

以 O₂ 電漿進行高分子表面改質之研究

揭由志

摘要

本研究主要是利用 13.56 MHz 之射頻(RF)氧電漿對二種市售高分子基材，聚對苯二甲酸乙稀酯(PET)及聚碳酸酯(PC)進行表面改質，以改變電漿功率及處理時間的方式來觀察高分子基材表面性質的變化，也期望能藉此改善高分子基材與金屬鍍膜間之附著性。改質前後之高分子基材以水接觸角之量測觀察其親水性之變化，以原子力顯微鏡(AFM)觀察表面粗糙度及形貌的改變，而基材表面官能基的變化則是利用 X 光光電子能譜儀(XPS)進行鑑定。高分子基材經不同功率之氧電漿處理後，水接觸角有明顯降低之趨勢，顯示經氧電漿處理後之高分子表面親水性增加，而表面粗糙度則隨電漿能量之增加而上升。高分子基材表面經電漿處理後，含氧之極性官能基(C-O 及 C=O)比率有明顯的改變。另外，鍍著於改質後高分子基材上之金屬膜具有較低之片電阻，而金屬鍍膜與高分子基材之附著性亦有非常顯著的提升。

關鍵詞：高分子基材、氧電漿、表面改質、接觸角、附著性。

Polymer surface modification by O₂ plasma

Yu-Chih Chieh

Abstract

In this study, 13.56 MHz radio frequency O₂ plasma were employed to modify the surface of two commercial polymer substrates, polyethylene terephthalate (PET) and polycarbonate (PC). Plasma powers and treatment times were varied to investigate the influences on the surface properties of the substrates. Adhesion between polymer substrates and coated metal films also expected to be improved after plasma treatment. Water contact angle measurements were employed to investigate the hydrophilicity of polymer substrates. Atomic force microscopy (AFM) was used to observe the surface roughness and morphology of the substrates. The changes of chemical components of the substrate surface were characterized by X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The water contact angles of the substrates remarkably decreased indicating the hydrophilicity of polymer surface increased when undergone different powers of O₂ plasma. Surface roughness also ascended apparently as the plasma energies increased. The components of polar oxygen functional groups (C-O and C=O) of polymer surface also altered after O₂ plasma treatment. Moreover, metal films that coated on plasma modified substrate surfaces exhibited lower sheet resistance. Adhesion between polymer substrates and metal films also improved noticeably after O₂ plasma treatment.

Keywords: polymer substrates, O₂ plasma, surface modification, contact angle, adhesion.

壹、前言

在聚合物材料中，聚對苯二甲酸乙稀酯(polyethylene terephthalate, PET)以及聚碳酸酯(polycarbonate, PC)在一般日常生活用品到各種工業及醫療用途，以至於目前光電半導體產業都佔有非常重要的角色，是被廣泛使用且具相當重要性的高分子基材。PET 及 PC 均具有良好的機械強度及耐衝擊性，對一般的酸鹼液具有良好的抵抗性，因 PC 之玻璃轉移溫度(T_g=150°C)較 PET (T_g=70°C)要高，耐熱性較佳使用溫度亦較廣。PC 具有良好的透光性，經常使用在各種光學產品如鏡片、鏡頭、以及光碟片基材，而 PET 則具有非常優異的阻氣性，由於此兩種基材近年應用於可撓型液晶平面顯示器用基材[1,2]而更加受到重視。

由於大部分高分子基材表面之親水性不佳，所以在應用上常遇到一些如：濕潤性、著色性、生物相容性、抗靜電性、與異質材料間之接著性等問題[3]，所以高分子基材之表面改質近年成為熱門的研究課題，傳統方法中有以機械研磨、火焰處理，或以強酸或強鹼等濕式化學方式進行改質，以增進其表面特性及與異質基材間的接著性[4]，但此些方法在設備成本及製程上仍有不少缺點。雖然近年來亦有以其他如 UV 照射、雷射等改質方法已陸續被發表，但電漿改質卻是現今被學術

