當電漿中有電場存在時，電漿中的帶電粒子會移動來減少電場變動，這種帶電粒子移動而減少區域電場變化即稱為迪拜遮蔽效應；當電漿狀態遭受外來擾動時，同樣也以這種方式保持電漿的準電中性；由於電漿系統具足夠之電中性，而與氣相分子行為一致，因此其物性及基本物理定律與氣體相同。

(二) 集體效應

電漿中每一個帶電粒子在迪拜長度內有本身的電場作用而影響周圍粒子，當超過迪拜長度後，該帶電粒子的電場作用為零。電漿中電子密度必須夠大，才能使電漿中突然出現一個帶電粒子時，能因遮蔽效益在迪拜長度內達成電中性的要求，並產生及維持電漿狀態。

(三) 提供電子的能量必須大於原子或分子的束縛能，使其離子化。

要產生電漿，必須使電子獲得充足的能量藉由碰撞效益將能量傳遞給中性的氣體分子或原子，把一個氣體分子或原子的電子游離出來。不同氣體離子化所需的能量不同，如氮需要 15.8eV，氫需要 15.7eV，當中性氣體分子或原子被離子化後，會游離出更多的電子，這些電子獲得充足的能量再藉由碰撞去撞擊氣體中的粒子，而產生一連串反應，進而產生電漿。

電漿主要組成詳如圖 1 所示。

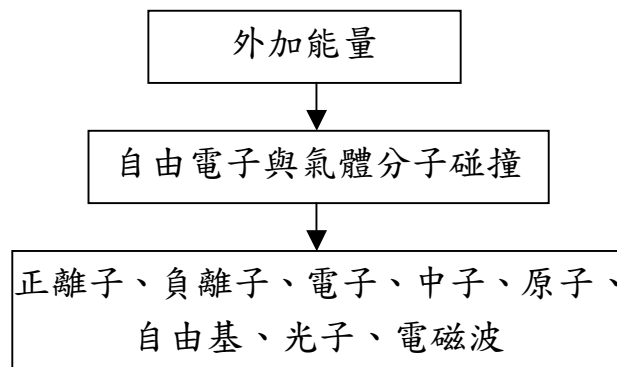


圖 1 電漿主要組成

二、電漿分類介紹

當系統壓力小或供給電場足夠大時，電子和部分離子之動能高於分子隨機運動之動能時，稱之為非平衡電漿，反過來說，若系統壓力太高導致帶電粒子於碰撞前無法移動較長距離而增加動能，即系統能量成均勻分配，此類系統稱為平衡電漿。平衡電漿大多指高溫電漿系統，在高溫下粒子間的碰撞次數多，使得粒子間的能量分佈均等，因此平衡電漿又稱為熱電漿，而非平衡電漿則被稱為冷電漿或非熱電漿，因此一般電漿又可區分為「熱電漿」及「非熱電漿」。

所謂「熱電漿」就是指完全離子化的氣體，而「非熱電漿」就是部份游離化的氣體。一般而言，熱電漿中的電子溫度與氣體溫度相近，約 10,000 度，實際上完全離子化狀況並不多見，因此一般氣體溫度達 2,000~3,000 度就被稱為熱電漿，此溫度比一般燃燒所能達到的溫度(1,000~2,000 度)高出很多。非熱電漿又稱為非平衡電漿(nonequilibrium plasma)，即未達熱平衡的電漿狀態，典型的非熱電漿的電子溫度約 1~5eV，1eV

趨近 10,000 度，而氣體溫度一般小於 1,000 度，甚至僅比室溫略高，因此為一氣體溫度不高卻存在相當高電子溫度(高能量)的特殊系統，此特質也讓非熱電漿技術可以在不加熱氣體的狀況下，有效的生成電子並加以利用，兩者間的差異及比較如表 1 所示。

表 1^[1] 熱電漿及非熱電漿比較表

項目	熱電漿	非熱電漿
定義	完全離子化之氣體	部份離子化之氣體
離子化程度	100%	$10^{-4} \sim 10^{-1}\%$
系統壓力	≥ 1 大氣壓	≤ 1 大氣壓
電漿溫度(Tg)	$> 10,000\text{K}$	$\sim 300\text{K}$ (室溫)
電子溫度(Te)	$\text{Te} = \text{Tg}$	$\text{Te}/\text{Tg} = 10 \sim 100$
氣體狀態	熱平衡狀態	非熱平衡狀態

