

真空技术基础

华中一編著

上海科学技术出版社

675.1

真空技术基础

华中一 編著

上海科学技术出版社

內 容 提 要

这是一本專为从事电真空工作的技工和技术員写的基础書籍,对于真空技术的各方面有簡單、明确而扼要的叙述。書内还提出了一些目前在真空技术方面尚未解决的問題,供讀者进一步独立思考。

本書也适合于物理系及无綫电系学生、中等技术学校学生及一般应用真空技术的实验室工作人員参考。

真 空 技 术 基 础

編著者 华中一

*

上海科学技术出版社出版

(上海南京西路2004号)

上海市书刊出版业营业許可証出 093 号

上海劳动印制厂印刷,新华书店上海发行所总經售

*

開本 787×1092 1/32 印張 4 1/4 字數 90,000

(原科技版印5,000冊)

1969年1月新1版 1959年3月新1版第2次印刷

印數 2,001—10,000

統一書号:15119·835

定价:(十)0.42元

前 言

1958年6月13日晚上，在比利时那摩尔召开的第一届国际真空技术会议閉幕了。参加这个会议的资本主义国家的“先生”們，大概做梦也不会想到在地球的那一面——复旦大学物理系会有一群青年人聚集在一起，发出了“两年就赶上英国爱德华真空器材厂”的响亮宣言。两年，这是一个艰巨然而也是光荣的任务！为了使参加赶英国工作的每一个人都具有一定的业务知識，我决定写这一本小書以提供技工、技术員和大学勤工儉学同学作为参考。

国内在真空技术方面的書籍一向很缺乏。1945年版亞伍德(Yarwood)的“高真空技术”譯本，在1957年仍然繼續重印，就可以想象問題的严重性。在我校“高真空技术与設備”出版以后，解决了部分工厂和真空實驗室自制真空器材的問題，但对广大的从事电真空工作的技工、中技学生、一般技术員和實驗室工作人員而言，結合国内实际的真空原理和技术書籍仍然沒有解决。为了迅速赶上技术革新的要求，这本书也許会有若干帮助。

在書内我采用了一些比較簡單的描述使讀者能对真空技术具有一种完整而明确的概念。所有的圖和算式也尽量簡化，而且有一定的重复，这样可以便于記憶。本書还特別着重于討論各种真空获得和测量方法的优缺点，同时为了帮助同志們独立思考，也提出了一些在真空技术的进展上尚未解決的問題。不过

由于撰写时间非常短促，一定会有很多疏漏的地方，只能等以后再补正了。

最后，让我向从事真空和其他工作的工人兄弟们致敬！凭着你们的智慧和劳动，社会主义是会很快地到来的。

作者 1958年6月30日

复旦大学

目 次

前言

第一章 真空的一般概念..... 1

大气压力..... 1	高真空情况下气体分子的动力学性质..... 9
真空..... 3	
真空在技术应用上的优点..... 5	

第二章 高真空的获得.....12

抽气的一些定义.....12	扩散真空泵.....23
粗泵.....12	电子泵.....33
机械真空泵.....13	离子泵.....35
气镇式真空泵.....17	收气和化学清除.....38
分子泵.....22	活性炭.....39

第三章 高真空的测量.....41

真空规的选择.....41	热阴极电离真空规.....53
低真空量具.....42	冷阴极电离真空规.....64
麦克劳真空规.....46	克努曾真空规.....69
热导真空规——皮喇尼式和热偶式.....49	利用超显微镜测定超高真空.....76
阻尼真空规.....52	高真空量具的展望.....77

第四章 电真空工艺.....82

电真空工艺的特殊要求.....82	绝缘材料.....93
金属.....84	玻璃.....94
石墨.....89	焊接.....98
半导体.....89	清洁处理..... 101
收气剂.....91	

第五章 真空系統的設計和使用	103
引言	103
管道設計	104
抽氣速率的測量	108
真空泵和真空規的選擇	112
真空考克	114
真空油脂	117
檢漏	118
除氣	121
冷凝阱和干燥劑	125
真空系統的操作手續舉例	126
參考書目	129

