

热分离器内的流动*

俞 鸿 儒

(中国科学院力学研究所)

摘 要

本文首次阐述了热分离器内的不定常流动过程。描绘出简化波图，根据波图计算出各流动区域的气流参数及理想冷冻效率。详细讨论了提高理想冷冻效率的方法。

一、前 言

利用气体膨胀致冷的方法可以分为两类：不作外功的膨胀及作外功的膨胀。前一类方法只需在连续流动的管路中装入一个简单的节流阀。这种方法操作维护亦非常方便，只是致冷效率较低，在温度高或压力低的场合效率尤其低。后一类方法需通过膨胀机对外作功。目前常用的往复式或透平式膨胀机结构复杂，运转维护麻烦。特别是用于气体分离，如果气体在膨胀机中发生液化，液化后的二相流将损坏机件。因而常常要与节流阀联合工作。

七十年代中，法国 NAT 公司发展了一种新型致冷机——热分离器。按上述分类法，这种机器属于作外功的膨胀致冷，因而理想致冷效率与其他类型作外功的膨胀机相同，但其结构则简单得多。由于致冷部分无运动部件，因而具有抵抗二相流侵蚀的能力，这种机器特别适用于气体分离。日本三菱重工业公司引进 NAT 公司的技术，制造出用于化工厂尾气及石油油气分离回收装置。^[1,2] 国内的浙江大学^[3]、大连工学院及营口石油化工研究所^[4]亦研制这种新型致冷机。对机器的结构、制造工艺及性能改进做了大量工作。

热分离器实质上是一种波机器，内部流动很复杂。揭示这种流动规律对于提高热分离器的致冷效率以及完善其他性能将起重大作用。我们对热分离器内的流动进行了分析，在若干简化假定下，绘制出流动波图。根据波图计算各流动区域的气流参数及理想冷冻效率。

本文 1984 年 7 月 10 日收到。

* 谨以本文纪念母校校庆三十五周年。

二、热分离器的构造及工作原理

热分离器是利用气体压力能致冷的设备，从构造上可分为两大类：

1. 无转动部件的热分离器（见图1所示）

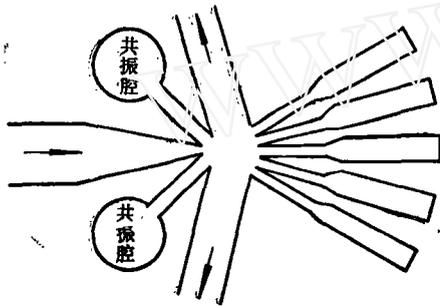


图1 无转动部件的热分离器

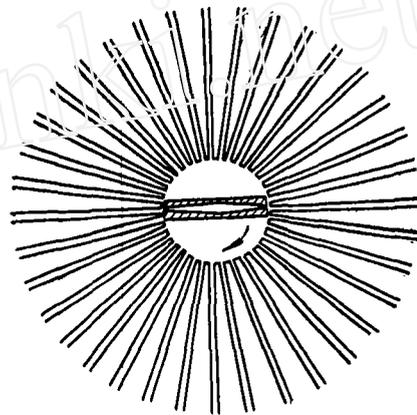


图2 具有转动气体分配器的热分离器

这类热分离器喷管流出的高速射流，籍装在喷管两侧的共振腔的脉动压力改变方向，使射流依次间隔射入各工作管（或称激波管段）。这类机器无转动部件，结构简单，维护方便。但充入与排出气体容易渗混，冷冻效率较低。

2. 具有转动的气体分配器的热分离器（见图2所示）

这类热分离器利用装在转动的气体分配器上的喷管，使喷出的射流连续改变方向，将气体依次间隔分配充入放射状布置在周围的各工作管。由于有转动部件，维护稍麻烦，但致冷效率高。

上述两类热分离器，除了气体分配方法不同外，内部流动过程及工作原理相同。

当气源内高压气体经过喷管膨胀，一方面压力降低，同时流速增加。这种高速气流间隔射入一端封闭的工作管。原在工作管内的气体与射入的气体之间的分界面，可以看作是一个无质量的活塞。此活塞向前运动，活塞前方将出现同方向运动的激波。激波扫过之处，该处气体被压缩并被加热。在喷管向工作管充气期间，激波对气体作功所需的能量，主要由气源供应。此时分界面后的气体只是经过等熵膨胀获得高速，静温虽亦降低，但因未对外作功，如果膨胀过程为定常过程，则对完善气体而言，气体总温不变。当喷射气流停止后，工作管开口截面与低压排气管接通并排气。在排气阶段，激波继续对气体作功的能量才由分界面与出口截面间的气体供应。这种对外作过功的气体，总温下降。

