

引用格式:

张利峰, 廖骞, 刘大为, 谢方平, 王修善, 李铁辉. 5H-2 谷物烘干机干燥箱多孔角状盒的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2024, 50(2): 86–91.

ZHANG L F, LIAO Q, LIU D W, XIE F P, WANG X S, LI T H. Design and experiment of multi-hole horn box in oven of 5H-2 grain dryer[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(2): 86–91.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



5H-2 谷物烘干机干燥箱多孔角状盒的设计与试验

张利峰¹, 廖骞², 刘大为^{2*}, 谢方平², 王修善², 李铁辉³

(1.湖南省农机事务中心, 湖南 长沙 410035; 2.湖南农业大学机电工程学院, 湖南 长沙 410128; 3.湖南农友机械集团有限公司, 湖南 娄底 417700)

摘要: 为改善 5H-2 谷物烘干机的干燥性能, 将原有角状盒改造为多孔角状盒。通过 Fluent 对多孔角状盒的干燥段气流场进行仿真分析, 对比空载条件下干燥箱内部温度场变化情况, 结果表明, 装有多孔角状盒的干燥箱内部温度场较原有角状盒的分布更趋均匀。选择早稻‘中早 35’稻谷, 在 5H-2 谷物烘干机上安装多孔角状盒开展烘干试验, 设置热风干燥温度为 65 °C, 风速为 8 m/s, 干燥缓苏比为 1 : 2, 结果装有多孔角状盒的烘干机干燥速率为 0.798%/h~1.002%/h, 烘干后爆腰增率为 7.4%~10.2%, 相比原有角状盒谷物烘干机, 其干燥速率提高了 12.1%~21.2%, 爆腰增率降低了 1.9%~5.1%。

关键词: 谷物烘干机; 干燥箱; 角状盒; 干燥速率; 爆腰增率

中图分类号: S226.6

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)02-0086-06

Design and experiment of multi-hole horn box in oven of 5H-2 grain dryer

ZHANG Lifeng¹, LIAO Qian², LIU Dawei^{2*}, XIE Fangping², WANG Xiushan², LI Tiehui³

(1.Hunan Agricultural Machinery Affairs Center, Changsha, Hunan 410035, China; 2.College of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Hunan Nongyou Machinery Group Co. Ltd, Loudi, Hunan 417700, China)

Abstract: In order to improve the drying performance of the 5H-2 grain dryer, an innovative modification was introduced by transforming the conventional angular boxes into porous angular boxes. Computational fluid dynamics (CFD) simulations using Fluent were employed to analyze the airflow field within the drying segment of these newly designed porous structures. A comparison of the temperature distribution within the drying chamber under unloaded conditions revealed a notably more uniform temperature field with the implementation of the porous angular boxes compared to their non-porous predecessors. Experimental drying trials were subsequently conducted on early-season rice variety ‘Zhongzao 35’ using the 5H-2 grain dryer equipped with these porous angular boxes. The tests were configured with a hot air drying temperature of 65 °C, an air velocity of 8 m/s, and a drying-relaxation ratio of 1 : 2. The resultant drying rates ranged from 0.798%/h to 1.002%/h, with an increase in kernel cracking rate of 7.4% to 10.2% post-drying. In comparison to the original angular box design, the dryer equipped with porous boxes demonstrated a significant enhancement in drying efficiency, with rates elevated by 12.1% to 21.2%, while concurrently reducing the increase in kernel cracking rate by 1.9% to 5.1%. These findings underscore the efficacy of the porous angular box design in optimizing the drying process, thereby reducing grain damage and enhancing overall drying performance.

