

冷冻消融预冷系统热力学分析

夏元通¹, 徐彬凯², 叶萍², 刘宝林²

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海理工大学 医疗器械与食品学院, 上海 200093)

摘要: 将单级蒸气压缩式制冷系统作为冷冻消融设备的预冷系统, 利用热力学第一定律、第二定律对其建立数学模型, 进行能量分析和㊦分析. 研究了 R134a, R22, R404a 这 3 种制冷剂在不同蒸发温度和冷凝温度下循环性能系数、总㊦损失、总㊦效率的变化, 以及系统中各部件的㊦损失、㊦损失占比和㊦效率. 结果表明, 在所选工况范围内, R22 的性能系数、总㊦损失、总㊦效率均优于 R134a 和 R404a, 但与 R134a 相比无显著差异. 计算结果表明, 系统中压缩机、冷凝器、毛细管是循环总㊦损失的主要来源, 而回热器及蒸发器的㊦损失较少, 分析了其原因, 并提出了改进建议.

关键词: 冷冻消融; ㊦分析; 热力学; 预冷系统

中图分类号: TB 61 **文献标志码:** A

Thermodynamic Analysis of Subcooler in a Cryoablation System

XIA Yuantong¹, XU Binkai², YE Ping², LIU Baolin²

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. School of Medical Instrument and Food Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The VCRS (vapor compression refrigeration system) was applied as a subcooler to obtain the needed temperature of a cryoablation system by J-T effect, and a mathematic model based on the first and second laws of thermodynamics was established for the energy and exergy analysis using R134a, R22 and R404a in the subcooling system of the cryoablation system. The effects of the evaporator and condenser temperatures on the *COP*, total exergy destruction and total exergy efficiency of the system were investigated. The exergy destruction and exergy efficiency in different system components were also displayed. The R134a and R404a systems have lower *COP* and exergy efficiency but higher exergy destruction compared to the R22 system. However, the performance of R134a system is closer to the R22 system. So, the best refrigerant is R22 and R134a is a good alternative to R22. The major exergy destruction occurs in the compressor, condenser and capillary tube among all system components. The reasons and improvement suggestions were presented.

Keywords: cryoablation; exergy analysis; thermodynamics; subcooling system

收稿日期: 2017-03-02

基金项目: 浦东新区科技发展基金资助项目(PKJ2014-S16)

第一作者: 夏元通(1992-), 男, 硕士研究生. 研究方向: 低温生物医学技术. E-mail: wellxia@163.com

通信作者: 刘宝林(1968-), 男, 教授. 研究方向: 低温生物. E-mail: bliuk@163.com

冷冻治疗因其具有无痛、微创、易恢复并可与其他治疗方式结合等优点^[1-2],已成为外科手术的主要方法之一. 其原理主要有两种:相变制冷和J-T(焦耳-汤姆逊)效应. 由于相变制冷冷刀直径大、温度不易控制等缺点,在当前较为先进的冷冻手术中,已逐渐被气体节流冷刀所代替^[3]. 但是,节流冷刀气体的工作压力大,氩氮刀氩气工作压力在20 MPa以上,风险高且不易推广. 赵庆孝等^[4]在氮气节流冷刀系统中加入预冷环节,不仅可以降低冷刀气体的工作压力,提高气体的有效利用率,同时可增大气体焓差,提高制冷量^[4],现已成为J-T冷刀发展的新方向. 预冷方式也因此成为研究内容之一,叶萍^[5]研究了以热电制冷作为预冷方式实现从20℃至-40℃的预冷温度,分别对氮气和氩气冷刀的降温特性进行研究;于子森等^[6]设计了三级半导体制冷器对氮气冷刀进行预冷,并对该预冷方式作了深入研究;上海导向医疗系统有限公司为其靶向刀产品设计研发了多级自复叠预冷,率先实现了冷刀气体超低温预冷.

