

不銹鋼螺紋鎖緊特性之研究—

以 M6—60 長不銹鋼螺紋結合 M 形不銹鋼夾緊件為例

A Study of Stainless Steel Screw's Locking Mechanism—

Use of M6-60 Stainless Steel Screw Joints M-Shape
Stainless Steel Machine Part for Example.

研究生：楊盛雄

Student : Sheng-Hsiung YANG

指導教授：秦繼華

Advisor : Jih-Hua CHIN

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩士論文



A Thesis

Submitted to Degree Program of Automation and Precision
Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Automation and Precision Engineering

October 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十六年十月

國立交通大學

工學院精密與自動化工程學程

碩士論文

不銹鋼螺紋鎖緊特性之研究—

以 M6—60 長不銹鋼螺紋結合 M 形不銹鋼夾緊件為例



A Study of Stainless Steel Screw's Locking Mechanism—
Use of M6-60 Stainless Steel Screw Joints M-Shape
Stainless Steel Machine Part for Example.

研究生：楊盛雄

指導教授：秦繼華教授

中華民國九十六年十月

不銹鋼螺紋鎖緊特性之研究一

以 M6—60 長不銹鋼螺紋結合 M 形不銹鋼夾緊件為例

學生：楊 盛 雄

指導教授：秦 繼 華

國立交通大學工學院精密與自動化工程（研究所）碩士班

中 文 摘 要

螺紋因具有易於安裝、拆解、更換之特性且大部分螺紋均已經被標準化，所以用途非常廣泛，是一種重要的機械結合方式。使用不銹鋼作為螺紋材料是因為不銹鋼具有許多的優點，如：耐蝕性、非磁性、使用溫度範圍寬廣，而且不需任何表面處理即可使用，所以不銹鋼已經成為高級螺紋用材料的代表。

本論文針對不銹鋼外六角螺絲搭配不銹鋼沖壓件之孔凸緣內螺紋，在鎖緊作用力使機件產生彎曲變形的情況下，進行不銹鋼螺紋鎖緊特性之研究，並對可能衍生的問題作分析及討論，研究項目包括：扭矩方程式的驗證、鎖緊力與螺紋的變形量的關係、彎曲作用下的螺紋摩擦與磨耗特性、不同鎖緊扭矩的比較、螺帽厚度及嚙合牙數對螺絲的影響及潤滑對不銹鋼螺紋產生的作用等。

實驗結果顯示，當螺紋的鎖緊作用力使機件產生彎曲變形時，螺紋與機件不只承受單純的拉伸或壓縮力，還承受了因偏心或傾斜所導致的很大的彎矩。此彎矩會使機件產生彎曲變形，螺紋受力面積會隨著變形角度加大而大幅減少，使螺紋面壓大幅升高，造成不銹鋼螺絲在鎖緊過程中產生嚴重的摩擦或磨耗作用，同時導致孔凸緣的加工裂痕破裂，以致螺絲在拆卸過程中損壞。

機構的設計必須要有足夠的強度，防止彎曲變形。並依使用需求增加嚙合牙數或施加抗壓性佳的潤滑劑，這些都可以有效防止螺紋損壞，延長螺紋的使用壽命。

A Study of Stainless Steel Screw's Locking Mechanism— Use of M6-60 Stainless Steel Screw Joints M-Shape Stainless Steel Machine Part for Example.

Student : Sheng-Hsiung YANG

Advisor : Dr. Jih-Hua CHIN

Program of Automation and Precision Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

Screw is used in various purposes for its features of easy-to-install, easy-to-disassemble, easy-to-replace, and mostly been standardized. It is also an important means of mechanical combination. As a typical material for high quality screw, stainless steel has its advantage of anti-corrosive, non-magnetic material, wide range temperature capability, ready to use without any surface treatment.

This thesis studies for stainless steel screw's locking mechanism in the situation of machine parts are bent and deformed by preload. Extended analysis and discussion are also included. Study consists: (1) verification of torque equation, (2) correlation between preload and screw's elongation, (3) screw's friction and abrasion characteristics under bending preload, (4) comparison of different torque, (5) how nut thickness and effective thread influence a screw, (6) how stainless screw affected by lubricating, and etc.

Test result shows, when screw's preload deforms machine parts, screw thread and machine parts bear not only tension or compression stress, but large moment caused by eccentric or tilt load. This moment deforms machine parts. Increasing angle of deformation reduces the stress area of screw thread and the stress of screw thread is raised. Under this reason, while screwing, stainless screw is seriously affected by abrasion, the work-hardening face crack of machine part is broken, and results in screw damages in disassembling process.

To avoid screw thread damaging and extend use life, it needs to have enough strengthen in mechanical design to prevent deformation, increase effective thread by requirements, or add anti-wear lubrication.

誌 謝

在論文的撰寫過程中，常常需要收集許多的相關資料，因為交通大學圖書館的開放時間很長，使我的資料收集更方便、更有效率，節省了很多的時間。所以，我首先必須感謝圖書館的相關工作人員的協助，因為您的用心，使得學子們能夠開心。

其次讓我覺得深受感動的是交通大學的諸位教授，尤其是我曾經修過課程的任教教授，不管年輕或年長，都有一顆充滿熱忱、諄諄教誨、毫不倦怠的心。這種認真教學的態度，感染了我，使得我更積極學習，在有限的時間裡，吸收更多的知識。

最後我要感謝論文指導老師—秦繼華教授及洪錫源教授，給我最大的彈性，毫不設限論文範疇，讓我有更多獨立思考的空間與時間，不管是好是壞，我都能盡情抒發自己的觀點。而論文口試委員周長彬教授及徐瑞坤教授的諸多指正，使得本論文更加完善。



目 錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	viii
圖目錄	ix
符號說明	xii
第一章 緒論	1
1.1 關於螺紋	1
1.1.1 螺旋原理簡介	1
1.1.2 螺紋之用途	3
1.1.3 公制 (ISO) 螺紋規格簡介	4
1.1.4 螺紋製造方法	6
1.1.5 螺紋結合方式及比較	9
1.1.6 螺紋受力型態	10
1.2 關於材料	11
1.2.1 常用之螺紋材料及其表面處理簡介	11
1.2.2 沖壓成型用不銹鋼薄板特性	12
第二章 研究內容與方法	17



2.1	研究主題說明	17
2.2	研究動機	17
2.3	研究對象及範疇	18
2.3.1	研究對象功能簡介	18
2.3.2	環境條件之限制及考量	20
2.4	研究方法	22
2.4.1	基本假設	22
2.4.2	以現場作業需求為出發點之實驗條件	23
2.5	預期結果	24
第三章	理論與文獻回顧	25
3.1	應力與應變	25
3.1.1	軸向負荷應力與應變	25
3.1.2	懸臂樑的撓曲方程式	26
3.1.3	扭轉負荷的應力與應變	28
3.1.4	軸向負荷的剪應力與破壞的最大剪力理論	30
3.1.5	應力集中	30
3.2	摩擦	32
3.2.1	固體的表面結構	33
3.2.2	摩擦理論簡介	34
3.2.3	摩擦與溫升	35
3.3	磨耗	37
3.3.1	磨耗的種類	38
3.3.2	黏著磨耗	38
3.3.3	黏著磨耗產生的磨燒現象	39
3.3.4	磨損磨耗	40
3.3.5	改善磨耗的方法	42
3.3.6	磨耗力學	42
3.4	潤滑	43

3.5	螺紋鎖緊機制	44
3.5.1	螺紋鎖緊扭矩與軸向鎖緊力	45
3.5.2	螺紋鎖緊作業	47
第四章	實驗方法與步驟	49
4.1	實驗設備與裝置	49
4.1.1	實驗使用設備	49
4.1.2	實驗使用裝置	51
4.2	樣品檢查及規格確認	52
4.3	實驗步驟	54
第五章	實驗結果與討論	55
5.1	螺紋受力的理論變形量與實驗變形量的比較	55
5.1.1	實驗條件	55
5.1.2	理論鎖緊力及其變形量之計算	56
5.1.3	實驗變形量	56
5.1.4	電鍍鋅螺紋受力的理論變形量與實驗變形量的比較	57
5.1.5	理論變形量與實驗變形量的實驗結果討論	58
5.2	鎖緊力對M型不銹鋼夾緊件產生的彎曲作用	59
5.2.1	實驗條件	59
5.2.2	實驗結果	59
5.2.3	鎖緊力對夾緊件產生的彎曲作用的實驗結果討論	60
5.3	鎖緊力對M型不銹鋼夾緊件產生的摩擦與磨耗作用	62
5.3.1	實驗條件	62
5.3.2	實驗結果	63
5.3.3	摩擦與磨耗實驗結果討論	63
5.4	不同鎖緊扭矩對M型不銹鋼夾緊件產生的影響	65
5.4.1	實驗條件	65
5.4.2	實驗結果	65

5.4.3 各種磨耗的照片·····	66
5.4.4 不同鎖緊扭矩對夾緊件產生的影響實驗結果討論···	68
5.5 螺帽厚度對 M 型不銹鋼夾緊件產生的影響·····	70
5.5.1 實驗條件·····	70
5.5.2 實驗結果·····	71
5.5.3 螺帽厚度對夾緊件產生的影響實驗結果討論·····	71
5.6 潤滑對不銹鋼螺紋鎖緊作用的影響·····	74
5.6.1 實驗條件·····	74
5.6.2 實驗結果·····	74
5.6.3 潤滑對不銹鋼螺紋鎖緊作用的影響實驗結果討論···	74
第六章 結論與建議·····	78
6.1 結論·····	78
6.2 建議·····	79
6.2.1 機構設計方面·····	79
6.2.2 作業及施工方面·····	79
6.3 殘留問題·····	80
參考文獻·····	81
自傳·····	84



表 目 錄

表 1	常用粗螺距公制螺紋之公稱直徑、螺距、與應力面積…	5
表 2	常用公制六角頭螺栓的尺寸規格……	6
表 3	鋼質公制六角頭螺栓的機械性質等級……	7
表 4	各種用途的常用螺紋材料……	12
表 5	螺紋製品用表面處理之種類……	12
表 6	常用不銹鋼化學成分表……	13
表 7	常用不銹鋼機械性質表……	14
表 8	常用金屬材料的硬度及熱性質……	37
表 9	鋼製螺栓的初期鎖緊力……	48
表 10	實驗所得的不銹鋼螺紋長度變形量……	56
表 11	實驗所得的電鍍鋅螺紋長度變形量……	58
表 12	鎖緊力對 M 型不銹鋼夾緊件產生的彎曲變形量……	59
表 13	鎖緊力對 M 型不銹鋼夾緊件產生的摩擦與磨耗實驗結果	62
表 14	不同鎖緊扭矩對 M 型不銹鋼夾緊件產生的影響……	66
表 15	螺帽厚度對夾緊件產生的影響……	72
表 16	潤滑對不銹鋼螺紋鎖緊作用的影響……	75

圖 目 錄

圖 1	利用斜面原理推升重物·····	2
圖 2	螺旋曲線及其展開後的三角形·····	3
圖 3	螺紋各部位之名稱·····	4
圖 4	公制螺紋規格圖·····	5
圖 5	滾軋加工螺紋再經彎曲成形製造之 U 型不銹鋼螺絲·····	8
圖 6	簡單形狀的凸緣孔成型及攻牙加工實例·····	10
圖 7	凸緣孔的加工示意圖·····	10
圖 8	慣用剪斷面之硬度分布圖·····	15
圖 9	因加工硬化產生的凸緣裂痕·····	15
圖 10	一般常用的螺紋結合機件方式·····	16
圖 11	螺紋受力型態·····	16
圖 12	M6—60mm 長不銹鋼全牙螺紋·····	19
圖 13	M 型不銹鋼孔凸緣攻牙夾緊件·····	19
圖 14	研究對象用於夾緊圓形桿件的使用示意圖·····	20
圖 15	研究對象的細部放大圖·····	20
圖 16	均勻剖面懸臂樑的剪力、力矩與撓曲·····	27
圖 17	扭力矩使圓軸產生扭曲·····	29
圖 18	固體的表面構造圖·····	33
圖 19	黏著摩擦與磨耗的示意圖·····	35
圖 20	兩接觸面之間的潤滑油薄膜厚度與潤滑狀態·····	43
圖 21	不同潤滑狀況下的摩擦係數比較·····	44

圖 22	不同潤滑區的磨損率比較.....	44
圖 23	(a) 法線螺紋力因 α 而增大.....	46
	(b) 螺絲頭接觸面之平均直徑 d_c	46
圖 24	120DB4-S 指示型扭矩扳手.....	49
圖 25	NITON XLt 797 重金屬元素分析儀.....	50
圖 26	美國 DELTRONIC 2D 光學投影機.....	50
圖 27	游標高度規 (畫線用) 及花崗岩平台.....	50
圖 28	液晶顯示式游標卡尺.....	51
圖 29	固定實驗對象的裝置.....	51
圖 30	(a) M6-60 螺絲材質成分與含量表.....	52
	(b) 螺絲 Cr 元素的 X-ray 特性光譜 ($K\alpha$ 、 $K\beta$).....	53
	(c) 螺絲 Ni 元素的 X-ray 特性光譜 ($K\alpha$ 、 $K\beta$).....	53
圖 31	(a) M 形不銹鋼夾緊件材質成分與含量表.....	52
	(b) 夾緊件 Cr 元素的 X-ray 特性光譜 ($K\alpha$ 、 $K\beta$).....	53
	(c) 夾緊件 Ni 元素的 X-ray 特性光譜 ($K\alpha$ 、 $K\beta$).....	53
圖 32	實驗相關機件之架設.....	55
圖 33	不銹鋼螺紋實驗變形量與理論變形量比較圖.....	57
圖 34	電鍍鋅螺紋實驗與理論變形量比較圖.....	57
圖 35	受力寬度變形量與軸向變形 y 比較圖.....	60
圖 36	鎖緊彎曲造成左上角及右下角有最大的螺紋干涉.....	61
圖 37	因為鎖緊彎曲造成的牙峰切削.....	61
圖 38	不銹鋼螺絲拆卸時造成的嚴重黏著及磨耗.....	63

圖 39	不銹鋼螺絲強行拆卸時造成的螺牙破壞·····	63
圖 40	電鍍鋅螺絲拆卸時造成的中度磨耗·····	64
圖 41	夾緊件的孔凸緣加工裂痕破裂造成螺牙破壞·····	65
圖 42	扭矩 55kgf-cm 時造成的螺紋局部變形及磨耗·····	67
圖 43	扭矩 60kgf-cm 時造成的螺紋局部變形及黏著·····	67
圖 44	扭矩 60kgf-cm 時造成的夾緊件孔凸緣螺紋毛邊·····	67
圖 45	扭矩 65kgf-cm 時造成的夾緊件孔凸緣加工裂痕破裂·····	68
圖 46	扭矩 75kgf-cm 時造成的夾緊件孔凸緣加工裂痕破·····	68
圖 47	修改後的不銹鋼螺帽 (3.2mm) 及 M 形不銹鋼夾緊件孔··	71
圖 48	厚度 3.2mm 的螺帽及螺絲磨損·····	73
圖 49	厚度 4.8mm 的螺帽及螺絲磨損·····	73
圖 50	正常不銹鋼螺紋的螺牙形狀·····	76
圖 51	加齒輪油鎖緊後再拆卸的不銹鋼螺紋的螺牙形狀·····	76
圖 52	烤漆的夾緊件內螺紋的磨耗情形·····	76
圖 53	不銹鋼螺絲殘留的烤漆粉末·····	77

符 號 說 明

第一章

- θ : 導程角
 β : 螺旋角
 L : 導程
 d : 螺旋直徑或公稱直徑
 p : 螺距
 A_t : 螺紋的應力面積

第三章

- σ : 應力
 δ : 變形
 ε : 應變
 μ : 蒲松氏比
 E : 材料的彈性係數
 I : 面積慣性矩
 y : 懸臂樑的彎曲變形量
 ϕ : 懸臂樑的變形角度
 $\gamma_{\theta z}$: 剪應變
 θ : 扭轉角度
 $\tau_{\theta z}$: 剪應力
 G : 剪彈性模數
 T : 扭矩
 J : 面積極慣性矩
 τ_{max} : 最大剪應力
 τ_{yp} : 材料的剪降伏應力



σ_{yp}	: 材料的降伏應力
K_f	: 應力集中係數
σ_{max}	: 材料的最大拉伸應力
n_c	: 有效作用螺牙數
α	: 熱膨脹係數
ρ	: 密度
c	: 比熱
W_r	: 磨耗率
K_A	: Archard 磨耗常數
P_l	: 限制應力
α	: 螺紋角
λ	: 導程角
d_m	: 螺紋節圓直徑
μ	: 接觸面的摩擦係數
F_i	: 螺紋預負載或初期鎖緊力
K	: 扭矩係數



第一章 緒論

1.1 關於螺紋

在機械領域裡面，我們將單一的機器零件稱為機件(Machine parts)，而機構(Mechanism)或機器(Machine)乃由數個或更多之機件所構成，以便得以產生一定之動作或進一步幫助人類作功。為了將這些機件能夠正確而且可靠的結合為一體，就必須依照設計及使用場合之需求採用合適之結合方式，機件結合方式可概略分為二大類，第一類是使用結合件(Fastener)，如螺絲、鉚釘、銷、鍵、扣環等，另一類則不使用結合件作結合，如：卡榫、點焊、熔接、膠黏合等，在這些結合方式中最常見到也最為人熟知的，無疑是以螺紋結合，所以螺紋在人類歷史上及機械上具有重要的地位，縱然許多新的結合科技陸續被發展，但是螺紋的使用依舊是最重要而且不可或缺的。

在 DFMA (Design for Manufacturing and Assembly) 學說中強調一個重要觀念：產品設計所使用之零件數愈少愈好。因為使用最少零件代表更低的製造成本，更可靠的品質，也因為零件少所以交期易於掌握。但是，很不幸的，使用螺紋作為結合件，通常會增加許多的零件數目，這代表產品成本的上升、作業及管理上的損失。所以雖然螺紋使用上非常方便，但是從產品設計觀點而言，使用螺紋卻是不得已為之，必須審慎斟酌，該用才用。

人類使用螺紋的歷史悠久而且用途日益廣泛，在我們週遭及日常生活中隨處可見，但有關螺紋深入之研究及探討卻不多見，因為我們大多習以為常，幾乎忘記螺紋的存在。但是螺紋卻一直暗中主導著機構及機械的運轉成敗與安全性，所以必須深入了解其優缺點與應用上的一些限制，才能妥適選擇合宜的螺紋規格並正確的運用，以充分滿足設計與使用上之需求。本論文即以此為出發點，探討以螺紋為結合件的一種特殊應用，希望能進一步了解螺紋在此使用條件下的優缺點及其限制。

1.1.1 螺旋原理簡介

螺旋為斜面變形之應用，如圖 1 所示，利用斜面機械利益 (Mechanical Advantage) 之原理，可以用較小之施力得到一個大的出力，以便舉起重物或將機件確實鎖緊。在不考慮摩擦因素下，斜面之機械利益為斜面底邊長度與斜面高度之比值或斜面受力前進距離與滑動件升高距離之比值。

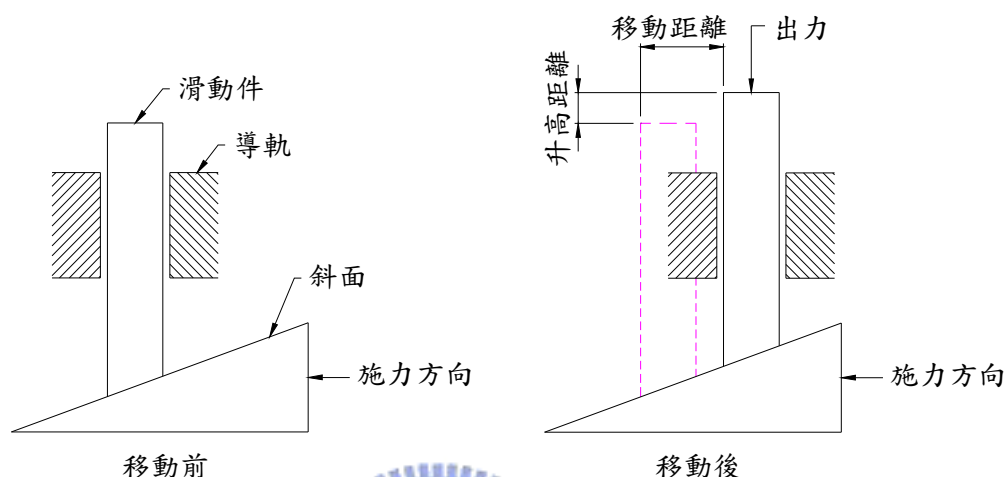


圖 1 利用斜面原理推升重物

如圖 2 所示，將一圈之螺旋曲線在平面上展開，可得到一個三角形，三角形之底邊長度等於螺旋圓柱之長度，三角形之垂直邊高度等於螺旋兩相鄰相對位置之距離稱為導程 (Lead) 或螺距 (Pitch)，而三角形之斜面夾角 θ 稱為導程角 (Lead Angle)，導程角之餘角 β 稱為螺旋角 (Helix Angle)。假設導程為 L ，螺旋直徑為 d ，則由三角形關係可得：

$$\tan \theta = \frac{L}{\pi d} \quad (1)$$

$$\tan \beta = \frac{\pi d}{L} \quad (2)$$

其中導程 L 為螺旋轉一圈沿軸向移動之距離，螺距 p 則為螺旋曲線上兩相鄰相對位置之距離，對於單螺旋線而言 $L=p$ ，對於複螺旋線而言 $L=np$ ， n 為螺旋線數。

式 (1) 即說明螺旋之基本原理及螺旋機械利益，事實上在圓柱上的螺旋線為一假想之理論曲線，只代表點在螺旋曲線上的運動軌跡，所以無法

用來傳送動力。但若使用合適之刀具或加工方法依循此螺旋線之運動軌跡進行加工，成為不同形狀及尺寸之凹槽，就可以得到各式各樣不同種類的螺紋。

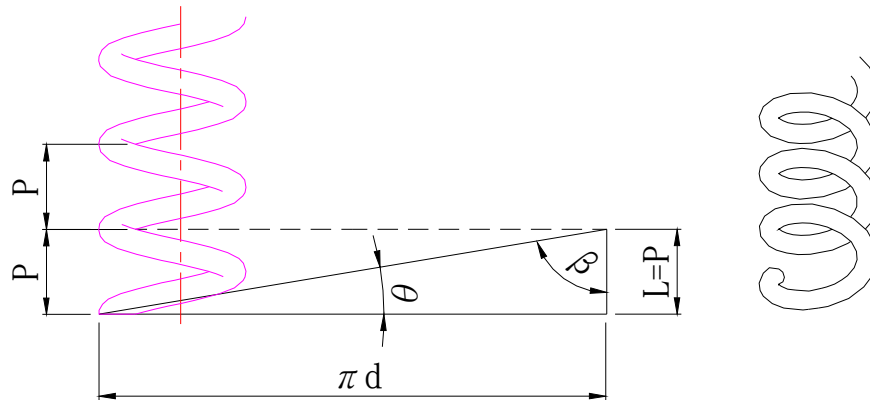


圖 2 螺旋曲線及其展開後的三角形， d 為螺旋線外徑

1.1.2 螺紋之用途

螺紋因具有易於安裝、拆解、更換之特性且大部分螺紋均已經被標準化，所以用途非常廣泛。相較其他結合方式，螺紋使用之相關工具也已經非常普及，幾乎是隨處可得，益增其使用上之便利性。螺紋種類眾多，依照其用途可歸納為四大類：

1. 連接機件並確保機件間可以緊密結合不發生鬆動：這類螺紋之特點為較高之螺紋強度以承受大的鎖緊負荷，較低之傳動效率以避免易於發生鬆動，此類螺紋一般均為 V 型螺紋。
2. 傳達動力或運動：為了避免動力傳遞過程之損失，所以此類螺紋必須具有較高之傳動效率，所以螺紋角度較小，通常使用方形螺紋或愛克姆 (Acme) 螺紋。
3. 量測：利用微細精密之螺距特性，將旋轉刻度予以適度放大並加上游標分割作用後可以得到較高之量測精度，如工作母機上所使用之進給刻度盤及更精密之量測工具測微器均是。
4. 調整機件之位置：為獲得較高之機件定位精度通常會使用較細螺距之螺紋，此外為防止機件之精密定位因受環境或本身之震動而產生鬆動，所以使用細牙 V 型螺紋。

1.1.3 公制 (ISO) 螺紋規格簡介

公制螺紋為國際標準組織 (ISO-International Organization For Standardization) 所制定之螺紋標準，主要以公稱直徑及螺距尺寸表示螺紋之大小，單位使用公厘 (mm)。如圖 3 所示為螺紋各部位之名稱 [1]。公制標準螺紋有 M 與 MJ 兩種類型，其中 M 系列為一般工業上所使用，MJ 系列則用於航空結構及相關設備。M 與 MJ 的幾何外型如圖 4 所示 [1]，而 M 與 MJ 的形狀差異在於 MJ 外螺紋根部為一內圓角，且內外螺紋之小徑略大，以適合航空界對於高應力、高疲勞強度及沒有裕度之配合使用 [2]。

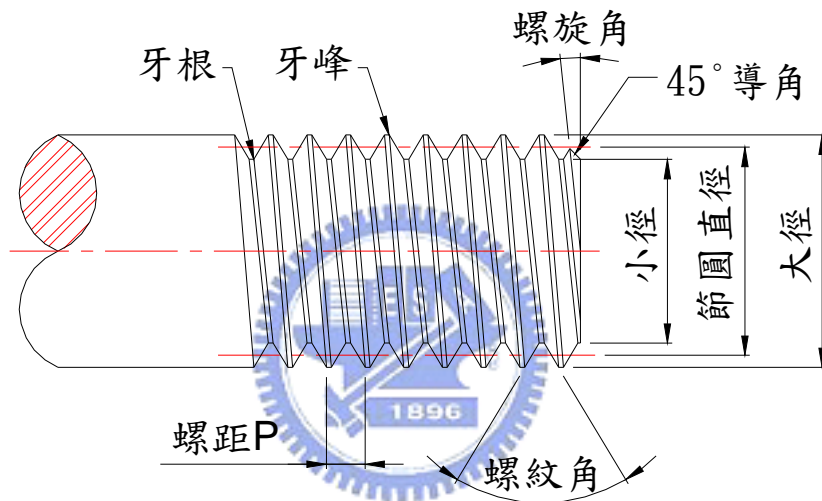
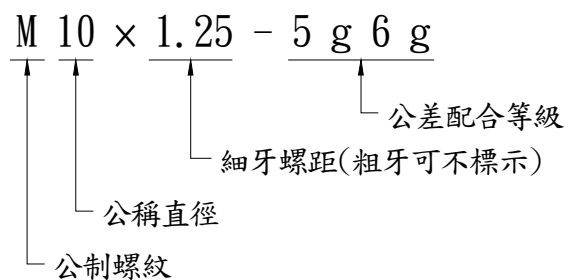


