

真空密封

斯立努者

真 空 密 封

斯 丕 努 著

王 璠 譯

机械工業出版社

出版者的話

除了对真空技术作一般的介紹外，主要是叙述真空技术問題——如何防止漏气。本書作者根据經驗介紹了各种真空密封結構，包括不可拆卸真空接合、可拆卸真空接合、真空接合和真空閥。作者在叙述每一种真空密封时，特指出其特点和設計时应注意之点。

真空技术在一些科学研究工作和許多工業部門中有重大的作用，因此，本書对于仪表工業、电真空工業、电器工業、黑色和有色冶金工業、化学工業以及一些科学研究部門中接触到真空技术的工作人員都会有帮助。

苏联 Г. А. Спыну 著 ‘Вакуумные уплотнения’ (Машино
1956 年第一版)

NO. 1557

1957 年 11 月第一版 1960 年 2 月第一版第三次印刷
787×1092 $1/32$ 半 39 千字 印張 $1^{23}/_{16}$ 2,951—3,950 册
机械工業出版社(北京阜成門外百万庄)出版
北京新华印刷厂印刷 新华書店發行

北京市書刊出版業營業許可証出字第 008 号 定价(11) 0.30 元

目 次

原序	4
一 概 論	5
1 真空的概念	5
2 真空的获得	6
3 抽气速率的概念	11
4 真空的測量	14
5 真空材料	16
6 真空設備設計的若干特点	18
二 不可拆卸的真空接合	22
1 金屬的熔焊	22
2 金屬的低溫焊接	24
3 金屬和玻璃的熔接	24
4 真空膠合	26
三 可拆卸的真空接合	27
四 活动真空接合	31
五 真空閥	39
六 真空接合的檢漏試驗	54
附录	57

原 序

本書在一定程度內反映了烏克蘭蘇維埃社会主义共和国科学院物理研究所設計室在設計真空設備方面的多年經驗。

作者的目的是：想在不多的篇幅內使讀者能了解設計真空設備的若干問題。本書是為設計室的設計技術員寫的，因而就決定了本書敘述的基本風格。

這本小冊子中所舉出的真空墊和真空閥結構，絕大多數都是經作者在实际使用過程中試驗過的，並且是根據長期使用的經驗作介紹的。

皮良凱維奇（А. Н. Пилянкевич）工程師在本書編校過程中，了不少幫助，並為本書搜集與選擇資料，作者謹表謝意。

一 概 論

1 真空的概念

凡气体压力低于大气压的負压状态，在科学技术上就称为真空。

在真空技术中，通常把气体压力不超过 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 公厘水銀柱的負压状态称为真空。现在用特殊方法可以获得 $10^{-3} \sim 10^{-9}$ 公厘水銀柱的負压。正如研究所証明的，在气体介質中(真空中)所發生的一些物理过程以及气体性質的本身，在很大程度上不仅决定于压力，即單位容积中存在的分子数目，而且还决定于气体分子从一次撞击到另一次撞击間的平均自由路程与該条件下的容器直綫尺寸之比。

按照以上所述將真空分成三类：

1. 高真空——分子的平均自由路程長度大于气体容器尺寸的气体状态；

2. 中真空——分子的平均自由路程長度和容器尺寸差不多的气体状态；

3. 低真空——分子的平均自由路程長度小于容器尺寸的气体状态。

通常把中真空和低真空称为預真空。

高真空的范围包括低于 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 公厘水銀柱的压力 (分子的平均自由路程長度大于 10 公分)。

真空的程度不仅决定于压力（压力与分子的自由路程長度之間成單值关系），而且还决定于容器的尺寸。例如，从一容器中抽出空气，假如此容器是直径为 50 公分的瓶子，那末 10^{-3} 公厘水銀柱的压力并不保証高真空，因为在这种情况下自由路程長度小于瓶子的尺寸；可是在直径 1 公分的瓶子中，在同样的压力下真空就会很高了。

