

涡轮分子泵的发展近况

P. Flecher

一、前言

1913年，盖德提出了一种新型的与位移原理无关的机械真空泵^[1]。他的分子牵引泵实际上是这样的设想：气体分子不断地与运动着的固体表面相碰撞，按一定的方向被抽出。

基于同样的设想盖德发明了扩散泵，在扩散泵中，气体分子被高速喷射的蒸汽分子带出^[1]。他将几级泵串联在一起，当前级压强为1毫巴时，对空气的压缩比达到 10^6 ，抽速为1升/秒。一种改进的盖德分子牵引泵在1923年由霍尔维克(Hol week)提出^[2]。转子在具有环形槽的圆柱筒中转动。它所达到的抽速约为5升/秒，对空气的压缩比为 10^6 的好几倍。

1940年，济克邦(Siegbahn)提出一种取代圆柱形转子的圆盘形转子的分子牵引泵^[3]。

这类泵有直到150升/秒的各种抽速^[4]。为了获得令人满意的压缩比，这三种早期的分子牵引泵的工作间隙只有百分之几毫米。由于离心力，热膨胀、甚至是外部的微小物质进入泵内都会导致转子卡壳或使结构损坏，所以它们的工业应用未能实现。分子牵引泵的物理性能是如此引人注目，导致贝克尔(Becker)1945年作了一次新的尝试，企图按照霍尔维克泵来研制一种成熟的工业用的分子泵^[5]。但是，与他的前辈一样，未能成功。

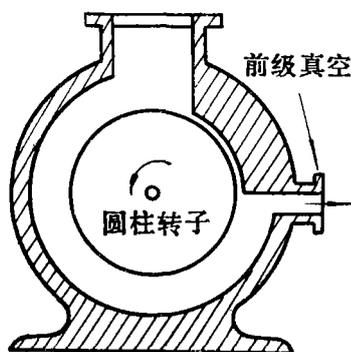


图1 盖德分子泵

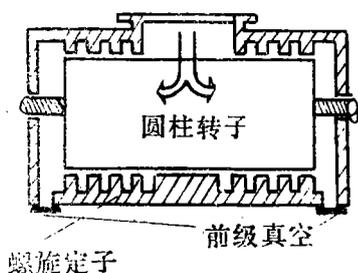


图2 霍尔维克分子泵

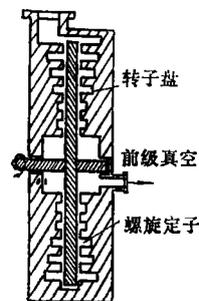


图3 济克邦分子泵

十年以后，在实验中贝克尔发现：在分子流范围内，油扩散泵的旋转障板对空气有一个明显的压强比。因而，他有可能在不久以后的1958年设计了第一台商品的轴流式涡轮分子泵(TVP500型，普佛(Pfeiffer)公司)^[5~7]。这种泵有一个转子和一个定子，都用单个圆盘做成。所有的圆盘都开有斜槽，研磨如镜的定子圆盘间插在转子圆盘中。定子和转子按光密性排列。采用多级串联，可简化到1毫米间隙。因为总压缩比是各级压缩比的乘积，如果将每级对空气的压缩比调为2，将足以达到极高的压缩比。多斜槽的并联能获得很高抽速。

60年代初，一种航空型立式涡轮分子泵由法国飞机发动机结构公司和法国原子能协会

制成（直径 70 厘米，吸气口抽速 8000 升/秒）〔8〕。在此基础上，西德雷暴-海拉斯（Leybold-Heraeus）公司〔9~11〕和美国沙尔金特-威尔斯（Sargent-Welch）公司〔12〕研制成功了涡轮分子泵的新系列。

