

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

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} 托时抽气速率为 8 升/秒,极限真空为 1×10^{-6} 托。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)。

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。

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,

3

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。

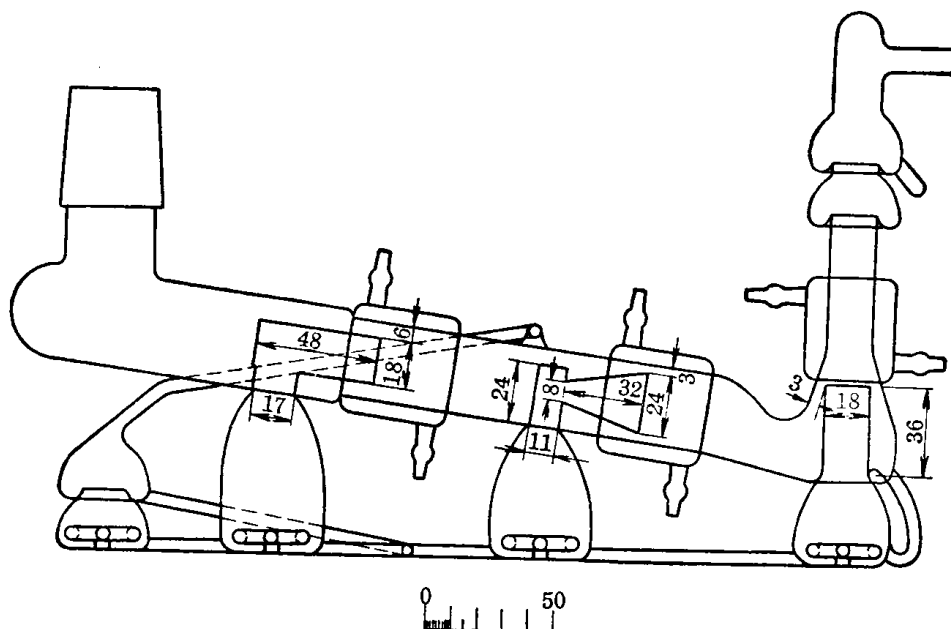


图3 玻璃横式三级油分馏扩散真空泵（单位：毫米）

制成的泵在 10^{-5} 毛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} 毛，前级真空的要求是 10^{-2} 毛级。

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），这一种装置是根据庇亚登^[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：

