

行政院所屬各機關因公出國人員出國報告
(出國類別:洽公)

六輕計畫：大型壓縮機維修技術
「離心式壓縮機乾式氣密軸封訓練」

服務機關:台灣中油公司石化事業部
姓名職稱:修護組轉動機械課 工程師 蕭建文
派赴國家:新加坡
出國期間:100年10月07日至10月12日
報告日期:101年12月05日

壹、摘要

壓縮機是化工廠的主要設備之一，其運轉順暢與否攸關整個工廠的生產量，若不能有效控制壓縮機運轉的穩定性，任何非計劃性的跳俾將導致工廠遭受巨大的損失。依TPM的精神，損失來源有人員、設備、與原物料。其中要以人員為最主要的影響因素，因此要保持壓縮機的操作穩定性、降低故障率，主要仍有賴於操作與維修人員的共同努力。就維修部門而言，如何降低壓縮機故障率的發生，其重點仍是按照原廠建議的維修手冊來完成相關的拆卸、整修、調整、組裝等。為了更進一步能了解壓縮機維修時的注意事項，有必接受原廠家之教育訓練。

中油第六輕油裂解工場由中鼎公司承包，由統包商向日本ELLIOTT EBARA Turbo machinery Corporation 採採購四組壓縮機，分別為裂解氣體壓縮機、丙烯冷凍壓縮機、雙冷媒冷凍壓縮機、汽油氫化裝置循環壓縮機，這四組壓縮機均採用日本JOHN CRANE T28AT TANDEM卡匣式的乾式氣密軸封(以下簡稱乾式軸封)。軸封對於壓縮機而言，是非常重要的一个構件，它界於製程氣與大氣之間。現今社會中，在越來越嚴謹的環保的法規要求下，它的穩定性就成為一個非常重要的因素。而此次出國行程，是乾式軸封的訓練課程，課程內容包括軸封的設計原理、乾式軸封的原理、控制系統、失效分析等，由JOHN CRANE所舉辦，英國總公司派員講解，上課地點位於新加坡。

貳、目錄

頁次

壹、摘要	-----	2
貳、目錄	-----	3
參、目的	-----	4
肆、過程	-----	5
伍、心得與建議	-----	28

參、目的

在環保意識抬頭的今日，如何提高產能又能兼顧環保要求，使得石化業面臨更嚴峻的挑戰。有效控制製程氣(液)洩露至大氣，對環保或甚至是工安要求上來說，是一項很重要工作。在化工廠壓縮機運轉操作中，製程氣與外界隔離方式，主要是藉由壓縮機軸封所產生的密封面，再加上一些輔助系統，將製程氣與大氣隔離，使製程氣洩露量得以控制在規範之內。本次參加強克乾式軸封之課程，乃為加強維修人員對於中油六輕工場所採用之壓縮機軸封相關知識，期能對日後維護工作有更進一步的認知。

- 一、機械軸封基本原理。
- 二、轉動環與靜止環材料。
- 三、研磨簡介。
- 四、乾式軸封基本原理。
- 五、乾式軸封機械構造配置。
- 六、乾式軸封控制系統。
- 七、JOHNCRANE TYPE 28。
- 八、失效分析。
- 九、乾式軸封測試概況。
- 十、乾式軸封分解及組合。

肆、過程

一、行程安排如下

101年10月7日：由高雄出發至香港轉機，飛抵新加坡。

101年10月8日：乾式軸封課程第一天，介紹軸封基本原理。

101年10月9日：乾式軸封課程第二天，介紹乾式軸封原理、製造、檢修過程。

101年10月10日：乾式軸封課程第三天，乾式軸封性能測試，失效分析。

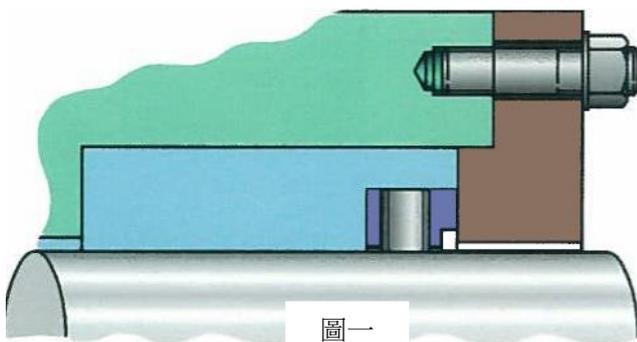
101年10月11日：乾式軸封課程第四天，乾式軸封拆解實務。

101年10月12日：由新加坡出發至香港轉機，飛抵高雄。

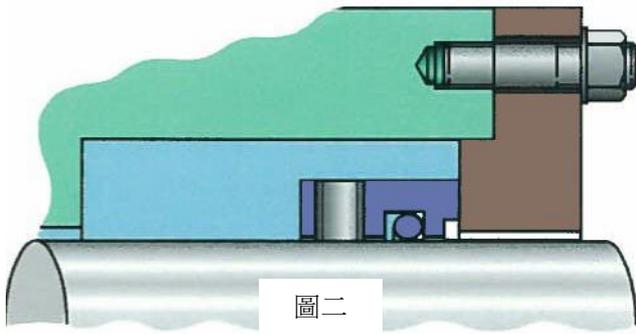
二、至強克公司受訓過程

第一天，介紹軸封基本原理。

機械軸封原則簡介



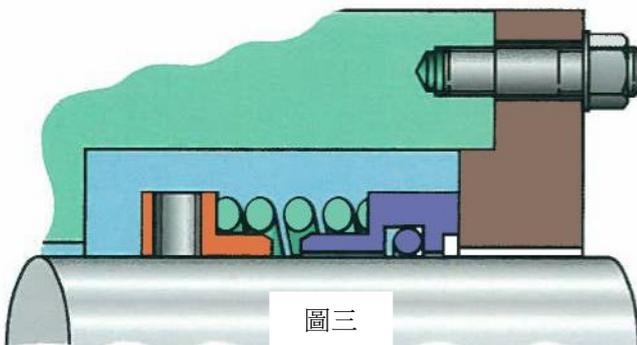
格蘭密封隨著時代的進步，其洩露量較大的問題，已不敷現代工廠使用，因此發展機械軸封。首先以下列幾張圖，來說明機械軸封的幾個主要構件之功能。如圖一表示，格蘭從填料函中移除，將格蘭壓蓋加工及拋光至非常平坦，接著用一個金屬環穿過軸與格蘭壓蓋接觸。形成接觸面來將製程液密封。金屬環被三個固定螺絲固定在軸心上。在其轉動前，我們可以從圖一看到製程液體將會沿著金屬環內孔洩露。



圖二

係，所產生軸移亦會導致洩露。

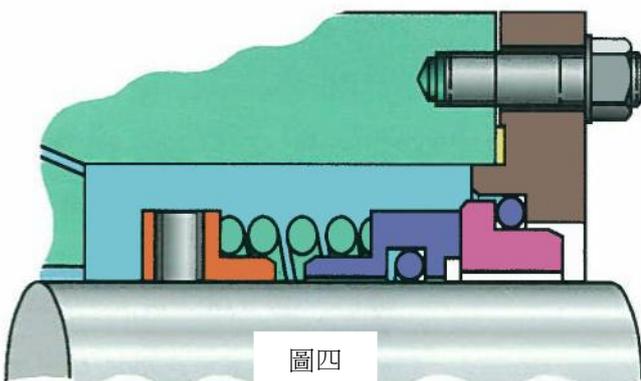
為了改善洩露問題，我們試著插入一些密封元件，如o-ring等，在金屬環內孔處。當軸開始轉動時，金屬環與格蘭壓蓋之間的接觸面會因磨擦而開始產生間隙，洩露問題又再次產生。除此之外，軸承間隙或是軸熱膨脹關



