

实用真空试验原理

〔苏〕B. A. 拉尼斯 Л. E. 列維娜 著

化学工业出版社

实用真空試驗原理

B.A.拉尼斯 Л.Е.列維娜 著

李 民 沈 虹 合 譯

化学工業出版社

本書是試驗真空設備嚴密性的實用指南。書中敘述了探尋漏隙的主要方法，詳細地說明利用質譜探漏儀 ПТИ-4А 的探漏方法，在探漏儀的操作及檢修方面亦有所說明。

書中敘述現代真空設備，同時提出怎樣在實際中應用這類設備的意見。書中也敘述了起碼的真空技術方面的基本物理概念，這些知識是熟悉地應用真空設備所必需的。

本書材料適合於從事真空設備運行工作的廣大讀者，而書中某些章節對工程師和科學研究人員在工作過程中遇到要獲得高真空度方面的問題時，也會有一定的幫助。

ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНИКИ ВАКУУМНЫХ ИСПЫТАНИЙ

實用真空試驗原理

李民 沈虹 合譯

化學工業出版社(北京安定門外和平北路)出版

北京市書刊出版業營業許可證出字第 092 號

化學工業出版社印刷所印刷 新華書店發行

開本：787×1092 $\frac{1}{32}$

印張：3 $\frac{10}{32}$ 插頁：6

字數：69 千字

定價：(10) 0.50 元

1958年8月第1版

1958年11月第1次印刷

印數：1—5000

書號：15063.0225

目 录

序 言	4
緒 論	5
第一章 真空技术导論	6
1. 一般概念气体分子运动論知識	6
2. 真空泵	8
3. 連接管道	22
4. 低壓的測量	50
5. 嚴密性的測量	55
第二章 探尋漏隙的方法	58
1. 氣壓法	59
2. 高頻放電法	59
3. 熱電壓力計和電離壓力計法	60
4. 差示法	61
5. 質譜儀法	62
第三章 ПТИ-4 А型探漏儀	67
1. 質譜儀真空室和探漏儀的磁鐵	67
2. 真空系統	70
3. 電氣部分	70
4. 質譜探漏儀的靈敏度	76
第四章 ПТИ-4 А的操作和檢修	81
1. ПТИ-4 А真空系統的維護	81
2. ПТИ-4 А電氣 - 無線電部分的主要故障	85
第五章 ПТИ-4 А的使用	91
1. 探漏儀與設備的連接和進行嚴密性試驗的方法	91
2. 利用質譜探漏儀測量嚴密性	99
3. 探漏儀試驗台	102
參考文獻	103
附錄1. 機械真空泵的牌號和主要參數	104
附錄2. 蒸氣噴射泵的牌號和主要參數	105
附錄3. 長度 $l=1$ 米的管道的通過能力與壓力及管徑的關係	106

序 言

在各种生产部門应用真空技术日益廣泛，那些不熟悉現代真空設備及其操作規程的人員必然也会遇到关于获得和測量高真空方面的問題。因此，叙述真空設備工作的基本規則以及向廣大生产人員介紹現代各类真空設備是适当的。

为了使讀者能对至今尚未标准化的真空設備另件的構造、尺寸有一概念，作者認為有必要从迄今为止所制訂的标准中，摘录某些資料写入本書。書中真空技术的俄文專門名詞与国定全苏标准 ГОСТ 5197-50 相符合。

書中特別着重描写了氦气質譜探漏仪，这种探漏仪在工业中的廣泛采用，大大方便了真空設備及真空裝置方面的工作。

本書是出版真空試驗实用指南的初次嘗試，因此讀者的批評和建議对作者將是特別宝贵。

作者深深感謝 М.И. 孟什科夫提出宝贵的建議和意見，同时要感謝 Л.П. 哈夫金、А.Б. 策伊特林、С.А. 庫柴、Л.П. 阿弗临、В.И. 庫茲涅佐夫等仔細閱讀原稿并提出許多有益的意見。

