

Engineering Industry and Technics

真空技术

Industrie Mécanique et Technipue

A. 罗思 著

きかいこうぎょうぎじゅつとしょ

chinenbauindustrie und Technologie

й Промышленности и Технике

机械工业出版社

# 真 空 技 术

A·罗思 著

《真空技术》翻译组 译



机 械 工 业 出 版 社

## 译 序

真空技术作为一门新兴的独立的学科出现，只是近三十多年的事。第二次世界大战后，由于原子能、半导体、电子计算机以及航天技术的迅速发展，促使真空技术也有了巨大的发展。真空技术在国民经济的许多领域中已得到十分广泛地应用；而且，随着基础科学的不断发展，真空技术也具有广阔的前景。

建国以来，我国在真空科学与技术研究方面已取得了很大的进展，但与国际先进水平相比，差距还很大。国内有关真空技术方面的书籍也很少，国外一些较新较好的著作或译著更难看到。为了满足读者的需要，我们将亚历山大·罗思（A. Roth）所著的《真空技术》一书译出，以供有关人员参考使用。

此书是作者为技术院校的研究生所写的教材。原书分七章，对真空技术的基本原理和真空技术在各个领域中的应用都作了比较系统的阐述。并且根据作者多年的实践经验，在书中提供了大量的实例、图表和公式；书中还提供了截至1974年为止的较新和较系统的参考文献和书目。因此，这本书不仅是一本教科书，而且可作为真空技术工作者的工作手册和进修的指南。

本书是根据荷兰的北荷兰出版公司1976年版本译出的。书中的人名译法，除少数知名者外，我们曾参考了辛华编的《外国姓名译名手册》。图表中的资料来源及书末的参考文献，我们仍保留原文，以便读者直接查阅。关于真空技术术语的一些译法问题，由于我国真空技术界对若干专门术语已提出过新的定名（如压强改为压力），但现在仍处于过渡试行阶段，所以我们在书中对若干术语仍沿用过去的习惯用法，未作更改。

参加本书翻译的有：唐雪葆（1、7章）、薛君敖（2、3章）、李星健（4章）、洪涛（5章）以及丁文琪（6章）同志，

---

并由王兴之、薛君敖同志总校。全书译完后，曾向四机部1412所及北京仪器厂的部分同志征求意见，他们提出了不少宝贵意见；在出版过程中，又承北京仪器厂的商令杰同志大力支援，在此一并表示深切的感谢。

由于我们的实践经验与水平有限，译文中错漏之处在所难免，我们热忱地欢迎广大读者提出批评指正。

译 者

1979年3月

## 常用符号

<p><math>A</math> —— 面积、区域 (也指密封面槽的深度)</p> <p><math>a</math> —— 距离 (也指半径)</p> <p><math>B</math> —— 圆周长、周长</p> <p><math>a, b</math> —— 矩形的边</p> <p><math>C</math> —— 流导</p> <p><math>C_r</math> —— 压缩比</p> <p><math>C_p</math> —— 定压比热</p> <p><math>C_v</math> —— 定容比热</p> <p><math>D</math> —— 直径</p> <p><math>D_{12}</math> —— 扩散系数</p> <p><math>E</math> —— 能量</p> <p><math>e</math> —— 电子电荷</p> <p><math>F</math> —— 力</p> <p><math>f</math> —— 分子粘附系数</p> <p><math>h</math> —— 高度 (也指厚度)</p> <p><math>i, I</math> —— 电流</p> <p><math>J</math> —— 热功当量 (也表示分子粘滞流的系数)</p> <p><math>K</math> —— 热导率 (及分子流改正因数)</p> <p><math>k</math> —— 玻尔兹曼常数</p> <p><math>L</math> —— 长度</p> <p><math>L_T, L_O</math> —— 蒸发潜热</p> <p><math>m</math> —— (分子的) 质量</p> <p><math>M</math> —— 分子量</p> <p><math>n</math> —— 分子密度</p> <p><math>N</math> —— (分子的) 总数</p>	<p><math>N_A</math> —— 每克分子的分子数</p> <p><math>P</math> —— 压强</p> <p><math>\bar{P}</math> —— 平均压强</p> <p><math>P_u</math> —— 极限压强</p> <p><math>P_v</math> —— 蒸汽压强</p> <p><math>P_r</math> —— 几率因数</p> <p><math>q</math> —— 气流 (每秒分子个数)</p> <p><math>q_D</math> —— 比出气率</p> <p><math>q_L</math> —— 比漏率</p> <p><math>q_D</math> —— 比渗透率</p> <p><math>Q</math> —— 流量</p> <p><math>r, R</math> —— 半径</p> <p><math>R</math> —— 密封因数</p> <p><math>R_0</math> —— 气体常数 (每克分子)</p> <p><math>Re</math> —— 雷诺数</p> <p><math>S</math> —— 抽速</p> <p><math>S_p</math> —— 泵口抽速</p> <p><math>t</math> —— 时间</p> <p><math>t_c</math> —— 温度 (<math>^{\circ}C</math>)</p> <p><math>T</math> —— 温度 (<math>^{\circ}K</math>)</p> <p><math>V</math> —— 容积</p> <p><math>v</math> —— 速度</p> <p><math>w</math> —— (密封) 宽度</p> <p><math>W</math> —— 质量或比质量 (每秒, 每厘米<sup>2</sup>)</p> <p><math>Y</math> —— 改正因数 (粘滞流)</p> <p><math>\alpha</math> —— 调节系数</p> <p><math>\gamma</math> —— <math>C_p/C_v</math> 比 (也表示表面张</p>
---	--

