自然冷源蓄冷低温热管储粮中防止结露的方法研究

刘金光[1,2],熊旭波[3],王世清[1,2],张　岩[1,2],姜文利[1,2]

(1.青岛农业大学食品科学与工程学院,山东 青岛　266109;
2.青岛市现代农业质量与安全工程重点实验室,山东 青岛　266109;
3.青岛澳维康生物科技工程有限公司,山东 青岛　266071)

摘　要:为了解决自然冷源蓄冷热管储粮中管壁周围粮层结露的问题,研究提出了在热管组结构中添加电磁阀,通过热管周围粮堆孔隙空气的露点温差来控制电磁阀的开启,进而控制热管中制冷剂的运行,避免结露;设计制作了微型粮仓温湿度测定装置,研究了粮堆孔隙空气相对湿度和露点温差随温度的变化,揭示了电磁阀温控与结露的关系。结果表明:在5~20 ℃储粮温度范围内,粮食籽粒含水量越高,粮堆孔隙空气的露点温度越高,露点温差越小;自然冷源低温热管储粮仓(小麦仓)热管组结构中电磁阀温控设定计算公式为:$y = -0.2149x^3 + 7.439x^2 - 86.384x + 343.43$(其中 y 为电磁阀温控设定值;x 为小麦籽粒含水率)。为热管技术在粮库中的应用提供依据和技术支持。

关键词:低温热管;自然冷源;储粮;结露;电磁阀

中图分类号:S 379.5　**文献标识码**:A　**文章编号**:1007-7561(2017)01-0074-06

Study on preventing condensation in low temperature heat pipe for grain storage by natural cold source

LIU Jin-guang[1,2], XIONG Xu-bo[3], WANG Shi-qing[1,2], ZHANG Yan[1,2], JIANG Wen-li[1,2]

(1. College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao Shandong　266109;
2. Qingdao Key Laboratory of Modern Agricultural Quality and Safety Engineering, Qingdao Shandong　266109;
3. Qingdao Aoweikang Biotechnology Engineering Co. Ltd., Qingdao Shandong　266071)

Abstract: In order to solve the condensation problems between the grain around the heat pipe in grain warehouse with heat pipe by natural cold source, an electromagnetic valve was added in the heat pipe group to control operation of the refrigerant in the heat pipe according to the temperature difference between the external environment and the grain layer around the heat pipe. The micro measuring device of temperature and humidity in warehouse was designed and manufactured. The change of the air relative humidity and dew point temperature difference in porosity of grain bulk was studied; the relationship between temperature control of electromagnetic valve and condensation was discovered. The results showed that in the range of 5 ℃ ~20 ℃, the higher the grain moisture content, the higher the dew point temperature of the air in the barn, the smaller the dew point temperature difference. In natural cold source low temperature heat pipe group, the calculation formula for the temperature control of the electromagnetic valve was: $y = -0.2149x^3 + 7.439x^2 - 86.384x + 343.43$ (the y was the temperature control of the electromagnetic valve; x was the moisture content of wheat). This research provides the theoretical foundation and technical support for the practical application of heat pipe technology in large grainwarehouses.

Key words: low temperature heat pipe; natural cold source; grain storage; dew; solenoid valve

温度作为储粮生态系统中重要的非生物因子,对储粮稳定性有着很大影响。低温储粮(≤15 ℃)通过抑制粮食呼吸强度、储粮害虫和微生物的繁殖

收稿日期:2016-08-09
基金项目:国家自然基金项目(31271963)
作者简介:刘金光,1991年出生,男,硕士研究生在读.
通讯作者:王世清,1961年出生,男,教授,博士.

