文章编号:0253-4339(2019) 05-0149-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.05.149

预冷冷库内冰浆式湿冷蒸发器的性能实验研究

王子安　武卫东　余强元

(上海理工大学制冷与低温工程研究所　上海　200093)

摘　要　针对果蔬预冷应用场合,本文提出一种冰浆式湿冷蒸发器,并将其应用于小型模拟冷库。采用娃娃菜为冷却对象,以库内温度和相对湿度为指标,改变填料类型(金属、塑料、纸质填料)和载冷剂(冰浆、冷水),在冷库空载条件下进行负载预冷实验。结果表明:金属、纸质填料的换热能力较塑料填料好;与冷水相比,以冰浆为载冷剂,预冷时间缩短了 1/6 并保持更低的库内温度,库内相对湿度稳定后均保持在 90%以上;预冷后样品失重率较冷水的小 0.19%;冰浆式湿冷蒸发器可在冷库中稳定运行,且较冷水为载冷剂的湿冷蒸发器,可更高效地实现预冷过程的低温(3~6 ℃)高湿(>90%RH)环境,适用于果蔬预冷和保鲜。

关键词　果蔬预冷;湿冷蒸发器;冰浆;冷库
中图分类号:TK61^{+}1; TB657.5　　**文献标识码**: A

Experimental Study on Performance of Humidicooling Evaporator with Ice-slurry in Precooling Cold Storage

Wang Zian　Wu Weidong　Yu Qiangyuan

(Institute of Refrigeration and Cryogenic Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract　A humidicooling evaporator with ice-slurry has been proposed and applied in a small-scale modeling cold storage for the precooling of fruits and vegetables. Performance comparison experiments were conducted by changing the types of fillers, i.e., metal, plastic, and paper, and cold medium, i.e., cold water and ice slurry, under no-load conditions in the cold storage with the storage temperature and relative humidity as evaluation parameters. Then, a load precooling experiment was conducted with a baby cabbage as a sample. Results showed that under the experimental conditions, the heat transfer performance of metal and paper fillers were better than that of the plastic fillers; the precooling time, with ice slurry used as the cold medium, was 1/6 shorter than that when cold water was used, and the relative humidity in the cold storage could be maintained at above 90%. In addition, the load precooling experiment showed that the weight loss rate of the sample was 0.19% smaller than that of cold water. In comparison with the huimidicooling evaporator with water, the humidicooling evaporator with ice-slurry could be operated reliably in the cold storage and achieved the working conditions of the low temperature (3-6 ℃) and the high humidity (>90%RH) for precooling more efficiently, and thus, is suitable for precooling and preserving of fruits and vegetables.

Keywords　fruits and vegetables precooling; humidicooling evaporator; ice slurry; cold storage

中国是果蔬生产大国,但 90%以上的果蔬为初级产品,采后腐损率达 25%~30%,有的果蔬高达 50%[1]。随着生活水平的提高,人们对果蔬品质的要求越来越高,促使果蔬冷链技术不断发展[2]。预冷作为整个冷链环节中的第一步,对维持果蔬品质方面发挥着极其重要的作用[3],它可使采摘后的果蔬在运输之前,迅速降低呼吸作用和减少水分蒸发,从而延长贮藏时间[4]。在现有的预冷方式中,湿冷预冷由于对含水量大、水分易于散失的果蔬、花卉等的保鲜具有突出的优势,备受青睐[5]。湿冷预冷的原理是在湿冷蒸发器(又称混合换热器)内空气和冷水的直接接触实现热质交换,获得低温高湿的空气,再经过强制通风与入库的果蔬进行换热,使之在较短的时间内得到冷却[6-7]。

湿冷蒸发器作为湿冷系统中关键部件之一,成为业界和学者们研究的重点。J. R. Camargo 等[8]采用

基金项目:"十二五"国家科技支撑计划(2015BAD19B02)资助项目。(The project was supported by the National Key Technology Research and Development Program during the 12th Five-Year Plan Period (No. 2015BAD19B02).)

