

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.03.023

姚渠, 尹君, 张忠杰, 等. 气膜钢筋混凝土球形仓小麦储粮粮堆温度场云图分析研究[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(3): 200-205.

YAO Q, YIN J, ZHANG Z J, et al. Analysis and research on cloud diagram of temperature field of wheat grain pile in air-film reinforced concrete spherical silo[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(3): 200-205.

气膜钢筋混凝土球形仓小麦储粮粮堆 温度场云图分析研究

姚渠¹, 尹君¹, 张忠杰¹, 李彦伟²

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮食储运研究所, 北京 100037;

2. 山西天舍建筑工程有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 气膜钢筋混凝土球形仓(以下简称“气膜球形仓”)是一种新的仓储结构形式,为探究其在一个储藏周期内的粮情变化情况,以我国首座气膜球形仓为研究对象,以小麦粮堆为研究目标,通过数值拟合重现储藏周期内小麦的径向中垂面温度场云图分布情况。结果表明,气膜球形仓具有良好的隔热保温性能,储粮过程中具有仓温、平均粮温低等特点,在粮堆内部形成巨大且稳定的“冷芯”,有效抑制害虫繁殖活动;在一个储粮周期内,不使用化学药剂熏蒸能安全度夏,这对促进低温绿色储粮技术发展有着积极作用。

关键词: 气膜钢筋混凝土球形仓; 粮温; 温度场; 云图

中图分类号: S379 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)03-0200-06

Analysis and Research on Cloud Diagram of Temperature Field of Wheat Grain Pile in Air-film Reinforced Concrete Spherical Silo

YAO Qu¹, YIN Jun¹, ZHANG Zhong-jie¹, LI Yan-wei²

(1. Institute of Grain Storage & Logistics, Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 2. Shanxi Tianshe Construction Engineering Co., Ltd, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: The air-film reinforced concrete spherical silo (hereinafter referred to as the air-film spherical silo) is a new type of storage structure. In order to explore the effect of the air-film spherical silo in a storage period, this paper takes the first air-film spherical silo in China as a research object and the wheat grain pile as the research target to reproduce the distribution of temperature field cloud map in the radial and vertical plane of wheat in the storage period by numerical fitting. Results showed that the air-film spherical silo had the characteristics of low silo temperature and average grain temperature. A huge and stable “cold core” formed inside the grain pile, effectively inhibiting the reproduction of pests. Therefore, the grains can safely pass the summer without the use of chemical fumigation in a whole grain storage period, which has a positive effect on promoting the development of low-temperature green grain storage technology.

Key words: air-film reinforced concrete spherical silo; grain temperature; temperature field; cloud map

收稿日期: 2021-12-31

基金项目: 校企合作项目(H20051)

Supported by: College-enterprise Cooperation Projects (No. H20051)

作者简介: 姚渠, 女, 1984年出生, 硕士, 助理研究员, 研究方向为粮食储藏与干燥。E-mail: yq@ags.ac.cn.

气膜钢筋混凝土气膜球形仓是由 1/2 圆的圆顶与筒壳组合而成的薄壳结构，它采用鼓风设备向 PVC 膜体内持续鼓风使膜体保持稳定的外形，然后在膜体内依次喷涂粘合剂、聚氨酯泡沫涂层、绑扎钢筋和喷射混凝土，形成一个具有超大无梁无柱的开阔空间的气膜钢筋混凝土结构体系^[1-3]。现这种结构体系被广泛应用于物料仓储、冷库、大型文体中心及办公场馆等场所，由于其构筑灵活、建造周期短、成本低、机械化程度高等优点^[4-8]，近些年，为缓解粮食仓容不足的压力，逐将其引用到粮食储藏领域。随着我国首座气膜球形仓投入储粮应用^[9]，其也成为储粮工作者关注的焦点问题之一。我国是产粮大国，粮食安全是关乎国民生计的基本。粮食的储藏品质是储粮稳定性的重要体现，粮温作为影响粮食储藏品质的重要因素，它随外部环境的变化、热传导、辐射和对流等综合作用，影响着仓内粮食温度梯度的形成，当粮堆温度过高或者梯度过大，加速粮堆内湿热迁移，易引发虫、霉的侵蚀，给安全储粮埋下隐患。追踪气膜球形仓内粮温的总体变化趋势并准确预测粮堆温度场的变化规律，为气膜球形仓在储粮领域的应用提供判断依据和技术支撑，也对气膜球形仓的推广应用具有重大且深远的意义。

