

# 直接接触式冰浆制备系统的热力分析与优化

方甫<sup>\*</sup>, 巫成真, 宁一霖, 高玉国<sup>#</sup>

华北水利水电大学机械学院, 河南 郑州  
Email: #gaoyuguo@ncwu.edu.cn

收稿日期: 2021年4月27日; 录用日期: 2021年5月10日; 发布日期: 2021年6月16日

## 摘要

为了提高直接接触式制冰系统的冷量焓效率和制冷系数, 把该系统简化为理想模型并做出热力学分析和计算, 从中得到主要影响因素为: 环境温度、冷凝温度、蒸发温度。以RC318为制冷剂设计 $L_9(3^4)$ 正交试验探究系统冷量焓效率和制冷系数综合的最优值, 结果表明: 各因素对目标值的影响顺序为冷凝温度、环境温度、蒸发温度; 当环境温度为 $38^\circ\text{C}$ , 冷凝温度为 $20^\circ\text{C}$ , 蒸发温度为 $-7^\circ\text{C}$ 时系统最优, 系统冷量焓效率为44.39%, 制冷系数为3.10; 各因素对综合评分的趋势表明: 满足循环系统工作的前提下, 冷凝温度、蒸发温度越小同时环境温度越大的情况下系统冷量焓效率和制冷系数越高, 冷凝温度和环境温度对目标值影响波动幅度大, 蒸发温度对目标值的影响波动幅度小; 方差分析表明: 各因素对目标值影响的顺序与正交试验极差法结果一致, 并分析得到冷凝温度对目标值的影响比较显著, 环境温度影响较显著, 受RC318制冷剂性质的影响, 蒸发温度影响不显著。

## 关键词

直接接触, 热力分析, 正交试验, 方差分析

# Thermal Analysis and Optimization of Direct Contact Ice Slurry Preparation System

Fu Fang<sup>\*</sup>, Chengzhen Wu, Yilin Ning, Yuguo Gao<sup>#</sup>

School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan  
Email: #gaoyuguo@ncwu.edu.cn

Received: Apr. 27<sup>th</sup>, 2021; accepted: May 10<sup>th</sup>, 2021; published: Jun. 16<sup>th</sup>, 2021

<sup>\*</sup>第一作者。

<sup>#</sup>通讯作者。

## Abstract

In order to improve the cooling capacity exergy efficiency and refrigeration coefficient of the direct contact ice making system, the system is simplified into an ideal model and thermodynamic analysis and calculations are made. The main influencing factors are: ambient temperature, condensation temperature, and evaporation temperature. Using RC318 as the refrigerant to design  $L_9(3^4)$  orthogonal test to explore the optimal value of the system's cooling capacity exergy efficiency and refrigeration coefficient, the results show that the order of influence of each factor on the target value is condensing temperature, ambient temperature, and evaporating temperature; When the ambient temperature is  $38^\circ\text{C}$ , the condensing temperature is  $20^\circ\text{C}$ , and the evaporation temperature is  $-7^\circ\text{C}$ , the system is optimal, the cooling capacity exergy efficiency of the system is 44.39%, and the refrigeration coefficient is 3.10; the trend of various factors on the comprehensive score shows that the cycle is satisfied Under the premise of system operation, the lower the condensing temperature and evaporating temperature and the higher the ambient temperature, the higher the cooling capacity and refrigeration coefficient of the system will be. The condensing temperature and ambient temperature have a large impact on the target value and the evaporating temperature will affect the target value. The impact of the impact on the target value is small; the analysis of variance shows that the influence order of each factor on the target value is consistent with the result of range method of orthogonal test, and the influence of condensation temperature on the target value is significant. The influence of environmental temperature is significant, and the influence of evaporation temperature is not significant due to the properties of RC318 refrigerant.

