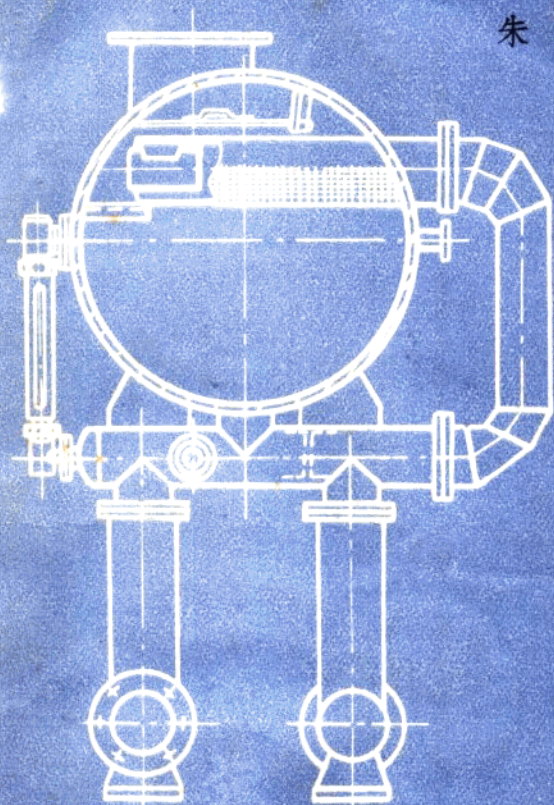


朱炳藩 編著



建筑工程出版社

# 蒸气喷射冷冻机

## 序 言

蒸汽喷射冷冻机是一种结构簡單、造价低廉而又不直接消耗机械动力和电力的制冷設備，在空气調节工程、降溫工程和其他工业方面都有其广泛的应用价值。处于我国工农业大跃进的形势下，各方面对这种設備的需要已日漸扩大，但截止到目前，我国还缺乏这方面的專門書籍，国外有关这方面的資料也不够系統，这就不能更好地来推广这样一种既經濟又实用的制冷設備。据此情况，作者特就現有的材料，利用业余时间編写成本書，試图对蒸汽喷射冷冻机作一扼要、系統的介绍，俾使讀者通过本書对它有个比較全面的概念，并取得有关蒸汽喷射冷冻机的設計、制造和操作使用等方面的一般知識。

作者水平有限，書中錯誤之处在所难免，热忱地希望有关这方面的專家們予以批評、指正，以便再版时加以补充和修訂。

編 著 者

1959年2月

# 目 录

## 序言

- 一、緒論..... ( 1 )
  - 二、工作原理..... ( 2 )
  - 三、实际过程..... ( 3 )
  - 四、实际过程的热工計算..... ( 10 )
    - (一) 实际过程的偏差 ..... ( 10 )
    - (二) 效率計算 ..... ( 11 )
    - (三) 計算举例 ..... ( 15 )
  - 五、噴射器..... ( 21 )
    - (一) 噴射器的工作原理及构造 ..... ( 21 )
    - (二) 噴射器計算 ..... ( 24 )
    - (三) 噴射器計算举例 ..... ( 39 )
  - 六、冷凝器..... ( 44 )
  - 七、蒸发器..... ( 49 )
  - 八、运行特点..... ( 51 )
  - 九、制冷量調节..... ( 54 )
- 附录:
- 一、蒸汽噴射冷冻机的热平衡图解..... ( 56 )
  - 二、蒸汽噴射冷冻机工作不稳定的原因..... ( 60 )
  - 三、苏联5Э型蒸汽噴射冷冻机介紹..... ( 72 )
- 参考書籍..... ( 85 )

## 一、緒 論

用水作为冷媒具有很大的优越性。首先，水的汽化热值很高，如以  $0^{\circ}\text{C}$  为例，约为氨的 2 倍，二氧化碳的 10 倍。其次，水是无毒的，也没有危险性，而且价格低廉，到处都有。但是，它也有很大的缺点，从表 1 可以看出，要得到低温蒸汽，必需创造十分低的压力条件，这样低的压力是一般活塞式冷冻机所不能达到的。此外，低温蒸汽的比容也十分大，如用活塞式冷冻机，则该机必须造得非常庞大，这样实际上是有困难的。目前只有使用蒸汽喷射冷冻机才能满足上述那些苛刻的条件。

