

地下生态粮仓中粮食温度场的试验与数值仿真

金立兵¹, 段海静¹, 薛雅琪¹, 王振清¹, 吴强²

(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, 河南郑州 450001)

摘要: 粮温是影响粮食安全的重要因素, 论文采用地下模拟试验、工程性试验与数值仿真相结合的方法, 研究了地下生态粮仓的粮食温度变化规律。通过在试验仓内布设测温电缆, 定时定点监测温度, 获取仓内各测点的温度变化规律。以地下储粮环境条件为基础, 构建了模拟试验仓的物理模型, 用数值方法分析了仓内粮食的温度场, 并与试验结果对比, 验证了数值方法的有效性。据此对工程性试验仓不同入仓时间的粮食温度场进行了数值分析, 发现地下粮仓入粮应优先选择冬季, 夏季入粮时因粮温较高应采取适当方式(如机械通风)降低粮食温度, 以实现低温储藏。研究表明: 埋深较深的工程性试验仓的储粮效果优于模拟试验仓; 地下生态粮仓内粮食温度随着储存时间的增加基本保持稳定, 且逐渐趋于地温; 模拟试验仓粮温稳定在 20℃左右, 工程性试验仓粮温稳定在 17℃左右, 而对应地上仓平均粮温在 25℃左右, 局部粮温高达 30℃, 随季节变化较大。因而地下生态粮仓具有恒低温储粮的优势, 有利于保证粮食品质和储粮安全。

关键词: 地下生态粮仓; 现场试验; 数值仿真; 温度场

文章编号: 1673-9078(2021)01-111-116

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.01.0670

Experiment and Numerical Simulation of Grain Temperature Field in Underground Ecological Granary

JIN Li-bing¹, DUAN Hai-jing¹, XUE Ya-qi¹, WANG Zhen-qing¹, WU Qiang²

(1. School of Civil Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

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

Abstract: Grain temperature is an important factor affecting grain security. The variation of grain temperature in underground ecological granary was analyzed by combining simulation test silo, engineering test silo and numerical simulation. The temperature change law of each measuring point was obtained by setting up the measuring cables in the test silo and monitoring the temperature at regular time. Basing on the boundary conditions of grain storage environment, the physical model of underground simulation test warehouse was established, and the grain temperature field in the warehouse was analyzed by numerical method. The effectiveness of numerical simulation method was verified by comparing with the test results. By using the same numerical simulation method, the grain temperature field of underground-engineering-test warehouse with different entry time was analyzed; it was found that loading in winter was better than in summer. In order to realize low temperature grain storage, appropriate ways (such as ventilation in the winter) should be taken for the grain to reduce the grain temperature, because the temperature was high in summer. It was found that the grain storage effect of deep underground silo (engineering test silo) was better than that of shallow depth underground silo (simulation test silo). The grain temperature in the underground ecological granary was gradually tended to be stable with the increasing storage time. The grain temperature of simulation test silo was about 20 degrees. The engineering test silo was about 17 degrees. The above-ground silo was about 25 degrees; the local temperature of the above-ground silo was as high as 30 degrees, and varied greatly with the seasons. Therefore, the underground ecological silo had the advantage of constant low temperature grain storage, which could ensure grain quality and grain storage safety.

引文格式:

金立兵, 段海静, 薛雅琪, 等. 地下生态粮仓中粮食温度场的试验与数值仿真[J]. 现代食品科技, 2021, 37(1): 111-116

JIN Li-bing, DUAN Hai-jing, XUE Ya-qi, 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

收稿日期: 2020-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51509084); 粮食公益性行业科研专项 (201413007-01); 河南工业大学土木工程学院科研团队资助

作者简介: 金立兵 (1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 混凝土结构与储仓结构

Key words: underground ecological granary; field test; numerical simulation; temperature field

粮食安全关乎民生大计,中国的国情决定了我国必须构建自己的粮食安全储备体系。地下生态粮仓可以充分利用浅层地能,实现粮食的低温储藏,进而保证粮食品质,同时地下粮仓具有节地、节能、低损耗、无污染的优势。在粮食储存过程中,粮温是影响粮食安全的重要因子,仓内粮堆发热、局部发霉、微生物及害虫的繁衍均与温度息息相关。对粮温的高要求下,地下生态粮仓具有低温储粮、抑制虫害的优势,可长期储存并保持粮食品质^[1,2]。因此利用数值仿真方法系统地分析地下生态粮仓的温度场,可为地下粮仓的推广提供理论依据。