收稿日期:2018-09-26;修回日期: 2018-11-17

数值模拟方法研究了空气-水混合换热器传热传质的性能。A. R. Al-Badri 等[9]建立了一种基于直接蒸发冷却器中空气与水热质平衡的数学预测模型,计算并分析了进风干球温度、相对湿度、水的过冷度和气水质量比等参数对其性能的影响。倪春丽等[10]基于 Poppe 方法,构建了空气和水混合换热器的数学模型,模拟计算了不同空气条件和喷淋水量对换热器传热性能的影响。简弃非等[11]利用 CFD 模拟计算了混合换热器填料中气流速度、压力、温度和含湿量,得出空气和水热质传递效果最佳时的填料间距、气流速度和喷淋流量。

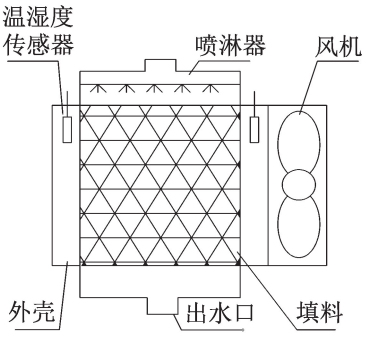
冰浆是一种含有悬浮冰晶粒子的水溶液,温度和流量相同情况下的冰浆(含冰率 5%~20%)载冷能力是冷水的 1.8~4.3 倍[12],有良好的流动性和相变换热性能。N. Haruki 等[13]采用简化单相流的方法研究了冰浆在螺旋盘管换热器中的传热系数,结果表明,冰浆在层流中的传热系数明显高于冷水的。S. Renaud-Boivin 等[14]实验研究了冰浆在管壳式换热器内的传热特性,结果表明含冰率为 25%的冰浆较冷水的传热系数和传热效率分别高 33%和 18%。但是目前有关冰浆用于湿冷蒸发器的研究较少。

本文提出了一种冰浆式湿冷蒸发器(将动态冰浆喷淋于湿冷蒸发器的填料上,与经过填料的空气直接接触进行热质交换),并将其应用于小型模拟冷库。以库内温度和相对湿度为指标,通过改变填料类型和载冷剂在冷库空载条件下进行了性能对比实验,并以娃娃菜为冷却对象进行了负载预冷实验。

1 冰浆式湿冷蒸发器及工作原理

图 1 所示为冰浆式湿冷蒸发器的结构。主要由外壳、喷淋器、填料 3 部分组成。填料段尺寸为 200 mm×200 mm×300 mm,采用横流式结构。外壳采用 304 不锈钢材质;喷淋器采用 200 mm×200 mm 的淋浴式喷淋头,喷淋孔孔径为 3 mm,共 100 个;选择金属、塑料和纸质填料(7090 普通型,比表面积 450 m^2/m^3)3 种常用填料进行对比研究,将轴流风机设计安装于填料段出风侧。

冰浆式湿冷蒸发器的工作原理:空气在风机作用下进入湿冷蒸发器中,在填料处与由喷淋器喷头喷淋出的冰浆溶液直接接触,空气的热量传递到冰浆中,使冰浆的冰晶粒子融化和部分水分蒸发,此时空气得到高效降温的同时,气液边界层的饱和水分子自由扩散进入空气,空气经过冰浆式湿冷蒸发器热湿交换后,变成低温高湿的状态,传热传质过程中伴随有显热和潜热变化。



(a) 示意图

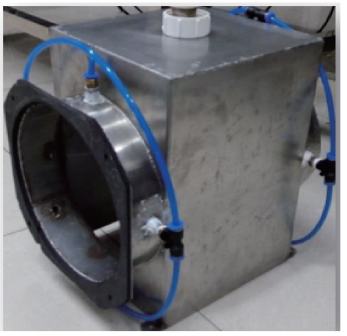

(b) 实物图

图 1 冰浆式湿冷蒸发器的结构

Fig.1 The structure of humidicooling evaporator with ice-slurry

2 实验系统

2.1 实验装置

图 2 所示为冰浆式湿冷蒸发器预冷冷库系统原理。在封闭的小型模拟冷库(内部尺寸为 800 mm×800 mm×900 mm 的方形腔体)中,库内空气在循环风机的作用下,不断被引入淋有载冷剂的填料中,经过热湿处理后变成低温高湿的空气,与货物进行热湿交换后回到风机进风口,完成一个循环(如箭头所示)。为控制喷淋流量不变,实验中载冷剂不循环,蓄冰桶(有效容积约为 160 L)内载冷剂通过水泵泵入喷淋器中,经热质交换后在湿冷蒸发器底部出口处回收;最终库内空气和货物被不断冷却降温,直到降低到一

