



以熱機械分析儀與應變規分析奈米環氧樹脂複合材料之熱膨脹性質及成份效應

國立勤益科技大學／張惠玲、陳志明・三聯科技股份有限公司／吳上卿



摘要

本文探討用熱機械分析儀(TMA)與應變規分析奈米環氧樹脂複合材料之熱膨脹係數以及玻璃轉移點溫度(Tg)。奈米環氧樹脂複合材料在製程中添加不同含量之稀釋劑、奈米二氧化矽粉末，與硬化劑經加熱硬化成形，製備成奈米複合材料，並探討添加稀釋劑及二氧化矽之多寡對熱機械性質影響之研究。TMA分析結果顯示：添加奈米二氧化矽0.5 wt.%，可使 T_g 前熱膨脹係數 α_1 最多下降7.45%， T_g 後熱膨脹係數 α_2 最多下降17.38%，樹脂基材中添加6 wt.%稀釋劑，其 α_1 將提升至19.44%， α_2 為9.81%。應變規分析結果則顯示，三個系列添加奈米二氧化矽其 T_g 前熱膨脹係數 α_1 最多下降19.07%， T_g 後 α_2 最多下降21.48%，添加6 wt.%稀釋劑其 α_1 將提升至31.06%， α_2 為20.31%。

經由TMA與應變規分析測量之比較下，可觀察到兩者皆有相同之趨勢，亦是添加奈米粉末對複合材料會降低熱膨脹係數，添加稀釋劑反而會造成負面之效果。

一、前言

環氧樹脂(epoxy resin)是應用相當廣泛的合成樹脂，為兩個碳原子與一個氧原子形成的環狀結構稱為環氧基而分子結構中具有兩個以上

環氧基的化合物即統稱為環氧樹脂。而環氧樹脂會因本身環氧基角張力不穩定的影響與氧碳間的極性以及氧原子鹽基性的關係，因此容易與酸類或鹽基性物質發生開環反應。經硬化反應後之可以得到三次元立體結構產物，具有：容易硬化、體積收縮率低、良好的黏著性、良好的機械性質、良好的絕緣性質、良好的抗化學性質、吸水性不大、價格便宜[1]。

Zavyalov和Pivkina[2]提出聚合物被廣泛地使用是因為：生產上方便，重量輕且延展性佳。不過，聚合物比金屬和陶器的強度更低，改進它們的機械特性的一種方法是將奈米粉末添入，使聚合物特性在保持輕的重量和良好的延長性時，同時改善機械特性。目前許多學者將奈米粉末添加至高分子基材中組成奈米複合材料發現在一些性質上有相當顯著幫助，奈米結構必須與微米甚至巨觀結構相結合，方能展現其卓越特性。

二氧化矽粉體可以提升許多性質[3]，如：添加於橡膠形成矽橡膠，在室溫下使其抗拉強度顯著增加；添加於熱塑性材料，可增加其硬度及熱穩定性；添加於黏著劑可使黏著力增強；添加於塗料中，可使表面較為平整。Wang 等人[4] 在環氧樹脂中添加二氧化矽，分別在室溫和115 °C藉由SEM觀察破裂面的情

形，室溫時破裂面並無發現任何變形，也沒發現基材與強材之間有脫層的現象，主要破裂的部分在於環氧樹脂。而115 °C時，觀察出樹脂的部分變得柔軟，但是依然將二氧化矽顆粒包覆著，也無脫層的現象，由此可知二氧化矽顆粒與環氧樹脂之間有不錯的鍵結。材料性質隨二氧化矽之含量增加時，其機械性質都有提升之結果。但在環境溫度提高時降伏應力與二氧化矽含量多寡沒有穩定加之趨勢，由奈米壓痕實驗可得知，二氧化矽的剛性高於環氧樹脂，故會產生複合材料降服強度增加。