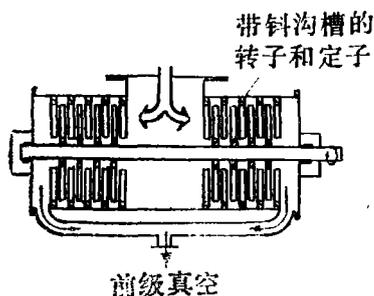


图4 贝克尔涡轮分子泵

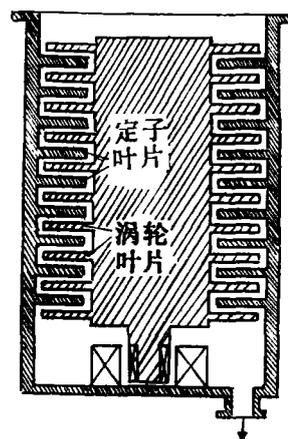


图5 法国飞机发动机结构公司的涡轮分子泵

立式泵部件与航空涡轮泵相似，气体由上部沿轴向到达底部。定子和转子叶片排列不再是光密性（即开式结构）。

二、理论

涡轮分子泵和轴流式压缩机的机理已由许多论文所建立〔5, 13~22〕，与测量结果十分符合。涡轮分子泵的基本特性既可以从经典的流体理论推出，也可以利用气体动力学和蒙特卡罗方法进行计算。蒙特卡罗方法可以得到更加有用的结果，只要进行一系列的简化以保证计算时间的允许。

要作出哪些假设呢？

a) 在分子流范围以内，即分子的平均自由程必须大于泵的几何尺寸。

在高真空范围内，这个要求总能满足。

b) 在泵的出口和入口，气体分子遵循麦克斯韦-玻尔兹曼速度分布律。这就意味着抽气时泵产生了一个“微小的扰动”。泵内气体分子不一定再遵循麦克斯韦-玻尔兹曼分布。其分布是与泵的结构有关的复杂函数，其目的在于获得分布速度的一个理想的方向。而在多级泵的情况下，计算中欲要考虑这些因素会大大延长计算时间。

c) 气体分子的再发射方向与入射方向无关，入射分子的切向动量全部损失在表面。这就是分子再发射的余弦定律。

d) 叶片、泵体、气体处于同一温度。假设适应系数为 1。

e) 假设叶片速度和分子热运动速度沿叶片方向是一个不变的圆周速度。然而，因为压缩比是叶片与气体分子的相对速度的指数函数，所以估计这时明显地有较大的误差。

f) 分别考虑间隙处的非致密性。

这个理论导出的如下结论已为实验所证实：

分子流范围的抽速几乎与气体种类无关并随气体分子量的增加而略有降低。

与此相反，对于某一气体，当泵的抽速为零时，压缩比（前级压强与入口压强之比）与

气体种类关系很大。下式成立：

$$K = K_0 \exp(Gu\sqrt{M/T})$$

其中： K_0 为常数； G 为几何因子（叶片角度等）； u 为叶片速度； M 为气体分子量； T 为温度。对于常规泵的压缩比为：氢， $K \approx 1000$ ，氮， $K \approx 10^8$ ；氩， $K \approx 10^9$ ；重的碳氢化合物， $K \gg 10^{10}$ 。

由于这个原因，涡轮分子泵的极限压强主要取决于泵入口处轻气体的分压强，尤其是粗抽端氢的分压强。这就实际上排除了它在正常工作情况下油蒸汽的返流。

三、性能和优点

涡轮分子泵实质上是一种不用冷阱或障板而获得低于 10^{-10} 毫巴极限压强的机械真空泵。

它的结构和性能可以用一组参数来表征，并作为选用特殊用途的泵的指标（几乎所有的参数值都可以改进，但以不牺牲其它性能为前提）。

3.1 抽速

从理论一节可知，涡轮分子泵获得的对所有气体或蒸汽的抽速相差在 20% 以内，也就是说，包括氢、惰性气体、碳氢化合物在内，只要处于分子流范围，压强都低于 10^{-3} 毫巴。在此范围内，固有抽速始终保持不变，与压强无关。然而，实际或有效抽速与泵内的解吸和前级泵的性能有关。这将使泵的工作压强总是高于 10^{-10} 毫巴。

