

建築節能材料：二氧化矽氣凝膠之應用

李訓谷¹ 鍾德華² 洪錫勳³ 林大惠^{4, 5*}

摘要

在臺灣，建築能耗約占全國總能耗的30%，而外殼建材影響建築物耗能所占的比例相當大，因此發展高性能外殼建材已成為世界各國相關產業的重要課題之一。有鑑於氣凝膠的低熱傳導(隔熱性能)、高透光、低折射率以及防火等優越性能，若能依照建築物外殼主要三大構造：屋頂、外牆與窗戶，以氣凝膠為基礎材料開發此三大構造的節能建材，將會提升建築外殼的節能效益。本研究團隊目前已利用階段式常溫乾燥技術加上疏水性改性，開發出200 g批次生產量之氣凝膠粉體。透過紅外光光譜儀(FTIR)官能基分析，掃描式電子顯微鏡(SEM)結構分析，BET比表面積及接觸角量測均顯示，本研究所開發之產品為典型奈米二氧化矽氣凝膠材料，不僅性能與國際標準產品不相上下，更具低成本、危險性低之優點。再者，本文探討現行市場上二氧化矽氣凝膠應用在玻璃建材與隔熱毯兩部分之產品特性，建議氣凝膠未來應用在隔熱建材之方向。

關鍵詞：二氧化矽氣凝膠、建材、隔熱性能、節能效益

1. 前言

二十一世紀由於二氧化碳濃度持續上升(圖1)，導致地球環境加速溫暖化現象，造成全球氣候變遷問題，因此國際上於2009年推動的減碳350運動、全球前二十大經濟體元首高峰會(G20, group of 20)至哥本哈根會議(COP15)之後，均著重於探討二氧化碳減量課題，思考如何有效降低二氧化碳排放量。

國際上針對節能減碳議題已具體落實至生活環境中，例如：英國標準協會(BSI)提出碳足跡認證(PAS2050)計算各產品之碳足跡，藉由日常生活中使用之各項產品累計碳足跡；日本亦於2009年也以英國標準協會提出之方法為基

礎，發展理想碳足跡制度方案(發展カーボンフットプリント制度の在り方(案))顯示碳足跡議題正快速發展中。

建築部門的環境足跡(environmental footprint)包含40%能源使用、30%原物料使用、25%的固體廢棄物、25%水使用量以及12%的土地使用。根據the Intergovernmental Panel on Climate Change's 4th Assessment Report (IPCC AR-4)預估在2004年與建築有關的溫室氣體排放約為86億當量二氧化碳噸，而到2030年大約會成長到2004年的兩倍，約為156億當量二氧化碳噸。再者，IPCC AR-4預估各部門的溫室氣體減量的潛勢(如圖2)可知，對於處理氣候變遷問題是聯合國的優先政策之前提下，有1/3能源相關的溫

¹ 國立成功大學能源科技與策略研究中心 助理研究員

² 國立成功大學能源科技與策略研究中心 博士後研究員

³ 義守大學化工系 教授

⁴ 國立成功大學機械工程系 特聘教授

⁵ 國立成功大學能源科技與策略研究中心 主任

*通訊作者, 電話: 06-2757575#62167, E-mail: thlin@mail.ncku.edu.tw

收到日期: 2014年10月17日

修正日期: 2014年11月28日

接受日期: 2014年12月09日

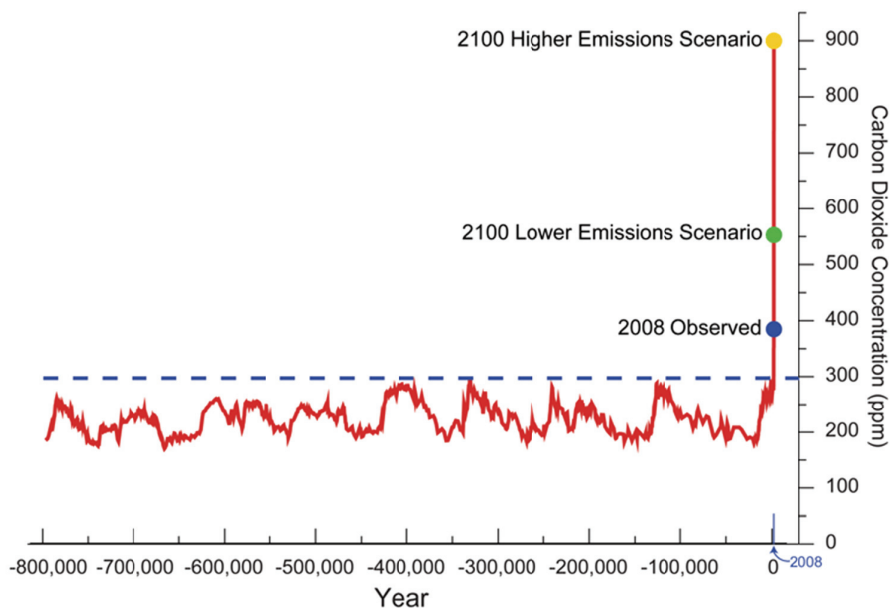


圖1 IPCC統計十萬年週期全球二氧化碳排放量[1-2]

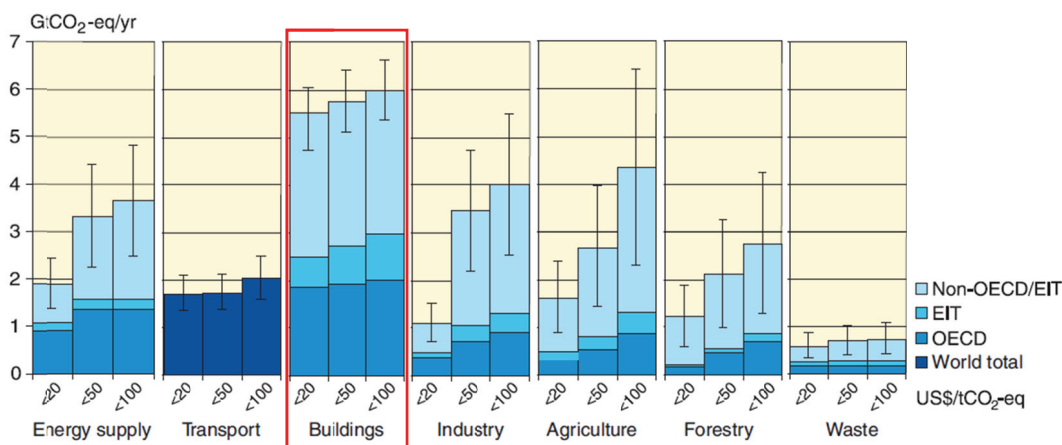


圖2 各部門溫室氣體減量潛勢[3]

室效應排放之建築部門具有相當大的二氧化碳減量潛勢[3]。

因此，現今世界各國為了解決氣候變遷與地球暖化問題，皆投注大量人力與物力進行解決之道的研究發展。由於建築能耗占一個國家的全國總能耗的比例相當大，例如美國的建築能耗大約占美國總能耗40%，臺灣大約為30%，中國大約25%。因此，降低建築能耗與都市熱島效應之策略已成為全世界關注的重點。對於降低建築能耗之策略除了提高建築設備的能源使用效率(例如：使用高能源效率的空

