

真空系统 设计原理

刘玉魁 编著

新 时 代 出 版 社

内 容 简 介

本书主要阐述了有关真空系统设计与计算的问题。内容包括：真空设计基础知识，真空工程中常用真空泵、真空计、结构材料的选择方法，真空管路计算，各种真空元件的结构原理及计算，真空室的设计，各种真空装置的适用真空度，高真空及超高真空系统设计，真空系统调试等。书中重点论述了真空系统设计方法，其余内容均为这一主题服务。读者通过学习本书，可以初步掌握真空系统设计和调试方法。

本书内容深入浅出，语言通俗易懂，可供真空设备操作人员、实验人员及从事真空工程设计的人员参考使用，也可以作为大专院校有关专业师生教学与学习参考。

真空系统设计原理

刘玉魁 编著

责任编辑 宋桂珍

新时代出版社出版 新华书店北京发行所发行

密云华都印刷厂印装

787×1092毫米 32开本 11.625印张 243千字

1988年3月第1版 1988年3月北京第1次印刷

印数：00001—2380册

ISBN7-5042-0039-5/TH·2 定价：3.10元

前 言

真空工程是真空技术的重要分支，是随着真空在科学技术各个领域中的应用而发展起来的。主要解决真空装置及真空元件的设计、制造、调试、运转等问题。真空系统设计又是真空工程主要的组成部分，给真空工程提供设计与计算方法。

科学技术中所使用的真空装置尽管要求不同，但从真空系统设计这一角度来讲，其设计原理大致是相同的。掌握了真空系统设计方法后，便可以从事各类真空装置设计。

本书中系统地讲述了真空系统及各种真空元件的设计方法，给出了设计时所必要的公式、数据、图表，新型真空产品及元件。用表格给出了各种真空泵、真空计的原理、用途。叙述了各类真空装置适用真空度范围及各类真空系统构成的原理图。书中描述了应用利用系数法确定真空泵的抽速，应用传输几率法确定管路流导以及各种真空元件的典型结构。此外，还讲述了真空系统调试方法。作者力求所论述的问题无论对真空工程设计人员，还是对真空系统操作、实验人员都能够有所裨益。

在写作本书时，得到了一些同志热情关怀与支持，陈文奎同志两次校阅文稿，从技术内容到文字修饰都提出了许多宝贵意见，胡炳森同志也为作者审阅了初稿，在此表示衷心的感谢。最后，恳切地希望读者对本书提出意见。

作 者

目 录

第一章 真空系统设计基础知识

§ 1.1	真空的含义	(1)
§ 1.2	真空度量单位	(3)
§ 1.3	真空区域及其物理特点	(5)
§ 1.4	真空的应用	(10)
1.4.1	真空环境的特点	(10)
1.4.2	各种真空装置的实用真空度	(11)
§ 1.5	真空泵	(20)
1.5.1	真空泵主要参数及有关术语	(20)
1.5.2	各种真空泵工作原理及特点	(22)
1.5.3	选择真空泵	(33)
§ 1.6	真空度的计量	(34)
1.6.1	选择真空计	(34)
1.6.2	规管的安装	(41)
1.6.3	规管使用注意事项	(43)
1.6.4	气体及蒸气对真空计的影响	(46)

第二章 真空工程常用材料

§ 2.1	对材料的要求	(47)
§ 2.2	常用钢	(52)
2.2.1	碳素钢	(52)
2.2.2	合金钢	(54)
§ 2.3	铸铁	(55)
§ 2.4	金属及其合金	(55)
2.4.1	铜及其合金	(55)
2.4.2	铝及铝合金	(56)

