

## 鍛鋼飛輪材料機械性質檢測與扭矩分析

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結構的鍛鋼材料選用及應力分析。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，本文尋找各種高強度鍛鋼Forged來進行拉伸試驗，針對不鏽鋼、鍛鋼等不同類型進行比較楊氏係數、抗拉強度等機械性質，尋找出最適合的金屬材料來製造飛輪。在理論方面，本文利用ANSYS套裝軟體建立半徑140 mm的飛輪模型，已成功建立標準金屬飛輪的分析模型。以有限元素程式ANSYS軟體分析，探討飛輪承受扭矩之位移分析及應力分析，計算飛輪可承受之最高轉速及啟動扭力之允收標準。

**關鍵詞：**飛輪、儲能系統、鍛鋼、拉伸試驗、扭矩

## Mechanical Properties Testing of Forged Flywheel Materials and Torque Analysis

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

*Department of Materials Science and Engineering, Da Yeh University*

### ABSTRACT

This 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 paper has high-strength forged which article to tensile test, comparing mechanical properties such as the Young's modulus and tensile strength with differential stainless steels and forged steels. In theory, the paper use ANSYS software to build a radius of 140 mm flywheel model which has been successfully established analysis model of standard metal flywheel. This 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.

**Key Words:** Flywheel, EnergyStorage, Forged, Tensile Test, Torque

## 一、前言

再降低全球暖化及推動零碳環境的全球議題下，隨著傳統石化燃料短缺、價格日益高漲及造成暖化與污染禍因，促使發展潔淨的再生能源作為部分新能源之需求，是國際間改善溫室效應的重要措施。主要國家如德、美、日、中等國，政府採取政策導向及經濟誘因，積極推動再生能源發電系統設置，其發電比例為總發電量的 20% 以上。

主要國家之能源政策近年來在再生能源發電與電力儲能系統(Electric Energy Storage System)之研究發展下，大幅度的提升電力系統裝置容量，同時改善電力品質及效益，主要的功能是提高電能的使用及可靠度。儲能的技術可分為機械能(如：飛輪蓄能)、化學能(如：蓄電池、燃料電池)、電磁儲能(如：超導電磁儲能)及熱能(如：熱水儲能)，這些儲能技術各有不同的應用層面及時機。

台灣為島型電力系統，電力供應需能自給自足，而充裕、可靠與穩定的電力供應為經濟發展之基礎，另為環保要求、節能減碳與國際接軌，再生能源與儲能系統為國內未來發展之重點。面臨未來國際燃料價格高漲趨勢，欲降低用電成本以及能源充分使用，以及早日因應積極研究推廣再生能源與儲能系統相關之配套機制，以利國內推動再生能源並帶動相關產業之發展。

儲能系統具備：可存、可放、可調度及可控制之特性，作為儲存電能、平穩電壓、改善再生能源風能及太陽能產生的電力品質不佳問題，亦可作為用戶、商辦及工廠不斷電系統(UPS)之使用。

本文儲能系統以磁浮飛輪(Flywheel)為主體，飛輪結構與儲存器之設計製造，是以高強度鍛鋼(Forged)及複合材料(Composites)飛輪與真空儲存器之外型設計、材料設計、結構分析、製造與量測，發展新一代高密度飛輪與真空儲存器，將以高強度鍛鋼為主要飛輪及儲存器的材料，發展高密度飛輪系統與測試平台開發。

鍛鋼，是金屬壓力加工方法之一。利用壓力改變金屬原料形狀，以獲得具有一定機械性能。根據加工時工件的溫度，可將鍛造分為：熱鍛（再結晶（recrystallization）溫度 30% 以上）；溫鍛（再結晶溫度的 30%）；冷鍛（再結晶溫度的 30% 以下，一般是室溫）。

