

# 新竹市第四十四屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

科 別： 國中

組 別： 化學組

作 品 名 稱： 「膠」換陣勢：探討電場誘導下石墨烯於白

膠基質之定向排列與電熱性質研究

關 鍵 詞： 石墨烯、電場定向、風力地暖系統

編 號：

## 摘要

本研究開發以水溶性高分子聚醋酸乙烯酯（PVAc）為基質，摻雜石墨與石墨烯粉體之高效導電複合材料。核心技術利用自製平行電場裝置施加外部電場，藉由界面極化效應誘導填料產生偶極矩並定向排列。此舉成功在基質內部構建連續的導電滲透路徑（Percolation Pathways），克服了填料於高分子鏈間隨機分佈導致的高臨界濃度問題。

實驗證實，當石墨烯添加比例為 40% 時，複材展現最佳的電子傳輸效能與焦耳熱轉換效率。為落實綠能應用，研究進一步整合風力發電系統驅動發熱片，並於模型房屋中驗證其地板暖氣系統之供暖效果。結果顯示，透過電場調控填料排列，不僅能顯著提升電熱反應速率與材料各向異性，更利用石墨烯之高機械強度強化建築結構。

本研究成功透過控制施加電場使石墨烯定向均勻分散於白膠高分子基材中，並結合風力發電儲能系統提供電力，使石墨烯發熱片通電後有效產生熱能，展現綠色能源發展高效率低成本發熱材料之應用潛力。

## 壹、研究動機

在上理化課時，老師提到石墨烯是世界上最薄、最堅硬的奈米材料，其導電跟導熱的性質佳，時逢冬天天氣寒冷，家裡常常需要開啟暖氣取暖，但這樣會消耗大量電力，導致電費相當昂貴。剛好也在電視上看到介紹風力發電等綠色能源，也提到高分子材料在通電後會產生熱能，讓我產生了一個想法：如果能利用風力發電剛好配合新竹風大的地理環境，把石墨烯添加到柔軟又輕薄的高分子基材中發熱，並製作成家裡地板的形式通電加熱，配合熱空氣上升的原理，就能在冬天提供良好的保暖效果，不但不會覺得寒冷，還能達到節能又環保的目的。之後在與老師討論後，我們決定將石墨烯粉與高分子材料結合，並探討其在施加電場時是否能提升其力學與熱學特性，進一步研究利用風力發電來製作地暖氣系統，取代過度依賴石化燃料產生能源的問題，因此開啟了本次科展的研究。

## 貳、研究目的

本研究旨在利用日常生活中常見之水溶性高分子材料-白膠作為基材，添加石墨烯粉體以提升材料導電性。並透過外加電場誘導石墨烯填料產生排列，形成導電通道，克服石墨烯片在複合材料中隨機分散易導致的團聚問題，探討施加電場是否能控制改變石墨烯在高分子基材中的排列方式，進而降低導電臨界濃度並提升電熱效率。

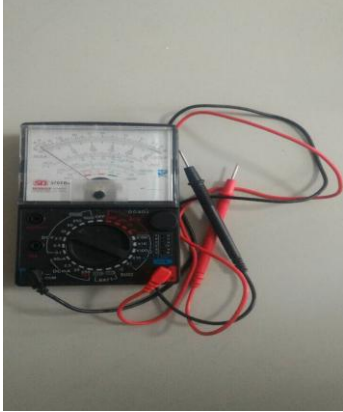

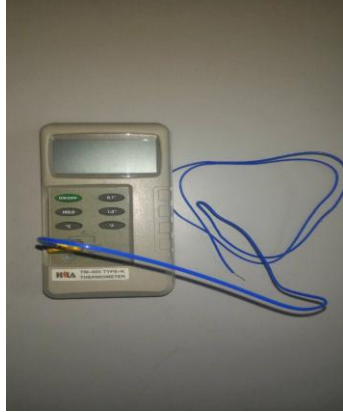






最後選定適當電場強度製作的石墨烯複合材料發熱片，結合風力發電系統提供電能，使高分子發熱片因電阻效應產生熱能，進而應用於地板暖氣系統，以探討其作為節能與取代過度依賴石化燃料取暖之可行性。

本研究預期達成以下目標：

- 一、建立一套自製簡易且可操作之平行電場實驗裝置。
- 二、透過有無施加電場製作多種比例複合材料片(石墨粉與石墨烯)。
- 三、分析化學摻雜效應並探討施加電場影響對導電性與發熱效率。
- 四、設計簡易房屋發熱地板，並探討風力發電提供地暖系統實際應用效果性。

## 參、研究設備與器材

### 一、設備

三用電錶	各式導線	數位式溫度計
		
電子秤	導電銅箔	電壓輸出器
		
電磁加熱攪拌器	高倍率顯微鏡	烘箱
		

## 二、材料

<p>水性白膠</p>	<p>石墨粉 300 目</p>	<p>石墨粉 1000 目</p>
		
<p>石墨粉 3000 目</p>	<p>石墨粉 8000 目</p>	<p>石墨烯粉</p>
		
<p>載玻片</p>	<p>風力發電機</p>	
		

## 肆、研究過程與方法

### 一、文獻回顧

#### (一)、導電高分子之分類

導電高分子依其導電機制可分為「本質結構型導電高分子」與「導電複合型高分子」兩大類[1]。

##### 1.本質結構型導電高分子

本質結構型導電高分子 (intrinsically conducting polymers) 係指分子主鏈本身具有共軛雙鍵結構 (conjugated structure)，能在適當摻雜後產生自由載子而導電之高分子材料。1977 年 Alan J. Heeger、Alan G. MacDiarmid 與 Hideki Shirakawa 發現，共軛高分子「聚乙炔」在經氧化或還原摻雜後，其導電率可大幅提升，甚至接近金屬導電等級。此項重大發現奠定導電高分子研究之基礎，三人並因此於 2000 年獲得諾貝爾化學獎。此類導電機制乃因共軛  $\pi$  電子系統在摻雜後形成極化子 (polaron) 或雙極化子 (bipolaron)，使電荷得以沿分子鏈移動，屬於「分子本身結構導電」。

##### 2.導電複合型高分子 (本研究採用方式)

導電複合型高分子 (conductive polymer composites) 則是將導電填料分散於原本為絕緣性的高分子基材中，使材料形成導電網路而具備導電能力。常見導電填料包括：

- (1)金屬粉末 (如金、銀、銅、鎳、鋁)
- (2)碳黑
- (3)石墨粉或石墨烯
- (4)碳奈米管等

當導電填料濃度達到一定臨界值時，填料彼此接觸形成連續導電通道，使材料電阻迅速下降，此現象稱為「滲流現象 (percolation effect)」，其臨界濃度稱為「滲流臨界值 (percolation threshold)」。本研究即採用此種

市售白膠，其主要成分為聚醋酸乙烯酯（Polyvinyl Acetate, 簡稱 PVAc）。PVAc 為由單體醋酸乙烯酯（Vinyl Acetate Monomer, VAM）經聚合反應所形成之合成聚合物。此材料最早於 1912 年由德國化學家 Fritz Klatte 發現。PVAc 具有良好彈性與黏著性，通常以水乳液形式販售可形成均勻薄膜，由於 PVAc 本身為絕緣材料，因此本研究透過加入導電材料，使其由絕緣體轉變為具導電性的複合材料。

