

## 輕量化鋁合金軸件之拉伸破壞特性 The Tensile Fracture Characteristics on Aluminum Shaft after Light-Weighting Design

呂理得 黃正熙

Lee-Der Liu, Chenhsi Huang

黎明技術學院創意產品設計系

Department of Innovative Product Design, Lee-Ming Institute of Technology

### 摘 要

本文針對鋁合金軸件經過輕量化設計後之拉伸破壞特性進行研究，由於鋁合金製成之軸件常需在軸件上鑽孔作為插銷孔以便組合傳動，若能經過輕量化設計，其整體性能必能有所提升。故本文除了探討軸件上鑽削不同之插銷孔及應力集中輔助孔後之破壞特性，並加入輔助孔之直徑及數量作為實驗變數，期望對鋁合金之軸件在銷孔部位之破壞形態有進一步的了解。

我們規劃輕量化的實驗方法驗證鋁合金軸件之最佳設計，實驗方法包括將軸件試片自行以精密銑床加工銷孔，除了鑽削不同直徑之插銷孔之外，並在插銷孔前後鑽削不同數量的應力集中輔助孔，希望能夠減緩在軸件外形變化處之應力集中現象。

本文之拉伸試驗係將鋁合金拉伸試片以 MTS 動態試驗機在程式控制之拉伸速度下進行，結果發現，鋁合金軸件經過輕量化設計後，其材料重量及截面積係以線性趨勢減少，但是其抗拉荷重並非依比例變化，在插銷孔及輔助孔兩者之直徑及數量設計變數之下，可得不同之結果，設計者可在輕量化與強度降低之間獲得折衷效能。

**關鍵詞：**鋁合金、輕量化設計、拉伸破壞。

### Abstract

This article aimed at the light-weighting design on aluminum shaft to increase its performance. And we designed some extra holes on shaft to obtain the purpose on light-weighting parts during tensile fracture. We tried to distinguish the tensile characteristics of aluminum by different number and diameter of holes.

We tried to verify the design method and tensile characteristics of aluminum, including drilling different number and diameter holes on aluminum shaft by



ourselves using milling machine. We hope to modify the performance of this shaft. For example, the tensile performance and stress concentration.

In experiment, we made some rod aluminum tensile specimens. We use MTS machine to control the tensile rate. We found that, the weight and cross-section area of aluminum shaft will be reduced after light-weighting design, but the tensile force showed some constant level. And the tensile force performed without proportional rules. So we have known that, there will be a compromise selection between tensile performed and light-weighting.

**Key Words:** aluminum, light-weighting design, tensile fracture.



## 1. 前言

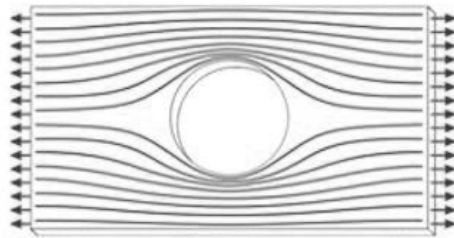
產品結構輕量化可提高產品性能，增加產品價值，目前輕量化的技術包括複合材料或功能材料的應用，使產品達成輕量化的目標，但是此類技術需求較高，本文乃針對利用相同材料的外形設計來達到輕量化的目標，雖然簡化外形或減少材料可能會影響到原本的力學設計，但是如果不至於嚴重使用壽命，筆者相信設計者或使用者皆可在產品輕量化與強度降低之間獲得一個折衷選項。[1-3]

## 2. 理論分析

本文以輕量化為前提，除了軸件本身需要裝配使用的中央位置的銷孔之外，刻意在鋁合金軸件上對稱軸向位置上依徑向鑽削不同形式的輔助孔，希望除了達到輕量化的效果之外，也能夠減緩在軸件外形變化處之應力集中現象。