---

力)	$\xi$	——分子直径
$\delta$ ——分子流-粘滞流比	$\rho$	——密度, 单位体积的质量
$\varepsilon$ ——滑移系数	$\tau$	——周期(时间)
$\eta$ ——粘滞度	$\phi$	——分子入射率
$\lambda$ ——平均自由程	$\psi$	——改正因数(粘滞流)
$A$ ——自由分子热导率		

# 目 录

译序

常用符号

第一章 绪论 .....	1
1.1 真空 .....	1
1.1.1 人工真空 .....	1
1.1.2 自然真空 .....	4
1.2 应用范围及重要性 .....	6
1.2.1 真空技术的应用 .....	6
1.2.2 真空技术的重要性 .....	9
1.3 真空技术发展史的主要阶段 .....	10
1.4 文献来源 .....	12
1.4.1 书籍 .....	12
1.4.2 刊物 .....	14
1.4.3 会议汇刊 .....	15
第二章 真空技术的稀薄气体理论 .....	17
2.1 物质的物理态 .....	17
2.2 理想气体定律和真实气体定律 .....	22
2.2.1 玻义耳定律 .....	22
2.2.2 查理定律 .....	24
2.2.3 一般气体定律 .....	24
2.2.4 分子密度 .....	27
2.2.5 真实气体的物态方程 .....	28
2.3 稀薄气体中的分子运动 .....	30
2.3.1 分子的动能 .....	30
2.3.2 分子的速度 .....	31
2.3.3 分子入射率 .....	33
2.4 压强和平均自由程 .....	34
2.4.1 平均自由程 .....	34
2.4.2 压强单位 .....	37

---

2.5 粘滞态中的迁移现象	40
2.5.1 气体的粘滞性	40
2.5.2 气体的扩散	42
2.6 分子态中的迁移现象	45
2.6.1 粘滞态和分子态	45
2.6.2 分子曳力	46
2.7 热扩散和能量迁移	48
2.7.1 热流逸	48
2.7.2 热扩散	49
2.7.3 稀薄气体的热导率	50
第三章 低压下的气流	56
3.1 流动方式、流导和流量	56
3.1.1 流动方式	56
3.1.2 流导	58
3.1.3 流量和抽速	60
3.2 粘滞流和湍流	63
3.2.1 粘滞流—孔的流导	63
3.2.2 粘滞流—圆柱管的流导	66
3.2.3 粘滞流—表面滑移	69
3.2.4 粘滞流—矩形截面	69
3.2.5 粘滞流—环形截面	71
3.2.6 湍流	71
3.3 分子流	72
3.3.1 分子流—孔的流导	72
3.3.2 分子流—隔板的流导	73
3.3.3 分子流—恒定截面的长管	74
3.3.4 分子流—恒定截面的短管	77
3.4 组合型容器的流导	80
3.4.1 分子流—锥形管	80
3.4.2 分子流—弯管	82
3.4.3 分子流—阱	83
3.4.4 分子流—闭光障板	87
3.4.5 分子流—密封界面	90