Kinloch等人[5]添入少量之奈米級二氧化矽於含橡膠之環氧樹脂中，對於複合材料之機械性質有提升的能力且熱性質也隨之提高，其中添入奈米級二氧化矽含量為8 wt.%機械性質及熱性質都有提高之結果。利用奈米級二氧化矽分散於環氧樹脂含量高達20.2 wt.%時，破壞韌性提高140 %且楊氏模數也提高30 %，且二氧化矽與橡膠加入環氧樹脂有助於不使其他性質如彈性模數及熱性質損失[6]。Zheng和Ning [7]在2005年研究環氧樹脂中加入奈米級二氧化矽，當二氧化矽含量達3wt.%時其玻璃轉移溫度是最高的，相對機械性質、拉伸強度及衝擊強度...等，也在相同含量下有增加之現象。

Zhang等人[8]二氧化矽以顆粒大小為25 nm均勻分散於環氧樹脂複合材料，研究改變二氧化矽含量來控制顆粒間的距離變化對於機械性質影響。實驗結果二氧化矽含量的提升，對於變曲模量強度和破壞韌性皆有提升之作用。

研究添加無機和有機基團在分子基材中，使得性質提升，所以在近幾年中引起很多

的關注。而有機基板覆晶封裝上，其關鍵點為晶片尺寸和封裝材料，在測試相對位移過程中，因材料間熱膨脹係數的不一致，最終導致層壓板間的焊接點失效[9-11]，而有機基板常用的填充料為矽和氧化鋁。Banks等人[12]發現覆晶封裝製造技術通常會造成熱應力的存在，對於封裝材料可能造成翹曲或不平坦。為了解決這個問題，通常添加低熱膨脹係數的填料到樹脂材料，降低有機基板的熱膨脹係數，以降低材料間熱膨脹係數的不一致。通常沒添加填料的樹脂和焊料，其材料間熱膨脹係數的不一致，相差高達56.8 ppm/°C，導致在熱循環過程中產生裂紋。

高分子材料的熱膨脹使得設計精密模型(mold)時更為複雜，因為必須考慮彈性模數(modulus)和熱膨脹率(thermal expansivity)兩者的互相影響效果以避免或減少熱應力(thermal stress)的產生。

本文研究，添加二氧化矽奈米粉末以增強環氧樹脂複合材料，對於有無添加稀釋劑與添加不同比例之奈米粉末之複合材料，用熱機械分析儀(TMA)與應變規探討分析奈米環氧樹脂複合材料之熱膨脹係數以及玻璃轉移點溫度(Tg)之影響。

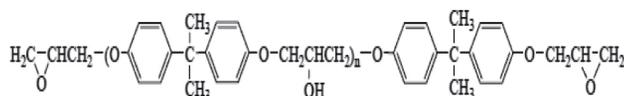
二、材料及儀器

1. 材料與製造設備

(1) 環氧樹脂

環氧當量：185 g/eq

密度：1.78 g/ml





- (2) 奈米二氧化矽粉末(粒徑14奈米)
- (3) 稀釋劑
密度：1.1 g/ml
- (4) 胺硬化劑(A100)
胺價：290 g/eq
密度：1.03 g/ml
- (5) 電子天秤
- (6) 攪拌機(IKARW20 digital)
- (7) 離心脫泡機
- (8) 真空箱
- (9) 真空幫浦
- (10) 烘箱
- (11) 模具

2. 測量儀器

- (1) 熱機械分析儀(Thermomechanical Analysis, TMA-Q400)
熱機械性分析儀又稱為熱膨脹分析儀，是用來量測材料熱膨脹的主要儀器。材料於加熱過程所導致其熱膨脹或收縮連續變化之熱膨脹係數(Coefficient of Thermal Expansion, CTE)，可使用熱機械分析儀量測材料的尺寸隨溫度變化之改變量，分析材料之熱膨脹係數可以了解材料內部的分子運動、結構轉變…等行為。在TMA圖中為兩段相連直線，前段斜率為 α_1 ，後段斜率為 α_2 ，兩斜率之交點對應到的溫度即為玻璃轉移溫度 T_g ，本實驗利用標準Expansion探針作為測量模式測量樣品之 T_g 點、以及 T_g 點前後之熱膨脹係數 α_1 及 α_2 。
- (2) 應變規(Strain Gage, KFG-2-120-C1-

