

陸、結論與未來展望

本研究利用環氧樹脂 (Epon828) 與有機黏土 (I30P) 製備出 epoxy/clay 奈米複合材料，並依據製備方法的不同過程分為三個系統：系統一為有機黏土未經處理之 epoxy/clay 奈米複材，系統二為有機黏土經冷凍乾燥處理之 epoxy/clay 奈米複材，系統三為使用超音波震盪溶液法製備 epoxy/clay 奈米複材。將製得之 epoxy/clay 奈米複合材料經過實驗分析檢測，以瞭解添加有機黏土對整體奈米複材之形態學、熱性質、機械性質的影響。以下吾人將對於本論文之實驗分析結果，作一綜合性的整理。

1. 奈米複材之熱重損失分析

對三個系統而言，epoxy/clay 奈米複材的初始裂解溫度和最大裂解溫度，都隨著 I30P 黏土的添加量愈多會有些微下降的趨勢。這是因為黏土片層表面的有機改質劑(alkylammonium cations)受熱較不穩定，且環氧樹脂基材本身受熱相較之下會較穩定，造成無法產生對有機改質劑因受熱不穩定而發生的熱傳遞屏蔽現象，所以 epoxy/clay 奈米複材容易提前發生裂解現象。

2. 奈米複材之形態學分析

藉由 XRD 和 TEM 分析證實，三個系統的環氧樹脂分子都有插層進入 I30P 黏土片層間，依據奈米材料的定義，本研究的三個系統都已達到奈米級的複合材料。系統一的 epoxy/clay 奈米複材能使其

I30P 黏土的層間距 d_{001} 增大至 10nm 左右，而系統二的 epoxy/clay 奈米複材能使其 I30P 黏土的層間距 d_{001} 增大至 13nm 左右，但由於這兩個系統 I30P 片層都以較大規模束團的形式存在於奈米複材中，所以系統一和系統二是屬於無序插層型的奈米複合材料。而系統三的 epoxy/clay 奈米複材其 I30P 的分散性較佳，因 I30P 黏土以較小的束團分佈於整體奈米複材中，屬於分散性良好的部分剝離型奈米複合材料。

3. 奈米複材之尺寸安定性分析

對三個系統的 epoxy/clay 奈米複材而言，隨著 I30P 黏土重量濃度的增加，其奈米複材的熱膨脹係數(CTE)會逐漸地下降。因為 I30P 黏土本身具有較剛硬且高比表面積的性質，會限制環氧樹脂分子鏈段的運動，且 I30P 黏土也是一種熱傳導係數低的陶瓷材料，在升溫過程中，I30P 黏土會阻擋大量熱能傳至環氧樹脂基材，使環氧樹脂分子鏈段獲得較少的能量，而不足以發生扭動或轉動的高分子運動現象。文獻指出，奈米複材的熱膨脹係數主要受其黏土顆粒的分散情形所影響，因系統三奈米複材中的 I30P 黏土有較好的分散性，所以其熱膨脹係數下降的幅度也比前兩個系統來得大。

4. 奈米複材之 DMA 分析

對三個系統的 epoxy/clay 奈米複材而言，在玻璃態和橡膠態時的儲存模數，都將隨著 I30P 黏土重量濃度的增加而相對地增加。這是因為 I30P 黏土的剛性結構，會阻礙靠近於黏土附近的環氧樹脂分子

鏈段因受熱而產生分子運動行為，而造成儲存模數的上升。且因為系統三奈米複材中的 I30P 黏土有較好的分散性，較能把 I30P 黏土的剛硬性質表現出來，所以玻璃態和橡膠態時的儲存模數，其增加的幅度比前兩個系統來得明顯。

另一方面，三個系統奈米複材在 T_g 方面只有些微的提升，因為 I30P 黏土會限制環氧樹脂分子鏈段的運動行為，造成 T_g 會上升；但由於 I30P 片層與環氧樹脂分子在交界面上，因不具有化學反應而會有塑化效應(plasticization)的產生，綜合以上兩個對 T_g 有正負效果的交互影響，導致添加 I30P 黏土對環氧樹脂在玻璃轉移溫度的提升方面沒有顯著的影響。

5. 奈米複材之拉伸測試分析

系統一和系統二屬於無序插層型的 epoxy/clay 奈米複材，其 I30P 黏土在整體奈米複材中的分散情形，主要由較大的束團(約數十片層)所組成，當外力施加於奈米複材時，這些束團內的片層排列較密集，容易造成應力集中(stress concentration)的現象，而導致奈米複材拉伸強度會有下降的現象，且隨著 I30P 黏土含量的增加，I30P 黏土顆粒會發生團聚(agglomeration)的行為，造成奈米複材拉伸強度下降的幅度更大。而系統三屬於分散性良好的部分剝離型 epoxy/clay 奈米複合材料，I30P 黏土在此系統下有更佳的分散效果，應力較能被分散開來，造成其拉伸強度會增加，但因 I30P 黏土的片層仍然會以小束團的形式存在，所以整體奈米複材拉伸強度的增加幅度不大，而在 I30P 黏土的含量較高時，I30P 黏土

則開始出現聚集的現象，導致奈米複材的拉伸強度也開始出現下降的趨勢。

另一方面，三個系統的拉伸模數都將隨著 I30P 黏土含量的增加而增加，因其 I30P 黏土的剛硬性質 (rigidity) 能阻礙環氧樹脂分子鏈段的運動行為所導致。且系統三因其 I30P 黏土的分散性較好，所以在拉伸模數增加的幅度，也比前兩個系統更加顯著。

綜合上述各實驗分析的結論，利用超音波震盪溶液插層法製備出的 epoxy/clay 奈米複材，因其有機黏土能有較佳的分散性，所以在熱性質及機械性質方面比使用熔融插層法有較佳的表現。此外，系統二的 I30P 黏土有先經過冷凍乾燥處理，但 I30P 黏土層間距 d_{001} 增加的幅度有限，所以在熱性質及機械性質方面的表現，都與系統一差不多。

本實驗利用超音波震盪溶液插層法製備出的 epoxy/clay 奈米複材，雖然 I30P 黏土已能均勻地分散在整體環氧樹脂基材中，但就微觀方面來看，黏土片層與片層仍會以束團的形式存在，並還沒有達到完全以單一片層的形式存在-完全剝離，仍需做進一步的研究。未來需從硬化反應溫度、硬化劑與環氧樹脂的比例等等，來控制有機黏土片層內外的硬化反應速度，使片層內的反應速度大於片層外的反應速度，促使有機黏土的層間距 d_{001} 擴大至各片層均已單一獨立的形式存在於環氧樹脂基材中，以製備出完全剝離型的 epoxy/clay 奈米複材。