## (二)、導電填料的選擇[2]

導電複合材料係將導電填料分散於絕緣高分子基材中。當填料含量低時，導電粒子彼此分離，材料仍為絕緣體；當填料濃度增加至某一臨界值時，導電粒子開始形成連續網路，材料電阻迅速下降，此現象稱為「滲流效應」。石墨烯為單層碳原子以  $sp^2$  鍵結形成之二維蜂巢狀結構材料，具有極高導率、優異機械強度、良好熱導率與大比表面積，石墨烯於 2004 年由 Andre Geim 與 Konstantin Novoselov 成功分離並證實其性質，兩人因此獲得 2010 年諾貝爾物理學獎。由於石墨烯具有高導電性與片狀結構，理論上可在較低添加量下形成導電網路，因此適合作為導電填料。

## (三)、電能轉換熱能<sup>6</sup>

$$1. E = V / d$$

E：電場強度（V/cm） V：施加電壓（V）

d：電極距離（cm）

當  $V = 5V \sim 40V$ ， $d = 0.1 \text{ cm}$ （1 mm）時： $E = 50 \sim 400 \text{ V/cm}$

電場強度增強使導電填料產生極化與定向排列[3]。

2. 電阻：電荷移動即形成電流，但任何材料對電荷移動一定會呈現反抗其移動之阻力，此反抗電荷移動之阻力即稱為電阻，決定電阻值大小，有下列幾個因素：

(1) 材料種類：不同材料其電阻係數不同，而  $R$  與電阻係數值成正比。

(2) 導體的長度( $l$ )： $R$  值與  $l$  成正比。

(3)導體的截面積(A)：R值與A成反比。

以上關係可以公式 $R=各種材質電阻係數 \times (l/A)$ 。

3.歐姆定律：導電體兩端的電壓與通過導電體的電流成正比，以方程式表示  $V=IR$ 。(V:電壓、I:電流、R:電阻) [4]

#### (四)導電臨界濃度理論 (Percolation Theory) [5]

當導電填料濃度達臨界值時，材料內部會形成連續導電通道。若填料排列具方向性，可降低臨界濃度、提高導電效率和改善發熱均勻性，本研究所使用之石墨烯材料具有高導電性與優異熱傳導特性[6]。

當電流通過含石墨烯導電網絡之高分子複合材料時，依據焦耳定律 (Joule Heating)： $Q=I^2Rt$ ，其中Q 為產生熱量，I 為電流，R 為材料電阻，t 為通電時間。電能可直接轉換為熱能，使材料形成均勻發熱之發熱片。而本研究之核心概念在於建立「再生能源直接熱利用」之跨能源轉換模式，其能量流程如下：風能→機械能→電能→石墨烯焦耳加熱→熱能，當風力發電系統產生電能時，可直接供應石墨烯高分子發熱片，熱能並儲存於建材或蓄熱結構中（如矽藻土包覆結構）。

此設計具有以下理論優勢：

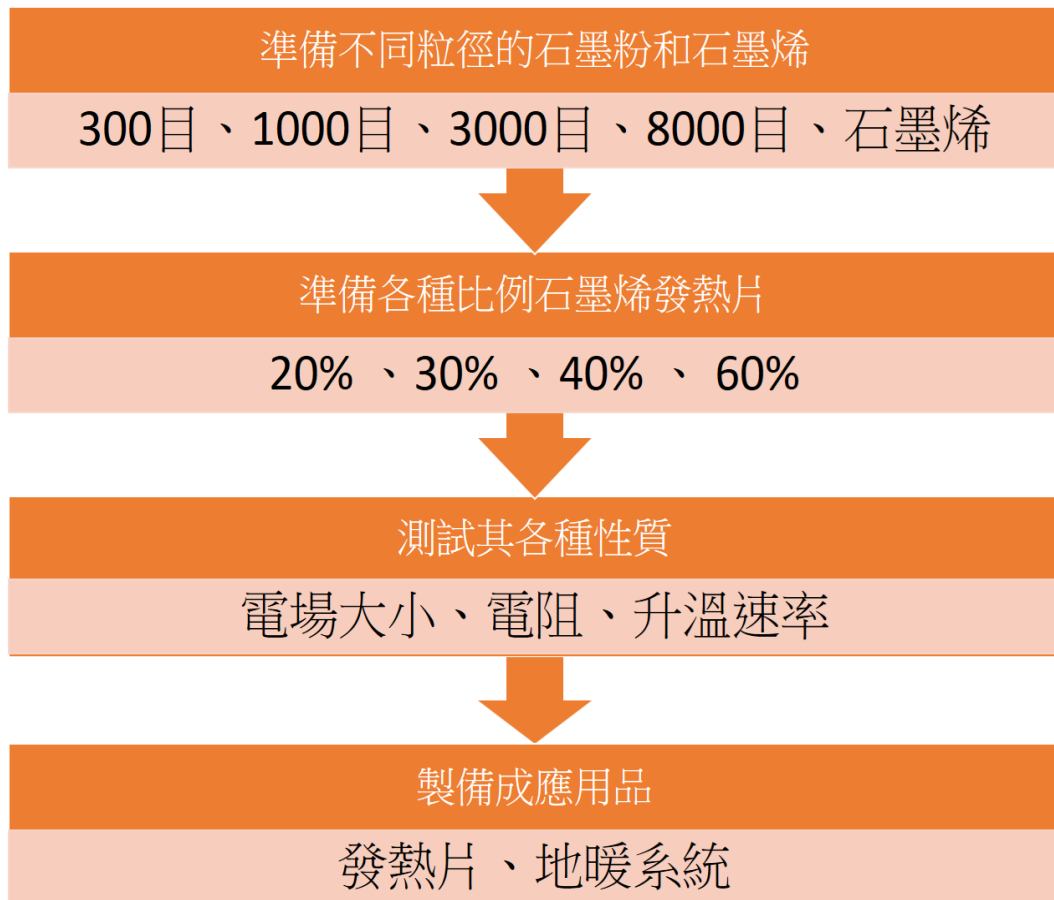
- (1)電能儲存需求降低：可以減少傳統電池儲能之能量損失與成本問題。
- (2)能源利用率提升：把間歇性電力轉為可累積之熱能。
- (3)材料整合創新：結合奈米導電材料與再生能源系統。

#### (五)、風力發電發熱能原理[7]

風力機藉由空氣的氣動力作用轉動葉片，將風的動能轉換成電能。風能與風葉掃摺面積及風速三次方成正比，風速愈大，風能愈高，可產出的電力也愈多，因此選擇良好的風場極為重要！至於實際發出功率則必須考慮葉片效率、傳動機械效率、發電機效率與電力轉換器效率等因素。