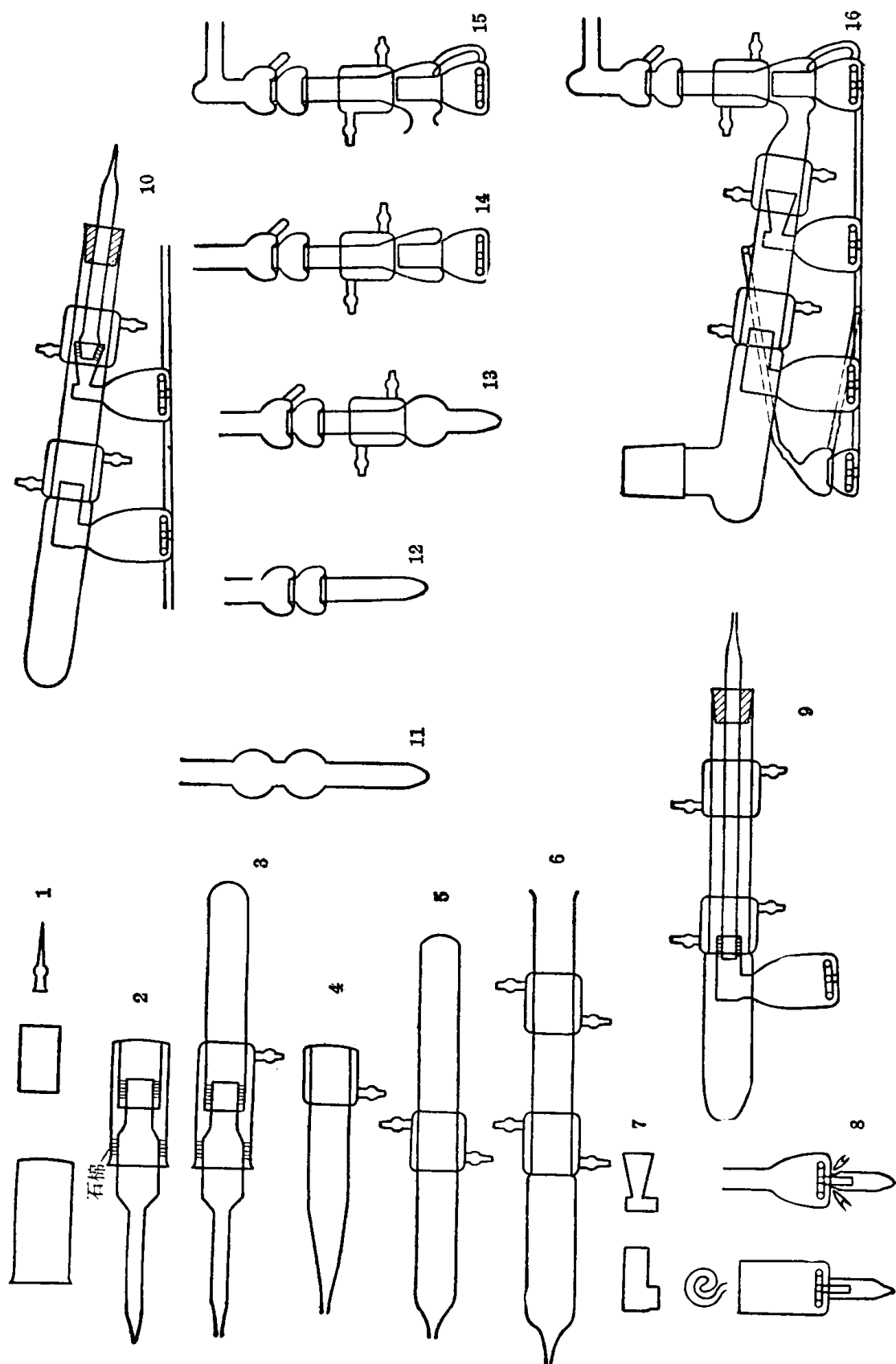
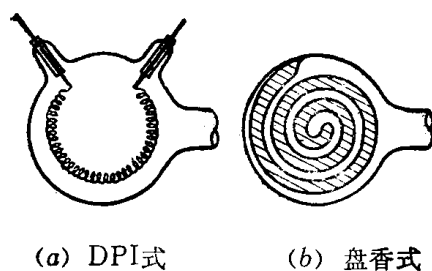


图 4 横式玻璃油分留扩散泵吹制的操作步骤



(a) DPI式 (b) 盘香式

图 5 扩散泵热源装置的顶视图

1. 没有金属玻璃封接，不易裂开；
2. 电热丝断后非常容易更换；
3. 电源只需要一个，而适当的温度可以用伸缩电热丝长度的办法来获得；
4. 电热丝因包在盘香管里面，并不和油类相接触，可以没有油裂变的触媒作用；
5. 盘香管也浸在油内，并没有损失热量。

在泵的玻璃吹接方面，手续要比较复杂一些，而且这种盘香管的制作，要求较高的玻璃技术。具体的步骤是：先用粗管封成平底，然后烧熔，轻轻吹气使底部略微突出一些而成为椭圆形，并在底的中心接上一段15毫米左右的玻管为转动柄，将粗管用火焰或电阻丝割开，套入绕有如图 5b 的盘香管，用石棉线或纸塞在盘香管和转动柄之间，让它固定不动，然后将割开的玻璃再连接起来，并且吹成三角形的加热瓶，同时趁热把盘香管分别与三角瓶连接，最后在盘香管的出口端烧出通入电阻丝的孔眼。

除了如图 3 所示的型式以外，我们还试制了其他各种不同抽气速率、水冷或气冷的横式油分馏扩散泵六种*。这些泵的抽气速率是比较好的，因此可以得到较高的极限真空，而且加热槽面积不受喷口直径的约束。缺点是抽气速率不能做得很大，加热槽的热量输入需要复杂的调节，而且要求较高水平的玻璃吹制技术（还不能使用玻璃车床，全靠手工制作）。因此，很早就有人希望能够仿照通用的金属油扩散泵的型式，在加热器内放入同心的圆环并隔开各喷口使用的蒸汽以达到分馏的目的，但是因为玻璃吹制技术十分困难而一直未能实现。直到 1953 年，法兰克^[19]才提出了一个特殊的设计。我们把这种几级喷口位于垂直线上的泵叫做“直式”泵。从 1956 年开始，我们试制并生产的直式玻璃油分馏扩散泵一共有六种；二级的（抽气速率在 10^{-4} 毛时分别为 12、50、100 升/秒）极限真空为 $\leq 5 \times 10^{-6}$ 毛；三级的（抽气速率在 10^{-4} 毛时分别为 12、50、200 升/秒）极限真空为 $\leq 1 \times 10^{-6}$ 毛。图 6 至图 9 为其中较小的四种。所用的材料不必为派拉克斯，使用线胀系数在 $38 \sim 42 \times 10^{-7}$ (350°C) 以内的国产硬质玻璃已经足够。可以用玻璃车床封接，然后进行彻底的退火。

