

真空技术实用指南

〔美〕 J.F. 奥汉隆 著

胡炳森 钦菊美 周兆萍 李希宁 译

陈 文 奎 校

国防工业出版社

真空技术实用指南

〔美〕 J. F. 奥汉隆 著

胡炳森 钦菊美

周兆萍 李希宁

译

陈文奎 校

国防工业出版社

著者为中文译本作的序

真空技术是一个不断发展的技术领域，但其基础部分是不变的。一本真空技术的入门书不像关于科研工作的书籍那样会很快过时，所以这本书对它的新读者肯定是有用的。

中国和美国的科学在风格和技术上存在着差异，因此书中有关设备、材料牌号的某些资料对中国读者或许没有多大意义。此外，由于我们两国的税收和运转费用不同，所以对经济学这一章可能会有不同的理解。

我确信胡、周、李、钦四位译者对本书的翻译是竭尽全力的，并已理解到这些差异，因此定能使这本书对中国读者有所裨益。

约翰·奥汉隆

一九八六年四月二日

代 译 者 序

真空技术是一门近代技术学科，是当今科研和生产中的关键技术之一。其应用非常广泛，在重工业、轻工业、医药工业、食品工业、农牧业等生产战线和宇航、电子、原子能等尖端科研部门都少不了它。

长期以来，国内外出版的真空技术书籍大多属于基础理论和教材类型。真空工作者和真空使用者深感迫切需要解决的实际问题则经常为国外公司缄守技术秘密而难以找到；有关真空技术的科研成果则又散布在各种文字写成的浩瀚的资料大海之中，实有汗牛充栋之感。

《A User's Guide to Vacuum Technology》一书的出版给我们带来了喜讯。美国真空学会前主席——真空低温专家 H. A. 斯坦赫尔茨先生于 1980 年 11 月来华讲学期间首次向我国真空界人士介绍当时新出版的这本书。此书内容新颖、崇尚实际，汇集了国外真空技术基础知识和实际经验，收集了大量有关资料，介绍了代表世界水平的国外先进成果，是一本非常实用的指南。书中不少章节的内容是国内外真空书籍中难以见到的，但又非常切合真空使用者的需要。如第五章残余气体分析器的数据分析；第十章中不但谈到高真空系统的选择、操作等，还特别谈到使用操作中的注意事项；第十二章大流量真空系统；第十三章经济分析等。文中经常针对真空使用者常感困惑的疑难问题（例如，如何抽有毒、腐蚀性、易爆气体，如何选择真空系统，如何发挥真空泵效益等等）给出了明确的分析和对策，并针对半导体和电子工业生产中出现的新问题介绍了许多实际解决办法。因而此书确为真空工作者和真空使用者的良师益友。此书出版以来，在美国已印刷了五次，深受欢迎。在日本也已将此书译成日文出版，足以

说明该书的使用价值。

本书中文译本的出版发行将会对国内真空技术的发展起到一定的促进作用。

兰州物理研究所名誉所长 金建中

一九八四年十二月

原 序

本书是为想要了解现代真空技术的基本知识和当前真空实践前景的真空系统使用者——大学生、技术员、工程师、经理或科学家等编写的。

真空技术主要是从属的，它是分析、研究、开发和加工制造重要的其它技术的一部分。它总是提供一种工艺环境。虽然科学家和工程师们是为真空本身发展而研究真空，但真空技术却是在其它技术的要求中获得许多进展的。一般的使用者所关注的是工艺过程，而只有在工艺过程中出现问题或需要购置新设备时，他们才专注于真空技术。

《真空技术实用指南》的重点是了解、操作和选择半导体、光学和其它有关技术所用的真空工艺设备。本书把重点放在别的书刊没有充分涉及的课题上，而对那些只有设计人员或学者才感兴趣的课题避免作深入的论述。残余气体分析是一个重要的课题，本书对该课题内容的论述超出了通常对滤质器原理的讲解范围。象涡轮分子泵和气氮制冷机低温泵那些新设备已被广泛使用了，但人们对它们的了解不象对扩散泵那么清楚。薄膜淀积和薄膜去除等新工艺需要使用有毒气体、腐蚀性气体或易爆气体。为安全起见，在使用这些气体时必须采取专门的防护措施。规、泵和材料部分是讨论总系统主要问题的前提。真空系统是根据其抽速、工作压强和排气量等一般真空要求而被分类的。本书研究了每种泵对几类系统的适应性，并给出了各种高真空抽气系统的基本操作方法。经济分析这一部分介绍真空设备的购置、维修和运转费用，并评述可大幅度降低运转费用的途径。

