

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.01.038

气调保鲜液氮充注沉浸式汽化器工作特性研究

郭嘉明^{1,2} 任俊杰^{1,2} 曾志雄^{1,2} 李斌^{1,2} 沈昊^{1,2} 吕恩利^{1,2}

(1. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 针对液氮充注气调方式液氮温度较低, 直接充注将对果蔬产生冻害问题, 为提高液氮汽化器出口温度的控制精度, 提高冷量利用率, 设计了一种蓄冷液氮充注沉浸式汽化器并搭建试验平台, 研究盘管长度、蓄冷剂类型和液氮流量等因素对汽化器工作特性的影响。基于传热理论建立了汽化器出口温度计算模型。计算得到的汽化器出口温度与试验值基本一致, 相对误差为 2.01% 和 8.06%。试验结果表明: 盘管长度、蓄冷剂类型和液氮流量都对汽化器工作特性有显著影响, 盘管长度和液氮流量与充注时间呈线性关系, 随着盘管长度增加或液氮流量减小, 相关系数升高; 当盘管长度为 3 m、液氮流量为 0.007 5 kg/s 和蓄冷剂类型为水时, 汽化器的换热性能较佳, 而当盘管长度为 3 m、液氮流量为 0.01 kg/s 和蓄冷剂类型为水时, 汽化器的蓄冷效率较佳。

关键词: 气调保鲜; 沉浸式汽化器; 出口温度; 盘管长度; 蓄冷剂类型; 液氮流量

中图分类号: S229

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)01-0349-06

OSID:



Operation Characteristics of Liquid Nitrogen Injection Heat Exchanger in Fresh-keeping Transportation Container with Controlled Atmosphere

GUO Jiaming^{1,2} REN Junjie^{1,2} ZENG Zhixiong^{1,2} LI Bin^{1,2} SHEN Hao^{1,2} LÜ Enli^{1,2}

(1. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment,

Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The fresh-keeping transportation container with controlled atmosphere by liquid nitrogen injection is an advanced and efficient equipment for transporting fruits and vegetables. The temperature of liquid nitrogen is -196°C . When liquid nitrogen was injected directly into the container, fruits and vegetables would be damaged. A heat exchanger with low control precision of the outlet temperature was used in the container. In order to improve the control precision of the outlet temperature of heat exchanger and utilization rate of cold quantity, a liquid nitrogen injection heat exchanger capable of storing energy was designed. A test platform was set up to study the effects of copper tube length, the type of phase change materials and liquid nitrogen flow rate on the operation characteristics of the heat exchanger. Based on heat transfer theory, a calculation model for heat exchanger outlet temperature was established. Calculated value was basically consistent with the experimental value, and the relative error values were 2.01% and 8.06%. The test results showed that the copper tube length, the type of phase change materials and liquid nitrogen flow rate had a significant effect on the operation characteristics of the heat exchanger, the copper tube length and liquid nitrogen flow rate had linear relationship with the injection time. When the copper tube length increased or the liquid nitrogen flow rate decreased, the linear relationship correlation coefficient was higher. When the coil length was 3 m, the liquid nitrogen flow rate was 0.007 5 kg/s and the phase change materials was water, the heat exchange efficiency of heat exchanger was better. When the coil length was 3 m, the liquid nitrogen flow rate was 0.01 kg/s and phase change materials was water, the thermal storage efficiency of heat exchanger was better. The results

收稿日期: 2019-10-07 修回日期: 2019-11-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0401305-2)、广东省 2019 年省级农业科技创新及推广项目(2019KJ101)、农产品保鲜物流共性关键技术研发创新团队项目(2019KJ145)、广东省重点领域研发计划项目(2019B020225001)、国家自然科学基金项目(31901736, 31971806)和广东省普通高校毕业生创新创业人才项目(自然科学)(2017GkQNCX010)

作者简介: 郭嘉明(1987—), 男, 副教授, 主要从事果蔬冷链物流与装备研究, E-mail: jmguo@scau.edu.cn

通信作者: 吕恩利(1979—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事果蔬冷链物流与装备研究, E-mail: enlilv@scau.edu.cn

provided references for control outlet temperature of heat exchanger accurately and recycle of cooling capacity.

