

真空元件與封合技術

一典型的真空系統是由許多次系統及元件所組合，常用的次系統包括真空腔體 (chamber)、真空計 (vacuum gauge)、真空幫浦 (vacuum pump) 等，聯結這些次系統成為系統則需依靠管件、法蘭、O 型環、墊圈、真空導引 (feedthrough)，以及各式閥門與附件等。本文旨在介紹真空元件與封合技術，針對各式真空封合、閥門、引入，及其它附件之真空性能與注意事項，提供讀者進行真空儀器系統設計時之參考。由於真空元件種類繁多，本文僅就常見元件做原則性介紹。

陳峰志、張嘉帥

一、前言

從國內科技發展趨勢，應用真空儀器設備進行新興材料合成與分析之研究，或是炙手可熱的半導體與平面顯示器製程，均大量採用真空儀器設備。不管是進行真空設備的研製或是真空系統的維護，都必須對所使用元件與材料之真空性能有相當的了解，才能確保系統性能，進而提昇實驗或產品之可靠度與生產效率。

在建立真空系統時，通常會選用各種不同的材料與元件，除了必須考慮物理、化學、機械、電性與熱等一般應用相仿的材料性能之外，仍需考量元件的真空性能，例如氣密性、氣體分子滲透率、逸氣率及材料蒸氣壓等。組合系統時，為了達到合格的真空性能，必須設計適合的腔體，並選用適當的

幫浦、管件、閥門與封合材料，如圖 1 所示為組成一真空系統所需各次組件與元件之魚骨圖，本文依元件種類介紹真空封合、閥門、引入，以及其它附件之真空性能與注意事項，提供讀者選用之參考依據。由於元件眾多，其性質與規格無法逐一介紹，讀者若需更深入探究其性質，可詳閱材料和元件產品型錄或書籍，本文僅就概略性原則做介紹。

二、真空封合

真空設備為了隔絕大氣，各零件管路或子系統間之連接處、電源訊號引入及機械運動之傳動、觀察窗、閘門等，皆需有可靠的封合，其密封品質是真空系統性能良窳之重要指標，本文將整理封合相關知識與技術。真空封合通常可分為可拆卸封合和不可拆卸之永久封合 (如鐸接)，其中可拆卸封合又可區分為靜態封合和動態封合。使用真空封合材料考慮的因素包括：系統壓力、溫度、材料滲漏 (permeation)、材料逸氣 (outgassing)、材料蒸氣壓，以及封合預壓等，正確的密封機構設計，並選

陳峰志先生為國立成功大學機械工程博士，現任國家科學委員會精密儀器發展中心副工程師。

張嘉帥先生為國立清華大學物理博士，現任工業技術研究院光電研究所經理。

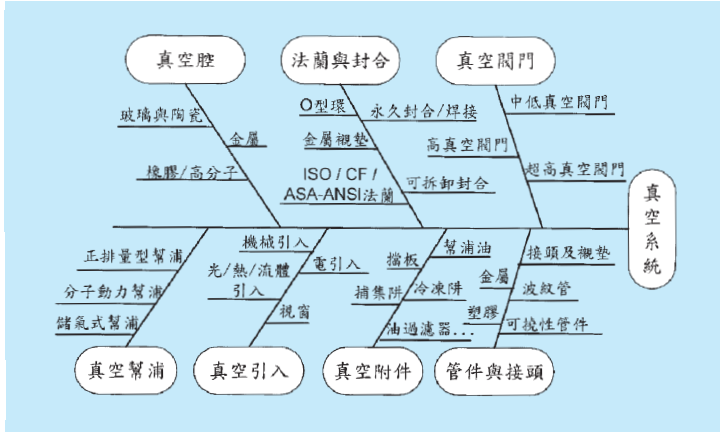


圖 1. 真空系統組成魚骨圖。

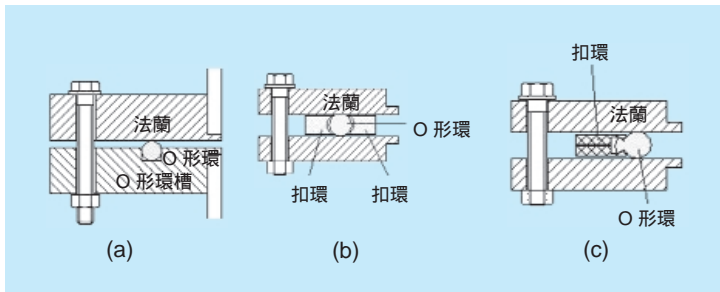


圖 2. 法蘭與 O 型環所組成之可拆卸真空封合。

擇適當的封合材料，始能達成預期的真空性能。靜態封合是指連接之管路或腔體無相對運動之封合，而動態封合則是連接之零件間有相對運動的條件下所做的封合，是真空系統機械引入 (mechanical feedthrough) 元件中重要的封合設計，在此先行討

論系統之靜態封合與永久封合，動態封合將於「真空引入」中一併討論。

1. 可拆卸靜態封合

對於低真空和高真空系統，且系統溫度不超過攝氏二百度者，一般採用高分子材料 O 型環 (O-ring)，或是鐵弗龍墊圈做為密封材料。超高真空系統由於逸氣率的限制，且需要烘烤，因此一般採金屬墊圈做為密封材料。一般的靜態接合常用法蘭以及 O 型環或墊圈 (gasket) 達成真空封合。就真空實務而言，O 型環及法蘭等均屬標準規格品，進行系統設計及組裝時，O 型環及法蘭零件之特徵尺寸，必須以手冊或元件供應商提供之型錄所記載圖面為依據。

O 型環封合為可拆卸封合最常使用方式，其截面一般為圓形或是矩形，主要作用是靠法蘭平面對 O 型環的擠壓，利用其塑性填補法蘭表面不規則之細微結構，其彈性並可維持一定的封合壓力。其封合方式又可分為定變形封合 (constant deflection seal) 和定負荷封合 (constant load seal)。如圖 2 為常見典型法蘭與 O 型環封合的方式，圖中 (a) 為具 O 型環槽之法蘭接合；(b) 及 (c) 均為平面法蘭，其間以固定器使 O 型環保持在特定的位置。一般而言，如 (a) 之 O 型環槽，依環槽之斷面幾何形狀，又可分為矩形環槽及梯形環槽等，其特徵尺寸一般在設計規範^(1,2) 中均可以找到，表 1 整理幾種常見的 O 型環槽之特徵尺寸，可供讀者參考，相關計

表 1. 法蘭 O 型環槽之特徵尺寸。

特徵尺寸					
A	$1.15d$	$1.4d$	$1.4d$	$0.9d - 0.95d$	d
B	$0.72d$	$0.7d$	$0.7d$	$0.75d - 0.8d$	$1.15d - 1.3d$
R	$0.15d - 0.22d$ 圓角磨光 $R_a < 1.6 \mu m$	$0.15d - 0.22d$ 圓角磨光 $R_a < 1.6 \mu m$	$0.15d - 0.22d$ 圓角磨光 $R_a < 1.6 \mu m$	$0.15d - 0.22d$ 圓角磨光 $R_a < 1.6 \mu m$	$0.15d - 0.22d$ 圓角磨光 $R_a < 1.6 \mu m$

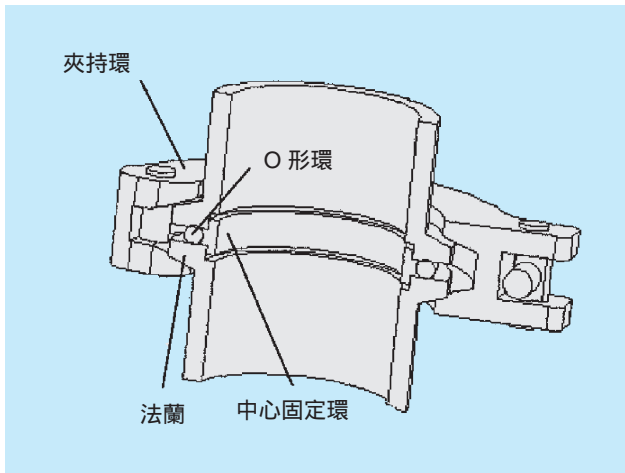


圖 3. KF 法蘭封合結構示意圖。

算法則可參考設計規範或型錄，設計時仍需依照型錄提供之法蘭細部尺寸為主，在連接管路時最常使用此類 O 型環。最常採用的夾持方式是如圖 3 之 KF 法蘭，其特徵尺寸係依據 ISO 2861/I⁽³⁾ 之規範。另外在管路接合亦常採用如圖 4 以螺絲迫緊方式，利用鎖緊螺帽迫緊密封環，進而擠壓 O 型環，達到封合及快速組裝及拆卸的目的，其特徵尺寸係依據 ISO 2861/II⁽⁴⁾ 之規範。

