



身輕如煙的固體

資料提供及撰文 / 國立成功大學電機工程學系楊宏澤教授研究團隊、國研院科技政策中心羅良慧副研究員
關鍵字 / 矽基氣凝膠、建材、氣凝膠複層玻璃、高隔熱性能、節能

計畫主持人

楊宏澤教授



計畫名稱

結合矽基氣凝膠之高效節能建材產品開發與量產計畫

計畫主持人

楊宏澤教授

共同主持人

洪錫勳教授、江育民副教授、陳長仁教授、李訓谷副研究員、何銘子教授

執行單位

國立成功大學電機工程系

義守大學化學工程系

國立金門大學工業工程與管理系

崑山科技大學機械工程系

國立成功大學能源科技與策略研究中心

吳鳳科技大學電子工程系

合作企業

中和製漆廠股份有限公司、成大昶閱科技股份有限公司、
佳東綠能科技股份有限公司

彷彿被凍結的煙霧，又是最輕的固體，是誰施了魔法？讓這層煙霧隔絕太陽的熱，卻允許太陽的光。讓我們撥開層層迷霧，一窺氣凝膠的真面目。

氣凝膠 (aerogel) 是一種具有奈米級孔洞的多孔性 (porous) 材料，一般以二氧化矽 (silica, SiO₂) 為主要成分，呈現 3-D 立體網狀結構的型式。氣凝膠的孔洞大小可以從幾奈米到幾百奈米，以整個材料來說，空氣佔有 80 % 以上的體積，也就是大部分的材料空間被空氣所佔據，造成密度極低的特性，也因此被稱為氣凝膠，可說是目前世界上最輕的固體。就外觀上而言，因為當中二氧化矽的粒子極小，所以氣凝膠一般呈現透明或是半透明的形態，像極了「被凍結的煙」。

氣凝膠的魔法：炎熱去去

如同前述的氣凝膠特性，在多孔材料的結構中，空氣占的比率稱為孔隙率，而氣凝膠的孔隙率可高達 99 % 以上。由於空氣具有極佳的絕熱性質，因此氣凝膠具有隔熱性，也就是熱傳導係數 (coefficient of thermal conductivity) 小 (註解 1)，適合應用於隔熱與耐燃材料上。再加上空氣的折射率 (refractive index) 為 1，使得富含空氣的氣凝膠也擁有低折射率的特性，幾乎是非常接近空氣的折射率，因此也具有良好的透光性。基於低熱傳導、耐燃、低折射率以及高透光等特性，讓氣凝膠在建築節能領域有極大的應用價值，可以顯著提高保溫、隔熱效果，又可滿足建築物的採光需求，所以在建築上常見以氣凝膠顆粒、氣凝膠氈、氣凝膠板 and 氣凝膠玻璃等形式加以應用，對應到建築節能領域的具體應用項目包含門窗、建築外牆、屋頂、塗料應用及混凝土添加劑等。另一方面，由於過往製造氣凝膠所使用的超臨界萃取乾燥程序需要耗費很高的成本，且多為國外廠商才有能力進行量產，因此簡易又便宜的製作方式，即成為氣凝膠相關產品可否量產且進入市場的首要挑戰。再加上氣凝膠的易脆性，是因為結構裡固態材料所占的體積比率太小，使其結構極為纖細，造成易脆的現象，此種特性也成為開發產品及應用時必須克服的問題。

為協助建築物保溫、隔熱進而達成節能之功效，國立成功大學電機工程學系楊宏澤教授研究團隊執行的「結合矽基氣凝膠之高效節能建材產品開

發與量產計畫」(以下簡稱本計畫)，以氣凝膠為基礎材料，依照建築物外殼主要三大構造：屋頂、外牆與窗戶，開發此三大構造的節能建材，並希望透過本計畫開發出具有高度節能效益之隔熱材料與玻璃，可達到比傳統建材在貨櫃建築物總體能源消耗上降低 30% 之節能效益。且讓我們乘著氣凝膠的魔法翅膀，拜訪零能耗貨櫃屋的誕生旅程！

