

基于热管技术的储粮仓温度特征及其抑虫效果

修方珑^{1,2}, 张 岩^{1,2}, 王世清^{1,2*}, 李保华^{1,2,3}, 姜文利^{1,2}

(1. 青岛农业大学食品科学与工程学院, 青岛 266109; 2. 青岛市现代农业质量与安全工程重点实验室, 青岛 266109;
3. 青岛第二粮库, 青岛 266112)

摘 要: 为解决传统储粮方法存在的高能耗、害虫多、易污染的问题, 基于热管技术, 该文设计开发了一座利用自然冷源蓄冷的储粮仓, 其由储粮仓、热管模组、温度监测系统等组成, 通过 1 年试验 (2011 年 12 月 16 日至 2012 年 11 月 1 日) 研究了储粮仓内粮食温度变化及对害虫的抑制效果, 结果表明: 热管模组在 19 d 内将粮食温度降低到 0, 最低可降至 -3.17℃; 热管储粮试验仓蓄冷量为 50.95 MJ, 降温速度达到了 0.28℃/d, 分别较对照仓高出 31.62% 和 47.37%, 因此试验仓降温速度更快, 蓄冷量更大。夏季试验仓虫害发生时间延迟, 害虫数量明显减少, 抑虫效果明显。此外, 试验周期内无任何能耗, 小麦并未出现结露或霉变等现象。该研究为热管技术在大型粮库中的应用提供依据和技术支持。

关键词: 热管, 蓄冷, 害虫抑制, 自然冷源, 低温储粮

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.14.032

中图分类号: TS205.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-14-0256-06

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.
Xiu Fanglong, Zhang Yan, Wang Shiqing, et al. Temperature characteristic and inhibition effect on insect pest in grain storehouse based on heat pipe technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(14): 256—261. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

温度是影响粮食品质和安全性的重要因素。低温储粮, 即维持粮食温度低于 15℃ 进行储藏, 能够有效抑制粮食呼吸作用, 防止虫害、霉变, 延缓陈化及其他品质劣变^[1]。目前国内外主要利用自然冷源或者机械设备进行低温储粮, 包括自然通风降温、机械通风降温、机械制冷降温等, 然而普遍建立现代化储粮仓并非易事^[2-5], 普通大型储粮仓的设计建设常受制于气候特点和地理位置, 且需要造价高又复杂的制冷设备, 能耗巨大, 增加了储粮成本, 加大了实施难度。利用自然冷源及机械制冷设备实现全年低温储粮的技术, 至今没有大范围应用和推广。因此寻求一种成本低、能耗小, 无污染, 易实施的绿色储粮方法是当下亟待解决的问题^[6-12]。

热管是一种利用工质相变, 可利用小温差进行高效热量传递的元件, 因其良好的传热性能, 被誉

为热的“超导体”^[13-14]。近年来, 热管技术发展迅速, 已被应用于诸多工程领域。本研究采用非传统的自然冷源贮备方式, 利用低温重力热管单向导热的工作原理, 将热管技术的优势与新的结构设计思想有机结合, 基于已开发的热管模组制冰蓄冷系统^[15-19], 设计开发了无能耗、无污染、无值守的自动循环热管模组自然冷源储粮仓, 对其蓄冷和害虫抑制效果进行了研究, 以期热管储粮仓在冬季时间较长, 自然冷源丰富的地区实现大范围应用推广提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设施

本试验设施由青岛农业大学食品科学与工程学院开发制作, 安装在青岛农业大学校内, 本设施由储粮仓、热管模组、温度监测系统等组成, 如图 1 所示 (热管组的具体结构设计和其他参数可见本团队的发明专利 201010500067.3)。根据粮食平房仓设计规范^[20], 设计建造 3 间规格完全相同的小型仓房, 自右向左依次标记为 1 号仓、2 号仓和 3 号仓, 长×宽×高均为 2.0 m×2.4 m×2.16 m。其中 1 号仓、3 号仓安装有热管模组。如图 2, 热管模组由冷凝端、蒸发端、中间连接管、压力表、工质灌注孔等组成, 冷凝端与自然冷风接触, 蒸发端安装在粮食内部, 冷凝端和蒸发端均采用直径 25 mm 无缝

