

## 流通环境对液氮充注蓄冷配送箱保温性能的影响

夏晶晶<sup>1,2</sup>, 王飞仁<sup>1,2</sup>, 王广海<sup>1,2</sup>, 林诗涛<sup>2</sup>, 任俊杰<sup>2</sup>, 郭嘉明<sup>2,3</sup>

(1. 广东机电职业技术学院, 广州 510515; 2. 华南农业大学工程学院, 广州 510642;

3. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室茂名分中心, 广东 茂名 525000)

**摘要:** **目的** 为了提高液氮充注蓄冷配送箱在流通过程中的保温性能, 保证配送品质。**方法** 搭建配送箱流通环境模拟试验平台, 研究不同外界风速、外界温度和振动频率对蓄冷配送箱内空气温度变化和温度场分布的影响。**结果** 试验结果表明, 当外界风速增大时, 箱体内部环境的升温速度也会增大; 外界温度对液氮充注完后箱内最低温度产生较大影响, 箱体内部空气最低温度随外界温度降低而降低, 同时始终在运输过程中维持较低的温度, 箱体内温度场均匀性先提高后降低; 振动对箱体内部环境的升温速度影响较大, 而随着振动频率增大, 箱体内部的温度场均匀性变差。**结论** 该研究可为蓄冷运输配送设备的设计与优化提供参考。

**关键词:** 蓄冷; 配送箱; 保温性能; 流通环境; 液氮; 振动

中图分类号: S229 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2022)17-0184-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.17.023

## Effect of Circulation Environment on Thermal Insulation Performance of Cold Storage Distribution Box Based on Liquid Nitrogen Injection

XIA Jing-jing<sup>1,2</sup>, WANG Fei-ren<sup>1,2</sup>, WANG Guang-hai<sup>1,2</sup>, LIN Shi-tao<sup>2</sup>, REN Jun-jie<sup>2</sup>, GUO Jia-ming<sup>2,3</sup>

(1. Guangdong Mechanical & Electrical Polytechnic, Guangzhou 510515, China; 2. College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Maoming Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangdong Maoming 525000, China)

**ABSTRACT:** The work aims to improve the thermal insulation performance of cold storage distribution box based on liquid nitrogen injection during circulation and ensure the distribution quality. A simulation test platform of distribution box circulation environment was established to investigate the effect of different external air velocity, external temperature and vibration frequency on the air temperature variation and temperature field distribution in the cold storage distribution box. According to the test results, when the external air velocity increased, the temperature rising speed of the internal environment in the box also increased. The external temperature had a great effect on the minimum air temperature inside the box after injection of liquid nitrogen, and the minimum air temperature decreased as the external temperature lowered. At the same time, a lower temperature was always kept during transportation. The homogeneity of temperature field rose firstly and then decreased. The vibration frequency had a great effect on the air temperature rising speed

收稿日期: 2021-12-27

基金项目: 提升市县茶叶科技能力促进产业发展项目 (DZ09-21-1-3278); 广东省 2019 年省级农业科技创新及推广项目 (2021KJ101); 农产品保鲜物流共性关键技术研发创新团队 (2021KJ145); 国家自然科学基金项目 (31901736, 31971806); 茂名实验室自主科研项目 (2021ZZ003); 广东省自然科学基金项目 (2020A1515010967); 广州市农村科技特派员项目 (GZKTP201921)

作者简介: 夏晶晶 (1980—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为果蔬冷链物流与装备。

通信作者: 王飞仁 (1990—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为果蔬冷链物流与装备。

inside the box, and the homogeneity of temperature field decreased with the increase of vibration frequency. The results can provide a reference for the design and optimization of cold storage distribution equipment.

