

# 螺桿與螺帽配合墊圈 手動組裝之緊固特性分析

文 ■ 陳志明<sup>1\*</sup>、黃仕瓊<sup>2</sup>、胡士瓊<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國立勤益科技大學機械工程系(所)教授、緊固邊界產學技術聯盟主持人

<sup>2</sup> 工業技術研究院

<sup>3</sup> 國立勤益科技大學 機械工程系 學生

\*Email: cmchen@ncut.edu.tw

本研究主要探討螺桿、螺帽與墊圈之緊固特性，了解螺紋系統經組裝程序後產生的形態變化以及緊固特性變化，透過本實驗室之扭力與軸向力測試模組進行實驗，並依照國際標準規範ISO 2320進行螺紋系統的預壓，結合螺紋力學理論公式取得螺桿與螺帽的扭力與軸向力關係、扭緊鬆脫係數及防鬆脫比，實驗結果顯示，由於實驗預壓前後之表面形態會有差異，從表面型態、表面粗糙度與平面度等數值差異，得知緊固件受損的程度與位置，並透過扭緊係數與鬆脫係數將可以進行緊固特性的預測，使系統可以獲得預期的緊固狀態，另由研究數據中可以看出，三組隨機樣品中仍有其中一組之扭力與軸向力的重現性較為不穩定，表示產品本身的特性仍有待精進，本研究結果可提供緊固件製造商做為修改產品設計之參考依據，並提供予使用者組裝時可使系統具有最佳的精度及剛性。

一個緊固件首要講求的是安全，再來是精度與壽命，就核電廠事件螺栓緊固問題，已造成當地居民的恐慌，還很有可能造成核安事件的發生，由此可使我們了解緊固件的組裝與安全是一項重要課題，本文之目的是研究螺桿與螺帽配合墊圈之間的緊固力大小，這勢必會影響其緊固特性，為了找出緊固相關特性及防鬆脫比與最大破斷點，本文針對螺桿與螺帽配合墊圈之零組件，以不同的使用方式、考慮結合時的預壓狀況或是其他相關因素，分析螺桿與螺帽配合墊圈零組件實際用於安裝時之特性。

## 研究理論

### 螺紋之力學理論公式

螺帽的扭緊係數與鬆脫係數主要由扭緊力矩、鬆脫力矩、軸向力及螺紋直徑來量化，關於螺紋緊固件之力學理論，針對螺帽之扭緊力矩 $T_r$ 及鬆脫力矩 $T_L$ 分別可表示為：

$$T_r = K F d_m \quad (1)$$

$$T_L = K' F d_m \quad (2)$$

(1)式及(2)式中 $F$ 為鎖緊時產生之軸向力； $d_m$ 為螺紋有效直徑； $K$ 為扭緊係數； $K'$ 為鬆脫係數。關於螺帽之防鬆脫性能本文將予以定義為『防鬆脫比』，防鬆脫比為上述螺帽力學理論中扭緊力矩與鬆脫力矩之比值，對於螺帽而言防鬆脫比之值越大代表防鬆脫性能越佳。

$$T_r = \frac{T_L}{T_F} \quad (3)$$

### 微小維克氏硬度試驗

微小維克氏是於1932年由美國國家物理實驗室所發表，其所用之壓痕器與維克氏相同，並且其計算公式異同，由於其施加荷重很小，一般是以克(gf)為單位其公式為：

$$H_{mv} = 1854.4 \frac{P}{d^2} \quad (4)$$

(4)式中

$P$ :所施加之荷重(gf)

$d$ :壓痕對角線之平均長度( $\mu\text{m}$ )

$H_{mv}$ :微小維克氏硬度值

## 實驗樣品、設備及方法

### 實驗樣品

以下為本研究所使用之樣品介紹：

#### 雙頭螺桿

本研究使用之螺桿，其螺紋規格為M8×1.25P，螺桿用於連接機械的固定功能，雙頭螺桿兩端有螺紋。

#### 緊固螺帽

一種具備內螺紋結構之緊固件，被設計來與外螺紋緊固件相互配合之緊固件，本研究所使用之螺帽樣品，螺紋幾何尺寸為M8×1.25P。

#### 墊圈

主要是避免螺絲鎖固時破壞主體，也有增加緊固件的防鬆脫性能。

## 實驗設備

### 荷重感測元件

使用型號LTH350之荷重感測元件，荷重器的材質是不鏽鋼，耐壓與高剛性等性質，直徑1.48in，工作溫度範圍在-60°F至200°F，使量測精度具有±0.5%的非線性，測量單純垂直的軸向壓力，其最高可承載荷重為5000lb。