圖 3 螺紋各部位之名稱

以下針對公制螺紋規格及與本論文相關之一些螺紋資料，予以整理後，摘要敘述之。

1. 公制標準螺紋之表示方法如下 [2]：



說明：一般標準公制螺紋 M6 以下無細牙螺紋。

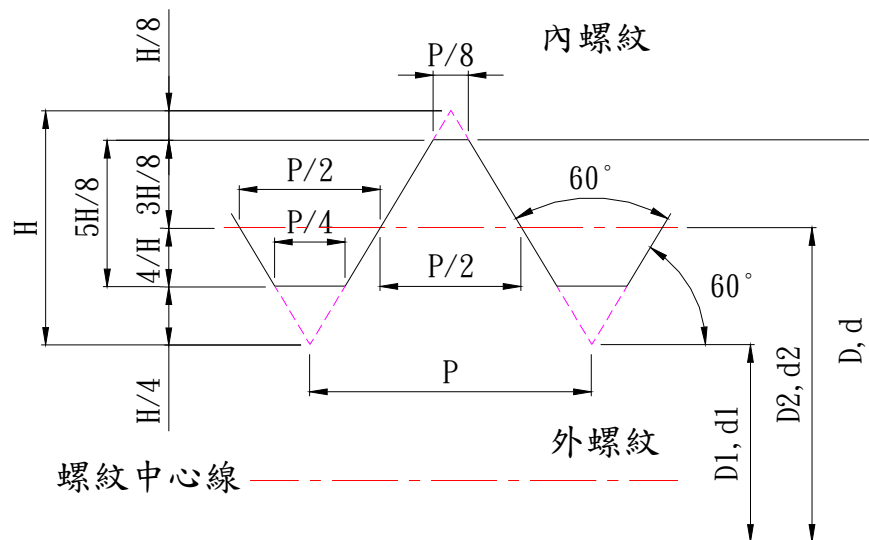


圖 4 公制螺紋規格圖

2. 公制標準螺紋之拉應力面積 A_t [1] [2] :

在許多螺紋的拉伸試驗結果顯示，直徑等於螺紋節圓直徑與小徑平均值的無螺紋桿，其抗拉強度與螺紋桿相同。此無螺紋桿的斷面積即稱之為該螺紋桿的拉應力面積 A_t 。公制標準螺紋拉應力面積之計算式如下：

$$A_t = \frac{\pi}{4} (d - 0.9382p)^2 \quad (\text{mm}^2) \quad (3)$$

d : 公稱直徑(mm), p : 螺距(mm)

拉應力面積即代表該螺紋之強度，所以在設計時候必須特別注意需求負荷與拉應力面積之間的關係。

表 1 常用粗螺距公制螺紋之公稱直徑、螺距、與應力面積 (單位: mm)

公稱直徑 d	螺距 p	拉應力面積 A_t
5	0.8	14.2
6	1	20.1
8	1.25	36.6
10	1.5	58.0

3. 一些與本研究相關之螺紋資料：

- 常用粗螺距公制螺紋之公稱直徑、螺距、與拉應力面積如表 1 所示[1] [3]。
- 常用公制六角頭螺栓的尺寸規格如表 2 所示[2][3]。
- 鋼質公制六角頭螺栓的機械性質等級如表 3 所[1][3]。但是對於不銹鋼六角螺紋而言其六角頭頭部強度區分標示為 A2-70，其意義代表此屬於沃斯田鐵 (Austenitic Stainless Steel) 體系不銹鋼，最小抗拉強度 700 N/mm^2 ，最小降伏強度 450 N/mm^2 。

選用螺紋時以標準規格為優先考量，但是螺紋部分愈長則可使用以及調整的範圍也越大，所以更有使用彈性，不過隨著有效螺紋長度增加則製造困難度也提高，螺紋精度會減少。因為實際使用需要大範圍的螺紋行程調整，本研究擬使用的螺紋為 M6，長度為 60mm 之不銹鋼全牙螺紋，就牙長而言並非屬於標準螺紋規格。

表 2 常用公制六角頭螺栓的尺寸規格 (單位：mm)

W：六角對邊寬度，H：六角頭高度

公稱直徑 d	螺距 p	標準六角頭		強力六角頭		結構用六角頭	
		W	H	W	H	W	H
5	0.8	8	3.58				
6	1	10	4.38				
8	1.25	13	5.68				
10	1.5	16	6.85				

1.1.4 螺紋製造方法

外螺紋通常由下述方法製造[4]：

1. 車床上以成型車刀車製。
2. 人工使用絲模鉸牙。

3. 在六角車床上使用自動絲模鉸牙。
4. 銑床上以成型銑刀銑製，適用於尺寸大之精密螺紋。
5. 螺紋滾製機器，即滾軋（Rolling）。
6. 壓鑄法鑄造，但僅限於壓鑄合金。
7. 磨床上以成型磨輪研磨，常用於精密配合。
8. 許多塑膠可以用射出成型方式得到所需之螺紋。

表 3 鋼質公制六角頭螺栓的機械性質等級

性質等級	尺寸範圍	最小保證強度 MPa	最小抗拉強度 MPa	最小降服強度 MPa	材料	頭部記號
5.8	M5~M24	380	520	420	低碳或中碳	
8.8	M16~M36	600	830	660	中碳，Q&T	
9.8	M1.6~M16	650	900	720	中碳，Q&T	
10.9	M5~M36	830	1040	940	低碳麻田散鐵，Q&T	

內螺紋可用下述方法製造[4]：

1. 車床上以成型車刀車製。
2. 人工使用絲攻攻牙。
3. 自動收縮絲攻。
4. 銑床上以成型銑刀銑製，適用於尺寸大之精密螺紋。
5. 螺絲拉刀切削。

基本上工業界大量生產之標準或非標準螺紋絕大部分使用滾軋方式生產，使用機器切削者甚少。直徑 50mm 以下的螺絲，90%以上是用

滾軋加工生產，而任一種可塑性足以承受加工而不破裂的金屬材料皆可採用滾軋加工製成所需之螺紋[5]。



圖 5 滾軋加工螺紋再經彎曲成形製造之 U 型不銹鋼螺絲，注意素材桿徑為 $\phi 5.2\text{mm}$ ，滾軋後螺紋大徑為 $\phi 5.9\text{mm}$

滾軋螺紋之所以應用廣泛在於滾軋加工的以下優點[4]：

1. 因為加工硬化作用，滾軋後會增加材料之強度。
2. 有較佳的表面加工精度及粗糙度。
3. 比較節省材料，滾軋加工比切削加工節省約 16~25% 的材料。如圖 5 照片所示為使用滾軋加工螺紋再經彎曲成形製造之 U 型不銹鋼螺絲，其素材桿徑為 $\phi 5.2\text{mm}$ ，但所得之滾軋後螺紋大徑為 $\phi 5.9\text{mm}$ ，計算後約可節省材料 23%，在今日金屬原料價格飆漲情況之下，尤其顯得格外重要。而本研究所使用之螺紋均為滾軋加工品。
4. 因滾軋過程可改善材料機械性質，所以有時候可以用較廉價之材料代替。
5. 生產速度快，生產成本低。
6. 螺紋形狀可以有較多變化及種類。

另一方面，滾軋螺紋之限制如下：

1. 無材料切除，所以原料之直徑尺寸必須準確。
2. 較適合大量生產，少量生產較不經濟。
3. 只能製造外螺紋。
4. 不能滾軋硬度超過 HRC 37 的材料。

至於滾軋方法有兩種，一種是用平板模另一種是用兩個或三個圓形模滾軋螺紋。

1.1.5 螺紋結合方式及比較

如圖 6 所示，一般常用的螺紋結合機件方式共有四大類，摘要敘述如下：

1. 螺絲配合螺帽鎖緊：這是一般最常見的方法，尤其當機件材料強度較低或者某些材料螺紋加工困難時，通常會使用螺帽來鎖緊機件。但在設計上必須考慮預留足夠的空間以容納螺帽及其鎖緊工具，所以使用上會受到一些限制。
2. 於機件之結合孔攻牙然後螺絲與攻牙孔直接鎖緊：此方法適用於當機件有足夠的厚度可以容納所需的螺紋數時。但是其前提為機件材料本身必須具備足夠的強度，以免螺紋於鎖緊施力過程中被損壞，喪失了螺紋的功能。所以通常只適用於有較高強度的金屬類機件及可以進行螺紋加工的材料。其優缺點為：
 - 因不需使用螺帽所以結合作業及工具變簡單。
 - 因不需使用螺帽所以結合空間及長度變少。
 - 攻牙加工成本通常較高。
 - 攻牙後使用螺紋規格即被固定，不易更換。所以使用上較螺帽缺乏彈性。
3. 使用自攻螺絲直接鎖緊：常用自攻螺絲可分為有切削作用及無切削作用二種，依照使用需求選用。通常對硬度較高的材料使用具有切削作用的自攻螺絲而硬度較低的材料使用無切削作用自攻螺絲。
4. 螺絲配合埋入內螺紋或牙套進行鎖緊：對於強度較低無法攻牙的材料，以及受空間或設計限制無法使用螺帽的場合，且又需要較大的結合強度及兼顧多次的拆裝而不至於損壞螺紋結構故無法使用自攻螺絲等情況下，通常會使用埋入螺紋或牙套來解決，其作用介於使用螺帽與機件上攻牙，但成本較高，所以不得已才用之。

綜合上述，最佳的螺紋結合方式是使用自攻螺絲直接鎖緊，不論材料上、加工上、作業上之成本都最少，但是自攻螺絲直接鎖緊的結合強度比螺帽鎖緊及機件上攻牙鎖緊低，因此在需要較高鎖緊強度的應用上

通常不建議使用自攻螺絲。本論文研究對象之使用需要大的結合強度且材質為不銹鋼，所以不適用後二者鎖緊方式，加上作業空間無法容納螺帽及工具，所以必須使用機件上攻牙鎖緊的螺紋結合方式。

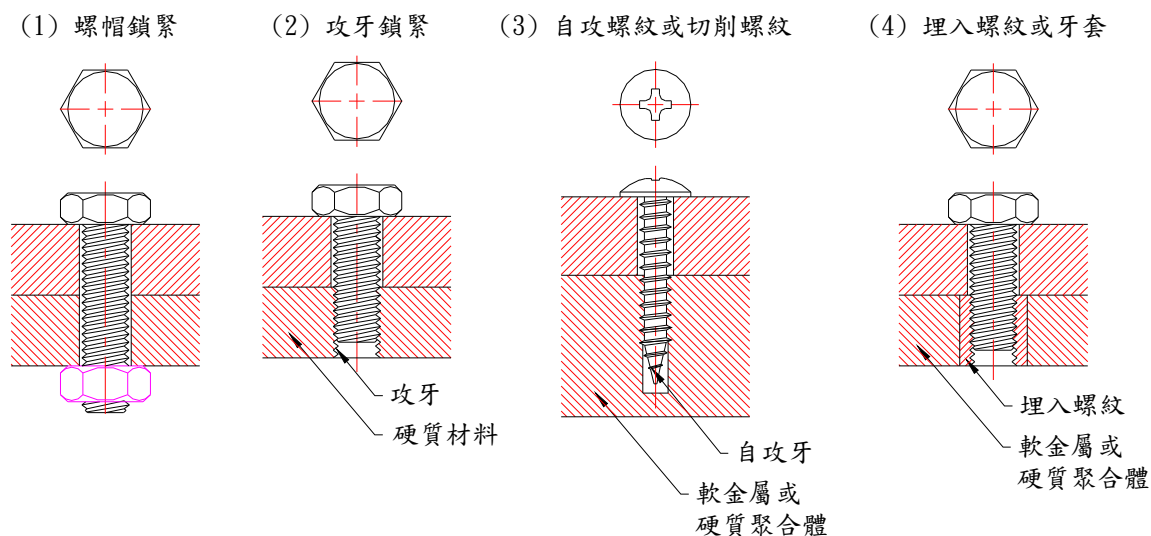
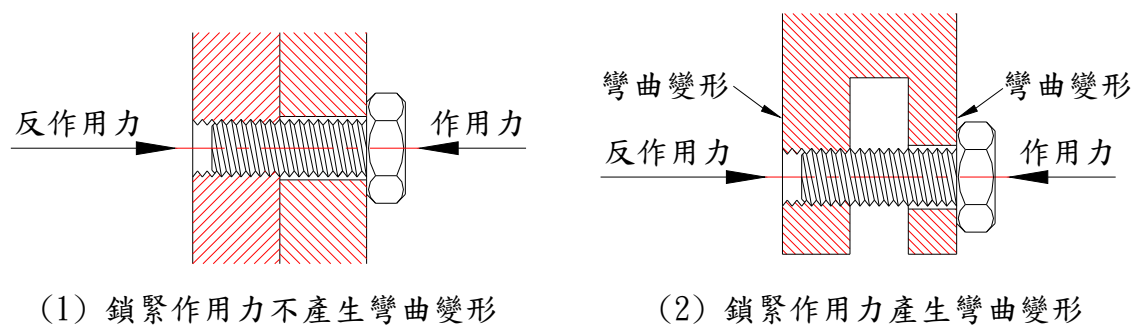


圖 6 一般常用的螺紋結合機件方式

1.1.6 螺紋受力型態

如圖 7 所示，螺紋受力型態可概略分成二種，第一種是螺紋的鎖緊作用力不使機件產生彎曲變形，第二種是螺紋的鎖緊作用力使機件產生彎曲變形。若假設所有機件均為剛體 (Rigid Body) 且螺紋與機件互相垂直的情況下，那麼這二種受力方式對螺紋本身而言不會有任何的差異，但是對機件而言會多承受一個彎矩 (Moment)，力矩的大小與鎖緊中心線到固定點距離成正比。因為機件及螺紋均已經假設為剛體，所以二者不會有任何變形存在。



(1) 鎖緊作用力不產生彎曲變形

(2) 鎖緊作用力產生彎曲變形

圖 7 螺紋受力型態

1.2 關於材料

在進行機械設計時，依據使用需求選擇最恰當的標準規格螺紋，是一門學問，其中螺紋材料在選擇過程中也扮演著重要的角色。如表 1 所示之螺紋拉應力面積，基本上具有相同公稱直徑之螺紋皆有相同的應力面積，但因螺紋材料差異，故有不同的強度，所以對常用螺紋材料特性有所了解後，將有助於本研究之進行。

1.2.1 常用之螺紋材料及其表面處理簡介

常用之螺紋材料大致上分為二大類：一為金屬材料，包括鐵金屬與非鐵金屬；另一類為非金屬材料，如聚合體等。本研究著重於使用鐵金屬螺紋材料，特別是使用不銹鋼作為螺紋材料。不銹鋼與一般鋼鐵材料相比，具有一些不可替代的優點，特別是耐蝕性用途，有關不銹鋼的機械性質及特性已經有廣泛的研究及應用[6][7]。

從金屬線材或棒材製成螺紋有兩個重要加工程序，一個是之前提過的螺紋滾軋加工，另一個是針對有頭螺紋的冷打頭（Cold Heading）加工。作為一個優良的螺紋材料，必須同時具備良好的滾軋特性及冷打頭特性，大部分的冷打頭材料為低碳鋼線材，硬度在 HRB 75~87 之間，鋁、不銹鋼及一些鎳合金亦可作為冷打頭材料，鋼材之打頭性（Headability）會隨含碳及含錳量增加而降低，含碳及錳量愈高則愈易使頭部裂開。當碳鋼含碳量超過 0.25%~0.44% 以上時應經製程退火（Process Annealed）或球化退火（Spheroidize Annealed）處理，才能容易得到較佳的加工品質[8]。

經過打頭及滾軋加工後之螺紋為求耐蝕性或美觀，通常會施以如電鍍等表面處理。依照環境與所需的使用壽命來決定表面處理之方式及處理厚度，但是必須考慮經過處理後的螺紋精度是否發生問題，增加表面鍍層的厚度會延長使用壽命，同時也會降低螺紋精度；表面處理也會影響到螺紋的疲勞強度及表面摩擦係數等重要機械性質。若使用環境惡劣，則常用不銹鋼而不做任何表面處理[9]。

附表 4 為各種用途的常用螺紋材料[9]。

附表 5 為螺紋製品用表面處理之種類[9]。

表 4 各種用途的常用螺紋材料

材料			耐 蝕 性	導 電 性	非 磁 性	特色
不 銹 鋼	沃斯田鐵 系	SUS302	○		○	耐醋酸、硝酸、硫酸、食鹽、 海水、硼酸及各種藥品
		SUS304	◎		○	
	肥粒鐵系	SUS430	○			不適合硫酸，切削性良好
	麻田散鐵系	SUS410	△			
快削黃銅棒		BsBMD2	○		○	切削性良好
黃銅線		BsW2	○	○	○	冷間鍛造性良好

由表 4 可知不銹鋼具有一般用途所需綜合性的優點，如：耐蝕性、非磁性、使用溫度範圍寬廣，而且不需任何表面處理及可使用，所以成為高級螺紋用材料的代表。

表 5 螺紋製品用表面處理之種類

表面處理之種類	厚度 (μ)	適用	價格比
電鍍鋅光澤鉻酸鹽	2~5	鐵鋼材，耐蝕用	1~2.5
鍍鎳鉻	2~3	鐵鋼、黃銅材，美觀用	4~12
鍍錫	3~5	鐵鋼材導電、焊接用	3~8
磷酸鹽覆膜	0.5~1	鐵鋼材，一般用	1.5~4
熔融鍍鋅	50~57	鐵鋼材屋外耐蝕用	2~4

1.2.2 沖壓成型用不銹鋼薄板特性

在本論文中配合不銹鋼螺紋使用的零件為同樣以不銹鋼薄板經沖壓、孔凸緣、彎折、及內孔攻牙等加工製程所完成的沖壓件，尤其內螺紋是以孔凸緣加工後的圓孔施以攻牙而得，因此孔凸緣決定了內螺紋的品質及精度。而不銹鋼材料的高韌性及高回彈性使得沖壓加工變得較困

難，零件尺寸精度及模具壽命也是一大考驗。然而沖壓加工具有生產速度快、加工成本低、材料浪費少等優點，因此在機械加工法之中佔有重要的地位。以下將對不銹鋼薄板材料及孔凸緣沖壓成型加工工作一介紹。

1. 沖壓成型加工用不銹鋼薄板材料：使用不銹鋼時除了考慮耐蝕性、成本、加工之可行性外，若需進行塑性加工則必須特別注意其成型性 (Formability)。一般而言，不銹鋼與低碳鋼相比，其成型性之差別如下[8]：

- 較高之強度。
- 加工硬化較大。
- 摩擦較大。
- 較容易融著或擦傷。
- 較低之熱傳導率。

以上這些不銹鋼的特性將與本研究息息相關，影響不銹鋼成型性的因素包括：降伏強度、拉伸強度、伸長率及加工硬化等機械特性。不銹鋼依照含鉻量之百分比多寡分為三大類，含鉻量最高者為沃斯田鐵系，其次為肥粒鐵系，而麻田散鐵系含鉻量最少。沃斯田鐵系的 SUS302 及 SUS304 擁有較大的可成形加工量，肥粒鐵系的 SUS430 其次。這也說明為何市面上販售的不銹鋼螺紋其材質幾乎都是使用 SUS302，因為 SUS302 在進行冷打頭及螺紋滾軋時可以有更大的變形量而不發生加工破裂。

表 6 常用不銹鋼化學成分表 (擷取自 JIS 規範)

Specification 規範	Steel Grade 鋼種	C% 碳 Max.	Si% 矽 Max.	Mn% 錳 Max.	P% 磷 Max.	S% 硫 Max.	Cr% 鉻	Ni% 鎳	Mo% 鉬	Ti% 鈦
JIS G4303	SUS302	0.15	1.00	2.00	0.045	0.03	17.00-19.00	8.00-10.00		
G4304	SUS304	0.08	1.00	2.00	0.045	0.03	18.00-20.00	8.00-10.50		
G4305 G4312	SUS430	0.12	0.75	1.00	0.040	0.03	16.00-18.00			

表 7 常用不銹鋼機械性質表（擷取自 JIS 規範）

Specification 規範	Steel Grade 鋼種	Tensile Stress 抗拉強 度,N/mm ² .MIN	Proof Stress 降伏強 度,N/mm ² .MIN	Elongation 伸長 率,%,MIN	Hardness 硬 度,HRB,MAX.	彎曲 BENDABILITY	
						Bending Angle 彎曲角度	Inside Radius 彎曲半徑
JIS G4304	SUS302	520	205	40	90	No Require	
G4305	SUS304	520	205	40	90	No Require	
G4312	SUS430	450	205	22	88	180	1.0 time the thickness

同樣的，一般應用於沖壓加工的不銹鋼薄板材料主要也以此三者為主，雖然沃斯田鐵系的 SUS302 與 SUS304 的成形性優於肥粒鐵系的 SUS430，但是 SUS430 的材料市售價格約為 SUS304 的三分之二，所以在成形性不特別嚴格且耐蝕性不特別需求之情況下，設計上可以優先考慮使用 SUS430，而本論文所使用的沖壓件材料即是使用 SUS430。附表 6 不銹鋼化學成分表及附表 7 不銹鋼機械性質表，均為擷取自 JIS 規範，將被用於後面的計算依據及作為實驗樣品的比對確認，也是一般機械設計人員常用的參考資料。

2. 孔凸緣沖壓成型加工：欲在金屬薄板上得到合適之內螺紋，常常因為受限於金屬板的厚度不足，所以無法得到所需要的螺紋數。而若為了得到所需的螺紋數把金屬板增厚，至少會產生兩大問題：第一可能因為材料加厚導致許多小尺寸形狀及彎折無法加工；其次是加厚使材料成本倍增，產品不但過重，也失去了市場的競爭優勢，變成失敗的產品。孔凸緣沖壓成型加工就是為了改善這類型問題而發展出來的加工方法。

圖 8 照片顯示一個簡單形狀的孔凸緣沖壓成型加工例子。一片長方形不銹鋼片中間被加工一突出的凸緣，然後在孔凸緣施以攻牙，因為凸緣關係局部材料厚度增加，所以攻牙的螺紋數變多了，在不改變材料厚度情況下也能有足夠的螺紋強度。

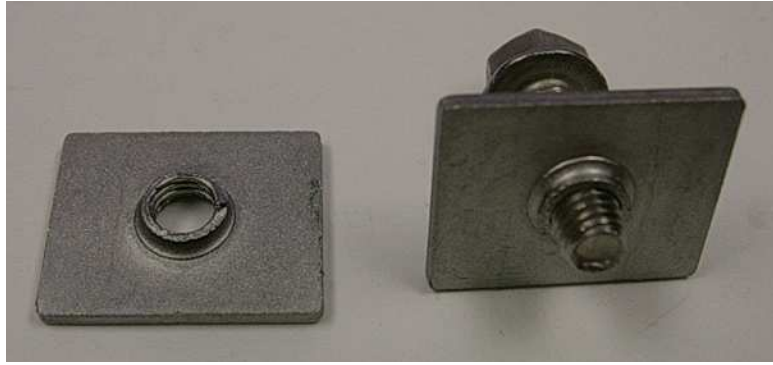


圖 8 簡單形狀的孔凸緣成型及攻牙加工實例

圖 9 為孔凸緣的加工示意圖[8]，首先在料片上沖出一小孔，然後再進一步沖成孔凸緣，於材料的體積不變原則下，凸緣部分材料厚度將變薄，參考計算公式如下[8]：

$$d = D - 2(H - 0.43R_D - 0.72t) \quad (4)$$

$$H = \frac{D - d}{2} + 0.43R_D - 0.72t \quad (5)$$

經由實驗方式可以找出沖孔徑 d 與成形孔徑 D 的比值關係，那我們就可以求出孔凸緣的極限高度。

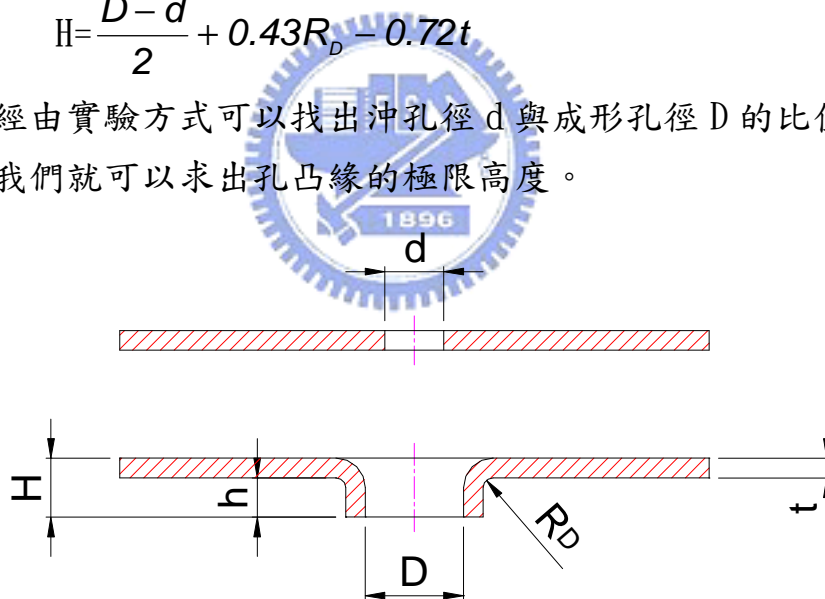


圖 9 孔凸緣的加工示意圖

3. 沖剪切口之加工硬化與凸緣裂痕：沖壓加工的剪切面，因材料先產生塑性變形然後才被剪斷，故製品的沖剪切口受加工硬化影響其硬度明顯上升，其硬度值約為母材的 2~3 倍，若用此沖剪切口面作為接觸面，則可提高零件的耐磨性及使用壽命[10]。圖 10 為熱軋鋼板 (SPH) 厚度 3.2 mm 材料沖剪切口受加工硬化後，沿板厚度方向及沿半徑方向的硬度分佈情形。