维持储粮生态系统的稳定[1-3]。大型储粮仓现有的低温储粮方法有:一是机械通风储粮,中高纬度地区利用冬季自然冷源通过风道引入粮仓降温,但风道周围易出现粮食风干失水和粮层局部结露的现象[4-6];二是机械制冷低温储粮,粮食温度能够保持相对稳定,但设备成本和能耗较大[7-8]。

热管是利用内部工质相变实现热量传递的元件,能够实现小温差高效传热,被誉为热的"超导体"[9-10]。热管凭借良好的导热性和启动性,已应用于低温储粮中[11-12],修方珑等[13]研究发现自然冷源蓄冷热管储粮,19 d 粮食温度降低到0 ℃,储粮期间最低温度达 -3.17 ℃,抑虫效果明显。李新宇等[14]研究发现低温热管储粮能够减少粮食水分散失、减缓脂肪酸值升高,能有效保持籽粒生物活性。自然冷源热管低温储粮适用于冬季自然冷源丰富的中高温度地区,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。但冬季自然冷源昼夜温差较大,且受大气寒流影响,温度时有骤降,因此,热管周围粮层容易出现结露的现象(如图1)。随着结露的发生,局部粮食出现发热、变硬、散落性降低,同时有储粮虫害(米象、赤拟谷盗和锈赤扁谷盗)的发生[15]。

a

b

图1 低温热管周围粮层局部结露现象

为了解决自然冷源热管蓄冷储粮中出现的管壁周围粮层结露的问题,本实验提出在热管组结构中加设电磁阀,通过电磁阀控制热管内工质的运行,来消除结露难题,为热管利用自然冷源蓄冷在大型粮库中的应用提供依据和技术支持,从而实现自然冷源热管蓄冷储粮的高安全和高品质。

1 材料与方法

1.1 材料与设施

材料:2015年收获的冬小麦(济麦22号),除杂晾干,由中央储备粮青岛市第二粮库提供。

微型粮仓温湿度测定装置(如图2):

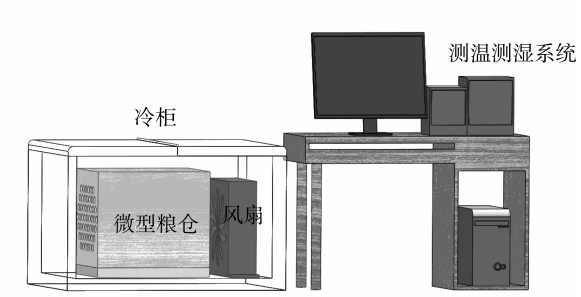

图2 微型模拟粮仓温湿度测定装置图

微型粮仓:根据国家标准储粮仓设计规范[16],设计制作了模拟微型粮仓(长×宽×高:0.6 m×0.6 m×0.6 m),粮仓整体结构为厚度50 mm的瓦楞纸板,左右对称面各开有50个通气孔(孔径为5 mm),粮仓内层用纱网(目数为10目)包裹,防止粮粒掉出;粮仓置于冷柜内,以确保精确的温度环境,仓底垫有厚为50 mm的聚苯乙烯泡沫板,避免仓底与冷柜直接传热。

Temp Curve软件和TP-1000多路温度记录仪:深圳拓扑瑞仪器有限公司。AOSONG GSP-885型温湿度记录仪;广州奥松电子有限公司;DT-8880手持式热敏风速仪:CEM.深圳华盛昌机械有限公司;MA-35电子水分测定仪:德国赛多利斯股份有限公司。

1.2 实验原理

低温储粮热管为分离式重力热管组,热管组蒸发段均匀分布于粮堆内部,冷凝段安装于室外,与冬季自然冷源直接接触,蒸发段和冷凝段通过连接段的蒸汽上升管和冷凝液下行管构成循环热管组。热管内工质在蒸发段吸收粮食的热量气化,饱和工质蒸汽携带潜热上升进入冷凝段,与外界冷空气热交换后液化并释放出潜热,冷凝液在重力作用下自发流回蒸发段完成一次工质循环。伴随着工质不断的气化上升和液化下降过程,粮堆中热量逐渐被导出,外界自然冷源逐渐在粮仓内蓄积,从而实现低温储粮[17]。

结露的成因:由于籽粒组织的呼吸作用,粮堆内部会自发产生热量,形成"热心",秋冬季气温降低,

粮堆表面受环境影响较大,温度降低明显,形成“冷皮”,即粮堆的“冷皮热心”现象[18-19]。低温热管储粮中热管蒸发段放置于粮堆内部,热管启动后,管壁温度迅速降低,当温度降低到一定程度,管壁周围空气中的水汽达到饱和凝结成液态水,形成结露;结露时的温度为露点温度,露点温度的高低受环境压强和粮食含水率等因素的影响[20,21]。

