

可拆装 PE-RT 低温热管蓄冷装置及其使用 碳氢制冷剂的蓄冷效果

Removable cold storage device with PE-RT low temperature heat pipe
and its cool storage effect using hydrocarbon refrigerants

刘金光¹ 刘文瑶² 王世清¹ 宋庆武³ 姜文利¹ 李飞¹

LIU Jin-guang¹ LIU Wen-yao² WANG Shi-qing¹ SONG Qing-wu³ JIANG Wen-li¹ LI Fei¹

(1. 青岛农业大学食品科学与工程学院, 山东 青岛 266109; 2. 青岛蔚蓝生物集团有限公司,
山东 青岛 266101; 3. 日照职业技术学院海洋工程学院, 山东 日照 276800)

(1. Food Science and Engineering College, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China;

2. Qingdao Vland Biltech Group Co., Ltd, Qingdao, Shandong 266101, China;

3. Marine Engineer Department, Rizhao Polytechnic College, Rizhao, Shandong 276800, China)

摘要:基于热管技术,设计并制作了一套低成本、可快速拆装的 PE-RT 热管蓄冷装置,用高密度聚乙烯(PE-RT)导热塑料管替代紫铜管作为热管管材,用新型碳氢制冷剂 HCR22 作为热管循环工质,以蓄冷量为指标,研究了 2 种材质热管组在不同充液率和不同换热面积比时的蓄冷效果。试验结果表明:与同管径、同结构尺寸的铜质热管组相同,PE-RT 热管组的最佳充液率也是 33%,最佳充液时,PE-RT 热管组的最优换热面积比同样是 2.8 : 1;热管组蓄冷 72 h,PE-RT 热管组和铜质热管组的储水槽水温分别降低 13.52, 15.30 °C, PE-RT 热管组的蓄冷量为铜质热管组的 88.37%。该研究为 PE-RT 低温热管的推广和应用提供依据。

关键词:热管;蓄冷;管材;PE-RT;紫铜;HCR22

Abstract: In order to solve the problem of high cost and difficult welding of metal materials, as well as avoid the ozone depletion and global warming by Freon refrigerant, a cold storage device made of PE-RT plastic was produced, with a low cost and an easy assembly. In this study, a polyethylene of high temperature tolerant tube instead of the copper one was used, complied with hydrocarbon refrigerant HCR22 as heat pipe circulating working fluid. The results showed that the best filling ratio of PE-RT plastic heat pipe group was 33%, which was the same as copper heat pipe group, with the same diameter, the structure size, and in best filling time, the optimal heat transfer area ratio of PE-RT plastic heat pipe group was also

2.8 : 1. When the heat pipe module ran for 70 h, the water temperature was reduced by 13.52 and 15.30 °C respectively by using the PE-RT plastic heat pipe group and copper heat pipe group, and the cold storage capacity of PE-RT plastic heat pipe group for copper heat pipe group was 88.37%. This study supported the application of the PE-RT plastic heat pipe and provided the potential prospect of the real green environmental protection on refrigeration.

Keywords: material texture; heat pipes; cold storage; PE-RT; copper; HCR22 refrigerant

热管通过填充介质的相变完成微小温差高效热传递,被誉为“热的超导体”^[1-2]。近年来,热管技术发展迅速,已广泛应用于航天器冷却^[3]、冻土路基保持^[4]和自然冷能制冷食品冷藏库建设等领域^[5-6]。氟利昂制冷剂是低温热管常用的制冷工质,其热力学特性稳定^[7],具有较大的单位容积制冷量和良好的导热性、启动力^[8],但有导致全球变暖的劣势。碳氢制冷剂仅包含元素 C、H,属于天然制冷剂,是氟利昂的理想替代剂,其 ODP(消耗臭氧潜能值)为零,GWP(全球变暖潜势)极低;制冷更迅速,且充注量仅为氟利昂的 1/3;无腐蚀性,材料相容性良好^[9-10],能够实现真正环保。碳氢制冷剂在欧洲和亚洲许多国家已有广泛应用:如 R600a 替代 R12 用于家用冰箱;HCR22 替代 R22 和 R404a 用在果蔬保鲜和制冷仓^[11],刘金光等^[12]用 HCR22 替代 R22 用于低温热管,发现两者制冷效果相当,但碳氢制冷剂的充注量更少。