近些年，随着我国科学技术的快速发展，国内粮库安装有精确的粮情测控软件，可实时监测粮堆内部各点温度变化情况。但由于受限于储粮环境的复杂性及软件本身系统的技术问题，仓库保管员也仅凭经验寻找“异常粮情点”，再综合判断是否需要处置。对此，尹君等利用多场耦合理论对浅圆仓的粮情云图进行了分析和预测^[10]；金立兵等利用 comsol 软件仿真模拟出地下仓粮温随时间的变化规律^[11]；王小萌等研究了小麦的温、湿度场与粮堆霉变的时空耦合关系^[12]。大量研究表明，粮堆内部温湿度场，可以准确分析预测粮堆内部储粮状态的变化，也逐渐成为实现安全储粮的重要技术手段。但是目前国内对气膜球形仓内粮堆生态系统的研究尚处于空白阶段，需要开展大量的科学研究。

本文以我国首座储粮气膜球形仓为例，持续跟踪了储藏周期内小麦温度数据，绘制温度场云图，采用多场耦合理论原理，分析了仓内温度在时间和空间上的变化规律，以期对气膜球形仓的

储粮过程中的粮情监测作出指导。

1 研究对象和方法

1.1 气膜钢筋混凝土气膜球形仓的物理模型

本文以我国首座气膜球形仓为研究对象，其仓体直径 32 m，仓高 30.45 m，储粮高度 18.5 m，仓体壁厚 0.25 m，仓体的外壁采用 PVC 薄膜，既可防水又可有效反射太阳光；仓壁膜内喷涂 5~10 cm 发泡聚氨酯，其具备良好的隔热保温及防水性能，可有效减少和避免仓外环境湿热对仓内温湿度的影响，以达到粮仓形成防水、气密隔热保温的性能要求；仓地面构造采取 SBS 改性沥青防水卷材，作为防潮处理。气膜球形仓的模型如图 1 所示。

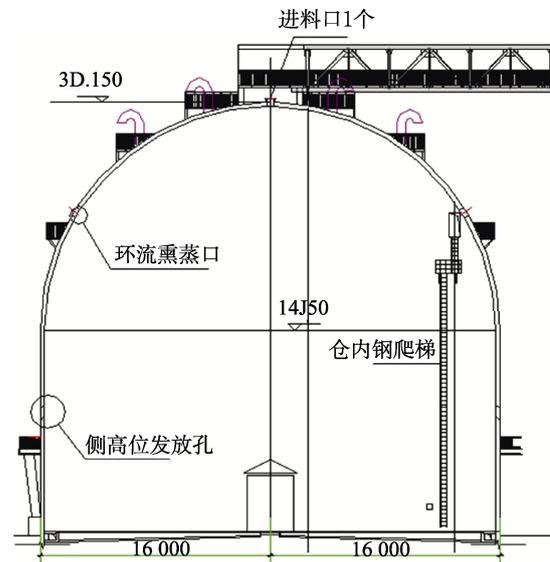


图 1 气膜球形仓的模型图

Fig. 1 Model diagram of a spherical tank with gas film

1.2 储粮粮堆

本仓存储为河南产的混合小麦，小麦入仓时水分为 12.0% w.b.，杂质含量为 0.83%，仓容为 12 430 t。

该气膜球形仓从 2014 年 10 月分批次压仓入粮，于 2015 年 12 月全部入粮完成，并对其机械通风均衡粮温。2019 年 3 月完成出粮，在整个储藏周期内，未使用化学药剂熏蒸。

1.3 温度传感器的结构布置

粮堆内部温度传感器采用环形布置如图 2 所示，由内而外布置 3 圈，内圈至外圈的直径分别为 9.6 m、19.2 m、29 m，每圈均匀布置测温电缆的个数分别为 6、12、18 个，并在仓正中心点布