经过国内外学者长期的研究,数值仿真方法可系统地分析储粮环境。Carrera-rodrigue 等^[3]利用多相介质的热量、质量和动量传递方程,通过最小二乘回归得出储粮过程中的瞬态热对流和质量对流的数值分析。Jian 等人^[4,5]利用位于加拿大北方区域的金属钢板仓储小麦长期实测的温度、水分数据得到了粮堆内微气流自然流动使内部水分发生迁移和再分布的规律。JIA 等^[6,7]利用有限元分析方法得出了瞬态条件下粮食温度变化情况的数学模型,探究了由于粮堆内部发热引起的粮堆整体温度的变化规律,通过粮食内部设置温度传感器测定的温度值做实验对比,验证了模型的准确性。王远成等^[8]采用数学分析的方法对影响粮堆内部自然对流、热量传递和水分迁移的因素进行研究,并利用数值模拟验证数学分析的结果,经研究证明数学分析可为仓型设计、储粮生态系统的模拟、仓储技术管理提供借鉴。

该文以地下模拟试验仓(简称:模拟仓)与地下工程性试验仓(简称:工程仓)为研究对象,运用现场监测与数值试验相结合的方法分析模拟仓粮食温度场,预测大仓容工程仓粮食不同入仓时间的温度场变化,对比不同仓容地下生态粮仓的粮食温度,为地下生态粮仓的推广应用与地下空间温度场的研究提供参考。

1 现场试验

1.1 工程概况

模拟仓与工程仓均位于河南省郑州市中牟县河南金地粮食产业园区,均采用钢筋混凝土筒体结构。

模拟仓底部为圆台锥底,直径 5 m,总高度 8 m,仓体壁厚为 0.25 m,总仓容为 83,000 kg(以小麦计,下同)。工程仓在模拟仓附近,位于模拟仓东北侧,

仓底采用圆锥形,单仓内径 25 m,单仓仓容 5,000,000 kg;侧壁厚度为 0.35 m,最低处深度为 20.06 m;顶盖为梁板结构,板厚 0.15 m;粮仓顶部覆土厚度为 1.5 m。工程仓底部均匀设置 8 道通风笼,可通过中心孔顶部进行机械通风,由中心孔和通风笼对粮堆进行降温,实现低温储粮。

1.2 温度监测

在模拟仓仓外、内设置温度传感器收集温度数据,根据模拟仓的高度从上至下分层测温,分为 6 层,每层间隔 1 m;每层 16 个测温点,中心区有 4 个测温点,其余位于外围区,见图 1。

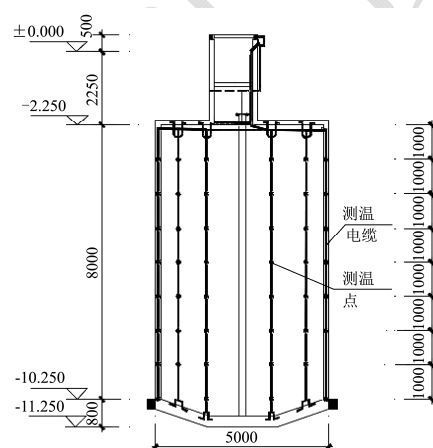


图 1 模拟仓电缆布置图

Fig.1 The cable layout of simulation granary

在工程仓内设置温度传感器,在仓内共埋设测温电缆 24 根,其中核心区 4 根,中心区 8 根,外围区 12 根,每根测温电缆上有 8 个测温点,将粮堆均分为 8 层,见图 2。