## Keywords

Direct Contact, Thermal Analysis, Orthogonal Experiment, Variance Analysis

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/>



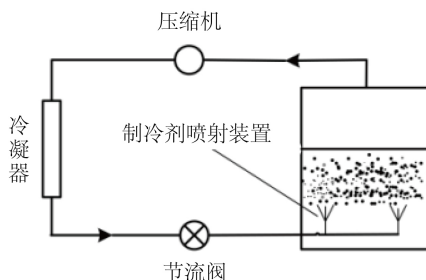
Open Access

## 1. 引言

冰浆作为一种重要且已被广泛应用的相变蓄冷材料,是指含有冰晶粒子的固液混合物,其中冰晶颗粒的直径不超过 1 mm,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。冰浆已被应用于太阳能、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]。冰浆制备方法主要包括:过冷水法、壁面刮削法、流化床法、真空法和直接接触法[5] [6] [7]。其中直接接触式制取冰浆的系统图如图 1 所示,它是当前制取冰浆的主要发展方向,直接接触式与间接接触式换热器相比,其换热面积大,传热更快,不仅可以节约成本、还可以提高换热效率,达到节能降耗的目的[8] [9] [10] [11]。近年来,有人提出一种新式的直接接触冰浆制取装置——多喷嘴对喷直接接触式冰浆制取装置,该方式增大介质的有效换热接触面积、提高了传热效率、避免了冰堵风险[12]。也有研究发现,在冰浆制备中,向溶液中添加纳米颗粒,可以促进冰晶的成核,降低溶液的过冷度,提高溶液的传热性能,更加节约能源[13]。理想的制冷剂应对臭氧层无破坏、对地球变暖影响小;毒性、易燃、易爆性符合要求,直接接触式制取冰浆的方法对制冷剂还应具有一定的化学和热稳定性、具有理想的热物理性质、具有一定的材料适用性、经济性好,直接接触式制冷剂还应该满足不溶于水且易于和水分离、能发生相变的条件[14] [15] [16]。直接接触式制取冰

浆中冷量的获取是整个制冰的收益量，系统冷量焓效率和制冷系数至关重要。

本文根据热力学第一第二定律对直接接触法制取冰浆建立循环制冰系统，并进行热力学分析，探究对系统冷量焓效率和制冷系数的影响因素，并以 RC318 为制冷剂设计正交试验和方差分析找出系统冷量焓效率和制冷系数综合的最优值。

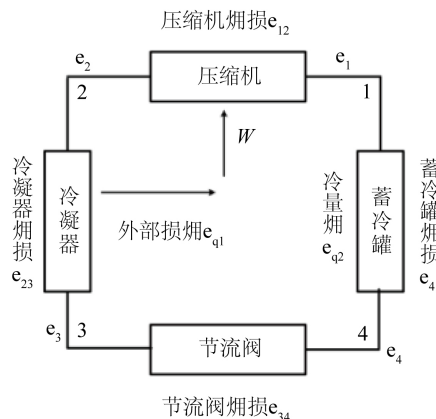


**Figure 1.** Direct contact ice-making system  
**图 1.** 直接接触式制取冰浆系统

## 2. 循环系统热力学分析

### 2.1. 制冰系统的简化

把图 1 简化为一个往复的制冷循环，直接接触式制冰循环系统简化模型如下图 2。



**Figure 2.** Simplified model of circulatory system and exergy balance of each part  
**图 2.** 循环系统的简化模型各部分焓平衡

### 2.2. 理想制冷循环焓熵图

根据理想蒸汽压缩制冷循环建立如下图 3 所示的热力学温熵图。温熵图中 1-2 绝热压缩过程(1 点为制冷剂饱和和气态蒸汽状态)；2-3 定压冷凝放热过程(3 点为制冷剂饱和和液态蒸汽状态)；3-4 膨胀阀节流过程(等焓)；4-1 等温定压蒸发吸热过程[17]。

