

文章编号: 1671-6612 (2021) 02-267-05

螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环热力性能分析

田源 高飞

(四川省建筑设计研究院有限公司 成都 610000)

【摘要】 螺旋压缩膨胀制冷机是一种近似布雷顿循环的新型制冷机, 与布雷顿制冷循环相比, 其压缩过程更接近于等温压缩过程。首先提出了螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环, 其次采用数学理论计算方法就特定工况下螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环过程的热力性能和制冷系数与布雷顿循环进行比较研究。研究发现: 一定条件下, 得到相同制冷量时, 螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环比布雷顿循环节约13.4%的压缩功; 螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环的制冷系数明显大于布雷顿制冷循环的制冷系数; 随着制冷量的增大, 两种制冷循环的制冷系数均逐渐增大, 相同条件下螺旋压缩膨胀制冷循环的制冷系数比布雷顿制冷循环的制冷系数增加更明显。

【关键词】 螺旋压缩膨胀制冷机 制冷循环 热力性能研究

中图分类号 TB61/TH45 文献标识码 A

Thermal Performance Analysis of Refrigeration Cycle of Spiral Compression Expansion Refrigerator

Tian Yuan Gao Fei

(Sichuan Provincial Architectural Design and Research Institute Co., Ltd, Chengdu, 610000)

【Abstract】 The spiral compression expansion refrigerator is a new type of refrigerator similar to the Brayton cycle. Compared with the Brayton refrigeration cycle, the compression process is closer to the isothermal compression process. In this paper, the refrigeration cycle of the spiral compression expansion refrigerator is firstly proposed. Secondly, the theoretical calculation method is used to compare the thermal performance and refrigeration coefficient of the refrigeration cycle process of the spiral compression expansion refrigerator with the Brayton cycle under specific working conditions. The study found that: under certain conditions, when the same refrigeration capacity is obtained, the refrigeration cycle of the spiral compression expansion refrigerator saves 13.4% of the compression work compared to the Brayton cycle; the refrigeration coefficient of the refrigeration cycle of the spiral compression expansion refrigerator is significantly greater than that of the Brayton refrigeration cycle. With the increase of the cooling capacity, the refrigeration coefficients of the two refrigeration cycles are gradually increased. Under the same conditions, the refrigeration coefficient of the spiral compression expansion refrigeration cycle is more obvious than that of the Brayton refrigeration cycle.

【Keywords】 spiral compression expansion refrigerator; refrigeration cycle; thermal performance research

作者(通讯作者)简介: 田源(1994.07-), 男, 硕士, E-mail: tianyuanSADI@163.com

收稿日期: 2020-08-18

0 引言

螺旋压缩膨胀制冷机是一种近似布雷顿循环的新型制冷机^[1], 其在制冷机压缩过程设计中融合了冲压激波压缩技术和传统轴流式与离心式压缩机设计技术, 与常规制冷机压缩过程相比, 具有结

构简单、单级压比高、压缩效率高、膨胀功可回收、气流沿轴向流动、径向尺寸小和重量轻等优点^[2,3]。压缩过程中多级螺旋叶片逐级压缩再扩压的连续压缩方式, 一边压缩, 一边冷却, 相比于布雷顿循环更接近等温压缩过程, 消耗的压缩功更少。

为进一步推进螺旋压缩膨胀制冷机的开发利用，研究其制冷循环过程及其性能是很有必要的。本文首先介绍了传统布雷顿制冷循环及其工作过程，在传统制冷循环的基础上，提出了螺旋冲压压缩膨胀机制冷循环，对此制冷循环的工作过程及其性能特点进行详细阐述，并采用数学理论计算方法就特定工况下螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环过程的热力性能和制冷系数与布雷顿循环进行比较研究。

1 布雷顿制冷循环

布雷顿循环是一种以气体为工质的热力循环，理想的布雷顿循环包括等熵压缩、等压吸热、等熵膨胀和等压冷却四个工作过程，其 $T-s$ 图如图 1 (a) 所示，图中 1-2 为工质在压气机中的等熵压缩过程；2-3 为气体在回热器中的回热过程；3-4 为工质在热交换器中的定压加热过程；4-5 为工质在膨胀机中的等熵（可逆绝热）膨胀过程；5-6 为冷却排气过程；6-1 为工质在冷却器中的等压冷却过程。但是在实际工程中，由于机械各部件存在各种损失，使得实际布雷顿循环中压缩和膨胀过程都存在不可逆因素。实际布雷顿循环的 $T-s$ 图如图 1 (b) 所示，1-2 为不可逆绝热压缩过程；2-3 为回热器中的预热过程；3-4 为吸热过程；4-5 为不可逆绝热膨胀做功过程；5-6 为回热器中的放热过程；6-1 为冷却过程。过程 1-2' 和 4-5' 分别为与过程 1-2 和 4-5 相对应的等熵压缩和等熵膨胀过程，2-2' 和 1-1' 为等压线。