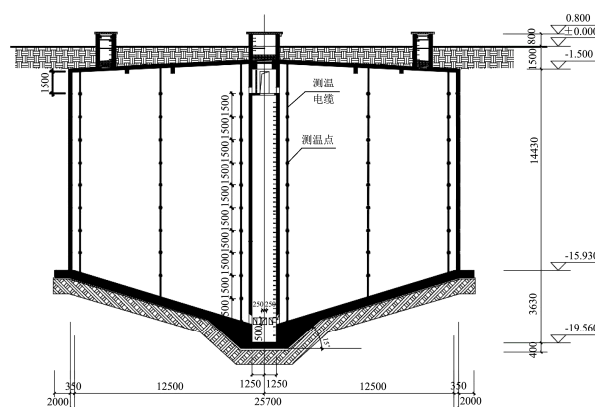


图 2 工程仓电缆布置图

Fig.2 The cable layout of engineering granary

通过一年连续监测得到了模拟仓与工程仓气温、仓温和粮温的变化情况,如图 3、图 4 所示。由图 3~4

可知,气温年变化比较大,夏季温度显著高,冬季温度偏低;仓内温度在气温的影响下发生变化,模拟仓最高仓温与粮温分别为 20.56 °C、19.16 °C,工程仓最高仓温为 21.66 °C;由温度变化图可知,地下生态粮仓仓内温度基本稳定在 20 °C 左右,说明地下生态粮仓可以实现低温储粮。

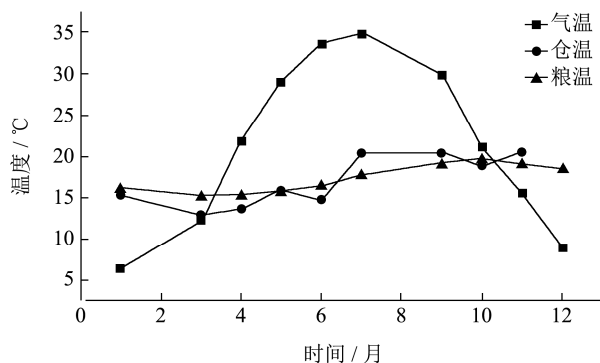


图3 模拟仓气温、仓温、粮温的年变化曲线

Fig.3 The temperature, warehouse temperature, grain temperature annual changes of simulation granary in a year

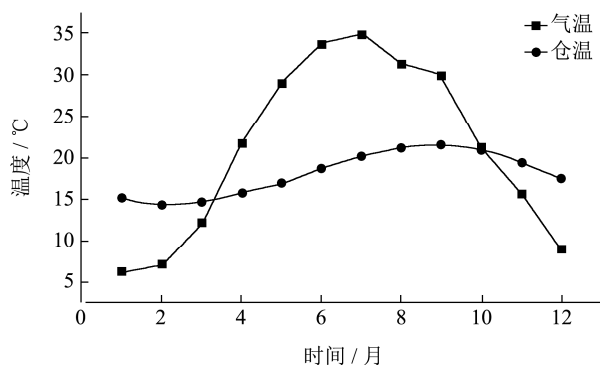


图4 工程仓气温、仓温的年变化曲线

Fig.4 Temperature, warehouse temperature annual changes of engineering granary in a year

2 理论基础

仓外的土体、外界气温变化、壁面与粮堆顶部空气层、粮堆内温度差都会对地下储粮仓仓内温度产生影响,流体流动产生温度差,温度场发生变化,由于气流交换不稳定,简化为非稳态的传热过程,该过程中空气连续性、动量守恒、能量守恒的控制方程为:

空气连续性方程:

$$\varphi \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \Delta \cdot (\rho_f \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

$$\rho_f \left[\varphi^{-1} \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \varphi^{-2} (\vec{u} \cdot \Delta) \vec{u} \right] = -\Delta p - \frac{\mu}{\kappa} \vec{u} + F \quad (2)$$

能量守恒方程:

$$(\rho c)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c)_f \vec{u} \cdot \Delta T = \Delta \cdot (\kappa_m \Delta T) + q_m \quad (3)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; f 为流体; $\vec{u}$ 为速度, m/s ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; μ 为粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; c 为比热容, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; κ 为导热系数; F 为流体在多孔介质中所受合力, N ; φ 为孔隙率; m 为固体骨架; t 为时间, s ; q_m 为热量, J 。

3 数值仿真

利用仿真软件 COMSOL Multiphysics 对地下储粮仓进行数值模拟,得到模拟仓与工程仓温度变化规律。

3.1 参数设置

3.1.1 环境温度

粮堆在非人工干预状态下储存时,外界气温及周围土体都会对其产生影响。郑州位于中原地带,该地区恒温带深度 27 m,恒温带温度 17 °C,全年温度变化不超过 0.5 °C^[9],故假设模拟仓与工程仓处于恒定 17 °C 的温度场中。