收稿日期: 2012-11-07 修订日期: 2013-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31271963); 山东省自然科学基金项目 (2009ZRB01581)

作者简介: 修方珑 (1989—), 男, 主要从事食品工程方面的研究。青岛 青岛农业大学食品科学与工程学院, 266109。Email: xiufangl@163.com
*通信作者: 王世清 (1961—), 男, 山东招远人, 博士, 教授, 中国农业工程学会会员 (E041200427S), 主要从事食品安全保藏等研究。青岛 青岛农业大学食品科学与工程学院, 266109。

Email: wangshiqing@126.com

钢管,二者之间由蒸汽上升管和冷凝液下行管的中间连接管连接,构成了循环热管模组,为增加热交换效果,冷凝端加装了环状铝制散热片。为提高储粮仓保温效果,延缓冷量散失,在仓房内壁及小麦上方铺装挤塑式聚苯乙烯隔热保温板。



图 1 试验设施

Fig.1 Grain storehouses

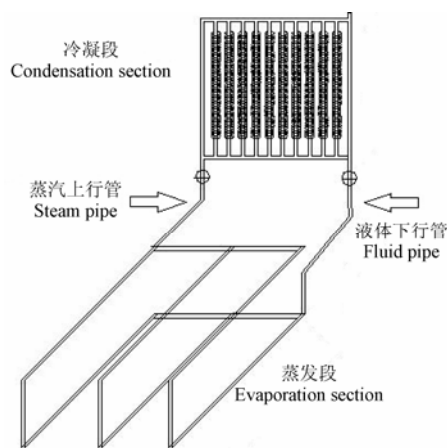


图 2 热管模组结构简图

Fig.2 Structure diagram of heat pipe

1.2 试验原理

热管内工质在蒸发端吸收粮食中热量而汽化,饱和蒸汽携带潜热进入冷凝端,与外界冷空气热交换释放潜热发生液化,冷凝液在重力作用下自发回流到蒸发端,完成工质循环,实现了汽液各行其道,互不干扰的热量交换与传递,在无任何能耗的情况下,完成了自然冷源的蓄积^[21-25]。

本试验设备作为典型的重力热管结构,密闭的管内先抽真空,在此状态下充入少量工质氟利昂。热管下部冷凝液在加热端接触到高温粮食后,因吸收热量而汽化,蒸汽在微小压差作用下流向热管上部的冷凝端,并与外界进行热量交换,释放潜热凝结成液体。液体在重力作用下回到蒸发端。这样,工质在热管内不断蒸发、冷凝,热量从高温端传给低温端,如此循环往复,将粮食内部热量导出,外

界冷量导入,实现低温储粮^[26-29]。通过对粮食温度进行不间断测量和采集,并观察其变化特征,作为分析评价热管低温储粮设施的蓄冷和储粮效果的依据。

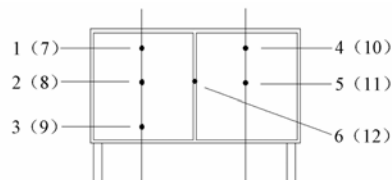
综合传热性和热稳定性等因素,本研究选择氟利昂 R22 作为热管制冷工质,在本试验条件下,当室外温度低于其沸点 (5°C),粮食温度与室外温度存在正向温差时,工质可自发进行循环,据此确定蓄冷阶段起止时间。

1.3 试验内容

1.3.1 蓄冷效果试验

利用冬季外界环境丰富的自然冷源,实现热管的有效运行。通过对比试验仓(热管储粮仓)和对照仓(普通储粮仓)的温度变化,分析热管储粮仓内部的温度变化,通过比较室外日平均温度与试验仓粮食平均温度确定蓄冷阶段起止时间,计算系统在蓄冷阶段的蓄冷量和降温速度,分析热管储粮仓的蓄冷效果。

选择 1 号仓为对照仓,3 号仓为试验仓。试验共设置 13 个温度测量点,如图 3 所示,试验仓内布置 1~6 号测温点,对照仓在对应位置布置 7~12 号测温点,在室外设置 13 号测温点记录外界环境温度,1 号仓、3 号仓分别贮存小麦 3 000 kg,3 号仓热管灌注工质氟利昂 R22,1 号仓热管不灌注工质。温度数据采集、记录与存储工作由 NI4351T 热电偶测温系统(美国 NI 仪器有限公司)完成,数据采集时间间隔为 5 s,温度精确到 0.1°C 。



注:测点 1~6 布置在试验仓(3 号仓)内;测点 7~12 布置在对照仓(1 号仓)内。

Note: Thermocouples 1~6 are fixed in storehouse with heat pipe. Thermocouples 7~12 are fixed in traditional storehouse.

