

常壓非熱電漿應用於表面滅菌之研究回顧

A Review of Atmospheric Nonthermal Plasma Applied to the Surface Decontamination

張宗良¹ Chung-Liang Chang
元培科技大學環境工程衛生系

徐詮亮² Chuan-Liang Hsu
東海大學食品科學系

邱挺璋³ Ting-Wei Chiu
元培科技大學環境工程衛生研究所

陳飛揚³ Fei-Yang Chen
元培科技大學環境工程衛生研究所

洪雪芬^{1*} Hsueh-Fen Hung
元培科技大學環境工程衛生系

^{1,3} Department of Environmental Engineering and Health, Yuanpei University, Hsin Chu 30015,
Taiwan

² Department of Food Science, Tunghai University, Taichung 40704, Taiwan

摘要：許多產業包括生物技術、食品工業、製藥及醫療等均須仰賴滅菌技術以控制可能產生之生物性健康危害，由於傳統之滅菌技術在實際運用上具有一些限制或缺點，諸如加熱滅菌法耗時且無法適用於熱敏感性器材，化學殺菌劑可能具殘留毒性及環境汙染問題，輻射線滅菌法可能產生輻射危害等。近幾十年來，世界各地許多研究團隊均致力於開發新的滅菌技術，而低溫電漿滅菌技術的快速發展便是其中一項。常壓非熱電漿的產生方式很多，本文主要回顧近期常被研究且具實務應用潛力的兩種電漿產生方式，以及其他會影響一電漿系統滅菌效率的因素，包括電漿操作條件(如電漿製處理表面的距離、通入氣體種類與流量等)及微生物特性(如營養型/孢子型細胞、生長期、細胞密度等)。期望透過本文的回顧，提供未來開發常壓非熱電漿應用於實務滅菌時之參考。

關鍵字：常壓非熱電漿、表面滅菌、噴流電漿、介電質放電

Abstract: Many industries including biotechnology, food-processing, and medical-care must rely on the sterilization method to prevent the contamination of microorganisms. Conventional sterilization techniques have some disadvantages such as limited use on heat-sensitive materials and

*Corresponding author



time-consuming process of heating methods, residual toxicity and environmental pollution caused by the application of biocides, and potential radiation hazards of irradiation sterilizations. In recent years, many researchers are devoted to develop novel disinfection techniques as an alternative to the traditional methods. One of the rapidly developing methods is low-temperature plasma sterilization. In this article, a review of two types of popularly studied nonthermal atmospheric plasma generation system is presented. In addition to the plasma generation method, there are many factors including plasma device operation conditions (e.g. plasma-to-surface distance, feeding gas, flow rate etc.) and the characteristics of microorganisms (e.g. vegetative/spore cell, growth phase, cell loading density etc.) that will affect the disinfection efficacy of a given plasma system.

Keywords: Nonthermal atmospheric plasma; Surface decontamination; Plasma jet; Dielectric barrier discharge

1.前言

傳統的滅菌方法包括熱滅菌法(如高溫高壓滅菌釜、乾熱滅菌)、化學藥劑滅菌法(如 ethylene oxide、hydrogen peroxide、orformaldehyde)、物理性滅菌法(如 UV 照射、離子輻射)等，各類方法均具有其優缺點。其中，熱滅菌法操作簡便、成本低，但耗時且不適用於塑膠、纖維、橡膠等對熱敏感之材質。輻射(radiation)之滅菌效果佳可被運用於塑膠、醫療儀器、製藥等產品之殺菌，然而離子輻射成本高昂且 γ 射線會改變物質的特性(例如 polypropylene、polystyrene)。UV 照射滅菌雖無熱傷害，但對某些抵抗力強的微生物或孢子(如 *Bacillus atrophaeus*)之滅菌效果差。化學藥劑滅菌法雖不需高溫操作，但卻有毒性殘留及造成環境污染等問題。

醫療、健康照護、食品工業、製藥及生技產業等均須仰賴滅菌技術以控制可能產生之生物性健康危害，而為了增進室內空氣品質減少過敏源與微生物危害，通風空調工業也積極尋求低耗能高效率的滅菌技術以整合到其產品設備中，增加產品功能以提升市場競爭力。由於傳統之滅菌技術在實際運用上具有一些限制或缺點，因此，世界各地許多研究團隊均致力於開發新的滅菌技術，而電漿技術便是其中一項(Montie et al., 2000; Laroussi, 2002; Sladek and Stoffels, 2005; Ekem et al., 2006; Gaunt et al., 2006; Halfmann et al., 2007; Muranyi et al., 2007; Schwabedissen et al., 2007; Burts et al., 2009; Yang et al., 2009; Joshi et al., 2010; Tian et al., 2010)。透過氣體放電可形成大量電子(Electrons)、離子(Ions)、介穩態(Metastable)粒子及自由基(Radicals)等具高活性物種，這些高活性物種可快速與其他分子或粒子反應，藉由此特性而使電漿在滅菌上的應用獲得廣泛的探討與研究。