低温饱和蒸汽性质表 表 1

温 度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	压 力		比 容 (公尺 <sup>3</sup> /公斤)	温 度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	压 力		比 容 (公尺 <sup>3</sup> /公斤)
	(公厘 水银柱)	(公斤/ 公分 <sup>2</sup> )			(公厘 水银柱)	(公斤/ 公分 <sup>2</sup> )	
+20	17.50	0.0238	57.8	± 0	4.58	0.0062	207
18	15.50	0.0211	65.1	- 2	3.96	0.0054	244
16	13.60	0.0186	73.2	4	3.41	0.0046	282
14	12.00	0.0163	83.0	6	2.91	0.0040	332
12	10.50	0.0143	93.7	8	2.52	0.0034	388
+10	9.20	0.0125	106.0	-10	2.16	0.0029	451
8	8.00	0.0109	120.0	12	1.85	0.0025	526
6	7.00	0.0095	138.0	14	1.57	0.0021	615
4	6.09	0.0083	158.0	16	1.34	0.0018	722
2	5.28	0.0072	181.0	18	1.13	0.0015	848
± 0	4.58	0.0062	207.0	-20	0.94	0.0013	995

蒸汽喷射冷冻机不仅能用廉价的水作为冷媒，而且构造简单，造价低廉，维护和使用也较容易。因此，它的发展前途将是很大的，我们对它的性能和构造进行研究、了解也就成为十分必要了。

## 二、工作原理

如图1所示，高温高压蒸汽——以后通称为工作蒸汽——由锅炉送到喷嘴，工作蒸汽从喷嘴喷出时，速度很高，位能变成动能，产生真空，蒸发器中的水就蒸发成为低温低压蒸汽，当其被引入混合室时即从周围水中吸收热量，成为低温水。此低温水即为冷媒，作为降温或其他需用。低温蒸汽与工作蒸汽在混合室内混合后即进入扩压器，在扩压器中，速度下降，动能又变成位能，压力提高，而后送到冷凝器中，用冷却水将其冷凝成水，一部分用水泵送回锅炉，小部分通过节流阀进入蒸发器再行蒸发。

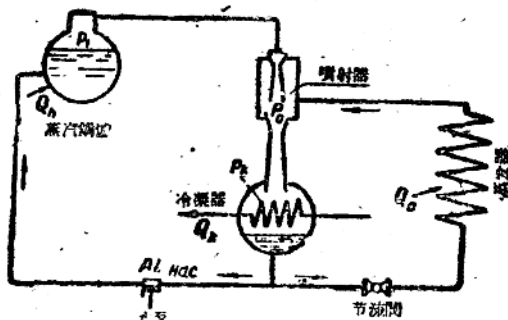


图1 蒸汽喷射冷冻机简图

这种过程的理論循环，见图 2 中  $T-S$  图上所示。

工作蒸汽由状态 1 絕热膨胀至喷嘴出口处的状态 2，与蒸发器引出的低温蒸汽 4 混合成为混合蒸汽 6，然后在扩压器中絕热压缩至 7，又等温等压冷凝至 8，一部分經水泵改变至 8' 后进入鍋爐，加热后回至状态 1；另一部分經节流閥变成 9 到蒸发器中去蒸发。回到状态 4。

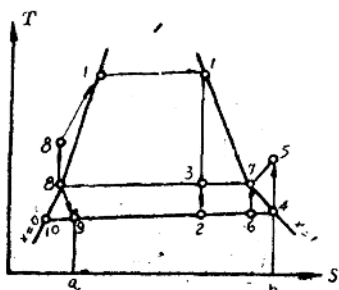


图 2 蒸汽喷射冷冻机的理論循环

图中 4—5 为冷媒蒸汽的絕热压缩过程，2—3 为工作蒸汽的絕热压缩过程。由此可见，冷媒的整个循环为 4—5—7—8—9—4，面积 4—5—7—8—10—4 为所消耗的功，面积 a—b—4—9—a 为冷媒所吸收的热量，即制冷量。很明显，这种循环与一般活塞式冷冻机并无区别。