Keywords: grain dryer; drying box; angular box; drying rate; crackle ratio increment

收稿日期: 2023-01-03

修回日期: 2024-04-11

基金项目: 湖南省农业农村厅项目(湘财农指[2021]47号)

作者简介: 张利峰(1979—), 男, 湖南冷水江人, 硕士, 主要从事农机新产品研发及项目管理, 47659805@qq.com; *通信作者, 刘大为, 博士, 副教授, 主要从事水稻生产全程机械化技术及理论研究, liudawei8361@163.com

混流式谷物干燥机是近年应用最广泛的一种谷物干燥设备^[1-3]。角状盒是其干燥段的核心部件。角状盒分为进气角状盒和出气角状盒 2 种, 交替排列, 谷物自由下落, 按照“S”形曲线在干燥箱内流动, 进行温湿交换。该类型干燥设备存在的主要问题是低温干燥脱水速率低、干燥时间长, 且余热不能循环利用, 热能利用率较低^[4-6]。段二亚^[7]在粮食干燥数值模拟过程中研究五边形角状盒和三角形角状盒对粮食干燥的影响, 结果表明, 五边形的角状盒更有利于热空气均匀分布; 李臻等^[8]、刘清化等^[9]利用 ANSYS/FLOTTRAN 对角状盒的截面大小进行仿真分析, 研究角状盒尺寸对混流式干燥机内风场大小和场强分布均匀性的影响; 位艳芳^[10]在研究玉米热泵干燥时对角状盒侧面进行了开百叶窗处理, 分析了角状盒侧面百叶窗的大小对干燥均匀性的影响; 高瑞丽^[11]在变径角状盒研究基础上进行优化设计, 在其侧面开设一定量的孔, 结果表明采用变径开孔角状盒后干燥箱内的热风场均匀性得到了改善。由此可见, 角状盒的形状、大小、排列方式等对烘干机的结构和干燥性能等均有一定影响。

笔者针对湖南农友机械集团有限公司生产的 5H-2 混流式谷物烘干机五边形角状盒进行优化设计, 将原有角状盒设计成多孔形状, 运用多孔跳跃模型对干燥段内部流场进行仿真分析, 对比空载条件下原有角状盒和多孔角状盒干燥箱内的温度场分布情况, 并通过整机烘干性能试验判断多孔角状盒能否改善 5H-2 谷物烘干机干燥速率低、干燥不均匀等问题, 以期为提高稻谷烘干效率和干燥品质

提供依据。

1 干燥箱结构及多孔角状盒设计

5H-2 谷物烘干机干燥箱体中安装有进气和出气角状盒, 布置形式及尺寸如图 1-A 所示, 其中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 分别为 100、30、100、220、180 mm。原有角状盒截面形状为五边形, 采用“倒 V”形薄板折弯结构, 烘干作业时, 热风进入角状盒后, 沿角状盒管道内部区域扩散, 只有少量从角状盒下开口处流出, 高温场主要分布在角状盒周围, 使得干燥箱内温度分布不均匀, 且热风在干燥段内还未被完全利用就从出风口排出, 其热能利用率低。为了使箱体温度场更加均匀及提高热能利用率, 将角状盒侧壁开孔, 设计成多孔结构, 考虑到角状盒侧板开孔过大, 稻谷会直接由孔进入角状盒, 形成的内部物流会影响热风流动, 因而综合考虑稻谷的尺寸来设定开孔大小。选取南方典型细长型籽粒水稻品种‘玉针香’和短粒型水稻品种‘中早 35’, 测量外形尺寸, 测得水稻谷粒的最小厚度为 1.72 mm, 最小宽度为 2.07 mm。选择壁厚为 1 mm 的不锈钢薄板制造角状盒, 长(L)为 1 200 mm, 开孔形状为圆形, 梅花形布置, 以保证其强度和开孔量(孔面积约占角状盒表面积的 50%); 圆孔直径(d_0)设计为 1 mm, 以避免稻谷卡在孔内; 梅花形直径(d_1)为 4 mm, 孔与孔之间的中心距(l_0)为 2 mm。多孔角状盒布置形式及结构尺寸如图 1-B 所示。