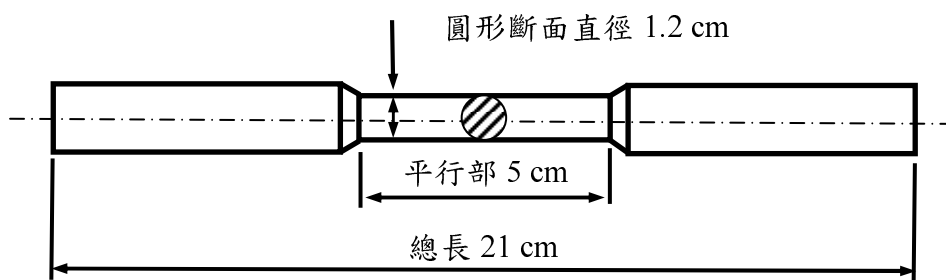
圖一是當一個具有孔洞的物件受到拉伸外力時，在孔洞周圍的應力流線分布示

意圖，從圖中可看到在外型改變劇烈的位置，其應力流線密度較高，表示該處的應力集中現象比較明顯，在實務經驗中顯示，元件破壞的原因常是因為不當的設計造成無法預期的應力集中所造成。[4-5]

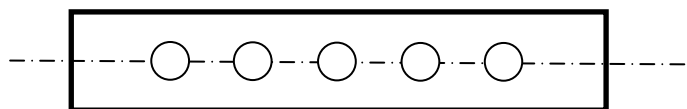


圖一 具有孔洞的物件受到拉伸外力時，在孔洞周圍的應力流線分布示意圖。

本文先以計算方式算出鋁合金軸件在各種輕量化設計的重量改變，再以實驗的方式加以對照。圖二是本文的拉伸試片示意圖，圖三是輕量化設計示意圖，吾人預計在拉伸試片的平行部鑽削左右對稱的貫穿孔作為輕量化的方式。



圖二 拉伸試片示意圖



圖三 輕量化設計示意圖，此為平行部之放大圖，圓形部份為貫穿孔。

理論上，從表一可以看出在鋁合金試片平行部的重量，以及不同直徑的銷孔所去除的重量。而各種輕量化條件的輕量化

比率可從表二看出，輕量化比率的計算方式為鑽削銷孔後材料重量的減少百分比。

表一 鋁合金試片平行部，以及不同直徑的銷孔所去除的計算重量。

變數 或常數	直徑 (Diameter)	截面積 (Area)	長度 (Length)	體積 (Volume)	重量 (Weight)
單位	cm	cm <sup>2</sup>	cm	cm <sup>3</sup>	g
數值 或 計算值	1.2(軸)	1.13(100%)	5	5.65	15.55
	0.4(孔)	0.13(88.5%)	1.2	0.15	0.41
	0.6(孔)	0.28(75.2%)	1.2	0.34	0.93

註 1：截面積= $[\pi/4]*直徑*直徑$ ，其中圓周率 $\pi$ 為 3.14159。

註 2：體積=截面積\*長度

註 3：重量=體積\*密度，鋁合金密度為 2.75 g/cm<sup>3</sup>。

表二 各種輕量化條件的輕量化比率

軸件平行部原始重量 15.55 g	鑽削後之重量(g)	鑽削後之輕量化比率(%)
第一組 鑽削孔徑 0.4 cm	鑽削 1 個孔	2.67
	鑽削 3 個孔	8.00
	鑽削 5 個孔	13.33
第二組 鑽削孔徑 0.6 cm	鑽削 1 個孔	6.00
	鑽削 3 個孔	18.00
	鑽削 5 個孔	30.00