感谢纽约州，E. 费希基尔国际商用机器公司(以下简称IBM公司)数据系统部的G. 约翰逊对本书作了多次有意义的讨论，并

审阅了其中几章。感谢 IBM 公司数据系统部的 L. 赫尔维希和 H. 俞, IBM 公司科研部的 N. 周、J. 科伯恩、J. 丘奥莫、R. 瓜尼里、高森竹石和 H. 温特斯各位博士对本书各章作了谦和的审阅并指出了多处错误。这里还向所有慷慨提供图表资料的仁人表示感谢。本书中的许多材料已经用演讲的形式向 IBM 公司科研部和数据系统部的有关人员发表过。他们的参与对这些材料的成形是颇有益处的。

J. F. 奥汉隆

1980年3月于纽约

目 录

真 空 基 础

第一章 真空技术	1
第二章 气体的性质	5
2.1 气体运动论模型	5
2.2 气态元素的迁移现象	9
2.2.1 粘滞度	9
2.2.2 热传导率	11
2.2.3 扩散	13
2.2.4 热流逸	15
2.3 气流	15
2.3.1 流量和流导	17
2.3.2 湍流	18
2.3.3 粘滞流	19
2.3.4 分子流	20
2.3.5 过渡流	30
2.4 抽速	32

真 空 测 量

第三章 全压强规	38
3.1 直读式规	40
3.1.1 膜盒规与波尔登规	40
3.1.2 电容压强规	42
3.2 非直读式规	45
3.2.1 热传导规 皮拉尼规 热偶规	46
3.2.2 电离规 热阴极电离规 冷阴极电离规	51
3.2.3 超高真空规	58
3.2.4 非直读式规的精度	59
第四章 残余气体分析器	62

4.1 仪器介绍	62
4.1.1 离子源	63
4.1.2 质量分离 扇形磁铁 射频四极 分辨能力和分辨本领	65
4.1.3 检测	75
4.2 安装和操作	80
4.2.1 高真空	80
4.2.2 差级抽气	82
4.3 仪器的选择	87
第五章 残余气体分析器的数据分析	89
5.1 碎片图型	89
5.2 定性分析	92
5.3 定量分析	99
5.3.1 分离谱	100
5.3.2 重叠谱	101

材 料

第六章 真空材料	106
6.1 固体的放气	107
6.1.1 蒸发	108
6.1.2 热解吸	108
6.1.3 扩散	110
6.1.4 渗透	112
6.1.5 电子和离子激发解吸	113
6.2 金属	116
6.2.1 蒸发	116
6.2.2 渗透率	116
6.2.3 出气	118
6.2.4 结构金属	122
6.3 玻璃和陶瓷	127
6.4 聚合材料	133

真 空 获 得

第七章 机械泵	140
7.1 旋片泵	141
7.1.1 泵液	144

7.2	滑阀泵	147
7.3	罗茨泵	150
7.4	涡轮分子泵	153
7.4.1	抽气机制	153
7.4.2	抽速和压缩比的关系 最大压缩比 最大抽速 一般关系	155
7.4.3	极限压强	163
7.4.4	设计考虑	163
第八章 扩散泵		168
8.1	基本机制	168
8.2	抽速-排气量特性	170
8.3	泵液和热效应	174
8.4	返流、障板和阱	178
第九章 捕获泵		184
9.1	吸气剂泵	185
9.1.1	升华泵	185
9.1.2	非蒸散型吸气剂泵	190
9.2	离子泵	191
9.2.1	静电离子泵	192
9.2.2	溅射离子泵	193
9.3	低温泵	198
9.3.1	抽气机制	199
9.3.2	抽速、压强和饱和	202
9.3.3	致冷技术	206
9.3.4	低温泵的特性 中真空吸附泵 高真空气体制冷机低温泵 高真空液 态气体低温泵	212

真 空 系 统

第十章 高真空系统		225
10.1	扩散泵抽气系统	226
10.1.1	系统的操作	229
10.1.2	操作注意事项	231
10.2	涡轮分子泵抽气系统	238
10.2.1	系统的操作	241
10.2.2	操作注意事项	242
10.3	离子泵抽气系统	244