圖三

在這個例子中，先以單彈簧來說明。在加入彈簧裝置後，因磨擦產生之間隙或軸移所導致的洩露，將藉由彈簧力維持接觸面之密封，而消除該問題。但是，這仍然有以下幾個問題待改進。

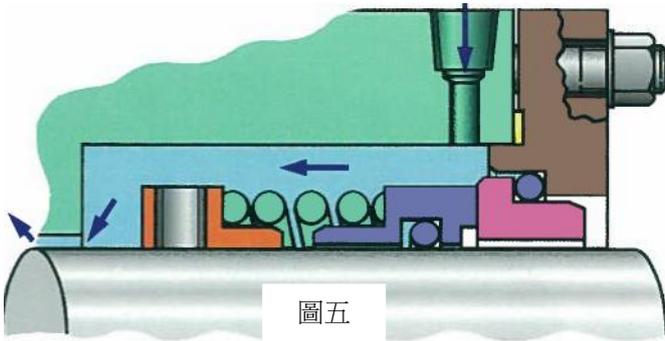
- 一、在接觸面上因磨擦所產生的熱要如何消除。
- 二、沿著填料函與格蘭壓蓋接觸之表面會有洩露之可能。
- 三、格蘭壓蓋這個元件頗大，在長時間磨擦接觸下，為維持密封面的光滑，經常需要更換，而這個大元件如果是由碳化鎢或碳化矽來製造，將非常的昂貴而不具經濟效益。除此之外，格蘭壓蓋鑽孔後，用螺栓鎖在填料函上，壓蓋之變形將會導致光滑的研磨面產生洩露之通道。



圖四

增加gasket或o-ring在格蘭壓蓋及填料函之間，以解決上述第二、三項所產生之問題，以防止洩露。至此磨擦所產生的熱消除問題尚待解決。在低負載的情形下，冷卻不一定非常需

要，因此” dead-end box”就運用上，如已知之API piping Plan 2。在這種情形下，氣體或水蒸氣將會被侷限在填料函之中，當轉軸開始轉動，在填料函中的流體亦開始轉動。因為流體比氣體來得重，當離心力產生時，流體會被推向填料函內外側，氣體在內側，造成磨擦面會有乾磨現象產生。雖然在填料函上鑽一個小通道，使氣體順著通道自動排出可以解決問題。但隨著負載增加，此種piping plan配置方式，將不敷使用。



圖五

以單軸封為例，製程流體從泵浦出口注入填料函之中再迴流至進口端，藉由流體循環將磨擦熱帶走。此時填料函內之溫度，大約是與泵液相同。但若是泵液溫度過高，將不適合使用。



圖六

確保piping配置進口端要儘量接近磨擦面，且兩側之壓力差不要過高，一般都會插入流孔板在此循環配置中。而流孔板插入之位置要儘量離填料函越遠越好，避免沖蝕現象產生。由圖六可看出，沖蝕所產生之情形。

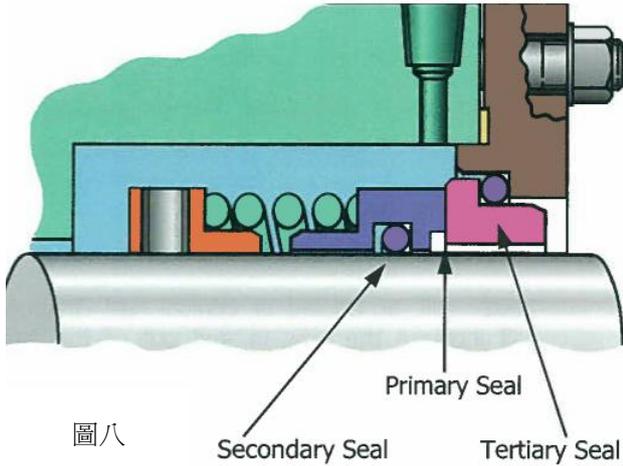


圖七

圖七顯示同樣之問題，不正確之piping plan配置位置。另外還有一個問題—過高的循環壓力，造成固體及磨擦顆粒。其解決之道：

1. 確保循環管線(flush piping)進口位置正確。
2. 使用流孔板在泵浦出口端之循環管線內。

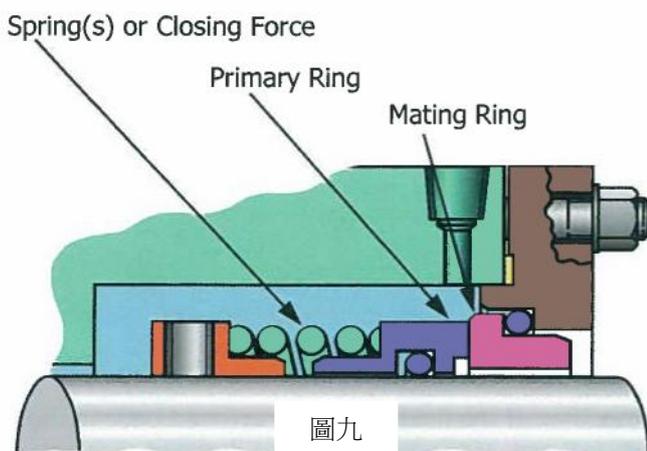
3. 在多級式泵浦中，從第一級或第二級截取循環液體(flush liquid)，不要在最後一級，讓壓力過大。
4. 使用切線方式的配置連接或用多孔式、分散式沖洗。
5. 檢查磨擦物質，了解原因，採取補救措施。



在機械軸封上，有三個主要的密封重點，不同廠家有不同之名稱，在此仍以JOHN CRANE自己定義為主。

1. Primary seal(主密封)：在primary ring及mating ring之間的接觸區域。
2. Secondary seal(次密封)：防止洩露穿過primary ring，沿著轉軸流出。

3. Tertiary seal(第三密封)：防止洩露從mating ring背後穿過。



主密封組成如下：

1. Primary ring：通常是二個運轉面中較軟的那一個(常見材料石墨)，它研磨過的運轉接觸表面，窄於mating ring。這元件最常被磨損，其磨損在一定允許值之內是可再利用。
2. Mating ring：通常是二個運轉面中較硬的那一個(常見材料碳化矽)，它研磨過的運轉接觸表面，寬於primary ring。

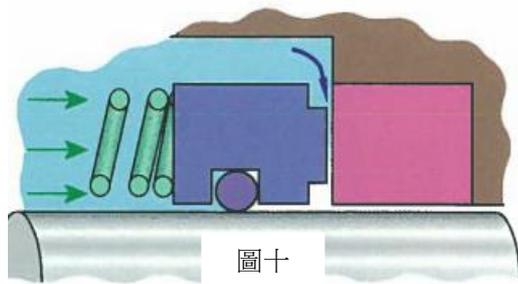
3. Spring drive：在某些軸封設計上，扭力是經由彈簧所傳遞的，而這些設計通常都只適用於單一轉向。依據不同的軸旋轉方向，挑選時需注意彈簧是右旋或是左旋。

