

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2024.01.020

金立兵, 朱豆豆, 李闯, 等. 半地下双层浅圆仓静态储粮温度场的数值分析[J]. 粮油食品科技, 2024, 32(1): 153-160.

JIN L B, ZHU D D, LI C, et al. Numerical analysis of temperature field of static grain storage in semi-underground double-storey squat silos[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2024, 32(1): 153-160.

半地下双层浅圆仓静态储粮 温度场的数值分析

金立兵¹, 朱豆豆¹, 李闯¹, 吴强², 王宇航¹, 张为博¹

(1. 河南工业大学 土木工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 河南工大设计研究院有限公司, 河南 郑州 450001)

摘要: 粮食温度是影响储粮安全的最重要因素之一, 为揭示半地下双层浅圆仓的储粮温度场分布规律, 本文建立了地上浅圆仓和地下仓的粮堆数学分析模型, 并通过现场实验结果验证了模型的有效性。以此为基础建立了半地下双层浅圆仓数值模型, 分析低温入粮后静态储藏1年期间的粮堆温度场变化规律。结果表明: 半地下双层浅圆仓地上层靠近仓壁2 m内的粮温受外界气温影响变化明显, 温度范围在10.62~27.37 °C, 地下层粮温常年处在准低温状态, 平均温度不超过地下恒温区温度17 °C; 入冬时地上层粮堆在距仓壁1~3 m之间会短期形成一个热量聚集区, 导致近仓壁处粮堆温差较大, 随后外围区温度缓慢降低, 形成“热心冷皮”; 仓壁的保温隔热措施可有效减小气温对粮温的影响, 地上层夏季最高粮温较未做保温的地上浅圆仓低3.86 °C左右。研究结果可为半地下双层浅圆仓的推广应用提供技术支持。

关键词: 半地下双层浅圆仓; 静态储粮; 温度场; 数值分析; 验证

中图分类号: TS210; S379 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2024)01-0153-08

网络首发时间: 2023-12-27 15:01:44

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/11.3863.TS.20231226.1729.012>

Numerical Analysis of Temperature Field of Static Grain Storage in Semi-underground Double-storey Squat Silos

JIN Li-bing¹, ZHU Dou-dou¹, LI Chuang¹, WU Qiang², WANG Yu-hang¹, ZHANG Wei-bo¹

(1. College of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou, Henan 450001, China;

2. Henan University of Technology Design and Research Academy CO., LTD, Zhengzhou, Henan 450001, China)

Abstract: Grain temperature is one of the most important factors that affect the safety of grain storage. In order to reveal the distribution rule of grain storage temperature field in semi-underground double-storey squat silos(SUDSSS), the mathematical analysis models of the grain piles of the ground squat silo and the underground silo are established respectively in this paper, and the validity of the models is verified by the field test results. A numerical model of the SUDSSS was established. Through numerical analysis, the

收稿日期: 2023-08-10

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(232103810080; 232102110266; 232102320014)

Supported by: Key Research and Development Project of Henan Province (No. 232103810080; 232102110266; 232102320014)

作者简介: 金立兵, 男, 1976年出生, 博士, 教授, 研究方向为混凝土结构与新型仓储结构基本理论和长期性能。E-mail: jinlb@haut.edu.cn

temperature field variation rule of the grain pile during the 1-year static storage of the SUDSSS after low-temperature grain storage was acquired by numerical analysis. The research demonstrates that the grain temperature within 2 m of the above-ground part of the SUDSSS close to the silo wall varies significantly because of the influence of the outside air temperature, and the temperature from 10.62 to 27.37 °C. The grain temperature in the underground part is in a quasi-low temperature state all the year round, and the average temperature does not exceed 17 °C of the temperature in the underground constant temperature zone. At the beginning of the winter, a heat accumulation area will be formed in the upper storey of the ground between 1 ~ 3 m from the warehouse wall in a short period of time, leading to a large temperature difference in the grain pile near the warehouse wall, and then the temperature in the peripheral area will slowly decrease, forming a 'hot core and cold skin', and the thermal insulation measures of the silo wall can effectively reduce the influence of temperature on the grain temperature. The highest grain temperature in the upper storey in summer is about 3.86 °C, lower than that of the shallow silo without thermal insulation. The research results can provide technical support for the popularization and application of the SUDSSS.