**KEY WORDS:** cold storage; distribution box; thermal insulation performance; circulation environment; liquid nitrogen; vibration

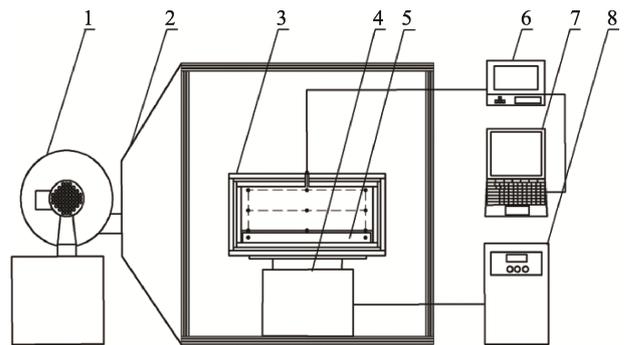
金枪鱼营养价值高, 为保证金枪鱼的品质, 需要在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下的温度进行运输<sup>[1]</sup>。液氮充注蓄冷配送箱将液氮冷量存储于相变材料 (Phase Change Material, PCM) 中, 在运输过程中缓慢释放冷量保持箱内温度, 具有节能、环保、冷却快等优点<sup>[2-4]</sup>。但配送箱在运输过程中, 车辆行驶时产生的振动, 外界温度和风速都可能影响其保温性能<sup>[5-7]</sup>。因此, 开展运输过程对配送箱保温性能和温度场影响的研究具有必要性。

目前针对在流通环境下的配送箱保温性能研究, 主要集中于研究箱体内货物的品质变化情况。胡云峰等<sup>[8]</sup>研究了不同振动频率对箱体中蒜薹品质的影响。周然等<sup>[9]</sup>研究了运输过程中因振动对箱体中的哈密瓜的抗氧化保护系统的影响。杨松夏等<sup>[10]</sup>研究了 3 种运输方式 (气调保鲜运输、冷藏加湿保鲜运输和冷藏保鲜运输) 下, 菜心的品质变化规律和保鲜效果。Laguerre 等<sup>[11]</sup>研究了在不受控制的环境温度下, 装有冰袋的保温箱中沙丁鱼温度随时间的变化关系。然而, 针对不同风速、外界温度和振动频率等参数下箱体的空气温度变化和分布的研究暂未发现报道, 因此, 文中搭建了模拟流通环境试验平台, 研究不同外界风速、外界温度和振动频率对箱体的保温性能影响, 以期对蓄冷运输配送设备的设计与优化提供参考。

## 1 试验平台

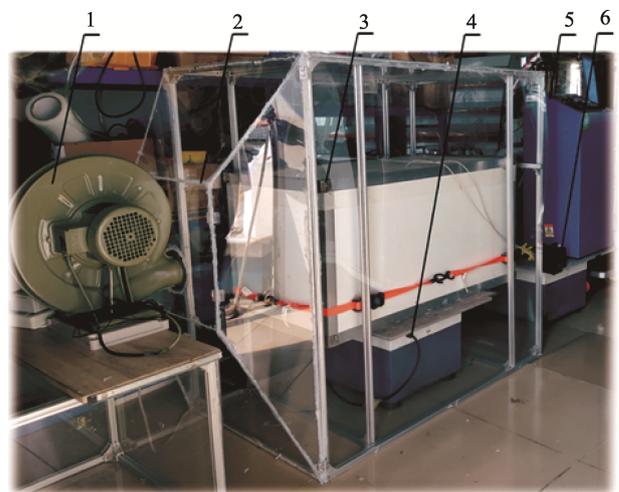
搭建的配送箱模拟流通环境试验平台及其实物图见图 1、图 2, 主要由风机、风道、配送箱、振动台、振动台控制器和无纸记录仪组成。风道主体结构由铝型材搭建而成, 并通过亚克力板将其四周密封, 与之相连的风机 (型号 CZR90, 风量为  $20\text{ m}^3/\text{min}$ , 转速为  $2\ 800\text{ r/min}$ ) 将空气吹往配送箱。通过调节脉冲调速器的占空比以获得不同的风速, 从而改变配送箱外界的空气流动速度<sup>[12]</sup>。配送箱固定在振动台 (ZY-4013 型, 广州震宇试验设备有限公司) 上, 通过振动台控制器可改变振动频率。配送箱体内布置 PT100 传感器 (型号为 WZP-PT100、精度为 $\pm 0.1$ 、测量范围为 $-200\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), 见图 1。采用无纸记录仪 (型号为 SIN-R9600、精度为 2%、杭州联测自动化技术有限公司) 记录各 PT100 传感器的数值, 同时将数据储存于计算机内。数字电子秤 (型号为 XK3190-A6、精确度等级三级、上海耀华称重系统有限公司) 记录液氮的消减量。蓄冷型保温箱通常在配

