

研究简报

多级蒸汽压缩制冷循环的节能原理

THE PRINCIPLE OF ENERGY CONSERVATION IN MULTI-STAGE COMPRESSION REFRIGERATION CYCLE

王金庆 葛茂泉

(上海水产大学食品学院, 200090)

王秀芬

(上海鱼品厂冷冻车间, 200090)

WAN Jin-Qing, Ge Mao-Quan

(College of Food Science, SFU, 200090)

WANG Xiu-Fen

(Refrigeration Workshop, Shanghai Fish
Product Factory, 200090)

关键词 多级蒸汽压缩制冷循环, 节能

KEYWORDS multi-stage compression cycle, energy conservation

中图分类号 TB615

在制冷循环的实际应用中,多级压缩制冷系统主要用于制取低温。它有两大大优点:一是提高压缩机的输气系数,增加制冷量;二是降低压缩机的排温,改善润滑油工作条件,保证机器正常运转[孙光三等 1987,吴业正和韩宝琦 1995]。就是说多级压缩制冷系统有利于提高压缩机的经济性及其运转的安全可靠性。但是,就理论上而言,对不考虑压缩机输气系数影响的理论制冷循环,多级压缩制冷循环的经济性是否也会提高,理论上能否给予证明,在公开发表的文献资料中,尚研究甚少。本文提出多级蒸汽压缩制冷循环的节能原理,对于不完全中间冷却的多级压缩制冷循环,在 n 级压缩制冷循环中再进行一次节流,得出后者的COP值大于前者的COP值的结论,并从理论上得到证明,为其实际应用提供了理论基础。

1 依据

设图1所示的 n 级压缩不完全中间冷却制冷循环和图2所示的 $n+1$ 级压缩不完全中间冷却制冷循环两个制冷循环,并且有:①两个循环中,都是1kg的制冷剂循环量(流经冷凝器)。②两个循环有相同的冷凝压力与蒸发力。③两个循环中,冷凝器出口后,从第一次节流,至第 $(n-1)$ 节流,每次节流后制冷剂的状态相同。④ $(n+1)$ 级压缩制冷循环,是在 n 级压缩制冷循环

中的第 n 次节流中又增加了一次节流。四个限定条件, 求证 $(n+1)$ 级压缩制冷循环中的 COP 值大于 n 级压缩制冷循环的 COP 值。

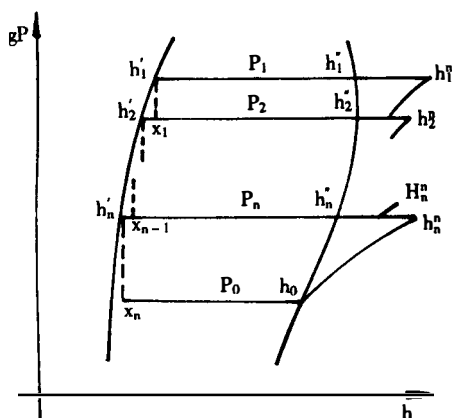


图1 n 级压缩制冷循环

Fig. 1 n -stage compression refrigeration cycle

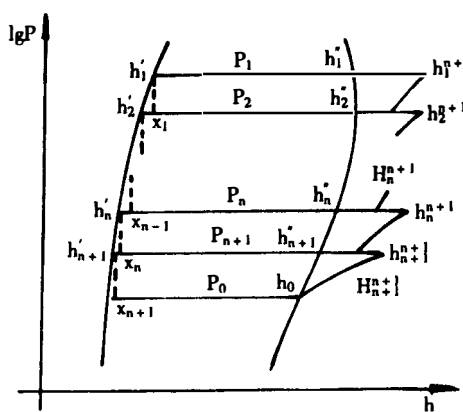


图2 $(n+1)$ 级压缩制冷循环

Fig. 2 $(n+1)$ -stage compression refrigeration cycle

注: 上两图中, P_0 —蒸发压力; P_1 —冷凝压力; P_i —制冷剂每次节流后的压力; h_i' 、 h_i'' —制冷剂在 P_i 压力下饱和液体焓与饱和汽焓; h_0 —蒸发器出口制冷剂的焓; h_n'' — n 级压缩制冷循环在 p_i 压力下, 压缩机出口焓; h_{n+1}'' — $(n+1)$ 级压缩制冷循环在 p_i 压力下, 压缩机出口焓; H_n'' — n 级压缩制冷循环在 p_i 压力下, 制冷剂的饱和蒸汽与压缩机出口蒸汽混合后的焓; H_{n+1}'' — $(n+1)$ 级压缩制冷循环在 p_i 压力下, 制冷剂饱和蒸汽与压缩机出口蒸汽混合的焓; n —压缩级数; x —制冷剂干度

