

大氣壓電漿技術在高分子產業的應用

Atmospheric Pressure Plasma Technology Applications for the Polymer Industry

張加強

Chia-Chiang Chang

大氣電漿技術已廣泛地應用在各種高分子材料相關的產業之中，本文特別集中舉例最新的應用趨勢之一，是應用在鞋業材料的表面處理；本文分成原理、應用的現況機會，與未來挑戰逐一分享，期能鼓勵優秀後進持續投入，更上層樓。

Atmospheric plasma technology has been widely used in various industries related to polymer materials. This article focuses on exemplifying one of the latest application trends, which is the surface treatment of materials in the shoe industry; this article is divided into principles, application opportunities, and future challenges are shared one by one, hoping to encourage outstanding new generations to continue to invest, and to reach the next level.

一、前言

論所有的科技應用，其實都可以從食、衣、住、行、育、樂，這六個面向為基礎來討論，也就是以「功能」的角度來看待科技的價值，但是現在已經是超越公元兩千年後的 21 年 (2021 年) 現代，人類應該已經學會用更多元的角度來看待科技，除了上述六個傳統面向之外，還會以交錯、跨界 (cross-over) 的方式來看新技術應用的「價值」。

大氣壓電漿相關的應用技術，其實過去 30 年來，已經有很多國內外學者專家已從各種面向，提供不少極具參考價值的文章與資料分享⁽¹⁻⁶⁾，本文就不再贅述；本文重點，而是選以對臺灣較具相關，且對世界有影響力的應用產業，來專文介紹。

大氣壓電漿技術應用在高分子材料工業的應用非常的多，其中鞋業的產值算是高分子工業裏的超級大宗，而全球前 10 大製鞋公司的排名中，臺灣的企業就佔據了前 5 大，可以說臺灣製鞋能力是全球第一名，因此在鞋業領域中任何的科技創新科技應用，對全球的高分子產業，臺灣是具有領頭羊的示範威力。因此，本篇專文欲向讀者介紹，臺灣的鞋業，如何領先全球，如何利用大氣壓電漿技術，又再度創造出世界第一的價值，鞋業絕對不是傳統產業，進而是結集先進的材料科技，先進智慧製造，以及醫材工程的專業能力產業。

鞋類產品屬於「行」的民生用途，這是上世紀過去習以製造業，代工「OEM」的思維來看的結果。但公元 2021 年的現代，早已更著重於「行」延伸出來有關的教「育」及「樂」趣的組合；比方全球知名運動鞋品牌 Nike，不僅強調專業比賽中的「行」，其精神標語：just do it 的積極教「育」更是經典，開創出許多驚人的鞋材科技，協助人類突破體能的極限；或者專業的登山鞋品牌 Timberland (大陸稱為踢不爛)，提供更安全可靠的登山「樂」趣，用高品質的製鞋技術，助人類挑戰巔峰…等等。而這些育、樂「價值」，往往帶來新技術更無上限的增值空間。

萬里始於足下，本篇文章想要引導讀者觀察的角度，從可以保護你珍貴的雙腳的鞋子開始，分享大氣壓電漿技術或設備，到底現在與未來，會扮演者什麼樣的角色？也引領對「時尚」產業前景有興趣的專家，在本文中可找到新的應用來發揮。

二、簡述電漿

什麼是電漿？本文先以口語簡易的方式來形容電漿，接著再用學術界標準的方式來說明，希望透過這樣的方式讓沒有接觸過電漿的讀者比較容易體會及瞭解。

電漿二字中文，表示自然界的物質，會有機會達到一種同時表現出帶有正電荷，以及帶有負電荷的複合狀態，肉眼看起來好像是一團發光的雲或像變成漿料的物質，其性質又有別於自然界中的固體、液體、氣體的三種狀態，因此我們稱為這種狀態為物質的第四種狀態，這種一團帶有電荷又會發光的特別狀態，中文稱為「電漿」。

什麼是電漿 (plasma)？plasma 英文這一詞，其實是一位美國科學家發明的。美國科學家爾文·蘭摩爾 (Irving Langmuir) 博士在 1928 年正式創造了「plasma」一詞⁽⁷⁾，現成為電漿在歐美各語言中的名稱。而蘭摩爾博士，則在 4 年後 (1932 年)，得到了諾貝爾化學獎。

其實更早之前就有人正式發現電漿的現象，在英國，發明真空陰極射線管的知名英國科學家威廉·克魯克斯爵士 (Sir William Crookes)，於 1879 年在他所研製的克魯克斯管 (Crookes tube，也就是陰極射線管) 中發現了電漿現象，他稱之為「發光物質」，也呼應了前面說的，好像是一團發光雲一樣。

簡單來說，當自然界的物質 (一般是氣體分子)，進入到會發光的狀態時，就是形成了電漿狀態 (當然這是不太標準的說法，但是讀者可以比較容易體會)，比方說太陽，就是宇宙裡面最大的電漿體，裏面是由氫與氦所組成。其實宇宙中所有的星星，都是恆星，都是處於電漿的狀態…。

其實電漿這個中文名稱，在中國大陸過去是習稱為「等離子」，但即便是大陸的物理學家們，也認為「電漿」這一詞要比「等離子」更洽當⁽⁸⁾，因此我們統一使用「電漿」來做為英文 plasma 的正式翻譯。

三、電漿的功能

那麼電漿狀態，到底有什麼核心特色而令人關注呢？它的特別就在於它的化學反應性特別的高，可以在非常微小的尺寸下 (一般是奈米級到原子尺寸等級)，有效發生化學反應作用。我們知道，所謂的化學「反應」，就是發生電子轉移的現象，也就是說，如果發生電子轉移的現象，就會產生所謂的化學反應。

由於電漿已經是一種處於電子、離子分開又結合 (所以才會產生光輻射) 的暫穩態現象，因此當電漿接觸到其它中性物質或者同樣其它物質的電漿狀態時，很容易就會發生彼此電子交換的現象，而產生化學反應。舉例來說，氧氣電漿，碰到以碳原子為主的高分子材料 (塑膠) 表面時，就很容易馬上與碳形成二氧化碳的氣態生成物 ($2O + C \rightarrow CO_2$)，而被抽氣帶離表面 (氧氣如果不是在電漿狀態，塑膠發生反應的速度是非常慢的)，這種電漿反應在工業界習稱為電漿蝕刻 (etching) 反應，可以用來對材料表面進行非常精密 (一般在奈米級) 的重新塑形，如圖 1 所示，圖 1 中的上半部 SEM 圖中，看到鞋子不同部位的不同材料 (upper 是指鞋面，在此為 PET 布料，midsole 是指鞋子的中底，此為 EVA (ethylene-vinyl acetate) 材料，outsole 是指鞋子的大底，此為橡膠。NBR (nitrile butadiene rubber) 橡膠經過空氣大氣壓電漿處理過後，表面形態已與原始的不同。圖 1 的下半部，則用 AFM 來做表面型態變化更仔細的比較，此為 PI (polyimide) 薄膜經過不同程度 (時間) 空氣大氣壓電漿表面處理之後，表面從原本相對平面的型態，逐漸出現均勻突起物的粗糙結構 (量測範圍為 1 - 1 μm)，顯示出空氣電漿處理對於表面粗度的影響，其實是表面被蝕刻的結果。