在后面，真空一詞我們就是指高真空，而省用「高」字。

2 真空的获得

获得真空是靠真空泵。按所造成負压的不同，真空泵可分为：預真空泵——造成 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ 公厘水銀柱的負压；高真空泵——造成 $10^{-3} \sim 10^{-6}$ 公厘水銀柱的負压。大多数預真空泵都是根据同一原理工作的机械旋轉泵。高真空泵常見的是扩散泵和蒸汽噴射泵。

現在，我們来討論預真空机械泵的作用原理。



圖 1 預真空泵作用示意圖。

圖 1 为这种泵的示意圖。这种泵由圓筒形外壳和两根管子——进气管和出气管——以及轉子組成。轉子对外壳偏心配置。轉子帶有兩塊板，這兩塊板可以在轉子的溝槽中自由移动，并借彈簧与壳壁貼紧。开始时（I），轉子的兩塊板把泵的工作空間分为兩個容积相等的部分。当轉子按圖 1 中箭头所示的方向旋轉时，上

面一塊板就在進氣管旁邊轉過。轉子繼續轉動時，在上面這塊板的後面形成了愈來愈大的空間，空氣就从需要造成真空的容器流了進來。同時下面一塊板把空氣壓縮到泵的左邊的空間，並把它排入出氣管。在Ⅲ的情況下，以前吸入的空氣就和兩根管子分離，并被送向出氣管。在Ⅳ的情況下，帶有以前吸入的空氣的空間就和出氣管相連。這樣一來，轉子轉半轉，旋轉泵就工作一個周期。

为了不使壓縮方面的空氣流入負壓方面，轉子頂部必須與外殼內壁嚴密地貼緊。還得保證轉子的兩塊板與外殼內壁嚴密地貼緊。為了不讓大氣中的空氣滲入泵內，故在出氣管上安裝閥門。在泵里放入能潤滑和密封接觸處的礦物油，保證轉子和兩塊板與泵殼內壁接觸處的嚴密性。這種油也是冷卻劑，不過在某些情況下也有用空氣冷卻的。

旋轉泵可按其能力分為兩類：抽氣速率為2~50升/分的和抽氣速率大於50升/分的。第一類泵用來從小型的儀器中抽出空氣，第二類泵則用於大型和中型的工業設備上。

蘇聯出產BH-1、BH-2、BH-461等型號的預真空旋轉泵，這些泵的數據見表1。

在高真空泵中，是利用氣體擴散現象，而不是利用機械作用原理。擴散泵的作用原理如下。

工作液體在圓筒（圖2）底部用特殊的加熱器加熱，從圓筒底部逸出的工作液體的蒸汽就沿着圓筒運動。需要造成真空的容器經過一根連接管與圓筒相連接。被抽出的空氣在連接管的入口處與蒸汽相接觸。被抽出的空氣分子經過連接管擴散到工作液體的蒸汽中，工作液體的蒸汽流就把進入其中的空氣分子帶引向上，在上部，空氣分子即可被預真空泵排除。為使擴散到連接管中的工作液體蒸汽的分子與被抽出的空氣分子相接觸，而不阻礙空氣分

子的运动，因而也不致惡化抽气速率起見，特在扩散地点的附近安置冷却器。工作液体的蒸汽在冷却器壁冷凝，因此工作液体的蒸汽实际上不妨碍连接管中空气的运动。随着泵的工作，容器中正被抽出的空气的压力逐渐降低；如果工作液体的蒸汽不含空气，那么，这一压力可以低到任意小。被抽出空气的空间将充满工作液体的蒸汽，其压力相当于冷却器温度下工作液体的饱和蒸汽压。显然，如果利用特选的工作液体，则冷却器温度愈低，所能达到的真空度也就愈高。