工作蒸汽的循环为 1—3—8—8'—1'—1，此循环圈所包括的面积亦即工作蒸汽所做的功。这个循环是活塞式冷冻机所沒有的，这也是蒸汽喷射冷冻机的特点。

理論上，面积 1—3—8—8'—1'—1 应等于面积 4—5—7—8—10—4，但实际上并不相等，因为喷射器的損失很大，效率很低。

### 三、实际过程

实际用在空气調节工程上的蒸汽喷射冷冻机通常包括图 3 所示的几个主要部分。

从空气调节室循环回来的冷媒水混同一部分从冷凝器来的冷凝水用喷嘴喷入蒸发器。在外面绝热的蒸发器内保持着与需要水温相适应的低气压, 于是一部分水即在低温下蒸发, 并未蒸发的水中夺取蒸发所需的热量, 而降低其温度。集结在蒸发器下部的低温水, 用水泵送到空气调节室去冷却空气。

蒸发器中的水位是用浮球阀来保持平衡。

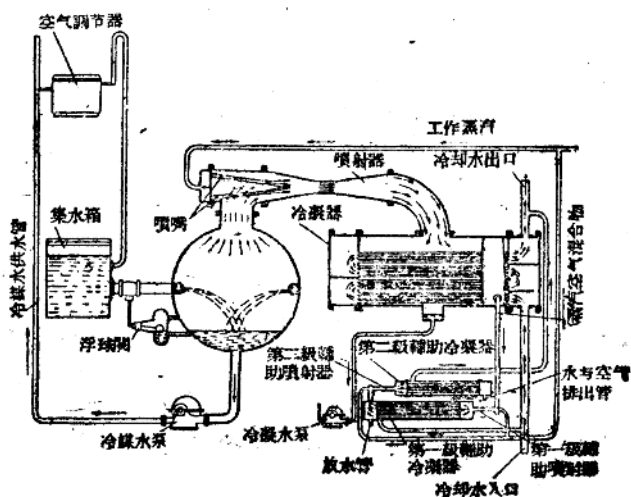


图 3 蒸汽喷射冷冻机简图

工作蒸汽由锅炉(或汽轮机等蒸汽机械)引入喷射器, 并以很高的速度从喷嘴喷出, 同时将蒸发器中的低温蒸汽吸走。两种蒸汽在混合室混合后即进入扩压器。压力提高后的蒸汽即通入冷凝器中, 被冷却水冷凝成水。冷凝水用冷凝水泵排出, 一部分回至锅炉; 一部分经过节流阀进入蒸发器。

在冷冻机起动时，有一部分空气被吸入系统内，此部分空气必须排除。为了提高冷冻机的效率，减少工作蒸汽的消耗量，喷射器的压缩比都有一定的限制。一般规定不超过7—8。因此，在冷凝器中的压力还是很低，仍旧有95—96%的真空度（即绝对压力只有40—50公厘水银柱左右）。在这样低的压力下，空气不可能排除，必须另用二级辅助蒸汽喷射器和冷凝器。空气和蒸汽混合体由第一级辅助喷射器将压力升高至0.25绝对大气压，再由第二级升至大气压力，于是，蒸汽就在冷凝器中冷凝，空气即通过排气管排入大气中。通常，辅助喷射器的耗汽量约为工作蒸汽总消耗量的10%。在大型冷冻机中，如用表面式冷凝器，每1000千卡制冷量的耗汽量约为0.1公斤，如用混合式冷凝器，则每1000千卡制冷量的耗汽量约为0.2公斤。