第一章 真空的一般概念

1-1 大气压力

多少年来，人們生活在空气中，一直以为空气是一种无色、无味、无臭，而且沒有重量的物質。我們可以任意地在空气中往来，并不感到有什么阻擋。因此气体的压力性質，長期被人所忽略。三百多年以前，意大利塔斯坎尼地方有一个大公爵，他掘了一口 50 英尺(約 15 米)深的水井，却无法把水用普通的唧筒汲出来。他向当时公認為最聪明的科学家伽利略請教，經過了長久的思考，伽利略才作了这样一个假設：即空气也許是有重量的。

这个假設后来被他的学生托里拆利所証实。托里拆利的著名实验是在 1643 年做的。他用一根試管裝满了水，反轉放入一个水盆中，如果这根試管足够的長，則水將流出到一定的高度 h ，然后停止(如图 1)。显然 h 將相当于大气与管内空隙部分 A 的压力差(假定水的密度为 1)。我們可以从实验測得，在温度为 0°C 的海平面上， h 达 1000 厘米以上，即大气在每平方厘米的海面上所施的压力要有 1 公斤多一点！

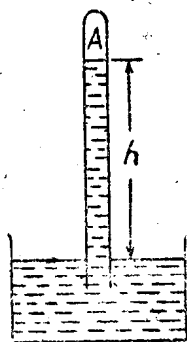


图 1 托里拆利实验

虽然托里拆利已经测得大气的压力，但是由于在他的实验中并没有提供任何利用真空区域(即空隙 A)进行观察某些现象的可能，因而没有得到一般人的重视。有些人仍然具有“即使空气有压力，也只是很小很小”的错误概念。1650 年葛利克(Geryk)发明了一种抽气机，就是活门的方向和一般自行车用的打气筒相反的抽气唧筒。他用两个直径为 60 厘米的金属半球相向地合起来，用上述的抽气唧筒抽去了一部分气体，用八对骏马相背地拉，结果还不能使密合的半球打开。这不但使当时观看表演的罗马皇帝弗狄南三世为之震惊，也使全世界的科学家为之震惊，因为这生动地证明了大气的压力是非常巨大的。这个实验后来被称为“马德堡半球试验”。一个洋铁罐头如果里面抽去了空气，会很容易地压扁；相反地，如果把一只蝦蟆放在玻璃钟罩内，而抽走外面的空气，那么这只可怜的蝦蟆就会爆裂。所以，人所以不感到大气有压力，是因为身体内外都有空气，两边的压力抵消了，正如一张绷在架子上的薄纸，用一个手指头轻轻一顶，就会穿一个大洞；但如果两面都用手指顶住，则用很大的力气也不致损坏。

现在国际公认的标准大气压(或称常压)为：在标准重力为 980.665 厘米/秒^2 下，温度为 0°C 时，760 毫米高的汞所施的压力。如果把 0°C 时汞的密度定为 13.59509 克/厘米^3 ，则这数值就相当于 1013.249 达因/厘米^2 。最近重力的标准值已改为 980.629 厘米/秒^2 ，因此常压就被定为 1013.250 达因/厘米^2 的压力(与气压表高度无关)。

用压力的绝对量度达因/厘米²来标志气压，在实用上是不方便的。因此我们常常用一个“相当值”来表示，即“毫米汞高”，

或更好地称为“托(Torr)”:

$$1 \text{ 托} = 1 \text{ 毫米汞高} = \frac{1}{760} \text{ 标准大气压}.$$

1-2 真 空

現在我們可以說到什么是“真空”了。有些人把“真空”理解成为“沒有东西”，这是絕大的錯誤。真空，严格地說来只是压力較常压为小的任何气态空間。完全沒有任何物質的空間被称为“絕对真空”，这是永远达不到的。

我們先看看普通所謂“真空”中还有多少东西。在压力为 1 大气压，温度为 273°K 时，根据罗斯密特常数我們知道 1 立方厘米的任何气体，所含的分子数为 2.683×10^{19} 个；或者可以这样来表示：每立方厘米气体的分子数 N 为