送过程中放置合适的蓄冷板以延长生鲜食品的保鲜时间<sup>[13]</sup>, 故文中选取相变温度适应液氮充注特性的超低温蓄冷剂置于箱内, 放置在蓄冷板的蓄冷剂其物性参数见表 1。



1. 风机; 2. 风道; 3. 配送箱; 4. 振动台; 5. 蓄冷板; 6. 无纸记录仪; 7. 计算机; 8. 振动台控制器。

图 1 配送箱模拟流通环境试验平台  
Fig.1 Circulation environment simulation test platform of distribution box



1. 风机; 2. 风道; 3. 配送箱; 4. 振动台; 5. 振动台控制器; 6. 无纸记录仪。

图 2 配送箱模拟流通环境试验平台实物图  
Fig.2 Physical diagram of circulation environment simulation test platform of distribution box

## 2 试验方案

在进行试验时, 将配送箱体固定在振动台上, 将在室内温度  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  放置的  $4.5\text{ kg}$  蓄冷剂装入蓄冷板, 并放置在配送箱体底部, 并将 PT100 温度传感器布置

表 1 相变蓄冷剂物性参数  
Tab.1 Physical properties of phase change material

| 相变温度/°C | 温度范围/°C | 潜热值/(kJ·L <sup>-1</sup> ) | 密度(固/液)/(kg·L <sup>-1</sup> ) | 体积膨胀系数/% |
|---------|---------|---------------------------|-------------------------------|----------|
| -80     | < 100   | 82.32                     | 1.14/1.24                     | 8.36     |

在如图 3 所示所设定的位置,通过往箱体内部充注液氮,将箱体温度下降,同时将液氮的冷能存储到蓄冷板中,蓄冷板会释放冷能用于维持箱体的温度。将液氮罐放在数字电子秤上,记录其当前重量为试验前的初始重量;将液氮注入箱体中,当液氮充注完成后,记录液氮罐当前重量为试验后的重量。通过振动台控制器和脉宽调速器将振动台和风机开启。设定无纸记录仪每 1 min 记录一组数据,每组试验充注 8 kg 液氮,模拟 8 h 的运输试验。试验结束后,通过 Excel 软件进行数据制图和分析。

在箱体内宽度方向的中纵截面上均匀布置 9 个 PT100 传感器(A1—A9),取 9 个温度测点的平均值来表征箱体的平均温度,具体分布见图 3。

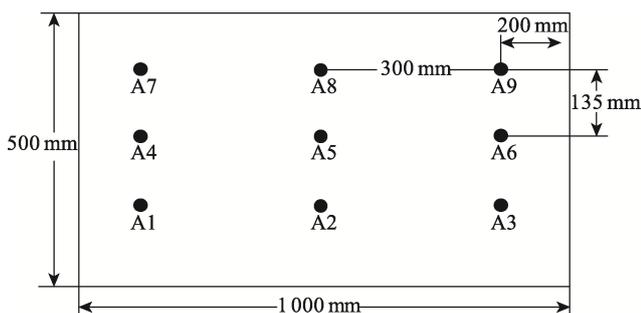


图 3 温度场测点分布图

Fig.3 Distribution of temperature field measuring points

试验的因素及水平见表 2,此次试验有外界风速、外界温度和振动频率这 3 个影响因素,每个因素取 4 个水平值,进行单因素试验。在不同外界风速、外界温度和振动频率条件下进行配送箱模拟流通环境单因素试验,监测 8 h 内箱体平均的空气温度变化及分布情况。

### 3 结果与分析

对不同风速、外界温度和振动频率对箱体保温性能和温度分布均匀性进行分析。因配送箱内温度随时间持续变化,取箱内温度测点在试验过程中的平均值作为均匀性评价依据。具体试验结果及分析如下。

#### 3.1 不同外界风速对箱体保温性能的影响

分别设置外界风速为 0、10、20、30 m/s。如图 4 所示,当外界风速为 30 m/s 时,液氮充注后箱内最低温度明显高于其他外界风速。从箱体内部温度这一方面分析,当风速在 0~30 m/s 范围内时,随着风速

