

聚合物奈米複合材料與其技術

The Introduction of the Polymer Nano-composite and its Application

蘇添貴

台美產業科技推動協會(TAITA) 成員

本文首先簡要地介紹一般的奈米技術，以及應用於聚合物奈米複合材料之數種不同的奈米粒子，包括：奈米黏土、奈米金屬、奈米碳管、奈米二氧化鈦及生物高分子奈米粒子。之後再說明奈米黏土聚合物，包括：黏土結構、黏土表面處理、製造技術、奈米黏土在聚合物裡的分散狀態、測量奈米黏土分散程度的技術及對聚合物性能的改善，與聚合物黏土奈米複合材料的優點，以及如何增強機械、熱和各種氣體阻隔的性能，聚合物奈米黏土複合材料已成為一種新的工業材料、醫療材料及食品包裝材料，本文將簡述幾種聚合物奈米複合材料在汽車上的應用，之後再揭示數據及詳細討論奈米黏土塗層塑料在薄膜上的應用。

塗料含有鹵素(halogen)聚合物，如聚二氯乙烯(PVdC)已被用來改進薄膜的氣體阻隔性能，但是非鹵素的塗料卻比較稀少，再加上聚二氯乙烯材料較昂貴，並且有再循環使用的問題，故在文中討論可有效提高氣體阻隔性能的奈米黏土塗層，乃是非鹵素的塗料。其熱塑性塑料薄膜的結構組成有一持續的貼壁塗層，其中包括聚合物黏合劑和奈米黏土。該奈米黏土層使各種氣體擴散通過奈米黏土聚合物塗層時，必須改變路線。在塗層表面的薄膜，奈米黏土形成了水分和氧氣在聚合物擴散的障礙，因而大大地降低了氧氣傳輸速率(OTR)和水蒸氣傳輸速率(MVTR)。

The nano-particle size in Nano-materials refers to the measurement in the order of 1~100nm ($1\text{nm}=10^{-9}$ meter). Nano-particles have unique surface, interface and volume effects in nano-materials due to their small sizes, which enable them to modify chemical and physical properties of materials consisting of nano-particles. The Polymer Nano-technology is the most rapidly growing section of the Nano-technology. The process and characterization advancements led to new functionalities and applications of polymer nano-particles. The performances and applications of nano-polymers depend upon the chemical compositions, shapes, structure, morphologies and the

amounts of nano-particles. The extraordinary large surface areas on nano-particles provide opportunities to modify the surfaces of nano-particles to improve dispersion and properties. As a result, a relatively small amount of the nano-particles can improve chemical and physical properties of polymer materials remarkably. The resultant nano-materials can still maintain their clarity, since nano-particles scatter little light due to the size much smaller than the wavelength of the visible light.

There are various nano-particles used in polymer nano-technology, including silica, silicate, calcined alumina silicate, zeolite, calcium phosphate, magnesium sulfate, diatomaceous earth, titanium dioxide, carbonate alumina, zinc oxide, zirconium oxide, metal, carbon tube, clay, biopolymer and others. Among them montmorillonite clay, an inorganic nano-material, is the most commonly used in plastics. The clay is a layered silicate which consists of three sub-layers of silicon oxygen tetrahedrons. Normally, it requires surface modification to improve its compatibility with polymer materials.

The nano-clay can improve thermal and mechanical properties of polymer materials. The clay/polymer composites have been commercially used in the automotive parts. The nano-clay can also improve the gas barrier property of polymers markedly, in which, the impermeable clay creates a tortuous path of gas permeation. The application in this report uses a thin layer of a polymer binder containing nano-clay to coat on BOPP film. The resultant film provides improved oxygen and moisture barrier properties, while the BOPP film still maintains its clarity. This technology can be further improved by (1) increasing the amount of nano-clay and its dispersion in polymers by optimizing its surface treatment, (2) enhancing the orientation of nano-clay and (3) using barrier polymers as the carrier for nano-clay.