### 2.3. 循环系统焓分析

根据热力学知识对循环系统进行焓分析[18] [19]。图 3 系统循环 1-2 过程压缩机压缩制冷剂，压缩功为：

$$w = h_2 - h_1 \quad (1)$$

式中:  $w$  为压缩功, KJ/kg;  $h_i$  为系统循环温熵图  $i$  点对应的焓值, KJ/kg。

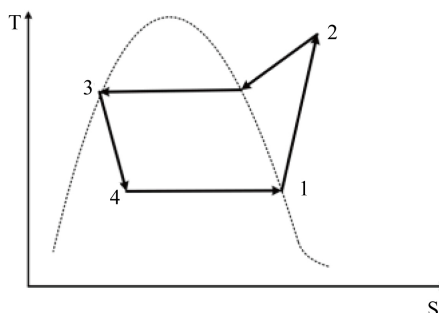


Figure 3. Thermodynamic temperature entropy diagram

图 3. 热力学的温熵图

循环系统 2-3 冷凝器放热过程, 放出的热量为:

$$q_1 = h_2 - h_3 \quad (2)$$

$q_1$  为冷凝器放出的热量, KJ/kg。

循环系统 4-1 制冷剂汽化吸热过程, 循环单位质量工质在蓄冷罐中的吸热量为:

$$q_2 = h_1 - h_4 \quad (3)$$

式中:  $q_2$  为蓄冷罐中的吸热量, KJ/kg。

循环系统的制冷系数为:

$$\varepsilon = \frac{q_2}{w} \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon$  为循环系统的制冷系数。

蓄冷罐中的冷量焓为:

$$e_{q_2} = q_2 (T_0/T - 1) \quad (5)$$

式中:  $T_0$  为环境温度, K;  $T$  为蓄冷罐内冰浆温度, K;  $e_{q_2}$  为制冰过程中的冷量焓, KJ/kg。

冷凝器中的热量焓计算公式为:

$$e_{q_1} = q_1 (1 - T_2/T_1) \quad (6)$$

式中:  $T$  为冷凝器温度, K;  $T_2$  为冷凝器内环境温度, K;  $e_{q_1}$  为冷凝器内向环境放出热量的热量焓, KJ/kg。

在整个循环系统中系统的冷量焓效率为:

$$\eta_m = \frac{e_{q_2}}{w} \quad (7)$$

式中:  $\eta_m$  为系统的冷量焓效率。

对循环系统建立焓平衡进行焓分析, 系统各个部分焓平衡如图 2 所示。

(1) 压缩机

以循环系统 1-2 过程的压缩机为系统进行焓分析, 以稳定流动工质进行计算, 可得压缩机焓损失  $e_{12}$  为:

$$e_{12} = T_0 (s_2 - s_1) \quad (8)$$

### (2) 冷凝器

以 2-3 过程冷凝器为系统, 冷凝器总的焓损失整理得为:

$$e_{q_1} + e_{23} = q_1 - T_0 (s_2 - s_3) \quad (9)$$

### (3) 节流阀

以 3-4 过程节流阀为系统, 节流阀焓损  $e_{34}$  整理为:

$$e_{34} = T_0 (s_4 - s_3) \quad (10)$$

### (4) 蓄冷罐

以 4-1 过程蓄冷罐为系统, 蓄冷罐焓损  $e_{41}$  整理为:

$$e_{41} = T_0 (s_1 - s_4) - T_0 / T (h_1 - h_4) \quad (11)$$

以 RC318 为制冷剂分析该循环系统的焓损和焓效率, RC318 不溶于水, 不与水发生反应, 不含破坏臭氧层的氯原子, 无毒、不燃, 液态密度大于水, 可在水底部利用相变吸热[16], RC318 是适合直接接触式制冰的制冷剂。选用 RC318 制冷剂, 环境温度为 25℃, 冷凝温度为 30℃, 蒸发温度为-11℃进行焓分析。根据 REFPROP 软件查取数据, 计算结果如表 1 所示。表 1 中看出各焓损中压缩机焓损失最大, 主要原因是压缩机把制冷剂从低温低压状态压缩到高温高压状态制冷剂不可逆因素存在且不可逆性很大因此熵值增加过多, 造成压缩功损失量过大, 实际压缩机焓损来源于实际循环压缩过程 RC318 制冷剂的性质造成不可逆压缩焓损过多, 其值主要取决于压比和压缩机的制造技术, 随着压比和压缩机内部摩擦阻力的增大, 不可逆损失也跟着增大。制冷循环中主要目标是制冷系数和系统的冷量焓效率, 故应该综合提升这两者的数值。

