

主辦機構
Organiser



資助機構
Funding Organisation



技術提供
Technology Provider



開發基於超穩熱致相變材料的 智能控溫節能車窗玻璃

Development of Thermochromic Glass Mediated with Ultra-Stable Phase Change Material for Smart and Energy-efficient Automotive Window

技術手冊



目錄

編輯 Editors	2
------------------	---

出版 Published by	2
-----------------------	---

致謝 Acknowledgement	3
--------------------------	---

1. 前言 4

1.1 背景	4
1.2 智能控溫窗戶現時的市場發展	5
1.3 智能控溫窗戶優點、缺點及挑戰	8

2. 塗層材料製備 10

2.1 超穩 VO_2 複合相變塗層 ($\text{VO}_2 / \text{MoO}_3 / \text{SiO}_2$) 製備	10
2.2 VO_2 -Mo 複合塗層製備	12

3. 玻璃性能測試 21

3.1 超穩 VO_2 複合熱變色材料元素表徵、物相鑒定	21
3.2 超穩 VO_2 複合熱變色材料光學性能測試	23
3.3 超穩 VO_2 複合熱變色材料機械性能測試	25
3.4 超穩 VO_2 複合熱變色材料熱致相變性能測試	29

4. 結論與展望 31

4.1 結論	31
4.2 4.2 未來展望	32



編輯 Editors

黎偉華先生 Mr Waiwah LAI

楊浩坤先生 Mr Haokun YANG

王陳劭先生 Mr Chenjie WANG

楊浩鈺先生 Mr Haoyu YANG

盧匡行先生 Mr Honghang LO

出版 Published by

香港生產力促進局

香港九龍達之路 78 號生產力大樓

The Hong Kong Productivity Council

HKPC Building, 78 Tat Chee Avenue, Kowloon, Hong Kong

Copyright © 2026

香港生產力促進局

The Hong Kong Productivity Council

版權所有 翻印必究 All Rights reserved.

No part of this publication may be reproduced in any form, whether in electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

致謝 Acknowledgement

感謝香港汽車零部件工業協會，香港創新科技及製造業聯合總會，建朗電子（深圳）有限公司，新力環保科技有限公司，與深圳職業技術學院的支持。（以上排名不分先後）

Thank you for the support from Hong Kong Auto Parts Industry Association, Hong Kong Federation of Innovative Technologies and Manufacturing Industries, Smart Glory Electronics (Shenzhen) Co. Ltd, Sunny EP Technology Limited, as well as Shenzhen Polytechnic University. (List above is in no particular order)

該技術總結報告乃創新科技署撥款資助的創新科技基金項目中的其中一項成果。在此總結報告上的資料，或項目成員表達的任何意見、結論建議及展現的成果，並不代表香港特別行政區政府或創新科技署的觀點。

This technology summary is a publication under the ITF project which is funded by the Innovation and Technology Commission. Any opinions, findings, conclusions or recommendations expressed in this handbook (or by members of this project team) do not reflect the views of the Government of Hong Kong Special Administrative Region or the Innovation and Technology Commission.



1. 前言

1.1 背景及需要

近年來，能源與環境問題備受關注，而交通能源是其中的重要一環。能源是否充足與平衡，直接影響經濟發展、人口與城市化；隨著城市擴張，推動節能技術與設備愈發重要。

數據顯示，汽車能源消耗約佔發展中國家總能源的 20% 至 40%；在大灣區，交通能源使用量約佔綜合能源的 31%，已高於建築與電力；在香港，約 30% 的能源用於運輸。這些數字說明，減少交通領域的能耗刻不容緩，而減少車輛的能源損失是其中一項重點方向。在車輛能耗中，除行駛燃料外，車內的通風、製冷與製暖約佔近四成，車內溫度調節是主要的能量流失來源。以中國南方為例，亞熱帶的氣候使製冷需求高、產出的廢熱也多，進而出現熱島效應。車窗作為透明構件，兼具保溫、採光與通風等功能，對乘員的光熱舒適度影響顯著；因此，提升車窗的性能對提高能效與維持良好的車內熱環境十分關鍵。

車窗同時是車輛熱量交換的主要通道。透明玻璃能帶來良好視野，但也讓陽光與熱輻射更易進入車廂、造成升溫與能量損失。現有的材料塗層等調光技術已能調整透光度，但在耐候性、穩定性與紅外線管理上仍有限，難以完全滿足工業需求，亦難以適應多種隨時可變的外在環境。若能開發能隨外界溫度變化自動調節的車窗材料，結合光、熱響應特性構築更耐用的智能溫控節能系統，將更有助於兼顧節能與舒適。

理想的車窗應保持良好可視性與行車安全所需的可見光，並在白天盡量減少眩光，同時最大程度阻擋或反射紅外線與紫外線，降低車內環境升溫、減少空調負荷。在外界高溫時，車窗需要盡量減少太陽與紅外線熱進入；在低溫時，則應允許更多陽光進入，以降低暖氣使用的

需求。對於擋風玻璃、後窗與駕駛員側窗，既要確保可見光透明性與安全，又要在高溫環境下有效抑制紅外線熱量，達致節能降溫效果及提升汽車使用者的體驗。下文將作出更多圍繞智能變色控溫窗戶的討論。

1.2 智能控溫窗戶現時的市場發展

在 1970 年代的能源危機之後，學界與產業對節能玻璃開展了大量探索工作。隨後，市場上發展最為成熟的是低輻射（Low-emissivity, Low-E）玻璃，但可調性及應用場景受限。1980 年代，Svensson 與 Granqvist 等人提出「智能窗戶」概念，將具備光線調整能力的材料結合到玻璃或其他基材上，使窗戶能動態地調節太陽輻射，透過改變透射率、反射率與吸收率來改善室內環境並提高能源效率。經過多年發展，目前智能窗戶的主要技術可按觸發機制分類，包括電致變色與熱致變色等，而材料種類則包括鈣鈦礦、液晶及離子液體等，用以控制可見光與紅外線的通過與抑制熱量進入，同時可兼顧視覺透明度。

電致變色材料可在外加電壓下改變顏色或透明度，通常藉由可逆的氧化還原反應在不同透光狀態間切換。常見材料包括無機過渡金屬氧化物（如三氧化鎢 WO_3 ）與有機導電聚合物，這是一種主動調節機制，其優點是能按需求主動調節透光；但其不足在於需要外置電能及以系統進行控制，且其成本較高。

熱致變色材料會隨溫度改變光學性質，在特定溫度範圍內調整顏色或透明度，並可選擇性調節近紅外線吸收，同時可透過可見光。這是一種被動調節機制，會隨環境溫度自動變化透光率與色度。研究顯示，其在不同氣候與建築條件下可節省約 5.0% 至 84.7% 的供暖或冷卻能耗。相較其他類型，熱致變色窗戶製程簡便，甚至單層塗層即可應用，成本較低，亦無額外操作系統限制，因此相當適合用於智能窗戶，代表性材料為二氧化釩（ VO_2 ）。

可選用的材料方面，鈣鈦礦材料具有獨特的光電特性，可在受熱或受電場影響時產生熱致變色或電致變色效應，兼具高吸光性與可調性，適合高效能與長期應用。液晶材料介於液體與固體之間，受電場作用時分子會重新排列，改變極化與散射特性，快速在透明與霧化狀態間切換，響應快、可控性高，但整體透明度通常低於玻璃。離子液體由陽離子與陰離子組成，室溫下為液態，具有高穩定性與低揮發性；封裝於密閉玻璃結構後可表現出熱致變色或電致變色，並可與其他材料協同變色。然而其對水分較敏感，必須嚴格防潮密封，導致成本與結構複雜度較高，距離大規模商業化仍有距離。