依據能量需求及氣體離子化的程度，可分成熱電漿(thermal plasma)及非熱電漿(nonthermal plasma)，高溫電漿主要應用於燃燒裂解如工業上金屬材料之加工、電漿火炬於廢棄物處理，而低溫電漿則廣泛應用於表面改質、薄膜生成、半導體製程、特殊氣體生成、空氣污染物的控制等。非熱電漿依其操作壓力，又可區分為低壓非熱電漿與常壓非熱電漿，前者包括電子束法(Electron Beam)及輝光放電(Glow discharge)，因需要低壓環境故操作上有其限制，而後者則可在常壓下操



作，因而成為現今常溫電漿發展的主要方向，其氣體放電技術包括脈衝電暈放電法(Pulsed Corona Discharge)、及介電質放電法(Dielectric Barrier Discharge, DBD)等(Urashima and Chang,2000)。

2.常壓非熱電漿之型式

常壓非熱電漿的設備非常多元化，設計的原理主要仍以介電質放電以及經由射頻/微波持續放射離子射流兩大型式為最普遍。

2.1 介電質放電

介電質放電之結構主要是於兩金屬電極間置入介電材料(Trompeter et al., 2002; Colagar et al., 2010; Kostov et al., 2010)，此介電材料於系統中具有荷電功能，當系統所施加的高壓交流電能達最大值後開始變相(或改變極性)時，此時高能電子或流光電暈便會從介電質表面放射出，或者當兩電極間之電壓差達氣體崩潰電壓後，兩電極間的氣體將成為電導體，且由於介電質的關係產生穩定的微放電充滿在整個放電區。此時於兩電極間便可觀察到許多微放電之現象。微放電生成的同時，此時高電場又促使系統中的自由電子加速，此時電子在該電場中將被加速並與氣體分子撞擊，而進行激發(Excitation)、游離(Ionization)、解離(Dissociation)及結合(Combination)/再結合(Recombination)等作用與反應，而生成許多電子(Electrons)、離子(Ions)、介穩態(Metastable)粒子及自由基(Radicals)等具高活性物種，這些高活性物種可以促使氣流中的物質分解。

圖 1 為 Kostov 等人(2010)利用介電質系統進行表面滅菌測試。此系統使用室內空氣做為通入氣體，並在常壓下進行操作，系統分為兩個電極，第一電極為介電質，第二電極為樣品放置區，由低頻交流電 110 V 提供電能，單位滅菌面積所使用之能量範圍低於 19.5 W/cm^2 。

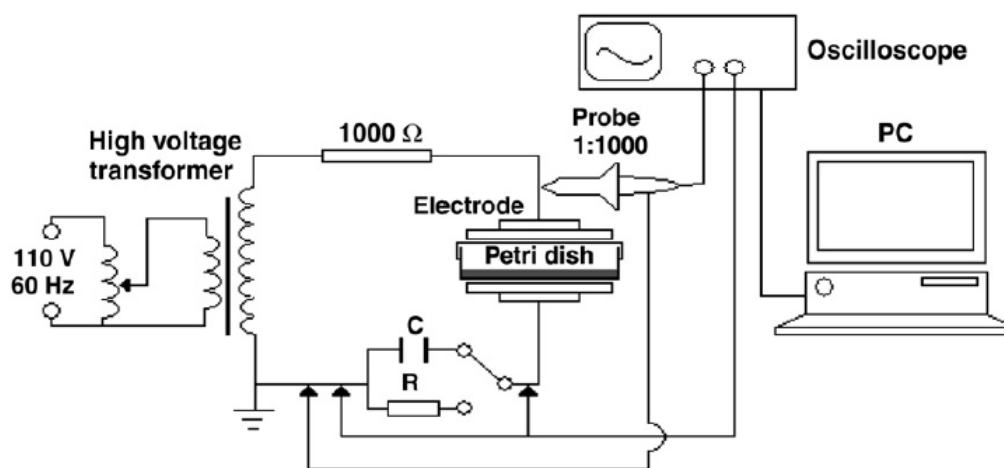


圖 1 介電質放電之電漿系統 (摘自 Kostov et al., 2010)

2.2 射頻/微波持續放射等離子射流

此類系統設備的外部為接地電極，內部電極則利用射頻電源 (radio frequency power)調整在高頻下(~kHz)激發、產生並加速電子，利用加速電子再撞擊其他原子以產生更多的游離電子，如



此反覆進行而形成穩定的非熱電漿，此時電漿通過噴嘴構造而形成一道高速噴流電漿。為了維持所形成的電漿穩定而均勻，系統中必須通入以氦氣(Helium, He)為主成分之混合氣體，以持續擴散放電(Yu et al., 2006; Uhm et al., 2007; Feng et al., 2009; Yang et al., 2009)。

圖 2 為 Uhm 等人(2007)所使用 APPJ(atmospheric-pressure plasma jet)系統。系統由兩個同軸圓筒組成，在兩圓筒內產生電漿。圖中編號 A 和 B 各為 3 及 9 公分，圓筒長度為 12 公分，噴嘴直徑 0.5 公分，操作電功率為 130 W。