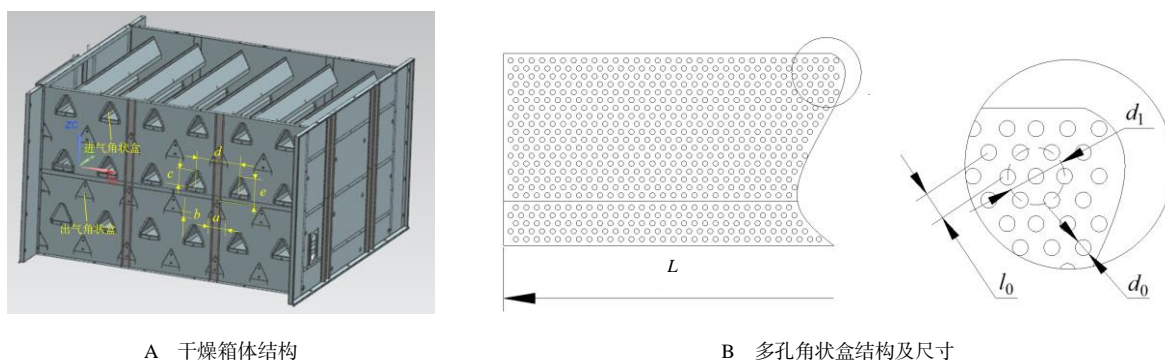


图 1 5H-2 谷物烘干机干燥箱体及角状盒结构

Fig.1 5H-2 grain dryer dry box body and angular box structure

5H-2 谷物烘干机原有角状盒的热风主要在角状盒内部, 只有少量从角状盒下开口处流出, 稻谷的运动方向和横截面方向热风的流向呈混流状, 如

图 2-A 所示。而在角状盒侧板处开多孔, 可使得进入角状盒的热空气通过侧面迅速扩散至干燥箱体其他区域, 有利于改善干燥箱体内角状盒横截面

方向的热风流向,提升干燥速率,并改善谷物干燥

不均匀的问题,其原理如图 2-B 所示。

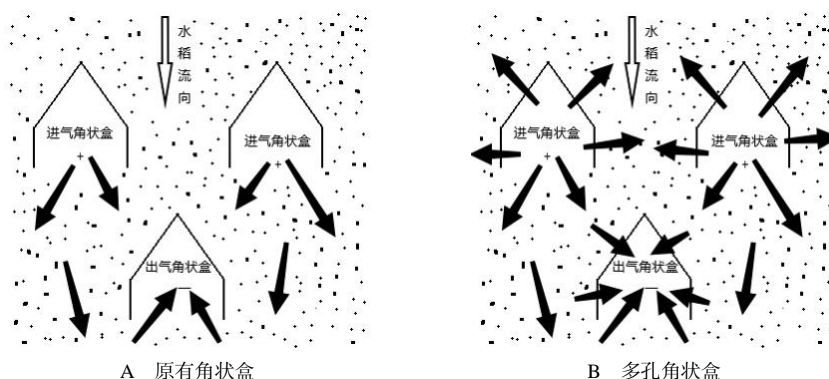


图 2 角状盒的热风流向

Fig.2 Hot air flow of angular boxes

2 干燥箱热风场特性数值模拟

为探明多孔角状盒结构下干燥箱内部热风流动及温度场变化规律,采用数值模拟分析方法研究空载条件下多孔角状盒干燥时箱体内部流场的分布情况。

2.1 模型建立

运用 SolidWorks 2018 对 5H-2 型谷物烘干机的干燥箱进行建模,模型尺寸为 1 320 mm×1 200 mm×1 000 mm,将模型导入 Ansys Fluent 后在 SpaceClaim 中抽取流体域,建立仿真模型。对干燥段仿真模型进行网格划分,考虑到实际的计算机数值模拟分析工作量,选择网格划分尺寸大小为 10 mm,计算机共生成 1 832 478 个网格,1 797 458 个单元。

参考文献[12-16],对模型的进出口等边界条件进行设置。进口边界条件设置为速度进口,根据 5H-2 谷物干燥机的实际工作参数,设定热介质的入口风速为 8 m/s;考虑到小型烘干机的热效率较低,且用户实际烘干作业时使用的热风温度较高,设置热空气温度为 65 °C;角状盒壁厚设置为 1 mm;外界温度设定为 20 °C;设定壁面无滑移,热通量值为 0。