自然冷源热管蓄冷储粮中容易出现结露现象,秋冬季气温时有骤降,经冷凝段热交换后的骤冷制冷剂进入蒸发段,导致管壁周围空气温度迅速降低,进而发生结露。为防止结露现象的发生,在热管组结构设计中添加电磁阀,通过电磁阀的开启控制热管运行,电磁阀温控设定值为热管周围粮堆孔隙空气的露点温差,当外界环境温度与热管周围粮食温度的差值小于此设定值时,电磁阀为开启状态,热管运行;当差值小于或等于此设定值时,电磁阀自动关闭,热管内工质的运行停止,以便避免结露的产生。

本实验基于湿空气露点温度公式,建立了储粮仓内部粮堆孔隙空气露点温差数学模型,采用数学模型与实验结合的方式确定粮堆孔隙空气的露点温差,最终导出电磁阀温控设定计算公式,具体步骤为:测出不同温度时粮堆孔隙空气的相对湿度,进而确定绝对湿度,绘制粮堆孔隙空气温湿图,对照100%湿度空气等湿线,确定露点温度值,得出热管周围粮堆孔隙空气的露点温差,从而确定自然冷源低温热管储粮仓内热管组结构中电磁阀温控设定计算公式。

1.3　实验测试

1.3.1　粮堆孔隙空气相对湿度随储藏温度的变化

使用电热恒温箱(DY-640D)和冷柜(AUCMA BC/BD-390SH)提供粮仓3~20 ℃的外界环境,通过小风扇将冷柜内的空气导入粮仓内部,使粮仓内空气流速为0.12 m/s,降温速度为5 min/℃,收集粮堆温度每降低1 ℃时粮堆孔隙空气的相对湿度值,分析粮仓内部粮堆孔隙空气相对湿度值随温度的变化规律。

粮仓内部测温点和测湿点的布置如图3所示[22-23]:1~6号测温点分别布置于粮仓内部,距粮仓表面中心位置的水平距离为100 mm,7号和8号测温点布置于仓体对角线上,距顶点处的距离为100 mm,9号测温点位于仓体中心,10号测温点测量外界环境温度;测湿点布置于仓体中心处。温度和湿度数据的采集、存储工作由温度记录仪和温湿度记录仪完成,数据采集4 s/次,数据精度为0.1 ℃。

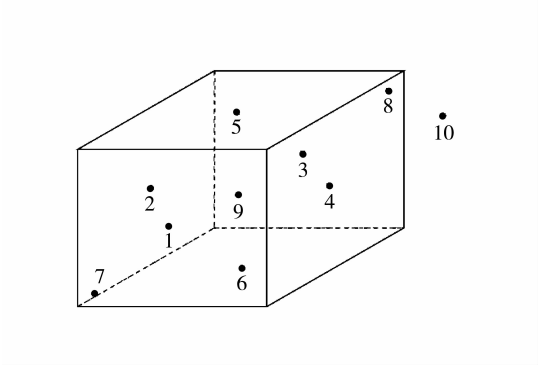

图3　微型粮仓内部测温点和测湿点布置图

1.3.2　粮堆孔隙空气露点温差随储藏温度的变化

小麦含水量测定:参照GB/T 24898—2010《粮油检测 小麦水分含量测定(近红外法)》[24]。取实验小麦样品50 g,粉碎后过80目筛,含水量测定由电子水分测定仪完成,温度设定为130 ℃,时间为10 min。

已知粮堆孔隙空气温度和相对湿度,根据《绝对湿度与相对湿度对应表》确定绝对湿度值,绘制粮仓内部粮堆孔隙空气温湿图,对照100%湿度空气等湿线,得出露点温度,进而计算得出露点温差。