2.4.3 可伐	(56)
2.4.4 镍	(57)
2.4.5 钨	(58)
2.4.6 钼	(58)
2.4.7 钽	(59)
2.4.8 钛	(59)
§ 2.5 玻璃与陶瓷	(59)
2.5.1 玻璃	(59)
2.5.2 陶瓷	(60)
§ 2.6 真空密封材料	(62)
2.6.1 真空橡胶	(62)
2.6.2 塑料	(64)
2.6.3 金属密封圈材料	(64)
2.6.4 真空脂	(66)
2.6.5 真空封蜡	(66)
2.6.6 真空封泥	(66)
§ 2.7 干燥剂	(66)
第三章 真空管路气流计算	
§ 3.1 气流产生及其流动的基本方程	(68)
3.1.1 稀薄气体的流动状态	(68)
3.1.2 流导	(71)
3.1.3 真空泵的利用效率	(73)
§ 3.2 湍流时圆管的流导	(74)
§ 3.3 粘滞流下孔及管道的流导	(76)
3.3.1 孔的流量及流导	(76)
3.3.2 长管流导	(77)
3.3.3 圆形截面短管的流导	(80)
§ 3.4 分子流时孔及管道的流导	(80)
3.4.1 孔的流量及流导	(80)
3.4.2 长管的流导	(81)

3.4.3	短管的流导.....	(82)
§ 3.5	粘滞-分子流时管道的流导	(89)
§ 3.6	分子流下复杂管路的传输几率.....	(91)
3.6.1	两个截面相同的管道串联.....	(91)
3.6.2	两个截面相同的管道中间接一个大容器	(92)
3.6.3	管道与小孔组合后的传输几率	(93)
3.6.4	两管道中间有小孔后管路传输几率	(94)
3.6.5	两个截面不同的管道串接后的传输几率	(95)
3.6.6	各种管道的传输几率	(96)
§ 3.7	真空室中的压强分布	(100)
3.7.1	细长真空室中压强分布	(100)
3.7.2	串接真空室中的压强	(102)
第四章 真空系统常用元件设计		
§ 4.1	焊接及封接	(103)
4.1.1	玻璃-金属封接.....	(103)
4.1.2	金属-陶瓷封接.....	(104)
4.1.3	金属焊接	(105)
4.1.4	金属件焊接结构	(109)
4.1.5	环氧树脂胶合	(117)
§ 4.2	法兰连结	(117)
4.2.1	概述	(117)
4.2.2	橡胶密封法兰	(119)
4.2.3	金属密封法兰	(121)
4.2.4	快装法兰	(124)
4.2.5	管接头	(125)
§ 4.3	真空传动轴.....	(125)
4.3.1	概述.....	(125)
4.3.2	液体密封传动轴.....	(126)
4.3.3	橡胶圈密封传动轴.....	(130)
4.3.4	间隙密封传动轴.....	(131)

4.3.5 磁力传动轴	(132)
4.3.6 橡胶隔膜密封传动轴	(133)
4.3.7 金属波纹管密封传动轴	(134)
§ 4.4 真空中电引入线	(136)
4.4.1 对电引入线的要求	(136)
4.4.2 低压大电流引入线	(138)
4.4.3 高压引入线	(139)
4.4.4 热电偶引入线	(141)
§ 4.5 真空阀	(141)
4.5.1 真空阀类型及用途	(141)
4.5.2 真空阀设计与计算	(149)
4.5.3 阀门流导	(152)
§ 4.6 扩散泵障板及冷阱	(154)
4.6.1 扩散泵油蒸气的返流	(154)
4.6.2 障板	(155)
4.6.3 半导体温差致冷障板	(157)
4.6.4 冷阱	(162)
4.6.5 液氮冷冻钛升华阱	(165)
§ 4.7 油封机械泵挡油阱	(166)
4.7.1 机械泵的返流	(166)
4.7.2 离子阱	(167)
4.7.3 吸附阱	(168)
4.7.4 其它类型挡油阱	(170)
§ 4.8 油封机械泵油雾捕集器	(170)
§ 4.9 真空室的玻璃窗口	(172)
§ 4.10 前级罐的设计	(174)
§ 4.11 真空管路使用的柔性元件	(176)
4.11.1 金属波纹管	(176)
4.11.2 真空橡胶管及塑料管	(184)
4.11.3 环形波纹管网体	(184)