**Table 1.** Exergy efficiency

**表 1.** 焓效率

数据值	压缩机焓损 $e_{12}/(\text{KJ/kg})$	冷凝器外部焓损 $e_{q1}/(\text{KJ/kg})$	冷凝器内部焓损 $e_{23}/(\text{KJ/kg})$	节流元件焓损 $e_{34}/(\text{KJ/kg})$	蓄冷罐焓损 $e_{41}/(\text{KJ/kg})$	冷量焓 $e_{q2}/(\text{KJ/kg})$	制冷系数 $\epsilon$
焓/(KJ/kg)	27.89	2.00	2.66	3.79	3.13	7.12	1.60
系统效率/(%)	59.86	4.29	5.71	8.13	6.72	15.28	

## 3. 正交试验设计

### 3.1. 正交表设计

根据热力学分析可知影响系统焓的因素有: 环境温度, 冷凝温度, 蒸发温度, 以这三种影响因素设计正交试验探究系统冷量焓效率和制冷系数的最优值。以 RC318 为制冷剂, 每因素三种水平设计正交试验。对应因素水平的选取准则是: 环境温度是根据郑州四季的变化而取得(不考虑零下温度), 故除去冬天

零下温度的选取, 初春和冬天零上温度选取 2℃ 为代表, 秋天和晚春综合考虑选取 15℃, 夏天温度较高郑州最高温度偶有达到 40℃ 综合考虑选取 38℃; 冷凝温度的选取: 实际循环工作过程中压缩机的排气温度和排气压力决定着冷凝温度的选取, 冷凝温度和蒸发温度选取对应的压力又同时影响着压缩机的压缩比, 冷凝温度的选取影响着通过节流阀时的压降大小, 冷凝温度越小节流阀压降越小通过节流阀的制冷剂流量越少制冷效果不佳, 所以根据综合因素选择合适的冷凝温度: 20℃, 35℃, 50℃; 蒸发温度的选取: 蒸发温度的选取考虑到制冷工质的制冷温度下限(基本稳定在 272.15 K 附近)和直接接触式制冷方式的换热效率(该方式换热效率高), 该制冷循环中蒸发温度对应的压力就是压缩机的进气压力, 冷凝温度对应的压力等于压缩机的排气压力, 蒸发温度和冷凝温度的选取直接决定着压缩机的压缩比[20] [21], 所以根据综合因素选择合适的蒸发温度: -7℃, -17℃, -27℃。故根据以上条件合理选取环境温度: 2℃, 15℃, 38℃; 冷凝温度: 20℃, 35℃, 50℃; 蒸发温度: -7℃, -17℃, -27℃。为了避免人为因素造成系统误差, 故抽签得到因素水平数据如表 2 所示[22]。

**Table 2.** Draw data

**表 2.** 抽签数据

因素	环境温度/℃ (A)		冷凝温度/℃ (B)	蒸发温度/℃ (D)
水平	1	15	50	-7
	2	38	35	-27
	3	2	20	-17

如果以四因素三水平实验探究系统冷量焓效率和制冷系数的综合最优值, 那么需要  $3^3$  组试验数据, 数据量较大, 因此采用四因素三水平的正交试验  $L_9(3^4)$  九组实验就能得到系统冷量焓效率和制冷系数的综合最优值, 正交试验设计表格如下表 3 所示[22]。

**Table 3.** Orthogonal test design table

**表 3.** 正交试验设计表

试验号	A	B	空列	D	实验方案
1	1	1	1	1	$A_1B_1D_1$
2	1	2	2	2	$A_1B_2D_2$
3	1	3	3	3	$A_1B_3D_3$
4	2	1	2	3	$A_2B_1D_3$
5	2	2	3	1	$A_2B_2D_1$
6	2	3	1	2	$A_2B_3D_2$
7	3	1	3	2	$A_3B_1D_2$
8	3	2	1	3	$A_3B_2D_3$
9	3	3	2	1	$A_3B_3D_1$

### 3.2. 正交试验数据

目标值用综合评定且系统冷量焓效率和制冷系数的权重各占一半的方法做正交试验, 用 Excel 做正交试验分析结果如下表 4 所示。通过 k 值得到极差 R, 极差 R 的大小可以得到主要的影响顺序依次为 B (冷