制冰及果蔬保鲜等食品方面用途的低温热管管材常用无缝钢或铜等金属材料,金属管材导热性好,耐腐蚀,但存在重量大、成本高的缺陷,且用于低温热管时对管壁焊接点密封要求极高,因此,大规模应用时制作成本高、施工难度大。

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:31271963)

作者简介:刘金光,男,青岛农业大学在读硕士研究生。

通信作者:王世清(1961—),男,青岛农业大学教授,博士。

E-mail: wangshiqing@126.com

收稿日期:2018-07-03

导热塑料凭借良好的导热性、易施工、寿命长以及质轻价低的优势逐渐进入人们的视野。孙国华等^[13]设计制作了分置式斯特林循环塑料制冷机,颜健等^[14]和田树生等^[15]研究发现塑料管导热系数仅为金属管的0.6%~1.0%,但传热系数是金属管的56%~77%,陈小平等^[16]用导热塑料管替代钢管用作蓄冰槽盘管,发现钢管总传热系数仅为塑料管的1.25倍,张雪东等^[17-18]用聚四氟乙烯塑料管替代铜管用于吸收式制冷机,发现吸收器内2种管材传热系数差异极小,蒸发器和冷凝器内铜管传热系数仅为塑料管的2.1倍。

高密度聚乙烯(PE-RT)管是目前应用广泛的导热塑料管,因其易拆装、导热性良好,廉价、可回收等优势广泛用于地暖管材^[19]。修方珑等^[20]和李新宇等^[21]证明分离式热管低温储粮效果明显,张明安等^[5]证明自然冷源可用于果蔬贮藏保鲜中,且经济价值十分可观。但热管低温蓄冷中,由于热管的特殊结构和制作要求,致使热管无法方便、快捷地拆卸和组装,基于分离式低温热管,本研究尝试使用PE-RT导热塑料管替代紫铜管,用无腐蚀性的HCR22制冷剂为热管循环工质,设计开发了一套低成本、可快速拆装、真正环保的PE-RT低温热管蓄冷装置,对比了PE-RT热管组和铜质热管组的蓄冷效果,以期将热管单向导热的优势与PE-RT导热塑料管的优势相结合,实现食品用途低温热管蓄冷装置的低成本、可快速拆装拆解和环保制冷。

1 材料和方法

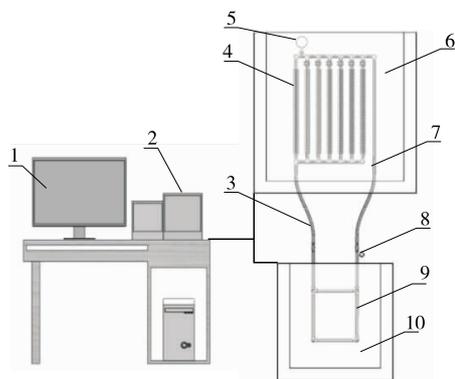
1.1 试验材料

碳氢制冷剂:HCR22型,仁天和节能环保有限公司;
导热塑料管材:PE-RT型,上海中财管道有限公司。

1.2 试验器材

空压机:550W-8L型,台州市奥突斯工贸有限公司;
电子天平:UTP313-4型,上海花潮电器有限公司。

蓄冷装置(见图1)包括储水槽、低温热管组和温度监测器等,其中冷柜1(澳柯玛BC-208HNE型)模拟外界自然冷源;冷柜2(澳柯玛BD-258SV型,有效容积240L)作为密闭保温的储水槽。



1. 计算机控制系统 2. 温度监测器 3. 冷凝液下降管 4. 热管冷凝段 5. 压力检测器 6. 冷柜1 7. 蒸气上升管 8. 制冷剂充注阀 9. 热管蒸发段 10. 冷柜2

