

复旦大学电真空实验室

真空技术三十年集

华中一 主编

复旦大学出版社

复旦大学电真空实验室

真空技术三十年集

华中一 主编

复旦大学出版社

内 容 提 要

本书选录了复旦大学电真空实验室1953~1983年公开发表的部分论文,计21篇。包括真空获得、测量、分析以及真空容器结构计算等方面。

本书可供研制高真空设备和电真空器件的科技人员参考,也可作为高等院校教师或研究生的教学参考书。

真空技术三十年集

复旦大学出版社出版

新华书店上海发行所发行

上海群众印刷厂印刷

字数: 260千 开本: 787×1092 1/16 印张: 11.75

1985年3月第一版 1985年3月第一次印刷

印数: 1—3,500

书号: 13253·012 定价: 2.30元

序

长期以来，真空技术一直是复旦大学物理系从事的重点科研项目之一。解放后不久，我校和工业部门合作，在周同庆教授的领导下，试制医用 X 光管和高压整流管的同时，就开展了一些真空器材的试制和研究。短短几年内制成了十余种器材，随后又扩大了真空技术的研究范围。六十年代以来，我系真空技术的工作逐步转入研究和开发。在各方面的支持和合作下，1963 年建立了第一套国家基准的压缩式真空规。1966 至 1976 年十年动乱期间，我系电真空实验室被迫停止工作，粉碎“四人帮”后才逐步重建。特别是在 1978 年起，由于开展表面科学研究的需要，我系真空物理和技术的研究重新活跃起来，目前已建立了多种具有自己特色的表面物理仪器，并把“真空-薄膜-表面”三个领域的工作有机地结合起来，在学科发展方面作出了新的努力。

这本文集记录了我系三十年来在真空研究方面的一些典型成果，包括真空获得、测量、分析等各种课题，所选的内容不论设计或工艺都或多或少地带有一定的新意。即使象用三维有限元法对真空容器结构进行计算机辅助设计这样的工作，在国际上也是首先发表的。这充分说明我校电真空实验室这个研究集体及其组织者的才能和进取精神。趁文集出版之际，我乐于为序以志祝贺，并期望他们在发展我国社会主义科学技术事业中作出更大的贡献。

复旦大学物理系名誉系主任

王福山

1983 年 7 月

前 言

华 中 一

复旦大学的真空技术研究工作始于1953年。当时我国真空工业比较落后,工厂只能生产较小抽速的定片式油封转动泵,甚至象扩散泵和电离真空规这样一些常用的真空器材都是进口的。由于这个原因,我校在周同庆教授的领导下,与工业部门合作研制医用X光管和高压整流管的同时,为了工作需要,不得不相应地进行一些真空技术与设备的研究,经过三年多的努力,到1956年年底为止,先后试制成功的真空器材有玻璃汞扩散泵、玻璃横式油分馏扩散泵、抽速为60升/秒的金属油分馏扩散泵、三种热阴极电离真空规、二种冷阴极电离真空规、以及真空考克等。这些器材主要供玻璃高真空系统使用,在较好的烘烤条件下,系统能得到的极限真空约为 5×10^{-9} 托*。我们把这些工作写成《高真空技术与设备》一书,并于1957年正式出版^[1],这是解放以后我国第一本有关真空技术的专著。

1958年我们与上海市的有关部门合作,开始了较大规模的高真空技术研究。除获得和测量设备之外,还试制了射频质谱计、场电子显微镜(FEM)、收气剂和真空油脂等。金属与各种不同介质材料的熔封技术也逐步成熟。这方面的工作被迅速地汇总在《高真空技术与设备》的第二版^[2](1959)中。与此同时,在1958年,我们还编写出版了《真空技术基础》^[3]一书,为有关专业的技术人员、学生和工人提供了必要的真空知识。在许多兄弟单位和我校的共同努力下,到1960年时,上海的真空设备工业已初具规模,能提供各种常用的高真空器材。同时北京、兰州、沈阳、成都、南京等地也分别试制了不少新的真空设备。因此,从六十年代起,我校的真空工作逐步转入研究开发(R/D)方面。特别是由于当时中国科学院新技术局主持的真空测试基地的推动,国内在真空测量方面开展工作较多,我校也重点进行了这方面的工作,并与国家计量局、上海市计量局、上海玻璃厂合作,于1963年建立了第一套国家基准的压缩式真空规。在1966~1976年的十年间,由于众所周知的原因,我校真空研究被迫停止。直到1978年初,才重新开始真空物理与技术的研究工作。

下面扼要叙述一下过去三十年间我校在真空技术方面所做的主要工作。

一、扩 散 真 空 泵

在我校的教学实验室内,全玻璃的直式油分馏扩散泵很早就得到广泛使用。这种泵的最大抽速可做到200升/秒^[4A],极限真空为 10^{-8} 托级;如加用液氮冷阱则可达 5×10^{-10} 托。它的主要特点是可以自己吹制、价格低廉、易于清洗检漏,而且可与玻璃壳的电真空器件直接熔封而无需凸缘连接,因此被抽气的器件能得到较好的真空度。除此

* 由于历史上的原因,本书中的压强单位仍使用托(Torr): 1 托 = 1.33×10^4 帕(Pa)。

以外，它对真空技术的教学也很有好处：学生对扩散泵的结构和工作状态一目了然，可以看到喷口结构、油的正常沸腾或暴沸状态、油的凝结和返回以及在意外暴露大气之后油的劣化；特别是在什么情况下扩散泵具有最佳抽气状态可以有一种直观的认识。