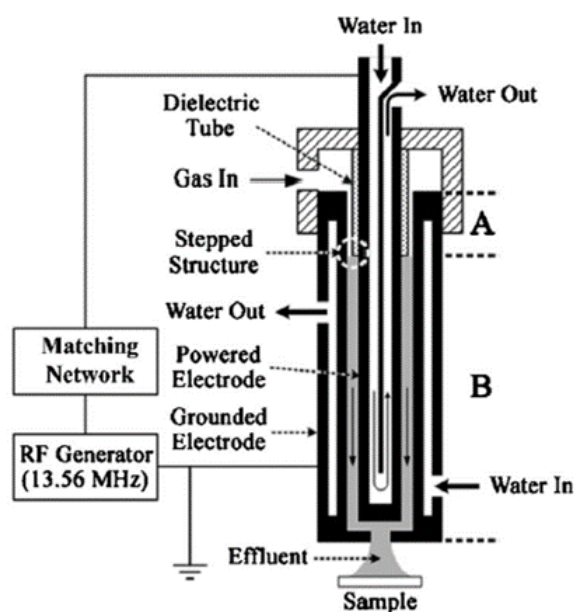


圖 2 Atmospheric-pressure plasma jet(APPJ)系統 (摘自 Uhm et al., 2007)

一般而言，介電質電漿系統大多以耗能低為優勢，能以較低之輸出功率進行有效率之滅菌，而 APPJ 及 RF 雖然可在短時間內達到不錯之滅菌效果，但屬於高耗能電漿系統且高功率操作可能導致氣體溫度提高而無法運用於熱敏感之器材消毒，此點也是許多研究積極改善的缺點之一。此外，介電質電漿系統由於具有較大的放電區以及介電質區，因此處理表面積相對較噴流式電漿系統大。

3.電漿之殺菌機制

氣體放電導致細菌死亡的反應機制目前尚無定論，主要有兩種假說，一為靜電崩解 (electrostatic disruption)，另一則為細胞膜成分的氧化作用。Mendis et al. (2000) 提出電漿處理會使細胞表面蓄積電荷，當總電力超過細胞膜的總抗張強度(tensile strength)時細胞將會溶解，而細菌細胞膜的抗張強度是由肽聚醣層(peptidoglycan)所維持，革蘭氏陽性菌之肽聚醣層較革蘭氏陰性菌厚，因此欲引起革蘭氏陰性菌細胞溶解所需之累積電荷相對較低，故革蘭氏陽性菌比陰性菌對電漿處理更具有耐受性，此點可由 Montie 等人(2000)、Sun 等人(2007)之研究結果獲得驗證。第二種機制則係由氣體放電產生之離子、自由基、反應性物種對細胞膜或細胞成分造成氧化傷害作用。由於含氧自由基會與微生物細胞膜進行氧化反應，造成微生物細胞膜破裂而使巨分子



物質滲漏，且含氧自由基會與微生物的 DNA 進行化學反應，造成微生物的基因突變、生理特性改變而死亡，有關反應性含氧物種(reactive oxygen species, ROS)對細胞的傷害已由許多研究證實 (Kellogg et al., 1979; Farr and Kogoma, 1991; Hyslop et al., 1995; Imlay, 2003; Nojima et al., 2007)。

Kostov 等人(2010)，利用介電質放電系統進行滅菌效果評估，研究指出消毒時間與放射頻率成反比，因此低頻電漿系統所需之滅菌時間較高頻系統長，在電漿殺菌過程中，熱以及 UV 光的貢獻較為薄弱，大部分滅菌效果導因於電子碰撞以及化學反應，因此，除了帶電粒子破壞以外，細胞表面累積電荷也成為殺菌因素之一。

另外有文獻利用 DBD 電漿系統探討臭氧在電漿殺菌中所扮演之角色，並提出臭氧與電離子為 DBD 電漿系統主要的殺菌因子，第一，低能電子可能造成微生物的穿孔反應。然後帶電粒子的貢獻為累積在電漿系統內並進一步的滲透到細胞裡。第二則為臭氧和原子氧可能為破壞蛋白質與 DNA 並擾亂細胞新陳代謝的主要物質(Poiata et al., 2010; Ahn et al., 2003)。

不同電漿設備所產生之離子及帶電物種的密度有差異。如表 1 所示，在電量放電及介電質放電系統中，臭氧是主要的反應性產物。

表1 不同電漿設備所產生之氧離子、氧原子、臭氧及帶電物種的密度 (Loeb and Meek, 1940)

Source	Typical density (cm ⁻³)			
	O ⁺ , O ₂ ⁺ , O ₂ ⁻	O	O ₃	Charged species in plasma
Low pressure discharge	10 ¹⁰	10 ¹⁴	<10 ¹⁰	10 ⁸ ~10 ¹³
Arc or plasma jet	10 ¹⁵	10 ¹⁸	<10 ¹⁰	10 ¹⁶ ~10 ¹⁹
Corona	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ¹⁸	10 ⁹ ~10 ¹³
DBD	10 ¹⁰	10 ¹²	10 ¹⁸	10 ¹² ~10 ¹⁵
Plasma jet	10 ¹²	10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ¹¹ ~10 ¹²