或者僅對材料表面的附著物，有著非常細微 (一般在奈米級) 的特殊破壞，如果這破壞發生在細菌或病毒身上，就變為殺菌或除病毒的作用，我們稱為電漿殺菌 (plasma sterilization) 應用。當然，電漿反應不只有蝕刻分解的功能，也可以有聚合合成的功能，產生很特殊的新的材料，稱為電漿聚合反應 (plasma polymerization)，或者稱為電漿鍍膜 (plasma coating)，這早已經廣泛的應用到現代的光電產業與產品之中，比如眼鏡鏡片表面上有鍍有一層或者多層的透光微奈米級的光學薄膜，來增加許多特殊的光學性質，比如透光度、抗藍光等；還有半導體晶片工業，裏面的超細微線路的關鍵里程碑，則是廣泛的同時利用到電漿的鍍膜與蝕刻技術。

四、大氣壓電漿技術的特色—安全與環保

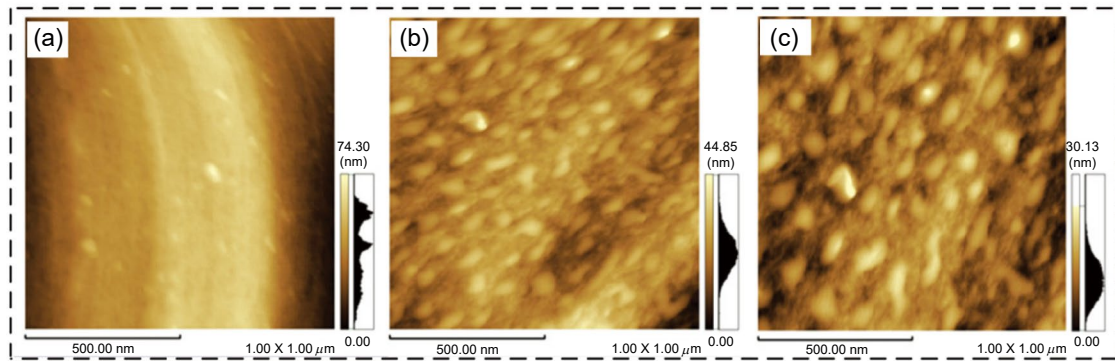
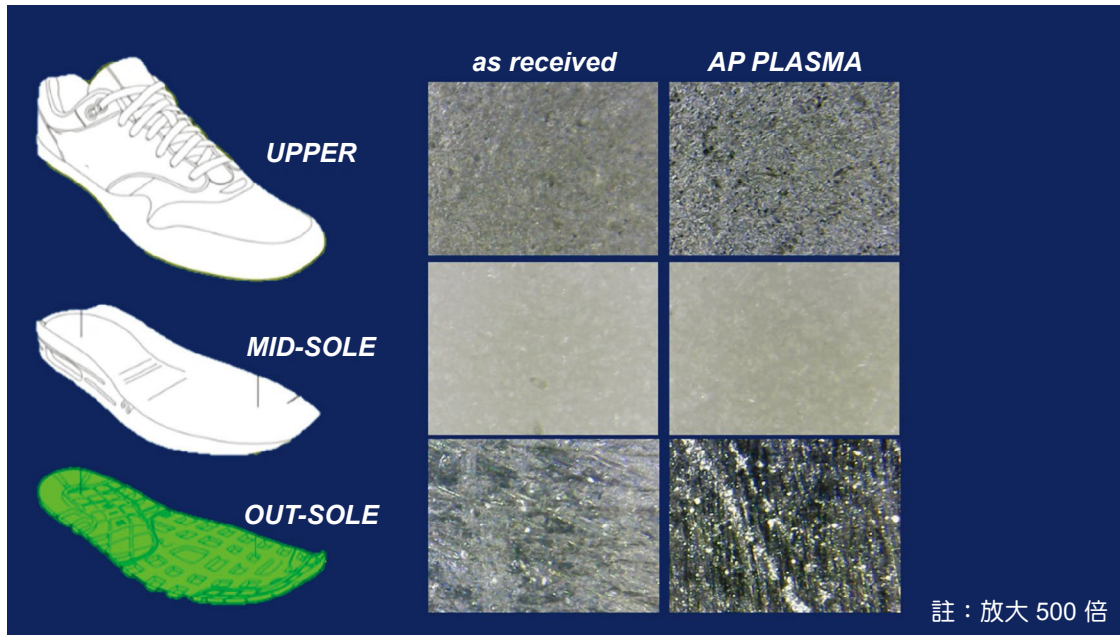
首先，當然就是不需要抽真空的環境是大氣壓電漿的第一個主要特色之一。

大氣壓電漿 (atmospheric pressure plasma, or atmospheric plasma) 這個名稱的出現，主要是為了與過去習知的真空電漿 (vacuum plasma, or low pressure plasma) 有所區別。大氣壓電漿我們業界習稱為 AP 電漿，真空電漿就習稱為 LP 電漿⁽¹⁰⁾。

參考圖 2 中，看到了產生電漿的基本裝置構造。一般所謂產生電漿的裝置，其實是一個產生氣體放電 (discharge) 現象的裝置⁽¹¹⁾，讓電子從一個電極表面，奔向另一個電極的過程，其中會與遇到的分子氣體產生各種交互作用 (能量轉移)，也會讓氣體受激而放電，而產生電漿的輝光現象。

而這個放電產生電漿的現象，有一個知名的簡易關係式，稱為 Paschen's law (為了紀念科學家 Dr. Paschen⁽¹²⁾)，說明者要產生氣體放電現象，其中所需要最小放電電壓 (v)，與產生放電現象的兩個電極之間的距離 (d)，與其中的氣壓關係 (p)。可以參考圖 3

這裡特別分享一下 AP plasma 與 LP plasma 的另一個本質差別。參考圖 3 的右側圖，如果同樣以空氣為主要產生電漿的氣體，以及電極間距同樣在一英吋的情況下，在大氣壓 (760 torr) 下的 AP plasma，產生氣體放電現象，所需要的電壓極大，理論上要要超過 3 萬伏特以上，而低壓 (0—1 torr 之間) 真空電漿 LP plasma，所需要的電壓約只要幾百伏特即可，這裡可看到產生大氣壓電漿的技術與裝置，理論上是比真空電漿難度要高，因為要安全的產



AFM photos of the samples under different treatment conditions:
 (a) Control; (b) Processed for 10 s; (c) Processed for 60 s.

圖 1. 上部藍色底：鞋材各部份被大氣壓電漿處理過後，SEM 表面形態產生明顯變化⁽⁹⁾，下半部：大氣壓電漿處理 PI 材料之後，用 AFM 觀察表面形態的變化⁽¹⁰⁾。

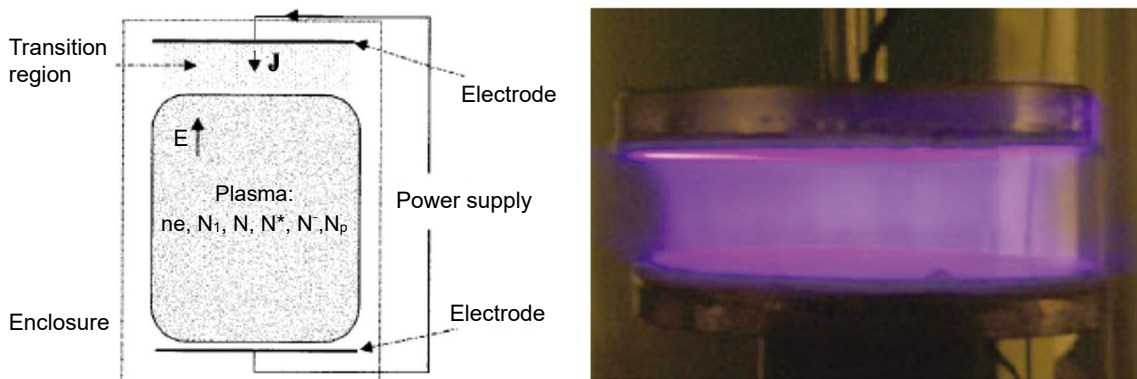


圖 2. 左圖是一個產生電漿的常見基本硬體結構。右圖是實際產生電漿的情況；這是在一個以透明的耐熱玻璃 (Pyrex glass) 為外罩，通入氬氣，導入適當的電壓，在兩個平行金屬板間產生均勻的氬氣電漿⁽¹²⁾。

