

刮削法冰浆制备系统的热力学分析与优化

巫成真^{1*}, 方甫^{1*}, 宁一霖^{1*}, 高玉国^{1,2#}

¹华北水利水电大学机械学院, 河南 郑州

²华北水利水电大学, 河南省新能源汽车热流电化学系统国际联合实验室, 河南 郑州

Email: #gaoyuguo@ncwu.edu.cn

收稿日期: 2021年5月27日; 录用日期: 2021年6月27日; 发布日期: 2021年7月5日

摘要

为了提高刮削法制冰系统的制冷系数和焓效率, 本文基于热力学定律对刮削法制冰系统进行热力学分析, 研究了制冷剂种类、冷凝温度、环境温度以及蒸发温度等因素对刮削法制冰系统的影响。通过单因素实验设计计算系统的焓损系数和焓效率, 可以通过降低冷凝温度、提高蒸发温度以及更换高效制冷剂 NCUR01 来提高系统的效率, 来达到优化系统的目的。同时设计四因素三水平的正交实验进行极差分析, 得到这四个因素对实验结果影响的主次顺序为: 制冷剂种类、冷凝温度、蒸发温度、环境温度, 制冷剂种类对目标值有最为显著的影响。在制冷剂工质为 NCUR01, 冷凝温度为 10°C, 环境温度为 12°C, 蒸发温度为 -5°C 时, 系统的制冷系数 $\varepsilon = 4.97$ 和焓效率 $\eta = 47.1\%$ 达到最优值, 制冷剂种类对目标值有最为显著的影响。通过本研究, 可以得到各因素对系统影响的规律, 选择合理的实验方案, 为系统的优化设计提供指导。

关键词

刮削法, 热力学分析, 焓效率, 单因素, 正交实验

Thermodynamic Analysis and Optimization of the Skiving Ice Slurry Preparation System

Chengzhen Wu^{1*}, Fu Fang^{1*}, Yilin Ning^{1*}, Yuguo Gao^{1,2#}

¹School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²Henan International Joint Laboratory of Thermo-Fluid Electro-Chemical System for New Energy Vehicle, School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

Email: #gaoyuguo@ncwu.edu.cn

*第一作者。

#通讯作者。

Abstract

In order to improve the coefficient of refrigeration and exergy efficiency of the scraping ice-making system, this paper conducts a thermodynamic analysis of the scraping ice-making system based on the law of thermodynamics, and studies the influences of type of refrigerant, condensation temperature, ambient temperature, and evaporating temperature on the ice scraping system. The exergy loss coefficient and exergy efficiency of the system are calculated through single-factor experimental design. The efficiency of the system can be improved by reducing the condensation temperature, increasing the evaporation temperature and replacing the high-efficiency refrigerant NCUR01 to achieve the purpose of optimizing the system. At the same time, a four-factor and three-level orthogonal experiment was designed for range analysis, and the order of the four factors' influence on the experimental results was as follows: refrigerant type, condensation temperature, evaporating temperature, ambient temperature; and the type of refrigerant has the most significant effect on the target value. When the refrigerant is NCUR01, the condensation temperature is 10°C, the ambient temperature is 12°C, and the evaporation temperature is -5°C, the system's refrigeration coefficient $\varepsilon = 4.97$ and efficiency $\eta = 47.1\%$, which reach the optimal value. The type of refrigerant has the most significant effect on the target value. Through this research, we can get the law of the influence of various factors on the system, choose a reasonable experimental plan, and provide guidance for the optimal design of the system.

Keywords

Scraping Method, Thermodynamic Analysis, Exergy Efficiency, Single Factor, Orthogonal Experiment

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

冰浆是指含有冰晶粒子(颗粒的直径一般不超过 1 mm)的固液混合物,冰浆具有传热效率高、释冷速度快、经济性能好、结构简单等特点,能起到削峰填谷、节能减排环保的重要作用。作为一种重要且已被广泛应用的相变蓄冷材料,冰浆目前已被应用于太阳能利用、建筑物蓄冷、食品的加工与储藏、矿井降温、人工造雪、医疗救助及消防灭火、管道清洁等领域[1] [2] [3] [4]。刮削法制取冰浆系统的性能稳定,在经济性和实用性等方面具有突出的优势,能够实现其广泛的商业用途,但是系统复杂、热效率低、成本高,而且需要机械刮削搅动,功耗大、机械故障频繁[5],因此仍需开展大量研究。

王泽普[6]等对刮削法的刮片结构进行了深入研究,通过优化刮片结构形状提升了刮削法的制冰效率。黄成[7]等对新型螺旋式刮削法冰浆制取装置进行深入研究,通过控制制冰溶液的流量来提高制冰效率。王磊[8]等对刮削法制冰系统的动态仿真进行了深入研究,预测了在不同条件下制冰溶液的结晶时间。饶志明[9]等对刮削法制冰系统的壁面冰晶成核机理进行了研究,通过不同浓度的氯化钠溶液进行实验,拟合出氯化钠溶液的浓度与潜热的关系式。

