



◎ 葉樹開

透明奈米 發泡材料

奈米發泡材料具有超隔熱性質，在能源方面有很大的應用潛力，它的超結構性質與耐衝擊性，對於材料的應用也是很大的利基。

【 高分子發泡材料具有密度小、導熱率低、彈性佳、隔音絕熱等優點，因此廣泛應用於消音隔熱、保溫防凍、緩衝防震等用途。 】

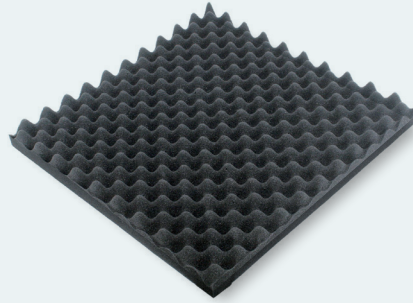
什麼是發泡材料

發泡材料是指透過在材料的內部產生氣泡，並在內部產生許多小孔洞，使其成為多孔性結構物質的統稱。多孔結構早已廣泛存在於自然界的植物和動物組織中，例如木頭、軟木、骨頭等。依材料分類，發泡材料可以分成金屬、陶瓷及高分子 3 種。

高分子（塑膠）材料自發明以來，就一直影響著人類的生活。自然界中動植物內的蛋白質、醣類，到生活中使用的工具和各種原料，大部分是以高分子為主要成分構成的。工業上大量使用高分子並應用於多種用途，例如塑膠、纖維、橡膠接著劑、塗料等。和一般金屬材料比較，高分子材料最大的優點是質量較輕，有較好的可塑性、絕緣性和抗腐蝕性，加上容易取得，價格低廉，因此一直是發展的重點。

高分子發泡材料是高分子材料中很受重視的領域。一般而言，高分子發泡材料具有質量較輕（密度小）、導熱率低、彈性佳、隔音絕熱等優點，因此廣泛應用於消音隔熱、保溫防凍、緩衝防震等。如此多樣化的用途使得發泡材料在各領域都能維持長期的成長動能，在交通運輸、房屋建築、包裝、日常用品及食品加工都可以看到它的身影。根據 MarketsandMarkets™ 的報導，2015 ~ 2022 年全球每年的高分子發泡材料市場會從 1,050 億美金成長至 1,610 億美金，每年的成長率約維持在 8% 以上。

發泡材料內含多孔洞結構，稱為「泡孔」。而依據泡孔的型態可以區分為兩種結構：閉孔結構—發泡後的泡孔之間互不相連，各個是獨立的氣室結構；開孔結構—發泡後的泡孔之間有通道相連，換句話說是泡孔和泡孔間沒有明顯的邊界，這種發泡材料具有吸收液體的特性。高度相通的開孔泡材料適用於過濾、催化、緩衝、



常見的發泡材料：泡棉。

吸音等，閉孔泡材料則適用於結構應用，例如做為海上漂浮設備和熱絕緣材料。

製作發泡材料的方法

常見的發泡方法包括藉由機械攪拌的方式，把氣體混入液態的機械發泡，例如卡布奇諾咖啡，就是利用攪拌時把氣體混入液體中產生泡沫。另外包括在液體中通入氣體成泡、化學發泡、物理發泡等各種方式。由於高分子材料的黏度較高，通常會採用化學發泡和物理發泡兩種方式製造高分子發泡材料。

化學發泡是指在高分子中加入化學發泡劑，其受熱分解或原料之間發生化學反應而產生氣體，使得高分子熔體中充滿孔洞，這種發泡方法稱為化學發泡。相對於化學發泡的是物理發泡，物理發泡在材料中溶入氣體或液體，而後透過加溫或減壓使其氣化發泡，形成多孔結構。

在目前的發泡材料中，物理發泡是常見的方法，且近年來有許多突破。早期物理發泡法是使用氟氯碳化物、氫氟氯烴、氫氟烴等製作發泡材料，很快地應用在家具或建築絕熱等用途上。到了 1980 年代，美國麻省理工學院發展以二氧化碳作為

發泡劑的微發泡技術，把發泡材料帶入了微米泡材的時代。

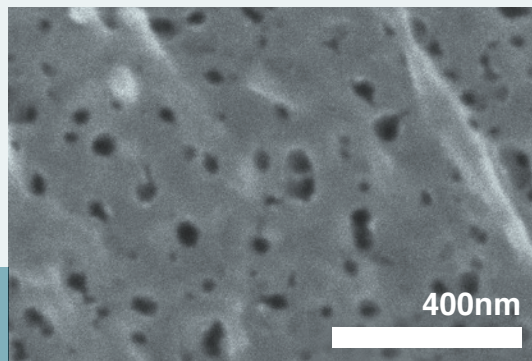
微米泡材代表的是材料內的孔洞達到微米以下，由於具備更好的物理性質和減重效果，使得微米泡材在 21 世紀更加多元化地應用在日常生活中。而在最近幾年，尤其在 2010 年後，開始進入了奈米孔徑的發泡材料時代，有大量的學者開始投入研究。由於其特別及改善增強的物理性質，預計能成為發泡材料的下一波革命。