一、導言及背景

奈米技術的工業可視為進化，而不是革命。奈米材料在機械、光學、電學與化學等方面具有獨特且不尋常的特性，奈米技術的應用領域包括：新型聚合物奈米、聚合物奈米複合材料、生命科學、能源、健康醫療藥物、塗料和膠黏劑、電子、光電子及磁學、資訊、通訊與其他。

其中，聚合物奈米技術是增長最迅速的項目，各種不同的奈米材料應用於聚合物奈米技術，包括：陶土、金屬、二氧化鈦、碳酸鹽岩、沸石、碳管及其它。其中常見用在

塑料材料的奈米粒子是蒙脫土層狀結構的奈米黏土(montmorillonite)，是一個層狀矽酸鹽，包括三個子層的矽氧四面體。聚合物奈米複合材料是一類新的高性能材料，其歷史真正開始在1990年，由豐田公司 (Toyota)首次使用奈米黏土/尼龍6 (nanoclay/nylon-6)複合材料，以生產豐田汽車的正時皮帶外蓋 (timing belt covers)。之後，於其它汽車上的應用包括：三菱(Mitsubishi)也使用奈米黏土/尼龍6製造皮帶外蓋和GDI發動機，通用汽車 (General Motor)亦使用奈米黏土/聚烯烴複合材料應用於汽車上。

在奈米材料裡的奈米粒子，其尺寸大約在1~500奈米($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$)的範圍，由於其體積小，具有獨特的表面、界面及體積效應，致使它可以很有效地修改含有奈米粒子材料的化學和物理性質。功能和在聚合物裡的應用取決於其化學成分、形狀、結構、形態和數量。舉例來說，奈米黏土對奈米聚合物的性能改進包括：(1)提高玻璃化轉變溫度；(2)增加結晶速率；(3)提高耐熱性和耐化學性；(4)增強耐燃性(flame resistance)；(5)增強機械力學性能(mechanical property)；(6)提高各種氣體的阻隔性能(gas barrier)等。

聚合物薄膜在包裝業應用需要某些特性，包括各種氣體的阻隔性能，許多常用的薄膜，如聚烯烴提供的氣體阻隔性能不足，因此通常需要提高或提供所需的特性，以達到這些性能，聚合物薄膜往往以擁有較高阻隔性能的材料設計成一層或一層以上。這些阻隔層可藉由共擠壓(co-extrusion)或塗層(coating)及製程(process)來納入。

在食物包裝行業中，採用塗層技術以改善塑料薄膜對氧氣及水氣的阻隔性能是很常見的。其中，塗料很普遍的含有鹵素聚合物，例如聚二氯乙烯(PVdC)，已被用來改善薄膜的阻隔性能，如聚二氯乙烯塗層的聚丙烯薄膜⁽¹⁾，聚二氯乙烯塗層的高密度聚乙烯薄膜⁽²⁾，但非鹵素塗料則較少。然而，聚二氯乙烯很難回收，對循環再使用造成問題，因為當再加工的時候，它往往會熱分解。在此如使用奈米黏土塗層高分子薄膜，其為非鹵素塗料，可以提高塑料薄膜的阻隔性能，但卻沒有鹵素可能帶來的影響。

二、奈米粒子的種類

許多不同種類的奈米粒子可以應用於聚合物奈米複合材料中，以下說明一些較常見的材料。

(一)黏土

通常蒙脫石型的黏土(smectite-type)被用作為填料，蒙脫土層狀結構的黏土則被用來分散在聚合物基體中。其表面需要化學處理，以便親水性(hydrophilic)的黏土獲得有機兼容性(organic compatibility)。其處理方式包括利用下列化學品：胺基酸(amino acids)、有機銨鹽(organic ammonium salts)或四有機磷(tetra organic phosphonium solution)。如果高分子鏈和化學處理黏土的矽酸鹽層有效地連接，就只需要使用0.1~10%體積的奈米黏土，來改進高分子材料的物理和化學性能。例如：更強的拉伸性能，較高的耐熱性和阻燃性能，提高氣體的阻隔性能⁽³⁾和加強耐化學性。在製造技術(fabrication techniques)方面，有以下幾種方法。

1. 解誘導插 (solution induced intercalation)

使用有機溶劑溶解聚合物，之後分散黏土在其中，接下來讓溶劑蒸發或含有黏土的聚合物沉澱。

2. 原位聚合 (in-situ polymerization)

混合矽酸鹽層和聚合物的單體，再加聚合引發劑或催化劑，聚合後導致分散黏土層到矩陣聚合。

3. 熔體處理 (melt processing)