及工業界高度重視的方法[5-8]。電漿為氣體在高電場中所解離而形成之第四態物質，其中包含高能電子、原子、離子、自由基及激發態的分子，當高分子基材處於電漿的環境中，這些高反應性的電漿粒子會改變基材表面的化學性質及形貌，進而達到表面改質的目的[4]。由於電漿僅會改變表面特性而且不會影響到內部性質，而且可以同時改變表面的化學性質以及形貌，所以電漿已被廣泛應用在高分子材料之表面改質，以改進其表面能、光學反射性、生物相容性，以及對其他材料之接著性[9,10]。

Lai 等人[3]及 Cheng 等人[11]以不同之電漿處理高分子基材表面後，發現水接觸角(Water contact angle)均明顯降低，表示其親水性提昇，而以 XPS 檢測經電漿改質之高分子基材表面後，發現含氧的官能基(-C-OH, C-O, C=O 等)均明顯增加，而 Lai [3]認為這些含氧官能基是基材表面親水性增加之主要原因，而 C=O 官能基則是其中關鍵的因素。另一方面，有許多金屬與高分子基材間的附著性改善之方法，但是以電漿改質之方法最受人重視，Bou 等人[12]將鋁膜於 PET 基材上，提出有效增加基材表面之 C-O 官能基，可與 Al 形成 Al-O-C(PET)，故可提高薄膜與基材之附著性。Silvain 等人[13]亦提出以氬離子打斷 PET 基材 C=O 鍵結以增

加 C-O 鍵結後，可增加 PET 與鋁膜間之附著性。Le 等人[14]採用 RF 13.56 MHz 分別以 O₂ 電漿及 CO₂ 電漿對 PET 基材進行表面前處理，提出氧電漿處理之基材對鋁膜之附著性較好，主要原因是因為氧電漿有較高之化學活性，可有效的增加含氧之官能基，且可更有效率達到表面粗化的效果，進而增加與薄膜之附著性。

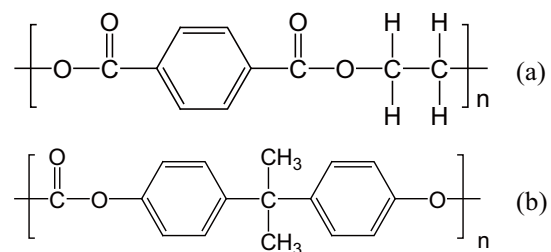
貳、實驗方法

首先，將二種市售之高分子薄板，PET 及 PC(分子結構如圖一所示)，裁切成 1.7 公分×1.7 公分之試片，將二種試片均浸入脫脂清洗液中再置入超音波震盪槽進行清洗 10 分鐘，將試片取出後以去離子水(18 kΩ-cm)將表面沖洗乾淨，再以壓縮空氣吹除塑膠表面之水分，即完成清洗動作。接著，將清洗後之高分子試片置入電漿輔助化學氣相沉積系統(Plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)腔體內，使用 13.56 MHz 之 RF 電漿源，通入 50 sccm 之氧氣，工作壓力控制在 0.200 torr，以不同功率之氧氣電漿(100W、200W、300W)對高分子試片分別進行 1、5、10 及 20 分鐘之表面處理。

經電漿處理後之高分子試片，利用影像式接觸角量測儀(Dynamic Contact Angle Analyzer FTA200)量測去離子水在各試片表面之接觸角，量測前先進行去離子水表面張力之校正，將各試片所量測出

之接觸角亦換算成表面張力(Surface tension)以進行比較。高分子試片表面形貌與粗糙度以原子力顯微鏡(AFM, Veeco / DI Tapping mode TM)進行量測，量測範圍為 15 μm × 15 μm，Z 軸固定為 500 nm。使用 X 光光電子能譜儀(XPS, Physical Electronic ESCA PHI1600)進行電漿處理後高分子試片表面之化學組態分析，其 X 光激發源為 Al Kα($h\nu = 1486.6$ eV)，濺射槍能量為 3 kV 的氬離子槍，起飛角(take-off angle)固定為 45°。