調、照明設備等)外，另一發展重點為降低建築外殼能耗。因此，開發高隔熱的建築材料已成為世界各國認為在建築節能減碳中相當具有成本效益的作為之一，亦是具有市場價值之產品之一。過去的隔熱建材的發展趨勢，大多朝向厚度加大與多層化的方向發展，例如：膠合玻璃所組成的雙層或是三層玻璃建材已被視為隔熱性能優異的玻璃建材。然後，此類複層建材會因為其本身的重量增加，而造成建築物結構必須承受較大的負載，甚至必須額外考量此類玻璃建材墜落所造成之人員安全問題。

根據能源局之資料顯示，進入建築物的熱量所佔比例以屋頂、外牆以及玻璃三者為最高，因此，最有效的建築外殼手法即是開發高隔熱外牆與屋頂建材，以及高透光高隔熱的玻璃建材。根據文獻預測，2013年全球的建築隔熱建材的市場，從2008年的8千3百萬美元成長到6億4千6百萬美元[4]，因此全世界相關廠商無不致力於研發高效能的新隔熱建材產品研發與成本降低。其中，目前世界各國對於氣凝膠的低熱傳導、高透光、低折射率以及防火性能感到十分的興趣，因而掀起一股氣凝膠應用於建材開發之熱潮，氣凝膠可謂是隔熱建材的明日之星。例如：歐盟科研計畫中的AEROCOINS FP7 European Project - Aerogel based Composite/hybrid Nanomaterials for Cost-Effective Building Superinsulation Systems [5]就是開發氣凝膠單一板材作為建築物外殼之節能材料。

二氧化矽氣凝膠是一種乾燥膠體，俗稱凍結的煙霧(frozen smoke)藍煙(blue smoke)，而這些形容都源自於它的透明性與物質中的光線散射能力。二氧化矽氣凝膠是1930年Kistler所發現[4]，Kistler教授利用傳統低溫溶膠凝膠法製成[6-7]，且用超臨界法乾燥，因此有網狀結構之高比表面積及低密度、低折射率之性質，當製造過程採用溶劑做熟化處理或熱處理之後，因結構上改變熱性質因而產生極大進展(如圖3)。氣凝膠其高比表面積 $500\sim 1,200\text{ m}^2/\text{g}$ 、孔隙率 $88\sim 99.8\%$ 、低密度 $20\sim 200\text{ kg}/\text{m}^3$ 、低熱傳導值 $0.015\text{ W}/\text{m}\cdot\text{K}$ 、低介電常數 $1.0\sim 2.0$ 、高透光



圖3 氣凝膠產品[8]

性及低折射率 ~ 1.05 吸引各領域研究者廣泛注意。也由於氣凝膠具有優良之隔熱性能，是建材絕佳之隔熱材料，目前市售產品熱傳導係數低於 $13\text{ mW}/\text{m}\cdot\text{K}$ ，比傳統材料優越；同時二氧化矽氣凝膠具有高的可見光穿透率， 10 mm 二氧化矽氣凝膠固體的太陽輻射穿透率為 88% ，若加上配合近紅外光的材料。即可有效讓可見光通過而阻絕紅外光，用於建物可兼顧保溫隔熱與照明，是提高居住品質之重要材料。

有關氣凝膠的應用，最早是1922年美國馬里蘭州Davison公司建立矽凝膠生產廠，主要用途為武器的防潮。二次戰後，矽凝膠在其它領域的應用開始被挖掘出來，於是Davison公司於1948年進一步開發出微米級氣凝膠，在市場很快發展成為消光劑的主要組成，該公司於1954年併入W.R.Grace，以開發微米級 SiO_2 氣凝膠為主，在1960年後期，因應市場需求陸續成功開發出二十多類產品。此外尚有日本Sylsicia生產的SY系列以及韓國DCC公司的ML系列等類似產品。德國Worms公司也在1980年後生產易分散型消光劑ED系列產品，使用更方便、節能效果好。

氣凝膠生產相關技術的學術研究已趨於相當成熟。近年來，由於節能產業的發展逐漸深入一般建築產業中，因此具備節能、健康，耐候、高安全性、高可靠度，且耐用之建材即因應而生。氣凝膠在建材方面應用範圍極廣，板、隔熱毯、玻璃、塗料等。除了在建材方面之應用，氣凝膠也能應用於太陽能系統超熱絕緣體、冰箱、保溫瓶、高效催化劑和催化劑載體，氣體和生物感測器，電池、勻相催化劑裝置、和用於電路的低介電質材料。根據氣凝膠市場評估報告[9]，2013年氣凝膠(包含矽基、碳基以及鋁基氣凝膠)總產值為2億2千萬美元，2020年預估產值為18億9千7百萬美元，2014到2020年的年均複合增長率為 36.4% 。

氣凝膠產品製備程序繁雜，與傳統矽膠製造方式相距甚遠；產品要求純度高， SiO_2 含量 $>99.5\%$ ， Fe_2O_3 含量 $<100\text{ ppm}$ ；粒徑分布狹窄，

多孔型物質的微米級分級難度大，一般分級設備做不到；微米級產品，其表面能增大易團聚，不易分散到各種使用介質中，須進行特殊表面處理，才有良好的使用性能。因此，上述產品仍為少數幾個跨國公司壟斷，臺灣目前仍處開發的初級階段。目前有關矽基氣凝膠的材料生產與應用在建材的現況如表1所示。

由於將氣凝膠應用在提升建築材料之性能，需要穩定性高以及成本低的氣凝膠生產技術，因此本研究之目的為生產出穩定性與純度高的二氧化矽氣凝膠粉體，提供作為隔熱建材研發的基本組成材料。

2. 矽基氣凝膠製程

SiO₂氣凝膠之製造有3個步驟：成膠預備、熟化與乾燥，各步驟之目的與製程分述如下：

2.1 成膠預備

成膠預備是透過溶膠凝膠過程可得到矽凝膠，在含矽之溶液中透過催化產生凝膠作用而得到凝膠，而凝膠依其分散之溶劑不同可分為水凝膠(hydrogel)，酒精凝膠(alcogel)及氣凝膠(aerogel)。

矽氣凝膠之先驅物為烷氧矽化合物如矽酸

甲酯(TMOS)或矽酸乙酯(TEOS)，首先在TMOS或TEOS等有機矽中加入適量水和催化劑，使之發生水解反應[10]



式中R為烷基，水解生成的矽酸再脫水縮聚，即



溶膠凝膠過程為反應物在溶液中首先生成初粒子，粒子長大形成溶膠，溶膠粒子相互交聯形成三維的網路結構即凝膠。溶液中粒子的長大、歧化和交聯，成核速率、粒子生長速率和交聯速率影響凝膠的最終結構，而氣凝膠可由此溶液中分離而得。事實上利用烷氧矽化合物作為先驅物質之成本較高，如今多已用廉價之水玻璃或矽酸鈉當矽源[11]，水凝膠即在矽酸鈉溶液中用鹽酸或硫酸酸化而得[12-13]。