在熱致變色材料中，二氧化鈮（ VO_2 ）因可逆的金屬—絕緣體相變與優異的光學調控，被視為最具前景的無機熱致變色材料之一。二氧化鈮在約 68°C 發生相變：室溫下為單斜晶系半導體相，有較高的近紅外線透過率；升溫後轉為金紅石四方晶系金屬相，能強烈反射或阻擋近紅外線，從而抑制熱量進入；比較相變前後的材料特性，可見光透過率變化通常較小。由於近紅外線約佔太陽輻射能量的 50%，二氧化鈮塗層可在高溫時選擇性阻擋近紅外線。透過摻雜或應力工程，可將相變溫度調整至更接近日常環境，提升使用便利性。二氧化鈮薄膜可藉由物理氣相沉積（PVD）、化學氣相沉積（CVD）或溶液法製備，並在透明基材上透過多層結構優化光學性能。

二氧化鈮的熱致變色性質於 1959 年由 Morin 首次報導，隨後 Goodenough 給出理論，並在 1980 年代開始引入二氧化鈮的智能窗戶研究。此後的研究重點主要集中在同時提升可見光透過率與太陽能調制能力，可見光透過率（ T_{lum} ）意指可見光範圍穿透材料的比例；太陽能調制幅度（ ΔT_{sol} ）則是材料在兩種變色狀態下，太陽能透過率（ T_{sol} ）的差值。若材料的 T_{lum} 越高，窗戶越通透； ΔT_{sol} 越大，控熱越有效。

然而，兩者往往難以同時最大化：要提升通透度，通常需加入抗反射塗層並精準控制折射率與厚度，使反射光產生干涉抵消，但實驗上難以穩定達成，且多數設計均基於單一波長（約 550 nm）設計，難以覆蓋整個可見光譜，甚至可能降低 ΔT_{sol} 。因此，研究者常在此兩個參數間尋求平衡，並透過結構設計、光學疊層與成分工程協同優化材料性能。

在製備與表面工程方面，製作二氧化鈦塗層的常見策略包括納米薄膜、多孔薄膜、多層結構（如加入 TiO_2 、 SiO_2 ）以及周期性圖案等。構建納米二氧化鈦結構的技術涵蓋水熱法、磁控濺射、化學氣相沉積（CVD）、物理氣相沉積（PVD）、溶膠－凝膠法、受限空間燃燒法、電化學法與溶液法。許多具有納米或微米結構的材料也可用來作為抗反射塗層，例如二氧化矽、二氧化鈦、二氧化鋯與氧化鋅。摻雜方面，可用以調節二氧化鈦的相變溫度至目標範圍，並同時改善透光與光學表現，例如摻雜鎢可將變色溫度降至約 22°C，共摻雜方案可調至約 39°C；透過溶膠－凝膠法將二氧化鈦納米顆粒嵌入玻璃基體，可提高機械強度與耐久性，並維持良好透明度與熱致變色性能；亦可透過設計複合材料的組成與結構，使其在更低溫度下實現相變並提升紅外線調控效果。

在結構與性能表現上，已有研究透過納米多孔二氧化鈦薄膜獲得約 14% 的太陽能調制幅度與逾 40% 的可見光透過率；進一步提升孔徑與孔密度可將室溫透光率由約 10% 提升至近 80%。在光學疊層方面，於二氧化鈦上引入 TiO_2 、 SiO_2 等抗反射層已被實驗與模擬證實可提升可見光透過率，多層結構（例如 $TiO_2/VO_2/TiO_2/VO_2/TiO_2$ ）亦有助於平衡通透度與控熱能力。聚合物複合（如 VO_2/PVA ）能抑制二氧化鈦的氧化與聚集，進一步提升對紅外線的調制表現與耐候性。

在應用層面，已有基於二氧化鈦的建築模擬與實驗研究，對智能窗戶的節能效益進行了評估與總結。現階段研究多集中於建築領域；相較之下，智能窗戶與熱致變色窗戶在交通工具上的應用研究仍相對較少，未來在車輛節能與舒適性方面仍有廣闊的探索空間。

1.3 智能控溫窗戶優點、缺點及挑戰

在各類智能窗戶技術中，因成本、性能、壽命與規模化條件逐步成熟，熱致變色窗已成功商業化，且相較其他節能調控材料更受關注。同時，高性能窗戶（多層 / 三層玻璃、低輻射 Low-E 玻璃、高反射率玻璃等）也日益普及。這些方案透過調整材料性質（如導熱係數、透射率與反射率）以匹配不同的室內環境需求：多層玻璃提升隔熱以降低能耗；Low-E 玻璃有效抑制紫外線與紅外線熱輻射、穩定室內溫度；高反射率玻璃減少眩光並提升視覺舒適度，整體推動建築能效提升。

在產業與市場方面，與智能變色窗戶相關的代表性公司包括美國的 Suntuive 與英國的 Magic Glass，從事相關產業的代表公司亦包括美國的 SageGlass、View Dynamic Glass 與 ConverLight，以及德國的 Gesimat 與 EControl-Glas。據報導，2021 年全球智能窗戶市場銷售額約為 33 億美元，預計 2028 年達 60 億美元，年複合成長率（CAGR）約 8.7%。從競爭格局看，Gentex 為智能窗戶產業的全球大型製造商之一，約佔市場份額 38%，其後為 AGC Inc.、Saint-Gobain 與 View Inc. 等企業；上述公司在技術開發與市場推廣上持續推動產業成長與創新。

針對二氧化釩智能窗戶材料，未來發展需在相變溫度、光學調控與材料穩定性之間取得平衡：相變溫度需調整至更適用的工作區間，並同時維持對太陽光譜（吸收、折射、反射）的有效管理。結構工程（例如多孔塗層）可改善透光率等光學性能，但對變色溫度幫助有限；摻雜塗層可降低變色溫度，卻往往導致光學性能（如可見光透過率或太陽能調制幅度）下降。另需進一步提升材料在空氣中的穩定性與安全性，降低因吸收光線過度引發的棕黃色外觀影響，並優化壽命、可靠性與成本效益的量產流程。

在效能與工程化方面，當前技術在調光與散射控制上仍存在限制：單一的散射機制使調光彈性不足，整體透光率的調整區間多集中於 20% 至 40%；目前研究多聚焦於總透光率與霧化程度，對於散射方向控制與導引日光以改善照明分佈的探討仍相對不足。在調節精細度與動態

響應方面，常見方案仍以階段式變化為主，反應速度亦有限，難以達到連續、細緻且可預期的控制效果。此外，多數研究停留於厘米級樣本測試，與實際應用所需的平方米級規模在製程均勻性、耐候性、壽命與成本控制等方面仍存在明顯落差。

整體而言，二氧化釩智能窗戶尚未大規模商業化，主要受到相變溫度偏高、可見光透過率不足、太陽能調制幅度有限，以及製程中晶格缺陷易導致光學性能下降等因素的限制。上述瓶頸需在材料設計（摻雜與結構設計的權衡）與製程控制（沉積品質、均勻性與封裝可靠性）上持續突破，方能推動更大範圍的應用落地。

可是，二氧化釩智能窗戶至今尚未大規模商業化，主要受限於相變溫度偏高、可見光透過率不足、太陽能調制幅度有限，以及製程中易生晶格缺陷導致光學性能下降等問題；上述瓶頸仍需在材料設計與製程控制上持續突破。