Key words: fresh-keeping transportation; heat exchanger; outlet temperature; copper tube length; phase change materials; liquid nitrogen flow rate

0 引言

气调保鲜技术通过控制储运环境的气体成分,降低果蔬呼吸强度,从而延长其保鲜期。国外采用的气调方式,如制氮机制氮气气调、制臭氧气调和果蔬呼吸自调等气调方式普遍存在气调速率低或成本高等问题。而液氮充注气调方式具有气调效率高和成本低等优点。在液氮充注气调中,液氮的温度为 -196°C ,若直接将液氮注入箱体,会对箱体中的果蔬造成低温伤害。因此,需要先通过汽化器对液氮进行汽化升温之后再注入箱体^[1-6]。文献[7]对低温贮罐自增压汽化器进行了设计计算。文献[8-9]对空浴式汽化器的传热、结雾和结霜特性进行了研究。文献[10]通过理论结合试验研究的方式初步建立了在垂直通道内液氮流动沸腾适用的理论模型,并对该模型进行了完善和扩充,使之能够有效预测垂直通道内低温液体流动沸腾中的传热系数等参数。文献[11-14]针对在汽化器的表面形成的霜层,研究了其结霜的机理和传热的热阻。目前国内外对液氮充注汽化器的相关研究较少。开展液氮充注沉浸式汽化器的研究具有重要意义。

本文结合气调保鲜运输需求,建立液氮充注沉浸式汽化器的出口温度预测模型,并研究该汽化器在不同盘管长度、不同蓄冷剂类型和不同液氮流量下的工作特性,为气调保鲜运输装备的进一步设计提供参考。

1 沉浸式汽化器试验平台

试验平台如图1所示,平台支架由铝合金材料搭建而成。液氮充注沉浸式汽化器如图2所示,主要由盘管、蓄冷剂、出气横管和箱体组成。汽化器的结构参数:箱体尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 $600\text{ mm}\times 200\text{ mm}\times 150\text{ mm}$,其材料为铸铁。盘管材料为紫铜管,其外直径 d_o 为 12 mm ,内直径 d_i 为 10 mm ,单根管长为 $1\ 000$ 、 $2\ 000$ 、 $3\ 000\text{ mm}$,总管数为3根,分别记作L1、L2、L3。出气横管长 500 mm ,均匀开有4个同向小孔(直径 3 mm)^[15]。

沉浸式汽化器横管小孔处温度和蓄冷剂温度均采用4个PT100温度传感器(WZP-PT100型、精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 、测量范围为 $-200\sim 500^{\circ}\text{C}$),采用无纸记录仪(SIN-R9600型、精度为2%、杭州联测自动化技术有限公司)记录各传感器的数值(记录频率是

$1\text{次}/\text{min}$),同时储存于计算机。液氮罐(YDZ-100型,最大出液压力为 0.09 MPa ,出液电磁阀使罐内出液压力迅速达到并稳定在 0.09 MPa ,容积为 100 L)增压电磁阀实现液氮充注。数字电子秤(XK3190-A6型,精确度等级3级,上海耀华称重系统有限公司)记录液氮的消减量^[16]。蓄冷剂材料包括水(潜热为 335 J/g ,密度为 $0.998\text{ g}/\text{cm}^3$)和相变蓄冷剂(潜热为 403 J/g ,密度为 $0.912\text{ g}/\text{cm}^3$)。

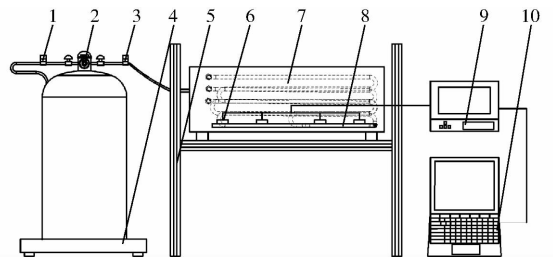


图1 液氮充注沉浸式汽化器试验平台

Fig.1 Test platform of liquid nitrogen injection heat exchanger

1. 增压电磁阀 2. 液氮罐 3. 出液电磁阀 4. 数字电子秤
5. 铝型材 6. PT100 温度传感器 7. 箱体 8. 出气横管 9. 无纸记录仪 10. 计算机

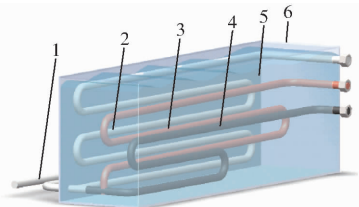


图2 液氮充注沉浸式汽化器

Fig.2 Liquid nitrogen injection heat exchanger

1. 出气横管 2. 盘管 L3 3. 盘管 L2 4. 盘管 L1 5. 蓄冷剂
6. 箱体

2 沉浸式汽化器出口温度模型

在沉浸式汽化器中,其出口温度为其换热性能的主要评价标准^[17]。而其主要的换热元件为盘管,根据所设计盘管的规格及长度获取汽化器的传热特性。将盘管取其中一段(长度 $L=0.01\text{ m}$)进行分析,如图3所示^[18]。