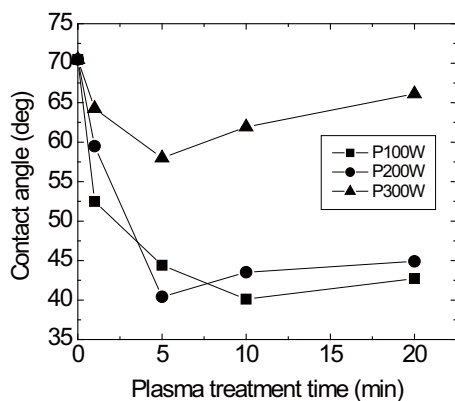
另一方面，以直流磁控濺鍍系統(DC magnetron sputtering)，靶材為純度 99.99% 鋁靶及鈦靶，靶材與基板距離約 120 mm，以 2000W 之功率，於常溫下對電漿改質後之高分子試片進行 5 min 之鋁膜及 20 min 之鈦膜鍍著。將鍍著鋁膜後的 PET 試片以 ASTM D3359 之標準(百格法)進行鋁膜附著性檢測，而鍍著鈦膜之 PC 試片則以四點探針量測鈦膜之片電阻之變化。



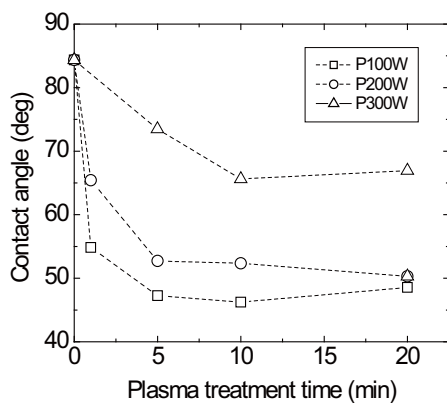
圖一、(a)PET 以及(b)PC 重複單元之分子結構

參、結果與討論

一、高分子基材電漿改質前後水接觸角之分析



圖二、PET 基材經不同功率氧電漿處理後，接觸角隨處理時間之變化



圖三、PC 基材經不同功率氧電漿處理後，接觸角隨處理時間之變化

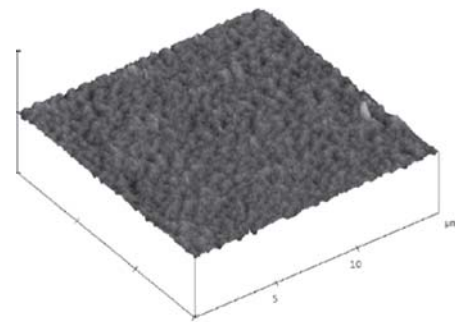
圖二及圖三分別為 PET 及 PC 二種高分子基材經 100W, 200W, 及 300W 氧電漿以不同時間處理後表面張力之變化。由圖中可看出二種高分子基材經氧電漿處理後水接觸角皆明顯降低，但以 100W 及 200W 處理後降低的幅度較大。

水接觸角可代表材料表面之濕潤性以及作為親水性(hydrophilicity)或疏水性(hydrophobicity)之指標，接觸角越低代表濕潤性越佳亦表示親水性越高。材料表面所測得之接觸角越小，表示材料內聚能越大，其表面張力也越大。高分子材料之接觸角與其化學結構有密切關係，一般而言，材料表面若含有如-OH, -C=O, -COO-, -OOH, -COOH, -NH₂, 與 NH 等含氧及含氮之極性(polar)官能基，會使得親水性較佳[15,16]；而苯環及脂肪族之碳氫官能基或鏈均屬於非極性(non-polar)基，所表現出來的為疏水性。由圖二及圖三中可看出未經電漿處理之原始 PC 所測得之接觸角(84.4°)比 PET 所測得的(70.5°)明顯要高，表示 PC 之疏水性比 PET 要強，由圖一(a)及(b)所列出 PET 及 PC 重複單元(Repeat unit)之分子結構圖中，可觀察到二者雖然皆具有苯環結構，但是 PC 單位結構中之 C-C 鍵結數為 16，C-H 鍵結數為 20，而 PET 單位結構中之 C-C 鍵結數為 9，C-H 鍵結數為 8，明顯看出 PC 之疏水基之比率要比 PET 高許多，這可以解釋為何原始 PC 之接觸角要比 PET 大的原因。由圖二及圖三可看出 PET 及 PC 經 100W 及 200W 氧電漿處理後，接觸角隨處理時間變化呈現的趨勢一致，當處理 5 min 後接觸角已大幅下降，PET 由原始 70° 降至 40°-45°，PC 由原始 84° 降至

