

内衬塑料地下粮食筒仓粮堆温度场研究

张祥祥, 张 昊^{*}, 王振清, 陈 曦, 陈 雁

(河南工业大学土木工程学院, 郑州 450001;)

摘 要: 为了研究地下仓储粮期间粮堆的温度变化, 该研究以湿基含水率为 23% 的高水分玉米为研究对象, 首先采用试验方法对内径 3 m, 高 5 m 的地下筒仓在静态储藏条件下的仓内温度场的变化进行了分析。然后基于多孔介质传热理论, 使用多物理场数值模拟软件 COMSOL 对试验仓进行了模拟研究。数值模拟基于实际堆粮高度, 充分考虑了仓内谷物颗粒呼吸作用对粮堆内温度场分布的影响, 研究了不同初始粮温、粮食种类和装粮季节对仓内温度场的影响。结果表明: 静态储藏阶段, 粮食的呼吸作用较强, 粮堆首先在底部开始升温, 并逐渐形成高温热芯, 随后热芯位置逐渐向粮堆中上部移动, 并最终稳定于距装粮线 1 m 处。初始粮温为 35 °C 时, 仓内粮堆温升最高, 为 6.1 °C, 温度达到峰值后出现下降趋势; 在 5 种不同种类 (玉米、油菜籽、大豆、小麦和稻谷) 粮堆中, 油菜籽堆平均温升最高, 为 1.6 °C, 玉米堆平均温升最低, 为 1.2 °C; 不同季节外部环境温度的变化对仓内粮堆温度变化影响很小, 仓内粮堆温度在不同季节条件下表现出一致的变化趋势。该研究对地下仓高水分粮储藏期间的温度变化进行了研究, 并拓展了数值模拟, 可为实际工程提供参考。

关键词: 作物; 温度场; 温度传感器; 地下粮食筒仓; 玉米; 静态储藏; 数值模拟

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.002

中图分类号: TS210

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-16-0008-07

张祥祥, 张昊, 王振清, 等. 内衬塑料地下粮食筒仓粮堆温度场研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 8-14. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.002 <http://www.tcsae.org>

Zhang Xiangxiang, Zhang Hao, Wang Zhenqing, et al. Study on temperature field of grain piles in underground grain silos lined with plastic[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(16): 8-14. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.16.002 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

粮食安全事关国计民生^[1]。为了保证国家粮食安全, 不仅要提高粮食产量, 而且要加强粮食储备。粮食储藏过程中, 影响安全储粮的因素很多, 粮堆发热是破坏安全储粮的重要威胁之一^[2-3]。因温度分布不均而产生的仓内粮堆局部发热、结露和霉变时有发生^[4-6]。国内现有粮食储备仓大都为地上仓, 地上仓存在土地利用率低、能耗高和仓内粮堆易受外界环境变化影响等问题。采用地下仓不仅能提高土地利用率, 而且能利用地温, 将仓外环境维持在较为恒定的水平, 减少仓外环境变化对仓内粮堆的影响^[7-8]。但地下仓储粮过程中, 粮堆可能因温度分布不均而发生热量传递, 同时会伴随水分转移, 导致水汽在低温部位聚集, 使得粮堆局部含水率偏高, 引起粮食霉变、发热等风险, 有必要揭示粮堆在地下仓储藏中温度的变化, 以制定有效的预防措施, 实现安全储粮。

国内外学者对不同仓型内粮堆温度场进行了大量的

研究。Jia 等^[9]在忽略小麦粮堆水分迁移对温度场影响的条件下, 通过数值模拟的方法对粮食筒仓小麦粮堆温度场的变化过程进行了研究分析; Shubham^[10-14]通过建立粮堆内部的热湿传递模型, 对粮堆内部热量传递和水分迁移过程进行了模拟分析; Francisco 等^[15]通过对混凝土圆柱筒仓对仓内温度场进行试验研究, 并结合传热理论, 开发了有限差分模型; Wang 等^[16]提出了一种基于气温的粮堆温度高精度预测模型; 王小萌等^[17]对玉米粮堆霉变发热过程中的温湿度场变化规律进行了研究; 王振清等^[18-20]对地下仓储粮期间温度场变化进行了数值模拟分析, 得出仓内粮堆温度随着储粮时间变化的规律。相比于实仓测试的成本、受限条件多等问题, 数值模拟经济有效, 在探索粮堆内部温度场分布及其传递规律中应用广泛^[21]。

综上, 国内外学者对平房仓等地上仓型粮堆温度变化进行了大量研究, 对钢筋混凝土地下仓内温度场的研究有所涉及, 但对内衬塑料地下粮食筒仓内温度变化过程的研究还相对较少。本研究针对内衬塑料地下仓, 建立试验平台, 通过对试验仓内温度的监测, 分析仓内粮堆温度动态变化规律; 基于动量守恒、能量守恒、质量守恒和多孔介质传热理论, 采用计算流体力学方法, 应用多物理场数值模拟软件 COMSOL 进行数值模拟分析。用数值模拟结果和地下试验仓测试结果进行比较分析, 且基于误差分析和试验结果, 对数值模拟模型参数进行调整, 模拟不同初始粮温、粮食种类和装粮季节对仓内

收稿日期: 2021-07-02 修订日期: 2021-08-14

基金项目: 河南省科技攻关项目 (202102110122); 省属高校基本科研业务费专项资金项目 (2016QNJH23); 河南工业大学高层次人才科研启动基金项目 (2018BS077)