的增大,试验结束时箱内空气温度提高,当风速为 30 m/s 时,试验结束时箱体内部平均温度已达-31 °C。说明外界的空气流动速度增大会使箱体与外界的热交换加快,导致箱体内部空气温度上升加快<sup>[14]</sup>。如表 3 所示,从箱体温度分布这一方面分析,在风速在 0~30 m/s 范围内,外界风速对箱内温度分布影响不明显,风速为 20 m/s 时,其箱体的温度场均匀性较好。这可能是由于外界风速的增大,提高了箱体与空气的换热效率,促进箱内温度均匀性提高,但随着风速进一步增大,箱体表面气流分布不均匀性也进一步提高,导致箱内外环境换热更加复杂。

表 2 试验因素及水平  
Tab.2 Test factors and levels

| 水平 | 因素      |       |                         |
|----|---------|-------|-------------------------|
|    | 振动频率/Hz | 温度/°C | 风速/(m·s <sup>-1</sup> ) |
| 1  | 10      | 25    | 0                       |
| 2  | 10      | 25    | 10                      |
| 3  | 10      | 25    | 20                      |
| 4  | 10      | 25    | 30                      |
| 5  | 10      | 15    | 10                      |
| 6  | 10      | 20    | 10                      |
| 7  | 10      | 25    | 10                      |
| 8  | 10      | 30    | 10                      |
| 9  | 10      | 25    | 10                      |
| 10 | 30      | 25    | 10                      |
| 11 | 50      | 25    | 10                      |
| 12 | 70      | 25    | 10                      |

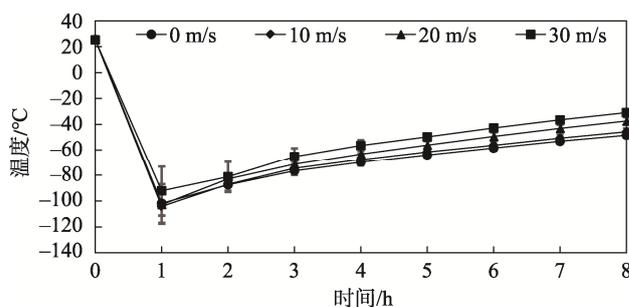


图 4 不同风速下箱体温度随时间的变化关系  
Fig.4 Change of box temperature with time at different air velocity

表 3 不同风速对箱体中纵截面温度场的影响  
Tab.3 Effect of different velocity on medium longitudinal section temperature field of box °C

| 传感器序号 | 不同风速/(m·s <sup>-1</sup> ) |        |        |        |
|-------|---------------------------|--------|--------|--------|
|       | 0                         | 10     | 20     | 30     |
| A1    | -76.92                    | -75.67 | -71.51 | -63.83 |
| A2    | -76.57                    | -74.55 | -70.19 | -64.32 |
| A3    | -74.93                    | -73.64 | -68.24 | -63.76 |
| A4    | -73.52                    | -71.84 | -67.63 | -54.57 |
| A5    | -69.55                    | -70.46 | -65.13 | -56.22 |
| A6    | -72.21                    | -72.27 | -67.14 | -57.70 |
| A7    | -66.60                    | -56.91 | -59.76 | -43.29 |
| A8    | -65.99                    | -66.25 | -61.24 | -53.90 |
| A9    | -66.80                    | -68.20 | -65.33 | -57.60 |
| 平均值   | -71.45                    | -69.98 | -66.24 | -57.24 |
| 标准差   | 4.11                      | 5.41   | 3.64   | 6.24   |

### 3.2 不同外界温度对箱体保温性能的影响

分别设置外界温度为 15、20、25、30 °C。如图 5 所示, 外界温度对液氮充注后箱内最低温度影响较大, 箱内最低温度随着外界温度提高而提高。从箱体内空气温度变化这一方面分析, 当外界温度在 15~30 °C 范围内时, 随着外界温度的升高, 试验结束箱体内空气平均温度越高, 当外界温度为 30 °C 时, 箱体内部平均温度已达 -39 °C。如表 4 所示, 从箱体温度分布这一方面分析, 在外界温度 15~30 °C 范围内, 当外界温度为 20 °C 时, 其箱体温度场标准差较小。说明在这外界温度水平中, 外界温度为 20 °C 时, 其箱体的温度场均匀性较好<sup>[15]</sup>。这可能是由于外界温度的升高, 提高了箱体与空气的换热效率, 但随着外界温度进一步增大, 箱体内外环境换热变得更加复杂, 从而导致外界温度为 20 °C 时箱体内温度场均匀性较好。