对于单级蒸汽压缩式制冷系统,已有将其作为预冷系统应用于临床的冷冻治疗设备,并取得了良好的效果. 但是,目前针对冷冻治疗系统的文献大多集中在刀头和治疗区域,而忽略了关键的预冷系统,预冷决定了气体的工作压力和节流效果,并且是设备的产热源,医疗设备虽然对能耗探讨不深,但设备经常处于24 h开机状态,其性能不应被忽视. 因此,为其提供一个科学可靠的预冷系统是十分必要的,本文利用热力学第一定律、第二定律对单级蒸汽压缩式预冷系统建立数学模型,进行能量分析和熵分析.

1 热力学分析

蒸汽压缩式制冷系统是当前使用最为广泛的,也是最为成熟的制冷系统. 根据具体工况要求,采用不同的制冷剂,系统将得到不同的性能^[7]. 因此,本文对预冷系统的3种制冷剂R22, R134a, R404a进行热力学分析,对不同制冷剂系统在不同工况下的性能系数、系统焓损失及焓效率进行比较,为最终选取制冷剂提供理论指导,并对系统各部件的焓损失以及各部件焓损失占比和效率进行分析,为今后的系统设计更趋合理奠定基础. 为了充分了解各制冷剂系统性能,观察其规律,本文将冷凝温度为40℃,蒸发温度为-30℃作为参考进行了更为深入的分析.

1.1 循环描述

图1为设备采用的带回热器的蒸汽压缩式制冷

系统图以及循环的压焓图和温焓图. 其中,1—2s表示压缩机等熵压缩过程,1—2表示实际压缩过程,3—4和e—1分别表示回热器内液体过冷和气体过热. p 为压力, T 为热力学温度, s 为比熵, h 为比焓. 表1列出了循环的各项指标.

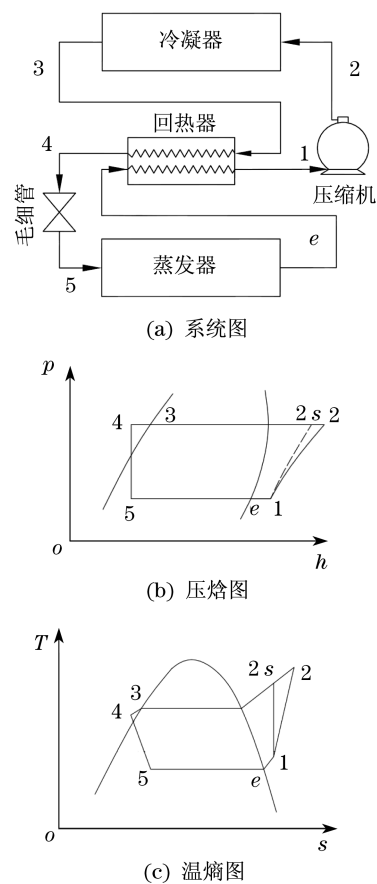


图1 带回热的单级蒸汽压缩式制冷循环系统图、压焓图及温焓图

Fig.1 Schematic diagram of a vapour compression cycle with liquid vapour heat exchanger, p - h diagram and T - s diagram

表1 循环各项指标

Tab.1 Parameters of a refrigeration cycle

制冷剂	R22/R134a/R404a
制冷量	115 W
蒸发温度	-35~-5℃
冷凝温度	25~55℃
等熵效率	0.75
过冷度	5℃
参考温度 T_0	25℃
参考压力 P_0	101.3 kPa

注:R134a制冷剂-30℃及以下部分仅用于理论计算,实际应用中无法达到.

由于制冷系统实际运行时的工况十分复杂,为简化分析,作如下假设^[7-8]:

- a. 系统各部件处于稳态条件下;
- b. 除蒸发器与冷凝器外,制冷剂在连接管路内的压降及其与外界的热交换均为零;
- c. 制冷剂在蒸发器和冷凝器内的压力不变;
- d. 忽略制冷剂在系统内的动能和势能变化.