本文对刮削法制冰系统进行热力学分析,通过单因素实验设计,分析了制冷剂种类、冷凝温度、环

境温度以及蒸发温度等因素对实验结果的影响；通过正交实验设计，探究出影响因素的主次顺序以及冰浆制取系统的制冷系数和焓效率的最优值和最佳实验方案。

2. 制冰系统热力学模型

2.1. 制冰系统的主要装置

如图 1 是刮削法制取冰浆装置的系统模型，其核心组件:压缩机、蒸发器(冰晶器)、冷凝器、热力膨胀阀及干燥过滤器与油分离器。在冰晶器内得到冰浆并通过泵的作用运送至储冰装置中；在冷凝器中，制冷剂将所得到的热量交换给冷凝器外壁的冷凝液体，最后通过热力膨胀阀的节流作用重新回到冰晶器中。

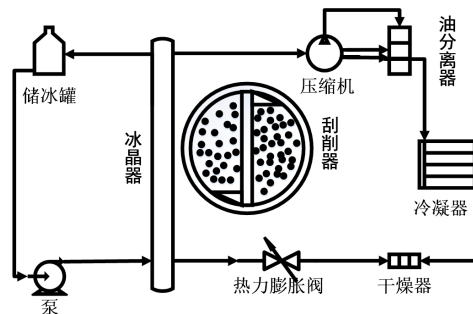


Figure 1. Scraping ice system
图 1. 刮削法制冰系统

2.2. 制冰系统的温熵图和压焓图

根据上述制冷剂的循环过程中绘制出制冰系统的温熵(T-S)图和系统的压焓图如图 2 和图 3 所示，过程 1-2 中制冷剂在冰晶器内等温定压吸热过程(焓增)，过程 2-3 中制冷剂在压缩机内的压缩升温过程(焓增)，过程 3-4 中高压制冷剂在冷凝器等温定压放热过程(焓减)，过程 4-1 中制冷剂在热力膨胀阀不可逆的绝热膨胀降压过程(等焓) [10]。

工况 4 处的制冷剂状态为饱和液态工质，工况 2 处的制冷剂状态为饱和气态工质，整个制冰系统的简化模型如图 4 所示。

2.3. 热力学模型的简化及热力学分析

对整体系统建立焓分析根据上图所示的制冰系统简化得到的热力学模型和系统的温熵图、压焓图可知，图中各状态点的焓值：

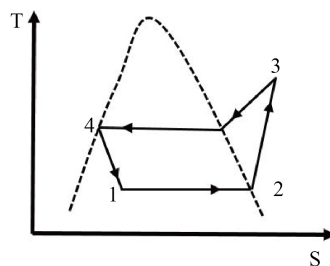


Figure 2. System temperature entropy diagram
图 2. 系统的温熵图

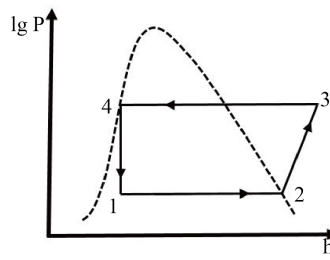


Figure 3. Pressure enthalpy diagram of the system
图 3. 系统的压焓图

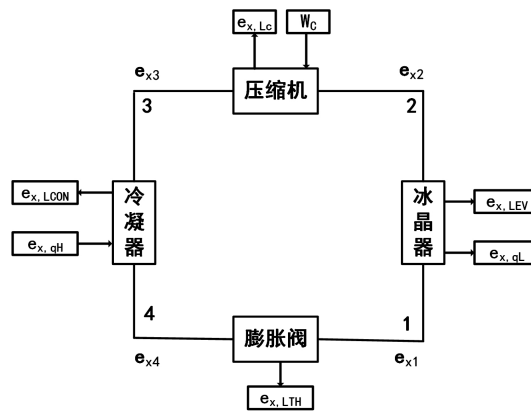


Figure 4. Simplified model of ice making system
图 4. 制冰系统的简化模型

$$e_{x,i} = h_i - h_0 - T_0 (S_i - S_0) \tag{1}$$

式中 T_0 为环境温度，K；焓值是在相对于环境条件进行相关数据计算的， h_i 是图 3 中压焓图各点处的焓值 KJ/kg， h_0 是环境下的焓值，KJ/kg； S_i 和 S_0 分别是各点的熵和工质在环境下的熵值，KJ/kg.K。