图 3 粮食内部温度测量点分布正视图

Fig.3 Distribution of thermocouples for temperature measurement at front view

1.3.2 害虫抑制效果试验

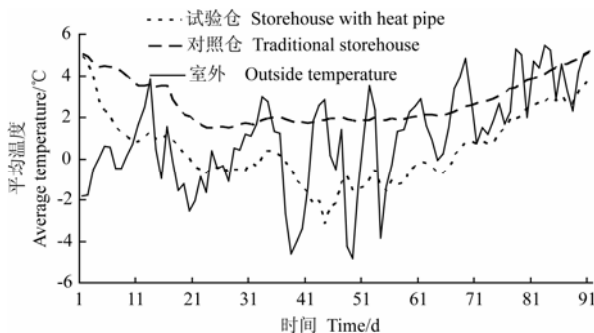
夏季通过人工抽样检测的方法对仓储小麦进行虫情检查,对比分析新型粮仓储粮效果。同时采用 105°C 恒重法测定小麦水分含量变化。

将全仓分层进行取样:第 1 层距粮食表层 30 cm,第 2 层距表层 60 cm;每层各设 5 个取样点:中央 1 个点,四周距仓壁 20 cm 处各 1 个点。各点用抽样器抽取 1 kg,用网筛进行筛选,记录害虫的种类和数量^[30]。

2 结果与分析

2.1 蓄冷阶段粮食平均温度变化

图 4 为 2011 年 12 月 16 日至 2012 年 3 月 15 日的试验仓和对照仓的粮食平均温度和室外日平均温度变化图。由图 4 可以看出, 2011 年 12 月 16 日至 2012 年 3 月 15 日室外平均温度低于粮食平均温度, 且低于工质沸点 (5°C), 因此该时段是热管储粮仓的蓄冷阶段。经过 19 d, 试验仓粮食内部平均温度从 5.2°C 降到 0, 经过 43 d, 温度最低达到了 -3.17°C , 而对照仓的内部温度一直高于 0。这表明, 外界冷量通过热管模组成功导入到粮食内部。随着气温回升, 室外温度开始逐渐高于粮食温度, 正向温差逐渐消失, 直至 3 月 15 日, 室外日平均温度高于试验仓的粮食平均温度, 重力热管模组停止运行, 不再有外界冷量导入, 依靠已导入的冷量进行低温储藏。此外, 热管运行期间 (2011 年 12 月 16 日至 2012 年 3 月 15 日), 试验仓粮食的平均温度为 0.27°C , 对照仓粮食平均温度 2.47°C , 相差 2.2°C 。5 月 1 日之前, 试验仓平均粮温一直未超过 14.5°C , 属于粮食低温储藏的安全温度区间, 5 月 31 日之前, 平均粮温仍然低于 20°C , 符合准低温储粮标准。



注: 试验日期为 2011-12-16 至 2012-03-15。

Note: Date of experiment: from 2011-12-16 to 2012-03-15.

图 4 粮食温度对比曲线

Fig.4 Temperature comparison of experimental storehouse and control storehouse

2.2 热管储粮仓蓄冷量分析

热管储粮仓在蓄冷阶段 (2011 年 12 月 16 日至 2012 年 3 月 15 日) 的蓄冷量由式 (1) 可得

$$Q_w = c_w \rho_w V_w \Delta t \quad (1)$$

式中, Q_w 为小麦蓄冷量, J; c_w 为小麦的比热容, $1757 \text{ J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$; ρ_w 为小麦的密度, $863 \text{ kg}/\text{m}^3$; V_w 为小麦容积, 4 m^3 ; Δt 为蓄冷阶段小麦的温差, 试验仓和对照仓的温差分别为 8.37 和 6.32°C 。

本研究所研发的热管储粮仓在蓄冷阶段的小麦蓄冷量为 50.95 MJ , 降温速度为 $0.28^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。对照仓的小麦蓄冷量为 38.71 MJ , 降温速度为 $0.19^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 。