11L1M2R)

應變規，或稱為是應變計，其組成為一固定阻值之電阻。應變規之應用原理為利用應變規中金屬導線阻值之變化來量測應變量，就電阻的特性來說：值會隨著長度之改變而成正比的變化。應變規上的應變感測體是一柵欄狀的應變阻抗材料或是用照相蝕刻法在一微小的面積上提供所需的電阻值。應變規上產生的應變所感應的電子阻抗很小，一般為 10^{-3} 到 $10^{-6}\Omega$ 。普通是用惠斯登電橋以捕捉電子訊號。利用電橋之不平衡的原理，造成一微電壓之輸出，再利用放大器將訊號處理成我們所需要之電壓，去做量測，監控。

三、製程

製程方法說明如下：

1. 首先將環氧樹脂與稀釋劑依比例進行機械攪拌。
2. 再依各不同奈米粉末添加量進行添加後，進行超音波震盪以及機械攪拌。
3. 使用離心脫泡機以及抽真空。
4. 依比例添加硬化劑，並攪拌且離心脫泡。
5. 放置於烘箱成形(120°C ，30 min)。
6. 成形樣品進行後處理(150°C ，300 min)。
7. 進行儀器之測量。

四、結果與討論

本研究配置三種不同系列組成之樣品，其組成真實重量百分比如表1所示。系列一為無添加稀釋劑、系列二為添加約3.2 wt.%稀釋劑，以及系列三添加約6.5 wt.%稀釋劑之高分子基材，並添加五種不同重量百分比之 SiO_2 粉末來製備樣品。

▼表1 一層滑動面型態滑動層判釋數據統計表

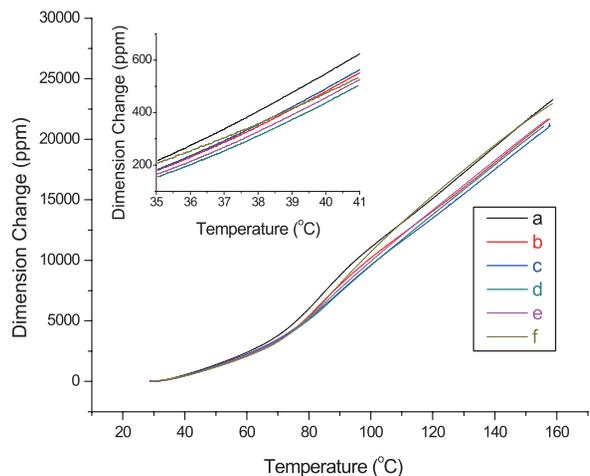
		Epoxy (wt%)	稀釋劑 (wt%)	A100 (wt%)	SiO ₂ (wt%)	SiO ₂ 體積百分比 (vol%)
系列一	EAP00	66.60	0.00	33.40	0.00	0.00
	EAP05	66.05	0.00	33.45	0.50	10.70
	EAP10	65.62	0.00	33.38	1.00	19.39
	EAP15	65.17	0.00	33.34	1.49	26.47
	EAP20	64.49	0.00	33.53	1.98	32.42
	EAP30	63.40	0.00	33.66	2.94	41.77
系列二	D3EAP00	63.43	3.23	33.34	0.00	0.00
	D3EAP05	63.10	3.22	33.18	0.50	10.56
	D3EAP10	62.78	3.20	33.02	1.00	19.18
	D3EAP15	62.51	3.19	32.80	1.50	26.35
	D3EAP20	62.15	3.17	32.68	2.00	32.41
	D3EAP30	61.52	3.14	32.34	3.00	42.08
系列三	D6EAP00	59.93	6.66	33.40	0.00	0.00
	D6EAP05	59.69	6.63	33.18	0.50	10.40
	D6EAP10	59.38	6.60	33.02	1.00	18.92
	D6EAP15	59.06	6.56	32.88	1.50	26.02
	D6EAP20	58.77	6.53	32.70	2.00	32.04
	D6EAP30	58.21	6.47	32.32	3.00	41.68