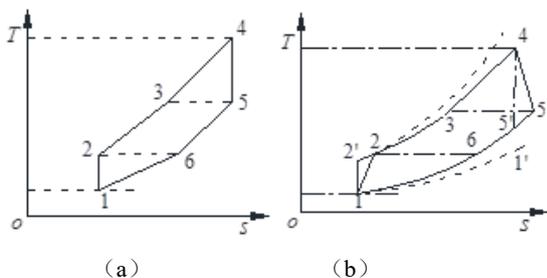


图 1 布雷顿循环 $T-s$ 图

Fig.1 Brayton cycle $T-s$ diagram

布雷顿制冷循环是布雷顿循环的逆过程，理论循环包括等熵压缩、等压冷却、等熵膨胀和等压吸热四个过程。布雷顿制冷循环按有无回热器可分为无回热的制冷循环和有回热的制冷循环。

1.1 无回热器的布雷顿制冷循环

无回热器的布雷顿制冷循环 $T-s$ 图如图 2 所示，图中 T_0 是制冷温度， T_c 是环境温度。在无回热器的制冷机中首先气体进入压缩机，在压缩机内，气体被压缩，压力由 P_0 升高到 P_c ，然后进入换热器中被冷却，放出热量 Q_c ，接着气体进入膨胀机，在膨胀机中气体实现绝热膨胀过程，使气体温度达到制冷温度，最后气体在冷箱中吸热，完成制冷，并进行下一次循环过程。气体在压缩机内的压缩过程和膨胀机中的膨胀过程均为可逆绝热过程，在冷却器中的冷却过程和吸热过程均是理想过程，整个过程没有压力损失，并且换热器中不存在端部温差。

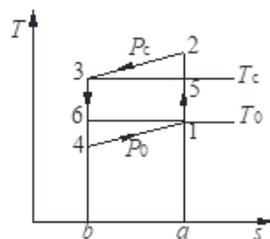


图 2 无回热布雷顿制冷循环 $T-s$ 图

Fig.2 $T-s$ diagram of Brayton refrigeration cycle without recuperation

1.2 有定压回热器的布雷顿制冷循环

有定压回热器的布雷顿制冷循环 $T-s$ 图如图 3 所示，理论布雷顿制冷循环过程在 $T-s$ 图中由 1'-2'-3-4'-5'-6-1' 表示。但是，在实际过程中，由于各种损失的存在，实际制冷循环热力过程与理论过程有很大的区别，压缩过程和膨胀过程都是不可逆的，也就是说并不是等熵过程，回热器中高低压气体间存在传热温差 ΔT ，压缩机压缩过程中存在进气损失，考虑到实际过程中以上几点，所以，布雷顿制冷循环的实际热力过程在 $T-s$ 图中为 1-2-3-4-5-6-1。

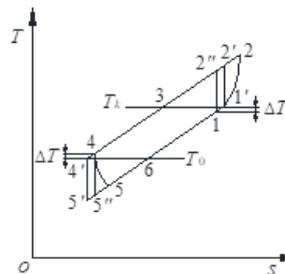


图 3 有回热布雷顿制冷循环 $T-s$ 图

Fig.3 $T-s$ diagram of Breton refrigeration cycle with recuperation

2 螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环

螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环是一种近似的布雷顿制冷循环, 但是由于螺旋压缩膨胀制冷机采用多级螺旋叶片逐级压缩再扩压的连续压缩方式, 螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环与布雷顿制冷循环相比更接近于等温压缩过程。结合布雷顿循环和螺旋压缩膨胀制冷机工作特点, 提出螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环过程的 $T-s$ 图, 如图 4 所示。

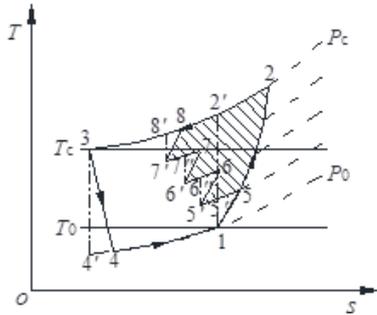


图 4 螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环 $T-s$ 图

Fig.4 $T-s$ diagram of refrigeration cycle of spiral compression expansion refrigerator