沉浸式汽化器的传热形式有3种:①管外侧的自然对流换热。②盘管壁面的热传导。③管内侧的强迫对流换热。

2.1 管外侧传热

沉浸式汽化器的管外侧向盘管壁面传热,其传热量 Q_1 为

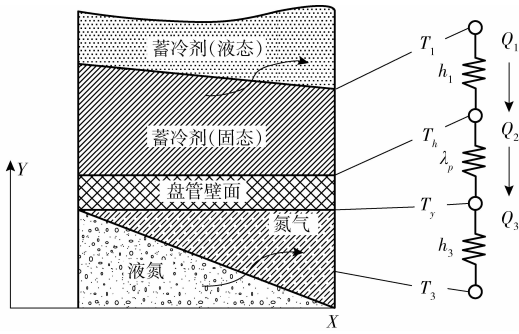


图 3 沉浸式汽化器传热模型

Fig. 3 Heat transfer model of heat exchanger

$$Q_1 = h_1 (T_1 - T_h) \pi d_0 L \quad (1)$$

式中 h_1 ——管外侧传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$

T_1 ——蓄冷剂温度, $^{\circ}C$

T_h ——盘管外壁面温度, $^{\circ}C$

2.2 盘管壁面的热传导

盘管壁面是通过热传导的方式将热量从盘管外壁面传导到盘管内壁面。其温度从管内侧 T_y 升高到管外侧 T_h , 导热量 Q_2 为^[19-20]

$$Q_2 = \frac{2\pi L \lambda_p}{\ln(d_0/d_i)} (T_h - T_y) \quad (2)$$

式中 λ_p ——盘管材料热导率, 取 $398 W/(m^2 \cdot K)$

2.3 管内侧传热

沉浸式汽化器的管内侧是由盘管内壁面向液氮传热, 其传热量 Q_3 为

$$Q_3 = h_3 (T_y - T_3) \pi d_i L + \frac{q_y L_y}{M_N} t \quad (3)$$

式中 h_3 ——管内侧传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$

T_3 ——液氮温度, $^{\circ}C$

q_y ——液氮流量, kg/s

L_y ——液氮汽化潜热, 取 $2.79 kJ/mol$ ^[21]

M_N ——氮气摩尔质量, $kg/kmol$

t ——试验时长, s

根据热平衡原理, 从盘管壁面向管外侧传导的热量 Q_1 等于盘管壁面导热吸收的热量 Q_2 , 等于液氮升温吸收的热量 Q_3 , 等于蓄冷剂直接传到液氮的热量 Q_5 , 也等于管内液氮温度升高吸收的热量 Q_4 ^[22], 即

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_5 = Q_4 \quad (4)$$

其中 $Q_5 = K \pi L (T_1 - T_3)$ (5)

$$Q_4 = q_y C_y (T_3 - T_b) + \frac{q_y L_y}{M_N} \quad (6)$$

式中 C_y ——液氮定压比热容, $J/(kg \cdot K)$

T_b ——氮气上一个时刻的温度, $^{\circ}C$

K ——总传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$

综合式(1)~(6)可得

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_1} + \frac{\ln(d_0/d_i)}{2\lambda_p} + \frac{1}{hd_i} \quad (7)$$

在建立汽化器出口温度模型中, 主要计算管外侧的传热系数 h_1 、管内侧的传热系数 h_3 以及盘管的热导率 λ_p 。液氮在管内流动时, 属于强迫流动, 一方面在靠近管壁处沸腾^[23-24], 一方面又以一定的速度流过管壁, 其传热系数与其他两项的传热系数相比较, 故忽略不计^[25]。因此, 对于沉浸式汽化器传热计算, 主要研究盘管热导率 λ_p 和管外侧传热系数 h_1 。

2.4 管外侧的传热系数计算

汽化器中, 管外侧的传热系数可由水平圆筒自然对流换热准则关联式^[26]求得

$$h_1 = \frac{\lambda_w}{d_0} \left\{ 0.6 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (8)$$

式中 λ_w ——蓄冷剂导热系数, $W/(m \cdot K)$

Ra ——蓄冷剂瑞利数

Pr ——蓄冷剂普朗系数

2.5 模型求解结果

为了验证数学模型的可行性, 依照上述沉浸式汽化器的结构参数和液氮流量为 $0.014 kg/s$ 与蓄冷剂为水的参数, 利用模型计算不同盘管长度的出口温度, 共 10 个长度, 分别记作 $L_1 \sim L_{10}$ ($1 \sim 10 m$, 间隔 $1 m$), 其预测值如图 4 所示。结合汽化器的结构参数和成本的考虑, 选取 L_2 和 L_3 进行试验, 作为预测验证组。