$$N = 9.7 \times 10^{18} \frac{P}{T},$$

此处 P 为压力(以托表示)， T 为絕对温度。这样，在普通室温下，如果

$$P = 10^{-8} \text{ 托}, \quad N > 3 \times 10^8 \text{ 个},$$

$$P = 10^{-10} \text{ 托}, \quad N > 3 \times 10^6 \text{ 个}.$$

也就是說，即使在极高的所謂“超高真空”的条件下，每立方厘米的气体分子仍然在 300 万个以上！

我們再来看看气体分子之間的相互情况。气体分子每秒鐘碰撞單位面积(1 平方厘米)的次数为

$$n = 3.54 \times 10^{22} \frac{P}{\sqrt{MT}},$$

此处 M 为气体的分子量。这样,在压力 P 为 10^{-8} 托, 20°C 时的空气,它的

$$n = 3.84 \times 10^{12}.$$

因此在真空内还是存在着大量的气体分子(不过比平常的空气稀薄得多了),而且不断地在运动着、作用着,和“没有东西”的概念是差得很远的。

为了讨论和实际应用上的方便,常常把不同程度的低气压空间划分为几个名称。这些名称和它们的范围在各本书上常不相同。我在这里提出一个划分方法:

气压为 $760 \rightarrow 10$ 托,称为粗真空;

$10 \rightarrow 10^{-3}$ 托, 低真空;

$10^{-3} \rightarrow 10^{-8}$ 托, 高真空;

10^{-8} 托以下, 超高真空。

这些真空区的分界根据下列的理由:压力在 10 托以上的空气,性质和常压下差不多。10 托左右,气体导电的现象开始显现; 10^{-3} 托是一般转动真空泵能达的极限(有些转动泵能达到 1×10^{-4} 托或更低,但这时抽气速率已非常微小); 10^{-8} 托是扩散泵能达的极限。 10^{-8} 托以下都可以被称为超高真空。我们还不能肯定人类能得到的最低气压是多少,但目前根据已发表的文献来看,还只有 10^{-12} 托左右。

在这里要注意一个问题:气压越“低”,我们称为真空度越“高”;反之,气压越“高”则意味着更“低”的真空度,这一点不要弄错。低气压和高真空是同义的。

在实际工作中,对于真空的要求并不都是愈高愈好。当然,过低的真空度对工作会有妨碍,但过高的真空度非但对实际没

有好处,而且技术上要困难得多,完全不符合“快”、“省”的原则。只有在研究表面现象时才是没有任何一种已达的高真空可以认为是足够满意的。所以真空工作人员必须牢牢记住:一切从实际要求出发。

1-3 真空在技术应用上的优点

在真空条件下工作,到底有些什么好处呢?为什么我们要辛辛苦苦地去寻求一个低压空间呢?我们可以分下列几方面来谈。

第一,不受空气条件的影响。例如热水瓶的复壁中需要真空($10^{-1} \sim 10^{-2}$ 托),是因为去除气体的传导和对流,使热量不容易散出,从而达到保温的作用。温度计需要真空($10^{-2} \sim 10^{-3}$ 托)是因为免除在汞或酒精受热膨胀、玻璃管内残余气体的体积被压缩而产生的气压变化影响测量高度。电灯泡需要真空($10^{-1} \sim 10^{-3}$ 托)是因为防止钨丝在高温时和空气中的氧作用而被焚燬。霓虹灯($1 \sim 10^{-2}$ 托)是因为要得到一个充满特殊气体的空间。真空保存器(有时称为真空干燥器)是因为在真空条件($10 \sim 10^{-1}$ 托)下可以使存贮物品不致因为空气中的水汽、酸性气体、氨或其他悬浮的污秽物品所沾染。不过这些物品所需要的都只是低真空,也不是真空技术的应用中最主要的部分。

我们目前最感兴趣的是高真空,在高真空的情况下,产生了下面第二和第三两个特点。

第二个特点是清洁。这个“清洁”的意思并不是除七害、讲卫生;也不是上面讲过的真空保存器等所要求的清洁。它的意义是:和空间残余气体的分子间的化学作用可以忽略。首先这就体现在热电子发射的真空条件的要求上。我们知道一个清洁的