全玻璃泵的缺点是喷口尺寸不易制作得非常准确，而且损坏以后几乎不能回修。为此我们又设计了一种玻璃壳、金属芯的油分馏扩散泵^[4A]。这种泵兼有玻璃泵和金属泵的优点。它的喷口形状和位置比较准确，在玻壳采用模子吹制后，泵芯可配合任何一只玻壳使用，于是在外壳损坏后可迅速换装。后来我们还根据 Hickman-Kinsella^[41]的预调节泵（pre-conditioned pump）设计了一种玻壳，当系统突然进入大气时，热的油液可“躲入”玻壳夹层中，使油液表面与大气的接触面积迅速减少到最小限度。这种泵曾用于显象管的排气系统，可允许不使用阀门以提高泵的有效抽速，而且在换接新的待排气管子后再次起动时，由于油液未完全冷却，就能大大缩短泵的温升时间，节约了能源和缩短了抽气周期。

二、涡轮分子泵

涡轮分子泵是一种性能优良的真空泵，目前已成为获得无油或少油超高真空的重要工具，但它已有的理论还存在着十分明显的缺陷。早期 Becker^[42]曾借用 Gaede 分子泵的分子拖动模型，但实际上在涡轮分子泵内，抽气方向并不象 Gaede 泵那样与叶轮的运动方向相一致。此外分子拖动模型还无法解释单片叶轮的抽气作用。Kruger-Shapiro^[53]用蒙特卡罗法进行了分析，但这种方法需要冗长的计算，而且对于形状复杂的有限长叶片很难处理。我们^[5A]用统计物理方法分析了涡轮分子泵的工作原理，证明了它的抽气作用主要是由于叶片与被抽气体之间的高速相对运动使入射分子与上下叶片表面的碰撞几率以及从叶轮一侧直接飞入另一侧的几率不相等造成的，而分子拖动理论只是在叶片速度不很高时的一种近似数学描述。使用新的计算方法计算一组叶轮尺寸只需约 1 小时的时间。

分子泵在使用上的主要缺点是不易除气。通常泵外壳用电热外套烘烤，而内部的转子只能依靠外壳的辐射来加热，因此温升缓慢、效率不高，甚至在超高真空系统中转子可以反过来成为主要的放气源。为了克服这个缺点，我校与浙江大学合作，试制成功一种能够内加热的分子泵^[6]。它的原理十分简单：在分子泵外面加一个磁场，工作时分子泵转子在高速旋转时，叶轮切割磁力线而产生涡流，使自身加热，这样就能达到除气的目的。当然，这个磁场的大小和位置都要经过适当的选择。实验证明，一个抽速为 450 升/秒的这种泵对暴露过大气 10 小时、容积为 8 升的测试罩抽气，在加热 6 小时后冷却 3 小时，就可得到 1×10^{-10} 托的压强。而一般无内加热的 Leybold-Heraeus 泵，在同样的情况下却只能得到 9×10^{-9} 托的压强。实测结果还证明这种泵的振动和噪声都较小。

三、绝对真空规和校准系统

1962 年国家计量局、上海市计量局、复旦大学和上海玻璃厂^[7A]曾协作建立了我国

第一套国家标准的压缩式真空规(又称麦克劳真空规)。在工艺上的主要突破是找到了一种简单的使毛细管内壁磨毛的方法,使内径的综合均方相对误差小于 0.5%,且对汞的表面张力处处均匀。在毛细管内径和压缩容积的测量以及读数方法等方面也做了不少工作,得到了比较稳定的工艺方案。以制成的一个宽量程压缩式真空规为例,它的精度与当时国际上一些高精度压缩式真空规比较如表 1 所示。

表 1 国际上几种高精度压缩式真空规的比较

	Jansen-Venema (1959) ^[54]	Podgurski-Davis (1960) ^[55]	Goto(1960) ^[56]	本 规(1962)
毛细管内径(毫米)	0.5	0.5	1.0	0.6949
压缩容积 (毫升)	490.9	200	1000	1019
精 度		±2% (10 ⁻³ 托)	< ±1% (10 ⁻³ 托)	±0.5% (0.5~2.5 托)
				±1% (3.7×10 ⁻³ 托)
	±3% (10 ⁻⁴ 托)	±2% (10 ⁻⁴ 托)	±3% (10 ⁻⁴ 托)	±2.4% (1.5×10 ⁻⁴ 托)
	±5% (10 ⁻⁵ 托)			±4% (3.6×10 ⁻⁵ 托)

为了防止汞蒸汽对人体的毒害,我们还设计了一种用波纹管来改变容积的充油压缩式真空规^[8A],量程为 3.4×10⁻⁸~3×10⁻¹ 托。

除了压缩式真空规外,从原理上说来,辐射计真空规(又称克努曾真空规)也是一种绝对真空规。1956 年 H.Klumb 教授曾访问复旦大学,介绍了他早年与 H.Schwarz 一起提出的同轴圆筒形辐射计真空规^[47]及其后的发展。我们认为这种规要比克努曾(Knudsen)的原始设计为佳,但如何从它的几何尺寸和部件温度计算出灵敏度的方法实际上并不具备,因此当时根本不能作为绝对真空规使用。为此我们对于它的灵敏度公式进行了理论计算^[8A],后来在铝笼的最佳结构方面又重新进行了计算^[10A]。至此已可认为在 Klumb-Schwarz 规的绝对化方面前进了一大步。只是后来不用绝对真空规作参考的标准方法飞速发展,使这种仪器实际上没有得到任何推广。