1.3.3　数据处理

每次实验重复三次,结果用平均值表示。实验数据处理采用Excel软件和SPSS17.0软件。

1.4　评价指标

绝对湿度:标准状态下(1 atm)每立方米湿空气中所含水蒸汽的重量[25],用Ψ表示,单位是g/m^3。

相对湿度:某温度时,空气的绝对湿度与同温度下饱和水汽压的百分比值[26],通常用RH表示。

露点温度:气压和湿度一定,湿空气冷却至饱和时的温度为露点温度[27]。

露点温差:指大气温度与结露时露点温度的差值。当露点温差接近于0 ℃时,空气中的水汽达到近似饱和状态[28]。由公式(1)计算:

$$d = t - t_d \tag{1}$$

其中d为露点温差;t_d为空气的露点温度;t为某时刻的湿空气温度。

2　露点温差数学模型建立

2.1　粮仓内部微气流压力计算

以中央储备粮青岛市第二粮库标准储粮仓(平房仓)为研究对象,粮仓长×宽×高为60 m×24 m×12m,粮堆高6 m,储量为6 000 t。对于粮仓整体,

各粮层的空气温度、压力互不相同，由理想气体状态方程、质量方程和浮力方程：

$$PV=\frac{m}{M}RT, m=\rho V, F_{浮}=\rho g V_{排},$$

$$得：P_a=\frac{R}{M}\Delta\rho_a(T_a-T_a) \quad (2)$$

其中 P_a 为任意粮层内任一点的空气压力；ρ_a 为任意粮层内任一点的空气密度；T_a 为任意粮层内任一点的温度；T_b 为 T_a 粮层的平均温度。

尹君等[29]研究发现，国家标准储粮仓（平房仓）内部水汽分压分布为：表层和边缘低，中间及仓底高，单位时间内，水汽分压低区域会吸收水汽分压高区域转移出水分，首先形成结露，即常规储粮结露首先发生在粮堆顶层。

低温热管储粮中，为防止制冷剂充注后热管周围粮层即刻发生结露，制冷剂充注前，通过风机和仓内风道使粮仓内部各粮层降温并达到温度基本均匀，此时影响结露的主要因素只有压力，通风后短期内粮堆孔隙空气的压力为近似常压，因此，制冷剂充注后露点温度的计算中 P_a 为常压。热管运行后粮仓内部形成“冷心”，若气温骤降，则热管结露现象最先发生在上层热管，而上层热管周围的空气压力可近似为常压，因此，自然冷源低温热管储粮中露点温度计算中 P_a 可用常压计算。

2.2 粮仓内部空气露点温度计算

由湿空气露点温度计算公式[30]：

$$H=H_{sd}=\frac{0.622P_{sd}}{P_T-P_{sd}} \quad (3)$$

其中 H 为温度 t 时湿空气的湿度；H_{sd} 为露点温度 t_d 时湿空气的饱和湿度；P_{sd} 为露点温度 t_d 时湿空气的饱和蒸汽压；P_T 为温度 t 时湿空气的总压。

当粮仓内部粮堆孔隙空气的温度降至露点温度以下，其所含的超过饱和部分的水蒸汽将以液态水的形式凝结出来，由公式（3）可得粮仓内部粮堆孔隙空气的露点计算公式。

$$H=H_{sd}=\frac{0.622P_{sd}}{P_a-P_{sd}} \quad (4)$$

其中 H 为温度 t 时粮堆孔隙空气的湿度；H_{sd} 为露点温度 t_d 时粮堆孔隙空气的饱和湿度；P_{sd} 为露点温度 t_d 时粮堆孔隙空气的饱和蒸汽压；P_a 为任意粮层内任一点的孔隙空气压力。

将粮堆孔隙空气湿度 H 和压力 P_a 代入公式（4）可求得 P_{sd}，由水蒸汽表查出 P_{sd} 对应的饱和温度即为露点温度 t_d。

2.3 露点温差计算

粮食籽粒含水量能够影响粮堆孔隙空气的相对湿度，进而影响露点温度[28]。由公式（4）得粮堆孔隙湿空气温度为 t 时的露点温度 t_d，代入公式（1）可得露点温差 d。

粮堆孔隙湿空气露点温度计算中，测出湿空气的温度（t）和相对湿度（RH），由湿空气温湿图确定湿度（H），代入公式（4）可得 P_{sd}，通过查阅水蒸汽表得出 P_{sd} 对应的饱和温度即为露点温度 t_d，最后由公式（1）计算出露点温差 d。但热管低温储粮的粮温小于 15 ℃，在此温度范围，湿空气温湿图精确度极低，无法准确查阅，所以，采用实验的方法测量储粮仓内部空气相对湿度的变化，进而确定热管低温储粮中热管周围空气的露点温差。