制冰系统的制冷量：

$$q_L = h_2 - h_1 \tag{2}$$

q_L 为系统的制冷量，KJ/kg。

压缩机耗功：

$$w_c = h_3 - h_2 \tag{3}$$

w_c 为压缩机耗功，KJ/kg。

制冰系统的制冷系数为系统的制冷量和压缩机耗功的比值：

$$\varepsilon = \frac{q_L}{w_c} \tag{4}$$

ε 为系统的制冷系数。

由热力学第二定律可知，制冰系统的冷量焓：

$$e_{x,qL} = q_L \left(1 - \frac{T_0}{T_L} \right) \tag{5}$$

T_L 为低温热源温度, K; 系统的输出为冷量, 其值为负, $e_{x,qL}$ 为系统的冷量焓, KJ/kg。通过系统焓效率计算公式得到:

$$\eta_{e_x} = \frac{e_{x,qL}}{w_c} = \frac{e_{x,qL}}{q_L} \frac{q_L}{w_c} = \frac{e_{x,qL}}{q_L} \varepsilon \quad (6)$$

式中 η_{e_x} 为系统的焓效率。

对系统各组分进行焓平衡分析, 系统各组分的焓如图 4 所示。

1) 冰晶器的焓损分析

通过焓守恒得到冰晶器的焓损为冰晶器的进口处的焓值和出口处的焓值以及冷量焓的差值:

$$e_{x,L,EV} = e_{x4} - e_{x1} - e_{x,qL} \quad (7)$$

式中 $e_{x,L,EV}$ 为冰晶器的焓损量, KJ/kg。

冰晶器的焓效率及焓损系数:

$$\eta_{e_x,EV} = \frac{e_{x,qL}}{e_{x4} - e_{x1}} = 1 - \frac{e_{x,L,EV}}{e_{x4} - e_{x1}} \quad (8)$$

$$\xi_{EV} = \frac{e_{x,L,EV}}{w_c} \quad (9)$$

式中 $\eta_{e_x,EV}$ 为冰晶器的焓效率, ξ_{EV} 为冰晶器的焓损系数。

2) 压缩机的焓损分析

通过对制冰循环系统的焓简化分析得到压缩机的焓损:

$$e_{x,L,C} = w_c + e_{x1} - e_{x2} \quad (10)$$

式中 e_{x2} 为压缩机出口处的焓值。

压缩机的焓效率及焓损系数:

$$\eta_{e_x,C} = \frac{e_{x2} - e_{x1}}{w_c} = 1 - \frac{e_{x,L,C}}{w_c} \quad (11)$$

$$\xi_c = \frac{e_{x,L,C}}{w_c} = 1 - \frac{e_{x2} - e_{x1}}{w_c} \quad (12)$$

式中 $\eta_{e_x,C}$ 为系统的焓效率, ξ_c 为压缩机的焓损系数。

3) 冷凝器的焓分析

在忽略制冷剂流动阻力时, 一般不考虑冷凝器的焓效率, 只考虑广义焓损系数, 冷凝过程中放出的热量焓:

$$e_{x,qH} = q_H \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \right) = (H_2 - H_3) \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \right) \quad (13)$$

式中 $e_{x,qH}$ 为冷凝器向外界释放的热量焓。

q_H 为冷凝器向环境放出的热量 KJ/kg·K, T_0 为高温热源温度, K, T_H 为外界环境温度, K。

冷凝器的焓效率:

$$\eta_{ex,EV} = \frac{e_{x,qH}}{e_{x2} - e_{x3}} = 1 - \frac{e_{x,L,CON}}{e_{x2} - e_{x3}} \quad (14)$$

式中 e_{x3} 冷凝器出口处的焓值。

4) 膨胀阀的焓损分析

制冷剂在膨胀阀中是节流过程, 节流前后焓值相同, 如图 3 中的压焓图, 即 $h_4 = h_1$, 膨胀阀的焓损:

$$e_{x,L,TH} = e_{x3} - e_{x4} = h_3 - h_4 - T_0 (s_3 - s_4) = T_0 (s_4 - s_3) \quad (15)$$

e_{x4} 为膨胀阀出口处的焓值, KJ/kg, s_3 和 s_4 分别为 3、4 点处的熵值, KJ/kg·K。

膨胀阀的焓效率及焓损系数:

$$\eta_{e_{x,TH}} = \frac{e_{x4}}{e_{x3}} \quad (16)$$

$$\xi_{TH} = \frac{e_{x,L,TH}}{w_c} \quad (17)$$

$\eta_{e_{x,TH}}$ 为膨胀阀的焓效率, ξ_{TH} 为膨胀阀的焓损系数。

3. 单因素实验设计

影响制冰系统效率的主要因素有冷凝温度、蒸发温度、环境温度以及制冷剂种类, 为提高刮削法制取冰浆的效率, 进行单因素实验设计, 进行影响因素的初步筛选, 通过单因素实验设计, 将有益于提高系统效率的因素水平进行甄别和选择。