3.1.2 边界条件

地下储粮仓仓顶覆土,随着时间的延长,气温影响覆土温度,进而影响到粮仓壁面,导致粮仓内部温度受到影响。粮仓内通过粮仓顶部壁面与外界环境进行热量传递与交换,壁面的热传递用下式表示:

$$q = h_f (T_w - T_f) + q_{\text{rad}} \quad (4)$$

式中: h_f 为流体对流换热系数; T_w 为粮仓壁面温度; T_f 为粮仓内表面温度; q_{rad} 为仓外壁辐射热流量^[10]。

由于粮食颗粒之间存在极小的孔隙,将粮堆视为多孔介质,内外交换的气流在粮堆间进行传递时受到阻力,故在标准的流体流动控制方程中增加一个运动源项表示气流流动时的阻力。

$$S_i = \frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{\rho_a}{2} |\vec{v}| v_j \quad (5)$$

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 ; $\vec{v}$ 是平均速度, m/s ; i, j 代表网格方向。

α 、 C_2 可表示为:

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{\varphi^3}{(1-\varphi)^2} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{3.5 (1-\varphi)}{D_p \varphi^3} \quad (7)$$

式中: D_p 是小麦颗粒平均直径, mm ; φ 是粮堆多孔介质孔隙率^[10,11]。

综上所述,依据墙壁与粮堆的传热性质得出具体参数见表 1。

表 1 仿真模拟具体参数设定

条件		参数设置
墙壁	混凝土	比热容 $C_c=1000\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, 密度 $=2500\text{ kg/m}^3$, 热传导系数 $\lambda_c=3\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$
粮堆	多孔介质	小麦密度 $\rho_g=750\text{ kg/m}^3$, 比热容 $C_g=1780\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, 热传导系数 $\lambda_g=0.13\text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, 粮堆孔隙 $\varphi=0.468^{[12]}$

3.2 模拟仓粮堆温度场的数值仿真

由于小麦粮堆传热、传质过程是复杂的瞬态变化，故为了简化计算，本文在模拟过程中做以下基本假设：忽略粮食颗粒的自主呼吸；假设模拟仓所处环境为 17℃ 的温度场中，忽略气温对地温的影响；假设气体为理想气体。

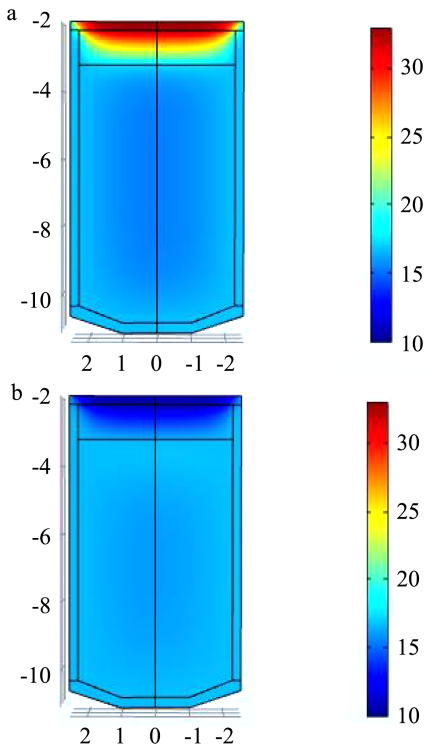


图 5 模拟仓粮堆温度场云图

Fig.5 The temperature contours of simulation granary

注：a：6 月；b：12 月。

建立模拟仓物理模型，装粮线距离仓顶板 1 m；将图 3 中的气温数据作为环境温度的边界条件；由于地下生态粮仓装粮时间为 12 月，此时外界温度为 8.92℃，将此作为装粮入口的初始温度；壁面参数及多孔介质参数见表 1，划分网格，得到模拟仓粮堆温度场云图，见图 5。由图 5 知，表层温度极易受外界环境变化的影响，随着温度的变化而呈正相关变化，夏季表层温度最高，冬季表层温度最低；随着储存时间的延长，粮温逐渐趋向于所处恒温层的温度。粮食是不良导体，粮食颗粒间的热传递交换相对较慢。地下粮仓主体结构的热传导性大于粮食的热传导性，外界温度变化时对粮堆的冷热传递作用主要发生在粮堆