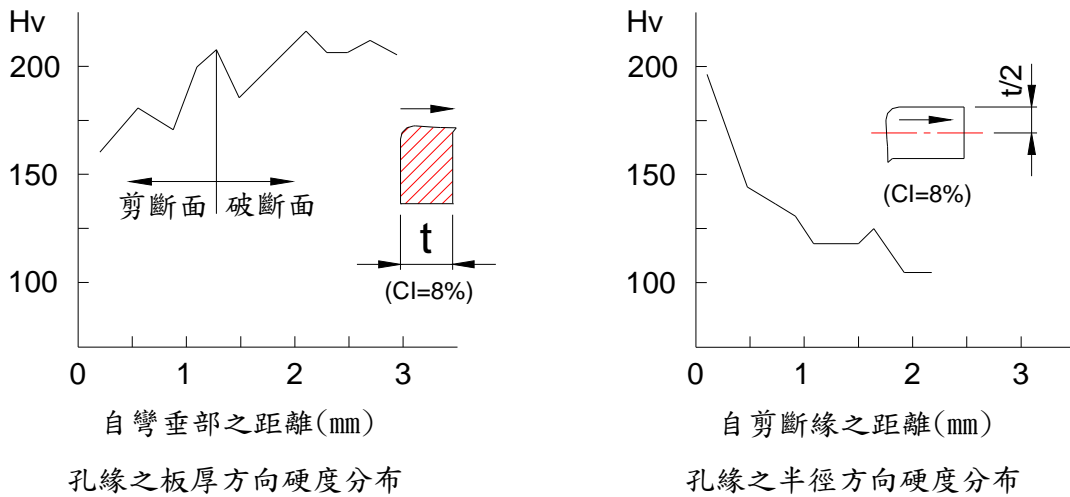


圖 10 慣用剪斷面之硬度分布圖 (SPH 3.2t)

參照圖 9 之凸緣加工，材料先被沖出一小孔，此時剪切斷面產生加工硬化，使得孔周圍材料硬度增加，愈接近切斷面及切斷之毛刺面則其硬度愈高。當進行第二道孔凸緣之成形時，此高硬度面因無法容許更多的加工變形，所以會在凸緣端面產生加工裂痕，如圖 11 所示。此裂痕隨凸緣高度增加而增大，此現象對不銹鋼材料尤其明顯，這是因為不銹鋼的強度、加工硬化及摩擦係數等較一般成形用鋼板大的緣故，使二次加工成形能力降低。

因加工硬化產生的凸緣裂痕使後續攻牙作業受到影響，同時造成螺紋品質降低，進而對螺紋鎖緊產生不利，但真實影響性如何有待於後續的實驗中，作進一步之探討及分析。

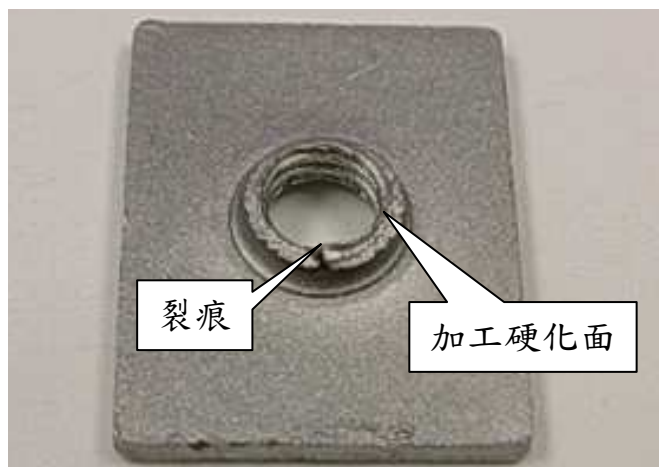


圖 11 因加工硬化產生的凸緣裂痕

第二章 研究內容與方法

2.1 研究主題說明

如同第一章內容所述，螺紋是一種非常重要的結合元件，也具有非常廣泛的用途。但是若要能夠發揮螺紋真正的功能，達到設計上的目的，則有許多細微部分需要釐清及注意。本論文即針對以不銹鋼外六角螺絲搭配不銹鋼沖壓件之孔凸緣內螺紋，在鎖緊作用力使機件產生彎曲變形的情況下，所可能衍生的問題作分析及討論。在進入研究主題之前，先對與研究主題相關的事項及定義作簡單扼要的說明。

以螺紋作為一個結合元件時，其作用是將二個或二個以上的機件以適當的力量結合為一體。由此定義牽涉到四個基本要素分別為：結合作件—即螺紋、被結合作件—即機件、結合方式、結合力與受力種類。這四個基本要素在第一章中已有基本的介紹。

事實上自然界的材料均非剛體，所以當機件受外力作用時一定會存在或多或少的變形，在此情況下螺紋受力的型態就變的非常重要了。通常螺紋都被附加一個大的負荷或是鎖緊力，當螺紋鎖緊作用力不使機件產生彎曲變形時，因為沒有彎矩發生，所以螺紋承受單純的拉伸或壓縮力，在這種情況下，只要螺紋規格選用正確及鎖緊作業合宜，基本上不會有使用上的問題。

當螺紋的鎖緊作用力使機件產生彎曲變形時，螺紋與機件不只承受單純的拉伸或壓縮力，還承受了因偏心或傾斜所導致的很大的彎矩。此彎矩決定了整個鎖緊系統的結構強度，不管是螺紋或是機件都受到彎矩的影響，在直覺上整個鎖緊系統的結構強度至少必須對彎矩有一定的抵抗能力，但是因為螺紋鎖緊力往往很大，為了要達到充分克服彎矩的需求，往往帶來的負面作用為必須使用更厚的材料。所以對於此類的螺紋鎖緊應用所潛藏的問題，以及在此情況下使用的鎖緊扭力對於螺紋的影響是本論文研究探討的核心。

2.2 研究動機

前文已提過不銹鋼的優缺點及重要特性，包括：較大的強度、加工硬化、摩擦與較低的熱傳導等性質，這些均與一般鋼鐵材料有所差異。因為這些特性使得不銹鋼螺紋結合不銹鋼機件在鎖緊作用力使機件產生彎曲變形時，由彎矩產生的不良作用影響將遠超過一般鋼製螺紋或其他金屬螺紋結合件，但其真實影響度到底如何？是否足以造成鎖緊機構失效或螺紋失去作用？鎖緊力的極限為何？等等問題均需以理論計算配合實驗結果作解讀。

目前有關不銹鋼螺紋結合不銹鋼機件在鎖緊作用力使機件產生彎曲變形的研究仍十分缺乏。尤其是機件內螺紋採用沖壓孔凸緣攻牙加工，但是此方面的實務應用卻很多，或許以往的使用並無發生問題，所以未研究；抑或許只有一些小問題，不值一提；抑或許問題一直處於潛藏狀態尚未顯現，所以不為人知。然而就我個人使用經驗而言，這裡面值得進一步作更多的分析及探討，也希望藉此研究能夠釐清疑問並期待找出一個具有實用價值的結果以供設計者及相關人員作為螺紋引用及施工上的參考。



2.3 研究對象及範疇

本論文的研究主題為“不銹鋼螺紋鎖緊特性之研究—以 M6-60 長不銹鋼螺紋結合 M 形不銹鋼夾緊件為例”，研究對象分別是 M6-60mm 長不銹鋼全牙螺紋如圖 12 及 M 形不銹鋼孔凸緣攻牙夾緊件如圖 13，以下將針對研究對象作一介紹。

2.3.1 研究對象功能簡介

本研究對象目前被使用於小型衛星天線或者其他類似產品的安裝及調整，圖 14 為研究對象的其中一種應用例，是以二支不銹鋼全牙螺紋配合 M 型不銹鋼孔凸緣攻牙夾緊件，將一圓形桿件夾緊以便進一步作設備的安裝及角度的調整。因為桿件直徑有大有小，必須靠螺紋長度來做調整才可以確實將桿件夾緊，為了得到最大的調整範圍，所以必須採用全牙螺紋，此外桿件外徑的使用範圍尚受限於 M 型夾緊件兩側凸緣攻牙孔之間距。細部放大如圖 15。

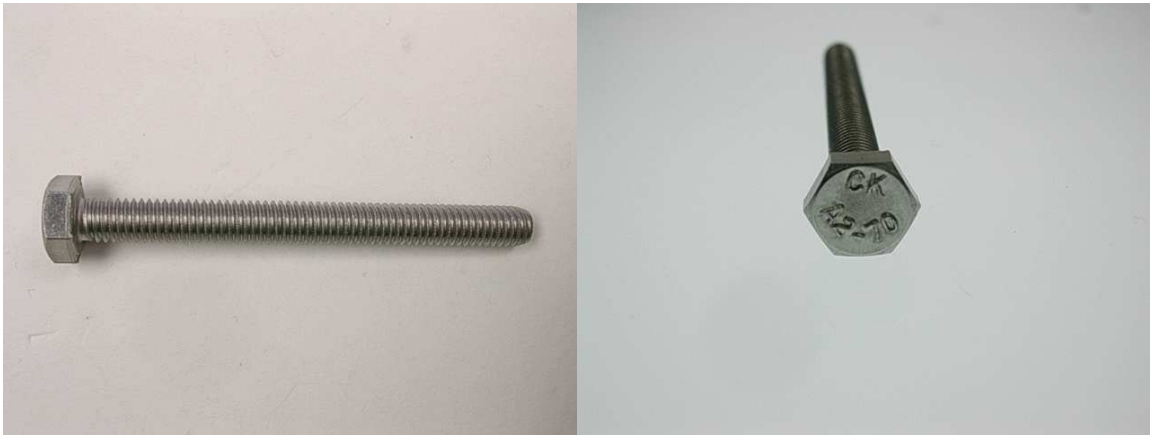


圖 12 M6—60mm 長不銹鋼全牙螺紋，六角頭有註記 A2-70 表示強度等級



圖 13 M 型不銹鋼孔凸緣攻牙夾緊件，右圖顯示孔凸緣攻牙情形

基本上不同桿徑代表螺紋鎖緊作用力與反作用力軸線距離不同，桿徑愈小則螺紋鎖緊作用力與反作用力軸線偏離愈遠，所以彎矩影響加大；反之若桿徑愈大則螺紋鎖緊作用力與反作用力軸線距離愈近，所以彎矩影響較小。在本論文中僅先考慮 M 型不銹鋼夾緊件所能安裝的最大桿件外徑其外徑等於 50.8mm 或者常用稱呼為 2 英吋，這是一般最常用的圓桿尺寸之一，也有比較大的強度，對於其他直徑的圓桿，可以用推導的方式得到一個近似值。

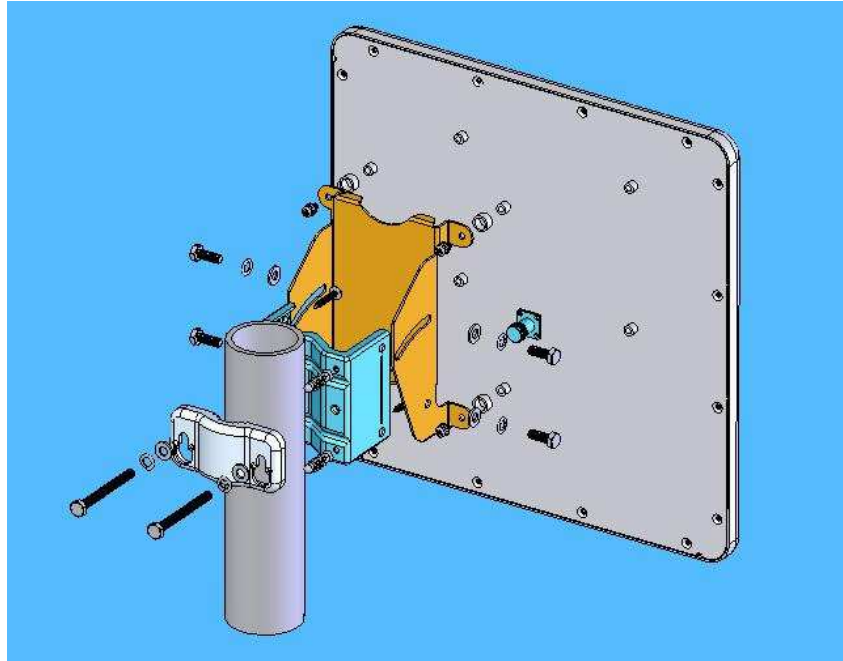


圖 14 研究對象用於夾緊圓形桿件的使用示意圖

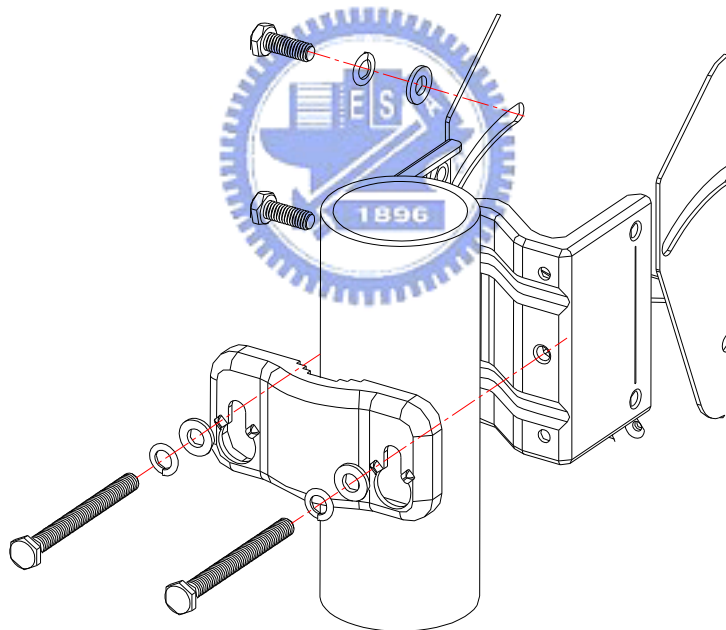


圖 15 研究對象的細部放大圖

2.3.2 環境條件之限制及考量

在緒論中已經對螺紋及材料有概略說明，我們也了解不銹鋼材料的一些特性。眾所皆知，不銹鋼相較於其他鋼鐵材料而言，不但價格昂貴數倍、加工困難度高、對於刀具及模具的磨損也很大，就以上缺點來說不銹鋼實在稱不上是一種經濟的抉擇。但是當使用環境相對惡劣情況

下，不銹鋼展現了它的優點，如耐蝕性、耐藥品、非磁性（SUS304 系列）、耐低溫及疲勞等。

本研究對象材料使用不銹鋼是基於使用環境的需求。對戶外產品來說，最大的挑戰不外乎防蝕及防水，尤其在台灣，空氣中往往含有高濃度的鹽分及各種酸雨，一般的鐵金屬加上電鍍尚無法得到好的耐蝕效果，鐵鋼材施以熔融鍍鋅及熔融鍍鋁可以有較佳的耐蝕效果且價格也比較低（請參考表 6），但是因為鍍層很厚，對於小型、複雜且尺寸精度要求較高的機件並不適用，就製品的外觀而言，不如不銹鋼的自然金屬光澤來的美觀，且許多的電鍍製程常常有重金屬（如六價鉻、鎘等）污染的潛在疑慮，在今日環保意識高漲，許多國家及地區紛紛制定相關的環保規定，舉其重要者如：歐盟 RoHS 指令及 ELV 廢棄汽車指令均限制鉛、汞、鎘、六價鉻等重金屬的最大含量，此指令已於 2006 年 7 月 1 日正式實施，所有銷售至歐盟國家的產品均必須符合此一標準；而中國大陸也頒布了 China Rohs 指令，其對有害物質的規定較歐盟更為嚴格，指令已於 2007 年 3 月 1 日正式實施，銷售至中國大陸的產品必須符合此一標準。可以預見的，環保議題將是未來產品競爭力的基本要件之一，環保的規格也將日益嚴格，所以深深影響了材料與製程的選用。所以設計上採用不銹鋼材料的情況勢必會更多，當然這也間接導致不銹鋼價格步步高漲，尤其應用於沃斯田鐵系不銹鋼（SUS302 或 SUS304 等）的重要金屬原料—鎳（Ni），因為沃斯田鐵系不銹鋼的使用需求大幅增加，造成鎳價大幅度上漲。

以下幾點是研究對象材料選用不銹鋼的考量因素：

- 使用年限長：若以材料耐蝕生命週期及材料原始成本相比，不銹鋼會比一般鋼材具有較多的優勢。
- 維護費用低：當考慮機件因腐蝕必須經常維護或進行更換時，則人工成本勢必遠超過材料成本。
- 考慮機構的安全性：當機構會因為腐蝕而產生人員或環境的安全顧慮時，使用較佳材料是必然的選擇。
- 考量環保性及易於資源回收再利用。

本研究對象之螺絲材料是使用 SUS302 不銹鋼，這是基於螺紋滾軋加工及螺絲冷打頭製程等塑性加工時此種材料有較佳的流動性及成形性，SUS302 不銹鋼加工特性請參照附表 7 及附表 9。而 M 形不銹鋼沖壓件材料則使用 SUS430 不銹鋼，雖然 SUS430 不銹鋼的塑性加工能力低於 SUS304 不銹鋼，但是用於一般的沖壓加工或折彎製程已經足夠，就如第一章所提，SUS430 不銹鋼的最大優點在於材料價格相對便宜也有足夠的塑性加工能力。所以選用 SUS430 不銹鋼這為了兼顧耐蝕性與產品成本雙重考量的結果。

2.4 研究方法

本研究主要在於探討不銹鋼材料在鎖緊作用產生彎曲變形時，對螺紋及機件結構產生的影響。就一般經驗法則而言，彎曲變形的作用遠比單純的拉伸作用更為複雜。

為了讓研究有一個比較客觀的比較標準，所以研究對象之試件直接取材於市面上已經大量生產及已經實際應用的零件，這些零件是由相關的模具製造，並且經過一定的材料、尺寸等品質管控，所以其品質水準較有一致性及穩定性，這將使得實驗結果更為客觀及具有可靠性。以下將針對研究方法作一介紹。

2.4.1 基本假設

不管是材料成分比例容許的差異、材料表面處理差異、放置環境不同、放置時間長短不同、生產過程中機具設備及模具工具本身的精度誤差、各種加工條件不同產生的誤差、量測儀器本身的允許公差、檢驗量測時環境條件差異、人為所導致的量測誤差等各種因素，這些都會使試件產生實質上的誤差，直接或間接影響實驗結果。但是這些誤差通常很小，不足以影響整個試驗的結論，所以如同上節所述，本實驗試件直接取材於市面上已經大量生產及已經實際應用的零件，以巨觀角度進行實驗，並不考慮更細節或微觀的因素所產生的誤差及影響。以下是本實驗的基本假設：

- 對於所使用的試件材料均假設為均質並具有相同的機械特性，不

考慮材料微結構的作用及影響。材料計算所使用的各項參數，均依照 JIS 或 ASTM 等國際規範之規定。

- 因為試件材料均為不銹鋼，且試件表面並無任何處理，所以受環境及時間（主要是氧化作用）的影響較小，因此環境及時間影響因素不考慮。
- 容許量測儀器本身的合理公差。不論如何，得以校正的儀器，必須確保其使用在校正期限之內，且使用前必須確保先將之歸零，使儀器誤差降至最低。
- 容許實驗環境的誤差。如：溫度、溼度等。因為實驗設備及儀器的使用環境已有溫溼度的管理（溫度 $23^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ ，溼度 $60\%\pm 15\%$ ），所以對不考慮環境變數引起的誤差。
- 允許人員操作上產生的誤差，但是必須以相同的作業方法進行試件實驗。

為了不讓各種誤差導致使用的錯誤並提高設計的安性，在機械設計中往往必須考慮到所謂的“安全係數”（Safety Factor），安全係數(SF)定義如下[11]：

$$\text{SF} = \frac{\text{設計負荷}}{\text{正常負荷}} \quad \text{或} = \frac{\text{材料降伏應力}}{\text{最大工作應力}} \quad (6)$$

選擇適當的安全係數所必須考慮的因素諸如：因為對真實負荷的不確定、對材料強度的不確定、對結構破壞的後果影響是否重大及使用較大安全係數的成本等。通常適當的安全係數已經足以將各種細微的誤差予以涵蓋，所以並不影響正常使用的可靠性。

2.4.2 以現場作業需求為出發點之實驗條件

螺紋鎖緊並不是一種精密的作業，其作業在許多不同環境條件下都有可能進行。若必須考慮各種環境條件之真實情況以進行實驗，這不是一般實驗室可以充分滿足的。但是盡量與作業現場的作業條件或作業方式一致，這樣實驗結果會更接近實用，基於此點考慮，本實驗所使用的

各項工具及施工方法並不作特別的考慮，而是以市面上容易取得為主，也許其精度無法達到實驗室的需求等級，但是對於一般實務使用者而言，已經有足夠的參考價值。

2.5 預期結果

希望藉此研究能夠達到下列預期目標：

- 了解研究對象受力作用下的各種現象。
- 了解研究對象其原有設計功能變化的趨勢。
- 了解研究對象的功能極限與是否被破壞。
- 探討各種變因對研究對象的影響程度。
- 探討不同實驗條件及實驗參數的影響度。
- 探討材料的影響。
- 探討加工方法或製程的影響。
- 設計改善的建議方案。
- 螺紋鎖緊作業的建議方案。



第三章 理論與文獻回顧

螺紋鎖緊原理於第一章已經做過概略的說明，然而在鎖緊過程及鎖緊到所需的結合力中間，牽涉到多方面的機械及力學相關領域理論，包括：基本的軸向應力與應變；近似樑的撓曲變形；扭轉負荷下的應力與應變、摩擦作用、磨耗現象、潤滑作用、因為摩擦或機械變形所造成的溫度效應等。以上這些因素均會對本研究有所影響，所以有必要將這些因素的理論與文獻作一個了解。

3.1 應力與應變

應力與應變是影響螺紋鎖緊機構最明顯且較為人所知的部分，作用在螺紋的應力包括：螺紋軸向的鎖緊力；螺絲頭承受的扭力；產生彎曲變形的力矩等。分別敘述如下。

3.1.1 軸向負荷應力與應變[1] [12]

當機件受到一個沿軸方向的拉伸或者壓縮外力作用時，此機件單位面積上所承受的外力大小稱為應力 σ (Stress)，一般定義拉應力符號為正(+)；壓應力符號為負(-)。假設外力為 P ，機件之剖面面積為 A ，應力可表示為：

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (7)$$

機件因外力作用引起的長度總變化量稱為變形 δ (Deformation)，若將變形除以機件的原來長度 l ，則代表單位長度的變形量，稱為應變 ε (Strain)，應變可表示為：

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l} \quad (8)$$

雖然機件只承受軸向作用力而在軸方向產生變形，但在橫向仍有尺寸上的變化。定義 μ 為蒲松氏比 (Poisson's ratio)，則橫向應變會等於 μ 乘上軸向應變。

對大部分使用的工程材料，其應力與應變成一定的比例關係，當此

比例關係存在，則該材料遵循虎克定律 (Hook' s law)。若將此比例常數定義為 E ，則應力與應變的比例關係可表示為：

$$\sigma = \varepsilon E \quad \text{或} \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (9)$$

常數 E 被稱為該材料的彈性係數 (Modulus of elasticity) 或楊氏係數 (Young' s Modulus)。將 (7) 與 (9) 代入 (8) 中可得：

$$\delta = \frac{\rho l}{AE} \quad (10)$$

上述方程式將被用來計算螺絲受力後的變形量，此變形量代表螺紋的軸向鎖緊力。

3.1.2 懸臂樑的撓曲方程式[12]

如附圖 16 所示，考慮一個只有末端受力彎曲變形的懸臂樑結構，其在末端承受一作用力 P ，懸臂樑的長度為 l ，樑受力產生的彎曲變形量為 y ，變形角度為 ϕ ，則此懸臂樑的撓曲方程式可推導如下：

1. 由材料力學樑的力矩方程式可得： $M = \frac{EI}{r}$ (11)

M ：力矩負荷， I ：面積慣性矩 (Moment of inertia of the area)， r ：彎曲變形之曲率半徑

2. 在 ϕ 很小時，則 $\phi = \frac{dy}{dx}$ ，且 $\frac{d\phi}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2}$ ， $dx = -r d\phi$ 因此

$$\frac{d\phi}{dx} = -\frac{1}{r} = \frac{d^2y}{dx^2} \quad (12)$$

3. 將式 (11) 代入可得

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (13)$$

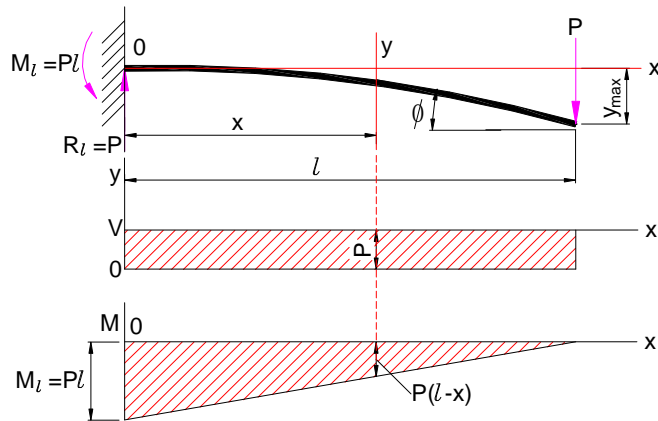
4. 懸臂樑在位置 x 時所承受的力矩 $M = P(l - x)$ 代入式 (13) 可得

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} = -\frac{P(l - x)}{EI}，\text{兩邊積分可得}$$

$y = \frac{P}{6EI}(3lx^2 - x^3)$ ，此即懸臂樑的撓曲方程式。當

$x=l$ 時 y 有最大值

$$y_{max} = \frac{Pl^3}{3EI} \quad (14)$$



$$\phi = \frac{Pl^2}{2EI} \quad ; \quad y = \frac{P}{6EI}(3lx^2 - x^3) \quad ; \quad y_{max} = \frac{Pl^3}{3EI}$$

圖 16 均勻剖面懸臂樑的剪力、力矩與撓曲

5. 同理可求得懸臂樑的變形角度 ϕ ，將懸臂樑在位置 x 時所承受的力矩 $M=P(l-x)$ 代入式 (12) 與 (13) 可得

$$\text{因為} \quad \frac{d\phi}{dx} = \frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI}$$

$$\text{所以} \quad \frac{d\phi}{dx} = -\frac{M}{EI} = -\frac{P(l-x)}{EI}, \text{兩邊積分可得}$$

$$\phi = \frac{P}{EI} \left(lx - \frac{x^2}{2} \right)$$

因為整支懸臂樑具有相同的變形角度，考慮在 $x=l$ 時變形角度

$$\phi = \frac{Pl^2}{2EI} \quad (15)$$

實驗對象的受力結構，若假設為一個間單的懸臂樑，則可以用此節

的方程式進行受力的計算，並與實際受力進行比較。

3.1.3 扭轉負荷的應力與應變

對螺紋機構而言，因為承受扭矩作用而造成軸扭轉的負荷。在機械應用上許多軸的用途為將機械力由一點轉移或傳送到另一點，扭力矩也可以經由軸傳送，但我們必須知道軸所能承受的應力和扭轉角度，才不至於破壞材料或造成軸過大的變形。螺紋也有如同傳力軸一樣的特性，鎖緊力量來自於螺絲頭及工具施加的扭力矩，當螺絲愈長則扭力矩的作用影響就愈大。