### 數位式扭力扳手

使用型號SH-DGTQ135-2之數位扭力扳手，扭力範圍在6.8~135N·m，數位式的扳手可先設定好限制扭力大小，待施加扭力超過定值就有電子音聲提醒，以避免施力過大後，影響穩定的使用條件與對試驗之緊固件造成不必要的損傷。

### 真圓度量測儀

日本Mitutoyo真圓度儀可測量各種精密機械零件的圓度形狀參數，真圓度、真直度、平面度、圓筒度、平行度、垂直度、傾斜度、同心度、同軸度、對稱度、偏擺度、位置度。主要是量測螺帽座面平面度。

### 全自動影像量測儀

本設備可用於觀察元件細部表面型態，並可藉由高倍率鏡頭繪製元件幾何尺寸，檢測產品加工精度；另可配合Auto CAD軟體，將零件圖輸入，系統將會可自動執行全自動大量快速篩檢，降低人力成本與檢測時程，提升檢測準確度。

表面粗糙度輪廓測定儀

本實驗使用之表面粗糙度量測使用日本Mitutoyo表面粗糙度輪廓儀SV-C4500型，此儀器可量測物件表面幾何形狀以及計算，並且可知其表面粗糙度，儀器規格如下，輪廓Z1量測範圍：60mm，Z1輪廓解析度：0.02 $\mu$ m，粗糙度Z1量測範圍：800/80/8 $\mu$ m，粗糙度Z1解析度：最大至0.1 $\mu$ m，探頭測定力：0.75mN。

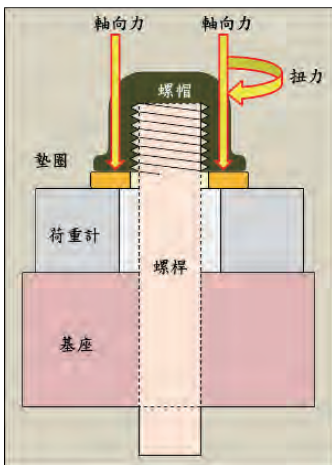
微小硬度試驗機

本文為了量測其表面硬度值使用了日本Mitutoyo HM-210 A型，試驗力10gf-1000gf以10gram遞增；試驗力以電磁控制；負荷率：60 $\mu$ /s；負載停留時間：0-999秒；壓痕器：維克氏；物鏡：10倍、50倍。

實驗方法

實驗原理

本研究之實驗原理(如圖一)所示，將螺栓進行夾持固定後，使用數位式扭力扳手對緊固螺帽進行扭緊，緊固螺帽扭緊後所產生的軸向力將由荷重感測元件來進行擷取，以上所獲取之扭力與軸向力將由資料擷取器進行記錄，並即時顯示於顯示器上。



圖一：實驗原理



圖二：螺帽破壞

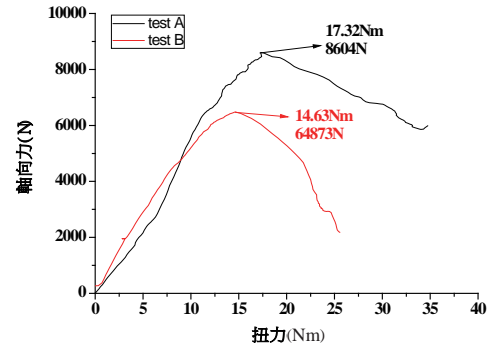
實驗步驟

規劃出完整的研究流程後開始規劃實驗步驟，接著進行架設儀器設備，將螺桿、螺帽配合墊圈組合後固定夾持住，用數位扭力扳手對螺帽進行10N·m扭緊再鬆脫，此時螺帽扭緊後所產生的軸向力將由荷重元來進行擷取，同時將扭力及軸向力即時回授至顯示器上，根據國際標準規範進行扭緊與鬆脫之操作各5次，再分析數據扭力與軸向力的關係。