工作蒸汽的压力与蒸汽消耗量有着直接的关系，因之，必须慎重选择，使蒸汽消耗量达到最合理的程度。从图4和图5可以看出，最经济的压力约为6—8绝对大气压。

工作蒸汽的最低压力为1.10—1.15绝对大气压。采用过热度很大的过热蒸汽是不经济的，它将增加工作蒸汽的消耗量和冷却水量，并增大了冷凝器的尺寸。

当工作蒸汽干度小于0.98时，应在喷射器前加装水分离器。

工作蒸汽从喷嘴喷出时的速度为1070—1370公尺/秒。

蒸汽喷射冷冻机通常装有3—8个主喷射器，一方面是为了缩小喷射器的尺寸；另一方面也便于调节冷冻机的制冷量。

冷凝器和蒸发器，在大多数情况下，是几个（2—4个）喷射器合用的。



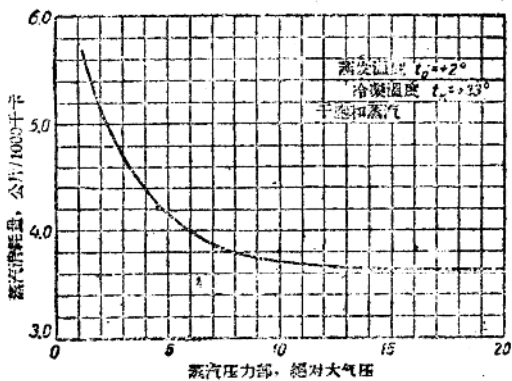


图 4 喷射器前之蒸汽压力与每1000千卡制冷量所消耗的蒸汽量的关系

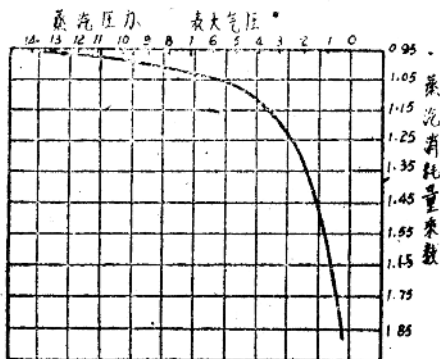


图 5 喷射器前之蒸汽压力与蒸汽消耗量系数的关系

蒸发器中的水温应根据需要而定，但同时也要考虑蒸汽消耗量问题。水温越低则蒸汽消耗量越大(见图6和表2)。例如， $0^{\circ}\text{C}$ 水的蒸汽消耗量要比 $10^{\circ}\text{C}$ 水大一倍多(见图6)。因此，在条件允许的情况下，应尽可能采取较高的水温。

根据水温即可从表1查出蒸发器中所应保持的压力。

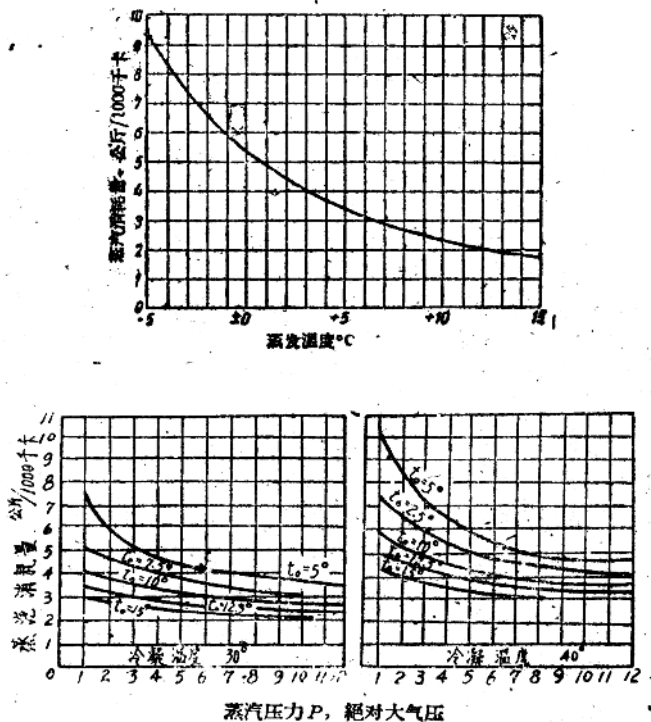


图6 蒸汽压力和蒸发温度与蒸汽消耗量之间的关系  
(图中 $t_0$ 为蒸发温度)

每1000千卡/时制冷量所需之工作蒸汽消耗量(公斤)