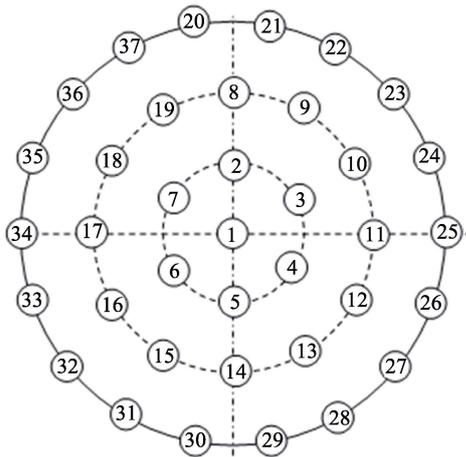


图 2 温度传感器的布置图

Fig.2 The layout of temperature sensor

置 1 根测温电缆，以保证相邻温度传感器间距不
大于 5 m，即共布置 37 根测温电缆。

温度传感器在垂直方向上按不大于 2 m 间距
均匀布置，最高点与粮面、最低点与仓底的距离
均不大于 0.5 m。按照此方法布置，内圈和中圈即
1~19 号测温电缆线上每根布置 10 个测温点，外
圈即 20~37 号测温电缆线上每根布置有 11 个检测
点，即该气膜球形仓共布置 389 个检测点，每天
监测粮温、每周记录一次数据，通风期间，每天
检测并记录一次数据。

1.4 研究方法

首先通过温度传感器监测粮堆各检测点的实
时温度值，选取径向中垂面上的温度数据，利用
MATLAB 软件和粮温拟合算法绘制气膜球形仓内
小麦粮堆径向中垂面温度场变化云图^[13-14] (如图
3~5 所示)，并结合实仓的应用情况对云图进行分析。