数学流体计算模型选用多孔跳跃模型,简化为 porous jump 边界条件,流体内部的流动方向为薄板法向。多孔介质的动量方程附带有额外的动量源项,包括内部压力损失和黏性损失 2 部分,对于一般的简单、均质多孔介质模型,压力损失和流动速度的关系为二次函数^[15]。

以空气作为模拟流体,温度为 65 °C,空气密度(ρ)为 1.045 kg/m³,黏度为 1.024e-5 kg/(m s),在 Ansys Fluent 中建立一个 50 mm×50 mm×1 mm 的多孔板模型,其孔的大小和分布与多孔角状盒一致。多孔板模型的进出口分别定义为速度进口与压力出口,随后对模型进行网格划分。进气速率为 2、4、6、8 m/s 时,测得的压降值分别为 88.325、343.745、763.027、1 346.722 Pa。将该数据导入 Excel 2013 中,并进行多项式拟合,得到压降值与速度大小的函数关系如式(1)。

$$\Delta p = 20.517v^2 + 4.552v \quad (1)$$

式中: Δp 为压力损失; v 为垂直于表面的速率。

代入压力损失和流动速度的二次函数式可以得出式(2)。

$$\begin{cases} \frac{1}{2} C_2 \rho \Delta m = 20.517 \\ \frac{\mu}{\alpha} \Delta m = 4.552 \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_2 为惯性阻力系数; ρ 为热介质密度; Δm 为模型厚度; μ 为层流流体黏性; α 为介质的面渗透率。

取模型厚度 $\Delta m=1$ mm,代入式(2)中计算可得, $C_2=39\ 266.98$, $\alpha=224\ 956.06$ 。

2.2 模拟结果

分别选取干燥箱体中前端面和 3 个中间平面进行分析,如图 3 所示的 4 个不同截面位置。由 Fluent 数值模拟得到原有角状盒和多孔角状盒干燥箱内温度场分布云图如图 4 所示。图 4 中第 I 截面为热风从进风口进入角状盒的正视截面图,从图 4-A 和图 4-B 中可以看出,在热风刚进入角状盒时,原有

角状盒和多孔角状盒高温空气均集中分布在角状盒内部。从第 II、III、IV 截面的温度场分布云图可以看出, 装有原有角状盒的干燥箱, 热风从进风口进入角状盒后, 沿角状盒管道内部区域扩散, 只有少量的热风从角状盒底部流出, 扩散到干燥箱其他区域, 其角状盒内部温度明显高于干燥箱其他区域。装有多孔角状盒图的干燥箱内, 热风进入干燥箱后不再集中于角状盒内部, 而是通过多孔结构流入到干燥箱内的其他区域, 使得干燥段内部的温度场分布更均匀。