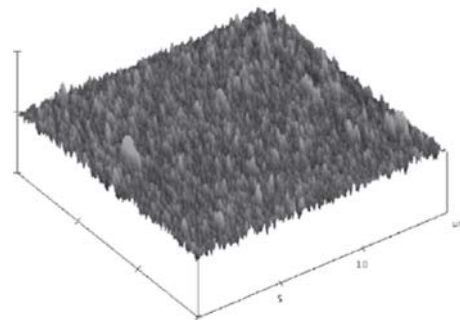
45°-55°之間，表示經此二種功率之氧電漿處理後，PET 及 PC 表面之親水性明顯增加，但處理時間增加其接觸角並未再明顯下降。以 300W 氧電漿處理後 PET 之接觸角下降幅度較小，在 5min 處理後所降低的程度最大，而處理時間增長後其接觸角反而上升。在 PC 方面亦呈現經 300W 電漿處理後接觸角下降的幅度較小的現象。

二、高分子基材電漿改質後表面粗糙度之分析

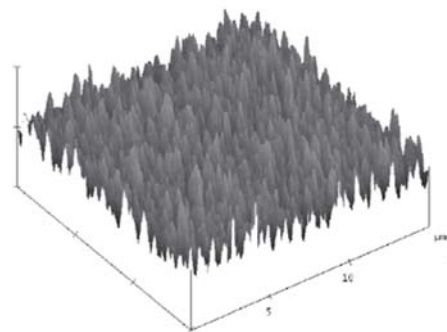
圖四為(a)未以氧電漿處理之原始 PET 及經(b)200W 5min 與(c)300W 20 min 之氧電漿處理後，由 AFM 所測得之表面形貌及(d)經換算所得表面粗糙度之變化。未施加氧電漿處理之 PET 表面呈現較平滑及具有細小顆粒之形貌，而經 200W 氧電漿處理 5 min 後，表面開始出現許多明顯且緻密之小錐狀突起物，造成表面變得比較不平整，在經 300W 20 min 之處理後，表面呈現高低起伏極大有如從上空俯看針葉林之型貌，顯示表面粗糙度大幅增加。由圖四(d)可發現 PET 表面粗糙度與氧電漿處理總能量呈現正比之關係，經 300W 氧電漿處理 30 min 後之 PET 表面粗糙度則大幅上升至原始 PET 約 7 倍之程度。



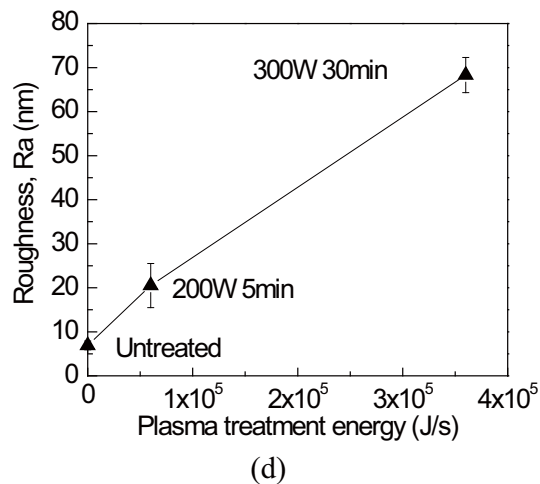
(a)



(b)



(c)