不用绝对真空规的所谓“无规”校准法常见的有两种。第一种是“注气法”,即将定量的气体注入某一已知容积的真空容器中,然后利用玻意耳-马略特定律算出压强,作为校准时的参考。这种方法一般用于低真空规的校准,如需作高真空校准则必须采用多级膨胀的方法。我们曾经对这种方法进行了计算,并得到了普适的方程^[11A]。第二种是“泻流法”,即在泵口加上一个薄壁小孔作为标准气导以得到限定抽速 s ,然后通以一定流量 Q 的气体。在动态平衡时,容器内的压强为

$$P=\frac{Q}{s},$$

可作为校准时的参考。我们^[12]曾讨论了当小孔半径为 r 时获得良好结果的实验条件是:“薄壁”的半径 $\geq 5r$ 、厚度 $\leq 0.1r$,对应于 P 的平均自由程 $\geq 2r$;而泵的标称抽速要

大于小孔气导率的50倍，由此还设计试制了总误差小于10%的泻流法校准系统^[12]。

1978年我们根据“注气法”原理提出了另一种设想^[13A]，即用加速器发出的高能质子通过隔膜注入超高真空容器。当质子抵达容器内收集极的表面，即转换为氢。这种方法原则上和注入气体是等效的，但不同的是注入气体的总量可以从测量注入质子的电流和时间来做到，而这是非常容易的。如果用“泻流法”作动态校准，则更为方便。此时 Q 由电流决定， s 由小孔几何尺寸决定，就可以不用压强测量而得到压强值 P 。实现这种方法的困难在于要使收集极不被氢原子植入，此外还要有一个在超高真空中具有相当抽速的无油真空泵。

四、热阴极电离真空规

几乎所有热阴极电离真空规的新设计，都着眼于如何拓展其量程以及如何使量值更为可靠。我们曾经做了如下工作：

1. 在拓展高压强端的量程方面，我们首先从理论上解决了影响高压强测量的因素，具体地说，就是探讨造成热规在高压强下校准曲线偏离线性的原因^[14A]。我们认为，这主要是由于电子通过较高压强的气态空间时繁流放电因素逐渐呈现的缘故。在稀薄气体中任何一个电子从阴极飞向阳极时，即使本身并未与气体分子发生碰撞，也还是增加了下一电子与气体分子发生碰撞的几率。对于这种理论最初曾有人提出不同看法，认为在真空中不会发生繁流放电。但是，其后王欲知等^[48~50]的大量工作却进一步证明在电离规、质谱计等电真空器件内都普遍存在着繁流放电现象，并已作了很多探讨。从这一理论出发，如热规灵敏度为 Γ （ 毛^{-1} ），则它偏离线性1%时的压强值为 $\frac{1}{50\Gamma}$ （ 毛 ）。这与Goto^[50]等的实验结果十分符合。由此自然得到的结论是：要拓展热规的高压强量程就必须降低其灵敏度。

2. 在普通量程（ $10^{-8} \sim 10^{-7}$ 毛）的热规方面，我们曾先后对栅式规^[51]和小林规^[52]进行探讨。我们^[5A]认为，小林规的特点不仅在于有效电离区的扩大，而且电子轨迹处于有效电离区内的比值也增大，因此灵敏度较高。此外，这种管子没有绕制的栅网，能耐受较强烈的机械震动而不致变形，很适宜于作为副标准电离规。于是我们与上海电子管厂和上海市计量局合作进行了试制，并将初步方案在1964年的第四届全国真空测试基地年会上作了报告。这种规采用的阳极是表面磨光的钨棒，收集极是直接涂布在玻壳内壁上的金膜。但是后来“文化大革命”开始，这一方案未能继续进行试验。

3. 在 Bayard-Alpert 规(BA 规)方面，我们认为它在实用上的主要缺点是电极难于彻底除气，为此设计了一个各电极都能直接通电除气的 BA 规^[16A]。它的形状与常见的 BA 规不同，实际上是一个横过来的 BA 规。灵敏度（手工制造的规管）为 8毛^{-1} 左右。在六十年代初期我校各实验室都普遍使用这种热规，还一度由南京电子管厂小批生产。

4. 在拓展低压强端的量程方面，我们认为最实用的设计是调制型 BA 规(MBAG)。为了避免在这种规管中调制极本身发出的 X 射线对收集极的影响，我们曾提出一种“针

对针”结构^[17]。近年来考虑到交流调制和锁定放大器的应用日益普通,而且由于这种结构的极间电容特别小,因此适于作连续工作的 MBAG。于是,我们重新进行了探讨^[18],在方法上是成功的,但灵敏度很低(0.2 托^{-1}),因此并不完全令人满意。后来在“轴向规”^[53]的基础上,我们另外设计了一种“分流规”^[19, 20A]。它的灯丝和离子收集极分别置于螺旋形加速栅的两端,而调制极为围绕收集极的环形圆片,使用时采用调制极电位由阴极电位跳变到收集极电位的工作模式,此时收集极得到的离子流占总离子流的份额发生变化,而收集极的光电流却并不随调制极电位而异,完全克服了加速极软 X 射线的影响。这种规的灵敏度为 30 托^{-1} 及 15 托^{-1} ,即调制系数达 50%,可以认为这是目前 MBAG 中最好的一种。

1965 年我们还设计过一种全屏蔽式热规^[17A]。它的收集极处在屏蔽极的“阴影”之中,因此完全不受加速极软 X 射线的影响。这个原始设计的灵敏度为 6 托^{-1} ,后来经过改进^[19],已提高到 10 托^{-1} 。