4.11.4 焊接波纹管	(185)
--------------------	-------

第五章 真空室设计与计算

§ 5.1 真空室的设计	(187)
5.1.1 真空室的构成	(187)
5.1.2 真空室门的设计	(189)
5.1.3 真空室水冷套设计	(192)
5.1.4 真空室中换热计算	(194)
§ 5.2 真空室筒体强度计算	(199)
5.2.1 常用基本概念	(199)
5.2.2 圆筒形壳体壁厚	(202)
5.2.3 球形壳体厚度	(206)
5.2.4 盒形壳体壁厚	(207)
5.2.5 管道壁厚	(208)
§ 5.3 圆筒体加强圈设计	(210)
§ 5.4 封头厚度计算	(213)
5.4.1 外压球形封头	(213)
5.4.2 外压凸形封头	(214)
5.4.3 平盖	(215)
§ 5.5 壳体开孔补强	(218)
§ 5.6 圆筒体及封头常用数据	(220)
§ 5.7 真空室筒体计算实例	(230)
5.7.1 圆筒形壳体	(230)
5.7.2 盒形壳体	(233)

第六章 真空装置设计与计算

§ 6.1 真空装置设计原则及其构成	(235)
6.1.1 真空装置设计原则	(235)
6.1.2 各种真空装置的构成	(236)
§ 6.2 真空装置的主要参数	(245)
6.2.1 真空装置的极限真空	(245)

6.2.2	真空装置的工作压强	(248)
6.2.3	抽气时间	(249)
§ 6.3	计算真空泵的抽速及确定抽气系统结构	(251)
6.3.1	确定主泵抽速	(251)
6.3.2	计算前级泵及预抽泵的抽速	(253)
6.3.3	确定管路真空元件流导及几何尺寸	(255)
6.3.4	真空系统中压强分布	(256)
§ 6.4	超高真空系统设计	(256)
6.4.1	超高真空与高真空系统设计的异同	(256)
6.4.2	真空泵的选择	(258)
6.4.3	选择无油真空系统的真空泵	(261)
6.4.4	选择材料	(264)
6.4.5	超高真空装置实例	(264)
§ 6.5	真空系统计算实例	(271)
第七章 真空系统调试		
§ 7.1	真空元件的清洁处理	(280)
7.1.1	清洁处理的目的	(280)
7.1.2	金属材料的预处理	(281)
7.1.3	玻璃、陶瓷的清洗	(285)
7.1.4	橡胶清洗	(285)
7.1.5	辉光放电清洗	(286)
7.1.6	氮气冲洗	(287)
7.1.7	氟里昂蒸气清洗	(288)
§ 7.2	真空系统的烘烤	(228)
7.2.1	烘烤出气	(288)
7.2.2	金属零件除气	(290)
7.2.3	烘烤对杜瓦抽气时间的影响	(291)
7.2.4	简易烘烤设备	(291)
§ 7.3	检查真空系统气密性	(292)
7.3.1	漏孔及其形成	(292)

7.3.2 检漏方法简介	(294)
7.3.3 设备制造中的检漏	(300)
§ 7.4 真空系统的安装	(301)
7.4.1 安装前的准备工作	(301)
7.4.2 总装	(302)
7.4.3 安装调试的安全问题	(303)
7.4.4 装置性能检查	(304)

附录

1. 2X型旋片式真空泵技术性能	(305)
2. 2XZ系列直联高速旋片式真空泵技术性能	(305)
3. 2H型滑阀式真空泵技术性能	(306)
4. W型往复真空泵	(306)
5. SZ型水环泵技术性能	(307)
6. ZJ型罗茨真空泵(机械增压泵)技术性能	(307)
7. P型水蒸气喷射泵性能	(308)
8. Z型油增压泵技术性能	(309)
9. K型油扩散泵技术性能	(309)
10. FX型分子筛吸附泵技术性能	(310)
11. SP型钛球升华泵性能	(310)
12. L型溅射离子泵性能	(310)
13. L/3L型溅射离子泵性能	(311)
14. F型涡轮分子泵性能	(311)
15. 真空计规格	(312)
16. 橡胶密封圈(JB 921—75)	(312)
17. 橡胶密封法兰(JB 919—75)	(314)
(a) 焊接钢法兰	(314)
(b) 松套钢法兰	(318)
18. 金属垫片密封法兰	(320)

