

石墨烯紡織品之應用及性能評估

陳靜宜／財團法人紡織產業綜合研究所組長

一、前言

近年來，石墨烯紡織品不斷推陳出新，紡織業採用石墨烯纖維製成各式紡織產品，網購平台甚至推出石墨烯商品專區，產品類型包含：寢具、運動服飾、襯衫、褲子、手套、襪子、夾克以及各式冬季服裝，設計概念來自石墨烯具有溫度調節之性能，利用石墨烯纖維

作為環境與皮膚之間的調節器，在溫暖的環境會排出熱量，但在寒冷的環境則通過均勻分布身體熱量來保存熱量。

石墨烯是由單層碳原子組成的二維材料，主要特性包括：

- (一) 高熱傳導性：導熱係數高達 $5300 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，高於奈米碳管和金剛石。



圖1 石墨烯改質紡織品之功能示意圖[1]

(二) 高導電性：電阻率約 $10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ ，比銅或銀更低，為目前電阻率最低的材料。

(三) 最薄卻最堅硬的材料：石墨烯硬度是鋼的100倍。

使得石墨烯紡織品具有高度柔韌性和耐久性，同時能夠有效地導電和散熱，被稱為可應用於多種不同領域的新時代材料。圖1顯示石墨烯可以賦予紡織品的各種應用和性能，石墨烯之機械性能和熱性能明顯增強外，還可以將抗紫外線(UV)、抗靜電、耐火性、抗菌、抗病毒等幾個次要優勢結合到紡織品中，並具有輕量、靈活度高、低摩擦係數等優異特性，讓石墨烯在生產高階機能性和創新性紡織品的現代紡織工業中佔有重要地位。

一般認知下，當外界環境寒冷，人們需要保溫服裝，而酷熱環境下需要涼感服裝，但隨著氣候異常，導致日夜溫差變化急遽，讓民眾在衣服穿著上極為困擾，因此具溫度調節有恆溫效果的機能性紡織品不斷被開發出來。而石墨烯具備高熱傳導性，此性質使石墨烯能夠迅速地將熱能從一個地方傳遞到另一個地方，提供有效的熱傳導通路，使其成為開發具有溫度調節功能的紡織品之理

想材料。

簡單來說，石墨烯紡織品能夠調節溫度，具有良好的保溫和散熱效果。在寒冷的環境中提供保暖，同時在炎熱的環境中保持涼爽。通過利用石墨烯的導熱性及熱力學定律，可以設計出具有受控區域溫度的服裝，助於身體在極端氣候下管理其溫度。

二、石墨烯之市場應用

石墨烯紡織品之製備，常見方法為在紡織品之纖維或織物表面塗覆石墨烯材料，可以通過化學還原法、化學氣相沉積法或機械物理混合法等技術來實現。另一種方法是將石墨烯納入紡織品的纖維結構中，例如：利用紡絲法將石墨烯混合至聚合物溶液中，然後紡成纖維，其他還有石墨烯印花、印刷等方式。彙整知名品牌所開發之石墨烯相關產品如下：

(一) 英國Reebok

Reebok投入了新款THERMOWARM+GRAPHENE系列中十幾款服飾的應用，如夾克大衣、連帽衫及慢跑機能緊身褲，來因應顧客多樣化運動類型及生活模式。採用內部網格區域印刷技術(internal grid print zone technology)，印

刷區與未印刷區相比，多保留8 %~15 %的熱量，確切數值則取決於底布料的種類。所有THERMOWARM+GRAPHENE產品，都有最重要的保溫儲熱區，亦即連帽衫之帽子、肩膀部位、大腿區域等位置添加網格印刷，為實現服飾保暖效果的最大化。此服裝的穿著者，身體散發的熱量會被吸收、保留在石墨烯印刷布料上，確保在寒冷環境中，可長時間維持身體暖和度。

（二）英國Superdry

Superdry率先使用Versarien的石墨烯服裝技術(Graphene-Wear technology)期望將石墨烯對溫度和濕度管理特性導入其服裝，創造出具有高度技術性和創新性的石墨烯增強型優質產品系列。利用Graphene-Wear之熱調節特性，控制和調節熱傳導率，幫助身體管理溫度，特別是在極端氣候和身體承受壓力的情況下。石墨烯之強度可減少纖維破損，也使服裝的使用壽命更長，增加每件服裝的穿著和洗滌次數，亦符合Superdry對永續發展的承諾[2]。