图中 1-2-3-4-1 表示布雷顿制冷循环过程, 其中 1-2 是不可逆压缩过程, 2-3 是等压冷却过程, 3-4 是不可逆膨胀过程, 4-1 是等压吸热过程。1-5-5'-6-6'-7-7'-8-3-4-1 表示螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环过程, 1-5 是气体在一级螺旋压缩叶片中的压缩过程, 5-5'是一级压缩冷却过程, 5'-6 是二级螺旋压缩叶片压缩过程, 6-6'是二级压缩冷却过程, 6'-7 是三级螺旋压缩叶片压缩过程, 7-7'是三级压缩冷却过程, 7'-8 是四级螺旋压缩叶片压缩过程, 8-3 是四级压缩冷却过程, 3-4 是不可逆膨胀过程, 4-1 是等压吸热过程。

3 螺旋压缩膨胀制冷循环性能分析

在对螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环进行热力性能分析之前, 我们先进行一些简化处理, 以便能更直观的说明螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环的特点。

- (1) 气体在螺旋压缩膨胀制冷机各级螺旋压缩叶片内压缩的压比相同;
- (2) 气体在制冷机中的散热过程贯穿于压缩过程的始终, 且散热是均匀的;
- (3) 气体在制冷循环中的冷却过程和吸热过程是等压过程;

(4) 螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环膨胀过程与布雷顿制冷循环膨胀过程相同;

(5) 气体在换热器内冷却和吸热过程不存在传热温差。

设定制冷机工作时环境压力 $P_a = 0.1 \text{ MPa}$, 环境温度 $T_a = 303 \text{ K}$, 工作压力 $P_0 = 0.1 \text{ MPa}$, $P_k = 0.7 \text{ MPa}$, 工作温度 $T_0 = 243 \text{ K}$, $T_k = 278 \text{ K}$, 压缩机绝热效率 $\eta_{sc} = 0.85$, 膨胀机绝热效率 $\eta_{se} = 0.75$ 。图 2.7 中状态点 1 的温度 $T_1 = T_0 = 243 \text{ K}$, 压力 $P_1 = P_0 = 0.1 \text{ MPa}$; 状态点 2 的温度 $T_2 = 416 \text{ K}$, 压力 $P_2 = 0.7 \text{ MPa}$; 状态点 3 的温度 $T_3 = T_k = 278 \text{ K}$, 压力 $P_3 = 0.7 \text{ MPa}$; 状态点 4 的温度 $T_4 = 203 \text{ K}$, 压力 $P_4 = P_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 。空气可视为定比热容的理想气体, $k = 1.4$ 。图 2.7 中其他各状态点的温度和压力可由以下计算式求得:

$$T_5 = T_1 \left(\frac{P_5}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1)$$

$$T_{i'} = T_i \left(\frac{P_{i'}}{P_i} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (i=5, 6, 7) \quad (2)$$

$$T_i = T_{(i-1)'} \left(\frac{P_i}{P_{(i-1)'}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (i=6, 7, 8) \quad (3)$$

$$\frac{P_5}{P_1} = \frac{P_6}{P_{5'}} = \frac{P_7}{P_{6'}} = \frac{P_8}{P_{7'}} \quad (4)$$