与喷射器前蒸汽压力之关系

表 2

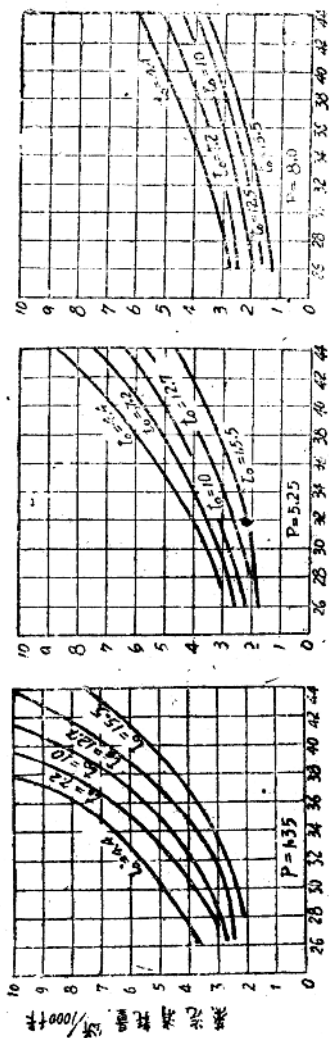
工作蒸汽 压力 (绝对 大气压)	冷凝温度 +30°C				冷凝温度 +40°C			
	蒸发温度 (°C)				蒸发温度 (°C)			
	+5	+7.5	+10	+12.5	+5	+7.5	+10	+12.5
1.00	7.14	5.13	4.03	3.37	10.87	7.58	5.95	4.93
1.25	6.67	4.90	3.91	3.29	10.10	7.25	5.68	4.74
1.50	6.21	4.72	3.82	3.24	9.34	6.85	5.47	4.61
1.75	5.95	4.61	3.73	3.20	8.77	6.71	5.35	4.50
2.00	5.65	4.50	3.67	3.14	8.40	6.49	5.21	4.39
2.50	5.35	4.31	3.56	3.09	7.69	6.10	5.03	4.26
3.00	5.13	4.17	3.48	3.01	7.09	5.75	4.81	4.13
4.00	4.65	3.92	3.35	2.91	6.33	5.29	4.50	3.91
5.00	4.31	3.68	3.18	2.78	5.81	4.98	4.31	3.76
6.00	4.05	3.50	3.04	2.67	5.41	4.70	4.11	3.61
8.00	3.64	3.20	2.82	2.51	4.90	4.29	3.79	3.36
10.00	3.45	3.03	2.68	2.40	4.61	4.05	3.59	3.22
21.00	3.39	2.99	2.64	2.34	4.50	3.97	3.52	3.15

冷凝器中冷却水温度的提高即引起冷凝压力和压缩比的增大,从而使蒸汽消耗量加多(见图7)。冷却水的出水温度约比蒸汽冷凝温度低2.5—6°C。冷却水的温升一般为6°C左右。

蒸汽喷射冷冻机的冷却水消耗量约比活塞式冷冻机大3—4倍左右。原因是不仅要冷凝冷媒蒸汽而且还要冷凝工作蒸汽。

蒸发器中的蒸发水不应用生水补充,否则杂质增加,会影响效率。

抽蒸发器中冷媒水用的水泵必需有很高的吸程。如水泵装在与蒸发器支架底脚的同一水平上,考虑到支架尚有1公尺



冷却温度, °C

(P 为蒸汽压力, 以绝对大气压表示)