Sun 等人(2007)與陳氏(2012)分別利用掃描式電子顯微鏡與原子力顯微鏡對臭氧或電漿暴露後之菌體進行觀察比較，顯示暴露電漿之菌體呈現許多不完整之碎片狀，而暴露臭氧之菌體失去活性但外觀仍舊完整(圖 3)，因此，臭氧在不同系統中對殺菌效果的貢獻度也不盡相同。

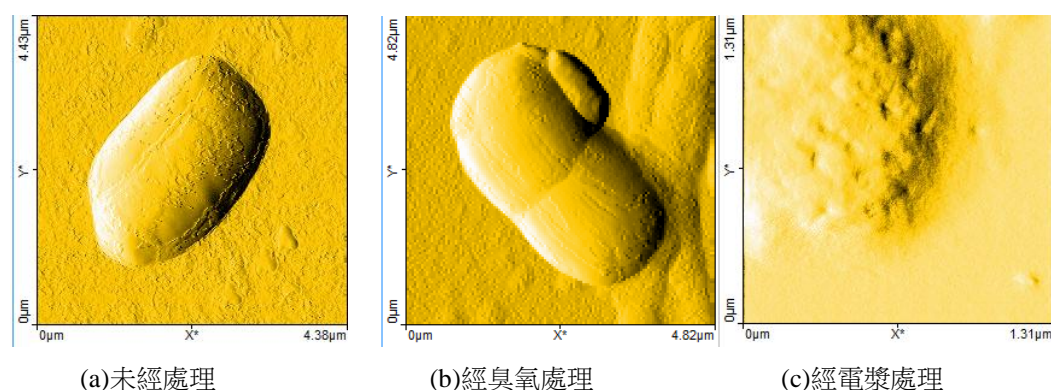


圖 3 以原子力顯微鏡觀察經不同處理方式後之大腸桿菌細胞形態(摘自陳氏，2012)

4. 影響電漿表面殺菌之因素



影響電漿對表面微生物殺菌效果的因素包括電漿噴口與處理表面之距離、通入氣體(feeding gas)的流量及種類、處理時間、電極型式、頻率等電漿系統操作條件及測試菌數濃度、營養型或孢子型、微生物之不同生長期等微生物因子。以下針對國外常壓非熱電漿殺菌之相關文獻進行探討與評述。

4.1 電漿系統操作條件

由於不同型式之放電設計或不同的電漿設備操作參數均會影響其滅菌成效，因此，本節僅就影響電漿滅菌效果之作用距離、通入氣體種類與流量等操作條件作一彙整。

4.1.1 距離

此處所指之距離有兩類，一為電漿噴口(atmospheric pressure plasma jet)或電極板之放電電極(DBD)與處理表面之垂直距離，另一個則是以噴流電漿接觸處理表面為中心點向外擴展之水平距離。結果顯示垂直/水平距離愈短，殺菌效果愈佳(Ma et al., 2008; Yang et al., 2009)。因此，目前常見的常壓非熱電漿操作形式上較適合應用於平整的小面積滅菌，若將放電區設計為可移動式，則可增加作用面積。

4.1.2 通入氣體

由於氦氣(He)具有較低的放電電壓且當有 O₂ 或 N₂ 存在時較容易產生穩定的輝光放電，因此常被作為放電系統的通入氣體。Lim 及 Uhm (2007)利用常壓輝光放電(atmospheric pressure glow discharge, APGD)比較以 He+ O₂ 與 Ar+ O₂ 為 feeding gas(通氣流量 10 lpm)產生之電漿殺菌效果，顯示 Ar+ O₂ 的電漿在 30 秒內可使 *Bacillus atrophaeus* 的孢子減少 10⁷ 個 CFU，而 He+ O₂ 則無任何滅菌效果，研究中測量 Ar+ O₂ 與 He+ O₂ 的電漿溫度分別為 85 與 110 °C，明顯高於一般室溫，顯然該系統之滅菌效果除來自電漿外，高溫效應也是其中主要原因之一，此系統並不適用於熱敏感性材質之滅菌。

除了 He 及 Ar 外，Deng 等人(2008)嘗試添加過氧化氫蒸氣(H₂O₂)於 feeding gas 中(He 及 Ar 通氣流量分別為 22.7 及 21.5 lpm)以測試 DBD 產生之電漿對枯草桿菌(*Bacillus subtilis*)之殺菌效果，結果顯示 Ar+ H₂O₂ 處理 30 秒可減少 10² 個 CFU，而 He+ H₂O₂ 處理 20 秒則可去除 10⁶ 個 CFU。Deng 等人(2008)與 Lim 及 Uhm (2007)之研究均顯示通入的氣體種類會影響電漿之殺菌效果。