Key words: semi-underground double-storey squat silos; static grain storage; numerical analysis; temperature field; verification

粮食品质劣变、发热、害虫繁殖等都与粮食温度密切相关，进而影响粮食品质^[1]。为了实现自然准低温储粮，本文提出了一种新仓型，即半地下双层浅圆仓，地下部分可充分利用浅层地能，对保证粮食品质有重要意义^[2]。对半地下双层浅圆仓储粮的温度场进行研究分析，为其推广应用提供参考。

国内外尚未发现对半地下双层浅圆仓温度场的相关研究，对储粮温度场的研究大多局限于普通地上粮仓。在数值模拟方面，通过运用计算流体力学（Computational Fluid Dynamics, CFD）方法，模拟了机械通风过程中的粮堆温度和水分迁移过程，得到了粮食储藏的热质传递规律^[3-4]；戚禹康等^[5]同时考虑了粮堆和粮粒两种尺度，采用数值分析研究了稻谷静态储藏下外界气温和粮堆内部自然对流对温度和水分分布的影响。在实验研究方面，田琳等^[6]通过现场实验的方法分析了浅圆仓储粮一年期间粮温在水平和垂直方向上的变化，并根据露点和温差评估了粮堆表层的结露风险；Iguaz 等^[7]建立了一个小型筒仓研究大米储藏期间的温度和含水量变化。在实验和数值模拟相结合方面，王振清等^[8]、金立兵等^[9]利用 CFD 模拟软件建立了地下仓静态储粮温度场预测的数学模型，根据模型计算结果和实测数据对比分析，

验证了模型的准确性；张昊等^[10]通过数值模拟的方法分别研究了高水分粮堆在静态储藏和通风阶段的温度变化，发现温度场变化形式与风道设置和送风方式有关，并通过实验进行了验证。

采用现场实验和数值分析相结合的方法，研究了半地下双层浅圆仓静态储粮时的温度场变化规律；并与传统地上浅圆仓和地下仓粮堆温度场进行对比，为半地下双层浅圆仓的推广应用提供支持。

1 温度场分析的数学模型

1.1 理论基础

粮仓外土体、外界空气、仓壁、粮仓内部空气域之间的热量传递，以及空气流动产生的温差等因素都会导致仓内粮堆温度场的变化，为在软件中描绘该传热过程，将其简化为非稳态传热，并由以下方程加以控制：

连续性方程：

$$\varphi \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \Delta \cdot (\rho_f u_m) = 0 \quad \text{式 (1)}$$

动量守恒方程：

$$\rho_f \left[\varphi^{-1} \frac{\partial u_m}{\partial t} + \varphi^{-2} (u_m \cdot \Delta) u_m \right] = -\Delta \rho - \frac{\mu}{\kappa} u_m + F \quad \text{式 (2)}$$

能量守恒方程：

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f u_m \cdot \Delta T = \Delta \cdot (\kappa \Delta T) + q_m \quad \text{式 (3)}$$

式中： ρ 为密度， kg/m^3 ； t 为时间， s ； u_m 为速度， m/s ； ϕ 为孔隙率； μ 为黏度， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； F 为流体在多孔介质中所受的合力， N ； c 为比热容， $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ； κ 为导热系数， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； m 为固体骨架； q_m 为热量， J 。

在静态储粮过程中，由于外界温度变化造成粮堆温度变化，从而导致空气流动。空气在粮堆内流动需克服粮食的阻力，故在模型中增加一个动力源项来表示空气流动时的阻力。

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{\rho_a}{2} |v_n| v_j \quad \text{式 (4)}$$

式中： α 是渗透系数； μ 是空气分子黏性， $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ； C_2 是内部阻力因子； v 是速度， m/s ； v_n 是平均速度， m/s ； i, j 代表网格方向。

α 、 C_2 表示为：

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad \text{式 (5)}$$

$$C_2 = \frac{3.5(1-\phi)}{D_p} \frac{1}{\phi^3} \quad \text{式 (6)}$$

式中： D_p 为粮食颗粒平均直径， mm ； ϕ 为粮堆孔隙率。

1.2 模拟参数设置

1.2.1 外界环境温度

在静态储藏过程中，半地下双层浅圆仓地下层主要受地下恒温区温度影响，郑州地区恒温带深度为 27.36 m，恒温带温度 $17\text{ }^\circ\text{C}$ ，全年温度变化不超过 $0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ，1.3 m 深处地温值多在 $17\sim 18\text{ }^\circ\text{C}$ 之间^[11]，故假设半地下双层浅圆仓地下层处于 $17\text{ }^\circ\text{C}$ 的恒温区域中。粮仓地上层仓内温度主要受外界气温影响，为更好地与实验结果对比，将实验周期内实测气温（见图 1）作为地上层仓壁的外界环境温度，以插值函数的形式输入模型中，将上年 12 月底的气温作为地上层仓壁的初始温度。