图1 试验装置图

Figure 1 Heat pipe cooling device

低温热管组为分离式重力热管,主要包括蒸发段、冷凝段和连接段。如图2所示,蒸发段为长方体框架结构,总长度为5m,放置于储水槽的中心位置,完全浸没于水中;冷凝段为排管式结构,放置于冷柜1内与冷源直接接触;连接段包括蒸汽上行管和冷凝液下降管,连接蒸发段和冷凝段,使热管组行成一个密闭的循环系统。铜质热管组材质为紫铜,外径为12.7mm,壁厚0.7mm,各连接处用金属银焊接;PE-RT热管组材质为PE-RT导热塑料,外径为16mm,壁厚2mm(可耐压0.6MPa),各连接处采用热熔接。可认为2种材质管材内径相同。

为提高换热效果,冷凝段外管壁皆加装紫铜质翅片,翅片外径为25mm、厚度为3mm、间距为5mm;为保证热管内制冷剂单向流动,冷凝段顶端内管壁安装单向流通器;为减少系统的热能损失,连接段外壁包裹聚氨酯保温材料 and 防水带。

1.3 试验原理

低温热管中充注制冷剂后,制冷剂受重力作用聚集在热管蒸发段,吸收热管周围的热量汽化,在微小压差作用下上升进入冷凝段,与冷源进行热交换并液化,制冷剂液体由于重力又流回蒸发段。伴随循环工质的连续吸热蒸发上升、冷凝放热下降的过程,水的热量逐渐被导出,冷源的冷能逐渐蓄积到储水槽^[22-25]。

热管冷凝段安装于室外,与外界自然冷源(指冬季冷空气)直接接触,蒸发段安装于室内均匀分布于被冷却物内(粮堆内等)。本试验用冷柜1替代冬季室外自然冷源,若将冷源供给更换为中高纬度地区冬季丰富的自然冷源,则本试验装置的热量转移和冷量蓄积2个过程可实现无能耗运行,实现无能耗蓄冷^[26-27]。

1.4 测温点的布置

温度测定使用T型热电偶测温,测温点布置(见图2):冷凝段安装1~2号测温点,测量制冷剂进、出冷凝段的温度,3号测温点测量冷源环境温度;4~14号测温点安装于储水槽内,测量储水槽内水温,15号测温点测量室内环境温度;16~22号测温点安装于蒸发段表面,测量蒸发段温度。

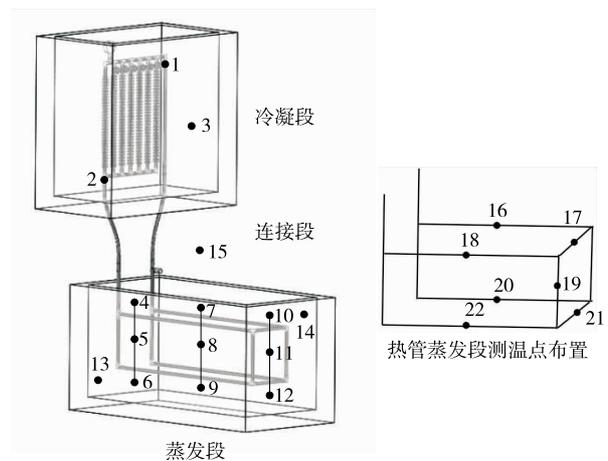


图2 热管组结构及蓄冷设施测温点图

Figure 2 Structure and temperature distribution

装置蓄冷期间,储水槽内水的实时温度采集记录使用 TP1000-64 型多路温度记录仪完成,数据采集间隔为 5 s,精度为 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。储水槽内初始水温为 $(20\pm 0.2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.5 试验内容

1.5.1 制冷剂充液率对热管蓄冷效果的影响 对试验热管组进行不同充液率蓄冷研究,对比铜质热管组和 PE-RT 热管组最佳充液时的蓄冷效果。

热管组为 PE-RT 热管组和铜质热管组,选用新型碳氢制冷剂 HCR22,充液率分别为 40%,33%,27%,20%,13%;采集、记录装置蓄冷 72 h 的储水槽实时水温。