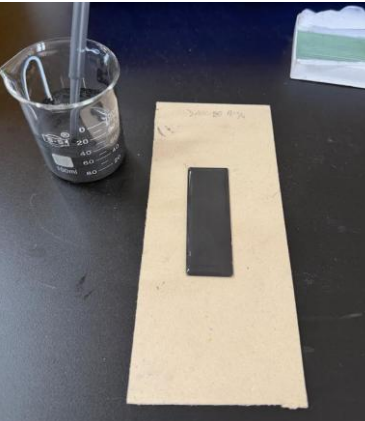


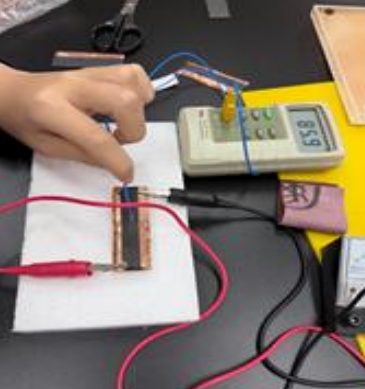

在能量轉換的過程中，會發生些許損耗，以致於風力機無法將全部風能轉換成電能。一般而言，風力機將風能轉換為電能的輸出效率約20~40%。

## 二、研究步驟



### 三、實驗過程

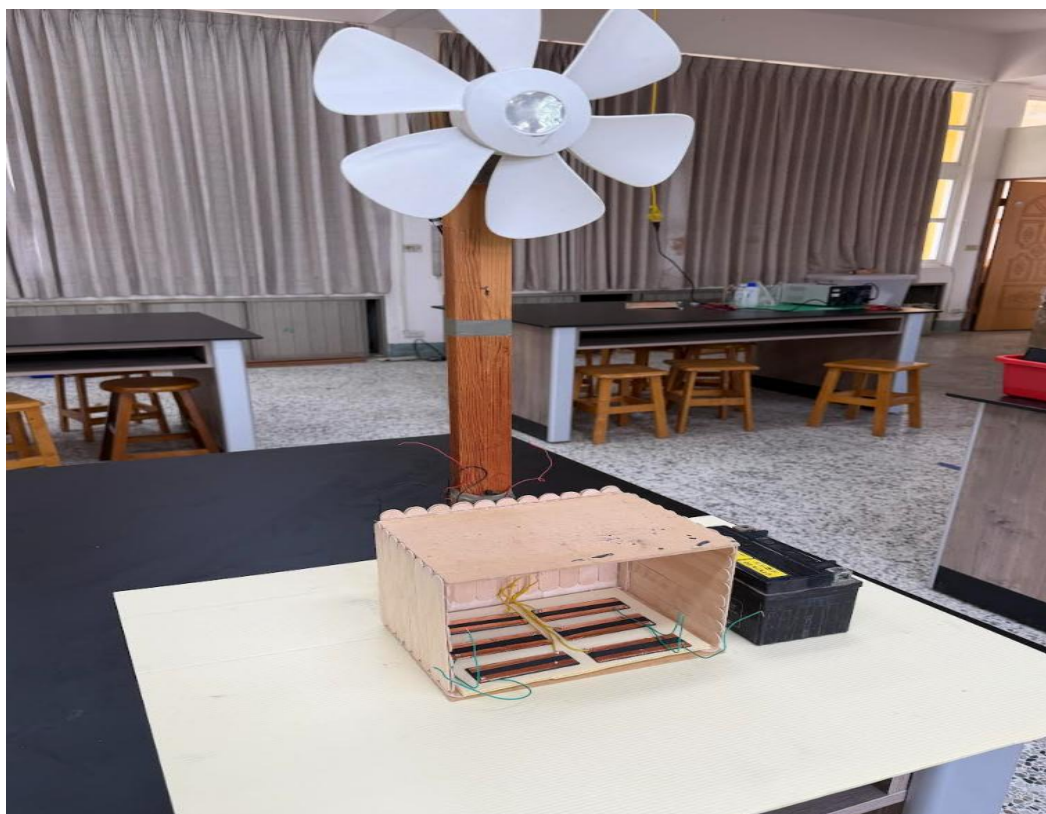
(一)實驗一：把不同粒徑的石墨烯粉體秤適當重量添加白膠中，並改變其含量百分比攪拌製成導電混合稠狀液體。

		
<p>取所需石墨烯的公數，之後再加高分子樹脂到25克。</p>	<p>添加蒸餾水仔細均勻攪拌。</p>	<p>用滴管將攪拌混合均勻的導電複合塑料，利用滴管方法均勻塗在玻璃基材上。</p>
		
<p>放入烘箱以45℃烘乾，把水分去除，電熱膜即成型。</p>	<p>利用銅箔膠帶貼在電熱膜片上做為電極，並於電極接上直流電源後，調整不同電壓對電熱膜進行升溫變化的測量</p>	<p>利用銅箔膠帶貼在電熱膜片上做為電極，並於電極接上可調式變壓器後，調整不同電壓對電熱膜進行升溫變化的測量</p>

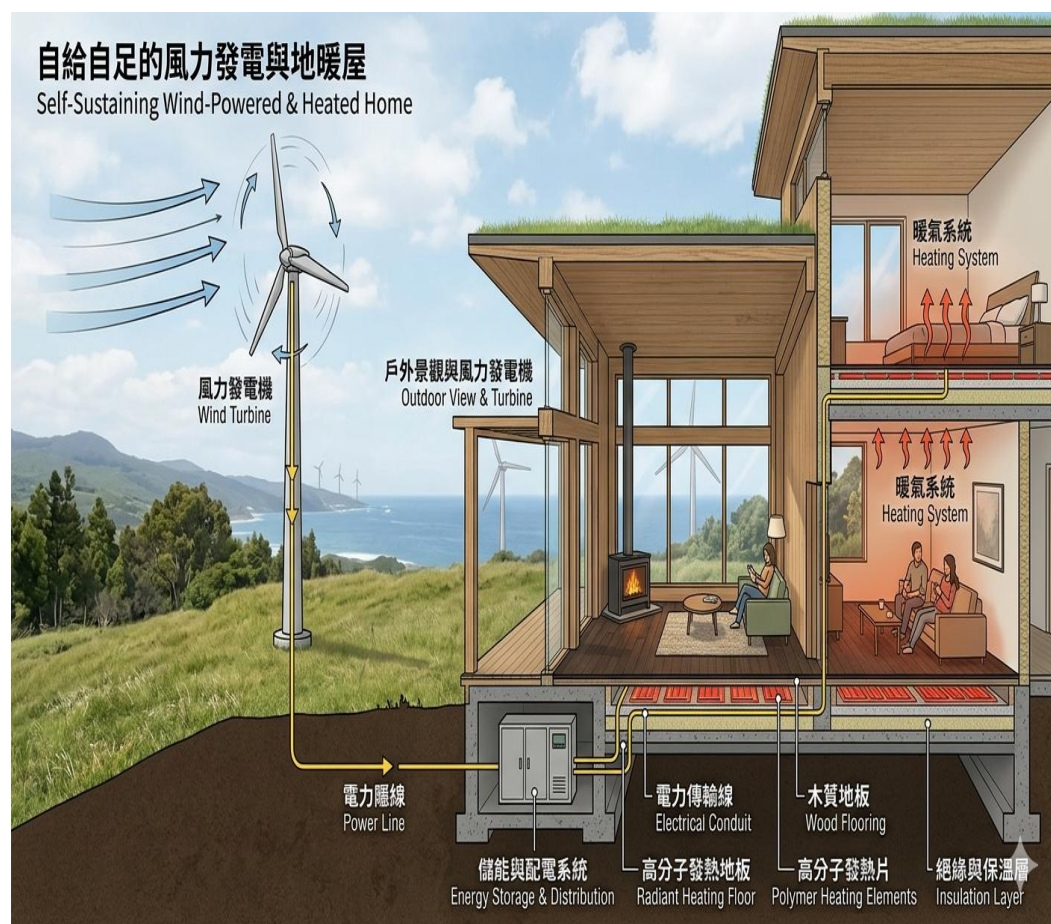
(二)實驗二：再烘乾時在烘箱中利用電源供應器提供電場，添加把不同粒徑的石墨烯粉體秤適當重量添加白膠中，並改變其含量百分比攪拌製成導電混合稠狀液體。