3.1. 冷凝温度的单因素设计

蒸发汽化后的制冷剂, 在冷凝器内的一定压力的条件下被冷凝成液体时相应的饱和温度被称为冷凝温度, 冷凝温度的高低取决于实验过程的环境条件和压缩机允许的排气压力和温度; 冷凝温度过高(40℃以上)会使得冷凝效果达不到预期; 同时, 如果冷凝温度过低(0℃及以下), 参加循环的制冷剂工质大大减少, 换热效率低, 因此在制冷剂为 R410A, 环境温度 2℃, 蒸发温度为-25℃时, 设计冷凝温度分别为 10℃、20℃、30℃、40℃进行实验, 表 1 是冷凝温度下系统的各个参数。

Table 1. System parameters at condensation temperature

表 1. 冷凝温度下的系统参数

冷凝温度(℃)	制冷量(kJ/kg)	压缩机做功(kJ/kg)	冷量焓(kJ/kg)	制冷系数
10	182.15	37.25	14.28	4.89
20	173.03	46.13	13.42	3.87
30	160.47	49.33	12.42	3.29
40	145.25	65.00	11.32	2.23

冷凝温度变化时, 各部分焓损及整体的焓效率如图 5 所示。

在冷凝温度升高时, 系统的制冷量逐渐降低, 而压缩机的做功增加, 使得制冷系数和焓效率降低; 在冷凝温度有 10℃提高到 40℃过程中, 冰晶器的焓损系数降低了 7%, 压缩机耗功从 37 kJ/kg 增加至 65 kJ/kg, 而冰晶器的焓损都在 5 kJ/kg 左右; 在冷凝温度升高时, 冷凝器的焓损系数从 20%提高到 42%, 在冷凝温度达到 30℃以上时, 冷凝器的焓损系数保持在 42%左右, 冷凝温度过高, 制冷剂工质在冷凝器内换热不充分, 导致了焓损系数较高, 因此降低冷凝温度可以有效的提高系统的效率。

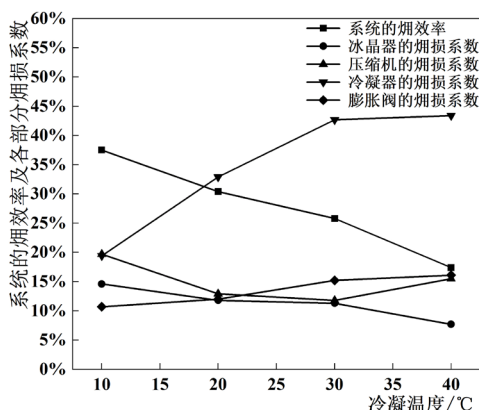


Figure 5. Exhaust efficiency and exergy loss coefficient of each part when the condensing temperature changes

图 5. 冷凝温度变化时的焓效率及各部分焓损系数

3.2. 环境温度的单因素设计

制冰系统的实验环境是影响制冰系统效率的重要因素，郑州市地处中原地区，一年四季分明，将郑州市选择为环境温度的实验条件能够较为科学的进行相关实验，并且能够减少偶然因素引起的误差，初春和秋末的平均气温为 22°C ，夏季温度较高平均温度为 32°C ，初冬和冬末的平均温度为 12°C 和 2°C [11]；因此在冷凝温度 40°C ，制冷剂为 R410A，蒸发温度为 -25°C 时，设计环境温度分别为 2°C 、 12°C 、 22°C 、 32°C 进行实验，环境温度变化时系统的焓效率及各部分的焓损系数如图 6 所示。

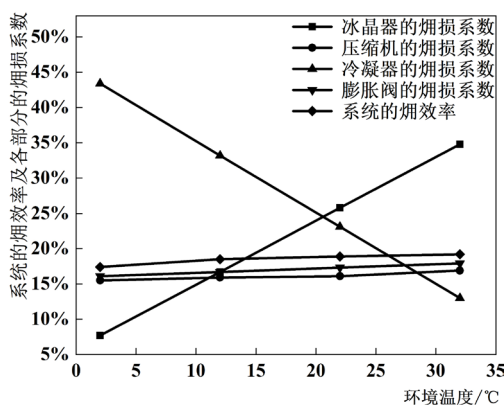


Figure 6. Exhaust efficiency and exergy loss coefficient of each component when the ambient temperature changes