在特殊情况下，没有辅助泵时，涡轮分子泵获得的压强低于 10^{-11} 毫巴^[22,23]。

目前，泵的生产厂家已能提供抽速为 100~3500 升/秒的分子泵，因而可以部分代替传统使用的扩散泵。

3.2 抽气效率

涡轮分子泵的抽气效率的定义是气体被泵抽出的速率与气体在入口处可能达到的最大速率之比（又叫做何氏系数 H_0 ）。实际上，抽气效率主要受泵的结构所影响，即能否对轻气体在低压缩比下达到较高的抽速，反之亦然。

抽气效率 η 为 0.12~0.45，与泵的结构有关。和带障板的同尺寸的扩散泵的值同一数量级。

3.3 压缩比

在实际应用中，需要知道涡轮分子泵对氢、氮、水的压缩比。这对所能获得的极限真空度有所影响，当然还与所用的粗抽系统有关。常用增加泵的级数的方法来得到高压压缩比，不利之处在于造价增加并影响抽气效率。在很多情况下，合适的压缩比是以保证采用价廉的泵来获得超高真空。

另一方面，压缩比较高的泵的极限压强会有改进，或许能降低对前级泵的要求，例如，

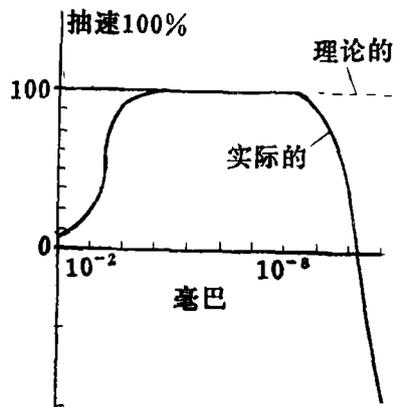


图6 典型的涡轮分子泵的抽速是系统压强的函数。在高压强范围内，抽速主要取决于前级泵，在极高真空范围内，泵的压缩比和内部解吸起决定作用。在某个压强下，泵的有效抽速为零或负值就意味着泵好像一个附加的出气源。

可以用单级代替双级前级泵。现在，市售的分子泵的压缩比为几百 $\sim 10^4$ ^(*)。对于油蒸汽和较重的碳氢化合物的压缩比是如此之高，只要泵正常工作，就不必担心轴承润滑油和前级泵的油蒸汽的返流。除非出现某种原因的停电、分子流区域内转速太低或停止转动等例外情况^[24]。

采用全无油的涡轮分子泵时，来自前级泵的污染不能避免，因为常用油封前级泵。

在前级管路上安装一个分子过滤器可以避免污染，但定期维修比较麻烦。即便如此，也总有污染。气浮轴承支撑的复合泵不需要前级泵就能获得高真空。泵停止运转时，大气也会进入系统，除非它是特别清洁的，否则系统的污染仍不可避免。

3.4 振动

因为涡轮分子泵是一种机械泵，所以必然有一定的振动。近年来，常规的滚珠轴承泵已有长足的进步，振动小的新型分子泵已经设计成功：即气浮或磁悬浮轴承的涡轮分子泵。用普通气体没有任何问题。其它类型的泵常会产生共振，例如在启动时，除非采用某些特殊的测量措施。有时，这样的振动实际上干扰了泵的运转。蒸镀设备中，当坩埚通过共振点时，待蒸发材料会被溅出。因此，建议采用灵敏的仪器先作泵组的频谱分析，以对可能发生的各种共振引起注意。有必要的话，采取相应的防护措施。如果前级用机械泵，也会发生共振，因为前级泵的振幅较大，共振往往发生在最危险的低频带。

无论泵在机房或在实验室运转，都可能会产生较大的噪音。

3.5 运转费用

除了要考虑涡轮分子泵的可观的造价而外，还要考虑它的运转费用。运转费用虽然低于扩散泵，但通常高于吸气离子泵。如果系统的其它器材不计算在的话，涡轮分子泵的运转费用主要是消耗于水、电、压缩空气。

