

# 低温泵的特性和原理

姜万顺

低温泵是一种利用温度极低的冷却表面( $\leq 77\text{K}$ )的冷凝作用,把气体从系统内部排除的真空泵。60年代以来,低温抽气在真空的获得和应用中有了越来越广泛的应用。

低温泵是一种清洁的真空泵。因为低温介质只是一种对泵的抽气表面起冷却作用并在封闭容器中存贮或循环的冷剂,因而不与真空空间发生任何接触。这一特点对于某些要求清洁无油的真空系统来说是至关重要的。低温泵对大多数气体都能获得极低的分压和极高的抽速。当低温泵在液氮介质下工作时,还具有很大的实际抽气能力和抽气的无选择性(氮除外)等优点。

## 一、抽气机理

1. 低温吸附 指低温表面上的吸附剂与碰其上的气体分子产生的一种吸附作用。一般说来,吸附剂与气体分子之间的相互作用力是相当强的。因此,在低温吸附情况下,气体平衡压强远比相同温度下低温冷凝时气体的饱和蒸汽压低得多。利用低温吸附原理制成的泵大致分为两种类型:一种是非金属吸气剂泵。通常以活性炭、分子筛作为吸附剂。最常用的是低温分子筛吸附泵、气氮致冷机低温吸附泵;另一种是金属吸气剂泵,最常用的是钛升华泵。后一种不属于我们要考虑的低温泵之列。

2. 低温冷凝 这系利用低温介质(液氮、液氢、气氮、液氦等)将固体表面冷却到极低温,使沸点高于固体表面温度的气体冷凝,从而产生很大的抽气作用。其平衡压强大体上由这个温度下冷凝气体的饱和蒸汽压给出。例如,为了在高真空条件下抽除氮气(或空气),必须使用温度低于 $25\text{K}$ 的抽气表面;若抽除氢气,必须使用温度为 $4\text{K}$ 或更低的抽气表面。图1是近年出现的可在超高真空或极高真空条件下连续抽除氢气的贮槽式液氮冷凝泵<sup>[1]</sup>。低温抽气表面的温度可达 $2\text{K}$ 。

3. 低温捕集 这个现象的特征与上述不同,其抽气机理是图2所示的一种低温捕集作用。不可凝气体在可凝气体的冷凝过程中被埋葬和吸附。通常是以 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{N}_2$ 、

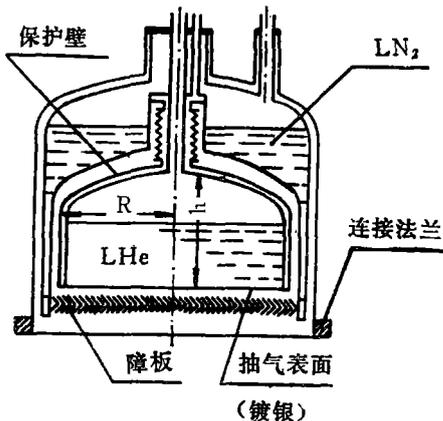


图1 贮槽式液氮冷凝泵

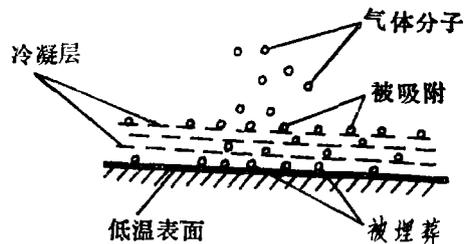


图2 低温捕集的机理

Ar、Ne 等气体首先成霜于低温表面形成吸附层，进而达到吸附其它气体的目的。实践证明，用低温泵抽各种混合气体时，系统的抽气效果往往比抽单一气体好。

## 二、低温泵的基本特征

1. 极限压强 低温抽气系统所能获得的极限压强通常取决于泵的表面温度下被冷凝气体的蒸汽压强。各种气体的蒸汽压与温度的关系如图 3 所示<sup>[2]</sup>。从图 3 可知：液氮(77K)温度下的低温泵能抽除二氧化碳和水；液氢或气氮(20K)温度下的低温泵能抽除氖、氦、氩以外的全部气体，极限压强可低于  $10^{-10}$ ；托液氮(4.2K)温度下的低温泵可抽出氦以外的所有气体。低温冷凝方法无法抽除氦这一限制对于低温吸附抽气方法来说是可以克服的。但其主要缺点是在给定容积的吸附剂上可以吸附的气体量较少。