本文主要以冷鍛鋼材為主要材料，因冷鍛鋼材在低溫狀態下密度平均分散、冷卻時緩慢降溫使得整體密度平均及整體硬度高，其冷鍛鋼材機械性質及抗拉強度皆優於熱鍛鋼

材，並針對不鏽鋼、鍛鋼等不同類型以 CNC 銑床機銑成 ASTM 規範之標準試片並黏貼應變規，以利於數據的準確性，並使用萬能試驗拉伸機進行拉伸實驗，進行比較楊氏係數、抗拉強度等機械性質，尋找出最適合的金屬材料來製造飛輪。在理論方面，使用 ANSYS 套裝分析軟體建立半徑 140mm 的飛輪模型，以有限元素程式 ANSYS 軟體分析，探討飛輪承受扭矩之位移分析及應力分析，計算飛輪可承受之最高轉速及啟動扭力之允收標準。

## 二、實驗方法

本文以尋找高強度鍛鋼為目的，先以 304 不鏽鋼、SKD11 及鉻鉬鋼(SCM44)進行拉伸實驗，需求得最大應力 1000MPa 以上，故此進行不同材質試片比較其機械性質之比較，並以 Ansys 有限元素軟體進行飛輪扭距分析。

### 2-1 拉伸實驗

先以 CNC 銑床機銑成 ASTM 規範之標準試片，長 10 cm、寬 1 cm、厚度 2 mm，先以酒精擦拭試片清潔表面，並將以 50 號沙紙以 45° 反覆研磨，再次以酒精擦拭試片表面，因利用砂紙磨耗試片表面，會使表面粗糙以利於應變規的黏貼，並使用萬能試驗機（圖一）進行拉伸並連接應變規取質系統(PCD-300A）（圖二），以利於數據的準確性。



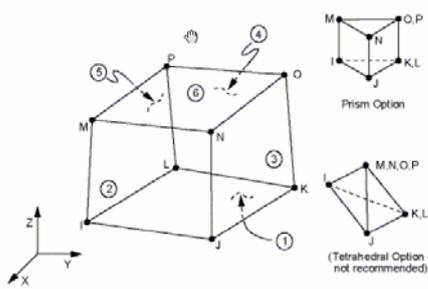
圖一 萬能試驗拉伸機



圖二 應變規取質器

### 2-2 使用 Ansys 套裝軟體分析

使用 ANSYS 有限元素分析進行模組建立，使用元素 Solid185（圖三），設定參數（表一），並設定飛輪參數（表二），試驗其飛輪扭矩所需機械性質，最後以拉伸試驗數據進行比對與驗證。



圖三 Solid185 元素示意圖

表一 材料性質參數

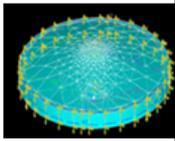
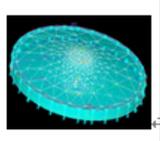
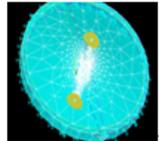
鍛鋼材料參數	
楊氏係數	170 GPa
浦易松比	0.3
密度	7.8 kg/m <sup>3</sup>

表二 飛輪實體尺寸

飛輪尺寸	
直徑	280 mm
總高	60 mm
斜角	10.30°



表三 鍛鋼邊界條件

邊界設定	完全固定	XY固定Z放掉	中間固定 外圍XY固定Z放掉
圖形			

### 三、結果與討論

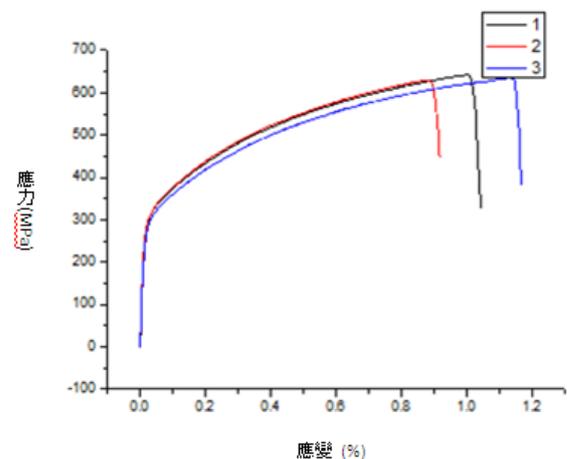
本文以尋找適用於飛輪的高強度鍛鋼進行拉伸實驗及 Ansys 有限元素分析，分別以 304 不鏽鋼、SKD11 及鉻鉬鋼 (SCM44) 進行檢測及應力分析。