▼表2 各樣品以TMA測量下之熱膨脹係數以及T_g

		T _g (°C)	Thermal expansivity	
			$\alpha_1(10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	$\alpha_2(10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
系列一	EAP00	71.03	9.21	26.21
	EAP05	73.67	8.71	24.27
	EAP10	76.06	8.69	22.65
	EAP15	74.25	8.54	23.14
	EAP20	73.85	8.59	23.53
	EAP30	71.55	8.07	23.67
系列二	D3EAP00	63.25	9.81	27.85
	D3EAP05	66.77	9.36	23.01
	D3EAP10	67.05	9.78	23.44
	D3EAP15	66.40	9.43	23.73
	D3EAP20	66.02	9.68	23.30
	D3EAP30	65.68	9.55	23.38
系列三	D6EAP00	59.62	11.00	28.78
	D6EAP05	62.10	10.18	24.64
	D6EAP10	63.52	10.64	23.98
	D6EAP15	62.20	10.41	24.30
	D6EAP20	61.76	10.97	23.11
	D6EAP30	60.41	10.24	23.31

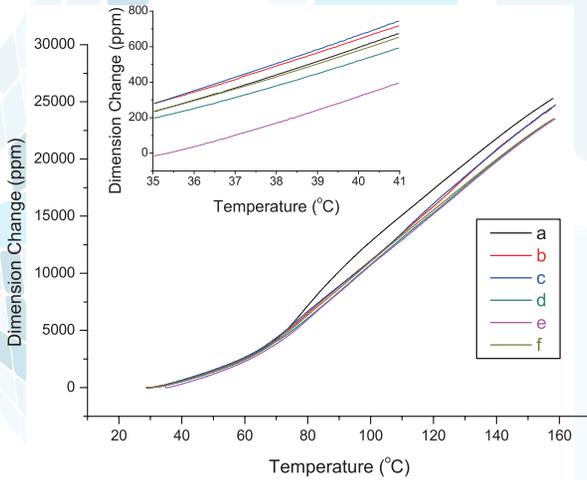
研究當中使用TMA來測量熱膨脹係數 α ，在各種不同粉末添加量之複合材料之熱膨脹可分為兩階段，第一階段為玻璃轉移點溫度(T_g)之前的斜率稱 α_1 ，第二階段為T_g之後的斜率稱 α_2 ；兩段斜率之交點稱為T_g。系列一的T_g約在71.03°C~76.06°C之間，由於此系列環氧樹脂在100°C後有軟化現象，所以 α_2 以在100°C之前數值，其分析結果如表2所示。

以TMA實驗結果顯示，如圖1所示系列一複合材料在無添加奈米粉末樣品EAP00之T_g為71.03°C；當添加1 wt.%奈米粉末之樣品EAP10時，有最高之T_g值為76.06°C，但是添加超過1 wt.%奈米粉末含量之樣品EAP10複合材料，T_g則會逐漸降低，所以奈米粉末添加量達1 wt.%是系列一中具有最高玻璃轉移點。

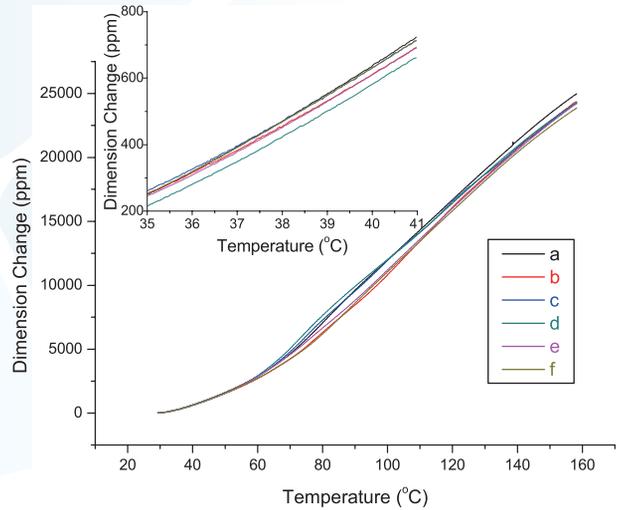


▲圖1 系列一不同奈米粉末添加量之TMA分析圖
(a)EAP00(b)EAP05(c)EAP10
(d)EAP15(e)EAP20(f)EAP30

如圖2所示系列二在無添加奈米粉末樣品D3EAP00之T_g為63.25°C；當奈米粉末添加量增至1 wt.%之D3EAP10時，有最高之T_g為67.05°C，但是奈米粉末含量超過1 wt.%之複合材料，T_g則會降低。