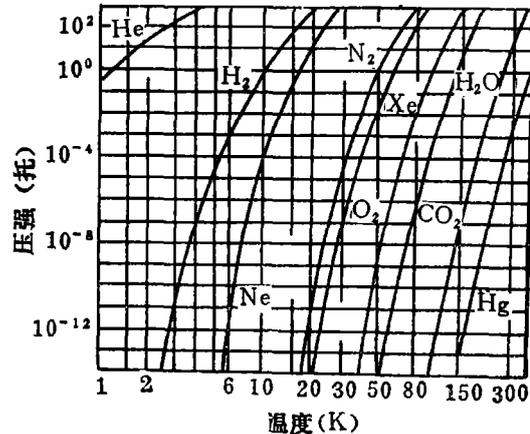


图 3 气体的蒸汽压与温度的关系

当泵壁温度与被测空间气体温度不同时，极限压强为：

$$P_s = P_s(T_s/T_c)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中， $P_s$  为被测空间的气体的极限压强； $P_s$  为气体在冷面温度下的饱和蒸汽压； $T_c$  为被测空间的气体温度； $T_s$  为冷面温度。显然，当  $T_s \approx 80\text{K}$ ， $T_c \approx 4\text{K}$  时， $P_s \approx 4.5P_s$ 。

2. 抽速 现在考虑分子流范围内，低温泵的抽速。当低温板的温度足够低时，碰到冷面的气体分子将全部冷凝(即被抽吸)。由气体分子运动论可知，冷凝面单位面积的理想抽速为：

$$S_{th} \approx 3.64(T_c/M)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

其中  $M$  为入射气体的分子量。几种气体的最大理想抽速如表 1 所示。

表 1 气体的最大理论抽速(升/秒·厘米<sup>2</sup>)

温度	气体	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> (或 CO)	Ne	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	空气
293K		11.0	11.8	13.9	44.1	14.7	9.4	11.6
78K		5.7	6.1	7.2	22.7	7.6	4.9	6.0

当  $P_s$  与  $P_s$  相比较不能忽略时，必须考虑气体在冷面上的蒸发。这时冷面上的实际抽速与最大理想抽速有区别。另外，气体分子在冷面上不可能全部被冷凝，总有一部份能量足够大的分子还会从冷面上返回被抽空间。把被冷凝的气体分子与碰在低温表面上的气体分子之比叫做冷凝系数  $\alpha$ 。考虑到这些实际因素以后，单位面积的抽速公式变为：

$$S \approx 3.64\alpha(T_c/M)^{\frac{1}{2}}(1 - P_s/P_s) \quad (3)$$

为了防止室温热辐射直接透射到极低温的冷凝面上，通常采用液氮人字形障板对 20K 或温度更低的冷凝面进行屏蔽，以减少功耗。然而使用障板会增大流阻，反过来又会降低冷面的抽速。因此，必须考虑障板的分子流导几率  $f$  对抽速的影响。障板的形状如图 4 所示，