註：輕量化比率的計算方式為材料鑽削孔洞後的重量減少百分比。

### 3. 實驗方法

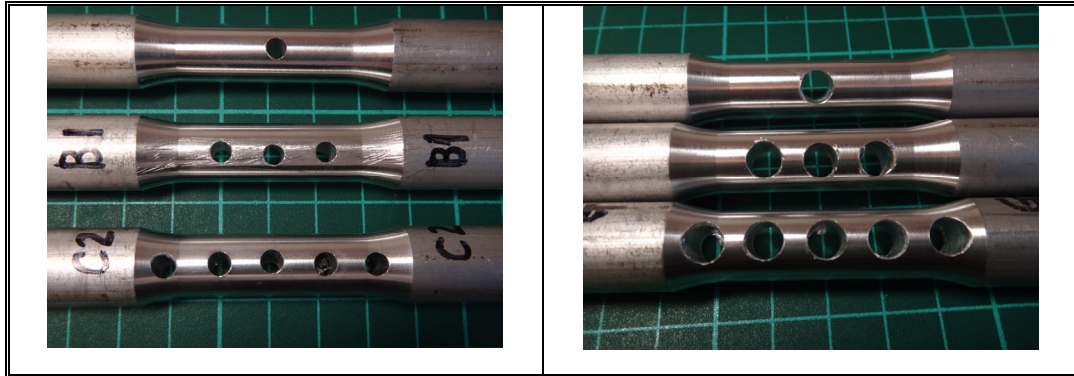
本文之實驗採用圓桿狀之拉伸試片，試片總長約 21 cm，其平行部之直徑為 1.2 cm，平行部長度為 5 cm。拉伸試片示意圖如前所示。

試片準備係在拉伸試片平行部以精密銑床鑽削不同形式的輔助孔，第一組試片鑽削輔助孔之孔徑為 0.4 cm，分別在中央部位鑽削單一銷孔，以及在對稱位置鑽削 3 孔及 5 孔，試片加工後的照片如圖四左

側所示，第二組試片鑽削輔助孔之孔徑為 0.6 cm，其餘相同，照片如圖四右側所示。

鑽孔加工後的試片以精度為 0.1 mg 的電子天平秤重，數據四捨五入至 0.1 g，結果如表三所示，輕量化的變化情形如圖五所示，從圖中可看出，第一組與第二組的計算值與實際測量值都因鑽削某些孔洞之後而降低重量，但是兩組試片的實際測量值都稍低於計算值，原因可能是鑽削過程中的工具振動使孔洞擴大，造成試片材料與重量低於預期的計算值。

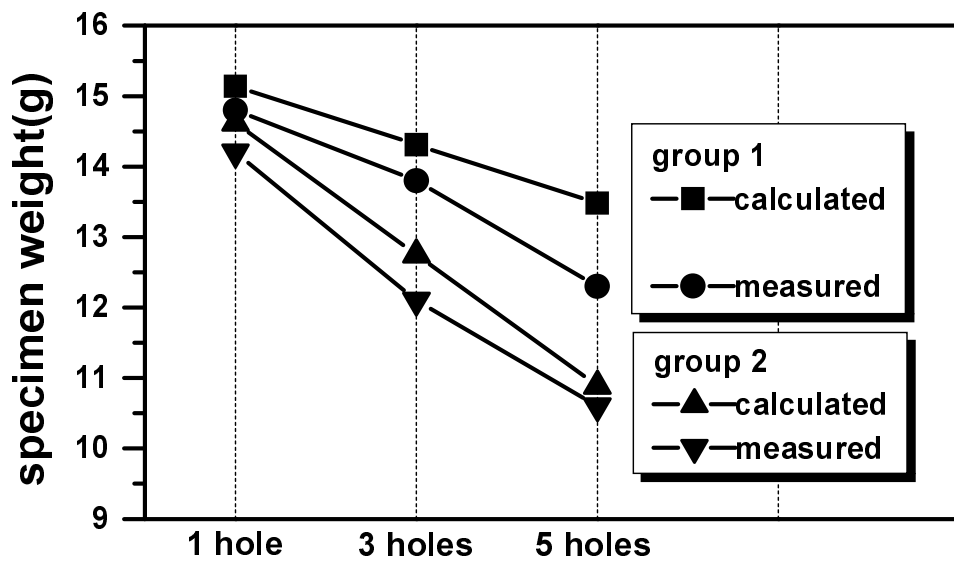




圖四 左側為第一組試片，鑽削輔助孔之孔徑為 0.4 cm。  
右側為第二組試片，鑽削輔助孔之孔徑為 0.6 cm。  
背景方格為 1 cm 單位之格線。

表三 鋁合金試片鑽孔加工後的計算重量變化。

軸件平行部原始重量 15.5 g		鑽削後之計算重量(g)	鑽削後之實際重量(g)
第一組 鑽削孔徑 0.4 cm	鑽削 1 個孔	15.14	14.8
	鑽削 3 個孔	14.31	13.8
	鑽削 5 個孔	13.48	12.3
第二組 鑽削孔徑 0.6 cm	鑽削 1 個孔	14.62	14.2
	鑽削 3 個孔	12.75	12.1
	鑽削 5 個孔	10.89	10.6