4. 另有二個有關軸封的密封點需要注意：

A. 在格蘭壓蓋與填料函表面之間的GASKET或O-RING。

B. 如果轉軸上裝有軸套(SLEEVE)，一定會有某些形式的密封裝置在軸套的內緣，以防止洩露產生。

機械軸封原則-主密封介紹

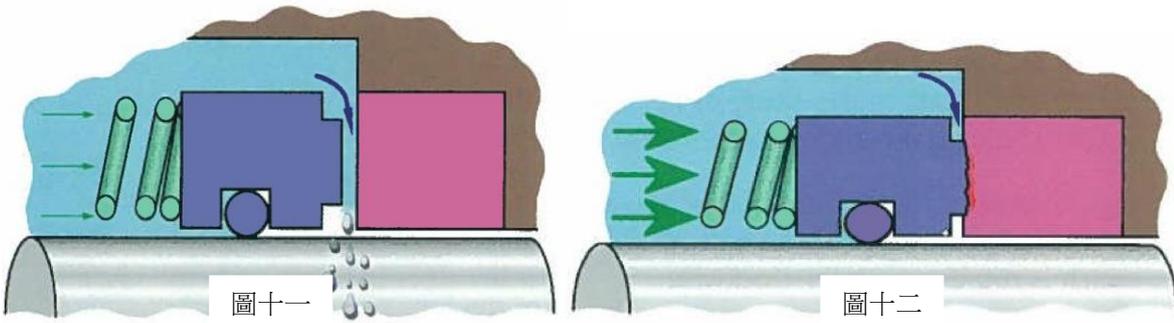


大多數的密封，較高壓力在於PRIMARY RING與MATING RING之接觸面的外側。這是為了被密封的液體壓力，加上彈簧力，要大於受製程液壓力而推開密封面的力。隨著壓力增加，閉合力也跟著增加，相反亦如此，因此

軸封可以自我調整。

如果較高壓力在其內側，閉合力就只能由彈簧產生。當液體壓力大過於彈簧的閉合力，其密封面就會產生大量洩露。反之，如果液體壓力太小於彈簧的閉合力，會產生額外的磨擦在密封面上。

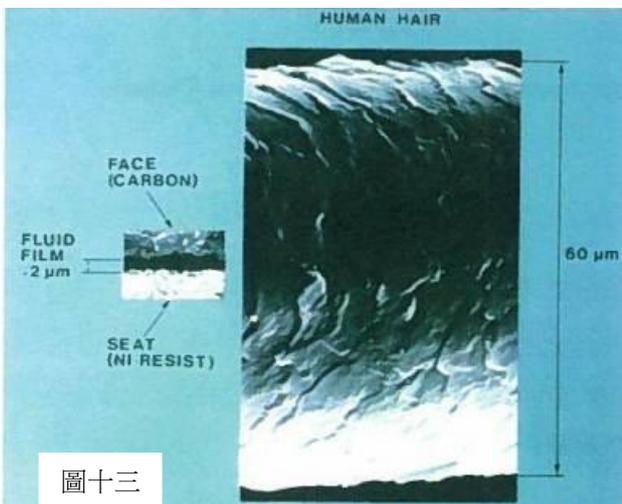
如果密封面沒有洩露，那在primary ring內側的壓力為零，該處密封面呈壓力梯度分佈。在密封面間的液體具有潤滑效果，而形成「主密封」構造。在任何時候軸封會呈現，「溼」式密封狀態。



在大多數的軸封設計中，最大壓力應該在密封面外側，且最小壓力（正常是大氣壓）在密封面內側。如果密封面的閉合力不足，其間隙會變成太寬而導致洩露產生。

很多因素會影響密封效果及密封面上所產生的熱量，以下列出幾點相關因素。

軸徑大小	轉速	製程液溫度
密封液特質	密封面加工	構件之材質
密封壓力	密封面接觸大小	



在密封面之間的潤滑液是一道非常細的薄膜，它通常大約在0.5~3microns的厚度之間。這裡將它與人類頭髮的厚度相較。雖然機械軸封會有洩露存在(如果沒有液體做滑潤，會造成乾磨)，但是我們一般都看不到洩露，因為它的量非常少，會隨其離開密封面時而蒸發。我們

可以藉由一密閉系統來測試在不操作條件下，其真實的洩露量。因為該液膜非常的細，所以要特別注意其接觸面的平坦度，以防止洩露的產生。而平坦度就要靠機械加工—研磨，來達成。

當密封液經過密封面，會發生下列二件事：

1. 填料函內的壓力降至與大氣壓力相同。

2. 密封面之間的液體薄膜溫度會因磨擦力及應力而上昇，真實上昇溫度是看製程條件，但是一般是約20°C上下。

舉例來說，水當泵液在90°C時，開始運轉後液膜溫度上昇至110°C，當壓力開始下降至大氣壓時，水會開始蒸發成水蒸氣，密封面會被快速推開。在這時候沒有磨擦力產生熱，洩露的泵液經過密封面會被冷卻至90°C，密封面又閉合回來，這種模式會反覆產生，因此而產生，振動、密封面的點蝕、爆裂、格蘭壓蓋沿軸徑會噴出蒸氣。當密封面被不均勻打開，primary ring轉動面外側會有缺口產生。