3 结果与分析

3.1 粮堆孔隙湿空气的相对湿度

图4为粮堆孔隙湿空气相对湿度变化图，图中数据显示：环境温度为5～20 ℃，温度变化对粮仓内部粮堆孔隙湿空气相对湿度的影响成指数函数关系，环境温度越高，粮堆孔隙湿空气相对湿度越大；小麦籽粒含水率越高，粮堆孔隙湿空气相对湿度越大。与李兴军等[31]研究发现粮堆平衡相对湿度随温度升高而上升的结论相符。

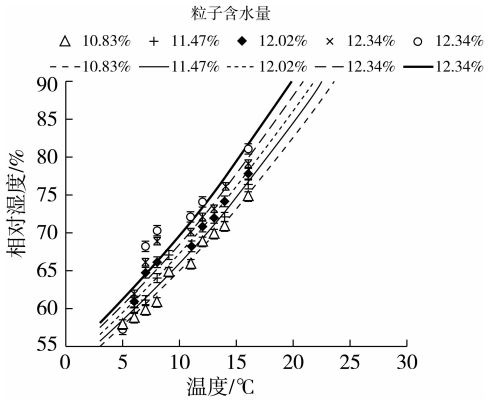

图4 粮堆孔隙湿空气相对湿度变化图

3.2 粮堆孔隙空气的露点温度

图5为微型粮仓内部孔隙湿空气温湿图。由粮堆孔隙空气的温度和相对湿度，定位图中一点 A（A_1，A_2），即为粮堆孔隙空气状态点 A，于 A 点做 x 轴的平行线交 100% 湿度空气等湿线于 B（B_1，B_2）点，则 B_1 对应的横坐标值即为粮堆孔隙空气在 A 状态点时的露点温度。

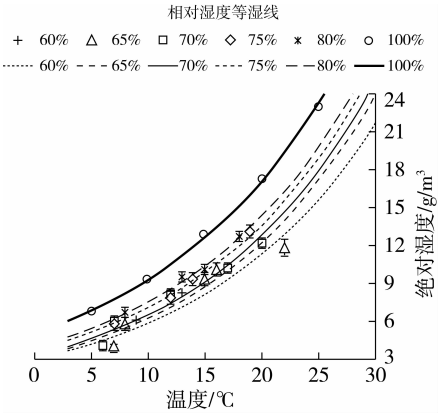

图5　微型粮仓内部孔隙湿空气温湿图

3.3　粮堆孔隙空气露点温差的确定

由图5，A_1、B_1两点对应的横坐标的差值即为热管周围粮堆孔隙空气的露点温差，由图5还可以看出：实验温度范围内（5～20 ℃），粮堆温度相同，粮堆孔隙湿空气相对湿度越大，露点温差越小，此露点温差即为热管降温的安全温差范围，即电磁阀温控设定值。由图4可知，粮堆孔隙湿空气相对湿度与小麦籽粒含水量相关。因此，电磁阀温控设定值可以用小麦籽粒的含水量和温度表示，如表1所示。

表1　电磁阀温控设定值检查表

粮温/℃	小麦籽粒含水量/%				
	10.83	11.47	11.82	12.27	12.77
5.0	9.0	8.5	8.5	8.0	7.5
7.0	8.5	8.5	8.0	8.0	7.5
9.0	8.5	8.0	8.0	8.0	7.5
10.0	8.0	8.0	8.0	7.5	7.0
13.0	8.0	8.0	7.5	7.5	7.0
15.0	8.5	7.5	7.5	7.0	6.5
17.0	7.5	7.5	7.0	6.5	6.0
20.0	7.5	7.0	7.0	6.5	6.0