2.2 熟化

在第一步成膠預備形成之凝膠先在母液中熟化，熟化使凝膠分子間之鍵結力更強，乾燥時使凝膠不致收縮。

當溶膠達到凝膠點，聚合之矽物質將透過鏈接連到整個溶液，然而凝膠初始形成時強

表1 全球氣凝膠生產現況[作者整理]

公司	國家	產品				
		粉體	板材	隔熱毯	玻璃	塗料
AMERICAN AEROGEL CORPORATION	美國	✓	✓			
ASPEN AEROGELS INC.	美國	✓		✓		
CABOT CORP.	美國	✓	✓	✓		✓
CF TECHNOLOGIES INC.	美國	✓				
DOW CORNING CORP.	美國	✓				
MAEROTECH SDN BHD	馬來西亞	✓				
NANOPORE INC.	美國				✓	✓
OCELLUS INC.	美國	✓				
SVENSKA AEROGEL AB	瑞典	✓	✓			
TAASI CORP.	美國	✓				
THERMABLOK INC.	美國	✓	✓			

度往往較差，主鏈上物質仍含許多未完全反應之烷氧矽，為提高凝膠強度以抵抗乾燥產生之應力，凝膠常需經熟化處理，熟化過程也可以看作是凝膠化作用之繼續，使水解與縮聚仍繼續一段時間，使凝膠之網狀結構形成，可利用調整pH，濃度及水含量來強化分子間之鍵結力[14-16]，使溶液相的單體或小的凝膠團簇繼續粘接並與網路聯接，已形成的凝膠網路間發生交聯，網絡逐漸變粗凝膠強度提高使結構穩定。熟化為擴散控制，因凝膠為網狀結構之故，攪拌對熟化無影響，而擴散受膠厚影響，膠厚也影響熟化時間及產能。熟化之後孔隙間水分需要排除，使乾燥可以進行，可用乙醇或正己烷排水[15]，孔隙間剩餘水分無法用超臨界乾燥排除，會造成膠體不透明及密度增加。

2.3 乾燥

乾燥是氣凝膠製備重要而關鍵的步驟，乾燥受毛細壓力之影響，過程中由於有巨大的收縮力在毛細管中產生，使凝膠易於變形和碎裂。欲避免變形與碎裂，需要採用極慢的乾燥速率，安全乾燥速率甚至會耗時超過一年。氣凝膠材料若要在工業上大量應用，就必須縮短乾燥時間，因此找到安全迅速的乾燥方法是很重要的。二種最常用乾燥方式為常壓乾燥(APD)與超臨界乾燥(SCD)，前者不可避免會產生毛細應力，而後者利用超臨界溫度與壓力去除孔隙間液體，可避免產生毛細應力。

超臨界乾燥(SCD)是氣凝膠製備中最有效的乾燥方法。SCD分為高溫(HTSCD)及低溫(LTSCD)，其中前者與建材氣凝膠無關，因此重點放在後者，LTSCD超臨界乾燥的過程分三步驟[17]：將凝膠放在高壓釜中並加入CO₂，增壓至100 bar，使CO₂取代孔隙間溶劑再升溫至313 K，然後等溫減壓至常壓，再降溫至常溫。這樣凝膠孔隙內液體可不經氣液平衡而達到超臨界狀態，氣液介面不會形成，而在快速減壓中凝膠孔隙內液體可直接變成氣體，即可得到無碎裂的氣凝膠。CO₂超臨界乾燥的成

功應用，使乾燥時間縮短，同時可避免使用溶劑，操作費用也大幅降低，使工業應用變得可行又可靠。相對於昂貴之SCD，常壓乾燥APD可再降低成本引起很大研究興趣，APD分二步驟進行：首先將矽凝膠烷基化[18]形成疏水性凝膠，再進行常壓乾燥[19]。超臨界(Super Critical)乾燥技術缺點主要為生產設備具有高溫、高壓的高風險，生產設備費用高，初期投資(設備、原料)費用高，不能連續生產，生產時間週期長。

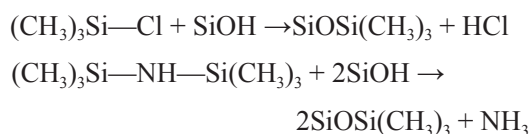
常溫常壓乾燥技術則不使用任何離子交換樹脂，脫水/防水的過程可同時進行，以提高效率，進度時間也縮短不少，常溫常壓下生產所需時間是5~45 hr (原需要100 hr以上)，有持續性大量生產的能力；以水玻璃為原料，成本較低，成品具有價格競爭優勢，僅為原來的1/10~1/8。此兩種乾燥流程迥異，但製備的氣凝膠性能基本一致，常溫乾燥技術具有很好的創新性，生產出的產品性能能夠滿足需要，且具有較高的附加價值。

2.4 氣凝膠的疏水性

因普通的SiO₂氣凝膠表面具多孔結構及親水性矽羟基，使得SiO₂氣凝膠很容易吸收水，造成材料的負荷增加，使抗拉強度大幅度降低，有時甚至會導致SiO₂氣凝膠裂開損壞。目前，由於製備需要高溫高壓或高壓的超臨界乾燥設備，以及價格昂貴的醇鹽原料，如矽酸乙酯或矽酸甲酯等，使奈米SiO₂氣凝膠作為隔熱材料的發展受到限制，僅在航太領域或貴重設備儀器中應用。因此，如何改質SiO₂氣凝膠，使由親水變為疏水，使用常壓乾燥並保持氣凝膠獨特的結構，開發出節能隔熱建築材料顯得至關重要。

傳統超臨界乾燥製法過程繁複，須用大量溶劑作置換用且改性劑用量也很龐大，Schwertfeger [11]指出，使用100 g濕凝膠需54~100 g改性劑(TMCS及HMDSO)，使得採用廉價水玻璃為原料變得毫無意義。Bhagat [20]

採用HMDSO為改性劑且在成膠前加入改性劑，可使改性更完整更快速達到疏水性更佳，大大節省改性劑用量，配合常壓乾燥，改善了製備時間與成本。因此，採用水玻璃加上常壓乾燥可大大降低成本，目前已有許多相關的研究文獻發表，但商業製程仍待開發，因製造時間長(6天)及溶劑置換需大量溶劑。利用水玻璃及常壓乾燥製備氣凝膠時，表面改性也是很關鍵的，可因此避免乾燥時因矽膠團之縮合而體積收縮，同時改性可保有氣凝膠之高比表面積及高孔隙率。改性方法分為(i)成膠之後改性與(ii)成膠之前加入改性劑使在成膠過程中達到改性作用，前者為傳統水玻璃利用常壓乾燥(APD)製備氣凝膠之方式，其溶劑置換及表面改性係用擴散方式進行，故需大量溶劑及耗費時間長造成成本增加。後者優點為改性時間短，先將表面改性劑加入膠溶液時，促使凝膠改性較均勻，此成膠前之改性反應可用下式說明：