金屬表面在高温时会放出电子，这就是所謂热电子发射。发射电子的金屬表面(例如鎢)非但要求不被空气中的氧或二氧化碳所氧化，还要求不被空气中的杂质沾附而致不能发射电子(这现象被称为“毒化”)。高真空就使热电子发射有了保证。純金屬和超純合金的冶炼也需要真空($10^{-2} \sim 10^{-4}$ 托)：例如鈦，人們一向認為它是没有什么用处的金屬，因为它的物理性能很差，一碰就要裂开，但后来发现这是因为它里面含有微量杂质的关系，如果在真空中冶炼而得到的純鈦，竟是一种理想的金屬，它比鋼要輕得多，但是它的强度远超过鎂、鋁、鉄等一般金屬而竟和不銹鋼相近，还能抵抗許多酸鹼和硫的侵蝕。但是由于鈦在高温时很容易吸收氧、氮、硅、碳等元素，因此如果没有真空冶炼，純鈦的得到是不可能想象的。鈹也是类似的情况：鈹在受到氘(重氢)核的轟击后会产生中子流，是原子能工业中核分裂时所需中子来源之一；此外鈹在受到中子轟击时却又象鏡子一样把中子反射回去，可以作为原子堆外面的反射体，——但最好的純鈹也是在真空中冶炼出来的。在原子能工业和电子管工业中用的鎢，几乎和所有的气体都能起作用，所以除了真空冶炼外，也想不出有什么办法可以得到金屬鎢而不是鎢的化合物。其他純合金和超純合金，为了在冶炼过程中不致引入成分的变化，真空氛圍也是完全必要的。半导体的广泛应用大家总很关心和熟悉吧？但是半导体的基体鎢或硅，只要有百万或千万分之一的杂质，就可以破坏它們的特性，除了在真空($10^{-5} \sim 10^{-7}$ 托)中进行区域熔化外，沒有别的办法能使它們提純。很多有机物的合成也必須在真空($10^{-2} \sim 10^{-6}$ 托)中进行反应，才能得到預期的完美效果。

第三个特点是减少碰撞。这要先从气体分子的运动說起。

我們知道分子运动是无规律的、永不会休止,而且只与物质的温度有关。微粒在分子的不規則撞击下发生的运动称为“布朗运动。”例如气体的扩散就是因为分子运动的作用。两只玻璃瓶中間放一个考克(活門),如图2所示,則在活門打开时,如果只考虑重力作用,那末因为上面瓶子装的氢气要比下面瓶子装的氮气輕,这两种气体的混合就不可能发生。但实验結果这两种气体很快地就会混合起来,这就証明了扩散现象的存在。气体分子处在連續的混乱运动状态中,它們互相碰撞。在两次碰撞之間,分子可以自由地通过一个路程 λ 。各个 λ 并不相等,取平均值为 $\bar{\lambda}$,称为平均自由路程。如图3所示,

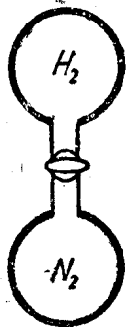


图2 扩散实验

两个分子如走到距离为它們的半径 r 的2倍时,就可以說他們已經相撞。根据这样的假定,可以算得气体分子平均自由路程 $\bar{\lambda}$ 的長度①为:

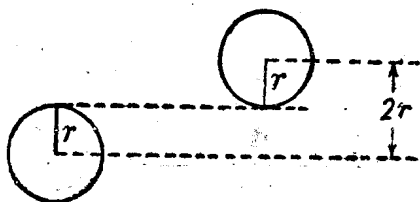


图3 碰撞示意图

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{4 \sqrt{2} n \pi r^2} = \frac{1}{\sqrt{2} n \pi d^2},$$

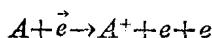
此处 n 为單位体积內的分子数, d 为分子直径。因为 n 正比于压力 P ,所以

$$\frac{\bar{\lambda}_1}{\bar{\lambda}_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{P_2}{P_1};$$

① 参看 Франк-Тиммерева 著、梁宝洪译:“普通物理学”第一卷,211頁;(1951)

也就是說:分子的平均自由路程 $\bar{\lambda}$ 与气体压力 P 成反比。压力越低(注意,这就是真空度越高),平均自由路程就越長,單位時間內分子互相碰撞的次數也就減少。例如空气在 $P=10^{-4}$ 托时, $\bar{\lambda}=50$ 厘米;但在 $P=10^{-6}$ 托时, $\bar{\lambda}=5000$ 厘米!