圖四、(a)原始 PET 以及經(b)200W 5min(c)300W 30min 氧電漿處理後 AFM 之表面形貌及(d)表面粗糙度之變化

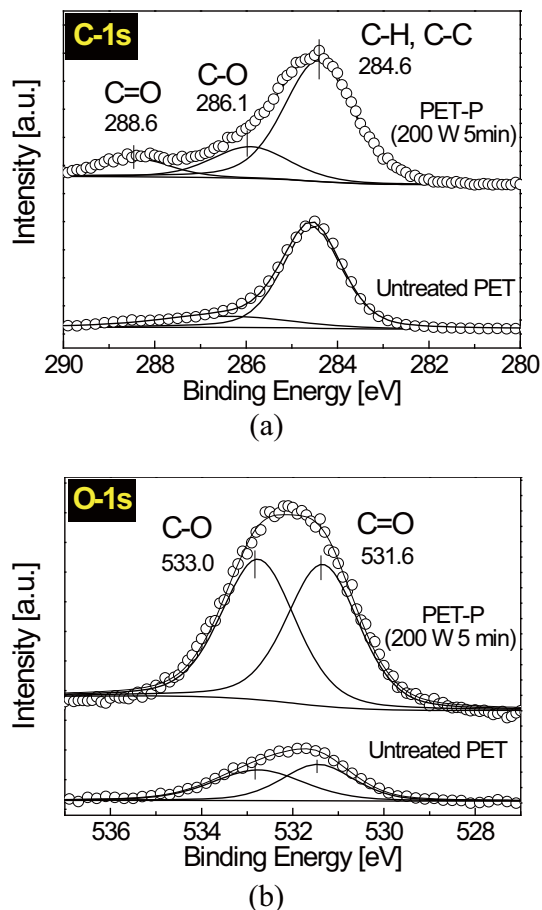
Amanatides 等人中[17]提到高分子基材表面經氧電漿之處理後會產生下列現象(1).氧電漿中產生之 O*及 O²⁺高能活性氧會使得高分子表面產生斷鍵(bonds broken)、再結合(recombination)以及重組(rearrangement)等反應，而高能氧與產生的片段(fragment)及末端基(end group)反應產生如-OH, -C-O, 或-C=O 等含氧的官能基，使得表面之極性增加，同時也可能造成部分結晶的現象。(2).電漿之高能量使得高分子表面的分子鏈有足夠動能產生移動，而增加對氧原子或氧離子之吸收，這些高能氧離子會使表面產生化學蝕刻(chemical etching)或是使分子鏈產生接枝(grafting)的現象，而 O²⁺的存在則是造

成此現象最主要的因素。此化學蝕刻現象可分為水平及垂直兩方向，而垂直方向之蝕刻是造成表面粗糙度增加之主要原因。

綜合參考文獻所提出的機構以及本研究接觸角與 AFM 粗糙度量測之結果後，發現 PET 及 PC 經 100W 及 200W 電漿處理 5 min 後，所量測之接觸角即大幅降低，顯示以此條件處理後已可明顯提升此兩種高分子基材表面之親水性，而若增加電漿處理時間，接觸角並未明顯改變，Lai 等人[3]曾提到可能因為表面斷鍵及化學蝕刻造成破壞之程度，而與親水性官能基增加產生相互抵銷造成表面親水性趨於一平衡狀態而使得接觸角變化不明顯，但處理時間增長亦會增加表面之粗糙度。如前所述由圖二所發現 PET 經 300W 氧電漿處理 10 min 以上接觸角有不降反升之現象，對照圖四(c)經 300W 20min 氧電漿處理後之 PET 表面形貌及所量測所得之粗糙度，不難看出高能電漿已將 PET 表面破壞，使得表面變得非常粗糙，而 Le 等人[14]也提出過高的電漿功率或處理時間會造成基材表面的劣化，使得表面親水性反而降低，而此過於粗糙的表面亦可能對後續鍍著於其上的金屬膜造成不良的影響。此外，由圖二及圖三之結果發現高分子基材經電漿處理後，表面親水性的改變並非僅取決於總電漿能量，而也與起始電漿的功率有關，300W 的氧電漿無

論處理時間長短，均無法達到 100W 或 200W 將高分子基材表面增加親水性的效果，此可能是電漿功率太高會大幅增加化學蝕刻的效應，使得表面粗糙度在短時間內大幅提升之緣故。