1.2.2 仓壁边界条件

半地下双层浅圆仓在静态储粮时，粮仓内温度场的变化主要是由于外界环境温度影响仓壁温度，进而改变粮堆温度。地下层处在地下，可以忽略空气温度的影响，粮仓的传热主要考虑土壤、

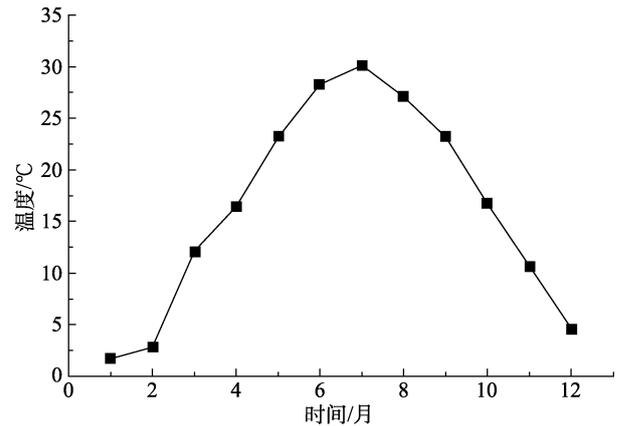


图 1 2019 年实验期间实测外界月平均气温

Fig.1 Measured outside monthly average temperature in real time during the experiment in 2019

仓壁和粮堆之间的热传导。地上层粮堆与外界环境热量传递的形式主要有太阳辐射和对流传热，故仓壁的热传递过程可用下式表示^[12]：

$$q = h_m(T_w - T_f) + q_{\text{rad}} \quad \text{式 (7)}$$

式中： h_f 为流体对流换热系数； T_w 为仓壁外表面温度； T_f 为仓壁内表面温度； q_{rad} 为仓壁外表面辐射热流量。

1.2.3 隔热材料属性

混凝土的导热系数为 $0.79\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，计算地上浅圆仓的仓壁传热系数为 $3.16\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。为保证半地下双层浅圆仓地上层有更好的储粮环境，对仓壁和仓顶采用聚氨酯复合板做保温隔热措施。聚氨酯复合板的厚度仓壁外侧为 35 mm、仓顶内外两侧分别为 30 mm，仓壁和仓顶的传热系数分别为 $0.55\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、 $0.36\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ，上述标定的传热系数均符合低温储藏的标准。

使用有限元软件模拟粮堆温度场变化时，各种材料的属性参数以及边界条件的选取，对模拟结果的准确性有很大影响，本文的具体参数选取见表 1。

1.3 模型建立

1.3.1 几何参数设定

半地下双层浅圆仓仓壁内径 25 m，中心筒内径 2.5 m，锥底高 3 m，地下层仓壁高 16 m，装粮高度 13 m；地上层仓壁高 18 m，装粮高度 15 m，中间连接隔板厚 0.5 m，建立几何模型。半地下双层浅圆仓采用钢筋混凝土筒体结构，并且用聚氨

表 1 数值模拟各材料参数选取
Table 1 Numerical simulation of the selection of material parameters

材料	参数
混凝土	密度 $\rho_c=2\ 500\ \text{kg/m}^3$, 比热容 $C_c=1\ 000\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 导热系数 $\lambda_c=0.79\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
聚氨酯复合板	密度 $\rho_s=35\ \text{kg/m}^3$, 比热容 $C_s=1.38\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 导热系数 $\lambda_s=0.024\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$
小麦	密度 $\rho_g=750\ \text{kg/m}^3$, 比热容 $C_g=1\ 780\ \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, 导热系数 $\lambda_g=0.13\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 孔隙率 $\phi=0.468$

注：聚氨酯复合板为半地下双层浅圆仓地上层的保温隔热材料。

Note: Polyurethane composite board is a thermal insulation material for the upper storey of SUDSSS.