作者

緒 論

真空技术是实用科学領域內最年青的一門，它是最近几年內成長起来的，并从實驗室深入到了工业各部門。电灯泡及其他电真空仪表的生产、真空熔煉、熔液的蒸濃、罐頭食品的生产、混凝土及天然的树液果汁的脫水等，所有这些过程必須获得低压，同时进行这些过程均要求使用严密性很高的設備。对用来貯存气体、蒸气或液体的設備亦有这样要求，由于种种原因（有毒、珍貴）不允許它們有一点滲漏，因此严密性的真空試驗及探漏問題是具有重大意义的。

1943 年到 1946 年以前，所有的探漏方法是不完善的，这些方法不能保証目前廣泛应用的大容积的金属真空設備的高度严密性。这个問題在頗大程度上是在質譜探漏仪制成之后才得以解决。質譜探漏仪的作用原理是利用質譜仪发现通过漏隙逸到真空系統中的試驗气体。

苏联工业部門所出产的質譜探漏仪 ПТИ 4A 是一种很灵敏的仪器，用它能迅速地試驗設備的严密性以及能发现很小的漏隙。儘管質譜探漏仪的結構比較簡單和运用方便，但是正确使用它仍然需要專門的知識。

本書是进行真空試驗技术方面的实用指南，除了描述質譜探漏仪探漏方法，探漏仪 ПТИ 4A 的操作性能以及在探漏仪中最常发生的故障的消除方法以外，簡要地敘述了真空技术的基本物理概念，同时描述了目前最为廣泛使用的真空設備及使用这些設備的方法。本書中所写入的有实用意义的見解可能对工作中需获得和測量低压的、非真空方面的專門工作人員是有益的。

參閱附录中所列举的書籍，可以更完备地熟悉本書所涉及的物理方面的問題、真空設備的作用原理及其計算方法。

第一章 真空技术导論

1. 一般概念气体分子运动論知識

根据分子运动論，我們周圍的所有物質均由最小質点的分子組成，这些質点仍然保持着該物質的化学性質。簡單物質（元素）的最小質点是原子，由原子構成分子。分子之間彼此以內聚力相互結合，并依这种內聚力的大小为轉移，物質或呈固态、液态或呈气态。分子是处在不断的运动中的。固体中的分子在平衡位置附近振动。液体中的分子以不同速度向前运动，并經常改变自己的运动方向。在气体中內聚力很小，以致分子能完全自由地轉移位置，而佔有气体存在的空間的全部体积。

所有物質的分子所呈的不規則运动称为热运动。因为这运动的平均动能与物質的絕對溫度成正比。

真空技术与气体方面的科学密切相关，因为要获得真空就在于从容器中排除气体。

根据分子运动論，表征气体状态的有三个参数：压力（ P ）、体积（ V ）及溫度（ T ）。后两个参数不需要作补充說明。压力的定义是作用于与气体接触的單位面积上的力。压力是分子撞击在这个表面上而引起的。显然，在碰撞前分子的数目愈多，質量（ m ）及运动速度（ v ）愈大，則分子作用在容器壁的力上也愈强。这具体反映于公式中，根据該公式压力为：

$$P = \frac{2}{3} n \frac{mv^2}{2} \quad (1)$$

式中 n —單位体积中的分子数；

$$\frac{mv^2}{2} \text{—分子平均动能。}$$

在真空技术中通常以毫米水銀柱及微米水銀柱作为压力的單位。

毫米水銀柱是高 1 毫米水銀柱的压力。大家知道，标准大气压等于 760 毫米水銀柱。有时人們也用这个压力作为測量單位，并称之为“物理大气压”。其次采用其他压力單位——工程大气压，巴、皮茲等。有时在外国文献中遇到的为磅/吋²。

气体分子处在不断的不規則运动状态下，既彼此撞击，也与容器壁相碰。單位体积中分子数 (n) 愈多，則分子发生相互碰撞的机会愈頻，分子在兩次碰撞之間所通过的平均路程愈短。分子在兩次碰撞之間所通过的平均距离称为分子自由路程的平均長度 (λ)。分子自由路程平均長度与貯有气体的容器的特性直線尺寸 (d)，兩者的对比关系在很多方面决定了该种气体中所发生的过程的特点。这对比关系可表示某容器内的稀薄度或真空度。

