

# 金属油扩散泵的研究制造\*

金建中 崔遂先  
(中国科学院)

## 1. 油扩散泵与水银扩散泵的比较

水银扩散泵是1915年发明的,但自1928年发现可以用油作为工作液体代替水银后,水银扩散泵不太被人们重视,油扩散泵便发展很快. 1938年已经出现了金属三级分馏油扩散泵<sup>[1]</sup>. 油扩散泵发展后,在大部分实验室研究工作和工业上的用途上它代替了水银扩散泵. 这是因为油的蒸气压比水银小的多. 室温下扩散泵油蒸气压在 $10^{-5}$ — $10^{-9}$ 毫米水银柱范围<sup>[3-5]</sup>内,而水银蒸气压大约为 $10^{-3}$ 毫米水银柱. 因此使用水银扩散泵时,必须使用冷阱(液体空气或干冰),而使用油扩散泵时只用冷水甚至空气冷却就可以了. 更重要的是水银蒸气有毒性,因而在使用水银泵的实验中,如何避免水银蒸气散在室内空气是很难的问题;尤其当玻璃的水银扩散泵发生炸破事故时,大量的热水银蒸气散发出来,对人更是危险. 此外,水银对各种有色金属具有腐蚀性,也是它的严重缺点. 但是油也有它的缺点,它很怕氧化,它的前级耐压低(0.2毫米以下),在高电压的真空设备上,油的蒸气附在电极上会使耐压下降等等. 因此,在油扩散泵发展以后,水银扩散泵在某些实验室用途上仍有它的特殊作用,不过大部分高真空工作中都用油泵.

## 2. 金属油扩散泵的优点

金属油扩散泵最大的优点:它坚固不易碰坏;其次是大型的扩散泵必须做金属的. 现在一般大的玻璃油扩散泵速度只有100—200升/秒;而大的金属油扩散泵可以达到20000—40000升/秒. 因此一切大型的真空设备都用金属的油扩散泵. 由于大型玻璃活门难制,使玻璃油扩散泵更没有向大型方向发展的可能. 另外,因为金属加工容易比玻璃精确,金属的扩散泵易于制造,这也是它的优点.

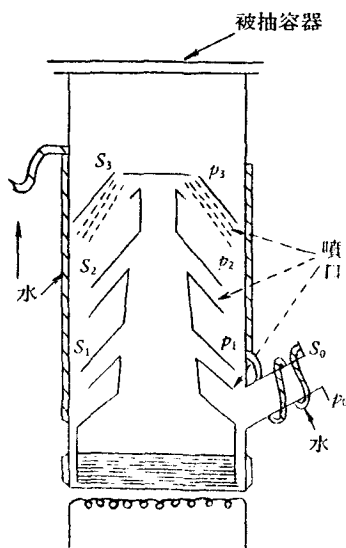


图 1

## 3. 扩散泵的简单工作原理

当用机械泵把扩散泵和被抽容器中的空气抽到很稀薄时(气压在100微米以下),我们把油扩散泵的油用电炉加热到 $200^{\circ}\text{C}$ 左右时(各种油不同),油的蒸气压上升到0.5—1毫米,蒸气便由各级喷嘴喷出. 喷出方向是向下向外,打在水冷却的壁上便凝结流下,流回锅炉. 不停地加热,油蒸气便不停地喷出来,喷出的蒸气分子流的速度大约是每秒200米以上<sup>[13]</sup>. 原有的空气分子遇到蒸气喷流使被打下来,于是渐渐上面的气压便比下面的气压

\* 1960年1月17日收到.