（三）美國Umbro

在Umbro品牌服飾key elite pro-training kit服裝的內側添加石墨烯增強墨

水配方，其墨水配方也經過國際標準測試，運用Graphene-Wear技術，除了石墨烯材料提供之增強的熱傳導率，亦增加水分管理機制來加快服裝的乾燥速度，訴求在運動過程中可提供快速乾燥之特性[3]。

（四）義大利Grossi

Advances in Textiles Technology 期刊報導[4][5]，義大利紡織集團Grossi與歐洲石墨烯最大公司Directa Plus合作，利用G+ (Graphene Plus)的高熱傳導性，開發含石墨烯智慧恆溫紡織品。G+處理劑以石墨烯為基材，為織物提供了多種性能，包括抑菌性和消除靜電之性能。但是，該處理劑也具有獨特的熱性能，它可將人體產生之熱量在寒冷環境中均勻散佈，但也可迅速散出人體在高溫環境下所產生之熱量。因此，使用G+處理的服裝有助於穿著者在各種環境條件下保持舒適體溫。截至目前為止，Directa Plus已與三家公司合作，將G+導入商業成衣產品中，義大利個人防護服和制服製造商Alfredo Grassi開發採用G+之產業用紡織品與成衣；義大利戶外成衣和雪地運動服供應商Colmar開發採用G+之滑雪成衣；以及義大利經編針織布專業公

司Eurojersey開發採用G+處理之Sensitive品牌經編針織布，用於製造運動休閒成衣、運動服和內衣。

三、試驗流程簡介

(一) 試驗標準

CNS 16199於2023年4月公告，名稱為「織物熱逸散試驗法－使用改良式瞬態平面熱源傳導儀(MTPS)」[6]，其參考依據標準為ASTM D7984-2021[7]，而ASTM D7984是紡織產業綜合研究所與加拿大品牌Mark's及設備商C-THERM公司共同研究與建立，試驗法使用改良式瞬態平面熱源傳導儀(Modified Transient Plane Source, MTPS)，適用範圍包含梭織、針織或不織布及各式紡織成品，在最低氣流流動及特定環境條件下，量測織物在乾燥狀態之熱逸散值，用於評估織物與受熱表面的動態熱交換。透過熱傳導率、密度及比熱計算求得，以確定試樣的熱逸散值。研究已證實人體皮膚與不同材質之接觸初始冷感覺與熱感覺具有正相關性[8]。此試驗法可廣泛適用於各種厚度之紡織品，為確保試樣中含有熱波，惟試樣厚度應大於量測時間內熱傳遞量之滲透深度(Penetration depth)，滲透深度為在表面處施加初始輻射熱量

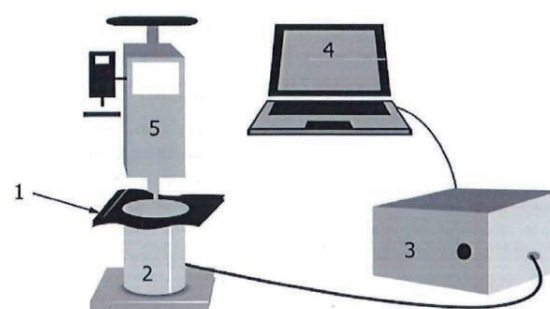
進入試樣的深度。

(二) 儀器設備

MTPS具有單側平面熱源及垂直於熱源上設置隔熱環的一種裝置，該熱源及隔熱環同時與試樣的一側接觸，在短時間以熱脈衝進入試樣內，隔熱環的作用是維持試樣一致之單向熱流量。

MTPS：提供瞬態平面熱源功能所需的基本設備，如圖2-圖4所示，包括：

1. 加熱器：可提供足以使試樣表面溫度增加 $1^{\circ}\text{C}\sim 3^{\circ}\text{C}$ 的熱脈衝。
2. 溫度感應器：可提供讀取的試樣表面溫度至 $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$ 。
3. 溫度控制程式：提供1 s~3 s的功率脈