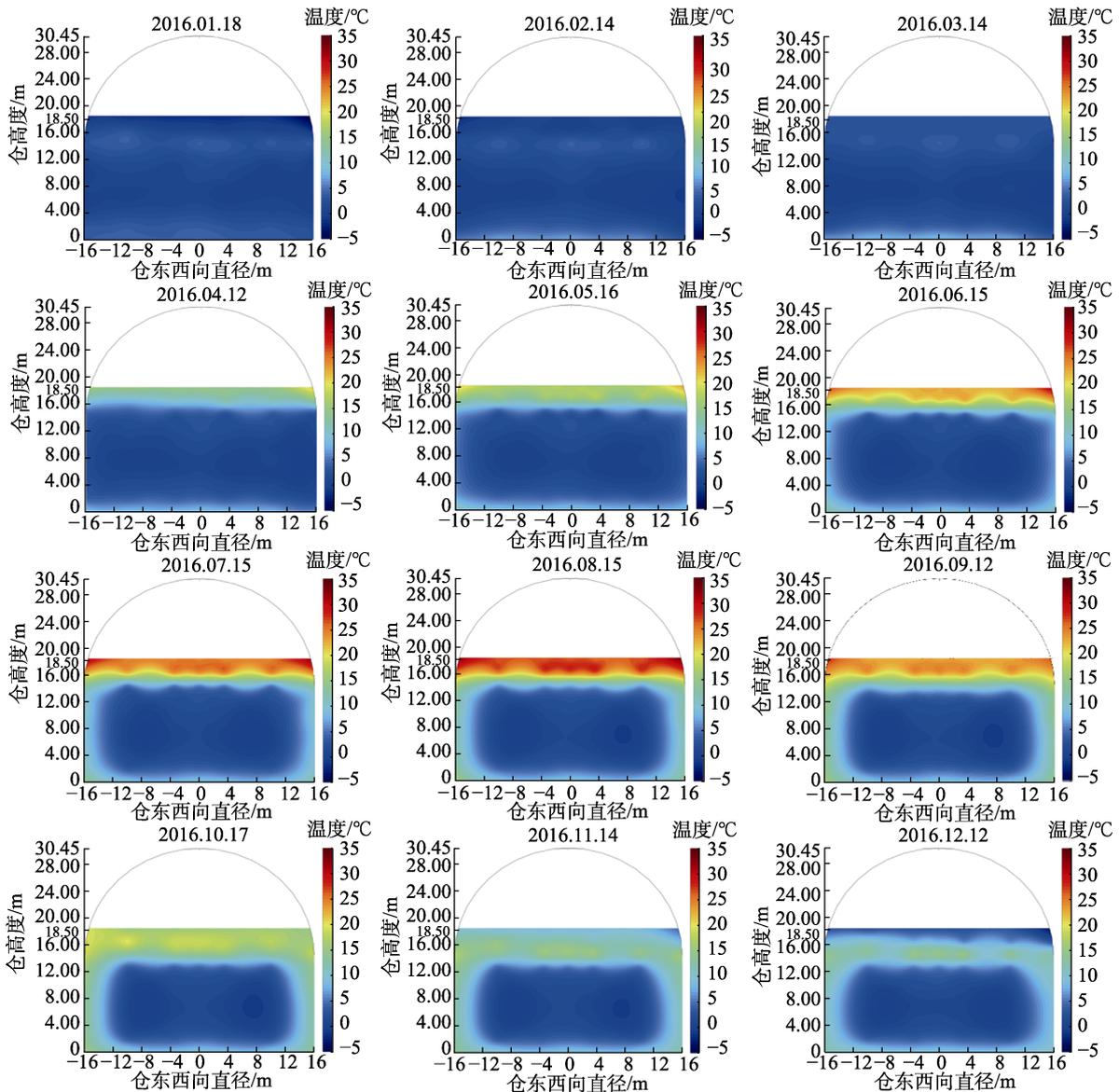


图 3 2016 年度气膜球形仓温度场云图

Fig.3 Cloud map of temperature field of air-film reinforced concrete spherical silo in 2016