图 7 在各种蒸发温度下蒸汽消耗量与冷却温度的关系

左右的高度，則水泵吸程應不少於 9 公尺。若水泵的吸程沒有這樣高，那末應將水泵位置降低，否則水就吸不出來。

也可以採取間接冷卻——在蒸發器中冷卻兩次冷媒——的辦法，這樣，水泵的吸程就不受限制。

## 四、實際過程的熱工計算

### (一) 實際過程的偏差

如圖 8 所示，實際過程和理論過程並不一致，原因是：

(1) 由於在膨脹和壓縮時，動能損失和磨擦損失的關係，熱能為蒸汽所吸收，干度增加，熵值就變大。因此，實際上工作蒸汽的膨脹和混合蒸汽的壓縮都非絕熱過程。

(2) 從蒸發器蒸發出來的冷媒蒸汽實際上並不完全干燥，一般干度只有 0.95。因此，冷媒蒸汽的初狀態並非在點

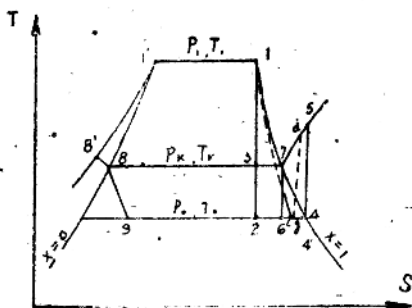


圖 8

實綫—理論過程；點綫—實際過程

4 而在点 4'。除非在蒸发器出口处加装消水器。但这种做法并未被广泛采用，因为它增加了流动阻力。

(3) 实际冷冻机的工作蒸汽的消耗量要比冷媒蒸汽量大得多，因此，混合结果的状态参数很接近工作蒸汽膨胀过程的终点状态，如图 8 中的  $g$  点与  $c$  点很接近，而不是在理想过程中的 6 点。

## (二) 效率计算

实际循环的制冷系数应为：

$$\varepsilon = \left( \frac{G_0}{G_1} \right)_{\text{实际}} \cdot \frac{q_0}{q_1'} \quad (1)$$

式中： $G_0$ ——冷媒蒸汽的吸入量，公斤/时；

$G_1$ ——工作蒸汽的消耗量，公斤/时；

$q_0 = i_0'' - i'$ ——每公斤冷媒蒸汽的制冷量，千卡/公斤；

$q_1' = i_1'' - i'$ ——每公斤工作蒸汽的耗热量，千卡/公斤；

$i_0''$ —— $T_0$ 时的冷媒蒸汽热焓，千卡/公斤；

$i_1''$ —— $T_1$ 时的工作蒸汽热焓，千卡/公斤；

$i'$ ——送入锅炉和蒸发器中的水的热焓，即  $T_K$  时的热焓，相当于图 8 中的点 8，千卡/公斤。

在理想的蒸汽喷射冷冻机中，工作蒸汽和冷媒蒸汽都实现卡诺循环。工作蒸汽的温度范围为  $T_1$  和  $T_K$ ，冷媒蒸汽的温度范围为  $T_K$  和  $T_0$ 。点 7 应在 1—4 的连接线上（见图 9）。

因之，制冷系数可用下式表示：

$$\varepsilon_c = \frac{Q_0}{Q_1} = \frac{T_0}{T_K - T_0} \cdot \frac{T_1 - T_K}{T_1} = \frac{T_0}{T_1} \cdot \frac{T_1 - T_K}{T_K - T_0} \quad (2)$$

式中： $Q_1$ ——温度为  $T_1$  ( $^{\circ}K$ ) 时的耗热量，千卡/公斤；

$Q_0$ ——温度为  $T_0$  ( $^{\circ}K$ ) 时的制冷量, 千卡/公斤。

与卡诺循环相比, 实际冷冻机的效率为:

$$\eta_c = \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \quad (3)$$

如图 9 所示, 工作蒸汽由  $P_1$  绝热膨胀至  $P_K$ , 每公斤蒸汽所作的功  $AL'_1 = i_1 - i_3$  千卡/公斤。同时, 冷媒蒸汽由  $P_0$  压缩至  $P_K$ , 每公斤需功  $AL'_0 = i_5 - i_4$  千卡/公斤 ( $A$  为功的热当量, 等于  $\frac{1}{426.4}$  千卡/公斤-公尺)。

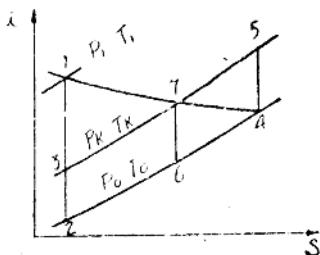


图 9

在冷冻机无损失的情况下,

$$G_1 \cdot L'_1 = G_0 \cdot L'_0 \quad (4)$$

由此得

$$\frac{G_1}{G_0} = \frac{L'_0}{L'_1} \quad (5)$$

但实际冷冻机有很大的损失, 它只利用了一部分工作蒸汽的膨胀功  $\eta'_1 \cdot L'_1$ , 而冷媒蒸汽所需的压缩功却提高至  $\frac{L'_0}{\eta'_0}$ 。