酯复合板为与外界空气直接接触的地上层仓顶及仓壁做保温隔热措施。

1.3.2 网格划分

由于半地下双层浅圆仓具有高度的旋转对称性,为了简化模型,节约计算资源,利用 COMSOL 有限元软件建立半地下双层浅圆仓的二维旋转对称模型,对模型采用非结构化网格划分,并且进行局部加密处理,共划分为 3 600 多个单元,如图 2 所示。

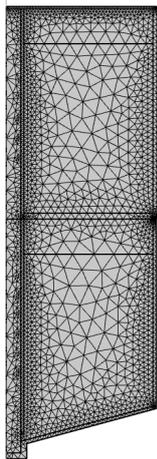


图 2 半地下双层浅圆仓二维旋转对称模型及网格划分
Fig.2 2D rotational symmetry model and mesh division of semi-underground double-storey squat silo

1.3.3 边界条件设定

假设半地下双层浅圆仓与实验所用地面上浅圆仓和地下仓都位于河南省郑州市某粮食产业园区内,于冬季低温入粮,并且上下两层均装粮。由于郑州市 10 月份的月平均气温约为 $15\ ^\circ\text{C}$,略低于平均地温,故以 $15\ ^\circ\text{C}$ 为粮堆的初始温度,忽略粮食的自呼吸作用,假设气体为理想气体;地上层环境温度设定见图 1,地下层仓壁温度设定为 $17\ ^\circ\text{C}$,小麦、隔热板、仓壁相关参数见表 1,通过 COMSOL 软件模拟了半地下双层浅圆仓静

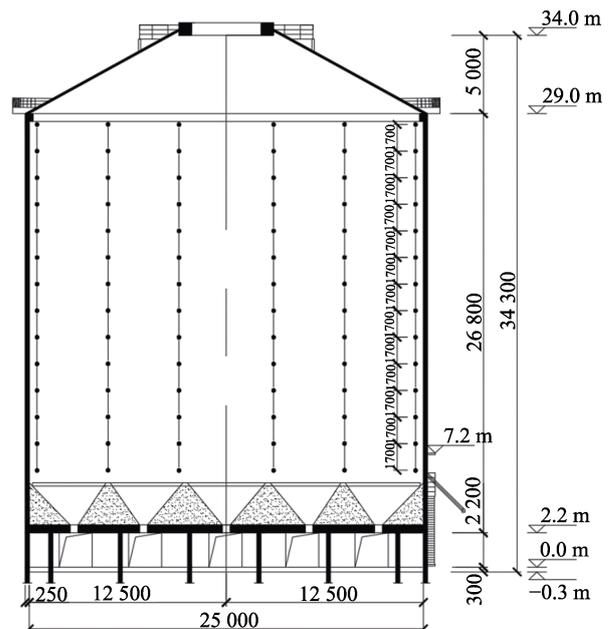
态储粮一年内的温度变化情况,并与地上浅圆仓和地下仓进行对比。

2 温度场数值分析与验证

2.1 现场实验

用于现场实验的地上浅圆仓和地下仓同位于河南省郑州市某粮食产业园区内,且均为钢筋混凝土筒体结构。地上浅圆仓内径 25 m,仓内檐高 29 m,仓顶高 34 m,仓壁厚 0.25 m,装粮高度 21 m,单仓仓容约 7 000 t(以小麦计);地下仓仓底为圆锥形,仓壁内径 25 m,仓壁厚 0.25 m,仓顶上部覆土厚度为 1.5 m,仓壁厚 0.35 m,仓底深度为 20.06 m,单仓仓容约 5 000 t(以小麦计)。

在地上浅圆仓和地下仓内埋设测温电缆,并且布置温度传感器来监测实验仓内的温度变化。地上浅圆仓的温度测点布置如图 3 所示,由上到



注：其余未标注单位为 mm。

Note: The other units are mm.