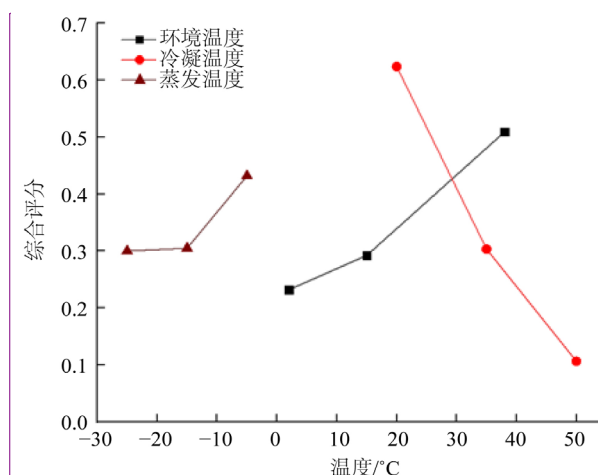
凝温度), A (环境温度), D (蒸发温度); 通过 K 值确定最优方案为 A<sub>2</sub>B<sub>3</sub>D<sub>1</sub> 环境温度为 38℃, 冷凝温度为 20℃, 蒸发温度为-7℃的试验方案, 此方案计算得到数据为: 系统的冷量焓效率  $\eta_m$  为 44.39%, 制冷系数  $\varepsilon = 3.10$ 。

各因素综合评定的趋势图如图 4 所示。图 4 中看出环境温度越高对应的综合评分越大, 其中制冷系数是制冷量和压缩机耗功的比值, 制冷量是制冷剂蒸发前后的焓值之差, 所以环境温度对制冷系数没有影响, 故图 4 中环境温度对综合评分的影响实际上是对系统冷量焓效率的影响, 该循环制取的冰浆它的温度波动不大一般稳定在-1℃, 当其它影响因素一定时, 环境温度在热力学中相当于高温热源, 制取的冰浆看成低温热源且当做一定值, 根据卡诺定理低温热源一定高温热源越大系统效率越高故系统冷量焓效率值越大, 综合评分呈现上升趋势。图 4 中冷凝温度越低综合评分呈现上升趋势, 当其它因素一定时, 冷凝温度越低制冷剂在冷凝器内放出的热量越多, 冷凝温度越低对应点制冷剂的焓值和压力也就越小压缩机的排气压力也就越小, 压缩机的压缩比和排气温度也就越小, 压缩机耗功越少, 同时对应点制冷剂的焓值的减小让蓄冷罐内的制冷量和冷量焓增大, 制冷系数和系统冷量焓效率都变大, 故冷凝温度越低制冷系数和系统效率的综合评分呈上升趋势。图 4 中蒸发温度越大综合评分越大但增长趋势较为缓慢, 其它影响因素一定, 蒸发温度越大压缩机进气压力和焓值都增大, 压缩机压缩比减小压缩机耗功减少, 由于 RC318 制冷剂性质的原因蒸发温度越高它对应的焓值和压力都有所提升但增长波动不明显, 制冷量增长的少, 所以图 5 中蒸发温度越大综合评分呈上升趋势但折线图相对波动幅度小。

**Table 4.** Orthogonal test results  
**表 4.** 正交试验结果

试验号	A	B	空列	D	系统冷量焓效率	制冷系数	系统冷量焓效率隶属度	制冷系数隶属度	综合评分	
1	1	1	1	1	4.57%	0.78	0.1563	0.1083	0.13230	
2	1	2	2	2	5.31%	0.90	0.1849	0.1516	0.16825	
3	1	3	3	3	13.45%	2.29	0.4998	0.6534	0.57660	
4	2	1	2	3	8.96%	0.61	0.3264	0.0469	0.18665	
5	2	2	3	1	22.19%	1.51	0.8379	0.3718	0.60485	
6	2	3	1	2	26.38%	1.79	1.0000	0.4729	0.73645	
7	3	1	3	2	0.53%	0.48	0.0000	0.0000	0.00000	
8	3	2	1	3	1.28%	1.16	0.0290	0.2455	0.13725	
9	3	3	2	1	3.58%	3.25	0.1180	1.0000	0.55900	
K <sub>1</sub>	0.87715	0.31895	1.00600	1.29615						
K <sub>2</sub>	1.52795	0.91035	0.91390	0.90470						
K <sub>3</sub>	0.69625	1.87205	1.18145	0.90050						
k <sub>1</sub>	0.292383	0.106317	0.335333	0.432050						
k <sub>2</sub>	0.509317	0.303450	0.304633	0.301567						
k <sub>3</sub>	0.232083	0.624017	0.393817	0.300167						
极差 R	0.277233	0.517700	0.089183	0.131883						
因素的主次					B	A	D			
最优方案					A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> D <sub>1</sub>					