稳态条件下，运转功率大约为联载泵组的20%。经验表明，水费与电费相等。

如供水困难，建议用致冷机。致冷剂在一个封闭系统内循环，沉积物、腐蚀、藻类生成物等可以避免。当然致冷机增加的功耗应包括在内。

四、研制现状

涡轮分子泵的研制现状大致分为两个方面：

改进现有的系统和增加抽速、压缩比，以及新系列的研制。

4.1 经典的涡轮分子泵

经典的涡轮分子泵具有普通的滚珠轴承，还需一个前级机械泵。泵为“开式”或“闭式”结构实质上并不重要。成本/效率只是涉及任务需求时才考虑。

它们在市场上销路较广，甚至超过了扩散泵。这就表明了技术上的成熟性，运转中不会发生什么问题。在某些情况下，只有电控系统可能受到干扰，例如供电线路的条件或环境影响很差的地方。

它们的最大优点是使用方便和可靠，能获得从大气到超高真空的清洁真空，简易到只用扭一下电钮。

小型涡轮分子泵组最适用于吸气离子泵抽气的大型设备的粗抽。实际上克服了起动的困

* 原文此处为 10^4 ，有误 一译注

难及其不稳定性。

在抽除惰性气体很困难或难以完全抽除时。涡轮分子泵常与低温泵或钛蒸发泵联合使用，目前市场上已有三种新研制的产品。普佛公司的额定抽速为 100 升/秒，对氢的压缩比为 500 的小型泵；沙尔金特-威尔斯公司的抽速为 1000 升/秒的泵；雷暴-海拉斯公司的额定抽速为 3500 升/秒，对氢的压缩比为 10^4 的大型泵。其它如埃柯-特梅卡尔 (Airco-Temes-cal) 和大坂真空 (Osaka Shintn) 等厂家生产的泵因为欧洲很少采用，这里就不提及了。

4.2 新的系列

根据专家的印象，不久前在市场上出售的新产品还有：

1974 年，阿尔卡泰 (Alcatel) 公司已经把一种新式的带气浮轴承的能直接排大气的 450 升/秒的复合式分子泵公诸于众^[25]。同时还把一个用空气驱动的 120 升/秒的泵列入销售产品。近来还有一种磁悬浮轴承的 450 升/秒的无油分子泵已由雷暴-海拉斯公司投放市场^[26]。

4.2.1 磁悬浮轴承涡轮分子泵

这种泵的详细介绍将在本次会议上提出报告，这里只说明它的主要特性。

它是一种开式结构的涡轮分子泵，对氢的压缩比为 50000 时，额定抽速为 530 升/秒。有 39 个频率为 500 赫（即 3 万转/分）的转子。转子为由电磁铁组成的 5 个活动磁悬浮轴承支撑着，并用适当的电控系统通过传感器控制，以监测转子和定子之间的距离和位置。电磁轴承系统中还有两套备用操作系统，以防止转子和轴杆卡住。

一个显著的特点是运转稳定，按照使用者的要求，最大位移为 0.03 毫米/秒，这对分子泵来说是适宜的。另一优点是不需要冷却水。

虽然涡轮分子泵是全无油的，但只要与油封式前级泵长期同时工作，即便前级管路上装有有效的过滤器，绝对无油也是不可能的。

4.2.2 气浮轴承复合式分子泵

阿尔卡泰公司的涡轮分子泵是一种复合泵，由开式结构的涡轮分子泵作为第一级，多槽式分子牵引泵（霍尔维克）作为第二级。转子装在两个气浮轴承支撑的主轴上。轴密封是多槽抽气式的“动密封”^[27]，用这种复式结构将抽出的气体排向大气。低于分子流范围（ 10^{-3} 毫巴），可以不需要前级泵。如果不用油封式机械泵粗抽，用于轴承的空气是无油的话，碳氢化合物的问题完全可以消除。

吸气离子泵系统中可以用粗抽吸附泵来代替机械前级泵（旁路工作）。用这个方法来解决前级泵的油污效果明显。如果需要超清洁条件，我们就不再推荐其它的串联或并联常规的油封式机械泵的方案。