作者简介: 张祥祥, 研究方向为粮食仓储。

Email: zhangxiang2052@163.com

*通信作者: 张昊, 博士, 副教授, 研究方向为储仓结构和绿色储粮体系。

Email: zzbright@163.com

粮堆温度场的影响。拟为制定粮食储藏防结露和霉变等相关措施提供依据。

1 试验及数值模拟方法

1.1 试验装置与测点

试验装置由试验仓、测温系统和隔热保温系统组成，如图 1。

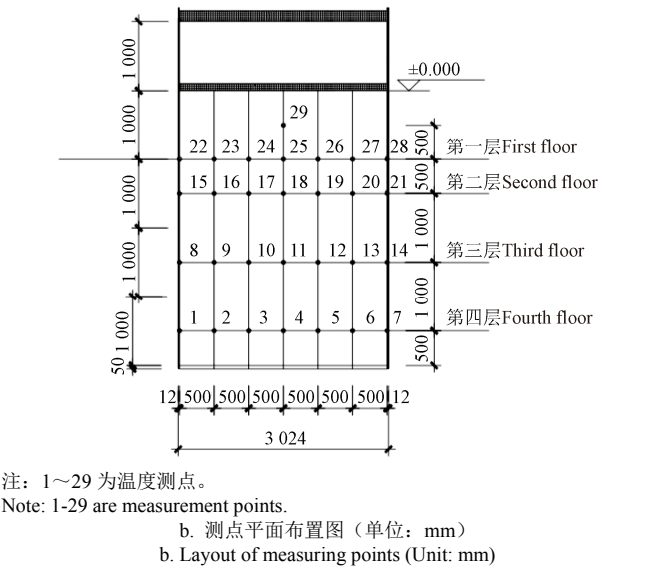
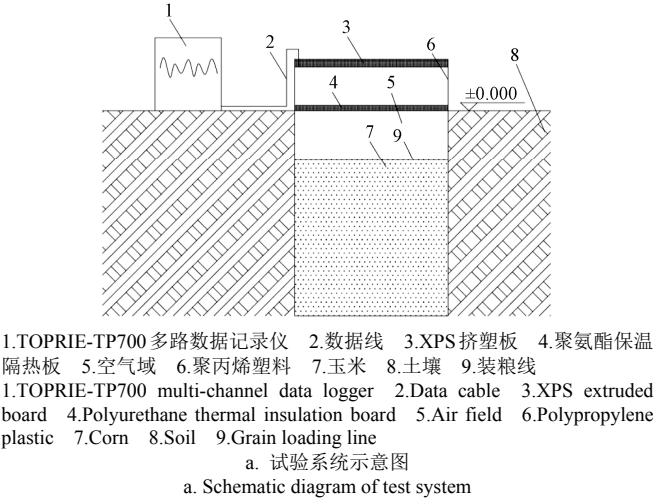


图 1 试验系统及温度测点布置
Fig.1 Test system and temperature measuring point layout

如图 1b 所示，试验仓仓体直径为 3 m，高 5 m，仓壁厚 12 mm，装粮线高 3 m，仓体采用聚丙烯塑料加工而成。测量系统由 TOPRIE-TP700 多路数据记录仪和 TOPRIE-TP2305 温度传感器组成。测温范围-40~125 ℃、测量精度±0.3%。试验仓裸露仓体部分采用厚度为 20 mm 的橡塑保温棉进行包裹，在距离仓顶 1 m 处布置一层硬质聚氨酯保温隔热板，板厚 80 mm，在仓顶处，位于环筋上布置一层 XPS 挤塑板。

仓内共布置 29 个测点，每个测点对应一个温度传感器，测点按照横向 7 个和竖向 4 个的数量进行布置，测点编号遵循从左到右、从上到下的顺序。

1.2 试验材料

本次试验采用高水分粮进行试验。所用玉米产自于河南省周口市，为 2020 年秋收新粮。入仓前用粮食水分测试仪对玉米含水率进行测量，含水率为 23%，入仓温度为 (17.5±0.5) ℃，其他参数见表 1。其中，玉米导热系数 $\lambda_g = 0.117\ 0 + 0.001\ 3 \cdot (100 \cdot M_g)$ ，玉米比热容 $C_g = 1\ 706.1 + 7.128\ 1 \cdot T_g$ ， M_g 是湿基含水率，23%； T_g 是粮堆初始温度，17.9 ℃^[2]。

表 1 试验材料参数
Table 1 Test material parameters

参数 Parameter	玉米 Corn	空气 Air	聚丙烯塑料 Polypropylene plastic	聚氨酯保温隔热板 Polyurethane thermal insulation board	XPS 挤塑板 XPS extruded board
密度 Density/(kg·m ⁻³)	707	1.225	1 470	40	29
比热容 Specific heat capacity (J·(kg·K) ⁻¹)	1 838	1 006	1 190	1 380	1 470
导热系数 Thermal conductivity (W·(m·K) ⁻¹)	0.146 9	0.024	0.18	0.02	0.033

1.3 试验方法

装粮完毕后，对粮面进行找平，使粮堆温度的变化不会因粮面的参差不齐而受到影响。然后铺盖聚氨酯保温隔热板，缝隙用发泡胶进行填充粘接。在 XPS 挤塑板裁剪、修复、粘接和边缘封闭以后开始试验，试验时长 564 h。