		
<p>取所需石墨烯的公克數，之後再加高分子樹脂到25克。</p>	<p>然後仔細均勻攪拌，攪拌期間可以添加蒸餾水以方便攪拌均勻。</p>	<p>用滴管經攪拌混合均勻的導電複合塑料，利用滴管方法均勻塗在玻璃基材上。</p>
		
<p>烘箱上方架設電源供應器，施加電壓電場後放入高分子基材，以45°C烘24小時，把水分去除，電熱膜即成型。</p>	<p>利用銅箔膠帶貼在電熱膜片上做為電極，並於電極接上可調式變壓器後，調整不同電壓對電熱膜進行升溫變化的測量</p>	<p>利用銅箔膠帶貼在電熱膜片上做為電極，並於電極接上可調式變壓器後，調整不同電壓對電熱膜進行升溫變化的測量</p>

#### 四、製作應用的成品



風力發電屋概念圖



## 伍、研究結果

一、各種石墨粉粒徑與高分子基材添加重量百分比。

表 1

<b>種類 \ 重量</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>40%</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>
石墨粉 300 目(克)- 48 $\mu$ m	5	7.5	10	12.5	15
白膠(克)	20	17.5	15	12.5	10
<b>種類 \ 重量</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>40%</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>
石墨粉 1000 目(克)- 13 $\mu$ m	5	7.5	10	12.5	15
白膠(克)	20	17.5	15	12.5	10
<b>種類 \ 重量</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>40%</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>
石墨粉 3000 目(克)- 4.5 $\mu$ m	5	7.5	10	12.5	15
白膠(克)	20	17.5	15	12.5	10
<b>種類 \ 重量</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>40%</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>
石墨粉 8000 目(克)- 1.6 $\mu$ m	5	7.5	10	12.5	15
白膠(克)	20	17.5	15	12.5	10
<b>種類 \ 重量</b>	<b>20%</b>	<b>30%</b>	<b>40%</b>	<b>50%</b>	<b>60%</b>
石墨烯 (克)- <4 $\mu$ m	5	7.5	10	12.5	15
白膠(克)	20	17.5	15	12.5	10

## 二、探討各種比例導電發熱片的發熱效果

表 2：無施加電場經塗佈方式製成不同比例碳黑之表面電阻值  $\Omega$

種類 \ 重量	20%	30%	40%	50%	60%
300 目-粒徑 $48 \mu\text{m}$	1420	1220	885	652	420
1000 目-粒徑 $13 \mu\text{m}$	1380	1155	842	705	358
3000 目-粒徑 $4.5 \mu\text{m}$	1350	1088	958	632	339
8000 目-粒徑 $1.6 \mu\text{m}$	1280	1010	945	720	376
石墨烯-徑 $<4 \mu\text{m}$	1110	890	482	364	190

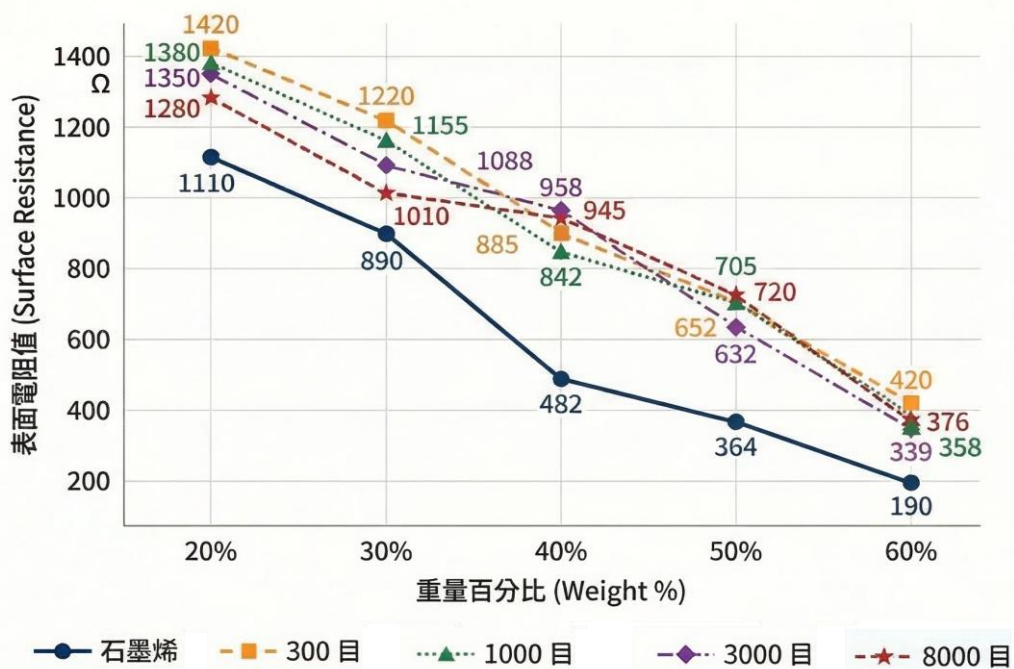


圖 1：無施加電場不同比例表面電阻值  $\Omega$

- 隨著石墨烯或碳粉的重量百分比（20% 增加至 60%）提高，所有測試材料都隨著重量百分比增加，隨著濃度變高表面電阻值明顯下降。這符合材料內部形成的導電通路逐漸完整。而電阻值大約落在  $190 \Omega$  到  $1420 \Omega$  之間。
- 比較材料方面，石墨烯（藍色實線）表現最佳：  
在相同的重量百分比下，石墨烯的電阻值始終是最低的，尤其在石墨烯 40% 以上的濃度時電阻下降速度極快，在 60% 時達到了全組最低的  $190 \Omega$ ，證明石墨烯建立導電網絡方面效率最高。

表 4：有施加電場經塗佈方式製成不同比例碳黑之表面電阻值-電場大小 100

重量 種類(200)	20%	30%	40%	50%	60%
300 目(克)	1280	832	522	332	268
1000 目(克)	1220	812	628	322	226
3000 目(克)	1130	798	528	302	264
8000 目(克)	1080	720	498	265	198
石墨烯(克)	1090	525	198	102	85