2. 塗層材料製備

2.1 超穩 VO_2 複合相變塗層 ($\text{VO}_2 / \text{MoO}_3 / \text{SiO}_2$) 製備

如圖 2.1 所示，本項目研發了一種熱致相變玻璃塗層材料。該塗層由依次沉積於基底上的二氧化鈮 (VO_2) 層、三氧化鉬 (MoO_3) 層以及二氧化矽 (SiO_2) 層組成，樣品以石英玻璃基片為基底，玻璃基片的長度為 4-6 厘米，寬度為 4-6 厘米，厚度為 0.4-0.6 毫米。在優選條件下，二氧化鈮 (VO_2) 層由二氧化鈮納米顆粒構成，厚度為 100-200 納米，顆粒粒度為 100-200 納米；三氧化鉬 (MoO_3) 層由三氧化鉬納米顆粒構成，厚度為 200-300 納米，顆粒粒度為 200-300 納米；二氧化矽 (SiO_2) 層由二氧化矽納米顆粒構成，厚度為 100-500 納米，顆粒粒度為 100-500 納米。

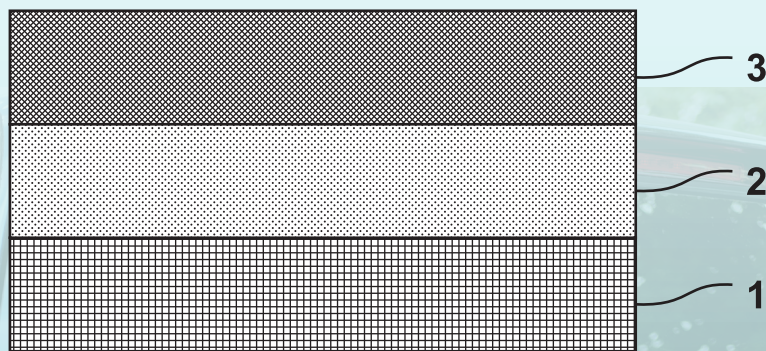


圖 2.1 熱致相變玻璃塗層材料結構示意圖

該熱致相變玻璃塗層材料的製備方法包括以下步驟：

2.1.1 製備二氧化鈮 (VO_2) 層：

將 5 克五氧化二鈮 (V_2O_5) 粉末倒入瑪瑙研鉢中進行充分研磨，使顆粒尺寸為 500 納米 -1 微米，確保顆粒更加細化且混合均勻。然後將其倒入小坩堝中，放入馬弗爐中升溫至 700-800°C 進行熔融，保溫 20-40 分鐘後取出，倒入 200-300 毫升去離子水中攪動，形成 VO_2 溶液。將二氧化鈮 (VO_2) 溶液用提拉機鍍膜於石英玻璃片上（長寬 5×5 厘米），提拉速度為每秒 1500-2000 微米，浸漬時間為 100-120 秒，停留時間為 100-120 秒。進行一次提拉後，將樣品放入溫度為 70-80°C 的烘箱中乾燥 20-40 分鐘。

2.1.2 製備三氧化鉬 (MoO_3) 層：

稱取 1.5 克的三氧化鉬 (MoO_3) 粉末，倒入瑪瑙研鉢中進行充分研磨，使顆粒尺寸達到 500 納米 -1 微米，確保顆粒更加細化且混合均勻。然後將其倒入小坩堝中，放入馬弗爐中升溫至 700-800°C 進行熔融，保溫 20-40 分鐘後取出，倒入 200-300 毫升去離子水中攪動，形成三氧化鉬 (MoO_3) 溶液。將三氧化鉬溶液用提拉機鍍膜於步驟 1 所得到的鍍有 VO_2 的石英玻璃片上（長寬 5×5 厘米），提拉速度為每秒 1500-2000 微米，浸漬時間為 100-120 秒，停留時間為 100-120 秒。進行一次提拉後，將樣品放入溫度為 70-80°C 的烘箱中乾燥 20-40 分鐘。

2.1.3 製備二氧化矽 (SiO_2) 層：

首先採用史托伯法 (Stober process) 製備二氧化矽 (SiO_2) 顆粒。具體步驟如下：

- 取乾燥的燒杯，加入適量的無水乙醇，其體積佔史托伯反應溶液總體積的 70%-80%；
- 向無水乙醇中緩慢加入正矽酸乙酯（濃度為 0.2-1.0M），以史托伯反應溶液的總體積比為 20%-50%，攪拌均勻以確保正矽酸乙酯完全溶解；

- c. 在攪拌的同時，緩慢加入氨水（質量百分比濃度為 25%），體積為正矽酸乙酯的 2-5 倍，氨水將使反應體系的 pH 值增加至 9-11，反應在室溫下（20-25℃）進行，反應時長為 2-10 小時，得到含有二氧化矽（ SiO_2 ）納米顆粒的溶液，顆粒的粒度在 100-500 納米之間。

將上述步驟得到的含有二氧化矽（ SiO_2 ）納米顆粒的溶液用提拉機鍍膜於步驟 2 所得鍍有二氧化鈮（ VO_2 ）及三氧化鉬（ MoO_3 ）的石英玻璃片上（長寬 5×5 厘米），提拉速度為每秒 1500—2000 微米，浸漬時間為 100-120 秒，停留時間為 100-120 秒。進行一次提拉後，將樣品放入溫度為 70-80℃的烘箱中乾燥 20-40 分鐘。最後，將乾燥後的石英玻璃片放入管式爐中，抽真空後升溫至 500-600℃進行退火處理 10-30 分鐘，得到三層薄膜材料，即熱致相變玻璃塗層材料。該材料在可見光範圍內（400-700 納米）具有 70%—80% 的透光率，在近紅外區域（700-1100 納米）的透光率為 40%-50%。

綜上所述，三層複合結構的熱致變色玻璃塗層材料通過二氧化鈮（ VO_2 ）層、三氧化鉬（ MoO_3 ）層以及二氧化矽（ SiO_2 ）層的組合，解決了玻璃在太陽能調節率和耐候性方面的不足，實現了太陽能的智能動態精確調控。

2.2 VO_2 -Mo 複合塗層製備

在熱致相變玻璃塗層材料中，界面構築是提高二氧化鈮（ VO_2 ）納米顆粒穩定性的關鍵。本節介紹的塗層製備方法基於前期探索和理論分析，旨在通過形成穩定界面，有效抑制氧擴散並防止界面處物質間的固相反應導致的失效。為此，本項目選擇了二氧化矽（ SiO_2 ）作為透明包覆材料，採用史托伯法和溶膠凝膠法在二氧化鈮（ VO_2 ）納米顆粒表面形成緻密的多層複合殼結構。二氧化矽（ SiO_2 ）材料具有高穩定性和耐腐蝕性，殼體結構可有效隔絕相變材料與環境中的氧氣、酸、鹼等物質的接觸，從而提高耐候性和穩定性。此外，二氧化矽（ SiO_2 ）材料屬氧化物，不與二氧化鈮（ VO_2 ）發生化學反應，也難以發生界面擴散，確保界面的穩定性。

二氧化鈮 (VO_2) 在相變過程中會發生明顯的體積變化，反復膨脹收縮會導致二氧化鈮脫離透明基體，降低調光性能，這是塗層失效的另一個重要原因。如何通過複合結構的構築降低體積效應，是本項目要解決的另一個關鍵科學問題。

本研究的目的是提供一種熱致相變玻璃塗層材料及其製備方法和應用，以製備超穩相變材料為目標，實現二氧化鈮 (VO_2) 材料的多層包覆。通過引入彈性介質層解決二氧化鈮 (VO_2) 相變過程中體積變化導致的與基體脫離的問題，並引入低折射率二氧化矽 (SiO_2) 實現增透效果，同時限制二氧化鈮相變過程中的體積改變效應，增加穩定性。