二级直式泵的吹制步骤如下：先取一只模制的玻璃泵壳（直接用玻璃管吹也可以，但不容易吹得均匀美观），截成如图纸要求的长度，然后另外挑选一段玻管作为水冷套，两头割切磨平，放在玻璃车床上翻，翻口边缘的直径要刚好放得进扩散泵的玻壳内。若冷水套管翻得过大，可以用一块铁皮包住反口，加一些水和金刚砂研磨，把口边磨去一层。做好这道工序，就可配扩散泵的心柱：先用玻管按照要求吹成不同角度的喇

* 包括综合喜克曼^[16]及柴培尔^[18]式的多喷口水冷泵。

叭型喷口，用电阻丝或火焰切割规定的长度，然后磨平。接着取一段玻璃管，一头放在玻璃车床上，烧软，用 15° 的黄铜刮板把它翻成平的喇叭口，另一头吹成泵的内喷口。再取一段玻璃管，管壁略厚一些，一头用铁丝钳子在火焰上撑成喇叭口形状，并在玻璃上用实心玻璃棒烧上等距的三个玻璃点，正好装入翻平的喇叭内，用小火焰烧在与三点相碰的管壁上，使互相粘着，退一下火，趁热取一个实心玻璃环接在用钳子撑开的喇叭口上，再用一根 $\phi 8$ 毫米的玻璃管套入玻璃环接在翻平的喇叭口上（这根管子是作为回油用的）。在烧接时要特别小心，不能使翻平的喇叭口变形或走样；其次要注意火焰，不要再烧在已接好的三点上，否则容易发生爆裂。吹好这个工序，退一下火，冷后接上准备好的扩散泵喷口罩，就完成了泵心柱的加工。接下去就可以把玻璃壳和冷水套连接起来，但在连接之前泵的心柱一定要经过电炉退火，取消内部应力，若不经退火，则在与玻璃壳吹接时，泵的心柱内部本身已有应力存在，再突然受热膨胀，很容易在三点焊接处发生爆裂，这是非常重要的。泵的外壳和泵的心柱都分别准备好后，就把泵的心柱在第二级喷口上绕上几圈石棉绳，套上水冷套玻璃管，使它们基本上紧密，再用三个相同的软木塞支在第二级喷口上，使泵的心柱固定在冷水套内，只要基本上不致摇动就可以，然后将冷水套和泵的心柱一起装入玻璃壳，再用一段粗玻璃管（上面接有一个小管吹气孔的）塞在泵内壳，管外包几层普通纸，一方面作为吹气，另一方面挡住冷水套不让它在吹接时滑出来。全部都准备好后，可放到玻璃车床去吹接，玻璃车床上的自来轧头要包上石棉绳或石棉布，以免夹碎玻璃壳。在车床吹接时，先要封接泵的心柱和喇叭口，烧好后，马上封接冷水套的另一头，在烧熔时要一块石墨刮板，轻轻地压在泵壳和心柱的喇叭口相碰的地方，让它软化时紧密地粘着，并且边烧边吹气，使封接部分均匀，接好后放到喷灯上，用大火焰退火，立即接上通冷却水用的小玻璃咀及前级真空部分的抽气管，退一下火。等到冷却以后，就接另一头：用电阻丝割切泵壳多余的玻璃管，取出软木塞及石棉绳，放到玻璃车床上，操作方法与第一头基本相同，与冷水套和通往高真空端的磨口都吹接好以后，就要进行 $500\sim 550^\circ\text{C}$ 的退火，除去内部的应力。至此就完成了扩散泵的操作手续。

