

低温泵原理结构及特点

一、低温泵的概述

具有清洁真空和高排气速度特点的泵

低温泵是储存式真空泵，泵内设有极低温面，可以通过冷凝和吸附来捕捉气体，以实现超高真空的状态。另外，由于可以获得没有油污染的清洁真空，并且具有比其他真空泵更高的排气速度而备受瞩目。

低温泵的应用领域

半导体、液晶、光盘等电子部件、眼镜镜片、超大型腔体的排气等

二、低温泵的特征

1、如何在极低温下获得清洁真空？

低温泵是通过在极低温面上冷凝吸附气体分子，并将所有气体分子储存在泵内的泵。

该泵的主要特点是在真空容器中没有任何动作，不使用油，能获得干净的真空，尽管是吸附方式的泵，但排气速度大。

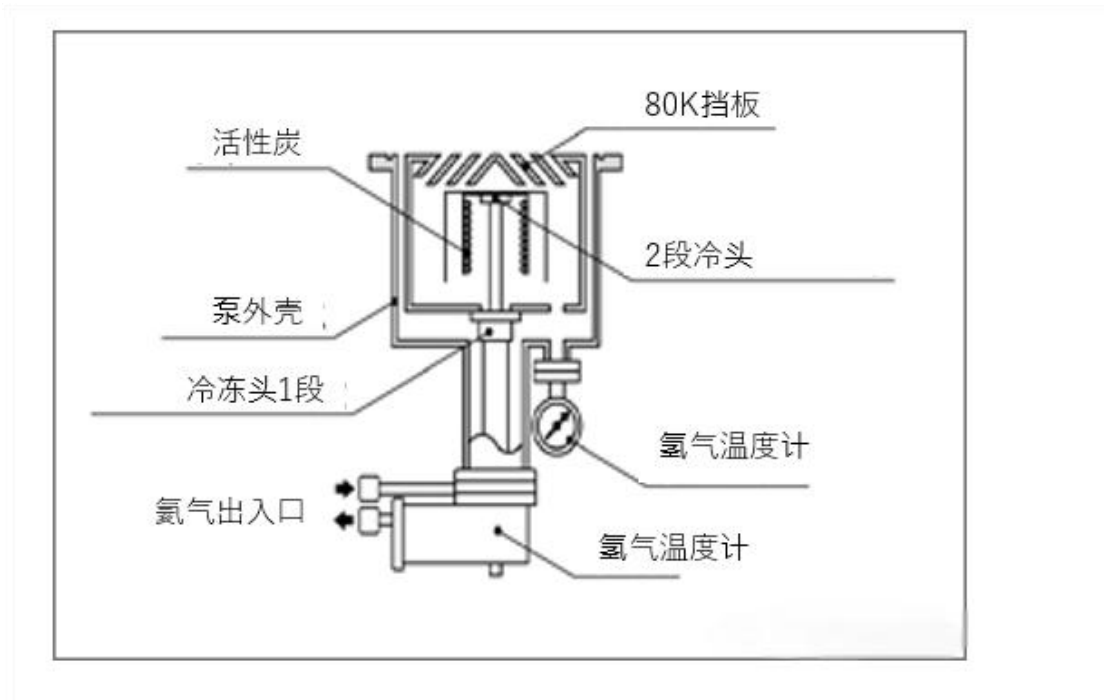
优点：可将所有气体排出，获得超高真空。

缺点：由于是储存型泵，必须定期释放和再生。

2、低温泵的结构形式

通过 2 段式实现高真空

冷头有 2 段、1 段冷头有较大的冷冻能力，可冷却至 80K(卡尔文) 以下。至此，主要是水分的排出，接下来 2 段冷头进一步冷却，排出 N_2 ， O_2 ， Ar ， H_2 等分子，以获得更高的真空。



3、极低温的理由

当接触已经冷却至接近 0K =绝对零度 (-273.15°C) 的表面时，气体分子具有冷凝和吸附的性质。

三、低温泵的结构

1. 低温泵原理

真容器内设有极低温面，通过冷凝和吸附来捕捉容器里的气体并排气的泵。由于机械运动部件很少且不使用油，因此可以实现清洁的高真空。为了使低温泵有效的进行排气，冷凝时的蒸气压力，吸附时的吸附平衡压力必须在 10^{-8}Pa 以下。

图 1 是各气体的蒸气压力，比氮气的蒸汽压力低的气体，在极低温面(低温面或低温挡板)冷却到 20K 以下时，其蒸汽压力为 10^{-8}Pa 以下。氢气、氦气、氖气等蒸汽压较高的气体在 20K 时不能通过冷凝排气，所以

通过却到 20K 以下的吸附剂排气。以这种方式，低温泵可以排出所有气体以获得超高真空。

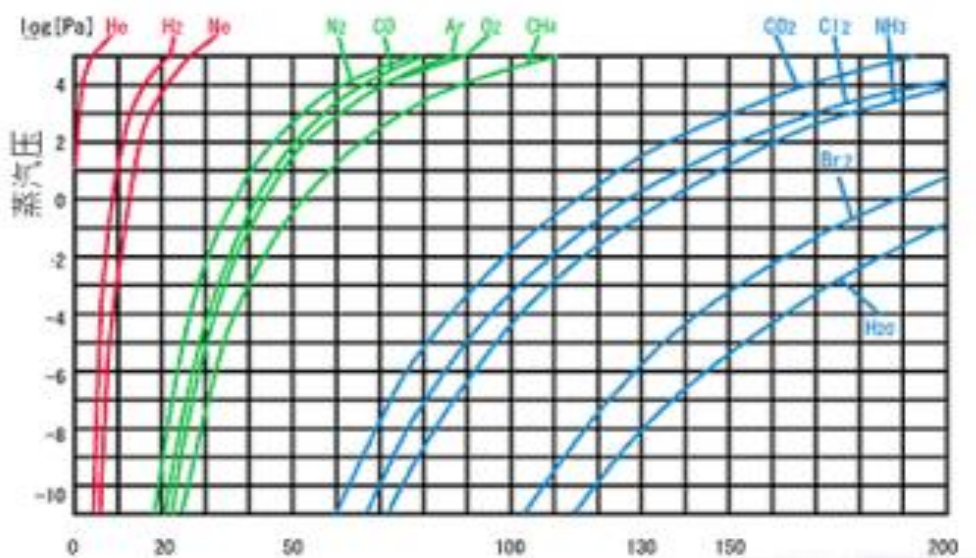


图 1.各种气体的蒸气压力

形成冷冻表面的方式，通常使用封闭循环的小型氦冷冻机。低温泵使用小型氦冷冻机，不需要像贮液型低温泵那样定期补给冷冻剂，通过简单的操作即可得到清洁的超高真空，可长时间、稳定的连续运转。