3·5 流导的解析——统计计算	93
3·6 过渡流	100
3·6·1 克努曾方程	100
3·6·2 最小流导	101
3·6·3 过渡压强	102
3·6·4 过渡区的界限	103
3·6·5 一般气流方程	104
3·6·6 分子流—粘滞流交点	105
3·6·7 气流的积分方程	107
3·7 真空系统计算	111
3·7·1 真空系统中的气体源	111
3·7·2 粘滞流范围内的抽气	112
3·7·3 分子流范围内的抽气	115
3·7·4 具有分布气体负载的稳定态	118
3·7·5 流导和抽气时间的列线图解计算	120
3·7·6 气体负载的计算和抽气要求	125
第四章 真空技术中的物理化学现象	135
4·1 蒸发——凝结	135
4·1·1 真空系统中的蒸汽	135
4·1·2 蒸汽压和蒸发率	136
4·1·3 蒸汽压数据	142
4·1·4 低温抽气和真空镀膜	146
4·2 溶解和渗透	149
4·2·1 渗透过程	149
4·2·2 气体对真空外壳的渗透	153
4·2·3 渗透的结果	154
4·3 吸着	157
4·3·1 吸着现象	157
4·3·2 吸附能	158
4·3·3 单分子层和粘附系数	159
4·3·4 吸附等温线	163
4·3·5 真表面	163
4·3·6 用吸收剂的气体吸着	164

---

4.4 解吸——出气 .....	169
4.4.1 解吸现象 .....	169
4.4.2 出气 .....	169
4.4.3 出气率 .....	172
4.5 电子和离子与表面的相互作用 .....	174
4.5.1 电子散射 .....	174
4.5.2 离子散射 .....	176
4.5.3 低能电子衍射 (LEED) .....	177
4.5.4 俄歇电子能谱学 (AES) .....	179
第五章 低压强的产生 .....	182
5.1 真空泵 .....	182
5.1.1 抽气原理 .....	182
5.1.2 参数和分类 .....	182
5.2 机械泵 .....	185
5.2.1 液体泵 .....	185
5.2.2 活塞泵 .....	186
5.2.3 水环泵 .....	187
5.2.4 旋片泵 .....	187
5.2.5 滑片泵 .....	192
5.2.6 旋转柱塞泵 .....	194
5.2.7 罗茨泵 .....	195
5.2.8 分子泵 .....	196
5.3 蒸汽泵 .....	198
5.3.1 分类 .....	198
5.3.2 蒸汽喷射泵 .....	199
5.3.3 扩散泵 .....	200
5.4 离子泵 .....	205
5.4.1 分类 .....	205
5.4.2 离子抽气 .....	206
5.4.3 蒸发离子泵 .....	209
5.4.4 溅散离子泵 .....	215
5.5 吸附泵 .....	219
5.5.1 吸附抽气的特性 .....	219

5.5.2	吸附泵	221
5.5.3	多级吸附抽气	222
5.6	低温抽气	224
5.6.1	低温抽气的机理	224
5.6.2	低温抽气阵列	230
5.6.3	低温捕集	232
5.6.4	低温泵	234
5.6.5	液氮阱	234
5.7	吸气	237
5.7.1	吸气原理	237
5.7.2	闪时吸气剂	238
5.7.3	容积吸气剂和敷层吸气剂	242
5.7.4	吸气能力	243
5.7.5	升华泵	244
5.8	稀释抽气	245
5.9	抽速的测量	246
5.9.1	测量方法	246
5.9.2	定压法	246
5.9.3	定容法	250
5.9.4	机械泵和扩散泵抽速的测量	250
5.9.5	溅射离子泵抽速的测量	251
第六章 低压强的测量		253
6.1	真空计的分类和选择	253
6.2	机械真空计	255
6.2.1	波登真空计	255
6.2.2	膜盒式真空计	256
6.3	使用液体的真空计	258
6.3.1	U形管流体压力计	258
6.3.2	斜管流体压力计	259
6.3.3	差动流体压力计	260
6.3.4	杜布罗温真空计	260
6.3.5	麦氏真空计	262
6.4	粘滞(分子)真空计	269