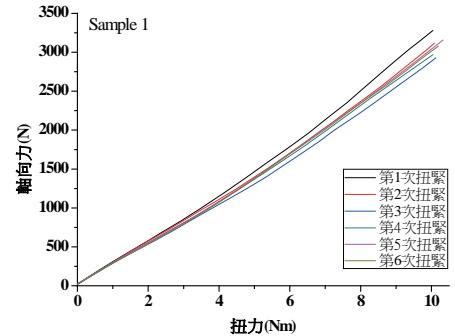
結果與討論

在實驗初期由於不知道螺帽的容許力矩而無法得知需要用多少力來扭緊，所以用一組樣品來直接扭緊到極限，當螺帽扭緊達到一定扭力後，圓頂部位會因為螺桿的擠壓產生破壞，若再繼續扭緊，圓頂將會突出破裂(如圖二)，螺帽因頂端破壞後，若螺帽繼續扭緊，會導致軸向力驟降(如圖三)，得知容許力矩後開始實驗，用數位扭力扳手對螺帽扭緊後所產生的軸向力將由荷重計來進行擷取，同時將扭力及軸向力即時回授至顯示器上，彙整數據後，其Sample1結果顯示第一次扭緊時軸向力最大約在3300N，第二次至第六次扭緊的軸向力約在2880N至3100N(如圖四)，Sample2結果顯示第一次扭緊時軸向力最大約在3000N，第二次至第六次扭緊的軸向力約在2600N至2900N(如圖五)，Sample3結果顯示第一次扭緊時軸向力最大約在2700N，第二次至第六次扭緊的軸向力約在2600N至2640N(如圖六)，本研究只使用的三組樣品，樣品一(圖七)的緊固特性有明顯的變異，樣品二(圖八)及樣品三(圖九)則是具有較佳的重現性，三組樣品即有一組樣品有變異，表示該螺紋緊固件之性能極需改善。根據圖十所示，螺帽在緊固的時候在6 N·m以下時各組樣品的緊固特性皆穩定，但扭緊力矩大與6 N·m以上將會開始產生較大的變異。圖十一為三組樣品之防鬆脫比，其值分別為0.82、0.77及0.92，從這裡也可以看出此樣品之品質仍需持續精進，提升產品之可靠性。

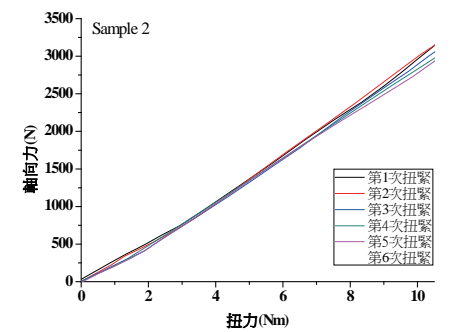
墊圈凸面表面粗糙度平均Ra由0.646 $\mu$ m上升至0.662 $\mu$ m，平均Rz由4.235 $\mu$ m上升至4.347 $\mu$ m，有稍微變粗糙。墊圈平面表面粗糙度平