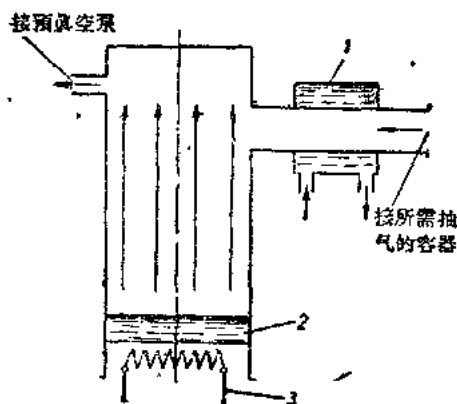


圖 2 扩散泵的作用原理：

1—冷却器；2—工作液体；3—加热器。

左面的示意图(圖 2)和文字叙述仅仅是说明了扩散泵的基本作用原理，而泵的構造却要复杂得多，其中有特殊的工作液体捕集器、工作液体回流装置等，此外，扩散泵常常做成多級的，这样可以获得更高的真空。

抽气速率决定于工作液体的蒸汽密度；蒸汽流的密度愈大，则抽气速率愈小，因为在连接管中造成蒸汽浓度很高的一段，被抽出的空气分子就不能通过这一段渗透到连接管口。抽气速率也决定于蒸汽流速率：气流速率低时，气体分子就不能从连接管中被带走，反而会扩散到原来容器的空间中。当蒸汽流速率極低时，泵会完全停止工作，因为预真空支管中的空气会渗入真空系统。当预真空不良，所谓反向压力（被抽出气体的出口方面的压力）过分大时，就会發生这种现象。扩散泵的抽气速

率开始急剧降低时的預真空压力称之为临界压力。临界压力的大小决定于泵的構造和蒸汽流的速率。提高气流速率（例如提高加热器的温度），可以提高临界压力，使泵在較差的預真空下也能工作。多数扩散泵的临界压力为 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 公厘水銀柱。理論上，用扩散泵可以得到任意小的压力，但实际上，無論扩散泵或者預真空泵都有極限的真空度，因为泵內蒸汽会向真空系統扩散，泵的热壁上会发生气体离析作用等。

扩散泵按所用工作液体的种类，分为水銀蒸汽泵和油蒸汽泵。前者是用水銀作为工作液体。这种泵的优点是，水銀在加热时或温度骤变时不分解、不燃燒。但在一般的冷却器温度下，水銀的飽和蒸汽压为 10^{-2} 公厘水銀柱，因此只要蒸汽进入真空系統，就不能得到高真空。另外，水銀蒸汽有剧毒。所以，目前水銀泵仅仅用于小型真空系統中，而且逐漸地讓位給油蒸汽泵了。油蒸汽泵中工作液体是特殊的真空油。用油作为工作液体的优点是油在冷却器温度下的飽和蒸汽压較低，而且沒有毒性。但油蒸汽泵与水銀泵不同，泵中油在高温下可能分解；当空气大量进入工作空間时，油可能燃燒。

