



shiy

ZHENKONG

# 实用真空

骆定祚

湖南科学技术出版

**shiyong**

ZHENKONGJISHU

---

# 实用真空技术

骆 定 祚

# 实用真空技术

骆定祚

责任编辑：刘孝纯

\*

湖南科学技术出版社出版

(长沙市展览馆路14号)

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

\*

1980年8月第1版第1次印刷

字数：467,000 印张：22.875 印数：1—3,150

统一书号：15204·37 定价：1.90元

# 前 言

真空技术是本世纪初发展起来的一门新技术。目前，它已经广泛应用于原子能、电真空、半导体、电子计算机以及宇宙航行等方面。现代科学技术的发展，对真空技术提出了新的、更高的要求，许许多多的新技术、新工艺要以高真空、超高真空为条件，许许多多的新器件、新材料要在高、超高或很“清洁”的真空环境下工作或制备。然而，现今的真空技术、工艺、装备和应用状况都难以适应这种需要。这是当前亟待解决的问题。

1975年，第四机械工业部指示筹备中南地区真空设备维修技术训练班，笔者有幸受聘为训练班讲课，编写了《真空设备维修技术》讲义。于1976年讲授后，学员反映尚好。后来，许多单位和读者纷纷要求提供资料或建议出版。于是，湖南省电子工业局要求笔者对原讲义进行修改和补充，并向出版社推荐。笔者遂以原讲义为基础，将从事真空技术工作二十余年所积累的知识和经验加以整理，编写成此书，以供真空设计、技术人员，以及操作、维修工人参考。其实效如何，还很难说。它只不过是一块引玉之砖，恳切希望同行们指教。

本书保持了原讲义深入浅出、切合实用的特点，增加了真空基础理论和简单计算等新内容，还介绍了国外的真空技术发展趋向。此外，还收集了大量的有关真空技术的资料，附录于

后，可供查考。

笔者的知识有限，完成这部长达四十多万字的著作是颇有困难的。不是各方面给予支持，本书的问世将难以想象。本书编写过程中得到第四机械工业部中南供办、四机部中南地区机动科长工作会议、湖南省电子工业局、770厂等单位的领导、技术人员和工人的热情支持和帮助，不少单位的同志提供了宝贵的经验和资料；770厂副总工程师翟瞻莱同志亲自审稿，真空工艺实验室、真空泵维修组及唐爱华、胡成佳、王玉川、童升华、王文举等同志给予多方面具体的支持；焦小平、王宝民、刘碧文、李筑银、杨兴林等同志协助绘图；朱月珍、于人伟、顾森、龙建辉、魏亚德、陆源德、贺兰珍、罗丽元、熊佩及其他诸多热心同志协助誊写；津市吴友根老师傅生前为协助作者验证修泵技术而亲自修好了几台已报废的典型坏泵，提供了他积累多年的宝贵经验。在此，一并表示衷心的感谢！

**骆定祚**

1979年7月落稿 1980年3月订正于长沙

# 目 录

## 第一章 真空技术的基本理论与简单计算..... ( 1 )

第一节 真空与真空的量度..... ( 1 )

第二节 分压强定律..... ( 12 )

第三节 理想气体定律及应用举例..... ( 16 )

第四节 真空技术常用的物理概念及简单计算..... ( 28 )

第五节 气体流动状态及流导..... ( 34 )

第六节 真空技术的基本方程..... ( 64 )

第七节 真空系统简单计算..... ( 78 )

第八节 真空技术理论研究范畴与在实践中的应用..... ( 87 )

## 第二章 机械真空泵 (低真空泵) ..... (105)

第一节 油封机械真空泵..... (106)

第二节 定片式机械真空泵 (定片泵) ..... (110)

第三节 滑阀式机械真空泵 (滑阀泵) ..... (111)

第四节 往复式机械真空泵..... (117)

第五节 水蒸气喷射泵..... (120)

第六节 机械增压泵 (罗茨泵) ..... (125)