表面改性反應進行時在矽凝膠表面形成疏水層，使水被迫排出，如同溶劑置換。

在上述的製備氣凝膠過程中，凝膠化的過程相當重要，它決定了凝膠的結構與品質。影響氣凝膠製程的參數包括矽醇與矽水比、pH、水解時間、成膠時間、改性劑量等等。本研究是以矽酸四乙酯(TEOS)為原料，經過酸鹼催化製備出醇凝膠，即用乙醇(EtOH)、TMCS、正己烷混合溶液對醇凝膠進行溶劑交換-表面改性，再以階梯式升溫常壓乾燥，合成出氣凝膠。其使用製劑原料矽酸四乙酯為 $(\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4)$ ，氫氧化銨 (NH_4OH) ，乙醇 $(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH})$ 和鹽酸(HCl)，以二次蒸餾水來製備催化劑鹽酸及氨水之所需濃度。

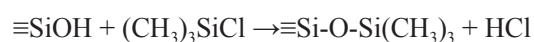
本研究目前最佳二氧化矽氣凝膠製作實驗步驟如下：在250 ml燒杯中將莫耳數比1:3:6之

矽酸四乙酯(TEOS)、乙醇(EtOH)及蒸餾水在50°C恆溫攪拌條件下進行混合，隨後步驟中，再將酸性催化劑0.1 M HCl逐滴加入溶膠溶液中至pH值3.5進行水解反應，並滴加鹼催化劑0.1 M氨水至pH值6進行縮合反應，形成凝膠，在凝膠中加入乙醇250 ml並於室溫下熟化，再用正己烷進行溶劑置換，將alcogels浸泡於正己烷溶劑中。乙醇/三甲基氯矽烷(TMCS)莫耳數比2:3；三甲基氯矽烷(TMCS)/正己烷體積比1:4.5進行表面改性，隨後再以正己烷及乙醇重複清洗凝膠，並靜置後進行階段式乾燥，階段式乾燥的控制溫度依序為65°C、80°C、120°C、200°C，最後將氣凝膠樣品冷卻至室溫，並進行氣凝膠特性分析。

本研究利用BET比表面積測定儀(型號NOVA 1000型)以孔徑分佈通過，使用多個點之 N_2 氣體的吸附在不同分壓的量的BET分析($0.05 < P/\text{PO} < 0.3$ ，氮分子的截面積 = 0.162 nm^2)來確定氣凝膠的比表面積，和一個單一的凝結點($P/\text{PO} = 0.99$)用於量測孔徑和孔體積。利用紅外光光譜儀(FTIR)進行分析確認其表面改性後的成分，採接觸角分析量測其疏水性能，最後使用掃描式電子顯微鏡(SEM)分析儀與穿透式電子顯微鏡(TEM)對奈米多孔二氧化矽氣凝膠微結構(形態)進行觀察。

本研究初期因無法穩定各參數變因，故製備出低比表面積(200~500 m^2/g)及無網狀結構之白色粉末乾凝膠。從圖4可得知經調整各參數值(矽醇與矽水比，pH，水解時間，成膠時間)後，即得到高比表面積(~1091 m^2/g)、高孔隙率之氣凝膠。

本研究針對二氧化矽氣凝膠其疏水能力進行分析，該醇凝膠含極性基團，須以烷基/芳基做表面改性，這是常壓乾燥前一個必不可少的步驟，因此相鄰的矽基團，會形成新的矽氧烷鍵。在本研究中醇凝膠的表面被有機三甲基氯矽烷反應，以下為表面改性的化學反應式：



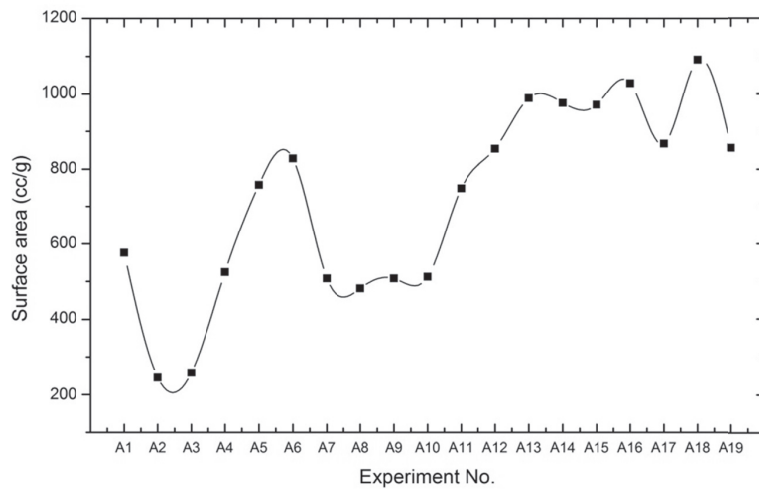


圖4 各批次比表面積上升趨勢圖[作者整理]

表面改性前後之氣凝膠之紅外光光譜比較結果，分別如圖5(a)、圖5(b)所示。可得到下列結果：

1. 圖5(b)之特徵峰 3414.69 、 847.48 、 1557.99 cm^{-1} 與改性前之數值比較均減弱，此說明 SiO_2 氣凝膠在疏水處理後仍含有少量矽羟基，但是數量比疏水處理前明顯減少。
2. 圖5(b)之特徵峰 2964.5 、 1257.41 、 847.489 cm^{-1} 表示 Si-CH_3 振動，顯示在疏水處理後骨架表面已接上矽甲基。
3. 圖5(b)之特徵峰 1090.32 、 668.929 cm^{-1} 表示 Si-O-Si 的反對稱伸縮振動、對稱伸縮振動以及

彎曲振動。

本研究將其疏水改性後二氧化矽氣凝膠進行接觸角分析，改性後氣凝膠之疏水角為 138° (如圖6所示)，介於疏水性($90^\circ \sim 120^\circ$)與超疏水性(150°)之間；亦即呈現其疏水特性，證實氣凝膠的表面改性成功。利用掃描式電子顯微鏡 (SEM)觀察其表面結構，如圖7，(a)圖為早期之乾凝膠，表面無孔洞及網狀結構、(b)為氣凝膠，相較於(a)圖，可看出氣凝膠中的有類似海綿的網狀結構，二氧化矽的顆粒形成之鏈狀結構為氣凝膠骨架，疏鬆的內部孔隙充滿氣體，尺寸分布約 $2 \sim 50$ nm，有相當高的孔隙率，故