6.4.1 原理	269
6.4.2 衰减真空计	270
6.4.3 旋转分子真空计	270
6.4.4 谐振式粘滞真空计	271
6.5 辐射计(克努曾真空计)	272
6.6 热导真空计	275
6.6.1 热导率和热损耗	275
6.6.2 皮氏计	276
6.6.3 热偶真空计	278
6.6.4 热敏电阻真空计	280
6.6.5 麦氏-皮氏组合真空计	280
6.7 电离真空计	281
6.7.1 放电管	281
6.7.2 热阴极电离真空计	282
6.7.3 冷阴极电离真空计	292
6.7.4 装有放射源的真空计	294
6.8 真空计的校准	295
6.8.1 概述	295
6.8.2 麦氏计法	296
6.8.3 膨胀法	296
6.8.4 流量法	297
6.8.5 排气法	298
6.9 分压强测量	298
6.9.1 概述	298
6.9.2 磁偏转质谱仪	299
6.9.3 余摆线型(摆线型)质谱仪	301
6.9.4 回旋质谱仪	302
6.9.5 线振质谱仪	304
6.9.6 四极质谱仪和单极质谱仪	305
6.9.7 飞时质谱仪	305
第七章 高真空技术	307
7.1 选择材料的准则	307
7.1.1 概述	307

---

7.1.2	机械强度	307
7.1.3	透气性	308
7.1.4	蒸汽压和气体释放	308
7.1.5	工作条件	308
7.1.6	金属容器和管道	308
7.1.7	玻璃容器和管道	310
7.1.8	弹性材料和塑料管道	311
7.2	清洗技术	313
7.2.1	金属清洗	313
7.2.2	玻璃清洗	318
7.2.3	陶瓷清洗	320
7.2.4	橡胶的清洗	320
7.2.5	烘烤	320
7.3	密封技术	320
7.3.1	概述、分类	320
7.3.2	永久密封	321
7.3.3	半永久可拆密封	347
7.3.4	垫圈密封	365
7.3.5	电引入线	388
7.3.6	运动传送	392
7.3.7	真空系统中的物质传递	397
7.4	检漏	406
7.4.1	漏率和检测	406
7.4.2	泄漏测量	412
7.4.3	漏孔检测	416
7.4.4	密封部件测试	417
7.4.5	灵敏检漏法	418
7.5	真空系统操作规则	425
参考文献		427

# 第一章 绪 论

## 1.1 真 空

虽然拉丁词“vacuum”的意思是“空的”，但是真空技术研究的对象却绝不是没有物质的空间。在用现代排气方法获得的最低压强下，每立方厘米抽成真空的空间里仍然有好几百个分子。

根据美国真空学会（1958）的定义，“真空”这个术语，指的是充有低于大气压压强的气体的给定空间，即分子密度小于约 $2.5 \times 10^{10}$ 分子数/厘米<sup>3</sup>的给定空间。

现在，“真空”这个一般术语所包含的压强（或密度）比标准大气的压强大约低十九个数量级。随着真空技术在排气和测量技术方面的改进，这个范围的下限正在不断降低。

### 1.1.1 人工真空

在我们的地球上，真空是通过对一容器进行排气而获得的，其真空度随残余气体所产生的低于大气压的压强的降低而增高。真空度分类的传统方法，是测量一个系统的绝对压强。因此，我们所说的低真空、中真空、高真空和超高真空，是与越来越低的压强范围对应的（图1.1）。

乍看起来，各种不同的压强范围的极限似乎是任意的，因为每个压强范围各有特定种类的排气泵和测量仪器。事实上，每个真空范围都对应于一种不同的物理环境。为了描述这些物理环境，利用分子密度、平均自由程和形成单分子层的时间常数等概念是有用的，这些概念和压强有关，也和气体的种类及其温度有关。