三、高分子基材電漿改質後表面 XPS 之分析



圖五、未處理之原始 PET 與經 200W 5min 氧電漿處理後(PET-P)之(a)C-1s XPS 能譜圖(b)O-1s XPS 能譜圖

將未經處理之原始 PET 與經 200W 氧電漿處理 5 min 之 PET 進行 C-1s 與 O-1s 之 X 光光電子能譜測試，結果分別如圖五(a)及(b)所示。原始 PET 之 C-1s 能譜圖(圖五 a)中並僅發現微弱的 C-O(288.6 eV)及 C=O(286.1 eV)之特徵訊號峰，而 C-H 及 C-C(284.6 eV)之能峰強度則很高，研判可能是表面吸附污染物造成 C-H 及 C-C 訊號過強造成遮蔽效應所致，但從圖五(b)之 O-1s 能譜圖中則可看出明顯的 C-O(533.0 eV)及 C=O(531.6 eV)之訊號能峰。經 200W 氧電漿處理 5 min 後之 PET 表面，C-1s 能譜圖中出現較明顯的 C-O 及 C=O 訊號，而 O-1s 之能譜圖中 C-O 及 C=O 訊號強度亦比未處理前要增加許多，此結果表示 PET 經 200W 氧電漿進行 5 min 表面改質後，極性官能基有明顯增加的現象。

將圖五(a)及(b)各能峰積分後求得之面積列於表一，由表中 C-1s 之結果可看出經氧電漿處理後，PET 之 C-O 及 C=O 能峰面積之總和增加了約一倍(處理前：19.6%，處理後：38.9%)，而由 O-1s 之結果則可發現 C-O 比例略為增加，此原因推測是因為表面經電漿轟擊產生斷鏈，而在高能氧的環境中，氧進而與其反應生成新的鏈所致。Lai 等人[3]指出 C-O 及 C=O 的含量增加是表面親水性增加之關鍵原因，由於 C=O 官能基之親水性要較 C-O

要強，所以 C=O 對親水性增加的貢獻要比 C-O 要大。此 XPS 能譜鑑定結果與前述之接觸角測試結果一致，亦能解釋接觸角大幅下降的現象。

表一、由原始 PET 與經 200W 5min 氧電漿處理後(PET-P)之 C-1s 及 O-1s XPS 能譜圖(圖五 a, b)中所求出各能峰之積分面積及其相互之比例關係

Binding energy(eV)	functional groups	Ratio(%)	
		Original PET	200W, 5min
C-1s	288.6	0.8	13.6
	286.1	18.8	25.3
	284.6	80.4	61.1
O-1s	533.0	53.8	54.8
	531.6	46.2	45.2

四、改質前後高分子基材鍍著金屬膜後之附著性及片電阻分析

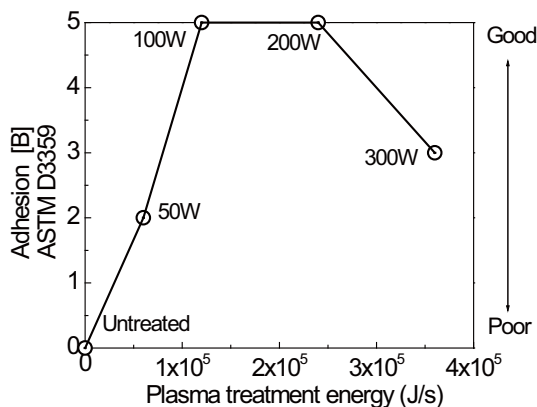
本研究另一部份就是將經電漿處理過之 PET 及 PC 分別鍍著鋁膜(Al)及鈦膜(Ti)，由於在直流磁控濺鍍過程中高能之金屬粒子過程中持續撞擊高分子基材，並將動能轉變成熱能後產生沉積(deposited)，所以雖然基板並未加溫，基材在鍍著過程中溫度仍持續上升，經測試後發現鍍著 20 min 後基板溫度可達到 80°C 以上，此溫度已超過 PET 的玻璃轉移溫度，但離 PC 的玻璃轉移溫度仍有一段距離。此外，鈦的解離活化能較鋁為高，在相同功率下需要較長的鍍著時間才能形成足夠厚度之膜層，基於此些考量故決定將 PET 上鍍著鋁膜，而選用 PC 作為

