

高香兰, 林子木, 王德华, 等. 玉米深层干燥影响因素与水分变化规律研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2024, 55(5): 574-582.
GAO Xianglan, LIN Zimu, WANG Dehua, et al. Study on the influencing factors and moisture variation of maize deep-layer drying [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2024, 55(5): 574-582.

玉米深层干燥影响因素与水分变化规律研究

高香兰, 林子木, 王德华, 邢思敏, 刘国辉

(辽宁省粮食科学研究所, 沈阳 110032)

摘要: 针对玉米干燥过程中水分变化规律认识不深入, 导致实际生产中粮食干燥设备干燥控制自动化水平有限等问题, 采用热风深层顺逆流干燥装置, 探究高水分玉米在烘干过程中水分与干燥段内温度、湿度和排粮频率之间的变化规律; 利用皮尔逊相关性分析法验证干燥段内水分与温度和湿度之间的相关性; 利用过程模拟软件对干燥过程进行模拟分析, 探究加热温度和干燥温度对干燥过程的能耗和能量效率影响, 并进一步分析干燥过程的能量分布情况。结果表明: 干燥过程中玉米的水分变化与干燥段内温度和湿度均具有强相关性。当排粮频率为 10 Hz, 烘干温度从 70 °C 增加到 90 °C, 达到安全水分干燥时间从 225 min 减少为 135 min, 而排粮频率较高时 (20 Hz), 不同烘干温度下的玉米水分变化规律较相近。此外, 烘干 30 min 后计算的玉米水分与温度及湿度的 R 值都大于 0.9, 表明干燥过程中玉米的水分变化与干燥段内温度和湿度均具有强相关性。进一步通过模拟计算结果表明, 当空气加热温度从 70 °C 增加到 100 °C, 干燥能量效率从 54.8% 明显升高至 73.0%, 而干燥温度从 45 °C 增加到 50 °C, 能量效率从 73.0% 降低至 66.4%。增加空气加热温度和降低干燥温度可以降低空气热损失, 有助于降低干燥过程能耗并提高能量效率。

关键词: 水分变化规律; 皮尔逊相关性; 数学模型; 能耗及能量效率

中图分类号: TS210.4

文章编号: 1000-1700(2024)05-0574-09

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on the Influencing Factors and Moisture Variation of Maize Deep-layer Drying

GAO Xianglan, LIN Zimu, WANG Dehua, XING Simin, LIU Guohui

(Liaoning Grain Science Research Institute, Shenyang 110032, China)

Abstract: The poor understanding of the moisture change in the process of maize drying caused the limited automation level of the drying control of grain drying equipment in the actual production. This study focuses on investigating the variations of moisture of high moisture corn with the temperature, humidity, and the frequency of grain discharge during the drying process by a cross-flow and counter-flow hot air dryer. Pearson correlation analysis is employed to verify the correlation between moisture content and temperature/humidity during the drying sections. Process simulation software is utilized to analyze the drying process. The effects of heating temperature and drying temperature on energy consumption and energy efficiency during the drying process are studied. Moreover, the energy distribution during the drying process is also analyzed. The results indicated that a strong correlation between the moisture of corn and the temperature/humidity during the drying stages. When the grain discharge frequency was 10 Hz, the drying time of maize decreased from about 225 min to 135 min due to the drying temperature increased from about 80 °C to 90 °C. Besides, when the grain discharge

收稿日期: 2024-04-25

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2022-MS-068)

第一作者: 高香兰(1984-), 女, 硕士, 高级农艺师, 从事粮食储藏研究, E-mail: 434485345@qq.com

frequency was high (20 Hz), the change of maize moisture exhibited similar case at different drying temperatures. In addition, after 30 mins drying of maize, the calculated R values of moisture with temperature/humidity were all more than 0.90, indicating a strong correlation between the moisture of maize and the temperature/humidity during the drying processes. The calculation results further show energy efficiency of maize drying processes increased from 54.8% to 73.0% due to the increase of air temperature from 70 °C to 100 °C. While energy efficiency decreased from 73.0% to 66.4% after increasing of drying temperature is 45 °C to 50 °C. It can be seen that increasing the heating temperature and reducing the drying temperature can reduce air heat loss, which contributes to reducing energy consumption and improves the energy efficiency of maize drying processes.