1.5.2 热管组换热面积比对蓄冷效果的影响试验 调整冷凝段的换热面积即改变热管组的换热面积比,探究铜质热管组和 PE-RT 热管组在最佳充液时换热面积比对蓄冷效果的影响。

调整热管组的换热面积比依次为 3.2:1,2.8:1,2.3:1,1.8:1,1.4:1,采集、记录装置蓄冷 72 h 的储水槽实时水温。

1.6 测试指标

1.6.1 充液率 在冷态条件下,热管工质充入量的体积与热管总容积的比值^[28](碳氢制冷剂的使用量为氟利昂制冷剂的 1/3)。

1.6.2 蓄冷量 热管组蓄冷装置蓄冷期间的蓄冷量由式(1)计算:

$$Q_c = cm\Delta T, \quad (1)$$

式中:

Q_c ——装置蓄冷量,kJ;

c ——水的比热容 ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 0.1013 MPa),
4.183 kJ/(kg· $^{\circ}\text{C}$);

m ——水的质量,kg;

ΔT ——蓄冷前后水的温差, $^{\circ}\text{C}$ 。

1.6.3 统计与分析 数据统计分析采用 Spss 软件,差异显著水平为 0.05。

2 结果与分析

2.1 充液率对热管组蓄冷效果的影响

由图 3(a)可知,铜质热管组运行 72 h,充液率为 27%,33%,40%时,储水槽内水温明显低于充液率为 13%和 20%时的($P<0.05$),蓄冷过程的前 6 h,27%,33%,40%充液率对应的储水槽内水温差异较小,6~72 h,充液率为 33%时,储水槽内水温明显低于其他充液率时的($P<0.05$),因此,铜质热管组的最佳充液率为 33%,热管组运行 72 h 储水槽的水温降低 15.23 $^{\circ}\text{C}$,由式(1)可知,蓄冷量为 15 289.70 kJ。

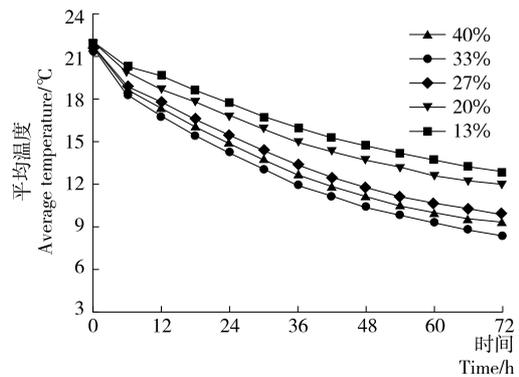
由图 3(b)可知,PE-RT 热管组蓄冷 72 h,充液率为 13%和 20%时,储水槽内水温明显高于其他充液率时的($P<0.05$),可能是 HCR22 制冷剂为碳氢制冷剂,充注量仅为氟利昂制冷剂的 1/3,因此,13%和 20%充液率时制冷剂充注量过少,导致蒸发段上部管内壁无液膜覆盖,出现烧干现象,热管组无法正常运行;PE-RT 热管组蓄冷过程的最佳充液率为 33%,此时,储水槽内水温明显低于 27%和 40%充液率

时的水温,原因可能是 40%充液率时($P<0.05$),制冷剂充入过多,部分制冷剂液体被制冷剂蒸气携带进入蒸气上行管,甚至流入冷凝段,降低了热管组的传热性能。充液率分别为 13%,20%,33%,33%,40%时,PE-RT 热管组工作 72 h,储水槽内水温依次降低 9.10,10.00,11.90,13.30,12.50 $^{\circ}\text{C}$,蓄冷量分别是 9 135.67,10 039.20,11 946.65,13 352.14,12 549.00 kJ。王一平等^[29]研究发现 R22 的充液率为 50%~100%(对应的碳氢制冷剂充液率为 17%~33%),铜-R22 分离式热管蒸发段最佳充液率为 80%~100%(对应的碳氢制冷剂充液率为 27%~33%)。洪光等^[30]试验了 R22 制冷剂 41%~113%充液率时分离式热管的传热能力,证明热管最佳工况的充液率为 82%~98%(对应的碳氢制冷剂充液率为 27%~33%),此时热管内工质以相变换热为主,热管的换热量和传热系数均较大。二者关于氟利昂制冷剂用于分离式热管的最佳充液率的研究结果均支持本研究结论。