1.2 理论模型

为了确定系统的性能特征,基于热力学第一定律、第二定律对系统进行能量分析和熵分析.从热力学第一定律的角度,衡量制冷系统优劣的标准为系统的性能系数 COP ^[9-10].

$$COP = \frac{q_e}{w_i} \quad (1)$$

式中: q_e 为单位质量制冷量; w_i 为压缩机比功.

热力学第二定律则描述了系统熵的概念^[11].对于一个系统来说,出口的熵 $\dot{E}_{out}$ 总是小于进口的熵 $\dot{E}_{in}$,而这一部分损失便是由系统的不可逆性造成的,称为熵损失 $\dot{E}_{dest}$ ^[12].

系统熵平衡方程为

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \dot{E}_{dest} \quad (2)$$

或者为^[13]

$$\begin{aligned} & \sum_{in} \dot{m} e - \sum_{out} \dot{m} e + \sum \left[\dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right]_{in} - \\ & \sum \left[\dot{Q} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \right]_{out} + \sum \dot{W}_{in} - \\ & \sum \dot{W}_{out} = \dot{E}_{dest} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $\dot{m}$ 为制冷剂质量流量; $\dot{Q}$ 为温度 T 时通过边界的传热量; $\dot{W}_{in}$ 为输入功; $\dot{W}_{out}$ 为输出功; e 为单位质量制冷剂流体的比熵,表示为^[12] $e = (h - h_0) - T_0(s - s_0)$, h_0 和 s_0 分别为制冷剂在参考温度和参考压力下的焓和熵.

如图 1 所示,系统由压缩机、冷凝器、回热器、毛细管、蒸发器组成,系统各个部件的熵损失及其熵效率可分别表示为^[14-18]:

压缩机

$$\dot{E}_{d,com} = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 + \dot{W}_{in} = \dot{m} [T_0(s_2 - s_1)] \quad (4)$$

$$\eta_{ex,com} = 1 - \left(\frac{\dot{E}_{d,com}}{\dot{W}_{in}} \right) \quad (5)$$

冷凝器

$$\begin{aligned} \dot{E}_{d,con} &= \dot{E}_2 - \dot{E}_3 = \dot{m} (h_2 - T_0 s_2) - \\ & \dot{m} (h_3 - T_0 s_3) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\eta_{ex,con} = 1 - \left(\frac{\dot{E}_{d,con}}{\dot{E}_2 - \dot{E}_3} \right) \quad (7)$$

回热器

$$\begin{aligned} \dot{E}_{d,lvhe} &= \dot{E}_3 - \dot{E}_4 + \dot{E}_0 - \dot{E}_1 = \\ & \dot{m} [(h_3 - T_0 s_3) - (h_4 - T_0 s_4) + \\ & (h_e - T_0 s_e) - (h_1 - T_0 s_1)] \end{aligned} \quad (8)$$

$$\eta_{ex,lvhe} = \frac{\dot{E}_3 - \dot{E}_4}{\dot{E}_e - \dot{E}_1} \quad (9)$$

毛细管

$$\dot{E}_{d,cap} = \dot{E}_4 - \dot{E}_5 = \dot{m} T_0 (s_5 - s_4) \quad (10)$$

$$\eta_{ex,cap} = \frac{\dot{E}_5}{\dot{E}_4} \quad (11)$$

蒸发器

$$\begin{aligned} \dot{E}_{d,evap} &= \dot{m} (h_5 - T_0 s_5) - \\ & \dot{m} (h_e - T_0 s_e) + \dot{Q}_L \left(1 - \frac{T_0}{T_L} \right) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\eta_{ex,evap} = 1 - \left(\frac{\dot{E}_{d,evap}}{\dot{E}_5 - \dot{E}_e} \right) \quad (13)$$

式中: $\dot{Q}_L$ 为制冷剂从低温热源中吸收的热量; T_L 为低温热源温度; E_i 为 i 状态点的熵值, $i = 1, 2, \dots, 5$.