Key words: law of moisture change; Pearson correlation; mathematical model; energy consumption and energy efficiency

中国是世界上最大的小麦和稻谷生产国、第二大玉米生产国。2022年,我国粮食总产量68 653万t,约占世界粮食总产量的1/4^[1]。作为三大主要粮食作物之一的玉米,不仅是食品原料和家畜优质饲料,同时也是生产酒精和淀粉的主要工业原料^[2-3]。国家统计局公布的数据显示,2022年我国玉米产量为27 720.3万t,占粮食年总产量的40.38%^[1]。尽管我国玉米产量丰富,但“大国小农”的基本国情决定了小农户承担着我国大部分玉米生产任务,表现出高效的玉米耕种收综合机械化水平与低下的玉米烘干机械化水平间产能不匹配问题,直接导致大量新收玉米(含水率高达22%~28%)无法得到及时有效的干燥处理^[4-5]。目前,我国中原地区在收获玉米后一般直接晾晒在马路两侧,或码垛晾晒;东北地区利用简易仓(如SWD-金属网钢骨架玉米短期储存仓,12~120 m³)对新收获高水分玉米进行仓储;西北地区则主要使用钢板仓、双面涂PVC气密粮仓和聚乙烯板组装仓等存储玉米^[5-7]。受限于自然气候、干燥设备和干燥工艺等诸多因素影响,以上干燥措施无法有效干燥新收获的玉米,导致存储玉米的水分大多超过16%,高于国家规定的安全粮食存储标准(含水率<14%)^[5,8],这会引发玉米发生霉变或变质,造成玉米大量浪费的问题。据统计,每年因腐败变质而损失的玉米高达几百万吨^[9-10]。因此,新收玉米的及时干燥在粮食生产及加工过程中扮演了极其重要的地位,既能保证粮食安全,又能有效提高粮食质量。

20世纪末,研究人员利用干燥设备对玉米进行收获后干燥处理,发现玉米霉变的概率明显下降,玉米干燥效率以及干燥品质得到显著提高。然而,传统的干燥设备是通过燃料燃烧来提供热量,出现热效率低、能量利用率不高的缺点以及能源浪费、环境污染的问题。随着我国农产品烘干技术不断发展,农业生产机械化水平的提高,烘干工艺参数不断优化设计,并逐步向模块化、标准化、智能化及低能耗等方向发展^[11-14]。目前,我国玉米主产区主要选择多级顺流高温快速烘干机进行玉米干燥处理^[5]。然而,玉米烘干人员主要凭借经验,手动调控烘干设备的各项参数,无法根据玉米状态的变化,实时调控干燥过程,进而造成玉米烘干效果差的问题。玉米热风干燥过程中最重要的问题是如何设置合理的工况条件,使干燥速率、能耗水平与产物品质达到最佳水平。干燥的实质是高温的热风与低温的籽粒之间进行的复杂的热量、质量及动量传递。在此过程中,涉及传热传质学、流体力学、弹塑性力学等多个学科领域^[15-16]。因此,在烘干塔工作过程中,探究玉米初始含水率、干燥热风温度、环境湿度、烘干热风风速以及其他干燥工艺等,辅以理论模型,构建分析干燥过程中能耗及能量分布对降低粮食含水率具有重要意义。

本研究以新收获的高水分玉米为研究对象,利用玉米深层顺逆流干燥试验装置^[17],研究高水分玉米在特定温度、排粮频率和样品量等条件下的干燥行为,分析干燥过程中玉米的水分变化与干燥段内温度和湿度的相关性。通过构建顺逆流干燥段玉米干燥过程水分预测数学模型,探究加热温度和干燥温度对干燥过程的能耗和能量效率影响,以期开发高效、节能的玉米干燥方式奠定理论和实践基础。