解決方式：在填料函內的液體溫度，要低於大氣壓下之蒸發溫度下20°C。以水為例，泵液溫度要低於80°C。最好冷卻填料函至65°C左右，以達到安全操作區域。

液壓平衡

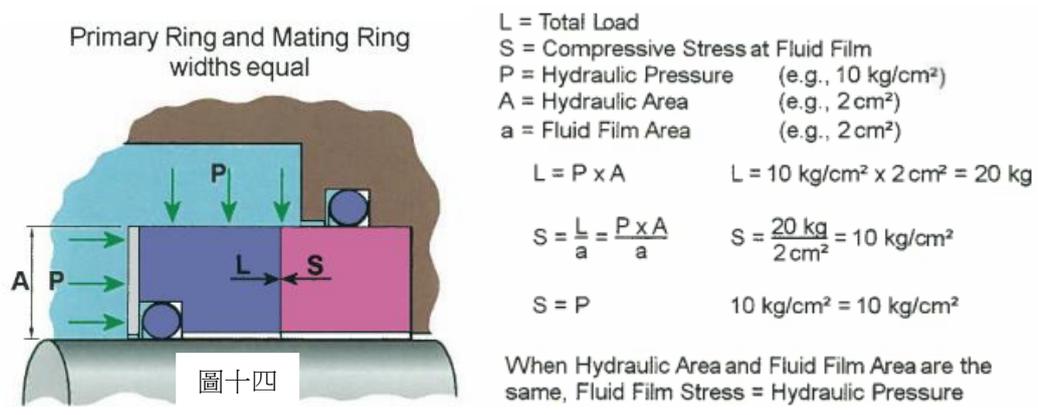
在填料函內有二種熱源：

1. 製程產品所產生。
2. 軸封自己產生。

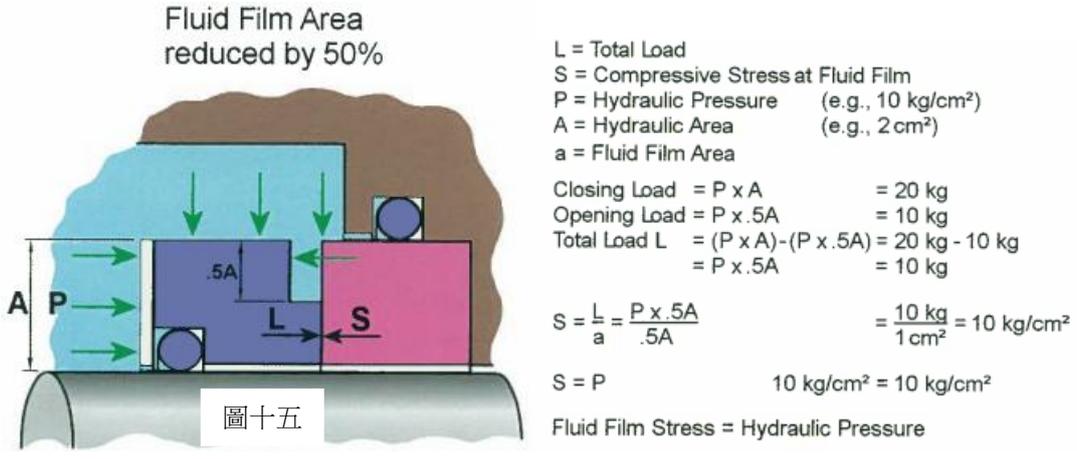
為了減少軸封磨擦所產生的熱量，需要辨識在軸封密封面上產生熱的因素有哪些。

軸封尺寸	轉速	密封液溫度	密封液的特性
密封面精細度	材料構造	填料函壓力	密封面接觸面積

其中軸封尺寸及轉速是固定不變，所能做的就是控制密封面這個區域。藉由「平衡」這個概念，軸封製造商要平衡密封面上的閉合力等於開啟力，達到既有液膜潤滑，又低洩露，讓軸封的使用壽命延長。這裡簡單介紹在密封上液力平衡的概念並看看如何藉由改變primary ring的形狀，來達到最佳的平衡關係。

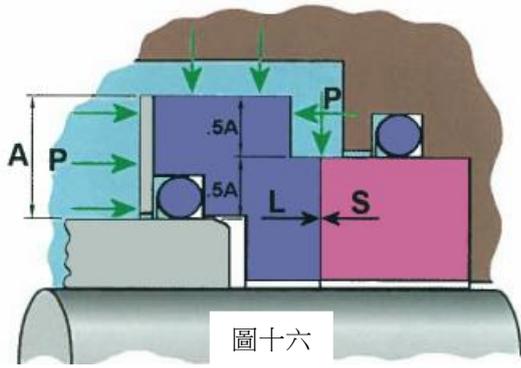


為了讓計算簡單化，在圖十四中，我們先忽略彈簧所產生的力。僅考慮填料函內的液壓。(要注意這種設計是要解釋軸封平衡概念，實際上並不存在。)當液壓區上的液體壓力作用在密封面上，液膜面積等於液壓面積時，液膜上應力等於液壓力。



在圖十五中，進一步加工primary ring的外徑，製造一小塊去負載區 (off-loading force)，產生大約抵消50%的閉合力。然而其液膜面積(密封面)也減少50%，因此液膜應力仍等於液壓力。另外，我們需要找到一種可以減低閉合力，而不減少液膜面積的方法。

Hydraulically Balanced Seal (50% Balanced)



L = Total Load
 S = Compressive Stress at Fluid Film
 P = Hydraulic Pressure (e.g., 10 kg/cm²)
 A = Hydraulic Area (e.g., 2 cm²)
 a = Fluid Film Area = A (e.g., 2 cm²)

Closing Load = $P \times A$ = 20 kg
 Opening Load = $P \times .5A$ = 10 kg
 Total Load L = $(P \times A) - (P \times .5A)$ = 20 kg - 10 kg
 = $P \times .5A$ = 10 kg

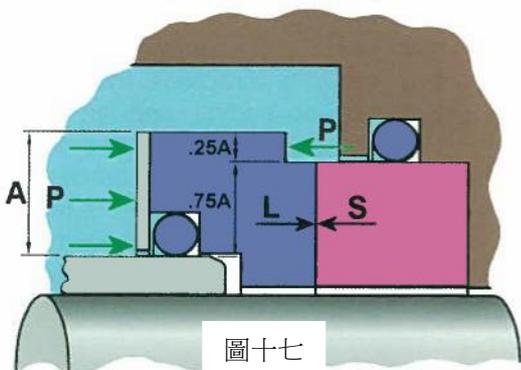
$$S = \frac{L}{a} = \frac{P \times .5A}{A} = \frac{10 \text{ kg}}{2 \text{ cm}^2} = 5 \text{ kg/cm}^2$$

$$S = \frac{P}{2}$$

Fluid Film Stress = Half the Hydraulic Pressure

保持原來的密封面面積，並引入一個臺階(step) 在primary ring之中，在這個例子中，我們可以安裝一個軸套(sleeve)在轉軸上，達到這種效果。現在可以維持閉合力及去負載力如原來之圖示，其總閉合力為原來之50%。現在液膜應力理論上來說是液壓力的一半。當液膜應力減少50%，密封面會變得不穩定，隨時會被打開而洩露。

Hydraulically Balanced Seal (75% Balanced)



L = Total Load
 S = Compressive Stress at Fluid Film
 P = Hydraulic Pressure (e.g., 10 kg/cm²)
 A = Hydraulic Area (e.g., 2 cm²)
 a = Fluid Film Area = A (e.g., 2 cm²)

Closing Load = $P \times A$ = 20 kg
 Opening Load = $P \times .25A$ = 5 kg
 Total Load L = $(P \times A) - (P \times .25A)$ = 20 kg - 5 kg
 = $P \times .75A$ = 15 kg

$$S = \frac{L}{a} = \frac{P \times .75A}{A} = \frac{15 \text{ kg}}{2 \text{ cm}^2} = 7.5 \text{ kg/cm}^2$$

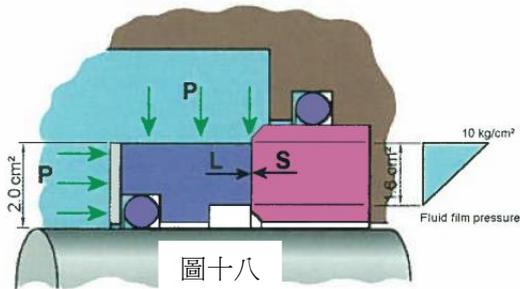
$$S = .75P$$

Fluid Film Stress = 75% of Hydraulic Pressure

軸封廠家對pusher-type所採用的液壓力平衡方式，一般是原來應力75%。對於一個平衡的pusher type軸封，必需採用有階的軸或是採用軸套。在很多的軸封設計中，「階」式設計內建於軸封的軸套上，例如：卡匣式軸封。

如果在密封面直徑外側高壓，75%的密封面積會在軸套直徑外側，且該軸套會內藏可滑動的o-ring，而該滑動直徑被稱為“平衡直徑”。

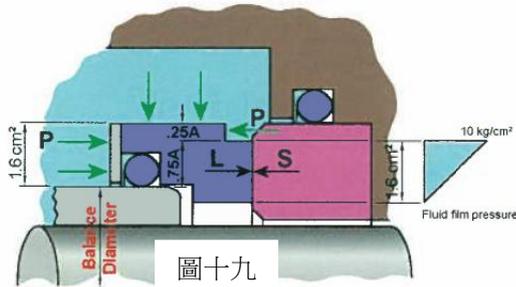
Typical Loading in an Operating Hydraulically Unbalanced Seal