系统总熵损失则等于系统各个部件熵损失之和.

$$\dot{E}_{d,tot} = \dot{E}_{d,com} + \dot{E}_{d,con} + \dot{E}_{d,lvhe} + \dot{E}_{d,cap} + \dot{E}_{d,evap} \quad (14)$$

熵效率

$$\eta_{ex,tot} = \frac{\dot{E}_{out}}{\dot{E}_{in}} = 1 - \frac{\dot{E}_{dest}}{\dot{E}_{in}} \quad (15)$$

在本循环中, $\dot{E}_{dest} = \dot{E}_{d,tot}$, $\dot{E}_{in}$ 为压缩机耗功 $\dot{W}_c$, 对于蒸汽压缩式制冷系统,熵效率还可表示为^[9,19]

$$\eta_{ex,tot} = \frac{\left| \dot{Q}_L \left(1 - \frac{T_0}{T_L} \right) \right|}{\dot{W}_c} \quad (16)$$

式中:分子表示系统输出给低温物体的熵;分母表示压缩机所消耗的功.

2 分析讨论

图 2~7 显示了 3 种制冷剂在不同蒸发温度 T_e 和冷凝温度 T_c 下循环性能系数 COP 、熵损失、熵效率的变化趋势,图 8 表明了系统各部件熵损失占比及其自身熵效率,本文计算所用制冷剂物性参数均通过 NIST 的 REFPROP9.0 软件获得.

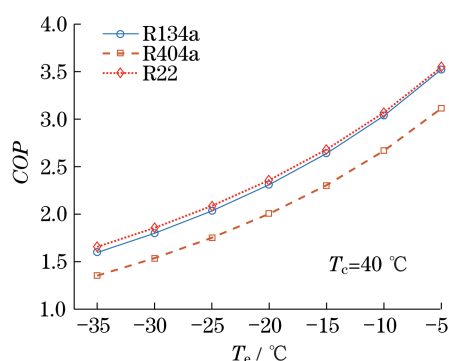


图2 性能系数随蒸发温度的变化曲线 ($T_{\text{con}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig.2 Variation of COP with the change of evaporator temperature ($T_{\text{con}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

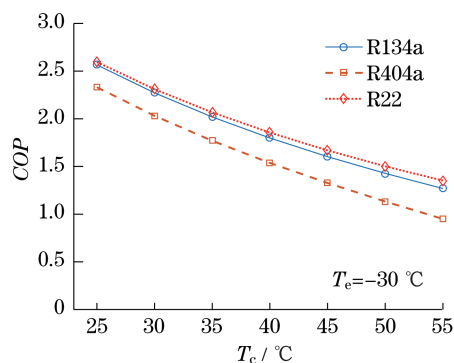


图3 性能系数随冷凝温度的变化曲线 ($T_{\text{evap}} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig.3 Variation of COP with the change of condenser temperature ($T_{\text{evap}} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

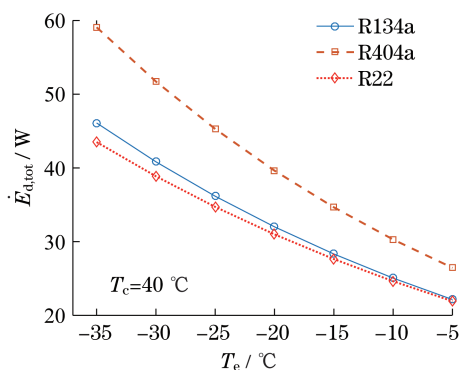


图4 总熵损失随蒸发温度的变化曲线 ($T_{\text{con}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig.4 Variation of total exergy destruction with the change of evaporator temperature ($T_{\text{con}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

如图2和图3所示,3种制冷剂在所选工况下COP均随蒸发温度的升高而升高,随冷凝温度的升高而降低.这是因为蒸发温度上升,单位制冷量增加且压缩机耗功减少,导致COP增加.而冷凝温度升高,提高了压缩机的排气压力,使压缩机压比增大,