图 6. 环境温度变化时的焓效率及各组分焓损系数

环境温度从 2°C 升高至 32°C 时，冰晶器的焓损系数从 7.7% 上升到 34.8% ，而冷凝器的焓损系数从 43% 降低至 13% ；制冷剂工质在冰晶器内蒸发吸热，经过压缩机后在冷凝器内释放热量进行冷却，环境温度主要是通过影响换热过程对焓损系数产生影响，在 2°C 至 32°C 摄氏度时，提高环境温度可以使焓效率提升了约 2% ，环境温度对系统的效率影响较小。

3.3. 制冷剂种类单因素设计

目前制冷剂的种类选择已经成为制冰系统以及制冷系统所面对的重要问题，R22 制冷剂是目前使用

最广泛地制冷剂,属于 HCFC 类制冷剂,但是 R22 制冷剂会对环境造成极大的破坏,因此寻求合理的制冷剂 R22 的替代物是当前的研究热点之一[12]。R410A 制冷剂是一种新型环保的制冷剂,是两种烷的混合物(R32 和 R125),其不会破坏臭氧层,R410A 制冷剂的 GWP 比 R22 的 GWP 高了 16%,性能系数 COP 大约提升 8%,因此 R410A 被视为 R22 的中长期的制冷剂替代物[13]。R407C 是一种三元非共沸混合物,其 ODP 值为 0, GWP 值较高,它是直接替代 R22 的合适工质,可不换压缩机,但 R407C 的主要缺点是传热性能较差[14]。R404A 制冷剂可以在一定程度上替代 R22,但其使用成本过高,不易大量使用。

R1234ze 属于氢氟烯烃制冷剂,ODP 为 0, R1234ze 的 GWP 值远小于其他几种工质的值, R1234ze 制冷剂的不足之处是该制冷剂的单位制冷量较低,而 R152A 制冷剂具有较高的单位容积的制冷量和能效比,但是制冷剂 R152A 具有较大的可燃性,可能存在较大的安全隐患[15] [16] [17] [18] [19]。因此目前有学者提出使用混合工质 NCUR01 (R1234ze:R152A = 40:60),可以使得含有 40%的 R1234ze 不燃组分加入到易燃组分 R152A 中去,能够有效地提升新型制冷剂的安全性能,而且 NCUR01 制冷剂 ODP 值也为 0,对环境影响较小,是可以替代 R22 制冷剂的可行性新型制冷剂[20]。因此在冷凝温度 40℃,环境温度 2℃,蒸发温度为-25℃时,设计制冷剂种类分别为 R410A、R404A、R407C、R1234ze、R152A、R1234yf 进行实验,表 2 是不同制冷剂时的系统参数。

Table 2. System parameters of different refrigerants

表 2. 不同制冷剂的系统参数

制冷剂种类	制冷量(kJ/kg)	压缩机做功(kJ/kg)	冷量焓(kJ/kg)	制冷系数
R410A	145.25	65.00	11.32	2.23
R404A	92.31	49.84	7.24	1.85
R407C	136.05	68.09	10.66	2.21
R1234ze	111.75	53.95	8.76	2.07
R152A	118.08	85.96	17.09	2.54
R1234yf	91.91	46.92	7.20	1.96
NCUR01	172.29	71.34	13.50	2.42

制冷剂工质变化时,系统的焓效率及各部分的焓损如图 7 所示。

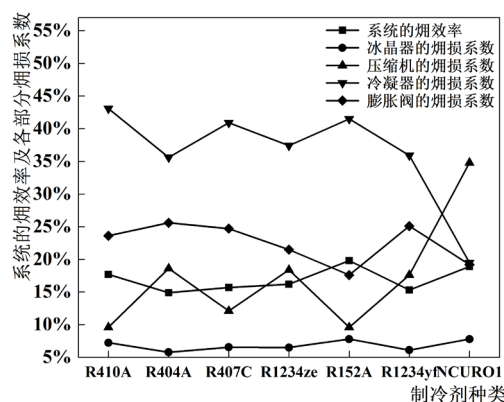


Figure 7. Exhaust efficiency and exergy loss coefficient of each part when the refrigerant changes

图 7. 制冷剂变化时的焓效率及各部分的焓损系数

当制冷剂为 R410A、R407C 和混合工质 NCUR01 时，系统制冷系数在 2.2 左右，焓效率均为 18% 左右，适合作为制冰系统的工质。冰晶器的焓损系数波动幅度只有 2% 左右，不同的制冷剂种类对冰晶器的焓损影响不大。而新型的混合制冷剂工质 NCUR01 在使用过程中冷凝器的焓损系数只有 20%，相较于大多数制冷剂这一数值较低，但压缩机焓损系数较高达到 35%，这是由于新型制冷剂在实际应用过程中对压缩机的要求更高，因此在使用这一制冷剂时要注意与压缩机匹配。