O 型環材料為高分子彈性材料，適用於中低真空系統以及不需烘烤之高真空系統之封合，有部分材料，如 Viton，可以烘烤至約 200 °C 仍保有不錯的真空性能，當需烘烤超過 200 °C 以上之超高真空系統，真空度至 10^{-8} Torr 以下時，乃採用金屬墊圈做為封合材料，其滲漏及逸氣規格亦較高分子材料之 O 型環佳，可以維持較好的真空度。金屬墊圈材質為軟質金屬，同時需考慮金屬材質之滲漏及逸氣，一般採用無氧銅 (oxygen-free high conductivity copper, OHFC)、鋁、銀及金等，另外鋼則因熔點太低，適用於低溫的系統，如冷凍幫浦之真空封合與熱傳導。金屬墊圈封合對法蘭表面之粗糙度要求較高，一般要求在 $R_a < 0.6$ mm。金屬墊圈封合的方式有：平面封合 (planar seal)、角封合 (corner seal)、階梯封合 (step seal)、卡環封合 (wheeler seal)、矩形墊圈封合 (coined gasket seal)、刀刃封合 (knife edge seal) 及斜楔法蘭封合 (conflat flange seal) 等。其中以如圖 5 之刀刃封合及圖 6 之斜楔法蘭封

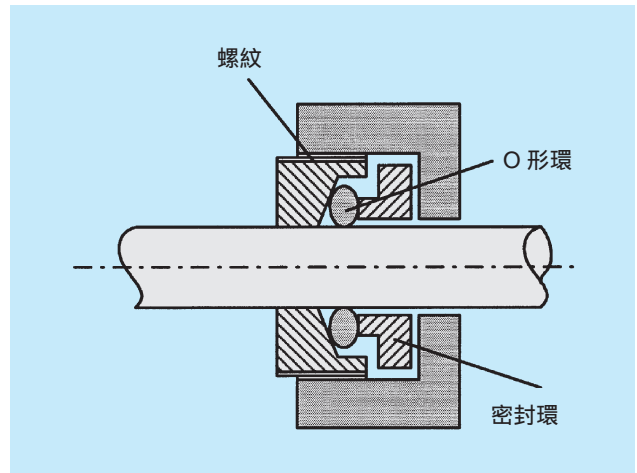


圖 4. 管路之錐形壓縮封合。

合最為常見。

不管是高分子封合材料或是金屬墊圈，常用法蘭組成封合機構，法蘭尺寸需依標準規範⁽³⁻⁶⁾，產品型錄中亦提供詳細尺寸可供參考。另外有適用於小尺寸管路之 VCR 接頭及 Swagelok 接頭均是真空系統中常見的標準元件，其封合材料亦使用金屬墊圈或是鐵弗龍墊圈。表 2 整理最常見的三種法蘭，分別有 ISO 法蘭、CF 法蘭、ASA-ANSI 法蘭，並比較其特性及適用之場合。法蘭通常以銲接接合於真空系統腔體、玻璃觀察窗或元件上，通常以熔接 (welding) 或硬銲 (brazing) 於腔體或管路元件上，銲接方法與所使用材料相關，並在銲接後確實測漏。在組裝真空系統時需注意法蘭清潔及組裝之要求，組裝前須以丙酮擦拭封合面，所使用的布料或紙須為無塵無線頭的材質。通常金屬墊圈只可使用一次，若墊圈或 O 型環非新品亦須以丙酮擦拭清潔，再小心組合墊圈與法蘭。組裝時以螺帽和螺絲鎖緊，螺帽先由對角順序鎖上，再依序加緊扭力逐一鎖緊，務必進行重覆三至五次以上方可均勻地封合，必要時可以使用扭力鉸手確使鎖緊扭力平均，並利用厚薄規 (thickness gauge) 測定兩法蘭之間隙是否均勻。鎖緊法蘭所用螺絲應與法蘭使用相同材料，以避免因為溫度變化時，不同的膨脹造成鬆動和漏氣，所使用材料通常為 SUS 304 不銹鋼。而螺帽處可以塗上硫化鉬做為高溫潤滑劑，以防螺牙咬住不易拆卸。組裝過程中，應逐一測漏，並正確

地防漏及堵漏，以確保系統之真空性能。

2. 永久封合

永久性的封合是以銲接接合真空系統管路元件、腔體、玻璃觀察窗，或引入絕緣封合等，銲接的方式可分為熔接、硬銲、軟銲 (soldering)，以及玻璃或陶瓷與金屬之接合，銲接方法與所使用材料相關，需考慮接合材料之可銲性與銲料之滲漏率及逸氣等真空性能，並在銲接後確實測漏。使用於真空系統結構及元件之銲接的方法有氬銲、電弧銲、電子束銲接、電阻銲接及冷銲等⁽⁶⁾，其中較為常見的有氬銲、電子束銲接以及硬銲等。

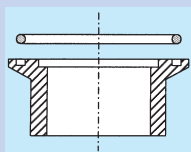
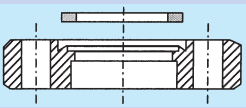
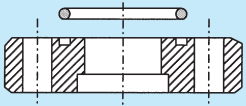
氬銲為電弧銲的一種，在銲接的過程中以氬氣作為保護銲縫的氣體，其熱源集中，熱影響區比較小，工件變形小，可以得到較佳的氣密性和機械強度。氬銲適用於銲接高強度合金鋼 (如不 鋼)，難熔和化學性質活潑的金屬及其合金，在真空設備中常見的超高真空不 鋼腔體、管路閥門、波紋管接頭、法蘭接頭、Kovar 合金與陶瓷封接等均適合以

氬銲接合。

電子束銲接是在真空環境下，電子束從電子槍發射，在 20 kV 至 300 kV 電壓加速下，通過電磁透鏡聚焦成高能量密度的電子束，當轟擊工件材料時，電子的動能轉化為熱能，使銲區的局部溫度升高到 6000 °C 以上，使材料熔接。其能量密度比氬銲大，熱影響與變形也比較小，銲接工件之真空性能與機械強度比氬銲好。其缺點是設備複雜，銲接工件大小受限於電子束銲接系統之真空腔尺寸，成本也較高。電子束銲接適用於鎢、鉬、鉭等難熔金屬，耐熱合金及其它強化合金，以及活潑金屬及其合金之接合，亦適用於接合金屬與陶瓷或厚度相差懸殊的工件。

硬銲和軟銲是以熔融的銲料填滿接合材料間隙，銲料與工件材料間擴散形成固溶體，使工件銲接封合的方法。硬銲和軟銲的區別在於銲料熔點與材料之再結晶溫度之比值，一般來講硬銲銲料之熔點在 450 至 500 °C 以上，其接合強度較高，軟銲銲料之熔點在 450 至 500 °C 以下，接合強度不如

表 2. ISO 法蘭、CF 法蘭及 ASA-ANSI 法蘭之特性。

法蘭種類	適用系統	特 性
 <p>ISO 法蘭</p>	<p>中低真空系統及無需烘烤之高真空系統 (壓力大於 10^{-8} Torr 之系統使用) 使用 Viton O 形環烘烤至 200 °C，操作溫度可達 150 °C。</p>	<p>高分子封合材料 O 形環，可重覆使用，可以使用固定中心環和平面法蘭或在法蘭上以環槽固定 O 形環，組裝拆卸快速、成本較為經濟。 組裝時可使用真空油脂輕輕塗覆 O 形環，可以提高封合性能。 小管徑使用夾緊環 (hing clamp)，手動鎖緊即可，較為方便，大管徑則使用緊固扣環 (claw clamp)。</p>
 <p>CF 法蘭 (conflat 法蘭)</p>	<p>超高真空系統封合 (壓力小於 10^{-8} Torr 之系統使用)。 可使用金屬墊圈及 Viton O 形環，若使用 Viton O 形環可烘烤至 200 °C，操作溫度可達 150 °C。</p>	<p>金屬墊圈封合材料以及 Viton O 形環，封合滲漏很微小。法蘭刀口及封合面的尺寸精度及表面粗糙度要求高。需依要求進行清潔與螺絲組裝程序。</p>
 <p>ASA-ANSI 法蘭</p>	<p>中低真空系統及無需烘烤之高真空系統 (壓力大於 10^{-8} Torr 之系統使用) 使用 Viton O 形環可烘烤至 200 °C，操作溫度可達 150 °C。</p>	<p>高分子封合材料 O 形環，封合效果較 ISO 法蘭佳。可熔接或硬焊於腔體或元件需依要求進行清潔與螺絲組裝程序。</p>

