DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.04.025

杨泰,张修霖,孙浩森,等.不同中心集风管形式对浅圆仓降温通风效果的模拟研究[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(4): 185-192. YANG T, ZHANG X L, SUN H S, et al. Simulation study on cooling and ventilation effect of different central air collection pipe forms on shallow circular warehouse[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(4): 185-192.

不同中心集风管形式对浅圆仓 降温通风效果的模拟研究

杨 泰,张修霖,孙浩森,王远成,杨开敏⊠

(山东建筑大学 热能工程学院,山东 济南 250101)

摘 要: 在 CFD 数值模拟技术的基础上,对浅圆仓不同中心集风管形式下的径向通风降温数值模拟 结果分析,并进行对比以评判优劣。研究的粮食种类为大豆,数值模拟了四种变径形式的中心集风管 顶部,或开孔或不流通,共八种情况的通风条件下,粮堆内部温度分布和气流组织情况,将八种情况 下的数值模拟结果对比,分析其通风均匀性和通风降温速率。研究发现,集风管高度与粮面平齐且上 粗下细时有较为明显的优越性,通风均匀性较好。研究结果对浅圆仓仓储大豆通风降温方式的选择提 供了理论依据。

关键词:浅圆仓;通风降温;数值模拟;中心集风管;均匀性;

中图分类号: TS205.9; S379.5 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)04-0185-08 网络首发时间: 2022-06-30 15:27:03

网络首发地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20220629.1549.018.html

Simulation Study on Cooling and Ventilation Effect of Different Central Air Collection Pipe Forms on Shallow Circular Warehouse

YANG Tai, ZHANG Xiu-lin, SUN Hao-sen, WANG Yuan-cheng, YANG Kai-min⊠ (Department of Thermal Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China)

Abstract: On the basis of CFD numerical simulation technology, the numerical simulation results of radial ventilation and cooling under different central air collection pipe forms of shallow circular silo were analyzed, and they were compared to judge the advantages and disadvantages. The grain type studied in this paper was soybean. The temperature distribution and air distribution in the grain pile under the ventilation of the top or opening or non-circulation of four variable diameter central air collection pipes were numerically simulated. The numerical simulation results of the eight cases were compared to analyze their ventilation uniformity and ventilation cooling rate. It is found that the air collecting duct has obvious advantages when its height was flush with the grain surface, thick at the top and fine at the bottom, which is mainly reflected in its ventilation uniformity. The research results

收稿日期: 2022-02-21

基金项目:山东省高等学校"青创科技计划"(2019KJH012);山东省高等学校青创人才引育计划项目

Supported by: The Scientific and Technological Innovation Project for Youth in Colleges and Universities of Shandong Province (No. 2019KJH012); Introduction and Education Program of Young and Innovative Talents in Colleges and Universities of Shandong Province

作者简介:杨泰,男,1998年出生,在读硕士生,研究方向为多孔介质传热传质。E-mail:184032154@qq.com.

通讯作者:杨开敏,男,1983年出生,博士,副教授,研究方向为强化传热技术、相变传热及复杂多孔介质传热传质。E-mail: yangkaimin@sdjzu.edu.cn.



provide theoretical guidance and basis for the selection of ventilation and cooling methods for soybean storage in shallow circular warehouse.

Key words: shallow silo; ventilation and cooling; numerical simulation; central air collecting duct; uniformity

与房式仓相比,浅圆仓在占地面积、储粮量、 机械化程度以及仓储物流流程上有明显优势,该 仓型在粮食仓储行业应用会更加广泛^[1-2]。在这种 趋势下,探究影响浅圆仓径向通风效果的因素并 寻找高效合适的通风形式是很有必要的。

浅圆仓径向通风系统一般由贴仓壁布置的垂 直支风道与竖直设置在浅圆仓中心的集风管组 成,贴壁的支风道与中心集风管配套,通过缩短 气流路径减少通风阻力。当前国内最常用的方式 仍是垂直通风, Thorpe 建立了模拟计算通风降温 时粮堆内部温度变化的数学模型, 该模型可以较 好反映出粮堆内部的温度分布情况^[3]。Thompson 开发了实验和数值模拟相结合的模型,通过不间 断的通风来评估温湿度对粮食储存的影响^[4]。王 远成等[5]和高帅等[6]建立了储粮通风模型,对粮堆 内部空气流动及热湿耦合规律进行模拟研究,重 点研究了房式仓垂直和横向通风过程中温度前沿 的变化。俞晓静等^[7]展开了关于不同形状地槽对 垂直通风影响的研究,通过对比找到具备优势的 布置形式。经过探究人们发现垂直通风阻力大且 粮堆内温湿度容易分层,于是研究者们提出径向 通风^[8-9]。张修霖等^[10]通过数值模拟方法,对比分 析了浅圆仓径向通风形式中压入式和吸出式两种 形式的粮堆内部温度分布以及气流组织情况。戚 禹康等^[11-12]运用 CFD 技术,模拟研究了不同装粮 高度下浅圆仓径向和垂直通风粮堆温度场和流场 的分布及变化趋势。