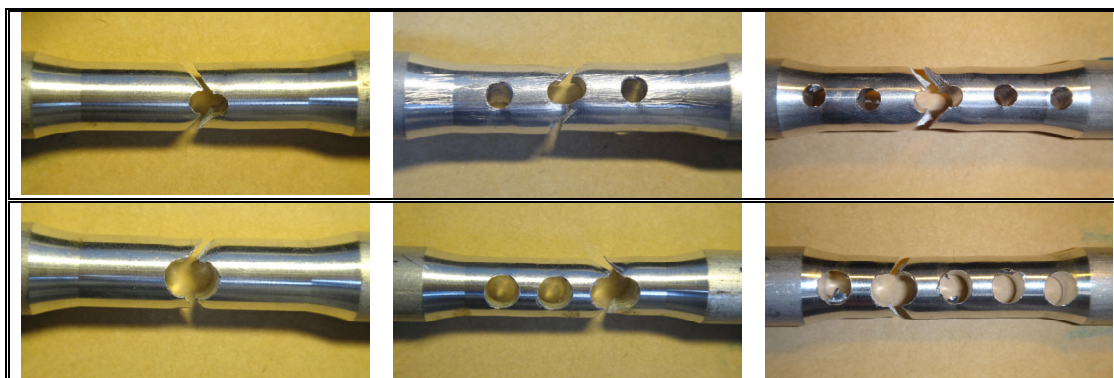
圖五 鋁合金試片鑽孔加工後的計算重量及實際重量變化圖。

試片準備完成後，本文的拉伸實驗採用 MTS 公司之 100 kN 動態拉伸實驗機 (MTS 810) 實施拉斷實驗。謹此感謝大同大學材料系提供設備協助。

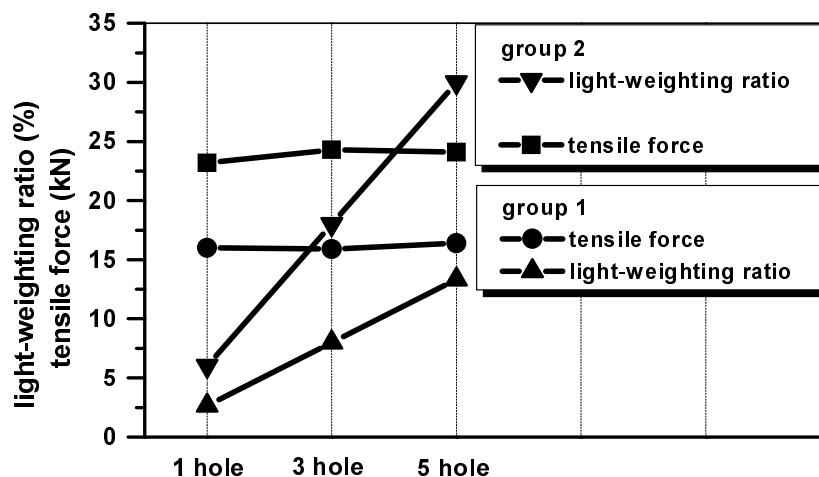
拉伸試驗的結果數據如表四所示，拉伸破壞的試片照片如圖六所示，試片的輕量化比率與抗拉荷重的變化情形如圖七所示。

表四 鋁合金試片鑽孔加工後的輕量化比率與抗拉荷重的變化情形。

		輕量化比率(%)	抗拉荷重(Newton)
尚未鑽削的原材試片		0	37757(100%)
第一組 鑽削孔徑 0.4 cm	鑽削 1 個孔	2.67	23166 (61.4%)
	鑽削 3 個孔	8.00	24319 (64.4%)
	鑽削 5 個孔	13.33	24105 (63.8%)
第二組 鑽削孔徑 0.6 cm	鑽削 1 個孔	6.00	16025 (42.4%)
	鑽削 3 個孔	18.00	15866 (42.0%)
	鑽削 5 個孔	30.00	16443 (43.5%)