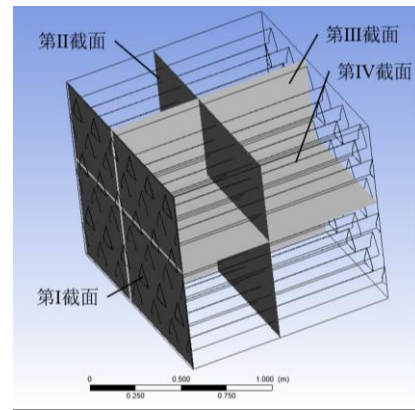
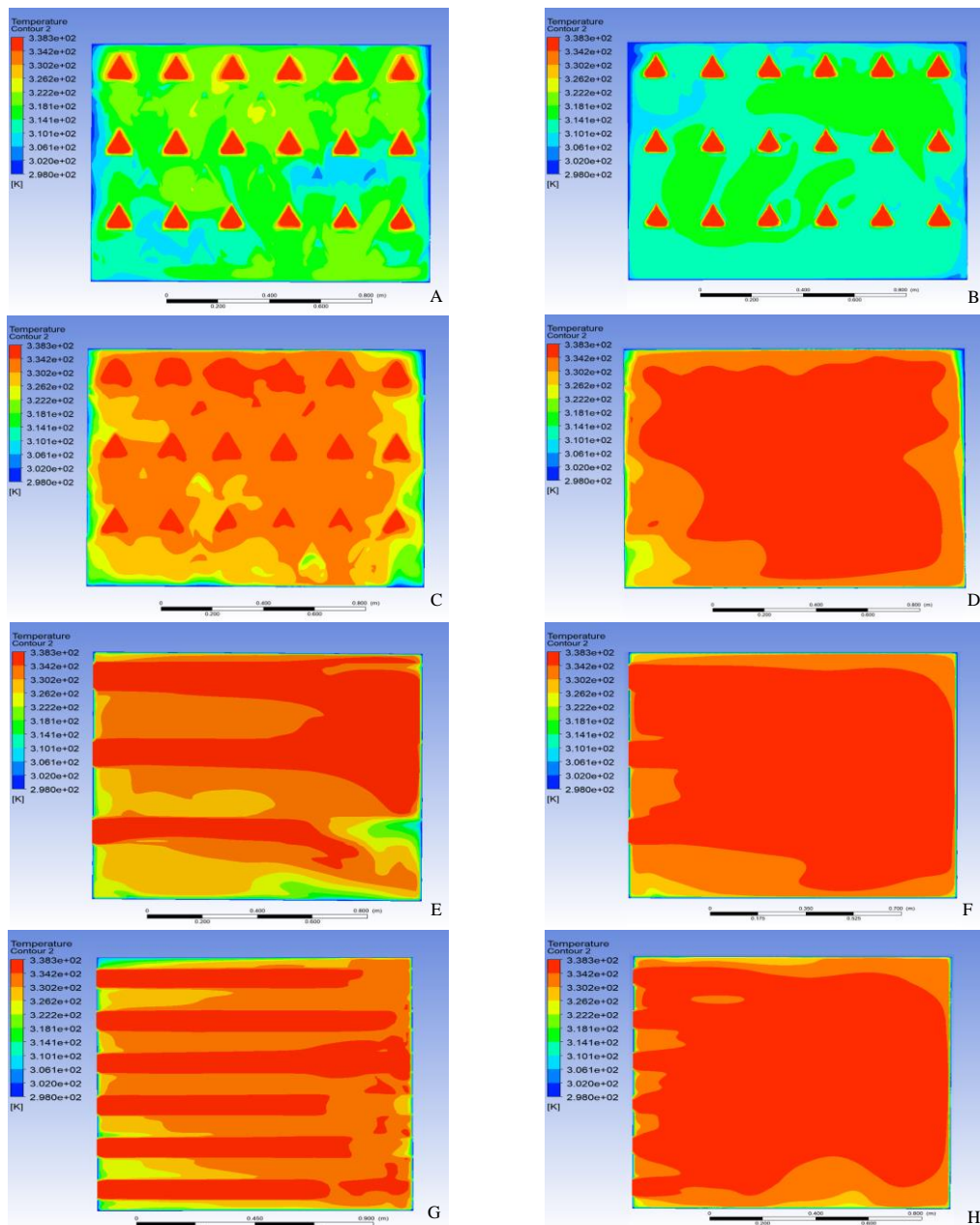


图 3 截面选取位置

Fig.3 Position of cross-section selection



A、C、E、G 分别示原有角状盒的第 I、II、III、IV 截面; B、D、F、H 分别示多孔角状盒的第 I、II、III、IV 截面。

图 4 角状盒在不同截面位置的温度场分布云图

Fig.4 Temperature field distribution cloud of angular boxes at different cross-section locations