如圖 17 [13]顯示一個受扭力矩作用使圓軸產生扭曲變形，假設圓形軸任一截面最初與軸相垂直，在變形之後平面依然垂直於軸而沒有任何扭曲變形。若將軸的頂端固定，在軸底端施加一扭矩。扭轉角度定義為 θ ，假設伸長應變為零，則剪應變 $\gamma_{\theta z}$ 為

$$\gamma_{\theta z} = r \frac{d\theta}{dz} \approx \frac{r\theta}{l} \quad (16)$$

若剪應力定義為 $\tau_{\theta z}$ ，由虎克定律，剪應力與應變的關係為

$$\tau_{\theta z} = G \gamma_{\theta z} = G r \frac{d\theta}{dz} \approx G \frac{r\theta}{l} \quad (17)$$

其中 G = 剪彈性模數，由 (17) 可知剪應變 $\gamma_{\theta z}$ 與剪應力 $\tau_{\theta z}$ 隨著扭轉角度 $\frac{d\theta}{dz} \approx \frac{\theta}{l}$ 作線性的變化。若軸扭矩定義為 T 則扭矩與剪應力 $\tau_{\theta z}$ 的關係式如下：

$$T = \int_A r(\tau_{\theta z} dA) = \frac{G\theta}{l} \int_A r^2 dA \quad (18)$$

因為面積極慣性矩 J 為

$$J = \int_A r^2 dA \quad (19)$$

將方程式 (19) 代入 (18)，得到扭矩或扭轉角度為

$$T = \frac{G\theta J}{l} \quad \text{或} \quad \theta = \frac{Tl}{GJ} \quad (20)$$

對半徑為 r_0 ，直徑為 d 的實心圓形軸，面積極慣性矩 J 為

$$J = \frac{\pi r_0^4}{2} = \frac{\pi d^4}{32} \quad (21)$$

將方程式 (18) 與 (19) 代入 (17) 可得剪應力 $\tau_{\theta z}$

$$\tau_{\theta z} = \frac{rT}{J} \quad (22)$$

最大剪應力 τ_{max} 發生在中立軸到外緣的最大距離，此距離定義為 c ，將方程式 (21) 代入，則方程式 (22) 可改寫成

$$\tau_{max} = \frac{cT}{J} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (23)$$

方程式 (23) 的假設前提為：[11]

1. 桿件必須是挺直且為實心的圓桿（空心圓桿的面積極慣性矩 J 與實心者不同），而且施加的扭矩必須與軸垂直。
2. 材料必須是均質的，且在彈性變形之範圍內。
3. 截面應考慮必須足夠遠離負荷的施加點並避開會引起應力集中的外形，如：孔洞、切槽、鍵槽等。

上述方程式將被用來計算螺絲受扭力後的剪應力及剪應變，用以判斷螺紋是否產生永久變形或破壞。

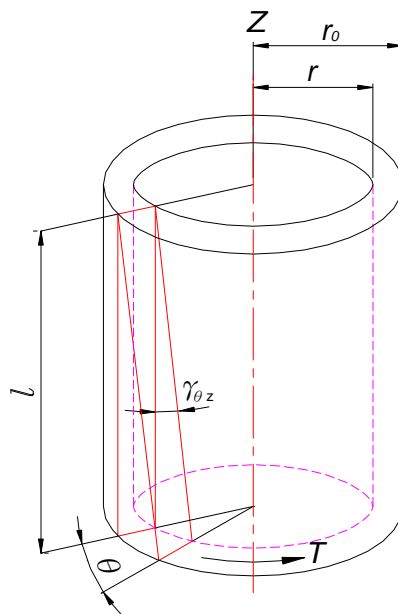


圖 17 扭力矩使圓軸產生扭曲

3.1.4 軸向負荷的剪應力與破壞的最大剪力理論[13]


作用於機件上兩點，大小相等、方向相反、平行而且相距極小的力稱為剪力，單位面積上所受的剪力大小定義為剪應力（Shear stress） τ 。由剪力引起的變形稱為剪應變（Shearing strain）或角變形 γ 。在彈性變形範圍內剪應力與剪應變成正比，剪應力之虎克定律為

$$\tau = \gamma G \quad (24)$$

E 、 G 、 μ 三個彈性常數之數學關係為

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \quad (25)$$

因為延性材料的破壞是由剪力作用所引起，所以一般設計者廣用材料破壞的“最大剪力理論”（Maximum shear theory of failure），作為設計強度之依據。軸向負荷的最大剪應力 τ_{max} 為軸向拉伸應力 σ 的50%，定義 τ_{yp} 為材料的剪降伏應力，可得


$$\tau_{max} = \frac{\sigma}{2} \quad \text{或} \quad \tau_{yp} = \frac{\sigma_{yp}}{2} \quad (26)$$

方程式（6）所描述的安全係數 SF 若以剪應力作用模式則可改寫為

$$SF = \frac{\tau_{yp}}{\tau_{max}} \quad (27)$$

將方程式（27）代入（26）可得

$$SF = \frac{0.5\sigma_{yp}}{\tau_{max}} \quad (28)$$

方程式（28）適用於受軸向負荷的延性材料，而剪力的破壞是沿著 45° 的方向發生。當材料承受的剪應力接近其降伏強度的一半時，則該材料可能被剪斷，所以剪應力是所有作用力中必須被優先考慮的破壞力。

3.1.5 應力集中

我們都知道機件表面的微細缺陷以及機件形狀的突然改變會對機件

的疲勞強度產生不良的影響。雖然有關螺紋的疲勞問題並非本研究的範圍，但是對螺紋而言，因為螺牙及螺牙根部的形狀容易引起應力集中。所以使用上必須遵照建議的鎖緊扭力及作業標準，不可超過螺絲本身的強度，否則這些應力集中的部位會先被破壞。在各種螺紋的標準規範中，對螺紋可能造成應力集中的部位，都有一些較詳細的規定，以避免應力集中產生，對螺紋造成破壞。

因為應力集中效應，將使得機件承受的應力變的更高，假設應力集中係數為 K_f ，則材料的最大拉伸應力 σ_{max} 與最大剪應力 τ_{max} 可以表示為

$$\sigma_{max} = K_f \sigma \quad \text{或} \quad \tau_{max} = K_f \tau \quad (29)$$

對於螺紋而言，因為應力集中造成的破壞通常有兩種模式，一種是從螺牙根部螺桿整根拉長斷裂；另一種是螺牙產生塑性變性或螺牙受剪力破壞而失去功能。假設螺桿與螺牙有相同的強度則該螺紋理論上會有最大的鎖緊強度，亦即：螺牙強度 = 螺桿強度，可得

$$\frac{\pi d}{\cos \theta} n_c \frac{p}{2} \tau_{yp} = K_f \sigma_{yp} \frac{\pi d^2}{4} \quad (30)$$

d ：螺紋公稱直徑 (Nominal diameter)

θ ：螺紋導程角 (Lead angle)

p ：螺距 (Pitch)

n_c ：有效作用螺牙數

τ_{yp} ：材料的剪降伏應力

K_f ：應力集中係數

σ_{yp} ：材料的降伏應力

因為螺紋屬於延性材料，所以適用“最大剪力理論”： $\tau_{yp} = \frac{\sigma_{yp}}{2}$ 代入方程式 (30)，可得

$$\frac{\pi d}{\cos \theta} n_c \frac{p}{2} \frac{\sigma_{yp}}{2} \tau_{yp} = K_f \sigma_{yp} \frac{\pi d^2}{4}$$

予以整理化簡後可得

$$n_c = K_f \frac{d \cos \theta}{p} \quad (31)$$

1. 當 $n_c > K_f \frac{d \cos \theta}{p}$ 時，螺牙強度較螺桿大，螺桿斷裂。
2. 當 $n_c < K_f \frac{d \cos \theta}{p}$ 時，螺牙強度較螺桿小，螺牙產生塑性變性或螺牙受剪力破壞。

由以上結果可知，若想要充分發揮螺紋的最大強度，必須同時考慮螺紋的有效作用牙數（使用螺帽時也必須注意螺帽厚度及其有效牙數）與螺紋應力集中係數所產生的影響。應力集中係數可用實驗方式測得或以有限元素分析法（Finite Element Analysis）模擬求得，或是查詢相關的書籍[14] [15]。此方程式將被用來計算孔凸緣的高度及攻牙螺紋數與螺桿的強度比較，並依需求鎖緊扭力判斷孔凸緣的攻牙強度是否足夠承受，其安全係數如何。

3.2 摩擦

在自然界中，兩互相接觸的表面會存有一種阻礙運動的作用，稱之為摩擦（Friction）。摩擦有兩大類型，分別稱為“滑動摩擦”及“滾動摩擦”，滾動摩擦的摩擦係數比滑動摩擦小，這表示使物體滾動的阻力較滑動阻力少。物體在靜止狀態到受力即將滑動之前，受到靜摩擦係數約制；等到物體開始產生運動時，開始受到動摩擦係數約制。實驗顯示，滑動前的最大靜摩擦係數大於運動狀態中的動摩擦係數，這表示在物體開始滑動前承受最大的阻力。通常在大尺寸時，物體受慣性影響較大，在微尺寸時則因為物體重量減輕，所以慣性力影響減少，而彈性力與摩擦力變的重要[17]。

摩擦作用是接觸物體之間不可避免的物理現象，在機械應用上，依使用的需求來想辦法設計出合適的摩擦值是絕對必要的。通常作功機械為了避免機械能因為摩擦造成損失或高速運動的機件為了避免摩擦溫度升高造成機件磨耗等原因，都需要盡量降低摩擦係數，所以在此情況下盡量以滾動摩擦代替滑動摩擦或者選用低摩擦係數的材料如鐵氟龍

(PTFE) 等，在許多應用上則以添加潤滑劑以便在接觸面中間形成保護作用的潤滑膜來降低摩擦係數並減少溫度上升。高摩擦並非總是有害，許多情況必須使用高摩擦係數。如：傳動的煞車裝置、車輛輪胎、各種防滑機件或裝置、螺絲與螺帽的鎖緊等。無論如何，我們總是希望可以控制摩擦並利用它。

摩擦對螺紋影響重大。不論是螺紋滾軋或打頭等生產過程必須有足夠的摩擦係數才能正確成形，在螺紋的使用上也必須依賴摩擦作用。摩擦同時帶來正反兩面的影響。一方面螺紋因有足夠的摩擦才得以鎖緊機件，防止鬆落，發揮其功能；另一方面螺紋因為摩擦導致磨耗使機件壽命減少，摩擦引起溫升或因摩擦係數的不確定性及變化大，導致螺紋鎖緊扭力的變異性增加，因而無法得到正確的鎖緊力。以下將針對摩擦與本研究相關的部分做說明。

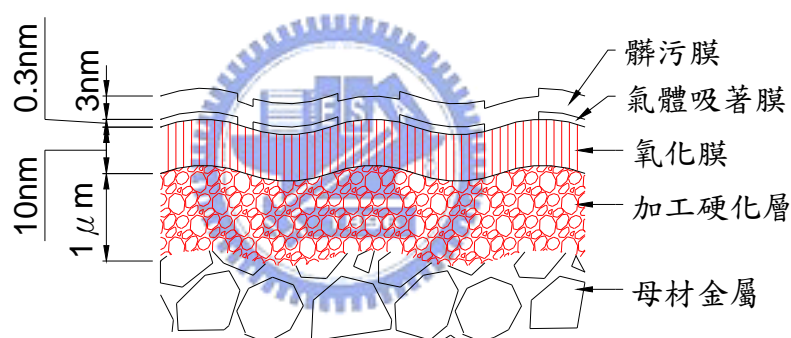


圖 18 固體的表面構造圖 (Rabinowicz, E.)

3.2.1 固體的表面結構

如圖 18 為固體的表面構造概念圖 (Rabinowicz, E.) [16]，由圖可知，固體的表面具有複雜的結構。說明如下[13]：

1. 表面必有微視性凹凸，並非如巨視形狀般光滑平整。
2. 依表面的加工方法，表面正下方為加工變質層，其性質異於固體內部。
3. 表面常被氧化膜、吸著膜、及其他污物所包覆。

表面依不同的加工方法而各有獨特的微視性形狀，因為摩擦作用導致局部的塑性變形，被磨耗後會產生順應性，表面形狀因而改變。因加

工或摩擦所導致的變質層有形成電池、晶粒細化、非晶質化、塑性流動、相變態、表面偏析，結果造成硬度上升或發生殘留應力[13]。

而表面氧化膜的形成與金屬材料特性有關，Green 曾經提出一種強調真實接觸面積的黏著模型[18]；Archard 也提出大部分的表面被吸附物所污染[19]。許多材料的新加工面因為與大氣中的氧分子及水氣發生化學作用，形成了金屬氧化膜。氧化的速度取決於氧向表層的擴散速度或金屬離子穿過氧化膜向外的擴散速度[23]。氧化膜對容易產生氧化作用的金屬的摩擦有極顯著的影響，對摩擦的影響與其強度有關，強度高可以防止接觸面的黏著發生，若無氧化膜，則許多金屬表面於滑動摩擦時容易被熔合在一起。

3.2.2 摩擦理論簡介

最早研究摩擦作用的是 Leonardo da Vinci，他指出兩個接觸表面的摩擦係數 μ 為定值，與接觸面積無關。而後 Amontons 提出摩擦力 F 與荷重 W 成正比，摩擦係數 μ 與接觸面積無關[20][21]， $F = \mu W$ 稱為摩擦定律，通稱為 Amontons 定律。三個摩擦定律敘述如下：[13]

1. 摩擦力與正向力（或負荷）成正比。
2. 摩擦力與接觸面積無關，亦即與物體大小無關。
3. 摩擦力與滑動速度無關。

前兩個定律適用於大部分的金屬，但若接觸為聚合體時則不適用。第三個摩擦定律較不完整，開始滑動的摩擦力通常大於保持滑動者，然而一但開始滑動，動摩擦與滑動速度無關。

目前所接受有關摩擦力的理論，是以 Bowden 與 Tabor 的著作為基礎[22]。他認為就算是光製的表面，以電子顯微鏡放大後，其表面仍是凹凸不平。所以將兩個乾燥潔淨的表面放在一起，只會有少數的凸出部分相接觸，真正的接觸面積與表面積相比，是非常小的，因此所加的荷重會使局部壓力大到足夠產生金屬塑性降伏，然後荷重會分布到較大的接觸面積上，當此塑性變形停止後，最後會達到平衡狀態，而在接觸面發生冷熔接（cold welding）現象，也稱為黏著理論，如圖 19 為黏著摩擦與磨耗的示意圖。

假如使一個表面在另一個表面上滑動，其相接處最後會因剪力而破壞，此破壞點鬆脫後的凸出點會與另一面的凸出點相碰撞，變成一個新的相接點。所以相接處的破壞與形成，是因為碰撞造成，剪力是靠近金屬表層內發生而不是在熔接處，對不同的材料表面，一般剪力發生在較軟的金屬上，而且產生摩擦粒子。硬的表面凸起會在較軟金屬上犁出一條溝，所以摩擦阻力是由剪力與犁力所合成。[13]

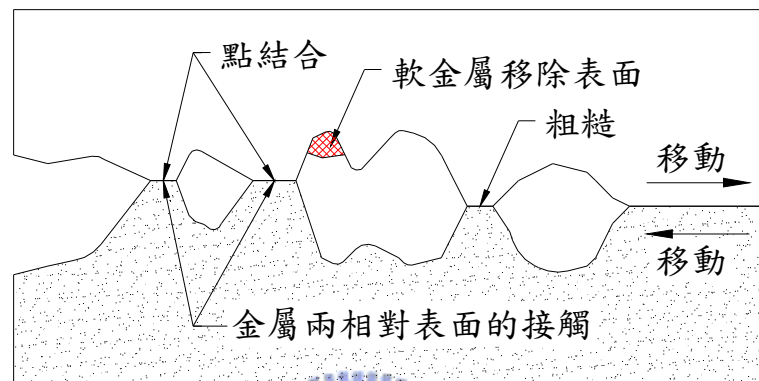


圖 19 黏著摩擦與磨耗的示意圖

另一個摩擦力的觀點由 Kragelskii 所提出，他認為決定摩擦力的主要因素是材料本身的彈性變形[24]，因為彈性遲滯之變形造成材料表面的疲勞，然後產生表面的磨耗。無論如何，至今尚未有一個概括性的公式，可以涵蓋所有的摩擦機制。在各種理論中，已經確認摩擦係數與下列因素相關：[13]

1. 在某些情況下速度會影響摩擦係數。
2. 接觸面的性質會影響摩擦係數。
3. 所產生熱的程度與性質。

傳統上的摩擦係數，並未考慮摩擦速度或表面溫度等因素，所以常常會有相當大的誤差，使用上必須注意。

3.2.3 摩擦與溫升

摩擦是一種阻力，克服阻力所需的功會轉換成熱能，所以接觸表面的溫度會因為熱能而升高，可能因而造成材料局部軟化或者熔化的現象。產生的熱一部分分布在相接觸的兩個材料上，一部分因環境散失熱

的正確分布係依照材料的熱傳性質及接觸面積而定 [13]。

雖然局部溫度很高，但是因為真實的接觸點很微小，所以對整體材料而言，正常狀況下溫升很小。由於接觸點很小，作用時間短暫，所以要以量測方式得到接觸點的真實溫度是非常困難的。

在一些極端情況下，摩擦會造成大幅度的溫度上升，此時就必須慎重考慮溫度的影響了。溫度升高會造成熱變形，當材料在拘束狀態下承受熱變形時，因為變形無法自由伸展所以會產生熱應力。假設材料為均質，所以 X、Y、Z 三個軸方向具有相同的熱變形量，其熱變形之方程式如下：

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = \alpha \Delta T \quad (32)$$

其中， ε = 單位長度的熱變形

α = 熱膨脹係數

ΔT = 溫度變化量 (°C)

熱應力之方程式如下：

$$\sigma = \varepsilon E = \alpha (\Delta T) E \quad (33)$$

其中， σ = 熱應力

E = 彈性係數或楊氏係數

材料在作塑性加工時，假設塑性變形的所需的功 W_d 全部變成熱，而且完全不往周圍傳導，則材料受摩擦的溫升 ΔT_d 為 [25]

$$\Delta T_d = \frac{W_d}{\rho c} = \frac{\int_0^\varepsilon \sigma(\varepsilon) d\varepsilon}{\rho c} = \frac{\bar{\sigma}_{yp} \cdot \varepsilon}{\rho c} \quad (34)$$

其中， ρ = 密度

c = 比熱

ε = 對數應變或真應變 = $\log_e \left(\frac{l}{l_0} \right)$ ， l_0 = 變形前尺寸， l = 變形後

尺寸

$\bar{\sigma}_{yp}$ = 平均降伏應力

將螺絲鎖緊時所作的功代入上述方程式，可以用來估算螺絲與機件之間接觸面的溫度變化。表 8 為常用金屬材料的硬度及熱性質[25]。

由表 8 可知，18-8 不銹鋼與一般鋼鐵相比，其密度及比熱都相當接近，理論上兩者有相近的溫升。但是 18-8 不銹鋼熱傳導率比一般鋼鐵低約 4.5 倍、熱膨脹係數約高 40%，所以當兩者承受相同的功時，因為不銹鋼熱傳導率差且熱膨脹係數高，所以容易造成熱集中於局部螺紋上，因此溫度變化對螺紋的使用影響會更大。

表 8 常用金屬材料的硬度及熱性質（室溫）

	硬度 Hv	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	比熱/ $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	熱傳導率/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	熱膨脹係數 $/\text{K}^{-1}$
純鋁	20	2700	0.90	230	24×10^{-6}
純銅	40	8900	0.38	390	17×10^{-6}
純鐵	100	7900	0.45	73	12×10^{-6}
18-8 不銹鋼	180	7800	0.45	16	17×10^{-6}

3.3 磨耗

伴隨摩擦而來的負面作用最主要的就是產生磨耗（Wear），磨耗也常常被稱為磨損，兩者代表的含意是相同的。磨耗現象對螺紋鎖緊機構非常重要，但一般使用卻很少留意磨耗對螺紋可能造成的傷害。如 3.1.5 節所述，應力集中造成螺紋損壞的型態有兩種，一種是螺桿斷裂（斷裂破壞）；另一種是螺牙變形（非斷裂破壞）。很明顯的，螺桿斷裂是因為機械作用所引起的；而螺牙變形發生的因素比較複雜，可能原因有：機械作用、溫度作用或腐蝕作用等。機械作用會導致機件產生撓曲、翹曲、壓縮、扭轉、拉伸、剪切、膠執、磨耗、疲勞的現象。溫度作用則引起材料強度變化（強度降低）、熱應力及熱應變、材料畸變及潛變作用。腐蝕作用對一般不銹鋼螺絲幾乎無影響。

機件的設計不只需要考慮強度，為了確保機件長時間操作的可靠性、穩定性，於設計階段就須將機件所需的剛性、耐磨性及耐候性等各種使用條件一併考量，不能偏廢。磨耗長久以來被認為是對機件最重要

且通常是有害的過程，然而有關磨耗的科學研究卻是近期才開始，磨潤學的研究歷史沿革為摩擦、潤滑、磨耗，事實上大部分的磨耗研究都是在最近 50 年內[13]。

磨耗可視為施加負荷在表面產生相對運動後，造成物體操作表面有更大的質點流失[13]。磨耗與材料硬度、承受負荷及運動距離等因素有關。所以若螺紋於極端的鎖緊作用條件下，螺紋有可能會產生很大的磨耗，甚至失去功能，所以必須對摩擦與磨耗的相關機制以及各種磨耗的發生原因、影響程度，有所了解。

3.3.1 磨耗的種類

磨耗的主要種類有[11][26]：黏著磨耗（adhesive wear）、磨損磨耗（abrasive wear）、腐蝕磨耗（corrosive wear）、化學磨耗、疲勞等，疲勞作用有時並不被列入磨耗的範疇。其中造成機器磨損之最主要原因為磨損磨耗，然而各種類型的磨耗經常一起發生，且其中一項將促使另一項進行，最終變成很難予以明確區分其產生起始磨耗的真正原因。以下將擇要說明黏著磨耗與磨損磨耗。

3.3.2 黏著磨耗

黏著磨耗是一般最常見的磨耗型態，Kohno 和 Hyodo 曾經利用點與面的接觸量測不同材料表面能的黏著力[27]。對於黏著磨耗的產生機制主要有兩種不同的解釋。

1. 黏著磨耗是因為微小接觸點的熔接作用而引起的金屬轉移。

以微觀的角度來看，滑動的金屬表面並不平滑，因為金屬表面的微小凹凸不平，使得滑動時產生的接觸壓力及摩擦熱能會集中在接觸的一小塊局部區域，造成此局部區域的壓力及溫度有時可能高達到焊接溫度[11]。當接觸點到達熔點的溫度時，若金屬滑動則這些接觸點會因為剪切作用而受到破壞。在原始接觸點被破壞後，新的微細的接觸點會再度產生，基本上此作用類似於電焊現象，所以若金屬容易被焊接則代表對於黏著磨耗也比較容易發生。而被破壞的金屬顆粒會附著在材料表面跟著繼續運動，造成互相摩擦的情況愈來愈

愈嚴重。

2. 黏著磨耗是金屬表面薄層因為疲勞而引起的金屬轉移。

鋼軸在青銅軸承上旋轉時，常發現鋼軸上有青銅薄膜的痕跡，顯示即使在潤滑情況下，滑動接觸面仍會產生金屬薄膜的轉移現象 [20]。依照 Kragelskii 的研究，青銅薄膜的金屬轉移會產生保護作用，大幅度減少機件磨耗。此種現象是因為接觸面的金屬粒子會因為疲勞作用以至於脫落所以從表面被移走，然後緊附著在另一個表面上。此種解釋與黏著磨耗為微小接觸點的熔接作用而引起的金屬轉移並不相同。

3. 總結而言，黏著磨耗的金屬轉移機制，可能是以上兩種理論的結合，當較軟的金屬轉移層在另一個較硬的表面形成時，則表面的熔接就不會再產生了。

摩擦速度是金屬轉移作用最具影響力的因素。依照 Bowden 與 Tabor [22] 的實驗發現，金屬在金鋼石上滑動，“摩擦與磨耗完全取決於速度”。在高速度下“金屬表面變軟、溶解、並附著在金鋼石上，附著的金屬薄膜保護金鋼石，使金鋼石本身只受到很少甚至不受磨耗。在較低速度下，金鋼石表面產生很顯著的拋光或磨耗，磨耗碎屑的發生，主要由於非晶質碳”。

在錘擊或用螺絲起子轉動螺絲後也會有金屬轉移發生。此現象說明機件的性質與組成，除了與原來的材料性質有關之外，也與加工方式及製造刀具有關。不同的加工方式或者刀具不同，除了影響機件的表面粗糙度及加工精度之外，事實上也影響了機件的表面性質，此表面性質即所謂的加工變質層。加工變質層形成的因素非常複雜，對一般屬於巨觀結構或精密度不需很高的機件，加工變質層常被刻意忽略，但對於微小結構或高精密度的機件（如：奈米級加工），加工變質層就會變的很重要而且影響甚大。

3.3.3 黏著磨耗產生的磨燒現象

當摩擦的接觸面因為溫度、壓力或摩擦係數突然間大幅升高，就會發生較大面積的熔著作用，這種現象稱為磨燒或膠(熔)執(lubrication)

[25]。磨燒所產生的表面粗化現象稱為刮痕 (scoring)。因為金屬的表面能量高，無表面皮膜而直接接觸時會發生強力黏著，使得摩擦係數增高。為了達到摩擦面在安定狀態下運轉的目的，須在摩擦面間形成充分的潤滑，當失去潤滑膜之後，機件容易遷移到高摩擦係數的狀態，然後發生磨燒。

影響磨燒的因素包括：表面太粗糙、接觸面不平均、負荷增加、沒有適當的潤滑等，這些原因會使得接觸面的溫度上升、摩擦係數增加，最後磨燒發生。

因為黏著磨耗是焊接作用，所以性質相近的金屬受高壓高速互相摩擦時，最容易造成表面的熔接作用[13]。這是因為性質相近的金屬熔點也相近，熔接作用產生後其附著力也會比較大，所以不容易脫落，甚至接觸面的金屬會因此而變為類似的金屬。

有時候螺紋在鎖緊過程中會發生“咬死”這種現象，發生時處理起來往往很麻煩。尤其對使用螺絲數量多的機件，發生的比率相對更高，因為數十支螺紋的其中一支發生咬死，或螺牙損壞，以至於必須整個機件更換，造成很大的損失。“咬死”這種現象是否與黏著磨耗的金屬轉移現象有關或更擴大範圍為磨燒作用有關？這個問題也是本論文的一個必須了解的重點。