如果分子自由路程平均長度远比容器的直線尺寸为小 ($\lambda \ll d$)，那末分子彼此碰撞的次数远比与容器碰撞为多，这种气体状态称为低稀薄度或低真空度。

容器中气体的真空度在分子自由路程平均長度大大超过該容器的直線尺寸 ($\lambda \gg d$) 时，称为高真空度。在高真空度情况下，分子彼此碰撞的次数远比与器壁碰撞为少。

容器中分子自由路程平均長度与容器的直線尺寸为同一数量級时 ($\lambda \approx d$)，气体稀薄度称为中等稀薄度或中等真空度。

由此可见，真空是相对概念，取决于 λ 和 d 之間的对比关系。

显然，分子自由路程平均長度与压力成反比。空气在温度为 20°C 时的分子自由路程平均長度可根据下式来确定：

$$\lambda \approx \frac{5}{P} \text{ 厘米} \quad (2)$$

式中 P —压力，微米水銀柱

压力为 1 毫米水銀柱时， $\lambda = 0.005$ 厘米；

压力为 10^{-3} 毫米水銀柱时， $\lambda = 5$ 厘米；

压力为 10^{-6} 毫米水銀柱时， $\lambda = 50$ 米。

从公式(1)可見，在溫度(T)不变的情况下，亦即分子动能 $\frac{mv^2}{2}$ 不变的情况下，压力与單位体积中分子数(n)成正比。抽气或打气，也就是减少或增加貯在容器中的分子数量可以改变容器中的压力。从容器中排除气体用專門的真空泵进行。

2. 真 空 泵

工程上最广泛应用的真空泵分为两大类：机械真空泵和蒸气喷射式真空泵。①

机械真空泵用来获得低真空度 10^{-3} 毫米水銀柱以下，蒸气喷射式真空泵用来获得高真空度（到 10^{-7} 毫米水銀柱）。

以下是真空泵的主要参数：

1. 极限真空度——用一块裝有真空計的盖板把真空泵的进口接管封严，这时用泵抽气，所能获得的最大真空度（稀薄度）即是极限真空度。在极限真空度下，真空泵抽出的气体量，和以下数量即容器壁的出气量、工作液体的出气和蒸发量、以及可能有的从外面漏入的空气量相平衡。

2. 最大排出压力——真空泵正常地工作时其出口接管中的极限最大压力。最大排出压力决定于泵的结构及其作用原

* 蒸气喷射式真空泵又称为扩散真空泵——譯者注。

理。机械真空泵的排出压力稍高于大气压(見“机械泵”一节)。蒸气喷射泵的排出压力远低于机械泵，很少超过0.1—0.2毫米水銀柱。因此，为了保证蒸气喷射泵的正常工作，必須將机械泵和它串联在一起，以便造成蒸气喷射泵出口連接管中所需的預真空度。

唯有当被抽气的真空装置中的压力不超过泵的最大排出压力时，才允許开动真空泵进行抽气。

3. 真空泵的抽气速率用單位時間內，在压力 P 下通过泵进口連接管截面的气体体积来計量。抽气速率(S_H)可用下式求得：

$$S_H = \frac{Q}{P} \quad (3)$$

式中： Q —單位時間內用真空泵从容器中抽去的气体量；

P —泵的进口連接管处的压力。

蒸气喷射泵的抽气速率主要决定于进口連接管的截面积。机械泵的抽气速率决定于轉子的轉速及轉子每轉一轉被泵抽去的气体体积。图1作为例子表示BH-494机械泵及ЦБЛ-100蒸气喷射泵的抽气速率与压力之間的关系。

在真空技术中，气体量用 PV 的單位表之，因为容积 V 中的气体量由气体的压力 P 决定。

气流(Q)通常以單位時間內，折合至一定压力(毫米水銀柱或微米水銀柱)下的气体通过某一截面的体积(立升)来表达。例如

$$Q = \frac{1 \text{ 立升} \cdot \text{毫米水銀柱}}{\text{秒}} = 1000 \frac{\text{立升} \cdot \text{微米水銀柱}}{\text{秒}}$$