生高電壓的技術，考量比較多，而且超高電壓的裝置，過去常用被在軍事裝備用途 (比如雷達)，實際發展限制較多，所以電漿技術被人類拿來應用的歷史上，是先以真空電漿技術為主 (從 1950 年代開始)，直到近二十年前，大氣壓電漿技術的各種突破，才開始有大量的應用出現。

$$V = F(pd)$$

Paschen's law

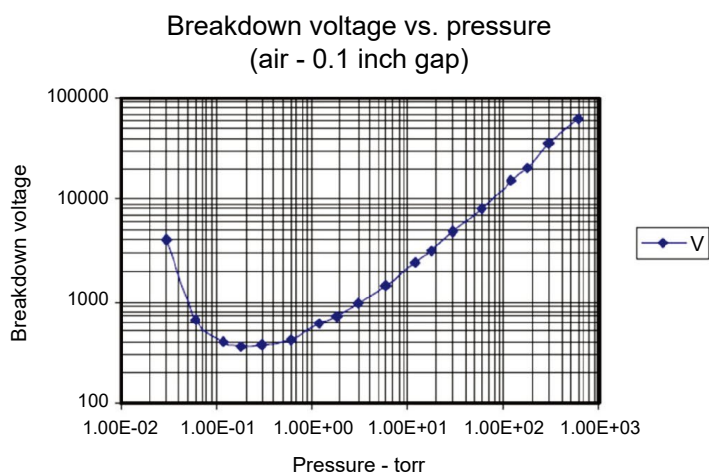
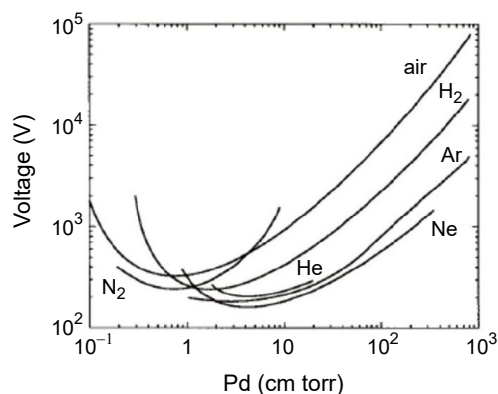


圖 3. 左圖為知名的 Paschen's law，分享了產生放電現象的電漿，所需要的最小電壓，與電極距離及氣壓有關。右圖為以空氣單獨為例的關係曲線⁽¹³⁾。

AP 電漿由於是在大氣壓環境下就可以產生電漿，一般不需要特製一個環境腔體，與需要一個特製的低壓真空腔體來產生的 LP 電漿也不同，因此 AP 電漿比 LP 電漿的應用的尺寸較無限制，或者是說，適合連續性生產需求的產業 (如帶狀生產的紡織，塑膠薄膜工業等…)，都是生產量極大的工業)，而 LP 電漿的應用，由於有一個環境真空腔體，基本上都是批次 (batch type) 量產的型態為主，比如電子零組件產品工業、高精密光學元件，以少量但價高的應用為主。

大氣壓電漿製程絕對環保與安全，這是大氣壓電漿技術的第二個特色。因為大氣壓電漿的製程，沒有被限制在額外的人造腔體內，因此，在利用 AP 電漿的過程中，所有的反應物必需都是安全，包含通入的原料或產生電漿的氣體 (如氮氣、氬氣等鈍性氣體為主)，以及產生的成品與副產物，都必需是無毒性的，否則在進行 AP 電漿的製程中就會造成危害。這也間接表示，大氣壓電漿製程的安全性，可以說是環保技術的代表。

綜合以上的特色，AP 電漿很容易的可以在碳基材上面，接枝 (grafting) 各種官能基 (functional group)，去產生更多新的功能，如圖 4 所示。而這些官能基，全部只需要來自於一般的空氣、氮氣、氬氣、氧氣、氫氣等所產生的電漿狀態就可以產生，不需要傳統溼式化學來反應來提供，十分的方便與環保。

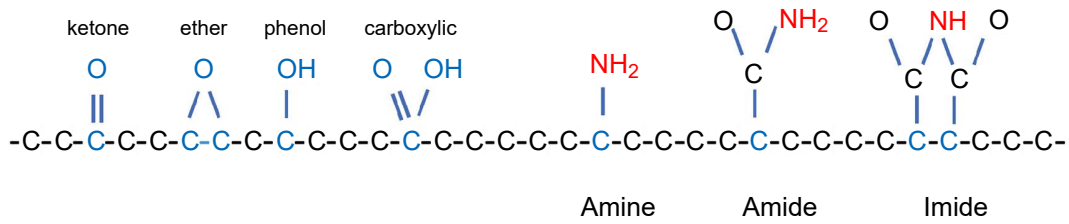


圖 4. 常見 AP 電漿可以產生的官能基⁽⁹⁾。

五、高分子產業的應用

電漿常見的應用面遍及許多民生業業，在高科技產業的應用中更為廣泛，尤其在鞋業的部分。鞋業是百年以上的工業，幾乎只要有人類的地方，就會有鞋子的需求。所以鞋子的需求數量，每年超過 240 億雙⁽¹³⁾，這是一個比全球手機製造數量 (目前一年需求大約 16 億支手機)，還要大 10 倍以上的產品，如圖 5 所示；且鞋子是一種耗材，在歐美國家，平均每人一年要買 7 雙鞋子 (推測這平均數大概是女性貢獻的比較多)，整體產值十分驚人…，因此產生了許多隱形富豪⁽¹⁴⁾，也就表示，如果可以在這個產業貢獻佔有一點點角色，那對全球的影響，將會十分的深遠。

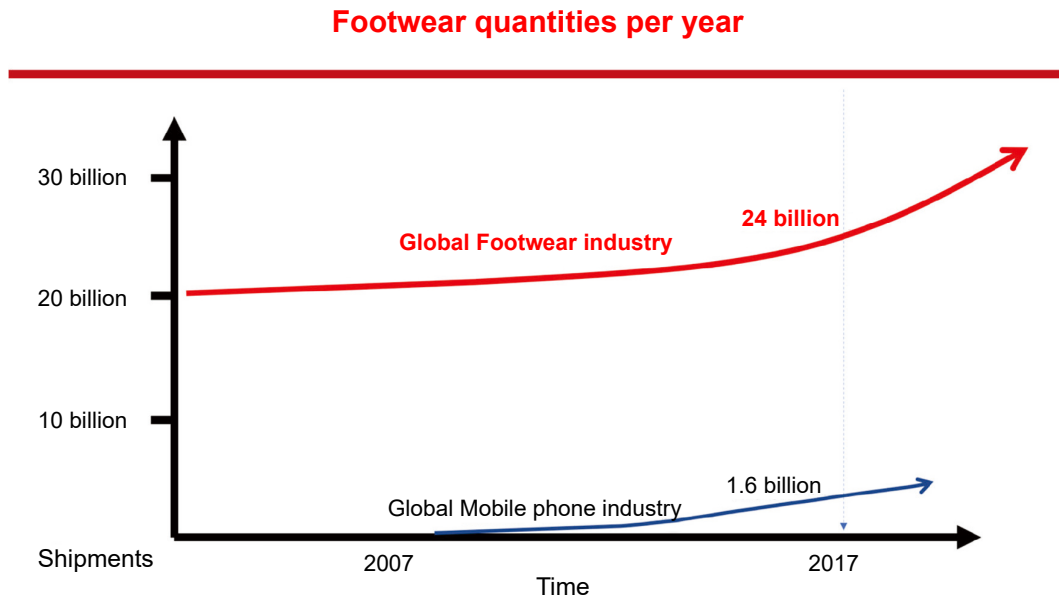


圖 5. 每年製鞋數量與手機數量之比較^{(14) (16-19)}。

如果可以在每年 240 億雙鞋子的製造環節中，利用科技的力量，在每一雙鞋上面，產生價值 1 元新台幣的變化…，比如每雙生產成本降低 1 元，或者提高 1 元的價值，那光這樣子來看，一年就至少有 240 億元新台幣的貢獻度了吧…。不敢說這市場價值有多高？但至少也不少了才是！