- 說明：(1)試樣
(2)加熱器與溫度感應器
(3)控制器
(4)數據擷取器
(5)加壓裝置

圖2 MTPS配置圖例

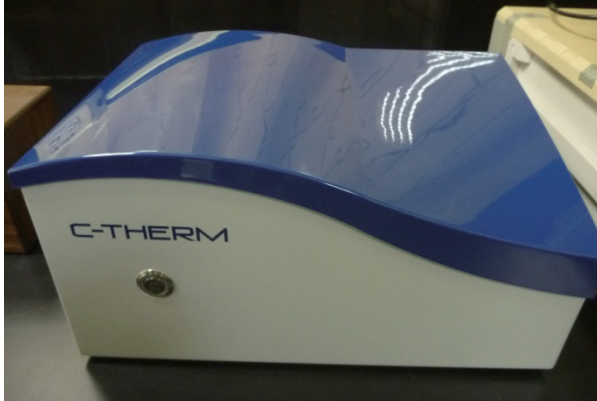


圖3 MTPS之主機圖例

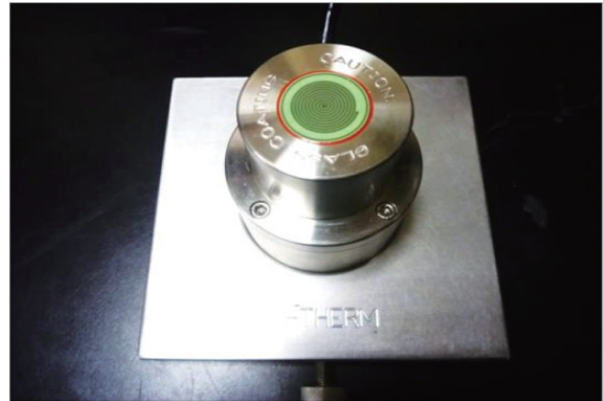


圖4 MTPS之溫度感測器圖例

衝，使表面溫度增加1 °C~3 °C。

4. 隔熱環：確保單向熱流垂直於試樣受熱表面。
5. 數據擷取器：提供每秒20個數據點或更高的數據擷取速率、儲存及顯示量測或計算信號之儀器。輸出信號需有溫度或上升溫度及時間。
6. 加壓裝置：對試樣施加10 kPa~50 kPa的壓力，以確保試樣與加熱器及溫度感應器直接接觸。

(三) 試驗結果

MTPS提供一個瞬間之熱脈衝於試樣表面，當熱流量以一維熱擴散方式進入試樣中時，熱脈衝會使試樣表面溫度提升。隨著時間變化材料之表面溫度提升多寡可決定其熱逸散量，表面溫度提升程度與試樣之熱逸散量為反比關係。以ASTM D7984[9]標準試驗流程，

可獲得待測樣品之熱逸散值 (Thermal effusivity)：此為一種描述測試平面與另一種接觸材料交換熱能之材料屬性，兩種接觸材料的熱流動性決定熱交換後接觸表面的溫度，公式如下。

$$e = \sqrt{\lambda \cdot c_p \cdot \rho}$$

式中：

e = 熱逸散 (Thermal Effusivity), $W \cdot s^{1/2} / (m^2 \cdot K)$

λ = 熱傳導率 (Thermal Conductivity), $W/(m \cdot K)$

c_p = 比熱 (Specific Heat Capacity), $J/(kg \cdot K)$

ρ = 密度 (Mass Density), kg/m^3

(四) 熱逸散值之應用

試驗方法量測加熱元件和織物試樣之間的熱傳導速率，服裝的舒適性質

與初始熱感覺有關（即初次接觸時的冷感或溫熱感），其中較低的熱逸散值表示感覺較為溫暖；反之表示感覺較為涼爽。在標準或特定條件下感應器與被測試樣應在相同溫度下進行，此種試驗方法適用於熱逸散值在 $35\sim 1700\text{ W}\cdot\text{s}^{1/2}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 範圍內的任何織物。圖5為Unifi品牌對熱逸散值之分級，表1為C-Therm設備原

廠及Unifi品牌對產品熱逸散值之要求。

（五）熱逸散差異率之應用及等級

量測機能織物（如：石墨烯或其他材料）在乾燥狀態 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 與 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 熱逸散差異率，以評估織物的溫度調節性能，當熱逸散差異率差異愈高，表示該織物在不同環境溫度下，具有溫度調節之能