由于第二和第三两个优点,就誕生了电子管(或者如同早期所說的那樣:真空管)。因为除了保証热电子发射外,还因碰撞次數的減少而使产生的絕大部分电子不致因和气体分子碰撞而改变运动軌道,而且还使管内剩余气体分子因碰撞而产生的电离可能大为降低。不必要的气体分子电离



会招致二种惡果。从上面的式子可以看到,电子 $\vec{e}$ 在撞击原子 A 后产生了2个 e ,这样就增加了不需要的电子;此外正离子 A^+ 將被引向阴极、轟击阴极表面使它損坏。

高真空的获得除产生了整个电子管工业(如整流管、收訊管、发射管、微波管、阴极射綫管、电视管、X光管、象加强管、紅外观測器等的制造)以外,还对电子显微鏡($10^{-4} \sim 10^{-6}$ 托)和基本粒子加速器($10^{-6} \sim 10^{-8}$ 托)的产生提供了可能、在技术上作出了巨大的貢獻。

第四个特点是絕緣性强。在高真空情况下的两个电极之間,可以耐受极高的电位差而不致漏电或击穿,这样就有了真空电容器($10^{-4} \sim 10^{-5}$ 托)。真空电容器非但可耐受相当的高电压,还因为和外界隔絕而長期不改变电容量,甚至在数百度温度变化下也不致使电容大受影响,在軍事上和精密工业的要求上这是值得重視的。

真空还有一个特点,即低气压可降低汽化点。以水为例,水

的沸点为

$$100 + 0.0367(P - 760) \text{ } ^\circ\text{C},$$

式中 P 的單位是千。所以在高山上, 在 $P < 760$ 千时, 水不到 100°C 就开了。由于汽化点变低, 在真空中蒸馏魚肝油和低蒸汽压油脂就很方便。而且即使在常温下, 水也很容易被真空泵抽走(水在 10°C 时蒸汽压为 9.2 千), 这样就形成了一种叫做真空脱水的工业 ($10^{-1} \sim 10^{-3}$ 千), 如干血漿制造、生物腺制藥、抗生素制造、細菌保存及无水蔬菜的生产等。

根据上面所說的一些优点, 真空工作在最近二、三十年內有了飞跃的发展, 已成为先进技术之一, 在国防上和国民經济上起了巨大的作用: 以近代世界四大成就——原子能、半导体、电子計算机和人造卫星为例, 哪一件都不能与真空无关。在科学研究工作中, 有許多基本現象也是从真空現象本身及真空器件中得到的, 特別是有关原子和电子的知識。因此如果說二十世紀的重大发现件件都和真空有关, 实在不能算是过分。

1-4 高真空情况下气体分子的动力学性質

在气体压力較大的情况下, 气体沿着管子的流动象粘滯性液体一样, 單位時間內流过的气体体积(或称流量) U 可以用泊謨叶(Poiseuille)公式来表示:

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{\eta} \frac{\pi R^4}{8l} (P_2 - P_1) \left[\frac{1}{2} (P_2 + P_1) \right] \\ &= \frac{1}{\eta} \frac{\pi R^4}{16l} (P_2^2 - P_1^2) \end{aligned}$$

此处 η 为粘滯系数; R 、 l 分別为管子的半徑和長度, P_1 和 P_2

为管子两端的气压。由此可知流量和管子直径的4次方成正比。

在低气压下,气体以分子运动的形式出现,动力学性质更为明显,泊谟叶公式也就不再适用。当平均自由路程 $\bar{\lambda}$ 与容器的最大直径为相同数量级时,称为超稀薄状态或分子态,在这种状态下分子自由飞行,并不相互碰撞,因此可以认为没有分子间能量的交换。于是在这种状态下压力平衡的条件就应该被定为:在相反方向通过任何小面积的分子数目应相等。气体在管子两端的压力 P_1 、 P_2 不同时,平衡要看连接管的情况。单位时间内的流量为

$$U = 30480 \sqrt{\frac{T}{M}} \frac{R^3}{l} (P_2 - P_1)$$

此处 T 是绝对温度, M 为气体分子量, R, l 的单位是厘米。由此可知

$$U \propto \frac{R^3}{l}$$

即流量显著地和管子半径有关,所以在真空工作中应该尽量选用粗的管道。

气体从粘滞态(或称泊谟叶流体)过渡到分子态时,存在一种中间态(或称克努曾 Knudsen 流体),它的分子动力学性质并不十分明显,可又不能适用泊谟叶公式。它的流量公式是从经验导得的,非常繁复,在真空工作中较少用到,因此这里就不列举了。

这三种状态的分野不是很明显的,根据经验,可以认为符合下列条件的是粘滞态:

$$\bar{\lambda} : R \leq 1 : 5.5;$$