因此，如果以上的論點可以成立，我們可以如何切入？確實產生這 1 元的價值變化呢…？

這裡結論先告訴您，其實利用電漿科技的力量，產生的價值，不是 1 元，而是 2 元以上，單位不是新台幣，而是美金！所以產生的經濟價值項獻，是超過每年 480 億美元。那到底怎麼做呢？也許利用電漿技術中的 AP 電漿技術先進製造能力，可以辦的到。

六、製鞋的基礎

一雙常見的運動鞋 (sport shoe)，其主要的關鍵部份，就如同圖 6，分成鞋面，中底，以及大底這三部份，總共大約需要經歷 100 多個步驟，才得以完成。鞋子的製造，也像光電產業一樣，有分前段製程，以及後段製程。前段製程，主要與上述的鞋面，中底，大底這三個部份的材料、成型等加工有關；而後段的製造，主要就是把前段所備製好的材料，精細組合 (組裝) 起來的製程，這部份會使用到許多種類的膠水、處理藥水來貼合，也是目前所需人力最多的地方，品質最容易不穩定的所在，同時也是最容易產生污染的階段。因此過去臺灣的鞋業，為何從臺灣要遷移到中國大陸，越南，印尼，印度，甚至是非洲，除了人力的成本是原因之外，還有就是環境的考量。



圖 6. 運動鞋的主要結構 (紅色)，以及主要的工序製程 (藍色)^(9, 20)。

鞋業直接影響到的環境污染，首要就屬於空氣，因為鞋業貼合裏的強力膠水，含有大量的有機揮發物溶劑。2015 年美國 NASA 科學家分析全球主要的城市空氣品質，發現到目前令人聞風喪膽的霧霾 (smog)，霧霾的組成如圖 7 所示，其分布區域，竟然不是與工業區、或火力發電廠有關，而是會使用到大量有機揮發溶劑 (volatile organic compounds, VOCs) 的工業產品製造，與分布有關，鞋業就是裏面的最大宗，是產生霧霾的主因之一。這結果當然驚動到全球主要鞋業品牌，包含 Nike, Adidas 等全球巨型公司，不得不趕緊思考對策，因此開始禁用會用到有機溶劑的膠水 (adhesive) 等一切化學藥水，改用水性為主的膠水與處理劑 (primer)……但結果發現產生其副作用為貼合的性能變差，讓消費者買到鞋子後，鞋底開口笑的情況愈來愈嚴重，這一直深深困擾者製鞋與品牌業者，亟需找到新的替代方案……

有鑒於此，前面提到的大氣壓電漿技術與特色一節中，安全與環保是其特色，也就是不會使用有毒氣體，以及優秀的物理效果 (表面微粗化) 與化學效果 (官能基接枝) 特色，是最適合提供替代的環保技術來源之一。因此，我們從這裡出發，找到大氣壓電漿可以利用以及發揮的價值。

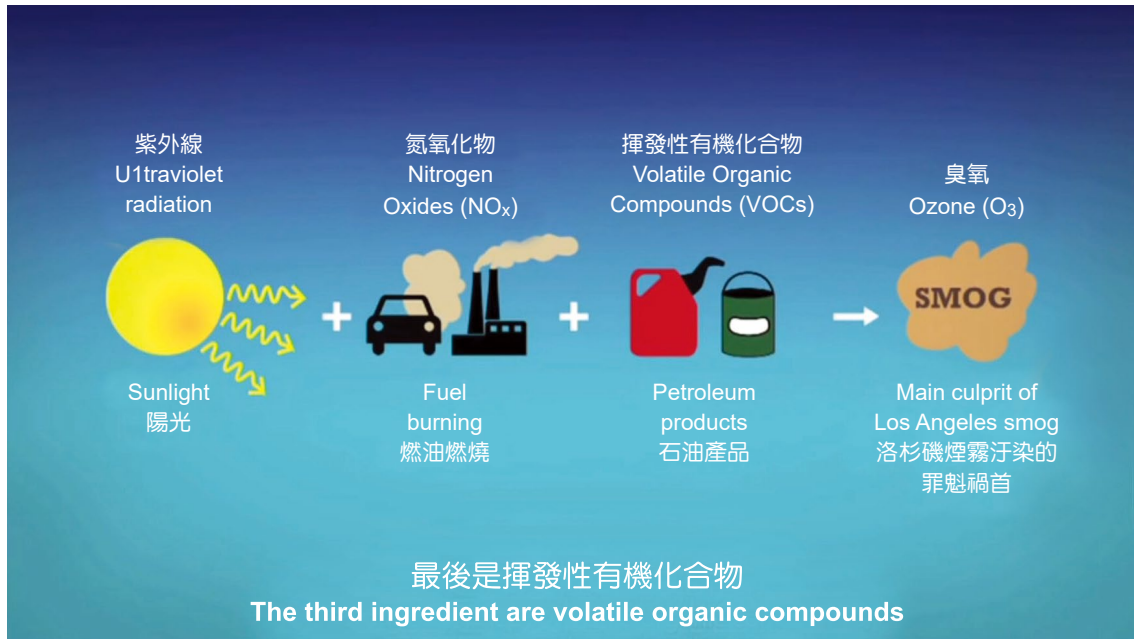


圖 7. 造造成霧霾 (SMOG) 的原因來自有機揮發物 VOCs⁽²¹⁾。

七、鞋業應用的現況

AP 電漿技術在高分子材料的應用，早在 1990 年代起，在最注重環保的歐盟，就已經開始有很多的相關研究與應用⁽¹⁵⁻¹⁸⁾，特別是歐洲的德國，最早開始把 AP 電漿技術，應用在汽車產業鏈上，處理的對象就是橡膠與金屬的貼合，因為汽車本身需大量的橡膠來吸震，也需要橡膠來作很多密封的保護。

對臺灣而言，我們有更強的製鞋材料工業，製鞋中的鞋底，也是使用到大量的橡膠，因此，在 2010 年之後，也開始有不少臺灣的製鞋大廠，配合國際品牌的鼓勵之下，相繼投入 AP 電漿技術的應用開發。

圖 8 與圖 9 中所示的製程變化，即為鞋業目前採用 AP 電漿應用的目的與優勢差異。參考圖 6 中所示的製鞋結構，目前 AP 電漿主要應用在中底 (midsole) 材料與大底材料 (outsole) 的處理上。

中底材料 (一般是發泡材料，比如 EVA (ethylene-vinyl acetate) 黏貼時，都需要用到有毒的處理劑 (primer) 與膠水，貼合強度才夠，但逐漸被國際禁止，因為會產生大量空氣污染 (產生 PM 2.5)。目前已經有開發出直接用空氣 AP 電漿處理取代處理劑的設備，因為原理如圖 4 所示，空氣 AP 電漿可以產生比化學鍵更豐富的官能基來與材料合，再結合全自動化機械人精準處理，貼合強度更高，品質更穩定，快速又環保。