后面几章将对这些参数作数学上的分析。为了介绍这些参数起见，可将它们定义如下：

分子密度：每单位容积内的平均分子数。

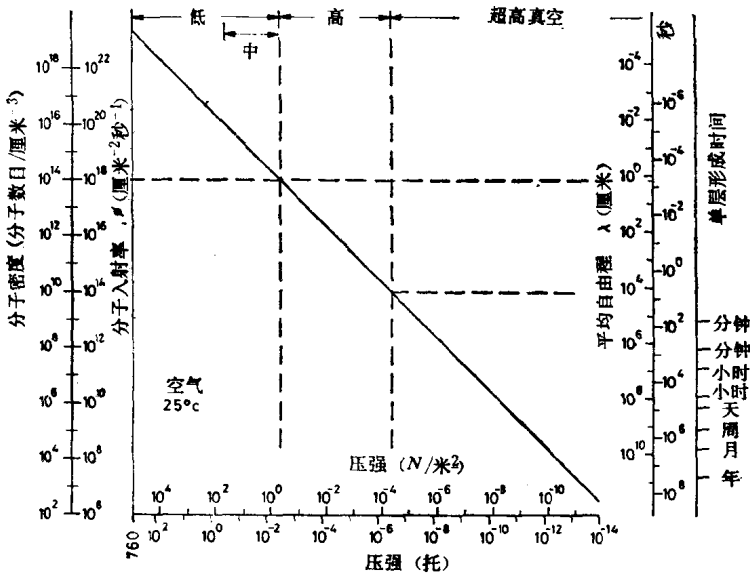


图1.1 真空度定义的几个概念的相互关系

**平均自由程：**气体中一个分子在与该气体中其他分子发生两次连续碰撞之间所行进的平均距离。

**单分子层形成时间：**指一新离解的表面被一个分子厚度的气体层覆盖所需的时间。这个时间是形成一个密实的单分子层（约  $8 \times 10^{14}$  分子/厘米<sup>2</sup>）所需要的分子数与分子入射率（分子以此入射率撞在表面上）之比。

表1.1和1.2列出了这些参数的数值，图1.1示出了它们的关系。

通过分析图1.1所示的范围，以及表1.1和表1.2所列的各项数值，可得出表征各种真空范围的物理情况：

**低（和中）真空——**气相的分子数大于覆盖表面的分子数，所以在这个范围内排气主要是使现有的气相稀薄。压强范围是在大气压与大约  $10^{-2}$  托之间。

**高真空——**系统中的气体分子主要位于表面上，平均自由程等于或大于有关的容器尺寸。因此，排气在于抽除或俘获离开表

表1·1 25°C时空气的分子密度、分子入射率 $\phi$ ，平均自由程 $\lambda$ 以及单分子层形成时间 $\tau$ 的数值与相应的压强 $P$ 数值

$P$ (托)	$n$ (分子/厘米 <sup>3</sup> )	$\phi$ (分子/厘米 <sup>2</sup> ·秒)	$\lambda$ (厘米)	$\tau$ (秒)
760	$2.46 \times 10^{19}$	$2.88 \times 10^{23}$	$6.7 \times 10^{-6}$	$2.9 \times 10^{-9}$
1	$3.25 \times 10^{16}$	$3.78 \times 10^{20}$	$5.1 \times 10^{-3}$	$2.2 \times 10^{-6}$
$10^{-3}$	$3.25 \times 10^{13}$	$3.78 \times 10^{17}$	5.1	$2.2 \times 10^{-3}$
$10^{-6}$	$3.25 \times 10^{10}$	$3.78 \times 10^{14}$	$5.1 \times 10^3$	2.2
$10^{-9}$	$3.25 \times 10^7$	$3.78 \times 10^{11}$	$5.1 \times 10^6$	$2.2 \times 10^3$
$10^{-12}$	$3.25 \times 10^4$	$3.78 \times 10^8$	$5.1 \times 10^9$	$2.2 \times 10^6$
$10^{-15}$	$3.25 \times 10$	$3.78 \times 10^5$	$5.1 \times 10^{12}$	$2.2 \times 10^9$