上述超穩相變塗層的製備方法包括如下步驟：

2.2.1 製備納米顆粒

採用控制氧化技術製備二氧化鈮 (VO_2) 納米顆粒，實現尺寸、形貌、分佈的可控。顆粒分佈如圖 2.2 所示。

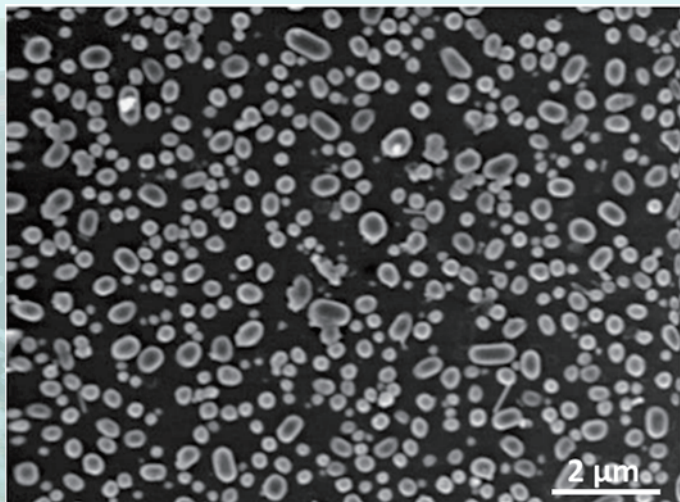


圖 2.2 二氧化鈮 (VO_2) 納米顆粒 SEM 顯微觀察圖

採用溶膠凝膠法製備二氧化鈮 (VO_2) 薄膜，通過鉬 (Mo) 離子摻雜實現其相變溫度可調。按摩爾比 2.5-3.0 秤取五氧化二鈮 (V_2O_5) 粉末和三氧化鉬 (MoO_3) 粉末，將其倒入瑪瑙研鉢中進行充分研磨，使其顆粒更加細化且混合均勻。

摻雜鉬 (Mo) 離子的目的是調節二氧化鈮的相變溫度。五氧化二鈮 (V_2O_5) 粉末和三氧化鉬 (MoO_3) 粉末的摩爾比最佳條件為 2.5-3.0。如果五氧化二鈮粉末和三氧化鉬末之間的摩爾比低於 2.5，可能不足以有效降低相變溫度，從而影響材料的應用性能；而五氧化二鈮粉末和三氧化鉬粉末之間的摩爾比高於 3.0，則三氧化鉬粉末的低摻雜量可能導致鉬離子在材料中的分佈不均，影響薄膜的均勻性和穩定性。

接著將其倒入小坩堝中，放入馬弗爐中升溫至 700-800℃ 將其熔融。700-800℃ 的熔融處理能促進粒子的結晶，確保二氧化鈮 (VO_2) 納米顆粒和薄膜的相變行為和機械性能的提升。低於 700℃ 的處理溫度可能形成不純的相或低質量的粒子，甚至可能導致二氧化鈮 (VO_2) 的形成失敗，從而降低材料的功能性和相變性能。高於 800℃ 可能導致顆粒過度燒結，形成較大的團聚現象，降低材料的比表面積，從而減少相變活動性，影響其相變特性。

保溫 30-40 分鐘後，將其取出倒入 200-300 毫升去離子水中並快速攪動，待其完全溶解分散開後靜置 1-2 小時，得到含有二氧化鈮 (VO_2) 納米顆粒和鉬 (Mo) 離子的混合溶液。

保溫時間小於 30 分鐘可能導致反應未完全，影響後續溶膠的質量和性能；大於 40 分鐘可能導致顆粒在冷卻過程中出現過度團聚，從而降低粒子的分散性和均勻性，影響最終薄膜的質量。如果去離子水的體積不足 (<200 毫升)，可能導致溶液濃度過高，增加顆粒間的相互作用，造成集聚和沉澱，影響材料的均勻性。若去離子水的體積過大 (>300 毫升)，可能導致目標物濃度過低，降低材料的有效性和後續處理的難度。若靜置時間不足 (<1 小時)，可能導致顆粒未能充分分散，影響顆粒尺寸的一致性和分佈，且可能有未沉澱的雜質影響最終產品質

量。過長的靜置時間（>2 小時）可能導致顆粒沉降到底部，形成顆粒堆積，導致物相分離或不均勻特性，影響後續的性質與功能。

2.2.2 顆粒表面包覆透明材料

本步驟採用史托伯法（Stober process）和水熱共生法結合後續退火處理，實現 VO_2 顆粒表面包覆二氧化矽（ SiO_2 ）透明材料，構築二氧化鈦（ VO_2 ）與透明材料的核殼結構。二氧化矽（ SiO_2 ）的添加可提升材料的硬度和韌性，實現增透效果，同時限制二氧化鈦相變過程中的體積改變效應，增加穩定性，克服材料與基體的脫離問題。通過將史托伯法與水熱共生長方法結合，在史托伯法製備的二氧化矽（ SiO_2 ）顆粒上繼續進行水熱處理，可實現二氧化鈦（ VO_2 ）顆粒的均勻包覆和核殼結構的形成。

史托伯法（Stober process）的步驟如下：

- 1) 取一乾燥的燒杯，加入適量的無水乙醇（其體積佔史托伯反應溶液總體積的 70%~80%）作為溶劑和反應介質，促進水解和縮聚反應；
- 2) 向無水乙醇中緩慢加入正矽酸乙酯（濃度為 0.2M 到 1.0M，以反應溶液總量計的體積比為 20%-50%），攪拌均勻以確保正矽酸乙酯完全溶解；
- 3) 在攪拌的同時，緩慢加入氨水。氨水的質量百分比濃度為 25%，其體積為正矽酸乙酯體積的 2 到 5 倍。氨水將使反應體系的 pH 值增加至 9-11，促進正矽酸乙酯的水解。反應在室溫下（20-25°C）進行，反應時長 2 小時 -10 小時，得到含有二氧化矽（ SiO_2 ）納米顆粒的溶液。反應時間越長，二氧化矽形成的粒徑通常越大。

通過史托伯法可製備出粒徑均勻的二氧化矽（ SiO_2 ）顆粒，粒度介於 100-500 納米之間，且較高的純度（>99%）和良好的透明性，有助於保持二氧化鈦（ VO_2 ）顆粒的光學特性。

水熱共生方法的步驟如下：

將上述步驟得到的含有 VO_2 納米顆粒和鉬（Mo）離子的混合溶液和上述得到的含有二氧化矽（ SiO_2 ）納米顆粒的溶液轉移到水熱反應釜中，加入 200-300 毫升去離子水，並保持適當反應溫度（100-200℃）和反應時間（10-24 小時）。

若去離子水低於 200 毫升，反應物濃度過高可能導致顆粒的聚集，變得不均勻，影響核殼結構的形成和顆粒的分散性。若去離子水高於 300 毫升，水的過量導致反應物的稀釋，反應速率降低，可能導致二氧化矽（ SiO_2 ）生長不均勻，從而影響到 VO_2 的包覆質量。

反應溫度低於 100℃，溫度過低會導致反應速率緩慢，二氧化矽（ SiO_2 ）可能無法有效覆蓋二氧化鉬（ VO_2 ）顆粒，生成的核殼結構不完全，影響材料性能。反應溫度高於 200℃，溫度過高可能會導致二氧化鉬的相變，從而改變材料的光學和電學特性。過高的溫度還可能導致材料的降解或燒結，使顆粒連結成團狀，不再是所需的核殼結構。