## 第三章 旋片式油封机械真空泵 (旋片泵) ..... (130)

第一节 旋片泵的结构与工作原理..... (130)

第二节 旋片式真空泵的结构特征分析..... (140)

|     |                      |       |
|-----|----------------------|-------|
| 第三节 | 旋片泵的参量               | (178) |
| 第四节 | 旋片泵的改进               | (187) |
| 第五节 | 旋片泵的技术条件和试验方法        | (195) |
| 第四章 | 机械真空泵的维修             | (208) |
| 第一节 | 机械真空泵的安装、使用、维护和保养    | (208) |
| 第二节 | 油封机械真空泵常见故障          | (211) |
| 第三节 | 油封机械泵修理工艺概述          | (214) |
| 第四节 | 油封机械泵的总装配            | (232) |
| 第五节 | 油封机械泵常见故障分析和维修实例     | (241) |
| 第六节 | 多室泵和往复泵的维修           | (257) |
| 第七节 | 某些零部件的加工工艺简介         | (263) |
| 第八节 | 修泵常用工具、材料和设备         | (281) |
| 第五章 | 高真空泵                 | (284) |
| 第一节 | 油扩散泵                 | (284) |
| 第二节 | 油扩散泵使用、操作、维护、修理和性能试验 | (338) |
| 第三节 | 无油类型的真空泵             | (359) |
| 第六章 | 真空系统和材料              | (401) |
| 第一节 | 决定真空系统性能的因素          | (401) |
| 第二节 | 真空系统的典型结构            | (403) |
| 第三节 | 真空系统用泵的选择            | (409) |
| 第四节 | 真空材料                 | (415) |
| 第五节 | 辅助密封材料               | (424) |
| 第六节 | 真空系统的连接              | (428) |

|                              |              |
|------------------------------|--------------|
| 第七节 阱.....                   | (445)        |
| 第八节 阀.....                   | (455)        |
| 第九节 真空系统的鉴定和清洗.....          | (469)        |
| 第十节 真空系统的安装与调试.....          | (471)        |
| 第十一节 真空系统排气.....             | (475)        |
| 第十二节 真空获得技术的应用实例.....        | (479)        |
| 第十三节 真空系统的污染及消除.....         | (510)        |
| <b>第七章 实用真空测量和检漏技术 .....</b> | <b>(545)</b> |
| 第一节 真空测量技术.....              | (545)        |
| 第二节 真空检漏技术.....              | (603)        |
| 第三节 氦质谱检漏仪.....              | (629)        |
| <b>附录 (二十六项) .....</b>       | <b>(670)</b> |



# 第一章 真空技术的基本理论与简单计算

## 第一节 真空与真空的量度

### 一、大气与真空的概念

地球上的一切生命活动离不开大气。人类没有空气和水是难以生存的。虽然空气和水对于人类有这样大的作用，但是在许多地方，它们的存在却是有害的。例如，在含有过多空气和水蒸气的气氛下，灯泡、电子器件的热灯丝容易烧断，金属零件发生氧化，高压下容易引起电击穿现象以及使某些物质特性变坏等等。在此种情况下，就需要减少空气和水的存在，以减少它们的不良影响。

为此，通常使用“真空设备”把特定空间内之不需要的气体抽除，使这个空间成为“真空”。所谓“真空”，就是指在给定的空间内，气体分子密度低于该地区一个标准大气压时气体分子密度的气体状态。在工程应用上，真空指低于该地区大气压的稀薄气体状态。

这种气体状态并不是都需人为地去造成，实际上自然界里就有。当爬上很高的山峰或到达高原地区时，人们常会感到空气稀薄的压力，呼吸也觉得困难了；离地球表面愈远，或海拔愈高，这种感觉愈厉害。这是因为空气愈加稀薄了，严格地说，