$L = \text{Total Load}$
 $S = \text{Compressive Stress at Fluid Film}$
 $P = \text{Hydraulic Pressure} = 10 \text{ kg/cm}^2$
 $A = \text{Hydraulic Area} = 2.0 \text{ cm}^2$
 $a = \text{Fluid Film Area} = 1.6 \text{ cm}^2$
 $\text{Closing Load } (L_c) = P \times A = 10 \text{ kg/cm}^2 \times 2.0 \text{ cm}^2 = 20 \text{ kg}$
 $\text{Opening Load } (L_o) = \frac{P}{2} \times a = 5 \text{ kg/cm}^2 \times 1.6 \text{ cm}^2 = 8 \text{ kg}$
 $\text{Total Load } (L) = L_c - L_o = 20 \text{ kg} - 8 \text{ kg} = 12 \text{ kg}$
 $S = \frac{L}{a} = \frac{12 \text{ kg}}{1.6 \text{ cm}^2} = 7.5 \text{ kg/cm}^2$

Fluid Film Stress = approximately 75% of Hydraulic Pressure

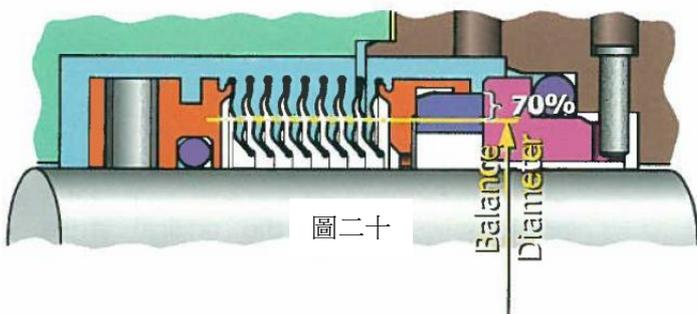
Typical Loading in an Operating 75% Hydraulically Balanced Seal



$L = \text{Total Load}$
 $S = \text{Compressive Stress at Fluid Film}$
 $P = \text{Hydraulic Pressure} = 10 \text{ kg/cm}^2$
 $A = \text{Hydraulic Area} = 1.6 \text{ cm}^2$
 $a = \text{Fluid Film Area} = 1.6 \text{ cm}^2$
 $\text{Closing Load } (L_c) = P \times A = 10 \text{ kg/cm}^2 \times 1.6 \text{ cm}^2 = 16 \text{ kg}$
 $\text{Opening Load } (L_{o1}) = P \times .25A = 10 \text{ kg/cm}^2 \times 0.4 \text{ cm}^2 = 4 \text{ kg}$
 $\text{Opening Load } (L_{o2}) = \frac{P}{2} \times a = 5 \text{ kg/cm}^2 \times 1.6 \text{ cm}^2 = 8 \text{ kg}$
 $\text{Total Load } (L) = L_c - L_{o1} - L_{o2} = 16 \text{ kg} - 4 \text{ kg} - 8 \text{ kg} = 4 \text{ kg}$
 $S = \frac{L}{a} = \frac{4 \text{ kg}}{1.6 \text{ cm}^2} = 2.5 \text{ kg/cm}^2$

Fluid Film Stress is approximately 25% of Hydraulic Pressure

圖十八、圖十九採用更接近真實的配置方式，來解釋pusher類型的軸封液壓平衡。液膜壓力也一併考慮進去。直接比較「非平衡」與「平衡」式primary ring。假設經過液膜的壓力是呈線性下降。如範例所示，可以看到「非平衡」式軸封的液膜壓力小於100%及75%「平衡」式軸封的液膜壓力，在這個例子中，平衡式液膜應力只有非平衡式應力的1/3。



金屬波紋管 (bellow) 軸封及彈性波紋管軸封，均不需階式設計在轉軸上，而能達到平衡。以金屬波紋管軸封來說，壓力作用在各個方向，其液壓在每圈波紋上前、後相對應。

有效的「平衡直徑」可以用下列公式來求得。

$$D_{\text{BALANCE}} = \sqrt{(0.5(OD^2 + ID^2))}$$

這個公式所找到的點，在波紋的兩側壓差為零。

第二天，介紹乾式軸封原理、製造、檢修流程。

乾式軸封簡介

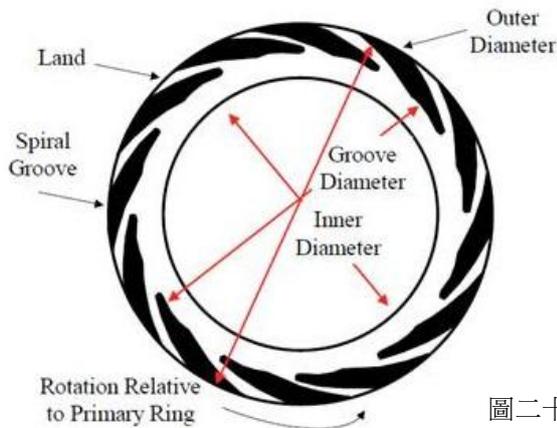
JOHNCRANE發展TYPE 28乾式軸封近三十年，為離心式壓縮機帶來革命性的改變。在1970年代中期，加拿大研究指出，在之前幾年壓縮機失效的原因有80%來自於密封油系統失誤的問題。在1976年安裝第一台TYPE 28乾式軸封，證實了非接觸式密封已解決了這個存在已久的問題。乾式軸封的發展現在更為成熟，已成為世界上眾多電廠及壓縮機使用。

乾式軸封優於溼式密封系統的要點如下：

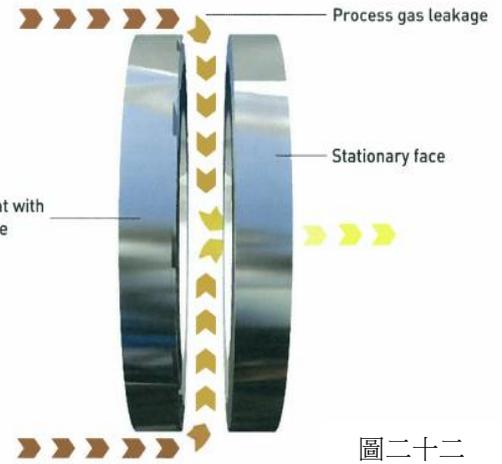
- 一、卡匣式設計：卡匣式設計的軸封，安裝相對簡單。
- 二、無磨耗：因為有一層薄薄的氣體薄膜在密封面之間。所以當轉軸旋轉同時，可以避免磨耗。
- 三、無滑油系統：在乾式軸封系統中，密封油系統被乾淨的密封氣供應系統所取代。其空間、重量及主要支出可以減少。乾式潤滑系統可以減少維修及去除潤滑油的使用。
- 四、低功率消耗：溼式潤滑密封普遍上，以液體黏度之剪應力吸收更多的能量。乾式軸封提供減少98%磨擦至幾近無磨擦之狀態，所以更省能源。
- 五、改善操作安全：取消溼式密封系統，移除與製程氣接觸之密封油，改善操作安全。

乾式軸封溝槽設計

Dry Gas Seal Spiral Groove Arrangement



圖二十一



圖二十二

在轉動環密封面上加工出螺旋狀淺槽，表面進行研磨、拋光處理。轉動環固定於旋轉軸上，當軸心轉動時，轉動環也跟著一起旋轉，而密封氣體沿著螺旋槽由外向內運動，進入螺旋槽內的氣體被壓縮，由於槽內氣體的壓力升高，在該壓力作用下，靜環密封端面被推開，因此轉動環和靜止環之間會形成一層很薄的氣膜。