扩散泵按結構型式不同，又分为玻璃扩散泵和金屬扩散泵。玻璃扩散泵中包括有水銀泵和小型的油泵。这种泵現在已經沒有工業价值，因为它已經被金屬扩散泵所代替了。

苏联出产 ДРН-10 型水銀泵 和 MM-40A、ЦБЛ-100、Н-5 型的油泵等（表 1）。

也还有几类根据其他原理工作的真空泵。属于这类泵的有分子泵和电离泵。

在預真空分子泵中，是利用以旋轉圓筒帶走向其撞击并在其轉动方向得到分力的气体分子这一原理。

表1 真空泵的数据

种 类	型 号	預計能达到的真空 (公厘水銀柱)	起 动 压 力 (公厘水銀柱)	抽气能力 (升/秒)	泵口直徑 (公厘)
旋轉真空泵	BH-1	10^{-3}	760	23	
旋轉真空泵	BH-2	10^{-3}	760	7.5	
旋轉真空泵	BH-461	10^{-3}	760	0.95	
旋轉真空泵	PBH-20	10^{-3}	760	3.3	
水銀真空泵	ДРН-10	$10^{-6} \sim 10^{-7}$	10^{-2}	10	
水銀真空泵	ДМН-20	$5 \cdot 10^{-6} \sim 1 \cdot 10^{-6}$	10^{-3}	20	
水銀真空泵	ДМН-50	$5 \cdot 10^{-6} \sim 1 \cdot 10^{-6}$	10^{-3}	50	
油 真 空 泵	ММ-40А	$1 \cdot 10^{-6}$	10^{-3}	40	45
油 真 空 泵	ЦБН-100	$5 \cdot 10^{-6} \sim 1 \cdot 10^{-6}$	10^{-3}	100	65
油 真 空 泵	H-5	$5 \cdot 10^{-6} \sim 1 \cdot 10^{-6}$	10^{-3}	500	120

用在特殊裝置中的电离泵，是根据气体电离并借电場除去离子的原理。气体在紅熱的陰陽極之間的空間中电离，正离子就趋向陰極，由此經過連接管为預真空泵所抽出。

因为用泵不能使殘余气体完全抽光和完全除光，故使用〔凝結法〕和〔化学吸气法〕（用固体吸收气体）。

〔凝結法〕是把气体和蒸汽冷凝在冷却表面以除去气体和蒸汽的方法。作为这种冷却表面的是人工冷却的所謂〔捕集器〕。如果捕集器溫度相当低，那么，在抽气系統中气体和蒸汽所处压力，將相当于捕集器溫度下冷凝物的饱和蒸汽压，而这个压力是非常小的数值。用作冷却剂的有：冰（ 0°C ），固体二氧化碳（ -78°C ），液体空气（ -185°C ），液体氮（ -196°C ）和液体氫（ -252°C ）。例如，在液体空气的溫度下，水銀的饱和蒸汽压值極小： $1.5 \cdot 10^{-27}$ 公厘水銀柱。不过用捕集器不能凝結氮、氦、氫、氫、氮、氧这类气体。为了降低这类气体的压力，利用所謂除气剂——一些能和气体形成穩固的不揮發性化合物的物質。如果把除气剂置于需

表2 各种泵所能达到的压力范围

10	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	公厘水銀柱
旋轉机械泵										
				擴散泵						
				利用除气剂和捕集器						

要除去殘余气体的空間中蒸發，由于除气剂有迅速吸收气体的能力，压力就会减少到 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 公厘水銀柱左右（表2）。

3 抽气速率的概念

当气体沿着真空管道流动时，对这种流动的阻力，取决于真空管道的几何尺寸和被抽出气体的种类。圓筒形真空管道有一定的通过能力，其阻力在低压下（低于 10^{-2} 公厘水銀柱）可用下式表示

$$W = 2394 \frac{L}{D^3}, \quad (1)$$

式中 D ——真空管道的直徑 (公厘);

L ——真空管道的長度 (公分)。

由上式可見, 阻力取決于幾何尺寸, 而且在極大程度上取決于真空管道的斷面積。阻力隨真空管道直徑的減少, 成立方地增加。

從狹窄的真空管道轉到寬大的管道中時, 阻力用下式表示:

$$W = 318.4 \frac{1}{D_1}, \quad (2)$$

式中 D_1 ——狹窄部分真空管道的直徑。

可見, 在這種情況下, 阻力取決于真空管道的直徑。

真空管道中的彎曲, 只在壓力較高時 ($1 \sim 10^{-2}$ 公厘水銀柱) 影響通過能力 (降低通過能力), 而在壓力較低時, 並不影響系統的通過能力。