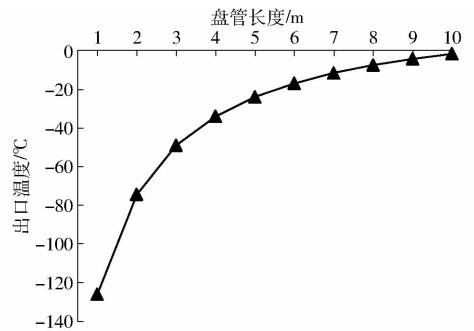


图 4 汽化器出口温度预测值

Fig. 4 Predicted value of heat transfer temperature

与试验相同的条件下, 将模型求解得到的汽化器出口温度与试验得到的出口温度相比较, 由表 1 可知, 模型结果与试验结果较为接近, 其相对误差分别为 2.01% 和 8.06% , 表明模型的效果较好。

表 1 预测值与试验值相对误差

Tab. 1 Relative error between predicted and experimental values

盘管长度/m	预测值/°C	试验值/°C	相对误差/%
2	-74.19	-75.87	2.01
3	-48.82	-45.32	8.06

3 沉浸式换热器工作特性试验方法

为了更好地了解该汽化器的工作特性,采取不同的试验因素,对其进行试验。试验在室内进行,环境温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 。以汽化器盘管长度、蓄冷剂类型和液氮流量为试验因素,连接好液氮罐,开启出液电磁阀、增压电磁阀进行液氮充注试验。每组试验持续进行 10 min,用无纸记录仪将温度传感器采集到的数据记录并保存在计算机中。每组试验重复 2 次,取平均值进行分析。

蓄冷剂温度的测定:在箱体内布置 4 个温度测点,取 4 个蓄冷剂温度的平均值表征蓄冷剂温度。

汽化器出口温度的测定:在汽化器出气孔处布置 4 个温度测点,取 4 个出口温度的平均值表征汽化器出口温度。

液氮流量的测定^[27]:记录液氮罐试验期间质量的变化量,液氮流量计算公式为

$$q_y = (m_s - m_f) / t \quad (9)$$

式中 m_s ——试验前液氮罐的质量,kg

m_f ——试验后液氮罐的质量,kg

存储冷量:蓄冷剂通过与盘管内的液氮进行换

热得到的冷量,其计算公式为

$$Q_c = C_x m_x T_x \quad (10)$$

式中 C_x ——蓄冷剂比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

m_x ——蓄冷剂质量,kg

T_x ——试验前后蓄冷剂的温差, $^\circ\text{C}$

释放冷量:液氮通过与盘管外的蓄冷剂进行换热释放出来的冷量,其计算公式为

$$Q_y = \left(\frac{L_y}{M_N} + C_y T_L \right) (m_s - m_f) \quad (11)$$

式中 T_L ——试验前后液氮的温差, $^\circ\text{C}$

蓄冷效率^[28]:用存储冷量除以释放冷量表征汽化器的蓄冷效率。

4 试验与结果分析

4.1 盘管长度对汽化器工作特性的影响

采用水作为蓄冷剂,液氮用量和流量分别为 16.2 kg 和 0.007 5 kg/s,进行液氮充注试验,测量不同盘管长度下的液氮出口温度,分析其对蓄冷效率的影响。以汽化器出口温度与蓄冷剂温度等指标为因变量,采用 Excel 软件对试验数据进行关系拟合,拟合结果如表 2 所示,试验结果如图 5 所示。

表 2 不同盘管长度下各项指标与时间的关系式

Tab.2 Relationship equations between various indexes and time under different copper tube lengths

指标	盘管类型		
	L1 盘管	L2 盘管	L3 盘管
汽化器出口温度	$y = -5.6748x + 31.646 (R^2 = 0.9386)$	$y = -2.8811x + 24.569 (R^2 = 0.9595)$	$y = -2.0577x + 27.524 (R^2 = 0.9934)$
蓄冷剂温度	$y = -0.3798x + 26.429 (R^2 = 0.9315)$	$y = -1.2052x + 27.64 (R^2 = 0.9766)$	$y = -1.5636x + 27.27 (R^2 = 0.9972)$