#### 3-1 拉伸實驗結果

本文針對 304 不鏽鋼(圖四)的、SKD11(圖六)、鉻鉬鋼 (SCM44)(圖八)等不同鋼材進行機械性質檢測，由表三所式，SCM44 的最大應力皆優於 304 不鏽鋼、SKD11，因磁浮飛輪轉動時會有極大的扭轉應力，必須具有高強度的鍛鋼來製成，這樣在扭轉時應力平均分布時才不會龜裂。

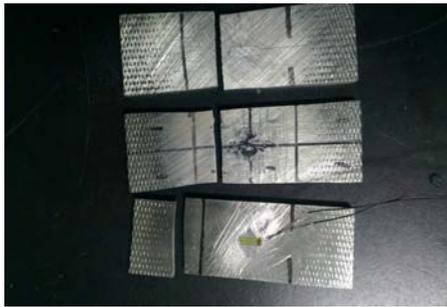


圖四 304 不鏽鋼試片示意圖

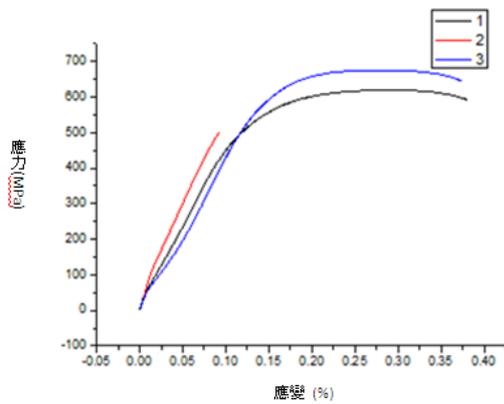


圖五 304 不鏽鋼應力-應變曲線圖

圖四為 304 不鏽鋼試片示意圖，由圖五可得知，304 不鏽鋼斜率較大，但最大應變達 1.0~1.2%其應變較大，扭轉時會導致飛輪本體產生變形。



圖六 SKD11 試片示意圖

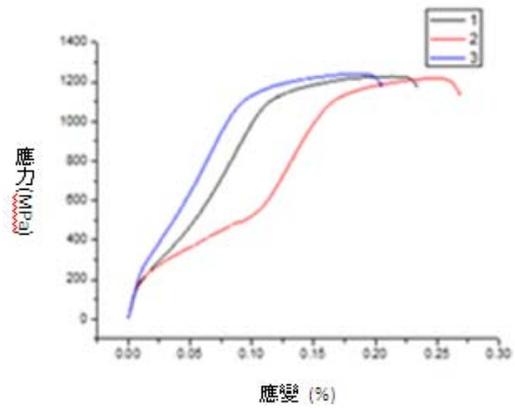


圖七 SKD11 應力-應變曲線圖

圖六為 SKD11 試片示意圖，由圖七所示，SKD11 的最大應力大約在 6 百 MPa 左右，其最大應變只有 0.35~0.40 之間。



圖八 鉻鉬鋼(SCM44)



圖九 SCM44 應力-應變曲線圖

圖八為鉻鉬鋼試片示意圖，由圖九所示，SCM44 的最大應力大約在 1200MPa 以上，較符合本研究的鍛鋼材料。

表四 304、SKD11、SCM44 的機械性質比較

機械性質 材質	平均楊氏係數 ( GPa)	最大應力 (MPa)
304 不鏽鋼	182.65	741.60
SKD11	158.39	647.30
SCM44	174.27	1228.56