Herrmann 等人(1999)利用高週波產生噴射式常壓電漿(atmospheric-pressure plasma jet, APPJ)進行 *Bacillus globigii* 孢子之殺菌效果評估，發現通入氧氣所產生之電漿殺菌效果比未通入氧氣者佳，而 Richardson 等人(2000)利用 resistive-barrier discharge (RBD)通入含有 3 % 氧氣之氦氣體可使產生之電漿對 *Bacillus subtilis* 具有最佳的殺菌效果(相較於只通入純氦氣體)。

Colagar 等人(2010)以化膿性鏈球菌做為測試菌種，利用介電質放電系統通入包含氧氣以及二氧化碳等不同氣體探討其對電漿殺菌效果之影響，當氣體流量 10 lpm，測試樣品與電漿距離 40 mm，處理時間為 10 分鐘，通入氧氣可去除約 5 orders 之菌落數，而二氧化碳只有 4 orders，時間延長至 15 分鐘時，通入氧氣可去除 9 orders 之菌數，而二氧化碳去除 7 orders 之菌數，通入氧氣之滅菌效果高於二氧化碳。另外，研究中測量測試腔之臭氧濃度，當通入氧氣可產生 11 ppm 之臭氧，而二氧化碳僅有 0.1 ppm，顯示大部份空氣中之紫外線在滅菌過程中並未發揮作用，主要滅菌效果係由臭氧以及其他活性物種所貢獻。



除了氣體種類之外，通入氣體的流量也是影響滅菌效果的主要因素之一。Wang 等人(2008)利用填充床式電漿系統以空氣為通入氣體對大腸桿菌進行滅菌測試，並評估最佳氣體流量。結果顯示，當氣體流量低於 $0.75 \text{ (m}^3/\text{h)}$ 時，滅菌效果隨氣體流量增加而增加，而流量高於 $0.75 \text{ (m}^3/\text{h)}$ 則隨氣體流量增加而降低，作者認為可能原因為隨著流量增加，氣體反應越多而導致化學反應更完全，但當氣體流量高到能迅速使化學活性物種達到飽和後，活性物種彼此反應而迅速分解，因此導致滅菌效率降低。邱(2011)以不同流量之空氣通入 DBD 系統進行大腸桿菌滅菌測試，隨著通氣流量增加滅菌效率呈現下降趨勢，當通入空氣流量為 0.5 lpm 時，滅菌效果最好，去除的菌數可達 3.5 orders 。而未通入空氣氣體時，滅菌效果則可達到 100% ，去除之菌數濃度超過 6 orders ，由於氣體流量增加可能會造成電子與氧分子間反應不完全，導致所形成的活性含氧物種減少，而使滅菌效果降低。

整體而言，通入含有氧原子之氣體通常可使電漿中的活性含氧物種增加，進而提升滅菌效果，然而，除了考量通入氣體種類外，由於氣體流量會影響反應性含氧物種的形成，故在進行電漿系統之開發測試時，必須通盤考量之。

4.2 微生物特性

不同的微生物生理特性與細胞構造會影響電漿的作用。

當環境不良或營氧不足時，細菌會將細胞質收縮，形成類似含有一層保護壁的孢子型態，即進入休眠狀態，能抵抗熱、乾燥、光及防腐劑，且能在 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 下抵抗 1 小時，因此，電漿對孢子形態之菌體的滅菌效果較營養型差(Feng et al., 2009)。

而在有限的空間及營養源的環境下，細菌細胞的數量會隨著時間而產生不同變化，並可被區分為遲滯期、對數期、穩定期、死滅期等四個不同時期，每個時期的細菌細胞則具有不同的生理特性，因此對電漿的作用也會產生不同的結果。Yu 等人(2006)利用 cold atmospheric plasma pen (CAP-PEN) 針對不同生長時期之大腸桿菌進行電漿殺菌效果評估，研究結果發現處於對數生長期之菌株以電漿處理 150 秒可去除 10^5 個 CFU，而進入穩定期之菌株則須 180 秒方可達到相同效果，顯示穩定期之細菌較對數期更具有抗性。

此外，測試菌數的密度越高，電漿的滅菌效果越差。高濃度菌數在小面積下容易產生菌體堆疊的情形，形成多層次保護膜，上層細胞阻擋了電漿中活性物種對下層細胞的破壞作用，進而降低了電漿滅菌處理的效果(Deng et al., 2005; Yu et al., 2006)。

另一項影響電漿效果的微生物特性為細胞壁的結構，依據細胞壁結構可將細菌區分成革蘭氏陽性菌與陰性菌。Sun 等人(2007)利用 DBD 產生之常溫電漿對大腸桿菌(*E. coli*)及金黃色葡萄球菌(*S. aureus*)進行滅菌效果測試，結果顯示 DBD 對 *E. coli* 的滅菌效果優於對 *S. aureus*，電漿暴露後之菌體在掃描式電子顯微鏡下呈現許多不完整之碎片狀，而暴露臭氧或 UV 光者則菌體失去活性但外觀仍舊完整，因此，電漿除了可使菌體失去活性減少感染危害外，尚具有進一步將菌體破壞分解的潛力(Yu et al., 2006)，故可免除死亡菌體之細胞成分成為過敏原，此特點使電漿殺菌的應用更具有開發的價值。