**Figure 4.** Trends of various factors and comprehensive scores  
**图 4.** 各因素和综合评分分的趋势

### 3.3. 方差分析

根据正交试验表 4 数据进行方差分析[22], 得到数据如表 5 所示; 表 6 为其它影响因素一定时蒸发温度对应的数据; 图 5 图 6 为蒸发温度 $-27^{\circ}\text{C}$ 到 $-7^{\circ}\text{C}$ 变化对系统冷量焓效率和制冷系数的影响趋势图。

表 5 中分析得到系统冷量焓效率和制冷系数的影响因素顺序和正交试验极差法分析完全吻合, 影响顺序依次为冷凝温度、环境温度、蒸发温度; 其中冷凝温度对系统效率和制冷系数的综合影响较为显著, 环境温度对其影响显著, 蒸发温度对其综合影响不显著。表 6 中看出其它条件一定时, 由于 RC318 制冷剂性质的影响蒸发温度从 $-27^{\circ}\text{C}$ 到 $-7^{\circ}\text{C}$ 对应焓值的变化很小即冷量变化很小, 对应蒸发温度的压强变化也不显著对压缩机的压缩比影响小, 压缩机耗电波动小, 由于其它条件一定从图 5 和图 6 中能看出两者的曲线走势一致, 对目标值的影响波动情况不显著, 故方差分析得到由于制冷剂物性的原因蒸发温度对系统冷量焓效率和制冷系数综合影响不显著。

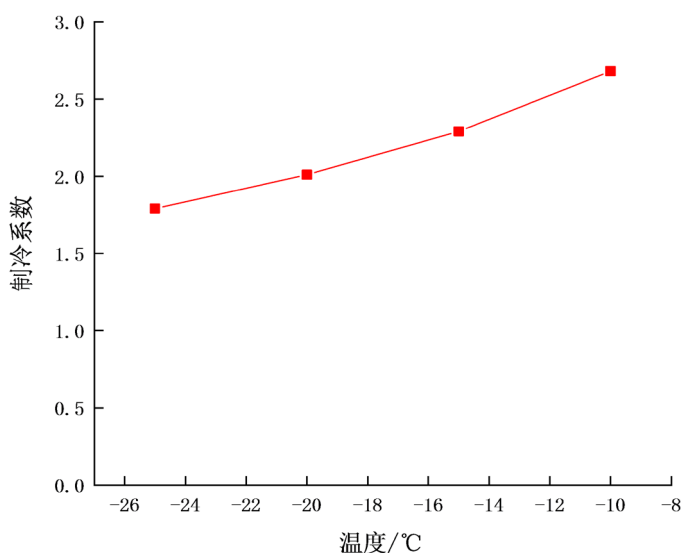
**Table 5.** Analysis of variance data  
**表 5.** 方差分析数据

差异源	SS	df	MS	F	显著性
A	0.127554	2	0.063777	10.35643	*
B	0.409638	2	0.204819	33.25939	**
D	0.034421	2	0.017211	2.794722	
误差 e	0.012316	2	0.006158		
$F_{0.1}(2,2)$	9		$F_{0.05}(2,2)$	19	