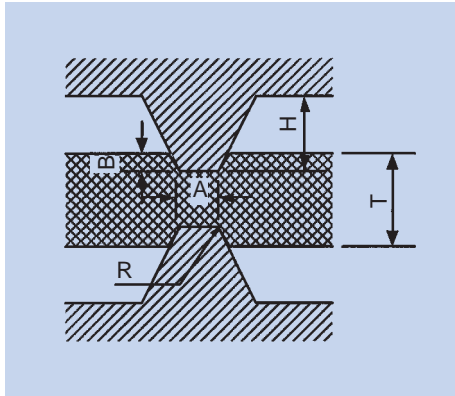


圖 5. 金屬墊圈刀刃封合結構示意圖。

硬鐸。由於軟鐸所使用鐸料真空性能不佳，只有在半永久性封合的考慮時使用，一般多採用硬鐸做為永久封合。硬鐸特別適合於相異材料之接合，如陶瓷與金屬之接合，鐸料必須適合真空用途，其蒸氣壓要低，因此不宜使用含有汞、硫、銻、鉛、鋅、鎘、鉀、硒、鈉、磷、鎂、鋇、銻、鉍及鈣等元素的材料。另外考慮陶瓷玻璃與金屬之鐸接，由於鐸接材質之熱膨脹係數差異頗大，應慎選鐸料，最常見的是使用 Kovar 合金做為鐸料。

由於理想的鐸接必須注意鐸道需完全穿透，儘量以單邊鐸接，而鐸道必須在真空側，同時避免包陷氣體產生氣泡增加逸氣的機會。若考慮接合的強度必須使用雙側鐸接時，必須保證內側不滲漏和逸氣。最好使鐸道可以分別測漏，而不互相干擾，以便於抓漏和堵漏，圖 7 為真空用途之鐸道與鐸接方式示意圖。永久封合之真空系統鐸接工藝有別於一般機械工件鐸接，特別是材料之封合效果、蒸氣壓、滲漏、逸氣，以及氣體包陷等，是真空永久封合之主要考慮因素，工件與鐸料之清潔亦是施工實務必須注意的問題。

三、真空閥門

真空閥門主要功能為可開閉氣體管路，調節或是隔絕真空系統內氣體之流通，圖 8 是依據 ISO 真空技術圖示規範⁽⁸⁾ 所整理各式真空閥門之圖示符號，工程師應依照共同認定的圖示規範進行真空系統設計。對於真空閥門，必須要求其氣密性，不論

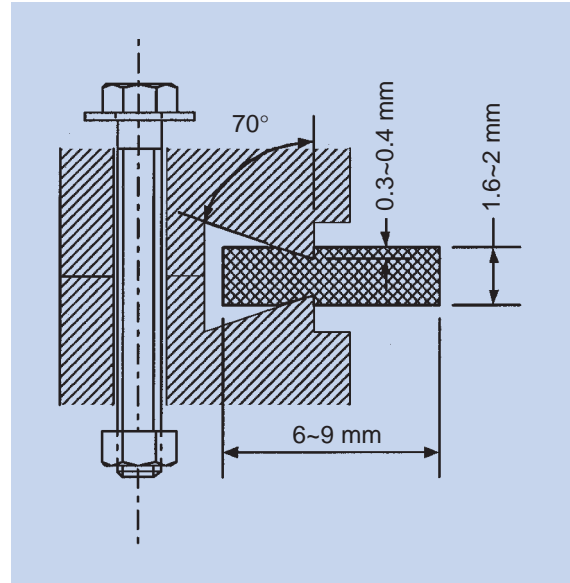


圖 6. 金屬墊圈斜楔法蘭封合結構示意圖。

是操作閥門以及保持閥門開或閉時，均不可發生洩漏；閥門所使用材料應不易吸附氣體分子或是逸氣；動態封合零件之耐磨性要好，能反覆使用；閥門管路設計應使其氣體阻抗為最小；若是超高真空系統所使用閥門，還得使用可加熱烘烤的材質。真空閥門依其形狀構造、操作原理及用途分類，種類繁多，若依系統真空度需求，又可分為中低真空閥、高真空閥及超高真空閥，表 3 依真空閥門之工作特性、驅動、聯結方式和用途，分類整理常見的真空閥門⁽⁹⁾。

真空閥門之基本結構包括活動桿 (stem)、閥帽 (bonnet)，以及閥體 (valve body) 三個部分，活動桿是閥門的機械引入運動操作機構，閥帽則為活動桿導接頭及其真空動態封合機構，閥體內含管路及閉合機構，並以法蘭與真空系統結構或管路接合，接合部分以 O 型環或金屬墊圈達到真空靜態封合。閥帽與閥體封合機構與所使用材料，與系統真空度需求以及管路氣體相關，在中低真空系統可以使用鑄銅、鐵或鋁材閥體，並以高分子彈性 O 型環做為真空封合；在高真空系統可以使用黃銅或鋁材閥體，以青銅製波紋管 (bellow) 做為操縱桿之動態封合；由於超高真空系統常需烘烤，一般採用全金屬閥門，使用不銹鋼做為閥體，由金屬墊圈做靜態封合，並以不銹鋼或 Inconel 合金波紋管做為操縱桿

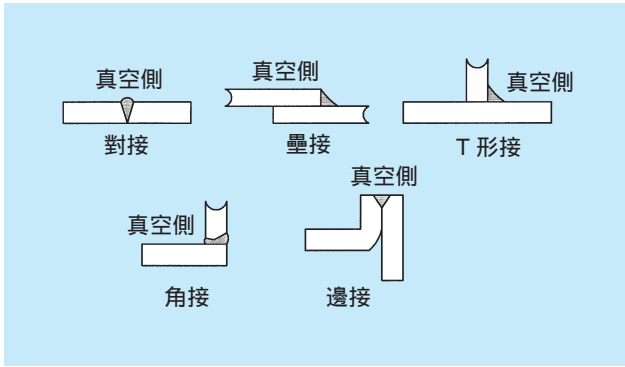


圖 7. 真空永久封合銲接形式。

表 3. 真空閥門分類。

分類依據	閥門名稱
工作壓力	中低真空閥、高真空閥、超高真空閥
用途	截止閥、隔絕閥、放氣閥、節流閥、換向閥、封閉送料閥
驅動方式	手動閥、電動閥、手電兩用閥、電磁閥、氣動閥、液壓式真空閥
材料	玻璃龍頭閥、金屬真空閥
結構特點	擋板閥、翻板閥、蝶閥、連桿閥、隔板閥、閘閥、雙通閥、三通閥、四通閥、直通閥、角閥

之動態封合，具有最佳的真空封合效果與最低的材料逸氣。

真空閥門可以依其形狀構造、操作原理及用途等來分類，首先依據用途可分為隔斷閥 (isolation valve)、閘閥 (gate valve)、進氣閥 (gas inlet valve)，以及節流閥 (throttle valve)。隔斷閥主要是用來阻絕或導通管路、真空幫浦、真空計或真空腔室等，其隔斷必須能克服封合時兩邊的壓差，常見的有盤閥，或是球閥，盤閥之進氣口和出氣口可以在一直線上，亦可垂直，垂直者稱之為直角閥 (right angle valve)；而球閥亦可以做為選擇導通多重管路，成為三通或多通閥門。閘閥可以阻絕或導通氣流，並可以通過物體，因此其通導較大且多為直通，其結構緊密，氣導最佳，常見的閘閥機構有翻板閥 (flap valve)、蝶閥 (butterfly valve) 及滑動閘閥 (sliding gate valve)，如圖 9 所示。閘閥全開時氣流阻抗很小，一般作為真空腔室通樣品取換室之閘

門、真空系統各分段間之閘門，或是真空腔室與高真空幫浦 (如冷凍幫浦、渦輪分子幫浦或擴散幫浦等) 間之閘門。通常閘閥的體積和重量都很大，進行真空系統設計時必須考慮閘閥之重量及操作空間。進氣閥之功用為將氣體從外界引入真空系統中，通常要求必須能調整氣流通量，如圖 10 之薄膜真空閥 (diaphragm valve)，可藉由調節螺絲控制氣流通道的大小。若進氣閥之氣體氣流通量不大者稱為漏氣閥或微漏閥門 (leak valve)，可保持定量氣體進入真空系統中，常見於濺射、活性蒸鍍及分析儀器中。節流閥具調節流量之作用，其機構常使用針閥 (needle valve)，如圖 11 所示，微漏閥門亦常使用針閥機構，使用時必須注意避免用力過當造成損壞，主要用在調節抽氣速率，以控制系統之真空度。其它特殊用途者如可快速關閉閥門⁽¹⁰⁾ 係整合壓力感測器 (pressure sensor) 及控制單元 (control unit)，可以在數毫秒內快速關閉閥門，以避免大氣突入，以保護系統，常於貴重儀器中使用。