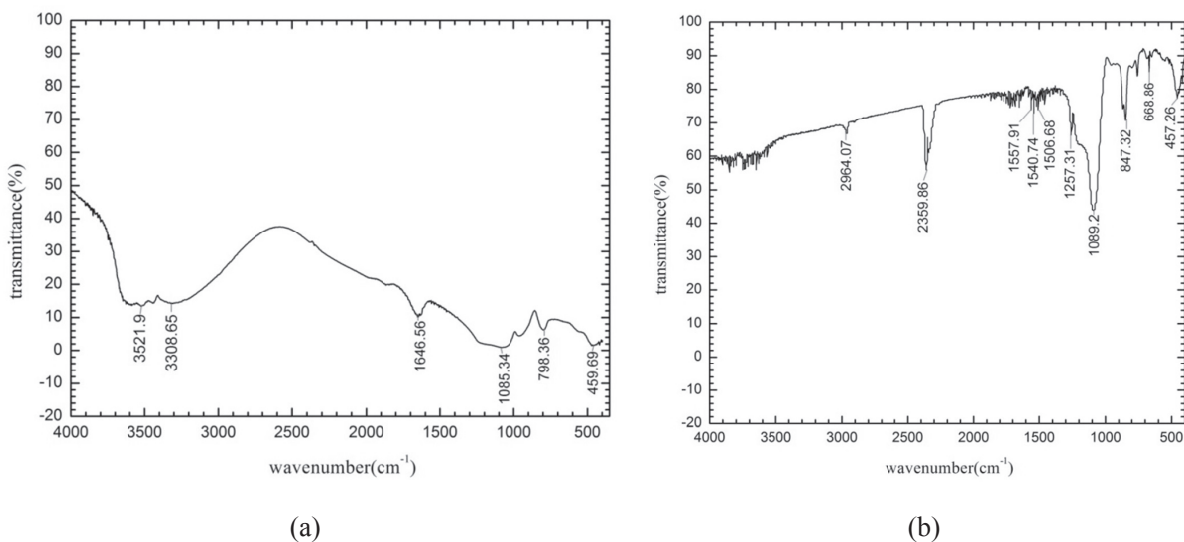


圖5 氣凝膠改性前(a)、改性後(b)之紅外光光譜比較圖[作者整理]

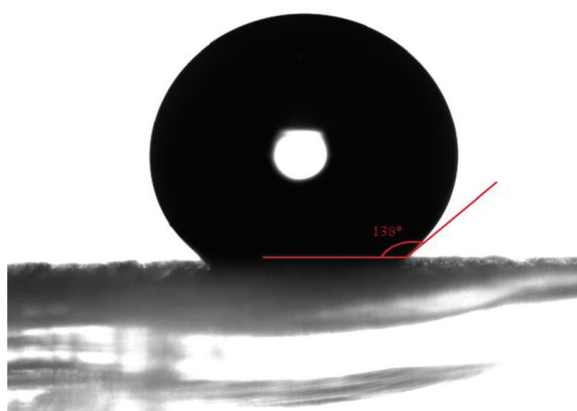


圖6 氣凝膠改性後之接觸角測試圖[作者整理]

可確認其為氣凝膠。

由上述氣凝膠基本性質量測：紅外光光譜儀(FTIR)官能基分析，掃描式電子顯微鏡(SEM)結構分析，具有之高比表面積及疏水性之接觸角，均表明為典型奈米氣凝膠材料。再者，本研究以Cabot P300為基準標的(benchmarking)，比較相關之性能如表2。由表2可知，本研究所生產之氣凝膠在比表面積、疏水性以及製程穩定性上均較標的物好，並且製作成本也應與標的物的製作成本相近，目前本研究使用高純度藥品配置後之成本約為市售產品價格之一半，為每公斤6,000元。相信未來若是批次生產量能拉高到公斤級，生產成本一定會再降低。再者，本研究所生產之氣凝膠在疏水性改性部分是在常壓乾燥階段前進行，因此所生產氣凝膠整體結構具備疏水性，不受氣凝

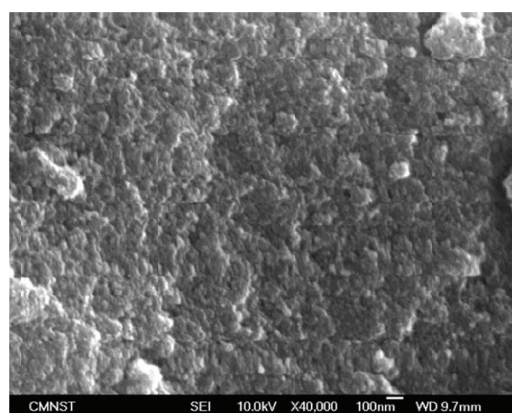
膠應用產品所需之粒徑影響。而一般市售的氣凝膠多是其表面具疏水性，將其研磨後氣凝膠的疏水性即消失。至於本研究所生產之氣凝膠因為比表面積較市售產品大，因此所量測的密度為 148 kg/m^3 ，約較市售產品的密度(150 kg/m^3)低。

3. 氣凝膠在建材之應用

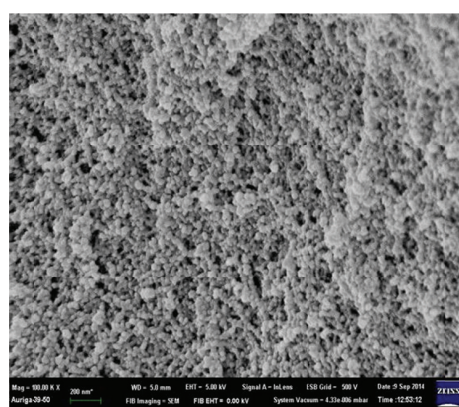
3.1 玻璃建材

氣凝膠具有優良之隔熱性能，同時具有透光性，可有效讓可見光通過而阻絕紅外光，用於建物可兼顧保溫隔熱與照明，是提高居住品質之重要材料。另一方面，因為二氧化矽氣凝膠具有高的可見光穿透率，10 mm二氧化矽氣凝膠固體的太陽輻射穿透率為88% (如圖8)，加上其具有隔音的性能，因此二氧化矽氣凝膠被應用在玻璃建材上，目前有顆粒狀氣凝膠與塊狀氣凝膠被應用製成複層玻璃。圖9及圖10為顆粒狀氣凝膠與塊狀氣凝膠被應用製成複層玻璃之示意圖。

為發展兼具隔熱及高透光度之氣凝膠玻璃，Buratti及Moretti [8, 21]使用塊狀(厚度14 mm)及顆粒狀(粒徑0.5~3.5 mm)之兩種氣凝膠為原料，填入4 mm平板清玻璃及4 mm Low-E玻璃中間(間隙為14 mm)進行測試。表3為作者依