矽酸鹽需要表面處理以增加其有機性，因此矽酸鹽層能有效地直接分散到聚合物中

熔融。一般來說，在碳氫聚合物裡，如聚乙烯或聚丙烯，需要加一種相容劑(compatibilizer)以促進極性(polar)黏土的分散。例如加酸酐接枝聚丙烯(anhydride grafted polypropylene)到含有黏土的聚丙烯^(4~6)，以加強黏土和聚合物之間的兼容性。

4. 聚合物黏合劑(polymeric binder)⁽⁷⁾

聚合物黏合劑是一種共聚物，包括羧酸(carboxylic acid)或羥基(hydroxyl)等功能團(functional groups)。它可以綁定或錨住黏土，導致奈米黏土在其中的分散，可以達到脫落(exfoliation)的程度。這類包含聚合物黏合劑和奈米級粒子的塗料，適用於塑料薄膜，能形成大幅度持續地黏附塗層。

(二)奈米金屬

金屬奈米具有不同的性能，由來自金屬奈米晶體的大小和形狀，測量僅幾毫微米的奈米金屬粒子，卻包含幾百個原子，透過這種方式，顯示出獨特的奈米材料磁性與電子性能。金屬聚合物奈米複合材料可應用於一些技術應用，如光學設備、光學傳感器和彩色濾光片。目前可以用來獲取金屬聚合物奈米複合材料有兩種不同的技術。

1. 原位合成法(in-situ synthesis)

首先，將含有金屬離子的化學物質放入單體聚合溶液(polymerization solution)中，之後透過化學、熱或光解的方法，獲得金屬奈米粒子。

2. 異地合成法(ex-situ synthesis)

金屬奈米粒子是由化學方法先獲得，然後分散(disperse)到聚合物溶液或單體溶液聚合。

(三)奈米碳管

生產奈米碳管的技術已發展到相當大的數量，包括電弧放電(arc discharge)雷射剝離(laser ablation)，高壓一氧化碳(HiPCO)和化學氣相沉積(CVD)等。通常，這些生產過程都在真空或氣體中作業，其中電弧放電法將導致石墨(graphite)蒸發，而後存放在陰極，此方法能夠生產比較優質的奈米碳管。奈米碳管有非凡的機械強度和獨特的電性能，而且是有效的熱導體。高超的強度和柔韌性，再加上輕盈的奈米碳管，使其在航空材料應用上很有潛力。此外，使用奈米碳管也可作為增強纖維和具獨特的電氣、熱性能的聚合物基體。

(四)生物高分子奈米粒子(biopolymer)

生物高分子的材料可以從多醣(polysaccharide)、碳水化合物(carbohydrate)、膠(gum)、蛋白質(protein)或膠體(colloid)等製造，其中比較常用的是多醣，例如澱粉^(8,9)。製造技術如下：

1. 生物聚合物溶解或分散在羥基溶劑，其乾燥物質含量在加工過程中至少50%的重量；
2. 透過擠壓，生物聚合物的處理過程包括熱和機械剪切力；
3. 在稍後階段擠壓時，加入交聯劑(cross-linking agent)，例如乙二醛(glyoxal)或二醛(dialdehyde)；
4. 混合物被擠壓通過圓洞而擠出造粒，之後通過冷磨碎；
5. 由此產生的粉末其次再通過一個聚酯篩除(sieve)不要的大顆粒子。這種粒子是不規則的三維形狀(3D)，非球面形狀，也不像

兩個層面的黏土。顆粒的大小是利用動態光散射(DLS)來衡量顆粒的平均粒徑和粒徑的分佈，理想的粒子粒徑大約從20~80nm；

6. 準備製造奈米生物聚合物的水溶液。奈米粒子溶解或分散在水中，其濃度為4~50%之間。此奈米生物聚合物水溶液，可應用在塗層塑料薄膜上，提高氧氣的阻隔性能⁽¹⁰⁾。

(五) 奈米二氧化鈦

奈米二氧化鈦(nano titanium dioxide；TiO₂)分為銳鈦礦(anatase)和金紅石(rutile)兩種晶型，外觀呈白色粉末，粒度小(奈米粒子之粒徑10~100nm)，分散性好。銳鈦礦型奈米二氧化鈦具有很強的光催化活性，在紫外光與氧氣的作用下，具有很強的殺菌能力。金紅石型奈米二氧化鈦對紫外線有很強的屏蔽作用，其光吸收率之大為主要特色，利用此特性可應用於紅外線感測器材料。二氧化鈦長期以來被認為是一種有效的防曬劑，再加上奈米二氧化鈦粒度小，具有卓越的透明性，可用作以下應用。