若依真空度需求區分為粗抽及前級閥門、高真空閥門，以及超高真空閥門。前述之盤閥及球閥，常用於粗略真空或是粗抽管路連接幫浦與真空腔室，以隔絕或導通氣流。閘閥則常用於真空腔室與高真空幫浦之間，其封合朝向真空側，可避免於拆卸高真空幫浦時讓閥門本體吸附氣體。除此之外，依系統真空度需求，必須考慮所使用閥體、閥塊及

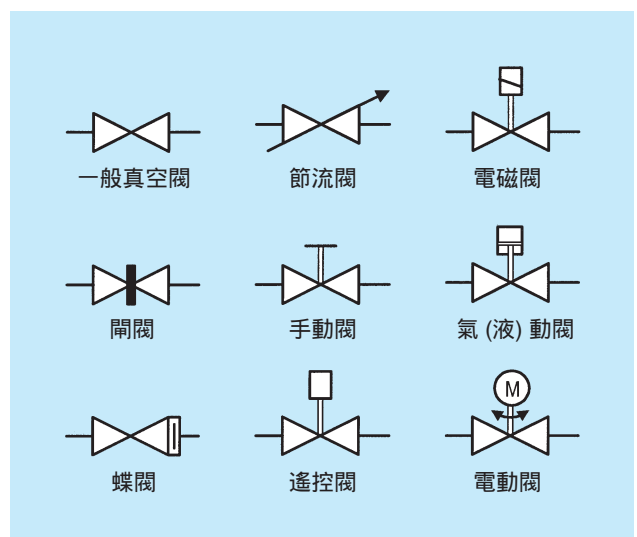


圖 8. 真空技術用閥門符號。

其封合之材料。選用真空閥門時氣密性及氣導為真空閥門最重要的性能規格，其性能檢測系統⁽¹¹⁾如圖 12 所示，系統係由機械幫浦、真空閥門、管路、輔助氣室、盲板、針閥、真空計、擴散幫浦等所組成，其中之洩漏率檢測系統(圖 12(a))可以由氦氣質譜儀測漏或是以正壓法量測閥門洩漏性能，氣導檢測系統(圖 12(b))則可以量測閥門氣流通路之氣導或氣體阻抗。而閥門之尺寸參數包含閥門與管路接合之法蘭公稱尺寸 (normative demensions)、氣流通道標稱直徑 (normative diameter) 及操作方式，亦屬真空系統設計之重要考慮因素。

四、真空引入

真空引入作用是將真空系統外部之電、流體、溫度、光或機械動作等傳送入真空腔室內部之裝置，並要求良好的氣密性，不可因機械動作或溫度變化而發生洩漏。目前較常見的真空引入裝置有機械引入 (mechanical feedthrough)、電引入 (electrical feedthrough)，以及流體引入，本文將分別介紹。至於溫度引入及光傳導引入較不多見，則不在本文討論之範疇。

1. 機械運動引入

引入可簡單區分為直線運動 (linear motion) 引入、旋轉運動 (rotation) 引入，或是線性運動和旋轉運動耦合之螺旋運動 (screw motion) 引入，其最重要的性能要求為動態封合 (dynamic seal) 之氣密性。機械運動引入允許導桿與真空腔體間之相對運動，而仍能保持系統之真空封合，不致在導桿與器

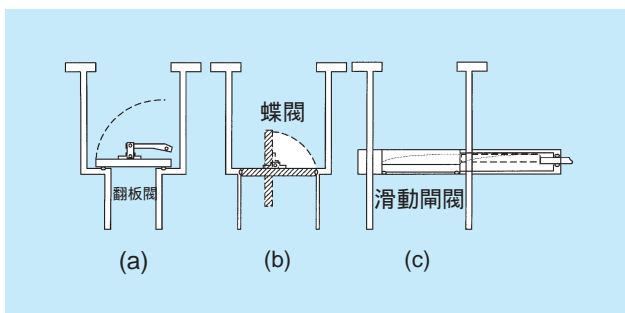


圖 9. 閥門結構示意圖。

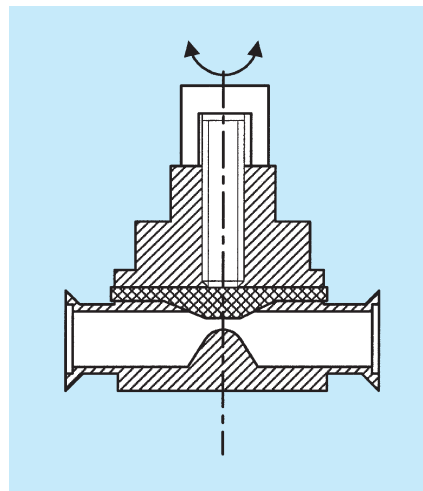


圖 10. 薄膜真空閥。

壁間發生洩漏，在真空閥門中之操縱桿及其封合亦可視為機械運動引入的裝置。機械引入動態封合可以使用 O 型環、墊圈、波紋管、磁性流體軸封或是磁力耦合 (magnetic coupling) 傳動。如圖 13 所示為四種常見的機械運動引入之動態封合機構。其中以波紋管氣密效果佳，且可烘烤，為超高真空系統所採用，至於磁力耦合傳動可將真空側與非真空側隔離做間接傳動，不需另做封合以防止洩漏，惟需注意磁場干擾對系統的影響。除了氣密性能之外，輸出軸之荷重能力、定位精度、驅動裝置及控制亦為機械運動引入裝置所需考慮的規格。

機械運動引入之動態封合機構是利用 O 型環，可使用一個或是二個以上的 O 型環，O 型環上均勻塗覆真空油脂、機械幫浦油或擴散幫浦油，進行動態封合，所塗覆的真空油脂可以確保氣密性，亦可潤滑機械運動所造成的摩擦。使用 O 型環之動態封合適用於壓力不低於 10^{-6} Torr 的設備，以及相對運動速度較低的機械引入，一般要求軸與孔表面之平移相對速度不超過 0.2 m/s，其工作溫度介於 -25°C 至 80°C 。兩個 O 型環之結構較能確保氣密性，且可保持軸的準直性能，惟在二個 O 型環間易殘存氣體，影響動態封合的性能，可在 O 型環之間開孔抽除其間殘存的氣體，以確保動態封合的效果，如圖 13(a)；亦可使用鎖緊螺帽和間隔環迫緊 O 型環，參見圖 4，可以增加氣密的效果，同時也增加了摩擦力，不適於高速的機械運動傳動。O