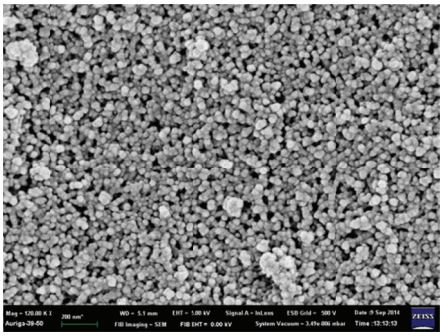
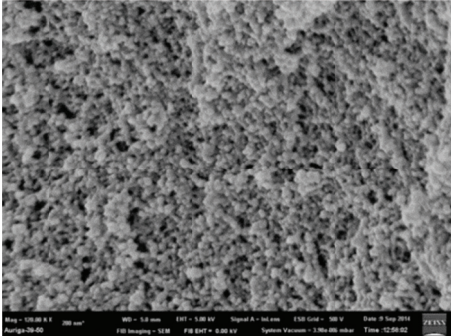
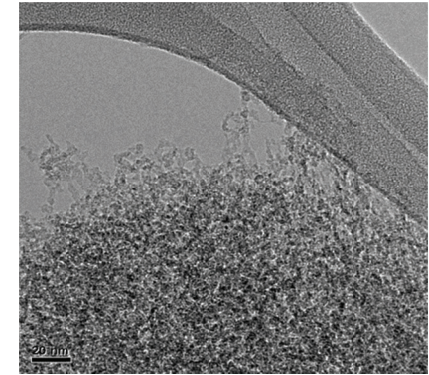
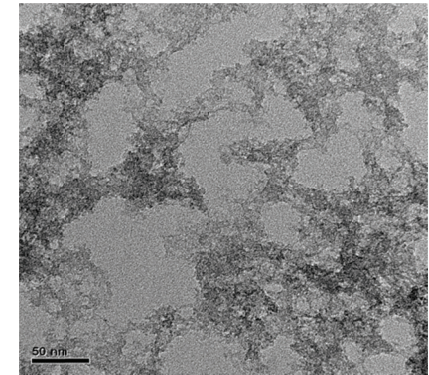
(a)



(b)

圖7 乾凝膠(a)、氣凝膠(b) SEM觀測圖[作者整理]

表2 產品性價分析與比較[作者整理]

項目	Cabot P300樣本	本研究產生Aerogel
比表面積	750 m ² /g	800~1,000 m ² /g
密度	150 kg/m ³	148 kg/m ³
SEM		
TEM		
乾燥技術	超臨界乾燥	常壓階段式升溫乾燥
疏水性	顆粒表面疏水	完全疏水
接觸角	150°	138°
批次生產量	公斤級	200 g
售價	12,000元/公斤(大量購買售價)	6,000元/公斤(成本)

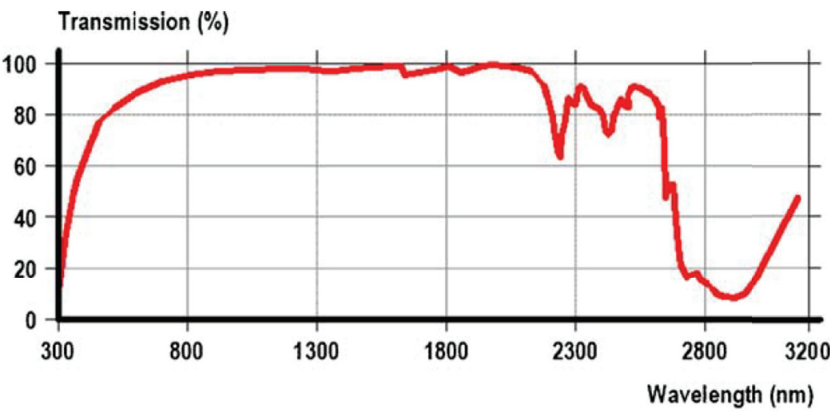


圖8 二氧化矽氣凝膠穿透率光譜[4]

照EN 410/2011測試標準量測玻璃的光學與熱學性質，並且與6 mm清玻璃與Low-E玻璃比較之可見光穿透率/反射率、太陽輻射穿透率/反射

率、太陽輻射熱得係數及演色性結果。表3之數據顯示塊狀氣凝膠玻璃的可見光穿透率比顆粒狀氣凝膠玻璃好。其可見光穿透率 = 0.62，

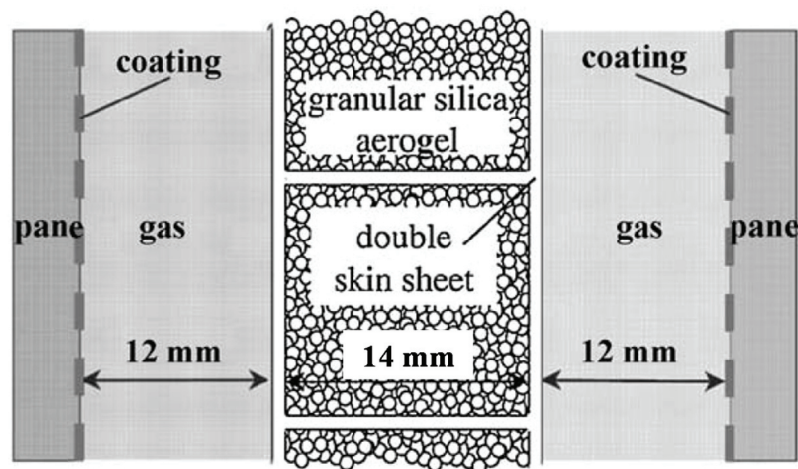


圖9 顆粒狀二氧化矽氣凝膠應用於玻璃之產品[4]

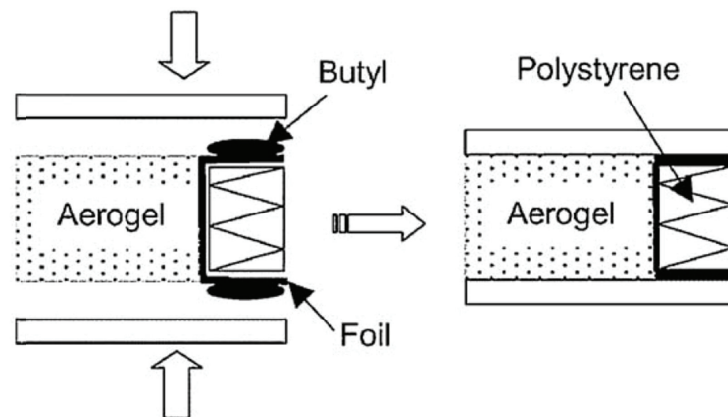


圖10 塊狀二氧化矽氣凝膠應用於玻璃之產品[4]

表3 氣凝膠玻璃與一般雙層中空玻璃之性能比較[作者整理]

試件	可見光 穿透率	可見光 反射率	太陽輻射 穿透率	太陽輻射 反射率	太陽輻射 熱得係數	U值	演色性
14 mm塊狀氣凝膠(aer)	0.78	0.07	0.80	0.06	—		91
6 mm清玻璃	0.88	0.08	0.79	0.07	0.82	5.79	—
AGC 6 mm Low-E清玻璃	0.68	0.09	0.54	0.09	0.60	4.31	—
4 mm清 + aer + 4 mm清	0.62	0.13	0.55	0.11	0.74	0.6	93
4 mm清 + aer + 4 mm LE	0.56	0.14	0.49	0.12	0.70	0.6	90
4 mm清 + 粒狀 + 4 mm清	0.29	0.13	0.29	0.12	0.36	1.0	93
4 mm清 + 粒狀 + 4 mm LE	0.27	0.13	0.25	0.12	0.35	1.0	91
4 mm清 + air + 4 mm清	0.81	0.14	0.70	0.12	0.77	2.7	98
4 mm清 + air + 4 mm LE	0.75	0.14	0.62	0.12	0.66	2.6	94