小,上面便形成了高真空。这便是最粗浅的扩散泵工作原理。

#### 4. 多級扩散泵的工作原理

要想得到大的抽气速度,噴口旁的抽气咽喉一定要寬。但是这时蒸气到达冷却壁时,蒸气分子的浓度小,不能耐高的前級压力,因而可以在它的前面再放第二級,第三級。每一級的抽气咽喉比上面一級狹窄一些,抽气速度小一些,但能够抵抗較大的前級压力,如图 1。最高真空的噴口抽气速度为  $S_3$ , 下面一級为  $S_2$ , 再下为  $S_1$ , 当我们放气进入被抽容器时,平衡气压最高真空为  $p_3$ , 下面为  $p_2$ , 再下面为  $p_1$ , 到机械泵时为  $p_0$ 。根据气体定律 ( $pV = \text{常数}$ ):

$$S_3 p_3 = S_2 p_2 = S_1 p_1 = S_0 p_0.$$

如果假定每一級的噴流的气体压缩比如相同, 即  $\gamma$

$$\frac{p_2}{p_3} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{p_0}{p_1} = \gamma,$$

則

$$\frac{S_3}{S_0} = \frac{p_0}{p_3} = \frac{p_0}{p_1} \times \frac{p_1}{p_2} \times \frac{p_2}{p_3} = \gamma^3,$$

$$\therefore \gamma = \sqrt[3]{\frac{S_3}{S_0}}.$$

在我們的情况下,扩散泵抽气速度  $S_3$  約为机械泵的速度  $S_0$  的 1000 倍, 因此  $\gamma$  为 10, 即每級大約把空气压缩 10 倍, 而每級的抽气速度依次下降 10 倍。实际情况  $\frac{S_3}{S_2} \doteq 5$ ,  $\frac{S_2}{S_1} \doteq 10$ ,  $\frac{S_1}{S_0} \doteq 20$ , 这是因为高真空一級的蒸气比較不足(因为它膨胀的多), 而高压一級的蒸气插入各級咽喉面积的計算最多的緣故。

#### 5. 抽气速度 $S$ 与扩散泵内径 $D$ 的关系 ( $S = 3D^2$ )

根据分子运动論的原理,在高真空中,一个理想的抽气口(即凡是打进到抽气口的空气分子完全被抽去,絕不再返回来)的抽空气速度为 11.7 升/秒,实际因为有咽喉下面一段器壁的反射和蒸气流的不完全吸收(反射一部分),因而打入咽喉的空气分子总会有一部分回来。如咽喉面积为  $A$  (厘米<sup>2</sup>),則抽气速度为

$$S = 11.7A \times H \text{ 升/秒.}$$

$H$  称为何氏系数(我国科学家何增祿同志首次提出),即打入抽气咽喉而被抽去的空气分子的系数。抽气咽喉面积  $A$  为

$$A = \frac{1}{4} \pi (D_1^2 - D_2^2).$$

$D_1$  为原体内径,  $D_2$  为噴口傘的外径。  $D_2$  假定为  $\frac{1}{2} D_1$ , 則

$$A = \frac{3}{16} \pi D_1^2.$$

假定  $H$  为 0.4, 則

$$S = 11.7 \times (3/16) \pi D^2 \times 0.4 = 2.75 D^2 \text{ 升/秒 (} D \text{ 单位厘米)}^{[2]}.$$

实际情况我們可以看看苏、英、美三个国家的商品油扩散泵的性能。

## 苏 联

型 号	H-1C	H-5C	H-2T	H-5T	H-8T
D(厘米)	8.6	16	26	38	50
$3D^2$	220	770	2030	4320	7500
S	100	500	2000	5000	8000

## 英国 (Edward 公司)

型 号	403	603	903	1605	2404
D(厘米)	10.15	15.2	22.8	40.7	61.0
$3D^2$	310	700	1560	4950	11200
S	300	650	150	6000	12000

## 美国 (Distillation Product 公司)

型 号	MC 275	MC 500	MCF 700	MCF 1400	MCF 5000
D	9.8	15.2	15.2	25.4	40.7
$3D^2$	280	700	700	1940	4950
S	275	500	700	1600	5000

可見在  $D = 10$  厘米到 30 厘米很寬的范围内,  $S = 3D^2$  是很符合的.  $D < 10$  厘米时,  $S < 3D^2$ ;  $D > 30$  厘米时,  $S > 3D^2$ .  $S = 3D^2$  公式是很容易記住的, 它很有用处.