2. 低温泵的工作原理及结构

CRYO-U8H 为例来说明低温泵的结构。

低温泵的冷冻机为 2 段式，1 段具有较大的制冷能力，可以冷却至 80K 或更低，2 段的制冷能力较小，可以冷却至 10 至 12K。

15K 挡板(1)(冷凝板)和 15K 挡板(2)(吸附板)安装在冷冻机的 2 段上，80K 挡板和 80K 屏蔽桶安装在制冷能力较大的 1 段上，防止受到室温的热放射(辐射)。另外，为了防止吸附剂表面不被覆盖，吸附剂被安装在浓缩性气体不能进入的挡板的内侧。

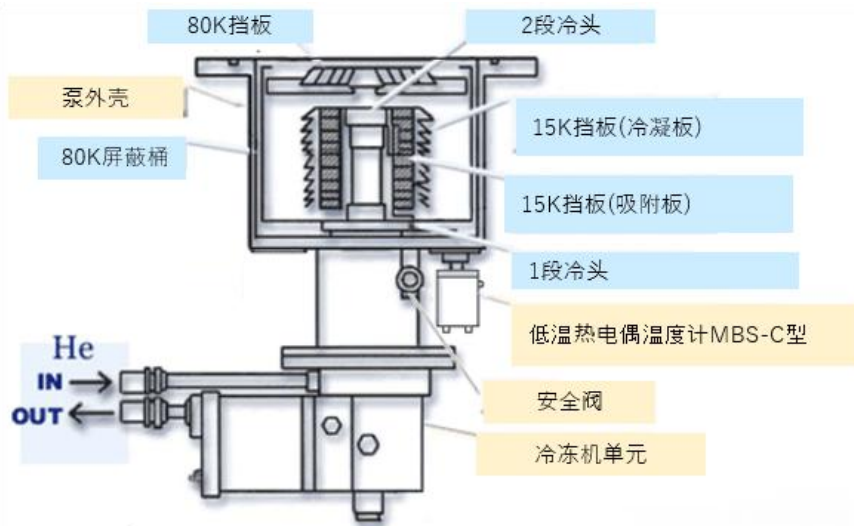


图 2.CRYO-U8H

低温泵主要的排气气体是、以下(1)~(3)等。

(1)空气(N₂、O₂)

: 真空设备粗抽后的残余气体

(2)放出气体

1 H₂O

: 吸附在真空容器表面 (普通真空设备中最大的部分), 从玻璃、塑料、陶瓷释放出来的气体的主要成分

2 H₂

: 真空容器的金属壁内部扩散放出(超高、极高真空的问题)高温, 熔融金属(特别是铝)放出(蒸镀、溅射)

3 CO、CO₂、
CH₄、CnHm

: 真空设备壁面上的污垢

(3)导入气体

4 Ar

: 溅射设备

5 H₂

: 离子注入

6 O₂

: 氧化物

根据蒸汽压力表可知，水蒸汽(H₂O)温度在 130K 以下的话，蒸汽压力就会在 10⁻⁸Pa 以下，氮气(N₂)、氧气(O₂)、一氧化碳(CO)、氩气(Ar)等气体，由于蒸汽压力高而不能在 80K 时冷凝，需要通过 20K 以下挡板(1)的外表面来冷凝和排气。

氦气(He)、氢气(H₂)、氖气(Ne)等更高蒸气压力的气体在 10~20K 的温度下不会冷凝，因此通过安装在 15K 挡板(1)（冷凝板）内侧的吸附剂来吸附和排气。吸附剂安装在 15K 挡板(2)（吸附板）中，为了防止吸附剂表面不被覆盖，吸附剂被安装在浓缩性气体不能进入的挡板的内侧。

80K 屏蔽桶、80K 挡板、15K 挡板 (1) 的外表面为镜面，可以反射室温的辐射热。80K 屏蔽桶的内表面进行了黑化处理，是为了防止室温辐射在 80K 屏蔽的内面反射，射入 15K 挡板。为使低温泵正常工作，80K 屏蔽桶、80K 挡板的温度必须在 130K 以下，15K 挡板必须在 20K 以下。

为了能够确认这些温度，在 80K 挡板上安装了 CA 热电偶，在 15K 挡板上安装了氢气蒸汽压温度计(H₂VP)及 MB 型低温热电偶温度计。（CA 热电偶 130K 的标准电动势为-5.5mV。）

3. 低温泵的再生和安全阀

油扩散泵和涡轮分子泵是将压缩排出的气体释放到泵外，但低温泵是通过冷凝和吸附储存在 15K 挡板中，因此必须定期释放和再生。

再生是指将低温泵的温度升高到室温并使冷凝或吸附的气体重回到气体状态。储存了大量气体的低温处于密封状态时，低温泵的内部可能在再生期间变成高压气体，因此需要在低温泵上安装安全阀。

安全阀的工作压力设定为 20kPa（表压）。

使用安全阀是为了安全起见，因此请勿关闭安全阀或将其用于其他目的。

另外，请勿在再生过程中将其用作气体释放阀。当安全阀工作时，吹扫气体中的灰尘等附着在 o-ring 表面上，会导致漏。

4. 低温泵系统

低温泵系统基本由《1》低温泵单元(含冷冻机单元)、《2》压缩机单元、《3》软管、构成，按图 3 所示连接后。低温泵便的启动（低温泵不能在大气压下启动）和再生需要粗抽泵（由客户准备）。