3.3.4 磨損磨耗

因為金屬表面的微小凹凸不平，使得滑動時凸出的接觸點會產生類似剪切作用，將凸出的顆粒剪斷，變成微小的磨耗細屑，這種的磨耗形式稱為磨損磨耗。這種磨耗形式常發生於夾緊配件或螺栓配件上。磨損磨耗可能以黏著磨耗開始產生，若磨耗細屑清除速度不夠快，就開始產生磨損磨耗，當磨耗細屑開始氧化，磨損磨耗會變得更嚴重[16]，對於亦受氧化的材料必須特別注意。

一般將磨損磨耗的發生過程分成三個階段[26]，說明如下：

1. 磨合階段 (Running-in)

對於剛開始使用的新機件，因為接觸表面為加工面，所以加工精度主宰了此階段的磨損磨耗情況。因為一般的機械加工精度還是

無法達到理想的表面，為了改善此階段的磨耗，通常新的機件會使用較佳的潤滑、降低作用負荷、降低運動速度等方式來減少磨耗的劇烈發生。磨耗細屑藉由潤滑液作用予以清潔，以減少黏著磨耗的發生。

2. 線性穩定磨損階段 (Linear stability wear)

經過一段時間的磨合作用後，基本上機件原來加工所產生的凹凸不平接觸點已經大幅減少，若潤滑、負荷、速度（頻率）等作業條件沒有大幅度的改變，則磨損狀態為線性關係。通常線性磨損會持續一段相當長的時間，這部分就是所謂的機械正常使用受壽命 (Normal working life) 階段。

3. 磨損破壞階段

雖然線性磨損磨耗的速度穩定且緩慢，但磨耗始終不停的進行，最後機件還是會因為磨耗過多而損壞或者失去其原本設計的功能性，此時機件必須予以更新。

對於螺紋鎖緊機構而言，最大的磨耗發生在螺紋互相嚙合時，此階段有一點類似外螺紋與內螺紋之間的磨合期。就個人觀點，個人認為這個階段還可以細分為三個不同的作用時期，敘述如下：

第一個時期：螺紋對正作業

因為外螺紋與內螺紋必須互相對正才可以正確鎖入，所以在鎖入之前的螺紋滑動，會造成磨耗。對螺紋而言，對正使螺牙正確鎖入是非常重要的步驟，許多螺紋從一開始便發生咬死現象，多半是因為螺牙未正確對正即強行鎖入所造成。這種磨耗在手工鎖螺紋時影響很少，但是當使用如氣動、電動等自動鎖螺絲工具時影響很大。

第二個時期：螺紋正確鎖入到承受鎖緊力前

這個階段螺紋主要的磨耗來自於對螺紋加壓的壓力大小、鎖緊速度、施力是否鎖入方向相垂直、螺紋鎖入的長度、螺紋材料（摩擦係數）、螺紋表面加工精度、表面處理等因素有關。這些影響的因素與本節所述磨耗產生的因素是一致的。

第三個時期：螺紋承受鎖緊力開始到正確鎖緊為止

這個時期螺紋開始承受鎖緊力，因為鎖緊壓力持續增加，所以磨耗

情況會愈來愈嚴重，在第二個時期影響磨耗的因素的作用會隨著鎖緊力的增加而惡化，如果作業不當就容易導致螺紋或互相配合的機件產生破壞的現象。

總之，磨損磨耗之所以成為機件主要的損壞原因在於不只是滑動會造成磨損磨耗，對於作動頻率更高的機械振動，也會造成嚴重的磨損磨耗。磨損磨耗與機件的硬度及表面處理有關，硬度（如：螺紋滾軋加工產生的加工硬化）愈高則耐磨耗性愈好，若在機件表面施以潤滑膜或皮膜處理（如：鋼鐵表面的磷酸鹽皮膜處理），會對磨耗有重大的改善。如表 6 所示，除不銹鋼螺絲之外，對於大部分的鋼製品螺絲而言，都會施以表面處理，這些表面處理對於磨損磨耗會有一定程度的改善。而磨損磨耗對於不銹鋼螺紋機件的影響如何？對施以表面處理的鋼製品螺絲改善效果又如何？這些問題對選用螺絲而言是必須要知道的技術細節，需要進一步實驗了解。

3.3.5 改善磨耗的方法

改善磨耗可以從兩方面著手，第一種就是提高機件的表面硬度，硬度愈高則愈耐磨耗。許多增加表面硬度的處理都可以用來抵抗磨耗，如：表面滲碳處理、表面氮化處理、表面高週波感應硬化、表層電鍍硬質材料、加工應化、珠擊法等。

另一種方式則是設法降低接觸面的摩擦係數，如：使用適當的潤滑劑以便形成良好的保護膜、使用低摩擦係數的材料、重要的接觸面避免使用性質相近的材料等。

此外對於無法避免的磨耗，必須在設計時候即需考慮磨耗機件需易於更換，或者磨耗量可以自動進行補償[26]，對於易受環境灰塵侵入引起磨耗的機件則要給予適當的防塵設計。

3.3.6 磨耗力學

1. 磨耗率和限制壓力[13]

磨耗率被定義為：

$$W_r = \frac{\text{移除材料的體積}}{\text{移動的距離}} \quad (34)$$

磨耗率 W_r 的 SI 單位平方公尺。在低限制應力下可寫成

$$W_r = K_A A P_L \quad (35)$$

其中 K_A = Archard 磨耗常數， $(\text{Pa})^{-1}$

A = 接觸面積， m^2

P_L = 限制應力（接觸面的作用力除以接觸面積），Pa

由方程式可知，移動的距離、作用力均與磨耗量成正比，而磨耗常數 K_A 則取決於材料的本身特性。

2. 黏著磨耗力學[26]

接觸點因為熔合而發生黏著磨耗，然後因為相對運動破壞了熔合點，於是產生磨耗粒子。如上節，假設 V 為移除材料的體積、 L 為移動的距離，則 V/L 為單位滑動距離的體積磨耗率。假設接觸表面承受的總荷重為 W ，材料的降伏應力為 σ_{yp} ， k 為磨耗係數，則黏著磨耗的基本公式為

$$W_r = \frac{V}{L} = k \frac{W}{3\sigma_{yp}} \quad (36)$$

3.4 潤滑

潤滑的主要功能在於降低摩擦作用及摩擦導致的溫升、磨耗等，潤滑油性質中，最重要的是黏度，黏度太低則無法形成足夠的油膜厚度，黏度太高則會增加摩擦損失。通常潤滑油的黏度隨著溫度及壓力的變化而有顯著的改變。

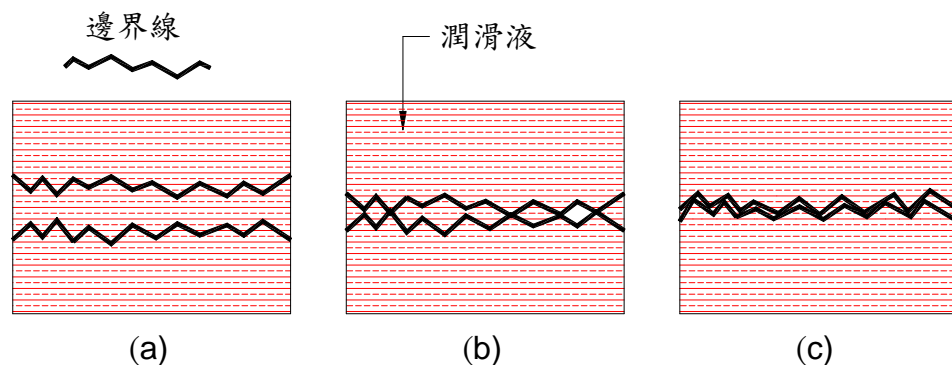


圖 20 兩接觸面之間的潤滑油薄膜厚度與潤滑狀態

如圖 20 所示，由兩接觸面之間的潤滑油薄膜厚度可將潤滑狀態分成三種：分別為 (a) 流體薄膜潤滑＝接觸面由厚的潤滑薄膜所分開。(b) 部分潤滑＝厚的潤滑薄膜與邊界潤滑同時影響。(c) 邊界潤滑＝由邊界薄膜所決定 [13]。對螺紋的形狀而言，其潤滑型態屬於邊界潤滑。在邊界潤滑中，固體不被潤滑劑分開，因此流體薄膜的影響很小可以忽略，且有許多的固體相接觸。

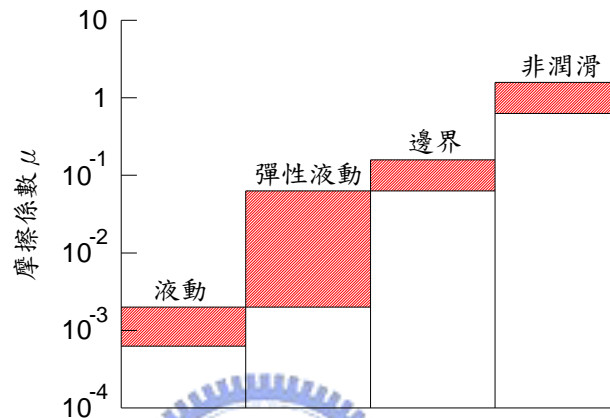


圖 21 不同潤滑狀況下的摩擦係數比較

圖 21 [28] 為不同潤滑狀況下的摩擦係數比較，由圖可知非潤滑之摩擦係數遠大於邊界潤滑，可見潤滑的重要性與降低摩擦係數的功能。圖 22 [28] 為不同潤滑區的磨損率比較，操作負荷及潤滑種類決定了磨損率的大小。

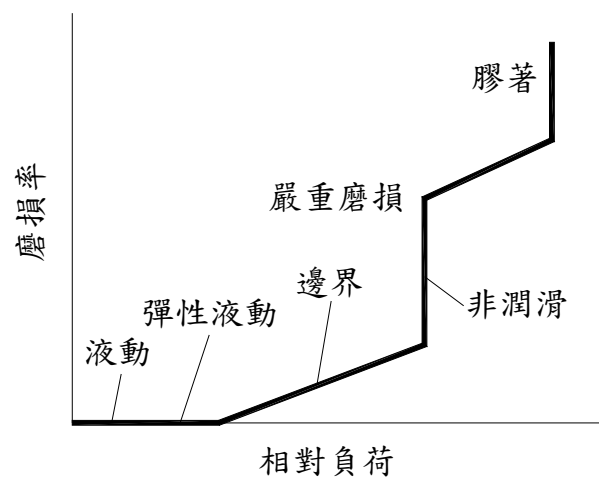


圖 22 不同潤滑區的磨損率比較

在螺紋鎖緊過程中，除特殊使用情況之外，通常不會加任何潤滑劑。

但是，一些自攻螺紋或是切削螺紋，因為作用負荷較大，所以加入潤滑劑將有助於降低鎖緊扭力的需求，但潤滑劑也可能降低螺絲與機件表面之間的摩擦係數，使螺紋較易鬆脫。

3.5 螺紋鎖緊機制

如第一章所述，螺紋的主要功能為結合機件，螺紋的鎖緊力愈大則鎖緊強度愈高，機件也不易鬆落。必須依照使用的需求來選擇合適的螺紋規格才能確保結合強度。理想的螺栓長度為螺帽上緊後，只外露一到二個螺牙即可。通常沖壓件的凸緣孔攻牙後都會有殘留的毛邊，此毛邊於鎖緊過程中有可能被撕斷不造成影響，也有可能被捲入螺牙內造成黏著現象，因而妨礙正常的鎖緊施力，這是本研究需特別注意之處。

關於螺紋鎖緊方面的研究，池田等人[29]曾經做過鎖緊扭力與軸向鎖緊力的試驗，在相同的鎖緊扭力下，鎖緊速度愈快則軸向鎖緊力會愈大，當鎖緊速度低於 2rpm 以下時，由於動摩擦變成近似靜摩擦，使得摩擦係數明顯增高。Nakashima 和 Takafuji [30]曾經探討在一定軸向力條件下，螺紋面的磨耗行為，在潤滑狀態下螺紋的磨耗量與螺紋的面壓成一比例關係，若螺紋接觸面愈均勻則其磨潤特性會愈好。

國內研究方面有邱源成[31]對螺桿及螺母鬆緊過程之磨潤行為進行研究，發現軸向鎖緊力隨著鎖緊、放鬆的次數增加而逐漸減少，摩擦係數逐漸上升，面壓加大則螺紋面的摩擦係數也會增加。另一個為林海平[32]針對螺栓塑性鎖付的特性進行研究。Stout 等人曾經研究不銹鋼圓棒在單軸拉伸與壓縮的應變速率敏感性、應變硬化及降伏強度的性質[33]。

對於螺紋而言，大部分的研究重點在於軸向鎖緊力、磨耗、疲勞、破壞、塑性變形等方面，這些都是螺紋應用上必須要深入了解的變數。螺紋的鎖緊機制很複雜，牽涉到許多學科的領域，還有很多值得進一步探討的地方。

3.5.1 螺紋鎖緊扭矩與軸向鎖緊力[1]

如圖 23 (a) 所示，假設螺紋的螺紋角 $=2\alpha$ ，導程角為 λ ，因為導程角很小予以忽略不計，只考慮螺紋角效應下，螺紋鎖緊扭矩 T 為

$$T = \frac{F d_m}{2} \left(\frac{l + \pi \mu d_m \sec \alpha}{\pi d_m - \mu l \sec \alpha} \right) \quad (37)$$

其中 F = 軸向力

d_m = 螺紋節圓直徑

l = 螺紋導程

μ = 接觸面的摩擦係數

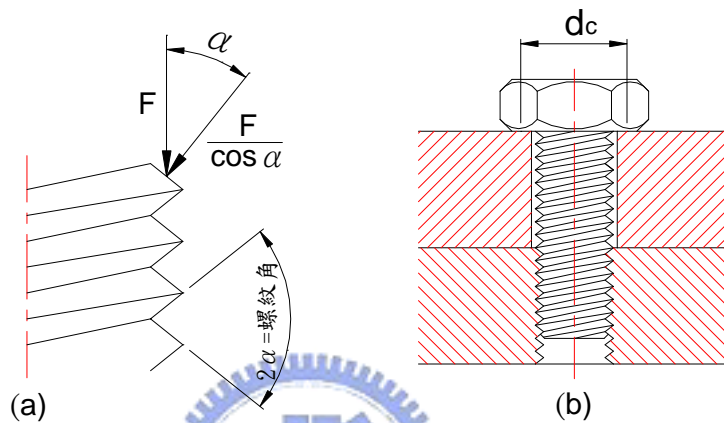


圖 23 (a) 法線螺紋力因 α 而增大 (b) 螺絲頭接觸面之平均直徑 d_c

如圖 23 (b) 所示，當螺紋開始接觸機件表面時，螺絲頭與機件接觸面會存在一摩擦，假設螺絲頭與接觸面的平均直徑為 d_c ，接觸面摩擦係數為 μ_c ，則接觸面作用之扭矩為

$$T_c = \frac{F \mu_c d_c}{2} \quad (38)$$

因為螺紋實際鎖緊扭矩等於方程式 (37) 與方程式 (38) 相加，所以可得

$$T = \frac{F_i d_m}{2} \left(\frac{l + \pi \mu d_m \sec \alpha}{\pi d_m - \mu l \sec \alpha} \right) + \frac{F_i \mu_c d_c}{2} \quad (39)$$

其中 F_i = 螺紋預負載 (preload)，或稱為初期鎖緊力

因為 $\tan \lambda = \frac{l}{\pi d_m}$ ，且六角螺絲頭的接觸面外徑等於公稱直徑的 1.5

倍，所以螺絲頭接觸面平均直徑 $d_c = \frac{(d+1.5d)}{2} = 1.25d$ ，代入方程式 (39)，可得

$$T = \left(\left(\frac{d_m}{2d} \right) \left(\frac{\tan \lambda + \mu \sec \alpha}{1 - \mu \tan \lambda \sec \alpha} \right) + 0.625\mu_c \right) F_i d \quad (40)$$

定義扭矩係數 (torque coefficient) K 為括弧內之項，則

$$K = \left(\left(\frac{d_m}{2d} \right) \left(\frac{\tan \lambda + \mu \sec \alpha}{1 - \mu \tan \lambda \sec \alpha} \right) + 0.625\mu_c \right) \quad (41)$$

所以方程式 (40) 可以改寫成

$$T = KF_i d \quad (42)$$

方程式 (42) 用以計算施加螺紋預負載 (或初期鎖緊力) 所需的扭矩。在扭矩係數方程式 (41) 中除了摩擦係數之外，其餘均為固定之常數，所以摩擦係數決定扭矩係數，摩擦係數愈小則扭矩係數愈小，代表可以用較小的鎖緊扭力，得到較大的螺紋鎖緊力 [9]。一般摩擦係數 μ 與 μ_c 大約為 0.15，此時扭矩係數的標準值約為 0.2。布雷克與柯茲 [34] 曾經發表許多螺栓扭矩的試驗結果，在潤滑及無潤滑情況下，所得到的預負載的平均值幾乎相同，計算其扭矩係數約為 0.208。一般若未特別指明，扭矩係數均使用 0.2 為標準。

3.5.2 螺紋鎖緊作業

如何得到一個正確的螺紋鎖緊力是工程師所關心的。通常螺紋在塑性範圍有最大的鎖緊力，而對一般鎖緊後即無外力作用的情況下，作用於螺栓的荷重只有初期鎖緊力 (或稱為預負載) 時，其初期鎖緊力的大小可以參考表 9，在表中沒有的強度區分，鋼螺栓的初期鎖緊力則以下式的值作為標準 [9]。

$$F_i = A_t (0.7 \sigma_{yp}) \quad (43)$$

其中 A_t = 拉應力面積，請參考表 1

σ_{yp} = 螺紋的降伏應力

在螺紋鎖緊過程中可用下述方法來確保鎖緊力是否足夠：

1. 扭矩法：用扭力扳手的扭矩讀數配合方程式 (42)，可以計算出螺紋的軸向鎖緊力。因為使用固定的扭矩係數所以會產生一些誤差。但是因為扭力扳手取得容易加上作業方便，目前螺紋大部分都用扭矩法鎖緊。[9]
2. 變形法：螺紋受到鎖緊力的作用，會發生變形，測量受力前後的長度變形量，在代入方程式 (10) 中，可以求出鎖緊力的正確值。[1] 正常使用情況為已知初期鎖緊力的規格（如表 9 之數值），則只要計算出在此初期鎖緊力下的長度變形量，在實際鎖緊作業中，以游標尺或分釐卡等測量其變形量，兩者若一致則代表所受的鎖緊力是相同的。通常變形法的準確度較扭矩法高，但是對未貫穿的螺紋情況無法進行量測，而且作業上較不方便，只用於重要且需要高可靠度的使用場合。

總之，雖然螺紋的使用很普遍，但對許多的應用環境及條件，仍必須特別注意，尤其是高負荷、高速度、高震動、高溫差及需考慮安全性的結構等，正確的螺紋選用及鎖緊作業更顯的重要。

表 9 鋼製螺栓的初期鎖緊力[9]

公稱 直徑	螺紋的初期鎖緊力 F_i (kgf)			
	強度區分，可參考表 (3)			
	6.9	8.8	10.9	12.9
M5	535	635	895	1070
M6	755	900	1260	1510
M8	1390	1650	2320	2790
M10	2210	2620	3690	4430

第四章 實驗方法與步驟

本論文主要探討不銹鋼螺絲的鎖緊特性，觀察巨觀下的各種實驗結果，並非屬於高精度的範疇，所以對實驗環境並未特別控制，所使用的主要設備簡介如後。

4.1 實驗設備與裝置

4.1.1 實驗使用設備

實驗所使用的主要設備如下：

1. 扭矩（力）扳手（Torque Wrench）：功用＝量測鎖緊扭矩。
製造商（廠牌）：日本 TOHNICHI，外觀照片如圖 24。
產品型號：120DB4-S，Dial Indicating Torque Wrench。
精度規格：誤差為讀數之 2%，最小指示刻度 2kgf-cm，最大使用範圍 120kgf-cm。



圖 24 120DB4-S 指示型扭矩扳手

2. 手提式 X 光螢光光譜儀（XRF）：功用＝材質確認。
製造商（廠牌）：NITON XLt 重金屬元素分析儀。
產品型號：XLt 797
外觀照片如圖 25



圖 25 NITON XLt 797 重金屬元素分析儀

3. 2D 光學投影機：功用＝放大檢查及尺寸、外形量測、照相。

製造商（廠牌）：美國 DELTRONIC，外觀照片如圖 26。

產品型號：DH214/MPC-5/E。

精度規格：可調整放大倍率及焦距，附照相功能。



圖 26 美國 DELTRONIC 2D 光學投影機

4. 游標高度規及花崗岩平台：功用＝高度量測及畫線，如圖 27。



圖 27 游標高度規（畫線用）及花崗岩平台

5. 液晶顯示式游標卡尺：功用＝一般尺寸量測。

製造商（廠牌）：日本 Misutoyo。

精度規格：最小指示數值 0.01mm，最大測量長度 150mm。

外觀照片如圖 28



圖 28 液晶顯示式游標卡尺

4.1.2 實驗使用裝置

如圖 29 為本實驗所使用的裝置，其功能為固定實驗對象，並承受螺紋鎖緊夾持力

製造商（廠牌）：自行製作。

規格：直徑 2 英吋（50.8mm）不銹鋼管。



圖 29 固定實驗對象的裝置

4.2 樣品檢查及規格確認

實驗前先進行所有樣品的規格確認，包括

尺寸確認：主要以游標尺量測。

螺紋牙形確認：以牙規（Pitch gauge）及 2D 光學投影機量測。

材質確認：以 XRF 確認。

如圖（30）（a）為 M6-60 不銹鋼螺絲材質成分與含量表，為了確定元素的正確性，可以比對元素的特性光譜；（b）針對 Cr 元素；（c）針對 Ni 元素的 X-ray 特性光譜（ $K\alpha$ 、 $K\beta$ ）。參考表 6，由 Cr 含量約 19.3% 及 Ni 含量約 7.5% 可判斷其材料為使用 Ni-Cr 系不銹鋼（SUS302）。

如圖（31）（a）為 M 形不銹鋼夾緊件材質成分與含量表；（b）針對 Cr 元素；（c）針對 Ni 元素的 X-ray 特性光譜（ $K\alpha$ 、 $K\beta$ ）。參考表 6，由 Cr 含量約 16.7% 及 Ni 含量約 0.2%，可判斷其材料為使用 Cr 系不銹鋼（SUS430）。

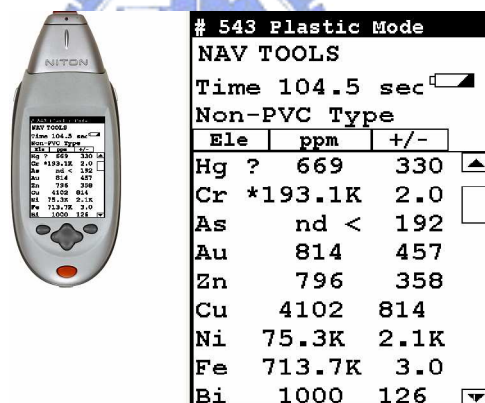


圖 30（a） M6-60 螺絲材質成分與含量表

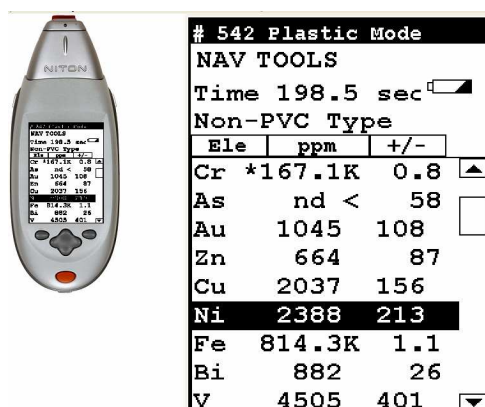
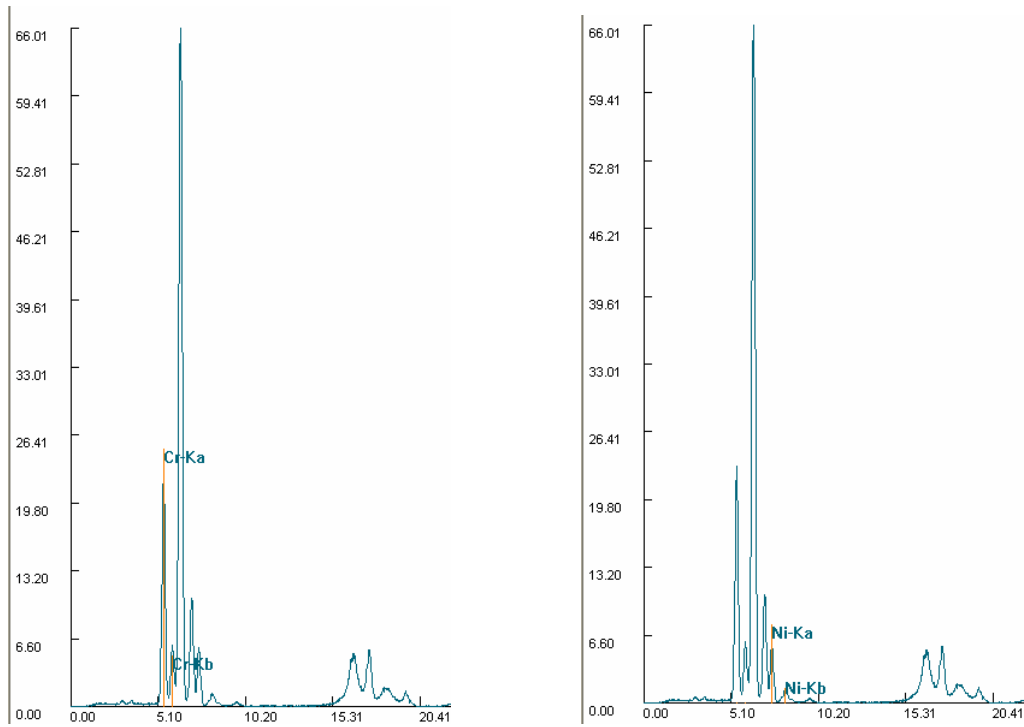
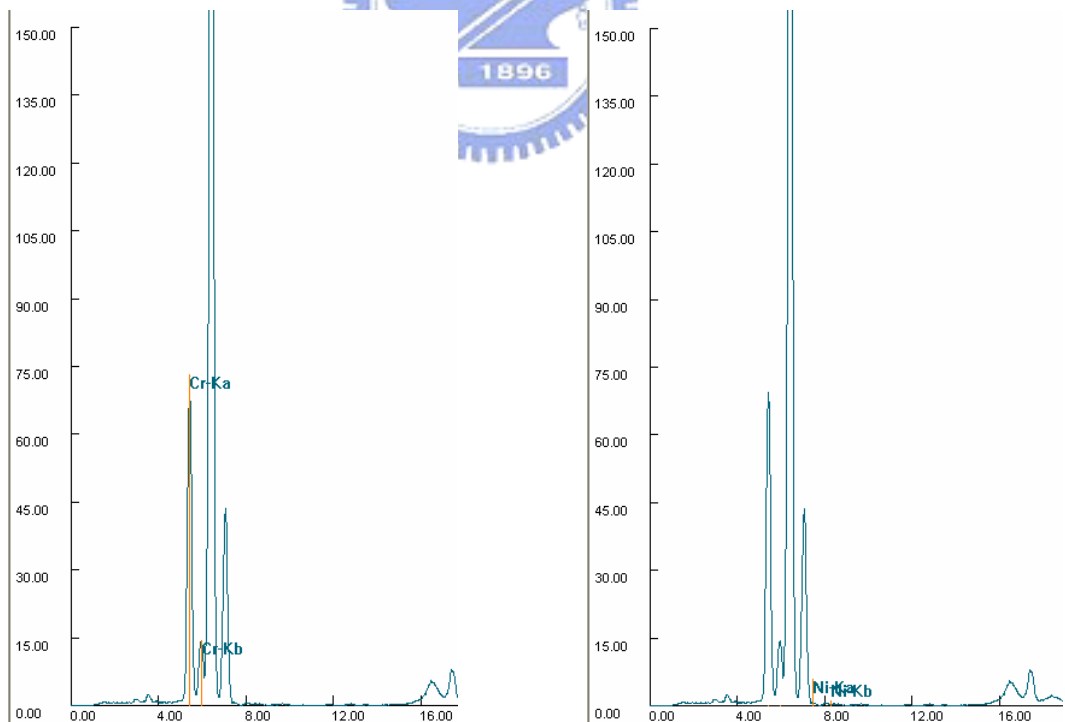