在設計條件下，運轉中作用於乾式軸封上的力，可以概略以下表圖示之。閉合力是系統壓力作用於primary ring再加上彈簧力的總合。而開啟力是系統壓力再加上溝槽所產生的升力。

<p>Normal Operation Approx. Gap = 0.003mm</p>	<p>正常情況</p>
	<p>在正常操作情形下，轉動環與靜止環之間的氣膜間隙會維持在0.003mm上下，動態平衡。</p> <p>閉合力 = 開啟力。</p>

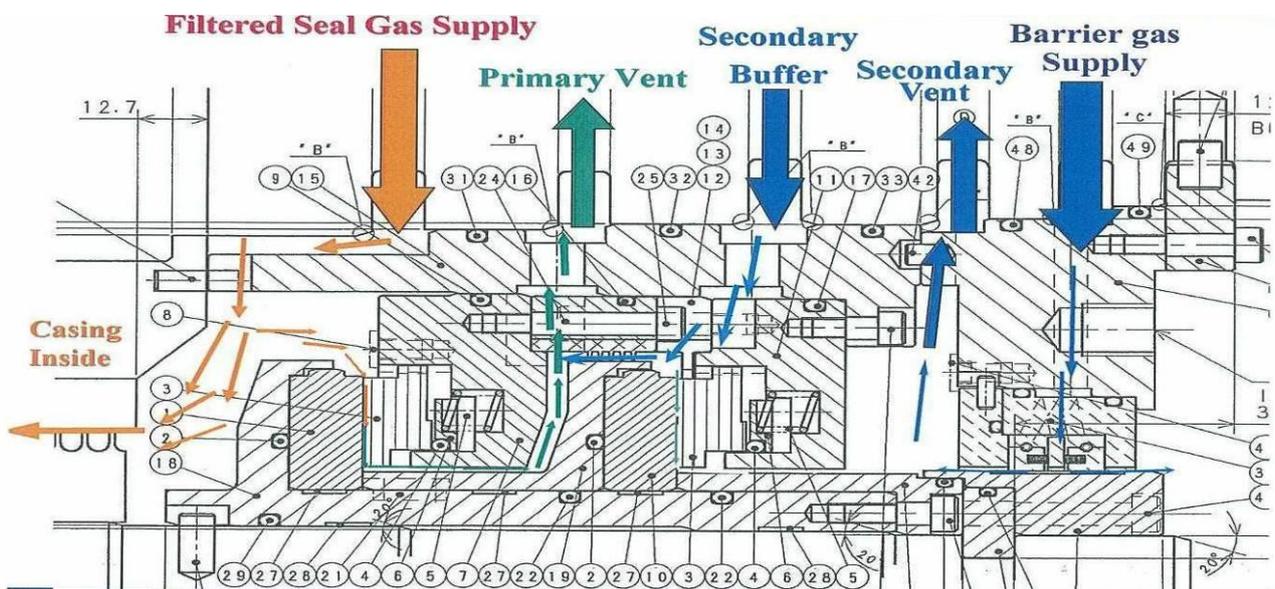
	<p>間隙大</p> <p>氣膜的開啟力變小。</p> <p>開啟力 < 閉合力。</p> <p>此時，轉動環與靜止環之間間隙逐漸變小，氣膜厚度亦減小。</p>
	<p>間隙小</p> <p>氣膜的開啟力變大。</p> <p>開啟力 > 閉合力。</p> <p>此時，轉動環與靜止環之間間隙逐漸變大，氣膜厚度亦增加。</p>

表1乾式軸封面作用力分析

JOHN CRANE 28AT TANDEM

以六輕乾式軸封設計為例，其採用JOHN CRANE 28AT TANDEM，其軸封佈置是二個密封面串列在一起，而採用這種佈置方式之優點是分擔密封負荷量或是當內軸封有洩露產生時，外軸封可當成隔離大氣與製程氣的備援裝置。處理非常高壓或對於安全非常要求情況下，可選用28XP高壓密封或3 TANDEMS，其2個內軸封可分擔密封負荷量，而外軸封當成備援裝置。不同的串列式乾式軸封，其密封面之間包含曲折密封(labyrinth)，在系統中會用氮氣來將洩露之製程氣體導入primary vent。以下概述乾式軸封內各通道的功能。

1. Filtered Seal Gas Supply: 在控制系統中，密封氣流經濾網及控制閥。氣體來源為壓縮機出口端製程氣或是採用氮氣等。
2. Primary Vent: 來自內軸封之主要洩漏，經此通道排出軸封外。而在控制系統中有流量計及流孔板的背壓來監控流量。透過洩露量趨勢的監控來預警軸封問題。
3. Secondary Buffer Gas Supply: 氮氣透過此通道注入在內軸封及外軸封之間，而氣體穿過中間的曲折密封(labyrinth)，來隔離內軸封的製程氣洩露並將此洩露之製程氣帶往Primary Vent。
4. Secondary Vent: 此通道是由分離氣(separation gas)-氮氣及少量經外軸封洩露的製程氣流往之處。
5. Barrier Gas Supply: 將氮氣注入此通道來防止潤滑油進入乾式軸封內部。此隔離氣在軸承滑油泵開始啟動前，在任何時候都要先提供。



圖二十三

第三天，乾式軸封性能測試，失效分析。

乾式軸封出廠前需要經過一道道的檢驗程序，不僅在製造過程對每個重要的工件需仔細檢查，另外在組裝完成後，亦會實施性能測試，以確保每個軸封都能在出廠前達到所需要的性能。而這一連串的檢驗程序都要花費人力、物力及時間來處理，因此乾式軸封的送修時間都很長，若買家沒有自存備品，相信有再好的技術支援都沒有辦法。因製程條件、裝機設備廠家的不同，每套軸封幾乎都是客製化處理，所以生產出來的乾式軸封均不相同，若重要的元件受損嚴重，只能重新製作，花費時間相當冗長。

以下簡略說明幾項檢驗過程。

一、現場實際測試配置：現場測試設備相當齊全，模擬壓縮機運轉狀況，包含時間、溫度、壓力、轉速、功率及洩露率等。依據API617試驗規範。

1. 超速試驗：在密封組裝之前，轉動面應經最大連續轉速的115%超速試驗。
2. 靜態試驗：把通過每個密封接觸面的壓力以至少四次增量增加到最大密封壓力，包括額定的密封壓力。把每個壓力保持在穩定狀態。

3. 動態試驗：

(一)在正常的密封壓力情況下保持密封氣體壓力、並以至少四次增量從零轉速增到至少為最大連續轉速。在每次轉速增量下記錄兩組數據。在穩定狀態。

(二)在正常的密封壓力情況下，以最高連續轉速的110%運轉15分鐘。

(三)在正常的密封壓力情況下，以最高連續轉速運轉60分鐘。

(四)把速度降到零，把壓力降到最小壓力。之後，增速到最高連續轉速。至少用四次增量把壓力增加到最大密封壓力。在每個試驗點上記錄下兩組數據。

(五)把壓力降到正常密封壓力，運轉15分鐘。

(六)把速度降到零。保持正常密封壓力，記錄下兩組靜態數據。

(七)在正常密封壓力下，對常規密封增加密封壓力，記錄靜態數據。

(八)逐漸把轉速增加到最高連續轉速，保持15分鐘，每5分鐘記錄一次。

(九)重覆七、八兩項至穩定狀態。

4. 目視檢查：檢查後拆卸密封，確保關鍵零件有配對標記。檢驗部件磨損及一般情況。記錄檢查情況，重新組裝密封。

5. 確認試驗：重新組裝之後，重覆七、八兩項，以驗收重新組裝的密封是否正確。

二、控制室導覽：在測試現場側邊有控制室，人員可以在控制室直接觀察現場狀況，並將現場溫度、壓力等訊號傳回控制室，由控制室電腦記錄相關數據。另外，在控制室外另有一間會議室。透過網路，顧客可以在會議室看到控制室內的數據。