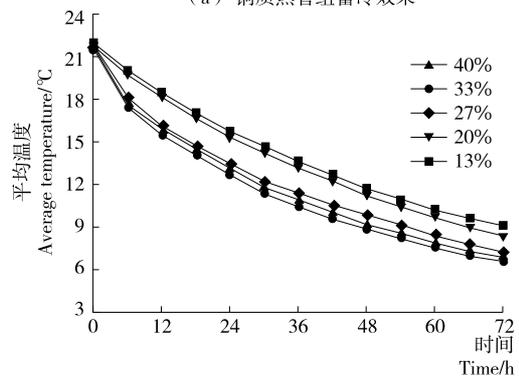
2.2 铜质热管组和 PE-RT 热管组最佳充液时的蓄冷效果对比

图 4 为铜质热管组和 PE-RT 热管组最佳充液时蓄冷效果对比图。2 种热管组的最佳充液率皆为 33%(图 3),热管组工作 72 h,铜质热管组和 PE-RT 热管组蓄冷后储水槽内水温分别降低 15.23,13.30 $^{\circ}\text{C}$,蓄冷量分别为 15 289.70,13 352.14 kJ,PE-RT 热管组的蓄冷量为铜质热管组的 87.33%。

对比 2 种材质热管组的蓄冷降温曲线,2 条曲线的温度变化趋势十分相似,温度降低平缓,无明显的骤升、骤降,可



(a) 铜质热管组蓄冷效果



(b) PE-RT热管组蓄冷效果

图 3 充液率对蓄冷效果的影响

Figure 3 The cooling effect of charging ratio

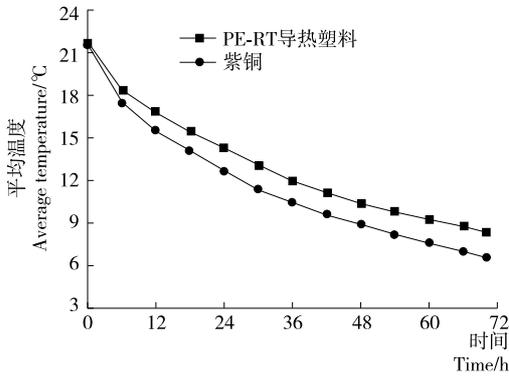


图4 热管组最佳充液时蓄冷效果对比
Figure 4 The cooling effect of heat pipe with best charging ratio

见,PE-RT热管组与铜质热管组的相变传热中,蓄冷过程的传热稳定性一致。

2.3 热管组换热面积比对蓄冷效果的影响

由图5可知,铜质热管组和PE-RT热管组的最佳换热面积比皆为2.8:1,当换热面积比小于最佳换热面积比时,随着换热面积比的增加,蓄冷量增大,可能是换热面积比过小,即冷凝段换热面积过小,制冷剂蒸气在冷凝段未完成充分热交换进而影响了冷凝传热;当换热面积比超过最佳换热面积比时,蓄冷量反而低于最佳换热面积比时的蓄冷量,可能是换热面积比过大,即冷凝段换热面积过大,制冷剂蒸气在冷凝段的部分管路已完成了充分热交换,过大的冷凝段面积反而延长了制冷剂的循环周期,从而减缓了热管组的换热效率,而且增加了热管组的结构和成本。