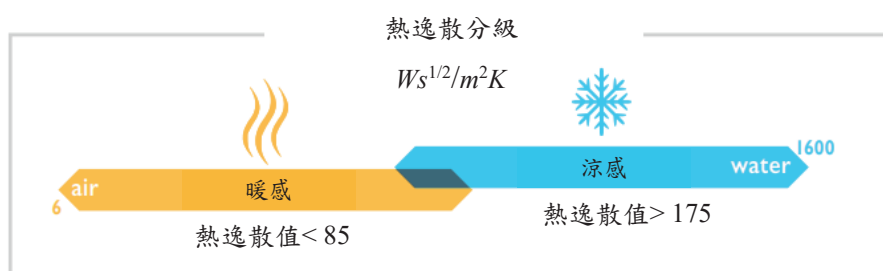


圖5 Unifi品牌對熱逸散值之分級[10]

表1 溫暖的感覺及涼爽的觸感之熱逸散值產品要求

熱逸散 Thermal Effusivity $\text{W}\cdot\text{s}^{1/2}/\text{m}^2\cdot\text{K}$	C-Therm網站 品牌目前採用	Unifi 要求
Cool-Touch 涼爽的觸感	> 185	> 175
Warm-Feel 溫暖的感覺	介於 65 – 100	< 85

表2 熱逸散等級

等級(Grade)	$30\text{ }^\circ\text{C}$ 與 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 熱逸散差異率(%)	說明(Description)
A	$5 \leq X < 10$	好(Good)
AA	$10 \leq X < 15$	很好(Very Good)
AAA	$15 \leq X$	優良(Excellent)

力。冷熱環境之熱逸散差異率，公式如下，熱逸散等級如表2：

$$X = (e_{30} - e_{10}) \div e_{10} \times 100 \%$$

式中： e_{30} = 30 °C 環境下之平均熱逸散值

e_{10} = 10 °C 環境下之平均熱逸散值

四、未來應用

近年來，消費者與國際品牌對於石墨烯產品尋求更便利、多功能和可持續材料，而石墨烯已被證明是紡織業遊戲規則改變者，促使許多紡織品和服裝製造商、設計師和品牌已經採用最新技術來突破製造、生產、營銷和可穿戴性的極限。利用石墨烯的特性生產可穿戴電子產品，可以檢測、分析和傳輸有關身體和環境數據等資訊，並可以在智能穿戴、醫療保健、能源儲存和傳輸等領域有改變生活的應用。

（一）石墨烯創新塗層，帶來類似皮膚的感覺

位於瑞典的石墨烯旗艦計劃成員 Grafren AB 利用多種紡織材料來測試石墨烯塗層方法，該方法不使用黏合劑，也不使用膠，而是將導電元件嵌入織物內部，使石墨烯薄片融入織物深處的創新方法，創造了柔軟、靈活的類皮膚產品，且具有可控制的導電性。獲得了石

墨烯油墨製備和織物塗層兩項專利，並開發自有獨特的石墨烯塗層設備，目前可用卷對卷方式處理兩米寬的織物。該公司正在研發三種石墨烯紡織產品：準備商業化的電加熱紡織品(G-Heatex)、超輕迷彩服和用於數字醫療保健的壓力監測織物。Grafren 首席執行官埃里克·赫拉諾夫斯基(Erik Khranovskyy)表示：“一旦證明其效率，將成為‘綠色’複合材料商業化的遊戲規則改變者” [11]。

（二）導電紗

石墨烯旗艦計劃柔性電子工作小組的研究人員正在開發富含石墨烯的導電聚酯（聚對苯二甲酸乙二醇酯，PET）紗線。芬蘭科技研究院VTT從英國劍橋大學獲得石墨烯基質的層狀材料，並將其與PET複合。接續，德國公司Trevira將這種材料紡成織物。如果技術經濟上取得成功，這種材料有望成為一種新型的輕質導電紗線[12]。

（三）石墨烯作為金屬替代品

可穿戴技術的電子元件目前主要使用金屬墨水（例如銀和金）來生產，這些墨水價格昂貴、對環境不友好且對氧化敏感，而石墨烯材料對環境友好、堅固、易於獲得且導電性高，用石墨烯代