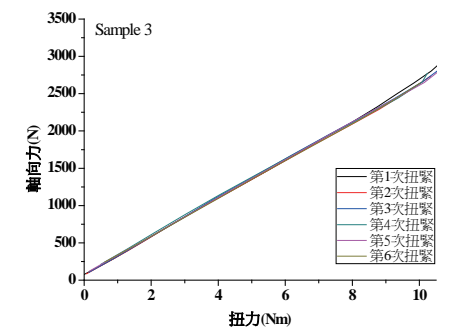
圖三：螺帽容許力矩



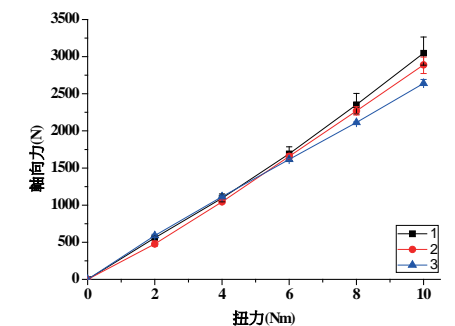
圖四：Sample1 扭力與軸向力關係圖



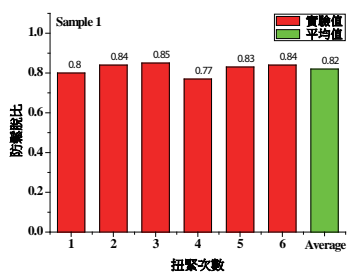
圖五：Sample2 扭力與軸向力關係圖



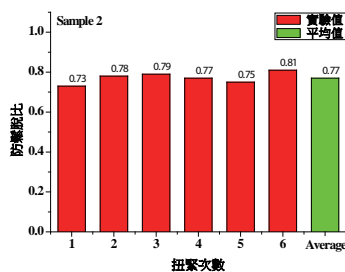
圖六：Sample3 扭力與軸向力關係圖



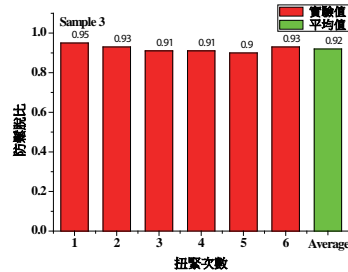
圖十：扭力與軸向力關係



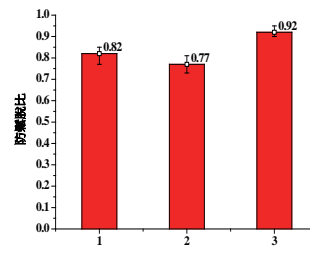
圖七：Sample1防鬆脫比



圖八：Sample2防鬆脫比



圖九：Sample3防鬆脫比



圖十一：防鬆脫比

均Ra由0.508 $\mu\text{m}$ 下降至0.479 $\mu\text{m}$ ，平均Rz由3.529 $\mu\text{m}$ 下降至3.431 $\mu\text{m}$ (如表一)，有稍微變平滑。螺帽表面粗糙度平均Ra由0.232 $\mu\text{m}$ 上升至0.269 $\mu\text{m}$ ，平均Rz由1.685 $\mu\text{m}$ 上升至2.115 $\mu\text{m}$ (如表二)，有稍微變粗糙。

墊圈凸面平面度由5.204 $\mu\text{m}$ 下降至5.094 $\mu\text{m}$ ，墊圈平面平面度由8.169 $\mu\text{m}$ 下降至7.820 $\mu\text{m}$ (如表三)，螺帽平面度由6.217 $\mu\text{m}$ 下降至5.724 $\mu\text{m}$ (如表四)，在墊圈與螺帽平面度都下降結果顯示，墊圈與螺帽組裝接觸有更緊密的情況。表五則分別為螺栓/螺帽的扭緊係數與鬆脫係數。

螺帽座面由於跟墊圈凸面接觸摩擦造成有兩邊度層剝落(如圖十二)。墊圈凸面由於跟螺帽座面接觸，造成墊圈表面有黏附磨耗與磨粒磨耗(如圖十三)。墊圈平面由於跟荷重感測元件接觸摩擦，造成表面鍍層剝落(如圖十四)。

表一、墊圈平均表面粗糙度

狀態	樣品	凸面		平面	
		R <sub>a</sub> ( $\mu\text{m}$ )	R <sub>z</sub> ( $\mu\text{m}$ )	R <sub>a</sub> ( $\mu\text{m}$ )	R <sub>z</sub> ( $\mu\text{m}$ )
實驗前	No.1	0.718	4.738	0.571	4.319
	No.2	0.501	3.089	0.512	3.219
	No.3	0.718	4.878	0.440	3.050
	Average	0.646	4.235	0.508	3.529
實驗後	No.1	0.606	3.925	0.500	3.852
	No.2	0.639	4.336	0.491	3.202
	No.3	0.742	4.781	0.445	3.139
	Average	0.662	4.347	0.479	3.431

表二、螺帽平均表面粗糙度

狀態	樣品	R <sub>a</sub> ( $\mu\text{m}$ )	R <sub>z</sub> ( $\mu\text{m}$ )
實驗前	No.1	0.212	1.464
	No.2	0.236	1.620
	No.3	0.247	1.971
	Average	0.232	1.685
實驗後	No.1	0.329	2.469
	No.2	0.252	2.018
	No.3	0.225	1.858
	Average	0.269	2.115

表三、墊圈平均平面度

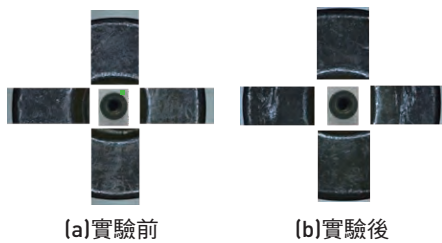
狀態	樣品	凸面	平面
		平面度( $\mu\text{m}$ )	平面度( $\mu\text{m}$ )
實驗前	No.1	7.101	8.304
	No.2	5.813	9.866
	No.3	2.698	6.338
	Average	5.204	8.169
實驗後	No.1	7.290	7.722
	No.2	5.547	9.741
	No.3	2.446	5.996
	Average	5.094	7.820

表四、螺帽平均平面度

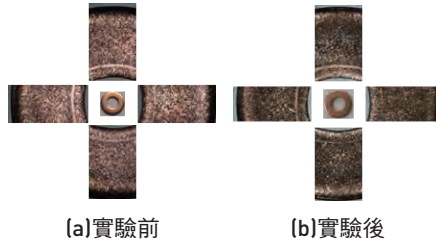
狀態	樣品	平面度( $\mu\text{m}$ )
實驗前	No.1	7.302
	No.2	5.098
	No.3	6.252
	Average	6.217
實驗後	No.1	6.154
	No.2	5.561
	No.3	5.457
	Average	5.724