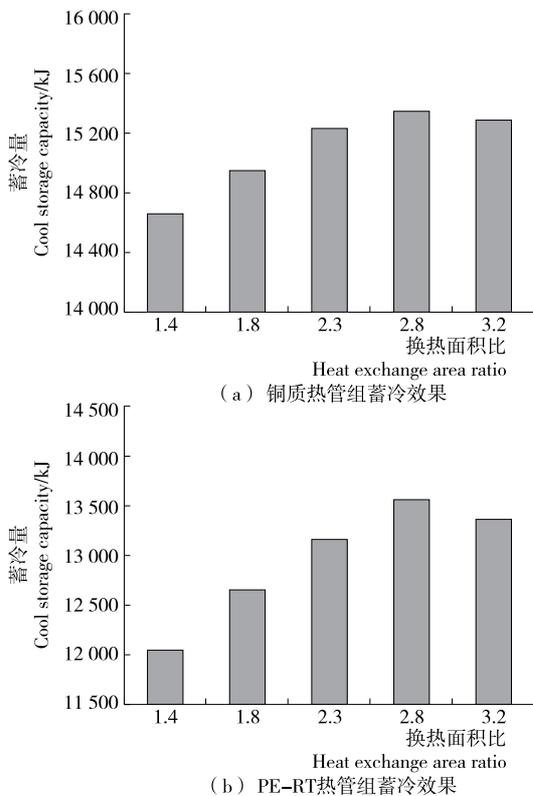


图5 换热面积比对蓄冷效果的影响
Figure 5 The cooling effect of heat exchange area ratio

铜质热管组和PE-RT热管组在最佳换热面积比2.8:1时运行72h,储水槽内水温分别降低15.30,13.52℃,对应的蓄冷量分别为13552.92,15348.96kJ,PE-RT热管组的蓄冷量为铜质热管组的88.37%。相比宋庆武等^[27]自然冷源制冷设备最佳换热面积比3:1,本试验设施的最佳换热面积比为2.8:1时结构更紧凑、管材更节约。

2.4 PE-RT热管组和铜质热管组最佳蓄冷效果

由表1可知,2种热管组的最佳充液率均为33%,最佳换热面积比均为2.8:1,此条件时,PE-RT热管组的蓄冷量为铜质热管组的88.37%,但PE-RT管材每米单价仅为同管径紫铜管的19.13%,每米重量仅为同管径紫铜管的44.68%,因此,相比同结构、同尺寸的铜质热管组,PE-RT热管组可快速拆装、成本低、重量轻。

表1 PE-RT热管组和铜质热管组最佳蓄冷效果

Table 1 The best cooling effect of PE-RT heat pipe group and copper heat pipe group

热管组材质	每米单价/元	每米重量/g	最佳充液率/%	最佳换热面积比	水温降低/℃
PE-RT 塑料	2.02	105	33	2.8:1	13.52
紫铜	10.56	235	33	2.8:1	15.30

3 结论

本试验使用PE-RT导热塑料制作低温热管组,以碳氢制冷剂HCR22为热管循环工质,实现了热管蓄冷装置的低成本和可快速拆装,完善了环保制冷,研究发现:

(1) PE-RT热管组用于低温蓄冷时的最佳充液率为33%,与同管径、同结构尺寸的铜质热管组相同;在热管组相变传热中,2种材质热管组蓄冷过程的传热稳定性一致。

(2) 最佳充液时,PE-RT热管组蓄冷的最优换热面积比与铜质热管组相同,皆为2.8:1,蓄冷装置蓄冷72h,PE-RT热管组和铜质热管组使储水槽内水温分别降低13.52,15.30℃,PE-RT热管组的蓄冷量为铜质热管组的88.37%。

(3) 试验中PE-RT热管组内压力为0.40~0.55MPa,冷凝段周围环境温度为-18℃,PE-RT热管组表现出良好的耐压和耐冷冲击性,且热管组各处传热均匀。