吹制三级直式泵的手续和二级的基本上相同，但是因为多了一个喷口，工艺上要稍微复杂一些。直式泵也可以做成无水冷套的，可以省掉一个手续，冷却用紧密绕在泵壳上适当部分的透明薄壁塑料软管通水来获得，也能得到同样的极限真空（虽然，对于直径较大的泵似乎不很相宜）。

由于喷口的封接是手工操作的，所以要特别注意喷口在泵内的位置是否平整、是否处于中心。尤其是最高的喷口，影响最大。如果略有歪斜，非但因为喷口尺寸变动而影响抽气速率，还将产生严重的油蒸汽回流现象，影响原来的极限真空。

关于玻璃扩散泵制造技术的一般性指导，可以参看书籍[20]及[21]。

三、玻璃壳金属芯油分馏扩散泵

全部用玻璃吹制的扩散泵，最大的缺点是喷口不易制作得非常准确，而且在使用过程中如有任何一个部分损坏时，回修几乎是不可能的事情。因此我们试制了玻璃壳金属

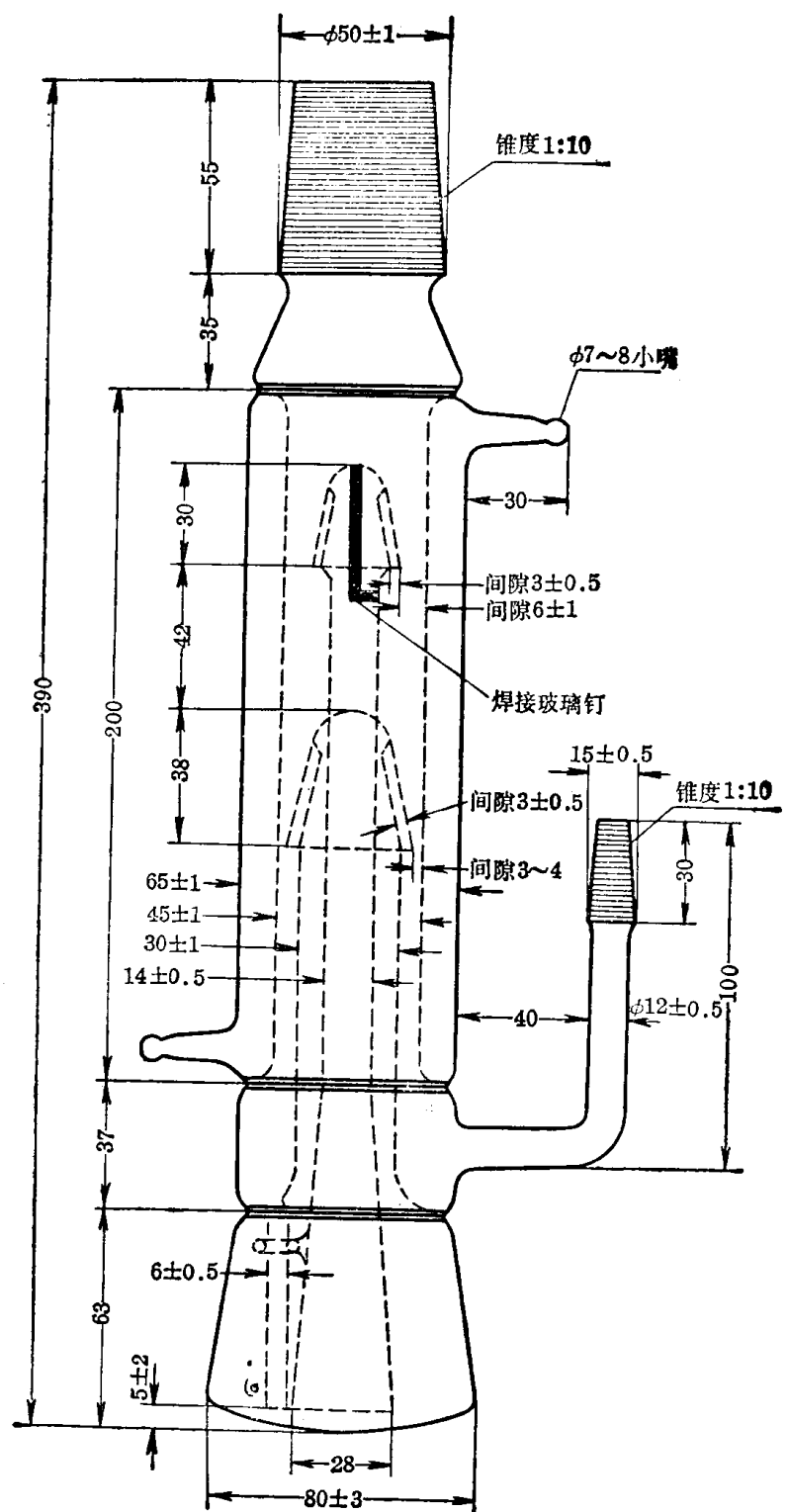


图 6 12升/秒二级水冷直式玻璃油分馏扩散真空泵（单位：毫米）

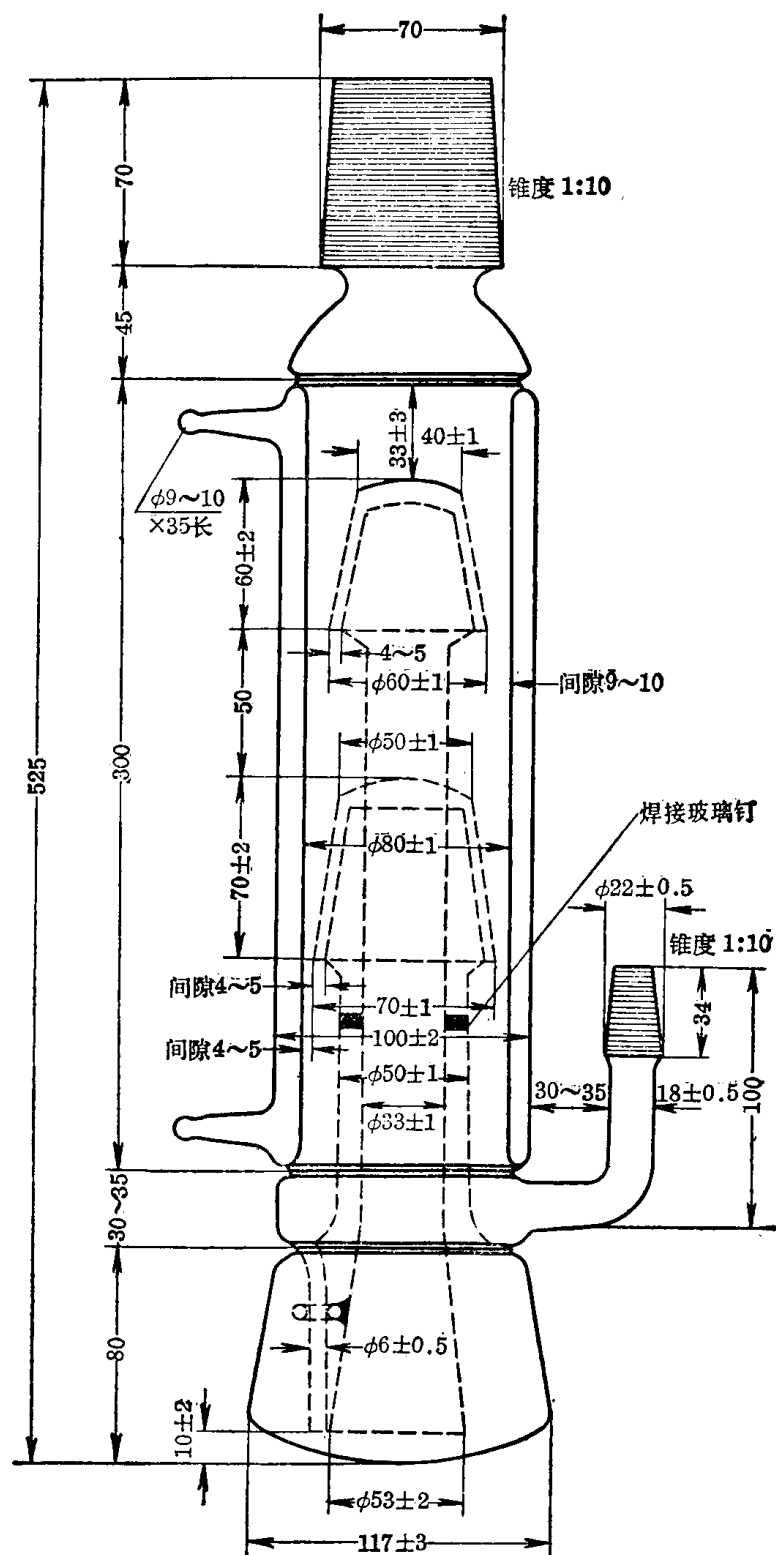
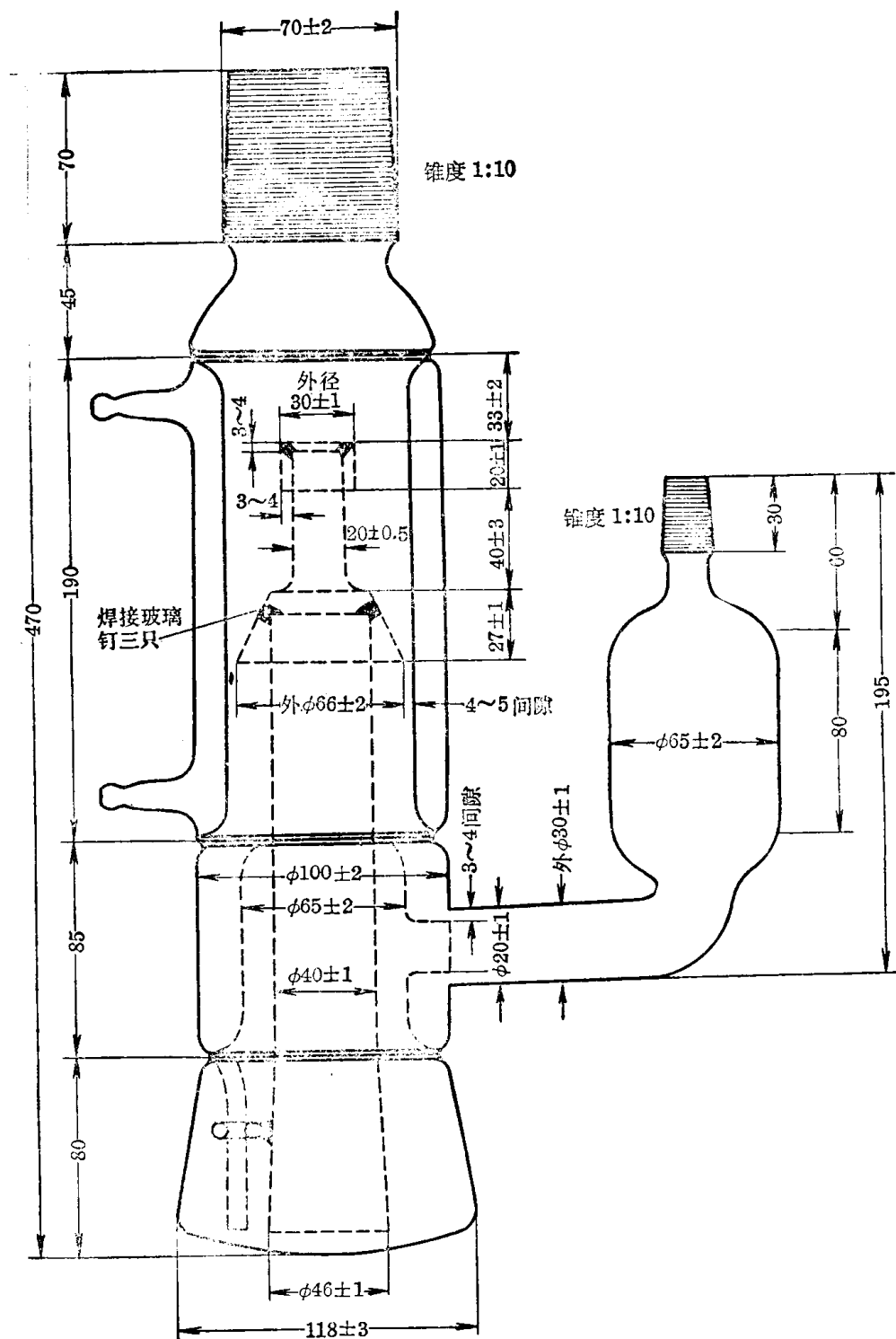


图 7 50升/秒二级水冷直式玻璃油分馏扩散真空泵 (单位: 毫米)