图 3 浅圆仓测点布置图
Fig.3 The cable layout of shallow round silo

下共有 14 层，每层间隔 1.7 m，其中 1~4 层为仓内空气温度，其余为粮堆温度；每层有 23 个温度测点，其中核心区 2 个，中间区 7 个，外围区 14 个，外围区测点距仓壁 0.5 m。地下仓的温度测点由上到下共分为 8 层，每层有 24 个测点，其中核心区 4 个，中间 8 个，外围区 12 个，外围区测点距仓壁 0.5 m，见图 4。

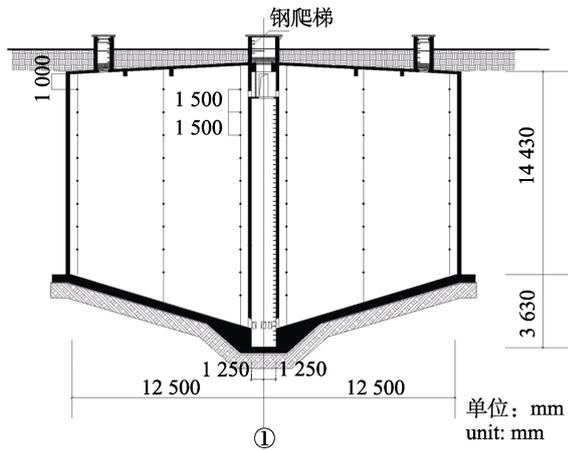


图 4 地下仓测点布置图

Fig.4 The cable layout of underground silo

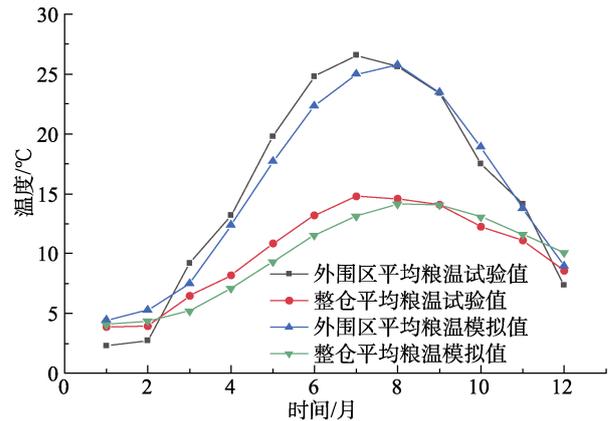
地上浅圆仓为常规储藏，于 12 月份进行机械通风降温，将整仓平均粮温降低至 3.88 °C，后进行连续一年的静态储粮；地下仓在连续一年的实验期间未储粮，为空仓状态。通过地上浅圆仓每周一次、地下仓每天一次的温度监测，获取了连续一年的实验仓温度数据。

2.2 模拟结果与实验对比

采用本文所建立的模拟方法，设置相应边界条件，对现场实验周期内地上浅圆仓和地下仓的温度场进行预测，与实验结果对比，以验证模型的准确性。由于粮堆体积较大，外界环境温度对粮堆不同区域的影响程度不同，选择温度变化较大的区域对比以增加可信度，地上浅圆仓选择平均粮温以及外围区粮温进行对比，地下仓则选择平均仓温及装粮线处仓温，结果如图 5 所示。

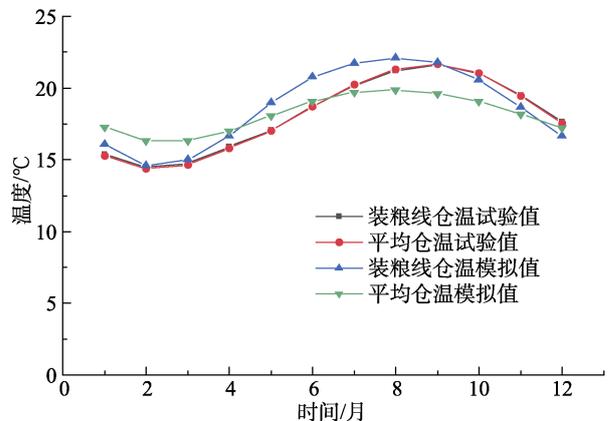
由图 5 可以看出，地上浅圆仓外围区粮温易受外界气温影响，年变化幅度很大，在 7 月份达到最高，为 26.57 °C，而整仓平均粮温变化较小，在 3.88~14.79 °C 之间；地下仓在未装粮的情况下，仓内温度年变化幅度很小，常年稳定在 20 °C

以下，最高为 21.66 °C，说明地下仓的储粮环境安全稳定，有利于保证粮食品质。通过将实验数据与模拟结果进行多方面对比，可以发现两者曲线吻合较好，误差在合理范围内，说明本文建立的有限元模型对地上和地下粮仓温度场的模拟均有较好的效果，可以用于半地下双层浅圆仓温度场的预测。