10.3.1 系统的操作	246
10.3.2 操作注意事项	247
10.4 低温抽气系统	248
10.4.1 系统的操作	249
10.4.2 操作注意事项	250
10.5 真空室	252
10.6 检漏	255
第十一章 超高真空系统	262
11.1 真空室	264
11.2 抽气技术	267
11.2.1 扩散泵	268
11.2.2 涡轮分子泵	271
11.2.3 溅射离子泵	272
11.2.4 低温泵	273
第十二章 大流量系统	275
12.1 节流的高真空系统	278
12.1.1 扩散泵抽气系统	280
12.1.2 涡轮分子泵抽气系统	283
12.1.3 低温泵抽气系统	286
12.2 中、低真空系统	291
第十三章 经济分析	298
13.1 高真空系统	299
13.1.1 投资	299
13.1.2 运转费用	302
13.1.3 投资效益	306
13.2 大流量系统	310
13.3 节能	311
符号	316
附录	318
附录 A 单位和常数	318
附录 A.1 物理常数	318
附录 A.2 国际单位制的基本单位	318
附录 A.3 换算因数	319
附录 B 气体的性质	322
附录 B.1 气体平均自由程与压强的函数关系	322
附录 B.2 $T = 0^{\circ}\text{C}$ 时气体和蒸气的物理性质	323

附录 B.3 气体的低温特性	324
附录 B.4 气体的流导和流量公式	325
附录 B.5 常见气体的蒸气压曲线	328
附录 B.6 低压强下气体和蒸气的放电现象	330
附录 C 材料的性质	331
附录 C.1 金属在真空烘烤后的出气率	331
附录 C.2 未烘烤金属的出气率	331
附录 C.3 陶瓷和玻璃的出气率	333
附录 C.4 合成橡胶的出气率	333
附录 C.5 聚合材料的出气率	334
附录 C.6 聚合材料的渗透率	335
附录 C.7 固态和液态元素的蒸气压曲线	336
附录 C.8 奥氏体不锈钢	339
附录 D 同位素丰度	341
附录 E 碎片图型	347
附录 E.1 泵液的碎片图型	347
附录 E.2 气体的碎片图型	349
附录 E.3 常见蒸气的碎片图型	350
附录 E.4 常用溶剂的碎片图型	352
附录 E.5 半导体掺杂剂的碎片图型	353
附录 F 泵液的性质	355
附录 F.1 机械泵泵液的蒸气压曲线	355
附录 F.2 扩散泵泵液的蒸气压曲线	356
附录 F.3 机械泵泵液的运动论粘度	357

真 空 基 础

要了解真空部件和真空系统是如何起作用的，首先要了解气体在低压强下的特性。第一章介绍真空技术的本质。第二章概述真空技术的基础——基本的气体动力学和低压强下的气流特性。

第一章 真 空 技 术

伽利略(Galileo)是第一个建立粗真空的人。他是用一个活塞来建立粗真空的。继十七世纪的这一发现之后，1643年托利析里(Torricelli)发明了水银气压计，1650年冯·格里克(Guericke)发明了第一台真空泵。在此之后的二百多年里，气体在低压强下的特性一直未得到重视，直到麦克劳(McLeod)发明了压缩式真空规才开始了一个迅速发展的时期。1905年一位富于创造力的发明家盖德(Gaede)设计出一台用水银密封的机械泵。这些发展，再加上热传导规、扩散泵、电离规和离子泵、氮气的液化以及有机的泵液的提炼等技术的发展就构成了一个技术核心，使得从灯泡制造到外层空间模拟等事事都成为可能。

真空技术是一门具有科学概念的并用这些原理来获得实际的低压强环境的系统学科。它利用了诸如化学、物理学、数学、陶瓷学、材料科学和表面科学以及工程学等许多领域里的发现。同时，其本身也做出了十分重要的贡献。

真空是这样—一个空间，在这个空间里，空气或其它气体都已被排走。事实上，我们知道气体是抽不尽的，有时我们只希望抽除特定的一部分气体。因为空气存在于一切系统之中，所以它是

所要抽除的最主要的气体。空气至少含有十余种组分,这些组分的浓度见表 1.1。为了预先估计真空泵和真空规的特性,了解空气的组分是很有用的。表 1.1 列出的浓度系指海平面处的干燥大气(全压强为 $101323.2\text{Pa}^{\bullet}$) 的浓度。在该表中未列入水蒸气的分压强,因为它是在不断改变的。在 20°C 时,50% 的相对湿度相当于 1165Pa 的分压强,这使水蒸气成为空气的第三大组分。如图 1.1 所示,全压强随海拔高度急剧变化,其变化速率虽慢但很显著。在外层空间,大气的主要成分被认为是氢气和少量氮气^[1]。

表 1.1 干燥大气的组分

组 份	含 量		压强[Pa]
	体积 %	ppm	
N ₂	78.084 ± 0.004		79117
O ₂	20.946 ± 0.002		21223
CO ₂	0.033 ± 0.001		33.437
Ar	0.934 ± 0.001		946.357
Ne		18.18 ± 0.04	1.842
He		5.24 ± 0.004	0.51
Kr		1.14 ± 0.01	0.116
Xe		0.087 ± 0.001	0.009
H ₂		0.5	0.051
CH ₄		2.	0.203
N ₂ O		0.5 ± 0.1	0.051

来源,经许可引自 *The Handbook of Chemistry and Physics*, 59th ed., R. C. Weast, Ed., Copyright 1978, The Chemical Rubber Publishing Co., CRC Press, Inc., West Palm Beach, FL33409.