3.4. 蒸发温度的单因素设计

制冷系统的蒸发温度是影响制冷系统运行效率的关键因素，蒸发温度是工质在工作压力下的沸点。蒸发温度的高低决定了蒸发压力的大小，同时影响着压缩机在实际工作工程中的效率，因此在冷凝温度 40℃，制冷剂为 R410A，环境温度 2℃，设计蒸发温度分别为 -25℃、-15℃、-5℃、5℃，表 3 是蒸发温度变化时系统的参数。

Table 3. System parameters at evaporation temperature

表 3. 蒸发温度下的系统参数

蒸发温度(℃)	制冷量(kJ/kg)	压缩机做功(kJ/kg)	冷量焓(kJ/kg)	制冷系数
-25	145.25	65	11.32	2.23
-15	149.45	52.23	11.71	2.86
-5	153.45	42.62	12.03	3.59
5	157.15	34.01	12.32	4.62

蒸发温度变化时，系统的焓效率及各部分的焓损如图 8 所示。

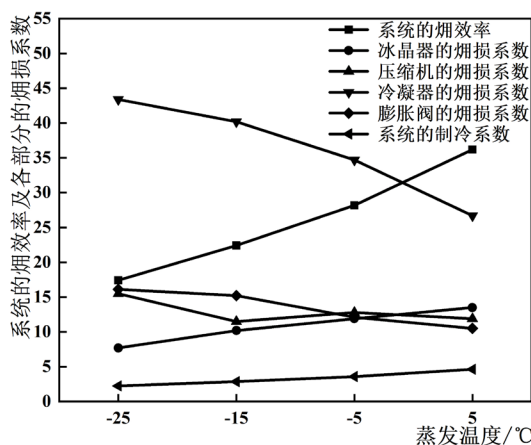


Figure 8. Exergy efficiency and exergy loss coefficient of each part when the evaporation temperature changes

图 8. 蒸发温度变化时的焓效率及各部分的焓损系数

在蒸发温度为 -25℃ 冷凝器的焓损系数为 43.2%，造成了多数能量的损失；在蒸发温度为 5℃ 时，冰晶器的焓损系数达到了 13.4%，焓损系数最高，蒸发温度升高时，冰晶器内的蒸发吸热过程收到负面影响，降低其换热效率；同时较高的蒸发温度会使压缩机的排气温度升高，会影响压缩机的正常工作，蒸发温度同时也不能过低，蒸发温度 -25℃ 以下时，系统的工作效率低下，不利于相关实验的开展。

4. 正交实验设计

4.1. 正交实验因素水平的选取

由于单因素实验存在一定的局限性, 因此为确保实验的可靠性, 在单因素的基础上选取较为合适的实验因素水平进行相关的正交试验设计, 在单因素的基础上对制冷剂进行筛选, NCUR01, R410A 以及 R407C, 这三种制冷剂安全环保, 且实验过程中, 系统的焓效率和制冷系数较高, 因此制冷剂选择分别为 NCUR01、R410A、R407C; 冷凝温度是将制冷剂工质由饱和和气态冷却为液态的温度, 冷凝温度过高(40℃或 50℃以上)会使得冷凝效果达不到预期; 同时, 如果冷凝温度过低(0℃及以下), 会有大量制冷剂积存于冷凝器中, 实际参加循环的工质大大减小, 因此冷凝温度选择为 10℃、20℃、30℃; 环境温度参考第三节中的郑州市一年四季的平均温度, 不考虑冬季极低的(接近 0℃及以下)温度水平, 因此环境温度的选择为 12℃、22℃、32℃; 蒸发温度的高低决定着蒸发压力的高低, 同时这一参数影响着压缩机的工作状况, 蒸发温度一般比冷却水的温度低 10℃, 因此蒸发温度选择为-25℃、-15℃、-5℃。通过对单因素实验结果以及相关文献的分析, 发现冷凝温度在 40℃以上以及 10 摄氏度以下会使制冷系统的工作效率大幅度降低, 因此选择冷凝温度为 10℃、20℃、30℃; 选择制冷剂 NCUR01、R410A、R407C 是在多种制冷剂在同种工况下进行比较, 选择了三种制冷效率较高的制冷剂种; 选择环境温度是根据郑州市一年内各季度平均温度进行选择, 制冷系统在温度极低的情况下基本不会选择使用, 因此选择的环境温度为 12℃、22℃、32℃, 蒸发温度的高低决定了系统内蒸发器的效率, 因此通过单因素分析得到使得系统效率较高的温度为-25℃、-15℃、-5℃, 上述各因素及其相应的水平可以使得正交实验比较充分的进行, 对上述各因素及水平进行四因素三水平正交实验设计, 抽签数据如表 4 所示。