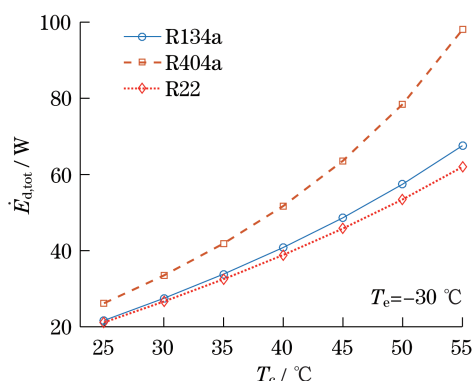


图5 总熵损失随冷凝温度的变化曲线 ($T_{\text{evap}} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig.5 Variation of total exergy destruction with the change of condenser temperature ($T_{\text{evap}} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

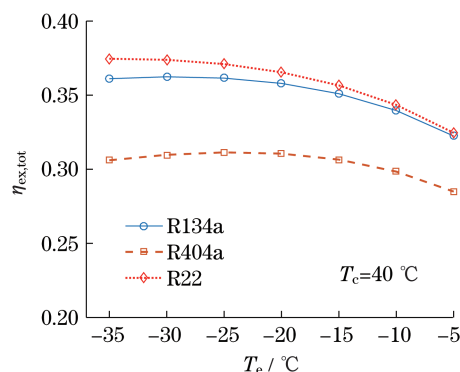


图6 总熵效率随蒸发温度的变化曲线 ($T_{\text{con}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig.6 Variation of total exergy efficiency with the change of evaporator temperature ($T_{\text{con}} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

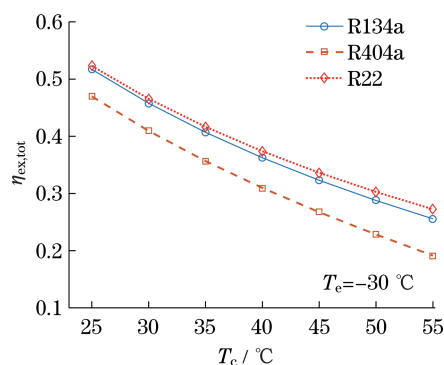


图7 总熵效率随冷凝温度的变化曲线 ($T_{\text{evap}} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig.7 Variation of total exergy efficiency with the change of condenser temperature ($T_{\text{evap}} = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

导致压缩机效率降低,同时在蒸发器入口处,制冷剂的比焓提高,这意味着在给定工况下总的制冷量减小,导致系统COP减小.系统COP最大的为R22, R134a次之, R404a最小.在蒸发温度 $T_e = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷凝温度 $T_c = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, R22与R134a制冷剂的COP比R404a制冷剂的分别大20.7%, 17.0%, 而

此时 R22 的仅比 R134a 的大 3.17%。蒸发温度由 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降低到 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, R134a, R404a, R22 这 3 种制冷剂的性能系数分别降低了 54.7%, 56.5%, 53.4%, 而冷凝温度由 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, COP 分别降低了 50.5%, 59.2%, 47.9%。R22 降幅最小, 说明随着蒸发温度与冷凝温度温差的增大, R22 的性能要比 R134a, R404a 的优越。在相同制冷条件下, 系统 COP 越大, 产生的冷凝热相对越小, 这对减小设备内温度非常重要。

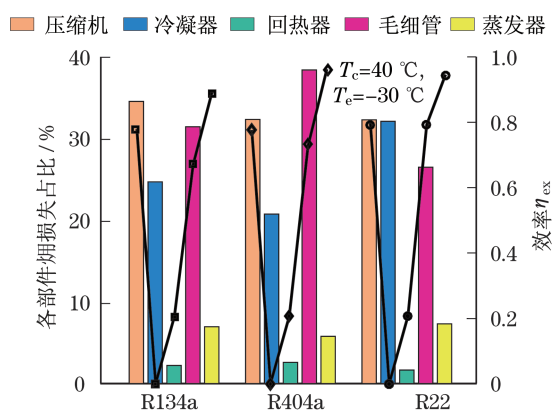


图8 系统各部件熵损失占比(条形图)及其熵效率(折线图)
Fig.8 Percentage (bar) of exergy destruction and exergy efficiency (line) in different components of system