(註解 1) 熱傳導係數 (coefficient of thermal conductivity)：是反映材料導熱性能的物理量，代表物質熱傳遞性能的強弱，單位為 W/m-K。熱傳導係數很大的物體是優良的熱導體；而熱傳導係數小的是不良的熱導體或為熱絕緣體，一般而言，金屬的熱傳導係數最大，非金屬固體次之，液體的較小，而氣體的最小。

圖 1 氣凝膠，也稱作空氣膠或稀密封，具有良好的隔熱能力





暑氣消失的密室：零能耗貨櫃屋

依我國台灣電力公司《建築物節約能源簡介》指出，在建築相關用電中，我國住宅及商業用電所消耗電力佔總用電 30%，是非工業生產中最主要的耗能。其中，空調用電系統佔建物總用電量 43%，照明用電量約佔 26%，因此如要改善建築物能耗，可考量以減輕空調及照明用電為目標。再者，由於建築物外殼建材對建築物能耗表現有相當大的影響，所以發展高效節能且透光的外牆建材已成為建築物之主要節能手段，將可有效地減少進入建築物的總熱量，使室內的溫度不會上升過快，採光不會過暗，令人感受較為舒適外，也可以減少空調及照明用電等，進而降低住商部門用電的尖峰負載需求。有鑑於此，本計畫聚焦於建築節能之技術研發，生產出高穩定性與高純度的二氧化矽氣凝膠粉為基本組成材料，再進行相變化材料與氣凝膠的結合，以研發出兼具蓄熱及隔熱功能的建材，並且也成功開發出高效透光隔熱膠合玻璃與具隱密性的氣凝膠複層玻璃。最後，透過隔熱性能實驗、電腦模擬與全尺寸實驗，蒐集磚牆、屋頂、貼膜玻璃等傳統建材隔熱性能與節能效益等數據，再將上述本計畫所開發的建材納入模擬軟體與全尺寸實驗屋中以評估建築物的整體節能效益。

在楊宏澤教授研究團隊的共同努力下，關於二氧化矽氣凝膠量產與製程，目前已建置公斤級批次氣凝膠粉體製造實驗工廠，並完成三種氣凝膠製程技術開發，分別為氣凝膠常壓乾燥製程（10 公斤級）、次微米珍珠狀氣凝膠製程（粒徑最小），及氣

凝膠直接疏水乳化製程（成本最低），製程時間最短可為 12 小時 / 公斤，成本最低可降至 4,000 元 / 公斤，其中氣凝膠粉體的熱傳導係數小於 0.04 W/m-K，比表面積大於 700 m²/g，在性能上可媲美國際標竿產品。另外，在建築領域中，目前氣凝膠製備成本過高，因此降低原料價格是首要，才能使這種新型的功能材料得到廣泛應用。本計畫除了將氣凝膠製備原料改為工業級原料外，也使用蒸餾回收裝置回收製備相關溶劑（如酒精、正己烷等），不但可降低溶劑使用成本，更可減少對環境的污染。

在隔熱建材方面，本計畫以結合相變化材料與氣凝膠之複層建材製造技術，製造具儲熱、隔熱與防水的複合式外牆與屋頂建材。目前透過開發氣凝膠粉體分散於水性酚醛樹脂技術，促使水性酚醛樹脂的熱傳導係數下降 13% ~ 17%，也可應用在岩棉上降低熱傳導係數以增加保溫效果，現階段已開發出熱傳導係數小於 0.032 W/m-K 的氣凝膠岩棉。本計畫亦研發「隔熱塗裝」技術，即利用塗層使鐵皮屋及建築外殼具有儲熱與隔熱效果，初步測試採用隔熱塗裝技術者可比未採用者的室內溫度約下降 1.5°C，除此之外，同時也與成大昶閱科技股份有限公司（TecHome Technology Co., LTD.）合作研發並技轉具有隔熱塗層的牆體構造技術。再者，在隔熱玻璃方面，本計畫應用奈米研磨分散技術開發二氧化矽氣凝膠漿料，結合合作廠商佳東綠能科技股份有限公司（Oriental Green Energy Technology INC.）



