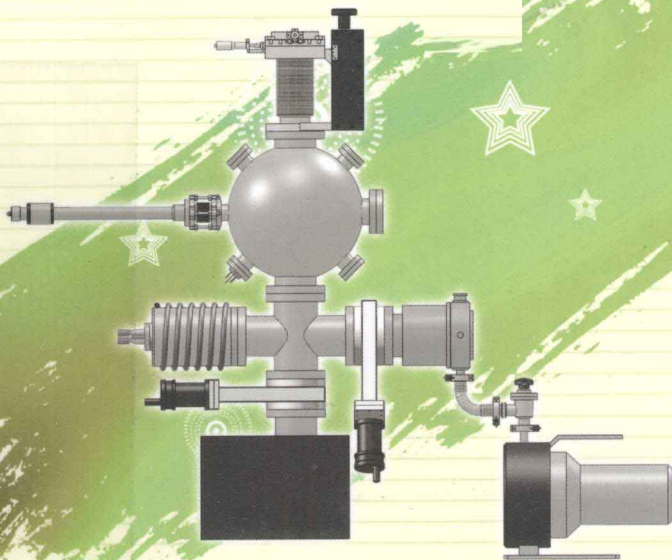


实用 真空技术

SHIYONG ZHENKONG JISHU

郭方准 著

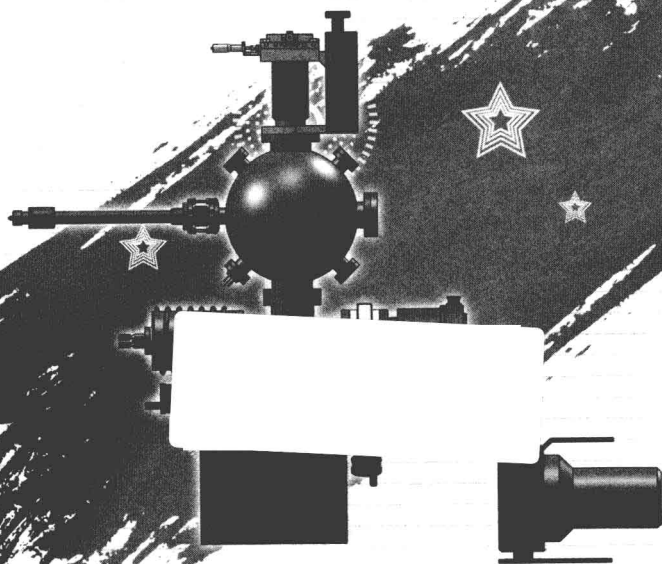


大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

实用 真空技术

SHIYONG
ZHENKONG JISHU

● 郭方准 著



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

实用真空技术 / 郭方准著. — 大连 : 大连理工大学出版社, 2012. 7

ISBN 978-7-5611-7035-9

I. ①实… II. ①郭… III. ①真空技术 IV. ①TB7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 141335 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连力佳印务有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:128mm×185mm 印张:4.625 字数:100 千字

印数:1~4000

2012 年 7 月第 1 版

2012 年 7 月第 1 次印刷

责任编辑:赵晓艳 李建英

责任校对:张 娇

封面设计:张 莹

ISBN 978-7-5611-7035-9

定 价:50.00 元

前言

真空技术和物理学的进步紧密相关,目前已经是表面科学、半导体应用、高能粒子加速器、核聚变研究装置和宇宙开发领域不可缺少的技术。当前人类面临的四大课题:环境、能源、生命和新材料,这些课题的解决,无一例外都需要真空技术。

我国在先端科研和产业技术方面发展迅速,对真空技术的要求越来越高。但是,在高端的真空装备研发生产和真空技术普及方面都远远不能满足国内的需要,也不具备实力和国际对手竞争。国家每年投入的科研经费中有很大部分都被用来从国外采购科研设备,这不仅使我国的科研受制于人,



新世紀

也很难拥有原创性成果。《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,明确要求提高科研装备的自主创新能力,促进原始性科技创新成果的产出,并将高端技术装备研发列为五项战略性新兴产业之一。迅速提高我国的真空技术水平,是当务之急。

笔者在国外将近20年的学习和工作中,关注真空技术的发展。回国后,致力于表面科学研究的同时,也全力推动真空装备的产业化。本书的编写,不求全面,只求实用,努力抓住重点,描述力求通俗生动。衷心希望本书的出版,能为我国真空技术的普及做出一点贡献。

