

奈米碳管複合材料飛輪機械性質與扭矩分析

賴峯民 張志嘉 吳煜華

大葉大學材料科學與工程學系

彰化縣大村鄉學府路 168 號

摘要

本文著重於飛輪(Flywheel)結構材料選用及結構應力分析。近年來飛輪儲能(Energy Storage)系統主要研究重點在於如何提高飛輪能量密度及降低運轉時能量消耗，其中飛輪本體以採用具高強度重量比之複合材料為終極目標。本文探討碳纖維或玻纖布的環氧樹脂添加奈米碳管(carbon nanotubes)及石墨烯來製作高強度複合材料，使用添加奈米碳管及石墨烯之複合材料以手積法製作標準拉伸試片，再以萬能拉伸試驗機進行拉伸試驗，以測量其楊氏係數、抗拉強度等機械性質。本文主要利用拉伸試驗了解不同添加材對於複合材料的機械性質影響，亦成功完成添加奈米碳管及石墨烯之玻璃纖維複合材料的拉伸試驗，其有添加奈米碳管及石墨烯玻纖複合材料比原本玻纖複合材料之破壞強度提昇15~20%，使成為高強度複合材料。本技術未來可應用於高強度碳纖維複合材料來製造高強度飛輪，可提高運轉轉速，使得飛輪不易破壞，在理論分析計算中將以有限元素程式ANSYS分析，探討飛輪扭轉之位移分析及應力分析，飛輪可承受之最高轉速及啟動扭力的允收標準，以建立標準的飛輪分析模型。

關鍵詞：飛輪、儲能系統、複合材料、奈米碳管、抗拉強度、扭矩

Mechanical Properties Testing and Torque Analysis with Carbon Nanotube Composite Materials

FENG-MIN LAI, ZHI-JIA ZHANG, YU-HUA WU

Department of Materials Science and Engineering, Da-Yeh University

ABSTRACT

The paper studies the structure of flywheel which is forged material selection and stress analysis. In recent years, flywheel energy storage system main research focuses on how to improve the flywheel energy density and lower power consumption with during operation. The study is final objective of manufacture flywheel body which uses weight ratio of high-strength composite materials. The paper discusses carbon fiber or fiberglass and epoxy adding carbon nanotube and graphene to produce high-strength composite materials, which use the adding carbon nanotubes and graphene composite materials to manufacture the standard specimen, then MTS machine tensile test to measure mechanical properties such as Young's modulus, tensile strength. In this paper, the use tensile testing which understand the differential adding materials to compare mechanical properties of composite materials, has successfully completed tensile testing result for adding carbon nanotube and graphene in the glass fiber composites, which have added glassy carbon nanotube and graphene fiber composite materials than the failure strength of the original glass fiber composite materials to enhance 15~20%,

so that a high-strength composite materials. The technique can be applied to future high-strength carbon fiber composite materials to produce high-strength flywheel, can improve the operating speed, making the flywheel is not easy failure. In theory, the paper use finite element analysis (FEM) program (ANSYS software) to explore displacement analysis and stress analysis for flywheel subject torque force, and calculation the acceptance criteria which can withstand the maximum speed and the starting torque of the flywheel to establish a standard flywheel analysis model.

Key words: flywheel, energy Storage, composite materials, tensile test, torque

一、前言

奈米碳管(carbon nanotube)擁有各種優異的特性，可說是邁入 21 世紀的關鍵材料之一[1]。在電性上，不同管徑及旋角(chiral angle)的奈米碳管可具有金屬導體或半導體的特性，前者之導電率可高達銅的十倍，其一維(one-dimension)結構可應用作量子導線[2]。奈米碳管在電子產業的應用之一為場發射(field emission)元件，其典型的研究有場電子發射顯示器[3]，目前已有概念產品上市[4]。在機械性質方面，具有極強的結構和目前已知材料最高的楊氏係數(~1.3 GPa)，因此可用以製作防彈衣等。此外，可利用奈米碳管發展氣體儲存，例如儲氫材料及作為電極材料，用於二次鋰離子充放電效率之改進等領域[5]。

石墨烯(Graphene)一直被認為是假設性的結構，無法單獨穩定存在[6]，直至 2004 年，英國曼徹斯特大學物理學家安德烈·海姆和康斯坦丁·諾沃肖洛夫，成功地在實驗中從石墨中分離出石墨烯，而證實它可以單獨存在，亦為 21 世紀的新星材料。是目前是世上最薄卻也是最堅硬的奈米材料[7]，它幾乎是完全透明的。在電性上，常溫下其電子遷移率超過 $15000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，又比奈米碳管或矽晶體(monocrystalline silicon)高，而電阻率只 $10^{-6} \Omega\cdot\text{cm}$ ，比銅或銀更低，為目前世上電阻率最小的材料[6]。在機械性質方面石墨烯是人類已知測量過的強度最高的物質。它的強度比鋼鐵還要高 200 倍，具有 1 TPA(150,000,000 psi)時的拉伸模量(剛度)[7]