圖六 試片經過拉伸破壞的照片。上排為第一組試片，下排為第二組試片。



圖七 試片鑽孔加工後的輕量化比率與抗拉荷重的變化情形。



## 4. 結果與討論

從表四與圖七的試驗結果發現，當鋁合金軸件試片經過輕量化設計後，其材料重量以線性趨勢減少，輕量化程度則以線性趨勢增加。另一方面，雖然試片承受拉伸外力的截面積亦隨之縮減，但是其抗拉荷重並非依比例變化。

從結果發現，第一組與第二組的軸件截面積縮減程度分別成為原材的 88.5% 及 75.2%，輕量化比率也分別減輕了 2~13% 以及 6~30% 的重量，然而以上的幾何性質皆可精確計算，但是抗拉荷重卻無法依照輕量化的比例估算。

從表四的試驗結果可以看到，第一組與第二組試片的抗拉荷重並沒有因為孔洞數量的增加而有嚴重變化，第一組試片的抗拉荷重大約為 24 kN，而第二組試片的抗拉荷重大約為 16 kN，與原材的抗拉荷重，37 kN，作比較，大約分別是原材的 63% 以及 42%。

以設計的觀點而言，材料的微觀組織並不能成為設計者的重要依據，例如從圖六的照片中，我們可以清楚看到延性材料的斜面剪力破壞特徵，但是在產品設計者的眼中，這並不是最重要的，產品設計的主要原則在其功能性的外在表現而非破壞方式。[6-8]

所以，如果本文的輕量化元件運用減少 30% 重量的設計，而必須降低元件的抗拉荷重僅成為原來的 42%，這樣的輕量化設計是否可以符合商業需求，其實是可以討論的，因為從力學設計的角度而言，最終產品通常是過度設計(over design)的結果，主要是因為在設計過程當中必須加入一個安全係數(safety factor)，一般產品通常以 2~5 倍的倍率來保守計算產品強度並預估產品的使用壽命，當安全因素愈高愈

安全，表示產品的使用壽命愈長，亦即產品愈不容易損壞。

故此，設計者將元件的原始性能或基本需求乘以安全係數之後，便成為投入市場的產品，此舉是為了減少使用者的損失，但是對某些不需考慮安全性的產品而言，卻增加了生產成本而無濟於事。因此，無論設計者或使用者應可重新思考安全係數的必要性，並能夠在輕量化與降低強度之間選擇一個更佳的折衷方案。[9]

## 5. 結論

由以上的實驗及討論，可以得到下列結論：

1. 本文之鋁合金軸件經過輕量化設計後，其重量以線性趨勢減少。
2. 本文之鋁合金軸件雖然截面積因輕量化而縮減，但是抗拉荷重並未依比例變化。
3. 本文之輕量化元件減少了 30% 的重量，但必須降低元件的抗拉荷重成為原來的 42%。
4. 設計者應可重新思考安全因素的必要性，在輕量化與降低強度之間選擇不同的方案。

## 參考文獻

1. Donald R. Askeland and Pradeep P. Phule, Essentials of Materials and Engineering, Thomson, 2004.
2. 原著 Jim Lesko, 譯者: 黃台生, 工業設計-材料與製造入門指南, 六合出版社, 2004。
3. 林崇宏, 基礎設計-立體構成原理, 新文京開發股份有限公司, 2005。
4. 楊榮顯, 材料工程學, 全華科技圖書公司, 2005。
5. 劉松柏, 材料強度破壞學, 成環技術



- 叢書，2000。
6. Hasdogan, Gulay, The role of user models in product design for assessment of user needs, *Design Study*, Vol.17, No.1, January 1996.
  7. Crinnion, John, The role for prototyping in information systems design methodology, *Design Study*, Vol.10, No.3, July 1989.
  8. Donald J. Wolpi, *Understanding how Components Fail*, ASM, 1991.
  9. 吳復強，*產品穩健設計-田口方法之原理與應用*，全威圖書有限公司，2005。