奈米發泡材料

奈米 (nanometer, nm) 是一個很小的單位， $1 \text{ nm} = 10^{-9}$ 公尺。奈米發泡材料的定義雖然略有不同，但最嚴謹的定義是發泡材料內部泡孔的孔徑小於 100 nm。目前常見的發泡材料，孔徑多在微米 (10^{-6} 公尺) 左右。與微米孔徑的發泡材料相比，奈米泡材通常物性更好，且具有特殊的應用性，使得奈米泡材相較於微孔泡材更具有發展的優勢。

最早有研究學者宣稱，若高分子泡材的孔徑達到奈米等級時，泡材會具有超結構特性。意思是若泡孔孔徑接近於奈米等級，會小於材料固體本身的缺陷，這時材料會表現出接近於原本固體的物理性質。因此在泡材相對密度降低至原本的 20% 的情形下，仍然能維持 80% 的高分子材料的物理性質。這一理論獲得了廣泛的回響，奈米泡材也引起學界廣大的興趣。

奈米泡材更受到矚目的特性是一絕熱性質，原因是氣體分子的平均自由路徑約為 100 奈米，把分子限制在 100 奈米以下的泡孔中時，分子運動會受限，使得透過分子碰撞發生的氣體分子熱傳效應大大減低，大幅降低了熱傳的損失（這現象稱為 Knudsen



奈米泡孔示意圖

效應)。由於建築能耗占國家總能耗的比率高達 30 ~ 40%，若能有效地降低建築能耗，提升能源使用效率，對於節能減碳和降低全球暖化效應有很大的功效。

另外，在光電應用中，奈米發泡材料已經證實具有超低的介電常數，近年的專利發表也找出更多的應用，未來有很大的應用前景。

奈米泡材的製造方法

製作高分子奈米泡材需使用特殊製程以克服奈米尺度下相分離的問題，過去幾年已經發展出許多方法製備高分子奈米孔洞結構，包括：分子轉印、微乳液模板、相分離、在奈米結構整齊的嵌段分子共聚物選擇性移除其片段，但這些方法都非常昂貴，未來不易產業化。

使用氣體溶入高分子後的發泡過程中，氣體揮發後不會殘留在高分子中，因此不會發生與有機溶劑殘留在材料內部的問題。二氧化碳是這類型製程最佳的選擇之一，因為二氧化碳在高分子中有一定的溶解度，而且擴散係數高，有利於二氧化碳發泡的樣品形成小孔洞。

聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 是最早能製備奈米泡孔材料的高分子，在 1990

年代研究學者初步找出了製備奈米泡孔材料的條件。接下來幾年，陸續有越來越多的文獻發表，使用其他的高分子如聚醚酰亞胺（PEI）、聚醚砜（PES）、熱塑性聚氨酯彈性體（TPU）、聚碳酸酯（PC）、ABS 樹脂等高分子製備奈米泡材。

透明的奈米發泡材料

發泡材料的光學特性，尤其是奈米發泡材料的透光率，也是大家感興趣的研究領域。透光率是一種表示透明程度的重要性指標，物體的透光率愈高，其透明程度愈高。

綜合來說，影響透光率的因素主要有 3 種：光的反射—即入射光照射至材料表面而反射回來；光的吸收—是物體吸收多少入射光而造成其能量衰減的表示方法；光的散射—即光線入射到材料，由於材料內部結構不均勻，也就是傳播介質的不均勻性造成光線偏離原方向軌道的現象。

一般而言，發泡材料的透光率很低。為何原本接近透明的塑料，在發泡後透光度會大大下降呢？其中必定與某些因素的影響有關。在影響透光率的 3 個因素中，由於光的反射及吸收和材料的本質較為相關，但是發泡後並不會改變材料的本質，只會改變材料內部的結構，因此應和這兩者較無關係。由此推斷應是內部結構的改變影響了光的散射，進而改變了發泡材料的透光率。