不附有外加的真空规而测量电子束管在使用过程中的残余压强,可提供电子束管寿命和可靠性的重要信息。我校曾经对 X 光管^[21]、示波管^[22]、显象管^[23A]、投影管^[24]、摄像管^[23A]等管内压强测定方法进行过研究,积累了相当的经验。

五、冷阴极电离真空规

我校对潘宁(Penning)式冷阴极电离真空规(冷规)的研究进行较早。1956 年就发表了较完整的综述性报告^[25],并提出了一种用电磁线圈的“筒式冷规”以克服当时国内缺乏优质永久磁钢的困难,还指出老化处理是使冷规达到实用化的关键所在。1964 年,我们把类似的结构用于“中子管”的试制,再次获得成功。除此以外,为了克服冷规应用于高真空时的除气困难,我们设计了能使平板状阴极直接通电加热的冷规^[16A],为了扩展冷规在高气压端的使用范围,还提出一种“裂纹阳极”的结构^[26A],在高真空和低真空范围内选取不同的工作电压,可测范围达 $2 \times 10^{-8} \sim 2 \text{ 托}$,比当时苏联 MM-8 的量程 $5 \times 10^{-5} \sim 1 \text{ 托}$ 要宽得多。

我们^[27A]还曾对两种主要的冷规结构,即平行场式(Penning 式)和正交场式(Red-head 的磁控管式和反磁管式)进行了比较研究,对 12 种不同结构在 26 组工作条件下的特性进行了观察,发现后者主要工作模式实际上仍为潘宁式。

在实际应用方面,冷规的磁场往往带来不便,于是我们设计了一种无磁场冷规^[28]。它利用高频放电过程中单位时间内形成的正离子数与气体分子浓度的关系来指示相应的压强,测量范围为 $10^{-3} \sim 10^{-8} \text{ 托}$,特点是不需要磁场和高压电源,触发时间仅为数十微秒。只是当时国内条件所限,电源价格相对地比热规高而未能很快推广。但这仍不失为一种有益的尝试,也许对今后设计更为实用的无磁场冷规有参考价值。

六、质谱计

在气体分析用质谱计方面,我们曾经研制过用于氢、氘混合气体在潘宁放电时测量

离子比的磁偏转质谱计, 以及作为真空系统和电真空器件的残余气体分析用的射频质谱计^[20]和回旋质谱计^[30A]。近年来则致力于非四圆棍式准双曲场质谱计^[30A]的研究, 获得了一定的结果。在产生这种准双曲场的所谓“变态四极”结构方面, 我们曾经提出了八叶^[31A]、十二叶^[31A]、多叶^[32A]、多线^[32A]以及边界电位作连续变化的“魔管”等设计。对于常用的四圆棍电场也作过探讨^[31A]。

七、真空容器的结构设计

一般真空技术中很少讨论真空容器的结构设计。但对于显象管那样具有古怪形状的玻璃外壳, 实际上设计工作极为重要。它不但涉及器件的成品率和成本, 还在节能和减少材料消费方面具有现实意义。1975年在31公分黑白显象管的全国联合设计组中, 我们曾用三维有限元法计算了在大气作用下显象管外壳各处的应力, 找出了薄弱环节, 并由此比较了一些不同设计的玻壳在力学上的优缺点。在我们的报告^[33A]发表之后, 1977年Philips^[64]公司才发表了用同样方法进行类似计算的报告。

在这本集子里, 我们选录了已发表的21篇论文, 作为我校真空技术研究方面的一个粗略缩影。实际上多年来我们还进行过气镇泵^[2]、十室泵^[2]、金属扩散泵^[2]、轨旋式钛泵^[34]、热导真空规^[2]、大气中正负离子浓度测定仪^[35]、收气剂^[1]、分子筛^[36]、玻璃车床^[2]、真空气克^[2]、真空油脂^[37]等多种器材设备的试制以及清洗工艺^[2]和封接工艺^[2]的研究, 最近还开始把表面分析技术用于研究电真空材料, 如阴极^[38]、封接金属^[39]、结构材料(不锈钢^[40]、玻璃^[42])等等。

在进行这些工作的时候, 曾先后得到很多兄弟院校、研究所和工厂的大力协助, 对此我们表示衷心感谢。在回顾过去这一历程的时候, 我们深感工作还做得太少, 有些工作则比较粗糙。我们希望在未来的年月中, 仍然能与国内真空界的同行们相互配合, 相互支持, 共同为祖国的四化建设作出贡献。

最后, 谨向王福山、王零、苏步青、郑子文、谢希德等同志表示深切的谢意。如果没有他(她)们一贯的关心和支持, 复旦大学的真空工作的发展是不可想象的。

参 考 文 献

(凡号码后附有 A 字的收于本文集内)

- [1] 华中一等: 《高真空技术与设备》, 上海科学技术出版社, 1956.
- [2] 华中一: 《真空技术基础》, 上海科学技术出版社, 1958.
- [3] 华中一等: 《高真空技术与设备》(第二版), 上海科学技术出版社, 1960.
- [4A] 同[3], 页 42, 1960.
- [5A] 储继国, 华中一: *J. Vac. Sci. Technol.* 19, 1101, 1982.
- [6] 浙江大学, 复旦大学: 《FI-450A 型内热式涡轮分子泵》, 鉴定会报告, 1982.
- [7A] 国家科委计量局, 上海计量局, 复旦大学, 上海玻璃厂: 全国测试基地年会报告集(真空测试), 页 22, 1963.