若反應時間低於 10 小時，或會導致二氧化矽（ SiO_2 ）的生長不完全，可能難以形成穩定的核殼結構，導致核殼界面弱化。若反應時間高於 24 小時，可能導致材料的過度反應，二氧化矽（ SiO_2 ）層可能會變得過厚，影響顆粒的性能，並導致二氧化鉬（ VO_2 ）顆粒的形狀和尺寸發生變化，產生團聚現象。

把史托伯法與水熱共生長方法相結合以後，可以實現二氧化鉬（ VO_2 ）顆粒表面形成一致且均勻的二氧化矽（ SiO_2 ）包覆層，確保材料的性能一致性。

後續退火溫度為 500-600℃，退火時間為 1-2 小時。退火完成後將樣品放入溫度為 80-100℃的烘箱乾燥 10-30 分鐘，得到二氧化鉬（ VO_2 ）顆粒表面包覆二氧化矽（ SiO_2 ）透明材料的前軀溶膠。退火過程主要用於促進二氧化矽（ SiO_2 ）與二氧化鉬（ VO_2 ）之間的結合，幫助形成穩定的核殼結構，同時改善材料的晶體結構和相變特性。

若退火溫度低於 500°C ，二氧化矽 (SiO_2) 層可能未能充分結合，導致其附著力差，影響包覆效果。若退火溫度高於 600°C ，二氧化鈮 (VO_2) 顆粒可能開始溶解或改變結構，影響晶相穩定性。

若退火時間低於 1 小時，導致二氧化矽 (SiO_2) 未能完全反應，包覆層不均勻，將影響光學和熱學性能。退火時間高於 2 小時，可能造成材料氧化或退化，影響其長期穩定性與性能。乾燥溫度低於 80°C ，溶劑未完全去除，可能導致樣品在後續處理中發生分解或雜質的存在。乾燥溫度高於 100°C ，二氧化矽 (SiO_2) 層可能出現開裂或分層現象，影響光學透明性和力學性能。

乾燥時間低於 10 分鐘，溶劑可能殘留過多，造成最終產品的性能不穩定。乾燥時間高於 30 分鐘，材料可能乾燥過度，導致表面粗糙或形態變化。

在提高包覆層厚度的均勻性方面，本發明在包覆過程中不斷變化攪拌方向和基材擺放方向，以保證溶液與顆粒表面各方向充分接觸，從而達到均勻包覆效果，實現二氧化鈮 (VO_2) 顆粒表面包覆二氧化矽 (SiO_2) 透明材料，完成二氧化鈮與透明材料核殼結構的構築。其中，二氧化鈮 (VO_2) 的質量比例在 20-30% 之間，二氧化矽 (SiO_2) 的質量比例在 70-80% 之間，折射率為 1.4-1.5，若折射率低於 1.4，可能導致透光性過低，影響玻璃的光透過效果，產生反射甚至失真效果。若高於 1.5，則可能增加反射損失，從而降低光透過率。此外，較高的折射率也可能對相變材料的機械性能產生不利影響，導致脆性增加，從而影響整體材料的韌性和穩定性。所得殼核結構的平均粒徑在 100-300 納米之間，二氧化矽 (SiO_2) 殼層的厚度在 50-500 納米之間。

2.2.3 玻璃基材準備

採用高純度（純度 $>99\%$ ）的二氧化矽 (SiO_2) 玻璃作為鍍膜基材，將其先後放於丙酮、無水乙醇中超聲清洗 30-60 分鐘，然後再放入稀鹽酸溶液 (20wt%) 中超聲清洗 1-1.5 小時，取出後用去離子水沖洗乾淨，並用氮氣吹乾備用。

2.2.4 複合薄膜鍍膜

取用上述步驟所得的前驅溶膠，用鍍膜提拉機製備二氧化鈮／二氧化矽（ VO_2/SiO_2 ）複合薄膜。將清洗好的鍍膜基材（ 5×5 厘米）固定在鍍膜提拉機的支架上，確保其位置穩定。調整提拉速度至每秒 1500-1800 微米，確保設備的速度控制準確。將前驅溶膠倒入鍍膜槽中，確保槽中的溶膠量足夠覆蓋基材。在提拉機的控制下，將鍍膜基材緩慢浸入前驅溶膠中開始浸漬，浸漬時間設置為 100-120 秒。在浸漬過程中，確保溶膠在基材表面均勻塗布。在浸漬結束後，啟動提拉機以設定的速度（每秒 1500-1800 微米）將鍍膜基材從前驅溶膠中提拉出來。提拉過程中，確保基材與前驅溶膠的接觸均勻，以形成均勻的薄膜。在提拉完成後，將基材停留在空氣中，停留時間設置為 100-120 秒，確保薄膜在空氣中自行乾燥。

提拉速度及浸漬時間直接影響沉積薄膜的厚度。較低的提拉速度或較多的浸漬時間則允許更多的前驅體溶膠在基底表面沉積，導致薄膜變厚。相反，較高的提拉速度或較少的浸漬時間往往會導致薄膜變薄。

停留時間不足（ <100 秒）可能導致溶劑未能完全揮發，導致薄膜表面出現氣泡或不均勻，影響薄膜的光學和電學性能。過長的停留時間（ >120 秒）可能導致薄膜表面乾燥過快，形成不均勻的表面結構，甚至可能導致裂紋或剝落。

完成一次提拉後，將基材放入溫度為 $80-100^\circ\text{C}$ 的烘箱乾燥 10-30 分鐘，得到具有二氧化鈮／鉬離子（ VO_2/Mo ）複合薄膜的熱致相變玻璃塗層材料。製備完成的二氧化鈮／鉬離子（ VO_2/Mo ）複合薄膜中二氧化鈮顆粒尺寸控制在 100-500 納米，厚度為 500 納米 -3 微米，實現二氧化鈮（ VO_2 ）顆粒陣列薄膜的可控製備。

通過本項目研發的生產工藝，可保持複合薄膜在可見光範圍內（400-700 納米）具有 80%-90% 的透光率，在近紅外區域（700-1100 納米）的透光率為 40%-60%。該基於二氧化釩／鉬離子（ VO_2/Mo ）複合薄膜的熱致相變玻璃塗層材料可用於製造節能汽車窗戶材料，該材料相變溫度為 40~45℃，可見光透過率達到 70~80%。

本項目研發的熱致變色玻璃材料通過二氧化釩（ VO_2 ）納米顆粒的摻雜和複合技術，克服了現有材料的局限性，提供了一種低相變溫度（40~45℃）、高光學透明度（70~80%）和優異耐久性的節能汽車窗戶材料，具有廣泛的應用前景和顯著的市場競爭優勢。

該材料可解決玻璃關於太陽能調節率和耐候性低的問題，以實現太陽能的智能動態精確調控；當外部溫度高於相變溫度時，薄膜層可在保證高可見光透過率（70%~80%）的條件下，提升紅外光調節性能（>40%），隔絕太陽熱量；在低溫環境下（0~40℃的範圍），薄膜層可通過太陽光調控確保熱能的攝入，實現車廂內冬暖夏涼的節能模式。

熱致變色透明塗層在獲得高可見光透過率（70%~80%）的同時保證二氧化釩（ VO_2 ）優異的相變特性，紅外光調節性能大於 40%；同時增強二氧化釩的抗氧化性和環境穩定性，解決在鑲嵌二氧化釩膜工藝過程中和實際工作應用環境中二氧化釩氧化變質的問題，使二氧化釩顆粒在氧氣中的抗氧化溫度提高到 600℃，保證二氧化釩與基體的良好接觸以及與外界環境的隔絕，實現二氧化釩（ VO_2 ）相變材料的超穩定性。本項目的研究以製備超穩相變材料為目標，實現二氧化釩（ VO_2 ）材料的多層包覆，引入彈性介質層以解決二氧化釩（ VO_2 ）相變過程中體積變化導致的與基體脫離的問題，引入低折射率材料二氧化矽（ SiO_2 ）實現增透效果，同時限制二氧化釩（ VO_2 ）相變過程中的體積效應，增加穩定性，一定程度上克服材料與基體的脫離問題。