也就是說，較合理的解釋是，高分子材料在發泡後，由於內部會產生許多泡孔，

造成不均勻的孔洞結構，使得光在行進中受到泡孔泡壁的影響而散射，透光率因而下降。

因此，提高透明度最直接的方法就是一把泡孔縮小，以避免光的散射。有學者發現，當泡孔孔徑小於 50 nm 時，由於泡孔孔徑已遠小於可見光波長，光波可以直接繞過泡孔而不是被泡壁散射，使泡材的透光率開始上升，這性質使得奈米泡材具備更廣泛的潛在應用價值。另外，由於奈米泡材的熱傳係數甚低，這個特性甚至可讓奈米泡材製備成絕熱玻璃，在建築節能中有很大的應用潛力。

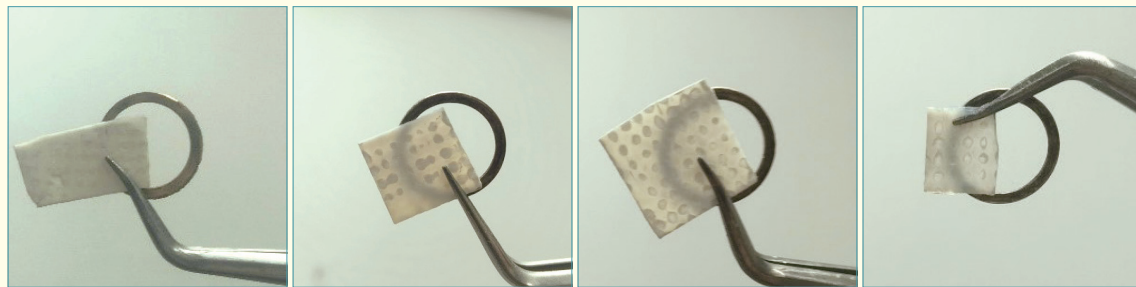
透明奈米泡材的應用

透明發泡材料可以有多种用途，以節省更多能源，例如在建築方面。建築物的外部主要由窗戶、屋頂、外牆等所構成，對於一般房屋而言，約 60% 太陽熱能會經由窗戶進入室內。

窗戶大多使用玻璃，當太陽光照射到玻璃時，一部分能量會直接穿過玻璃進入室內，另一部分能量則經由玻璃吸收後，再轉換成熱能向室內與室外傳遞。一般玻璃只能隔絕經由窗戶進入熱能的 7%，但由於美觀與採光的需求，玻璃大量運用在建築物上，而窗戶的隔熱性能是影響建築空調用電的重要因素。因此對建築用隔熱材料來說，阻隔熱是首先要解決的課題。

熱能傳遞的機制包含輻射、傳導、對流。為有效降低由窗戶進入室內的熱能，會加裝窗簾或隔熱玻璃，而窗簾會阻擋光

奈米泡材的熱傳係數甚低，這個特性可讓奈米泡材製備成絕熱玻璃，在建築節能中有很大的應用潛力。



泡孔大小 100 nm

泡孔大小 45 nm

泡孔大小 41 nm

泡孔大小 38 nm

隨著孔徑越來越小，泡材也越來越透明。

進入室內影響採光，選擇隔熱玻璃雖然可以兼顧照明與美觀，但是價格較昂貴。而發泡材料由於物質內部具多孔結構，可以有效降低熱的傳導和對流所造成的能量交換，以及阻絕部分的輻射能，對於熱能應有很好的阻絕性，可以減少熱以傳導或輻射的形式傳遞至室內。

如果可以使用具有高隔熱性能的透明奈米泡材取代玻璃，因為其可把傳導或輻射的熱隔絕於戶外，並且允許部分的可見光進入室內，便可以有效降低熱能傳遞至室內，達到減少空調用電的目的。把透明泡材製作成透明隔熱材料，假如以類似隔熱玻璃的形式應用在建築、汽車玻璃上，除了節省空調用電外，還可以利用自然採光營造舒適明亮的室內環境，也可節省照明設備用電，對於節能減碳，降低地球暖化有一定程度的貢獻。

目前已有實驗室以批式法製作出透明發泡材料，例如 PEI、PMMA 等透明發泡材料的製造，但是仍在研發及改良階段。

前瞻性與創新性

奈米發泡材料應用的可能性非常廣泛，高分子材料發泡技術可說是 21 世紀重要的材料關鍵技術。奈米發泡材料具超隔熱性質，在能源方面有很大的應用潛力，它的超結構性質與耐衝擊性，對於材料的應用也是很大的利基。也因此，大型塑膠公司都在這方面的專利布局。若能進一步大量生產，很可能為高分子產業帶來一波新的革命。

在溫室效應日漸加劇與石化原料短缺的今日，發泡技術的再精進被視為具有節能減碳的意義，對於永續能源的落實也是一大進步。透明奈米泡材是目前各界關注的重點，若這一目標可以達成，則超隔熱、耐衝擊的透明玻璃不再是夢想，在建築材料的應用中前景無限。

葉樹開

臺灣科技大學材料科學與工程學系