表1为电磁阀温控设定值检查表，表中数据显示，环境温度为5～20 ℃，小麦籽粒含水率越高，电磁阀温控设定值越小，即自然冷源热管蓄冷储粮时越易出现结露现象。

3.4　电磁阀温控设定变化图

图6为电磁阀温控设定值与环境温度、籽粒含水率的关系图，图中数据显示，小麦籽粒含水率不同，存在某一环境温度时，低温热管储粮仓内热管组中电磁阀温控设定值相同。

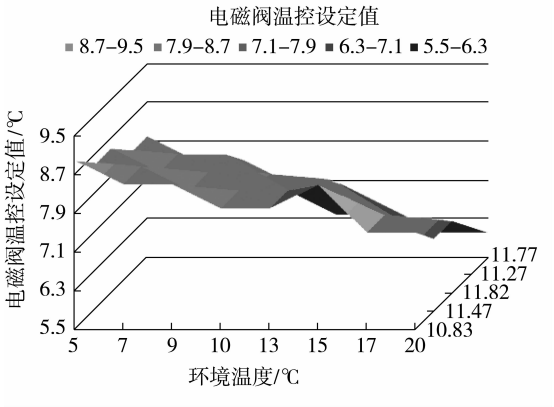

图6　电磁阀温控设定值变化图

3.5　电磁阀温控设定值计算公式

由表1和图6，同一批次小麦，电磁阀温控设定值取最小值，仓储小麦的含水率小于10.83%时，电磁阀温控设定值为7.5 ℃；小麦含水率在10.83%～11.82%时，电磁阀温控设定值为7.0 ℃；小麦含水率在11.83%～12.77%时，电磁阀温控设定值为6.0 ℃。

图7为电磁阀温控设定值与籽粒含水率的关系图，图中数据显示，电磁阀温控设定值计算可以用函数 $y=-0.215x^3+7.439x^2-86.384x+343.43$ 表示，（其中 y 为电磁阀温控设定值；x 为小麦籽粒含水率）。从图中看出，小麦籽粒含水率小于12.5%时，电磁阀温控设定值变化较小；籽粒含水率大于12.5%时，电磁阀温控设定值迅速降低。本结论支持程树峰等[32]研究发现小麦储藏安全水分（≤12.5%）的结论。相比黄明山[33]研究发现粮堆露点温差计算规则：$\Delta t=34-2W$（$W<14\%$）（式中 Δt 为露点温差，℃；W 为粮食含水率，%）更准确。

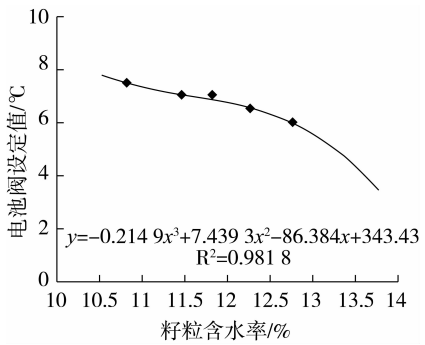

图7　电磁阀温控设定值与籽粒含水率的关系

4　结论

用微型粮仓模拟国家标准储粮仓（平房仓），得出自然冷源低温热管储粮仓内热管组结构中电磁阀

温控设定计算公式,弥补了储粮仓内粮堆孔隙湿空气露点温度数学模型的不足。

环境温度为5~20 ℃,随着温度的降低,粮堆孔隙湿空气的相对湿度逐渐减小;小麦籽粒含水率越高,粮堆孔隙空气的相对湿度越大。

实验温度范围内(5~20 ℃),小麦籽粒含水率越高,粮堆孔隙空气的露点温差越小;自然冷源低温热管储粮仓(小麦仓)热管结构中电磁阀温控设定计算公式为:$y = -0.215x^3 + 7.439x^2 - 86.384x + 343.43$(其中 y 为电磁阀温控设定值;x 为小麦籽粒含水率)。

自然冷源热管蓄冷储粮能够实现无能耗、无值守的绿色低温储粮,通过改进热管组结构,添加电磁阀控制热管的运行,避免热管周围粮层结露。今后实验中需验证电磁阀防结露的效果,达到粮仓周年低温或准低温安全储粮。

参考文献:

[1]向长琼,周浩,张华昌,等.我国低温储粮技术应用现状与思考[J].粮油仓储科技通讯,2015,31(2):1-5.