1.1 两个循环制冷量的比较

$$n \text{ 级压缩制冷循环制冷量: } q_n = (h_0 - h'_n)(1 - x_1)(1 - x_2) \cdots (1 - x_{n-1})$$

$$(n+1) \text{ 级压缩制冷循环制冷量: } q_{n+1} = (h_0 - h'_{n+1})(1 - x_1)(1 - x_2) \cdots (1 - x_{n-1})(1 - x_n)$$

$$\text{因为 } h'_n = (1 - x_n)h'_{n+1} + x_n h''_{n+1}$$

$$\text{所以 } q_{n+1} - q_n = (1 - x_1)(1 - x_2) \cdots (1 - x_{n-1}) [(h_0 - h'_{n+1})(1 - x_n) - (h_0 - h'_n)] \\ = (1 - x_1)(1 - x_2) \cdots (1 - x_{n-1}) x_n (h''_{n+1} - h_0)$$

$$\text{因为 } x_i < 1 \quad h''_{n+1} > h_0 \quad \text{所以 } q_{n+1} - q_n > 0 \quad \text{即 } q_{n+1} > q_n$$

1.2 两个循环的冷凝热量比较

$$n \text{ 级压缩制冷循环冷凝热量: } Q_n = h_1'' - h_1'$$

$$(n+1) \text{ 级压缩制冷循环冷凝热量: } Q_{n+1} = h_1''^{n+1} - h_1'$$

考察两个循环在 $p_n \sim p_0$ 区间, 压缩机进出口处制冷剂的焓值。

$$\text{因为 } H_{n+1}''(1 - x_1)(1 - x_2) \cdots (1 - x_{n-1}) = h''_{n+1}(1 - x_1)(1 - x_2) \cdots (1 - x_{n-1})x_n + \\ h_{n+1}''^{n+1}(1 - x_1)(1 - x_2) \cdots (1 - x_{n-1})(1 - x_n)$$

$$\text{所以 } H_{n+1}''^{n+1} - h_{n+1}''^{n+1} = x_n (h''_{n+1} - h_{n+1}''^{n+1}) < 0$$

$$H_{n+1}''^{n+1} < h_{n+1}''^{n+1}$$

因为 h_n^n 点位于 h_{n+1}^{n+1} 点所在等熵线上, h_n^{n+1} 点位于 H_{n+1}^{n+1} 点所在等熵线上, 且两个等熵线不相交,

所以 $h_n^{n+1} < h_n^n$

因为 $H_n^n(1-x_1)(1-x_2)\cdots(1-x_{n-2}) = h_n^n(1-x_1)(1-x_2)\cdots(1-x_{n-2})x_{n-1} + h_n^n(1-x_1)(1-x_2)\cdots(1-x_{n-2})(1-x_{n-1})$

$$H_n^{n+1}(1-x_1)(1-x_2)\cdots(1-x_{n-2}) = h_n^{n+1}(1-x_1)(1-x_2)\cdots(1-x_{n-2})x_{n-1} + h_n^{n+1}(1-x_1)(1-x_2)\cdots(1-x_{n-2})(1-x_{n-1})$$

所以 $H_n^{n+1} - H_n^n = [h_n^{n+1}x_{n-1} + h_n^{n+1}(1-x_{n-1}) - h_n^n x_{n-1} - h_n^n(1-x_{n-1})]$
 $= (1-x_{n-1})(h_n^{n+1} - h_n^n) < 0$

$$H_n^{n+1} < H_n^n$$

依次类推, $H_i^{i+1} < H_i^i$ $h_i^{i+1} < h_i^i$

所以 $Q_{n+1} - Q_n = (h_1^{n+1} - h_1') - (h_1^n - h_1')$
 $= h_1^{n+1} - h_1^n < 0$ 即 $Q_{n+1} < Q_n$

1.3 两个循环压缩功比较

n 级压缩制冷循环压缩功: $W_n = Q_n - q_n$

$(n+1)$ 级压缩制冷循环压缩功: $W_{n+1} = Q_{n+1} - q_{n+1}$

所以 $W_{n+1} - W_n = [(Q_{n+1} - Q_n) + (q_n - q_{n+1})] < 0$
 $W_{n+1} < W_n$

1.4 两个循环能效比 COP 值比较

n 级压缩制冷循环 COP 值: $COP_n = q_n/W_n$

$(n+1)$ 级压缩制冷循环 COP 值: $COP_{n+1} = q_{n+1}/W_{n+1}$

因为 $q_n < q_{n+1}$ $W_n > W_{n+1}$

所以 $COP_{n+1}/COP_n = (q_{n+1}/q_n)(W_n/W_{n+1}) > 1$
 $COP_{n+1} > COP_n$

因此, $(n+1)$ 级压缩不完全中间冷却制冷循环比 n 级的节能。

2 结语

本文提出的多级蒸汽压缩制冷循环节能原理, 实际应用中, 虽然增加循环节流次数可以提高循环的经济性, 但同时也增加了投资。应综合考虑循环的经济性与系统的复杂性, 要作具体分析。

参 考 文 献

- 孙光三, 周兴禧, 周根南等. 1987. 制冷中的节能. 上海: 上海交通大学出版社. 50~52
 吴业正, 韩宝琦. 1995. 制冷原理与设备. 西安: 西安交通大学出版社. 77~78