本书的出版,感谢大连交通大学、中国科学院大连化学物理研究所以及大连市高新技术产业园区给予的大力支持。金艳玲、韩艾伶和杨梅花对本书的整理也做了大量工作。书中不足之处,欢迎大家指正。

郭方准

2012年7月



第 1 章 真空知识概论	1
1.1 什么是真空	1
1.2 真空的发现和理论基础	4
1.3 几个重要的概念	8
1.4 真空技术的应用	13
第 2 章 真空密封	15
2.1 永久密封	15
2.2 非永久密封	18
2.3 真空法兰	23
2.4 真空导入要素	30
2.5 波纹管	34
第 3 章 影响真空度的要素	36
3.1 真空检漏	36
3.2 真空中的材料气体放出	44
3.3 真空材料的表面净化和抛光	47
3.4 真空系统的排气计算	50

第4章 真空系统	57
4.1 真空系统的构成	57
4.2 真空腔体	65
4.3 真空泵	70
4.4 真空计	84
4.5 真空阀门	94
4.6 各种运动导入器	101
4.7 配管连接元件	115
第5章 典型的薄膜生长方式	118
5.1 物理方式成膜(Physical Vapor Deposition;PVD)	118
5.2 化学方式成膜(Chemical Vapor Deposition;CVD)	125
附 录	129
参考文献	142

第1章

真空知识概论

1.1 什么是真空

在给定的空间内低于一个大气压的气体状态称之为真空状态。这种特定的真空状态与大气状态相比较,主要有两个基本特点:首先,处于真空状态的真空容器要受到大气压强的作用;其次,真空状态下气体的分子密度小于大气状态下的气体分子密度,因此,分子之间以及分子与固体表面(如器壁)之间碰撞的几率相对减小。

用吸管喝饮料时,吸管内的压强低于大气压强而处于真空状态,因此饮料在大气压作用下沿着吸管进入口中。本文介绍的真空,主要是在科学研究领域中所需的真空,具体来讲是残留气体对使用目的的影响可以忽略的真空状态。

真空有不同的程度(简称真空度),通常情况下按以下标

准来划分。

(1)低真空领域($10^5 \sim 10^3$ Pa)

气体的物理性质和大气压下的空气状态基本没有区别,该真空领域的主要特征是真空容器内外产生强大的压力差。利用这一特征的吸引和吸附技术,在产业领域被广泛利用。

(2)中真空领域($10^3 \sim 10^{-1}$ Pa)

气体的流体性质和大气压下的空气状态相比可以忽略。该领域物质的沸点降低,在更低温度下即可实现物质的蒸发。

(3)高真空领域($10^{-1} \sim 10^{-5}$ Pa)

以稀薄气体为特征的真空特性成为主导,气体分子的平均自由程增大。

(4)超高真空领域($10^{-5} \sim 10^{-8}$ Pa)

包括真空容器壁上的吸附分子在内,气体分子的存在几乎可以忽略。

(5)极高真空领域($< 10^{-8}$ Pa)

接近完全的真空状态。固体的清洁表面可以更长时间维持,对表面科学研究很重要。

地球和月球中间的真空度是 10^{-7} Pa,地球和太阳中间的真空度是 10^{-9} Pa,银河系边缘的真空度是 10^{-14} Pa。

不同压强下的气体分子状态见表 1.1。

表 1.1 不同压强下的气体分子状态

压强 /Torr	分子密度 /(个·cm ⁻³)	分子入射频率 /(个·cm ⁻² ·s ⁻¹)	平均自由程 λ /cm	单层膜的形成时间 /s
760	2.47×10^{19}	3.14×10^{23}	6.7×10^{-6}	2.9×10^{-9}
1	3.25×10^{16}	4.13×10^{20}	5.1×10^{-3}	2.2×10^{-6}
10^{-3}	3.25×10^{13}	4.13×10^{17}	5.1	2.2×10^{-3}
10^{-6}	3.25×10^{10}	4.13×10^{14}	5.1×10^3	2.2
10^{-9}	3.25×10^7	4.13×10^{11}	5.1×10^6	2.2×10^3
10^{-12}	3.25×10^4	4.13×10^8	5.1×10^9	2.2×10^6