上面所說的都是指真空達 10^{-2} 公厘水銀柱時而言。在壓力較高時, 氣體的流動則具有不同的性質, 而真空管道的阻力比高真空時要大。

系統的通過能力, 除了阻力由其尺寸決定外, 還取決于被抽出氣體的種類。如果通過能力用 F 表示, 則

$$F = \frac{1}{W \sqrt{\rho}}, \quad (3)$$

式中 ρ ——氣體在壓力 1 巴[●]時的密度。

現在我們討論抽氣速率問題。抽氣速率不僅取決于泵的抽氣能力, 即其作用的快慢, 而且还取決于系統的通過能力。正如實驗所證明的, 泵的入口處附近壓力降低比起被抽出空氣的空間中壓力降低要快得多; 在固定抽氣過程的條件下, 空間內部的壓力會大于泵入口處的氣體壓力。

● 巴 (Bar) 為壓力單位, 1 巴 = 1 達因/公分²。——譯者

簡單的計算就能得出系統的真实抽气速率的公式如下：

$$v = \frac{1}{\frac{1}{v_{\text{泵}}} + \frac{1}{F}}, \quad (4)$$

式中 $v_{\text{泵}}$ ——泵的抽气速率； F ——系統的通过能力；

v ——真实抽气速率。

泵的作用速率愈大（即其抽气能力愈大），系統的阻力愈小（即其通过能力愈大），則真实抽气速率也愈大。真实抽气速率永远小于泵的作用速率。

現在我們來討論一个能說明系統的阻力和泵的抽气能力对真实抽气速率的影响的例子。

假設真空系統是：若干个需要抽气的容器，連接管—— $\varnothing 10$ 公厘和長 15 公分的圓筒形真空管道、抽气能力为 7 升/秒的泵。根据式（1）和式（2）求該系統的几何阻力：

$$V = 2394 \frac{L}{D^3} + 2394 \frac{L_1}{D_1^3} + 318.4 \frac{1}{D_1^2};$$

$$W = 2394 \frac{15}{10^3} + 2394 \frac{1}{5^3} + 318.4 \frac{1}{5^2} = 67.8,$$

式中 $2394 \frac{L}{D^3}$ ——第一段的阻力；

$2394 \frac{L_1}{D_1^3}$ ——第二段的阻力，

$318.4 \frac{1}{D_1^2}$ ——轉換阻力。

如果認為被抽出气体是空气，則通过能力 $F = 426$ 公分³/秒。因此，抽气速率 $v = 400$ 公分³/秒，即不过为泵的抽气能力的 57%。

現在我們把縮口直徑增加 1 公厘。不难看出，在这种情况下系統的通过能力已經是 470 公分³/秒，与此相当的真实抽气速率則等于 440 公分³/秒。如果改用能力較大的，如抽气能力为 100 升/秒的泵，来代替 7 升/秒的泵，則抽气速率將为 420 公分³/秒。由此可

見，把縮口直徑增加不过 1 公厘，所得效果比把泵的抽气能力增加 13 倍还要高。

上面的数据說明，在設計真空系統，各种閥門和接合等时，應該如何注意考虑真空管道的断面尺寸。如果选择真空管道的断面等于高真空泵的泵口断面，那就能得到最大的效果（对預真空泵來說，断面就沒有这种意义）。由上面所討論的例子中可以看出，采用比較狹窄的真空管道断面，就会降低抽气速率；为了得到同样的抽气速率而采用能力較大的泵，那是不經濟的。

若于种扩散泵的高真空泵口直徑大小見表 1。

4 真空的測量

利用真空系統工作时，測量真空是一項重要的任务。真空技术所接触到的压力范围是非常广的：从 10^3 直到 10^{-9} 公厘水銀柱。这样大的压力范围不是某一种真空压力計所能測量的。因此，必須根据所測量的压力范围的不同和測量所处条件的不同，采用基于測量殘余气体一定的物理性質（傳热度、粘度等）的各种不同类型的压力計。