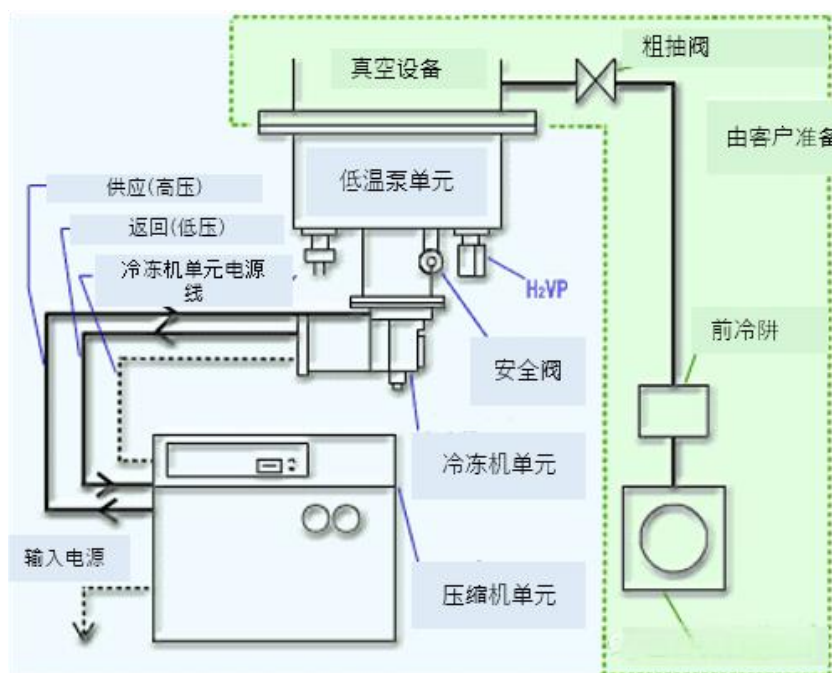


图 3.低温泵系统

四、低温泵的性能

低温泵的主要性能有：(1) 冷却降温特性 (2) 排气速度 (3) 排气容量 (4) 最大流量 (5) 交叉压力 (6) 极限压力 (7) 热负荷能力 等。

这些项目将在以下进行说明。

1. 冷却降温(cool-down)特性

由于低温泵不能在大气压下启动，因此需要粗抽泵。使用回转泵进行粗抽的情况下，低温泵 40Pa 不会引起油蒸汽的回流。残留在泵中的所有气体都被低温泵内的吸附剂吸附。冷却时间受以下因素影响。

表 1.影响冷却时间的因素

要因		冷却時間
1.粗引き压	高	延长
2..泵的温度	高	延长
3.粗抽后残留气体的构成	干(泵内干燥)	延长
	水分多	减少
4.泵的污染	已污染	延长

冷却时间受再生方法的影响。当使用氮气吹扫或加热带使温度升高时，水分会变少变得干燥，真空隔热难以实现，因此冷却时间变长。另外，请注意微小的漏也会导致冷却时间延长或不能冷却(安全阀处导致的漏请特别注意)。此外，60Hz 区域的冷却速度比 50Hz 区域快 10-15%。通常，冷却时间定义为 15K 挡板的温度低于 20K 所需的时间，如表 4-2 所示。

2. 排气速度特性

2-1. 对水的排气性能

如果冷冻面的温度为 150K 以下，则冷冻面对水的冷凝概率几乎为 1。通常，低温泵 80K 屏蔽桶和 80K 运作期间的温度为 130K 以下（通常约为 80K），因此低温泵相对于水的排气速度等于 80K 屏蔽桶口径的理想排气速度。对分子量 M 气体单位面积的理想排气速度 s 为 $s=62.5 / M^{1/2}(\text{L/s/cm}^2)$ (20°C)水的话，M=18 的理想排气速度为 $s=14.7(\text{L/s/cm}^2)$ 。80K 屏蔽桶吸气口面积 A(cm²)，低温泵对水的排气速度 S 为 $S=s \cdot A(\text{L/s})$ 。

例如、8 型的低温泵、80K 屏蔽桶吸气口面积约为 275cm²，对水的排气速度为 4000L/s。对在 80K 挡板中冷凝和排出的气体（例如，CO₂，NH₄）进行相同的计算。CRYO-U8H 对 CO₂ 的排气速度计算，对水的排气速度为 4000L/s，CO₂ 的分子量为 44， $SCO_2=SH_2O \times (18 / 44)^{1/2}=2560 \text{ L/s}$ 。

表 2.低温泵对于水的排气速度

口径	型号	排气速度 (L/s)
6	U6H	2100
8	U8H,U8H-U,U8HSP	4000
10	U10PU	6900
12	U12H,U12H-K2,U12HSP	9500
16	U16,U16P	16000
20	U20P	29000
22	U22H	39000
30	U30H	70000

2-2. 对 Ar、N₂（冷凝性气体）的排气特性

具有相对高蒸气压力的气体如 N₂, Ar, CO 和 O₂ 不会被 80K 挡板或 80K 屏蔽冷凝，而是在低于 20K 的温度下冷凝和排出。

如果冷冻面温度为 20K 以下，则冷冻面对冷凝性气体的捕获概率为 1，另外，由于在分子流动区域中从进气口到低温挡板的传导是恒定的，因此低温泵在分子流动区域中的排气速度是恒定的。

产品手册中低温泵的排气速度值是分子流区域中对氮气的排气速度。对氮气意外的分子量 M 的冷凝性气体的排气速度，通过以下公式计算求得。

$$SM=SN_2 \times (28 / M)^{1/2} \text{ (L/s)} \dots\dots\dots(1)$$

SN

3. 对氮气的排气速度 (L/s)

例如，CRYO-U8H 对氮气的排气速度，从表 6-3 可知 $SN_2 = 1700 \text{ (L/s)}$ ，氮气的分子量 $M=40$ ，通过此公式计算