对于制冷循环, 不可逆过程将导致循环多消耗一部分附加功^[19], 所以, 研究循环的不可逆损失非常必要。由图 4 和图 5 可以看出, 蒸发温度和冷凝温度的变化对系统总熵损影响较大, 尤其对于 R404a 制冷剂, 在蒸发温度由 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降到 $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的过程中, 系统熵损失增加了 123%, 而冷凝温度由 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升到 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 熵损失更是增加了 274%。可见冷凝温度选取是否合理将对系统产生非常大的影响。系统在冷凝器中的熵损失主要是由制冷剂与高温冷源之间的传热温差引起的^[7], 温差越大, 熵损失越大^[12]。显然, 在所研究工况下, R22 制冷剂熵损失最小, R404a 熵损失最大。在蒸发温度 $T_e = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷凝温度 $T_c = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, R404a 的熵损失是 R134a 的 127%, 是 R22 的 133%, 而 R134a 的熵损失仅是 R22 的 105%, 两者差距不大, 可见 R134a 也是一种非常优秀的制冷剂, 在某些工况下可作为 R22 的替代品。

熵效率可以用来衡量一个技术过程的热力学完善程度, 对于蒸汽压缩式制冷循环, 熵效率即为循环的热力学完善度^[19], 根据它的大小可以直接评判循环的经济性好坏。图 6 和图 7 分别给出了 3 种制冷剂

系统熵效率与蒸发温度、冷凝温度的关系。如图 6 所示, 熵效率随蒸发温度的增大呈现出先升高后减小的趋势, 根据式 (16), 随着蒸发温度的升高, $\dot{Q}_L$ 增大, 且压缩机耗功 $\dot{W}_c$ 减小, 这将使系统熵效率增大。但是, 随着蒸发温度不断接近参考温度 T_0 , 使 $(1 - T_0/T_L)$ 逐渐减小, 这将使系统熵效率减小。由于 2 个因素的共同影响, 熵效率将在某个温度点出现最大值。从图 6 可以发现, R22 制冷剂的熵效率最高, R134a 的比 R22 的略低, R404a 的熵效率最低, 且 R404a 制冷剂的熵效率最大值出现在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, R134a 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 而 R22 的熵效率最大值对应的蒸发温度则更低。

图 7 为冷凝温度变化对系统熵效率的影响, 可以看出, R22 和 R134a 制冷剂熵效率相近, 且明显都比 R404a 的大, 随着冷凝温度的升高, 3 种制冷剂熵效率都呈下降趋势, 这与图 5 相反, 主要是由于式 (15) 中熵效率与熵损失成反比的作用。结合图 6 和图 7 可以得出, 冷凝温度变化对系统熵效率的影响要明显高于蒸发温度的影响, 这是因为冷凝器内的熵损失要远大于蒸发器内的熵损失。

循环总熵损失是由系统不同部件熵损失累加所得, 而不同部件的熵损失不尽相同, 甚至相差悬殊, 因此, 了解不同部件熵损失在总熵损失中所占比例, 针对损失占比较大且效率不高的部件加以优化, 将使整个系统的设计和优化更具针对性和目的性。图 8 显示了在蒸发温度 $T_e = -30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 冷凝温度 $T_c = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 3 种制冷剂系统不同部件熵损失所占比例及部件自身熵效率。其中, 回热器在所有部件中熵损失最小, 其次是蒸发器。压缩机、冷凝器和毛细管占比较大, 对于压缩机的熵损失主要是由于压缩机效率不高引起的, 而压缩机熵效率还未达到 80%, 尚有一定的提升空间。同样, 作为与外界换热的部件, 冷凝器中熵损失比蒸发器中大数倍, 这是因为在蒸发器中制冷剂在接近等温的情况下与热源发生相变换热, 且换热温差不大, 这也是其效率较高的原因。而在冷凝器中, 制冷剂先冷却再冷凝, 相变换热只是整个放热过程的一部分, 与外界温差较大, 导致较大熵损失^[20]。冷凝器熵效率为零是因为排放给环境的热量熵全部转化为熵, 环境得到的熵为零。除冷凝器外, 回热器熵效率最低, 这是因为从冷凝器出来的高温制冷剂与从蒸发器出来的低温制冷剂换热温差较大。由于 R134a 制冷剂换热性能不如 R404a 和 R22, 所以, 在相同条件下, R134a 制冷剂在蒸发器内的熵