1 材料与方 法

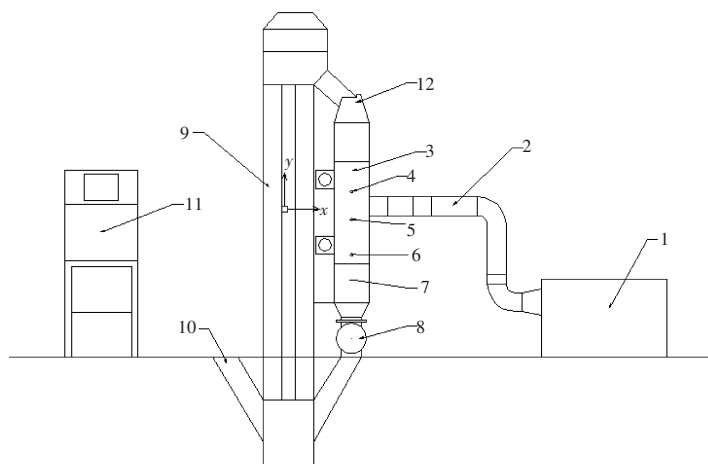
1.1 材 料

本研究选取辽宁省新收获的高水分玉米作为试验样品进行干燥处理,要求玉米水分含量在

20%~25%,为保证物料的成熟度一致,所有玉米均在同一天采摘,且玉米颗粒无病虫害、无机械损伤。

1.2 仪器设备

改造后的玉米热风深层顺逆流干燥试验装置,其中干燥段传感器分布简图见图1,主要部分包括电热风炉、热风管道、干燥段及干燥段传感器等。电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)、电子天平(FA2204B,上海精科)、粉碎机(JFSD-100,上海嘉定粮油仪器有限公司)。



1.电热风炉;2.热风管道;3.干燥段;4.干燥段1传感器;5.干燥段2传感器;6.干燥段3传感器;7.缓苏段;8.排粮机构;9.进出粮提升机;10.装料口;11.控制箱;12.取样口
1.Electric thermal blast furnace; 2.Hot air pipe; 3.Drying section; 4.Drying section 1 sensor; 5.Drying section 2 sensor; 6.Drying section 3 sensor; 7.Tempering section; 8.Grain discharging mechanism; 9.In and out grain elevator; 10.Loading port; 11.Control box; 12.Sampling port

图1 玉米热风深层顺逆流烘干设备结构

Figure 1 Structure of maize hot air deep-layer counter and current drying equipment

1.3 方法

1.3.1 扦样、检测 依据GB5009.3—2016检测标准^[18],对原始玉米样品进行水分检测(下同),具体为随机抽样法。抽取若干数量的未干燥处理的玉米颗粒倒入烧杯中,用电子秤称重并记录数据。然后将装有玉米颗粒的烧杯放置于电热鼓风干燥箱中,设置干燥热风温度为100℃。第1次烘干时间设定为4h,加盖冷却0.5h后称重;第2次烘干时间设定为2h,加盖冷却0.5h后称重。重复第2次的烘干步骤,直到重量不发生变化。将试验前的初始质量和试验后的最终质量分别减去烧杯的质量,即可得到玉米初始质量和玉米干基质量。依据式(1)计算本研究的玉米含水率。

$$M(\%) = \frac{m_0 - m_g}{m_g} \times 100 \quad (1)$$

式中: m_0 为玉米初始质量; m_g 为玉米干基质量。

在使用热风深层顺逆流干燥装置干燥玉米过程中,每间隔15min对玉米样品进行水分检测,并实时监测干燥段1,2,3处的温度和湿度。

1.3.2 试验设计 控制温度、排粮频率两个因素进行玉米烘干试验。具体为:原始玉米样品分别在70,80,90,100℃温度,以及10Hz和20Hz排粮频率下进行烘干试验。控制玉米样品用量为96~100kg。玉米烘干处理过程中,每间隔15min对玉米样品进行水分检测,直到出机水分低于安全水分(玉米含水量为14%)。具体的玉米烘干试验设计见表1。