二、電漿技術應用範疇介紹

電漿技術應用範圍甚廣，近年來除應用於有害事業廢棄物之處理外，亦可應用於空氣污染防制(如半導體業 PFCs 廢氣、溫室氣體廢氣處理等)、清潔生產製程、廢水處理及殺菌等。如何應用電漿技術提升各種污染物之處理效能進而資源化，是產業界及環工界近年來所共同關注之議題。目前應用在工業界之電漿型態，包括電子束法 (electron beam)、高週波電漿 (RF discharge plasma)、微波電漿 (MF discharge plasma)、電暈電漿 (corona discharge plasma) 及介電質放電法 (dielectric barrier discharge, DBD) 等。電漿技術在環境工程的應用範圍如圖 2 所示。

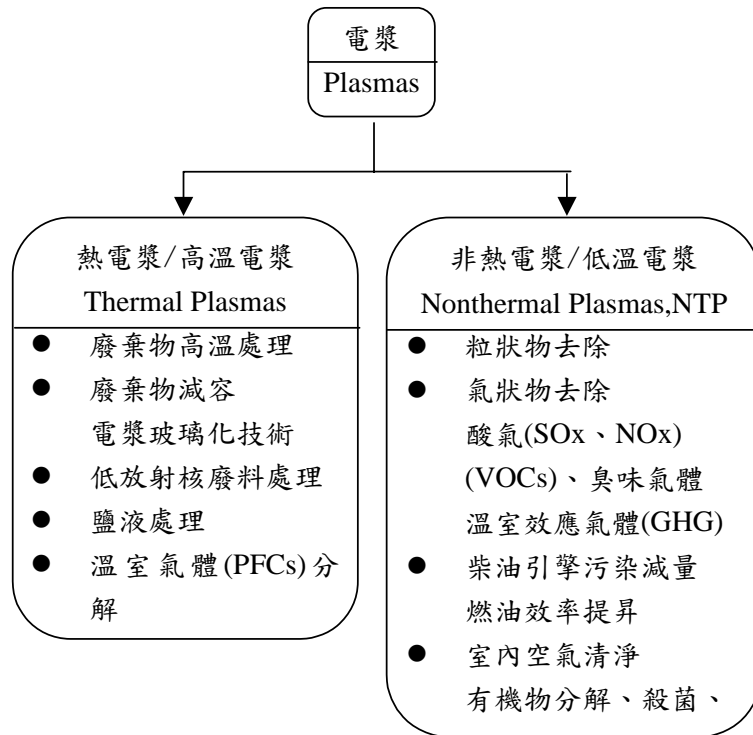


圖 2 電漿技術在環境工程的應用範圍

(一)熱電漿

熱電漿由於其超高溫之特性，在工業上被廣泛用於金屬材料的加工、熔接及鋼鐵與礦石冶煉等方面，近年來，已有利用熱電漿技術處理有害事業廢棄物，在國內目前教育部為妥善處理教育機構實驗廢棄物，已成立一共同處理體系，其中即設有一套電漿熔融系統處理有害實驗廢棄物。

熱電漿技術在空氣污染防治的應用上，主要為熱電漿技術對於全氟化物的控制，尤其對於 PFCs 之處理成效相當良好、技術成熟度高，但其火炬陰極壽命較短(約 7-14 天)是目前發展最大瓶頸；PFCs 排放源常見於半導體製程及鋁製程中，因此半導體製程尾氣處理方法及效能備受矚目，目前運用電漿技術處理全氟化物之相關研究發表或開發之機台，主要有高週波電漿及介電質電漿。

電漿處理 PFC 之反應機制，主要將中性之 PFC 氣體經電漿誘發系統，使氣體電漿化(自由基、離子、自由電子等)，且添加其他反應氣體(如 H₂O、O₂、Ar)進行反應，而將低極性

之 PFC 轉換成低分子量且具親水性之極性化合物，如 CO_2 (CO_2 之溫室效應遠低於 PFC 氣體)、 COF_2 、 CO 、 HF 等不具溫室效應氣體再以水洗、吸附等方法去除。