是单位体积内的气体分子数减少了。通常，物理学把北纬45°海平面的海拔高度认为是零，在此处的空间温度为27℃时，每立方厘米的大气体积中含有的分子数目（分子密度）测出为 $2.45 \times 10^{19}$ 个，因此就把相对于这种情况的大气压称为一个标准大气压（相当于760毫米水银柱高）。不同地区，由于海拔高度不同，大气压因之不同，天气变化，大气压也变化。天气预报经常提到某一时刻某一地区多少公里高空大气压的数值变化情况，实际上就是此时该处的大气中单位体积内分子数目变化情况。比如，当海拔高度上升到46公里时，气体分子的密度或每立方厘米中的分子数目已下降到 $3.2 \times 10^{16}$ 个（相当于大气压强的1/760，也就是1毫米水银柱时的分子密度了，参见表1—1和表1—2）。这种低于一个标准大气压的气体状态，按定义显然就属“真空”状态。

**表1—1 不同高度下大气压强的数值**

| 高度<br>(公里) | 0   | 14    | 30  | 46   | 60        | 90        | 100       | 200       | 440       | 900        | 月球<br>表面   | 星球<br>空间        |
|------------|-----|-------|-----|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|-----------------|
| 压强<br>(托)  | 760 | 100   | 10  | 1    | $10^{-1}$ | $10^{-3}$ | $10^{-4}$ | $10^{-6}$ | $10^{-8}$ | $10^{-10}$ | $10^{-14}$ | $\sim 10^{-20}$ |
| 温度<br>(℃)  | 15  | -56.5 | -47 | -6.5 | -17.4     | -92.5     | -63       | 963       | 1215      | 1234       | —          | —               |

**表1—2 在不同压强下，27℃ (300 K) 空气的分子密度**

| 压强 $P$<br>(托)                   | 760                   | 10                   | $10^{-3}$            | $10^{-6}$            | $10^{-9}$         | $10^{-12}$        |
|---------------------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-------------------|
| 分子数 $n$<br>(个/厘米 <sup>3</sup> ) | $2.45 \times 10^{19}$ | $3.2 \times 10^{16}$ | $3.2 \times 10^{13}$ | $3.2 \times 10^{10}$ | $3.2 \times 10^7$ | $3.2 \times 10^4$ |

比较上面两个表可以看出，当海拔高达900公里以上时，气体分子密度已减少到 $10^6$ 个/厘米<sup>3</sup>左右（即相当于标准大气压的1/10<sup>8</sup>或 $10^{-10}$ 毫米水银柱），按真空度区域划分，已属超高真空范围了。可见，宇宙环境和地面环境是极其不同的，除重力、

射线和温度差别很大外，宇宙空间的压强是很低的，气体成分主要是氢和氦（图1—1）。也就是说，火箭、人造卫星、宇宙飞

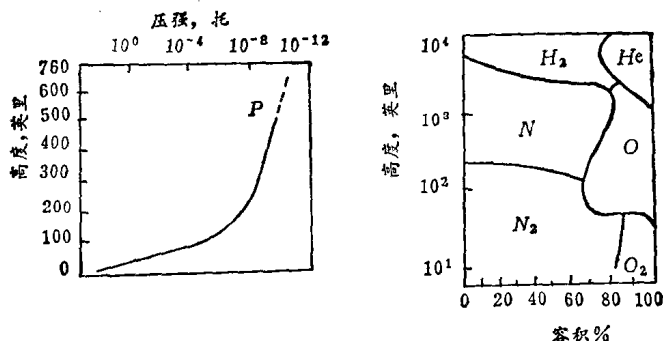


图1—1 高度和压强与气体成分的关系

船，实际上是在很低的大气压强下，即很高的真空状态下，在多为氢和氦的气氛下运行的。由于气体分子数目很少，对飞行器的阻力很小，所以飞行速度可保持很高。地面上要想研究飞行器在这种环境中飞行的情况、了解卫星或飞船的零件或材料能否经受住考验以及在高真空状态下物质特性的变化情况、了解人类在高真空状态下的适应程度，就需要在地面上先用扩散泵、钛泵或低温冷凝泵等真空设备把大容积抽成类似的真空状态，模仿宇宙的环境，作真空条件、太阳光及温度方面的模拟试验才行。