靠近墙壁表面的区域，对粮堆内部的热质交换比较缓慢，形成粮堆中心与仓体壁的分层现象，导致 6~9 月出现热皮冷心现象，12 月~3 月呈现冷皮热心现象。

经过一年的监测，测点（见图 1）测得的温度经计算得模拟仓的平均粮温；根据测点（见图 1）在温度场云图中取值，经过计算得到平均粮温模拟值，将现场监测到的数据与模拟得到的数值对比得图 6。由图 6 可知，模拟仓现场监测的粮温会滞后 2~3 个月，3 月达到最低温度，10 月达到最高温度，主要是由于地下粮仓表层覆土，外界空气与仓内交换存在滞后性；粮温变化范围在 15.17~19.07℃，说明地下储粮仓可达到低温储粮的要求。将模拟值与实测值对比可知，模拟值与实测值变化趋势一致，但最大差值为 2.64℃。在基本假设条件下进行的数值仿真虽存在误差，但说明建立的物理模型所选参数正确，可有效模拟温度场变化规律。

王振清^[13]等人利用流体动力学（CFD）对地下粮仓进行了 5~8 月份的数值模拟与实测结果对比，得粮堆温度在 15~19℃；金立兵^[14]等人通过现场试验与数值模拟相结合的方法研究了地下粮仓 1 年的温度场变化规律，且粮堆温度稳定在 20℃ 以下。与本文研究结果一致，说明数值仿真方法可有效预测地下生态粮仓温度场变化规律。

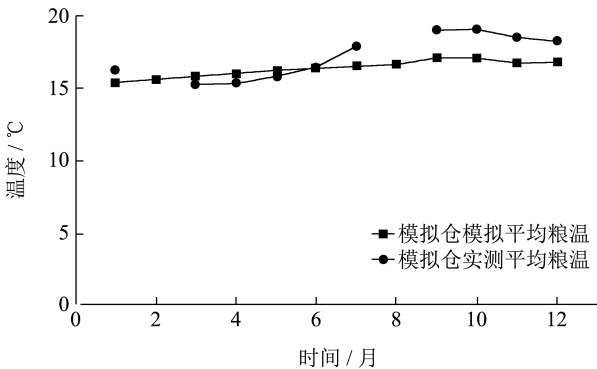


图 6 模拟仓模拟与实测粮温对比图

Fig.6 Comparison of simulated and measured grain temperature in the simulation granary

3.3 工程仓粮堆温度场的数值仿真

工程仓与模拟仓具有相似的地理位置、储粮环境、物理参数，所以可用有限元方法对工程仓进行数值仿真。研究不同入仓时间的粮堆温度场有利于合理选择

入粮时间,故对6月与12月入仓的粮堆进行数值分析。建立工程仓物理模型,装粮线至粮仓顶板的高度为2.1 m;环境边界条件设置见图4,将6月与12月的温度分别作为装粮入口的初始温度;粮仓内壁、多孔介质参数设置参照表1,划分网格,得到工程仓粮堆温度场变化云图。

根据图2的电缆布置图,在模拟得到的温度场云图中取值,通过计算得到平均粮温见图7。6月刚入粮时,粮温迅速降低,第1年粮温下降2.71℃,1年后粮温比较稳定,3年储存期内粮温下降3.62℃。由此可知,高温季节入粮后,粮温虽然会降低,但根据数值仿真分析结果发现无法达到准低温储藏要求,仍需要进行人工降温处理。根据通常采用的降温方式,气温降低后的11月初对粮堆进行72 h不间断机械通风,可将粮温降到16℃,随着储粮时间增长,粮温缓慢变化逐渐趋于稳定,根据分析可得到粮温基本保持在17℃以下。12月入粮时,粮食入仓后粮温变化幅度很小,且稳定在16℃以下。通过对比粮食不同入仓时间粮温可知,冬季入粮更利于实现准静态下的低温储粮。

陈桂香等人^[15]采用流体动力学(CFD)数值模拟方法,研究地下粮仓6月入粮、储存期为1年的粮食温度场变化规律,1年后粮温明显下降,同时也提出夏季入粮时应适当进行机械通风对粮堆降温的建议。与本文的研究结果基本相同。