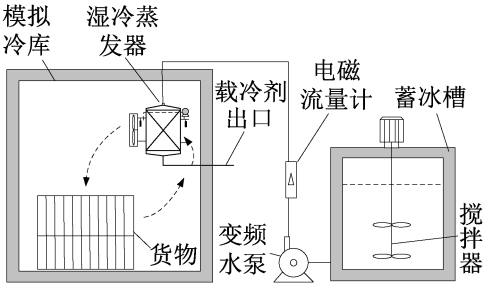


图 2 冰浆式湿冷蒸发器预冷冷库系统原理

Fig.2 The principle of precooling storage system with humidicooling evaporator with ice-slurry

定的温度并保持不变。

2.2 测量参数及仪表

实验测量的主要参数有:湿冷蒸发器进出口空气温度和相对湿度、小型模拟冷库库内温度、货物(娃娃菜)中心温度和质量、喷淋装置入口载冷剂体积流量。数据采集的主要仪器有:温湿度传感器、T 型热电偶、体积流量计。传感器的信号传入安捷伦数据采集仪中,再通过数据线导入电脑,采用编制的集成采集程序,对所有的数据信号进行采集记录,称重用电子计重器示数可直接在其自带的显示屏上读出。测量仪器关键参数如表 1 所示。

表 1 测量仪器关键参数

Tab.1 Key parameters of measuring instruments

测量仪器	量程	精度
T 型热电偶	−40~125 ℃	±0.2 ℃
温湿度传感器	0~100%RH; −40~80 ℃	±1.5%RH; ±0.2 ℃
电磁流量计	0~500 L/h	±1%
电子计重器	0~30 kg	±0.5 g

2.3 实验方法及测试工况

实验方法及步骤:1)配置足够的冷水(冰浆)放在蓄冰桶内。选取质量分数为 3% 的氯化钠水溶液,并维持在此时盐浓度的冰点温度,然后将制取的冰晶粒子倒入,并通过搅拌将其混合均匀,制取冰浆,再多次取样用极细滤网过滤,将过滤前后的质量进行比对[15],经测定所配置的冰浆含冰率为 5.2%);2)实验开始前,关紧冷库库门,静置一段时间,直到多个测点参数基本稳定(如做负载实验,需将货物称重后装入冷库,并在货物中心布置好温度测点);3)开启水泵并调节变频器,通过流量计示数来达到设计流量工况,并使其稳定;4)打开循环风机,通过数据采集软件在线观察各参数变化情况,实验过程中观察库内温度、货物中心温度、进出水(冰浆)温度、进出风温度和湿度等参数,直到库内温度或货物中心温度稳定在±0.5 ℃范围内,结束实验(如做负载实验,需实验结束后立即对货物称重,分析其失重率)。

失重率指实验结束后蔬菜质量比实验前减少的量占实验前蔬菜质量的百分比[16]:

$$失重率 = (G_0 - G)/G_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中:G_0 为样品预冷前起始质量,kg;G 为样品预冷后实测质量,kg。

本文通过改变填料类型(金属、纸质、塑料填料)和载冷剂(冷水、冰浆)等参数以及在空载和带负载情况下对冷库内的湿冷蒸发器进行性能对比实验,具体的实验测试工况如表 2 所示。

表 2 湿冷蒸发器在小型冷库中的测试工况

Tab.2 Test conditions of humidicooling evaporator with ice-slurry in small-scale cold storage

实验编号	填料类型	填料厚度/mm	载冷剂	库体货物	喷淋体积流量/(L/h)
1	金属、纸、塑料	200	冷水	空载	150
2	金属	200	冷水、冰浆	空载	200
3	金属	200	冷水、冰浆	负载	150

3 实验结果与分析

3.1 空载冷库在不同填料类型下的降温增湿特性

选取金属、纸质和塑料 3 种填料,厚度均为 200 mm,研究不同填料类型湿冷蒸发器对空载冷库降温增湿的影响。载冷剂为冷水,喷淋体积流量为 150 L/h,库内初始温度为 14 ℃。图 3 所示为不同填料类型时,空载冷库温度和相对湿度随运行时间的变化。