▲ 圖2 系列二不同奈米粉末添加量之TMA分析圖
(a)D3EAP00(b)D3EAP05(c)D3EAP10
(d)D3EAP15(e)D3EAP20(f)D3EAP30



▲ 圖3 系列三不同奈米粉末添加量之TMA分析圖
(a)D6EAP00(b)D6EAP05(c)D6EAP10
(d)D6EAP15(e)D6EAP20(f)D6EAP30

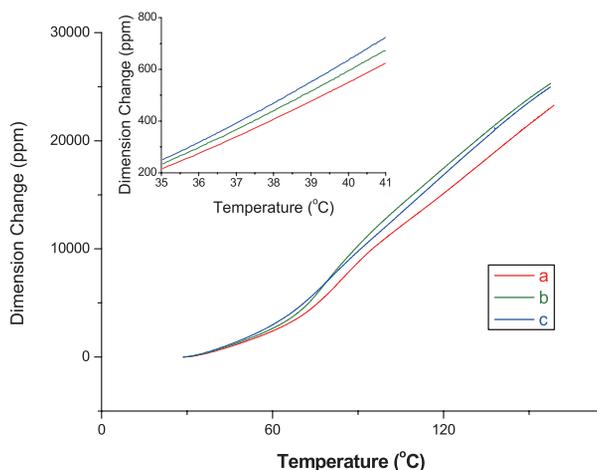
圖3所示系列三無添加奈米粉末樣品D6EAP00之 T_g 為 59.62°C ；當奈米粉末添加量增至1 wt.%之樣品D6EAP10，有最高之 T_g 值為 63.52°C ，因此添加超過1 wt.%奈米粉末， T_g 則會逐漸降低之趨勢。而三種系列比較下，未添加稀釋劑樣品EAP10比添加6 wt.%稀釋劑樣品D6EAP10之 T_g 最大降低 12.54°C 。關於系列一無添加奈米粉末樣品EAP00之 α_1 為 $9.21 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 為 $26.21 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，當添加0.5 wt.%奈米粉末之樣品EAP05，其 α_1 則會降低至 $8.71 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 為 $24.27 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，添加0.5 wt.%奈米粉末對於系列一之複合材 T_g 前熱膨脹係數 α_1 降低5.43%， T_g 後熱膨脹係數 α_2 降低7.40%。其中系列一於添加3 wt.%奈米粉末之 T_g 前熱膨脹係數 α_1 最多降低12.38%， T_g 後熱膨脹係數 α_2 則於添加1 wt.%奈米粉末時，最多降低13.58%。其目的為降低複合材料之熱膨脹係數，以達到材料優越之熱性質。

關於系列二無添加奈米粉末樣品D3EAP00之 α_1 為 $9.81 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 為 $27.85 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，當添加0.5 wt.%奈米粉末之樣品D3EAP05，其 α_1 則會降低至 $9.36 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 為 $23.01 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，然而奈米粉末添加量超過0.5 wt.%，對於系列二之複合材料無顯著降低之效果，其中添加0.5 wt.%奈米粉末對於系列二之複合材料 T_g 前熱膨脹係數 α_1 最多降低4.59%， T_g 後熱膨脹係數 α_2 最多降低17.38%。