Table 4. Lottery data

表 4. 抽签数据

水平	制冷剂种类 A	冷凝温度 B (°C)	环境温度 C (°C)	蒸发温度 D (°C)
1	NCUR01	10	12	-25
2	R410A	20	22	-15
3	R407C	30	32	-5

4.2. 正交实验的极差分析

通过上述抽签表得到混合水平的正交实验设计表 $L_9(3^4)$, 因实验的评价指标为系统的焓效率和制冷系数, 是双评价指标, 因此评价指标采用模糊数学中的隶属度函数对该实验结果进行综合评定, 且两种评价指标的权重各占 50%, 正交试验的极差分析表 5 所示。

通过正交实验的综合评分数据得到各因素对实验结果的影响主次分别是: A (制冷剂种类), B (冷凝温度), D (蒸发温度), C (环境温度), 通过计算得到系统的最优实验方案是: 制冷剂为 NCUR01、冷凝温度 10℃、蒸发温度-5℃、环境温度 12℃, 在这个实验条件下, 系统的制冷系数 $\varepsilon = 4.97$, 焓效率 $\eta = 47.1\%$ 。由正交试验的极差分析得到, 在制冷剂发生改变时, 系统的综合评分变化幅度为 1.5, 会对结果产生较大的影响; 提高冷凝温度时, 系统的综合评分降低了 1.1, 且冷凝温度越高, 综合评分的结果越小, 因此在进行实验过程中, 应尽可能的降低冷凝温度来提高系统的制冷系数和焓效率; 而提高蒸发温度时, 系统的综合评分提升了 0.7, 蒸发温度对实验结果的影响比前两者带来的影响较弱; 当环境温度从 12℃升高至 22℃时, 系统的综合评分降低了 0.3, 但是在环境温度从 22℃到 32℃时, 综合评分只有 0.01 左右的波动, 环境温度对实验结果产生的影响最小。

Table 5. Range analysis of orthogonal test
表 5. 正交试验的极差分析

实验组号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	制冷系数	焓效率	制冷系数隶属度	焓效率隶属度	综合评价指标	
1	1	1	1	1	4.93	42.10%	1.000	1.000	1	
2	1	2	2	2	4.89	36.28%	0.996	0.761	0.879	
3	1	3	3	3	4.67	32.72%	0.888	0.614	0.751	
4	2	1	2	3	4.51	32.76%	0.824	0.616	0.720	
5	2	2	3	1	3.30	23.12%	0.340	0.220	0.280	
6	2	3	1	2	3.48	26.30%	0.412	0.350	0.381	
7	3	1	3	2	4.05	28.39%	0.640	0.436	0.538	
8	3	2	1	3	4.24	32.04%	0.716	0.586	0.651	
9	3	3	2	1	2.45	17.78	0	0	0	
K ₁	2.630	2.258	2.032	1.280						
K ₂	1.381	1.810	1.599	1.798						
K ₃	1.124	1.132	1.569	2.122						
k ₁	0.877	0.753	0.677	0.427						
k ₂	0.460	0.603	0.533	0.599						
k ₃	0.375	0.377	0.523	0.707						
极差 R	0.502	0.376	0.154	0.280						
	因素 主→次						ABDC			
	最优方案						A ₁ B ₁ C ₁ D ₃			

5. 结论

本文通过采用单因素实验和正交实验的方法对刮削法冰浆制取系统进行热力学分析,得到如下结论:

1) 刮削法制取冰浆时,系统的焓损主要集中在冰晶器和冷凝器这两个进行换热部分的元件中;降低冷凝温度,提高蒸发温度以及选取性质优良的制冷剂工质 NCUR01,可以有效地降低系统的焓损,提高制冰系统的效率。

2) 新型的环保制冷剂 NCUR01 可以从提高效率和环保等方面有效地代替目前市场上的 R22 制冷剂,为制取冰浆选择合适的制冷剂提供了有效的依据。

3) 四个因素对试验结果的影响主次顺序为: 制冷剂种类 > 冷凝温度 > 蒸发温度 > 环境温度; 系统的制冷系数 $\varepsilon = 4.97$, 焓效率 $\eta = 47.1\%$ 达到最优值; 冷凝温度 10°C , 环境温度 12°C , 制冷剂为 NCUR01, 蒸发温度为 -5°C 为最佳实验方案。

参考文献

- [1] Alok, K., Sateesh, K.Y., Ankit, M., *et al.* (2019) On-Demand Intermittent Ice Slurry Generation for Subzero Cold Thermal Energy Storage: Numerical Simulation and Performance Analysis. *Applied Thermal Engineering*, **161**, Article ID: 114081. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114081>
- [2] Kauffeld, M. and Gund, S. (2019) Ice Slurry—History, Current Technologies and Future Developments. *International Journal of Refrigeration*, **99**, 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.01.010>
- [3] Guo, W.M., Zhang, Y.L. and Meng, Z.N. (2020) Non-Uniform Melting of a Spherical Ice Particle in Free Ascending.