与对照仓相比, 试验仓的蓄冷量高 31.62% , 降温速度快 47.37% , 快速蓄冷效果明显。考虑到试验仓的比表面积较大, 日间冷量散失较多, 因此实际蓄冷量要大于理论值。同时, 热管技术今后应用于大型储粮仓时, 由于其比表面积更小仓体保温效果会更佳, 且适当增加热管表面积, 蓄冷效果会有更加显著的提升。

2.3 粮食害虫抑制效果

进入夏季以后, 随着外界气温的升高, 小麦发生虫害的概率也随之上升。监测显示, 夏季试验期间试验仓平均仓温低于 27°C , 比对照仓仓温平均低 2°C , 上层粮温平均低 $1 \sim 3^{\circ}\text{C}$, 且试验仓粮食的水分含量基本未发生变化, 气味色泽正常。通过抽样器取样检测发现, 对照仓早在 7 月初就已出现害虫, 主要包括玉米象和麦蛾。随后在 8 月、9 月和 10 月对试验仓和对照仓分别进行了虫情检查。由表 1 可见, 仓内害虫数量在 9 月份达到峰值, 之后随着外界温度降低, 害虫数量逐渐下降。可能由于试验仓在冬季蓄积了大量冷量, 降低了害虫虫卵的孵化率, 在外界温度升高的过程中利用所蓄积的冷量延缓热量进入粮食内部, 进而破坏害虫孵化生长所需的环境条件, 因此对比发现, 试验仓害虫的活动明显受到了抑制, 8 月才出现害虫, 无论是在害虫的发生数量还是发生时间, 都体现出了较好的抑制效果, 符合当前安全、绿色储粮的需要。

表 1 储粮仓害虫情况对比

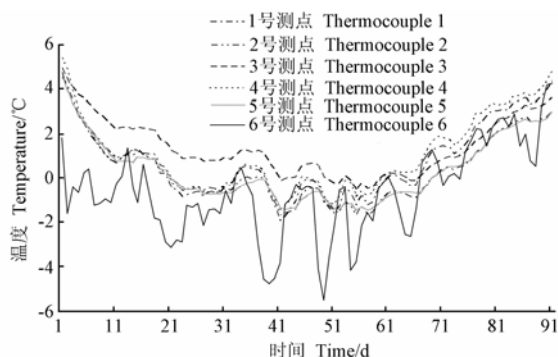
Table 1 Comparison of number of insect pests between experimental storehouse and control storehouse

	日期 Date	害虫数量 Number of pests per kilogram/(头·kg ⁻¹)
试验仓 Storehouse with heat pipe	2012-08-10	6
	2012-09-10	11
	2012-10-10	10
对照仓 Traditional storehouse	2012-08-10	26
	2012-09-10	40
	2012-10-10	36

2.4 热管储粮仓粮食内部冷量分布

由图 5 可见, 在热管蓄冷阶段, 粮食内部温度总体呈现内部高, 外部低的特点, 即“冷皮热心”现象。尽管试验仓仓顶有隔热层, 墙体铺装了挤塑式聚苯乙烯隔热保温板, 但仓体比表面积大, 且仓内空间大, 小麦又是热的不良导体, 因此, 当外界温度快速下降时, 靠近外部墙体及表层的粮食温度迅速下降, 而粮堆内部温度下降却相对缓慢。然而, 由曲线可以看出, 6 号点虽然位于粮堆中心位置, 但该点平均温度却最低, 形成了“局部冷心”, 并不符合“冷皮热心”的规律, 分析发现这是因为该

点靠近热管蒸发端, 受工质吸热作用影响最显著。因此, 在节约成本, 满足技术要求的前提下, 适当增加热管蒸发端与粮食接触面积, 改进冷凝端结构提高散热效率, 对于均匀降低粮温, 防止季节交替时产生“结露”现象, 保持粮食质量具有重要意义。



注: 试验日期为 2011-12-16 至 2012-03-15。

Note: Date of experiment: from 2011-12-16 to 2012-03-15.