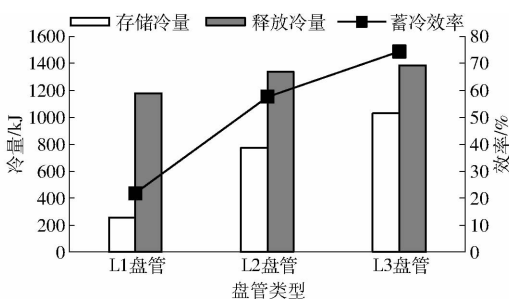


图 5 不同盘管长度下的蓄冷效率

Fig.5 Cooling storage efficiency at different copper tube lengths

从表 2 可以看出,汽化器出口温度和蓄冷剂温度都与充注时间呈线性关系,当盘管长度增大时,其相关系数升高。当为盘管 L3 时,试验结束时汽化器出口温度为 4.05°C ,相比于盘管 L1 时,其汽化器出口温度升高了 44.47°C 。从图 5 可以看出,当盘管长度增加时,汽化器的蓄冷效率也会相应增大。这可能是由于当液氮流量一定时,其盘管长度越大,液氮在汽化器内流动的时间越长,液氮通过盘管与蓄

冷剂进行换热的过程就越充分,从而能够升高液氮汽化后的温度,降低蓄冷剂的温度,更好地吸收液氮所释放的冷能,存储更多的冷量。因此液氮的换热性能和蓄冷效率会随着汽化器内盘管长度的增大而提高。

4.2 液氮流量对汽化器工作特性的影响

采用水为蓄冷剂,液氮用量为 16.2 kg,选取 L3 盘管,进行液氮充注试验,测量不同液氮流量下的液氮出口温度,及其对蓄冷效率的影响,以汽化器出口温度与蓄冷剂温度等指标为因变量,采用 Excel 软件对试验数据进行关系拟合,拟合结果如表 3 所示,试验结果如图 6 所示。

从表 3 可以看出,汽化器出口温度与蓄冷剂温度都与充注时间呈线性关系,当液氮流量减少时,其线性关系相关系数越高。当液氮流量为 0.014 kg/s 时,试验结束后其汽化器出口温度为 -45.33°C 。而从图 6 可以看出,当液氮流量增加时,汽化器的蓄冷效率呈先增加后减小的趋势。这可能是由于液氮流量增大

表 3 不同液氮流量下各项指标与时间的关系式

Tab. 3 Relationship equations between various indexes and time at different liquid nitrogen flow rates

指标	液氮流量/(kg·s ⁻¹)		
	0.007 5	0.010 0	0.014 0
汽化器出口温度	$y = -2.057 7x + 27.524 (R^2 = 0.993 4)$	$y = -4.955x + 33.548 (R^2 = 0.991 5)$	$y = -7.489 5x + 28.335 (R^2 = 0.957 5)$
蓄冷剂温度	$y = -1.563 6x + 27.27 (R^2 = 0.997 2)$	$y = -2.025 7x + 24.206 (R^2 = 0.976 1)$	$y = -2.030 7x + 23.348 (R^2 = 0.959 4)$

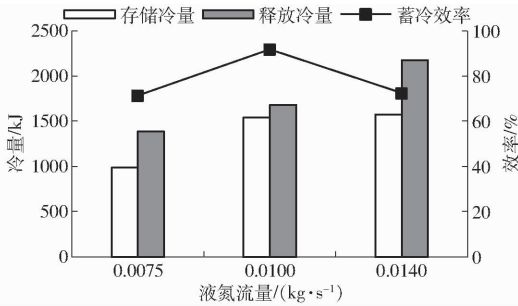


图 6 不同液氮流量下的蓄冷效率

Fig. 6 Cooling storage efficiency at different liquid nitrogen flow rates

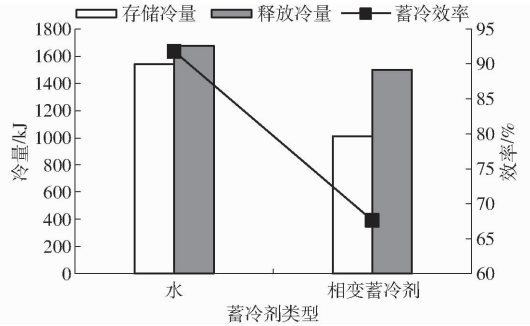


图 8 不同蓄冷剂类型下的蓄冷效率

Fig. 8 Cooling storage efficiency under different types of phase change materials