大底材料 (一般是橡膠) 黏貼時，需要用到大量酸鹼洗 (washing) 以及先打磨處理 (buffing)，才能與膠水穩固結合，但產生很多廢水污染以及大量粉塵危害 (參考圖 9)，尤其是打磨作業，需要大量有經驗的員工，但長久操作打磨，手部都會產生僵直炎等職業傷害。在目前普遍缺工人與員工職傷訴訟頻繁的情況下，一直是頭痛的問題。

Benefit for customers

shoe assembly process is changing

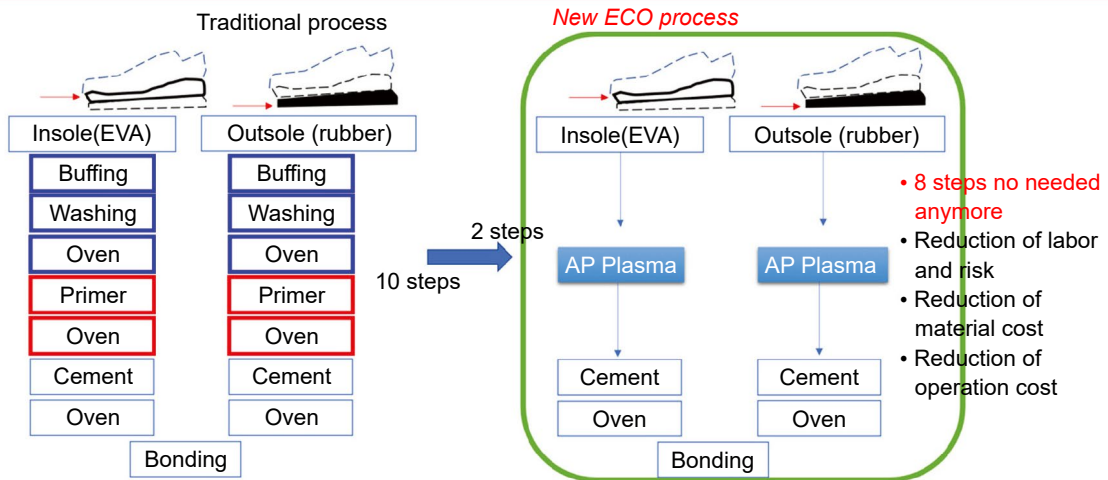


圖 8. 利用 AP 電漿的製程簡化，與傳統製程的差異⁽⁹⁾。

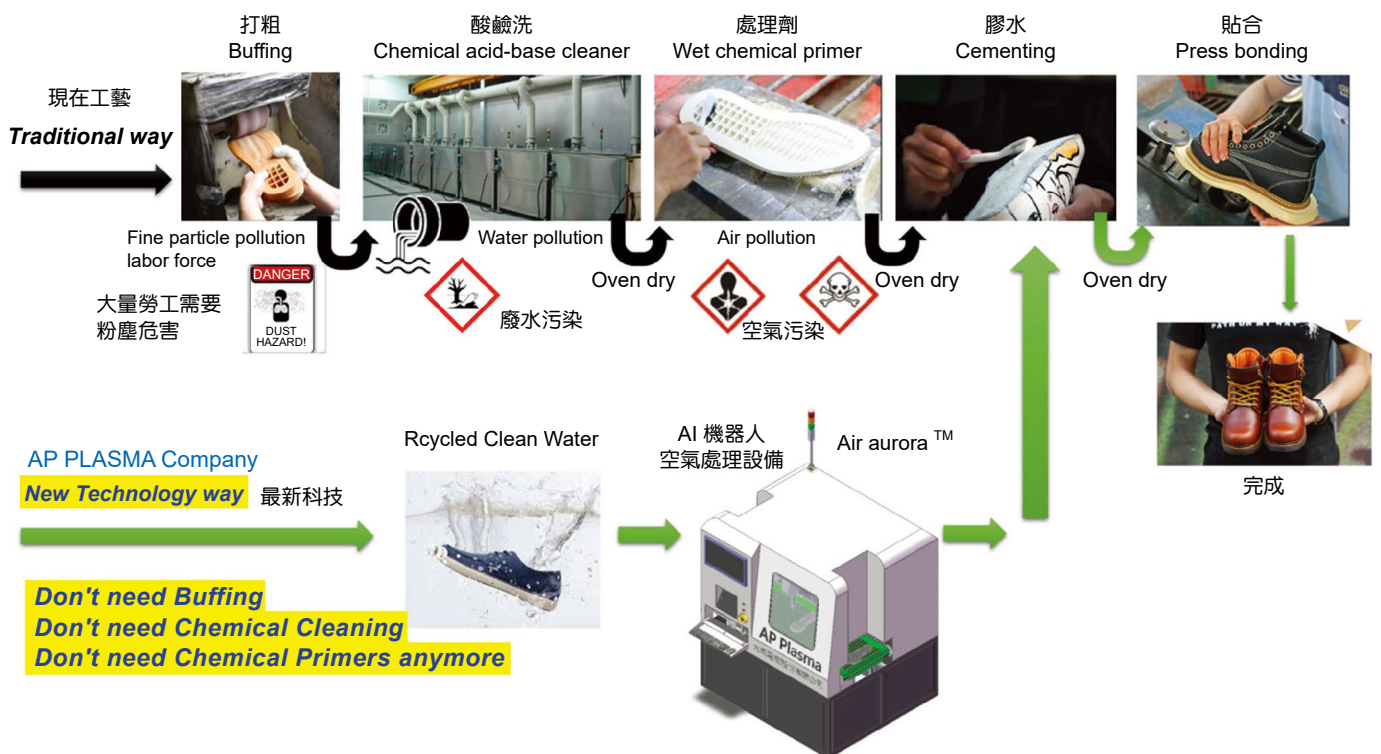


圖 9. 利用 AP 電漿的製程簡化，可以跳過傳統步驟中最污染的部分⁽⁹⁾。

目前已有開發出直接用空氣 AP 電漿處理取代打磨的設備，其原理就是如圖 1 的現況，大底材料碰到空氣電漿，就會自動的在表面產生微粗化的效果，產生的表面積比傳統機械打磨更大，而且沒有廢水處理與粉塵危害，再結合精密 AI 機器人作業，表面處理更均勻，更穩定，而且速度更快，全自動化作業，不需人員操作。

從圖 8 所示中，可以看到 AP 電漿應用到鞋業產生製程減化的重大變化，從原本兩個貼合的材料，在上膠水之前，共需要 10 個前處理的步驟，變成只需要 2 個步驟，直接少掉了 8 個不環保且耗能的步驟，而且對於鞋子的貼合品質反而變的更好，這也是讓許多的鞋廠驚訝不已的地方。(參考圖 12)

AP 電漿與鞋材處理時，有一個重要關鍵，就是製程溫度務必全程 60 度 C 以下，以免鞋材裡面的發泡劑再次發泡，造成尺寸變型。可是我們知道化學反應與溫度有正向的關係，因此如何保持在相對低溫製程，又可以快速有效的反應，考驗著電漿設備與製程專家的能力。如圖 10 所示。