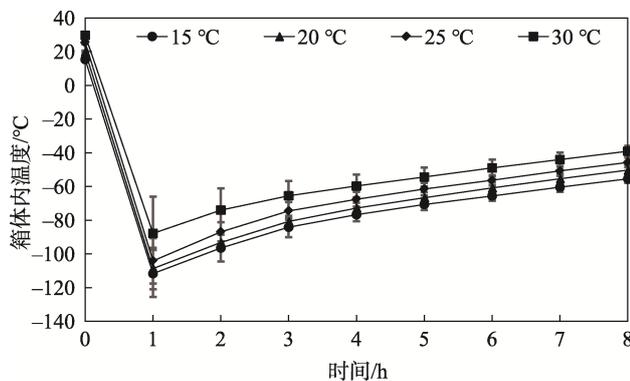


图 5 不同外界温度对箱体保温时长的影响  
Fig.5 Effect of different external temperature on thermal insulation duration of box

表 4 不同外界温度对箱体中纵截面温度场的影响  
Tab.4 Effect of different external temperature on medium longitudinal section temperature field box °C

| 传感器序号 | 外界温度/°C |        |        |        |
|-------|---------|--------|--------|--------|
|       | 15      | 20     | 25     | 30     |
| A1    | -85.08  | -82.39 | -75.67 | -67.81 |
| A2    | -85.50  | -78.86 | -74.55 | -64.73 |
| A3    | -84.50  | -80.67 | -73.64 | -67.65 |
| A4    | -81.90  | -75.70 | -71.84 | -62.89 |
| A5    | -79.39  | -76.17 | -70.46 | -57.46 |
| A6    | -81.87  | -76.62 | -72.27 | -62.48 |
| A7    | -69.07  | -69.78 | -56.91 | -48.26 |
| A8    | -73.46  | -71.02 | -66.25 | -51.73 |
| A9    | -75.44  | -71.44 | -68.20 | -53.65 |
| 平均值   | -79.58  | -75.85 | -69.98 | -59.63 |
| 标准差   | 5.43    | 4.16   | 5.41   | 6.73   |

### 3.3 不同振动频率对箱体保温性能的影响

影响车辆在行驶过程中振动频率的是车速和路面的不平度, 振动频率可由式 (1) 计算<sup>[16]</sup>。

$$f = \frac{V}{\Delta} \quad (1)$$

式中:  $f$  为振动频率, Hz;  $V$  为行驶车速, m/s;  $\Delta$  为路面不平度, 取路面最小的不平度为 0.1。

根据配送车辆在城市道路中的车速一般在 0~30 km/h, 分别设置振动频率为 10、30、50、70 Hz。如图 6 所示, 振动频率对液氮充注后箱内空气最低温度有一定影响, 但随着振动频率增大后, 影响减小。当振动频率为 30 Hz 时, 试验结束时箱体内空气温度较高, 为 -43.71 °C。当频率增大到 50 Hz 后, 振动幅度大幅度减少, 导致对箱体的影响减小, 箱体内部的空气温度变化减缓, 箱体保温时长有所延长。如表 5 所示, 在箱体温度场方面, 振动频率为 10 Hz 的条件下, 箱体的温度场标准差较小, 为 5.41, 其温度场均匀性较好。当振动频率增大时, 温度场标准差基本维持稳定, 振动频率对箱内温度分布均匀性的影响降低。这可能是由于当振动频率增大时, 其振幅会减小<sup>[17]</sup>, 导致振动对箱体的影响减小。

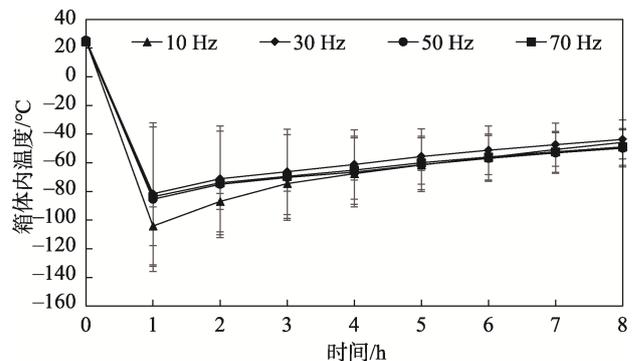


图 6 不同振动频率对箱体保温时长的影响  
Fig.6 Effect of different vibration frequency on thermal insulation duration of box