- [8A] 华中一, 蔡祖泉, 姜祥祺, 章壮健, 杨雅南, 翁根森: 真空技术 1, 49, 1966.
- [9A] 李志岩, 黄慕贤, 潘震明: 物理学报 19, 90, 1963.
- [10A] 姜祥祺: 真空技术 7, 295, 1978.
- [11A] 华中一: 复旦学报(自然科学版) 7, 147, 1962.
- [12] 姜祥祺, 蔡祖泉: 全国测试基地年会报告集(真空测试), 页 64, 1964.
- [13A] 华中一: 真空技术 7, 139, 1978.
- [14A] 华中一: 物理学报 19, 73, 1963; 华中一, 张强基: 上海市电子学会1962年年会论文选集, 页34, 1963.
- [15A] 黄心源, 尹元茂, 沈绍曾, 金效民: 上海市电子学会 1962 年年会论文选集, 页 53, 1963.
- [16A] 华中一, 黄心源, 章壮健: 物理学报 19, 83, 1963.
- [17A] 华中一: 复旦学报(自然科学版) 10, 235, 1965.
- [18] 华中一, 杨锡良, 邱绍雄, 诸葛健: *J. Vac. Sci. Technol.* 17, 351, 1980.
- [19] 华中一, 杨锡良, 邱绍雄, 陈建中, 唐景远, 孙企达: *J. Vac. Sci. Technol.* 19, 1144, 1982.
- [20A] 杨锡良, 邱绍雄, 陈建中, 唐景远, 华中一: 真空科学与技术 2, 354, 1982.
- [21] 袁作义, 周同庆: 复旦学报(自然科学版) 3, 130, 1958.
- [22] 华中一: 复旦学报(自然科学版) 5, 71, 1960.
- [23A] 姜祥祺, 黄金林, 华中一: 电子管技术 *2, 170, 1978.
- [24] 姜祥祺: 《电子束管内部残余气压的测定》, 内部报告, 1980.
- [25] 见[1], 页 56, 1956.
- [26A] 章壮健: 全国测试基地年会报告集(真空测试), 页 147, 1964.
- [27A] 华中一, 章壮健, 张强基: 全国测试基地年会报告集(真空测试), 页 58, 1963.
- [28] 袁一鹏, 杜元成: 复旦学报(自然科学版) 10, 243, 1965.
- [29] 复旦大学电真空实验室: 复旦学报(自然科学版) 4, 37, 1959.
- [30A] 潘孝仁, 杨惠新: 复旦学报(自然科学版) 10, 221, 1965.
- [31A] 华中一, 姜祥祺, 陆全康: *Nuclear Instruments and Meth.* 167, 101, 1979.
- [32A] 姜祥祺: 真空科学与技术 1, 145, 1981.
- [33A] 曹志浩, 华中一: 见《31 公分黑白显象管集中设计报告汇编》, 北京大学无线电电子学资料专辑, 页 107, 1976.
- [34] 张强基: 《小型轨旋式钛泵试制报告》, 内部报告, 1964.
- [35] 华中一, 章壮健: 上海电子学会1962年年会论文选集, 页 47, 1963.
- [36] 姜祥祺, 高龙关, 荣德载, 黄良社: 真空科学与技术 3, 11, 1983.
- [37] 夏国初, 陈炳钊, 周长春: 复旦学报(自然科学版) 5, 76, 1960.
- [38] 陈莹, 佟成伍, 张强基, 姚季永: 《失效氧化物阴极的俄歇谱分析》, 内部报告, 1983.
- [39] 华中一, 诸葛健, 潘星龙: 真空科学与技术 2, 354, 1982.
- [40] 华中一, 诸葛健, 范承善, 潘星龙, 陈华仙, 黄金林: 仪器仪表学报 1, 2, 1980.
- [41] K.C.D.Hickman, J.J.Kinsella: *Vac. Symp. Trans.* p. 52, 1956.
- [42] W. Becher, *Vakuumtechnik*; 16, 625, 1966.
- [43] C.H.Kruger, A. H. Shapiro: *7th Vac. Symp. Trans.* p. 6, 1960.
- [44] C. G. S. Jansen, A. Venema: *Vacuum* 9, 219, 1959 (Publ. 1960).
- [45] H. H. Podgurski, F. N. Davis: *Vacuum* 10, 311, 1960.
- [46] M.Gofe: *Adv. Vac. Sci. Technol.* p. 266, 1960.
- [47] H. Klumb, H. Schwarz: *Z. Physik* 122, 418, 1944.

- [48] 王欲知: 电子学报 *3, 1, 1964; *1, 41, 1965.
- [49] 王欲知, 徐廷伟: 真空技术 3, *3, 32, 1974.
- [50] 王欲知: 真空技术 9, *3, 35, 1980.
- [51] G. K. T. Conn, H. N. Daglish: *J. Sci. Instrum.* 31, 95, 1954.
- [52] 小林重雄: *Adv. Vac. Sci. Technol.* p. 271, 1960.
- [53] 陈建中: 真空 *1, 1, 1981.
- [54] J. H. R. M. Elst, D. K. Wielenga: *Philips Tech. Rev.* 37, 56, 1977.