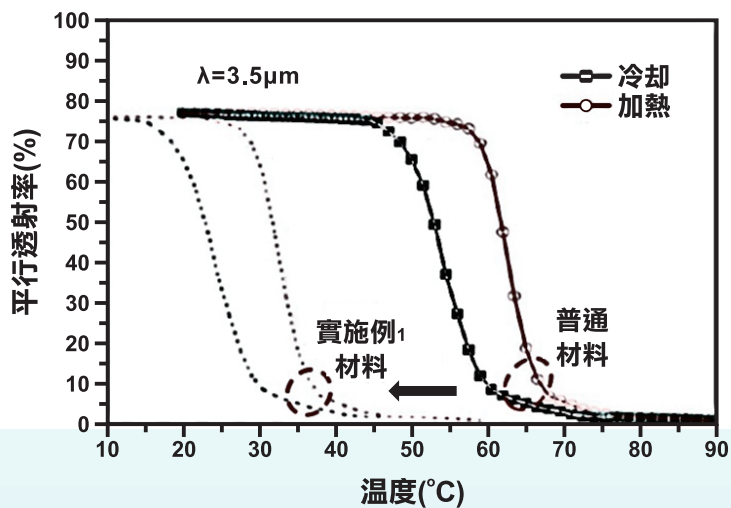


圖 2.3 本項目研發材料的光透射率隨溫度變化與普通材料比較

3. 玻璃性能測試

3.1 超穩 VO_2 複合熱變色材料元素表徵、物相鑒定

如圖 3.1 所示，為所製備的超穩二氧化鈮（ VO_2 ）複合材料薄膜的 XRD 分析圖譜。

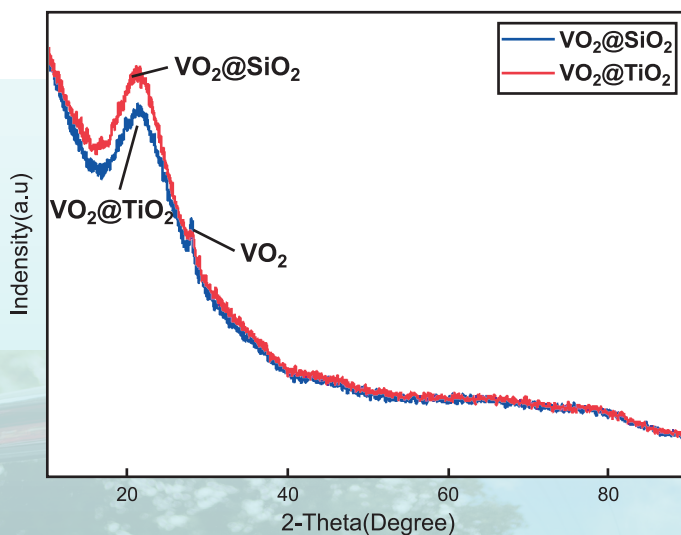


圖 3.1 超穩 VO_2 複合材料薄膜的 XRD 圖譜

如圖 3.2a-3.2e 所示，為所製備的超穩 VO_2 複合材料薄膜的 SEM 測試圖。

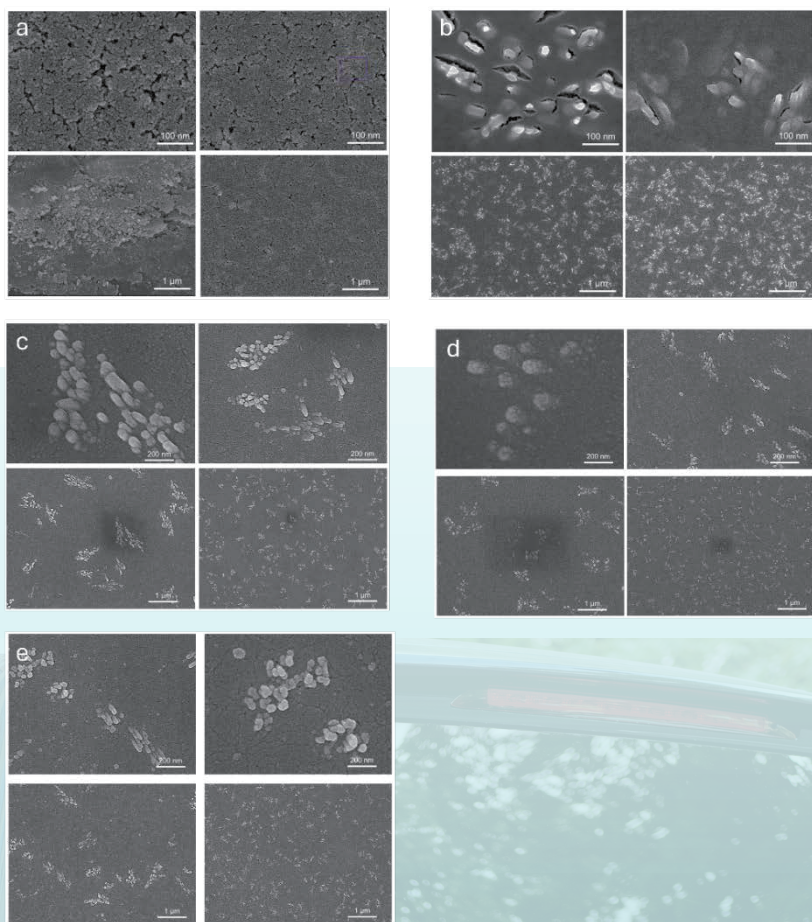


圖 3.2a-3.2e 薄膜樣品 1-5 SEM 測試

3.2 超穩 VO_2 複合熱變色材料光學性能測試

3.2.1 透明度

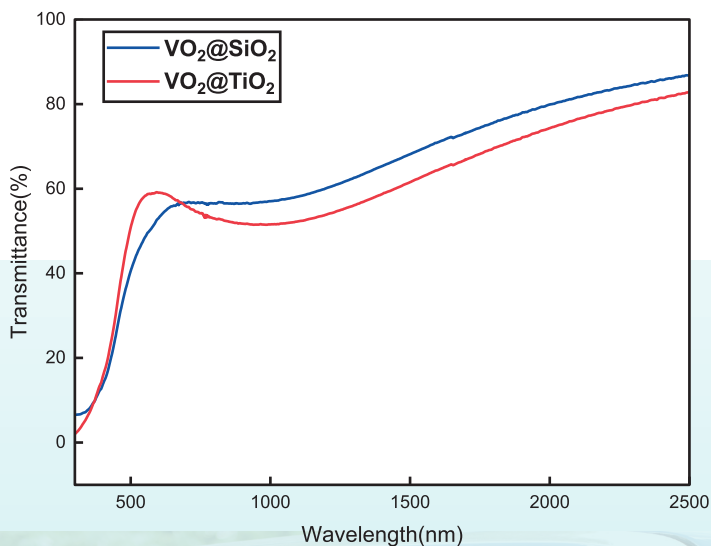


圖 3.3 超穩 VO_2 複合材料薄膜的透明度

由圖 3.3 的測試曲線可見，兩種複合熱變色材料在波長 500-2500 納米範圍內都有較高的透射率，在 500 納米左右可達到 60% 的透射率，在 2500 納米可達到接近 80% 的透射率。