1.3.3 模拟方法 基于玉米烘干试验结果,利用过程模拟软件对玉米干燥过程进行模拟^[19-21],计算玉

表1 不同排粮频率和不同烘干温度下玉米烘干试验设计
Table 1 Experimental design of maize drying at different grain discharge frequencies and drying temperatures

序号 Number	温度/℃ Temperature	排粮频率/Hz Grain-discharge frequency	样品量/kg Sample quantity
1	70	10	97.5
2	70	20	99.3
3	80	10	98.4
4	80	20	97.3
5	90	10	95.6
6	90	20	99.3
7	100	10	96.4
8	100	20	99.8

米干燥过程的能耗和能量效率,并进一步分析玉米干燥过程的能量分布情况,为实际干燥操作过程提供基础参考价值与理论指导。图2是干燥模拟流程图,模拟中使用的单元和相应模型如表2。进料的空气首先在加热器(Heater1)中加热到与试验要求一致的设置温度(即70,80,90,100 °C)。加热后的空气在换热器(Heater2)中通过热流股(Q-Dry)连接为玉米干燥提供热量。玉米干燥在干燥器(Dryer)中通过收率反应器模型(RYield)实现,干燥温度分别设置为45 °C和50 °C,玉米含水量由25%(原始含水)干燥至14%(对应试验的安全水分)。干燥器的产物通过分离器(Sep)后得到干玉米和水。与玉米换热后的空气进一步冷却(Heater3)至室温,通过计算得到热损失。

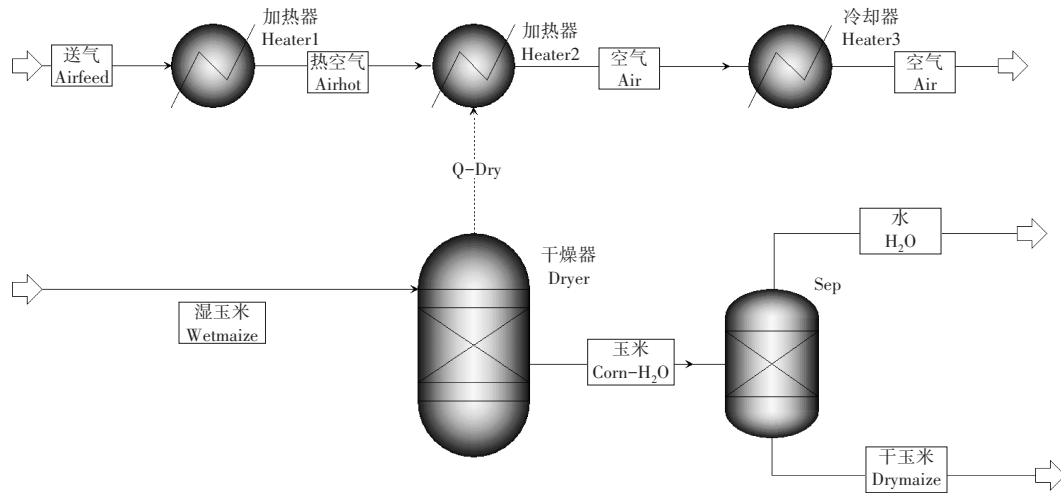


图2 玉米干燥过程模拟流程图

Figure 2 Flow chart of maize drying process simulation

表2 玉米干燥过程模拟中使用的代表性单元和相应模型

Table 2 Representative units and models used in the maize drying process simulation