时,单位时间内液氮与盘管换热量增大,换热更加充分,而当液氮流量增大到一定程度时,单位时间内液氮释放冷量速率过大,蓄冷剂所能吸收冷量的速率已经到达一定程度,增长缓慢,导致其蓄冷效率有所下降。

因此,适当减少液氮流量,对汽化器的换热性能和蓄冷效率都有一定的提高。

4.3 蓄冷剂对汽化器工作特性的影响

采用盘管长度为 3 m,液氮流量为 0.01 kg/s,进行液氮充注试验,测量不同类型蓄冷剂下的液氮出口温度,分析其对蓄冷效率的影响,试验结果如图 7、8 所示。

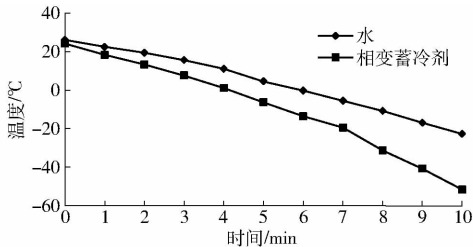


图 7 不同蓄冷剂类型下汽化器出口温度随时间的变化关系

Fig. 7 Relationship of exit temperature of heat transfer with time under different types of phase change materials

从图 7 可以看出,在同一条件下,不同的蓄冷剂对汽化器出口温度和其本身温度都有着较大的影响。当蓄冷剂类型为水时,其试验结束后,汽化器出

口温度达 -22.80℃,相比于采用相变蓄冷剂时,其温度升高了 28.98℃。而从图 8 可以看出,采用水为蓄冷剂时,液氮释放的冷能较大,蓄冷剂吸收的冷能较多,其蓄冷效率比采用相变蓄冷剂时高 24.12 个百分点。因此,选择水作为蓄冷剂比选择相变蓄冷剂时,其汽化器的换热性能更佳。

5 结论

(1) 为了提高液氮充注式气调保鲜运输装备的气调效果,建立了沉浸式汽化器的出口温度模型,并通过试验验证了该模型的正确性,其相对误差分别为 2.01% 和 8.06%;搭建了沉浸式汽化器试验平台,通过改变沉浸式汽化器盘管长度、蓄冷剂类型、液氮流量进行液氮充注试验,分析汽化器工作特性。

(2) 汽化器出口温度和蓄冷剂温度都与充注时间呈线性关系,当盘管长度增加或液氮流量减少时,两者与充注时间的相关系数升高。当盘管长度为 3 m 和液氮流量为 0.007 5 kg/s 时,汽化器的换热性能较佳。

(3) 随着液氮流量的增大,汽化器蓄冷效率呈先增加后减小的趋势,当液氮流量为 0.01 kg/s 时,汽化器的蓄冷效率较优。

(4) 相比于采用相变蓄冷剂作为蓄冷剂,采用水作为蓄冷剂时,汽化器的出口温度更高,其换热性能和蓄冷效率更佳。

参 考 文 献

[1] 吕恩利, 陆华忠, 罗锡文, 等. 果蔬气调保鲜运输车的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 9-16.
LÜ Enli, LU Huazhong, LUO Xiwen, et al. Design and experiment of fresh-keeping transportation vehicle with controlled