这就是說，在一秒中內，通过管道截面流过压力为1毫米水銀柱的气体为1立升，或者在一秒鐘內，流过压力为1微米水銀柱的气体为1000立升。

抽气速率用单位时间的体积来计量，通常用立升/秒表示。

例 1 抽气速率 $S_H = 0.21$ 立升/秒的 BH-494 真空泵用来抽某一容器中的气体。此容器每小时放出 1 大气压下的气体 200 厘米³。问容器中压力应是多少？

$$1. \quad Q = 200 \frac{\text{厘米}^3 - \text{大气压}}{\text{小时}} = 200 \frac{1}{3600} \text{立升} \times 760 \text{毫米水银柱}$$

$$= 200 \times 0.00021 = 4.2 \times 10^{-2} \text{立升} - \text{毫米水银柱}$$

$$2. \quad P = \frac{Q}{S_H} = \frac{4.2 \times 10^{-2}}{0.21} = 0.2 \text{毫米水银柱} = 200 \text{微米水银柱}$$

如果实际上必须时常进行类似例 1 的计算，则根据抽气速率曲线（图 1）作出泵的抽气量（每秒被泵抽去的气体量）与压力之间的关系曲线较为方便。图 2 中提供了 BH 494 泵的抽气量与进口压力之间的关系。

例 2 如果漏到容器中的气体量等于 100 $\frac{\text{立升} - \text{微米水银柱}}{\text{秒}}$ ，欲将容器中压力抽到 1×10^{-2} 毫米水银柱，问要用怎样的真空泵（ $S_H = ?$ ）？