三、控制面板：開始運轉前，檢驗各密封氣來源是否充足，並依檢驗程序作業。

四、測試狀態：現場測試軸封時，可從此處看出測試數據，並藉由電腦來記錄相關數據。與六輕控制室的HMI比較，較為簡單。

五、測試報告：測試過程由電腦記錄數據，並可列印相關測試報告。

六、溝槽深度測試：乾式軸封的核心技術在溝槽的形狀、深度的加工，而在現場未能窺見一、二，但是在檢測溝槽之方式倒能一覽無遺。實際檢驗如照片所示，使用精密儀器來測量溝槽加工的深度，並可在電腦上直接顯示檢驗結果。

七、平衡樞軸：用來檢驗軸封自身的動平衡。

八、研磨機：分溼式及乾式研磨機兩種。機械研磨方式研磨粉體時，於研磨過程中，粉體溫度將因大量能量導入而急速上升，且當顆粒微細化後，如何

避免塵爆問題產生等皆是機台難以掌控的。所以一般而言，乾式研磨的粒徑只能研磨到 $8\mu\text{m}$ 。如果要得到 $8\mu\text{m}$ 以下之粒徑，就必須使用濕式研磨。所謂濕式研磨即先將奈米粉體與適當之溶劑混和，調製成適當材料。為了避免於研磨過程中發生粉體凝聚之現象，所以需加入適當之分散劑或助劑當助磨劑。

九、光學干涉儀：干涉儀是非接觸式量測，可用來量測平面與球面光學元件的表面精度與曲率半徑，搭配電腦全像片（CGH）亦可以量測非球面鏡表面品質精度。干涉現象分為建設性干涉與破壞性干涉，因而產生明暗相間的干涉條紋，干涉儀的量測是透過待測波前與參考標準波前產生的干涉條紋的變形量或條紋分布來分析，干涉條紋的形狀、位置、間距和條紋的對比度，決定於光束在各點的光程差以及光波的光譜分布和光源的大小，因此可以應用條紋的分析處理得到待測物的相關訊息，例如表面精度及表面粗糙度等。



現場實際測試配置



控制室導覽



研磨機

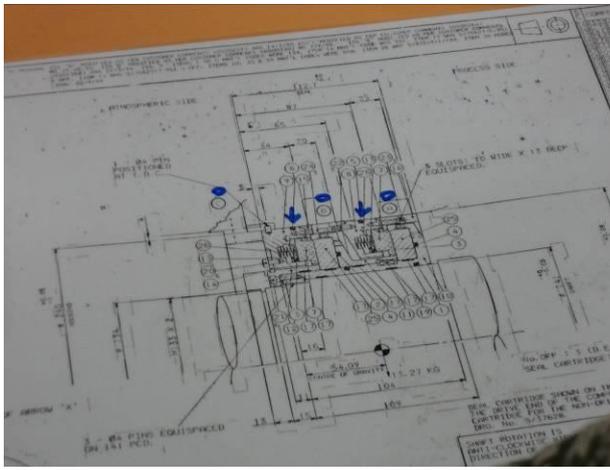
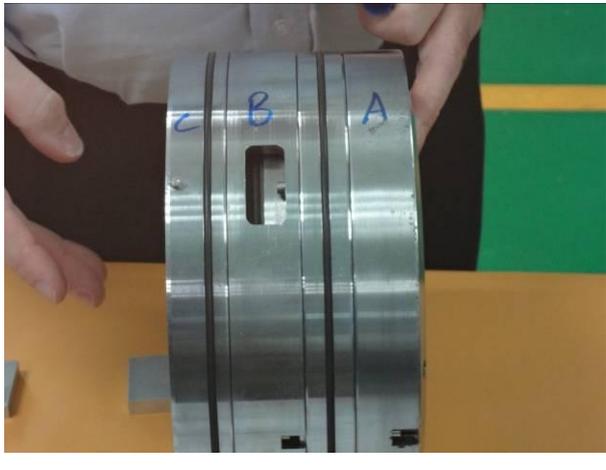


光學干涉儀

表2 乾式軸封檢驗、測試概況表

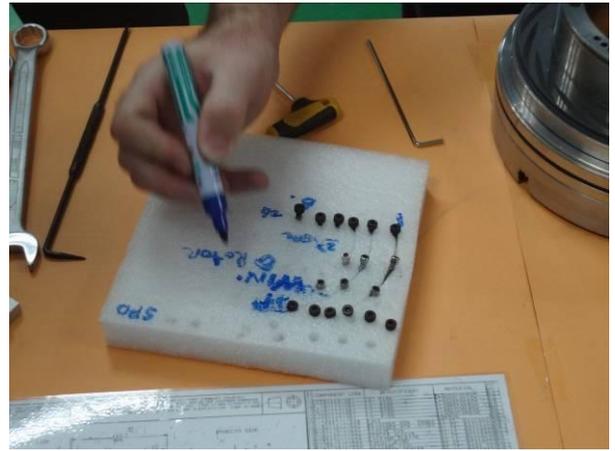
第四天，乾式軸封拆解與組裝，講解及實作。

乾式軸封拆卸及組裝過程並不複雜，從拆解後再組裝，學員大約花費四小時。先前的準備工作需要非常的充足，包含、環境的清潔、工具、圖件、清潔用品等。乾式軸封非常怕髒，與傳統溼式軸封不同，組裝過程不需要用滑脂或機油等潤滑，每個步驟都要用清潔劑將工件擦拭乾淨。在組裝過程需要按照圖面，檢查料件編號是否正確，避免誤用不同的材料。因為尺寸不符在組裝過程就會發現，但是材料確無法由外觀判定。另外與一般轉動設備不同的是，組裝過程要避免敲打，正常的安裝及拆解是不需要用到打擊的方式，同時也是避免密封受到損傷。細節部份要參考原廠的安裝手冊及其手冊內的注意事項。以下簡述拆解軸封過程中，幾個步驟。