(二)非熱電漿

非熱電漿之應用主要可應用於工業應用及污染防制兩方面，茲分述如下：

1.工業應用

(1)高週波放電

高週波放電通常應用於光學發射光譜與電漿化學的研究，其電漿產生方式為在放電管外側纏繞感應線圈，放電管內維持在近真空狀態施以數千至數百萬 Hz 間之放電頻率，此時系統產生一高週波電場，此電場會加速電子速度而使電子為高能量狀態，藉由電子碰撞之連鎖反應，便可將氣體游離及解離而形成電漿，一般高週波放電應用於低壓狀態，如半導體業之蝕刻或薄膜製造工業。

(2)輝光放電

此放電形式屬低壓放電之一，其主要構造係於管中置入兩平行電極板，壓力一般低於 10mbar，因此其誘引之電場較大，同時電子亦具有較高能量，易將中性之氣體原子及分子激發，產生輝光放電，惟因其低壓限制，導致處理氣體流量不大，而無法廣泛應用於工業製程中，目前實際應用上以照明工業較多，如廣告使用的氬燈管及螢光燈管等。

(3)電弧放電

電弧放電係由一陰極電位差(約百伏特)產生極大電流而誘發電漿，其最大特色在於其大電流(約 $1\sim 10^5\text{A}$)，其誘發型態有熱離子陰極電弧、冷陰極及陰極點電弧、真空電弧、高壓電弧、低壓電弧等，目前廣泛應用於熔接工業上。

2.污染防制

(1)電暈放電

電暈放電係在二電極間施以高壓電源，而獲致強大電場用以破壞系統中氣體之絕緣性，使之成為電導體，此時會有輝光產生，此種現象俗稱電暈，其電源

供給種類可分為直流電、交流電和正、負脈衝式等。目前電暈放電以應用於靜電集塵器方面最為常見，其主要原理為利用高壓電使二集塵板中產生電場，使氣流中懸浮微粒帶電，而將懸浮微粒收集於集塵板上。

(2) 電子束法

基本原理係以電子槍施加一強電場加速電子，使電子具極高動能並以極高速進入掃瞄線圈，經線圈之磁場控制電子方向，由於電子速度極快，經撞擊鈦箔光束窗下生成許多電子束，而其高能電子，可與廢氣之氣體分子進行非彈性碰撞，生成具有高反應性自由基以氧化或還原污染物。

(3) 介電質放電法

介電質放電法又稱為無聲放電或流光放電，其具有輝光放電之大反應體積和電暈放電之高操作壓力的優點，為一套可以應用於處理高壓力、大流量之電漿放電技術。美國伊利諾大學算是將介電質放電法應用在氣態空氣污染物防制方面的先驅者之一，其實驗室成功應用介電質放電法去除 NO_x 及 SO_2 ，單獨去除時均可達到 90% 以上之去除效率，若採同時處理，則 NO_x 及 SO_2 之去除效率分別達到 95% 及 32%；最近數年間，介電質放電法應用於氣態污染物之研究已被證實可有效應用於 NO_x 、 SO_2 、VOCs、溫室氣體、氟氯碳化物及臭氣等多種氣狀污染物去除，綜觀各種非熱電漿放電方法，在氣態空氣污染防制方面，介電質放電法為最具發展潛力的技術之一。

非熱電漿可廣泛應用在粒狀物、酸氣、VOCs、臭味氣體、溫室效應氣體、室內空氣及柴油引擎之污染控制上，因此對於空氣污染防制的應用範圍較熱電漿技術還要廣。然而，非熱電漿技術雖有低溫、低耗能的優點，但其技術成熟度較低，多仍在研發階段，尚未達商業化程度，但其對處理氣態污染物的發展近年也受到國際間的重視。許多研究都指出，非熱電漿技術具有良好的去除效能，與其他傳統空氣污染控制技術比較亦具有經濟競爭力。

三、與其他空污技術比較

由國外相關研究資料顯示，非熱電漿對於酸性氣體(SO_x、NO_x)的去除與傳統控制技術比較，最大的不同在於其可同時去除 SO_x 及 NO_x，且其亦具有設備空間小及節省成本的優點。就去除效率而言，非熱電漿技術對 NO_x 及 SO_x 之去除率分別為 60~80% 及 90~95%，比傳統技術高。

在設備操作成本上，相關研究資料亦顯示非熱電漿技術(脈衝電暈放電、噴射電暈、電子束)比傳統控制技術(SCR+FGD)年操作成本低。以 500 萬瓦的電廠而言，年操作費用，傳統技術約 12 億元台幣，電漿約 4~7 億元，經濟性相當好。