**Table 6.** Evaporation temperature data  
**表 6.** 蒸发温度数据

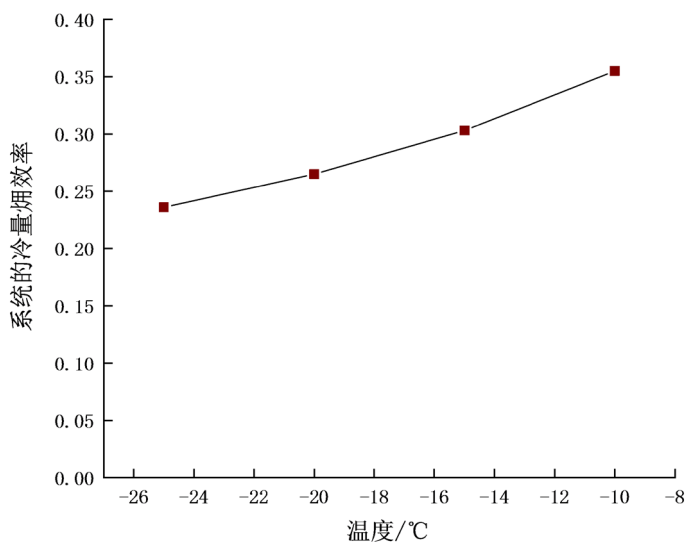
蒸发温度/ $^{\circ}\text{C}$	焓值/(KJ/kg)	压强/Mpa	制冷系数	系统的冷量焓效率
-25	297.73	0.0428	1.79	0.236
-20	301.06	0.0545	2.01	0.265
-15	304.41	0.0686	2.29	0.303
-10	307.77	0.0855	2.68	0.355





**Figure 5.** The influence of evaporating temperature on the coefficient of refrigeration

**图 5.** 蒸发温度对制冷系数的影响



**Figure 6.** The influence of evaporating temperature on the cooling capacity exergy efficiency of the system

**图 6.** 蒸发温度对系统冷量焓效率的影响

#### 4. 结论

本文通过热力学分析得到影响系统冷量焓效率和制冷系数的因素，采用正交试验和方差分析的方法得到如下结论：

(1) 对直接接触式制冰浆系统简化并建立温熵图，根据热力学相关知识对该循环系统各部分进行焓分析，以 RC318 为制冷剂，环境温度为 25℃，冷凝温度为 30℃，蒸发温度为 -11℃ 进行焓分析计算，得到压缩机损失是焓损失的主要部分。热力学分析得到影响系统冷量焓效率和制冷系数的因素有：环境温度，冷凝温度，蒸发温度。

(2) 根据影响因素设计每种因素三种水平建立  $L_9(3^4)$  正交试验探究系统冷量焓效率和制冷系数综合的最优值, 通过极差法得到对目标值的影响因素依次为冷凝温度、环境温度、蒸发温度, 计算分析得到最优方案为  $A_2B_3D_1$  环境温度为  $38^\circ\text{C}$ , 冷凝温度为  $20^\circ\text{C}$ , 蒸发温度为  $-7^\circ\text{C}$  的试验方案, 得到系统冷量焓效率为  $44.39\%$ , 制冷系数为  $3.10$ ; 各因素对综合评分趋势图表明: 在满足循环系统工作的前提下, 冷凝温度、蒸发温度越小同时环境温度越大的情况下系统冷量焓效率和制冷系数越高, 冷凝温度和环境温度对目标值影响波动幅度大, 冷凝温度对目标值的影响波动幅度小。

(3) 方差分析和正交试验极差法得到的因素影响顺序一致, 依次为冷凝温度、环境温度、蒸发温度, 分析得到冷凝温度对目标值的影响较为显著、环境温度影响显著、蒸发温度影响不显著。RC318 制冷剂性质的影响蒸发温度在  $-25^\circ\text{C}$  到  $-10^\circ\text{C}$  变化的过程中对应点的焓值和压强变化并不明显, 从图 5 图 6 中看出蒸发温度对制冷系数和系统冷量焓效率的影响趋势一致并得到对目标值的影响不显著。