综上所述,国内外学者在采用数值模拟方法 研究浅圆仓通风降温方面取得了一定成果,但总 的看来依然缺少中心集风管的形式对粮堆通风降 温效果影响的探究。中心集风管是为缩短气流路 径,减少阻力而设置,目前国外浅圆仓中心集风管 形式多为等径且伸出仓顶,结合国内实际情况,在 不改变旧仓主体结构且探究新型集风管形式的前 提下,以解决当前浅圆仓储粮通风降温过程中出 现的异常粮温、通风死角等现象为目的,本研究 设置了四种不同形式的中心集风管,以大豆为对 象在相同吨粮送风量的情况下,探究它们对于粮 堆内部流场与温度场的影响,并分析不同集风管 形式对于通风的效率与能耗的影响。为解决现存 问题、寻找最优径向通风降温形式提供理论依据。

1 模型建立

1.1 浅圆仓物理模型及数学模型建立

以典型浅圆仓为研究分析的对象,采用相似 性原理,建立总直径为2m,高度为3.3m的物理 模型,该仓的装粮高度为2.0m,为了使模拟效果 更加符合实际情况,将粮堆分为如图1中所示的 上中下三个部分,从粮面向上一直到仓顶的部分 为空气区域。在粮仓的顶部设置四个直径为0.1m 的风机出口。垂直支风道高度为1.0m,贴浅圆仓 外壁等距环状排列如图所示,沿着浅圆仓壁环状 分布的16根支风管与中心处的中心集风管组成 了该仓的径向通风系统。为了更能体现集风管形 式差异对气流分布的影响,本模拟采用气流由四 周支风道汇入集风管,由集风管流出粮堆的压入 式通风。



图 1 粮仓结构示意图与网格分布图 Fig.1 Schematic diagram of granary structure and grid distribution

1.2 中心集风管模型

中心集风管为变径圆管,集风管底部距离仓 底 0.2 m,根据中心集风管与粮面之间的高度关 系、集风管变径的规律设置四种不同形式的中心 集风管。针对不同的集风管形式,建立不同的物 理模型,不同形式集风管的形状如图 2 所示。







形式 I 是分为三段的下细上粗的变径集风 管,高度与粮面平齐;形式 II 的集风管是分为三 段的下粗上细的变径集风管,高度同样与粮面齐 平;形式 III 是分为两段的下端细上端粗的变径集 风管,其顶部距粮面 0.5 m;形式 IV 是分为三段的 下细上粗的变径集风管,其高度伸出粮面 0.5 m。

所有集风管的壁面和底面均为开孔孔板,空 气可以自由通过,根据集风管顶部是否具有通风 口把上述四种集风管更进一步分类,使用-a表示 顶部为开孔孔板的中心集风管,-b为顶部是壁面 的中心集风管。

1.3 数学模型及定解条件

本研究主要通过分析粮堆内部的温度场与流场分布情况来探究集风管形式对通风过程的影响,所以在求解流动与传热方程^[11-12]时,连续性方程中需添加粮食颗粒的体积分数项,并在动量守恒方程中加入动量源项。同时考虑粮粒的吸湿或是解吸湿作用,在传热方程求解时需添加相应的热源项^[10]。

仓内储存的粮食为大豆,粮仓内的初始平均 粮温为 22.75 ℃,为了使模拟结果更加符合实际, 将粮堆区域分三层设置,如图 1 中所示,由仓底



向上1m范围内为粮堆的下层,再向上0.5m区 域内为粮堆的中层,其余区域为粮堆的上层,下层 的粮堆温度设置为22℃、中层为23℃、上层为 24℃,上端空气区域的温度为24℃。送风温度 与粮堆的初始平均温度相差约8℃,即送风温度 为15℃。选择压入式的径向通风,按照通风规范, 吨粮的通风量设置为10m/(t・h)。出口设置为 outflow,因不考虑与环境的换热仓壁设为绝热。