圖 31（a） M 形不銹鋼夾緊件材質成分與含量表



(左)圖 30 (b) 螺絲 Cr 元素的 X-ray 特性光譜 ($K\alpha$ 、 $K\beta$)

(右)圖 30 (c) 螺絲 Ni 元素的 X-ray 特性光譜 ($K\alpha$ 、 $K\beta$)

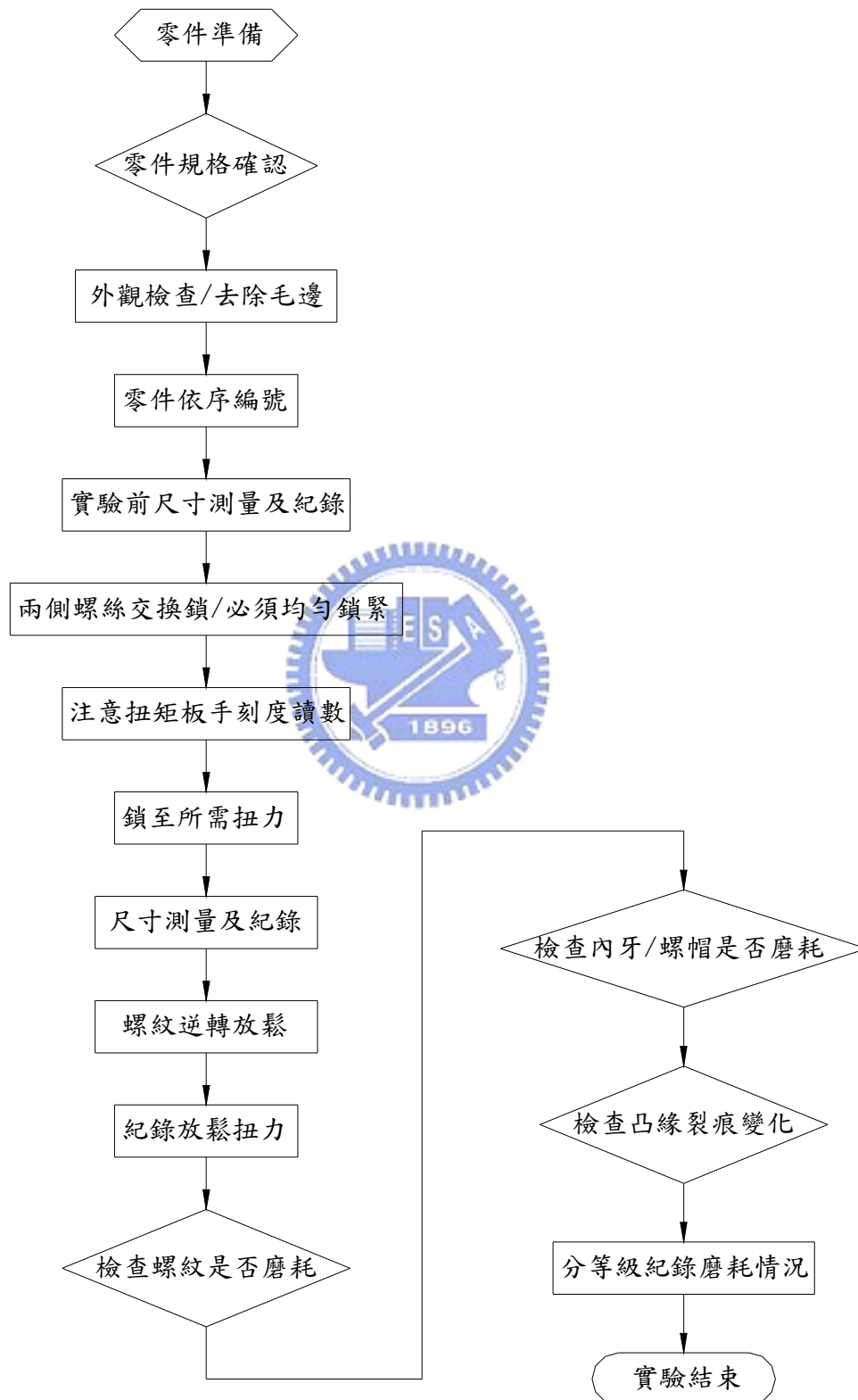


(左)圖 31 (b) 夾緊件 Cr 元素的 X-ray 特性光譜 ($K\alpha$ 、 $K\beta$)

(右)圖 31 (c) 夾緊件 Ni 元素的 X-ray 特性光譜 ($K\alpha$ 、 $K\beta$)

4.3 實驗步驟

實驗步驟的流程如下：



第五章 實驗結果與討論

本論文的實驗項目包括：螺紋受力的理論變形量與實驗變形量的比較、鎖緊力對夾緊件產生的彎曲作用、彎曲作用下的螺紋摩擦與磨耗特性、不同鎖緊扭矩的比較、螺帽厚度及嚙合牙數對螺絲的影響及潤滑對不銹鋼螺紋產生的作用等，所得的實驗結果及討論分別說明於下。

5.1 螺紋受力的理論變形量與實驗變形量的比較

5.1.1 實驗條件

基準鎖緊扭矩 = 100kgf-cm。

螺紋規格：M6-60，外六角螺紋，強度區分 A2-70，假設 SUS302

彈性係數 $E=190\text{GPa}$ ，如表 1 查得其應力面積 = 20.1mm^2 。

M 形不銹鋼夾緊件：假設 SUS430 彈性係數 $E=190\text{GPa}$ 。

假設扭矩係數 $K=0.2$ 。如圖 32 為實驗相關機件之架設方式

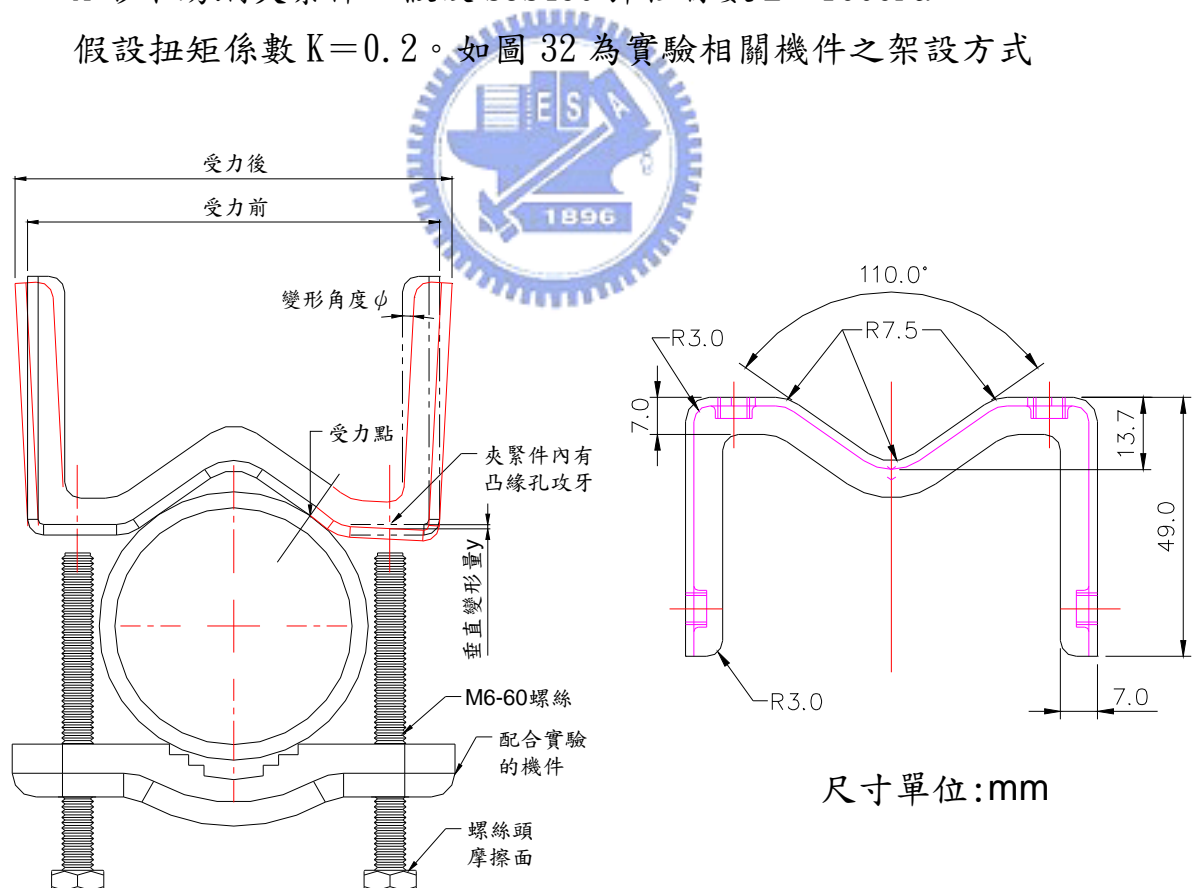


圖 32 實驗相關機件之架設

5.1.2 理論鎖緊力及其變形量之計算

由扭矩方程式 $T = KF_i d$ ，可得預負載（初期鎖緊力）為

$$F_i = 833 \text{kgf}$$

由應力－應變方程式 $\delta = \frac{pl}{AE}$ 。其中 $p = F_i$ 且當螺絲鎖緊扭力為

100kgf-cm 時，受力螺絲長度 l 約 50mm。代入可得受力變形量為

$$\delta = 0.106 \text{mm}$$

5.1.3 實驗變形量

如表 10 為實驗所得螺紋受力前後的長度變形量（以游標尺量測），圖 33 為實驗變形量與理論變形量比較圖，鎖緊扭矩 = 100kgf-cm。

表 10 實驗所得的不銹鋼螺紋長度變形量（單位:mm）

螺絲編號	實驗前長度	實驗後長度	變形量	理論計算值	誤差率
1	64.46	64.57	0.11	0.106	-3.8%
2	64.43	64.55	0.12	0.106	-13.2%
3	64.46	64.55	0.09	0.106	15.1%
4	64.46	64.58	0.12	0.106	-13.2%
5	64.2	64.32	0.12	0.106	-13.2%
6	64.4	64.5	0.1	0.106	5.7%
7	64.2	64.29	0.09	0.106	15.1%
8	64.39	64.48	0.09	0.106	15.1%
平均值	64.375	64.48	0.105	0.106	0.9%

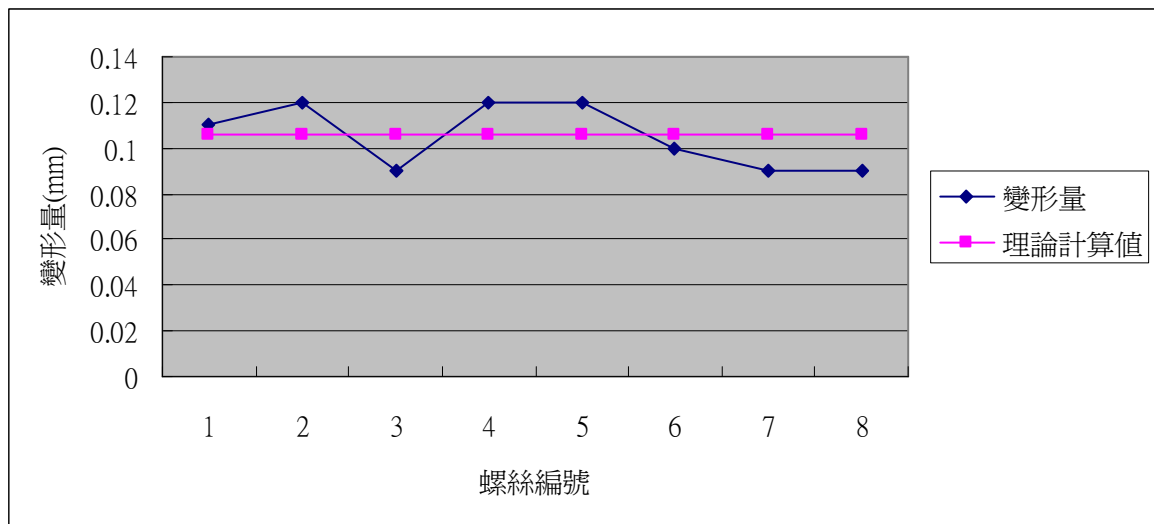


圖 33 不銹鋼螺紋實驗變形量與理論變形量比較圖

5.1.4 電鍍鋅螺紋受力的理論變形量與實驗變形量的比較

螺紋規格： M6-60，外六角螺紋，一般強度等級（5.8），假設電鍍鋅螺紋（碳鋼）之彈性係數 $E=207\text{GPa}$ ，其它實驗條件與 5.1.1 相同。

理論鎖緊力及其變形量之計算： 依照 5.1.1 的計算方式可得

$$F_i = 833\text{kgf} \quad ; \quad \delta = 0.097\text{mm}$$

表 11 為實驗的螺紋長度變形量，圖 34 為實驗與理論變形量比較圖。

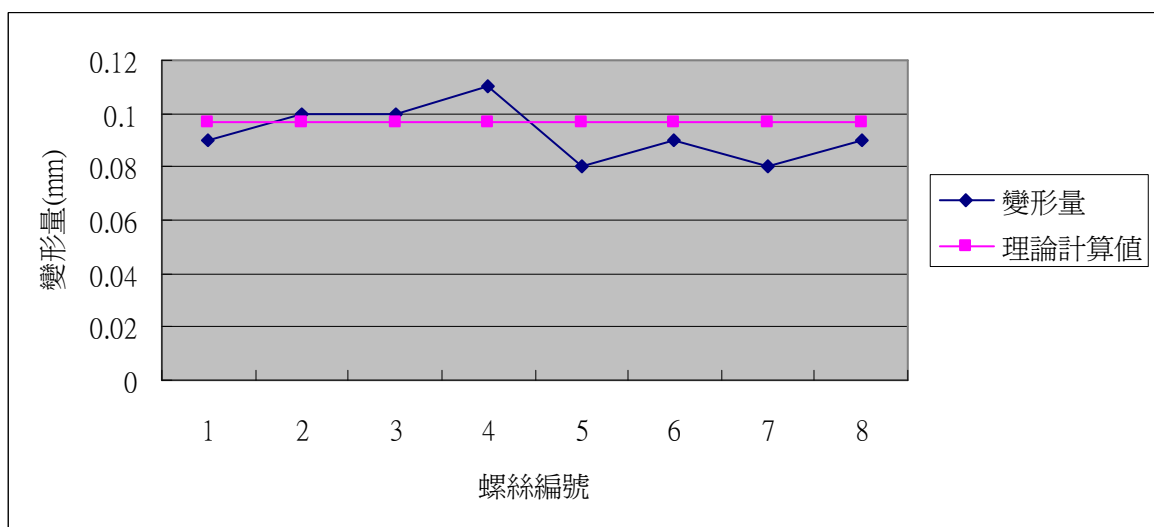


圖 34 電鍍鋅螺紋實驗與理論變形量比較圖

表 11 實驗所得的電鍍鋅螺紋長度變形量（單位:mm）

螺絲編號	實驗前長度	實驗後長度	變形量	理論計算值	誤差率
1	64.11	64.2	0.09	0.097	7.2%
2	64.18	64.28	0.1	0.097	-3.1%
3	64.11	64.21	0.1	0.097	-3.1%
4	64.16	64.27	0.11	0.097	-13.4%
5	64.06	64.14	0.08	0.097	17.5%
6	64.1	64.19	0.09	0.097	7.2%
7	64.16	64.24	0.08	0.097	17.5%
8	64.13	64.22	0.09	0.097	7.2%
平均值	64.126	64.219	0.0925	0.097	4.6%

5.1.5 理論變形量與實驗變形量的實驗結果討論

1. 因為扭矩扳手規格限制且對 M6 螺紋而言 100kgf-cm 的扭力值已經偏高。如表 3 與表 9 所示，此扭矩所提供的初期鎖緊力介於螺紋強度區分 6.9~8.8 之間，其抗拉強度與降伏強度值對實驗對象而言已屬上限規格。但是此扭矩對 M6 螺紋所造成的伸長量還是很小。
2. 因為變形量很小，所以量測誤差的影響變的非常敏感。在此情形下理論變形量與實際變形量的誤差可能有 20%，但是其平均誤差量很小，所以用扭矩扳手作為螺紋扭力管理的工具是可行的，但為考慮各種誤差，若將需求扭力提高約 5~10% 作為扭矩扳手的作業標準扭力，則會更佳。
3. 因為變形量很小，所以想要用螺紋的變形量來控制鎖緊力是非常困難的。尤其若扭力更低時，其變形量將非常小，使用一般的量測工具不易得到準確的數值，所以使用扭矩扳手將是比較符合作業需求的方式。
4. 不同的螺紋材料可以得到相同實驗結果，證明扭矩方程式及扭矩係數與使用的材料無關。

5.2 鎖緊力對 M 型不銹鋼夾緊件產生的彎曲作用

5.2.1 實驗條件

基準鎖緊扭矩 = 100kgf-cm。

螺紋規格：使用兩種不同材質的螺紋。

1. M6-60，外六角螺紋，強度區分 A2-70，假設 SUS302 彈性係數 $E = 190\text{GPa}$ ，如表 1 查得其應力面積 = 20.1 mm^2 。

2. M6-60，外六角螺紋，一般強度等級 (5.8)，假設電鍍鋅螺紋 (碳鋼) 之彈性係數 $E = 207\text{GPa}$ ，其它實驗條件與 5.1.1 相同。

M 形不銹鋼夾緊件：假設 SUS430 彈性係數 $E = 190\text{GPa}$ 。

如圖 32 為實驗相關機件之架設方式。

5.2.2 實驗結果

如表 12 為實驗的鎖緊力對 M 型不銹鋼夾緊件產生的彎曲作用，其結果為使夾緊件往外彎曲變形。圖 35 為變形量與軸向變形量比較圖。

表 12 鎖緊力對 M 型不銹鋼夾緊件產生的彎曲變形量

夾緊件編號	受力前寬度 mm	受力後寬度 mm	變形量 mm	變形角度 ϕ	軸向變形 y mm	
不銹鋼 螺絲	1	76.90	78.60	1.70	1.10°	0.23
	2	76.80	78.50	1.70	1.11°	0.23
	3	76.30	78.70	2.40	1.56°	0.32
	4	76.40	78.70	2.30	1.50°	0.31
電鍍鋅 螺絲	5	79.50	81.80	2.30	1.50°	0.31
	6	78.40	80.50	2.10	1.37°	0.28
	7	76.60	78.80	2.20	1.43°	0.30
	8	76.80	79.30	2.50	1.63°	0.34

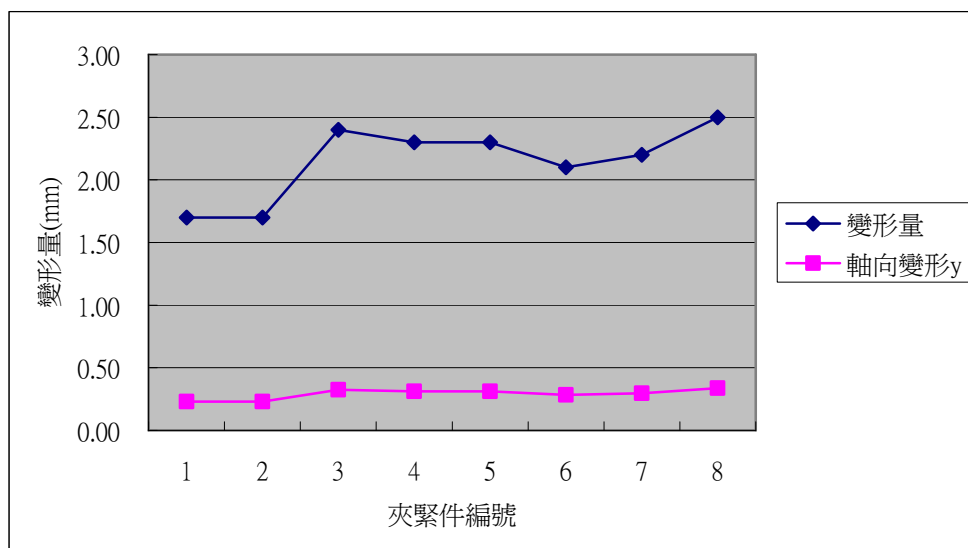


圖 35 受力寬度變形量與軸向變形 y 比較圖

因為 M 形夾緊件的形狀複雜，其面積慣性矩 I 不易計算，所以可以直接由受力前後的寬度變形量，用電腦繪圖軟體作圖或三角函數關係可以求出彎曲角度 ϕ 。由懸臂樑的方程式 $\phi = \frac{Pl^2}{2EI}$ 及 $y = \frac{Pl^3}{3EI}$ 之關係，可求得 $y = \frac{2l}{3} \phi$ ，其中 l 為受力點到螺紋的距離， y 為螺絲及 M 形夾緊件結合處的變形量。

5.2.3 鎖緊力對夾緊件產生的彎曲作用的量測與實驗結果討論

1. 在相同的扭矩及作業條件下，不銹鋼螺絲對 M 形夾緊件造成的變形量分佈範圍較大 (1.7~2.4mm)，電鍍鋅螺絲分佈比較集中 (2.1~2.5mm)，而且數值很接近。可見施加在不銹鋼螺絲上的扭矩，有一部分並未轉換為軸向鎖緊力，而是在作業過程之中被損耗。
2. 因為不銹鋼的摩擦係數較高，所以被消耗的能量可能是因為摩擦所造成。但是這無法解釋分佈不均勻的現象，所以需在摩擦與磨耗的實驗中進一步分析。
3. 當鎖緊扭矩 = 100kgf-cm 時，因為 M 型不銹鋼夾緊件的設計強度

不足，所以會產生彎曲變形，導致在螺紋結合處會發生軸向的變形，且此軸向變形並非完全垂直螺紋中心，而是傾斜一個角度 ϕ ，此變形量將由內外螺紋一起承受，其真實的受力螺紋面積會隨著傾斜角度加大而大幅減少，使得螺紋面壓大幅升高，對螺紋強度造成不利的影響。如圖 36 及圖 37 所示，當彎曲產生時，在左上角及右下角有最大的螺紋干涉，使得大部分鎖緊力由此區域承受，故此區域螺紋將可能發生塑性變形或被破壞。

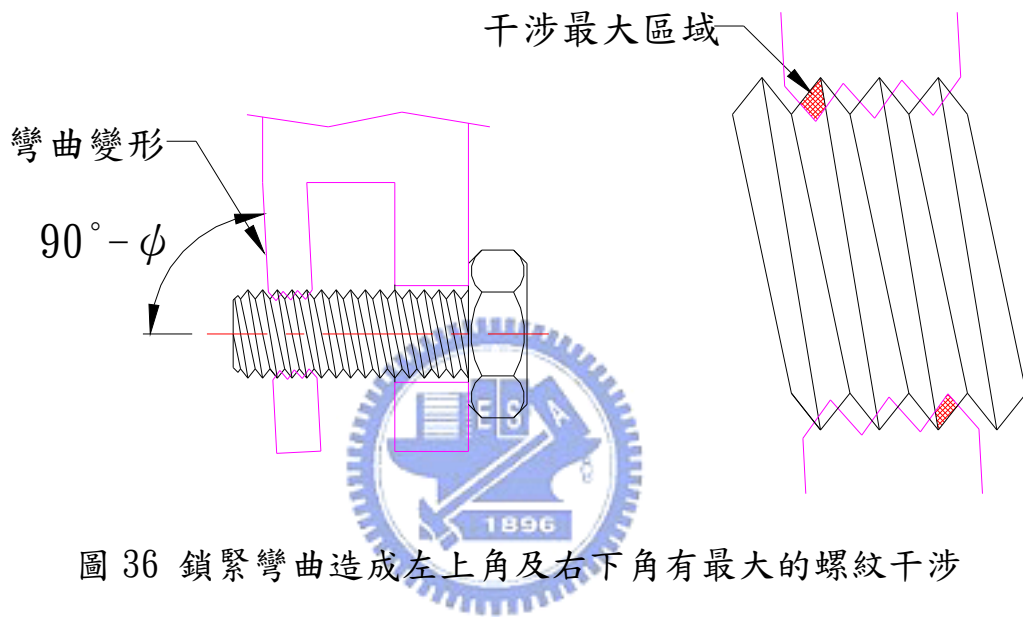


圖 36 鎖緊彎曲造成左上角及右下角有最大的螺紋干涉

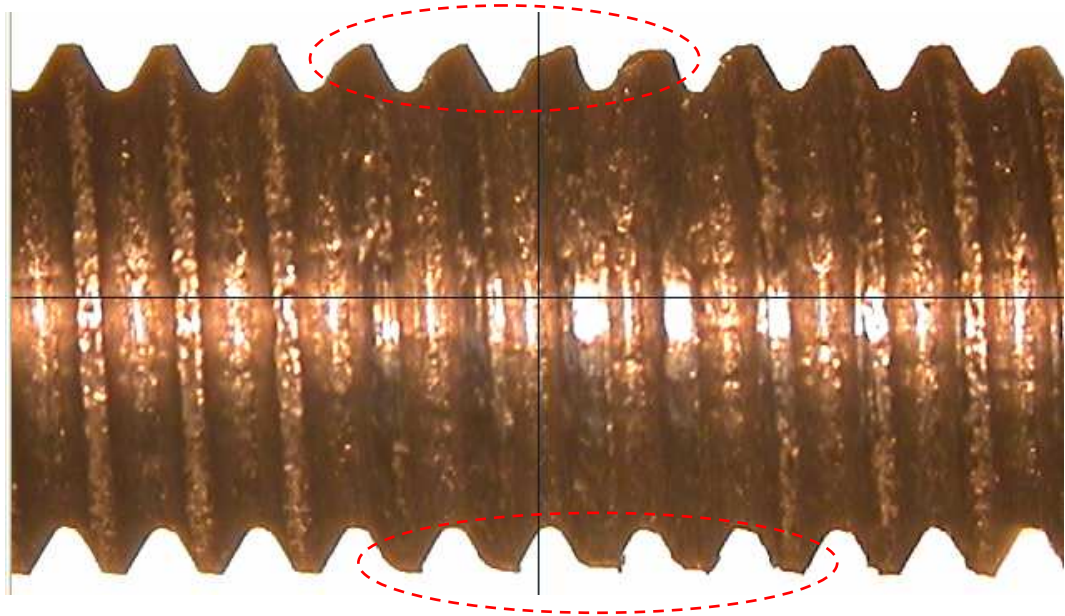


圖 37 因為鎖緊彎曲造成的牙峰切削（圈選處）

5.3 鎖緊力對 M 型不銹鋼夾緊件產生的摩擦與磨耗作用

表 13 鎖緊力對 M 型不銹鋼夾緊件產生的摩擦與磨耗實驗結果

夾緊件編號		變形量 mm	拆卸扭矩 kgf-cm	螺絲編號	螺絲狀況	夾緊件內 牙狀況	加工裂痕變化
不銹 鋼螺 絲	1	1.70	110.0	1-1	F	F	裂痕破壞
				1-2	C	C	裂痕伸長
	2	1.70	112.0	2-1	C	B	裂痕伸長
				2-2	C	B	無明顯變化
	3	2.40	116.0	3-1	F	F	裂痕破壞
				3-2	F	F	裂痕破壞
	4	2.30	110.0	4-1	F	F	裂痕破壞
				4-2	E	D	無明顯變化
電鍍 鋅螺 絲	5	2.30	92.0	5-1	C	A	無明顯變化
				5-2	D	A	無明顯變化
	6	2.10	94.0	6-1	B	B	無明顯變化
				6-2	E	B	無明顯變化
	7	2.20	90.0	7-1	E	B	裂痕伸長
				7-2	D	B	裂痕伸長
	8	2.50	88.0	8-1	D	A	無明顯變化
				8-2	D	B	無明顯變化