试验数据采用 TOPRIE-TP700 多路数据记录仪自动采集储存，数据采集的时间间隔为 1 min，由于数据较多，利用 Excel 对数据进行平均化处理，对每个测点每天 (60 min×24 h) 监测的数据取一个平均值。在数据处理软件 Origin 中按照对应坐标导入每个测点所计算的平均值，分别绘制不同时间的温度云图；以时间和测点温度均值绘制温度变化曲线。

1.4 数值模拟模型及边界条件

1.4.1 数学模型

模拟试验平台包括地下试验仓、仓内玉米粮堆和仓内装粮线以上空气层共 3 部分。在数值模拟中，地下试验仓的仓壁为固体，地下试验仓内玉米粮堆为多孔介质，装粮线以上区域为流体。结合本次试验中地下试验仓所处的环境条件，对静态储藏条件下的传热过程进行数学模型的建立。

在静态储藏条件下，主要涉及玉米粮堆温度的传递和微气流流动等；为了简化计算，本研究基于仓储粮堆内部自然对流传热数学模型，在数学模型的建立过程进行以下主要假设：1) 粮堆是连续均匀分布多孔介质，且在传热的过程中遵循热力学基本定律；2) 空气为不可压缩流体；3) 自然对流速度场足够小 (Ra<1) (Ra，瑞利数 Rayleigh number，自然对流无量纲数) 达西定律能够适用；4) 浮升力满足线性变化，可采用 Boussinesq 近似^[22]；5) 试验周期内玉米质量不发生变化。

1.4.2 物理模型

以模拟试验平台搭建的地下仓仓体实际尺寸为依据,在数值模拟软件 COMSOL 中建立仓体的模型,所建模型采用自由四边形网格,通过此方式划分的网格使用范围广、质量较好,主要用于研究仓内粮堆的温度场变化和后期的数值计算。对网格独立性进行了验证,网格数从 3 846 个增至 6 362 和 13 795 个时,温度分别变化 0.06 和 0.01 °C,本次模型划分 3 846 个网格满足要求。

已有研究表明^[23],土壤温度随时间和空间的变化可用具有正弦函数位相滞后和温度变幅衰减的方程来模拟,这种描述土壤温度时空变化的方程称为土壤的温波方程,用数学公式表述为^[23]

$$T_{(Z,t)} = \bar{T}_0 + A_0 e^{-\frac{Z}{D}} \sin \omega(t - \frac{Z}{D \cdot \omega}) \quad (1)$$

式中 $T_{(Z,t)}$ 为土壤在 Z 深度 t 时刻时的温度, °C; \bar{T}_0 为土壤表面平均温度, °C; A_0 为土壤表面温波方程的振幅, m; ω 为时角, $\omega = 2\pi/\tau$, τ 为温波方程的周期, d; Z 为土壤深度, m; t 为观测时间, s; D 为土温衰减深度,

$$m, D = \sqrt{\frac{2K_h}{\omega}} = \sqrt{\frac{K_h \tau}{\pi}}, K_h \text{ 为热扩散率, } m^2/s;$$

任意深度 Z 的振幅 $A_z = A_0 e^{-\frac{Z}{D}}$, 当 $Z=D$ 时, $A_z=0.37 A_0$, 即土壤深度 Z 的值为 D 时,其温波方程振幅减为土壤表面的 37%,当 $Z=3D$ 时,经计算,土壤温度波动减为地表的 5%,这时候可以认为温度波动基本消失,因此土壤深度 $3D$ 处称为恒温层。

对本次试验(共计 23 d)的恒温层深度(D_{23})进行计

算: $D_{23} = \sqrt{\frac{2K_h}{\omega}} = \sqrt{\frac{K_h \tau_{23}}{\pi}}$, 其中 τ_{23} 为本次 23 d 的试验周期。代入数据 $K_h=0.51 \times 10^{-6} m^2/s$ ^[23], $\tau_{23}=3\ 600 \times 24 \times 23$ s, 得 $D_{23}=0.32$ m, $Z_{23}=3 D_{23}=0.96$ m。本次模拟试验仓考虑到试验条件、安全等问题,建造的仓型高出地面 2 m,后期在仓体周围覆土高度为 1 m,覆土直径为沿仓壁距离 1.5 m,满足在 23 d 试验期内地下恒温的要求。

1.4.3 边界条件和初始条件设定

初始条件:初始粮温为 17.9 °C,粮食湿基含水率为 23%。

边界条件:由于试验仓外部土壤温度在整个试验过程中满足恒温条件,外部地面以下边界温度取平均值 17.4 °C;地面以上边界采用插值函数的形式定义温度,且采用竖向和横向自然对流的形式赋予边界热通量形式,插值函数值为试验过程实测大气环境温度;装粮线以上空气域与粮堆表层发生自然对流传热,空气域温度为 29 号测点实测温度。

呼吸作用:由文献[24]知,测定粮食在 24 h 内因呼吸作用所产生的 CO_2 的释放率,即可得出粮食因呼吸作用所产生的热量。文献[25]通过实测方法得出粮食呼吸作用 24 h 后 CO_2 释放率的数学表达式。基于本试验仓实际堆粮高度的呼吸作用考虑,按照空气中氧气含量为 21%计