气体冷冻主要在排气阶段完成。排气终止后结束一个工作循环。被激波加热的气体通过管壁散热。当然亦可将被加热的气体取出加以利用。

三、热分离器的波图

热分离器一般都有许多根工作管。各工作管内的流动过程相同。现取一根工作管内的流动进行分析。

工作管内的流动，一次循环中可分为两个阶段：充气阶段及排气阶段。两个阶段管路示意如图3。

为了便于分析，作如下基本简化假定：

- 1) 气体服从完善气体定律，而且比热不变；
- 2) 忽略气体粘性；
- 3) 除被激波加热气体通过管壁散热外，忽略传热影响；
- 4) 忽略漏气及分界面混合影响；
- 5) 充气及排气的切换瞬时完成；
- 6) 充气开始前，工作管内气体静止，温度均匀。
- 7) 充气气体经喷管作定常膨胀。

工作管内完整的工作循环的流动波图如图4。根据波图可计算各流动区域内气流参数及理想冷冻效率。

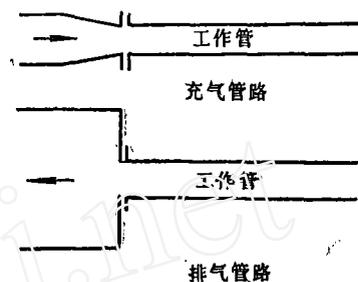


图3 充气及排气阶段管路示意图

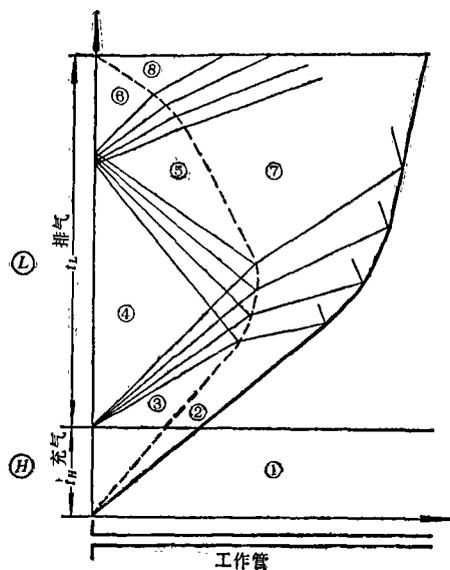


图4 热分离器工作管内流动波图

四、流动参数及理想致冷效率

1. 充气阶段流动参数

热分离器工作管周期性充气排气，但充气喷管连续或接近连续流动。一般膨胀压比下，

整个喷管流动为亚声速流, 只要采用简单的收缩喷管, ③区内将不出现非定常波。在高膨胀比下, ③区可为超声速流。若采用相适应的拉伐尔喷管, ③区内同样可不出现非定常波, 若③区内无非定常波, 则由一元定常流理论^[5,6] (对于具有转动气体分配器的热分离器, 忽略驱动气体分配所消耗的能量) 得出

$$\left(\frac{u_3}{a_{H_0}}\right)^2 = n \left[1 - \left(\frac{P_3}{P_{H_0}}\right)^{\frac{2}{2+n}} \right] \quad (1)$$

又由激波关系得出

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{(2+n)M_s^2 - 1}{1+n} \quad (2)$$

$$\frac{u_2}{a_1} = \frac{n}{1+n} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \quad (3)$$

上述三式加上分界面匹配条件 $P_2 = P_3$ 及 $u_2 = u_3$ 可求出

$$\frac{P_{H_0}}{P_1} = \frac{\frac{(2+n)M_s^2 - 1}{1+n}}{\left[1 - \frac{n}{(1+n)^2} \left(\frac{a_1}{a_{H_0}}\right)^2 \left(M_s - \frac{1}{M_s}\right)^2 \right]^{\frac{2+n}{2}}} \quad (4)$$