1. 抗紫外線材料：化粧品、化纖、塗料、塑料；
2. 光催化劑和抗菌劑：自潔陶瓷、空氣淨化、污水處理；
3. 化學工業：造紙、食品包裝。

三、奈米黏土層製造彎路(tortuous path)

黏土被用作為各種材料的填充物，個別的奈米黏土層的厚度大約1~10奈米，而長度範圍為100~1,000奈米。當它們分散於塑料中，達到脫落的狀態並形成個別層，此時奈米黏土層就像兩個層面的填料，且製造彎

路，使各種氣體擴散通過奈米黏土聚合物塗層時，必須改變路線⁽¹⁾。圖一為各種氣體通過聚合物含有脫落黏土(exfoliated clay)的曲折道路之示意。

透過這種系統，含有脫落黏土聚合物的氣體通透性(permeability)，可以使用方程式(1)來表示。其中， P_f 和 P_u 表明有及沒有含填料的聚合物系統的通透性， ϕ_p 和 ϕ_f 是聚合物和填料的體積分數(volume fraction)， L/W 代表填料的寬高比。值得注意的是，通透性和填料的寬高比是一種逆關係，此外它也取決於填料在聚合物基體內的排列方向(orientation)和分散情況。換句話說，當填料排列垂直於氣體流的方向時，阻隔氣體傳輸速率性能最有效，然而當它們調整到平行排列時，即與氣體流的方向一樣時，則阻隔通透性最差。

$$\frac{P_f}{P_u} = \frac{\phi_p}{\left[1 + \left(\frac{L}{2W}\right)\phi_f\right]} \quad (1)$$

四、測量奈米黏土分散程度的技術

廣角X射線散射(WAXS)^(8,9,10)和透射電子顯微鏡(TEM)^(11,12,13)已被普遍用來描述奈米層狀矽酸鹽在聚合物內分散的程度。廣角X射線散射可以測量奈米黏土插層(intercalated)系統的d-間距(d-spacing)，也是一種確認的方法，當奈米黏土在脫落的狀態時，X射線散射不存在，透射電子顯微鏡的圖，直接顯示黏土在聚合物中的形態和結構。

聚丙烯和聚丙稀含有不同數量奈米黏土的典型廣角X射線，散射模式如圖二所示，在2至5散射度範圍的模式，表示為奈米黏土分

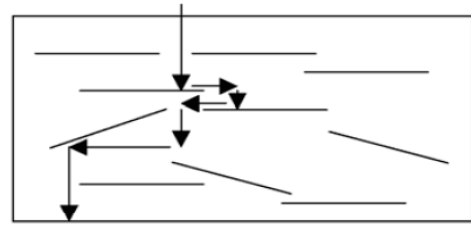
散的敏感地區。在脫落的狀態，其模式沒有特色(featureless)，也就是說在此範圍內無散射，然而在插層的情況下，則有一些散射。如果奈米黏土在聚合物內分散的很差，在更寬的散射角度將有更強大的散射。依圖二(四種散射模式)奈米黏土的數量從下而上的模式增加，並清楚地表明，從下而上，奈米黏土在聚合物內的分散程度，隨其量的增加而降低。換言之，當奈米黏土的量不斷增加時，它的分散狀態如預期地從脫落的情況變為插層的情況(intercalation)。透射電子顯微鏡也被廣泛用來評估分散奈米黏土在聚合物基體中分散的情況。圖三顯示脫落奈米黏土在聚合物中的典型代表，圖中顯示奈米黏土層的厚度大約1~10nm，而長度範圍為100~500nm。

差示掃描量熱(DSC)⁽¹⁴⁾和熱重分析儀(TGA)⁽¹⁵⁾等熱測量技術也被用來檢測奈米黏土在聚合物中，並確定其數量。在聚合物中，黏土可作為成核劑(nucleating agent)以提高聚合物的結晶速率，於是它可增加聚合物的初始和峰值結晶溫度。這導致測量聚合物結晶溫度的變化，可決定黏土的含量。因為黏土也可以提高聚合物的耐熱性，因此也可利用熱重分析儀來分析在聚合物中的黏土，並且還可以提高聚合物的阻燃性。