替這些金屬，將可解決這些挑戰並提供許多益處，使其成為未來可穿戴技術的理想選擇，可穿戴技術在健康監測上之應用廣泛，例如，由荷蘭埃因霍溫科技大學的研究人員領導的團隊使用石墨烯薄片、無毒溶劑和可拉伸的熱塑性聚氨酯黏合劑生產了一種導電油墨，即使在100 %應變下，墨水仍保持導電性，並且在20~50 %的應變（相當於人體皮膚的拉伸）的1,000次循環中高度穩定。高導電性、可拉伸性和耐用性的結合使這些導體很有希望應用於汗液感應或脈搏監測腕帶、體表加熱器、智能運動服、可穿戴電源和可穿戴ECG傳感器。由VTT領導的團隊也在研究用於心臟監測的襯衫[13]。

（四）防雷達偵測軍用紡織品

奈米碳管(Carbon Nanotube, CNT)和石墨烯皆具有出色的機械和熱性能，能夠吸收和消散紅外雷達系統發出的微波輻射。因此，研究指出，軍事人員穿著含有奈米碳管和石墨烯的紡織品塗層所製成的制服比穿著傳統制服，表現出明顯減低的熱信號，紅外雷達系統檢測不到這些人員。另一個研究是，石墨烯能夠重定向或彎曲光線和電磁輻射，進而

有效地使物體隱形，這種能力引起了軍方的高度關注。但是，尚未開發和應用於實際產品中[14]。

五、結語

石墨烯是一種熱導體，因此非常適合用於保暖的冬季服裝，在寒冷的環境中保存熱量，在溫暖的環境中散發熱量。市面上，石墨烯產品眾多，例如寢具、衣著、面膜、眼罩，以及護腰、護頸、護肩、護腕等發熱產品，但品質良莠不齊，針對石墨烯的溫度調節性能建議可採用CNS 16199進行測試，量測冷熱環境之熱逸散差異率，差異率愈高表示調溫性能愈優異，讓消費者在產品選購上有所依據。

六、參考文獻

1. Stephen Hodge, Thanuja Galhena, Mayank Gautam, Bobbie Lawrenson, David Kerr, Neill Ricketts, 2022, Graphene-Wear™ Textiles 6th April 2022.
2. Innovation in Textiles, 2021, www.innovationintextiles.com，取自<https://www.innovationintextiles.com/superdry-backs-graphene-for-future-fabrics> (112/5/24)

3. Innovation in Textiles, 2022, www.innovationintextiles.com, 取自<https://www.innovationintextiles.com/umbro-to-add-graphenewear/> (112/5/24)
4. Smart Textiles, Grassi to graphene to protective clothing, Advances in Textiles Technology, Aug. (2017).
5. 曾尚德；陳亭汶；胡子暉，2019，石墨烯含量對織物熱調節舒適性的影響，紡織綜合研究期刊，29卷3期，P1-7。
6. CNS 16199: 2023織物熱逸散試驗法－使用改良式瞬態平面熱源傳導儀 (MTPS)
7. Marin, E., "Teaching Thermal Physics by Touching," Latin-America Journal of Physics Education, Vol 2, No.1, January 2008, pp. 15-17.
8. Wongsriruska, S., Howes, P., Conreen, M., Miodownik, M., "The Use of Physical Property Data to Predict the Touch Perception of Materials," Materials and Design, Vol 42, 2012, pp. 238-244.
9. ASTM D7984-2021, Standard Test Method for Measurement of Thermal Effusivity of Fabrics Using a Modified Transient Plane Source (MTPS) Instrument (2021).
10. Instantaneous sensation of coolness to the touch. , 2023, 取自<https://s3.unifi.com/collateral/chillsense.pdf> (112/5/23)
11. Materials of the future: Graphene and textiles , 2023, 取自<https://graphene-flagship.eu/graphene/news/materials-of-the-future-graphene-and-textiles/>
12. Developing graphene-based wearable electronics , 2023, 取自<https://graphene-flagship.eu/research/work-packages/work-package-9-flexible-electronics/> (112/5/23)
13. Stretchable graphene conductors for wearable technologies , 2022, <https://graphene-flagship.eu/>, 取自<https://graphene-flagship.eu/graphene/news/stretchable-graphene-conductors-for-wearable-technologies/> (112/5/23)
14. Military clothing and equipment: escalating tensions spur investment , 2022, Performance Apparel Markets No 75, Textiles Intelligence Limited. P.55