仅仅从表面字义理解，“真空”似乎应当指“没有任何东西存在的空间”。实际上，绝对的“空”是不存在的。一个不装任何东西的容器，习惯上说它是“空”的，其实不然，它里面装

满了空气。在标准状态下 ( $0^{\circ}\text{C}$ , 一个大气压), 每立方厘米体积中含有  $2.69 \times 10^{19}$  个气体分子。如果象前述那样地用真空泵设法把这些气体分子抽走, 是否就能完全“空”了呢? 不能! 从表1—1中也会看到, 即使把容器抽到  $10^{-12}$  毫米水银柱的高真空环境, 每立方厘米的空间内仍将有三万多个气体分子, 只不过是该容器内的大气压强降低了很多罢了。由此可以得出一个重要原理: 大气压强与气体分子的数目是有密切的关系的。

## 二、大气压强

前面提到, 大气是有压力的。这可以用下面的实验证明: 在一根长约 1 米的一端封闭的玻璃管中装满水银, 用手堵住管口, 倒立于水银槽中, 松开手后, 水银就会下降, 可是当管内

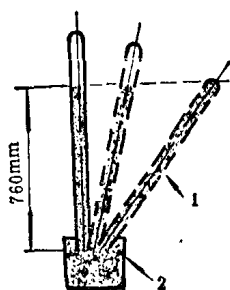


图1—2 大气压力

1. 玻璃 2. 水银槽

水银面高出槽内水银面760毫米时, 水银就不再下降了, 不管玻璃管直立或歪斜, 管内水银面始终保持在760毫米左右 (图1—2)。可见, 此时玻璃管内水银柱的压强与作用在槽里水银面上的大气压强相等。因此, 只要能求出管内水银柱的压强, 就能知道大气的压强。这里说的

“压强”, 按物理学定义, 就是指容器的单位面积上所承受的压力。

若上述实验中玻璃管内水银柱的压强以  $P$  代表, 已知水银比重  $d$  等于  $13.6 \text{ 克/厘米}^3$ , 水银柱高度  $h$  是76厘米, 则压强  $P$  即大气压强可由下式算出:

$$P = d \cdot h = 13.6 \text{克/厘米}^3 \times 76 \text{厘米}$$

$$= 1033.6 \text{克/厘米}^2 \quad (1-1)$$

此压强即称作标准大气压强，记作ATM。

通过上述实验，证明了大气压的确存在，而且得出了它的数值是76厘米水银柱（汞柱）或在每平方厘米的表面上承受了1033.6克重的力。

生活、生产中，说明大气压强存在的例子是很多的。例如抽成真空度为 $10^{-4}$ 毫米汞柱的灯泡被碰破时，炸的粉碎，这是由于内外压强差有 $10^7$ 倍缘故。一个显像管（例40厘米的）荧光屏表面压力达1吨多，如有局部应力，也就会引起爆炸伤人。镀膜机的玻璃钟罩直径若为20厘米，高30厘米，总面积约8000厘米，工作时，它的表面就要承受约8吨重的压力，所以，它的外面总是加防护罩。

那么，大气压是如何产生的呢？

原来，地球表面有很厚的大气层，这些大气层主要由大量直径约为 $(2 \sim 4) \times 10^{-8}$ 厘米的气体分子组成的。分子总是不停地作不规则的运动。温度越高，分子运动越激烈，分子运动的平均速率就越大。因此，气态物质由于这种分子的热运动，不但使气体分子之间不断产生频繁的碰撞，而且还使气体分子与容纳该气体的容器壁产生频繁的碰撞。在宏观上，就使器壁受到一个均匀的作用力。单位体积内的气体分子数目越多，温度越高，则表现其作用力越大。这就是气体压力的实质。它说明了前已提及的不同地区的海拔高度不同，气温不同，大气压力为什么会不同，以及同一地区气压也经常发生变化的原因。