$$S_{Ar} = 1700 \times (28/40)^{1/2} = 1400 \text{ L/s}$$

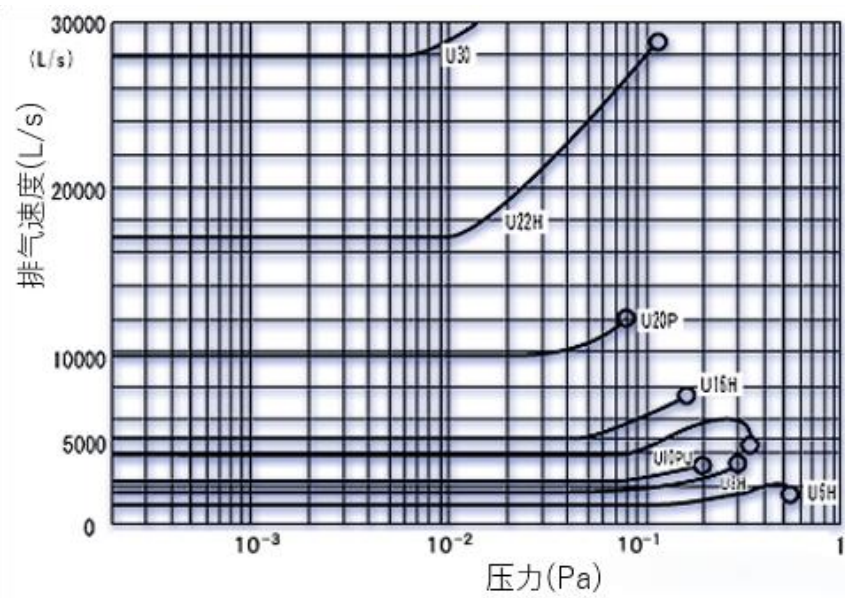


图 1.CRYO-U 对于氮气的排气速度

型号	排气速度 (L/s)
U6H	750
U8H/U8H-U/U8HSP	1700
U10P	2300
U12H	4000
U12HSP	4100
U16/U16P	5000
U20P	10000
U22H	17000
U30H	28000

表 3.各种低温泵对氮气的排气速度

当气流从分子流变为中间流（过渡流）时，电导与压力成比例，因此排气速度增加。然而，由于输入到低温泵的热量随着压力的增加而增加，所以当热负荷超过冷冻机的制冷能力时，就会达到低温泵的排气极限。ULVAC Cryo 根据该热负荷，将低温挡板温度达到 20K 时的流量定义为最大流量(图 6-1 o点)。虽然最大流量会随着制冷能力加强而增加，但是由于制冷能力再强，冷凝层的热传导率也是有限的，因此在厚度方向上会出现温度梯度。如果冷凝层的表面温度过高超过极限，气体就不会凝结，故排气速度变为 0，成为物理排气极限。

2-3.对 H₂、He、Ne（非冷凝性气体)的排气速度

H₂，He 和 Ne 是蒸气压力最高的气体，在 20K 左右时，由于蒸汽压力太高而不能通过冷凝排出，因此也被称为非冷凝性气体。由于这些气体不能通过冷凝排出，因此通过用冷却至 20K 以下的吸附剂吸附来排气。吸附剂吸附非冷凝性气体时会饱和，因此排气速度会慢慢降低。当排气速度下降到初始值的 80%时，此时排出的气体量被定义为排气量（稍后描述）。

在非凝结性气体中，氢是排放气体的重要成分，也是应用上重要的气体，因此经过详细研究确定了式样。氦气使用的例子很少，所以数据很少。另外，氦气是最难被吸附的气体，只能被排出氩气的 1/100~1/1000，因此不推荐使用低温泵来排气。

型号	排气速度	最大流量	排气流量
CRYO-U	(L/s)	(Pa · L/s)	(Pa · L)

-U6H	1100	1.1×10^2	3.1×10^5
-U8H	2700	2.4×10^2	1.0×10^6
-U8HSP	3200	2.4×10^2	1.0×10^6
-U10PU	3600	1.5×10^2	6.7×10^5
-U12H	6000	4.1×10^2	9.8×10^5
-U12HSP	6000	4.1×10^2	1.6×10^6
-U16	10000	4.1×10^2	2.4×10^6
-U16P	10000	4.5×10^2	2.4×10^6
-U20P	18000	5.0×10^2	4.6×10^6
-U22H	25000	1.3×10^3	8.5×10^6
-U30H	43000	7.4×10^2	1.5×10^7

表 4.CRYO-U 对于氢的排气特性

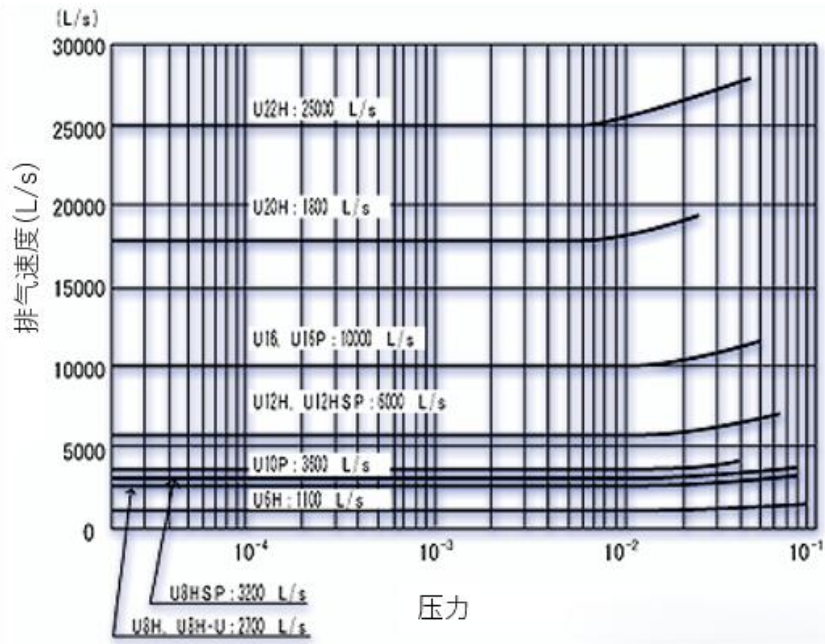


图 2.CRYO-U 对于氢的排气速度

4. 低温泵的排气容量

3-1. 对于凝固性气体的排气容量

通过冷凝排出的气体是（1）通过 80K 屏蔽桶或 80K 挡板排出的气体（主要是水）和，（2）通过 15K 挡板排出的气体（氮气，氩气，氧等）。

(1) 对水的排气容量

当水凝结在 80K 挡板上，冰的厚度增加时，80K 挡板的电导会减小，通过 15K 挡板冷凝和吸附排出的气体的排气速度也会减小。由于需要再生，此时排出的水量即为排气容量，没有明确的对水的排气容量的定义。但是，下表中的值可作为水的排气界限的粗略指导。（注意排气量的单位是 g（克））