$$P_{i'} = P_i \quad (i=5, 6, 7) \quad (5)$$

$$P_8 = P_2 \quad (6)$$

制冷循环各状态点的其他参数使用 REFPROP 软件中的空气的温熵图 (见图 5) 查得。制冷循环各状态点主要参数如表 1 所示。

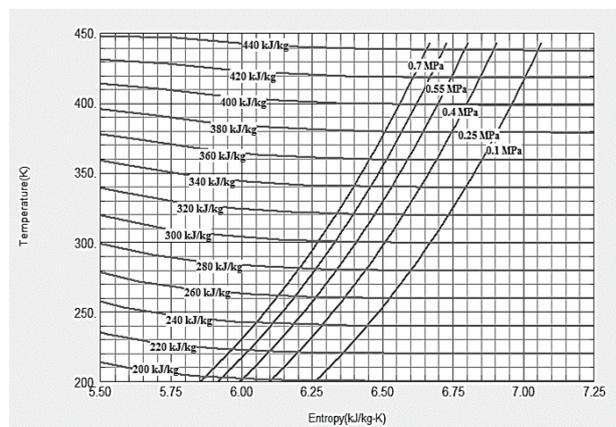


图5 空气温熵图

Fig.5 Air temperature-entropy diagram

表1 制冷循环各状态点参数

Table 1 Parameters of each state point of refrigeration cycle

状态点	1	2	3	4	5	5'	6	6'	7	7'	8
<i>P</i> /MPa	0.1	0.7	0.7	0.1	0.3	0.3	0.4	0.4	0.6	0.6	0.7
<i>T</i> /K	243	416	278	203	314	304	342	295	323	286	307
<i>h</i> /kJ/kg	242.5	417.2	277.4	202.6	315.1	303.4	341.8	294.3	323.1	285.6	307.4
<i>s</i> /[kJ/(kg·K)]	6.460	6.558	6.175	6.276	6.564	6.521	6.536	6.382	6.408	6.281	6.290

由热力循环 *T-s* 图的性质可知, 在图 4 中, 布雷顿制冷循环 1-2-3-4-1 过程所围成的面积表示制冷机一个制冷循环过程所消耗的机械功, 同理, 制冷循环 1-5-5'-6-6'-7-7'-8-3-4-1 所围成的面积表示螺旋压缩膨胀制冷机所消耗的机械功。由图 4 可以明显看出, 在制冷量相同的情况下, 布雷顿制冷循环所消耗的机械功大于螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环所消耗的机械功, 也就是说螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环比布雷顿循环更节约机械功, 节约的机械功见图 4 中阴影部分面积所示。

一般情况下, 制冷机的性能好坏可用制冷系数 *COP* 表示, 制冷系数的大小按下式计算, 即

$$COP = \frac{q_0}{W} \quad (7)$$

其中, q_0 表示制冷机的制冷量, W 表示生产此部分制冷量所消耗的机械功。

制冷机的制冷量

$$q_0 = h_1 - h_4 = C_p(T_0 - T_4) \quad (8)$$

制冷机消耗的机械功

$$W = W_c - W_e \quad (9)$$

其中, W_c 表示压缩机压缩过程中消耗的功, W_e 表示膨胀机做的功。

$$COP_l = \frac{C_p(T_0 - T_4)}{[C_p(T_{5'} - T_1) + C_p(T_{6'} - T_{5'}) + C_p(T_{7'} - T_{6'}) + C_p(T_{8'} - T_{7'})] / \eta_{sc} - C_p(T_3 - T_{4'})\eta_{se}} \quad (14)$$

通过上述关系式可计算出布雷顿制冷循环和螺旋压缩膨胀制冷机循环的各性能参数值, 如表 2 所示。

表2 制冷循环性能参数值

Table 2 Refrigeration cycle performance parameter

制冷循环	制冷量 /(kJ/kg)	压缩功 /(kJ/kg)	膨胀功 /(kJ/kg)	制冷系数 <i>COP</i>
布雷顿制冷循环	40.60	145.200	71.487	0.551

以布雷顿制冷循环为例, 压缩机消耗的功和膨胀机做的功分别为

$$W_{bc} = h_2 - h_1 = (h_2 - h_1) / \eta_{sc} = C_p(T_{2'} - T_1) / \eta_{sc} \quad (10)$$

$$W_e = h_3 - h_4 = (h_3 - h_{4'})\eta_{se} = C_p(T_3 - T_{4'})\eta_{se} \quad (11)$$

联立以上各式, 可得布雷顿制冷循环的制冷系数为

$$COP_b = \frac{C_p(T_0 - T_4)}{C_p(T_{2'} - T_1) / \eta_{sc} - C_p(T_3 - T_{4'})\eta_{se}} \quad (12)$$

对于螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环来说, 制冷机的制冷量和膨胀机做的功与布雷顿制冷循环的制冷量和膨胀功相同, 但是压缩机消耗的机械功由四级压缩机每级消耗的机械功组成, 是四级压缩过程耗功的总和。因此, 螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环压缩功可由下式计算:

$$W_{lc} = [C_p(T_{5'} - T_1) + C_p(T_{6'} - T_{5'}) + C_p(T_{7'} - T_{6'}) + C_p(T_{8'} - T_{7'})] / \eta_{sc} \quad (13)$$

所以, 螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环的制冷系数为

螺旋压缩制冷循环	40.60	125.775	71.487	0.748
----------	-------	---------	--------	-------