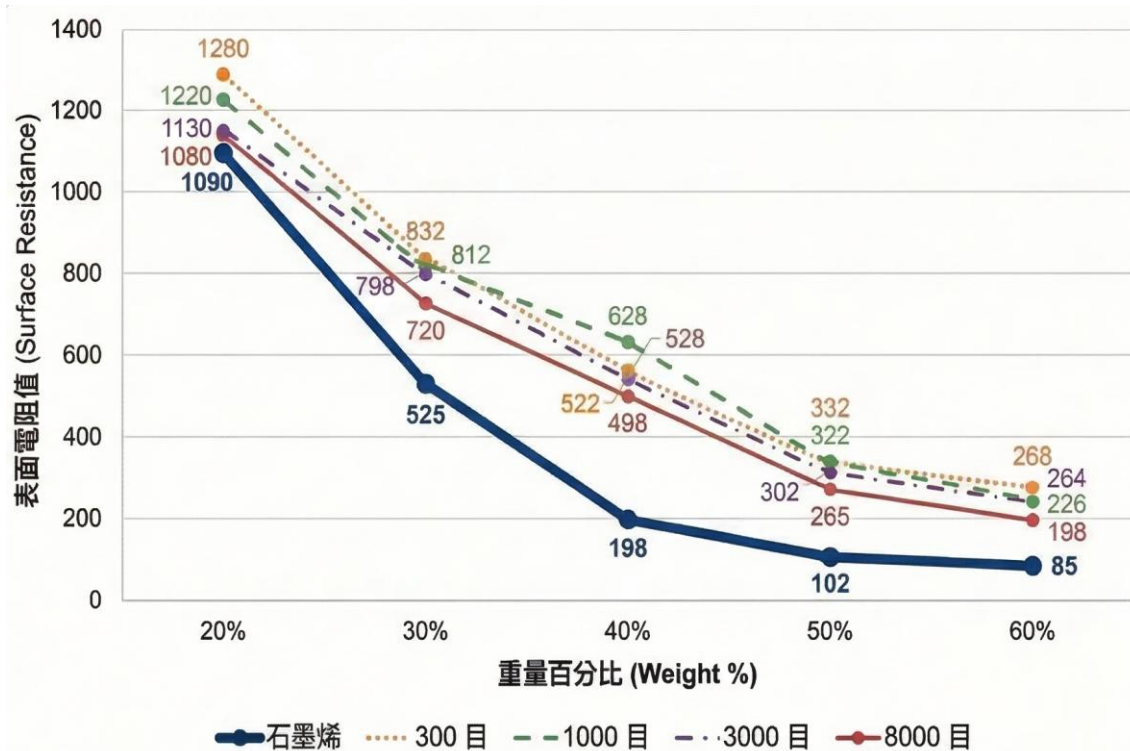


圖 2：有施加電場不同比例表面電阻值  $\Omega$

1. 在相同的 100E 電場環境中，藉由下降的電阻值可推測導電能力（由強到弱）：

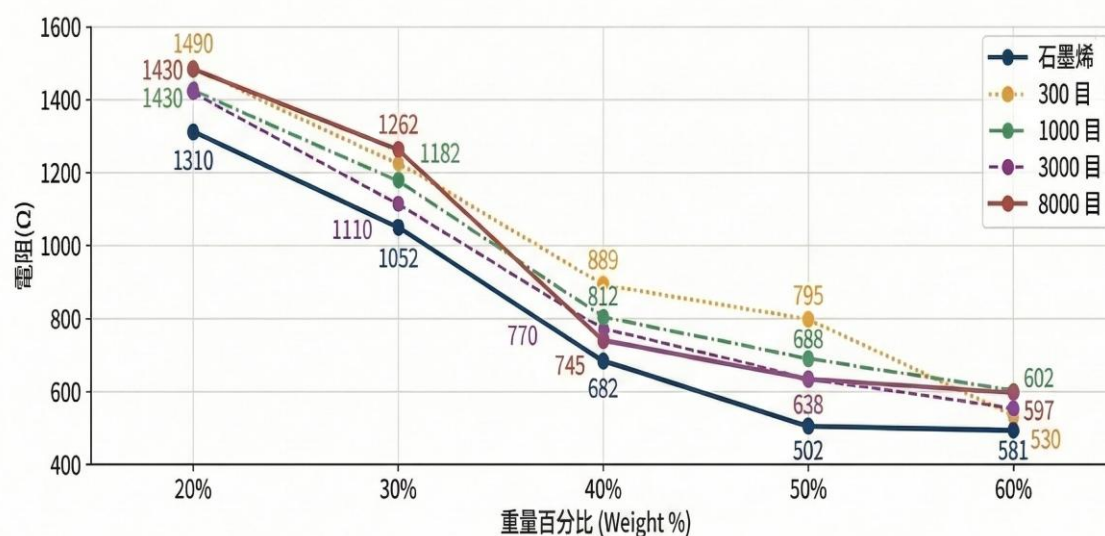
石墨烯 > 8000 目 > 1000 目 > 3000 目 > 300 目

而石墨烯均所有重量百分比中，石墨烯的電阻值都是最低的，尤其在 40% 之後，其電阻值迅速下降。

2. 在 60% 重量比下，石墨烯的電阻從原本的 190  $\Omega$  驟降至 85  $\Omega$ ，分析其背後原因應是施加電場有助於導電粉體（特別是石墨烯）在白膠中進行定向排列或加速形成導電滲透網路（Percolation Network），這就像是把散亂的石墨片排列整齊，讓電流更容易通過，而比較相關測量的電阻值也可以發現。

表 3：有施加電場經塗佈方式製成不同比例碳黑之表面電阻值-電場大小 300

重量 種類(200)	20%	30%	40%	50%	60%
300 目(克)	1490	1220	889	795	530
1000 目(克)	1430	1182	812	688	602
3000 目(克)	1420	1110	770	638	581
8000 目(克)	1480	1262	745	628	597
石墨烯(克)	1310	1052	682	502	492

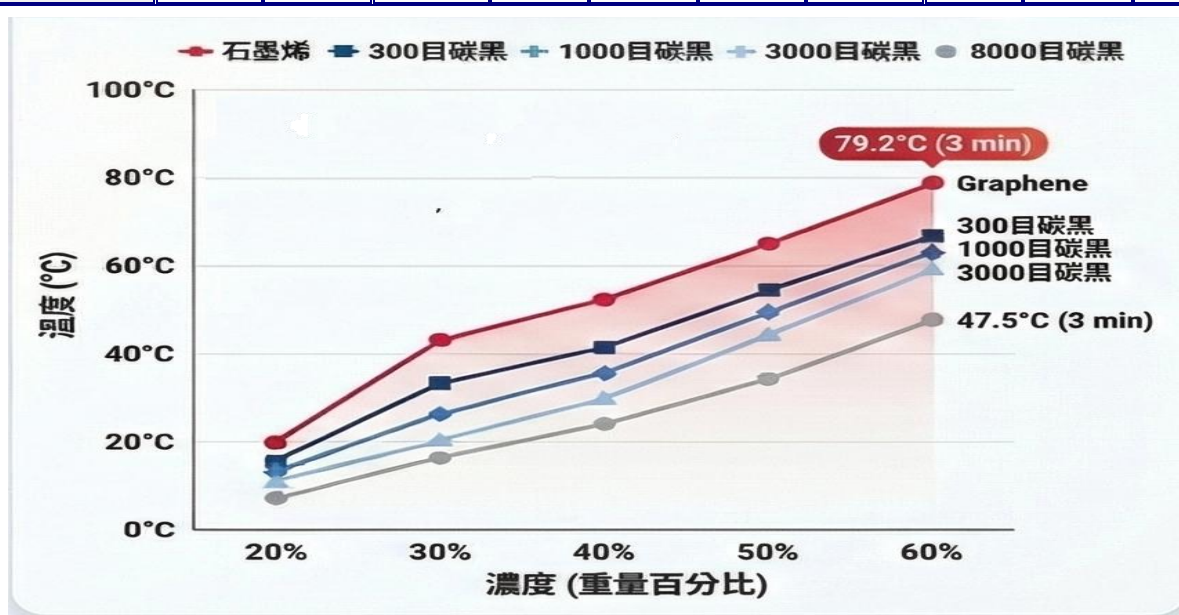


1. 從來源中的數據表可以看出，當電場強度從 100E 增加到 300E 時，所有導電填料（石墨烯與碳黑）的電阻值均出現了大幅度的回升。以 60% 重量的石墨烯為例，其表面電阻變化如下：無電場：電阻為 190 Ω、100E 電場：電阻降至最低點 85 Ω、300E 電場：電阻反而飆升至 492 Ω，推測 300E 的強電場可能造成的導電粒子在白膠基材中產生劇烈的遷移或產生極端排列情況，反而破壞了原本分布均勻的導電網路，團聚導致彼此間排列雜亂，破壞了原本分布均勻的導電網路，因粒子聚集成互不相連的小群體，而非連續的網路時，電荷在試片表面的傳輸會變得更加困難，導致宏觀上的表面電阻值大幅增加。