算,假定在短时间内玉米粮堆含水率不发生变化,经计算,需要 1.3 d 才能把空气域中氧气消耗完毕,所得结果以内热源形式赋予给仓内粮堆。

2 结果与分析

2.1 试验结果

2.1.1 环境温度变化对仓内空气域温度影响

如图 2 所示,在整个试验过程中,大气环境最高平均温度为 14.2 °C;最低平均温度为 2.2 °C;整体的大气环境温度处于下降趋势。地下仓的温度变化主要是由于大气环境温度对地面温度的影响,进而影响到仓内温度,仓内温度逐渐影响到每一层粮堆的粮温。地下仓内的粮食温度变化幅度较小,传热速度慢,粮食温度稳定在较低的温度水平,有效控制粮食和微生物的呼吸,从而有效抑制虫霉的发生和发展,有利于粮食的安全储藏。通过对比环境温度与仓内空气域(29 号测点)温度的变化过程,进而探究外部环境温度对试验仓内温度的影响。

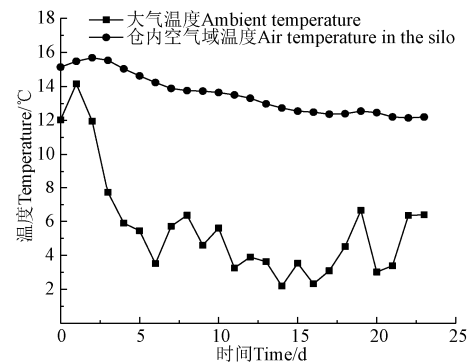


图 2 环境温度变化对筒仓内温度的影响
Fig.2 Influence of ambient temperature changes on air temperature in silo

2.1.2 环境温度变化对仓内粮堆温度影响

本次试验仓为圆柱形地下粮食筒仓,仓体边界受热条件都是完全对称的,所以取具有代表性的中垂面数据进行分析。由于粮层底部受到外界温度影响较小,所以温度云图的绘制是从距离仓底 0.5 m 处开始。温度云图包含试验仓内粮堆内部和空气层温度的变化情况。

如图 3a 所示,在闭仓后温度分布较为均匀,装粮温度为 (17.5 ± 0.5) °C,整个粮堆几乎分布在这个温度范围。由于外部环境温度较低,上部粮温略低于下部粮温,温度差为 1.2 °C,但粮堆整体温度趋于一致。在装粮 2 d 后,整体粮温略有上升,部分区域升温 1.3 °C,达到 18.8 °C。随着时间推移,粮堆温度出现分层现象,在装粮后 4 d (图 3c),粮堆下层温度最高为 21.3 °C,中间为 20 °C,装粮线附近温度为 18.8 °C,此时装粮线以上空气域温度为 16.3 °C,与粮堆底部温度相差 4 °C。这是由于试验仓所储存的粮食呼吸作用较强。通过图 3b~3d 可以看出,粮堆首先在底部开始升温,并表现出高温向上转移的趋势,这是由于热空气的密度较小,粮食颗粒间的空气浮升力大于自身的重力,使得热空气上升

所致。

如图 3d~3h 所示, 在装粮后 6 d (图 3d), 粮堆内部已形成热芯区域, 热芯区域温度达 22.5 °C, 此时热芯位于粮堆径向 1 m、轴向 2 m 位置, 即靠近仓体左上侧。随着时间推移, 热芯面积逐渐增大, 且温度逐渐升高。

在装粮后 10 d (图 3f) 时, 中心温度已超过 25 °C; 之后, 热芯高温区域面积基本稳定, 并逐渐缓慢地向地下仓中心位置转移。由于仓体整体封闭较好, 试验仓内的氧气逐渐被消耗殆尽, 呼吸作用达到极限并开始衰减。粮堆热芯区域面积不再增加。