Yu 等人(2006)針對大腸桿菌和微球菌也有此類測試，其結果顯示微球菌處理時間 180 秒可去除 10^4 個 CFU，而大腸桿菌僅可去除 10^2 CFU，推測造成差異之原因有二：第一是細胞結構不同，大腸桿菌屬於革蘭氏陰性菌，細胞有外膜的保護可避免電子直接打擊，而微球菌屬革蘭氏陽



性菌，細胞並無外膜結構。第二個原因為暴露在電漿下，些許存活的大腸桿菌細胞繼續增殖所致。

Kostov 等人(2010)利用 DBD 電漿系統對金黃色葡萄球菌以及大腸桿菌進行滅菌測試，電壓強度 12 kv，初始菌數濃度 3 個 orders，研究結果顯示隨著時間增加滅菌效果增加，然而大腸桿菌具有較強之抗性，去除 90% 之大腸桿菌需要 18 分鐘，金黃色葡萄球菌僅需 15 分鐘，可能的原因為革蘭氏陰性菌具有較厚的細胞層，提高對電漿的抗性。

除了上述研究外，尚有許多文獻(Yu et al., 2006; Montie et al., 2000; Mendis et al., 2000)對於革蘭氏陽性菌與陰性菌之電漿滅菌研究結果並不一致，此部份須再做進一步釐清。

綜合以上之研究顯示，電極間距、介電質特性、通入氣體、流量等均會影響微放電場之生成，進而對自由基之生成產生影響，因此，不同之介電質反應器設計與操作條件對於微生物具有不同之處理效果。而表面負載之菌數密度(loading density)、微生物的種類、生長介質(Yu et al., 2006; Cvelbar et al., 2006)、不同生長階段、營養細胞與孢子對電漿處理耐受性也有差異。多數常壓非熱電漿研究均以細菌類微生物作為測試菌株，鮮少有使用其他微生物(例如真菌、病毒等)進行測試。

5. 結論

醫療、健康照護、食品工業、生技產業等均須仰賴滅菌技術以控制可能產生之生物性危害，而為了增進室內空氣品質減少過敏源與微生物危害，通風空調工業也積極尋求低耗能高效率的滅菌技術以整合到其產品設備中，增加產品功能以提升市場競爭力。由於傳統之滅菌技術在實際運用上具有一些限制或缺點，因此，世界各地許多研究團隊均致力於開發新的高效率滅菌技術。

電漿技術具有作用時間短、無化學消毒劑殘留、及可進一步將菌體破壞分解等特性，且因常壓非熱電漿可免除低壓操作環境之限制，產生之電漿溫度接近室溫，故可應用於熱敏感性材質之滅菌處理，因此更成為最具開發潛力的殺菌技術。近年來，國外已有一些文獻利用不同氣體放電形式探討常壓非熱電漿之殺菌效果，隨著放電操作條件、微生物種類及生理狀態(營養型或孢子型)、以及介質的種類而使達到理想滅菌效果所需之處理時間由數秒鐘至數分鐘不等。

常壓非熱電漿應用於殺菌技術的時間並不長，因此仍有一些尚待克服或研究的地方，例如：這些研究大多使用高頻電源，然而高頻電源供應器製造費用昂貴且製造技術仍有瓶頸，耗能且操作成本高。此外，暴露到生物性因子可能造成三類健康危害：一是感染，其次是過敏及中毒。暴露到具有活性之致病性細菌、真菌或病毒，可能造成暴露者感染，而不具感染致病性之微生物或是生物性物質(包括微生物細胞成分及代謝產物)則可能引起過敏及中毒反應。多數電漿滅菌的相關研究只著重於菌體本身活性去除或細胞破壞，這樣的效果僅能確保達到免於微生物之感染性危害及部分由外毒素所引起之中毒危害，因此，未來電漿滅菌技術的開發與效果評估應更全面的考量所有生物性因子的健康危害，尤其是對於可能造成過敏及中毒危害(如內毒素等)之微生物細胞成分的去效果。