1.4 数据分析

利用 Tecplot 软件将模拟得到的 case 与 data

文件进行处理与分析,得到通风过程结束时粮仓 内部的气流组织分布情况与气流分布情况;利用 Origin 软件将模拟时监控的温度变化数据绘制成 折线图。将采用各种形式中心集风管通风时的各 类图形进行对比分析,进一步评价优劣。

2 结果与分析

2.1 粮仓内气流分布

在相同边界条件和初始条件下,对具有不同 中心进风管形式粮仓进行模拟计算,得到仓内流 场分布,如图3中所示。





由图 3 可得,几种不同形式的中心集风管通 风时,均不存在通风死角。无论中心集风管的顶 部是否为开孔孔板,粮仓内的气流分布都大体一 致,即靠近仓底的气流水平进入集风管,但随着 高度逐渐上升通过粮面进入空气区域的部分逐渐 变多,当其顶部为不开孔的板时,集风管上方出 现逆向流动的气流,并随着通风过程的进行发展 成涡流。为使中心集风管的效果明显,就需保证 整个粮堆区域中尽可能多的气流被中心集风管收 集到,图 3 中下层粮堆的气流绝大部分进入集风 管,气流在粮堆中流动的路径很短,减小了通风 的阻力。但在中上层粮堆中,气流多向上穿过粮 堆进入空气区域,该流动情况弱化了设置中心集 风管的作用。

对比几种情况,形式 I 集风管与形式 IV 集风 管的气流分布情况最为接近,在靠近仓底处,与 向上贯穿粮堆进入空气域这种情况相比,显然直 接汇入中心集风管时气流受到的阻力更低,所以 从支风道流出的低温气流近乎于水平流向中心集 风管。随着高度的增加,气流从粮面流出的阻力 小了,而进入中心集风管的压力却越来越大,所 以粮堆气流开始逐渐向上倾斜,向着仓壁的方向 靠近。由图 3 可得,在 I、IV 两种形式的集风管 作用下,可以保证粮堆内部的大部分气流都被收 集到。

当使用 II 形式集风管且顶部为开孔孔板时, 只有靠近仓底的极少部分气流进入中心集风管, 粮仓内气流分布与不设置中心集风管类似,大部 分气流依然是贯穿粮堆进入空气域,中心集风管 的作用就被极大弱化。该现象说明当集风管的底 部的直径设置的较大时,对比底部直径小的集风 管,此种集风管收集的来自底部的气流更多,但 是随着高度的上升,中心集风管的管径变小使得 气流进入集风管变得困难,本该由集风管流出粮 堆的气流直接贯穿粮堆由粮面流出。从气流情况 可得,下粗上细的 II 形式集风管并不能很好的缩 短气流路径以减小通风阻力。

对于III形式集风管,从流线图可以看出仅有 下层粮堆部分气流可以被集风管收集然后排出, 而中层粮堆的气流几乎全是从穿过粮堆向上从粮 面排出。又因该形式的集风管顶部距离粮面有 0.5 m 的距离,则上层粮堆的气流自然全部从粮面 流入空气区域,中心集风管效果不明显,气流的 通风阻力较大。

2.2 粮仓内温度分布分析

在相同边界条件和初始条件下,对具有不同 中心进风管形式粮仓进行模拟计算,得到仓内温 度场分布,如图4所示。

因为粮堆区域在 6 天后能够得到完全冷却, 所以截取第 6 天时的粮堆截面温度分布情况。结 合图 3 图 4,虽然部分气流并没有按照理想的方 式通过集风管流出粮堆而是贴仓壁流出粮堆,但 此种气流经过的粮堆依然得到了良好的冷却。单 由图 4 可得,所有形式的集风管经过一段时间的 通风之后,其粮堆内部均会出现环状的高温区域, 说明该处未得到充分的冷却,原因是此处通风阻 力大且处于气流流动路线的末梢,导致了流动至 此处的空气的压力变得较低,所以此处粮温降低 的十分缓慢。

当集风管的形式为 I 和 Ⅳ时,低温的区域非 常明显,说明整体通风降温均匀性较好,在中心 集风管顶部附近产生的高温环状区域体积较小且 在粮堆最高温为 16.5 ℃时该环状高温区域的平 均温度在 16 ℃左右。

当集风管形式为Ⅱ和Ⅲ时产生的高温区域体 积较大,并且他们的高温区域核心处的温度分别 为 19.5 ℃和 18.2 ℃与粮堆平均温度相差高达 3 ℃,并且由图 4 (h)可得,在使用形式Ⅱa 的 中心集风管,外部的粮温得到有效的降低而粮堆 中心处的温度下降的较慢,在该种情况下非常容 易形成异常的粮情。