$$\text{解：} S_H = \frac{Q}{P} = \frac{100}{10} = 10 \text{立升/秒}$$

用 BH-1 真空泵可将容器抽到所要求的压力（见附录 1）。

应该注意的是，在以上两个例子中用泵抽气时在容器中所

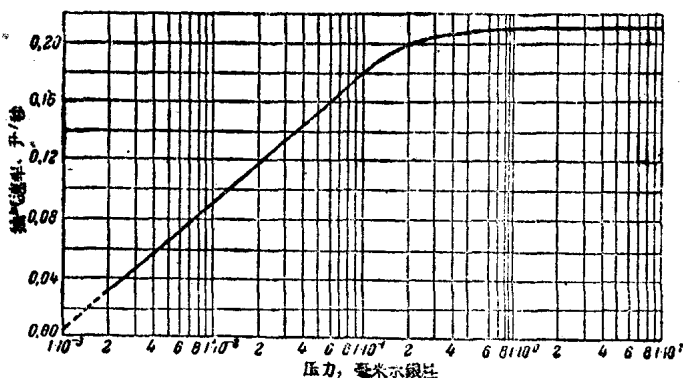


图 1a BH-494 机械泵抽气速率与压力之间的关系

达到的压力与容器
体积 (V) 无关。
体积的大小仅仅影
响达到要求的压力
所需的时间。

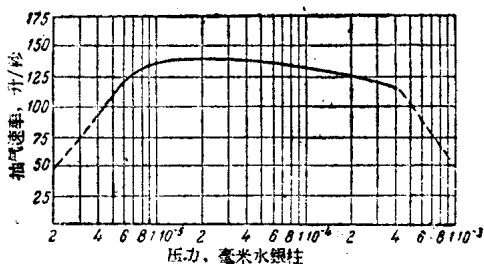


图 16 11BJ-100 蒸气喷射系的抽气
速率与压力之间的关系

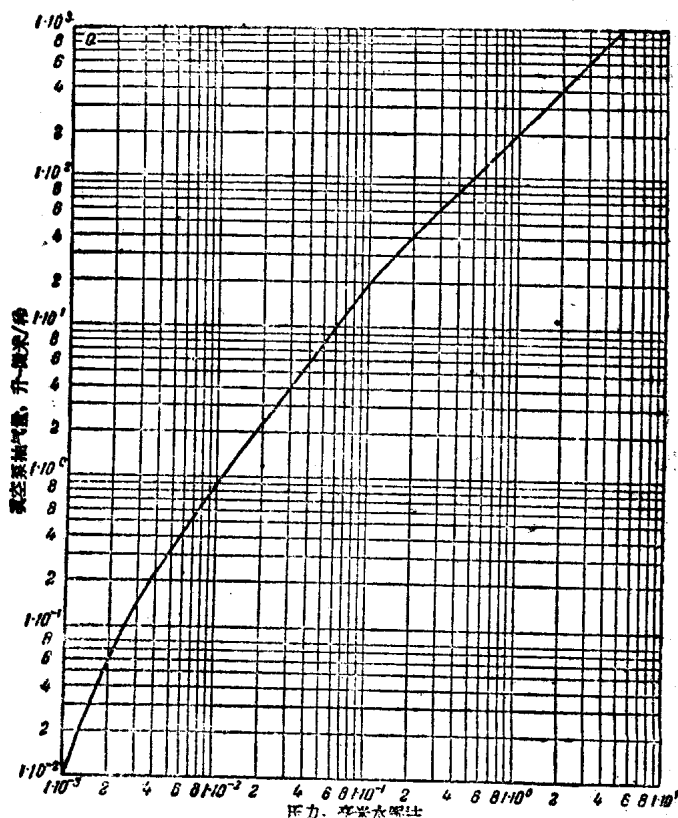


图 2 BI-494 真空泵的抽气量与被抽容器中压力之间的关系曲线。

机 械 泵

在真空技术中最常用的机械泵有三种形式：薄板轉子式、薄板定子式及滑閥式。机械泵的工厂名称及其工作参数見附录（表1）。这些泵（图3A）的作用原理基于以泵的运动部件来机械压出充滿在工作体积中的气体。

图3Aa表示型号为BH-494的薄板轉子式机械泵的作用原理图。轉子1偏心地位于泵的定子2的空腔中。轉子在旋轉时沿着定子的段線与其圆柱形内表面紧紧地相貼合。在轉子縱向槽中嵌有兩块密封的叶板3，叶板用彈簧4紧压在定子内表面上。当轉子按箭头所示的方向旋轉时，为叶板3所隔出的体积I增大，同时气体从所抽容器中經過进口連接管5被吸气。随着轉子的轉动，体积I开始佔有位置II，随后佔有位置III。当轉子繼續轉动时，体积III减小，其中的气体被压缩。在被压缩气体的压力作用下，活門6打开，將气体排到大气中。

图3A6表示最广泛应用的BH-461薄板定子式真空泵簡图。与上述泵結構不同之点在于活动密封叶板裝在定子3的槽中，并用彈簧8拉紧槓桿7，在槓桿的压力作用下叶板与偏心地安在軸1上的轉子2表面紧密地相貼。

图3Ab表示BH-1滑閥式机械泵的工作簡图。在偏心轉子1上套有一个圓筒形套圈2，而套圈上凸出一个帶有孔4、上部开口的空心平行六面体3。轉子轉动时，套圈滚动，同时略沿室壁滑动，而平行六面体則作擺动，在滑閥7中上下滑行。这样套圈可以完成兩個职能——所要抽的气体經平行六面体上部开口及孔4吸入，而經連接管5將气体排出。这种型式的泵在結構上較为簡單，抽气速率大，例如：BH-6真空泵在压力760毫米水銀柱时抽气速率达155立升/秒。