備註：螺牙磨耗或變形劃分為 6 等級

A: 無明顯變化 B: 極輕微磨耗或變形 C: 輕度磨耗或變形

D: 中度磨耗或變形 E: 重度磨耗或變形 F: 失去功能或破壞

5.3.1 實驗條件

所有實驗條件皆與 5.2.1 相同。

在上一個實驗中有發現在相同扭矩作用下，不銹鋼螺絲造成的變形並不是一個穩定的數值，而且在拆卸不銹鋼螺絲時，往往有螺紋干涉及

磨耗的情形發生，所以必須針對鎖緊過程中的摩擦與磨耗問題進行實驗，探討其中的原因。

5.3.2 實驗結果

如表 13 為鎖緊力對 M 型不銹鋼夾緊件產生的摩擦與磨耗實驗結果。

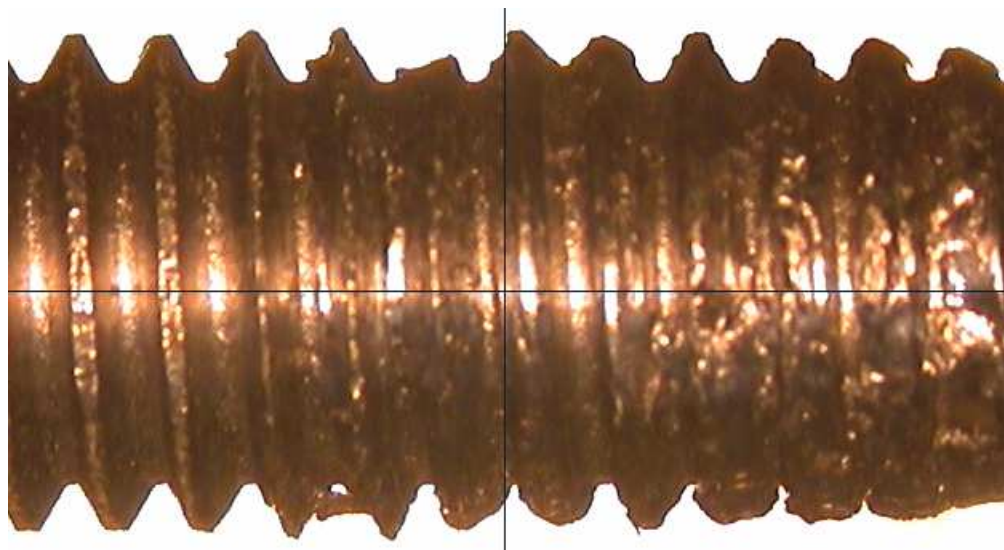


圖 38 不銹鋼螺絲拆卸時造成的嚴重黏著及變形

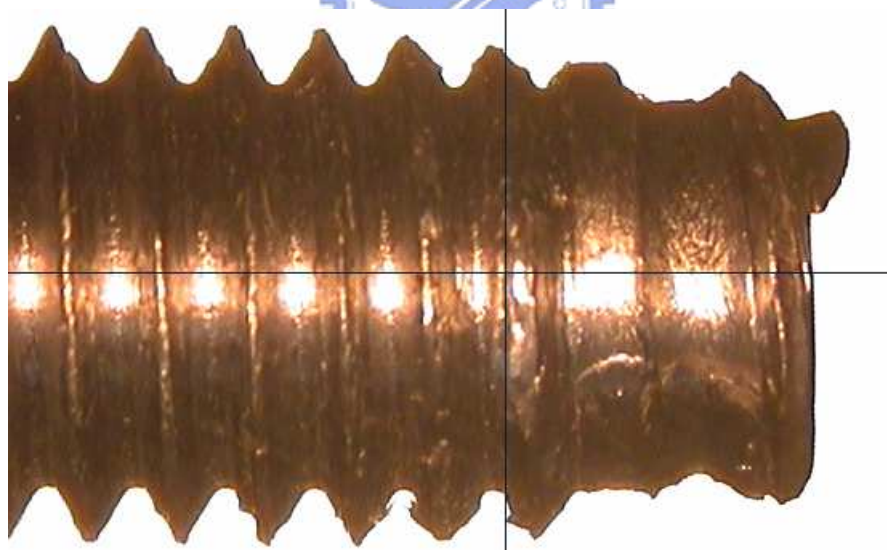


圖 39 不銹鋼螺絲強行拆卸時造成的螺牙破壞

5.3.3 摩擦與磨耗實驗結果討論

1. 不銹鋼螺絲有比較大的拆卸扭矩，且其平均拆卸扭矩會超過鎖緊扭矩約 12%。電鍍鋅螺絲的拆卸扭矩比較小，其平均拆卸扭矩會低於鎖緊扭矩約 9%。

2. 依照能量守恆定律，拆卸扭矩不應該超過鎖緊扭矩，除了實驗過程中動靜摩擦造成的誤差外，唯一的合理解釋為不銹鋼螺絲在鎖緊過程中，產生了新的摩擦或磨耗作用，此作用在螺絲拆卸時變成一種阻力，使所需的拆卸扭矩會高於鎖緊的扭矩。圖 36 的螺紋干涉現象或許也是其中原因之一。
3. 如圖 38、39，在 100kgf-cm 的扭矩作用下，不銹鋼螺絲與 M 形夾緊件的內螺紋，在拆卸過程中，螺牙都受到嚴重的損壞且容易產生螺牙卡死的現象，以至於無法拆卸。如圖 40，電鍍鋅螺絲雖然也有受到損傷，但程度較小，螺絲都可以順利拆下。
4. 如圖 41，不銹鋼螺絲對 M 形夾緊件的孔凸緣加工裂痕有較大的影響，在拆卸過程中，原有的裂痕較容易被伸展加長，也會發生加工裂痕破裂的現象，造成螺牙損傷。在彎曲作用下，孔凸緣加工裂痕會受到朝外的作用力，使得裂痕往外破裂，破裂之後原來的內牙螺紋也跟著被破壞。
5. 單就本應用例而言，因為不銹鋼螺絲的拆卸扭矩較碳鋼類螺絲大約多 20%，從預防機件鬆脫的角度而言，不銹鋼螺絲具有較佳的使用特性。

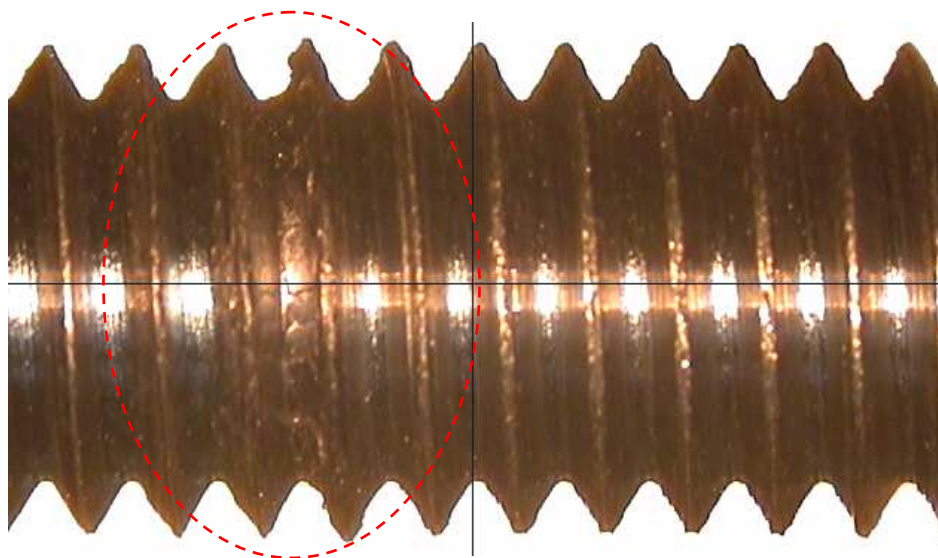


圖 40 電鍍鋅螺絲拆卸時造成的中度黏著及變形（圈選處）

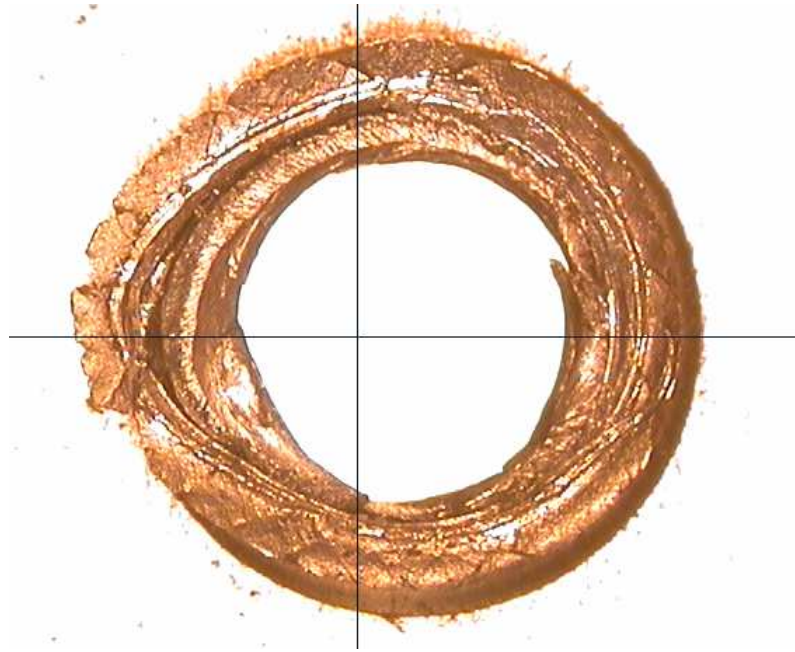


圖 41 夾緊件的孔凸緣加工裂痕破裂造成螺牙破壞

5.4 不同鎖緊扭矩對 M 型不銹鋼夾緊件產生的影響

5.4.1 實驗條件

1. 由方程式 $F_i = A_t (0.7 \sigma_{yp})$ ，強度區分 A2-70 的不銹鋼螺絲，最小降伏強度為 450 N/mm^2 ，如表 1 查得其應力面積 = 20.1 mm^2 ，代入可得 $F_i = 646 \text{ kgf}$ 。
2. 由扭矩方程式 $T = K F_i d$ ，將 F_i 代入得到 M6 不銹鋼螺絲的一般鎖緊扭矩 = 77.5 kgf-cm 。
3. 因為所需的鎖緊扭矩約為 77.5 kgf-cm ，所以本實驗擬將扭矩範圍訂定為從 55 kgf-cm ~ 90 kgf-cm (100 kgf-cm 於前節已經實驗過)，間隔為 5 kgf-cm 。
4. 其它實驗條件與 5.2.1 相同。

如圖 32 為實驗相關機件之架設方式。

5.4.2 實驗結果

實驗的結果如表 14 所示。

表 14 不同鎖緊扭矩對 M 型不銹鋼夾緊件產生的影響

鎖緊扭 力 kgf-cm	夾緊 件編 號	受力前 寬度 mm	受力後 寬度 mm	變形 量 mm	拆卸扭 矩 kgf-cm	螺絲編 號	螺絲狀 況	夾緊件 內牙狀 況	加工裂痕變化
55	11	76.6	77.3	0.70	66	11-1	D	D	無明顯變化
						11-2	B	C	無明顯變化
60	12	76.1	76.8	0.70	68	12-1	D	C	無明顯變化
						12-2	B	A	無明顯變化
65	13	76.6	77.5	0.90	72	13-1	F	F	裂痕破壞
						13-2	C	C	無明顯變化
70	14	76	77	1.00	80	14-1	F	F	裂痕破壞
						14-2	C	C	無明顯變化
75	15	76.2	77.4	1.20	82	15-1	F	F	裂痕破壞
						15-2	D	D	裂痕伸長
80	16	75.8	77	1.20	90	16-1	F	F	裂痕破壞
						16-2	F	F	裂痕破壞
85	17	76.3	77.4	1.10	94	17-1	F	F	裂痕破壞
						17-2	D	D	裂痕伸長

備註：螺牙磨耗劃分為 6 等級

A: 無明顯變化 B: 極輕微磨耗或變形 C: 輕度磨耗或變形
D: 中度磨耗或變形 E: 重度磨耗或變形 F: 失去功能或破壞

5.4.3 各種磨耗的照片

圖 42~圖 46 為在不同扭矩實驗過程中，比較具有代表性的磨耗、變形與破壞的表面實際情況。

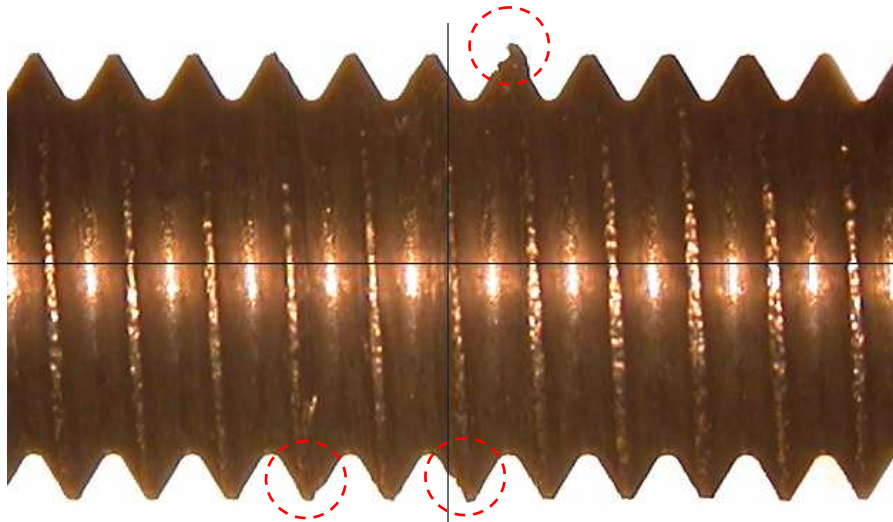


圖 42 扭矩 55kgf-cm 時造成的螺紋局部變形及磨耗 (圈選處)

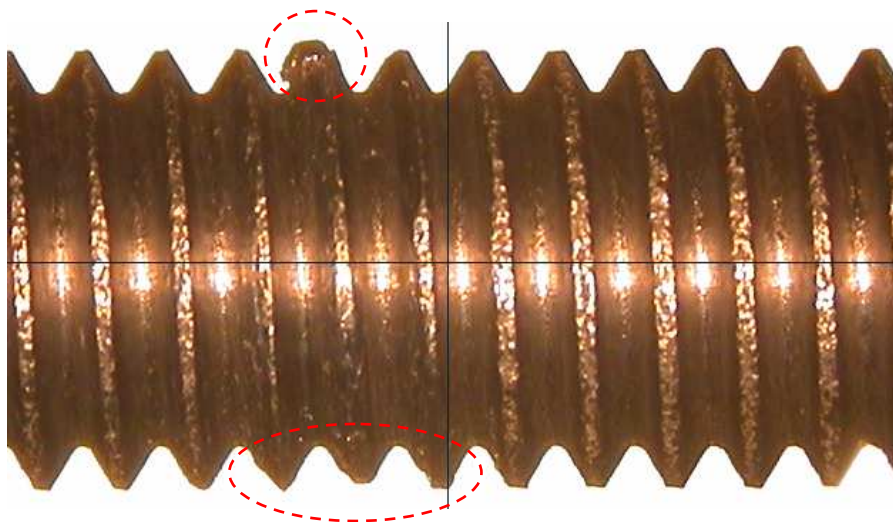


圖 43 扭矩 60kgf-cm 時造成的螺紋局部變形及黏著 (圈選處)

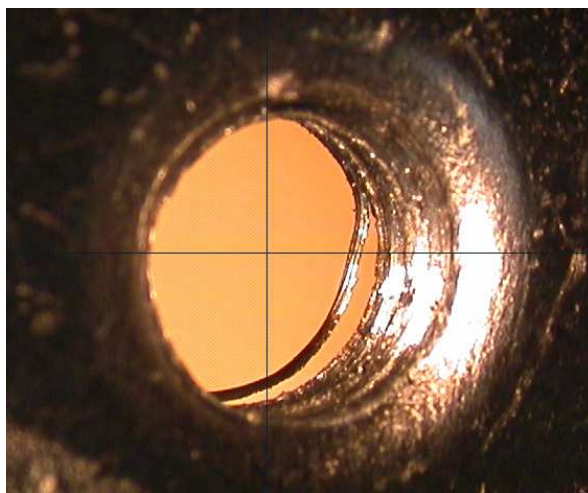


圖 44 扭矩 60kgf-cm 時造成的夾緊件孔凸緣螺紋毛邊

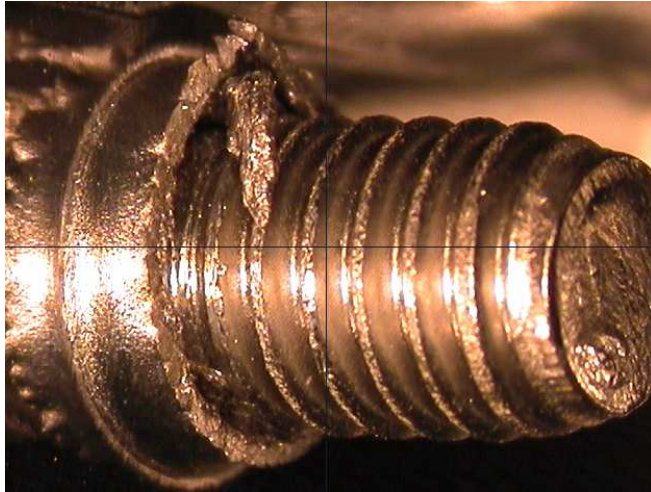


圖 45 扭矩 65kgf-cm 時造成的夾緊件孔凸緣加工裂痕破裂

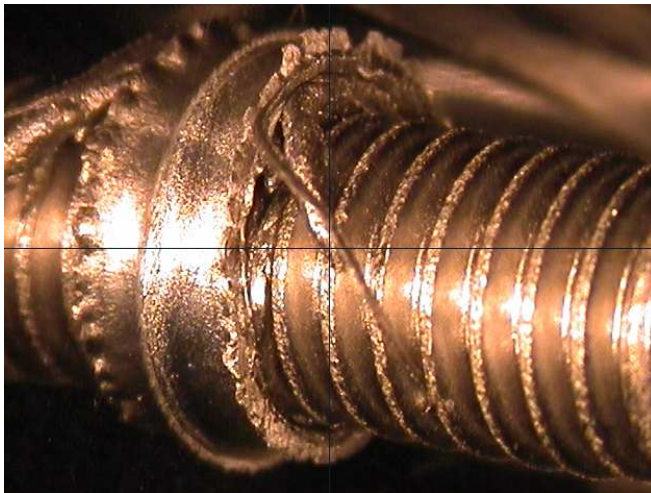


圖 46 扭矩 75kgf-cm 時造成的夾緊件孔凸緣加工裂痕破裂

5.4.4 不同鎖緊扭矩對夾緊件產生的影響實驗結果討論

1. 從實驗結果中可以發現當扭矩超過 75kgf-cm 時，兩側的螺絲都開始接近破壞程度，所以 90kgf-cm 的結果可以從 80、85kgf-cm 的實驗中推論而得到。
2. 鎖緊扭矩、拆卸扭矩、夾緊件變形量三者之間呈現正相關關係，即鎖緊扭矩加大則拆卸扭矩變大、夾緊件變形量也變大。
3. 參考表 14，單數編號的螺絲 (-1) 比偶數編號的螺絲 (-2) 先拆卸，結果顯示先拆卸螺絲的磨耗或破壞情況較嚴重。其原因為先拆卸的螺絲承受更大的作用力，加上兩側受力不平衡致使彎曲作

用力集中於先拆卸的螺絲。在高作用力及高彎曲下，會造成螺絲的磨耗作用急遽升高，並可能導致磨燒發生。

4. 在螺絲鎖緊過程中，扭矩並無特殊的變化，因為順時鐘旋轉螺絲，所以無法清楚感覺螺牙是否有產生磨耗。當螺絲開始拆卸時，也沒有扭矩突然增加的情況，等到螺絲逆時針旋轉約一圈或更多時扭矩開始增加，表示磨耗及黏著作用開始產生。
5. 一旦磨耗或黏著作用發生，則拆卸的扭矩會急速升高而且增加的速度很快，在此情形下約旋轉半圈到一圈後，螺絲就會卡死無法再拆卸了。這意謂著螺牙的變形、磨耗、黏著在高螺紋面壓下，最後已經熔合為一體，逐漸變成磨燒，阻塞了原本的螺紋運動間隙，若強行拆卸會使螺牙產生嚴重塑性變形，其結果就是破壞螺紋結構。
6. 螺牙變形的原因：

已知 SUS302 螺絲的最小降伏強度為 450 N/mm^2 ，因為螺紋屬於延性材料，所以適用“最大剪力理論”即 $\tau_{yp} = \frac{\sigma_{yp}}{2} = 225 \text{ N/mm}^2 = 23\text{kgf/mm}^2$ ，由方程式 (30) 可求出有效作用牙數 $n_c=1$ 的螺紋強度為

$$\frac{\pi d}{\cos \theta} n_c \frac{p}{2} \tau_{yp} = 217\text{kgf}$$

因為 M6 不銹鋼螺紋的單牙強度約為 217kgf，而螺紋的初期鎖緊力為 $F_i=646\text{kgf}$ ，所以必須有三個螺牙接觸才有足夠的強度。

夾緊件孔凸緣的總高度為 3.2mm，實際攻牙數約為 2.5 牙，鎖緊力造成的彎曲變形角度約為 0.8 度。因為牙數不足加上彎曲變形，所以其強度是無法承受此鎖緊力的，故螺牙可能產生變形。

若以 217kgf 單牙強度計算，則合適的初期鎖緊力為 $217 \times 2.5 = 542.5\text{kgf}$ ，換算成鎖緊扭矩 = 65.1kgf-cm，在不考慮鎖緊的彎曲效應下，此計算結果與實驗結果接近。

7. 但事實上如上述所言，破壞並非因為鎖緊過程的扭力所造成，而是在拆卸過程中發生的，這一點必須進一步分析。雖然鎖緊過程中的高面壓作用力，使得螺牙發生磨耗、特別是彎曲作用使牙峰產生變形，但並不會造成螺紋的嚴重磨耗或破壞，所以螺紋的損壞還有其他原因存在。

在詳細觀察螺紋拆卸的過程及用光學投影機放大損壞的部位之後，我們可以發現兩個因素會造成螺紋的破壞，分別敘述如下：

(1) 凸緣孔攻牙的毛邊：通常螺紋螺旋曲線的進、出點材料厚度很薄，所以容易產生毛邊。不管是內外螺紋，在加工過程中都會給予適當的倒角處理。對孔凸緣加工而言，螺紋進入點因為有加工自然產生的圓角，所以不會產生毛邊。而孔凸緣加工的另一端是無法進行導角加工的，所以會殘留毛邊在螺紋出口上，此毛邊在較高的鎖緊力及彎曲作用下會破裂，然後螺紋逆轉退出時就容易被捲入螺牙中間並黏著在螺牙上，造成螺紋損壞，如圖 44 所示。

(2) 凸緣孔的加工硬化裂痕：凸緣孔表面是加工硬化最大的部位，硬度較高且容易破裂。當此面受到較大的鎖緊力及彎曲作用時，會產生變形及裂開，使得牙形不正確。裂紋的銳利邊會對螺絲的螺牙產生切削作用且裂痕比毛邊更粗大，此切削作用於順時針方向鎖入時裂紋被往外軸向推出故影響較小，當逆時針拆卸時裂紋被往內擠入，然後捲入螺牙間隙中，造成螺絲磨耗或卡死，如圖 45、46 所示。

8. 參考 5.3 節的實驗結果，在鎖緊扭矩 100kgf-cm 時，螺絲磨耗及卡死現象並不會比 75kgf-cm 高，這是一個比較奇怪的現象。經過仔細分析發現，在高扭矩狀態下因為 M 形夾緊件的彎曲角度較大，所以會將毛邊或裂痕往圓周方向外側擴張，使得毛邊或裂痕影響程度不會增加，但是扭矩增大會加大磨耗作用。