(a) 浅圆仓平均及外围区粮温对比

(a) Comparison of average and peripheral grain temperature in shallow round silo



(b) 地下仓平均及装粮线处仓温对比

(b) Comparison of average and surface storey granary temperature in underground silo

图 5 浅圆仓和地下仓一年内温度变化模拟与实测结果对比

Fig.5 Comparison of simulated and measured temperature changes in shallow round silo and underground silo in one year

3 静态储粮的温度场分析

根据半地下双层浅圆仓的工程实际确定物理模型参数，建立半地下双层浅圆仓的储粮温度场数值分析模型，计算静态储粮一年内温度变化结果并进行分析。

3.1 低温入粮时仓内温度分布

通过分析得到半地下双层浅圆仓静态储粮一

年的温度场变化，详见图 6 所示云图。地上层粮堆温度易受外界气温季节性变化影响，在储粮 6 个月时，外界气温较高，仓内空气受影响后温度上升较为明显，但由于粮食是不良导体，所以仅仓壁附近小范围内粮温较大幅度上升，并且缓慢向内部扩散；在储粮 12 个月时，外界气温较低，靠近仓壁处的粮温也有明显降低，但由于粮堆内的热量未能及时散出，会在仓壁附近形成相对高温区。地下层粮堆由于仓壁处在地下 17 °C 的恒温区域，并且上层储藏低温粮，相当于长期处在一个温度较低的封闭区域，所以在一年的静态储粮期间，地下层粮堆温度没有明显的变化。

由于半地下双层浅圆仓地上层靠近仓壁处的粮温受外界影响较大，为了更直观地分析外界气温对粮温的影响范围和深度，研究地上层粮堆高

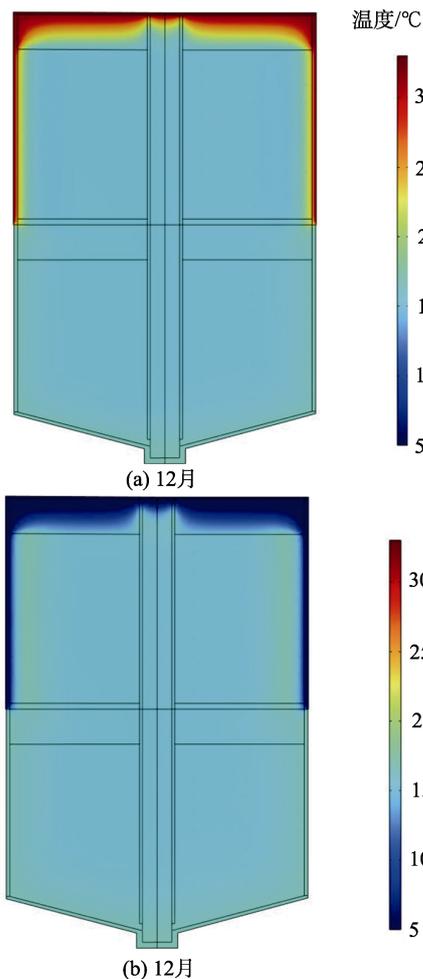


图 6 半地下双层浅圆仓温度场云图

Fig.6 The temperature contours of semi-underground double-storey squat silos

度为 7.5 m 平面上延径向方向的粮温变化情况，结果如图 7 所示。

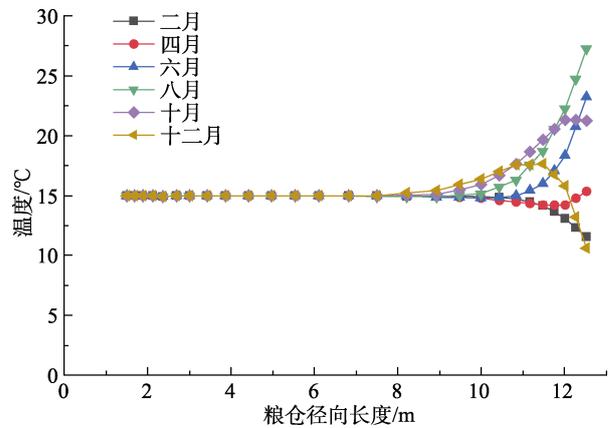


图 7 地上层粮堆高 7.5 m 处沿径向方向粮温分布

Fig.7 Grain temperature distribution along the radial direction at the height of 7.5 m above ground grain pile