由图 3 可知,库内温度在不同填料类型时均大幅度降低,30 min 内库内温度依次降至 2.5、2.8、3.0 ℃,并趋于稳定。由于金属的传热性能较好,因此金属填料填充的湿冷蒸发器降温效果最好。以金属填料为例,将整个库内降温过程分为 3 个阶段(图 3 中用虚线划分),温度降至 8 ℃为快速降温阶段,温度降低到 4 ℃为第 2 阶段,最终趋于稳定阶段为第 3 阶段,3 个阶段的平均降温速率分别为 3.0、0.4、0.1 ℃/min,可知初期降温明显,随着库内温度的降低,降温速率逐渐减小。

库内相对湿度在不同填料类型时均先快速降低再逐渐上升,原因是由于风机开启前(初始时刻),喷淋载冷剂使湿冷蒸发器周边的空气被率先润湿(达到高湿状态);当风机开启后,库内低湿度(约为 55%)的空气进入湿冷蒸发器,相对湿度先快

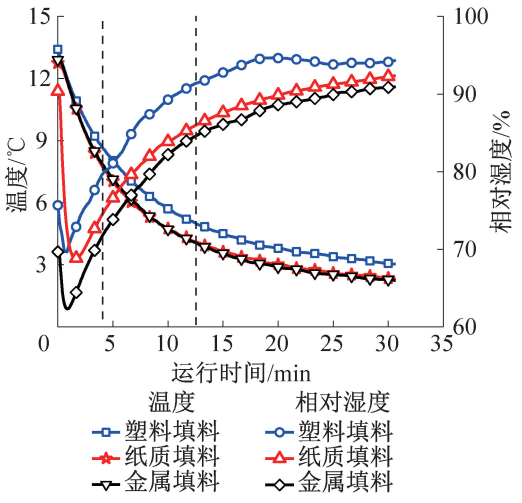


图 3 不同填料类型时,空载冷库温度和相对湿度随运行时间的变化

Fig.3 Temperature and relative humidity of no-load cold storage change with running time under different packings

速降低,随着运行时间的增加,库内空气湿度增加,最后均稳定在 90% 以上。但库内相对湿度到达 90%所用时间分别为 25、20、10 min,可知相对湿度回升最快的是塑料填料,趋于稳定后相对湿度大小顺序:金属填料<纸质填料<塑料填料。原因是不同填料的锁水能力差异较大,锁水能力受填料本身材料和结构等因素的影响,锁水能力强的填料可保留载冷剂中更多的液体,空气在热湿交换过程中可获得更高的湿度。

3.2 空载冷库在不同载冷剂下的降温增湿特性

本文分别采用冰浆和冷水作为载冷剂在小型模拟冷库中进行预冷对比实验,控制喷淋体积流量为 200 L/h,库内初始温度约为 14 ℃,湿冷蒸发器用金属填料填充,其他条件不变。图 4 所示为不同载冷剂下,空载冷库温度和相对湿度随运行时间的变化。

由图 4 可知,不同载冷剂下,库内温度大幅度降低,库内相对湿度先快速降低再逐渐上升,最后均稳定在 90%以上。以冷水为载冷剂时,库内温度约降至 2 ℃,相对湿度达到 92%;以冰浆为载冷剂时,库内温度约降至 1.3 ℃(降低了 0.7 ℃),相对湿度可达到 90%(降低了 2%),且冰浆湿冷蒸发器的降温速率比冷水湿冷蒸发器的降温速率更快。原因是冰浆的温度较冷水低,且单位体积制冷量更大,降温速率较快,因此库内温度更低。相对湿度略低的原因是由于冰浆的载流体为氯化钠盐溶液,具有一定的吸湿性,空气不易从气液边界层得到水蒸气分子,导致出

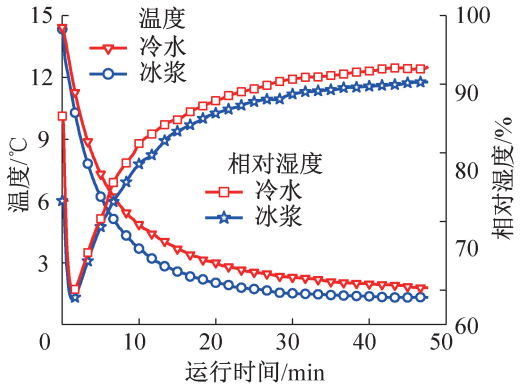


图 4 不同载冷剂下,空载冷库温度和相对湿度随运行时间的变化

Fig.4 Temperature and relative humidity of no-load cold storage change with running time under different coolants