之氧化銻鎢紅外線阻絕漿料以及財團法人精密機械發展中心（Precision Machinery Research Development Center, PMC）之陣列式超音波噴塗技術，開發出高透光高隔熱膠合玻璃，其優異的高透光及高紅外線吸收特性，可取代市場上 Low-E 玻璃（即 Low Emissivity Glass，是種低輻射鍍膜玻璃）。另一方面，本計畫開發的氣凝膠複層玻璃產品除了保有隱密性並兼具高透光度，其 U 值（註解 2）可降低 25%、Sc 值（註解 3）亦可降低 30%，後續本計畫將與英國西敏寺大學（University of Westminster）共同執行國際合作計畫，進行氣凝膠複層玻璃的異地研究以評估該產品在寒帶國家之節能效益。

最後在建築物節能的整體性能量測上，楊宏澤

（註解 2）熱貫流率（coefficient of thermal transmission, U 值）：為衡量材料隔熱性能的物理量，係指熱能經由隔熱材料傳導入室內的係數，單位為 W/m^2K ，U 值愈小表示該玻璃的隔熱能力愈佳。

圖 2 添加氣凝膠與相變化材料之隔熱塗料結合防水水泥砂噴灑於鐵皮



教授研究團隊透過全尺度建材節能實驗屋來驗證節能屋頂與氣凝膠複層玻璃確實可較傳統鐵皮屋頂與單層玻璃節省 30% 之空調耗電量外，同時也整合本計畫開發的產品與現有再生能源技術，實踐真實使用階段之節能效益，改善既有貨櫃屋易悶熱、難保溫及採光差等問題，並進一步改建成零能耗貨櫃屋，同時建立零能耗貨櫃屋設計方法與開發對應之建材模組。預計不久的將來會在高雄市、臺南市（如成大歸仁校區及沙崙綠能科學城）等地區建立零能耗貨櫃屋示範點，不僅成為建築節能及系統整合之典範，同時也帶動建築節能技術與產品發展以及相關產業的投入，朝向建築近零能耗的目標邁進。

（註解 3）遮蔽係數（shading coefficient, Sc 值）：代表玻璃建材對建築外殼耗能之影響程度，Sc 值越低代表因玻璃建材阻擋外界熱能（包含太陽熱能）進入建築物之能量越少，也就是該玻璃對太陽熱能有較佳的「遮蔽」效果。

圖 3 氣凝膠複層玻璃，保有隱密性兼具高透光度與隔熱效果



祝融的考驗：防火鐵捲門

如同前述提到的氣凝膠之低熱傳導與耐燃特性，本計畫掌握此特性研發出隔熱與耐燃性能優越之氣凝膠材料，期能擴大應用在節能耐燃建材上，使其在降低建築物能源使用量之際，同時又可滿足建築物的耐燃需求。楊宏澤教授研究團隊現階段成功地在酚醛發泡製程內添加少量氣凝膠，以增強酚醛發泡板之耐燃性能，並使產品耐燃性能從耐燃二級增進為耐燃一級的標準（註解 4），除此之外，更將氣凝膠酚醛發泡複合板製作成鐵捲門片耐燃填充材，讓一般的快速鐵捲門可具有 1 小時防火時效，同時也達到快速鐵捲門輕量化之目的。再者，本計畫也嘗試開發高隔熱與耐燃性能創新的竹木複合板材，此種「低導燃材料」使建築板具有低導燃效果，對減少火災的發生有所助益，後續將完成此種材料性能測試與驗證，期順利地應用本技術在木板及不織布上，以擴大應用的項