为方便起见,习惯上把低于大气压的压强划分成几个范围,并把一些现象和工艺过程与之联系起来。表 1.2 列出了当今采用的真空区域的划分。半导体薄膜的外延生长^[2,3]发生在低真空范围。溅射^[4,5]、等离子蚀刻、等离子淀积^[6]以及低压强化学蒸淀积^[6~7]都是在中真空范围内进行的工艺过程的实例。大部分薄膜

● 为 760Torr 。

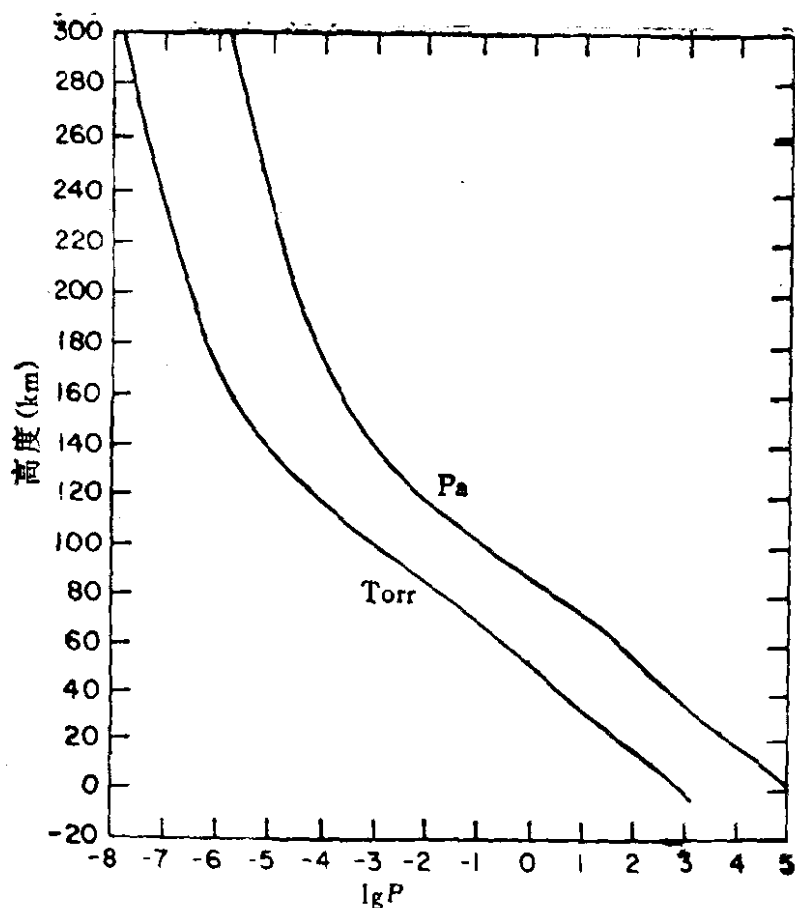


图1.1 大气压强与几何高度的关系曲线

经许可引自*The Handbook of Chemistry and Physics*,
59th ed., R. C. Weast, Ed. Copyright 1978, The Chemical
Rubber Publishing Co., CRC Press, Inc., West Palm
Beach, FL33409.

表1.2 真空区域的划分

真空范围	压强范围 (Pa)
低真空	$10^5 > P > 3.3 \times 10^3$
中真空	$3.3 \times 10^3 \geq P > 10^{-1}$
高真空	$10^{-1} \geq P > 10^{-4}$
甚高真空	$10^{-4} \geq P > 10^{-7}$
超高真空	$10^{-7} \geq P > 10^{-10}$
极高真空	$10^{-10} > P$

来源: 经许可引自正在编辑中的 *Dictionary for Vacuum Science and Technology*, M. Kaminsky and J. M. Lafferty, Eds.