假设 $\alpha = T_{H_0}/T_1$, $\beta = P_L/P_1$, 则

$$\frac{P_{H_0}}{P_L} = \frac{\frac{(2+n)M_s^2 - 1}{1+n}}{\beta \left[1 - \frac{n}{\alpha(1+n)^2} \left(M_s - \frac{1}{M_s}\right)^2 \right]^{\frac{2+n}{2}}} \quad (5)$$

又由

$$M_s = \frac{u_3}{a_3} = \frac{u_2}{a_3} = \frac{u_2}{a_1} \frac{a_1}{a_{H_0}} \frac{a_{H_0}}{a_3} = \frac{n}{1+n} \left(M_s - \frac{1}{M_s} \right) \frac{1}{\alpha^{1/2}} \left(1 + \frac{M_s^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$M_s = \left[\left(\frac{1+n}{n} \frac{M_s}{M_s^2 - 1} \right)^2 \alpha - \frac{1}{n} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (7)$$

若给定 P_{H_0} , a_{H_0} , n 及 P_L , 又选定 α 及 β 值, 则可从 (5) 及 (7) 求出 M_s 及 M_3 。根据一元等熵流及激波关系, ②及③区全部流动参数均可确定。

2. 排气阶段流动参数

④区左边与排气管相通, 因此

$$P_4 = P_L \quad (8)$$

④区右边通过右传稀疏波与③区相接, 因此

$$\frac{a_4}{a_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{\frac{1}{2+n}} = \left(\frac{P_L}{P_2}\right)^{\frac{1}{2+n}} = \left(\frac{P_L}{P_1} \frac{P_1}{P_2}\right)^{\frac{1}{2+n}} = \left(\frac{\beta(1+n)}{(2+n)M_s^2 - 1}\right)^{\frac{1}{2+n}} \quad (9)$$

还有

$$u_4 - \alpha a_4 = u_3 - \alpha a_3 \quad (10)$$

$$u_4 = u_3 - na_3 \left(1 - \frac{a_4}{a_3} \right) = u_3 - na_3 \left\{ 1 - \left[\frac{\beta(1+n)}{(2+n)M_3^2 - 1} \right]^{\frac{1}{2+n}} \right\} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{u_4}{a_{H_0}} &= \frac{a_3}{a_{H_0}} \left\{ M_3 - n \left(1 - \left[\frac{\beta(1+n)}{(2+n)M_3^2 - 1} \right]^{\frac{1}{2+n}} \right) \right\} \\ &= \frac{M_3 - n \left\{ 1 - \left[\frac{\beta(1+n)}{(2+n)M_3^2 - 1} \right]^{\frac{1}{2+n}} \right\}}{\left(1 + \frac{M_3^2}{n} \right)^{1/2}} \end{aligned} \quad (12)$$

③区与④区之间的右传稀疏波追上分界面后, 透射一族右传稀疏波, 因此

$$u_7 - na_7 = u_2 - na_2 \quad (13)$$

在我们讨论的情况, 反射波为左传压缩波, 因此

$$u_5 + na_5 = u_4 + na_4 \quad (14)$$

分界面匹配关系有

$$u_5 = u_7 \quad (15)$$

$$P_5 = P_7 \quad (16)$$

又由等熵关系

$$\frac{a_5}{a_4} = \left(\frac{P_5}{P_4} \right)^{\frac{1}{2+n}} \quad (17)$$

$$\frac{a_7}{a_2} = \left(\frac{P_7}{P_2} \right)^{\frac{1}{2+n}} \quad (18)$$

联立(13)至(18)式, 可解出⑤区及⑦区气流状态参数 u_5 , a_5 , P_5 及 u_7 , a_7 , P_7 .

⑥区与④区一样与排气管相通, 因此有

$$P_6 = P_L = P_4 \quad (19)$$

又由等熵关系, 有

$$a_6 = a_4 \quad (20)$$

④区与⑤区之间的压缩波在工作管开口截面处反射稀疏波, 因此有

$$u_8 - na_8 = u_5 - na_5 \quad (21)$$

$$u_8 = u_5 - n(a_8 - a_6) = u_5 - n(a_5 - a_4) = u_4 - 2n(a_5 - a_4) \quad (22)$$