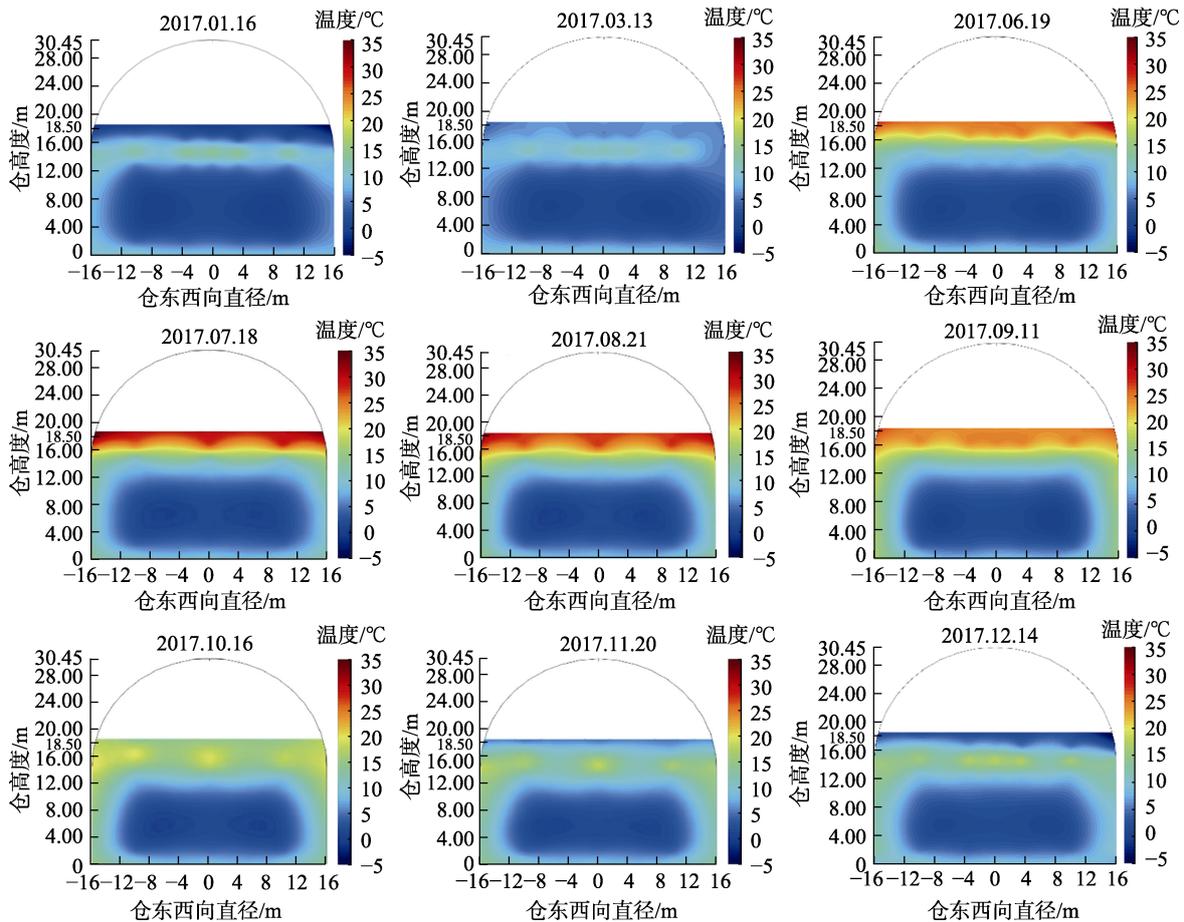


图 4 2017 年度气膜球形仓温度场云图

Fig.4 Cloud map of temperature field of air-film reinforced concrete spherical silo in 2017

2 结果与分析

2.1 温度变化情况

2015 年 12 月底,小麦全部入仓后,首先对粮堆进行了机械通风均衡粮温,此后整个粮堆温度较低且呈均匀分布状态。经监测显示 8 月下旬,气膜球形仓小麦温度出现最高值,即 24 °C,年平均粮温在 5~10 °C 之间,粮温一直处在较低温的状态下。

由图 3 可知,1~3 月,粮堆底层由于受地温影响,温度略有升高,但外界环境温度较低,其余粮堆温度均保持在低温且均匀分布状态。4~8 月,外界环境温度快速升高,大部分热量被气膜球形仓外层包裹的 PVC 薄膜所反射,部分热量因辐射透过仓顶传至粮仓内使仓温升高,仓内空气层温度升高后通过对流热交换影响粮堆表层温度,导致粮堆表层温度升高。受到空气层、粮仓壁面和粮仓底部热传导的影响,从粮堆表层和靠近壁面处开始,粮温缓慢上升,且随着外界环境持续

升温,表层和周边粮堆的升温范围也有所扩大,粮面下 4 m 和距仓壁 2 m 范围内粮堆均会受到外界环境温度变化所造成的不同程度的影响。华北区域进入 8 月份后,昼夜气温差增大,夜间外界环境温度逐渐降低,仓内空气层温度随之降低后通过对流热交换影响粮堆表层温度,导致粮堆表层温度缓慢下降,而受到粮仓壁面热传导的影响,靠近仓壁面处的粮堆温度也开始缓慢下降,这也是粮温最高值基本出现在 8 月份的主要原因。

由图 3~5 可知,粮堆表层及粮仓壁面处的粮堆容易受外界环境温度的影响,粮温会随着环境温度的升高而升高,降低而降低。但由于粮堆籽粒内部热质传递速率远小于仓体与粮堆的热质传递速率,随着储藏时间的推移,由云图 4 可知,在 2017 年 11—12 月之间,粮堆热气流与粮堆外冷气流形成以高温热气流从粮堆上部上升、低温冷气流从粮堆四周沉降的气体对流,致使仓内粮堆温度也开始呈现分层现象,在粮面下 1 m 处温度场云图呈现一“条状”薄层的相对偏高温的图