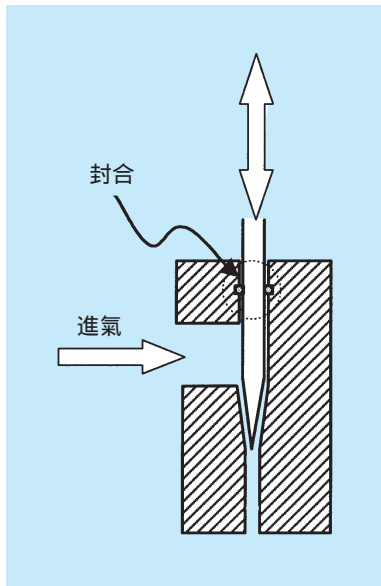


圖 11. 針閥結構示意。

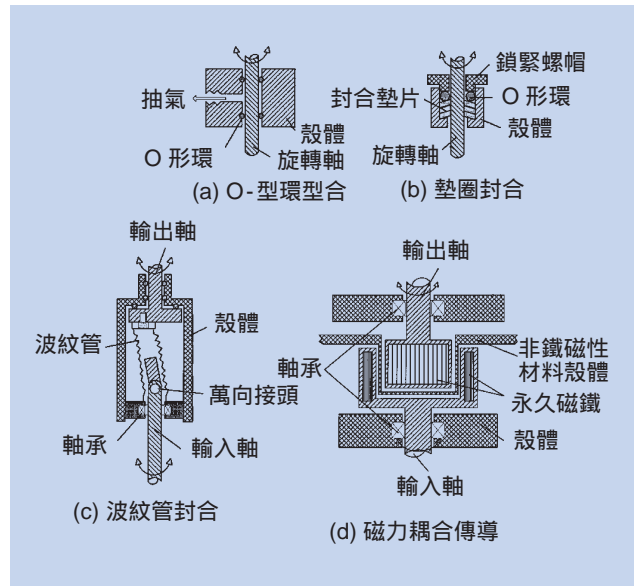


圖 13. 主要之轉動機械運動引入之封合機構。

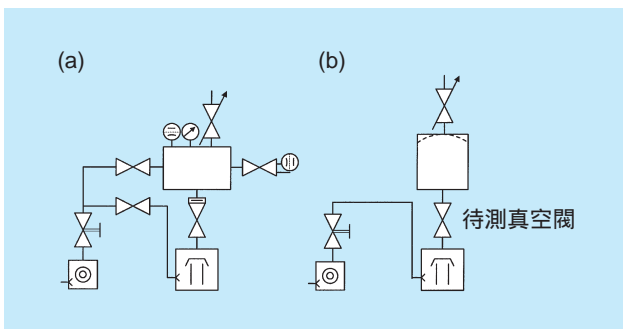


圖 12. 閥門真空性能檢測裝置，(a) 真空閥門洩漏率檢測裝置，(b) 真空閥門氣導檢測裝置。

型環槽之位置可於軸上或是孔壁上開槽，在軸上開槽之加工較為簡單，但在軸平移距離較大時則應於孔壁上開槽，同時在未開槽一側之 O 型環迫緊封合處，表面加工必須平滑無刮痕。

引入亦常見以墊圈做為動態封合的威爾遜密封 (Wilson seal)，如圖 13(b)，墊圈孔呈唇狀迫緊軸的表面，所以亦稱唇封 (lip seal)。一般墊圈內徑約為軸徑之 0.65 至 0.8 倍，軸徑尺寸公差需依墊圈型式與尺寸決定，通常在墊圈型錄或設計手冊^(12,13)會記載公差建議值。墊圈材料常使用橡膠材料，高轉速機械運動引入則使用鐵氟龍或金屬墊圈，墊圈孔緣和墊圈之間亦需塗覆真空油脂、機械幫浦油或擴散

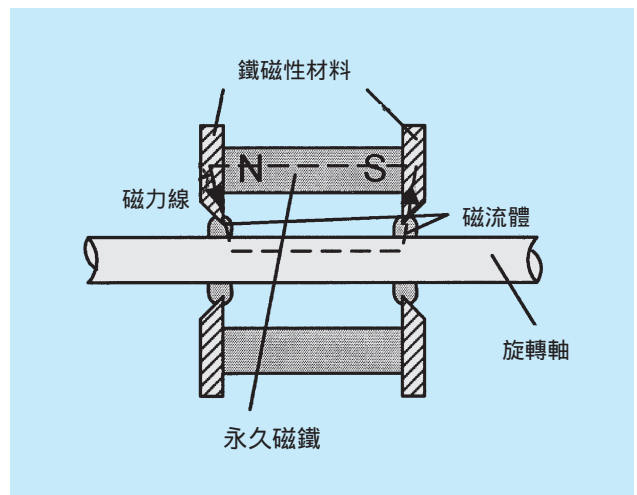


圖 14. 磁流體軸封結構示意圖。

幫浦油，做為潤滑以及確保氣密性能。以墊圈做動態封合適用於壓力不低於 10^{-6} Torr 的設備，外部為大氣壓力時，其相對運動平移速度不超過 2 m/s，或是旋轉速度小於 2000 rpm。

超高真空系統之機械運動引入則採用波紋管做為動態封合，如圖 13(c)，波紋管具有相當的撓性，可伸縮和彎曲，用在超高真空的波紋管係由許多的不銹鋼薄片銲接或擠製成型而成。一般而言，應用於直線運動引入之波紋管之軸向伸縮行程約可

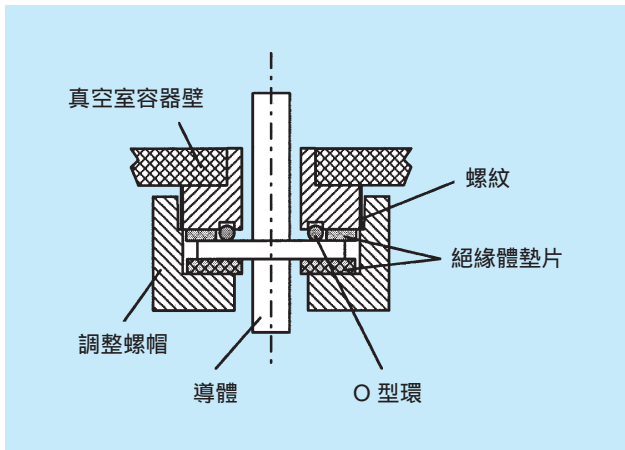


圖 15. 可拆式 O 型環墊片電引入結構。

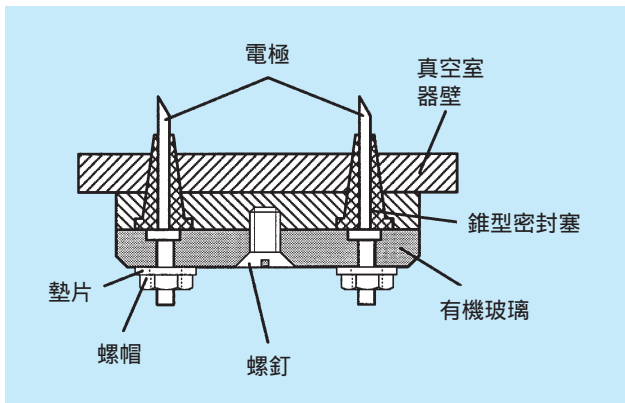


圖 16. 固定式低電壓小電流電引入結構。

達波紋管長的百分之二十至三十，若應用於旋轉運動引入時則通常採如圖 13(c) 之設計，使其銲接於萬向接頭 (universal joint) 或歐丹聯結器 (Oldham coupling)，並包覆傳動桿而非直接銲接於輸入或輸出軸，超高真空閥門之封合亦屬此類動態封合。

如圖 13(d) 為利用旋轉磁場傳動，真空側與大氣側以非導磁材料隔離，可避免機械運動引入處之洩漏，若結合磁浮軸承 (magnetic bearing)，可以得到相當高轉速的機械運動引入，此類設計亦可見於魯式幫浦之傳動軸聯結器⁽¹⁴⁾。1960 年代 NASA 發展出磁流體 (magnetic fluid)，並應用於高速旋轉軸封，亦可做為真空系統機械運動引入之動態密封。磁流體是由磁性微粒、承載液體及表面活性劑 (surfactant) 構成，當磁場磁力線通過流體時，磁性微粒能均勻地懸浮於承載液體中。如圖 14，當極

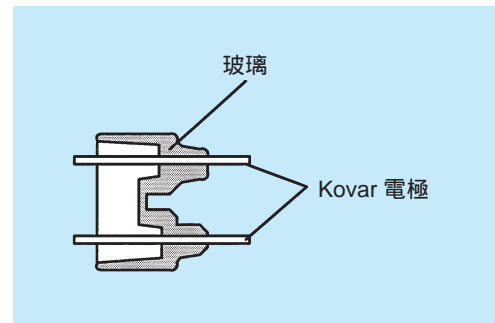


圖 17. 玻璃 / 金屬封接雙蕊電極。

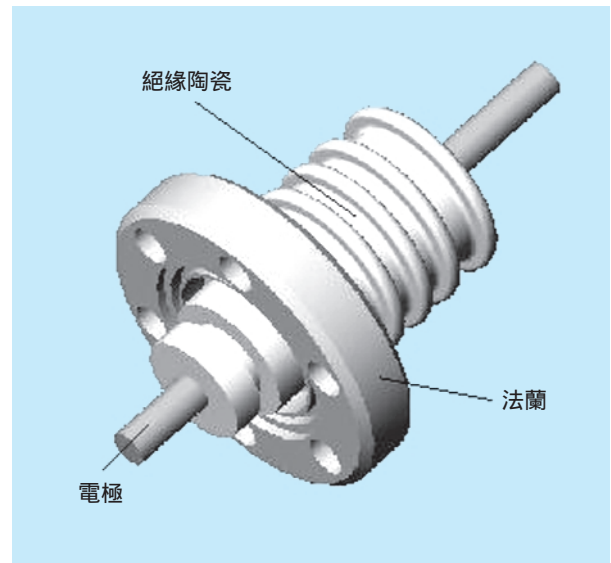


圖 18. 高電壓 / 大電流陶瓷絕緣電導引外觀示意。

片與旋轉軸間隙填滿磁流體時，會在永久磁鐵、極片、磁流體及旋轉軸間，形成一封閉的磁力線迴路，由於極片上尖齒強化了磁場的效應，磁性微粒在間隙中排成一層均勻的阻隔層，堵住流體通路以達成密封的功能。使用磁流體做為機械運動引入之動態封合的摩擦力很小，可以提高軸轉速，最高可達 120000 rpm，若使用低蒸氣壓的承載液體，其真空度可達 10^{-9} Torr。