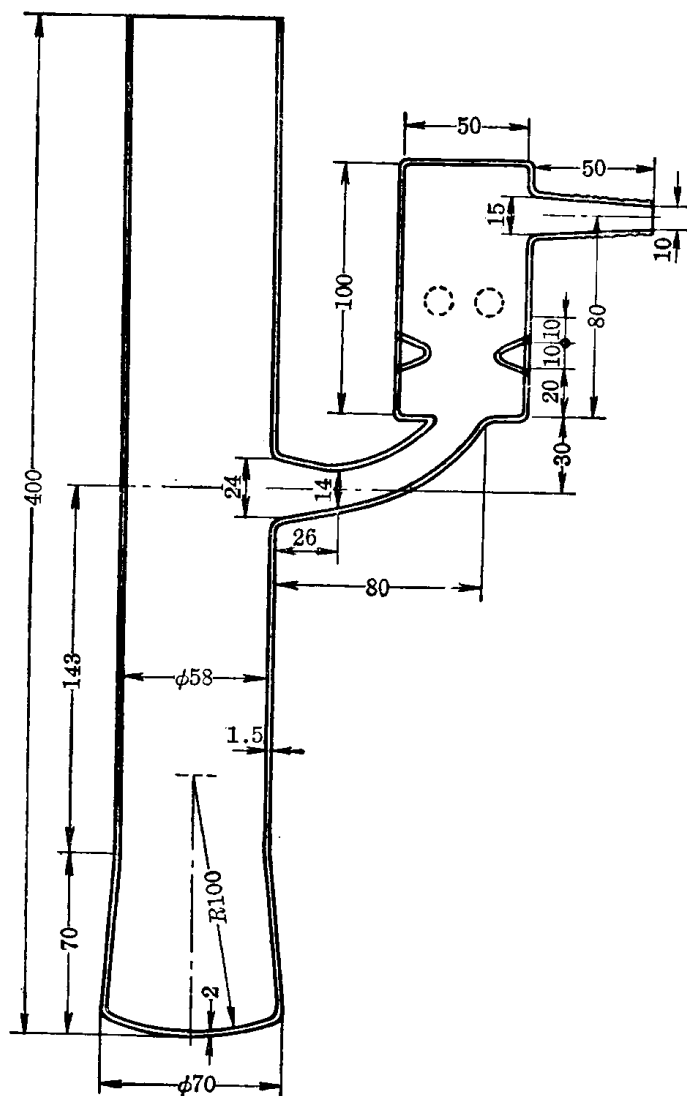


图 10 60升/秒玻璃壳金属芯三级油分馏扩散
真空泵外壳 (单位: 毫米)

芯的油分馏扩散泵, 根据我们的试用结果, 这种泵兼有金属泵和玻璃泵的优点, 而几乎避免了两者所有的缺点。

配用的泵芯是 60 升/秒、具有增压喷口的三级油分馏式 (见图 4), 泵壳如图 10 所示。后级的喷口用两块风翼作气冷或用透明塑胶管作为水冷却都可以, 前级喷口 (增压喷口) 则没有任何冷却, 只在前级筒上烧了一些凹涡、扩大气冷的面积而使油雾不致被转动泵直接抽走。金属芯在玻壳内的固定, 依靠顶端 Y 形的黄铜撑板。

十分明显, 这种泵由于是玻壳制的, 因此易于清洗、易于检漏、易于观察内部喷口的作用情况以及油液在使用过程中的变化; 同时它又具有金属喷口的准确性和易于装配的特点。在生产方面大大简化了玻璃吹制的工艺手续, 还节约了特殊内径的无缝钢管。在玻壳采用模制以后, 芯子可以配合任何一只壳子使用, 这样如果壳子不慎破裂, 可以立

即换用。在高真空端则可以直接用玻璃烧接上真空系统, 避免了在金属泵时必然要使用的橡皮或真空油脂的不良影响。在气冷时 (泵壁温度 80°C) 极限真空就可以达到 1.4×10^{-7} 托。用油量为 60 毫升, 加热功率 350 瓦。

这种泵还适用于学校作为教学示范实验。

参 考 文 献

- [1] Gaede: *Ann. Phys.* 41, 289, 1913; 46, 357, 1915.
- [2] Burch: *Proc. Roy. Soc.* 123, 271, 1929.
- [3] Klumb: *Naturwiss* 19, 612, 1931.
- [4] Alexander: *J. Sci. Instrum. Phys. Ind.* 25, 313, 1948.
- [5] Pollard, Sutton, Alexander: *J. Sci. Instrum. Phys. Ind.* 25, 401, 1948.
- [6] Delcher, Geller, Mongodin, Prevot: *Le Vide* 11, 78, 1956.