玻璃纖維(fiberglass)，是一種性能優異的無機飛金屬材料，種類繁多，優點是絕緣性好、耐熱性強、抗腐蝕性好，機械强度高，但缺點是性脆，耐磨性較差。它是以玻璃球或廢舊玻璃為原料經高溫

熔制、拉絲、絡紗、織布等工藝制造成的，其單絲的直徑為幾微米到二十幾微米，相當於一根頭髮的 $1/20 \sim 1/5$ ，每束纖維原絲都由數百根甚至上千根單絲組成。玻璃纖維通常用作複合材料中的增強材料。

本文以手積法分別將奈米碳管與石墨烯做為添加料加入玻璃纖維為主所製成之複合材料為標準拉伸試片，並使用萬能拉伸試驗機測試與驗證其機械性質。在分析方面，我們使 ANSYS 有限元素分析，建立飛輪扭力分析模型，以扭矩分析，並以拉伸試驗機械性質結果進行比對驗證需求，進而探討添加奈米碳管與石墨烯的優劣與特性。

經由實驗，我們嘗試操控奈米碳管與石墨烯含量百分比，得到不同添加物調配比例，具有機械性質差距情況。但發展量成本低廉的奈米碳管複合材料製程與高成本的石墨烯複合材料製成，仍有許多可改進的空間，值得深入研究。

二、實驗方法

本文先製作適當之拉伸試片進行拉伸試片，再進行 ANSYS 有限元素分析進行分析比對。

2.1 拉伸實驗

本文使用適當的膠量，環氧樹脂：硬化劑為 1：0.8。將環氧樹脂：硬化劑均勻混合後，以手積法塗抹在剪裁好的玻璃纖維上疊至 3 層，依據 ASTM (American Society for Testing & Materials；美國材料試驗協會)D3039-76 規劃拉伸試驗試片切割尺寸為長 229 mm、寬 25.4 mm。將多餘的膠以衛生紙擦拭乾淨。將試片放入烤箱中以 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘烤 1 小時，使膠快速硬化。並添加奈米碳管 3%與石墨烯 3%等添加物，反覆製作以萬能拉伸機進行試驗。

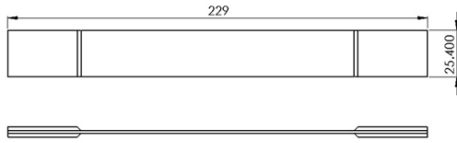


圖1. D3039-76規劃拉伸試驗試片切割尺寸

表1. 添加材料介紹

添加材料	英文學名	化學式	主要用途
石墨烯	Graphene	Cn	電子器件、導熱材料、海水淡化、生物器件、抗菌物質
奈米碳管	Carbon nanotube	C	場發射顯示器、場效電晶體、奈米導線、強化複合材料

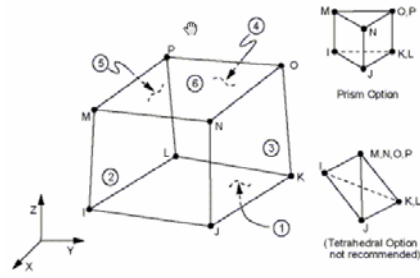


圖3. Solid185元素示意圖

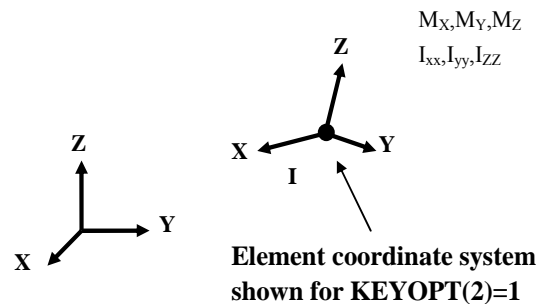


圖4. MASS21元素示意圖



圖 2. 萬能拉伸試驗機及加熱爐

2.2 ANSYS 有限元素分析

以 ANSYS 有限元素分析進行建模分析飛輪扭矩所需機械性質，其中元素的選用上以固體 (Solid185) 選用，如下圖 3，Solid185 元素用於構造三圍固體結構，元素共有 8 個節點來定義，每個節點有 3 個方向自由度，可看大變形及大應變等功能性如，並使用暫態分析震動分析並加入可進行 2D 及 3D 的模擬質量節點元素(MASS21)，套用在圓盤周圍所負載的質量，並可輸入單一節點的質量，下圖 4 為 MASS21 的有限元素模型示意圖，而飛輪尺寸厚度如下圖 5 所示。最後以拉伸試驗所得數據進行比對與驗證。