型号	排气容量 (g)
----	----------

CRYO-U6H	40
CRYO-U8H,U8H-U	90
CRYO-U10PU	170
CRYO-U12H	260
CRYO-U16,U16P	500
CRYO-U20P	1000
CRYO-U22H	1400

表 5.低温泵对水的排气容量（参考）

(1) 水多的情况

塑料

玻璃

陶瓷

(2) 水多的情况下再生注意点

当温度升高时，冰完全融化

粗抽时，不要冷冻水

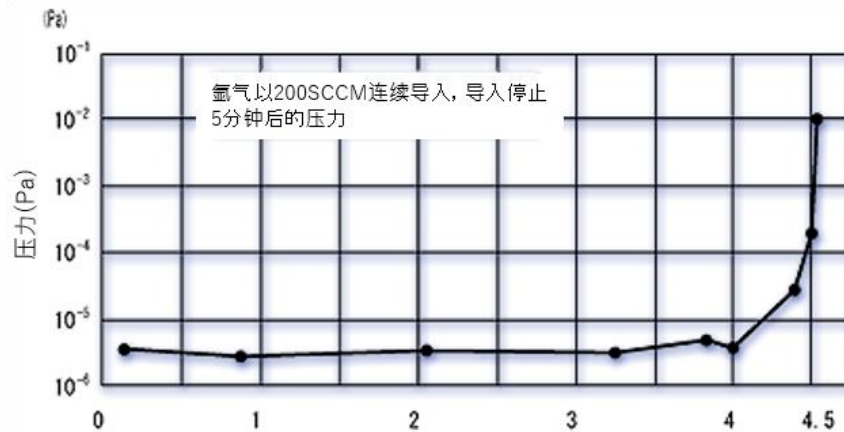
从泵内将水完全去除

检查旋转泵的性能（注意油乳化）

(2) 对氦气的排气容量

通过 15K 冷凝板凝结排出的气体中存在的难题是溅射工艺中氦气的排气容量。15K 挡板外表面冷凝氦气层的厚度增加，触碰到温度较高的 80K 挡板和 80K 屏蔽桶，或者氦气层本身温度梯度增加，使氦气表面温度升高。此类情况下，都会导致不能再进行冷凝。此时，排出的氦气量即为排气容量。ULVAC Cryo 将对氦气的排气容量定义为[将主阀关闭且在主阀关闭后 5 分钟后压力不会降至 $1.3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ 以下的氦气的排出量]。图 6-3 是连续导入 200SCCM 的氦气，停止导入 5 分钟后 CRYO-U12HSP 的压力值，排气量超过 $4.3 \times 10^8 \text{Pa} \cdot \text{L}$ 开始，压力突然恢复，因此排气量为 $4.3 \times 10^8 \text{Pa} \cdot \text{L}$ 。表 6-6 显示了每种型号低温泵的氦气排放能力。

图 3.CRYO-U12HSP 的压力恢复（测量例）



机种 CRYO-	排气容量(Pa · L)
-U6H	5.6×10^7
-U8H,U8H-U	1.0×10^8

-U8HSP	2.5×10^8
-U10PU	1.0×10^8
-U12H	2.1×10^8
-U12HSP	4.3×10^8
-U16,U16P	4.3×10^8
-U20P	5.8×10^8
-U22H	8.1×10^8
-U30H	7.8×10^8

3-2. 对于非冷凝性气体的排气容量

氢气，氦气，氖气等不能通过 10K 左右冷凝排出的气体，通过被 15K 挡板内侧的吸附剂吸附排气。因此，随着吸附量的增加，会接近饱和的状态，（1）排气速度降低，（2）吸附平衡压力增高，排气性能慢慢下降，最终不能进行排气。ULVAC Cryo 把对氢气的排气容量定义为对氢气的排气速度降至初始排气速度的 80% 时为止的氢气吸附量。为了使吸附剂能发挥出预定的吸附能力，必须清洁吸附剂。吸附剂的污染为

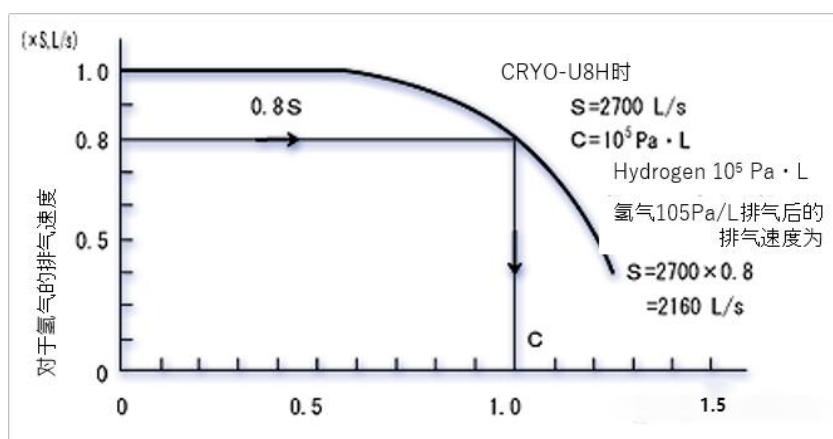
- (1) 吸附冷凝性气体(主要是空气)时
- (2) 吸附水分时
- (3) 吸附油蒸气时

当这些物质被大量吸附时，吸附氢气的的能力就会降低。通过再生低温泵可以去除空气和水分，但是一旦油蒸汽被吸附，就不能再次被去除，

此时必须更换 15K 挡板（2）（吸附板）。为了保持低温泵对于氢气的吸附性能，必须绝对避免油蒸气回流到低温泵中。

图 4 是关于氢气的排气速度与氢气排气容量的关系图，其中 S 是排气速度，C 是排气容量。有关各种型号的排气速度和排气容量，请参考图 4。

图 4.对于氢气的排气速度与排气容量关系



5. 低温泵的热负荷和最大流量

低温泵的热负荷为辐射热和气体负荷（气体热传导，冷凝热），分别给出以下方程式。

①辐射热 Q_r

$$Q_r = \delta \varepsilon A v A (T_2^4 - T_1^4) (W)$$

σ : 玻尔兹曼常数 $5.67 \times 10^{-12} W/cm^2/K^4$

$\varepsilon A v$: 平均辐射率

T_1 : 低温面的温度 (K)

T_2 : 高温面的温度 (K)

A : 受热面积 (cm²)

形状	ϵ_{AV}
平行平面	$\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_2 + (1 - \epsilon_2) \epsilon_1}$
同轴圆筒	$\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_2 + A_1 (1 - \epsilon_2) / A_2}$

A1: 内側 A2: 外側

②气体的热传导率 Qg1

$$Qg1 = 0.243 \left(\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) a_0 (T_2 - T_1) P \left(\frac{M}{P} \right)^{0.5}$$

γ : 气体的比热比

a_0 : 平均热适应系数

P : 压力 (Pa)