2. 電引入

真空系統之電引入主要是將系統外之直流、交流電或訊號傳入系統內，如蒸發熱源的電力、熱電偶或膜厚測定等量測信號，例如離子真空計之導線與玻璃接合即為一簡單的電引入，其基本要求為氣

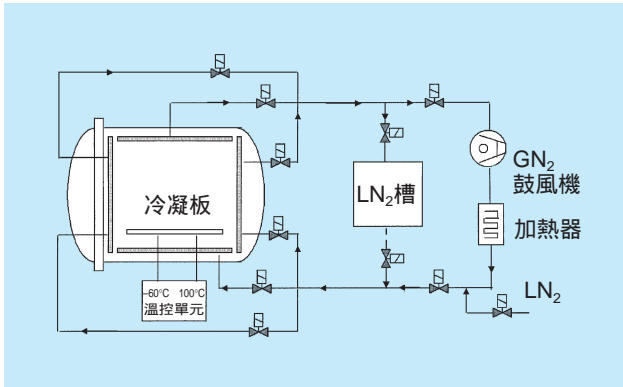


圖 19. 太空環境模擬熱真空腔熱控系統架構。

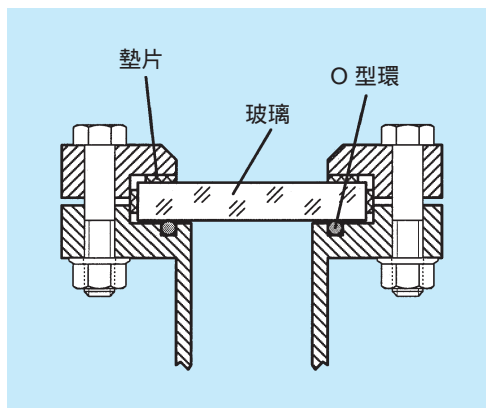


圖 20. O 型環封合之視窗結構。

密以及絕緣。電引入裝置主要有導線、絕緣體與外殼，導線常使用無氧銅、Inconel、Kovar、鉬及鎢等材料，絕緣體則常使用陶瓷、玻璃、環氧樹脂或真空蠟等，外殼則可使用銅或不鋼等，或是直接裝於法蘭上而不需外殼。

電引入裝置可分為可拆式與固定式，可拆式電引入主要用於一般高真空系統及熱偶真空計，固定式則使用於需烘烤的超高真空系統及離子真空計。可拆式電引入主要是可拆卸以更換導線或絕緣體，其絕緣體通常亦做為氣密封合墊片，最簡單的就是以 O 型環為絕緣體，如圖 15 為 O 型環加上絕緣墊片所做成的電引入結構，圖中的絕緣墊片使用具彈性之絕緣材料，例如鐵氟龍，為適用於低電壓大電流之電極結構。而圖 16 則為一固定式電引入裝置，其關鍵技術在於金屬與絕緣材料的結合。由於導體或外殼與絕緣材料熱膨脹係數的差異，溫度變

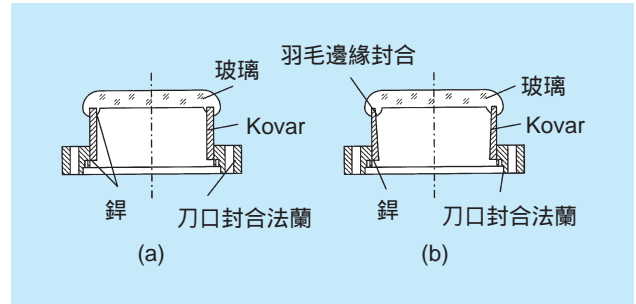


圖 21. 永久封合玻璃視窗結構。

化時材料之膨脹或收縮體積不同，使得結合處變成不夠緻密，容易造成洩漏，因此必須選用溫度膨脹係數相匹配的導體及絕緣體。例如 Kovar 合金為熱膨脹係數很低的金屬，與硬硼玻璃或氧化鋁陶瓷之熱膨脹係數相近，故常用作電引入之電極，如圖 17 金屬與玻璃封接之雙蕊電極，常見於真空計或熱電偶導線引入。有些電引入則利用高強度的陶瓷及較軟的導體，以補償因溫度膨脹的變形，例如銅棒與陶瓷硬銲結合。若以環氧樹脂或真空臘做為絕緣及封合，則為半可拆式電引入，在一時缺少電引入又急需時可以使用，然其強度不夠，一般情形並不常見。

電引入裝置可經由訂製或是採買標準品，如圖 18 為一般單電極高電壓大電流電引入之外觀，選用時需注意電引入電壓與電流、系統真空度需求、是否需烘烤等因素，一般型錄所提供之參考規格分別為：最大容許電壓、最大容許電流、最高溫度、電極導體材料、絕緣材料、電極數目、冷卻方式，以及法蘭型式及其標稱尺寸等，而 RF 電引入另需注意頻率與功率。另外在高壓電引入時，需注意絕緣體之幾何形狀，避免因系統運轉時於絕緣體表面濺鍍一層導體薄膜造成漏電，可以使用檔板屏蔽或是設計絕緣體形狀使濺鍍層不連續，均可改善漏電的現象。

3. 其它用途之引入

除了機械運動引入與電引入之外，真空系統有時亦需引入或導出流體、熱或是光，流體引入是以導管引入液體或是冷凍劑進入真空系統中，常用於真空系統之冷卻或是溫度控制，如圖 19 為一太空

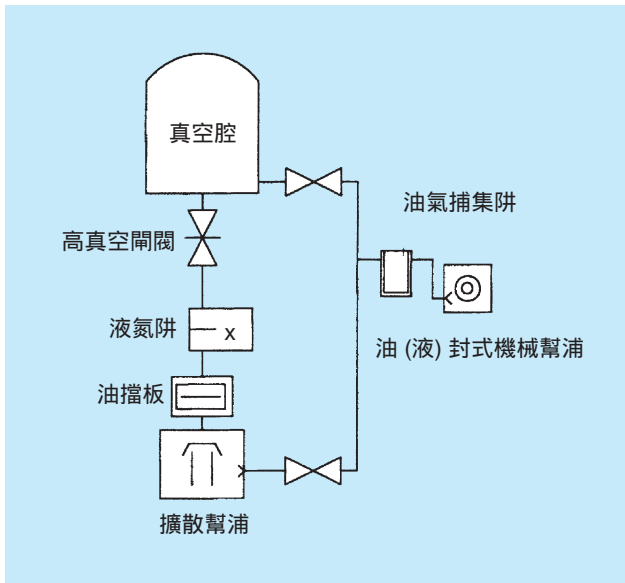


圖 22. 擴散幫浦系統中油擋板及油氣捕集阱之應用。

環境模擬之熱真空腔系統 (thermal vacuum system)，其中包含液態氮冷凍劑及加熱之氮氣引入，為流體引入之典型範例。流體引入之管路一般要求為無氣泡、無雜質以及無內部缺陷之不銹鋼材料，以防止氣體之滲透，導管可由真空腔直接開孔銲接，銲接時與永久封合之注意事項相同。若是所導引流體為常溫且溫度變化不大，則可以採 O 型環之可拆卸封合。另外一種可以導熱的裝置是以容易傳導熱的金屬做為熱導管 (heat pipe)，將熱傳導出真空系統之外；若需導引光進出真空系統，則採用光導管 (light pipe) 或光纖 (optical fiber) 做為光的傳導，其氣密要求與其它真空引入的要求大致相似。

4. 視窗

真空系統所用的窗簡單來說是一種可以穿透輻射的元件，此輻射為廣義的電磁波，若是用於可見光的窗則稱為視窗，其基本要求為機械強度可承受一大氣壓之壓力差、氣密、材料之蒸氣壓低、避免逸氣、所要求的輻射穿透率高，並可過濾不必要的輻射等。透過視窗可觀察真空系統內部溫度或試件狀態，或導引光源進入真空系統內。視窗依密封形式可分為可拆卸式和永久封合，可拆卸式封合同