充在安有定子的泵壳中的油，用来潤滑和密封定子和轉子

另件之間的間隙。油封同時也保證了帶動轉子轉動的軸的填料函的氣密性以及保證排氣活門 6 工作可靠。

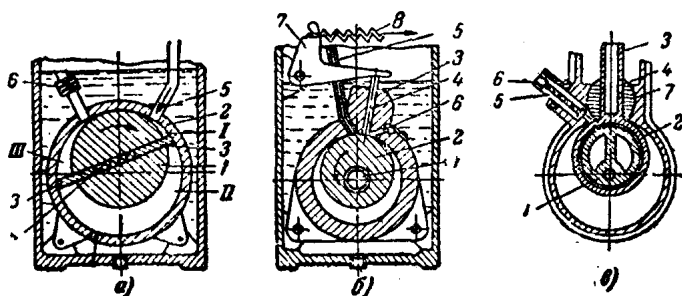


图 3A 机械泵簡图

a—薄板轉子式：

1—轉子；2—定子；3—密封葉板；4—彈簧；5—進口連接管；6—活門

6—薄板定子式：

1—軸；2—轉子；3—定子；4—密封葉板；5—進口連接管；6—出口連接管；7—橫桿；8—彈簧

B—滑閥式：

1—轉子；2—圓柱形套圈；3—空心平行六面體；4—孔；5—出口連接管；6—活門；7—滑閥

油可通過泵壳下部的放油塞從泵中放出。檢查油位時，應當用手轉動泵的皮帶輪。在不工作情況下充滿在定子內腔的油被壓擠到泵壳中，因而油位升高。

機械泵正常工作的持久時間決定於對它的維護程度。泵的修理工作僅允許熟練的工作人員來做。特別應該注意的是，不要使堅硬的物體（金屬鉋屑、鋸屑、玻璃碎片等）掉入泵中，這些東西可能擦傷泵的工作另件的表面，因而破壞它們貼緊的氣密性。同樣水銀滴入亦是有害的，因為它會引起金屬的汞齊化。

在工廠及實驗室的實踐中，機械泵不僅用來獲得預真空，也常常用在乾燥、蒸餾等過程中。但是普通結構的機械泵不適合於抽水蒸汽，因為蒸汽在壓縮過程中就會冷凝，在壓縮室中

所达到的压力不可能超过泵工作温度（約 60°C ）下的蒸汽饱和压力。形成的液体（凝結水）与油混合在一起留在泵內。在泵中的水蒸汽压和抽空容器中的水蒸汽压之間达成平衡，抽气已不发生作用。水混入油中后水形成乳濁液——水和油的机械混合物，使油中含有的酸份溶解及活化，而引起油的膠化及泵的金属另件的氧化。結果泵的极限真空度下降，泵的工作另件损坏。

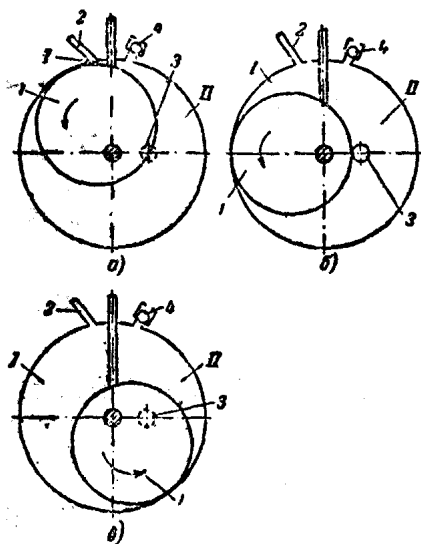


图 36 机械式气体鎮定真空泵的作用原理图

1—轉子；2—进口連接管；3—泵与大气相通的孔；4—出口連接管

盖着的孔 3 打开。这个孔使泵与大气相通。空气（鎮定气）經過孔漏入压缩室，这样在往后压缩时，压缩室中的压力將为所抽的蒸汽、气体的分压及放进鎮定气体的分压之和。

轉子繼續移轉，孔 3 又重新关闭，由于不断压缩，压力繼

現在有一种改良的机械泵，它除能抽气体以外尚能抽水蒸汽，亦就是所謂气体鎮定真空泵（Газобалластный насос）。根据图 36 所表明的簡图可以了解这种泵的作用原理。抽气循环开始时，被抽容器中的气体和蒸汽經過进口連接管 2 被吸入容积 I。在轉子 1 轉动时，与进口連接管連通的体积 I 逐渐扩大，随后佔据 II 的位置。当轉子轉到如图 3 Б 6 所指出的位置时，則原先被轉子