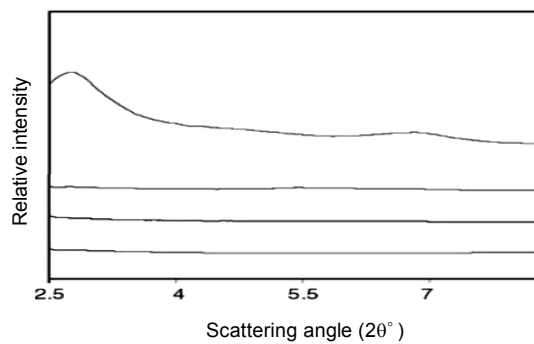
五、奈米黏土塗層在聚合物薄膜上的應用⁽⁵⁾

(一)材料

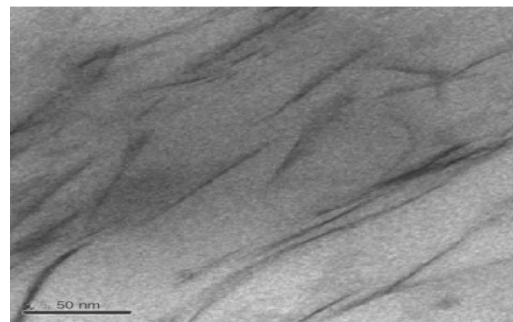
在此使用的黏土(organo-montmorillonite；SCPX944)，是從Southern Clay Products其表



▲圖一 各種氣體通過聚合物含有脫落黏土的曲折道路



▲圖二 奈米黏土的散射模式



▲圖三 脫落奈米黏土在聚合物中的典型代表

面經過有機物的處理然後分散在水中，含有9.1%的固體。聚合物黏合劑(polymeric binder)是乙烯丙烯酸共聚物(EAA)，是從Michelman Corp.取得的溶液，含有25%的固體。由此產生的塗層溶液是混合這兩種成分，同時添加水稀釋至9%固體，高分子薄膜是雙向拉伸聚丙烯薄膜(BOPP)。

(二)處置過程

首先使用凹印機(gravure coater)，填裝(prime)聚乙烯亞胺(polyethyleneimine)在BOPP薄膜上。等待通過烤箱乾燥後，使用同一凹印機，添加此黏土塗層溶液在聚乙烯亞胺引物(primer)上。再次通過烤箱乾燥後，一層又薄亦均勻的奈米黏土塗層便加於BOPP薄膜上。

(三)奈米黏土分散的狀態

在此用廣角X射線散射和透射電子顯微鏡來評估奈米黏土在聚合物乙烯丙烯酸共聚物中的分散情況。其中，透射電子顯微鏡的樣本是塗層塑料薄膜植根於環氧樹脂，接下來切一薄層斷面，廣角X射線散射的結果表明，有很多的奈米黏土是插層狀態，同時透射電子顯微鏡的結果，也顯示絕大部分的奈米黏土是脫落狀態。

▼表一 黏土/乙烯-丙烯酸共聚物(EAA)塗料的組成

塗層編號	水黏土	分散乙烯-丙烯酸共聚物	黏土/EAA的比率	固體量	黏度
1	50	50	27/73	17.23	1271
2	60	40	35/65	15.65	1581
3	70	30	46/54	14.07	1750
4	80	20	59/41	12.52	3004
5	90	10	77/23	10.90	177

▼表二 黏土/EAA塗層OPP薄膜的氧氣和水蒸氣傳輸速率

塗層編號	黏度	塗層重量	氧氣傳輸速率	水蒸氣傳輸速率
0(Control)	N/A	0	125	0.34
1	24.0	0.5	95	0.29
2	27.6	0.572	78	0.28
3	43.8	0.667	46	0.26
4	63.3	0.822	28	0.26
5	47.4	0.912	9	0.27