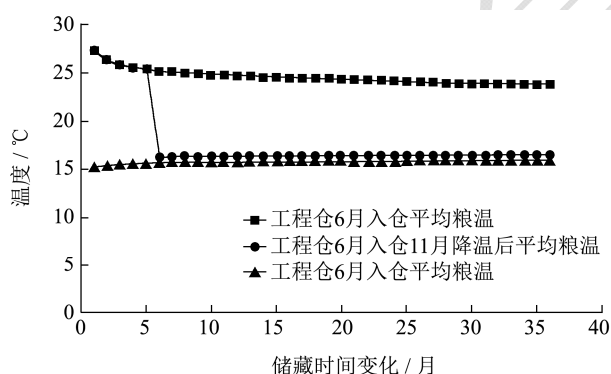


图7 工程仓平均粮温随储存时间变化曲线

Fig.7 The average grain temperature of engineering granary varying with storage time

4 地下生态粮仓与地上仓粮温与对比

某浅圆仓位于郑州市中牟县,与地下生态粮仓位于同一地区,故对比生态粮仓与该浅圆仓的粮温,见图8。浅圆仓的粮温范围为7.63℃~24.13℃,在高温季节局部粮温可高达30℃,不利于粮食的安全储藏。模拟仓与工程仓同为12月入粮,模拟仓与工程仓的粮温范围分别为15.17~19.07℃、15.09~15.64℃。对比

模拟仓与工程仓粮温,工程仓粮温小于模拟仓,工程仓和模拟仓粮温最大差值为3.46℃。对比地下生态粮仓与浅圆仓粮温可知,在高温季节,浅圆仓粮温高于模拟仓,而模拟仓粮温高于工程仓,浅圆仓与模拟仓、工程仓粮温温差可达5.40℃、8.55℃。由此可知,地下生态粮仓的储粮效果优于地上仓,而工程仓的储粮效果优于模拟仓。由图8可知,浅圆仓的粮温变化幅度较大,模拟仓粮温变化幅度较小,工程仓粮温变化幅度较平缓。主要是由于浅圆仓四周受到外界气温的影响较大;地下生态储粮仓表层均有覆土,使得粮仓受到外界环境的影响较小,粮温变化幅度较小。粮食是不良导体,虽然粮食颗粒自主呼吸会产生较小热量,但在粮堆间的传递很缓慢,吨数大的粮堆更不利于热量的传递与流动。通过对比模拟仓与工程仓粮温,说明埋深越深,储粮效果稳定性越好,可为修建大仓容的地下生态粮仓提供理论依据。

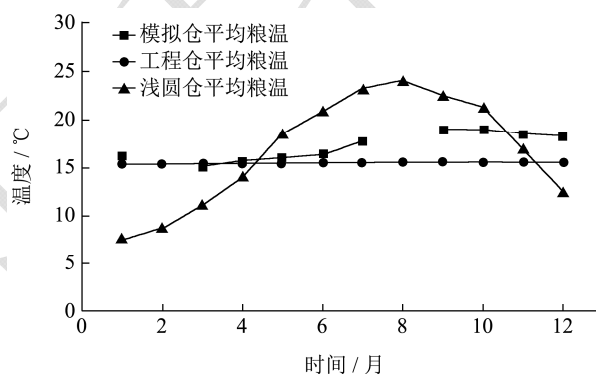


图8 地下生态粮仓与浅圆仓粮温对比

Fig.8 Comparison of grain temperature between underground ecological granary and squat silo

5 结论

本文采用现场试验与数值仿真相结合的方法对地下模拟试验仓与地下工程性试验仓进行研究,得到如下结论:

(1)通过对模拟仓模拟结果与试验数据进行对比分析,验证了本文建立地下生态粮仓物理模型时所选参数正确,数值仿真可有效预测地下生态粮仓温度场变化。

(2)地下生态粮仓仓顶的覆土可以较好地隔绝粮仓与外界的联系,粮堆中心区温度受到外界环境影响较小,仓内储粮环境稳定安全。

(3)根据预测工程仓夏季与冬季粮食入仓后粮堆温度场云图知,粮食高温季节入仓后对粮堆进行机械通风降温后,粮温可稳定在17℃左右;粮食冬季入仓更利于实现准静态低温储粮。