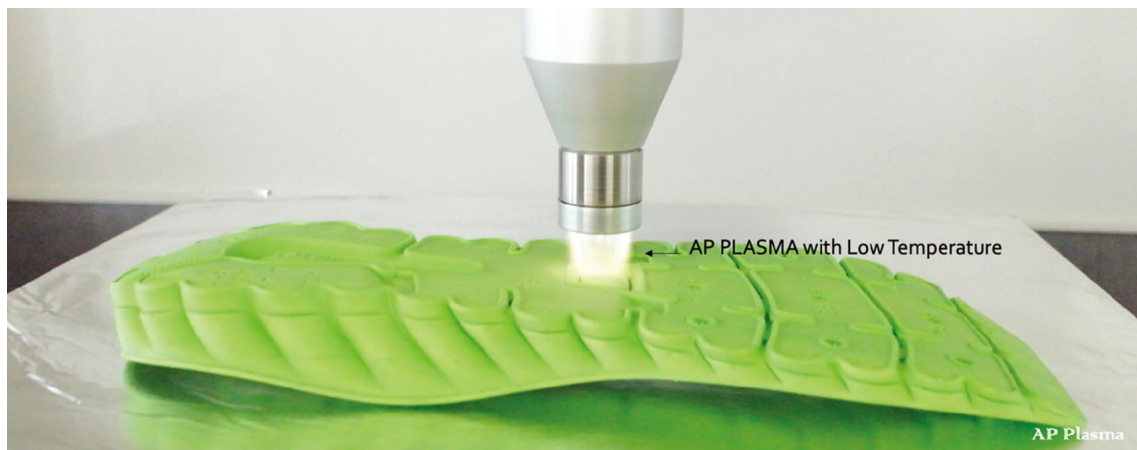


圖 10. AP 電漿設備處理中底鞋材 EVA 的情況^(9,20)。

由於鞋材的種類有上萬種以上，而且隨時都有新的材質開發出來，所以 AP 電漿處理過的鞋材料，都要經過拉力測試 (peeling test) 過關，才能確保是否可以應用到實際的量產上。(參考圖 11)



Bonding forces are stronger

All samples were done by Air aurora and water-base cement

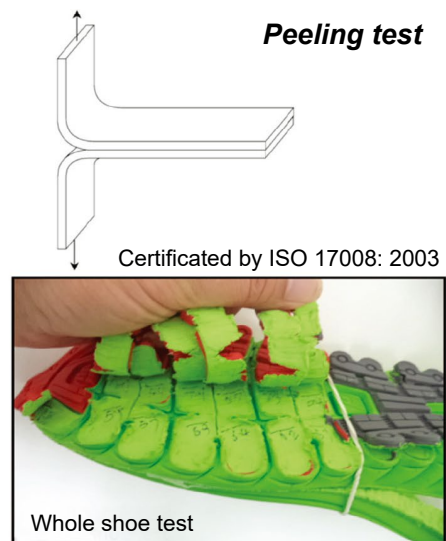


圖 11. 不同鞋材經過 AP 電漿處理之後貼合，拉力測試，全部通過^(9,20)。

目前鞋業接受的貼合拉力標準，一般會在 3 kgf/cm 以上，有些更嚴格，會要求 4 kgf/cm 以上。例如圖 12 中，不同的 PU 材料對貼，分別採用傳統的處理劑 (primer + PU) 以及 AP 電漿後理後 (AP + PU)，的拉力測試結果比較，可以發現 AP 電漿處理之後的材料，都比用傳統的方法，拉力數值高很多，原因是 AP 電漿是屬於奈米製程的反應，與鞋材接觸時可以同時產生更多奈米級的微粗化的物理效果 (如圖 1) 以及在上面接枝 (grafting) 更多有效的官能基 (如圖 4) 的化學效果，在物理化學效應雙管齊下，效果才會這麼明顯，這對於鞋業的品質要求，環保目的，與生產良率風險，都有很重要的意義。

剝離強度測試

Peeling speed 測試速度：100.000 mm/min

測試日期：09-05-2018
Pelling Force

測試編號	試件名稱	力量最大值 kgf	試件寬度 cm	剝離強度 kgf/cm	峰谷值平均值 kgf/cm
1	Primer + PU (A)	28.322	2.540	11.150	-
2	Aurora + PU (A)	30.047	2.540	11.829	-
3	Aurora + PU (A)	24.373	2.540	9.596	-
4	Primer + PU (A)	17.558	2.540	6.913	-

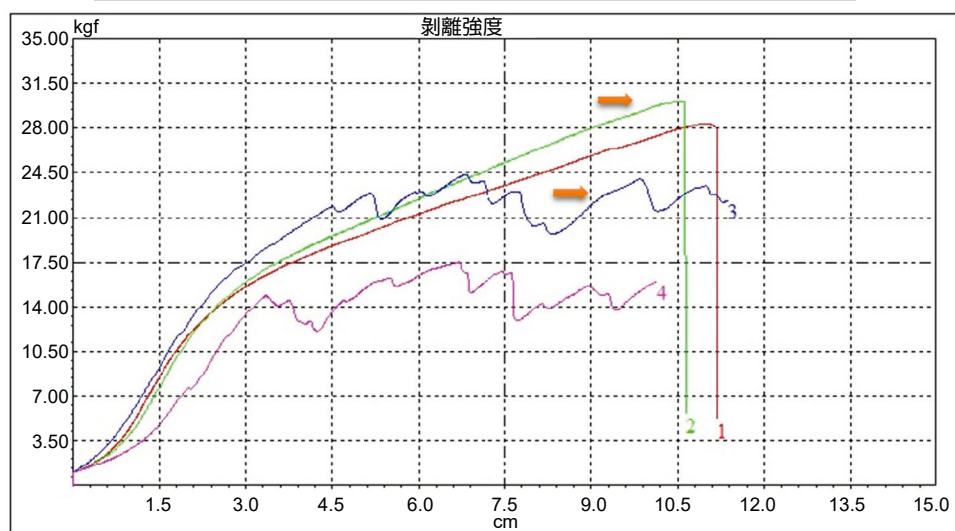


圖 12. 利用 AP 電漿處理，與傳統化學藥水 primer 處理的貼合力比較⁽⁹⁾。

不過由於早期鞋業領域的人才，對於電漿工程的特性並不熟悉，也缺乏專業的經驗，因此初期的應用上，應用到量產時，其實還面臨到不少挫折與挑戰，甚至還一度懷疑是不是太樂觀了⁽¹⁹⁻²⁰⁾。一直到 2017 年時，有更多材料與電漿工程經驗整合的人材與技術團隊加入⁽²¹⁾，才開始突破過去的瓶頸，真正實現大氣壓電漿技術取代傳統鞋業中的污染困擾，讓鞋業變成一個時尚又乾淨的產業⁽²²⁾。

八、發展與關鍵

目前歐美國家一線的品牌大廠，已經開始要把鞋業帶入自動化的世紀，強調投入產業的自動化與重要性，如圖 13 中為例，Nike 與 Adidas 甚至與過去電子業的自動化經驗大廠一起合作，期望加速收到成本降低，品質更穩定的效益⁽²³⁻²⁷⁾。

NIKE'S MANUFACTURING REVOLUTION ACCELERATED BY NEW PARTNERSHIP WITH FLEX

NIKE, Inc. announced today a partnership with Flex (Nasdaq: FLEX), a world-class global manufacturer, to accelerate NIKE's vision to bring advanced innovation to its manufacturing supply chain. Working together, NIKE and Flex will deliver footwear innovation that enables product to reach consumers more quickly, with customized solutions and increased performance innovation

NIKE has been actively developing new technologies to enhance its manufacturing business model for the past few years with investments in automation, modernization, sustainability, and innovative new methods of manufacturing such as Flyknit. The partnership with Flex advances this work by bringing new capabilities and expertise outside of the existing footwear industry to create future systems for making product and to catalyze innovation across NIKE's global supply chain