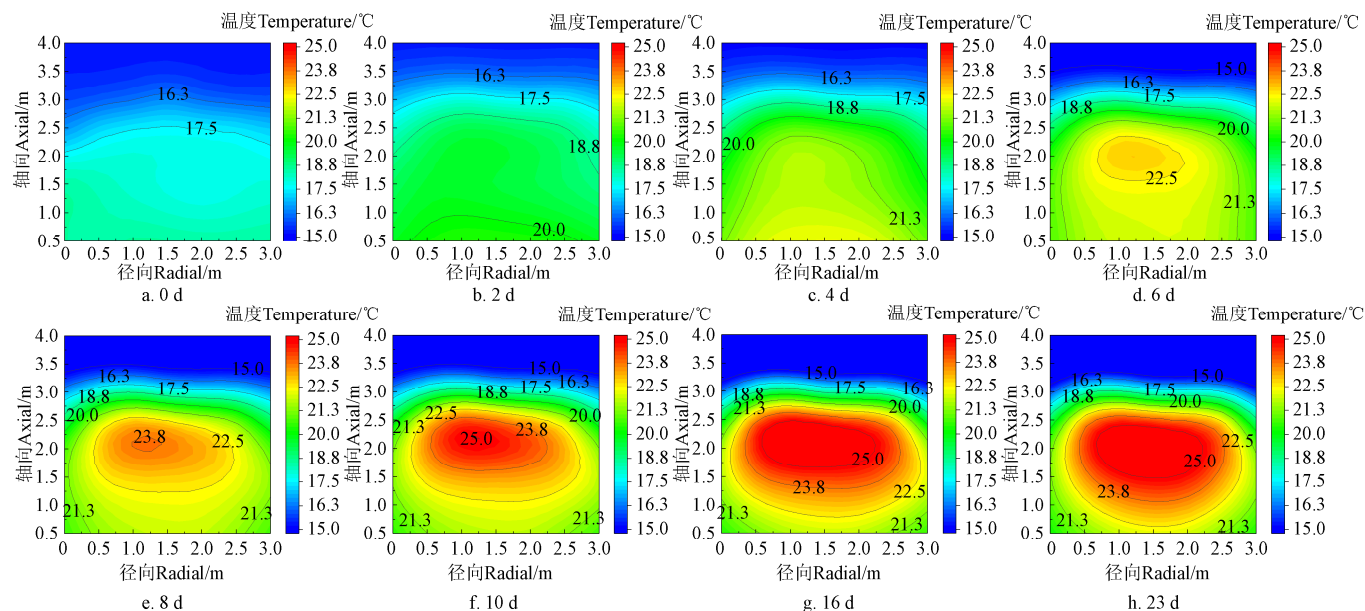


图 3 不同储藏时间筒仓内温度变化

Fig.3 Temperature changes in silo at different storage times

2.1.3 不同深度粮层温度分布

为了探究不同粮层温度分布以及变化规律, 取各层粮层数据的平均值。按照从上到下的顺序, 依次为第一层 (测点 22~28 平均值)、第二层 (测点 15~21 平均值)、第三层 (测点 8~14 数据平均值)、第四层 (测点 1~7 数据平均值)。

如图 4 所示, 在试验仓粮堆内温度出现明显分层现象。在外部大气环境温度的影响下, 仓内空气域温度除初始有小幅上升外 (小幅上升的原因是装粮后没有及时放置聚氨酯保温隔热板对仓顶进行保温), 一直处于下降状态, 从最初的 15.1 °C 降至 12.2 °C。受空气域温度降低的影响, 位于第一层的粮堆温度并未表现出其余 3 层粮堆明显升温现象。第一层粮堆最初温度为 16.5 °C, 最高温度仅为 17.7 °C, 温升 1.2 °C。第二、三和四层均出现升温现象, 并表现出不一致性。第四层温度从初始的 19 °C 在装粮后 4 d 达到峰值 21.8 °C, 之后稳定在 21.2 °C; 第三层从初始的 18.3 °C 在装粮后 18 d 达到峰值 23.2 °C; 在第二层粮堆中, 温度由初始的 18 °C 在装粮后 14 d 升至峰值 24.5 °C, 为 4 个粮层中温度最高处。

纵观整个试验仓内 4 个粮层温度变化, 除第四层受到空气域温度的影响外, 其余 3 层几乎不受空气域的影响。温度达到峰值后出现下降主要是由于粮仓整体密封性较好, 仓内氧气逐渐消耗殆尽, 粮食的有氧呼吸衰退所致。

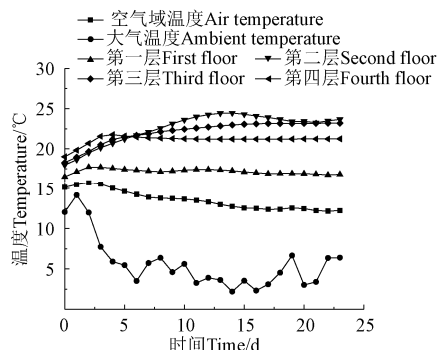


图 4 不同粮层深度温度变化

Fig.4 Temperature changes at different grain depths

2.2 模拟结果

为了保持和试验仓条件设置的一致性, 数值模拟结果均取中垂面粮堆温度均值。

2.2.1 数值模型验证

如图 5 所示, 通过对筒仓内粮堆温度均值的实测数据和数值模拟数据对比分析知, 数值模拟和实测数据具有很好的一致性, 趋势相同。试验过程粮堆温度平均值最大为 21.5 °C, 数值模拟中粮堆温度平均值最大为 19.6 °C, 相差 1.9 °C。产生误差主要原因是试验采用高水分粮, 呼吸作用强于正常水分入仓粮, 且在试验中密封等都会对试验仓温度的变化造成影响。

2.2.2 不同条件数值模拟分析

基于已验证的静态储藏物理模型, 对不同初始状态 (筒仓内粮堆初始平均温度为 5、15、25 和 35 °C)、粮

食种类(玉米、油菜籽、大豆、小麦和稻谷)和入粮季节的粮堆温度场进行数值模拟分析,各粮种参数见表2^[2,24,26-27]。

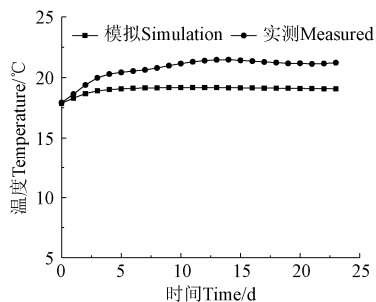


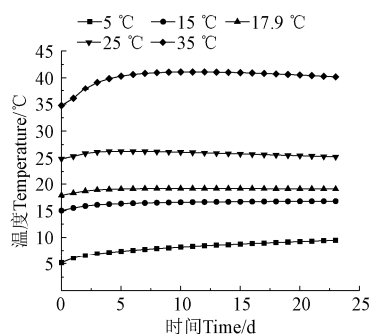
图5 静态储藏阶段粮堆温度实测与模拟对比

Fig.5 Comparison of actual measurement and simulation of grain pile temperature at each stage