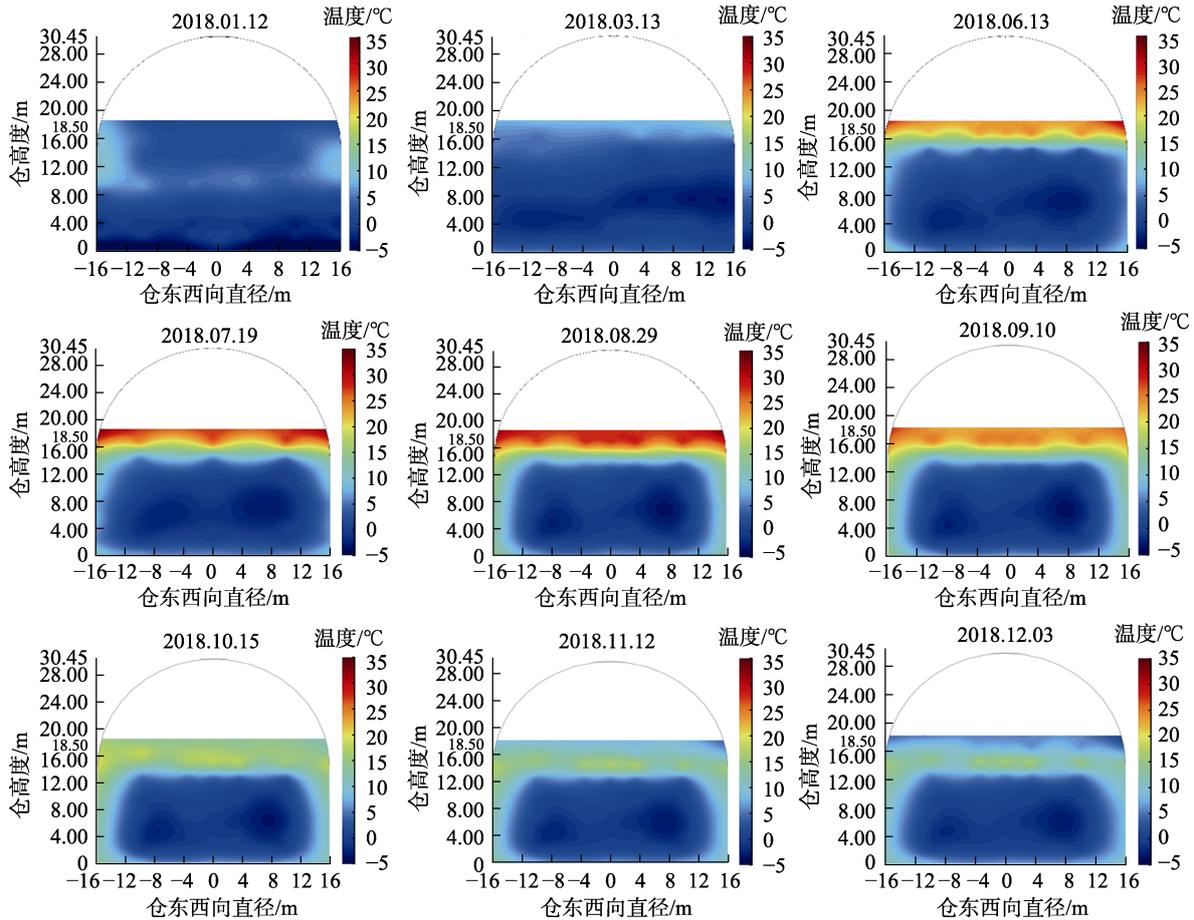


图 5 2018 年度气膜球形仓温度场云图

Fig.5 Cloud map of temperature field of air-film reinforced concrete spherical silo in 2018

形区域，且随着环境持续降温，粮堆内偏高温度区域逐渐减小。但若上升的内部热气流遇冷气流达到饱和，将导致粮堆内部的水分迁移至表面，其会造成低温部分的粮食发生结露等坏粮现象发生。

为消除储粮隐患，确保储粮安全，该粮库逐于 2018 年 1 月对气膜球形仓的小麦粮堆进行了第二次机械通风均衡粮温处置，之后整个粮仓内的粮堆又处于低温且较均匀分布状态，如图 5 所示，进入下一个年度的储藏，2018 年期间整个气膜球形仓的温度一直处于稳定状态，直至 2019 年 3 月出粮完成。

2.2 温度结果分析

入粮完成，粮堆经过冬季通风均衡粮温，整仓粮温保持在较低的温度状态下，由于内部粮堆受外界影响相对极小，其粮温变化缓慢，于是气膜球形仓内部形成一个巨大的“冷芯”，维持粮堆整体温度的平衡，也即维持粮情的稳定。

由于气膜球形仓仓体结构构造的完整性，整

仓气密性较好；内层的聚氨酯结构稳定，具有优良的隔热保温性能，所以气膜球形仓平均粮温常年处于较低状态下，储粮期间粮堆无发热和明显虫害现象，无须进行熏蒸作业，只进行了一次机械通风均衡粮温，使仓温和粮温处于稳定状态。

3 讨论

(1) 小麦在气膜球形仓内年平均粮温在 5~10 °C 之间，一直处于低温状态，但粮堆表层与靠近仓壁侧粮温受外界环境影响仍有粮温波动，若要气膜球形仓具备低温或准低温储粮标准，除解决粮堆表层及仓壁问题外，还应在气膜球形仓的储藏技术上开展系统研究。

(2) 气膜球形仓现作为一种新的仓型，本文仅进行了小麦在一个储藏周期内温度粮情监测和分析，下一步将着重分析其在小麦、稻谷等作物在各储粮区域内储藏技术上的应用，以期优化气膜球形仓的储粮技术，为新仓型的安全储粮提供理论依据和技术支撑。