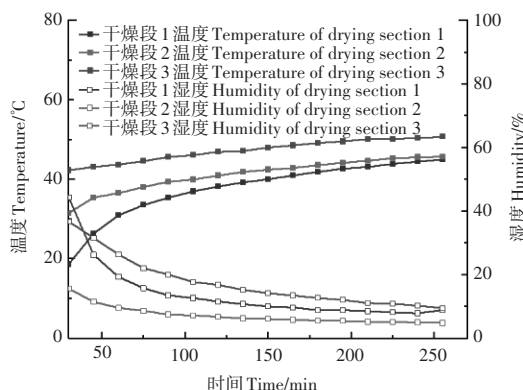
单元 Unit	流程图中名称 English name in flowchart	模型 Model	模型说明 Model description	参数设置 Parameter setting
干燥 Drying	Dryer	RYield	湿玉米干燥 Drying wet maize	45 °C/50 °C
加热器 Heater	Heater1	Heater	空气加热 Air heating	70 °C/80 °C/90 °C/100 °C
换热器 Heat exchanger	Heater2	Heater	热空气给干燥提供热量 Hot air provides heat to drying system	/
冷却器 Cooler	Heater3	Heater	空气冷却 Air cooling	25 °C
分离 Separation	Sep	Sep	分离水和干玉米 Separate water and dry maize	/

2 结果与分析

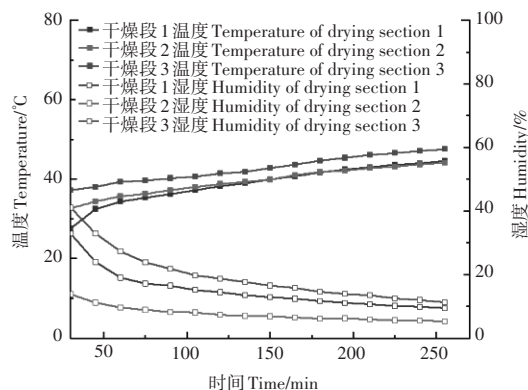
2.1 干燥段温度和湿度变化规律

由图3可知,玉米烘干开始前30 min内,各组样品干燥段3个测温点温度变化没有形成一定规律,这可能是由于初始干燥阶段粮层受热不完全,导致粮温分布不均匀、粮温不稳定。从45 min开始,干燥段1、干燥段2、干燥段3温度变化均呈现有规律的上升趋势,且上升趋势平稳,说明玉米受热均匀。此外,排粮频率较高时,干燥段1和干燥段2的温度变化曲线从120 min开始几乎重合,烘干至安全水分时干燥段1和干燥段2的温度基本一致,均略小于干燥段3温度。然而,排粮频率较小时,烘干至安全水分时干燥段3个测温点的温度形成一定的温度差。玉米水分达到安全水分时,3个测试点的温度大小为:排粮频率为20 Hz时,干燥段3温度>干燥段2温度≈干燥段1温度;排粮频率为10 Hz时,干燥段3温度>干燥段2温度>干燥段1温度。由图3可知,干燥段湿度变化规律与温度变化规律具有高度