### 三、 探討各種比例導電發熱膜片的升溫測試

表5：無施加電場加熱片 12伏特(初溫20°C)

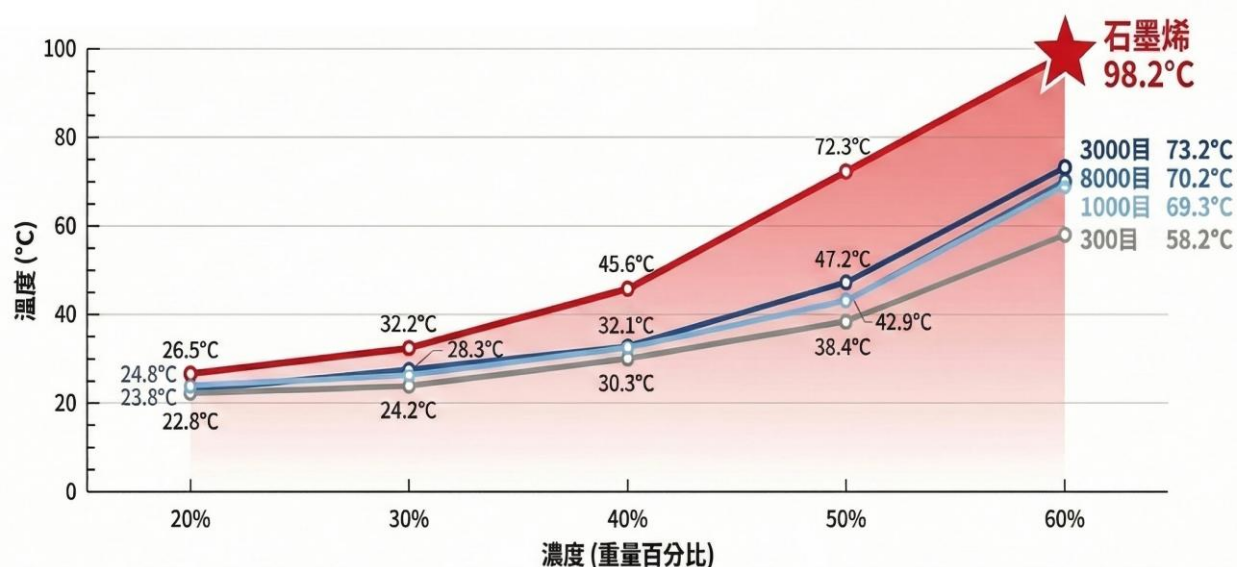
百分比 種類	20%		30%		40%		50%		60%	
	1分	3分	1分	3分	1分	3分	1分	3分	1分	3分
300目	20.3	21.8	20.8	23.2	22.1	27.2	24.2	32.2	28.8	42.7
1000目	20.9	21.8	21.6	23.8	23.6	28.6	24.8	31.2	30.2	45.6
3000目	20.5	22.3	22.2	23.6	22.9	30.8	25.9	31.6	31.2	48.2
8000目	20.8	22.6	21.9	24.3	22.5	29.5	26.2	30.2	30.8	47.5
石墨烯	21.8	23.8	23.8	26.2	25.3	35.6	31.2	62.8	35.2	79.2



1. 因白膠作為絕緣的材料，導電填料必須在其中互相接觸或距離足夠近，電荷才能透過電子躍遷 (Hopping) 或直接接觸進行傳遞。實驗數據顯示，當濃度從 20% 提高到 60% 時，表面電阻顯著下降，溫度則隨之上升，這是因為高濃度比例的填料增加了粒子間的碰撞機率，形成了更密集的導電通路。而粒徑越細 (目數越高)，單位體積內的粒子數量越多，在隨機分佈下更有機會接觸形成導電鏈結，從而降低電阻並增加發熱均勻度。
2. 而石墨烯平面結構，擁有極大的平面面積。這種二維片層結構比球狀的碳黑更容易互相重疊 (Overlap)，像拼圖一樣建立起大面積的導電網絡，因此在相同重量百分比下，我們可以發現石墨烯的升溫效果較明顯。

表6：有施加100E電場加熱片 12伏特(初溫20°C)

百分比 種類	20%		30%		40%		50%		60%	
	1分	3分	1分	3分	1分	3分	1分	3分	1分	3分
300 目	20.6	22.8	22.9	24.2	23.1	30.3	30.6	38.4	31.2	58.2
1000 目	22.2	23.8	23.5	25.3	25.6	31.6	31.2	47.1	32.8	69.3
3000 目	22.6	24.8	23.9	26.6	25.2	32.1	31.8	47.2	32.6	73.2
8000 目	22.2	23.6	26.7	28.3	23.7	33.8	33.2	42.9	32.8	70.2
石墨烯	23.1	26.5	27.6	32.2	30.2	45.6	34.6	72.3	38.5	98.2



1.核心觀察：施加電場顯著提升最高溫突破：在 100E 電場加持下，石墨烯（60%，3 分鐘）的溫度飆升至 98.2 度，另外 300 目~8000 目的升溫數據也整體提升

2. 不同材料的升溫效能排名

在 100E 電場下，最終升溫能力排序如下：

石墨烯 > 3000 目 > 8000 目 > 1000 目 > 300 目

表7：有施加300E電場加熱片 12伏特(初溫20°C)

百分比 種類	20%		30%		40%		50%		60%	
	1分	3分	1分	3分	1分	3分	1分	3分	1分	3分
300 目	20.8	22.2	21.8	23.6	22.1	30.2	23.8	31.5	25.6	33.8
1000 目	21.2	22.8	21.6	23.8	23.2	31.2	23.5	32.2	24.8	35.6
3000 目	21.9	23.8	22.5	23.6	23.2	30.8	24.8	33.2	23.6	34.6
8000 目	21.1	23.1	22.2	24.3	22.9	29.5	26.1	31.9	24.8	32.2
石墨烯	22.8	25.2	26.8	26.3	26.3	37.6	27.5	32.5	28.5	38.2