系列三無添加奈米粉末之樣品D6EAP00之 α_1 為 $11.00 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 為 $28.78 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，當添加0.5 wt.%奈米粉末之樣品D6EAP05，其 α_1 則會降低至 $10.18 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 為 $24.64 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ，然而奈米粉末添加量再增加，對於系列三之複合材料並無太大降低之效果，添加0.5 wt.%奈米粉末對於系列三之複合材料 T_g 前熱膨脹係數 α_1 最多降低7.45%，但對 T_g 後熱膨脹係數 α_2 ，則可降低14.38%。其中添加2 wt.%奈米粉末之 T_g 後熱膨脹係數 α_2 最多降

低19.70%。

經由系列一至系列三比較可得結果，樹脂基材添加稀釋劑則會提升熱膨脹係數。而圖4為系列一至系列三以TMA分析未添加與添加稀釋劑之熱膨脹係數比較，由結果可得知，未添加與添加6 wt.%稀釋劑其 T_g 前熱膨脹係數 α_1 提升19.44%與 T_g 後熱膨脹係數 α_2 提升9.81%，顯示添加稀釋劑反而會造成熱膨脹係數上升且降低玻璃轉移點溫度。



▲ 圖4 系列一至系列三以TMA分析稀釋劑添加量對熱膨脹係數之影響
(a)EAP00(b)D3EAP00(c)D6EAP00

由表3可得知測量各種不同含量之奈米複合材料的熱膨脹係數及 T_g ，首先將樣品貼至應變規，測量溫度從30°C開始，並以5°C/min之升溫速率上升至100°C，且分析奈米複合材料的熱膨脹係數之關係。

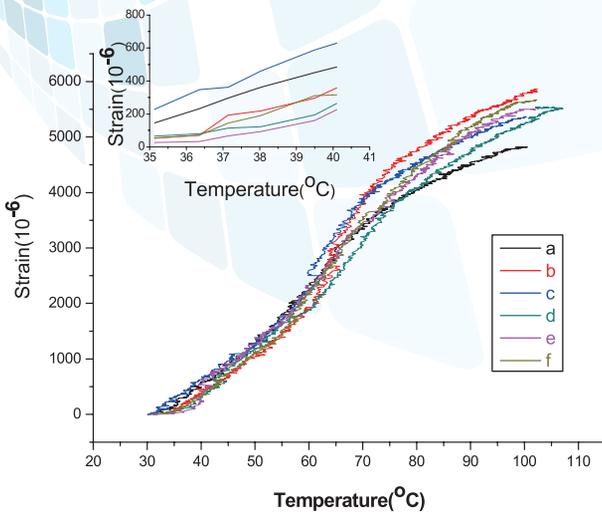
▼表3 各樣品以應變規測量下之熱膨脹係數以及 T_g

		T_g (°C)	Thermal expansivity	
			$\alpha_1(10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	$\alpha_2(10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$
系列一	EAP00	55.00	7.34	13.00
	EAP05	56.00	5.94	11.44
	EAP10	56.00	5.68	11.52
	EAP15	60.00	5.11	11.40
	EAP20	60.00	5.68	11.92
	EAP30	61.00	5.94	11.82
系列二	D3EAP00	55.00	9.36	14.20
	D3EAP05	56.00	7.92	12.10
	D3EAP10	57.00	7.63	12.25
	D3EAP15	58.00	7.96	12.50
	D3EAP20	60.00	8.24	12.40
	D3EAP30	61.00	8.05	12.24
系列三	D6EAP00	52.00	9.62	15.64
	D6EAP05	53.00	8.33	12.28
	D6EAP10	55.00	8.50	12.00
	D6EAP15	57.00	8.70	12.16
	D6EAP20	57.00	8.18	12.48
	D6EAP30	60.00	8.29	11.54

以應變規測量結果顯示，如表3所示可得知，系列一與系列二複合材料在無添加奈米粉末樣品EAP00與D3EAP00之 T_g 為55°C；當奈米粉末添加量增至3wt.%時，有最高之 T_g 為61°C；其三種系列比較下， T_g 最多降低3°C至5°C。因此樹脂基材中添加稀釋劑經應變規之測量，其玻璃轉移點溫度會下降。如圖5可得知系列一各樣品經應變規測量後之圖形，無添加奈米粉末樣品EAP00，其 α_1 為 $7.34 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 為 $13.00 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，當添加0.5 wt.%奈米粉末之樣品EAP05，其 α_1 則會降低至 $5.94 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 降低至 $11.44 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，因此添加0.5 wt.%奈米粉末對於系列一之複合材料 T_g 前熱膨脹係數 α_1 降低19.07%， T_g 後