## 基金项目

本文受河南省重点研发与推广专项 - 科技攻关(国际合作)项目(182102410087)的资助。

## 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.jheatmasstransfer.2019.119097>
- [4] Yang, L.Z., Villalobos, U., Akhmetov, B., et al. (2021) A Comprehensive Review on Sub-Zero Temperature Cold Thermal Energy Storage Materials, Technologies, and Applications: State of the Art and Recent Developments. *Applied Energy*, **23**, Article ID: 116555. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116555>
- [5] 何国庚, 吴锐, 柳飞. 过冷水法冰浆制取的实验设计与分析[J]. 低温与超导, 2006(4): 303-307.
- [6] Liu, X., Zhuang, K.Y., Lin, S., et al. (2017) Determination of Supercooling Degree, Nucleation and Growth Rates, and Particle Size for Ice Slurry Crystallization in Vacuum. *Crystals*, **7**, 128-141. <https://doi.org/10.3390/cryst7050128>
- [7] Zhang, X.J., Zheng, K.Q., Wang, L.S., et al. (2013) Analysis of Ice Slurry Production by Direct Contact Heat Transfer of Air and Water Solution. *Journal of Zhejiang University—Science A (Applied Physics & Engineering)*, **14**, 583-588. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1300171>
- [8] Park, P.M. (2010) Literature Research on the Production, Loading, Flow, and Heat Transfer of Slush Hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, 12993-13003.
- [9] Fu, H.L., Wang, Y.P., Huang, Q.W., et al. (2016) Direct Contact Evaporation Heat Transfer Coefficient and Drobble Size Distribution in a 2D Column. *Applied Thermal Engineering*, **96**, 568-575. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.11.109>
- [10] Martin, V., He, B. and Setterwall, F. (2010) Direct Contact PCM-Water Cold Storage. *Applied Energy*, **87**, 2652-2659. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.01.005>
- [11] Thongwik, S., Vorayos, N., Kiatsiriroat, T., et al. (2008) Thermal Analysis of Slurry Ice Production System Using Direct Contact Heat Transfer of Carbon Dioxide and Water Mixture. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **35**, 756-761. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.02.007>
- [12] 高玉国, 阿古斯·萨斯弥多, 秦朝举, 等. 一种直接接触式流态冰浆制取器及制取方法[P]. 中国, CN110500833A. 2019-11-26.
- [13] Gao, Y.G., Wang, H.C., Agus, P.S., et al. (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.jheatmasstransfer.2018.02.089>
- [14] Calm, J.M. (2008) The Next Generation of Refrigerants—Historical Review, Considerations, and Outlook. *Internation-*

- 
- tional Journal of Refrigeration*, **31**, 1123-1133. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2008.01.013>
- [15] Shaik, S.V. and Babu, T.A. (2020) Theoretical Energy Performance Assessment and Environmental Impact of Various New Ozone-Friendly Refrigerants Used in Residential Air Conditioners. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, **234**, 367-385. <https://doi.org/10.1177/0954408920928260>
- [16] Zhang, Y.K., Su, L., Dong, K.J., *et al.* (2019) Experimental Study of Ice Slurry Production System Using Direct Contact Heat Transfer of RC318 and Water in a Horizontal Pipe. *Energy Procedia*, **158**, 4495-4501. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.762>
- [17] 路贵香, 冯天平, 张猛. 压缩式制冷系统与吸收式制冷系统的对比[J]. 南方农机, 2020, 51(10): 212-218.
- [18] 张鹏飞, 柳建华. 直接接触式蓄冷系统热力性能分析[J]. 制冷与空调(四川), 2005, 19(3): 35-38.
- [19] 章学来, 李瑞阳, 束鹏程, 等. 直接接触式蓄冷循环的热力学研究[J]. 制冷, 2004, 23(1): 1-6.
- [20] Patel, V., Panchal, D., Prajapati, A., *et al.* (2019) An Efficient Optimization and Comparative Analysis of Cascade Refrigeration System Using  $\text{NH}_3/\text{CO}_2$  and  $\text{C}_3\text{H}_8/\text{CO}_2$  Refrigerant Pairs. *International Journal of Refrigeration*, **102**, 62-76. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.03.001>
- [21] Shen, D.M., Gui, C., Xia, J.H., *et al.* (2020) Experimental Analysis of the Performances of Unit Refrigeration Systems Based on Parallel Compressors with Consideration of the Volumetric and Isentropic Efficiency. *Fluid Dynamics and Materials Processing*, **16**, 489-500. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2020.08969>
- [22] 李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 第2版. 北京: 化学工业出版社, 2008.