在非熱電漿技術處理 VOCs 方面，與傳統處理技術比較，如吸附、燃燒、觸媒氧化、生物濾床等，非熱電漿技術適合處理低濃度、低流量的廢氣。由國外相關研究結果顯示，不論是低碳數碳氫化合物、醛類、酮類、含氯物質、苯環化合物或高沸點有機物，去除效率多可高於 95%，其所應用之範圍比單一傳統處理技術廣，且效率高。

非熱電漿及傳統各種 VOCs 處理技術之優缺點比較如表 2。

表 2 非熱電漿及傳統技術處理 VOCs 之優缺點

項目	優點	缺點
熱焚化	70~90% 熱能回收	生成 NO _x 、DXN，後續控制設備費用高
觸媒氧化	70% 熱能回收，低 NO _x ，不產生 DXN	觸媒需定期更換，且有毒化及廢棄觸媒問題。
吸附	可回收 VOCs，可作為濃縮設備	需定期更換或再生，有阻塞及廢棄活性炭處理問題。
生物濾床	過程簡單，額外能量需求低且效率高。	設備佔地大。溫溼度影響大，不適用高氯數化合物
UV 氧化	操作簡單分解效率高	光源鏡面清洗麻煩，UV 燈耗能高
非熱電漿	低能量、高效率	副產物

非熱電漿其處理成本與傳統處理技術比較，填充床電漿的

年操作成本比活性碳吸附法省 20% ，比觸媒氧化省 30% ，比焚化法省 50% ，但有中間副產物生成的問題。此問題目前已有整合電漿及觸媒技術，藉由觸媒使中間產物進一步氧化，產生無害化的 CO_2 及 H_2O 。

四、發展潛力

電漿技術之發展十分快速，主要發展範圍可分為能源性及工具性兩方面，在能源性之應用包括傳統應用如鋼材熔段、熔射、合成及燒結及冶金等方面，而工具性之利用則更具有經濟上之價值，如光技術、薄膜、蝕刻、表面處理及環境技術應用等方面；在環境技術應用部分，高溫電漿其未來應用和發展在能源回收方面具有非常大之潛力，利用電漿火炬分解有機物產生的水煤氣($\text{CO} + \text{H}_2$)能源，為電漿火炬所消耗之能源 3 倍多，可考量作為開發新型態之氣電共生系統。

在非熱電漿方面，目前研究顯示其對於酸性氣體(如氮氧化物及硫氧化物)、揮發性有機物、溫室效應氣體及臭味物質等氣態污染物具有良好的控制效果。非熱電漿技術已發展對多污染物同時去除，朝向整合性技術方向發展，包括觸媒電漿及濕式電漿等技術持續在研究與開發，觸媒電漿技術也研究去除戴奧辛的可能性。由於此類系統具備同時去除多種污染物的能力，且具相當高之去除效率，亦可藉此有效減少空間需求及硬體成本設備，為值得國內各界投入研發及推廣的新技術方向。

五、參考文獻：

1. 李灝銘，張木彬，氣態污染物控制新技術－非熱電漿技術，工業污染防治季刊，89 期，2004 年。
2. 游生任副研究員，電漿技術應用於處理全氟化物之研發與探討，工研院環安中心。
3. 原能會核研所網站。
4. Chapman, B., Glow discharge processes, A Wiley-Interscience Publication, Canada, pp.297-342, 1980。
5. Chang, M.B., Kushner, M. J. and Rood, M. J., Gas Phase

- Removal of NO from Gas Streams via Dielectric Barrier Discharges, *Environmental Science and Technology*, Vol .26 , No .4 , pp . 777-781 , 1992 .
6. Chang, M.B., Kushner, M. J. and Rood, M. J., Removal of SO₂ and the Simultaneous Removal of SO₂ and NO from Simulated Flue Gas Streams via Dielectric Barrier Discharge Plasmas, *Plasma Chemistry and Plasma Processing* , Vol .12 , No .4 , pp . 565-580 , 1992 .
 7. Mitsuharu, K., *Film deposition by plasma Techniques*, Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, pp.11-48 , 1992 .
 8. Streams by Combined Plasma Scrubbing Technology,” *Journal of Air & Waste Management Association* , 2004 .
 9. 赤崎正則，村岡克紀，渡邊征夫，猪原建治，*電漿工學的基礎*，1990 .
 - 10.阿部東彦，家田正之，入三欲，*電漿化學*，1991 .