表1·2 在25°C和 $10^{-3}$ 托时各种气体的 $\phi$ 、 $\lambda$ 和 $\tau$ 的数值\*

气 体	$\phi$ (分子/厘米 <sup>2</sup> ·秒)	$\lambda$ (厘米)	$\tau$ (秒)
H <sub>2</sub>	$14.4 \times 10^{17}$	9.3	$1 \times 10^{-3}$
He	$10.4 \times 10^{17}$	14.7	$2.3 \times 10^{-3}$
N <sub>2</sub>	$3.85 \times 10^{17}$	5.0	$2.1 \times 10^{-3}$
O <sub>2</sub>	$3.60 \times 10^{17}$	5.4	$2.4 \times 10^{-3}$
A	$3.22 \times 10^{17}$	5.3	$2.6 \times 10^{-3}$
Air	$3.78 \times 10^{17}$	5.1	$2.2 \times 10^{-3}$
H <sub>2</sub> O	$4.80 \times 10^{17}$	3.4	$1.1 \times 10^{-3}$
CO <sub>2</sub>	$3.07 \times 10^{17}$	3.3	$1.7 \times 10^{-3}$

\* 符号与表1·1同。

面的分子和个别到达排气泵的分子(分子流)。这就是粒子可在真空容器内运动而不与其他粒子碰撞的压强范围。此范围大约从 $10^{-3}$ 托到 $10^{-7}$ 托。

超高真空——单分子层形成时间等于或大于通常在实验室测量所用的时间，这样就可制备“清洁”的表面，并且可在吸附气体层形成以前来决定其特性。这个真空范围大约从 $10^{-7}$ 托到 $10^{-16}$ 托(下限随技术的进展而降低)。

气体的成分——当真空室内的总压强降低时，气相的成分也随着改变，在低真空范围，气体的成分基本类似大气的成分(表1·3)。在高真空范围，成分不断改变，成为一种含有70~90%



水汽的气体。水分子来自真空室内各表面。当连续进行排气并加热时，一氧化碳的含量便增加。在超高真空范围，氢是主要成分（表1·3），大部分是从容器材料渗透出来的。

表1·3 气体成分

成 分	(1) 大 气 压		超 高 真 空	
	体积百分比	分压强(托)	分压强 (托)	
			(2)	(3)
N <sub>2</sub>	78.08	$5.95 \times 10^2$	$2 \times 10^{-11}$	—
O <sub>2</sub>	20.95	$1.59 \times 10^2$	—	$3 \times 10^{-13}$
Ar	0.93	7.05	$6 \times 10^{-12}$	—
CO <sub>2</sub>	0.033	$2.5 \times 10^{-1}$	$6.5 \times 10^{-11}$	$6 \times 10^{-12}$
Ne	$1.8 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-2}$	$5.2 \times 10^{-11}$	—
He	$5.24 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-3}$	$3.6 \times 10^{-11}$ ①	—
Kr	$1.1 \times 10^{-4}$	$8.4 \times 10^{-4}$	—	—
H <sub>2</sub>	$5.0 \times 10^{-5}$	$3.8 \times 10^{-4}$	$1.79 \times 10^{-9}$	$2 \times 10^{-11}$
Xe	$8.7 \times 10^{-6}$	$6.6 \times 10^{-5}$	—	—
H <sub>2</sub> O	1.57	$1.19 \times 10^1$	$1.25 \times 10^{-10}$	$9 \times 10^{-13}$
CH <sub>4</sub>	$2 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-3}$	$7.1 \times 10^{-11}$	$3 \times 10^{-13}$
O <sub>3</sub>	$7 \times 10^{-6}$	$5.3 \times 10^{-5}$	—	—
N <sub>2</sub> O	$5 \times 10^{-5}$	$3.8 \times 10^{-4}$	—	—
CO	—	—	$1.4 \times 10^{-10}$	$9 \times 10^{-12}$

(1)Norton(1962)p.11, (2)Dennis and Heppel(1968)p.105, (3)Singleton (1966)p.355.

①原文有误，应是 $3.6 \times 10^{-11}$ ——译者注。

### 1·1·2 自然真空

地球上的真空 在动物生命的某些功能中天生就会使用“低真空技术”，但是在地球上还未曾听说过有自然的高真空。这种低真空的某些“应用”是至关重要的，如我们自身的呼吸；而象蚊子吸血这类应用，却是相当令人讨厌的。

人在呼吸中通过吸气可使胸腔压强达到约740托，而通过呼气使胸腔压强可降低至300托。章鱼体内能达到的压强约为100托 (Champeix, 1965)。

空间的真空 由于海平面760托的压强是“大气柱”的结果，