綜合以上研究結果發現，添加奈米碳管與石墨烯與原材進行比較機械性質影響甚鉅，些許微調，就會造成明顯變化。我們希望藉由比例調配，找出最佳機械性質材料。並可應用於未來之飛輪上。

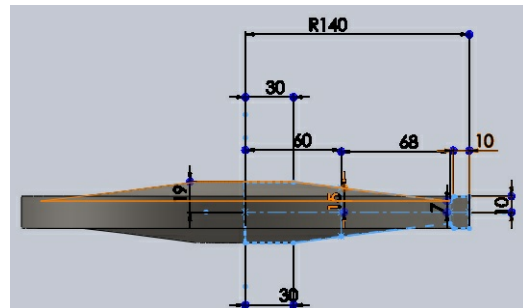


圖5. 飛輪尺寸半徑設計圖

三、結果與討論

結果數據顯示奈米碳管使其機械性質有所提升，但無添加石墨烯明顯，但石墨烯成本較高不適合應用於業界量產。

3.1 拉伸試驗：

在這次實驗裡討論玻璃纖維複合材料與添加奈米碳管與石墨烯等添加物之比較，下表 2 與圖 6 可以發現其機械性質皆有明顯提升。

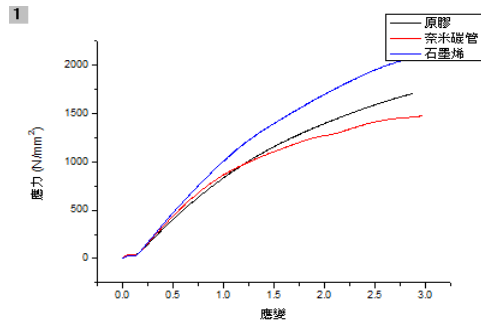


圖 6. 不同添加物試片之拉伸強度

表 2. 拉伸結果

材料性質 添加物	平均試片 厚 (mm)	平均楊 氏係數 (GPa)	平均拉應力 (MPa)
原膠	0.85	8.03	10.45
奈米碳管	0.85	8.55	11.35
石墨烯	0.85	9.34	14.34

3.2 ANSYS 有限元素分析：

與 ANSYS 應力分析施加邊界條件，以 196 N-m 的扭力進行扭轉試驗，進行比較驗證是否未來可應用於複合材料飛輪。其邊界條件設定與應力分析結果如下表 3、表 4 所示

表 3. 邊界條件設定：

邊界 設定	中間固定 外圍XY固定Z放掉
圖形	

表 4. 應力分析結果：

材質	原材	奈米碳管	石墨稀
承受 應力 (MPa)	151.11	140.53	128.44

四、結論

以上實驗結果與討論後得結論如下：奈米碳管，可以提升一般塗料之彈性、韌性及較佳之楊氏係數或剪應力，但效果較不明顯。石墨烯，可以提升一般塗料之抗拉強度、最大破壞應力，但成本較高。與 ANSYS 有限元素分析其扭轉位移與承受應力結果結合，成功找出目前適合之比例，未來可應用於飛輪之上，未來將繼續更加之調配比例。

致謝

本論文為經濟部能源局 102-D0624 計畫經費支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

- Iijima, S. (1991) Helical microtubules of graphic carbon. *Nature*, **354**, 56-58.
- Odom, W., J. L. Huang, P. Kim and C. M. Lieber (1998) Atomic structure and electronic properties of single-walled carbon nanotubes. *Nature*, **391**, 62-64.
- De Heer, W. A., A. Chatelain and D. Ugarte (1995) A carbon nanotube field-emission electron source. *Science*, **270**, 1179-1180.
- Choi, W. B., D. S. Chung, J. H. Kang, H. Y. Kim, Y. W. Jin, I. T. Han, Y. H. Lee, J. E. Jung, N. S. Lee, G. S. Park and J. M. Kim (1999) Fully sealed, high-brightness carbon-nanotube field-emission display. *Applied Physics Letters*, **75**, 3129-3131.
- Niu, E., K. Sichel, R. Hoch, D. Moy and H. Tennent (1997) High power electrochemical capacitors based on carbon nanotube electrodes. *Applied Physics Letters*, **70**, 1480-1482.
- 洪偉修(民 98) 世界上最薄的材料--石墨烯，98 康熹化學報報，頁 1-4，康熹文化事業股份有限公司
- Changu Lee, Xiaoding Wei, Jeffrey W. Kysar, James HoneI (2008) Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene. *Science*, **321**, 385-388