參考文獻

- [1] 邱挺璋，「常壓非熱電漿對大腸桿菌之滅菌效果評估」，元培科技大學環境工程衛生研究所



- 碩士論文，民國100年。
- [2] 陳飛揚，「電漿系統與臭氧系統殺菌效果之評估」，元培科技大學環境工程衛生研究所碩士論文，民國101年。
- [3] Ahn, H. S., Hayashi, N., Ihara, S. and Yamabe, C., "Investigation Results on Ozone Generation Characteristics by Superimposed Discharge," *Appl. Phys.* Vol. 42, 2003, pp. 121-127.
- [4] Burts, M. L., Alexeff, I., Meek, E. T. and McCullers, J. A., "Use of Atmospheric Non-thermal Plasma as a Disinfectant for Objects Contaminated with Methicillin-resistant Staphylococcus Aureus," *American Journal of Infection Control*, Vol. 37, No. 9, 2009, pp. 729-733.
- [5] Colagar, A. H., Sohbatzadeh, F., Mirzanejad, S. and Omran, A. V., "Sterilization of Streptococcus Pyogenes by Afterglow Dielectric Barrier Discharge Using O₂ and CO₂ Working Gases," *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 51, 2010, pp. 189-193.
- [6] Cvelbar, U., Vujošević, D., Vratnica, Z. and Mozetič, M., "The Influence of Substrate Material on Bacteria Sterilization in an Oxygen Plasma Glow Discharge," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 39, 2006, pp. 3487-93.
- [7] Deng, S., Cheng, C., Ni, G., Meng, Y. and Chen, H., "Bacterial Inactivation by Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma Jet," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47, No. 8, 2008, pp. 7009-7012.
- [8] Deng, X. T., Shi, J.J., Shama G. and Kong. M. G., "Effects of Microbial Loading and Sporulation Temperature on Atmospheric Plasma Inactivation of Bacillus Subtilis Spores," *Applied physics letters*, Vol. 87, 2005, pp. 153901-153903.
- [9] Ekem, N., Akan, T., Akgun, Y., Kiremitci, A., Pat, S. and Musa, G., "Sterilization of Staphylococcus Aureus by Atmospheric Pressure Pulsed Plasma," *Surface & Coatings Technology*, Vol. 201, 2006, pp. 993-997.
- [10] Farr, S. B. and Kogoma, T., "Oxidative Stress Responses in Escherichia Coli and Salmonella Typhimurium," *Microbiol. Rev.*, Vol. 55, No. 4, 1991, pp. 561-585.
- [11] Feng, H., Sun, P., Chai, Y., Tong, G., Zhang, J., Zhu, W. and Fang, J., "The Interaction of a Direct-current Cold Atmospheric-pressure Air Plasma with Bacteria," *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, Vol. 37, No. 1, 2009, pp. 121-7.
- [12] Gaunt, L.F., Beggs, C.B. and Georghiou, G.E., "Bactericidal Action of the Reactive Species Produced by Gas-discharge Nonthermal Plasma at Atmospheric Pressure: a Review", *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, Vol. 34, No. 4, 2006, pp. 1257-1269.
- [13] Halfmann, H., Bibinov, N., Wunderlich, J. and Awakowicz, P., "A Double Inductively Coupled Plasma for Sterilization of Medical Devices," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 40, 2007, pp. 4145-4154.
- [14] Herrmann, H.W., Henins, I., Park, J. and Selwyn, G. S., "Decontamination of Chemical and Biological Warfare (CBW) Agents Using an Atmospheric Pressure Plasma Jet," *Phys. Plasmas*, Vol. 6, No. 5, 1999, pp. 2284-2289.
- [15] Hyslop, P. A., Hinshaw, D. B., Scraufstatter, I. U., Cochrane, C. G., Kunz, S. and Vosbeck, K.,



- “Hydrogen Peroxide as a Potent Bacteriostatic Antibiotic: Implications for Host Defense,” *Free Radic. Biol. Med.*, Vol. 19, 1995, pp. 31-37.
- [16] Imlay, J. A., “Pathways of Oxidative Damage,” *Ann. Rev. Microbiol.*, Vol. 57, 2003, pp. 395-418.
- [17] Joshi, S. G., Paff, M., Friedman, G., Fridman, G., Fridman, A. and Brooks, A. D., “Control of Methicillin-resistant Staphylococcus Aureus in Planktonic form and Biofilms: A Biocidal Efficacy Study of Nonthermal Dielectric-barrier Discharge Plasma,” *American Journal of Infection Control*, Vol. 38, No. 4, 2010, pp. 298-301.
- [18] Kellogg, E.W., Yost, M. G., Barthakur, N. and Kreuger, A. P., “Superoxide Involvement in the Bactericidal Effects of Negative Air Ions on Staphylococcus Albus,” *Nature*, Vol. 281, No. 5730, 1979, pp. 400-401.
- [19] Kostov, K. G., Rocha, V., Koga-Ito, C. Y., Matos, B. M., Algatti, M. A., Honda, R.Y., Kayama M. E. and Mota. R. P., “ Bacterial Sterilization by a Dielectric Barrier Discharge (DBD) in Air,” *Surface & Coatings Technology*, Vol. 204, 2010, pp. 2954-2959.
- [20] Laroussi, M., “Nonthermal Decontamination of Biological Media by Atmospheric-pressure Plasmas: Review, Analysis, and Prospects,” *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, Vol. 30, No.4, 2002, pp. 1409-1415.
- [21] Lim, J. P. and Uhm, H. S., “Influence of Oxygen in Atmospheric-pressure Argon Plasma Jet on Sterilization of Bacillus Atrophaeous Spores,” *PHYSICS OF PLASMAS*, Vol. 14, 2007, pp. 093504-1-093504-6.
- [22] Loeb, L. B. and Meek, J. M., “The Mechanism of Spark Discharge in Air at Atmospheric Pressure,” *J. Appl. Phys.*, Vol. 11, No. 7, 1940, pp. 438-447.
- [23] Ma, Y., Zhang, G. J., Shi, X. M., Xu, G. M. and Yang, Y.,” Chemical Mechanisms of Bacterial Inactivation Using Dielectric Barrier Discharge Plasma in Atmospheric Air,” *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, Vol. 36, No. 4, 2008, pp. 1615-1620.
- [24] Mendis, D. A., Rosenberg, M. and Azam, F., “A Note on the Possible Electrostatic Disruption of Bacteria,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 28, No. 4, 2000, pp. 1304-1306.
- [25] Montie, T. C. Kelly-Wintenberg, K. and Roth, J. R., “An Overview of Research Using the One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma (OAUGDP) for Sterilization of Surfaces and Materials,” *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 28, 2000, pp. 41-50.
- [26] Muranyi, P., Wunderlich, J. and Heise, M., “Sterilization Efficiency of a Cascaded Dielectric Barrier Discharge,” *Journal of Applied Microbiology*, Vol. 103, 2007, pp.1535-1544.
- [27] Nojima, H., Park, R. E., Kwon, J. H., Suh, I., Jeon, J., Ha, E., On, H. K., Kim, H. R., Choi, K. H., Lee, K. H., Seong, B. L., Jung, H., Kang, S. J., Namba, S. and Takiyama, K., “Novel Atmospheric Pressure Plasma Device Releasing Atomic hydrogen: Reduction of Microbial-Contaminants and OH Radicals in the Air,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 40, 2007, pp. 501-509.
- [28] Poiata, A., Motrescu, I., Nastuta, A., Creanga, D. E. and Popa, G., “Microorganism Response to