目 录

序	王福山	1
前言	华中一	2
1. 玻璃扩散真空泵		1
2. 涡轮分子泵的统计理论		14
3. 标准压缩真空规的试制及互校		22
4. 一种新型结构的充油压缩真空规		37
5. 同轴圆筒形辐射真空规的绝对性		42
6. 同轴圆筒形辐射真空规的最佳铝笼结构		49
7. 相对真空规注气校准法的分析		59
8. 极高真空展望		66
9. 热阴极电离真空规的非线性		72
10. 小林式热阴极电离真空规性能的探讨		78
11. 可用焦耳热除气的超高真空电离真空规		85
12. 超高真空热阴极电离规中自发 X 射线效应的消除		92
13. 分流式超高真空电离规		99
14. 电子束管内残余气压的测定		103
15. 宽量程冷阴极电离真空规		111
16. 平行及正交电磁场冷阴极电离真空规的比较研究		118
17. 回旋质谱计中的离子弹道		126
18. 变态四极准双曲场的计算机分析		139
19. 多线和多叶型电极系统的计算		151
20. 显象管玻壳应力的计算机分析		162

玻璃扩散真空泵*

蔡 祖 泉

金属扩散泵具有不易破损、喷口准确、抽气速率较大、易于加工等优点,但它也有不易检漏、不易清洗、工作油液容易裂变等缺点,因此在实验室工作中,往往使用玻璃制的扩散真空泵。

事实上从扩散泵的发展历史看来,玻璃制的汞泵是最先出世的^[1],以后才有油^[2]、碘、石蜡^[3]、甘油^[4,5]、氟利昂-12^[6]等作为蒸汽源。目前最常用的是汞泵及油泵。本文着重讨论这两种玻璃扩散泵的制作方法。

一、玻璃汞扩散泵

在汞扩散泵中,最简单而易制的形式是玻璃、单级的,它的原始设计最初是郎缪尔^[7]提出的。后来因为这种单级的扩散泵在工作时要求较好的前级真空,因此就不断地有人加以改进,同时还在形式上力求简化,使玻璃吹制工作不致非常困难。在这一方面值得提出的是可斯和罗格尔斯^[8]的设计,他们采用的形式迄今还是最新型汞扩散泵的基础。而为了获得更高的极限真空和更大的抽气速率,后来就分别出现了更多级和多口^[9]的设计。这种泵后来还经常得到改进^[10,11],最后,还出现了喷口是可拆式的玻璃汞扩散泵^[12]。

在实验室中最常用的是小型三级汞扩散泵。我们早期试制的一种是仿照德意志民主共和国 Frithjof Sittig Q-10 型的,尺寸和加工步骤如图 1 所示。材料全部采用软化点在 500~550℃ (1 个大气压下)、在操作过程中不会烧毛的国产硬质玻璃。这种泵的喷口是综合小孔和帽套的,前者用 $\phi 1$ 毫米的钨棒作精确的穿孔,后者要控制对外壁的间距和规定的斜率,它们的地位对泵的性能起决定性的作用。最后一级喷口下面的螺旋管是使汞彻底冷凝的,斜度约和水平成 30°,再以下的弯管是让重新冷凝成液体的汞蒸汽回入加热槽的,同时也阻挡了槽内的汞蒸汽使不致被前级泵直接抽出。它的直径不能小于 7 毫米,否则汞会结积起来不流回加热槽,甚至因过重而使弯管裂开。在热源部分我们进行了修改:用玻璃管弯成盘香形状封接入加热槽底座(图 5b),然后用卷曲的电炉丝通入,这样实际上电炉丝全浸在汞内,在加热时不致浪费热量,比普通饼状电炉在槽外加热的办法要优越得多。此外,断了电热丝后也可以重接。

制成的泵在 10^{-4} 毛时抽气速率为 8 升/秒,极限真空为 1×10^{-6} 毛。它只要求较差的前级真空,甚至用一只水抽气机^[13]作为辅助就可以工作。

为了要得到更高的抽气速率,我们曾参照何增禄^[9]的多喷口原理设计了双级五口和双级九口的汞扩散泵。前者的结构如图 2 所示。在玻璃吹制工艺方面和 Q-10 型差不多,但由于多口占据的面积较大,泵的水冷套玻管较粗,就要求更高的灯工技术。在做喷

* 本文原载于华中一等著,高真空技术与设备,上海科学技术出版社,页 42~54 (1960)。

口时，先把小玻管按照图纸拉成一定规格的小喷口，用小而薄的安瓿锉刀割切、磨平，接到喷口的粗管上去：第一级单独喷口，接在粗管中心，四周连接第二级四个小喷口，距离要相互对称，长短也应一致，焊接小喷口时由于手里不能拿，就要一个辅助工具：可以用一段小玻管一端拉成和喷口同样大小的小嘴，就把小玻管本身作为手柄，将小嘴对准喷口用微火一烧，互相粘住，然后再将小喷口烧接在粗管上，以后只要轻轻敲击互相粘着的地方，辅助的小嘴就会很整齐地掉下来，这样逐只接上去是比较方便的。在烧接小喷口时用不着吹气，只要对准就可以，但要严密注意不能把喷口的小孔阻塞。其他的吹制工艺和图 1 是相仿的。全部过程中要注意对接时必须全部烧熔，不能带有小孔或细缝，否则就会造成漏气，而几乎所有的玻璃泵都是难于修理的。