3 整机烘干性能试验

3.1 试验设计及评价指标测定

参照 GB/T 21015—2007《稻谷干燥技术规范》^[17]及文献[18–19]的方法进行烘干试验。试验在湖南农友机械集团有限公司烘干中心进行。供试稻谷为早稻‘中早 35’，经自然风干至含水率为 21.5%~26.5%。参照 5H-2 谷物烘干机烘干粮食时采用烘干温度为 65 ℃的工艺参数，分别选用原有角状盒和多孔角状盒进行试验。设置烘干机的提升机转速为 1 410 r/min，单次总喂料量为 1.8 t，使用生物质燃烧炉，热风干燥温度 65 ℃，热源风机送风风速约为 8 m/s，干燥缓苏比 1 : 2。每干燥 1 个循环后观察实时水分仪记录的稻谷含水率，直至干燥到安全储存水分后停止干燥。参照 GB/T 14095—2007《农产品干燥术 术语》^[20]计算稻谷干燥速率；参照 GB/T 5496—1985《粮食、油料、黄米粒及裂纹粒的检验法》^[21]测定爆腰率，计算爆腰增率。试验重复 3 次，结果取平均值。

3.2 试验结果与分析

从表 1 可知，在初始含水率相近条件下，安装多孔角状盒的烘干机的干燥循环次数较原有角状盒的减少了 1~2 个循环，其烘干效率明显占优；装有多孔角状盒的烘干机干燥速率为 0.798%/h~1.002%/h，相比原有角状盒谷物烘干机干燥速率提高了 12.1%~21.2%，烘干爆腰增率为 7.4%~10.2%，相比原有角状盒谷物烘干机的爆腰增率降低 1.9%~5.1%。结合干燥段温度场仿真结果可知，原有角状盒干燥段热力场分布主要集中在角状盒内部，只有少量的热空气通过角状盒底部分散到其他区域，使得角状盒周围的稻谷干燥温度较高，而其他稻谷干燥温度较低，导致稻谷干燥不均匀；当装有多孔角状盒时，干燥箱内温度分布较均匀，进入角状盒的热空气通过多孔结构流向干燥箱的其他区域，有效改善了温度分布不均匀的问题，使稻谷干燥更加均匀，提高干燥效率的同时，也略微降低了稻谷的爆腰增率。

表 1 不同角状盒下 5H-2 谷物烘干机的干燥性能

Table 1 Drying performance of 5H-2 grain dryer under different angular boxes

| 组号 | 初始平均 含水率/% | 角状盒 类型 | 实测稻谷平均含水率/% | | | | | | | | | | | | 平均干燥 速率/(% h ⁻¹) | 平均爆腰 增率/% |
|----|---------------|-----------|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------------------------------|--------------|
| | | | 1 次 | 2 次 | 3 次 | 4 次 | 5 次 | 6 次 | 7 次 | 8 次 | 9 次 | 10 次 | 11 次 | 12 次 | | |
| 1 | 22.1 | 原有 | 20.6 | 19.4 | 18.1 | 17.4 | 16.8 | 16.2 | 15.7 | 14.9 | 14.2 | 13.7 | 13.2 | | 0.690 | 10.4 |
| | 21.5 | 多孔 | 19.8 | 18.5 | 17.4 | 16.6 | 16.1 | 15.2 | 14.5 | 13.8 | 13.1 | | | | 0.798 | 10.2 |
| 2 | 24.2 | 原有 | 22.8 | 21.1 | 19.9 | 18.9 | 18 | 17.1 | 16.3 | 15.6 | 14.9 | 14.2 | 13.6 | 13.1 | 0.792 | 9.4 |
| | 24.5 | 多孔 | 22.2 | 20.6 | 19.4 | 18.3 | 17.5 | 16.6 | 15.6 | 14.8 | 14.1 | 13.3 | | | 0.960 | 9.2 |
| 3 | 26.5 | 原有 | 24.4 | 22.7 | 21.3 | 20.1 | 19.2 | 18.3 | 17.5 | 16.7 | 15.9 | 15.2 | 14.4 | 13.6 | 0.894 | 7.8 |
| | 25.7 | 多孔 | 23.6 | 21.8 | 20.1 | 19.1 | 17.8 | 16.8 | 15.7 | 14.9 | 14.2 | 13.5 | 12.8 | | 1.002 | 7.4 |