$U = 0.6 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ，太陽輻射熱得係數 = 0.74。與市售雙層Low-E玻璃相比，塊狀氣凝膠的U值可從 $2.6 \text{ W/m}^2\text{-K}$ 降低到 $0.6 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ，但只減少19%光穿透量；而顆粒狀氣凝膠對光穿透效果表現

不佳，顆粒狀氣凝膠則減少66%光穿透量，若氣凝膠粒徑降低則有機會改善可見光穿透率。再者，以鋁框及顆粒狀氣凝膠玻璃實際測試，整體窗戶的U值為 $1.69 \text{ W/m}^2\text{-K}$ ，比現行的雙層

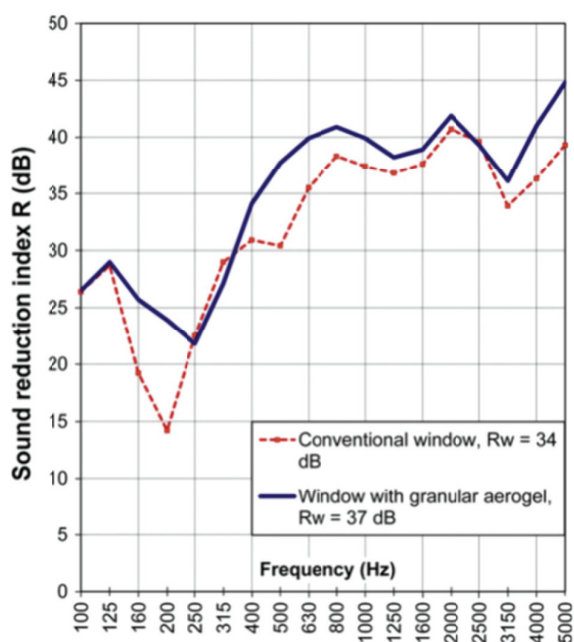


圖11 一般中空玻璃與顆粒狀氣凝膠玻璃安裝在鋁框窗戶之隔音性能比較[21]

玻璃鋁窗的U值($2.2 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$)還低，而且隔音性質($R_w = 37 \text{ dB}$)則較一般雙層中空窗戶($R_w = 34 \text{ dB}$)優越(圖11)，並且符合我國的高性能隔音綠建材標章的評定基準。由此可見，氣凝膠應用在玻璃建材上具有優越的隔熱性能與隔音性能。

前述之U值(thermal transmittance)，熱穿透率，其定義為單位時間，單位面積下，材料兩側每度溫差，可穿透之熱量，U值國際單位制為 $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ 。此熱量穿透材料兩側，乃包括傳導、對流、輻射等熱傳效應之疊加。對隔熱材料而言，熱穿透率值越低越好。

3.2 外牆隔熱建材

氣凝膠熱傳導性低，源於其固體骨架有低熱傳導性 λ_s (solid skeleton conductivity)、氣體熱傳導性低 λ_g (gaseous conductivity)，及紅外線輻射熱傳性低 λ_{ir} (radiative infrared transmission)，因參數彼此會互相影響，如紅外線吸收率改變會造成骨架熱傳導係數改變，因此利用數學方式欲把這三個參數彙總成一個熱傳導係數(overall thermal conductivity)是很困難的。氣凝膠的矽之熱傳導係數相對很高，但所占比

例很小且氣凝膠內部結構的閉合性孔道(dead ends)，使得熱傳導通路曲折又效率低，造成了其低熱傳導性。然而，氣凝膠的熱傳導性與其密度有關且有最低值，孔徑增加造成 λ_g 增加，而孔徑小則密度低。氣凝膠的氣體熱傳導係數 λ_g ，可用Knudsen效應加以說明，Knudsen效應表示氣體在孔道間的熱傳導是氣體壓力與孔徑的函數

$$\lambda_g = \lambda_{g,o} / (1 + 2\beta K_n)$$

其中：

K_n ：Knudsen數， $K_n = \ell_{\text{mean}} / \delta$ ， $\ell_{\text{mean}} = k_B T / (\sqrt{2} \pi d_g^2 P_g)$ ， δ ：孔徑， d_g ：氣體直徑， P_g ：氣壓， β 為常數介於1.5~2.0。

矽氣凝膠孔徑小且孔隙率高，使得其對熱傳導性有很大影響但也會受到Knudsen效應影響而降低， λ_g 甚至可再降低(i)透過填充低熱傳導性氣體(惰性氣體)；(ii)減少大孔徑數目；(iii)保持aerogel在真空狀態，在50 bar下熱傳導係數等於 $8 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$ 是可達到的。當溫度高於 200°C 時，輻射熱傳導是氣凝膠熱傳導係數主要影響因素，此時可加入碳黑吸收或分散紅外線輻射，用於抑制輻射熱傳導，通常在常壓下，氣凝膠熱傳導係數可降至 $13.5 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$ ，在50 mbar下可降至 $4 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$ ，一般在建築材料應用常溫下熱傳導係數約 $13.1\sim 13.6 \text{ mW/m}\cdot\text{K}$ 。

氣凝膠(圖12)被應用在建築外牆隔熱建材



圖12 二氧化矽氣凝膠應用於隔熱建材[4]

以美國Aspen Aerogels, Inc.所開發的Spaceloft[®]隔熱毯[22]最為普遍，Spaceloft[®]厚度約為10 mm，熱傳導係數為13.1 mW/m-K，傳統隔熱保溫材料的熱傳導係數約為Spaceloft[®]隔熱毯的2–2.5倍，而且Spaceloft[®]隔熱毯以玻璃纖維為基材，因此強度與彈性均較塊狀氣凝膠優越，適合應用在建築物外牆、屋頂與樓板的隔熱保溫上。

氣凝膠隔熱毯的價格約為單位面積1000臺幣或單位體積12萬臺幣，雖然單價較傳統隔熱材料貴，但是要達到相同隔熱效果時，氣凝膠隔熱毯的總造價是傳統隔熱建材1/10，並且使用氣凝膠隔熱毯會降低保溫層的厚度。

4. 結 論

二氧化矽氣凝膠具有高比表面積、高孔隙率、低密度、低熱傳導值、低介電常數、高透光性及低折射率等特性，吸引各領域研究者廣泛注意。也由於氣凝膠具有優良之隔熱性能，是建材絕佳之隔熱材料，氣凝膠已然成為高性能隔熱建材的主要應用材料，然而目前的高成本以及生產技術，讓氣凝膠應用在隔熱建材上並不普及。本研究利用TEOS為原料，藉由鹼催化sol-gel聚合反應，改變pH，水解時間、鹼性催化劑pH值及表面改性劑，並在常壓乾燥下，製備出高比表面積($\sim 1,091 \text{ m}^2/\text{g}$)、較大的孔體積及高孔隙率等優異物理性質之二氧化矽氣凝膠，產能也由20，100，提升至200克。在未來氣凝膠於隔熱建材的應用上提出下列的建議：