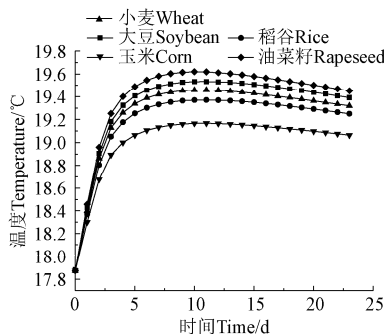
表2 不同粮食种类参数

Table 2 Parameters of different grain types

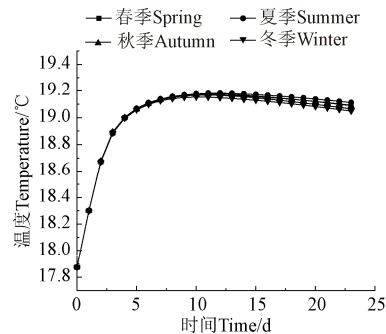
粮种 Types of grain	密度 Desity/ (kg·m ⁻³)	孔隙率 Porosity /%
玉米 Corn	708	35~55
油菜籽 Rapeseed	680	38~40
大豆 Soybean	770	38~43
小麦 Wheat	786	35~45
稻谷 Rice	580	38~43



a. 初始粮温
a. Initial grain temperature



b. 粮食种类
b. Grain type



c. 季节
c. Season

图6 不同条件筒仓内温度变化

Fig.6 Temperature changes in the silo at different conditions

在初始粮温(17.9 °C)相同的条件下,对不同季节粮堆温度场进行数值模拟分析,分析季节变化导致的外部环境温度变化对仓内粮堆温度场的影响。图7表示2020年4个季节环境温度变化^[28],地域设置与试验仓相同,时间区间与试验阶段相似(春季:4月17日—5月10日;夏季:7月17日—8月9日;秋季:10月17日—11月9日;冬季:1月17日—2月9日),且均为23 d。春夏秋冬4个季节在试验时间区间内,外部环境温度变化范围分别为12~30 °C、21.5~30 °C、12~17.5 °C和-1~10 °C。由图6c可知,不同季节外部环境温度变化对仓内粮堆温度变化影响很小,仓内粮堆温度在不同季节条件下表现出一致的变化趋势,这是由于在本次数值模拟中,采用了试验过程中相同的保温措施,保温材料导热系数较小,使得外部环境的冷量或热量难以传入仓内。同时

结合本次试验数据,对比分析筒仓内粮堆不同初始温度条件下仓内粮堆温度变化。如图6a所示,初始粮温为5和15 °C时,仓内粮堆最终温度为9.5和16.8 °C,温升分别为4.5、1.8 °C;初始粮温为17.9、25和35 °C时,仓内粮堆温度达到峰值19.2、26.3和41.1 °C后出现下降趋势,这是由于试验仓处于封闭状态,仓内氧气耗尽后,呼吸作用衰减且产热量低于外部环境温度传入仓体的冷量所致。

依托玉米粮堆试验验证的模型,不改变初始粮温(17.9 °C)和边界条件,对不同粮食种类(初始参数见表2)粮堆温度场进行数值模拟分析。由图6b分析知,油菜籽堆平均温升最高,为1.6 °C,玉米堆平均温升最低,为1.2 °C。整体温度在达到峰值后出现下降趋势,这与本文的玉米实仓试验现象一致。不同粮食种类粮堆温度的变化幅度不同,主要是由于各种粮堆粮食颗粒间孔隙率不同造成的,当孔隙率过大时,空隙中的空气流通性会比较好,空气的流通有助于粮堆内部的热湿迁移,这有助于安全储粮;相反,如果粮堆的孔隙率较小,会阻碍空气在粮堆中的流通性,使得储粮过程中粮堆内部热湿迁移受阻,进而造成热湿的集中,出现高温、高湿区域,进而使得粮堆出现结露并且导致霉变。

也证明了地下粮仓受外部环境温度变化影响很小,仓内温度的变化主要是由于粮食颗粒呼吸作用造成的。

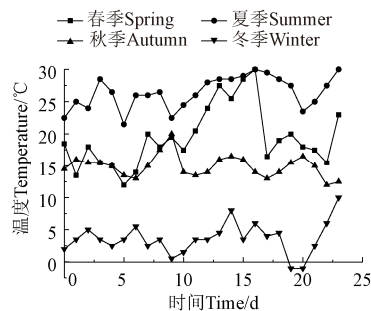


图7 不同季节外部环境温度变化

Fig.7 Changes in external ambient temperature in different seasons

3 结 论

本文以高水分粮为研究对象, 通过搭建试验平台, 利用多物理场数值模拟软件 COMSOL 对内衬塑料地下粮食筒仓在静态储藏阶段仓内温度场的变化进行了分析, 主要得出以下结论:

1) 在静态储藏阶段, 随着储粮时间增加, 粮堆内部逐渐形成高温热芯, 热芯温度随呼吸作用的衰退, 最终趋于稳定, 热芯位置最终稳定于距装粮线 1 m 处。在试验仓内, 粮堆温度出现明显分层现象, 第一、二、三和四层均出现温升现象, 温升分别为 1.2、6.5、4.9 和 2.2 °C, 并表现出的一致性。试验仓内温度变化几乎不受空气域的影响。