(3) 气膜球形仓具有良好的气密隔热保温性

能, 在小麦储藏的过程中有仓温、平均粮温低等特点, 具有良好的储粮应用前景, 期待储粮界的同仁们进一步的探索和研究。

参考文献:

- [1] 不公告发明人. 球形仓的施工方法[P]. 山西: CN106285136A, 2017-01-04.
The inventor is not announced. Construction method of spherical warehouse[P]. Shanxi: CN106285136A, 2017-01-04.
- [2] 不公告发明人. 一种球形仓膜体气压控制方法[P]. 山西: CN106368503A, 2017-02-01.
The inventor is not announced. Construction method of spherical warehouse[P]. Shanxi: CN106285136A, 2017-01-04.
- [3] 李彦伟. 一种钢筋混凝土薄壳球形建筑[P]. 山西: CN203939139U, 2014-11-12.
LI Y W. The utility model relates to a reinforced concrete thin shell spherical building[P]. Shanxi: CN203939139U, 2014-11-12.
- [4] 郭云, 王兆明, 刘云庆, 等. 气膜钢筋混凝土储仓及其在水泥行业的应用现状[J]. 水泥技术, 2019, (5): 28-32+39.
GUO Y, WANG Z M, LIU Y Q, et al. Gas film reinforced concrete silo and its application in cement industry[J]. Cement Technology, 2019, (5): 28-32-39.
- [5] 吴灵宇, 徐高翔, 邱国志. 某气膜钢筋混凝土筒仓结构设计分析[J]. 水泥技术, 2020(4): 31-37.
WU L Y, XU G X, QIU G Z. Structural design and analysis of an air film reinforced concrete silo[J]. Cement Technology, 2020(4): 31-37.
- [6] 张利, 吴赞. 气膜法施工钢筋混凝土薄壳结构技术[J]. 煤炭工程, 2019, 51(8): 48-51.
ZHANG L, WU Z. Construction technology of reinforced concrete thin shell structure by gas membrane method[J]. Coal Engineering, 2019, 51(8): 48-51.
- [7] 李彦伟. 气膜式薄壳混凝土球形仓介绍[A]. 《煤炭工程》杂志社//中国煤炭学会煤矿建筑工程专业委员会 2012 年优秀论文汇编[C]. 中国煤炭学会, 2012: 3.
LI Y W. Introduction of gas film thin shell concrete spherical silo[A]. Coal Engineering Magazine//Compilation of excellent papers of Coal Mine Construction Engineering Committee of China Coal Association in 2012[C]. China Coal Society, 2012: 3.
- [8] 王来新. 国内首座球形粮仓储粮效果及特性[J]. 中国粮食经济, 2018, (7): 72-74.
WANG L X. Grain storage effect and characteristics of the first spherical granary in China[J]. China's Grain economy, 2018, (7): 72-74.
- [9] 我国首次将“整体球形仓”用于大规模粮食仓储[J]. 中国粮食经济, 2014(10): 4.
The integral spherical warehouse is used in large-scale grain storage for the first time in China[J]. China's Grain economy, 2014 (10): 4.
- [10] 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 J, WU Z D, ZHANG Z J, et al. Analysis of local dew mechanism of shallow silo based on multi-field coupling theory[J]. Chinese Journal of Cereals and Oils, 2015, 30(5): 90-95.
- [11] 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 L B, XUE Y Q, LIANG X Y, et al. Numerical simulation and experimental study on temperature field of underground granary[J]. Journal of Henan University of Technology(Natural Science Edition), 2019, 40 (5): 120-125.
- [12] 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. Study on the change law of temperature and humidity field in the process of mildew and heating of corn grain pile[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 268-273.
- [13] 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.
YIN J, WU Z D, ZHANG Z J, et al. Temperature field reproduction and comparative analysis of grain stacks with different warehouse types[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(1): 281-287.
- [14] 王小萌, 吴文福, 尹君, 等. 基于温湿度场云图的小麦粮堆霉变与温湿度耦合分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 260-266.
WANG X M, WU W F, YIN J, et al. Coupling analysis of mildew and temperature and humidity of wheat and grain based on temperature and humidity field cloud map[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 260-266. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。