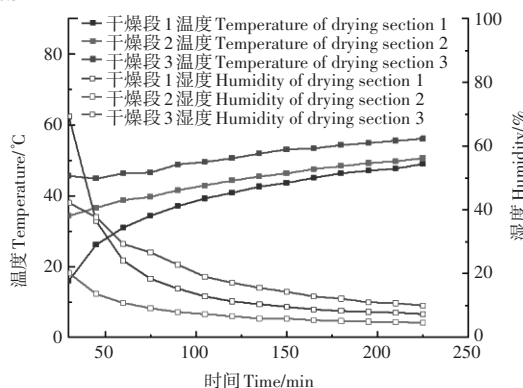
a.1号 No.1



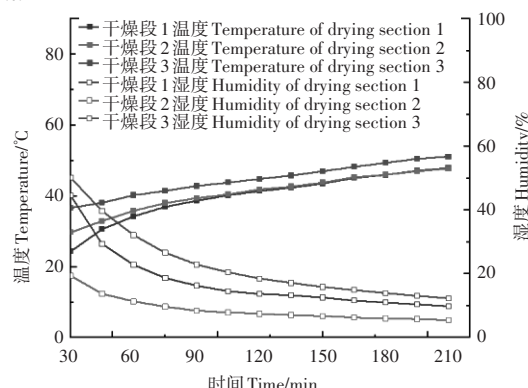
b.2号 No.2



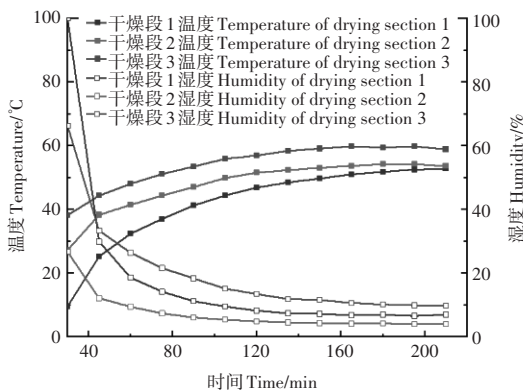
c.3号 No.3



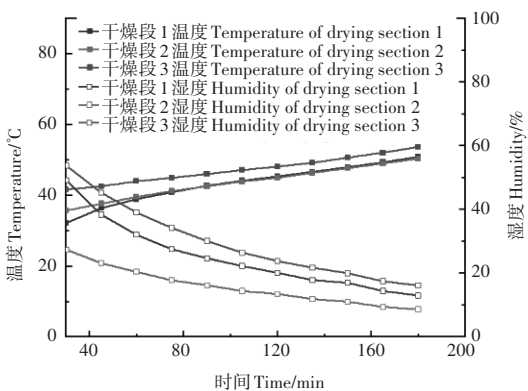
d.4号 No.4



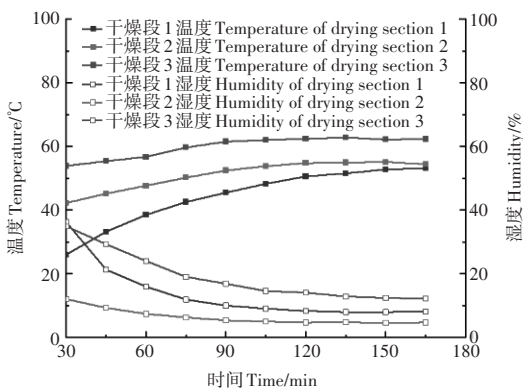
e.5号 No.5



f.6号 No.6



g.7号 No.7



h.8号 No.8

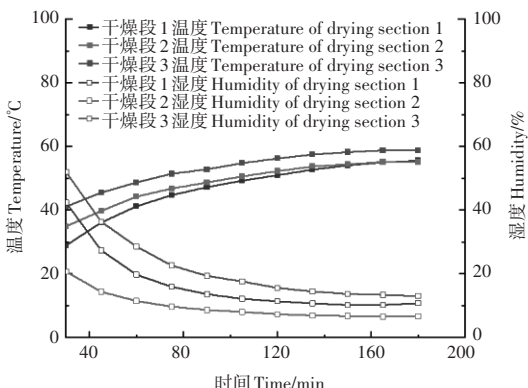


图3 玉米干燥试验过程中干燥段温度、湿度变化曲线

Figure 3 Variation curves of temperature and humidity in maize drying process

相关性,玉米烘干开始前30 min内,各组样品干燥段3个测试点湿度变化没有形成一定规律。随着烘干进行30 min后,热风在粮层内均匀分布,以及从45 min开始,粮温开始有规律升高,干燥段3个测试点湿度也呈现规律性下降趋势。此外,排粮频率对干燥段湿度影响较小,干燥段1、干燥段2和干燥段3的湿度变化曲线从120 min开始均几乎重合,且干燥段3个测试点的湿度形成一定的湿度差。粮食水分达到安全水分时3个测试点的水分大小为干燥段3>干燥段1>干燥段2。