真空度的表述单位有多种,目前的国际单位是帕斯卡 Pa ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$),此外比较常用的还有毫米汞柱(mmHg)、Torr、巴(1 bar= 10^5 Pa)、通过 kg 和 cm 表述的单位面积压力($\text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$)、通过每平方英寸所受英磅压力表述的 psi、标准大气压 atm 和水柱高 mH₂O 等。各种压强单位的换算关系参照附表 1。

1.2 真空的发现和理论基础

17 世纪初,意大利的挖井工人有一个经验性常识——用泵抽水的高度有限。伽利略通过计算,证明泵抽水的高度极限约 10 m。1643 年,伽利略的学生托里拆利认为,如果水的高度极限为 10 m,则相对密度为 13.6 的水银上升高度应该在 760 mm。他将一根一端封闭盛满水银的细长玻璃管倒立在水银槽内,实验验证玻璃管中的水银高度逐渐下降至水银槽液面以上大约 760 mm(图 1.1)。托里拆利随即指出,玻璃管上端的空隙内就是真空,而大气的压强就是约 760 mm Hg。之后,帕斯卡等发现水银柱在地面的高度大于在山顶的高度,证明大气压强与海拔高度有关。

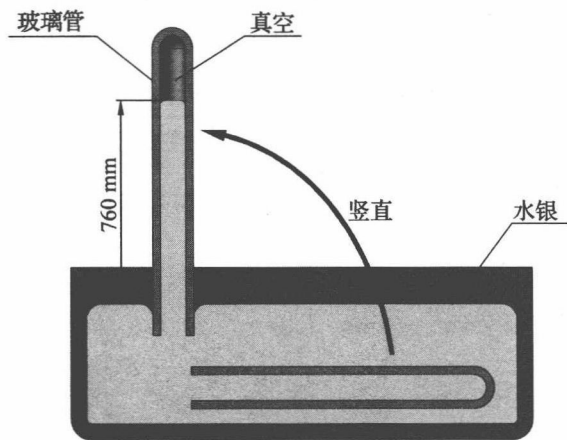


图 1.1 托里拆利实验图

1654年德国人葛利克将两个直径40 cm的铜质半球合起来,用真空泵将球内的空气抽出。在巨大的大气压强作用下,最终每个半球用8匹马,沿相反的方向也未能将两个半球拉开。葛利克当时是马德堡市的市长,这个实验被称为马德堡半球实验。

1622年英国人玻意耳发现玻意耳定律,即在定量定温下,理想气体的体积与气体的压强成反比。1738年瑞士人伯努利提出完整的气体分子运动理论。他们奠定了真空技术最初的理论基础。

气体的压强来自气体分子和容器壁的碰撞,其根本的起源是分子自身的动能。即

$$p = nkT \quad (1-1)$$

气体分子一个自由度的动能为 $\frac{1}{2}kT$,将 $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$ 代入式(1-1),则有

$$p = \frac{1}{3}nmv^2 \quad (1-2)$$

式中 n ——分子密度;

m ——分子质量;

v ——分子平均速度;

k ——玻尔兹曼常数；

T ——热力学温度。

真空容器内的压强和压强差的关系为

$$\Delta p = 1.03 \times \{(1.013 \times 10^5 - p) / 1.013 \times 10^5\} \text{ kgf/cm}^2 \quad (1-3)$$

kgf/cm^2 是千克力每平方厘米的压强表示单位。容器内的压强从大气压降到 10^4 Pa 时,容器内外的压强差基本上是线性增加(图 1.2)。继续减压,则压强差逐渐饱和。

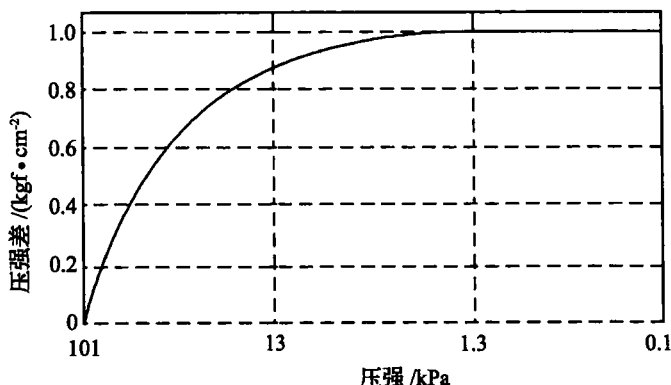


图 1.2 真空容器的压强和压强差之间的关系

一个大气压下,每平方厘米就承受 1.033 kg 的大气压力。如果我们人体的面部表面积是 200 cm^2 的话,则面部承

受着 200 多千克的压力。由于人们日常生活中身体内外压力平衡,所以才没有感到巨大的压力。乘坐飞机时,起飞和降落时耳膜会有不适,就是身体内外产生压强差的表现。乘坐高层电梯迅速升降时的耳膜不适,也是同样原因。海平面上,大气压强为 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$,珠穆朗玛峰顶的压强为 $3.2 \times 10^4 \text{ Pa}$,约为海平面气压的 $1/3$ 。