	
準備工具及講解注意事項	測試軸封是否有異物卡死
	
圖件參照	標示區域



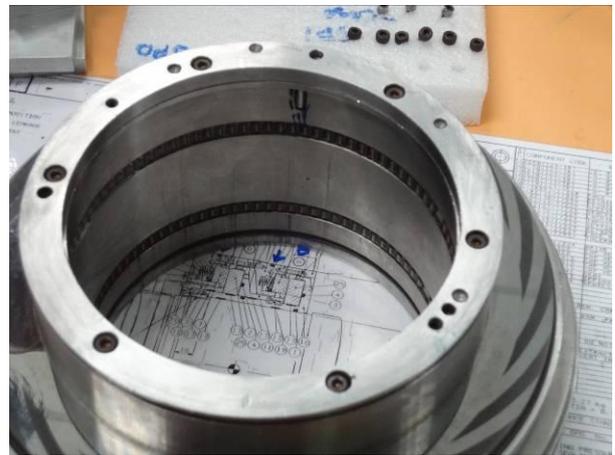
分層拆卸



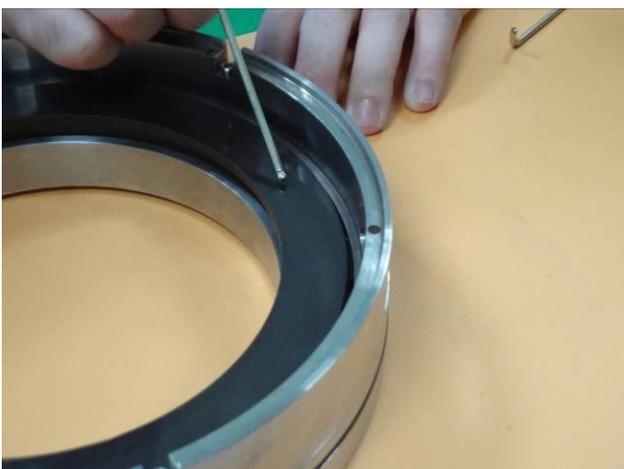
螺絲擺放整齊



外軸封狀況



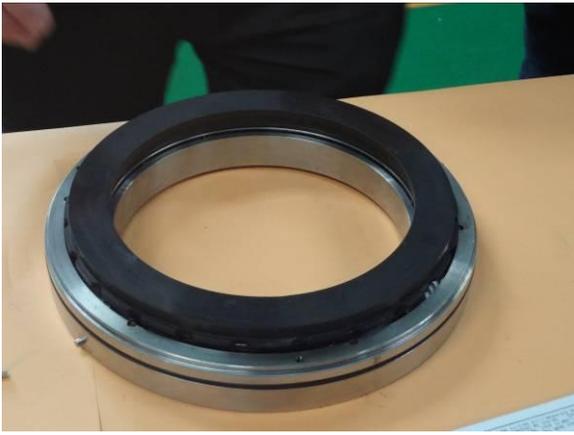
內緣定位環



檢查密封面



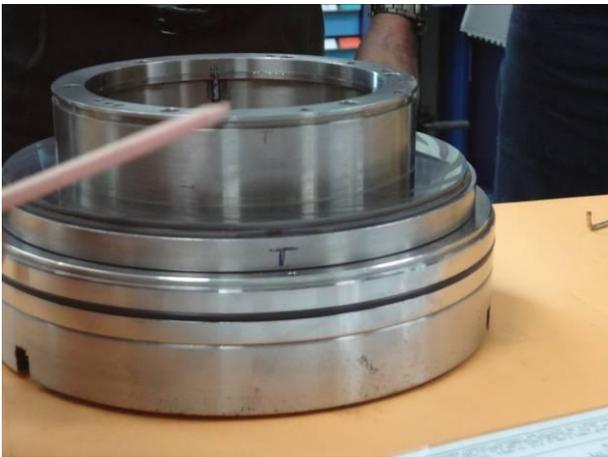
拆解內軸封



內軸封狀況



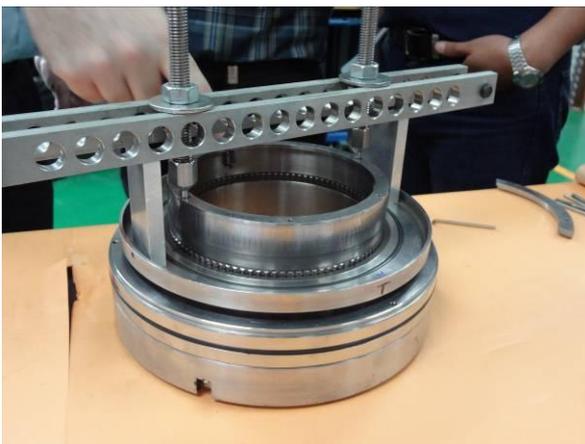
保持器及彈簧



Mark T，組裝定位記錄



拆卸內軸封保持器



特殊工具運用



定位環



元件標示序號、前次檢修時間



學員動手實作

伍、心得與建議

一、新加坡JOHN CRANE的佔地範圍不大，現場上課時只有一棟大樓，而大樓內的人力亦不多。該公司從軸封之設計、組裝、銷售、維修、物流等均可以在新加坡運作無礙。其佔地規模雖然不大，但產值卻很驚人，這要歸功於公司獨特的專利研發，讓其產品能夠有非常高的銷售利潤。這不禁讓我聯想到以製造為主的中油公司，長期生產石化原料、燃料用油等附加價值低，但其支出成本卻很高的情形下，只能靠薄利多銷。甚至可能因為原料採購成本控制不佳或產品市價不振的情形下，面臨虧損銷售情形。往高附加價值的產品研發與製造，是中油公司在永續經營的理念之下，必需踏出的一步。

二、該棟大樓主要負責產品為乾式軸封，廠區內乾淨、明亮、整齊，公司之5S非常落實。以組裝區為例，雖然組裝過程所用的工具不大，但每個工具都能整齊的排列在桌上，甚至連小至拆解過程中的一根螺絲都能用點巧思將其收納完整，按順序編號。等換好備件，開始組裝時，不會找東找西。另外在組裝前就將相關圖件放置在桌上供參考，並於組裝前再次確認材料編號與圖件是否相符，確保安裝正確性。這種要求細節的施工步驟，非常值得轉機工作人員借鏡。

三、在大樓內進出人員雖然不多，但是進入該棟建築物中，都需要刷卡管制，尤其是進入辦公樓層更再加設一道。員工在現場進進出出，都是卡不離身，在人員管制上非常的嚴格，可藉由刷卡系統來找出人員、進出時間、進出地點等。該公司對於軸封研發設計是不遺餘力，因此重視商業機密的外流就顯得格外重要。相比較之下，在林園廠各大樓中，經常看到代理商、設備商、承攬商等非員工之人到處走來走去。若巧遇有辦公室因人員在外處理事務而空著，相信這時管制作為就能發揮作用。

四、這個課程有實作教學，在自己動手做的同時，才體會知易行難這句話。在課堂上老師濤濤不絕的講授有關軸封理論、舉出失效案例、組裝注意事項等，但到現場實際操作的同時，這些似乎都不存在似的，在我的腦海中已經

將課程的內容忘的乾乾淨淨，接下來只能靠平時在現場接觸軸封的經驗來回應。這讓我聯想到技術人才的培養要從日常作業中一步一腳印的累積經驗，無法單純從課程的教授來栽培出優秀的技術人員，然而受限於中油公司人才招募方式，專業技術人員無法直接以高薪聘請，只能透過聯合招考取得，人員雖不乏高學歷者，但還是仍須多年的培養。因此人員的訓練就顯得格外重要，相信這件事執行狀況將影響未來轉機課工作推動順利與否。

五、新加坡官方語言採用英文，在當地看到無論多小的孩子，溝通都是用英文，無形中與國際接軌的語言障礙就不存在。在工廠設備的技術文件中，大多數以英文撰寫而成，英文解讀能力成為研讀技術文件的關鍵因素。此外外籍技師蒞臨公司，溝通順暢與否也是與英語脫不了關係。因此提升個人的英文能力是刻不容緩的事。不僅是個人要提升英語學習，若在公事處理上亦能用英文來表達，不論是e-mail、公務通知、會議等，相信時間一久會有潛移默化的效果。另外，在網路、手機、平板電腦發達的現今生活中，好好利用這些設備來增加英文能力，相信是省時又省事的一種學習方式。