Advanced manufacturing

Adidas's high-tech factory brings production back to Germany

Making trainers with robots and 3D printers



Print edition | Business >
Jan 14th 2017



圖 13. 歐美鞋業兩大公司一直積極發展鞋業自動化生產技術⁽²⁹⁻³²⁾。

但是投入自動化之前，我們認為一個更重要的任務要先達成，就是完成開發環保製造技術的重要性。因為如果環保沒有先顧到，屆時投入自動化作業，反而會讓污染的行為更自動化而破壞力更強，對環境更具殺傷力；另外如果沒有先重新考慮利用新環保技術，來精簡原本的複雜的製程，例如圖 8 中所示那般簡化的突破，投入自動化只會讓複雜度更高，距理想中的自動化目標更遠。這是一個關鍵的課題。

慶幸的事，國內領先的製鞋代工業者們，早已先主動與 AP 電漿技術專家群合作，先解決環保的根本問題，才能進行實質有效的自動化生產⁽²²⁾，這樣思維下的行動，帶來兩個結果：一是臺灣的鞋業製造領先集團們，產線自動化程度已超過 50%，二是反應到實質的業績，業績持續暴漲，儘管 2020 年全球冠狀疫情來襲，但自動化程度越高的公司，更加速訂單的到位，因為唯有自動化才能減少員工受災情的影響。而自動化之所以有顯著成果，就是注意環保為首的先進製造技術，利用新科技，大氣壓電漿技術，讓製造更精簡，更有效率。

目前大氣壓電漿技術應用到鞋業還有一個重要的關鍵技術要確定，就是如何做即時線上的品質檢測。目前可以檢測大氣壓電漿處理材料程度方式，常見有四種。第一種常用水接觸角 (water contact angle, WCA) 量測前後的差異，二是用有變色能力的電漿貼紙來看前後處理顏色變化 (圖 14)，第三種是實驗室常用的傅立葉轉換紅外光譜 (Fourier-transform infrared spectroscopy, FTIR) 儀器看處理前後材料表面官能基的變化，第四種是用拉曼光譜儀器 (Raman spectroscopy) 來看分子結構處理前後的變化。

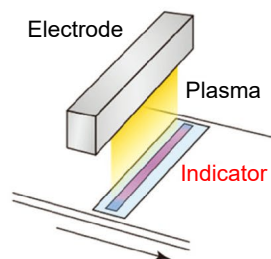
上述的四種品質檢測方式，都屬於接觸式量測，這在連續式生產上會有很多不便，僅有拉曼光譜儀器可以提供非接觸式的量測，但是量測時間又太久，同樣也不利於整合到快速的生產作業。因此，目前鞋業僅能夠採用抽檢的方式來確認品質，但我們希望未來可以整合自動化光學檢測系統以期達到 100% 全檢的目標，這樣才更有利於 AP 電漿技術與全自動化生產的結合，提升產業競爭力與附加產值。

For Normal-pressure Process/For Cleaning Process

By a newly developed organic colorant, radicals in atmospheric plasma can be checked.

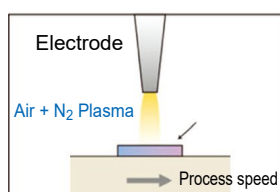
It is optimal for the check of large area treatments of atmospheric (normal-pressure) plasma process, PCB industry, FPD industry and surface modification in footwear materials.

It is applicable to UV / Ozone process



Color Changes by the Atmospheric Plasma of Various Scan Speed

2 sensitivity types are available



	Initial	300 mm/sec	100 mm/sec	60 mm/sec	40 mm/sec	25 mm/sec
High sensitive type for high-speed transport No.41						
Normal sensitive type for low-speed transport No.42						

PAT. P
High density radical atmospheric plasma equipment (air + N₂)

圖 14. 電漿濃度貼紙 (Plazmark, 日本櫻花公司, 台灣大氣壓電漿公司代理, <https://applasma.biz>)⁽⁹⁾。

九、挑戰與鼓勵

過去二十年來，臺灣的產業版圖，大部份習於在地域上西進，或變成現在政策所謂的南進，還好仍有些遠見的產業前輩，深知自己要長進才是王道，才是永續的根基，建構環保技術，才是未來。而大氣壓電漿技的選擇與應用，更是未來與全球合作或爭鋒第一的核心策略⁽²⁸⁾。大氣壓電漿技術一來對內是環保的代表，二來對外又可以讓臺灣產生很多國際合作機會。

鼓勵我國可以在主流媒體行業的助興之下，發掘臺灣更多應用環保技術的隱形冠軍產業，才能讓我國有志青年，有更多可以發揮的平台。有這些優秀的人才在我國的領域內加入，才能真正根留臺灣，把寶貴的精力，留下來建設臺灣，而不是在遙遠的海外。

再好的技術在臺灣發展，仍然要有機會貢獻到全世界才能真正把價值做大。鞋業的最大市場，仍然以歐美為首 (圖 15)。臺灣的時尚製鞋產業，早已領先全球，已先做好企業社會責任 (corporate social responsibility, CSR)，環境社會的公司治理 (environmental, social, governance, ESG) 的準備，目前正協以大氣壓電漿先進製造技術的能量，才可以讓這個產業更有趣，跑得更遠⁽²⁸⁾。

參考資料

1. F. Fanelli and F. Fracassi, *Surf. Coatings Technol.*, **322**, 174 (2017).
2. U. Cvelbar *et al.*, *Plasma Process. Polym.*, **16** (1), 1(2019).

GLOBAL FOOTWEAR MARKET GEOGRAPHICAL SEGMENTATION

Global Footwear Market By Geography 2016 (% share)