这也就是說, 对于大多数的油扩散泵何氏系数稍大于 0.4.

我們做的三种油扩散泵也是与  $S = 3D^2$  相符合的:

D(厘米)	10	22	40 <sup>1)</sup>
$3D^2$	300	1450	4800
S	300	1600	4500

因此我們认为我們做的这三种扩散泵的抽气速率已經达到很高的水平.

## 6. 如何获得大的抽气速度

为了获得大的抽气速度, 我們参考了 Dushman 书上关于 Alexander 与 Embree 的噴口設計和 Snyder<sup>[7]</sup> 等的具体图样而加以修改. 影响到抽气速度的因素有下列几个, 現分別討論:

(1) 要供应足够多的、压力足够大的油蒸气給噴口, 根据 Riddiford<sup>[8]</sup> 写的公式(見图 2):

$$\left(\frac{\pi R T}{2m}\right)^{\frac{1}{2}} r_1^2 (p_0 - p) = \frac{\pi r_1^4}{8\eta L} (p^2 - p_1^2) = 1.38\pi \left(\frac{KT}{m}\right)^{\frac{1}{2}} r_1 l p_1.$$

第一項指鍋炉油面的蒸发速度, 第二項指油蒸气通过管道(半径  $r_1$ 、长  $L$ )的速度, 第三項等于噴出噴口(寬  $l$ 、半径  $r_1$ )的速度. 从此公式我們可以看出, 首先要增大  $p_1$  使  $r_1$  很大, 使得  $(p^2 - p_1^2)$  很小, 即  $p$  接近  $p_1$  (即管道上的气压降很小). 为了使  $p_1$  (即  $p$ ) 接近

$p_0$ , 这样就可以使油的温度不必太大时, 我们就要使蒸发面积  $\gg$  喷口面积。我们根据许多文献上的实际例子可以知道: 锅炉面积至少要为喷口面积的五倍, 实际上各级锅炉面积为喷口面积的 5 倍至 20 倍, 自然, 要有足够蒸气, 还要提高温度  $T$ , 只要调节锅炉功率就可以了。

(2) 喷口的大小形状和喷流的方向: Alexander 主张尽量向下, 但它的原形状特别, 不易作。文献[7]的泵和 Embree 的原理相同, 但[7]的向后退的距离太大了, 使得咽喉的面积减少。实际是否一定要向后退也还难说, Riddiford 等的泵即没有向后退的设备。我们取了折衷的方案, 把[7]的尺寸向后退的距离减小, 因而可以增大咽喉的面积。Riddiford 的直径  $D_2 = 40$  厘米的泵, 喷口伞直径最好大约是 13 厘米, 即  $1/3 D_2$ , 我们的尺寸是:  $D_2 = 22$  厘米,  $D_1 = 7.2$  厘米, 实际在最佳尺寸的附近改变所得不会太多, 可以由 Riddiford 文章的曲线上看出来。

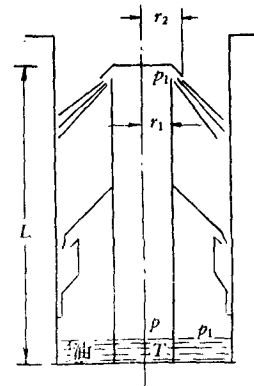
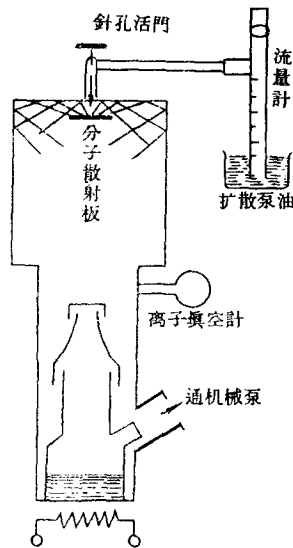