- [7] Langmuir, G. E. *Rev.* 19, 1060, 1916; *J. Franklin Inst.* 182, 719, 1916.
- [8] Kurth, Ruggles, 见 Dushman; *Scientific Foundations of Vacuum Technique*, p.191, 1949.
- [9] 何增禄: *Physics* 2, 386, (1932); *Rev. Sci. Instrum.* 3, 133, 1932.
- [10] Harrington; *Rev. Sci. Instrum.* 20, 761, 1949.
- [11] Dutta; *J. Sci. Industr. Res.* 10B, 261, 1951.
- [12] Monch; *Z. angew. Phys.* 6, 59, 1954.
- [13] Reimann; *Vacuum Technique*, p. 41, 1952.
- [14] Reichardt; *Z. angew. Phys.* 6, 61, 1954; 6, 105, 1954; 7, 297, 1955.
- [15] Alexander; *J. Sci. Instrum.* 23, 11, 1946.
- [16] Hickman; *J. Appl. Phys.* 11, 303, 1940.
- [17] Bearden; *Rev. Sci. Instrum.* 6, 276, 1935.
- [18] Zabel; *Rev. Sci. Instrum.* 6, 54, 1935.
- [19] Frank; *Glas-und Hochvakuum Tech.* 2, 294, 1953.
- [20] Barr, Anhorn; *Scientific and Industrial Glass Blowing and Laboratory Technique*, p.181, 1949.
- [21] Веселовский; *Стеклодувное Дело*, p.209, 1952.

涡轮分子泵的统计理论*

储继国 华中一

【提要】 本文从统计物理出发,分析了涡轮分子泵的工作原理,证明了泵的抽气作用主要来自叶片与被抽气体分子之间的高速相对运动使入射气体分子与上、下叶片表面的碰撞几率不同。涡轮分子泵的分子拖动理论实际上只是在叶片速度不很高时的一种近似数学描述。当叶片速度接近被抽气体分子的热速度时,泵的抽速和压缩比将趋向饱和,即进一步增加叶片的速度,泵的抽速和压缩比均不可能象分子拖动理论预期的那样显著增加。最后还用统计理论讨论了有限长叶片的何氏系数和压缩比,理论值与实验结果符合得很好。

一、引言

自从第一台商品涡轮分子泵问世以来,泵的性能和理论方面的工作均获得了很大进展^[1-7]。目前,泵的主要性能可以用大家熟知的分子拖动理论或者 Monte Carlo 方法求得。

分子拖动抽气原理是 Gaede^[8] 于 1913 年首先提出的。其内容为:气体分子与高速运动表面碰撞后,将获得定向速度,从而建立起一定的压强差。Becker^[1] 把这一原理用来分析他的涡轮分子泵的工作过程。在 Gaede 的分子泵中,转子的运动方向与抽气方向一致,然而,在由动叶轮和定叶轮交替叠合而成的涡轮分子泵中,叶轮的运动方向却与抽气方向垂直,因此,把涡轮分子泵与 Gaede 泵类比是甚为粗糙的。此外,Becker 对划分抽气通道和泄漏通道的依据缺乏明确的说明,尤其是用分子拖动理论无法解释单片叶轮的抽气作用。

Kruger 和 Shapiro^[2] 指出,涡轮分子泵的抽气作用来自从上侧射入叶轮的气体分子具有不同的传输几率。传输几率的数值可以用 Monte Carlo 方法求得。然而,这种计算只有在形状简单的无限长叶片时,才比较容易进行,对于实际涡轮分子泵,计算往往十分麻烦。

一般说来,采用上述理论或方法求得的结果与实测值符合得较好。但是,也存在一些难于解释的问题,例如,泵的抽速随被抽气体分子量增大而下降^[9,10];叶片速度很高时,压缩比趋向饱和^[2]等。

本文提出了一种分析涡轮分子泵工作机理的新方法。从统计物理出发,导出了计算抽速和压缩比的新公式,预期的结果与实验值符合得很好。

二、涡轮分子泵的统计理论

简化了的涡轮分子泵叶片结构,如图 1 所示。引进的假设与 Flecher^[11] 完全相同。当叶片高速度运动时,由于气体分子与叶片表面的碰撞,射入叶片间隙的气体分子

* 本文原载于 *Journal of Vacuum Science and Technology* 19, 1101(1982), 现根据原文译出。