为全面了解PE-RT热管组的使用特性,在今后的试验中仍需对PE-RT热管组的脆性和使用寿命等方面进行测试,为PE-RT热管组的应用和推广做准备。

参考文献

[1] 王世清,张岩,姜文利,等.热管技术在自然冷源蓄冷中的应用[J].农业工程学报,2010,26(4):312-316.
 [2] 王世清,宋庆武,张岩,等.基于热管的自然冷源制冰技术方案的初步试验[J].农业工程学报,2008,24(11):230-232.
 [3] SHANG Chuan-xun, TANG Lan-xiang, MA Jing-jing. Investigation on heat pipe technology for heat transport in manned spacecraft cabin[J]. Space Medicine and Medical Engineering,

- 1994(2): 109-114.
- [4] 杨永平, 魏庆朝, 张鲁新, 等. 青藏铁路多年冻土地区热管路基三维数值分析[J]. 中国铁道科学, 2005(2): 20-24.
- [5] 张明安, 蒲传奋, 张岩, 等. 自然冷源在果蔬贮藏保鲜中的应用效果研究[J]. 食品科技, 2010, 35(3): 44-47.
- [6] 张岩, 姜文利, 邵焕霞, 等. 小型热管低温储粮系统的应用试验[J]. 中国粮油学报, 2014, 29(9): 79-81, 86.
- [7] 马一太, 张国莉. 紧迫的氟利昂大气污染问题及其解决措施[J]. 制冷技术, 1990(2): 17-21.
- [8] 王越, 陈东, 刘振义, 等. 国内分离式热管概况与热环研究的小结及展望[J]. 节能技术, 2000, 18(3): 5-6.
- [9] JWO C, TING C, WANG Wei-ru. Efficiency analysis of home refrigerators by replacing hydrocarbon refrigerants[J]. Measurement, 2009, 42(5): 697-701.
- [10] MACLAINE-CROSS I L. Usage and risk of hydrocarbon refrigerants in motor cars for Australia and the United States[J]. International Journal of Refrigeration, 2004, 27(4): 339-345.
- [11] 吴青松, 杨良根. 高新技术全新节能环保空调雪种 HCR-22 碳氢制冷剂的应用分析[J]. 企业技术开发, 2011, 30(6): 11-13.
- [12] 刘金光, 熊旭波, 王世清, 等. 低温热管中无氟制冷剂 HCR-22 的蓄冷效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 268-273.
- [13] 孙国华, 陈国邦. 二级塑料斯特林制冷机的热力设计探讨[J]. 浙江大学学报, 1991, 3(25): 272-283.
- [14] 颜健, 刘妮. 导热塑料管在冷却塔中应用的可行性分析[J]. 制冷与空调, 2008(5): 76-78.
- [15] 田树生, 李建人, 王永冈. 建筑热水塑料管传热系数的探讨[J]. 给水排水, 2008, 31(5): 77-79.
- [16] 陈小平, 陈子煜, 范林, 等. 塑料盘管应用在蓄冰槽上的传热分析[J]. 流体机械, 2004, 32(4): 66-68.
- [17] 张雪东. 塑料管单效溴化锂吸收式制冷机系统设计及传热性能分析[J]. 应用能源技术, 2011(2): 36-39.
- [18] 张雪东. 塑料管单效溴化锂吸收式制冷机理论与实验研究[J]. 制冷, 2009(2): 10-14.
- [19] 吴源, 白成德, 赵海波, 等. 预制保温 PE-RT 管道系统在小区二次热力管网中的使用[J]. 供热制冷, 2016(2): 22-24.
- [20] 修方珑, 张岩, 王世清, 等. 基于热管技术的储粮仓温度特征及其抑虫效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 256-261.
- [21] 李新宇, 熊旭波, 张岩, 等. 热管低温储粮技术对小麦品质的影响[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(1): 107-111.
- [22] 张红, 杨峻, 庄骏. 热管节能技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2009: 36-125.
- [23] 刘效洲, 惠世恩, 徐通模, 等. 分离式热管换热器的工作原理及其在电厂余热回收中的应用[J]. 热能动力工程, 2001, 16(4): 375-376, 379-380.
- [24] TING Chenching, LEE Jingnang, CHEN Chienchih. Heat transfer characterizations of heat pipe in comparison with copper pipe[J]. Journal of Heat Transfer, 2009, 131(33): 1-6.
- [25] MOHAMMAD Hamdan, EMAD Elnajjar. Loop heat pipe: Simple thermodynamic[J]. International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, 2010, 2(4): 111-117.
- [26] 朱志昂. 热管自然蓄冷低温储粮探索[J]. 粮食储藏, 2011, 40(1): 51-52.
- [27] 宋庆武, 张岩, 张志伟, 等. 自然冷源贮冷设备的研究开发[J]. 食品科技, 2007(6): 158-161.
- [28] 汤广发, 刘娣, 赵福云, 等. 分离型热管充液率运行边界探讨[J]. 湖南大学学报, 2005, 32(1): 63-68.
- [29] 王一平, 邓林, 朱莉, 等. 铜-R22 分离式热管传热特性的实验研究[J]. 节能技术, 2007(3): 234-236.
- [30] 洪光, 张春辉, 罗晴, 等. 常温小温差下的分离式热管换热器充液率研究[J]. 节能, 2011(1): 24-27, 2.