效率略低于后者,这是由制冷剂性质决定的.减小冷凝器、回热器、蒸发器等换热设备的平均传热温差,提高换热效率是减少系统熵损失的有效途径.节流过程是典型的不可逆过程^[21],其熵损失不容小觑,如图8所示,毛细管中的熵损失甚至大于冷凝器和压缩机的,结合图1(c)及式(10),毛细管中的熵损失是由节流过程的熵产引起的,当冷凝温度与蒸发温度温差较大时,图1(c)中4—5过程的熵产越大,熵损失越大.所以,蒸发温度与冷凝温度的温差是节流过程熵损失的主要原因,可以通过降低冷凝温度或增加过冷度(如图1(c)中3—4过程)来减少毛细管中的熵损失.

3 结 论

单级蒸汽压缩式制冷系统可实现氮气、氩气、二氧化碳、一氧化二氮等气体的预冷,是冷冻治疗系统的重要组成部分,其设计是否科学合理决定整个设备的品质.本文从能量利用的角度对其进行理论分析,为今后试验台搭建提供了方向性指导,也可作为其他相关制冷设备的理论参考.分析主要得出以下结论:

a. 在3种制冷剂中,R22各项性能最为优越,其次是R134a,最后是R404a.所以,R22是作为冷冻治疗设备预冷系统制冷剂的最佳选择.

b. 虽然R22环境友好程度不如R134a,但作为一种非常优秀的制冷剂,在未来相当长时间内仍可用于医疗行业.在所研究的各项指标中,R134a虽略逊R22,但差距不大,因此,在制冷剂限制比较严格的发达国家地区,可选用R134a作为替代.

c. 冷凝温度对系统性能系数、熵损失、熵效率都有较大影响,因此,设计时应允许在条件允许的情况下尽量降低冷凝温度.

d. 压缩机、冷凝器和毛细管是系统总熵损失的主要来源,压缩过程、冷凝过程、节流过程是本系统中能量利用的薄弱环节,减少系统总熵损失应尽量从这3个部件着手.

参考文献:

[1] MIRKHALILI S M, RAMAZANI S A A, NAZEMIDASHTARJANDI S. Mathematical study of probe arrangement and nano-particle injection effects on heat transfer during cryosurgery[J]. Computers in

Biology and Medicine, 2015, 66: 113 – 119.

- [2] YU T H, LIU J, ZHOU Y X. Selective freezing of target biological tissues after injection of solutions with specific thermal properties [J]. Cryobiology, 2005, 50(2): 174 – 182.
- [3] SHURRAB M, WANG H D, KUBO N, et al. The cooling performance of a cryoprobe: establishing guidelines for the safety margins in cryosurgery [J]. International Journal of Refrigeration, 2016, 67: 308 – 318.
- [4] 赵庆孝, 杨鹏飞, 常兆华. 新型超低温冷冻医疗系统的设计与实验研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(6): 57 – 60.
- [5] 叶萍. 乳腺肿瘤冷冻消融靶向治疗技术研究[D]. 上海: 上海理工大学, 2012.
- [6] 于子森, 武卫东, 姜博仁, 等. 基于半导体制冷预冷的氮气冷冻刀系统实验研究[J]. 低温工程, 2014(1): 50 – 54.
- [7] AHAMED J U, SAIDUR R, MASJUKI H H. A review on exergy analysis of vapor compression refrigeration system [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011, 15(3): 1593 – 1600.
- [8] RASTI M, AGHAMIRI S, HATAMIPOUR M S. Energy efficiency enhancement of a domestic refrigerator using R436A and R600a as alternative refrigerants to R134a[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 74(6): 86 – 94.
- [9] ARORA A, KAUSHIK S C. Theoretical analysis of a vapour compression refrigeration system with R502, R404A and R507A [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31(6): 998 – 1005.
- [10] HUA Z Z, ZHANG H, LIU B L, et al. Refrigeration technology[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [11] CHO H, PARK C. Experimental investigation of performance and exergy analysis of automotive air conditioning systems using refrigerant R1234yf at various compressor speeds [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101: 30 – 37.
- [12] YATAGANBABA A, KILICARSLAN A, KURTBA İ. Exergy analysis of R1234yf and R1234ze as R134a replacements in a two evaporator vapour compression refrigeration system [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 60: 26 – 37.
- [13] YAN G, CUI C F, YU J L. Energy and exergy analysis of zeotropic mixture R290/R600a vapor-compression refrigeration cycle with separation condensation[J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 53: 155 – 162.