M : 分子量

T1 : 压力 P 测量点的温度 (K)

T2 : 低温面的温度 (K)

A : 受热面积 (cm²)

平均热适应系数 a_0 式 ($A_1 < A_2$)

$$a_0 = \frac{a_1 a_2}{a_2 + (A_2/A_1) (1 - a_2) a_1}$$

适应系数 a 1, a 2 (近似值)

温度(K) \ 气体	空气	氢气	氦气
340	0.1	0.3	0.3
76	1	0.5	0.4
20	-	1	0.5

③气体的凝缩所产生的热负荷(为H₂,He,Ne时的吸附热) Q_{g2}

$$Q_{g2} = \lambda SP + C_p (T_g - T_c) SP \quad (W)$$

γ : 冷凝热 (H₂,He,Ne 的话, 吸附热) (W/Pa · L/s)

T_c : 低温面的温度 (K)

T_g : 气体的温度 (K)

S : 低温泵的排气速度 (L/s) SP : (Pa · L/ s)

P : 压力 (Torr)

C_p : 气体的平均比热(W/ (Pa · L/s) /K)

冷冻机 1 段的热负荷为辐射热和气体的传导热, 除非在 10⁻¹Pa 范围内连续使用, 否则通常大部分为辐射热。冷冻机 2 段的制冷能力受 1 段的热负荷影响, 如果 1 段的热负荷增加, 则 2 段的制冷能力会下降, 最大流量也会下降。

因此, 当导入低温泵的气体量大时, 请保持低温泵的清静 (减少辐射热), 减少由热辐射引起的热过负载。通常, 大型低温泵的话受热面积更大, 会有更多的热辐射, 因此需要更大制冷能力的冷冻机。低温泵的最大流量定义为当标准辐射热时, 冷凝热 (或吸附热) 使低温泵的温

度到达 20K 时的流量。如果泵的口径相同，冷冻机的制冷能力越大，或排气速度越大，则最大流量也越大。比如 CRYO-U16 和 U16P 的口径相同，有同样的排气速度，U16P 的冷冻机(R50)的话比 U16 的冷冻机(R20)有更大的制冷能力，因此最大流量也更大。

低温泵的最大工作压力 P_{max} 是通过将最大流量 Q_{max} 除此时的排气速度 S_{max} 而求得的。 $(P_{max}=Q_{max}/S_{max})$ 。氦气的话， P_{max} 约为 $10^{-1}Pa$ ，此为中间流。表 7 显示了各种型号的最大流量。

低温泵的最大流量

	氦气 (Pa · L/s)	氢气 (Pa · L/s)
CRYO-U6H	1.1×10^3	1.1×10^2
CRYO-U8H,U8H-U,U8HSP	1.2×10^3	2.4×10^2
CRYO-U10PU	8.0×10^3	1.5×10^2
CRYO-U12H,U12HSP	2.0×10^3	4.1×10^2
CRYO-U16	1.4×10^3	4.1×10^2
CRYO-U16P	1.6×10^3	4.5×10^2
CRYO-U20P	1.1×10^3	5.0×10^2
CRYO-U22H	4.1×10^3	1.3×10^3

CRYO-U30H

 2.7×10^3 7.4×10^2

6. 交叉压力(cross over)

交叉压力为,真空槽粗抽时打开主阀切换至低温泵时,真空槽的压力(粗加压力)。此时允许的最大粗抽压力为最大允许交叉压力。主阀打开的瞬间真空槽种的气体向低温泵流入,如果气体的量超过极限,则低温泵不能再次恢复排气能力,温度会升高,已排气的气体全部被放出。极限气体量(可处理的最大气体吸入量)除以真空室的容积来求得最大容许交叉压力。

$$\text{最大允许交叉压力 } P_{\max} (\text{Pa}) \cong \frac{\text{瞬时可处理的最大气体吸入量(Pa} \cdot \text{L)}}{\text{真空室的容积 } V(\text{L})} \quad (1)$$

可处理的最大气体吸入量为恢复排气性能的极限值(通常低温挡板的温度超过 20K)。通常处于安全考虑,粗抽压力极限为(1)公式种求得的最大容许交叉压力的 1/2。此外,如果想提高安全系数,可以将低温泵挡板温度不超过 20K 时的值设为最大允许交叉温度。可处理的最大气体吸入量会随低温泵上的热负荷和低温泵中冷凝气体量而变化。

表6-8 低温泵可处理的最大气体吸入量

机种	瞬时可处理的最大气体吸入量(Pa · L)	
	恢复的上限量	不超过20K的上限量
CRYO-U6H	133000	13300
-U8H	133000	20000
-U10PU	133000	26600
-U12H/12HSP	133000	40000
-U16/16P	133000	53200
-U20P	133000	66500
-U22H	400000	133000
-U30H	400000	200000

表 6-8 为各种型号可以处理的最大气体吸入量(相对于空气)的参

考。例如，U8H的话，容积100L的真空容器的最大容许交叉压力 P_{max} 为可处理的最大吸入气体量 $133000Pa \cdot L$ ， $P_{max} \leq 133000Pa \cdot L/100L=1330Pa$ ，粗抽1330Pa以下。通常安全系数为2倍以上，即粗引压力设为665Pa。通如果为了不超过20K、可处理的最大吸入气体量为20000Pa， $P=20000/100=200Pa$ 。真空容器容积大，粗抽压力40Pa以下时，必须采取措施防止油蒸汽回流，安装更大的泵，或增加泵的数量，使粗加工压力为40Pa或更高。

7. 到达

低温泵无气体流量时的达到压力为，冷凝性气体在低温面温度下各种气体的蒸气压力和冷凝系数（假设为1），代入以下公式求得。

$$P_g = P_s(T_g/T_s)^{1/2}$$

T_s : 低温面的温度 10 ~ 20K

P_s : 温度为 T_s 时的气体蒸汽压力（氢气为吸附平衡压力）（Pa）

T_g : 气体温度 ~ 300K

冷凝性气体中，蒸汽压力最高的气体是氮气，对于氮气当低温面温度10-20K时，到达压力如图6所示。通常，在没有负载的状态下，低温泵挡板为10-12K，蒸气压为~10-21Pa，在实际使用时可以完全忽视。对于非冷凝性气体氢气的极限压力由吸附平衡压力决定。如图6-7所示，低温泵中使用的活性炭具有非常大的氢气吸附能力，并且当在超高真空中运行时，由于氢气的排气量非常小，因此氢气的吸附平衡压力 P_a 也可以忽略不计。（例如，U8H（SH₂O=2700 L/s）在 $1.3 \times 10^{-8} Pa$ 下连续运行1个月氢气的吸附量为 $Q=1.3 \times 10^{-8} \times 2700 \times 30 \times 24 \times 3600=91 Pa$ 因此，低温泵的极限压力由导入低温泵的气体流量与排气速度决定。通常，低温泵单体的极限压力会通过低温泵上使用盲法兰时，低温泵最小气体流入量来测量。另外，极限压力会根据低温泵的规格（标准规格和超高真空规格），粗抽压力，是否烘烤等而有巨大的差异。通常在有