由表四可得知，304 不鏽鋼楊氏係數較好，但是它的韌性太高，在扭轉時飛輪的慣性距太大，會使得飛輪飛輪變形，並不適用；而 SCM44 的最大應力為最好，故 SCM44 為本文較適合飛輪的材料。

### 3-2 Ansys 套裝軟體分析

由有限元素套裝軟體分析，在 Y 軸上以 140N-m 的扭力旋轉，結果由(圖七)所式，飛輪實體在扭轉時最大環向位移；以及飛輪扭轉最大應力，由(圖八)所示。

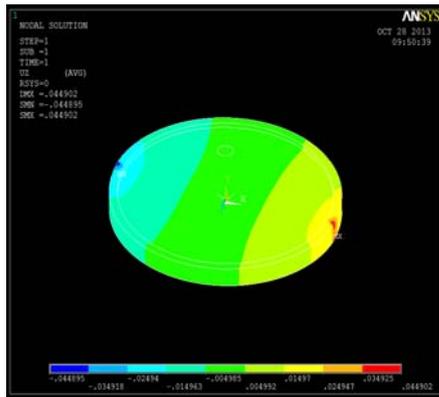
綜合以上結果，鋼材經拉伸實驗進行比較機械性質影響甚鉅，必須慎選鋼材，不然會承受不了飛輪之最大扭轉應力，會導致飛輪本體損壞。

## 致謝

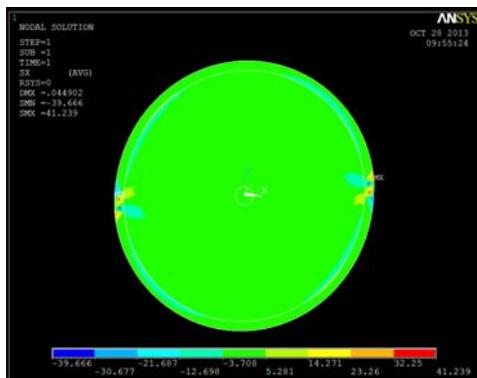
本研究感謝經濟部能源局計畫 102-D0624 提供經費支持，讓我們有機會藉此計畫做相關研究，特此致上感謝之意。

## 五、參考文獻

1. 經濟部能源局(民 101)，2012 能源產業技術白皮書。
2. 經濟部技術處(民 101)，2012 產業技術白皮書。
3. 李永健(民 101)，儲能系統於電網應用-有備無患，環保節能，P1~15。
4. 材料世界網(民 102)，複合材料中纖維補強技術之發展及其在飛輪儲能系統上之應用，網址：<http://www.materialsnet.com.tw/DocView.aspx?no=219535>
5. <http://www.enedu.org.tw/Technology/index.php?id=7>
6. 魏鳳春，張桓，蔡紅，陳東明(民 94)，飛輪儲能技術研究，洛陽大學學報 **20**，頁 28~32。
7. 泰勇，夏源明(民 95)，複合材料飛輪結構及強度設計研究進展”，兵工學報，**27**，頁 752~758。



圖七 飛輪最大環向位移示意圖



圖八 應力分析示意圖

表四 分析結果

飛輪 最大位移	最大 x 應力 點	最大 Von 應力點	最大 xy 應力 點
0.044902mm	41.239MPa	524.472MPa	7.447MPa

飛輪尺寸半徑 140 mm、高度 60 mm，進行扭轉及位移分析，在 Y 軸上以 140 N·m 的扭力旋轉，最大應力點出現在 X 軸上，由拉伸結果得知，SCM44 的最大應力符合 ANSYS 套裝軟體分析出來最大應力值，此材料是用於飛輪。

## 四、結論

經由實驗研究，可得以下幾項初步成果：

1. 鉻鉬鋼(SCM44)的機械性質皆優於 304 不鏽鋼及 SKD11。
2. 由分析結果得知，鉻鉬鋼適用於本文飛輪材料。
3. ANSYS 有限元素分析出其扭轉位移與承受應力分析。
4. 未來將分析結果與飛輪實體結果進行比對。