图5 试验仓粮食内部温度变化曲线

Fig.5 Temperature change of thermocouples in grain storehouse with heat pipe

3 结论与讨论

本研究首次将热管技术应用于粮食平房仓, 实现了无能耗的自然冷源蓄积。研究结果表明:

1) 从蓄冷阶段(2011年12月16日至2012年3月15日)试验仓的热管持续有效运行, 外界冷量成功导入到粮食内部, 粮食平均温度在19d的时间内降低到了0, 蓄冷阶段粮食平均温度0.27°C, 最低达到了-3.17°C, 较对照仓平均温度低2.2°C。其蓄冷量达到了50.95 MJ, 降温速度为0.28°C/d, 分别比对照仓提高了31.62%和47.37%。因此采用热管技术的新型储粮仓降温更快, 蓄冷量更大。

2) 热管冬季蓄积的冷量明显抑制了虫害的发生, 虫害发生时间延迟, 害虫数量明显减少, 试验仓小麦未出现结露或霉变现象, 低温储粮效果显著。

基于低温重力热管的工作原理, 热管储粮仓适于在温带和寒带大部分地区应用, 在中国主要应用范围包括北方地区和西北部分地区, 该地区冬季时间长, 冬季平均气温低于0, 自然冷源相当丰富。

为了延长低温储粮时间, 在今后的储粮试验中仍需进一步研究新型储粮仓对于除小麦外其他粮食品种降温和抑虫的适用性, 研究热管结构和表面积对于粮食降温效果的影响, 并开发研究新型保温材料, 提高仓体的保温效果, 以期实现周年低温储粮, 为早日实现热管技术在大型粮仓的应用和推广做准备。

[参 考 文 献]

[1] 崔国华, 曹毅. 粮食低温储藏的应用实践和发展建议[J]. 粮食储藏, 2004(2): 20—24.

Cui Guohua, Cao Yi. Propose on application and development of low temperature grain storage[J]. Grain Storage, 2004(2): 20—24. (in Chinese with English abstract)

[2] 李里特. 关于利用冷资源贮藏生鲜农产品的研究现状与前景[J]. 农业工程学报, 1991, 7(1): 18—23.

Li Lite. A study on utilizing cooling resources in cold season and to store vegetables in warm seasons[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1991, 7(1): 18—23. (in Chinese with English abstract)

[3] 李保华, 姜文利, 刘耀泽, 等. 储粮中存在的问题及解决途径[J]. 农业机械, 2011(26): 79—82.

Li Baohua, Jiang Wenli, Liu Yaoze, et al. Solutions to grain storage problems[J]. Farm Machinery, 2011(26): 79—82. (in Chinese with English abstract)

[4] 郑振堂, 陈明峰, 张颜平. 高大平房仓低温密闭储粮试验[J]. 粮食储藏, 2006(6): 28—30.

Zheng Zhentang, Chen Mingfeng, Zhang Yanping. Grain storage under low temperature and seal in large storehouse[J]. Grain Storage, 2006(6): 28—30. (in Chinese with English abstract)

[5] 华祝田, 李辉. 高大平房仓低温储粮技术应用[J]. 粮食储藏, 2004, 32(4): 32—35.

Hua Zhutian, Li Hui. Application of low temperature storage technology in large warehouse[J]. Grain Storage, 2004, 40(1): 51—52. (in Chinese with English abstract)

[6] 高海生, 赵希艳, 李润丰. 果蔬采后处理与贮藏保鲜技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 273—278.

Gao Haisheng, Zhao Xiyan, Li Runfeng. Review of postharvest treatment and preservation technologies of fruit and vegetable[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(2): 273—278. (in Chinese with English abstract)

[7] 王世清, 朱英莲, 张晶, 等. 新型自然冷源冷库与应用前景[J]. 农业工程技术, 2008(7): 37—38.

Wang Shiqing, Zhu Yinglian, Zhang Jing, et al. Application prospect of new cold resource freezer[J]. Agriculture Engineering Technology, 2008(7): 37—38. (in Chinese with English abstract)

[8] 王世清, 张岩, 朱英莲, 等. 自然冷源利用的状况与前景展望[J]. 农机化研究, 2010(6): 237—240.

Wang Shiqing, Zhang Yan, Zhu Yinglian, et al. Prospect and Application of Natural Coldness Resource[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(6): 237—240. (in Chinese with English abstract)

[9] 贾先斌, 李里特, 温旺. 自然冷资源的开发利用[J]. 自然资源学报, 1995, 10(2): 181—188.