2) 不同初始粮温条件下, 初始粮温为 5 和 15 °C 时, 仓内粮堆最终温度为 9.5 和 16.8 °C, 温升分别为 4.5、1.8 °C; 初始粮温为 17.9、25 和 35 °C 时, 仓内粮堆温度达到峰值 19.2、26.3 和 41.1 °C 后出现下降趋势, 初始粮温为 35 °C 时, 仓内粮堆温升最高, 为 6.1 °C; 在 5 种粮堆中, 油菜籽堆平均温升最高, 为 1.6 °C, 玉米堆平均温升最低, 为 1.2 °C; 不同季节外部环境温度的变化对仓内粮堆温度变化影响很小, 仓内粮堆温度在不同季节表现出一致的变化趋势。

本文仅对静态储藏阶段仓内温度场变化进行了分析, 模型的正确性得到验证, 后续可对多场耦合条件下仓内热湿变化进行分析, 进而为制定相关措施提供依据。

[参 考 文 献]

- [1] 崔宏伟, 吴文福, 吴子丹, 等. 基于温度场云图的储粮数量监控方法研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(4): 290-298. Cui Hongwei, Wu Wenfu, Wu Zidan, et al. Research on monitoring method of stored grain quantity based on cloud diagram of temperature field[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(4): 290-298. (in Chinese with English abstract)
- [2] 尹君. 小麦粮堆多场耦合模型及结露预测研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015. Yin Jun. Research on Multi-field Coupling Model and Condensation Prediction of Wheat Grain Pile[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [3] 张瑞元. 地下粮仓钢板与塑料内壁粮食结露实验与数值模拟[D]. 郑州: 河南工业大学, 2020. Zhang Ruiyuan. Experiment and Numerical Simulation of Grain Condensation on Steel Plate and Plastic Inner Wall of Underground Granary[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [4] 尹君, 吴子丹, 张忠杰, 等. 基于多场耦合理论浅析浅圆仓局部结露机理[J]. 中国粮油学报, 2015, 30(5): 90-95. Yin Jun, Wu Zidan, Zhang Zhongjie, et al. Analysis on the mechanism of local condensation in shallow silo based on multi-field coupling theory[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(5): 90-95. (in Chinese with English abstract)
- [5] 刘立意, 郝世杨, 张萌, 等. 基于 CFD-DEM 的稻谷通风阻力数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 27-32, 158. Liu Liyi, Hao Shiyang, Zhang Meng, et al. Numerical simulation and experiment of paddy ventilation resistance based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 27-32, 158. (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈雁, 王子嘉, 付常青, 等. 浅圆仓环壁通风降温系统的性能试验与风道设置优化[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 285-292. Chen Yan, Wang Zijia, Fu Changqing, et al. Performance test and air duct setting optimization of ring-wall ventilation and cooling system of shallow round silo[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(17): 285-292. (in Chinese with English abstract)
- [7] 王振清, 揣君, 刘永超, 等. 地下粮仓的结构设计研究现状与新进展[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2019, 40(5): 132-138. Wang Zhenqing, Chuai Jun, Liu Yongchao, et al. Research status and new progress of underground granary structure design[J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2019, 40(5): 132-138. (in Chinese with English abstract)
- [8] 毛海锋, 曾端辉, 卢黄华, 等. 优质籼米地下仓储过程中品质变化[J]. 粮油食品科技, 2017, 25(3): 87-91. Mao Haifeng, Zeng Duanhui, Lu Huanghua, et al. Quality changes of high-quality indica rice during underground storage[J]. Cereals, Oils and Foods Technology, 2017, 25(3): 87-91. (in Chinese with English abstract)
- [9] Jia C, Sun D, Cao C W, Computer simulation of temperature change in a wheat storage bin[J]. Journal of Stored Products Research, 2001, 37(2): 165-177.
- [10] Shubham S P, Chandra B S, John F, et al. Modeling of heat and mass transfer within the grain storage ecosystem using numerical methods: A review[J]. Drying Technology, 2020, 38(13): 1677-1697.
- [11] Thorpe G R. Moisture diffusion through bulk grain subjected to temperature gradient[J]. Journal of Stored Products Research, 1982, 18: 9-12.
- [12] Thorpe G R. Modelling ecosystems in ventilated conical bottomed farm grain silos[J]. Ecological Modelling, 1997, 94: 255-286.
- [13] Thorpe G R. The application of computational fluid dynamics codes to simulate heat and moisture transfer in stored grains[J]. Journal of Stored Products Research, 2008, 44(1): 21-31.
- [14] Thorpe G R. The modelling and potential applications of a simple solar regenerated grain cooling device[J]. Postharvest Biology & Technology, 1998, 13(2): 151-168.
- [15] Francisco N M. Simulation of the temperature of barley during its storage in cylindrical silos[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2018, 157: 1-14.
- [16] Wang Q Y, Feng J C, Han F, et al. Analysis and prediction of grain temperature from air temperature to ensure the safety of grain storage[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 1200-1213.
- [17] 王小萌, 吴文福, 尹君, 等. 玉米粮堆霉变发热过程中的温湿度场变化规律研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 268-273. Wang Xiaomeng, Wu Wenfu, Yin Jun, et al. Study on the change law of temperature and humidity field in corn grain pile moldy heating process[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(3): 268-273. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王振清, 殷鹏, 郑家欢. 非通风状态新型地下粮仓储粮温度场的 CFD 数值模拟[J]. 现代食品科技, 2016, 32(1): 170-174, 296. Wang Zhenqing, Yin Peng, Zheng Jiahuan. CFD numerical simulation of the temperature field of a new type of underground grain storage in a non-ventilated state[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(1): 170-174, 296.