由图 7 可知，在一年的静态储粮期间，地上层粮堆温度仅靠近仓内 2 m 内的区域有较大变化，而其他区域粮温变化很小。在 6-10 月，由于外界环境持续高温，近壁面处粮温随之升高，在 8 月份时外界气温达到 1 年内的最高值，壁面处粮温也达到最高为 27.37 °C。在 10-12 月，外界气温开始下降，近壁面处粮温也随之下降，但由于粮堆内部热量传递较慢，夏季聚集的热量无法及时散出，在 12 月份时距仓壁 1~3 m 处形成了一个明显的高温区域，高温区温度为 17.5 °C 左右，并逐渐向内部移动。由此可见，靠近仓壁 2 m 范围内粮温变化很大，并且粮堆温差也较大，要做好温度监测以及预防结露工作。

3.2 半地下双层浅圆仓与地上浅圆仓和地下仓的储粮温度场对比

为了分析半地下双层浅圆仓的储粮效果，以及相对于传统地上浅圆仓和地下仓的优势所在，将半地下双层浅圆仓地上层模拟结果与地上浅圆仓实验结果对比，地下层模拟结果与地下仓装粮后的模拟结果对比，如图 8~9 所示。

由图 8 可知，在连续一年的静态储粮期间，地上浅圆仓的粮温变化受外界气温影响很大，而半地下双层浅圆仓地上层的粮温较为稳定。地上浅圆仓外围区粮温夏季时最高可达 26.57 °C，而由于半地下双层浅圆仓地上层仓壁和仓顶均做了

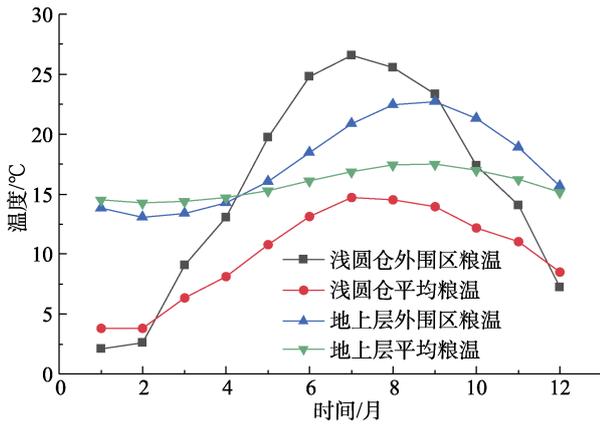


图 8 地上层外围区和平均粮温与浅圆仓对比图

Fig.8 Comparison of the peripheral area and the average grain temperature of the above-ground part with the shallow round silo

保温隔热处理, 仓壁传热系数较小, 仓内外热量交换较慢, 外围区最高粮温为 22.71 °C, 可见仓壁的传热系数是影响粮温的重要因素。由图 9 可知, 在连续一年的静态储粮期间, 对比半地下双层浅圆仓整仓平均粮温, 发现地下层的平均粮温上升速度也要小于地下仓, 地下层表层粮温变化幅度要明显小于地下仓的表层粮温, 主要是由于地下仓通过仓顶覆土与外界空气进行热质交换, 而半地下双层浅圆仓地上层储藏的是低温粮堆, 起到保温的作用。由此可知, 该半地下双层浅圆仓地下层和地下层储粮环境都优于传统地上仓型, 并且有容量大, 单位用地储粮多的优点; 在仓壁和仓顶进行保温隔热处理, 可以有效降低储粮的平均温度, 改善储粮性能。

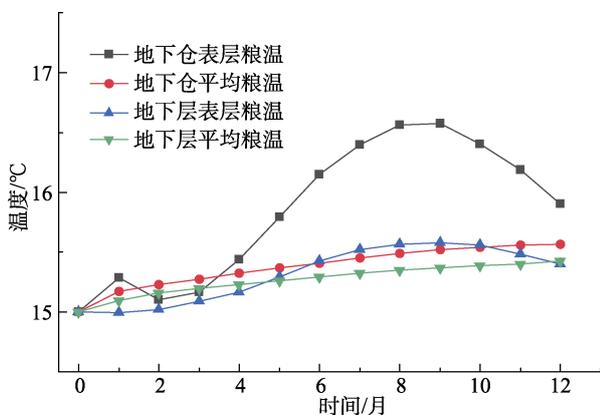


图 9 地下层表层和平均粮温与地下仓对比图

Fig.9 Comparison of the surface storey and the average grain temperature of the underground part with the underground silo