Jia Xianbin, Li Lite, Wen Wang. The exploration and utilization of the natural cold resource[J]. Journal of Natural Resources, 1995, 10(2): 181—188. (in Chinese with English abstract)

- [10] 彭汝生. 浅议绿色储粮[J]. 粮食加工, 2007, 32(3): 74—75.
Peng Rusheng. Discussion on the green grain storage[J]. Grain Processing, 2007, 32(3): 74—75. (in Chinese with English abstract)
- [11] Li Lite, Cheng Yongqiang, Xue Wentong. A study on the technology and keeping fruits and vegetables fresh by utilizing natural cooling resource[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1995, 11(3): 88—94.
- [12] 李里特, 程永强, 薛文通. 大型自然冷资源果蔬保鲜技术的研究[J]. 农业工程学报, 1995, 11(3): 88—94.
- [13] 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.
Zhang Ming'an, Pu Chuanfen, Zhang Yan, et al. A study on the effect of preserving fruits and vegetables by natural coolness resource[J]. Food Science and Technology, 2010, 35(3): 44—47. (in Chinese with English abstract)
- [14] 庄骏, 张红. 热管技术及其工程应用[M]. 北京, 化学工业出版社, 2000.
- [15] 张靖周, 常海萍. 传热学[M]. 北京, 科学出版社, 2009.
- [16] 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.
Wang Shiqing, Zhang Yan, Jiang Wenli, et al. Application of heat pipe technology in ice storage of natural coldness resource[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 312—316. (in Chinese with English abstract)
- [17] 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.
Wang Shiqing, Song Qingwu, Zhang Yan, et al. Preliminary study on technology for ice-making using natural cold resource based on heat pipe[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(11): 230—232. (in Chinese with English abstract)
- [18] 宋庆武, 张岩, 张志伟, 等. 自然冷源贮藏设备的研究开发[J]. 食品科技, 2007(6): 158—161.
Song Qingwu, Zhang Yan, Zhang Zhiwei. Research on storage facilities of natural coldness resource[J]. Food Science and Technology, 2007(6): 158—161. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李里特, 赵朝辉, 刘巧静. 利用自然冷源单管制冷蓄冷试验和一维传热模型[J]. 制冷学报, 1999(1): 34—39.
Li Lite, Zhao Chaohui, Liu Qiaojing. Experiments and a one-dimensional heat transfer model of ice making to store coldness by a pipe using natural cold resource[J]. Refrigeration Journal, 1999(1): 34—39. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李里特, 温旺. 自然冷源利用中的相变传热果蔬保鲜的研究[J]. 农业工程学报, 1993, 9(4): 44—50.
Li Lite, Wen Wang. A study on the latent heat transfer of water and keeping fresh of fruits and vegetables by UNCR[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1993, 9(4): 44—50. (in Chinese with English abstract)
- [21] GB 50320-2001. 粮食平房仓设计规范[S].
- [22] 李云飞, 葛克山. 食品工程原理[M]. 北京, 中国农业大学出版社, 2002.
- [23] Ting Chenching, Lee Jingnang, Chen Chienchi. Heat transfer characterizations of heat pipe in comparison with copper pipe[J]. Journal of Heat Transfer, 2009, 131(033109): 1—6.
- [24] 曹志高, 杜海存, 曹娟华. 热管技术及其应用分析[J]. 江西能源, 2009(3): 39—41.
Cao Zhigao, Du Haicun, Cao Juanhua. Analysis of heat-pipe technology and its application[J]. Jiangxi Energy, 2009(3): 39—41. (in Chinese with English abstract)
- [25] 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.
Liu Xiaozhou, Hui Shien, Xu Tongmo, et al. Working principle of a separation-type heat pipe heat exchanger and its use in the heat recovery system of a power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 16(4): 375—376, 379—380. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刁彦华, 王秋良, 赵耀华. 低温热管传热性能的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2008, 29(11): 1898—1900.
Diao Yanhua, Wang Qiuliang, Zhao Yaohua. Experimental investigation on the heat transfer characteristic of a cryogenic thermosyphon[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008, 29(11): 1898—1900. (in Chinese with English abstract)
- [27] 闫小克, 唐志伟, 俞昌铭. 热管传热性能的评价方法及其测试装置[J]. 计量学报, 2003, 24(2): 113—115.
Yan Xiaoke, Tang Zhiwei, Yu Changming. A method for evaluating the heat transfer performance of heat pipe and its measuring apparatus[J]. Acta Metrologica Sinica, 2003, 24(4): 113—115. (in Chinese with English abstract)
- [28] 陈彦泽, 丁信伟, 喻建良, 等. 新型热管技术开发及应用[J]. 热能动力工程, 2004, 19(1): 1—3, 102.
Chen Yanze, Ding Xinwei, Yu Jianliang, et al. Development and application of innovative heat pipe technology[J]. Engineering for Thermal Energy and Power, 2004, 19(1): 1—3, 102. (in Chinese with English abstract)
- [29] Mohammad Hamdan, Emad Elnajjar. Loop heat pipe: Simple thermodynamic[J]. International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, 2010, 2(4): 111—117.
- [30] 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.