19. 金属丝密封法兰	(323)
20. 铜垫片密封不锈钢法兰	(324)
21. 铜丝密封不锈钢法兰	(330)
22. 快装法兰	(334)
23. 橡胶密封管接头	(337)
24. 金属密封管接头	(339)
25. 陶瓷接线柱	(341)
26. 环形波纹管网体	(344)
27. 焊接波纹管规格及尺寸	(345)
28. 国外不锈钢成分	(348)
29. 各种气体热传导系数 k	(348)
30. 自由分子热传导系数 k_0	(349)
31. 不同温度下材料的辐射率 ϵ	(349)
32. 不同温度下材料的热传导系数	(350)
参考资料	(351)

第一章 真空系统设计基础知识

§ 1.1 真空的含义

地球被大气层包围着，粗略地说有 16km 厚。大气是无色、无味、无臭的气体。

大气是由各种气体组成的混合物，其主要成分^[1]：78.084% 氮、20.948% 氧、0.934% 氩、 3.14×10^{-2} % 二氧化碳、 1.83×10^{-3} % 氦、 5.24×10^{-4} % 氖、 1.14×10^{-4} % 氦、 8.7×10^{-6} % 氙、 5×10^{-5} % 氢、 2×10^{-4} % 甲烷。除此以外，还有氧化二氮、臭氧、二氧化硫、二氧化氮、氨、一氧化碳、碘蒸气等。水蒸气虽然不算做大气成分，但大气中却含有水蒸气，其含量取决于相对湿度。大气温度为 25℃，相对湿度为 50% 时，水蒸气的分压为 12mmHg[⊖]。

很早以前，人们认为大气是没有重量的，直到十七世纪托里拆利发现真空之后，才证实大气是有重量的。由于大气层很厚，因而对物体产生较大的压力，托里拆利通过测量得到了这个压力值。在海平面上为 760mmHg，通常称做“标准大气压”。在此压力下，每立方厘米 0℃ 的空气中大约含有 2.7×10^{19} 个气体分子。

真空是相对大气而言的，如果某容器中的压力低于周围大气压值，那么，我们就称该容器中的气体状态为真空状态。如：某地大气压为 760mmHg，而密闭容器中的压力为 76

[⊖]1mmHg = 1.333×10^2 Pa，下同。

mmHg, 那么, 容器中的气体状态即是真空状态。在此状态下, 容器每立方厘米的体积中有 2.7×10^{18} 个气体分子, 即 270 亿亿个分子。可见, 真空的空间并不空, 而是充满了气体分子。以现代的抽气手段获得的最高真空度为 $10^{-14} \sim 10^{-15}$ mmHg, 即使在这种稀薄的气体状态下, 每立方厘米的空间中仍然含有几十个到几百个气体分子。

我们通常以真空度来衡量空间气体稀薄程度。真空度越高, 表示气体越稀薄; 反之, 真空度越低, 表示气体越稠密。

真空度常用压强单位来表示, 我们说真空度高, 则意味着空间分子密度小, 也就是压强低; 反之说真空度低, 这就意味着空间分子密度大, 即压强高。

真空有两种: 天然真空和人为真空。

天然真空是自然界本来就存在的自然现象, 如人们呼吸时, 可以使体压强降低到 300 mmHg。各种动物呼吸也是利用体内压强降低 (真空) 来实现的。地球周围空间有一个广阔的天然真空环境, 海平面压强为 760 mmHg, 随着高度增加, 气体越来越稀薄, 如被称为世界屋脊的珠穆朗玛峰顶压强为 221 mmHg。目前世界人造卫星最低高度为 80 公里, 真空度约为 7×10^{-3} mmHg; 高度最高 (约 36000 km) 的同步轨道卫星所处环境的真空度约为 10^{-14} mmHg。这种压强随高度的变化关系, 可以用下式表示^[2]:

$$P = P_0 e^{-\frac{mg}{kT}h} \quad (1-1)$$

式中 P_0 ——海平面压强 mmHg;