[2]周建新,张瑞,王璐,等.储藏温度对稻谷微生物和脂肪酸值的影响研究[J].中国粮油学报,2011,26(1):92-94.

[3]高素芬."三北地区"低温储粮技术优化集成与典型应用[J].粮油食品科技,2009,17(4):47-50.

[4]赵会义,张宏宇,李福君,等.我国储粮机械通风技术发展[J].粮油食品科技,2015(S1):4-10.

[5]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.

[6]何立军,张来林,杨晨晓,等.粮食的结露与处理[J].粮食流通技术,2010(1):19-20,27.

[7]胡光,李琛,万清,等.高大房式仓谷物冷却机低温储粮技术研究[J].粮食储藏,2000,29(6):30-41.

[8]郁宏兵.长江中下游地区机械通风储粮技术工艺探析[J].粮油仓储科技通讯,2013(3):38-40.

[9]Yuechao Deng, Zhenhua Quan, Yaohua Zhao, et al. Experimental investigations on the heat transfer characteristics of micro heat pipe array applied to flat plate solar collector[J]. Science China Technological Sciences,2013,56(5):1177-1185.

[10]Pan Jo Kim, Seok Ho Rhi, Kye Bock Lee, et al. Heat-pipe-associated localized thermoelectric power generation system[J]. Journal of Electronic Materials,2014,43(6):1613-1619.

[11]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.

[12]张岩,姜文利,邵焕霞,等.小型热管低温储粮系统的应用实验[J].中国粮油学报,2014(9):79-81,86.

[13]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(14):256-261.

[14]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(1):107-111.

[15]张来林,詹启明,任伟志.粮面结露的几种处理方法[J].粮食加工,2013(1):65-67.

[16]粮食平房仓设计规范[S].中国粮食局,2002.

[17]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.

[18]左春英,温静.对颗粒状粮食湿度分布检测的理论研究[J].中国粮油学报,2009,24(5):132-136.

[19]Ho Saeng Lee, Chang Hyo Son. Condensation heat transfer and pressure drop characteristics of R-290,R-600a, R-134a and R-22 in horizontal tubes[J]. Heat and Mass Transfer,2010,46(5):571-584.

[20]尹君,吴子丹,吴晓明,等.基于温湿度场耦合的粮堆离散测点温度场重现分析[J].中国粮油学报,2014(12):95-101.

[21]石教斌,肖绪才,陈敦旺,等.高大平房仓综合控温储粮技术探讨[J].粮食储藏,2006,35(3):21-23.

[22]张前,周永杰,辛立勇,等.高大平房仓储粮温度变化规律及数学模型研究[J].粮食储藏,2003,32(6):25-30.

[23]武传欣,程小丽,王兴周,等.热管技术在低温储粮中的研究进展[J].粮食加工,2015,40(6):67-69.

[24]GB/T24898—2010,粮油检测小麦水分含量测定(近红外法)[S].

[25]田向东,于海军.高大平房仓储粮防止粮堆结露、结顶的实验研究[J].粮油加工,2007(10):108-110.

[26]刘海宁,李真,张国雄.以相对湿度为参量的大气折射率计算公式[J].应用激光,2000,20(1):13-15.

[27]葛云瑞,石红兵.低温储藏大米结露的原因及预防[C].中国粮油学会储藏专业分会2004年学术年会,海南三亚,2004.

[28]田广元,田鹏波,陈刚,等.利用温度露点差判别沈阳地区云体的统计分析[J].安徽农业科学杂志,2009,37(33):16459-16461.

[29]尹君,吴子丹,张忠杰,等.不同仓型的粮堆温度场重现及对比分析[J].农业工程学报,2015, 31(1):281-287.

[30]冯彝.食品工程原理[M].北京:中国轻工业出版社,2007:521-522.

[31]李兴军,吴子丹.粮堆平衡绝对湿度和露点温度的查定方法[J].粮食加工,2011,36(4):34-37.

[32]程树峰,唐芳,吴松陵.小麦储藏安全水分的研究[J].中国粮油学报,2011,26(1):88-91.

[33]黄明山.粮堆露点温差规则的发现与应用[C].中国粮油学会第三届学术年会,烟台,2004.