(下转第466页)

- (11):108-111.
- [12] 孙军华,南桂美,黄怡嫒,等.手机终端网络购物的动作标准和动作时间研究——以京东APP为例[J].上海理工大学学报,2016,38(4):387-393.
- [13] JANSEN B J, SPINK A. How are we searching the World Wide Web? A comparison of nine search engine transaction logs [J]. Information Processing & Management, 2006, 42(1):248-263.
- [14] 孙军华,霍佳震,苏强,等.基于时间研究及 KANO 模型的在线零售网站设计质量要素研究[J].工业工程与管理,2014,19(1):91-97.
- [15] 黄鹏强,王刊良.搜索引擎用户对商品搜索结果的点击行为研究[J].管理科学,2012,25(1):76-84.
- [16] 陈玉明,吴克寿,李向军.一种基于信息熵的异常数据挖掘算法[J].控制与决策,2013,28(6):867-872.
- [17] 王兴兰.摘要逻辑项中关键词抽取方法研究[J].农业图书情报学刊,2016,28(3):18-22.
- [18] 李丽双,王意文,黄德根.基于信息熵和词频分布变化的术语抽取研究[J].中文信息学报,2015,29(1):82-87.
- [19] 陈科文,张祖平,龙军.文本分类中基于熵的词权重计算方法研究[J].计算机科学与探索,2016,10(9):1299-1309.
- [20] 李圣文,凌微,龚君芳,等.一种基于熵的文本相似性计算方法[J].计算机应用研究,2016,33(3):665-668.
- [21] 界面.快消品商们最喜欢的电商平台:天猫京东领先[EB/OL]. [2016-12-22]. <http://www.ebrun.com/20161222/207615.shtml>.
- (编辑:丁红艺)

(上接第 443 页)

- [14] 蒋能照.焓及其在制冷工程中的应用[J].制冷学报,1981(1):62-77.
- [15] JOYBARI M M, HATAMIPOUR M S, RAHIMI A, et al. Exergy analysis and optimization of R600a as a replacement of R134a in a domestic refrigerator system [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(4):1233-1242.
- [16] DAYMA A S, AGRAWAL N, NANDA P. Energetic and exergetic analyses of a transcritical N_2O heat pump system [J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2014, 9(4):277-283.
- [17] DOOHAN R S, KUSH P K, MAHESHWARI G. Exergy based optimization and experimental evaluation of plate fin heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102:80-90.
- [18] 刘秀芳,王发辉,盛伟,等.两级复叠式低温预冷设备的焓分析[J].河南科技大学学报(自然科学版),2010,31(6):29-32.
- [19] 郑贤德.制冷原理与装置[M].2版.北京:机械工业出版社,2008:68-70.
- [20] YUMRUTA R, KUNDUZ M, KANOĞLU M. Exergy analysis of vapor compression refrigeration systems [J]. Exergy, An International Journal, 2002, 2(4):266-272.
- [21] 宋义乐.绝热节流过程的熵变特性分析[D].北京:华北电力大学,2013.
- (编辑:丁红艺)