制备^[5,8]、电子显微镜^[9]、质谱仪^[10]、晶体生长^[11]、X射线和电子束曝光制版^[12,13]以及阴极射线管和其他电子管^[14]的生产都要求甚高真空范围的压强。为顺口起见,我们把甚高真空范围叫做高真空范围,把甚高真空泵称为高真空泵。表面研究和材料研究^[15]则需要超高真空范围的压强。

本书通常采用国际单位制,很少例外。抽速以 L/s(高真空泵和流导)和 m^3/h (机械泵)为单位,而不用 m^3/s 。扩散泵的命名法尚未完全标准化,而是用其顶部法兰的 in 数来表示的。这往往与扩散泵的性能关系不大。除非另外指明,所有的公式都采用国际单位制的基本单位。

参 考 资 料

1. D. J. Santeler et al., *Vacuum Technology and Space Simulation*, NASA SP-105, National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC, 1966, p.34.
2. J. L. Deines and A. Spiro, *The Electrochemical Society Extended Abstracts*, May 1974, Abstract 62.
3. M. Ogirima et al., *J. Electrochem. Soc.*, **124**, 903 (1977).
4. H. F. Winters, *Advances in Chemistry Series No. 158, Radiation Effects on Solid Surfaces*, M. Kaminsky, Ed., American Chemical Society, 1976, p.1.
5. J. L. Vossen and W. Kerns, Eds., *Thin Film Processes*, Academic, New York 1978.
6. L. F. Donaghey, P. Raj-Choudhuri, and R. N. Tauber, Eds., *Proc. 6th Int. Conf. on Vapor Deposition*, The Electrochemical Society, Princeton, NJ, 1977.
7. T. O. Sedgwick and H. Lydtin, Eds., *Proc. 7th Int. Conf. on Vapor Deposition*, The Electrochemical Society, Princeton, NJ, 1979.
8. R. Glang, in *Handbook of Thin Film Technology*, L. I. Maissel and R. Glang, Eds., McGraw-Hill, New York, 1970, Chapter 1.
9. A. M. Glauert, Ed., *Pract. Methods Electron Microsc.*, **2**, North Holland, Amsterdam, 1974.
10. F. A. White, *Mass Spectroscopy in Science and Technology*, Wiley, New York, 1968.
11. B. R. Pamplin, Ed., *Crystal Growth*, Pergamon, Oxford, 1975.
12. A. N. Broers, *Proc. 7th Symp. on Electron Beam Sci. Technol.*, The Electrochemical Society, Princeton, NJ, 1976, p. 587.
13. A. N. Broers, *Proc. 7th Int. Vacuum Congr.*, R. Dobrozemsky et al., Eds., Published by the Editors, 1977, p. 1521.
14. F. Rosebury, *Handbook of Electron Tube and Vacuum Techniques*, Addison-Wesley, Reading, MA, 1965.
15. P. A. Redhead, J. P. Hobson, and E. V. Kornelsen, *The Physical Basis of Ultrahigh Vacuum*, Chapman and Hall, London, 1968.

第二章 气体的性质

象真空泵和真空系统这类用语都不能确切地说明它们所表示的事物。实际上，真空泵是一种在低于大气压的压强下工作的气体泵。真空系统是由管道和管路工件连接起来的真空泵和真空室所组成。真空室内的低压强是靠气体连续不断地从真空室流入真空泵来维持的，气体在真空泵中被捕获或被排入大气。本章讨论气体的静态和动态特性以及低压强下的气体流。

2.1 气体运动论模型

气体运动论的模型是建立在几种假设的基础上的。所研究的气体体积中包含着大量的分子。在 10^5Pa 的压强和 22°C 的温度下，一立方米的气体含有 2.5×10^{26} 个分子，而在 10^{-7}Pa 压强的很高的真空下，一立方米的气体则只含有 2.5×10^{13} 个分子。实际上，通常在实验室所用的任何体积和任何压强下都含有大量的分子。相邻分子的间隔距离要比单个分子的直径大得多。要是我们能使所有的分子立即停止下来，并将它们放在一个方格坐标上的话，那么在大气压(10^5Pa)下，分子之间的平均距离约为 $3.4 \times 10^{-9}\text{m}$ 。大多数分子的直径在 2×10^{-10} 到 $6 \times 10^{-10}\text{m}$ 的范围内，则大气压下分子间的间隔距离约为分子直径的 6 到 15 倍。对非常低的压强，譬如 10^{-7}Pa ，分子的间隔距离约为 $3 \times 10^5\text{m}$ 。分子处于不断运动的状态中。虽然概率不等，但运动可能有各种方向，而且可能具有各种速度。分子除在相互碰撞时外，它们互相之间不存在作用力。假定这是正确的，那么在整个容积中分子将均匀分布，并且它们在与器壁或相互之间碰撞之前作直线运动。

用这些假设可导出理想气体的许多值得注意的性质。这里只温习一些较基本的性质。当各个分子运动时，它们相互之间会发