2.3 粮仓内温度变化分析

通过图 5、图 6 即不同形式集风管通风后粮 堆平均温度、最高温度的变化曲线,能够得到平 均温度降低规律大致相同,均为前四天温度下降 速率较快,在此之后变得相对平稳。由图 6 可得, 最高温度降低趋势有一些差异,形式 I、形式Ⅳ 的最高温度明显比形式 II、形式Ⅲ下降的快。

当中心集风管为形式 I、形式 IV 时,在第 7 天其最高温度与平均温度相差在 0.5 ℃以内,但 使用形式 II 和形式 IV 时,因为通风气流受到的阻 力较大,在气流压力小处后期无法持续有效降温,







Fig.5 Average temperature variation curves of grain piles with radial cooling and ventilation of different forms of air collecting duct







故在通风第7天的时候其粮堆内的最高温度与平均温度相差十分明显。

2.4 不同集风管降温效果分析

不同形式中心集风管的通风效果可以通过计 算它们的降温速率和降低粮温的单位能耗来对比 分析。其中降温的速率t。可以表示为:

$$t_s = \frac{t_2 - t_1}{G \cdot \tau} \tag{1.1}$$

式中 t_s 为径向通风速率, $\mathbb{C}/(t\cdot h)$; G 为粮堆 的初始时刻质量, t; τ 为径向通风总时间, h; t_1 为径向通风停止后经过 24 h 的粮堆的平均温度, \mathbb{C} ; t_2 是径向通风前, 仓内粮堆的平均温度, \mathbb{C} 。 因径向通风 5 d 后, 仓内粮堆的平均温度降低就 已非常缓慢,所以通过通风 5 d 时的数据对比不 同形式集风管径向降温通风速率, 如表 1 所示。

考虑降温速率的同时也需考虑各种形式集风

管进行通风降温的经济性,经济性对比可以通过 径向通风单位能耗来完成:

$$E_{\rm t} = \frac{\Sigma W_{\rm t}}{(t_2 - t_1)G} \tag{1.2}$$

式中 E_t 为径向通风的单位能耗, (kW·h)/ (t·℃); ΣW_t 为通风实际上累计的耗电量, kW·h; t_1 为通风停止后经过 24 h 的粮堆的平均温度, ℃; t_2 是通风前, 仓内粮堆的平均温度, ℃。G 是粮 堆初始时刻的质量, t。

由表 1 可得,几种形式的集风管的降温速率 情况没有明显的差异,仅当集风管高度低于粮面 且管顶部开孔时稍慢一些。形式 I、Ⅳ的降温速 率最高。在耗能方面,Ⅲ形式集风管耗能明显高 于其他各种形式,其次是Ⅱ形式集风管,耗能最 低的为形式 I、Ⅳ集风管,二者无明显差异。总 的看来形式 I、Ⅳ集风管更加节能高效。

表 1 降温速率及能耗分析表 Table 1 Analysis of cooling rate and energy consumption

中心集风管形式	I a	Ιb	∏ a	∏ b	∭ a	∭b	IV a	∭b
降温速率/[℃/(t·h)]	0.017 8	0.017 8	0.017 0	0.017 6	0.015 4	0.017 3	0.017 8	0.017 8
单位降温通风能耗/[(kW·h)/(t·℃)]	0.000 79	0.000 84	0.001 07	0.000 87	0.001 13	0.001 01	0.000 78	0.000 78

3 结论

通过对以上四种不同集风管形式的数值模拟 结果对比分析得到以下结论。

(1)在集风管的变径形式方面,采用下细上 粗的变径形式能够明显体现集风管的作用,并且 得到更加均匀的气流组织,而采用下粗上细的集 风管时会出现通风不均匀进而导致局部粮温异 常。对比发现采用下细上粗、顶端开孔、与粮面 平齐的集风管得到的气流组织分布情况最好。

(2)几种形式集风管在通风降温后粮堆内部 均有高温环状区域,当集风管高度与粮面平齐时, 顶部开孔的集风管产生的高温区域体积更小;当 集风管高出粮面时,集风管顶部是否开孔对高温 区域的体积影响变得不明显;当集风管低于粮面, 是否开孔对于粮堆内高温区域的体积的影响同样 不明显。