3.2.2 可見光透過率

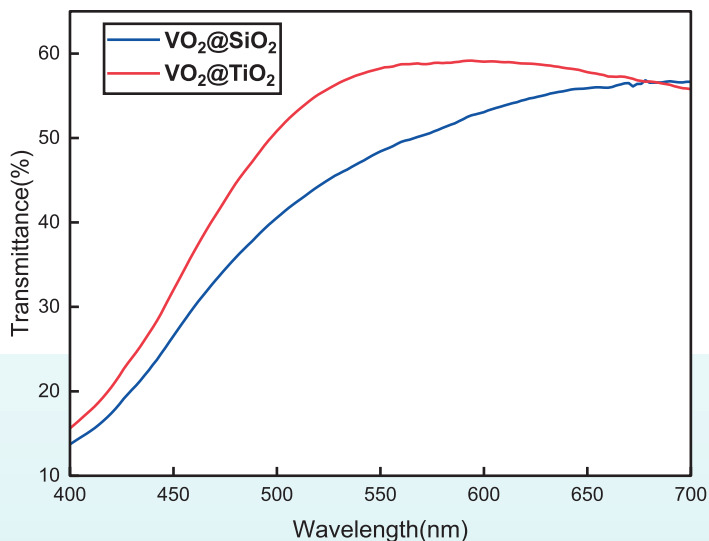


圖 3.4 超穩 VO₂ 複合材料薄膜的可見光透過率

由圖 3.4 的測試圖譜可見，在可見光波段，VO₂/SiO₂ 薄膜的透光率比 VO₂/TiO₂ 薄膜略高，且 VO₂/SiO₂ 薄膜在 500 納米波長的透過率可達到近 60%，對更長波段的可見光透過率則略為下降。而 VO₂/TiO₂ 的透過率在可見光波段隨波長提升而增加，在 700 納米波長為約 55%。

3.3 超穩 VO_2 複合熱變色材料機械性能測試

3.3.1 耐磨性能

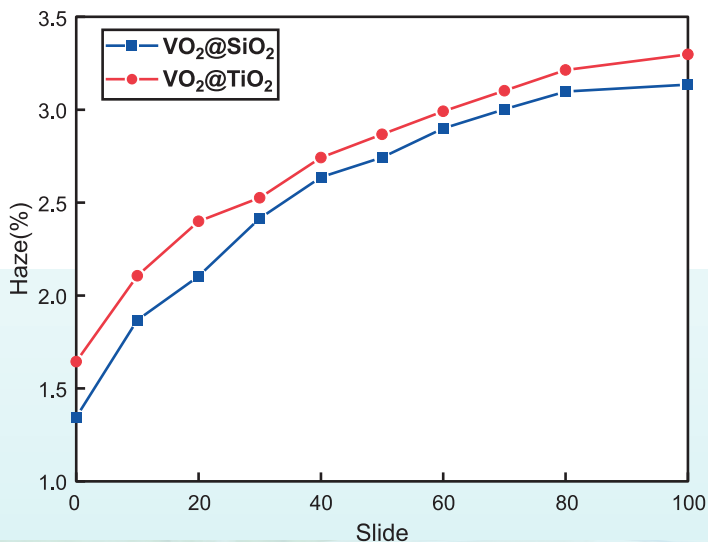
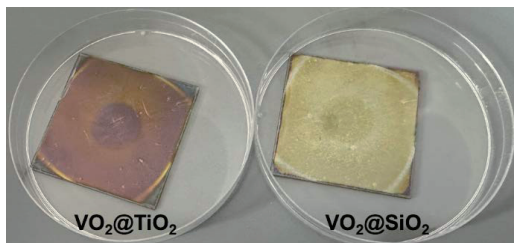


圖 3.5 超穩 VO_2 複合材料薄膜的霧度變化

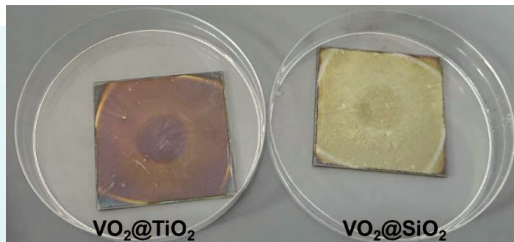
為測試樣品耐磨性能，使用 2000 目的砂紙摩擦樣品，每摩擦十次後測試樣品的霧度值。最終霧度差值均小於 2%。符合 GB 9656-2021 中 5.5.1 所述的耐磨性能。

3.3.2 抗腐蝕性能

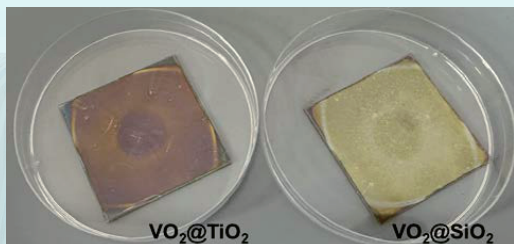
耐濕性能測試



a. 正常濕度下的超穩
 VO_2 複合材料薄膜



b. 80% 濕度下的超穩
 VO_2 複合材料薄膜



c. 90% 濕度下的超穩
 VO_2 複合材料薄膜

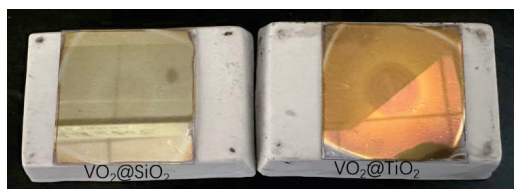


d. 100% 濕度下的超穩
 VO_2 複合材料薄膜

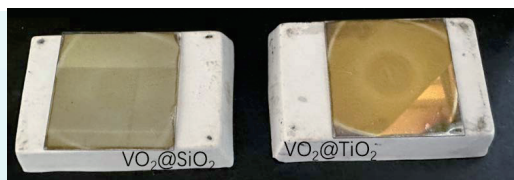
圖 3.6a-3.6d 不同濕度下耐濕性能測試

為測試樣品耐濕性能，將樣品放入濕度調節箱中，每提升 10% 的濕度檢測一次。試驗後樣品無變色、出泡、渾濁和其它可視缺陷。符合 GB 9656-2021 中 5.5.4 所述的耐濕性能。

耐熱性能測試



a. 常溫時的超穩 VO_2 複合材料薄膜



b. 100 °C 時的超穩 VO_2 複合材料薄膜



c. 150 °C 時的超穩 VO_2 複合材料薄膜



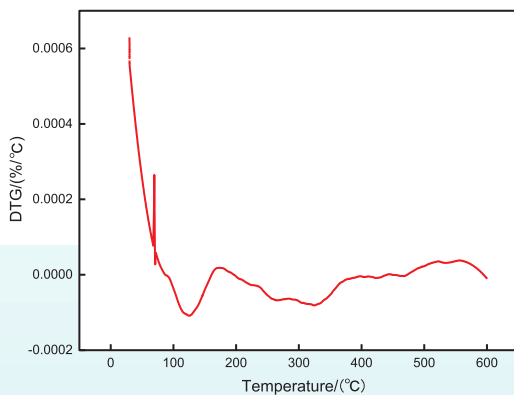
d. 200 °C 時的超穩 VO_2 複合材料薄膜

圖 3.7a-3.7d 不同濕度下耐濕性能測試

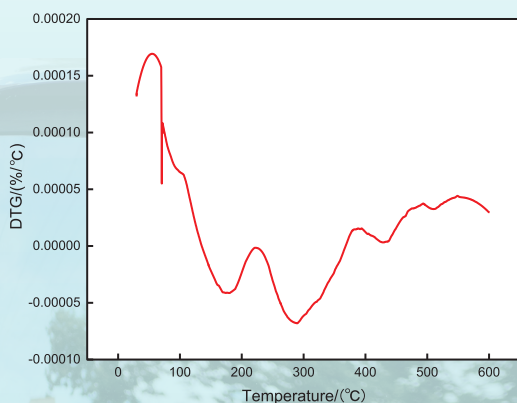
為測試樣品耐熱性能，將樣品放入烘箱中，每升高 50 °C 檢測一次。試驗後的樣品無裂口，並且未產生氣泡及其它可視缺陷。符合 GB 9656-2021 中 5.5.2 所述的耐熱性能。