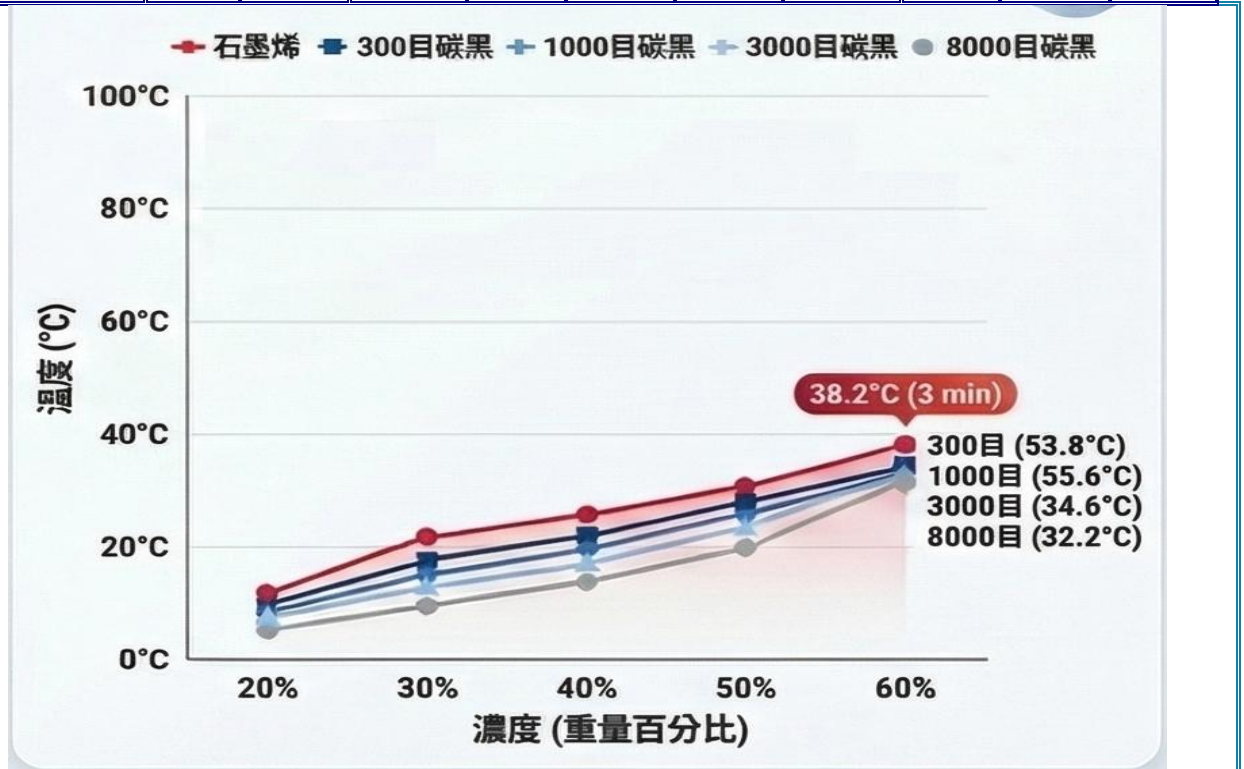


圖 2：白膠

1.在 300E 電場下，最終升溫能力排序（以 60% 濃度為準）如下：

石墨烯 > 1000 目 > 3000 目 > 300 目 > 8000 目，石墨烯（Graphene）依舊領先：即使我們發現整體溫度偏低，添加石墨烯的白膠材料仍是唯一能接近 40°C 的材料。

2.在施加 300E 強電場的情況下，使用 12 伏特加熱片對不同導電填料進行加熱的升溫表現明顯受限，在 300E 電場下，最高溫（石墨烯，60%，3 分鐘）僅達到 38.2 度。對比 100E 電場，同樣是 60% 濃度的石墨烯，在 100E 時可達 98.2 度，但在 300E 下卻下降了約 60°C。這顯示施加過高的電場可能對導電網絡產生了負面影響。

#### 四、導電發熱膜片的高倍率表面分散討論分析

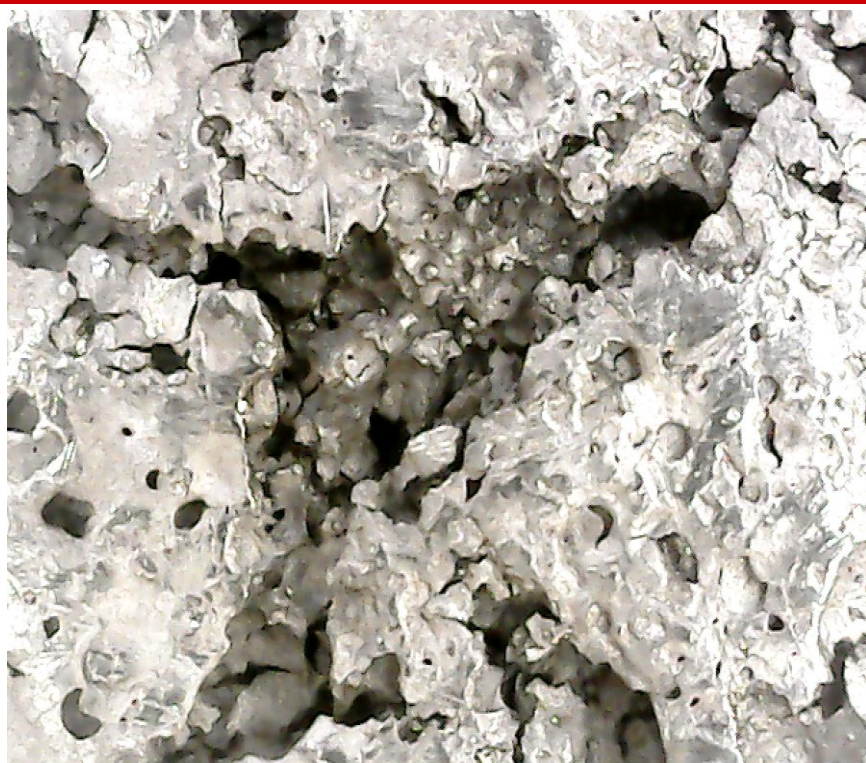


圖 8：石墨烯-60%(電場 100E)

而分析石墨烯的發熱片，在有通電場 100E 下烘乾，在白膠高分子基材中，其石墨烯在添加比例 60% 時感覺分散比較均勻。而分析比較其數據，電阻值明顯較低而 1-3 分鐘的升溫數據，也比其他比例來的高溫。



圖 8：石墨烯-60%(電場 300E)

分析在 300E 電場下烘乾石墨烯的發熱片，觀察高分子基材表面，發現較高的電場並不會讓所有的石墨烯對齊，反而容易在局部發生石墨烯團聚，隨著電場增強或時間拉長，這種破壞會導致聚合物發生熱降解，甚至有些地方燒穿的孔洞，這種現象應該是電場破壞原本均勻的導電與產熱網路，使得整體加熱效率不升反降，電阻在各個比例中也觀察到數據偏高。



圖 8：石墨烯 3000 目分散情況

而比較各種粒徑的石墨粉粒在白膠高分子基材中，因 3000 目的石墨粉粒徑較小。比較電阻值和發熱數據，發現 3000 目的各項數據優於 300 目與 1000 目，原因應該是 3000 目的顆粒大小較適中，在基材分散時，比較不會團聚在一起，而 8000 目粒徑太小，攪拌時較容易聚再一起，不容易混合均勻，所以各項數據稍差一些。



圖 8：石墨粉 3000 目分散情況

觀察 8000 目高分子基材表面，發現粒徑較小的石墨粉在烘乾，有時反而會發現容易在局部發生部分團聚現象，這種現象應該是細小粉體互相吸引，破壞原本應均勻分散，使導電網路效果變差，使得整體升溫效率不升反降，電阻在比例中也可觀察到有些數據較高。

## 陸、結果與討論

### 一、分析摻雜各種粒徑石墨粉或石墨烯在不同添加比例下電阻與升溫的情況

根據實驗數據，把各導電成分（石墨烯與不同目數碳黑）加入白膠基材後，所有測試材料的表面電阻都隨著重量百分比（添加比例）的增加而大幅下降，這顯示增加導電填料的比​​例，能有效在白膠基材中建立更密集的導電網路。