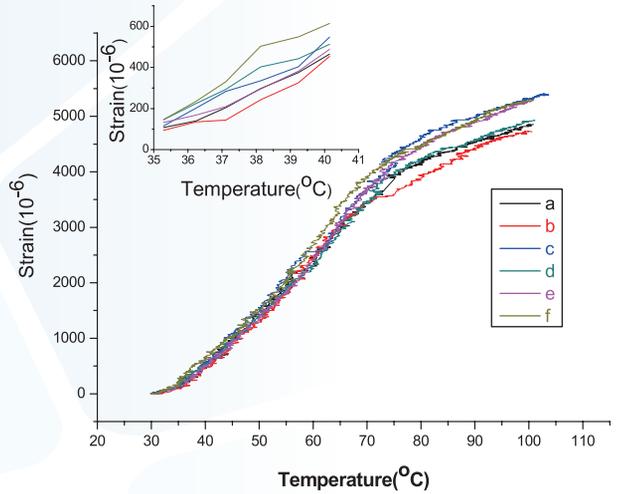


熱膨脹係數 α_2 降低12%。其中系列一皆於添加1 wt.%奈米粉末之 T_g 前熱膨脹係數 α_1 最多降低30.38%， T_g 後熱膨脹係數 α_2 最多降低12.31%。若持續增加奈米粉末超過1 wt.%對於熱膨脹並無降低之趨勢，由以上實驗得知，添加奈米粉末可以有效地降低複合材料之熱膨脹係數，以達到材料優越之熱性質。



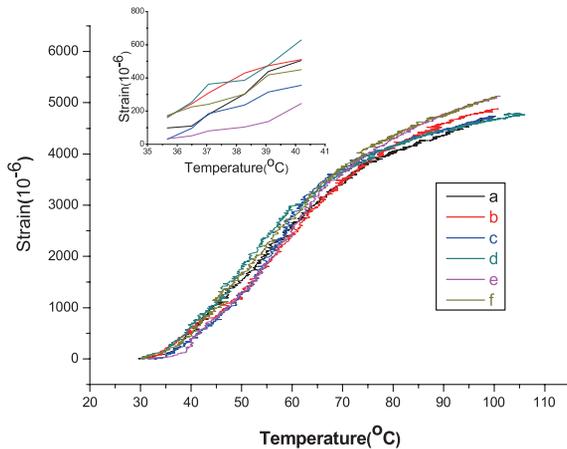
▲ 圖5 系列一以應變規分析添加不同奈米粉末之影響
(a)EAP00(b)EAP05(c)EAP10(d)EAP15
(e)EAP20(f)EAP30

系列二而言，如圖6可得知系列二各樣品經應變規測量後之圖形，無添加奈米粉末樣品D3EAP00之 α_1 為 $9.36 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 為 $14.20 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，當添加0.5 wt.%奈米粉末樣品D3EAP05，其 α_1 則會降低至 $7.92 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 為 $12.10 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，添加0.5 wt.%奈米粉末對於系列一之複合材 T_g 前熱膨脹係數 α_1 降低15.38%， T_g 後熱膨脹係數 α_2 最多降低14.79%。然而奈米粉末添加量超過1 wt.%並無顯著降低之效果，其中系列二添加1 wt.%奈米粉末之 T_g 前熱膨脹係數 α_1 最多降低18.48%。