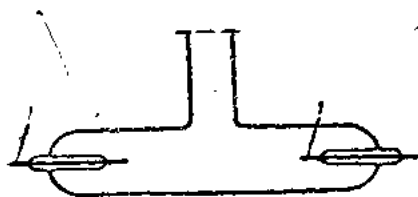


圖 3 气体放电管。

为了近似地定性測定真空，利用在气体中借感应圈放电时發輝光的現象。在真空技术中获得广泛应用的最簡單的真空感应器是气体放

电管（圖 3）。气体放电管中焊有电极 1，电极和真空系統相連。

根据放电管中輝光的性質，可以近似地估計管中真空度的大小，从而估計整个真空系統的真空度大小。此时可以根据表 3 所列数据来辨識。

表3 放电管中辉光与压力的关系

放电时辉光的性質	压力(公厘水銀柱)
沒有任何可見的輝光；在高电压下發火花	760~50
电極間有紫色細綫	50~10
藍色輝亮的寬光帶	10~3
出現成層的輝光	3~1
層与層之間距离增加，出現暗区	1~10 ⁻¹
只在电極附近有輝光	10 ⁻¹ ~10 ⁻²
管壁上發螢光	10 ⁻² ~10 ⁻⁴
放电現象消失	10 ⁻⁴ 以下

上述数据只是大概的数值，因为辉光的性質不仅取决于压力，而且还取决于气体的种类和所施的电压。

为了测量1公厘水銀柱左右或更高的压力，使用U形液体压力計。为了测量高真空，使用麦克雷压缩式压力計，用这种压力計可以测量1~10⁻⁵公厘水銀柱的压力。

某些压力計的結構是基于测量气体傳热度随压力的改变而产生的变化，例如皮雷尼压力計和热电偶压力計。热电偶压力計是一个裝有用电流燒紅的灯絲的容器。因为灯絲把热量傳給气体，灯絲冷却程度就取决于气体压力。灯絲溫度为热电偶所測出，該热电偶是十个与灯絲接触的热电池。这个热电池的电动势就是气体压力的度量。

测量真空时广泛使用的方法，是基于气体分子被从陰極飞向陽極的电子所电离的現象。这种电离压力計最簡單的是一个和所要测量真空的空間相連接的三極电子管。在陰陽極之間造成超过气体电离势的电位差，这时电子流在自己飞向陽極的电路路上就使气体分子电离。所产生的正离子趋向于受到負电势的集極(ко-

длектор)。陽極电子电流在定值下，集極离子电流是压力的度量。

用电离压力計可以測量 $10^{-3} \sim 10^{-7}$ 公厘水銀柱的压力，但不能測量 10^{-3} 公厘水銀柱以上的压力，因为在这种压力下电子流是不稳定的，并且在电极間可能产生放电現象，这会使压力計损坏。

5 真空材料

設計真空仪器和真空設備时，总要用到各种各样的材料。材料的饱和蒸汽压乃是決定在設計真空設備时能否采用这种材料的主要性質之一。真空技术中所用的一切材料，必須有最低的蒸汽压，并且要保證能够很容易除去所吸收的气体。此外，还应该考虑导电度或絕緣性能、抗腐蝕性能、耐高溫性能、加工是否容易以及經濟因素。

表 4 是真空技术中用得最廣的一些材料的蒸汽压。由表 4 所列数据可見，大多数材料的蒸汽压是指高溫而言的；在低温下，蒸

表 4 一些金屬、粘合剂和潤滑油的蒸汽压

材 料	蒸汽压(公厘水銀柱)
銅	680°时 10^{-8}
鐵	800°时 10^{-8}
鋁	750°时 10^{-8}
鉛	630°时 10^{-3}
水銀	$\begin{cases} -75^\circ \text{时 } 10^{-9} \\ 60^\circ \text{时 } 3 \cdot 10^{-1} \end{cases}$
鎳	1100°时 10^{-8}
銀	837°时 10^{-3}
鎢	2130°时 $8 \cdot 10^{-9}$
云杉甘(Пинеин)	20°时 10^{-5}
阿皮松(Апизон)	20°时 10^{-7}