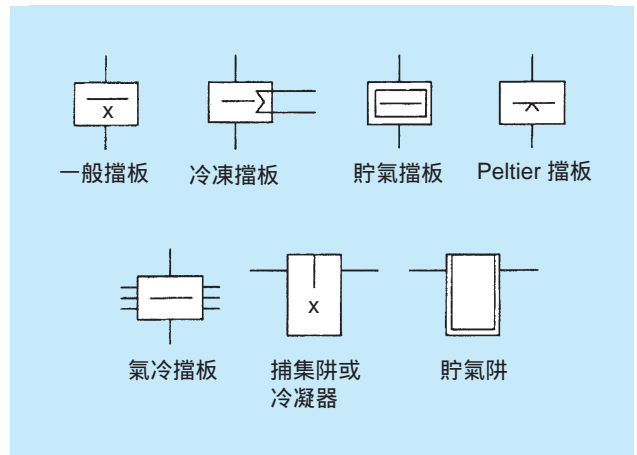


圖 23. 擋板及捕集阱 ISO 標準符號⁽¹⁷⁾。

靜態封合，主要是應用於高真空和低真空系統，永久封合則應用於超高真空系統。可拆卸式封合是以 O 型環封合結構為主，如圖 20，以 O 型環做為氣密封合，並利用墊片防止法蘭過度迫緊破壞鏡片，並於 O 型環迫緊處磨砂，安裝時於 O 型環塗覆高真空矽脂 (high vacuum silicone grease) 薄膜，以潤滑接觸面。永久封合視窗係將玻璃與法蘭或真空腔器壁做永久封合，關鍵技術為玻璃與金屬之接合，其考慮因素如同電引入所述，必須考慮玻璃與金屬之熱膨脹係數。可以採熱膨脹係數匹配的組合，例如 Kovar 合金與硬硼玻璃之銲接接合，如圖 21(a)。或是採熱膨脹係數不匹配的組合，以較軟的金屬補償因溫度膨脹的變形，如圖 21(b) 使用無氧高導銅與玻璃以羽毛邊緣技術 (feather edge technique) 銲接接合。

視窗材料主要為玻璃，最好使用光學玻璃，如 BK7 玻璃等。由於玻璃在成形的過程中易陷捕氣體分子，且其表面易吸附氣體，故安裝時需烘烤以減少玻璃材料之逸氣。若考慮觀察其它特殊波段之需求，則需使用其它材料^(15,16)，例如以石英 (quartz) 單晶及藍寶石 (sapphire) 可穿透紫外線至紅外線波段，可做為觀察從紫外線至紅外線之視窗材料。若使用於高溫的真空系統，可選用具水冷 (water cooled) 功能的視窗，以避免玻璃於高溫時破裂。另外為了防止薄膜材料蒸鍍到玻璃片上，可於視窗結構上設計擋板或擦拭機構。

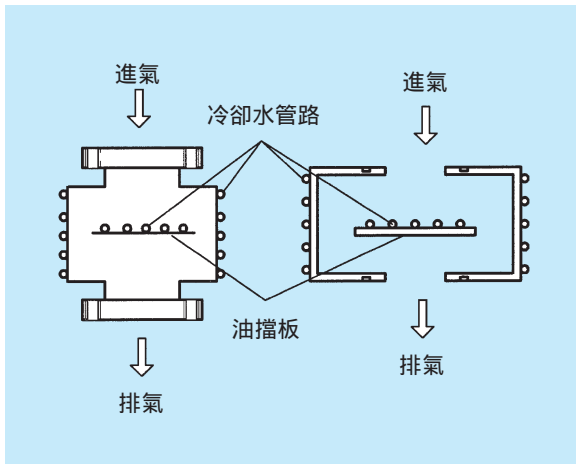


圖 24. 典型的油擋板結構。

五、真空附件

真空元件除了前述法蘭、真空閥門、機械引入、電引入及視窗等，還包括擋油帽、擋板 (baffle)、阱 (trap) 及管路等元件。在真空系統若選用幫浦油或潤滑液的真空幫浦時，則必須考慮配置擋板和冷阱組件，以防止系統遭受幫浦油氣的污染並減少油氣漏失。如圖 22 之擴散幫浦真空系統為例，其中之油擋板裝置於擴散幫浦進氣口處，用以減低幫浦油蒸氣回流 (back streaming) 污染系統，並以水循環冷卻使油氣凝結後流回幫浦；另外以一液態氮阱 (liquid N₂ trap) 捕集前述油擋板未完全阻隔之油氣分子，使油氣回流更小，同時成為凝結性氣體的吸附抽氣幫浦；除此之外，在做為粗抽及前級幫浦之油 (液) 封式機械幫浦進氣口處，裝設一油氣捕集阱，用以減低機械幫浦油氣回流。本節將整理包括擋板及阱等真空附件之原理與應用。

1. 油擋板及捕集阱

早期的高真空系統大都使用擴散幫浦，油擋板及冷凍阱為其必備之附件，以防止幫浦油氣回流污染系統或影響系統真空度。在 ISO 或 DIN 等真空相關技術標準中亦將其視為真空系統之標準配件，如圖 23 整理 ISO 3573⁽¹⁷⁾ 中關於擋板及冷凍阱之圖示，亦可參考 DIN 28401 之標準圖示。油擋板通常用冰水、乾冰或冷媒將油或水銀蒸氣凝結流回擴散幫浦，冷卻溫度以不使油氣凝結成固體為原則。如

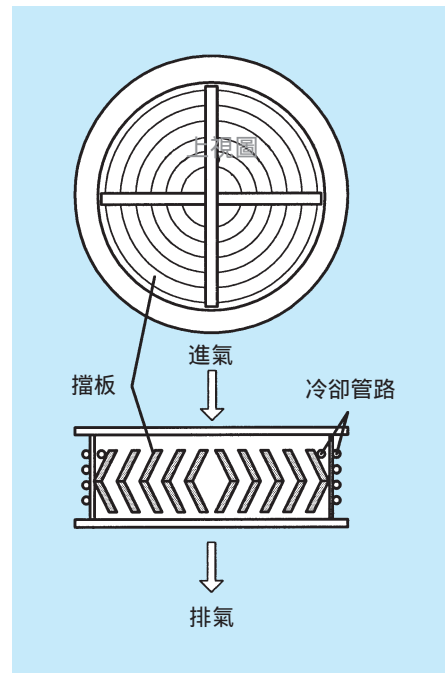


圖 25. 阻隔效果較大的油擋板結構。

圖 24 為普通簡單的油擋板結構，擋板幾何設計需求為使油氣分子不論來自任何角度均不能直接通過，類似光學擋板 (optical baffle) 之設計概念，至少要有一次光學屏蔽。若考慮阻隔效果較佳的油擋板結構則可以採取類似可變氣導閥門的擋板結構，如圖 25，然阻擋效果大的油擋板相對的氣導就較小，必須衡量系統需求選擇適當的油擋板，各式的油擋板結構可直接參考設計手冊^(19,20) 或是產品型錄。有些擋板並不使用冷卻作用，而是以吸附劑吸收油氣，待飽合後再將吸附劑活化再生使用。選用油擋板之主要參考規格為其氣導 (conductance)、洩漏率 (leak rate) 及標稱尺寸等，其氣導檢驗方式可參照 ISO 1608⁽¹⁸⁾ 蒸氣式幫浦性能量測標準，將擋板裝置於幫浦進氣端測量其氣導，若欲檢驗其洩漏率則可依加壓測漏法或由氬氣質譜儀檢漏。

因為油擋板不能完全阻隔油氣，因此在真空度需求更高時，需要再加一捕集阱以捕捉剩餘的油氣分子，捕集阱可以是冷凍阱 (cryotrap)、銅箔吸附阱，或是分子篩吸附阱。冷凍阱類似一冷凍吸附幫浦，其主要作用在冷凍吸附油氣分子，同時也吸附了其它氣體分子。冷凍阱可以使用於擴散幫浦與真空腔間以防止油氣分子進入系統，或是於聯結前級