(上接第 34 页)

- [23] Koba K, Sanda K, Guyon C, et al. *In vitro* cytotoxic activity of *Cymbopogon citratus* L. and *Cymbopogon nardus* L. essential oils from Togo[J]. Bangladesh Journal of Pharmacology, 2009, 4: 29-34.
- [24] PAZ LIMA M, SILVA T M D, DA SILVA J D, et al. Essential oil composition of leaf and fine stem of *Aniba canelilla* (Kunth) Mez from *Manaus*, Brazil[J]. Acta Amazonica, 2004, 34(2): 329-330.
- [25] BAGCI E, BASER K H C. Study of the essential oils of *Thymus haussknechtii* Velen and *Thymus kotschyanus* Boiss. et *Hohen var. kotschyanus* (Lamiaceae) taxa from the eastern Anatolian region in Turkey[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2005, 20(2): 199-202.
- [26] SHIMIZU Y, IMAYOSHI Y, KATO M, et al. Volatiles from leaves of field-grown plants and shoot cultures of *Gynura bicolor* DC[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2009, 24(5): 251-258.
- [27] CHERCHI G, DEIDDA D, DE GIOANNIS B, et al. Extraction of *Santolina insularis* essential oil by supercritical carbon dioxide: influence of some process parameters and biological activity[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2001, 16: 35-43.
- [28] 孙宝国. 食用调香术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010: 84-85.

(上接第 39 页)

- [27] 杨鲜, 祝慧凤, 王涛, 等. 重庆巫山等多地党参氨基酸及营养价值比较分析[J]. 食品科学, 2014, 35(15): 251-257.
- [28] 彭瑛, 蔡力创. 精氨酸的保健作用及其调控研究进展[J]. 湖南理工学院学报: 自然科学版, 2011, 24(1): 59-62.
- [29] 陈亚军, 齐玉梅. 精氨酸免疫营养作用的研究进展[J]. 中国临床营养杂志, 2007, 15(5): 310-314.
- [30] 王齐, 朱伟伟, 苏丹, 等. 蒲桃中氨基酸组成与含量对其营养与风味的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(16): 204-207.
- [31] 钱爱萍, 林虬, 颜孙安, 等. 乌饭树叶蛋白质中氨基酸含量及营养价值评价[J]. 福建农业学报, 2008, 23(3): 306-309.
- [32] SOLMS J. Taste of amino acids, peptides, and proteins[J]. Agricultural and Food Chemistry, 1969, 17(4): 686-688.
- [33] 鲁敏, 安华明, 赵小红. 无籽刺梨与刺梨果实中氨基酸分析[J]. 食品科学, 2015, 36(14): 118-121.
- [34] 蒋滢, 徐颖, 朱庚伯. 人类味觉与氨基酸味道[J]. 氨基酸和生物资源, 2002, 24(4): 1-3.