- atmosphere for fruits and vegetables[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(19): 9-16. (in Chinese)
- [2] 杨松夏, 吕恩利, 陆华忠, 等. 液氮充注气调厢开门时 O₂ 体积分数预测模型研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 227-232.
YANG Songxia, LÜ Enli, LU Huazhong, et al. Prediction model of O₂ volume fraction in controlled atmosphere compartments by liquid nitrogen injection during door-opening[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 227-232. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150332&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.032. (in Chinese)
- [3] 周晓龙, 吕恩利, 陆华忠, 等. 基于 Linux 的车载气调保鲜运输控制系统[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 155-160.
ZHOU Xiaolong, LÜ Enli, LU Huazhong, et al. Control system for fresh-keeping transportation truck with controlled atmosphere based on Linux[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2):155-160. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=2013S229&flag=1&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.029. (in Chinese)
- [4] 吕恩利, 陆华忠, 杨洲, 等. 气调保鲜运输车通风系统阻力特性试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 120-124.
LÜ Enli, LU Huazhong, YANG Zhou, et al. Pressure drop characteristics of the ventilation system in fresh-keeping transportation with controlled atmosphere[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 120-124. (in Chinese)
- [5] 韩谓, 吕恩利, 陆华忠, 等. 液氮充注气调保鲜环境数学模型[J]. 广东农业科学, 2012, 48(17): 184-186.
HAN Xu, LÜ Enli, LU Huazhong, et al. Mathematical model of fresh-keeping experimental with controlled atmosphere by liquid nitrogen injection[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 48(17): 184-186. (in Chinese)
- [6] SINGH S P, PAL R K. Controlled atmosphere storage of guava (*Psidium guajava* L.) fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 47(3): 296-306.
- [7] 陈叔平. 低温贮罐自增压汽化器的设计计算[J]. 深冷技术, 1996, 36(4): 20-23.
CHEN Shuping. Design and calculation of low temperature storage tank self-charging carburetor[J]. Cryogenic Technology, 1996, 36(4): 20-23. (in Chinese)
- [8] 侯可明. 果蔬保鲜运输液氮充注气调汽化器的设计与试验[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
HOU Keming. Design and experiment of controlled atmosphere vaporizer by liquid nitrogen injection equipped on transportation of fruits and vegetables[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [9] DIVYAMAAN W, SUN Biao, RANJEET P U, et al. Numerical study of fog formation around ambient air vaporizers[J]. Elsevier Ltd, 2018, 183: 37-46.
- [10] 邵雪锋, 李祥东, 汪荣顺. 竖直环形通道内液氮流动沸腾的数值模拟[J]. 化学工程, 2011, 39(10): 89-93, 102.
SHAO Xuefeng, LI Xiangdong, WANG Rongshun. Numerical simulation of liquid nitrogen boiling flow in vertical annular pipe[J]. Chemical Engineering, 2011, 39(10): 89-93, 102. (in Chinese)
- [11] THOMPSON D R. Frost formation on cryogenic heat exchangers with atmospheric heat sources[C] // 23rd ASME/AIChE National Heat Transfer Conference, Denver, 1985.
- [12] YANG D K, LEE K S, SONG S. Modeling for predicting frosting behavior of a fin-tube heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49(7): 1472-1479.
- [13] YAN Weimon, LI Hungyi, WU Yeunjong, et al. Performance of finned tube heat exchangers operating under frosting conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(5): 871-877.
- [14] LEE S H, LEE M Y, YOON W J, et al. Frost growth characteristics of spirally-coiled circular fin-tube heat exchangers under frosting conditions[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 64: 1-9.
- [15] 吕恩利, 杨洲, 陆华忠, 等. 保鲜运输用液氮充注气调的温度调节性能优化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 237-243.
LÜ Enli, YANG Zhou, LU Huazhong, et al. Optimization of temperature regulating performance in fresh-keeping transportation by liquid nitrogen injection[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(13): 237-243. (in Chinese)
- [16] 王世伟. 液氮制冷低温物流箱的设计与实验研究[D]. 天津: 天津商业大学, 2016.
WANG Shiwei. Design and experimental study of low temperature logistics box with nitrogen refrigeration system[D]. Tianjin: Tianjin University of Commerce, 2016. (in Chinese)
- [17] 黄海清, 邹声华, 沈毅, 等. 焦炉上升管换热器综合传热系数的计算与讨论[J]. 燃料与化工, 2019, 50(4): 17-21.
HUANG Haiqing, ZOU Shenghua, SHEN Yi, et al. Calculation and discussion for comprehensive heat transfer coefficient of riser heat exchanger[J]. Fuel & Chemical Processes, 2019, 50(4): 17-21. (in Chinese)
- [18] TAN Hongbo, LI Yanzhong, TUO Hanfei, et al. Experimental study on liquid_solid phase change for cold energy storage of liquefied natural gas (LNG) refrigerated vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 35(5): 71-76.
- [19] 张学学. 热工基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [20] 张秀珍, 沈国彬, 黄伟建. 真空热水锅炉换热管的传热分析与设计计算[J]. 中国特种设备安全, 2014, 30(4): 40-43.
ZHANG Xiuzhen, SHEN Guobin, HUANG Weijian. Heat transfer analysis and design of heat transfer tube of real empty hot water boiler[J]. China Special Equipment Safety, 2014, 30(4): 40-43. (in Chinese)