风相对湿度略低。

3.3 负载冷库在不同载冷剂下的降温增湿特性

以金属填料填充的湿冷蒸发器应用于小型模拟冷库中,控制喷淋体积流量为 150 L/h,选择 8 颗娃娃菜作为冷却对象进行负载预冷实验测试。图 5 所示为不同载冷剂下,冷库中蔬菜温度(中心温度)随运行时间的变化。由于娃娃菜在预冷温度低于 5 ℃时出现冻害,故预冷温度约为 5 ℃时结束实验。

由图 5 可知,当蔬菜初始温度相同时,两种不同载冷剂下,冷库内蔬菜温度均快速下降,均能满足样品蔬菜的预冷温度要求。以冷水为载冷剂时,蔬菜温度从 22 ℃预冷到 5 ℃所需时间为 240 min;以冰浆为载冷剂时,蔬菜温度从 22 ℃预冷到 5 ℃所需时间为 200 min,较冷水的预冷时间缩短了 40 min(缩短约 1/6)。

冷库内空气的相对湿度对果蔬预冷效果影响较大[17]。图 6 所示为不同载冷剂下,冷库内空气相对湿度随运行时间的变化。

由图 6 可知,预冷开始后,不同载冷剂下,冷库内的相对湿度均可快速达到 90%,并最终趋于稳定,一直保持在 90%以上,以冰浆为载冷剂的库内空气相对湿度较冷水为载冷剂的相对湿度仅低了约 1%。

预冷前后果蔬的失重率是评价果蔬预冷效果的重要指标[18]。因此,按式(1)对每组负载实验前后的样品蔬菜进行失重率计算。以冷水为载冷剂的实验:娃娃菜初始质量为 5 220 g,预冷后质量为 5 187 g,减少了 33 g,失重率约为 0.63%;以冰浆为载冷剂的实验:娃娃菜初始质量为 4 765 g,预冷后质量为 4 744 g,减少了 21 g,失重率约为 0.44%,比以冷水为载冷剂的失重率约减小了 0.19%。原因是与以冷水为载

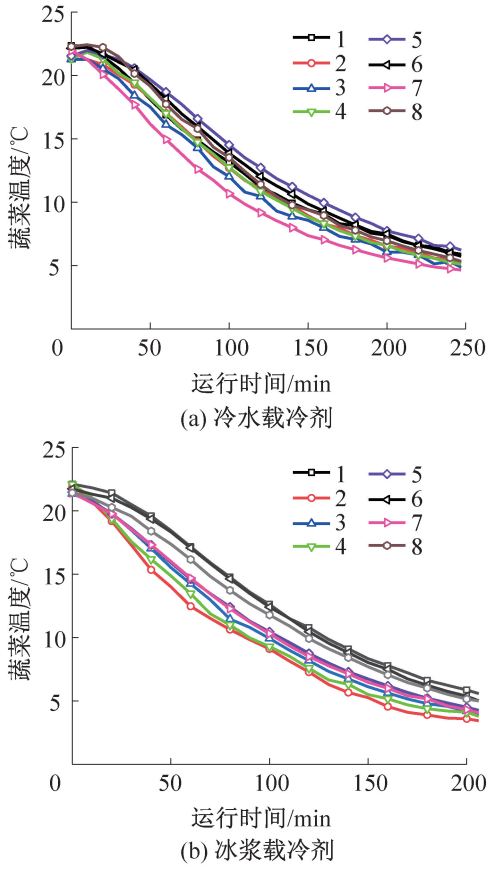


图 5 不同载冷剂下,冷库中蔬菜温度随运行时间的变化

Fig.5 The vegetable temperature in cold storage changes with running time under different coolants