表5 不同振动频率对箱体中纵截面温度场的影响  
Tab.5 Effect of different vibration frequency on medium longitudinal section temperature field of box °C

| 传感器序号 | 振动频率/Hz |        |        |        |
|-------|---------|--------|--------|--------|
|       | 10      | 30     | 50     | 70     |
| A1    | -75.67  | -69.84 | -73.95 | -79.56 |
| A2    | -74.55  | -66.94 | -74.04 | -69.51 |
| A3    | -73.64  | -70.16 | -76.53 | -73.42 |
| A4    | -71.84  | -49.95 | -49.81 | -51.86 |
| A5    | -70.46  | -43.86 | -46.47 | -47.22 |
| A6    | -72.27  | -47.16 | -48.42 | -49.25 |
| A7    | -56.91  | -33.22 | -48.70 | -39.75 |
| A8    | -66.25  | -35.84 | -38.89 | -39.08 |
| A9    | -68.20  | -36.17 | -39.38 | -38.89 |
| 平均值   | -69.98  | -50.35 | -55.13 | -54.28 |
| 标准差   | 5.41    | 14.16  | 14.42  | 14.90  |

## 4 结语

搭建模拟流通环境试验平台,通过单因素试验研究了不同风速、外界温度和振动频率对蓄冷配送箱体保温性能的影响,以期保证金枪鱼的品质,为运输设备的优化提供参考。试验结果表明,风速、外界温度和振动频率都对配送箱内空气的温度变化和分布有一定的影响。

1) 风速对箱体内部环境升温的速度有着正面的影响。当风速为 30 m/s 时,箱体内部平均温度上升的速度较快,试验结束时箱体内部平均温度已达 -31 °C,而当风速为 20 m/s 时,箱体内部的温度场均匀性较好。

2) 外界温度对液氮充注后箱内最低温度影响较大。随着外界温度升高,试验结束时箱体内部平均温度越高。而当外界温度为 20 °C 时,箱体内部的温度场均匀性较优。

3) 振动频率对液氮充注后箱体内最低温度以及温度分布均匀性有一定影响,但当频率超过 30 Hz 后影响不大。当振动频率为 30 Hz 时,试验结束时的箱体平均温度较高,为 43.71 °C。

值得讨论的是,配送箱的容积及液氮充注量可能也会对箱内温度变化产生一定的影响,项目组将对此进行深入研究。

### 参考文献:

[1] AVTAR S, SOOTTAWAT B, ZHANG BIN, et al. Effect of Squid Pen Chitooligosaccharide in Conjugation with

Different Modified Atmospheric Packaging Conditions on Color and Storage Stability of Tuna Slices[J]. Food Control, 2021, 125: 108013.

[2] CHONG L L, NOR M A, KAMARUL A A. Cryogenic Pipe Flow Simulation for Liquid Nitrogen with Vacuum Insulated Pipe (VIP) and Polyurethane (PU) foam Insulation under Steady-State Conditions[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2018, 7: 302-310.

[3] REHMAN M K, MUHAMMAD A, RAHMAN A F U, et al. Influence of Cryogenic Liquid Nitrogen Cooling and Thermal Shocks on Petro-Physical and Morphological Characteristics of Eagle Ford Shale[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 96: 104313.

[4] 徐瀚洲, 郭宪民, 王世伟. 液氮冷藏箱性能实验研究[J]. 低温与特气, 2020, 38(2): 29-32.

XU Han-zhou, GUO Xian-min, WANG Shi-wei. Experimental Study on Performance of Liquid Nitrogen Refrigerator[J]. Low Temperature and Specialty Gases, 2020, 38(2): 29-32.

[5] 贾宝惠, 郝彤星, 张刚, 等. 湿热环境对复合材料蜂窝板振动特性的影响[J]. 复合材料学报, 2020, 37(7): 1601-1610.

JIA Bao-hui, HAO Tong-xing, ZHANG Gang, et al. Effect of Hygrothermal Environment on Vibration Characteristic of Composite Honeycomb Structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(7): 1601-1610.