- (TBHQ), a food additive, with bovine serum albumin[J]. Food Chemistry, 2011, 124(3): 1063 – 1068.
- [25] LI C, HUANG X, PENG Q, et al. Physicochemical properties of peanut protein isolate-glucomannan conjugates prepared by ultrasonic treatment[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2014, 21(5): 1722 – 1727.
- [26] CHANGYUN C, MEIHUA M, JUNQI Z, et al. Spectroscopic investigation of the interaction of bovine serum albumin with a novel cardiac agent V-09[J]. Spectroscopy, 2008, 22(1): 43 – 50.
- [27] ROSS P D, SUBRAMANIAN S. Thermodynamics of protein association reactions: forces contributing to stability [J]. Biochemistry, 1981, 20(11): 3096 – 3102.
- [28] 王晨, 谢岩黎, 范亭亭. 花青素与小麦蛋白相互作用及对蛋白质结构的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(20): 60 – 66.
WANG Chen, XIE Yanli, FAN Tingting. Interaction of cyanidin-3-O-glucoside with gliadin and glutenin and their effect on protein structure[J]. Food Science, 2019, 40(20): 60 – 66. (in Chinese)
- [29] HU Y J, LIU Y, PI Z B, et al. Interaction of cromolyn sodium with human serum albumin: a fluorescence quenching study [J]. Bioorg. Med. Chem., 2005, 13(24): 6609 – 6614.
- [30] TENG Y, LIU R, YAN S, et al. Spectroscopic investigation on the toxicological interactions of 4-aminoantipyrine with bovine hemoglobin[J]. Journal of Fluorescence, 2010, 20(1): 381 – 387.
- [31] 朱颖, 王中江, 李杨, 等. 花青素对大豆蛋白质二级结构影响的多重光谱分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6): 368 – 374, 426.
ZHU Ying, WANG Zhongjiang, LI Yang, et al. Effects of anthocyanins on the secondary structure of soybean protein isolate by multiplex spectroscopy[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 368 – 374, 426. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180644&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.044. (in Chinese)
- [32] 李杨, 王中江, 王瑞, 等. 不同热处理条件下大豆分离蛋白的红外光谱分析[J]. 食品工业科技, 2016, 37(8): 104 – 109.
LI Yang, WANG Zhongjiang, WANG Rui, et al. Fourier transform infrared spectroscopic analysis of soybean isolate protein at different heat treatment conditions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(8): 104 – 109. (in Chinese)
- [33] LIU Y, XIE M X, KANG J, et al. Studies on the interaction of total saponins of *Panax notoginseng* and human albumin by Fourier transform infrared spectroscopy [J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2003, 59(12): 2747 – 2758.
- [34] PU H, JIANG H, CHEN R, et al. Studies on the interaction between vincamine and human serum albumin: a spectroscopic approach[J]. Luminescence, 2014, 29(5): 471 – 479.
- [35] MAUERER A, LEE G. Changes in the amide I FT-IR bands of poly-L-lysine on spray-drying from α -helix, β -sheet or random coil conformations[J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2006, 62(2): 131 – 142.

(上接第 354 页)

- [21] 郭嘉明. 荔枝气调保鲜热质耦合机理与优化研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
GUO Jiaming. Research on the regulation and control mechanism of the coupling in heat and mass transfer and optimization of fresh-keeping environment with controlled atmosphere for litchi fruit [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [22] 庞红丽, 潘亮, 胡坚勇. 冷氨换热器传热设计及试验研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2018, 47(1): 57 – 61.
PANG Hongli, PAN Liang, HU Jianyong. Heat transfer design and experimental study of cold delium heat exchanger[J]. Missiles and Space Vehicles, 2018, 47(1): 57 – 61. (in Chinese)
- [23] 贾洪伟, 张鹏, 郭涛, 等. 微通道热沉内液氮的流动沸腾换热实验[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(9): 64 – 68.
JIA Hongwei, ZHANG Peng, GUO Tao, et al. Experimental investigation of heat transfer characteristics of flow boiling of liquid nitrogen in micro-channels heat sin[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(9): 64 – 68. (in Chinese)
- [24] 赵成. 低温紧凑型换热器的传热机理分析及实验研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2010.
ZHAO Cheng. Theoretical analysis and experimental research on heat transfer of the compact heat exchangers in cryogenic engineering[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2010. (in Chinese)
- [25] 黄磊, 裴红珍, 白金山. 循环水加热汽化器的设计分析[J]. 中国化工装备, 2014, 16(6): 21 – 25.
HUANG Lei, PEI Hongzhen, BAI Jinshan. Design and analysis of circulating water heating carburetor[J]. China Chemical Industry Equipment, 2014, 16(6): 21 – 25. (in Chinese)
- [26] 李长有, 钱东平. 工程热力学与传热学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2014.
- [27] MAHAJAN P V, GOSWAMI T K. Use of liquid nitrogen in CA storage: theoretical analysis and experimental validation [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 82(1): 77 – 83.
- [28] 邹春阳. 自然冷资源利用中贮冰蓄冷试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2012.
ZOU Chunyang. Research of ice storage test in utilizing natural cooling resource [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2012. (in Chinese)