P ——高度为 h 处的压强 mmHg;

T ——高度 h 处空间绝对温度 [K];

k ——波尔兹曼常数 $[\text{J}/\text{K}]$;

m ——空间粒子平均质量 $[\text{kg}]$;

g ——重力加速度 $[\text{kg}/\text{s}^2]$ 。

人为真空是人们利用某种抽气手段得到的真空。如：保温瓶胆、电灯泡、真空吸盘、真空镀膜机、加速器真空盒、电子显微镜、真空电炉中的真空是用真空泵抽气后得到的，属于人为真空。通常所说的真空即指人为真空而言。

§ 1.2 真空度量单位

真空计量中，以压强表示真空度的大小。我国法定计量单位制度规定的压强单位为帕 $[\text{Pa}]$ 、吉帕 $[\text{GPa}]$ 、兆帕 $[\text{MPa}]$ 、千帕 $[\text{kPa}]$ 、毫帕 $[\text{mPa}]$ 、微帕 $[\mu\text{Pa}]$ 等。过去常使用的单位有毫米汞柱 $[\text{mmHg}]$ 、标准大气压 $[\text{atm}]$ 、托 $[\text{Torr}]$ 、帕 $[\text{Pa}]$ 、巴 $[\text{bar}]$ 、微巴 $[\mu\text{bar}]$ 、工程大气压 $[\text{kgf}/\text{cm}^2 (\text{at})]$ 等等。

1927年第七次国际计量大会上，给标准大气压下了定义。其定义条件：重力加速度为 $980.665 \text{ cm}/\text{s}^2$ ；水银温度为 0°C ；水银密度 $13.5951 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。在这种条件下，760mm高的汞柱产生的压强，称为标准大气压。其值：

$$1 \text{ atm} = 1013250.144354 \text{ dyn}/\text{cm}^2 \quad (1-2)$$

由此定义标准毫米汞柱值：

$$1 \text{ mmHg} = \frac{1}{760} \text{ atm} \quad (1-3)$$

可见，这种标准大气压，依赖于汞密度的测量精度，不能给出最终值。因而，1954年第十次国际计量大会，又重新定义了标准大气压。其值：

$$\begin{aligned} 1\text{atm} &= 1013250\text{dyn/cm}^2 \\ &= 101325\text{N/m}^2 \end{aligned} \quad (1-4)$$

虽然重新定义了标准大气压，但mmHg仍用1927年定义值。

毫米汞柱这个压强单位书写不方便。因而，为了纪念发现真空的托里拆利〔Torricelli〕，德国把毫米汞柱命名为“托”〔Torr〕。后来，国际标准化组织使用“Torr”做为压强单位。托值规定为标准大气压（1954年的定义）的七百六十分之一。即

$$1\text{Torr} = \frac{1}{760}\text{atm} \quad (1-5)$$

由于1927年与1954年定义的标准大气压值有差别，因而造成1mmHg比1Torr大 $1.9 \times 10^{-4}\text{dyn/cm}^2$ 。由于两者差值较小，故通常认为1mmHg近似等于1Torr。

1958年第一次国际真空会议上，正式规定以“托”做为真空度的计量单位。后来，我国也普遍地使用了这个单位。

国际单位制和我国法定计量单位制中的压强单位，既不使用mmHg，也不使用Torr，而是采用 N/m^2 。

为了纪念十七世纪世界著名的法国数学家、物理学家帕斯卡，由法国建议，并经国际计量委员会通过，给 N/m^2 一个专用名词，称为“帕斯卡〔Pascal〕”，简称为“帕”〔Pa〕。