4 结论

本研究中，对 5H-2 谷物烘干机干燥箱关键部件角状盒采用侧壁开圆孔设计，并以干燥段建模，对比分析了原有角状盒和多孔角状盒干燥时的温度场分布，通过试验验证不同含水率下多孔角状盒和原有角状盒对 5H-2 谷物干燥机性能的影响，具体结论如下。

1) 采用多孔跳跃模型对 5H-2 谷物烘干机干燥段进行数值仿真模拟的结果表明，多孔角状盒可以加强热风在干燥段的流动，使得干燥段温度分布更均匀。

2) 整机烘干性能试验的结果表明，相近初始含水率条件下，安装了多孔角状盒的 5H-2 谷物烘干机干燥循环次数较原有角状盒的减少了 1~2 次，其烘干效率明显优于安装了原有角状盒烘干机的；在相同的试验条件下，装有多孔角状盒的 5H-2 谷物烘干机稻谷干燥速率较原有角状盒烘干机的提高了 12.1%~21.2%，而爆腰增率降低了 1.9%~5.1%。

本研究中，仅选用侧壁开圆孔的角状盒进行干燥段空载条件下的数值模拟，后续研究应对不同开孔率、烘干量等条件下的多类型角状盒进行干燥段数值模拟及试验，全面分析角状盒结构对于干燥段流

场及实际烘干效果的影响。

参考文献:

- [1] 姚渠, 尹君, 李瑞敏, 等. 我国粮食干燥技术发展现状与趋势[J]. 粮食加工, 2022, 47(3): 77-79.
- [2] 李嫡, 高明宇. 粮食干燥机的技术现状与发展趋势[J]. 农业与技术, 2022, 42(10): 58-60.
- [3] 林立. 粮食机械化烘干发展情况综述[J]. 农机质量与监督, 2021(2): 32-33.
- [4] 刘攀, 张虎, 张玉龙, 等. 粮食干燥机的现状及发展趋势[J]. 现代农业装备, 2019, 40(3): 16-18.
- [5] 刘启觉. 高水分稻谷干燥工艺试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 135-139.
- [6] 王丹阳, 王洁, 邱硕, 等. 稻谷热风干燥缓苏工艺参数优化与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(17): 285-292.
- [7] 段二亚. 粮食干燥过程的数值模拟及实验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2014.
- [8] 李臻, 梅顺齐, 孔令学, 等. 混流式粮食干燥机角状盒的优化设计[J]. 农业装备技术, 2015, 41(2): 16-19.
- [9] 刘清化, 赵锡和, 吴耀森, 等. 基于 ANSYS 的稻谷热泵干燥仓角状盒选型及优化[J]. 现代农业装备, 2015(4): 32-38.
- [10] 位艳芳. 玉米干燥热泵技术应用及干燥塔角状盒优化设计研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018.
- [11] 高瑞丽. 水稻负压干燥均匀性与品质变化规律的试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2020.
- [12] 吴中华, 王珊珊, 董晓林, 等. 稻谷等温干燥-缓苏过程数值模拟及优化[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 7-13.
- [13] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [14] 郑力铭. ANSYS Fluent 15.0 流体计算: 从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
- [15] 胡坤, 顾中浩, 马海峰. ANSYS CFD 疑难问题实例详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [16] KHATCHATOURLAN O A, TONIAZZO N A, GRTYSHOV Y F. Simulation of airflow in grain bulks under anisotropic conditions[J]. Biosystems Engineering, 2009, 104(2): 205-215.
- [17] GB/T 21015—2007 稻谷干燥技术规范[S].
- [18] 马荐, 李成华, 王丹阳. 干燥工艺参数对稻谷爆腰率增值的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2009, 40(1): 114-117.
- [19] 谢奇珍, 刘进, 师建芳, 等. 水稻混流干燥工艺的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 129-132.
- [20] GB/T 14095—2007 农产品干燥技术 术语[S].
- [21] GB/T 5496—1985 粮食、油料、黄米粒及裂纹粒的检验法[S].

责任编辑: 邹慧玲
英文编辑: 柳 正