3. 理想冷冻效率

④区流动速度可正可负, 如果 $u_4 < 0$, 则一部分气体从④区排出, 其余从⑥区排出。如果 $u_4 \geq 0$, 则④区不排气, 全部气体必需从⑥区排出。更有甚者, 当 $u_4 > 0$, 以前排出的冷气还将返回④区, 然后从⑥区排出, 徒然作无用的流动, 增加摩擦及传热损失, 降低冷冻效率。在实际设计中应该避免发生。实际工作状态, 应选择在 $u_4 \leq 0$ 范围内。

从④区排出气的理想冷冻效率

$$\eta_4 = \frac{T_{H_0} - T_{40}}{T_{H_0} \left[1 - \left(\frac{P_L}{P_{H_0}} \right)^{\frac{2}{2+n}} \right]} = \frac{1 - T_{40}/T_{H_0}}{1 - (P_L/P_{H_0})^{\frac{2}{2+n}}}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{1 - \frac{\alpha_1^2 + u_1^2/n}{a^2 H_0}}{1 - (P_L/P_{H_0})^{\frac{2}{2+n}}} \frac{1 - \left(\frac{P_L}{P_{H_0}}\right)^{\frac{2}{2+n}} - \frac{1}{n} \left(\frac{u_4}{a H_0}\right)^2}{1 - (P_L/P_{H_0})^{\frac{2}{2+n}}} \\
 &= 1 - \frac{(u_4/a H_0)^2}{n \left[1 - \left(\frac{P_L}{P_{H_0}}\right)^{\frac{2}{2+n}} \right]} \quad (23)
 \end{aligned}$$

同理, 从⑥区排出气的理想冷冻效率

$$\eta_6 = 1 - \frac{(u_6/a H_0)^2}{n \left[1 - \left(\frac{P_L}{P_{H_0}}\right)^{\frac{2}{2+n}} \right]} \quad (24)$$

由于 $\alpha_6 > \alpha_4$, 从 (22) 式可以得出 $u_6 < u_4$ 。实际工作中 $u_1 \ll 0$, 则 $u_1^2 > u_4^2$ 。因此 η_6 低于 η_4 。

η_4 , 及 u_4/a_{H_0} 与 P_{H_0}/P_L 关系的数值结果绘于图 5。

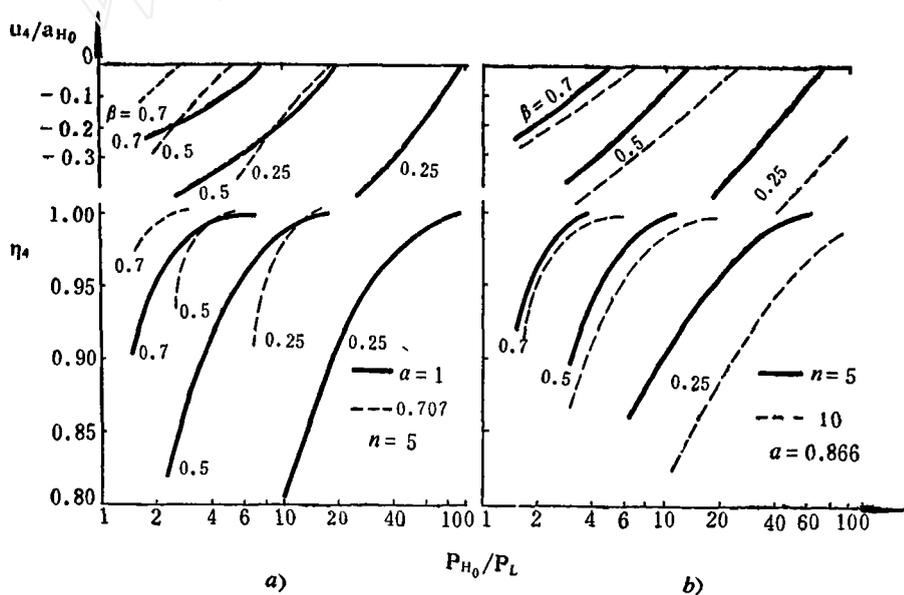


图 5 η_4 , u_4/a_{H_0} 与 P_{H_0}/P_L 关系曲线

五、讨 论

从图 5 计算曲线可以看出: 对于任何压力比 P_{H_0}/P_L , 只要选择适当的 $\alpha = T_{H_0}/T_1$ 及 $\beta = P_L^*/P_1$ 的数值, 都能达到高的理想冷冻效率。换句话说: 理想冷冻效率的高低在于控制 α 及 β 值的大小。