鍍著鈦膜之基材。

將不同電漿功率(50–300W)處理 20 min 後之 PET 上鍍著鋁膜的試片，以 ASTM D3359 標準測試鋁膜與 PET 基材之附著性，其方式是以此測試方法的專屬百格刀(ZEHNTNER 2087)，其前端每片刀片距離 1 mm，在鍍鋁膜試片表面上縱橫各劃過 1 cm，如此可在 1 cm² 的面積上產生 100 個 1 mm² 的格網，每個格子中之金屬膜均與鄰近格子的膜分開，接著以專用膠帶緊密貼在已切割的膜層上並保留一尾端，待 1 分鐘後再將尾端以近乎垂直(90°)的角度迅速拉起，計算薄膜被撕離部份與格網區域之間的百分比，用以判斷附著性之等級。此方法又稱百格法，此為測試膜層附著性最簡單且常用的方法。

圖六為以 ASTM D3359 方法測試鋁膜與經不同電漿功率及時間處理後 PET

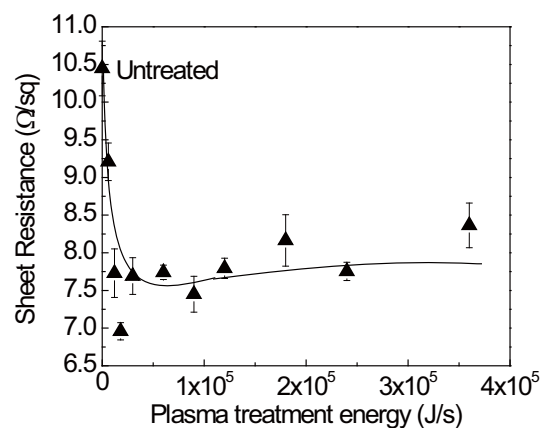
基材間附著性之結果，由圖中可看出未經處理之 PET 其與鋁膜之附著性測量結果為 0B，即膠帶可將 100 格切割的鋁膜全部拔起，表示鋁膜與 PET 之附著性非常差，但經過 50W 改質 20 min 後附著性亦有明顯改善，而 PET 經 100W 及 200W 氧電漿處理後，其鍍著的鋁膜均可達到 5B 的附著等級，顯示經電漿改質後之 PET 與鋁膜間的附著性已大幅改善。在經 300W 電漿處理 20 min 之 PET 鍍著之鋁膜附著性反而下降為 4B。Le 等人[14]提出當以太高的電漿功率或處理時間過長之 PET 基材，鋁膜之附著性反而較處理於低功率、短時間之基材來的差。而本研究中也發現相同的結果。



圖六、於不同功率及時間電漿處理之 PET 基材上鍍著鋁膜後，以 ASTM D3359 方法測試附著性之結果

圖七則為在以不同功率(100–300W)及時間(1 min–20 min)處理後之 PC 上鍍著之鈦膜片電阻測試結果，在此圖中已將各電漿之處理條件轉換成能量，由圖中可

看出 PC 基材經氧電漿處理後，鍍於其上的鈦膜之片電阻明顯較未處理 PC 上之鈦膜降低許多，對照試片外觀之觀察結果，鍍著於未處理 PC 基材上之鈦膜明顯有許多裂痕且膜面呈現些許霧面，而以 100W 及 200W 處理 5-20 min 後之 PC 基材上所鍍著之鈦膜裂痕較少且呈現銀色亮面外觀，表示高分子基材經電漿處理後，因附著性之提升，使其金屬鍍膜的缺陷降低及平整性增加，這可能是片電阻降低的主要原因。



圖七、鈦膜鍍著於不同功率(100–300W)及時間(1min–20min)處理後之 PC 上所測得之片電阻

肆、結論

本研究以 13.36 MHz 之射頻氧電漿對市售兩種常用的高分子基材，聚對苯二甲酸乙酯(PET)以及聚碳酸酯(PC)進行表面改質，結果證實，

- 1.此二種高分子基材經 100W–200W 之氧電漿處理 5-10 min 後，其與水之接觸角明顯降低，顯示表面濕潤性及親水性增加。
- 2.電漿處理後高分子基材之表面粗糙度也明顯增加，而增加的幅度則與電漿之能量成正比。以電漿改質高分子基材表面的效果與使用電漿之功率有明顯的關係，以過高的電漿功率進行表面改質後因對表面損害反而會使親水性降低。
- 3.經氧電漿改質後之高分子基材表面 C–O 與 C=O 官能基明顯增加，而改質後之表面親水性增加則與含氧之官能基之增加有密切關係。
- 4.於經氧電漿改質後之高分子基材上鍍著金屬膜後，金屬膜與高分子基材間之附著性明顯提昇，而片電阻也明顯下降，此與高分子表面溼潤性之增加有關，但過高的電漿功率及過長處理時間反而會降低附著性。