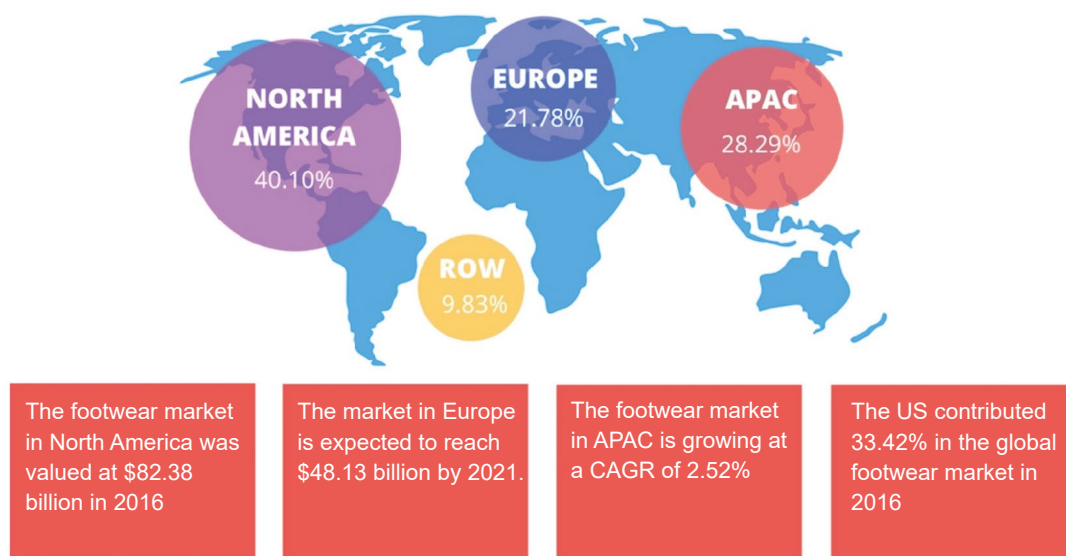


圖 15. 全球鞋業終端市場的分布，北美是世界最大的鞋業市場⁽¹⁶⁻¹⁹⁾。

3. S. Treatment and A. Bonding, "Surface Treatment of Materials for Adhesive Bonding" Elsevier, (2014).
4. D. Mariotti, T. Belmonte, J. Benedikt, T. Velusamy, G. Jain, and V. Švr ek, *Plasma Process. Polym.*, **13** (1), 70 (2016).
5. A. F. Al-rawaf and F. K. Fuliful, "Construction of Non-thermal Atmospheric Pressure Plasma System for Biomedical Applications" September, (2018).
6. 吳宗信, "週日閱讀科學大師/ 電漿-現代科技發展的隱形發動機," Youtube, 2014. Please refer to the web site: <https://youtu.be/-zH0u-9hi3o>.
7. I. Langmuir, "Oscillations in Ionized Gases" *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **14**, 627 (1928).
8. 曹則賢, 趙凱華, 林元章, *物理*, **35** (12), 1067 (2006).
9. "大氣電漿股份有限公司 AP PLASMA CORPORATION-AP PLASMA Corporation." [Accessed: 18-May-2021]. Please refer to the web site: <http://applasma.biz/index.html>.
10. M. Peng, L. Li, J. Xiong, K. Hua, S. Wang, and T. Shao, *Coatings*, **7** (8), 123 (2017).
11. Interreg, "Atmospheric and Low Pressure Plasma treatments: a comparison Outline," , 21, (2017).
12. 張加強, *科儀新知*, **32** (3), 58 (2010).
13. S. Y. Moon, W. Choe, and J. H. Moon, "Study on characteristics of filamentary and glow discharges generated at atmospheric dielectric barrier discharge" *IEEE International Conference on Plasma Science*, May 26-30, 142 (2002).
14. "2018年全球制鞋行業市場現狀及 2019 年發展趨勢分析 產業遷移路徑及消費市場分化明顯_行業研究報-前瞻網." Please refer to the web site: <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/190719-d8d3222e.html>. [Accessed: 18-May-2021].
15. "隱形富豪製造機 台中七期豪宅一半是他們的-今週刊." Please refer to the web site: <https://www.businesstoday.com.tw/article/category/80393/post/201504020035/隱形富豪製造機 台中七期豪宅一半是他們的>. [Accessed: 18-May-2021].
16. "Footwear Market Growth, Size, Share, Price Trends, Outlook 2021-2026." [Accessed: 29-Jun-2021]. Please refer to the web site: Available: <https://www.expertmarketresearch.com/reports/footwear-market>.
17. "Global Footwear Industry Analysis:2017-2030 (Edition 2021)." [Accessed: 29-Jun-2021]. Please refer to the web site: Available:<https://www.goldsteinresearch.com/report/footwear-industry-analysis-market-share-manufacturers-sales-statistics>.
18. "Footwear Market Research Reports & Footwear Industry Analysis | MarketResearch.com." [Accessed: 29-Jun-2021].

- Please refer to the web site: <https://www.marketresearch.com/Consumer-Goods-c1596/Consumer-Goods-Retailing-c80/Footwear-c126/>.
19. “Footwear Report 2020 | Statista.” Please refer to the web site: <https://www.statista.com/study/55485/footwear-report/>. [Accessed: 29-Jun-2021].
 20. “Just Using Air Flow As Adhesive For Footwear.” [Accessed: 02-Jun-2021]. Please refer to the web site: <https://contest.techbriefs.com/2016/entries/sustainable-technologies/7178>.
 21. “Air Quality A Tale of Three Cities” NASA, 2015. Please refer to the web site: <https://www.youtube.com/watch?v=W1pTIC2v6XM>.
 22. C. Lines, “Solving the Problem of Adhesion to Plastics & Rubber” pp. 1–4, (1930).
 23. S. M. Gubanski and B. Stenberg, “Hydrophobicity variations on plasma treated silicone rubber surfaces” *Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, 1995. Annu. Report., Conf.*, **475** (1995).
 24. D. Hegemann, H. Brunner, and C. Oehr, *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, **208** (1–4), 281 (2003).
 25. M. D. Romero-Sánchez and J. M. Martín-Martínez, *Int. J. Adhes. Adhes.*, **26** (5), 345 (2006).
 26. “愛迪達的機器人自動化實驗失敗，想遍佈全球生產的夢還要再緩緩” 財經新報, [Accessed: 14-Nov-2019.]. Please refer to the web site: <https://finance.technews.tw/2019/11/14/adidas-deploys-speedfactory-technology-at-asian-suppliers-by-end-of-2019/>
 27. “自動化宣告失敗：偉創力跟耐克合作的這家工廠關閉，損失超 2 億-每日頭條。” [Accessed: 18-May-2021]. Please refer to the web site: <https://kknews.cc/finance/vv14o3y.html>.
 28. A. P. Corporation, “National winner” Energy Globe Award, 2020. [Accessed: 17-May-2021]. Please refer to the web site: <https://www.energyglobe.info/national/winner/taiwan>.
 29. M. Bain, “Adidas built a highly efficient ‘Speedfactory’ to make its shoes – Quartz” Quartz, 2018. Please refer to the web site: <https://classic.qz.com/perfect-company-2/1145012/a-german-company-built-a-speedfactory-to-produce-sneakers-in-the-most-efficient-way/>. [Accessed: 14-May-2021].
 30. “Nike’s Manufacturing Revolution Accelerated by New Partnership with Flex” *Nike new*, [Accessed: 14-Oct-2015]. Please refer to the web site: <https://news.nike.com/news/nike-s-manufacturing-revolution-accelerated-by-new-partnership-with-flex>
 31. “Nike’s focus on robotics threatens Asia’s low-cost workforce | Financial Times.” [Accessed: 29-Jun-2021]. Please refer to the web site: <https://www.ft.com/content/585866fc-a841-11e7-ab55-27219df83c97>.
 32. “Flex - NIKE’s Manufacturing Revolution Accelerated by New Partnership with Flex.” [Accessed: 29-Jun-2021]. Please refer to the web site: <https://investors.flex.com/company-news/press-release-details/2015/NIKEs-Manufacturing-Revolution-Accelerated-by-New-Partnership-with-Flex/default.aspx>.
 33. “Nike’s Manufacturing Revolution Accelerated by New Partnership with Flex,” *Nike new*, [Accessed: 14-Oct-2015]. Please refer to the web site: <https://news.nike.com/news/nike-s-manufacturing-revolution-accelerated-by-new-partnership-with-flex>
 34. M. Bain, “Adidas-A German company built a ‘Speedfactory’ to produce sneakers in the most efficient way.” Please refer to the web site: <https://classic.qz.com/perfect-company-2/1145012/a-german-company-built-a-speedfactory-to-produce-sneakers-in-the-most-efficient-way/>. [Accessed: 14-May-2021].
 35. J. Bissell-Linsk, “Nike’s focus on robotics threatens Asia’s low-cost workforce” *Financial Times*, New York, [Accessed: 22-Oct-2017]. Please refer to the web site: <https://www.ft.com/content/585866fc-a841-11e7-ab55-27219df83c97>
 36. Flex, “The Future of Making – Our NIKE Partnership.” Please refer to the web site: https://s21.q4cdn.com/490720384/files/doc_events/2018/AnalystDay/MikeDennison-2018InvestorDay-Flex.pdf.

作者簡介

張加強先生為日本東京大學工學博士，現為大氣電漿股份有限公司董事長。

Chia-Chiang Chang received his Ph.D. in Electrical Engineering from University of Tokyo in Japan. He is currently a Chairman in AP PLASMA Co., Ltd..