(一)石墨烯的絕對優勢：在任何添加比例下，石墨烯的電阻值始終是最低的。

1.以無電場、60% 比例為例，石墨烯電阻為  $190\ \Omega$ ，而表現最佳的碳黑（3000 目）為  $339\ \Omega$ 。

2.石墨粉粒徑（目數）的差異：

(1)大粒徑（300 目,  $48\ \Omega$ ）：通常具有最高的電阻（導電性最差）。在 60% 比例下，無電場電阻為  $420\ \Omega$ 。

(2)中、小粒徑（1000 目~8000 目）：電阻較低。值得探討的是在 60%高比例下，3000 目電阻的表現（ $339\ \Omega$ ）甚至優於粒徑更小的 8000 目（ $376\ \Omega$ ）。

(二)升溫情況分析：焦耳加熱效應，升溫表現與電阻值呈負相關，即電阻越低，升溫效果越顯著。

1.石墨烯的高效發熱：

(1)在無電場、60%比例下，石墨烯加熱 3 分鐘可達  $79.2^\circ\text{C}$ 。

(2)在 100E 電場輔助下，60% 石墨烯更可達到全實驗最高溫  $98.2^\circ\text{C}$ 。

2.碳黑類的發熱限制：

(1)無電場下，60%比例各類石墨粉升溫介於  $42.7^\circ\text{C}$ （300 目）至  $48.2^\circ\text{C}$ （3000 目）之間。當比例低於 40%時，所有材料的升溫效果均有其極限，3 分鐘升溫多不超過  $10^\circ\text{C}$ （初溫  $20^\circ\text{C}$ ）。

在無電場情況下，導電填料受限於白膠基材的黏滯力，粒子呈現雜亂的隨機分佈。石墨烯在 60%濃度時電阻為  $190\ \Omega$ ，此時導電性完全依賴於填料在基材中的自然接觸。而當施加 100E 的適度電場時，電場力足以克服白膠分子的部分阻

力，誘導石墨烯或石墨粒子產生一定程度的定向排列，進而形成更有效的導電通路，使 60% 石墨烯的電阻大幅降至  $85\ \Omega$ 。這顯示白膠基材在特定電場強度下，能使填料進行有利於導電的重組形式。

## 二、在施加不同電場下乾燥的石墨烯與石墨粉其電阻與升溫的情況分析

針對在施加不同電場強度（無電場、100E、300E）下乾燥的石墨烯與各目數石墨粉填料）之電阻與升溫情況，電場的施加對發熱片的導電性有決定性影響，且呈現非常明顯的差異

(一)100E 電場為最佳條件：施加 100E 電場能誘導導電粒子產生較佳的定向排列，使電阻降至最低，例如，60% 石墨烯在 100E 下電阻僅為  $85\ \Omega$ ，遠低於無電場時的  $190\ \Omega$ 。而 300E 電場導致電阻飆升，當電場增強至 300E 時，所有材料的電阻反而大幅上升，以 60% 石墨烯為例，其電阻由 100E 的  $85\ \Omega$  暴增至  $492\ \Omega$ ，部分數據表現甚至比無電場 ( $190\ \Omega$ ) 更差，這顯示過強的電場可能破壞了導電網路的連續性。

(二)發熱效能與電阻的關聯，高分子發熱片發熱效能（施加 12V 電壓下測試）完全對應電阻值的變化趨勢，均符合焦耳加熱定律。100E 電場下升溫表現最為優異，60% 石墨烯在 3 分鐘內可達全實驗最高溫  $98.2^{\circ}\text{C}$ ，而 3000 目碳黑在相同條件下亦能達到  $73.2^{\circ}\text{C}$ 。但我們發現當實驗乾燥施加 300E 電場時，卻使讓電阻大幅增加，導致其升溫效果極其低落，即使是 60% 石墨烯，3 分鐘僅升溫至  $38.2^{\circ}\text{C}$ ，其餘石墨粉製成的發熱片則普遍維持在  $32^{\circ}\text{C}$  至  $35^{\circ}\text{C}$  之間

總結分析：

不同電場強度（無電場 vs. 100E vs. 300E）的關鍵影響施加電場對膜層電阻的成型具有決定性作用，但並非電場越強效果越好，100E 電場的「優化作用」：在 100E 電場輔助下，所有材料的電阻均降至實驗最低值。以 60% 石墨烯為例，電阻從無電場的  $190\ \Omega$  降至  $85\ \Omega$ 。這推測是因為施加適當強度的電場

100E 電場能誘導導電粒子在白膠中產生優勢排列，強化了導電路徑的連續性。

300E 電場的「抑制現象」：當電場強度提升至 300E 時，電阻值反而出現逆向大幅上升。同樣以 60% 石墨烯為例，電阻竟然回升至 492  $\Omega$ ，甚至比無電場時更高。這顯示當電場強度過大時，強大的電場力可能導致粒子運動過於劇烈，反而破壞了原本趨於穩定的導電鏈結。這種擾動使得粒子排列變得混亂，無法形成連續路徑，導致電阻大幅上升至 492  $\Omega$ 。從膠體化學的角度來看，電場會影響粒子在懸浮液中的穩定性，在 300E 的強電場下，導電填料粒子受到的引力大幅增加，可能促使粒子發生嚴重的粒子團聚效應（Agglomeration）。當石墨烯或碳黑粒子聚集成一個個孤立的「團簇」而非均勻分佈的網路時，電荷在試片表面傳輸時必須跨越更多不導電的白膠區域，這在宏觀上就表現為表面電阻的激增呈現在數據上。

### 三、風力發電地暖系統發熱片選擇情形



比較上方升溫數據後，選擇施加100E電場40%石墨烯的高分子發熱片應用於風力風電系統做成發熱地板，而高分子導熱片應用範圍很廣，原因是它可以利用膠體黏著劑的特性，可直接塗在地板上，我們結合珪藻土保溫，接上適當電源，達到發熱的目的。這次中東危機讓大家瞭解到石化燃料如果短缺，是會嚴重影響日常生活，所以本實驗開發的風力發電結合房屋地暖系統，可以發現效果非常顯著，製作成本又很低，可塑性高，石墨烯甚至可以加強地板的剛性強度，所以本研究探討方向是可行的甚至是應用到日常生活中。

## 扒、參考資料

1. 王仕漢(民 97)。多壁奈米碳管/導電型碳黑應用於複合型導電高分子之電性研究。國立交通大學半導體材料與製程產業系碩士論文。
2. 鄭凱文(民 103)。藉由化學摻雜提升石墨烯做為 TOC 的電性。國立中正大學光機電整合工程系碩士論文。
3. 汪灝(民 113)。利用定向電場增強二維材料邊緣的電化學活性。國立臺灣大學物理系碩士論文。
4. 朱煥民等 (2025)。《自然科學3下》。翰林文教事業。
5. 陳偉銘(民98)。高分子複合材料雙極板射出成形特性之初步探討。國立交通大學機械工程學系碩士論文。
6. 網路資料，石墨烯介紹，網址：  
[https://www.sancode.org.tw/activities\\_info.php?type=3&nid=187](https://www.sancode.org.tw/activities_info.php?type=3&nid=187)。
7. 李俊億(民102)。風力發電加熱器的分析與研製。中原大學電機工程學科。