图 2

### 7. 如何测量抽气速度

在 1948 年以前的文献上, 对于抽气速度的测量方法是不很注意的, 因而各人的测量结果很难相互比较, 1948 年, Duyton<sup>[9]</sup> 发展他们的测量方法, 我们大致是依照他的方法进行测量的。

如图 3, 空气由流量计(用滴管改制的)经过针孔活门流入真空系统。如果任它自由



3

流入, 它就会形成一分子射线束。有时射线束直接打入泵的咽喉, 那时测得的抽气速度便显得特别大; 反之, 如果射入真空计的导管, 气压就显得特别大, 抽速就显得特小, 可以相差到好几倍。精确的方法是在流入空气的出口按一分子散射板, 使分子束先向上面散射, 到“天花板”上面再散射一次, 分子便完全杂乱无章, 好象电灯的光线先照在天花板上散射下来便非常均匀一样。这样测的结果, 便会代表扩散泵抽杂乱的高真空分子一样, 也可以和别人的工作相互比较。离子真空计连接管口要向水平方向开口, 既不向上也不向下。开口的地方如果距离泵的咽喉有一段导管距离 ( $L$ ), 我们还要计算此段的真空阻抗, 即用

$$S_1 = \frac{12.1D^3}{L}$$

$D$  为直径(厘米);  $L$  为导管长(厘米);  $1/S_1$  即此段导管的阻抗。我们测得的应是  $S$ :

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S_0} + \frac{1}{S_1} \quad \text{或} \quad S = \frac{S_0 S_1}{S_0 + S_1}$$

而泵的抽气速度应该是  $S_0$ 。

### 8. 我们测量抽气速度的结果

第一次我们在北京测得 10 厘米泵的速度为 300 升/秒, 第一次我们在北京测得 22 厘

米泵的速度为 1500 升/秒, 这一次我們測得的 22 厘米泵的速度为 1800 升/秒, 在各种气压下的实验数据如图 4.

可以看出, 抽气速特性曲线很不好, 这是由于(1)扩散泵油比较差, 极限真空祇能够到  $2 \times 10^{-5}$ ; (2)机械泵的速度小 (1.1 升/秒), 只有扩散泵的 1/1600. 因此, 测量的范围很窄, 测量用的公式是由  $pV = \text{常数}$  来的:

$$p_0 v_0 = p_1 v_1,$$

$$S = \frac{v_1}{t} = \frac{p_0 v_0}{p_1 t} \text{ 升/秒},$$

式中  $p_0$  为大气压力, 在兰州为 630 毫米汞柱;  $v_0$  为流量计体积 (升);  $p_1$  为离子真空计读数 (毫米汞柱);  $t$  为时间 (秒). 按原意,  $p_1$  应该是放进去的气体在真空中造成的部分气压, 与原有的极限真空气压  $p_0$  无关. 因此应该用  $p_1 = p - p_0$  代入上式. 这样做的结果, 在功率为 1700 瓦时,  $S_0 = 1300$  升/秒; 在 2000 瓦时,  $S_0 = 1800$  升/秒.

习惯上许多文献是用  $p$  代入分母中的  $p_1$ , 那样它在极限真空  $p_0$  时的  $S_0 = 0$ , 然后渐渐上升到  $10 p_0$  时,  $S_0$  也差不多上升到最大的速度.

到气压为  $1.2 \sim 1.4 \times 10^{-1}$  时, 由于机械泵的速度小, 前级气压根据计算已到 0.2 毫米, 因此气压就不稳定, 表现已到前级耐压的极限.

今后试验扩散泵的动态特性时, 应该有较大的机械泵 (每秒 5 升) 和较好的扩散泵油 (能达  $5 \times 10^{-7}$  毫米的), 过去我们测量便可以得到比较现在宽两个数量级的曲线.