- (1) 氣凝膠應用在隔熱玻璃已經可以使玻璃的U值降低，但是目前氣凝膠產品都是無法完全透視。因此如何將氣凝膠製成完全透明的膠膜或是塗料是對氣凝膠玻璃的應用推廣有重大之影響。
- (2) 氣凝膠玻璃對於太陽輻射的阻隔效果不若Low-E玻璃優越，未來可以將具紅外線吸收的材料與氣凝膠混合製成同時兼具高透光、

高紅外線吸收以及高隔熱的單層玻璃或隔熱膜。

- (3) 氣凝膠隔熱毯是以玻璃纖維為基材，然而目前最常使用的建築隔熱保溫材料為岩棉、PU、PS等發泡材料，若氣凝膠可以與上述隔熱保溫建材結合，相信可發展出低成本且兼具隔熱與防火的材料。

誌 謝

本文為科技部能源科技代辦計畫(計畫編號：NSC 103-ET-E-006-007-ET)以及能源國家型計畫(計畫編號：MOST 103-3113-E-006-010-CC2)研究成果之一，由於科技部的支持，使本研究得以順利進行，特此致上感謝之意。另外，作者亦感謝極東貿易行股份有限公司協助提供Cabot P300氣凝膠作為本研究之基準比較。

參考文獻

1. IPCC/OECD, Revised 1996 IPCC Guidelines for Greenhouse as Inventories, 1996.
2. Climate Change Worksheet, Retrieved October 15, 2014, from <http://www.met.reading.ac.uk/~sgs02rpa/CONTED/climate-worksheet.pdf>
3. IPCC Fourth Assessment Report(AR4), 2007, Climate Change 2007: Synthesis Report.
4. R. Baetens, B.P. Jelle, A. Gustavsen, 2011, Aerogel insulation for building applications: A state – of – the – art review, Energy and Buildings 43, 761-769.
5. M. Moragues: FP7 NMP - European Commission, AEROCOINs FP7 European Project - Aerogel based Composit/hybrid Nanomaterials for Cost-Effective Building Superinsulation Systems, 2013.
6. S.S. Kistler, 1931, Coherent expanded aerogels

- and jellies, *Nature* 127, 741.
7. A.C. Pierre, G.M. Pajonk, 2002, Chemistry of aerogels and their applications, *Chemical Reviews* 102, 4243-4265.
 8. C. Buratti, E. Moretti, 2012, Glazing systems with silica aerogel for energy savings in buildings, *Applied Energy*, 98, 396-403.
 9. Global Aerogel Market (Form, Application, Geography) - Size, Share, Global Trends, Company Profiles, Demand, Insights, Analysis, Research, Report, Opportunities, Segmentation and Forecast, 2013-2020.
 10. G.A. Nicolaon, S.J. Teichner, 1968, Sur une nouvelle methode de preparation de Xerogelsetd'Aerogels de Silice de leursproprietestexturales, *Bullentin Societe Chimique de France*, 1900-1906.
 11. F. Schwertfeger, D. Frank, M. Schmidt, 1998, Hydrophobic waterglass based aerogels without solvent exchange or supercritical drying, *Journal of Non-Crystalline Solids* 225, 24-29.
 12. R.M. Jansen, B. Kessler, J. Wonner, A. Zimmermann, 1998, Method for the Subcritical Drying of Aerogels, United State Patent Number 5811031.
 13. R.M. Jansen, A. Zimmermann, 1997, Process for the Preparation of Xerogels, United States Patent Number 5647962.
 14. S. Hareid, M. Dahle, S. Lima, M.-A. Einarsrud, 1995, Section 2. Drying methodologies and sintering. Preparation and properties of monolithic silica aerogels from TEOS-based alcogels aged in silane solutions, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 186, 96-103.
 15. S. Hareid, F. Nilsen, M.-A. Einarsrud, 1996, Properties of silica aerogel aged in TEOS, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 204, 228-234.
 16. S. Smitha, P. Shajesh, P.R. Aravind, S. Rajesh Kumar, P. Krishna Pillai, K.G.K. Warriar, 2006, Effect of ageing time and concentration of ageing solution on the porosity characteristics of subcritically dried silica, *Microporous and Mesoporous Materials*, 91, 286-292.
 17. P.H. Tewari, A.J. Hunt, K.D. Lofftus, 1985, Ambient-temperature supercritical drying of transparent silica aerogels, *Materials Letters*, 3, 363-367.
 18. H.R. Kricheldorf, Silylation and Silylating agents, in: *Silicon in Polymer Synthesis*, Springer-Verlag, Berlin, 1996.
 19. C.J. Brinker, G.W. Scherer, *The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing*, Academic Press, New York, 1990.
 20. S.D. Bhagat, Y.H. Kim, Y.S. Ahn, J-G Yeo, 2007, Rapid synthesis of water-glass based aerogels by in situ surface modification of the hydrogels, *Applied Surface Science*, 253, 3231-3236.
 21. C. Burattiand, E. Moretti, 2012, Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems, *Applied Energy*, 97, 430-437.
 22. SpaceloftR Safety Data Sheet, Retrieved October 15, 2014, from [http://www.aerogel.com/products/pdf/Spaceloft MSDS.pdf](http://www.aerogel.com/products/pdf/Spaceloft%20MSDS.pdf)

Energy Saving Building Material: the Application of SiO₂ Based Aerogel

Shin-Ku Lee¹ De-Hua Chung² Richard S. Horng³ Ta-Hui Lin^{4, 5*}

ABSTRACT

The environmental footprint of the building sector includes 30% of energy use. The building sector is responsible for more than one third of energy-related GHG (Greenhouse gas) emissions and, in most countries, is the largest emissions source. As well known, energy saving and carbon oxide reduction should have Key Performance Index but not slogans only. Therefore, the integration of the various energy saving technologies used in Taiwan and other countries is applied for developing the innovative building material with high thermal-insulated performance in this study in order to enhance the capability international competition. In this study, a pilot scale process of a green energy material-Si based aerogel has been developed. The future research issues are also proposed for designing a glazing system with optimal visible-light transmittance, energy-efficient performance and building materials with aerogel, in order to meet the requirement for architectural application. The technologies developed in this integrated projects will be very helpful for Taiwan future energy saving, in particular in building energy performance.

Keywords: Si based aerogel, building material, high thermal-insulated performance, energy-efficient

¹ Researcher, Research Center of Energy Technology and Strategy, NCKU

² Postdoctoral Researcher, RCETS, NCKU

³ Professor, Department of Chemical Engineering, I-Shou University

⁴ Distinguished Professor, Department of Mechanical Engineering, NCKU

⁵ Director, Research Center of Energy Technology and Strategy, NCKU

* Corresponding Author, Phone: +886-6-2757575#62167, E-mail: thlin@mail.ncku.edu.tw

Received Date: October 17, 2014

Revised Date: November 28, 2014

Accepted Date: December 09, 2014