(四)奈米黏土塗層改進雙向拉伸聚丙烯薄膜性能

在配備機械攪拌的容器之內準備奈米黏土塗層液體，為水黏土(有機物處理的蒙脫土)與乙烯-丙烯酸共聚物的混合物。它們在本文中使用的成分列於表一。其中，水黏土(aqueous clay)含有9.1%固體，分散乙烯-丙烯酸共聚物(dispersed EAA)含有25%固體，黏度(viscosity)其單位是centipoises(cps)。在表一中，第二和第三欄各別代表水黏土和乙烯-丙烯酸共聚物液體的體積百分比。第四欄註明這兩個主要組成部分固體含量的比率，第五和第六欄代表最後的奈米黏土塗層液體的固體含量及其黏度。該塗層改良雙向拉伸聚丙烯薄膜(BOPP)對氧氣及水氣的阻隔性能列在表二，它也顯示塗層的不同成分(塗層重量/厚度)對阻隔性能的影響。

板樣形態的黏土如圖一所示，擔任氣體的障礙，從而使氣體擴散的有效路徑長度較長，造成彎路。在此展示說明奈米黏土塗層有效地降低雙向拉伸聚丙烯薄膜的氧氣及水氣的傳輸速率。相較之下，尤其對氧氣傳輸速率的影響較大，而對水氣的傳輸速率影響較小。這是因為黏土是親水性的(hydrophilic)。第三欄和第四欄的數據表明當塗層重量增多，氧氣傳輸速率減低。這結果反映在方程式(1)。也就是說，含有填料的聚合物的通透性跟其填料

的含量成反向關係。並且由於奈米黏土的寬高比例非常高，據方程式(1)可有效降低各種氣體的通透性。

此外，氣體的傳輸速率也取決於填料在聚合物基體內的排列方向(orientation)和分散情況。換句話說，當填料排列垂直於氣體流的方向時，阻隔氣體傳輸速率性能最有效。然而，當它們調整到平行排列時(在同一方向)，則阻隔通透性最差。還有當奈米黏土分散得好，達到脫落的狀態時，阻隔氣體傳輸也最有效。因此要更準確描述氣體的通透性，它需要修改據方程式(1)，包括填料的排列方向及填料的分散程度這兩個因素。

包裝業⁽¹⁶⁾常採用塗層技術以改善塑料薄膜對氧氣及水氣的阻隔性能，其中，很普遍的塗料含有鹵素聚合物如聚二氯乙烯，用來改進薄膜的阻隔性能。它具有非常有效的氣體的阻隔性，原因之一是由於其高密度，高分子鏈的安排非常接近，很緊密地排列。因此，它的密度在晶相(crystalline phase)和非晶相(amorphous phase)很高並十分接近，約1.7克/毫升。

聚二氯乙烯材料昂貴，又因為它含有鹵素不適合環保用途，薄膜包括有聚二氯乙烯薄膜的塗層更難以回收。也就是說聚二氯乙烯會有循環再使用的問題，因為當再加工的時候，它往往會熱分解，並產生黑碳，因此造成進程產品的品質問題。在本研究中奈米黏土塗層高分子薄膜，可以提高塑料薄膜的阻隔性能，是不含有鹵素的塗料。

為了進一步改善奈米黏土聚合物的氧氣和水蒸氣阻隔性能，可以考慮以下操作方法：(1)增加黏土數量；(2)增強黏土的排列方

向，以使其表面配合薄膜的表面；(3)對氧氣阻隔，使用較親水性的聚合物黏合劑，但對水蒸氣則相反；(4)使用氣體阻隔聚合物，以取代聚合物黏合劑，例如使用乙烯乙二醇共聚物(EVOH)、聚乙烯醇(PVOH)⁽¹⁷⁾或聚醚胺(polyether amine)⁽¹⁸⁾，來取代乙烯丙烯酸共聚物(EAA)。

除了提供氣體的阻隔性能，塗層必須具有可接受的清晰度，使產品能在袋子內清楚地被看到。在此奈米黏土塗層的雙向拉伸聚丙烯薄膜，仍然具有薄膜原有的良好清晰度。也就是說，奈米黏土塗層對薄膜的清晰度影響不大。換句話說它意味著奈米黏土在乙烯-丙烯酸共聚物中分散的程度非常好，大部分的奈米黏土達到脫落的狀態。由於奈米黏土在共聚物中分散得非常好，還有其尺寸遠小於可見光的波長，因此不會散射光線(scattering light)造成煙霧(haze)。