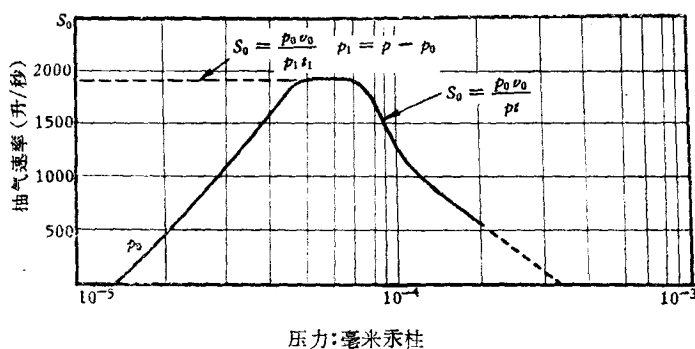


图 4

### 9. 扩散泵油的蒸气压

油的蒸气压  $P$  与分子大小及绝对温度  $T$  有关, 一般地说, 分子愈大, 蒸气压愈小, 温度愈低, 蒸气压愈小. 对于单一物质油蒸气压遵守下列公式:

$$\log P = A - \frac{B}{T} \quad (\text{Dushman 254 页, (公式 3)}).$$

因此, 可以在比较高的温度下测量它的压力<sup>[5]</sup>或测量它的蒸发速度<sup>[10]</sup>, 然后在实验数据的  $\log P$  对  $\frac{B}{T}$  的图表上向低温外延到室温, 测室温时的蒸气压, 在 Dushman 书第 255 页及文献[4], [5]上面都可以看见这样的图. 实际在室温下的油扩散泵的极限真空气压是决定于油蒸气压力的.

### 10. 怎样测量极限真空及其油蒸气压力

在1947年 Blears 发现用普通离子真空计测量极限真空会有很大的错误。这是因为在离子真空计中，油蒸气被电子及热的钨丝所分解，而形成的产物所给的离子流小得多。因此要测量真空系统内的极限真空，要使用他的所谓快速离子计，即把真空计的外面玻璃罩切开，只把电极直接放在真空系统内，这样测的结果，不但出气达到平衡很快，而且测的数值能够精确地代表系统内的气体及蒸气所给的离子流。这样由离子真空计电表上读的气压叫做等效空气压，即如果空气是这压力的话，它就会给这样多的离子流。

但是主要的成分在这时是油蒸气，Dushman 书第355—358页即提到对离子真空计油蒸气特别灵敏，在文献[6]上又特别详细地测量了这差别，一般是差十几倍。因此我们过去用 Д1-А 油获得的  $4 \times 10^{-7}$  毫米是等效空气压<sup>1)</sup>，其中油蒸气部分压力显然是在  $10^{-8}$  数量级内 ( $3 \times 10^{-8}$ )。

在文献内要分清极限真空是上述哪一种气压很不容易。大致苏联、英国是用等效空气(或氮)压；西德、美国是用气体真正的压力。

### 11. 怎样提高金属油扩散泵能够达到的真空度

油扩散泵抽到极限真空时所剩余的气体包括可能下列各项：(1) 反扩散的空气分子；(2) 漏气；(3) 出气、虚漏；(4) 橡皮圈出气及透过性；(5) 油的分解物(包括蒸气及气体)；(6) 油的蒸气；(7) 油的溶解物(蒸气、气体)等项。

为了提高真空，要采取下列措施：(1) 使用好的油(即蒸气压低和不易被热分解)，不分解的以 DC-703 为最好；蒸气压低的有苏联 Д1-А [ $4.5 \times 10^{-9}$  (真压力)] 和 Octoil-S 及 Apiezon C 等，我国上海化学原料公司做的样品，我们测得  $5 \times 10^{-7}$  (等效压)，兰州石油分所做的样品最好的到  $1.4 \times 10^{-6}$  (等效压)。

(2) 加强分馏作用，我们的三级分馏扩散泵，除有分馏筒以外，还加上分馏圈，通过油的孔都形成  $180^\circ$  距离，使油尽量走长的距离，以加强分馏。另外还采用了 Latham 建议的油膜分馏的方法，以加强分馏及除气作用。