因此, 上式关系在实际冷冻机中应写成:

$$\eta'_1 \cdot G_{1\text{实际}} \cdot L'_1 = G_{0\text{实际}} \cdot \frac{L'_0}{\eta'_0} \quad (6)$$

喷射器的总效率  $\eta' = \eta'_1 \cdot \eta'_0$ , 因此

$$\eta' = \frac{G_0 \text{实际} \cdot L_0'}{G_1 \text{实际} \cdot L_1'} = \frac{\frac{L_0'}{L_1'}}{\left(\frac{G_1}{G_0}\right) \text{实际}}$$

$$= \frac{\frac{G_1}{G_0}}{\left(\frac{G_1}{G_0}\right) \text{实际}} = \frac{\left(\frac{G_0}{G_1}\right) \text{实际}}{\frac{G_0}{G_1}} \quad (7)$$

用这样的公式来计算喷射器的效率还不够准确。因为，事实上工作蒸汽并非从 $P_1$ 膨胀到 $P_2$ ，而是膨胀到 $P_0$ ，与冷媒蒸汽混合后，才压缩至 $P_2$ 。所以，从 $P_0$ 压缩至 $P_2$ 的蒸汽量也不是 $G_0$ ，而是 $G_0 + G_1$ 。故在无损失的情况下，热功平衡式应写成：

$$G_1 \cdot L_1 = (G_0 + G_1) \cdot L_0,$$

$$\frac{L_1}{L_0} = \frac{G_0 + G_1}{G_1} = \frac{t_1 - t_2}{t_7 - t_6} \quad (8)$$

对于实际冷冻机，则应写成：

$$\eta_1 \cdot G_1 \text{实际} \cdot L_1 = (G_0 + G_1) \text{实际} \cdot \frac{L_0}{\eta_0} \quad (9)$$

令喷射器的总效率  $\eta = \eta_1 \cdot \eta_0$ ，则

$$\eta = \frac{\frac{L_0}{L_1}}{\left[\frac{G_1}{(G_0 + G_1)}\right] \text{实际}} = \frac{\frac{G_0}{(G_0 + G_1)}}{\left[\frac{G_1}{(G_0 + G_1)}\right] \text{实际}}$$

$$= \frac{\left(\frac{G_0}{G_1}\right) \text{实际} + 1}{\frac{G_0}{G_1} + 1} \quad (10)$$



如  $\eta$  为已知，则上述公式即可用来计算实际工作蒸汽的消耗量。

$$\text{从上式得 } \eta \left( \frac{G_0}{G_1} + 1 \right) = \left( \frac{G_0}{G_1} \right)_{\text{实际}} + 1$$

$$\text{因此 } \left( \frac{G_0}{G_1} \right)_{\text{实际}} = \eta \left( \frac{G_0 + G_1}{G_1} \right) - 1$$

$$= \eta \left( \frac{L_1}{L_0} \right) - 1$$

$$= \eta \left( \frac{i_1 - i_2}{i_7 - i_6} \right) - 1$$

$$= \frac{\eta(i_1 - i_2) - (i_7 - i_6)}{i_7 - i_6}$$

$$\therefore \left( \frac{G_1}{G_0} \right)_{\text{实际}} = \frac{i_7 - i_6}{\eta(i_1 - i_2) - (i_7 - i_6)} \quad (11)$$

$\eta$  值通常为 0.40—0.44。

每公斤冷媒蒸汽的制冷量可用下式计算：

$$q_0 = i_4 - [(1-x)r] - i_9 \text{ 千卡/公斤} \quad (12)$$

式中： $i_4$ ——冷媒蒸汽的热焓，千卡/公斤；

$x$ ——冷媒蒸汽的干度；

$r$ ——冷媒蒸汽的汽化潜热，千卡/公斤；

$i_9$ ——进入蒸发器中的水的热焓，千卡/公斤（见图8）。

每1000千卡制冷量所需的冷媒蒸汽公斤数  $g_0 = \frac{1000}{q_0}$ 。

因此，每1000千卡制冷量所消耗的工作蒸汽量即可用下式求得

$$g_1 = \frac{i_7 - i_6}{\eta(i_1 - i_2) - (i_7 - i_6)} \cdot \frac{1000}{q_0} \text{ 公斤/1000千卡} \quad (13)$$