六、結論

由於奈米粒子的體積小，具有獨特的表面、界面和體積效應，導致含有少量的奈米粒子即可有效地修改聚合物奈米材料組成的化學和物理性質。有各種不同的奈米粒子可以應用於聚合物奈米複合材料，其中奈米黏土已被廣泛應用於商業產品，利用它提升高分子材料的熱性能、阻燃性能和機械性能。此外，奈米黏土也可有效地提高聚合物的氣體阻隔性能。

分散黏土於奈米黏土組成的聚合物材料中有各種製造方法，合適的選擇使用可以綁定或錨住黏土的聚合物黏合劑，例如：乙烯丙烯酸共聚物，可導致奈米黏土在其中的分

散，達到脫落的程度。添加此黏土塗層溶液在聚合物薄膜上，例如雙向拉伸聚丙烯薄膜，再次通過烤箱乾燥後，一層又薄亦均勻的奈米黏土塗層便加在薄膜上，如此奈米黏土塗層改進雙向拉伸聚丙烯薄膜的性能，其中奈米黏土塗層可有效地降低雙向拉伸聚丙烯薄膜的氧氣及水氣的傳輸速率。相較之下，其對氧氣傳輸速率的影響較大，而對水氣的傳輸速率影響較小。如塗層重量增多時，氧氣傳輸速率就會減低。有趣的是，奈米黏土塗層並沒有散射光線而造成煙霧，因此奈米黏土塗層薄膜仍然具有薄膜原有的良好清晰度。

進一步改善聚合物含有奈米黏土的氣體阻隔性，可以考慮以下因素：(1)增加黏土數量；(2)增強奈米黏土在聚合物中的分散和排列方向；(3)對氧氣阻隔，使用較親水性的聚合物黏合劑，但對水蒸氣則相反；(4)選用較高氣體阻隔性的聚合物。

參考資料

1. L. Liu et al., US Patent 4, 865, 908, September, 1989.
2. R.V. Poirer, US Patent 6, 764, 751, July, 2004.
3. J. Villaluenga et al., European Poly. J. V43, #4, P1132-1143, April 2007.
4. G.W. Lohfink et al., Poly. Eng. & Sci., 33, 1404-1420 (1993).
5. F.C. Chiu et al., J. Poly. Sci., Part B, Poly. Physics, 42, 4139-4150 (2004).
6. G.C.R. Varela et al., Poly. Composite, 27, 451-460 (2006).
7. SC Chu, JK Keung, TK Su, US Patent 6, 599, 622, July 2003.
8. B. Gezen et al., US Patent 6, 677, 386, January, 2004.
9. C. V. Soest et al., US Patent 6, 755915, June, 2004.
10. D. L. Cowton, US Patent 7, 452, 592, November, 2008.
11. D.F. Eckel et al., J. App. Poly. Sci., V93, #3, Pages 1110-1117, April 2004.
12. V. Causin et al., Polymer, V46, #23, P9533-9537, Nov. 2005.
13. A. Vermogen et al., J. Nanosci Nanotech. 7(9), P3160-3171, September 2007.
14. S. Basu et al., Appl. Phys. Letter, V91, #5, July 2007.
15. B.N. Jung et al., Macromolecules, 38(15), P 6533-6543, June 2005.
16. Y. Chue et al., J. Nanosci Nanotech, 6(12), P3985-3988, December, 2006.
17. F. Fang, J. Nanosci Nanotech, 8(4), P1559-1581, April 2008.
18. M. Rajan et al., J. Nanosci Nanotech, 6(12), P3993-3996, December, 2006.
19. S. Ray et al., Int' J. Food Eng. V2, #4, 2007.
20. R. Toussaent, US Patent 6, 444, 750, Septembrt, 2002.
21. TK Su et al. US Patent 7, 163, 737, January, 2007.

蘇添貴 (Tien-Kuei Su)

BS, Chemical Engineering
MS, Chemical Engineering
PhD, Polymer Science & Engineering
Retiree
Retiree
Consultant
Adjunct Professor
Publications

National Taiwan University
Worcester Polytechnic Institute
University of Massachusetts
ExxonMobil
Toray
Toray
Rochester Institute Technology
40 Patents, 7 Papers

本文由台美產業科技協會(TAITA)供稿，文章內容為作者個人觀點，不代表 TAITA 與本刊立場