(3) 为了消灭橡皮出气透过的作用，我们最近做了金属刀口的泵，在文献[12]，从图上看与我们差不多，他们达到了  $1 \times 10^{-7}$  毫米，因此今后这是肯定努力的方向。1959年12月，我们的扩散泵经过改良也达到了  $1 \times 10^{-7}$  毫米汞柱。

(4) 为了消灭焊口漏气及铸件的虚漏，我们在最近的泵内都避免了。

(5) 为了减少油的吸收气体作用及加强油内杂质(汽油等)的排出，我们采用了另一油扩散泵为前级。同时可以避免可能机械泵油反扩散的作用。

(6) 根据经验，泵体及喷口所用的材料以铁、紫铜(镀镍)、铝三种可用，黄铜不可用；因为在高温下，锌会蒸发出来，引起油的分解作用。理论上，玻璃及搪瓷或真空蒸镀的表面可能有利，有待大家研究实验。

(7) 降低锅炉底的温度：因为油的温度在锅炉表面上是最高的，因此分解可能主要在这地方，减低温度方法有三个：(A) 减少喷口的面积，并且加防散热套以减少负担；(B) 增加加热对流的效应(把锅炉底板车出斜度)，减少面部油的过热；(C) 炉底分为两部，分别调节加热的功率。

(8) 长时间的抽气：长时间的抽气，可以减少出气、虚漏，油的出气的气体蒸气等。游

离真空计也要长时间工作。

(9) 利用冷却技术:每降  $20^{\circ}\text{C}$ , 油蒸气压即下降 10 倍, 因此从室温降至  $-40^{\circ}\text{C}$  有很大意义。关于不必要的液体空气或干冰等物, 这方面文献上还没有看到很多的工作。

## 12. 結束語

油扩散泵对于一般高真空技术的应用, 即  $10^{-5}$ — $10^{-6}$  毫米的极限真空是很容易达到的, 我们可以完全采用国产的材料来达到。在速度方面, 一般在  $S = 3D^2$  左右也是能够达到的。只要进行适当的設計及严格的試驗就可以了。要作更大的泵看来也没有太大的困难。

对于超高真空方面 ( $10^{-8}$ — $10^{-9}$  毫米) 仍然很有希望。从最近的文献来看, 研究工作主要是在提高高真空度方面。

油扩散泵虽有优点, 但是有前述的缺点, 别种泵例如金属水银扩散泵, 鈹蒸气离子泵等也有它的发展前途, 因此, 在发展真空技术方面, 应考虑各种类型的真空泵, 不要只注意一种真空泵。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Dushman, Vacuum Technique, p. 226—241.
- [ 2 ] Грошковский, Технология высокого вакуума, стр. 129, 他們的公式是  $S = 2.8 D^2$ ,  $H = 0.33$ .
- [ 3 ] 同上, стр. 158.
- [ 4 ] Latham, Vacuum, 1 (1951), 97; 2 (1952), 33.
- [ 5 ] Reich, Z., *angw. Phys.* 9 (1957) 23.
- [ 6 ] Dushman, Vacuum Technique, 208—214, p. 245—246.
- [ 7 ] Snyder and Liqkin, Miscellaneous Physical and Chemical Techniques of the Los Alamos Project, pp. 252—255.
- [ 8 ] Riddiford and Coe, *J. Sci. Instr.* 31 (1948), 33.
- [ 9 ] Dayton Industrial and Engineering Chemistry, 40 (1948), 759.
- [ 10 ] Манов, *П. Т. Э.* (1957), 5, 91.
- [ 11 ] Vleears, *Proc. Roy. Soc.* A188 (1947), 62.
- [ 12 ] Меньшиков, *П. Т. Э.*, № 4 (1959), стр. 10.
- [ 13 ] Барышова, ушаков, *П. Т. Э.*, 1959, стр. 94.