$f$  与几何尺寸的关系如图 5 所示。这时, 低温泵的单位面积的实际抽速  $S'$  为

$$S' = Sf \quad (4)$$

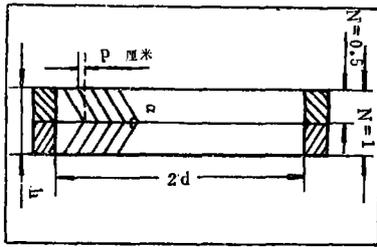


图 4 障板的几何形状

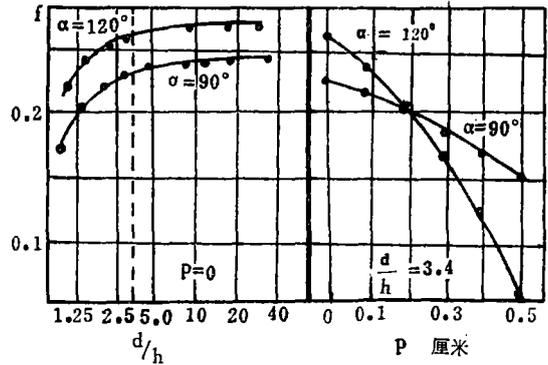


图 5 流导几率与几何尺寸的关系

### 3. 低温泵的热负载

a. 周围壁板的热负荷 多数情况下, 低温泵的冷面均由液氮障板屏蔽。这时, 冷面的辐射热  $Q_R$  为

$$Q_R = A_s \frac{\sigma(T_B^4 - T_s^4)}{\frac{1}{\epsilon_s} + \left(\frac{1}{\epsilon_B} - 1\right)} + A_B t \epsilon_s \sigma (T_w^4 - T_s^4) \quad (5)$$

其中  $Q_R$  为辐射热(瓦);  $A_s$  为冷面面积(厘米<sup>2</sup>);  $T_B$  为障板温度;  $T_w$  为容器壁温度;  $\epsilon_s$  为冷面辐射系数;  $\epsilon_B$  为障板辐射系数;  $t$  为障板的辐射传输几率;  $\sigma$  为黑体辐射常数( $5.7 \times 10^{-12}$  瓦/厘米<sup>2</sup>K<sup>4</sup>)。

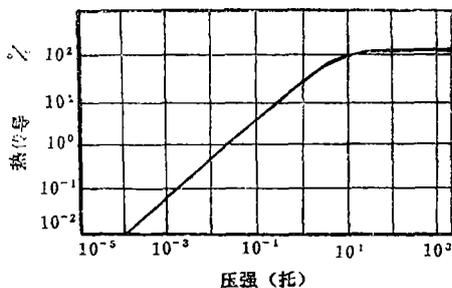


图 6 气体热传导与压强的关系

b. 气体的冷凝热负荷 指冷面上被冷凝的气体放出的热量, 由下式来计算<sup>[3]</sup>:

$$Q_c = q P_s S_s M / RT_s \quad (6)$$

其中  $Q_c$  为气体的冷凝热(卡);  $q$  为温度为  $T_s$  的每克气体降至  $T_s$  时放出的热量(卡/克);  $S_s$  为低温泵的有效抽速(升/秒);  $R$  为气体常数(62.36 托升/克分子·K)。

c. 气体的热传导 这部分热负荷主要与气体的压强有关。从图 6 可知: 当气体压强低于  $10^{-4}$  托时, 这项热负荷可以忽略不计。

d. 冷板支撑结构的热传导 须根据具体结构、材料及数目去计算。为了减少热传导, 要求支撑材料的导热系数小, 支撑板(杆)的横截面积尽可能小, 而长度尺寸尽可能大。这部分由支撑传走的热量为:

$$Q_d = \frac{k A_0 (T_1 - T_2)}{L} \quad (7)$$

其中  $Q_d$  为支撑传热(瓦);  $k$  为支撑材料的导热系数(瓦/厘米·度), 其值从表 2 中可以查出<sup>[4]</sup>;  $A_0$  为传导热量的截面积(厘米<sup>2</sup>);  $T_1, T_2$  为支撑板两端的温度( $T_1 > T_2$ );  $L$  为支撑板的长度(厘米)。

表 2 材料在低温下的导热率(瓦/厘米·度)