續增加，直到打開排氣活門 4 為止。此後進行排氣。為了使被抽的蒸汽能與放進的鎮定氣（空氣）一起排到大氣中去，所放進的鎮定氣體量（空氣）應選擇得使蒸汽分壓尚未等於蒸汽飽和壓力以前，先達到足夠打開活門的壓力。顯然，被抽容器中的蒸汽壓力愈大，則達到飽和壓力也愈早（壓縮程度較小）。因此，為了防止蒸汽冷凝下來，就需要較多的鎮定氣體。所放進的鎮定氣體量用專門的定量閥門來調節。

當被抽氣系統中的壓力很大時，在轉子完全復蓋孔 3 以前，排氣即該開始，在孔 3 上裝有活門以備上述情況之用，當壓縮室中的壓力超過大氣壓力時，這個活門會关上孔 3。

下面列出以氣體鎮定真空泵抽水的資料（見表 1）作為例子。

表 1

在 760 毫米水銀柱時的抽 氣速率立升/秒	泵入口處水蒸汽的容許壓 力毫米水銀柱	抽水量① 克/小時
18.3.....	3.0 以下	200 以下
7.0.....	4.0 以下	75 以下

BM-4 真空油對機械泵最為適宜。泵中的油最好每年更換一次到二次。如果泵經常用來抽帶有侵蝕性的蒸汽和氣體（氯、氟等），為避免運動部件卡住，應該更勤地進行換油和清洗。

為了更徹底的去油，在換油時最好用干淨真空油將泵涮兩三次。更仔細地清洗則需將泵拆卸，並應由泵的專門檢修人員來進行。泵每次清洗及灌入油以後，應該用手將皮帶輪轉動若干次，然後開動泵測量極限真空度，檢查泵的工作情況。極限真空度用直接與泵的進口連接管相接的壓力計來測量。用壓縮壓力計測得的極限真空值記入泵的說明書中。這種壓力計僅能測量不冷凝氣體的壓力，因此倒入泵中的油蒸汽壓力並不包括在

① 隨泵入口外壓力的變化而改變。

說明書上所指出的极限真空值中。

在泵工作以前，应确切檢查电动机皮帶輪的旋轉方向。为此，应从泵上取下傳动皮帶并开动电动机。如果正对着皮帶輪站着，則电动机的皮帶輪应按順时針方向旋轉。为避免使油从泵中飞溅出来，不要立刻將泵开足，而是分段逐步开动电动机。

当机械泵安裝在仪器架上或台上时，应考虑到由于泵的旋轉部件不完全平衡泵的外壳会有相当强烈的振动。安裝泵时裝入減震器可降低振动的影响。

机械泵連接时应預先考虑到要有可能將它的进口連接管与真空系統隔离，以及放大气入泵。所以需要这样是因为泵停止后，泵內的油有可能被吸入真空系統。在BH 461 型真空泵中因具有平衡室就消除了油漏到真空系統中去的可能。但是即使在这种情况下，为保持系統中的真空度，真空系統也应与泵隔开。用金属閥門或直角通玻璃旋塞可將真空系統与泵隔离。如果泵与被抽系統用橡皮管連接，則可用夾鉗压紧橡皮管来隔离它們。

真空泵排出的气体最好經專門管子或橡皮管引出室外。如果真空泵抽有害气体，不允許真空泵將廢气排在操作房間內。如果泵長期工作而沒有清洗和換油，由于膠化的結果，轉子的轉动就不灵活。严重膠化可能引起真空泵的損坏或电动机的过热。在泵的動轉过程中，电动机所需功率的增加可作为膠化的征候。

在選擇用来抽各种不同尺寸容器的真空泵时，应考虑到泵的抽气速率。用抽气速率小的真空泵抽大容积的设备会引起泵的过载和过热。因此在沒有大抽气量的真空泵来抽大容积设备的情况下，应將若干台真空泵并联，同时用它們来抽气。

容器中压力从 P_1 到 P_2 。所需的抽气時間用下面公式求得：