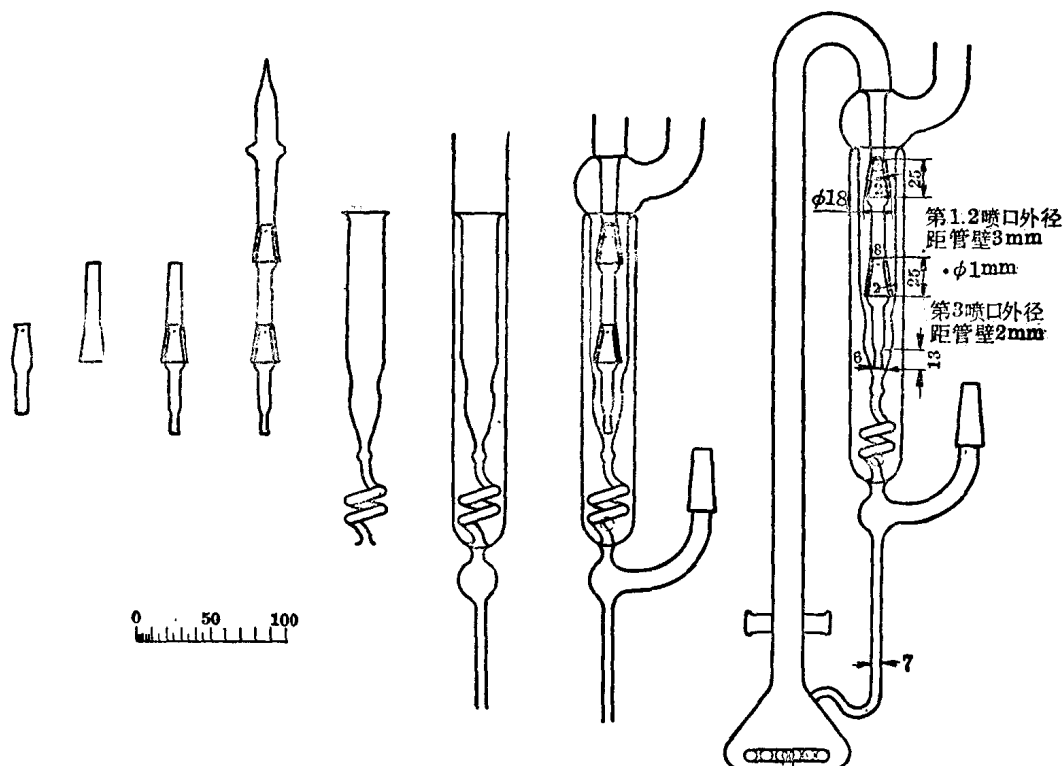


图 1 三级玻璃汞扩散泵吹制的操作步骤

汞泵的优点在于使用简单、前级要求低，热源控制不临界，同时汞对一般化学活性气体都不起作用，此外还不会有低质量数的元素分解出来，因此对质谱仪和离子器件的抽空特别适合。

汞泵的缺点首先是在于汞的蒸汽压高（20℃时 1.3×10^{-3} 托），因此必须附加用有干冰或液态空气的冷阱，而冷阱将必然影响泵的有效抽气速率；其次，汞蒸汽有一定的毒性，在长期使用时对工作人员不很适合（有时在前级泵出口处加一个盛有碘和碘化钾混合液的洗瓶要好一些）。汞泵在工作时破裂更是非常危险的，因此使用时要特别小心，防止发生事故。