	4.2K	10K	20K	80K	150K	300K
铜 1	3.2	7.8	13.0	5.2	4.1	4.0
铜 2	70	135	87	5.2	4.1	4.0
银 1	140	150	52	4.2	4.0	4.0
钢	8.4	4.2	1.8	—	—	—
黄铜	0.021	0.058	0.106	0.41	—	~ 1
银焊料	—	—	0.12	0.34	0.52	—
焊锡	0.16	0.43	0.56	0.52	—	—
伍德合金	0.04	0.12	0.17	0.23	—	—
不锈钢	0.0024	0.0077	0.20	0.083	0.11	0.15
玻璃	0.001	0.0012	0.0015	0.0045	0.0076	0.01
聚四氟乙烯	0.0005	0.00095	0.0014	0.0023	—	—
尼龙	0.00012	0.00039	0.001	—	—	—

[注] 铜 1: 退火的 99.95% 的电解铜; 铜 2: 退火的 99.999% 的铜; 银 1: 退火的 99.9% 的银; 钢: 99.993%; 黄铜: 含 Zn35.7%, Pb3.27% Sn 1%, Cu60%; 银焊料: 含 Ag50%, Cu15%, Zn16.5%, Cd18%; 焊锡: 含 Sn60%, Pb40%。

### 三、典型的低温泵

#### 1. 液氮冷凝泵

原则上, 液氮冷凝泵所能达到的平衡压强取决于被抽气体在液氮温度下的饱和蒸汽压。通常, 不锈钢真空系统经烘烤除气后, 器壁的主要出气成分是氢。因此, 对超高和极高真空获得来说, 主要是解决抽氢问题。若将氢蒸汽压特性曲线进行数据外推, 期望在 2.2K 时能获得  $10^{-15}$  托的平衡压强。然而, 有关冷凝氢平衡压强的实验研究表明, 在温度低于 3 K 时, 氢的饱和蒸汽压不再遵循克劳修斯-克拉帕隆方程而发生很大的偏离。它只能达到一个与冷凝面温度无关的数值—— $10^{-9}$  托左右。这就是氢的“反常特性”, 它影响极高真空的获得。图 7 是这个结果的说明。

实验研究表明<sup>[5]</sup>, 氢蒸汽压偏离的原因主要是由于氢在冷面上的解吸造成的; 到达冷面上的热负荷则是造成氢解吸的直接因素。氢的解吸量还与冷面衬底材料和冷面吸气的表面状况有关。为此须采取以下措施来减少氢的解吸;

(1) 液氮冷面用液氮或温度更低的障板或屏加以屏蔽, 以尽量减少室温辐射传输;

(2) 不锈钢抽气面上镀银, 因为银是能获得最低的氢饱和蒸汽压的材料;

(3) 抽气面上预先冷凝一层可凝气体(氮、氩、氦等), 可以大大降低氢的解吸率。

采取上述措施以后, 可以克服氢的解吸造成的压强限制, 并为液氮冷凝泵在低于  $10^{-10}$  托的压强范围内提供了大量抽除氢的可能性。

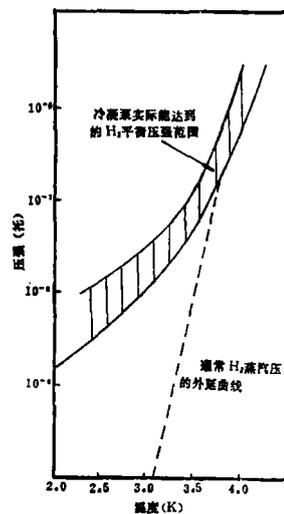


图 7 液氮冷凝泵抽氢的压强限制

另一个难题是如何减少冷剂的消耗？首先，从经济的观点来看，使用温度愈低，致冷费用愈高。每瓦致冷剂的总费用与致冷温度的关系如图 8 所示〔6〕。其次，由于一般的贮槽式液氮冷凝泵的液氮贮量有限，一次添充液氮的“寿命”而言，不过是几天。为使泵能长时间连续运转，要求使用先进的供给液氮的设备，否则，不但会增加不希望的冷剂损耗，甚至会导致实验计划的失败。如何减少泵本身的液氮损耗，以增加“使用寿命”，是一个重要的研究课题。近年来国外研制的第二代贮槽式液氮冷凝泵不但能获得  $10^{-13}$  托的极限真空，而且使用寿命可达 100 天〔7〕(图 9)。其特点有：