(3) 在采用不同形式的中心集风管进行通风

降温时,仅当集风管高度低于粮面且集风管顶部 开孔时速率明显低,采用其他形式集风管粮堆内 部的降温速率大致相同并没有明显的差异。

(4)综合来看,集风管高度与粮面平齐时, 其效果与伸出粮面的形式相比产生更小的高温区 域,与低于粮面的形式相比拥有更加卓越的降温 速率与能耗水平。从变径方面,采用下细上粗形 式既形成了良好的气流组织分布又更加凸显集风 管的作用。所以在本文所述的四类集风管中,形 式I是相对优异的。

参考文献:

- [1] 刘朝伟,吕建华,杨冰,等. 浅圆仓负压通风技术应用案例分析[J]. 粮食与食品工业, 2018, 25(5): 55-58.
 LIU C W, LV J H, YANG B, et al. Application case analysis of negative pressure ventilation technology in shallow circular warehouse [J] Grain and food industry, 2018, 25 (5): 55-58.
- [2] 张来林,蔡育池,许国川,等. 浅谈浅圆仓的储粮特点[J]. 粮 油食品科技, 2019, 27(5): 97-100.
 ZHANG L L, CAI Y C, Xu G C, et al. Discussion on grain storage characteristics of shallow circular warehouse[J] Grain, oil and food technology, 2019, 27 (5): 97-100.
- [3] THORPE G R. Modelling ecosystems in ventilated conical bottomed farm grain silos[J]. Ecological Modelling, 1997, 94(2-3): 255-286.
- [4] THOMPSON T L. Temporary storage of high-moisture shelled corn using continuous aeration[J]. Transaction of American Society of Agriculture Engineers, 1972, 15(2): 333-337.
- [5] 王远成,高帅,邱华宇,等. 横向谷冷通风过程的数值模拟研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(7): 103-106.
 WANG Y C, GAO S, QIU H Y, et al. Numerical simulation of transverse Valley cooling ventilation process[J]. Chinese Journal of grain and oil, 2016, 31(7): 103-106.
- [6] 高帅, 王远成, 赵会义, 等. 平房仓横向谷冷通风小麦粮堆传 热传质数值模拟[J]. 粮油食品科技, 2020, 23: 15-19.
 GAO S, WANG Y C, ZHAO H Y, et al. Numerical simulation of heat and mass transfer of wheat grain pile with transverse Valley cold ventilation in bungalow warehouse[J]. Science and Technology

of Cereals, Oils and Foods, 2020, 23: 15-19.

- [7] 俞晓静, 王远成, 戚禹康, 等. 三种不同通风道对浅圆仓通风 效果的模拟研究[J]. 粮油食品科技, 2015, 27: 61-66. YU X J, WANG Y C, QI Y K, et al. Simulation study on ventilation effect of three different ventilation ducts on shallow circular warehouse[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2015, 27: 61-66.
- [8] 白忠权.吸湿性仓储粮堆内热湿耦合传递规律的研究[D].济 南:山东建筑大学, 2013.

BAI Z Q. Study on heat moisture coupling transfer law in hygroscopic storage grain pile[D]. Jinan: Shandong Architecture University, 2013.

[9] 吴锐. 粮堆温度场实测结果与数值模拟分析[D]. 郑州: 河南 工业大学, 2011.

WU R. Measured results and numerical simulation analysis of grain pile temperature field[D]. Zhengzhou: Henan University of technology, 2011.

[10] 张修霖,杨开敏,王远成,等. 浅圆仓压入式和吸出式通风效
 果对比研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2021, 52(1):
 63-69.

ZHANG X L, YANG K M, WANG Y C, et al. Comparative study on ventilation effects of press in and suction out in shallow circular warehouse[J]. Journal of Shandong Agricultural University (NATURAL SCIENCE EDITION), 2021, 52(1): 63-69.

[11] 戚禹康,王远成,俞晓静,等. 浅圆仓不同装粮高度时径向与
 垂直通风模拟对比研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版),
 2019,40(4): 108-113.

QI Y K, WANG Y C, YU X J, et al. Comparative study on Simulation of radial and vertical ventilation in shallow circular silo with different grain loading height[J]. Journal of Henan University of Technology (NATURAL SCIENCE EDITION), 2019,40(4): 108-113.

- [12] 威禹康, 王远成, 俞晓静. 浅圆仓横向和垂直通风数值模拟 对比研究[J]. 山东建筑大学学报, 2019, 34(3): 50-56.
 QI Y K, WANG Y C, YU X J. Comparative study on Numerical Simulation of transverse and vertical ventilation of shallow circular warehouse[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2019, 34(3): 50-56.
- **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。