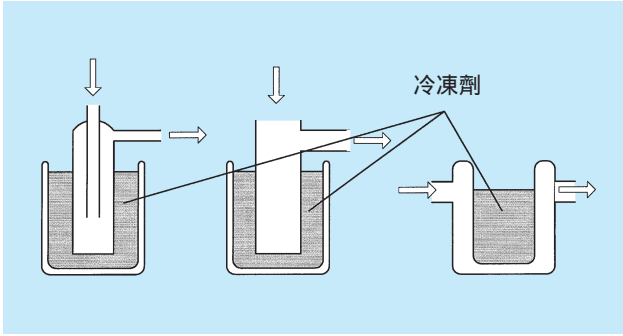


圖 26. 常見的冷凍阱結構示意圖。

幫浦之管路中以回收隨著排氣流出的油氣分子。如圖 26 為一般冷凍阱之結構示意，所使用的冷凍劑可以是冷媒、液態氮、乾冰等，冷凍劑溫度愈低者吸附效果愈佳。圖 25 中盛裝冷凍劑的材料可以是玻璃或金屬，在結構上應考慮減少冷凍劑揮發且冷卻面要大。銅箔吸附阱是以 0.76 mm 厚、152 mm 寬的無氧銅薄板，滾壓成深 0.63 mm 的波浪板，捲成筒狀裝置於擴散幫浦與真空腔室間，銅箔對油氣分子有極佳的物理吸附作用，然對水銀分子之吸附效果不大且氣導較小，不若冷凍阱普遍被使用。分子篩吸附阱之吸附面積大，效果比銅箔吸附阱佳，然氣導仍較冷凍為小，其結構簡單、價格便宜、無需運轉成本，且可重覆再生使用。捕集阱之有效工作時間與阱的幾何形狀、溫度和壓力相關，使用時必須注意參考規格之有效工作時間，除此之外，冷凍溫度與氣體飽和蒸氣壓之匹配與系統真空性能相關，使用時亦需選擇適當的冷凍劑。

2. 油 (液) 封式機械幫浦附件

油 (液) 封式機械幫浦為防止其油氣回流污染系統，並延長幫浦本身的壽命與功能，必須使用各種附屬配件，其附件可依功能分為二大類，一為避免幫浦影響真空系統內製程的附件，另一為防止真空系統內製程對幫浦造成不良影響。整理常見的真空機械幫浦附件如圖 27 所示⁽²¹⁾。

機械幫浦運轉時，幫浦機體溫度很高，為阻止油蒸氣隨氣體排出，通常會使用油分離器 (oil separator) 或油霧過濾器 (oil mist filter) 以減少油消耗。其中油分離器用以回收大油滴，而油霧過濾器用以回收小油滴 (當進氣壓力在 1 大氣壓至 3 Torr

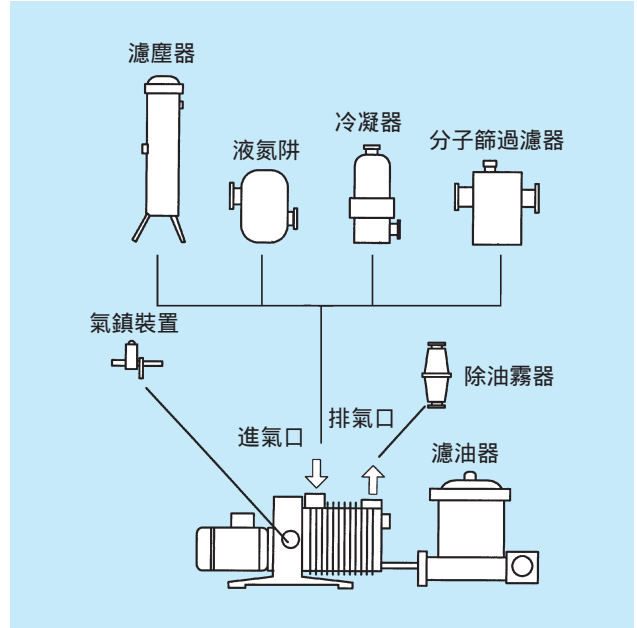


圖 27. 真空機械幫浦各類附件。

間，排氣將夾帶 1 mm 左右大小之油粒子)，二者搭配使用幾無油之漏失。分子篩油過濾器 (molecular sieve filter) 包括粗抽阱 (roughing trap) 和前級阱 (foreline trap) 二種，可以防止幫浦油回流至真空系統，其原理與適用於粗抽的吸附幫浦相當。在化學或半導體工業應用中，污染性氣體或反應產生固體微粒混在幫浦油中，常對機械幫浦造成侵害，使用濾油器 (oil filter) 淨化裝置可將不純物吸附在過濾網上予以淨化。大於 2 mm 之固體微粒會造成幫浦靜子表面之磨損，影響幫浦性能，尤其在真空冶金與化學應用上此種情形更為常見，濾塵器 (dust filter) 即是用於過濾此類製程所造成的固體微粒。在蒸氣逸出較嚴重的情況，例如真空乾燥應用，必須使用冷凝器 (condenser) 捕捉水蒸氣。與冷凝器功能相仿 (但冷凝劑不同，冷凝溫度也不同)，液態氮阱目的在捕捉對幫浦有害的蒸氣，並可防止油蒸氣回流至真空系統。從另外角度來看，液態氮阱相當於一個冷凍幫浦，可使凝結溫度高於 77 K 之氣體凝結而被抽除。氣鎮裝置 (gas ballast) 的目的在於防止凝結性氣體在幫浦內部凝結，使幫浦不僅可抽除永久性氣體亦可抽除凝結性氣體，若凝結性氣體為反應性成份則使用鈍氣做為氣鎮⁽²²⁾。例如水蒸氣 (70 °C 時之飽和蒸氣壓約為 234 Torr)

在幫浦運轉時因凝結性氣體分壓超過飽和蒸氣壓即會凝結成液體，也就是說幫浦無法產生過壓（大於一大氣壓）的結果，幫浦排閥無法順利打開排氣，水份則留在幫浦內與油形成乳化液，使幫浦油失去潤滑效果，甚至摩擦損壞，因此必須使用氣鎖裝置。

隨著經濟成長與生活環境的改善，工業安全衛生益受重視，真空系統中所使用之有害氣體以及幫浦所產生的噪音必須加以解決，因此配置有害氣體回收附件、防止反應性氣體爆炸之附件，以及消音器等附屬配件，亦常見於真空系統中。

六、結論

本文就真空儀器系統設計與整合時常會用到的元件與封合技術加以介紹。若以成本或技術層次考量，真空元件與封合技術在整個真空儀器系統所佔的份量不大，但是卻是真空技術工程實現之基礎。包括真空腔體與管件等結構性元件、抽氣次系統，或是鍍膜之功能性次系統等，必須藉由上述之真空元件與封合技術達成系統之整合，並確保其真空性能，因此充分的掌握元件之真空性能與封合技術，為實現新興真空科技之重要工程實務基礎。

參考文獻

1. 小栗富士雄, 標準機械設計圖表便覽, 增補三版, 台北, 台隆書店編譯, 9b24 (1985).
2. 達道安主編, 真空設計手冊, 修訂版, 北京: 國防工業出版社, 352 (1995).
3. ISO 2861/I, *Vacuum Technology - Quick-release Couplings - Dimensions*, Part 1: Clamped Type (1974).
4. ISO 2861/II, *Vacuum Technology - Quick-release Couplings - Dimensions*, Part 1: Screw Type (1980).
5. ISO 3669, *Vacuum Technology - Bakable Flange - Dimensions* (1986).
6. ISO 1609, *Vacuum Technology - Flange Dimensions* (1986).
7. A. Roth, *Vacuum Technology*, Elsevier Science Pub., New York, 352 (1990).
8. ISO 3754, *Vacuum Technology - Graphical Symbols* (1977).
9. 達道安主編, 真空設計手冊, 修訂版, 北京: 國防工業出版社, 443 (1995).
10. 呂登復, 實用真空技術, 再版, 新竹: 黎明書店, 314 (1996).
11. 達道安主編, 真空設計手冊, 修訂版, 北京: 國防工業出版社, 453 (1995).
12. 達道安主編, 真空設計手冊, 修訂版, 北京: 國防工業出版社, 412 (1995).
13. 小栗富士雄, 標準機械設計圖表便覽, 增補三版, 台北: 台隆書店編譯 (1985).
14. L. J. Budgen, *Journal of Vacuum Science and Technology*, **A1** (2), 147 (1983).
15. 蘇青森, 真空技術, 五版, 台北: 東華書局, 188 (1999).
16. A. Roth, *Vacuum Technology*, New York: Elsevier Science Pub., 323 (1990).
17. ISO 3753 *Vacuum Technology - Graphical Symbols*, 4 (1977).
18. ISO 1608/I *Vapour Vacuum Pumps-Measurement of Performance Characteristics-Part 1: Measurement of Volume Rate of Flow* (Pumping Speed) (1980).
19. 達道安主編, 真空設計手冊, 修訂版, 北京: 國防工業出版社, 515 (1995).
20. 蘇青森, 真空技術, 五版, 台北: 東華書局, 199 (1999).
21. 呂登復, 實用真空技術, 再版, 新竹, 黎明書店, 68 (1996).
22. A. Roth, *Vacuum Technology*, New York: Elsevier Science Pub., 210 (1990).