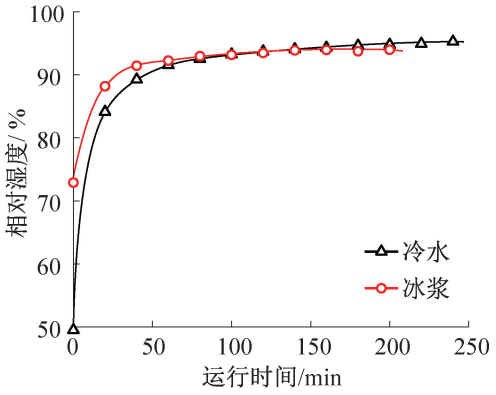


图 6 不同载冷剂下,冷库内空气相对湿度随运行时间的变化

Fig.6 The relative humidity of air in cold storage changes with running time under different coolants

冷剂的实验相比,以冰浆为载冷剂时,库内相对湿度稳定值略低,约为 1%。但是以冰浆为载冷剂时,库内降温速率比以冷水为载冷剂的快,即缩短了果蔬预冷时间。此外,以冰浆为载冷剂的湿冷蒸发器也能使库内相对湿度快速达到该工况下的最高值并维持稳定。综合以上因素,实现了果蔬的高效预冷,即冷得快、失水少。

4 结论

本文提出了冰浆式湿冷蒸发器并应用于小型模拟冷库。以库内温度和相对湿度为指标,通过改变填料类型和载冷剂在空载冷库内进行了性能对比实验,并以娃娃菜作为被冷却对象进行了负载预冷实验,得出如下结论:

1)采用金属和纸质填料填充的湿冷蒸发器降温速率相当,且都比以塑料填料填充的降温快,趋于稳定的库内温度也更低。库内相对湿度主要受材料本身结构的影响,库内相对湿度在 3 种填料类型下,均可稳定在 90%以上。

2)采用冰浆和冷水为载冷剂的湿冷蒸发器均可使库内温度快速降低,并保持较高的库内相对湿度。空载冷库在以冰浆为载冷剂时的温度和相对湿度,比以冷水为载冷剂时的温度和相对湿度分别降低了 0.7 ℃、2%。

3)负载冷库在以冰浆为载冷剂时的预冷时间,比以冷水为载冷剂时的预冷时间缩短了 1/6,且预冷过程中库内相对湿度能保持在 90%以上,使样品蔬菜的失重率为 0.44%,以冷水为载冷剂时的失重率减小了 0.19%。

4)在本实验工况下,以冰浆为载冷剂的湿冷蒸发器可以在冷库内稳定运行,比以冷水为载冷剂的湿冷蒸发器更高效地实现预冷过程的低温(3~6 ℃)高湿(>90%RH)环境,适用于果蔬预冷和保鲜。

参考文献

[1] 段爱鹏, 刘斌, 邸倩倩, 等. 几种物理量及场理论对果蔬保鲜的影响[J]. 制冷学报, 2017, 38(4): 110-118. (DUAN Aipeng, LIU Bin, DI Qianqian, et al. Effects of several physical quantities and field theory on the preservation of fruits and vegetables[J]. Journal of Refrigeration, 2017, 38(4): 110-118.)

[2] 许茹楠, 刘斌, 陈爱强, 等. 我国果蔬冷链碳足迹分析[J]. 制冷学报, 2018,39(4):13-18. (XU Runan, LIU Bin, CHEN Aiqiang, et al. Analysis of cold chain carbon footprint of fruits and vegetables in China[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(4): 13-18.)

[3] HAN Qiang, GAO Haiyan, CHEN Hangjun, et al. Precooling and ozone treatments affects postharvest quality of black mulberry (*morus nigra*) fruits[J]. Food Chemistry, 2017, 221: 1947-1953.

[4] 申江, 刘斌. 冷藏链现状及进展[J]. 制冷学报, 2009, 30(6): 20-25. (SHEN Jiang, LIU Bin. Status and progress of cold storage chain[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(6): 20-25.)

[5] 卓献荣, 宋垚臻, 陈嘉澍. 淋水式冷风机湿冷系统设计及性能实验研究[J]. 制冷学报, 2007, 28(1): 33-36. (ZHUO Xianrong, SONG Yaozhen, CHEN Jiashu. Study on humid-cool system design and its performance of water drenching air-cooler[J]. Journal of Refrigeration, 2007, 28(1): 33-36.)