- International Journal of Heat and Mass Transfer*, **148**, Article ID: 119097.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119097>
- [4] Gao, Y.G., Xi, Y.Y., Yang, Z.Z., Sasmito, A.P., Mujumdar, A.S. and Wang, L.J. (2021) Experimental Investigation of Specific HEAT of Aqueous Graphene Oxide Al_2O_3 Hybrid Nanofluid. *Thermal Science*, **25**, 515-525.
<https://doi.org/10.2298/TSCI190404381G>
- [5] Brooks, S., Quarini, G., Tierney, M., Yun, X. and Lucas, E. (2020) Conditions for Continuous Ice Slurry Generation in a Nylon Helical Coiled Heat Exchanger. *Thermal Science and Engineering Progress*, **15**, Article ID: 100427.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100427>
- [6] 王泽普. 刮削式流化冰制冰设备的优化设计[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2017.
- [7] 黄成, 吴昊凡, 黄河源, 等. 螺旋刮削式流态冰制取性能的实验研究[J]. 化工进展, 2017, 36(1): 59-65.
- [8] 王磊. 基于 Simulink 的刮片式流化冰制冰系统的动态仿真及性能优化[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津大学, 2017.
- [9] 饶志明. 刮片式冰浆制取系统的分析与实验研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津商业大学, 2013.
- [10] Tatsunori, A. and Yusuke, E. (2020) Experimental Study on Absorption Ice Slurry Generator with Ethanol Solution as the Refrigerant. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **162**, Article ID: 120333.
<https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120333>
- [11] Zhang, X.H., Dou, K., Zhang, G.W., Li, X.G., Cheng, W.S. and Zhu, H. (2021) Preparation of CO_2/N_2 Cryogenic Slurry and Its Pipeline Flow Characteristics. *E3S Web of Conferences*, **233**, Article ID: 01068.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123301068>
- [12] Hazarika, M.M., Ramgopal, M., Bhattacharyya, S. and Doménech, R.L. (2021) Role of Receiver on the Performance of a Transcritical CO_2 Based Air-Conditioning Unit with Single-Stage and Two-Stage Expansion. *Science and Technology for the Built Environment*, **27**, 1-28. <https://doi.org/10.1080/23744731.2021.1902189>
- [13] Faizan, A. (2021) Experimental Investigation of Al_2O_3 -Water Nanofluid as a Secondary Fluid in a Refrigeration System. *Case Studies in Thermal Engineering*, **26**, Article ID: 101024. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101024>
- [14] Gao, Y.G., Wang, H.C., Sasmito, A.P. and Mujumdar, A.S. (2018) Measurement and Modeling of Thermal Conductivity of Graphene Nanoplatelet Water and Ethylene Glycol Base Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **123**, 97-109. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.02.089>
- [15] Hu, J., Liu, C., Li, Q., et al. (2019) Thermal Energy Storage of R1234yf/MOF-5 and R1234ze(Z)/MOF-5 Nanofluids: A Molecular Simulation Study. *Energy Procedia*, **158**, 4604-4610. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.870>
- [16] Kosei, T., Shou, S., Takahiko, M., Nobuo, T., Yukihiro, H. and Kyaw, T. (2021) Heat Pump Cycle Using Refrigerant Mixtures of HFC32 and HFO1234yf. *Heat Transfer Engineering*, **42**, 1-14.
<https://doi.org/10.1080/01457632.2020.1776997>
- [17] Longo, G.A., Mancin, S., Righetti, G., et al. (2019) R1234yf and R1234ze(E) as Environmentally Friendly Replacements of R134a: Assessing Flow Boiling on an Experimental Basis. *International Journal of Refrigeration*, **108**, 336-346.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.09.008>
- [18] Lee, D.C., Yun, S.H., Choi, J.Y. and Kim, Y.C. (2021) Flow Patterns and Heat Transfer Characteristics of R-1234ze(E) for Downward Condensation in a Plate Heat Exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **175**, Article ID: 121373. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121373>
- [19] Colombo, L.P.M., Lucchini, A. and Molinaroli, L. (2020) Experimental Analysis of the Use of R1234yf and R1234ze(E) as Drop-In Alternatives of R134a in a Water-to-Water Heat Pump. *International Journal of Refrigeration*, **115**, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.03.004>
- [20] Zhang, S.Z., Li, Y., Xu, Y.Y., Yang, J.H. and Wang, Q. (2021) A New Method for Estimating the Refrigerant Distribution in Plate Evaporator Based on Infrared Thermal Imaging. *International Journal of Refrigeration*, **126**, 57-65.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.01.030>