我国自古以来就善于利用真空技术。古人冶炼时使用的风箱,其原理和现在的旋片泵相似;而医疗用的拔火罐更是一个获得真空和应用真空的完整过程。我国在几千年的历史中,善于发明创造,但是缺少将发明系统化和在生产中进行技术革新的意识,以至于多次和人类的重大产业革命失之交臂。

1.3 几个重要的概念

一个大气压下,空气的分子密度 $n=2.7\times 10^{19}$ 个/ cm^3 。

空气是混合气体,其相对分子质量由构成的气体分子按比例计算。氮气的相对分子质量 28.016,体积比 78.1%;氧气的相对分子质量 32,体积比 20.93%;氩气的相对分子质量 39.944,体积比 0.933%。

$$\begin{aligned}\text{相对分子质量} &= \frac{(28.016 \times 78.1 + 32 \times 20.93 + 39.944 \times 0.933)}{(78.1 + 20.93 + 0.933)} \\ &= 28.96\end{aligned}$$

由气体分子运动论,压强的计算式为

$$p=nkT$$

采用国际标准单位时(压强 Pa,体积 m^3),玻尔兹曼常数

k 为 1.38×10^{-23} J/K。

气体分子的密度为

$$n=p/(kT) \quad (1-4)$$

压强为 1 Pa,温度为 27 °C 时,气体分子的密度 n 为

$$n = \frac{1}{(1.38 \times 10^{-23} \times (273 + 27))} = 2.4 \times 10^{20} \text{ 个/m}^3$$

因此,即使真空度达到 10^{-9} Pa 的极高真空状态,每立方米的空间内仍有 10^{11} 个气体分子存在。

1.3.1 气体分子的平均自由程

气体是由大量的分子构成的,0℃一个大气压的情况下,22.4 L 的空间里有 1 摩尔(6.02×10^{23} 个)分子。这些分子在室温下以 500~1 500 m/s 的速度运动和其他分子碰撞后,改变运动方向和速度,之后再和另外的分子碰撞。两次碰撞之间的飞行距离,称之为平均自由程。

平均自由程 λ [m]、压强 p [Pa]、温度 T [K] 以及分子的直径 D [m] 之间的关系为

$$\lambda = 3.11 \times 10^{-24} T / p D^2 \quad (1-5)$$

因此,气体分子的平均自由程与压强成反比例、与温度成正比例、与分子直径的 2 次方成反比例关系。

温度为 25℃ 的空气,压强和分子平均自由程的实际数据,1 Pa 为 7 mm、 10^{-1} Pa 为 7 cm、 10^{-2} Pa 为 70 cm、 10^{-3} Pa

为 7 m 、 10^{-4} Pa 为 70 m 。记住这些数字,对真空度的感觉能更直观一些。

1.3.2 气体分子的入射频率

气体分子在单位时间和单位面积内碰撞固体表面的数量称之为入射频率。入射频率 r 和压强 $p[\text{Pa}]$ 、气体相对分子质量 M_r 、温度 $T[\text{K}]$ 之间的关系表示为

$$r = 2.6 \times 10^{24} p / (M_r T)^{1/2} [\text{个}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})] \quad (1-6)$$

即入射频率和压强成正比例、和气体相对分子质量平方根及温度的平方根成反比例关系。

在真空度为 10^{-4} Pa 的情况下, 25°C 氧分子的入射频率是 $2.72 \times 10^{18} \text{ 个}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。排列于固体表面的原子数大约是 $10^{19} \text{ 个}/\text{m}^2$, 只要几秒钟的时间, 表面所有的原子都会受到氧分子的碰撞。

如果气体分子的平均自由程和容器的尺寸相同或更长, 则气体分子和容器壁碰撞的次数要比气体分子之间的碰撞次数要多, 这种状态被称为分子流(图 1.3(a))。如果平均自由程比较短, 气体分子之间的碰撞次数比气体分子和容器壁的