从物理上可以认为: $\alpha = T_{H_0}/T_1$ 值主要决定于工作管散热状况。如果气源滞止温度 T_{H_0} 较高, 冷却介质温度较低以及散热器设计制造完善, 则 α 值高。反之, α 值低。从图 5 中可以看到: α 值愈高, 则理想冷冻效率曲线平缓。当工作状态偏离设计点时仍能维持较

高效率。实际工作过程中, 散热状况愈佳, 则工作管管壁温度愈低, 冷气在工作管内流动时从管壁传入的热量愈少, 实际效率提高。从上述两方面来看, 强化工作管后段的散热对热分离器的工作都是有利的。

至于 $\beta = P_L/P_1$ 值, 我们可以从流动波图 (图 4) 作如下的分析: 在其他条件不变的情况下, 延长排气时间 t_L , 意味着分界面到达出口截面后仍继续排气, 下一次充气开始前工作管内气体量较上次减少, P_1 亦相应下降, 因此 β 值升高。反之, β 值降低。由此可以得出: $\beta = P_L/P_1$ 值受 $\varepsilon = t_L/t_H$ 值的控制。

从 (23) 或 (24) 式可以看出: 理想冷冻效率主要决定于 $(u_4/a_{H_0})^2$ 或 $(u_6/a_{H_0})^2$ 值的大小。当 $u_4 = 0$ 或 $u_6 = 0$ 时, 效率最高。但是要维持重复循环工作, 充入的气体必须全部排出。因此, 排气速度受相对排气时间的制约。相对排气时间愈长, 排气速度较低, 理想效率愈高。

前面曾经提到, 受激波加热过的气体可从工作管封闭端设法取出。这部分热气不仅可作他用, 而且排走这部分热气, 则充入气可留一部分在工作管内而无需全部排出。由于开口端排气量减少, 在其他条件不变时, 排气速度下降, 理想冷冻效率可提高。当然, 冷量亦相应减少。

从图 5b 还可以看到, 气体种类改变后 n 亦改变。 n 改变使工作条件亦引起改变。它表明: 热分离器不仅要根据 P_{H_0} , T_{H_0} , P_L 值的大小, 还要根据气体种类的不同进行设计。

本工作中, 忽略了气体粘性及传热影响。由于一般工作管都是细而长的圆管, 摩擦及传热影响相当严重。上述影响以及热分离器尺寸及流量的研究结果将陆续发表。

本工作是在徐寿霖建议下进行的, 方曜奇提供了有关参考文献, 谨此致谢。

符 号 表

a : 声速;	u : 速度;	$M = u/a$: 马赫数;
x : 距离坐标;	n : 气体分子自由度;	$\alpha = T_{H_0}/T$: 温度比;
	$(n = \frac{2}{\gamma-1}, \gamma: \text{比热比})$	
$\beta = P_L/P_1$: 压力比;	P : 压力;	$\varepsilon = t_L/t_H$: 时间比;
T : 温度; (K)	t : 时间;	
下标: 1, 2, ..., 7, 8, H, L; 流动区域, 参看图 4;		
0: 滞止状态; S: 激波。		

参 考 文 献

- [1] 間宮林栄, 新原理によるガス冷却装置とろの応用, 石油と石油化学, 21 (1977), №3.
- [2] 間宮林栄, ガス冷却分離装置の化学工業の利用, 化学装置, 1977, 2.
- [3] 邵 件等, 回收气体压力能的转动喷嘴式膨胀机研究, 能源工程, 1981, 2.
- [4] 黄志达、刘洪奎等, 新型节能装置——透平式热分离机的研究, 大连工学院学报, 22(1983), №3.
- [5] Emmons, W., *Fundamental of Gas Dynamics*, Oxford University press, 1958.
- [6] Ruclinger, G., *Nonsteady Duct Flow*, Dover Publications Inc, 1969.

Flow in Thermal Separator

Yu Hongru

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

The process of nonsteady flow in a thermal separator is explained for the first time. A simplified wave diagram is constructed which provides a scheme to calculate the flow parameters in various regions and the ideal freezing efficiency. The methods to raise freezing efficiency are discussed in detail.