5.5 螺帽厚度對 M 型不銹鋼夾緊件產生的影響

5.5.1 實驗條件

基準鎖緊扭矩 = 100kgf-cm。

螺紋規格：M6-60，不銹鋼外六角螺絲，強度區分 A2-70。

螺帽規格：使用三種不同的螺帽，分別如下

1. 標準的不銹鋼螺帽：厚度 4.8mm。
2. 修改後的不銹鋼螺帽：厚度 3.2mm，與孔凸緣高度相同，如圖 47。
3. 標準的電鍍鋅螺帽：厚度 4.8mm。

M 形不銹鋼夾緊件：將凸緣孔螺紋加工去除，如圖 47。

如圖 32 為實驗相關機件之架設方式。



圖 47 修改後的不銹鋼螺帽（3.2mm）及 M 形不銹鋼夾緊件孔

5.5.2 實驗結果

實驗的結果如表 15 所示。

5.5.3 螺帽厚度對夾緊件產生的影響實驗結果討論

1. 由表 15 可知，以螺帽取代原有的孔凸緣攻牙，在相同的扭矩作用下，造成的變形量比較小，所需的拆卸扭矩也比較低，這是因為螺絲的貫穿孔直徑（約 6.5mm）比攻牙孔的間隙大，在受力彎曲變形時此間隙可以吸收部份的變形量，所以因彎曲造成的螺紋干涉會降低，故拆卸扭矩與鎖緊扭矩值接近。
2. 與 5.3 節實驗相比較，夾緊件孔凸緣的總高度為 3.2mm，與厚 3.2

mm 的不銹鋼螺帽具有相近的螺牙數（約 2.5 牙），夾緊件孔凸緣的平均拆卸扭矩為 112kgf-cm，3.2 mm 的不銹鋼螺帽的平均拆卸扭矩為 96.7kgf-cm，兩者差距為 13.7%，換言之約有 13.7% 的鎖緊扭矩，被消耗在螺紋干涉的摩擦當中。這部分損失的能量造成螺牙的磨耗，使得螺絲容易受損。

表 15 螺帽厚度對夾緊件產生的影響

螺帽種類	夾緊件編號	受力前寬度 mm	受力後寬度 mm	變形量 mm	拆卸扭矩 kgf-cm	螺絲及螺帽編號	螺絲狀況	螺帽狀況
不銹鋼厚 4.8 mm	21	76.2	78	1.80	104	21	C	C
						22	C	C
	21	76.2	77.8	1.60	98	23	C	C
						24	C	C
	21	76.2	77.9	1.70	100	25	C	C
						26	C	C
不銹鋼厚 3.2 mm	21	76.2	77.7	1.50	98	27	C	C
						28	E	D
	21	76.2	77.6	1.40	92	29	C	C
						30	D	C
	21	76.2	77.7	1.50	100	31	D	D
						32	C	C
電鍍鋅厚 4.8 mm	22	76.8	78.6	1.80	90	33	A	B
						34	A	B
	22	76.8	78.8	2.00	100	35	A	B
						36	B	D
	22	76.8	78.7	1.90	94	37	A	B
						38	A	B
22	76.8	78.9	2.10	94	39	A	B	
					40	A	B	

備註：螺牙磨耗劃分為 6 等級

A: 無明顯變化 B: 極輕微磨耗或變形 C: 輕度磨耗或變形
D: 中度磨耗或變形 E: 重度磨耗或變形 F: 失去功能或破壞

3. 與 5.3 節實驗相比較，不論是使用電鍍鋅螺絲或螺帽搭配不銹鋼材料，其拆卸扭矩都很接近，而且磨耗情況都比較輕微，不會發生螺紋卡死的現象。這種現象除了與材料本身性質有關之外，與電鍍的表面處理也有關係，因為鍍鋅層的潤滑作用，可以避免母材直接接觸，降低磨耗的發生。
4. 由表 15 可知，厚 3.2 mm 的不銹鋼螺帽與厚 4.8mm 的螺帽相比，螺絲與螺帽所受到的損傷情況明顯嚴重，可見嚙合的螺紋長度（或牙數）是一個關鍵因素。因為嚙合的螺紋愈多，抵抗彎曲變形的能力愈大，彎曲角度愈小，所以螺紋接觸面積增大，螺牙受到的應力及面壓減少，因此磨耗降低。圖 48 與圖 49 可以明顯看出 3.2mm 的螺帽與螺絲磨損比 4.8mm 的嚴重。

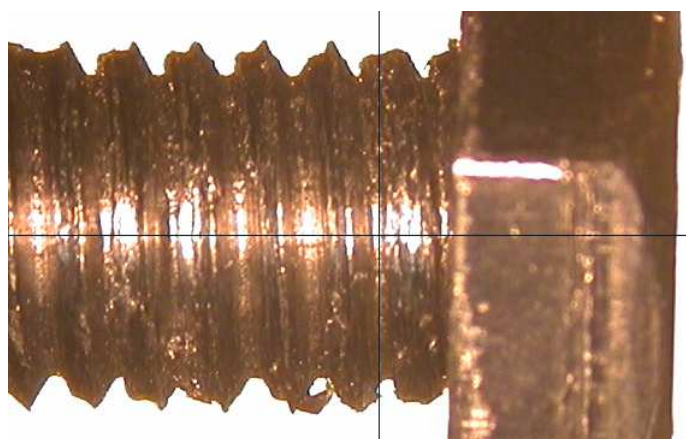


圖 48 厚度 3.2mm 的螺帽及螺絲磨損

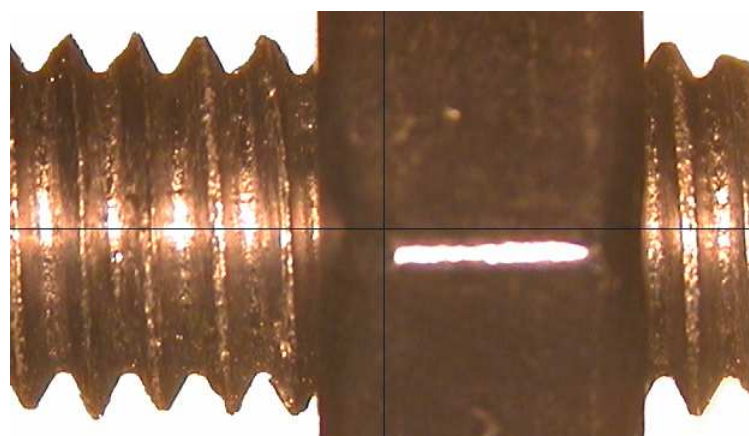


圖 49 厚度 4.8mm 的螺帽及螺絲磨損

5.6 潤滑對不銹鋼螺紋鎖緊作用的影響

5.6.1 實驗條件

基準鎖緊扭矩 = 100kgf-cm。

螺紋規格：M6-60，不銹鋼外六角螺絲，強度區分 A2-70。

潤滑油種類：使用煤油及齒輪油。

M 形不銹鋼夾緊件：素材及表面有烤漆二種。

如圖 32 為實驗相關機件之架設方式。

5.6.2 實驗結果

實驗的結果如表 16 所示。

5.6.3 潤滑對不銹鋼螺紋鎖緊作用的影響實驗結果討論

1. 煤油一般用途為機件清洗劑或作為燃料油，由表 16 可知，對不銹鋼螺紋鎖緊作用而言，煤油的功效並不明顯，螺紋依舊受到較嚴重的破壞。
2. 齒輪油的黏度係數高，可承受較高的工作壓力。由表 16 實驗結果可知，齒輪油對螺紋鎖緊過程的磨耗保護具有優異的效果，無論螺絲或夾緊件的螺紋都沒有造成明顯的破壞現象。對於拆卸的扭矩也可以維持一個穩定的數值，但是會略高於施加的鎖緊扭矩，其原因應與齒輪油的高黏度係數有關，亦即高黏度係數的潤滑油會形成拆卸的阻力，有助於防止螺紋鬆動，但鎖緊時因為潤滑膜的擠壓作用會產生明顯的噪音，這是其他實驗條件沒有發生的現象。圖 50 為正常不銹鋼螺紋的螺牙形狀，圖 51 為加齒輪油鎖緊後再拆卸的不銹鋼螺紋的螺牙形狀，兩者比較，可以發現牙根圓不同，這是因為齒輪油黏度高不易流動所以均勻的吸附在牙根上的關係。
3. 當 M 形夾緊件表面施以烤漆處理時，其實驗結果發現螺紋的磨耗變得非常輕微，如圖 52 為烤漆的夾緊件內螺紋的磨耗情形，圖 53 為不銹鋼螺絲的磨耗情形，兩者的表面均殘留有被切削掉落的烤

漆粉末。所以烤漆面及其粉末在鎖緊過程中具有潤滑劑的效果，會形成一個保護層（膜）可以減少摩擦及磨耗作用，可以當作一種固體潤滑劑。

表 16 潤滑對不銹鋼螺紋鎖緊作用的影響

潤滑條件	夾緊件編號	受力前寬度 mm	受力後寬度 mm	變形量 mm	拆卸扭矩 kgf-cm	螺絲編號	螺絲狀況	夾緊件內牙狀況	加工裂痕變化
加煤油	31	75.7	78.1	2.40	96	31-1	C	C	無明顯變化
						31-2	C	C	無明顯變化
	32	76.3	78.6	2.30	106	32-1	F	F	裂痕破壞
						32-2	F	F	無明顯變化
	33	76.1	78.1	2.00	106	33-1	C	C	裂痕伸長
						33-2	C	C	裂痕伸長
加齒輪油	34	75.8	77.3	1.50	104	34-1	A	A	無明顯變化
						34-2	A	A	無明顯變化
	35	76.3	77.8	1.50	102	35-1	A	A	無明顯變化
						35-2	A	A	無明顯變化
	36	76.2	78	1.80	102	36-1	A	A	無明顯變化
						36-2	A	A	無明顯變化
夾緊件烤漆	37	76.3	78.1	1.80	102	37-1	B	B	無明顯變化
						37-2	B	B	無明顯變化
	38	78.3	80	1.70	96	38-1	B	B	無明顯變化
						38-2	B	B	無明顯變化
	39	76.3	78.4	2.10	98	39-1	B	B	無明顯變化
						39-2	B	B	無明顯變化

備註：螺牙磨耗劃分為 6 等級

A: 無明顯變化 B: 極輕微磨耗或變形 C: 輕度磨耗或變形
 D: 中度磨耗或變形 E: 重度磨耗或變形 F: 失去功能或破壞

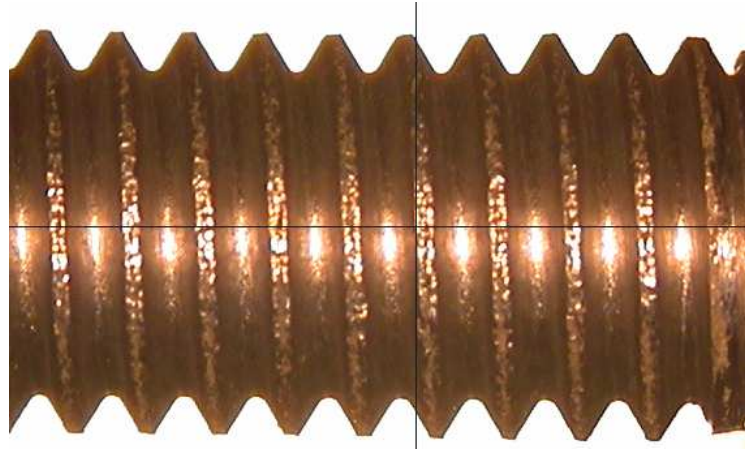


圖 50 正常不銹鋼螺絲的螺牙形狀

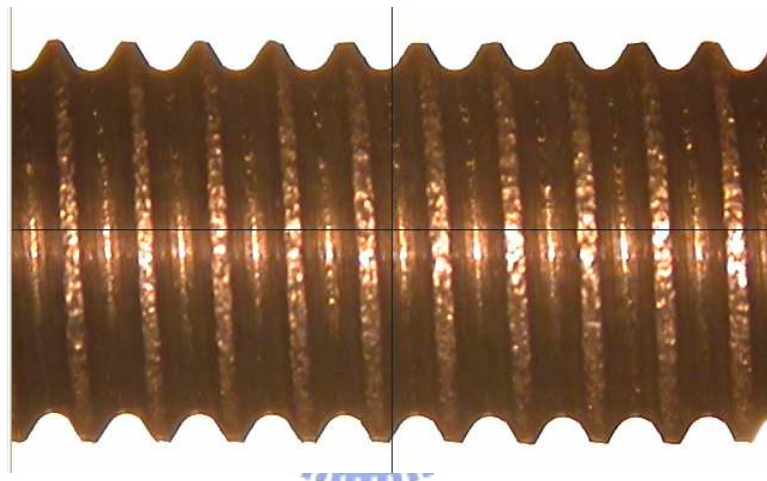


圖 51 加齒輪油鎖緊後再拆卸的不銹鋼螺絲的螺牙形狀

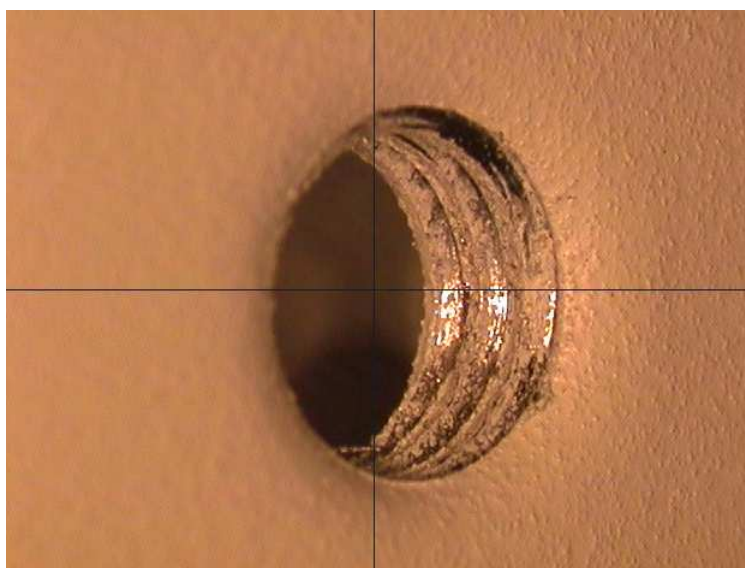


圖 52 烤漆的夾緊件內螺紋的磨耗情形

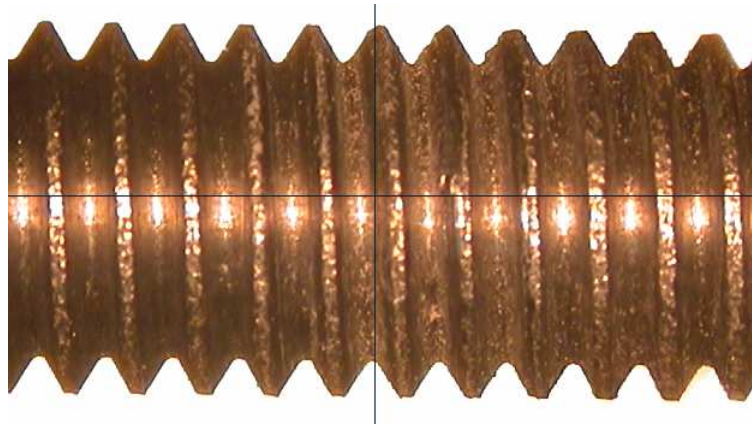


圖 53 不銹鋼螺絲殘留的烤漆粉末



第六章 結論與建議

6.1 結論

經由第五章的相關實驗，並對實驗結果現象的觀察及實驗數據量測相互比較分析，得到一些具體的實驗結果，這些結果有相當的參考價值，整理後得到如下的結論：

- 扭矩方程式 $T = KF_i d$ 具有相當的準確度，且扭矩方程式及扭矩係數與摩擦係數有關與使用的材料無關。
- 當機件強度不足會產生彎曲變形，導致在螺紋結合處會發生軸向的變形，傾斜一個角度 ϕ ，受力螺紋面積會隨著傾斜角度加大而大幅減少，使螺紋面壓大幅升高，對螺紋強度造成不利的影響，故此區域螺紋將可能發生塑性變形或被破壞。
- 不銹鋼螺絲在鎖緊過程中，產生的摩擦、磨耗及變形作用，此作用在螺絲拆卸時變成一種阻力，使所需的拆卸扭矩會高於鎖緊的扭矩。
- 先拆卸的螺絲承受更大的作用力，加上兩側受力不平衡致使彎曲作用力集中於先拆卸的螺絲。在高作用力及高彎曲下，會造成先拆卸螺絲的磨耗作用急遽升高，並可能導致磨燒發生。
- 一旦磨耗或黏著作用發生，則拆卸的扭矩會急速升高，螺絲就會卡死。這意味著螺牙的變形、磨耗、黏著在高螺紋面壓下，最後已經熔合為一體，逐漸變成磨燒。
- 高面壓作用力使得螺牙發生磨耗，特別是彎曲作用使牙峰產生變形，但並不會造成螺紋的嚴重磨耗或破壞。凸緣孔攻牙的毛邊，凸緣孔的加工硬化裂痕容易造成黏著導致螺紋的破壞。
- 嚙合的螺紋數愈多，抵抗彎曲變形的能力愈大，彎曲角度愈小，所以螺紋接觸面積增大，螺牙受到的應力及面壓減少，因此磨耗降低。
- 齒輪油的黏度係數高，可承受較高的工作壓力，對螺紋鎖緊的磨耗保護具有優異的效果。高黏度係數的潤滑油會形成拆卸的阻力，有助於防止螺紋鬆動，但鎖緊時因為潤滑膜的擠壓作用會產生明顯的噪音。

6.2 建議

6.2.1 機構設計方面

- 設計上盡量避免螺紋鎖緊力會使機件產生彎曲變形的結構，若無法避免則機件須有足夠的強度，即機件的 I 值愈高愈好。
- 高鎖緊力的環境，螺牙的嚙合數必須要足夠。對孔凸緣加工件而言，凸緣愈高螺牙數增加，但易發生加工硬化裂紋，反而有害，所以必須適度增加材料的厚度，以避免裂紋產生。
- 螺紋不可以有毛邊，對於容易產生毛邊的內外螺紋，設計上必須施以導角或圓角，且螺紋進入點及退出點必須有適當的引導。
- 攻牙孔必須避免加工硬化的裂紋。
- 若無特殊使用需求則優先選擇經過電鍍等表面處理的螺絲。
- 設計上可以控制的彎曲變形及磨耗，可以增加拆卸的扭矩，對防止螺絲的鬆脫有幫助，但是會降低螺紋的重複使用壽命。

6.2.2 作業及施工方面

- 螺紋加工及鎖緊作業都必須注意垂直度，若未垂直則所造成的損害與鎖緊的彎曲損害是相同的。
- 無論是螺紋鎖緊或是拆卸過程，兩側螺絲的受力都必須盡量維持相近，以免產生作用力集中現象，造成螺紋損害。
- 若作業上許可，不銹鋼螺絲的鎖緊作業可加高黏度及抗壓的潤滑劑，如齒輪油等，不但可以防止磨耗發生，延長機件及螺絲使用壽命，還可以增加拆卸扭矩，防止螺絲的鬆脫。
- 在螺絲拆卸過程中，若感覺阻力增加，表示螺牙有黏著作用產生，不可強行拆卸，否則會造成螺牙損壞。應該反轉鎖入後，清理黏著的殘屑並加入適當的潤滑後，才繼續進行拆卸作業。

6.3 殘留問題

本論文主要探討不銹鋼螺紋的鎖緊特性，雖然儘可能的從多方面進

行實驗，但是因為牽涉的領域很廣泛，所以有許多地方仍待進一步的研究及發掘，列舉如下：

- 螺紋鎖緊速度的影響性如何？
- 細長比作用對長螺絲的影響性如何？
- 高鎖緊力下的螺紋及材料疲勞作用為何？
- 鎖緊過程的軸向施加壓力及傾斜影響性如何？
- 如何確保高可靠度的鎖緊力及鎖緊品質？

本論文大致上達到了當初預期的目標，但是仍然有許多方面值得進一步去作更深入更完善的實驗及分析。



參 考 文 獻

- [1] Joseph Edward Shigley · Charles R. Mischke , “MECHANICAL ENGINEERING DESIGN” FIFTH EDITION , McGRAW-HILL , New York , 1995.
- [2] 莊明家 , “機械設計及分析” , 復文書局 , 民國七十九年.
- [3] 小栗富士雄、小栗達男 , “標準機械設計圖表便覽” , 臺隆書店 , 1990.
- [4] B. H. AMSTEAD , PHILLIP F. OSTWALD , et al , “MANUFACTURING PROCESSES” , JOHN WILEY & SONS , New York , 1987.
- [5] 日本螺紋工業協會編輯委員 , 賴耿陽、歐靜枝編譯 , “螺紋、螺絲、螺帽” , 復文書局 , 1987.
- [6] Donald Peckner , I. M. Bernstein , “Stainless Steels” , McGRAW-HILL , New York , 1977.
- [7] R. A. Lula , J. Gordon Parr and Albert Hanson , “Stainless Steels” , Metals Park , Ohio , American Society for Metals , 1986.
- [8] 林文樹·劉曉嶺 , 等著 “塑性加工學” , 三民書局 , 1987.
- [9] 賴耿陽 , “螺紋鎖緊機構設計, 現代螺紋使用實務” , 復漢出版社 , 1995.
- [10] 日本沖壓加工技術資料集編輯委員 , 張渭川編譯 , “沖壓加工資料集” , 全華科技圖書 , 民國八十六年.
- [11] ROBERT C. JUVINALL , KURT M. MARSHEK , “FUNDAMENTALS OF MACHINE COMPONENT DESIGN” , Second Edition , JOHN WILEY & SONS , New York , 2005.
- [12] M. F. Spotts , “Design of Machine Elements” , 台北市 , 乾泰出版 , 科技經銷 , 1989.

- [13] Bernard J. Hamrock , Bo O. Jacobson , Steven R. Szhmid ,
“Fundamentals of Machine Elements” , McGRAW-HILL , New
York , 2004.
- [14] PETERSON, R. E. , “Stress Concentration Factors” , WILEY ,
New York , 1974.
- [15] PETERSON, R. E. , “Stress Concentration Design Factors” ,
WILEY , New York , 1953.
- [16] Rabinowicz, E. , “Friction and Wear of Materials” , WILEY ,
New York , 1965.
- [17] Teru Hayashi , “Micromechanism and Their Characteristics” ,
IEEE , Japan , 1944.
- [18] A. P. Green. , “The Plastic Yielding of Metal Junction due
to Combined Shear and Pressure” , Journal of the Mechanics
and Physics and and Solids , 1955b , Vol. 2 , pp. 197-211.
- [19] J. F. Archard. , “Contact and Rubbing of Flat Surface” ,
Journal of Appiled Physics , 1953 , Vol. 24 , pp. 981-988.
- [20] B. Phgh, 楊春欽譯 , “Friction and Wear” , 科技圖書公司 , 1981.
- [21] J. A. Williams , “Engineering Tribology” , Oxford University
Press , Oxford , 1994.
- [22] F. P. Bowden , D. Tabor , “The Friction and Lubrication of
Solids” , Oxford University Press , Oxford , 1950.
- [23] A. Rlansdown , “Extreme-Pressure and Anti-Wear Additives” ,
Chemistry and Technology of Lubricants , R. M. Mortire , ed. ,
Blackie and Son Ltd. , 1992 , pp. 269-275.
- [24] I. V. Kragelskii , “Friction and Wear” , Elsevier , May 1981.
- [25] 蘇品書 , “塑性加工摩擦工學” , 復漢出版社 , 民國八十九年.
- [26] John R. Zimmerman , R. Bruce Hopkins , et al , “MACHINE DESIGN

- FUNDAMENTALS” ， JOHN WILEY & SONS ， New York ， 1983.
- [27] A. Kohno and S. Hyodo ， “The Effect of Surface Energy on the Microadhesion between Hard Solids” ， Journal of Applied Physics ， 1974 ， Vol. 7 ， pp.1243-1246.
- [28] B. J. Hamrock ， “Fundamentals of Fluid Film Lubrication” ， NASA Reference Publication ， 1255 ， 1991.
- [29] 池田 馨，中川 元，光永公一， “日本機械學會論文集 (C 篇)” ， 36 ， 290 ， (1970) ， 1735.
- [30] Nakasima K. and Takafuji K. ， “Wear Lead Screw Nuts” ， International Conference on Wear of Materials Apr 7-11 ， 1991 V2 ， pp. 589-592
- [31] 邱源成等 ， “螺桿及螺母鬆緊過程之磨潤行為研究 (一)：試驗機的研製和基礎試驗” ， 行政院國科會專題研究計畫成果報告 ， NSC-89-2212-E-110-003 ， 88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日。
- [32] 林海平 ， “螺栓塑性鎖付之最佳設計” ， 行政院國科會專題研究計畫成果報告 ， NSC-89-2212-E-212-002 ， 88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日。
- [33] M. G. Stout and P. S. Follansbee ， “Strain Rate Sensitivity ， Strain Hardening ， and Yield Behaviour of 304L Stainless Steel” ， Journal of Engineering Materials and Technology (Transactions of the ASME) ， ASME ， Vol.108 ， pp. 334-353 ， 1986.
- [34] J. C. Blake ， H. J. Kurtz ， “The Uncertainties of Measuring Fastener Preload” ， Machine Design ， Vol. 37 ， Sept 30 ， 1965 ， pp. 128-131.

自 傳

楊盛雄，中華民國五十七年出生於台灣省苗栗縣。畢業於國立高雄工專機械工程科機械製造組，並曾於台北科技大學學分班進修，累計了三十六個機械與自動化相關的學分。

在民國七十八年服役於陸軍裝甲旅，擔任少尉預官排長，民國八十年退伍後進入企業界服務。先在士林電機股份有限公司自動化部門擔任自動化機械設計工程師、主任工程師，前後一共九年，完成了許多各式各樣的自動化機器，所以累積了相當程度的機械設計實務經驗。之後轉職震波科技股份有限公司，歷經產品機構設計工程師，工程部門主管等職務，迄今為止。在此階段也獲得許多的機會，接觸各式各樣的加工及製造方法，得到許多產品設計相關的專利。

因為深感於機械知識領域的浩瀚及以往所學的不足，所以重拾書本，進入交通大學工學院精密與自動化工程研究所進修，在此學到機械更深一層的理論及知識。尤其論文撰寫過程中，不管是收集相關資料或實驗過程，對於相關知識均有深刻的了解，受益良多。

展望未來人生旅程，還有許多的挑戰橫亙於前，等待我去了解及突破。如同論文撰寫過程一樣，我相信只要方向正確，努力踏實一步步去做，總有完成之時。無論如何，我總是秉持著一顆不懈怠的心，向前而行，就如同我的座右銘一樣，希望能夠「我踏荊棘而去，必載滿月而歸」，過一個充實的人生。