4 结论

(1) 通过对浅圆仓和地下仓的现场实验数据与数值模拟结果对比分析, 验证了本文建立的数学分析模型的正确性, 可有效分析半地下双层浅圆仓的储粮温度场。

(2) 半地下双层浅圆仓地上层粮堆平均温度整体变化不大, 仅靠近壁面 2 m 内的粮温波动较大, 并且冬季在靠近壁面会形成一个热量聚集区; 地下层由于处在一个相对封闭的低温区域, 粮温整年都处于准低温状态; 说明半地下双层浅圆仓有更优的储粮环境, 能够更好地保证粮食品质。

(3) 由于保温隔热措施能够减小外界环境温度的影响, 相比地上浅圆仓, 半地下双层浅圆仓地上层平均温度与外围区温度的温差小, 地上层外围区温度变化范围小。相比地下仓, 半地下双层浅圆仓地下层表层温度变化范围小。

参考文献:

- [1] 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 X M, WU W F, YIN J, et al. Research on temperature and humidity field change during corn bulk microbiological heating[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 268-273.
- [2] 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 Z Q, CHUAI J, LIU Y Co, et al. Current situation and new progresses of structure design of underground silos[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(5): 132-138.
- [3] ROCHA K S O, MARTINS J H, MARTINS M A, et al. Three-dimensional modeling and simulation of heat and mass transfer processes in porous media: an application for maize stored in a flat bin[J]. Drying Technology, 2013, 31(10): 1099-1106.
- [4] 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 G X, ZHANG H W, WANG H T, et al. Numerical simulation of coupled heat and moisture transfer in stored grains during cooling ventilation by using COMSOL[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(11): 79-85.
- [5] 戚禹康, 王远成, 鲁子枫, 等. 稻谷自然储藏多尺度热湿耦合传递研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(6): 109-113.

- QI Y K, WANG Y C, LU Z F, et al. Multi-Scale coupled heat and moisture transfer in natural grain storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(6): 109-113.
- [6] 田琳, 张海洋, 谢维治, 等. 广东地区浅圆仓玉米粮堆温度分布规律研究[J/OL]. 中国粮油学报: 1-11[2022-11-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20220802.1250.006.html>
- TIAN L, ZHANG H Y, XIE W Z, et al. Study on temperature distribution of corn grain mass in squat silo in guangdong[J/OL]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association: 1-11[2022-11-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2864.TS.20220802.1250.006.html>
- [7] IGUAZ A, ARROQUI C, ESNOZ A, et al. Modelling and validation of heat transfer in stored rough rice without aeration [J]. Biosystems Engineering, 2004, 88(4): 429-439.
- [8] 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 Z Q, YIN P, ZHENG J H. Computational fluid dynamics simulation of storage temperature field in a non-ventilated underground granary[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(1): 170-174+296.
- [9] 金立兵, 段海静, 薛雅琪, 等. 地下生态粮仓中粮食温度场的实验与数值仿真[J]. 现代食品科技, 2021, 37(1): 111-116+83.
- JIN L B, DUAN H J, XUE Y Q, et al. Experiment and numerical simulation of grain temperature field in underground ecological granary[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(1): 111-116+83.
- [10] ZHANG X, ZHANG H, WANG Z, et al. Research on the temperature field of grain piles in underground grain silos lined with plastic[J]. Journal of Food Process Engineering, 2022, 45(3): e13971.
- [11] 王春喜. 郑州地区土壤源热泵建筑应用的可行性分析[J]. 墙材革新与建筑节能, 2011(1): 53-56+5.
- WANG C X. Feasibility analysis of the ground source heat pump building application in Zhengzhou[J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2011(1): 53-56+5.
- [12] 张忠杰, 李琼, 杨德勇, 等. 准静态仓储粮堆温度场的 CFD 模拟[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(4): 46-50.
- ZHANG Z J, LI Q, YANG D Y, et al. Temperature field simulation of stored bulk grain by CFD method[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(4): 46-50. 完

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。