关于玻璃制汞扩散泵的热输入、喷口尺寸、冷却用水的温度、蒸汽输入管直径对抽气速率的影响，已经有过详细的实验结果^[14]，金属制的汞泵目前除了原子能工业以外，

其他工业上使用得很少，而且也有过一些讨论^[15]，这里就从略了。

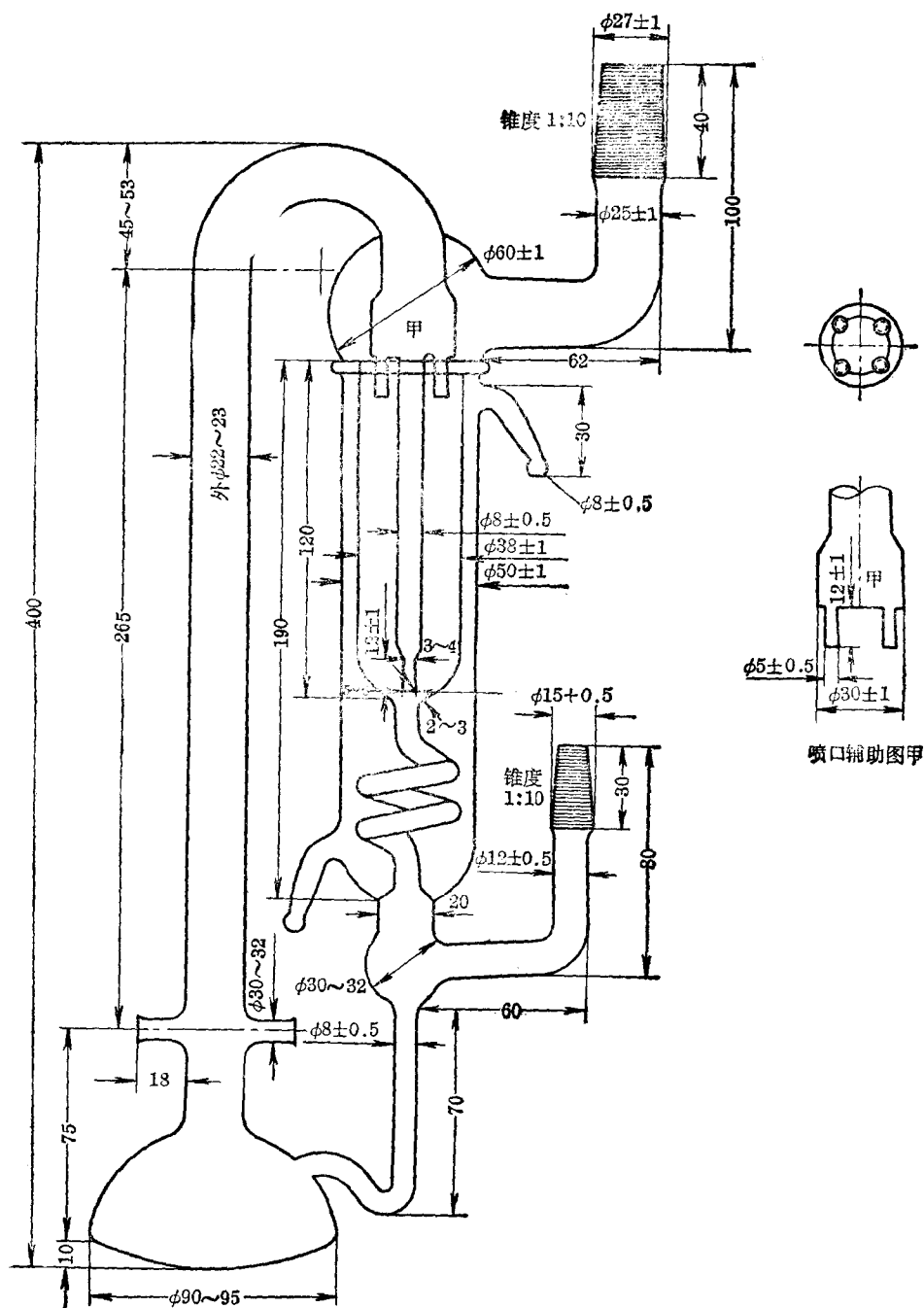


图2 双级五口玻璃汞扩散真空泵（单位：毫米）

二、玻璃油分馏扩散泵

目前油扩散泵几乎全部采用自动分馏式。最常见的玻璃油分馏式扩散泵是“横式”的，即几个级的喷口几乎处于同一水平线上^[16]。图3是我们仿照美国 Distillation Products GF-25W 型制成的玻璃、水冷、三级、油分馏式扩散真空泵。由于没有实物而只找到简陋的外形照片和一些标称规格^[16]，因此尺寸和原设计可能有些距离。因为加工复杂，所以材料必须用较好的硬质玻璃，如 Pyrex 或 Nonex 等。吹制时操作的大概步骤可以参看图4。原来在高真空部分有一个水冷室，防止油蒸汽上升到待抽空物件中去，而我们改用了一只干冰冷阱，以更彻底地保证油蒸汽不致回升。

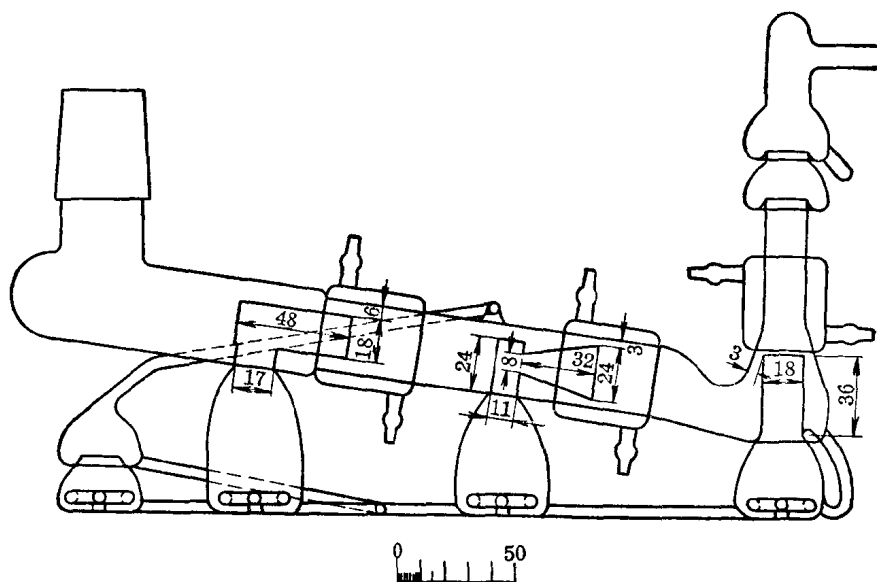


图3 玻璃横式三级油分馏扩散真空泵（单位：毫米）

制成的泵在 10^{-5} 托时泵口有效抽气速率（包括冷凝阱）是 19 升/秒，极限真空约 2×10^{-7} 托，前级真空的要求是 10^{-2} 托级。

这种油扩散泵的热源需要特殊的注意，因为四只加热槽的温度各不相同，例如在工作时第一槽（图3中最靠右边的一个槽）的油特别多，所以第四槽（分馏槽）的加热温度要低一些，以免第一槽内的油过量。原来在美国 Distillation Products 所出的几种玻璃油分馏式扩散泵，如 GF-5A, GF-20A, GF-25A 或 GF-25W 等，都是用电热丝直接焊入加热槽的（图5a），这一种装置是根据底亚登^[17]的设计而来的：优点是热效率大，而且可以用分别的电源加热。但是也存在不少缺点。首先是电热丝引出处的钨棒-玻璃封接容易过热而破裂；其次电热丝断裂以后重修非常麻烦；同时由于用分别的电源加热，就需要好几只调压变压器；此外电热丝表面和油类直接接触，容易使油分解或碳化，于是在实际使用上就非常不便。因此我们也改用了如图5b的盘香式，玻璃管弯成盘香形后封接入加热槽，用电炉丝穿入。这样就具有上述的优点而避免了上面所说的四个缺点，因为：