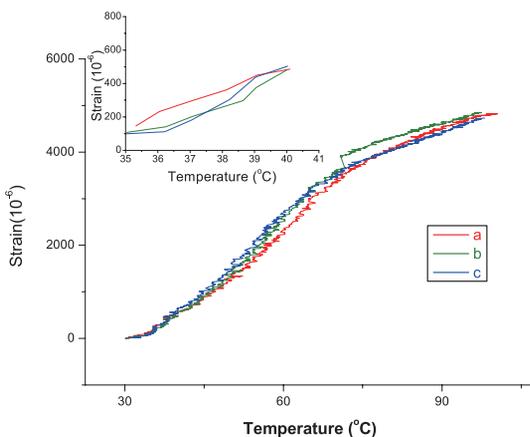
▲ 圖6 系列二以應變規分析添加不同奈米粉末之影響
(a)D3EAP00(b)D3EAP05(c)D3EAP10
(d)D3EAP15(e)D3EAP20(f)D3EAP30

圖7可得知系列三添加奈米粉末各樣品經應變規測量後之圖形，無添加奈米粉末樣品D6EAP00之 α_1 為 $9.62 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 為 $15.64 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，當添加0.5 wt.%奈米粉末之樣品D6EAP05，其 α_1 則會降低至 $8.33 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ； α_2 為 $12.28 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，若持續添加奈米粉末超過1.5 wt.%時，其熱膨脹係數降到最低，因此粉末添加量超過1.5 wt.%之樣品，其熱膨脹係數會先降後升，可能歸咎於粉末之團聚現象，添加奈米粉末對於系列三之複合材料 T_g 前熱膨脹係數 α_1 降低13.41%， T_g 後熱膨脹係數 α_2 降低21.48%。其中系列三於添加2 wt.%奈米粉末之 T_g 前熱膨脹係數 α_1 最多降低14.97%， T_g 後熱膨脹係數 α_2 則於添加3 wt.%奈米粉末時，最多降低26.21%。



▲ 圖7 系列三以應變規分析添加不同奈米粉末之影響
(a)D6EAP00(b)D6EAP05(c)D6EAP10
(d)D6EAP15(e)D6EAP20(f)D6EAP30

圖8所示為系列一至系列三以應變規分析未添加與添加稀釋劑之熱膨脹係數比較，未添加與添加6 wt.%稀釋劑其 T_g 前熱膨脹係數 α_1 提升31.06%與 T_g 後熱膨脹係數 α_2 提升20.31%。因此樹脂基材中添加稀釋劑含量越多，整體效果將變差。歸納TMA與應變規分析之結果有相同之趨勢：在粉末分散未團聚在奈米尺度下，添加奈米粉末含量越多，其熱膨脹係數則會下降。



▲ 圖8 系列一至系列三以應變規分析稀釋劑添加量對熱膨脹係數之影響
(a)EAP00(b)D3EAP00(c)D6EAP00

五、結語

本文旨在探討奈米二氧化矽/環氧樹脂奈米複合材料之製備及性質之研究，並針對製備上不同之條件來進行討論，如：奈米粉末、稀釋劑添加量等。研究中以TMA測量結果顯示，三種系列皆於添加1 wt.%之二氧化矽奈米粉末時有最高之 T_g ，但當添加稀釋劑則會呈現 T_g 降低之趨勢，其中未添加稀釋劑與添加6 wt.%稀釋劑之 T_g 最大降低12.54°C。至於熱膨脹係數，三種系列僅需添加少量0.5 wt.%之二氧化矽奈米粉末即有顯著降低之趨勢，不過以 T_g 前熱膨脹係數 α_1 來論，三種系列中最大降低了4.59%至7.45%， α_2 最大降低7.4%至17.38%。

應變規測量結果顯示，三種系列對於奈米粉末之添加有效降低其熱膨脹係數，就以 α_1 來比較，最大降低了13.41%至19.07%， α_2 最大降低了12%至21.48%。而三系列中 T_g 提升約6°C至8°C，因此添加稀釋劑含量越多，則會使熱膨脹係數持續增加及 T_g 下降。

熱機械分析儀在惰性氣體下量測，與應變規採用在空氣熱對流下量測，兩種儀器量測原理與氛圍並不相同，但是均對材料成分顯示同樣趨勢：稀釋劑添加會影響複合材料之熱性質。整體而言，添加奈米粉末含量越多，其熱膨脹係數會下降。

備註：因篇幅關係，參考文獻出處請參照原作論文。