- Atmospheric Pressure Helium Plasma DBD Treatment,” *Journal of Electrostatics*, Vol. 68, 2010, pp. 128-131.
- [29] Richardson, J. P., Dyer, F. F., Dobbs, F. C., Alexeff, I. and Laroussi, M., “On the Use of the Resistive Barrier Discharge to Kill Bacteria: Recent Results,” *Proc. IEEE Int Conf. Plasma Science*, 2000, pp. 109.
- [30] Schwabedissen, A. Łaciński, P., Chen, X. and Engemann, J., “Plasma Label – a New Method to Disinfect Goods Inside a Closed Package Using Dielectric Barrier Discharges,” *Contrib. Plasma Phys.*, Vol. 47, No. 7, 2007, pp. 551-558.
- [31] Sladek, R. E. J. and Stoffels, E., “Deactivation of Escherichia Coli by the Plasma Needle,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 38, 2005, pp. 1716-21.
- [32] Sun, Y., Qiu, Y., Ailing Nie, A. and Wang, X., “Experimental Research on Inactivation of Bacteria by Using Dielectric Barrier Discharge,” *IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE*, Vol. 35, No. 5, 2007, pp. 1496-1500.
- [33] Tian, Y., Sun, P., Wu, H., Bai, N., Wang, R., Zhu, W., Zhang, J. and Liu, F., “Inactivation of Staphylococcus Aureus and Enterococcus Faecalis by a Direct-current, Cold Atmospheric Pressure Air Plasma Microjet,” *Journal of Biomedical Research*, Vol. 24, No. 4, 2010, pp. 264-269.
- [34] Trompeter, F. J., Neff, W. J., Franken, O., Heise, M., Neiger, M., Liu, S. and Pietsch, G. J., “Reduction of Bacillus Subtilis and Aspergillus Niger Spores Using Nonthermal Atmospheric Gas Discharges,” *IEEE Transaction on plasma science*, Vol. 30, 2002, pp. 1416-1423.
- [35] Uhm, H. S. and Lim, J. P., “Sterilization of Bacterial Endospores by an Atmospheric-pressure Argon Plasma Jet,” *APPLIED PHYSICS LETTERS*, Vol. 90, 2007, pp. 261-501.
- [36] Urashima, K. and Chang, J. S., “Removal of Volatile Organic Compounds from Air Streams and Industrial Flue Gases by Non-thermal Plasma Technology,” *IEEE Trans. On Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 7, 2000, pp. 602-614.
- [37] Wang, C. H., Wu, Y. and Li, G. F., “Inactivation of E. Coli with Plasma Generated by Bipolar Pulsed Discharge in a Three-phase Discharge Plasma Reactor,” *Journal of Electrostatics*, Vol. 66, 2008, pp. 71-78.
- [38] Yu, Q. S., Huang, C., Hsieh, F.H., Huff, H. and Duan, Y., “Bacterial Inactivation Using a Low-temperature Atmospheric Plasma Brush Sustained with Argon Gas,” *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 2006, pp. 211-219.
- [39] Yu, H., Perni, S., Shi, J. J., Wang, D. Z., Kong, M. J. and Shama, G., “Effects of Cell Surface Loading and Phase of Growth in Cold Atmospheric Gas Plasma Inactivation of Escherichia Coli K12,” *Journal of Applied Microbiology*, Vol. 101, 2006, pp. 1323-1330.
- [40] Yang, L., Chen, J., Gao, J. and Guo, Y., “Plasma Sterilization Using the RF Glow Discharge,” *Applied Surface Science*, Vol. 255, 2009, pp. 8960-8964.