- Zhu Zhiang. Exploration of natural coldness storage by heat pipe[J]. Grain Storage, 2011, 40(1): 51—52. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王晶磊, 宋玉东, 徐威. 绿色储粮防护剂惰性粉防虫效果研究[J]. 粮食科技与经济, 2012, 37(3): 27—29.
- Wang Jinglei, Song Yudong, Xu Wei. Control effects of green grain storage protectant inert dust against pests[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2012, 37(3): 27—29. (in Chinese with English abstract)

Temperature characteristic and inhibition effect on insect pest in grain storehouse based on heat pipe technology

Xiu Fanglong^{1,2}, Zhang Yan^{1,2}, Wang Shiqing^{1,2*}, Li Baohua^{1,2,3}, Jiang Wenli^{1,2}

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

2. Qingdao Key Lab of Modern Agricultural Quality and Safety Engineering, Qingdao 266109, China;

3. Qingdao No.2 Municipal Grain Reserve, Qingdao 266112, China)

Abstract: To solve problems occurring in grain storage such as high-energy consumption, uncontrollable insect pests, and serious pesticide pollution, a heated, pipe-based grain storehouse utilizing natural cold resources was developed. The heated pipe-based grain storehouse is composed of a storehouse, heat pipe, and temperature monitoring system. The working substance in the evaporation section of the heat pipe absorbs heat from the grain, gasifies it, and then releases the heat via heat an exchange with cold air in the condensation section of the heat pipe. The liquefied working substance then flows back to the evaporation section via gravity. An automatic cycle is accomplished in this manner. The natural coldness resource is continuously transferred and stored in the grain, and low temperature grain storage is achieved. In this study, from December 2011 to November 2012, the distribution and variation of the temperature of grain storehouses were measured and analyzed. The insect pest inhibition effect was also studied. Results showed that the heat pipe was in operation for 91 day, in which the temperature was 2.2℃ lower than that of traditional grain storehouses, and the average wheat temperature of the heat pipe-based grain storehouse decreased to 0℃ within 19 days, reaching the minimum of -3.17℃. In this period, its heat exchange was 50.95MJ and the cooling rate was 0.28℃/d, which were respectively 31.62% and 47.37% higher than that of conventional grain storehouses. Natural cold resources more rapidly transferred into the heat pipe-based grain storehouse. The average wheat temperature of the heat pipe-based grain storehouse had been below 15℃ before May 2012, in accordance with the widely accepted temperature requirement for low temperature grain storage. The occurrence of insect pests in the heat pipe-based storehouse was delayed and the insect pest density was lowered. Thus, the insect control effect was significant. In addition, no moisture condensation or mildew occurred during the experimental period. In summer, the average wheat temperature of heat pipe-based grain storehouses was 2℃ lower than that of traditional storehouses. Heat pipe technology proved to be applicable and efficient in grain storage in temperate and cold regions. With low energy consumption, low cost, high cooling rate, and good insect pest control effect, the storehouse could remarkably maintain grain quality in an environmentally friendly way. Considering the high surface area of grain storehouses in this research, the cooling effect and reserved cold resources could be greater when put into practice in large grain storehouses. This research provides the theoretical foundation and technical support for the practical application of heat pipe technology in large grain storehouses.

Key words: heat pipes, cold storage, pest control, natural coldness resource, low temperature grain storage

(责任编辑: 张俊芳)