致謝

本研究感謝中興大學呂福興教授提供實驗設備及檢測分析的協助。

參考文獻

- [1] 李宗銘，下世代平面顯示器用可撓式塑膠基材技術，工業材料雜誌169 (2001) pp.87-89
- [2] 田宏隆，平面顯示器用可撓式塑膠基材技術與運用，工業材料雜誌 195 (2003) pp156-158
- [3] J. Lai, B. Sunderland, J. Xue, S. Yan, W.M. Folkard, B.D. Michael, and Y.Wang, “Study on hydrophilicity of polymer surfaces improved by plasma treatment,” *Appl. Surf. Sci.*, 252 (2006) pp.3375-3379.
- [4] M. A. Gilliam, Q. S. Yu, “Surface characterization of low-temperature cascade arc plasma-treated low-density polyethylene using contact angle measurements,” *J. Appl. Poly. Sci.*, 99 (2006) pp.2528-2541.
- [5] M. Noeske, J. Degenhardt, and S. Strudthoff, et al. “Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion,” *Int. J. Adhes.*, 24 (2004) pp.171-177.
- [6] S. Han, Y. Lee, H. Kim, “Polymer surface modification by plasma source

- ion implantation,” *Surf. Coat. Technol.*, 93 (1997) pp.261-264
- [7] N.-Y. Cui, N.M.D. Brown, “Modification of the surface properties of a polypropylene (PP) film using an air dielectric barrier discharge plasma,” *Appl. Surf. Sci.*, 189 (2002) pp.31-38
- [8] E.E. Johnston, B.D. Ratner, “Surface characterization of plasma deposited organic thin films,” *J. Elec. Spec.*, 81 (1996) pp.303-317
- [9] M. Strobel, M.J. Walzak, J. M. Hill, A. Lin, E. Karbasheski, and C. S. Lyons, “Comparison of gas-phase methods of modifying polymer surfaces,” *J Adhes Sci Technol.*, 9 (1995) pp.365-383
- [10] R.J. Shishoo, “Studies of Adhesion Mechanisms Between PVC Coatings and Different Substrates,” *.Coated Fabrics* 26 (1997) pp.26-32
- [11] C. Cheng, Z. Liye, R.-J. Zhan, “Surface modification of polymer fibre by the new atmospheric pressure cold plasma jet,” *Surf. Coat. Technol.*, 200 (2006) pp.6659-6665
- [12] M. Bou, J. M. Martin, and T. L. Mogne, “Chemistry of the interface between aluminium and polyethylene terephthalate by XPS,” *Appl. Surf. Sci.*, 47 (1991) pp.149-161
- [13] J. F. Silvain, A. Arzur, M. Alnot, J. J. Ehrhardt, and P. Lutgen, “XPS study of Al/polyethylene terephthalate interface,” *Surf. Sci.*, 251-252 (1991) pp.787-793
- [14] Q. T. Le, J. J. Pireaux, R. Caudano, P. Lec lere, and R. Lazzaroni, “XPS/AFM study of the PET surface modified by oxygen and carbon dioxide plasmas: Al/PET adhesion,” *J. Adhes Sci. Technol.*, 12 (1998) pp.999-1023
- [15] N.V. Bhat, D.J. Upadhyay, “Plasma-induced surface modification and adhesion enhancement of polypropylene surface,” *J. Appl. Polym. Sci.* 86 (2002) pp.925-936
- [16] N.V. Bhat, D.J. Uadhyay, R.R. Deshmukh, S.K. Gupta, “Investigation of plasma-induced photochemical reaction on a polypropylene surface,” *J. Phys. Chem.*, B107 (2003) pp.4550-4559
- [17] E. Amanatides, D. Mataras, M. Katsikogianni, and Y.F. Missirlis, “Plasma surface treatment of polyethylene terephthalate films for bacterial repellence,” *Surf. Coat. Technol.*, 200 (2006) pp.6331-6335
-