### 三、真空度的单位

真空度是指处于真空状态下之气体的稀薄程度习惯用语，这种气体状态的描述，本来采用单位体积内气体分子的数目（或称气体分子密度）这个物理量就可以了。但由于实际量度时很不方便，故采用宏观上的“压强”这个物理量来表征真空的高低，用起来就很方便。应当强调说明的是，“压强”和“真空度”的物理意义是不同的。我们指出“真空度高”，意味着这时“压强”是低的；反之，指出“压强愈高”，表示此时的真空度愈低。在真空技术中，经常遇到“真空度”和“压强”这两种提法，应当严格地区别它们的物理意义。

在真空技术中最常用的真空度单位是毫米水银柱（或毫米汞柱，记作mmHg）和托\*（Torr）。

按1927年国际计量大会规定，将标准状态下（重力加速度为980.665厘米/秒<sup>2</sup>下，760毫米0℃纯汞）的毫米水银柱（mmHg）定义为“托”作为真空度单位。

1毫米汞柱或1托，就是指0℃时1毫米高的水银柱作用在单位面积上的力。而纯水银0℃时的比重是13.5951克/厘米<sup>3</sup>，所以1毫米汞柱精确地计算该是13.5951克/厘米<sup>2</sup>。

前已提及，把北纬45度海平面的大气压定为1个标准物理大气压，它相当于760毫米汞柱。由于该地区的气压不可能一点不变化、不运动，因此这标准是不够严格的。后来，就把1个国际物理标准大气压（ATM）固定为：1 ATM = 1013250 达因/厘米<sup>2</sup>。它是根据前述“托”的定义条件换算出来的。这样

---

\* “托”原写为“乇”，因国家标准化，改作“托”。

一来，1 ATM 就不完全等于760毫米汞柱。1毫米汞柱本来与1“托”是一回事，这样一引入新定义，二个单位便产生大约七百万分之一的微小差别。但习惯上，仍把它们等同看待。

所以，1托 (Torr) = 1/760国际标准大气压(ATM)

$$= 1.35951 \text{克/厘米}^2$$

$$\doteq 0.00136 \text{公斤/厘米}^2$$

在不同国家和用不同的学科单位制，参考不同的真空书籍，往往遇到使用的单位制不同，压强的单位就不同；因此，压强单位的种类较繁杂，1945年时已有15种。通常真空技术中最常用的单位就是前述的“mmHg”和“托(Torr)”。

1969年，国际计量委员会建议(1971年批准)，推广一种米、千克、秒制合理单位叫“帕斯卡”(Pascal)，简称“帕”(Pa)。

$$1 \text{ 帕} = 1 \text{ 牛顿/米}^2$$

$$= 1 \text{ 千克/米} \cdot \text{秒}^2$$

$$= 10 \text{ 达因/厘米}^2$$

$$= 7.5006 \times 10^{-3} \text{ 托}$$

使用这种单位以后，计算、换算等就很方便了。例如，流量单位，目前惯用托·升/秒，如用“帕”作压强单位，则流量单位就是“瓦特”，与功率单位一致了，这样就消除了一个量多种单位的现象。但因习惯和其它原因，在国际上马上就完全统一使用标准单位，恐怕还是困难的。我国也尚未规定统一单位，故本书仍沿用“托”作真空度之单位。

我们还应了解现在习惯上沿用的一些常用真空度单位制。有如下几种，

1. 微巴 ( $\mu\text{bar}$ ): 这是厘米、克、秒制单位。

$$\begin{aligned} 1 \text{ 微巴} &= 1 \text{ 达因/厘米}^2 \\ &= 7.5006 \times 10^{-4} \text{ 托。} \end{aligned}$$