由表 2 可知, 两种制冷循环的单位质量制冷量和单位质量膨胀功均相同, 分别为 40.60kJ/kg 和 71.487kJ/kg。布雷顿制冷循环消耗的单位质量压缩功为 145.200kJ/kg, 螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环所消耗的单位质量压缩功为 125.775kJ/kg, 比布雷顿制冷循环所消耗的压缩功少 19.425kJ/kg。相比

而言,在两种制冷循环制冷量相同的情况下,螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环比布雷顿制冷循环节约了13.4%的压缩功。此外,布雷顿制冷循环制冷系数为0.551,螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环的制冷系数为0.748,是布雷顿制冷循环制冷系数的1.36倍,即单位功耗所获得的制冷量比布雷顿制冷循环的多。

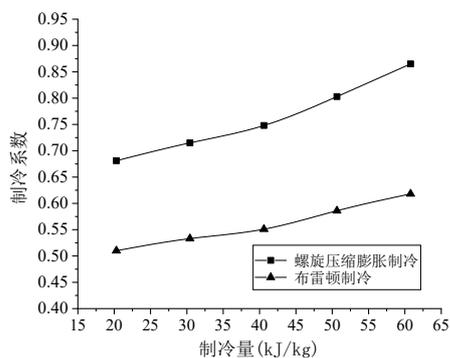


图6 制冷量与制冷系数的关系

Fig.6 Relationship between cooling capacity and cooling coefficient

图6是螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环和布雷顿制冷循环的制冷系数 COP 随制冷量的变化关系曲线。由图可知,螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环的制冷系数明显大于布雷顿制冷循环的制冷系数。随着制冷量的增大,两种制冷循环的制冷系数均逐渐增大。对于螺旋压缩膨胀制冷循环,制冷系数由0.681增加到0.865,增加了27.0%;对于布雷顿制冷循环,制冷系数由0.510增加到0.618,增加了21.2%。随着制冷量的增大,螺旋压缩膨胀制冷循环的制冷系数比布雷顿制冷循环的制冷系数增加更显著。

4 结论

(1) 螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环是一种近似布雷顿制冷循环,与布雷顿制冷循环相比,螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环更接近于等温压缩过程。

(2) 其他条件一定,在得到相同制冷量的情况下,布雷顿制冷循环所消耗的机械功大于螺旋压

缩膨胀制冷机制冷循环所消耗的机械功,即螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环比布雷顿循环更节能。

(3) 其他条件不变,两种制冷循环的制冷量和膨胀功相同的情况下,螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环所消耗的压缩功比布雷顿制冷循环消耗的压缩功少13.4%。

(4) 两种制冷循环的制冷量和膨胀功相同的情况下,布雷顿制冷循环的制冷系数为0.551,螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环的制冷系数为0.748,螺旋压缩膨胀制冷机制冷循环的能源利用效率更高。

(5) 随着制冷量的增大,两种制冷循环的制冷系数均逐渐增大。相同条件下螺旋压缩膨胀制冷循环的制冷系数比布雷顿制冷循环的制冷系数增加趋势更明显。

参考文献:

- [1] 张周卫,汪雅红,张小卫,等.螺旋压缩膨胀制冷机[P].中国:CN103423909A,2013-12-04.
- [2] 张周卫,汪雅红,张小卫,等.螺旋压缩膨胀制冷机用变螺距螺旋压缩机头[P].中国:CN103423160A,2013-12-04.
- [3] 田源,张周卫,汪雅红,等.螺旋压缩膨胀制冷机的研究与开发[J].化工机械,2017,44(6):672-674.
- [4] 张振迎,廖胜明.实际逆布雷顿空气制冷循环的性能研究[J].低温与超导,2007,(6):523-526.
- [5] 林比宏,S K yagi,陈金灿.不可逆布雷顿制冷循环的性能优化[J].低温工程,2004,(3):41-44,52.
- [6] 屠友明,陈林根,孙丰瑞.实际回热式布雷顿制冷机的性能优化[J].工程热物理学报,2006,(S1):21-24.
- [7] 张万里,罗京,陈林根.开式简单布雷顿制冷循环热力学优化 2.性能优化[J].电力与能源,2015,36(2):169-173.
- [8] 孙郁,侯予,赵红利,等.逆布雷顿循环空气制冷机的性能分析[J].低温工程,2006,(1):27-30,39.
- [9] 王可,侯予,杨金焕,等.透平—逆布雷顿循环空气制冷机性能分析(二)——模型的求解[J].流体机械,2004,(1):55-58.