O-RING，粗抽 40Pa，无烘烤的情况下，12 小时运行的极限压力为(1~4) $\times 10^{-6}$ Pa。图 6-7 显示了在有烘烤和没有烘烤的情况下对残留气体组成的测量。另外，表 6-9 显示了单个低温泵的极限压力的参考值。超高真空规格完全烘烤的情况下，可获得 10^{-10} Pa 的极高真空。装置的极限压力取决于装置释放出的气体量($P=Q/S$)。

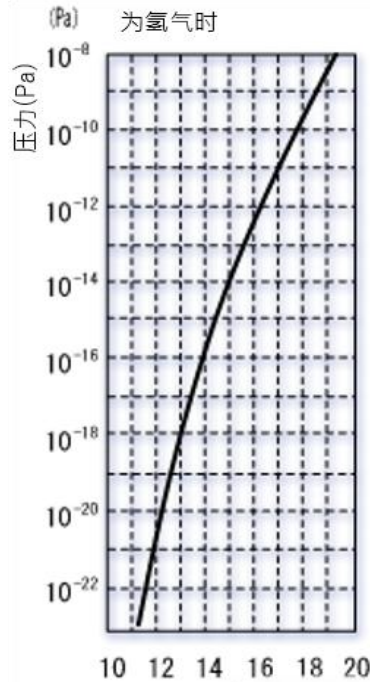
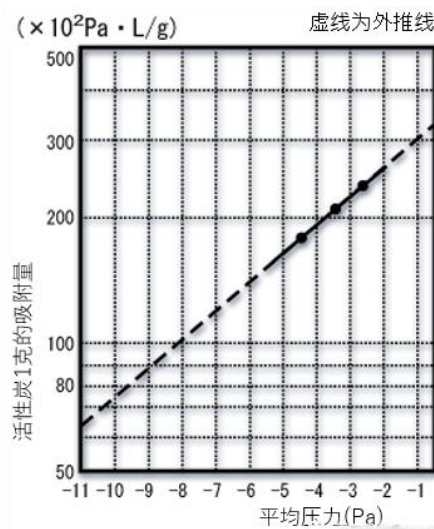


图 6.蒸气压力决定的极限压力

活性炭对氢气的吸附温度曲线



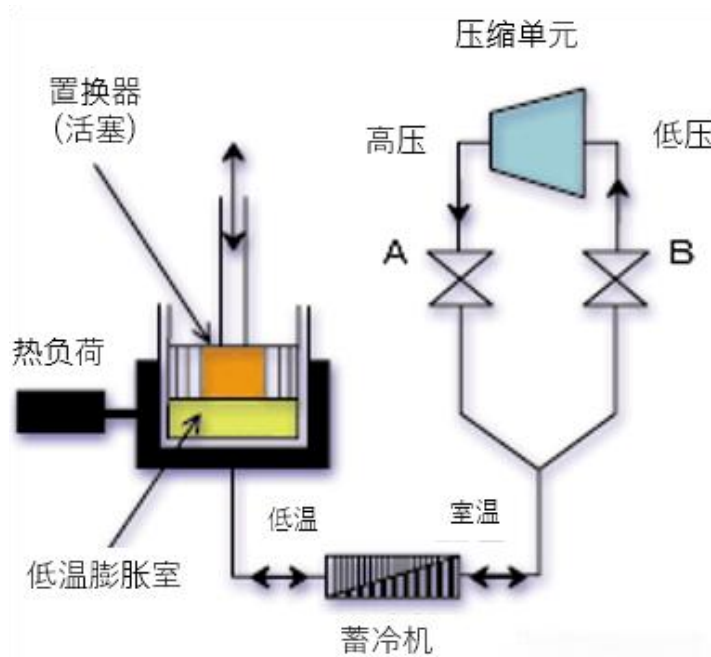
低温泵的极限压力(参考)

规格	粗抽压力(Pa)	烘烤	极限(Pa)
标准	40	无	$(1 \sim 4) \times 10^{-6}$
	40	$(100 \sim 150^{\circ}\text{C}) \times (3 \sim 10\text{h})$	$(1 \sim 4) \times 10^{-7}$
超高真空	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	无	10^{-8}
	$10^{-2} \sim 10^{-4}$	$(200 \sim 220^{\circ}\text{C}) \times (3 \sim 8\text{h})$	10^{-9}
	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	$(200 \sim 220^{\circ}\text{C}) \times \text{约 } 20\text{h}$	10^{-10}

五、冷冻机的构造和冷冻原理

1. 冷冻原理（一般说明用）

图 1. 冷冻原理



用于低温泵的代表性的冷冻循环为

(1) Gifford-McMahon 循环 (G-M 循环)

(2) Modified-Solvay 循环 (M-Solvay 循环)

2.低温泵所使用的冷冻循环

CRYO-U8H 为例来说明低温泵的结构。

低温泵的冷冻机为 2 段式，1 段具有较大的制冷能力，可以冷却至 80K 或更低，2 段的制冷能力较小，可以冷却至 10 至 12K。

15K 挡板(1)(冷凝板)和 15K 挡板(2)(吸附板)安装在冷冻机的 2 段上 80K 挡板和 80K 屏蔽桶安装在制冷能力较大的 1 段上，防止受到室温的热放射(辐射)。

图 2-2 为 G-M 循环的动作原理和 P-V 线图(膨胀室的压力 P 和容积 V 之间的关系)。

2-1.G-M 循环

G-M 循环是由 Gifford 在 20 世纪 50 年代末开发的制冷循环方式，置换器的驱动方式为机械驱动和利用作业气体压力差驱动。G-M 循环非常高效但驱动速度可能比较慢，另外，内部使用的密封件负荷轻，是一种高可靠性的制冷循环方式。这里，将对 ULVAC Cryo 使用的机械式压缩机驱动的制冷循环进行说明。