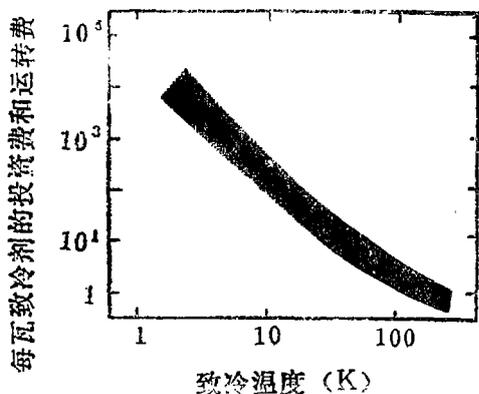


图 8 致冷成本随温度的降低而增加

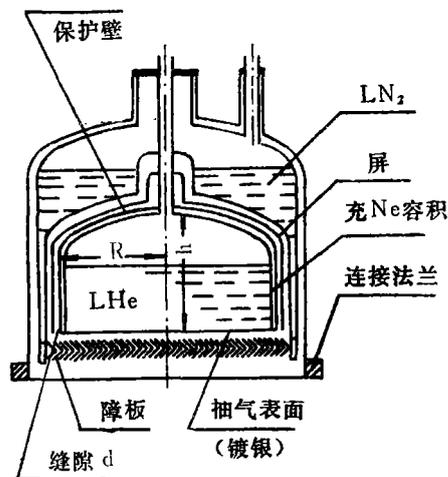


图 9 第二代液氮冷凝泵

(1) 液氮容器外壁夹层中充入适量的氦气并加以密封。当温度略高于 20K 时，氦在夹层两壁之间起热传导作用，从而缩短了泵的启动时间；低于 20K 时，氦在夹层中凝聚，形成高真空绝热层，减少了热负荷〔8〕。(2) 在液氮容器的外围加有一个保护侧屏(内壁涂黑，外壁镀银)。它由液氮容器中蒸发离散的氦气冷却。以往由于没有这个侧屏，这部分氦气没有利用，增加侧屏后还可以降低液氮耗量。(3) 侧屏与液氮容器外壁之间的环形间隙较小。因而透过缝隙面积到达冷面的热辐射量很小。通常在满足工艺条件的前提下，环形间隙为 1~2 毫米较为适宜。(4) 整个液氮容器的外表面镀银，能最大限度地减小冷面所吸收的辐射热。(5) 液氮容器前加有光学密闭的涂黑冷障板，吸收系数高于 0.9。通过液氮减压，障板温度可降到 64K 左右。

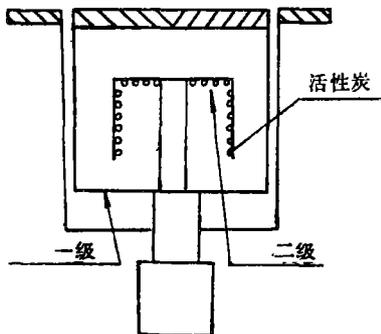


图 10 二级致冷机低温泵简图

## 2. 小型致冷机低温泵

具有清洁、抽速高、吸气容量大、结构简单等优点，是 60 年代以来研制的很有发展前途的抽气手段。各种小型致冷机的重量在 10 公斤以下，使用方便。小型致冷机的原理因其使用的致冷循环而略有不同。图 10 以一种二级致冷机低温泵为例〔9〕，现在据此来说明这类低温泵的原理和使用上注意事项。