[6] 黄翔, 夏青, 孙铁柱. 蒸发冷却空调技术分类及术语探讨[J]. 暖通空调, 2012, 42(9): 52-57. (HUANG Xiang, XIA Qing, SUN Tiezhu. Classification and terms of evaporative air conditioning technology[J]. Journal of HV & AC, 2012, 42(9): 52-57.)

[7] 张璐瑶, 黄翔, 宋祥龙, 等. 亚湿球温度的冷水对农业温室湿帘降温性能的影响分析[J]. 制冷技术, 2015, 35(1): 25-28. (ZHANG Luyao, HUANG Xiang, SONG Xianglong, et al. Influence of water of sub-wet bulb temperature on cooling effect of wet curtain in agricultural greenhouse[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2015, 35(1): 25-28.)

[8] CAMARGO J R, EBINUMA C D, SILVEIRA J L. Experimental performance of a direct evaporative cooler operating during summer in a Brazilian city[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(7): 1124-1132.

[9] Al-BADRI A R, Al-WAALY A A Y. The influence of chilled water on the performance of direct evaporative cooling[J]. Energy and Buildings, 2017, 155(15): 143-150.

[10] 倪春丽, 王一平, 黄群武. 新型规整填料换热器传热的理论与实验研究[J]. 化学工程, 2018, 46(1): 31-36. (NI Chunli, WANG Yiping, HUANG Qunwu. Theoretical and experimental study on heat transfer performance of novel structured packing heat exchanger[J]. Chemical Engineering, 2018, 46(1): 31-36.)

[11] 简弃非, 戴晨影, 任勤, 等. 波纹填料在蒸发式冷凝器中的流场与传热特征分析[J]. 制冷学报, 2014, 35(3): 90-95. (JIAN Qifei, DAI Chenying, REN Qin, et al. Analysis on flow field and heat transfer of corrugated filler used in evaporative condenser[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(3): 90-95.)

[12] 高红岩, ARASON S, 胡瑞卿, 等. 流化冰预冷与冰温贮藏新鲜鳕鱼片质量特性分析研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(2): 48-52. (GAO Hongyan, ARASON S, HU Ruiqing, et al. Analysis on quality of fresh cod (*gadus morhua*) fillets pre-cooled with slurry ice and further superchilled storage[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(2): 48-52.)

[13] HARUKI N, HORIBE A. Flow and heat transfer characteristics of ice slurries in a helically-coiled pipe[J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(4): 1285-1293.

[14] RENAUD-BOIVIN S, POIRIER M, GALANIS N. Experimental study of hydraulic and thermal behavior of an ice slurry in a shell and tube heat exchanger[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2012, 37(1): 130-141.

[15] 马军, 赵红霞, 周帅, 等. 真空法制取冰浆的实验分析与研究[J]. 热科学与技术, 2015(3): 255-258. (MA Jun, ZHAO Hongxia, ZHOU Shuai, et al. Experimental study of ice slurry generation using vacuum method[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2015(3): 255-258.)

[16] 王雪芹, 刘宝林. 蔬菜真空预冷中降低失水率的方法研究[J]. 制冷学报, 2013, 34(2): 81-84. (WANG Xueqin, LIU Baolin. Study of methods to reduce water loss rate for vegerables in vacuum cooling[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(2): 81-84.)

[17] 刘伟, 王洪江, 孟令伟. 保鲜技术在果蔬仓储过程中的应用研究进展[J]. 包装工程, 2017, 38(17): 58-63. (LIU Wei, WANG Hongjiang, MENG Lingwei. Research progress of fresh-keeping technology in fruits and vegetables storage[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(17): 58-63.)

[18] 严灿, 刘升, 贾丽娥, 等. 不同贮藏温度对草莓呼吸强度及品质的影响[J]. 制冷学报, 2015, 36(5): 37-42. (YAN Can, LIU Sheng, JIA Li'e, et al. Effect of storage temperature on respiration rate and quality of strawberry[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(5): 37-42.)

通信作者简介

武卫东,男,教授,博士生导师,上海理工大学能源与动力工程学院,13917527018,E-mail: usstwwd@163.com。研究方向:蓄冷与蓄热技术及应用。

About the corresponding author

Wu Weidong, male, professor, Ph. D. supervisor, School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, +86 13917527018, E-mail: usstwwd@163.com. Research fields: application of cold and heat storage technology.