1971年第十次国际计量大会正式采用帕斯卡这个压强单位，其值：

$$1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2 = 7.5006 \times 10^{-3}\text{Torr} \quad (1-6)$$

这个单位由于读和写方便，又能与其它计量单位统一起来，因而，逐渐被各国使用起来了。

国际单位制中，压强单位还使用巴〔bar〕和标准大气压〔atm〕，二者与Pa的关系如下：

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$$

$$1\text{atm} = 1.01325 \times 10^5\text{Pa}$$

真空工程中，使用压强大于1mmHg时，有时用百分真空度表示压强：

$$\delta = \frac{760 - P}{760} 100\% \quad (1-7)$$

式中 δ ——真空度的百分数；

P ——气体压强mmHg。

上述各种压强单位换算见表1-1。

表 1-1 压强单位换算〔3〕

单位	Torr mmHg	Pa	dyn	bar	atm
1Torr	1	1.333×10^2	1.333×10^8	1.333×10^{-3}	1.316×10^{-3}
1Pa(N/m ²)	7.5×10^{-3}	1	10	1×10^{-5}	9.870×10^{-6}
1dyn/cm ²	7.5×10^{-4}	0.1	1	1×10^{-6}	9.870×10^{-7}
1bar	7.5×10^2	1×10^5	1×10^8	1	0.987
1atm	760	1.0133×10^5	1.0133×10^8	1.0133	1

§ 1.3 真空区域及其物理特点

真空技术中，使用的压强范围很宽，从760mmHg直到 10^{-13} mmHg，跨越十五个数量级。人们为了技术交流方便，常常把这么宽的范围再划分几个真空区域。按国际真空标准，划分四个真空区域：低真空、中真空、高真空、超高真空。

我国机械工业部部标中所划分的真空区域与国际标准是

一致的。本书所划分的真空区域基本与一机部标准一致，但考虑到各真空区域的物理特点及真空技术的未来发展，参考了有关资料〔11,12〕给出了超高真空区域下限，并划出极高真空区域。各真空区真空度范围见表1-2。

表 1 - 2 真空区域划分

真空区域	机械工业部标准	本书推荐
低真空	750~7.5×10 ⁻¹ mmHg 10 ⁵ ~100Pa	750~7.5×10 ⁻¹ mmHg 10 ⁵ ~100Pa
中真空	7.5×10 ⁻¹ ~7.5×10 ⁻⁴ mmHg 100~10 ⁻¹ Pa	7.5×10 ⁻¹ ~7.5×10 ⁻⁴ mmHg 100~10 ⁻¹ Pa
高真空	7.5×10 ⁻⁴ ~7.5×10 ⁻⁸ mmHg 10 ⁻¹ ~10 ⁻⁵ Pa	7.5×10 ⁻⁴ ~7.5×10 ⁻⁸ mmHg 10 ⁻¹ ~10 ⁻⁵ Pa
超高真空	7.5×10 ⁻⁸ mmHg以下 10 ⁻⁵ Pa以下	7.5×10 ⁻⁸ ~7.5×10 ⁻¹⁵ mmHg 10 ⁻⁵ ~10 ⁻¹² Pa
极高真空		7.5×10 ⁻¹⁵ mmHg以下 10 ⁻¹² Pa以下

每个真空区域都有一定的物理特点。这些特点与气体的分子密度、平均自由程、形成单分子层时间等有关，现在分述如下：

1. 分子密度

空间单位体积中的气体分子数，称为气体分子密度。分子密度与空间气体压强及温度有关，可用下面公式表示：

$$n = 9.656 \times 10^{18} \frac{P}{T} \quad \text{〔分子数/cm}^3\text{〕} \quad (1 - 8)$$

式中 P ——气体压强〔mmHg〕；
 T ——气体温度〔K〕。