[6] 陈洪国, 谢代寒, 彭永宏. 常温运输中加冰量对荔枝果实品质的影响[J]. 湖北农业科学, 2001(2): 56-58.

CHEN Hong-guo, XIE Dai-han, PENG Yong-hong. Influence of Ice Adding Rate on the Lychee Fruit Quality under Common Transportation Condition[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2001(2): 56-58.

[7] WANG Bin, RONG Chuan-xin, CHENG Hua, et al. Temporal and Spatial Evolution of Temperature Field of Single Freezing Pipe in Large Velocity Infiltration Configuration[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 175: 103080.

[8] 胡云峰, 杜威, 魏增宇. 运输振动降低蒜薹的贮藏品质[J]. 现代食品科技, 2018, 34(8): 75-80.

HU Yun-feng, DU Wei, WEI Zeng-yu. Transport Vibration Decreases the Storage Quality of Garlic Shoots[J]. Modern Food Science & Technology, 2018, 34(8): 75-80.

[9] 周然, 曾媛媛. 不同等级道路的运输振动对哈密瓜贮藏过程中抗氧化系统的影响[J]. 食品科学, 2018(9): 176-181.

ZHOU Ran, ZENG Yuan-yuan. Effect of Transportation Vibration on Different Grades of Road on Antioxidant

- System of Hami Melons(Cucumis Melo Var. Saccharinus) during Storage[J]. Food Science, 2018(9): 176-181.
- [10] 杨松夏, 吕恩利, 朱立学, 等. 模拟运输条件下保鲜模式对菜心品质的影响[J]. 食品与机械, 2018(3): 127-131.  
YANG Song-xia, LU En-li, ZHU Li-xue, et al. Effects of the Fresh-Keeping Modes on Quality of Flowering Chinese Cabbage under Simulated Transportation[J]. Food & Machinery, 2018(3): 127-131.
- [11] LAGUERRE O, CHAOMUANG N, DERENS E, et al. How to Predict Product Temperature Changes during Transport in an Insulated Box Equipped with an Ice Pack: Experimental Versus 1-D and 3-D Modelling Approaches[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 100: 196-207.
- [12] 刘卫生, 黄雪梅, 张磊安, 等. 基于最小方差理论的风电叶片自动配胶机控制系统设计[J]. 制造业自动化, 2016, 38(12): 11-14.  
LIU Wei-sheng, HUANG Xue-mei, ZHANG Lei-an, et al. Design of Control System of Automatic Adhesives Mixing Machine for Wind Turbine Blade Based on Minimum Variance Theory[J]. Manufacturing Automation, 2016, 38(12): 11-14.
- [13] 游辉, 谢晶. 低温相变蓄冷材料及其应用于冷链的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(18): 287-293.  
YOU Hui, XIE Jing. Research Progress of Low Temperature Phase Change Storage Materials and Their Applications in Cold Chain[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(18): 287-293.
- [14] 吕恩利, 沈昊, 刘妍华, 等. 蓄冷保温箱真空隔热蓄冷控温传热模型与验证[J]. 农业工程学报, 2020, 36(4): 300-306.  
LYU En-li, SHEN Hao, LIU Yan-hua, et al. Heat Transfer Model for Vacuum Insulated Thermal Cooling Storage Temperature Control and Verification in Cold Storage Incubator[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(4): 300-306.
- [15] 李斌, 沈昊, 郭嘉明, 等. 无源蓄冷控温运输箱设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 358-365.  
LI Bin, SHEN Hao, GUO Jia-ming, et al. Design and Test of Passive Cold Storage Temperature Control Box[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 358-365.
- [16] 包晨旭. 电动汽车直驱式轮边电机仿真设计与实验研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2019: 32-35.  
BAO Chen-xu. Simulation Design and Experimental Research on Direct Drive Wheel Motor of Electric Vehicle[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019: 32-35.
- [17] 王跃钢, 左朝阳, 吴建国, 等. 基于 ADAMS 的离心机-振动台系统动力学仿真分析[J]. 机械设计, 2013, 30(7): 33-37.  
WANG Yue-gang, ZUO Zhao-yang, WU Jian-guo, et al. Kinematics and Dynamics Simulation Analysis of Centrifuge Facility-Vibration Shaker System Based on ADAMS[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(7): 33-37.

责任编辑: 曾钰婵