有些地方用毫巴 ( $\text{mbar}$ )、巴 ( $\text{bar}$ ), 它们的关系是:

$$1 \text{ 巴} = 10^3 \text{ 毫巴} = 10^6 \text{ 微巴}$$

2. 工程大气压 ( $\text{AM}$ ) 公斤/厘米<sup>2</sup>: 这是工程单位制。由于大气压强约为1公斤/厘米<sup>2</sup>, 所以把1公斤/厘米<sup>2</sup>称为工程大气压。

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= 1 \text{ 公斤/厘米}^2 \\ &= 735.56 \text{ 托} \end{aligned}$$

3. 英制单位: 英制单位有两种。一是“英寸汞柱” ( $\text{inchHg}$ ); 另一种是“普西” ( $\text{Psi}$ , 磅/英寸<sup>2</sup>)。 (1英寸等于2.54厘米, 1磅等于0.454公斤。)

4. 用真空度的百分数来表示工程热力学单位。一般只是在压强高于1托时才采用。

$$\delta\% = \frac{760 - P}{760} \times 100\% \quad (1-2)$$

例如: 当760托时,  $\delta = 0$       8托时,  $\delta = 99\%$

各种压强单位之间的换算列于表1—3中,

从表1—3中可以看到, 真空度的表示方法是利用数学上的负指数表示的。习惯上凡是小于1托的真空度数值, 均用负指数表示, 例如:

$$\begin{aligned} 0.1 \text{ 托} &= 1/10 \text{ 托} = 1 \times 10^{-1} \text{ 托,} \\ 0.00005 \text{ 托} &= 5/100000 \text{ 托} = 5 \times 10^{-5} \text{ 托, 等等。} \end{aligned}$$



表1-3 压 强 单 位 换 算 表

|                                  |                          |                           |                          |                           |                                       |                           |                                       |
|----------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|
| 1 帕<br>(1牛顿/米 <sup>2</sup> )     | 1                        | 7.5006 × 10 <sup>-3</sup> | 10                       | 物理大气压<br>(ATM)            | 工程气压<br>(AM)<br>(kg/cm <sup>2</sup> ) | 英寸汞柱<br>(inchHg)          | 普 西<br>(lb/in <sup>2</sup> )<br>(Psi) |
| 1 托<br>(1毫米汞柱)                   | 1.3332 × 10 <sup>2</sup> | 1                         | 1.3332 × 10 <sup>3</sup> | 1.3153 × 10 <sup>-3</sup> | 1.3595 × 10 <sup>-3</sup>             | 3.9370 × 10 <sup>-2</sup> | 1.9337 × 10 <sup>-2</sup>             |
| 1 微巴<br>(1达因/厘米 <sup>2</sup> )   | 10 <sup>-1</sup>         | 7.5006 × 10 <sup>-4</sup> | 1                        | 9.8692 × 10 <sup>-7</sup> | 1.0197 × 10 <sup>-6</sup>             | 2.9530 × 10 <sup>-5</sup> | 1.4503 × 10 <sup>-5</sup>             |
| 1 物理大气压                          | 1.0133 × 10 <sup>5</sup> | 760.00                    | 1.0133 × 10 <sup>5</sup> | 1                         | 1.0332                                | 29.921                    | 14.695                                |
| 1 工程气压<br>(1公斤/厘米 <sup>2</sup> ) | 9.8067 × 10 <sup>4</sup> | 735.56                    | 9.8067 × 10 <sup>5</sup> | 9.6734 × 10 <sup>-1</sup> | 1                                     | 28.959                    | 14.223                                |
| 1 英寸汞柱                           | 3.3864 × 10 <sup>3</sup> | 25.400                    | 3.3864 × 10 <sup>4</sup> | 3.3421 × 10 <sup>-2</sup> | 3.4532 × 10 <sup>-2</sup>             | 1                         | 0.49115                               |
| 1 普 西<br>(1磅/英寸 <sup>2</sup> )   | 6.8948 × 10 <sup>3</sup> | 51.715                    | 6.8948 × 10 <sup>4</sup> | 6.8046 × 10 <sup>-2</sup> | 7.0307 × 10 <sup>-2</sup>             | 2.0360                    | 1                                     |