另一方面，若工作压强始终高于 10^{-3} 毫巴，使用如此昂贵的超高真空泵是一种浪费，其次，少量空气进入前级连结管路系统都会卡住旋转泵的轴承。

因此，抽空管道中应当用盲法兰，最好是焊牢。

这类泵的另一特点是可以装于任何位置，甚至是倒装，即这时在入口处无须放一个筛网来防止碎片落入。因为没有前级泵的振动，所以它的振动极小。

450 升/秒的分子泵用气冷，400 赫的电机驱动（24000 转/分）。气浮轴承用水冷却。泵对氢的压缩比为 10^8 。于是理论的极限压强可低于 10^{-10} 毫巴。在 10^{-10} 毫巴的压强下，可以把氢、氦抽出，而抽速没有任何损失（标准大气压下，氢分压为 5×10^{-4} 毫巴，氦分压为

5×10^{-3} 毫巴)。

120 升/秒与 450 升/秒的涡轮分子泵的结构和特性相类似, 采用了一个全新的驱动系统: 用供给气轴的压缩空气来驱动此泵。转子的下部有一个小涡轮, 使泵达到 60000 转/分的转速。轴承不再需要冷却水。因而与供电和电控有关的许多问题不复存在。由于没有与电气有关的问题, 此泵可以用于强辐射的场合。

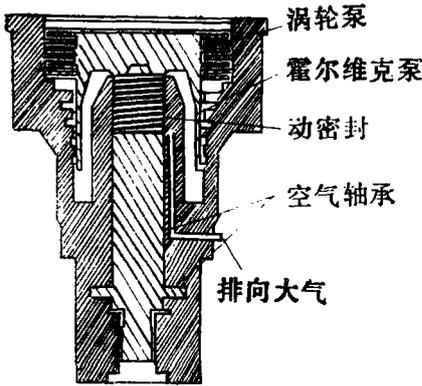


图 7 气浮轴承复合式涡轮分子泵

五、未来的展望

我们认为, 今后涡轮分子泵的发展仍在两个方面: 继续改进“常规”的分子泵以及研制特殊需要的, 要求更加严格的专用泵。

5.1 常规系的改进

由于泵的理论已很成熟, 可以研制一种高效率、低成本的泵。加工工艺的改进也是必然的, 因为目前还有很多手工操作。我们深信: 高抽速、压缩比合适、工作压强低于 10^{-8} 毫巴的价格合理的有竞争能力的涡轮分子泵必然有可能取代扩散泵而占领市场。

带有前级泵的复合式分子泵无疑会在不久的将来研制成功。

5.2 可能的专用泵

我们已很熟悉的新系列泵仍需改进。特别要求磁悬浮轴承分子泵配置无油前级泵, 以保证运转过程中没有碳氢化合物的污染。

估计涡轮分子泵在磁场中的应用将取得进展, 以适应受控热核技术的需要(泵全部由非金属材料制成), 或对现有泵种采取磁屏蔽的措施。

5.2.1 涡轮-低温泵

在其它涉及到低温应用的研究中, 有些设计师建议研究冷涡轮分子泵, 即涡轮-低温泵^[28]。涡轮-低温泵与涡轮分子泵是不相同的, 它的结构应当适于超低温的条件。还要研究包括常规轴承在内的各种轴承。

首先考虑的是液氮冷却(78K), 液氮各处都有, 而且价格便宜。虽然涡轮-低温泵可以与致冷机配用, 但这不是它的主要优点。

此泵的理论早已建立, 所以我们只满足于介绍一个简单的模型。如果接于一个热设备(293K)上, 入口法兰的通导实际上是不变的, 这就表明在第一级叶片上气体分子的“来源”保持不变。由于适应系数较高(氮达到 1), 气体分子一次碰撞以后在泵内升温, 即被抽气体的密度增加到 $\sqrt{293/78}$ (热流逸效应)。另一方面, 我们发现已知的几何抽速与叶片对气体分子的相对速度成正比。因为热运动速度也与 \sqrt{T} 成正比, 所以泵的抽速增加。泵的总抽速增加二倍多, 而泵的尺寸不变, 或许为减少对机械的要求, 抽速保持不变而降低叶片的转速。