A 置换器在气缸的最底部。此时，低压阀关闭，高压阀打开。

↓

(a) 气缸的室温部分和低温部分被高压气体填充。

↓

B 气缸内部变为高压。

↓

(b) 置换器上拉，室温的氦气一边被蓄冷器冷却，一边低温部分被填充。

↓

C 低温部分面积最大。此时高压阀关闭，低压阀打开。

↓

(c) 低温泵部分的高压气体通过蓄冷器放出。此时由于 Simon 膨胀，气体的温度下降，产生低温。

↓

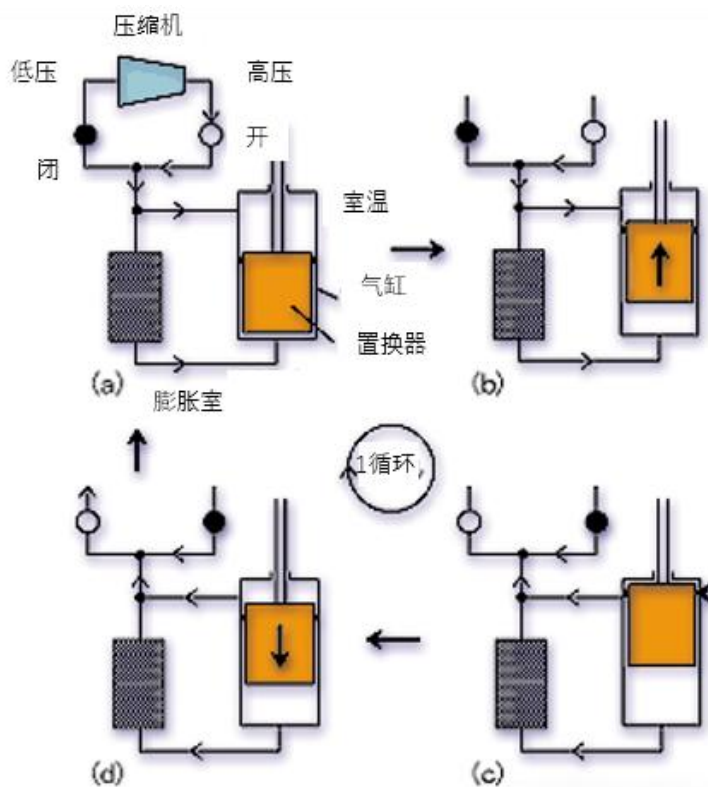
D 低温部分压力最低。

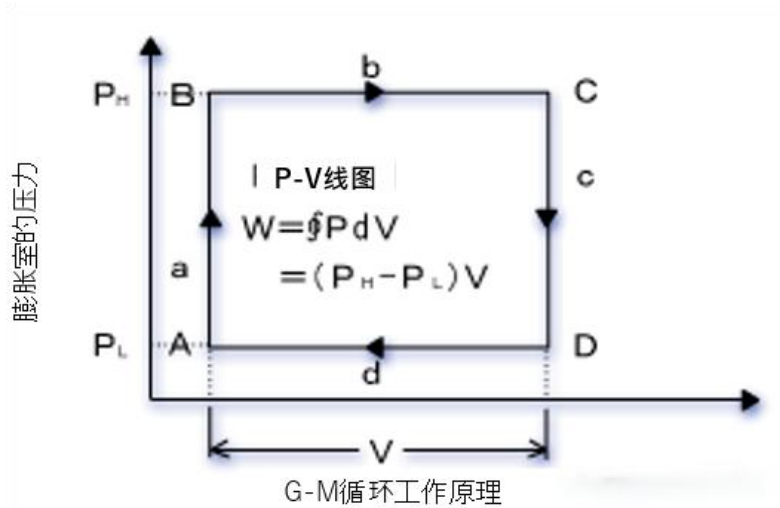
↓

(d) 置换器按下并冷却，氦气一边被蓄冷器冷却，一边被转移到室温部分。

↓

返回 A，一个循环完成。

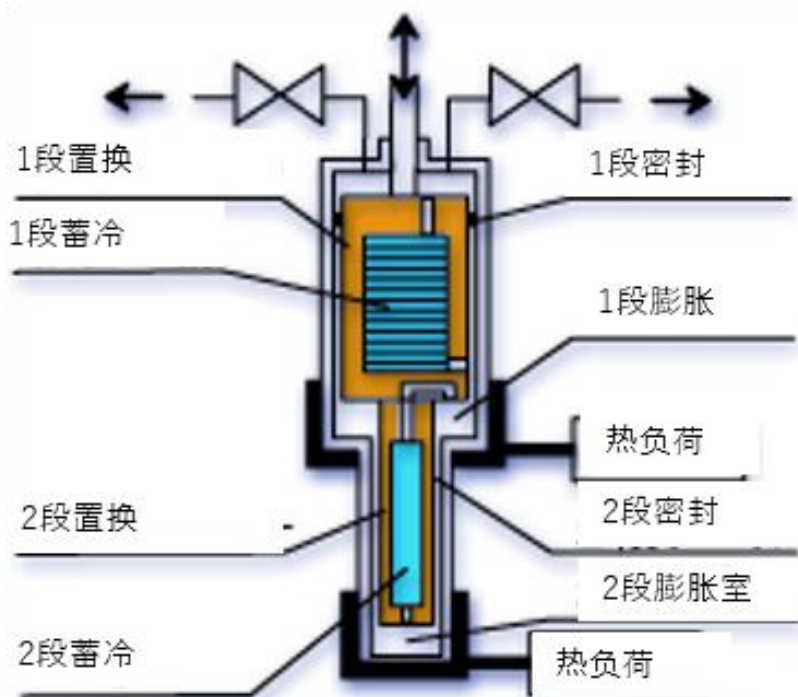




如同这样，理想的 G-M 循环 P-V 曲线是正方形的，1 个循环的周期为 t 秒的话，理想冷冻能力

Q_{ideal} 通过以下公式求得

$$Q_{ideal} = W/t$$



实际的冷冻机为可获得 15K 以下极低温的 2 段式构造。另外，为了简化结构，蓄冷器内置在了置换器的内部，与置换器一体化集成。1 段和 2 段的密封件没有压差，密封件的负荷很轻，使用寿命长可靠性高。