(4)地下生态粮仓的粮堆温度在储存期间逐渐趋

向于所处地层温度,可实现粮食长期的低温储藏,构建我国的粮食安全储备体系。

(5) 经研究得地下模拟试验仓粮温稳定在 20 ℃左右,地下工程性试验仓粮温稳定在 17 ℃左右,而对应地上仓平均粮温在 25 ℃左右,且局部粮温高达 30 ℃,随季节变化较大。对比地上仓与地下生态粮仓的粮温,可知地下仓的储粮效果优于地上仓;对比模拟仓与工程仓的粮温,验证了地下仓埋深较大时,储粮效果更优,达到低温、绿色、安全储粮的要求。

参考文献

- [1] 孙保平,吕有全,程金河.地下仓储粮特性及管理[J].粮油仓储科技通讯,2006,6:19-20
SUN Bao-ping, LYU You-quan, CHENG Jin-he. Characteristics and management of underground granary [J]. Liangyou Cangchu Keji Tongxun, 2006, 6: 19-20
- [2] 吴健美,王红军,宋国华.地下窑洞仓储粮特性及管理措施探讨[J].粮食储藏,2014,43(3):53-56
WU Jian-mei, WANG Hong-jun, SONG Guo-hua. Discussion on characteristics and management measures of grain storage in underground caves [J]. Grain Storage, 2014, 43(3): 53-56
- [3] Carrera-rodriguez M, Martinz-gonzalez G M, Navarrete-bolanos J L, et al. Transient numerical study of the effect of ambient temperature on 2-D cereal grain storage in cylindrical silos [J]. Journal of Stored Products Research, 2011, 47(2): 106-122
- [4] Fuji Jian, Digvir S Jayas, Noel D G White. Temperature fluctuations and moisture migration in wheat stored for 15 months in metal silo in Canada [J]. Journal of Stored Products Research, 2009, 45(2): 82-90
- [5] Fuji Jian, Digvir S Jayas, Noel D G White. Specific heat, thermal diffusivity, and bulk density of genetically modified canola with high oil content at different moisture contents, temperatures, and storage times [J]. Transaction of the ASABE, 2013, 56(3): 1077-1083
- [6] JIA Can-chun, SUN Da-wen, CAO Chong-wen. Mathematical simulation of temperature fields in a stored grain bin due to internal heat generation [J]. Journal of Food Engineering, 2000, 43(4): 227-233
- [7] JIA Can-chun, SUN Da-wen, CAO Chong-wen. Computer simulation of temperature changes in a wheat storage bin [J]. Journal of Stored Products Research, 2001, 37(2): 165-177
- [8] 王远成,潘钰,尉尧方,等.仓储粮堆内部自然对流和热湿传递的数学分析及验证[J].中国粮油学报,2017,32(9):120-125,130
WANG Yuan-cheng, PAN Yu, WEI Yao-fang, et al. Mathematical analysis and validation for natural convective heat and moisture transfer in grain bulk during sealed storage [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2017, 32(9): 120-125, 130
- [9] 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
WANG Chun-xi. Feasibility analysis of the ground source heat pump building application in Zhengzhou [J]. wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2011, 1: 53-56
- [10] 王福军.计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用[M].北京:清华大学出版社,2004
WANG Fu-jun. Computational Fluid Dynamics Analysis-CFD Software Principle and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004
- [11] 王瑞金,张凯,王刚.Fluent 技术基础与应用实例[M].北京:清华大学出版社,2007
WANG Rui-jin, ZHANG Kai, WANG Gang. Fluent Software Technology Foundation and Applications [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2007
- [12] 任广跃,彭威,张忠杰,等.仓储粮堆机械通风时压力场的模拟研究[J].中国粮油学报,2012,27(9):90-95
REN Guang-yue, PENG Wei, ZHANG Zhong-jie, et al. Study on simulation for pressure field under the condition of mechanical ventilation in grain storage [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(9): 90-95
- [13] 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 Zhen-qing, YIN Peng, ZHENG Jia-huan. 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
- [14] 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
JLN Li-bing, XUE Ya-qi, LIANG Xin-ya, et al. Numerical simulation and experiment on temperature field in underground granary [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 40(5): 120-125

(下转第 83 页)