一般说来，一级温度为 50~80K；二级温度为 10~20K。第一级冷头对外辐射屏和辐射障板冷却；第二级冷头对低温板冷却。前者用于抽除水和二氧化碳，并对不可

凝气体预冷；后者能吸附在 10~20K 时不能被抽除的氢、氖、氦，因为它的内表面涂有活性炭。表 3 列出了两种国产致冷机低温泵的主要性能指标。

表 3 国产致冷机低温泵主要性能指标

型 号	极限压强 (托)	抽 速 (升/秒)				对 H <sub>2</sub> 的抽气容量 (托·升/秒)	二级冷板冷下时间 (分钟)
		H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	Ar	He		
ZDB-150	$4 \times 10^{-10}$	2,400	700	—	270	11,000	90
ZDB-500	$< 10^{-9}$	10,000	6,600	6,000	3,000	12,000	95

在确定了致冷机的型号以后，周围环境总的热负荷便决定了低温泵的最大许可尺寸。这时，抽速和吸气容量便是衡量低温泵优劣的两项重要指标。为提高抽速和增加吸气容量，应仔细考虑如下问题：

(1) 尽可能提高泵口(包括障板)的通导系数，同时要考虑由此而可能带来的可凝性气和蒸汽对活性炭的污染，二者要兼顾；(2) 二级冷板和粘有活性炭的吸附表面应具有最佳几何体形状和合理的位置；(3) 在吸附板上应尽可能多粘附颗粒适度的活性炭并改进粘结技术；(4) 活性炭在粘结前要进行真空活化处理。

### 3. 低温分子筛吸附泵

最初的分子筛吸附泵，作为吸附剂的分子筛是堆放在 LN<sub>2</sub> 冷却的翼片上，并且从大气体开始对真空系统进行抽气。由于分子筛与冷却翼片间的导热性极差，加之分子筛吸气时受惰性气体、水汽及起始压强的影响甚大，往往限制了它的极限真空度。因而，通常只作为前级泵使用。随着低温技术的发展，LH<sub>2</sub>，LHe 的生产已不是工业上难题，于是人们希望采用温度更低的分子筛吸附泵，以增加泵的抽气效果。拓宽泵的使用压强范围。这样便出现了低温分子筛板吸附泵。

研制低温分子筛板吸附泵要解决两个关键问题。一是分子筛的粘结问题，二是温度均匀性问题。前者既要保证分子筛在“冷热冲击”下的强度，又要保持分子筛粘结之后的多孔性能；后者因为分子筛本身的热导性极差，而它的吸附性能在很大程度上取决于其表面温度，因此不允许它有较大的温度梯度。目前，最有前途的解决方法是在金属低温板上薄薄粘上一层分子筛。粘牢的先决条件是制备粗糙的金属表面。方法是：(1) 把金属丝网点焊或钎焊到抽气底板上；(2) 底板上交叉地折槽。通常槽深为 1.5~2 毫米，槽宽为 1.5~6 毫米<sup>[10]</sup>。所用吸附剂为 5A 分子筛，并以泥浆形式添加到粗糙的金属底板上。为了增加导热性能，可在 5A 分子筛里掺 5% 的铝粉，以减小吸附层内的温差。实验研究表明<sup>[11]</sup>：这种分子筛板吸附泵对氢、氦等气体有较大的吸附能力。

### 参 考 文 献

- [1] C. Benvenuti et al, J. Vac. Sci. Technol., 136 (1976) 1172.
- [2] 王欲知, 真空技术, 四川人民出版社 (1980) 261.
- [3] 真空设计手册编写组, 真空设计手册 上册 国防工业出版社 224.
- [4] 饭田修一等编, 张质贤等译, 物理学常用诸表 (1979) 科学出版社 203.
- [5] C. Benvenuti, J. Vac. Sci. Technol., 11 3 (1974) 591.
- [6] B. A. Hands et al, Proc. 7th Inter. Vac. Cong. (1977) 53.
- [7] C. Benvenuti et al, Vacuum, 29 11—12 (1979) 427.
- [8] C. Benvenuti, Proc. 7th Inter. Vac. Cong., (1977) 1.
- [9] D. R. Denison, Proc. 7th Inter. Vac. Cong., (1977) 69.
- [10] J. E. A. John et al, Space Technology 2, (1965) 609
- [11] R. J. Powers et al, J. Vac. Sci. Technol., 8 1 (1971) .