296. (in Chinese with English abstract)
- [19] 王振清, 田栋杰, 刘海燕. 钢筋混凝土圆形地下粮仓温度场试验研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2018, 39(3): 99-102, 126.
Wang Zhenqing, Tian Dongjie, Liu Haiyan. Experimental study on temperature field of reinforced concrete circular underground granary[J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2018, 39(3): 99-102, 126. (in Chinese with English abstract)
- [20] 金立兵, 薛雅琪, 梁新亚, 等. 地下储粮仓温度场的数值模拟与试验研究[J]. 河南工业大学学报: 自然科学版, 2019, 40(5): 120-125.
Jin Libing, Xue Yaqi, Liang Xinya, et al. Numerical Simulation and Experimental Research on the Temperature Field of Underground Granary[J]. Journal of Henan University of Technology: Natural Science Edition, 2019, 40(5): 120-125. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陈桂香, 张宏伟, 王海涛, 等. 基于 COMSOL 的平房仓冷却通风过程中粮堆热湿耦合传递研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(11): 79-85.
Chen Guixiang, Zhang Hongwei, Wang Haitao, et al. Study on the coupled heat and moisture transfer of grain piles during the cooling and ventilation process of the single-storey warehouse based on COMSOL[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(11): 79-85. (in Chinese with English abstract)
- [22] Prandtl L, Tietjeris O. Fundamentals of Hydro and Aeromechanics[M]. New York: McGraw Hill, 1934.
- [23] 段若溪. 农业气象学[M]. 北京: 气象出版社, 2013.
- [24] 潘钰. 房式仓粮堆自然储藏和机械通风过程中热湿耦合问题的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2017.
Pan Yu. Research on the Heat and Moisture Coupling Problem during the Natural Storage and Mechanical Ventilation of the Room-type Silo Grain Pile[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [25] White N D G, Sinha R N, Muir W E. Intergranular carbon dioxide as an indicator of biological activity associated with the spoilage of stored wheat[J]. Can. Agric. Eng. 1982, 24: 35-42.
- [26] 李诗龙. 油菜籽的物理特性浅析[J]. 中国油脂, 2005(2): 17-20.
Li Shilong. Simple analysis of physical property of rapeseed[J]. China Oils and Fats, 2005(2): 17-20. (in Chinese with English abstract)
- [27] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. JB/T 7679—2008, 螺旋输送机[S]. 机械工业出版社, 北京: 2008.
- [28] 中国气象数据网[DB/OL]. http://data.cma.cn/

Study on temperature field of grain piles in underground grain silos lined with plastic

Zhang Xiangxiang, Zhang Hao^{*}, Wang Zhenqing, Chen Xi, Chen Yan

(College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This study aims to explore the temperature changes of grain piles in underground grain silos during storage. The research object was taken as a corn grain pile with 23% high moisture content and a weight of 15 tons, while the underground grain silo with an inner diameter of 3m and a height of 5 m. Firstly, the change of temperature field was analyzed experimentally under static storage conditions. Secondly, the multi-physics software COMSOL was selected to simulate the grain bins with the same size, boundary conditions and height using the theory of heat transfer in porous media. The actual pile height was also utilized to fully consider the influence of grain respiration on the distribution of temperature field in the pile during simulation. A comparison between numerical simulation and experimental data was made to investigate the influence of different initial grain temperatures, grain types and loading seasons on the temperature field in the warehouse. The results show that the grain respiration was strong during the static storage stage. Specifically, the grain pile started to heat up at the bottom, and gradually formed a high-temperature heat core with 22.5 °C locating on the place, where was 1m radial and 2m axial from the physical core. Then, the position of heat core moved gradually to the middle and upper part of grain pile, and finally stabilized at the place where was 1m below the grain loading line, resulting in the obvious stratification in the temperature of grain pile. Furthermore, the spatial domain of air temperature descended from 15.1 to 12.2 °C in the bin at ambient temperature. The temperature changes of grain layers in the whole experiment chamber were almost unaffected by the air domain temperature, except the fourth layer of grain stack. More importantly, there was a great increase in the temperature of grain pile under various initial grain temperature (5, 15, 25 and 35 °C). Specifically, the final temperatures of grain pile in the silo were 9.5 and 16.8 °C, with an temperature increase of 4.5 °C and 1.8 °C, when the initial grain temperatures were 5 and 15 °C, respectively. The peak values of stack temperature in the silo were 19.2, 26.3 and 41.1 °C, when the initial grain temperatures were 17.9, 25 and 35 °C, respectively. The highest increase in temperature was 6.1 °C for the grain pile in the warehouse, when the initial grain temperature was 35 °C. Nevertheless, the temperature declined after the peak. Among five kinds of grain pile (corn, rapeseed, soybean, wheat, and rice), the highest increase in the average temperature was 1.6 °C in the rapeseed pile, whereas, the lowest increase was 1.2 °C in the corn pile. External environment temperature in different seasons (spring: 17th April to 10th May; Summer: 17th July to 9th August; Autumn: 17th October to 9th November; Winter: 17th January to 9th February) presented little effect on the grain pile temperature in the silo, indicating that the temperature of grain pile in the silo behaved a consistent trend of change under different seasonal conditions. Consequently, the finding can provide a sound reference for practical engineering during storage of high moisture grain in underground silos.

Keywords: crops; temperature field; temperature sensors; underground grain silo; corn; static storage; numerical simulation