表五、扭緊與鬆脫係數

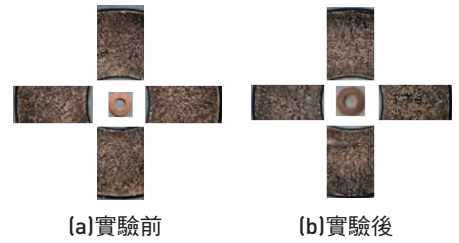
項目	扭緊次數	Sample1	Sample2	Sample3
扭緊係數	1	0.3979	0.4363	0.4594
	2	0.4206	0.4344	0.4723
	3	0.4491	0.4471	0.4679
	4	0.4346	0.4507	0.4675
	5	0.4250	0.4563	0.4703
	6	0.4284	0.4700	0.4717
鬆脫係數	1	-0.3607	-0.3759	-0.4246
	2	-0.3575	-0.3529	-0.4300
	3	-0.3753	-0.3734	-0.4168
	4	-0.3787	-0.3695	-0.4316
	5	-0.3735	-0.3690	-0.4317
	6	-0.3646	-0.3713	-0.4283



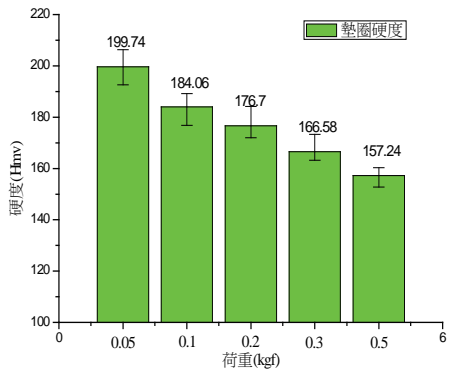
圖十二：螺帽實驗前後之表面型態



圖十三：墊圈凸面實驗前後之表面型態

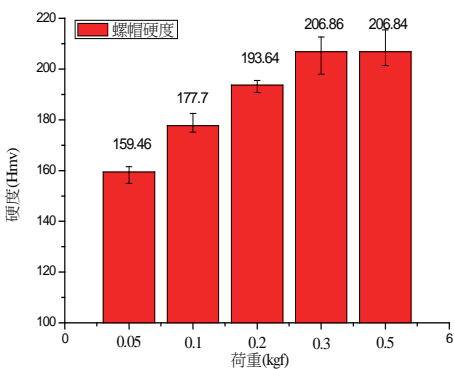


圖十四：墊圈平面實驗前後之表面型態



圖十五：墊圈硬度

墊圈硬度在荷重0.05的狀況下，平均硬度為199.74 Hv，在荷重0.1的狀況下，平均硬度為184.06 Hv，在荷重0.2的狀況下，平均硬度為176.7Hv，在荷重0.3的狀況下，平均硬度為166.58Hv，在荷重0.5的狀況下，平均硬度為157.24Hv(如圖十五)，由此可知墊圈由外到內是愈來愈軟。



圖十六：螺帽硬度

螺帽硬度在荷重0.05的狀況下，平均硬度為159.5 Hv，在荷重0.1的狀況下，平均硬度為177.7 Hv，在荷重0.2的狀況下，平均硬度為193.6Hv，在荷重0.3的狀況下，平均硬度為206.9Hv，荷重0.5的狀況下，平均硬度為206.8Hv(如圖十六)，由此可知螺帽由外到內是愈來愈硬。

## 結論

本研究探討螺絲緊固特性重點為透過扭力與軸向力的試驗，找出螺栓/螺帽的扭力與軸向力的關係、防鬆脫比、扭緊係數與鬆脫係數，經研究成果發現，螺帽、墊圈的表面粗糙度整理而言都有上升的變化，平面度則都有些許下降情況，表示墊圈與螺帽組裝接合有更緊密情況，而相互接觸面會因扭緊造成刮除磨耗，使螺帽、墊圈的表面粗糙度變大，螺帽的最大容許力矩約為14 N·m，超過此值螺帽將會產生破壞，而最佳的鎖固力矩約為6 N·m，大於此值螺栓/螺帽的緊固特性將會產生較大的變異，緊固特性較為不穩定；本文說明求得螺栓/螺帽的扭緊係數與鬆脫係數之方法，使零組件在組裝時可以達到設計者所要求之精度與剛性；各組螺栓/螺帽之防鬆脫比不穩定，顯示產品之品質有精進空間；根據本研究成果將可協助設計者與使用者進行組裝之參考依據，完整掌握產品的緊固特性與可靠度，進一步進行修正，協助緊固件相關製造商提升產業競爭力。