3.3.3 熱重量分析

為測試樣品的物理變化和化學變化過程，對樣品進行熱重量分析（Derivative Thermogravimetric Analysis，DTG）。熱重量分析是在受控溫度場景下，測量樣品的質量與溫度關係變化的方法。



a. VO_2/SiO_2 薄膜的 DTG 曲綫



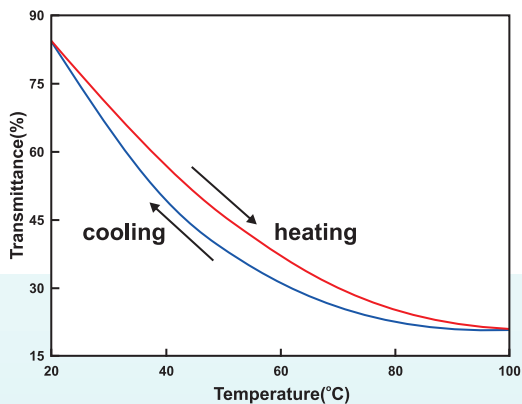
b. VO_2/TiO_2 薄膜的 DTG 曲綫

圖 3.8a-3.8b 超穩 VO_2 複合材料薄膜的熱重測試

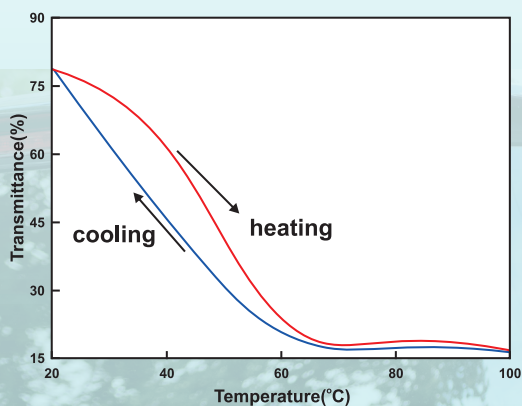
由圖 3.8a-3.8b 所示的 DTG 曲綫可知，本項目所研發的相變薄膜材料具有相變溫度較低的特點，有助於進行調溫節能。

3.4 超穩 VO_2 複合熱變色材料熱致相變性能測試

3.4.1 光透射率調節性



a. VO_2/SiO_2 薄膜的 DTG 曲線的光透射率調節性



b. VO_2/TiO_2 薄膜的 DTG 曲線的光透射率調節性

圖 3.9a-3.9b 超穩 VO_2 複合材料薄膜的光透射率調節性測試

由圖 3.9a-3.9b 可知，當在 20℃時，兩種薄膜光透射率均高於 75%，而隨溫度升高則相應降低。 VO_2/SiO_2 薄膜的透射率曲線較為平緩，而 VO_2/TiO_2 薄膜的光透射率降低幅度較快，當溫度升高至 60℃以上時，該薄膜材料可以通過相變降低透過率，以達到調光調溫的效果。當外部溫度高於相變溫度時，薄膜層可在維持高可見光透過率（70%~80%）的條件下，提升紅外光調節性能（>40%），隔絕太陽熱量；在低溫環境下（0~40℃的範圍），薄膜層可通過太陽光調控確保熱能的攝入，實現車廂冬暖夏涼的節能模式。



4. 結論與展望

4.1 結論

在全球能源緊缺與環境壓力日益加劇的背景下，交通領域的能源消耗問題愈發明顯，尤其是車內溫度調節所帶來的能量損失，佔據了汽車能耗的相當比例。數據顯示，在中國南方地區，由於氣候特徵為冬暖夏熱，汽車在製冷過程中需要消耗大量能量，同時伴隨大量廢熱排放，這不僅增加了能源負擔，也加劇了環境問題。車窗作為汽車主要的透明圍護結構，是影響車內熱環境調節效率和能源消耗的重要因素。傳統玻璃材料在隔熱、調光及耐候性方面存在明顯不足，無法滿足現代交通工具對節能和舒適性的雙重需求。因此，開發能夠根據外界溫度變化自動調節光學性能的智能車窗材料，成為節能技術發展的必然趨勢。

本研究針對上述問題，提出並製備了一種基於二氧化釩（ VO_2 ）／三氧化鉬（ MoO_3 ）／二氧化矽（ SiO_2 ）複合結構的熱致相變玻璃塗層材料。該塗層採用多層納米結構設計，依次沉積二氧化釩（ VO_2 ）、三氧化鉬（ MoO_3 ）和二氧化矽（ SiO_2 ）層，分別發揮相變調控、緩衝穩定和增透保護作用。通過工藝優化，製備的塗層在可見光波段（400 - 700 納米）保持高透光率（70% - 80%），在近紅外線區域實現有效調控（透射率降低至 40% - 60%），並具備低相變溫度（40 - 45℃），能夠在不同環境溫度下實現智能光熱調節，滿足車載節能需求。光學性能測試顯示，該材料在保持高可見光透過率、符合駕駛安全的同時，能有效阻擋紅外線與太陽熱。這可減輕車內空調負擔，實現「冬暖夏涼」的節能效果。

在耐久性方面，材料在耐磨、耐濕、耐熱等環境穩定性測試中均符合標準，表現出優異的長期使用性能。通過引入二氧化矽（ SiO_2 ）增透層和三氧化鉬（ MoO_3 ）緩衝層，解決了二氧化釩（ VO_2 ）在相變過程中體積效應導致的膜層脫離問題，並顯著提升抗氧化性能，使 VO_2 在高溫氧化環境下保持結構穩定，抗氧化溫度提高至 600°C ，使材料在複雜工作環境中保持可靠表現。這一突破不僅克服了傳統二氧化釩（ VO_2 ）薄膜在工業應用中的局限，也為智能節能玻璃的產業化提供了堅實的技術基礎。

4.2 4.2 未來展望

隨著智能交通和綠色建築的發展，熱致變色玻璃塗層的應用場景將更加廣泛。在汽車領域，該材料可用於擋風玻璃、側窗及天窗，實現動態調光調溫，降低空調能耗，提升乘坐舒適度，尤其適用於電動車輛，並延長續航里程。在建築領域，智能窗戶可根據室外溫度和太陽輻射強度自動調節透光率，減少空調和採暖能耗，協助達致綠色建築節能效果。此外，該技術還可拓展至高端軌道交通、飛機舷窗等場景，滿足對光熱舒適性和能效的更高要求。未來，結合智能傳感與控制系統，開發具備環境感知和自動調節功能的集成化玻璃解決方案，將成為智能節能材料的重要發展方向。同時，隨著工藝規模化和成本優化的推進，該類材料有望在全球範圍內實現商業化應用，推動交通和建築行業的低碳轉型。

綜上所述，本研究不僅在材料性能和工藝優化方面取得了顯著進展，還為智能光熱調控技術的應用提供了實踐基礎。隨著技術的不斷完善和應用場景的拓展，此熱致相變玻璃塗層將在節能減排、提升舒適性和推動可持續發展方面發揮重要作用，具有廣闊的市場前景。