目與範圍。

另一方面，為了進行建材隔熱性能檢測，本計畫建置了完備的實驗設備與分析軟體，並將推動此項建材隔熱性能檢測技術申請 TAF 實驗室認證，希望打造出臺灣最完善之建材隔熱性能檢測實驗室，未來除提供業界建材隔熱、耐候性能檢測等相關技術服務，更將進一步擴大本計畫團隊與臺灣建材產業之鏈結。

（註解 4） 建築材料之耐燃級數係依據材料燃燒性能及材料檢驗方法來判定其符合的耐燃級數，而耐燃級數是以 CNS 國家標準來分級，分為耐燃一級即《建築技術規則》所稱之不燃材料，耐燃二級即耐火板、耐燃三級為耐燃材料。進一步來說，不燃材料是指如混凝土、磚或空心磚等以及其他經中央主管建築機關認定符合耐燃一級之不因火熱引起燃燒、熔化、破裂變形及產生有害氣體之材料。

圖 4 氣凝膠酚醛發泡複合板，其產品耐燃性能從耐燃二級增進為耐燃一級



4

凍結的煙留住涼爽舒適好生活

為了減少溫室氣體排放，同時減緩地球溫度升高的趨勢，聯合國於 2015 年底的聯合國氣候變化綱要公約第 21 次締約國大會（COP21）上，呼籲各國提出「國家預期貢獻」（Nationally Determined Contributions, NDCs），並進一步成為《巴黎協定》（Paris Agreement）的關鍵內容。國際能源總署（IEA）在 2016 年“Energy Efficiency Market Report 2016”報告中指出，共計有 189 個國家提交 162 項 NDCs 並納入《巴黎協定》之中，這些與 NDCs 相關的溫室氣體減排方案與措施預期將從 2020 年執行至 2030 年，推估可涵蓋全球與能源使用相關的溫室氣體排放量達 95% 之多。在這些減排方案與措施當中，對於各國如何降低建築的能源需求量提出不少行動規劃，又以日本及墨西哥提出的建築節能目標最為積極。

楊宏澤教授研究團隊針對建築物節能建材的成本、工法與穩定度三方面進行考量，進而開發出高效節能的氣凝膠應用建材，目前已完成 4 項臺灣專利申請，不僅帶領臺灣在節能建材相關技術取得領先地位，更可提升相關建材產業在國際間之競爭力。另一方面，為達成前述開發需求與計畫目標，本計畫面臨的關鍵挑戰包含開發產品的性價比必須

優於市場現有產品，同時必須整合高效能空調、照明設備、智慧電網、智慧能源管理系統與高效能再生能源設備以落實零能耗建築的規劃、設計與建造等。也正因為如此，本計畫由點到線到面逐漸推動各項執行工作，嘗試從關鍵節能建材開發深化至系統整合型的零能耗貨櫃屋設計與應用，進而建構全面性建築外殼節能技術應用加值鏈，包括了材料生產、設計研發及應用加值等環節，除了透過示範場域的建立以傳承本計畫的經驗與成果，更可以作為提供廠商進入高效節能建材市場的參考依據。

對臺灣而言，透過使用建築物的保溫與隔熱材料以減少熱的無形散失或不當吸熱，維持建築物內部的適宜溫度與良好採光，應可對建築物的能源消耗獲得立即性改善，尤其對既有的舊建築物而言，增加外牆的隔熱層效果可能是達到節能減碳的最經濟手段。如此看來，加強建築節能領域各項方案與措施的推動，不僅可以有效降低建築物的用電需求量，長遠來說，更可對我國 NDCs 項下建築節能目標作出貢獻，達成減少溫室氣體排放的政策目標。讓我們一起期待楊宏澤教授研究團隊施展更多的魔法，使「凍結的煙—氣凝膠」驅散炎熱，留住涼爽舒適的好生活！

圖 5 本計畫團隊合照



5