然而, 主要的优点在于提高了对氢和其它轻气体的压缩比, 因为相对压缩比与温度呈指数关系。尺寸为已知的几种泵在室温和液氮温度下对氢的压缩比的变化如下表所示。这类泵的最佳结构尚未进行考虑。

C _氢 (293K)	C _氢 (78K)
100	7500
500	170000
1000	650000
10000	5.7×10 ⁷

这些数字说明了一种新的可能性。

考虑到解吸率与温度呈指数关系，冷态的涡轮-低温泵的内部解吸是如此之低，以至加以烘烤几乎就清除了。虽然用油润滑轴承和油封式前级泵（室温），估计油蒸汽不会有多大问题，即使不能完全解决，但液氮温度下的油分压是很低的。与吸附泵并用自然合适。

六、结 论

现有的技术和理论已能制造并向市场提供高度可靠性和高效率的泵。除了能满足多方面需要的标准泵型而外，还能提供特殊要求的产品。尽管如此，涡轮分子泵的发展远未结束。满足各项特殊的应用，展望未来是乐观的。

参 考 文 献

- [1] W. Gaede, Annalen der Physik 41 (1913) 337/289
- [2] F. Holweck, C. R. Acad. Science Paris 117 (1923) 43
- [3] M. Siegbahn, Arch of Maths. Astrona. Phys. 30B Nr2/1944
- [4] J. Henning, Nederlands Tijds. V. Vacuumtech. 9 (1971) 1
- [5] W. Becker, Vakuumtech. 15 (1966) 211, 254
- [6] W. Becker, Vakuumtech. 7 (1958) 149
- [7] W. Becker, Proc. 1 Int. Cong. Vac. Techn. Namura. (1960) 173
- [8] L. Rubet, Le Vide 123 (1966) 227
- [9] K. H. Mirgel, J. Vac. Sci. Techn. 9 (1972) 408
- [10] R. Frank, J. Techn. Vide Transact. Suppl. Le Vide 157 (1972) 257
- [11] W. Bachler et al, Japan J. Appl. Phys. Suppl. 2 (1974) 13
- [12] G. E. Osterstron et al, J. Vac. Sci. Techn. 9 (1972) 405
- [13] Ch. H. Kruger et al, 7 Nat. Symp. Vac. Techn. Transact. (1960) 6
- [14] Ch. H. Kruger et al, "Rare-field Gas Dynamics" (1961) 117
- [15] M. H. Hablanian, Adv. Vac. Sci. Techn. 1 (1960) 168
- [16] L. Maurice et al, Le Vide 111 (1964) 109
- [17] H. Garnier, Entropie 8 (1966) 65
- [18] U. Zelbstein et al, Ing. Techn. 215 (1967) 87
- [19] L. Rubet et al Colloque Int. Sur. Ultravide, Paris (1967) 104
- [20] O. Taniguchi et al, Trans. of the Japan Soc. of Mech. Engr. 34 (1968) 708
- [21] Shusoke Iide et al, Japan J. Appl. Phys. Suppl. 2 Pt 1 (1974)
- [22] P. Flecher, Vakuumtechnik 18 (1969)
- [23] P. Flecher, DB Patent 1567928
- [24] W. Nesseldeher, Vakuumtechnik 23 (1974) 163; Le Vide 142 (1976) 74; Vacuum 26 (1976) 281
- [25] L. Maurice, Japan J. Appl. Phys. Suppl. 2 (1974) 21
- [26] R. Frank et al, Vakuumtechnik 25 (1976) 48
- [27] L. Maurice, Japan J. Appl. Phys. Suppl. 2 (1974) 17
- [28] P. Flecher, to be Published in Vakuumtechnik

(周世敦译自 Proc. 7th Int. Vac. Cong. and 3rd Int. Cong. on Solid Surfaces (1977) 25 赵乃石, 杜维东 陈隆智校)