2.2 玉米水分变化规律

研究排粮频率和烘干温度对玉米干燥过程中水分变化的影响规律,有利于科学设计干燥工艺,提高干燥效率^[22-23]。本试验将8组玉米样品按照排粮频率不同分成两组(表1),探究不同排粮频率(10 Hz和20 Hz)及不同烘干温度(70,80,90,100 °C)下玉米烘干过程中其水分变化规律,结果如图4和图5。由图4可知,排粮频率较小时(10 Hz),烘干温度对玉米干燥时间影响较大,即烘干温度在100 °C和90 °C时,玉米水分达到安全水分所需的烘干时间为135 mins(5号和7号样品);烘干温度在80 °C和70 °C时,玉米水分达到安全水分所需的烘干时间为225 mins(1号和3号样品)。此外,排粮频率较高时(20 Hz),烘干温度在70,80,90,100 °C下的烘干试验玉米达到玉米安全水分的时间为160~195 min(图5)。以上结果说明,高排粮频率下4组不同烘干温度条件的玉米试样水分变化曲线较集中,与低排粮频率下形成鲜明对比。

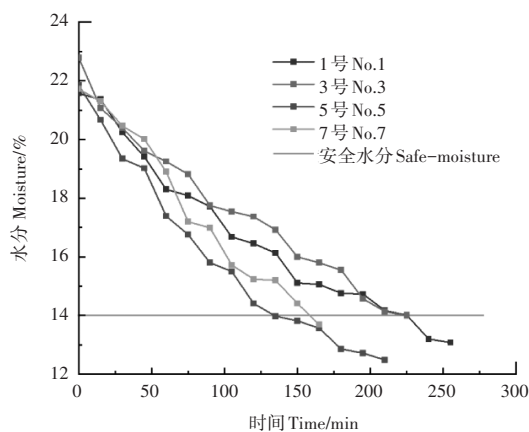


图4 排粮频率为10 Hz时不同试样的玉米水分变化曲线

Figure 4 Moisture variation curves of different maize samples at the grain discharge frequency is 10 Hz

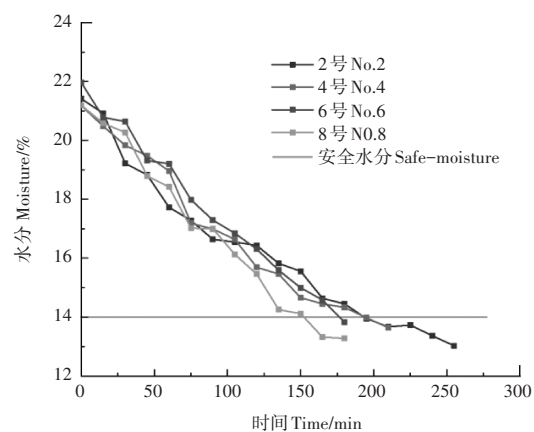


图5 排粮频率为20 Hz时玉米水分变化曲线

Figure 5 Moisture variation curves of different maize samples at the grain discharge frequency is 20 Hz

2.3 玉米水分与干燥段温度和湿度的皮尔逊相关性分析

皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient)是统计学家皮尔逊提出的用于评估两个变量相关性的一种数学分析方法^[24]。皮尔逊相关系数 R 的绝对值越接近1,两个变量的相关性越强^[24-25]。通过干燥段温度和湿度的数据分析可知,干燥段3的温度和湿度都最高。因此,作者根据干燥段3的温度和玉米出机水分、干燥段3的湿度和玉米出机水分两组数据,选取十数个个案数分别分析8组试验中玉米水分与干燥段温度和干燥段湿度的皮尔逊相关系数,结果分别如图6和图7。

由图6可知,不同组样品在烘干初始30 min后,玉米水分和温度的 R 值均大于初始烘干30 min内的数据,且烘干30 min后玉米水分和温度的 R 值都大于0.9,表现出强相关性。此外,玉米水分和湿度的 R 值也在烘干30 min后同样显示出强相关性(图7)。这可以证明玉米烘干试验开始前30 min由于热风分布不均匀,从而导致的干燥段内玉米的温度和湿度分布同样不均匀。而后,随着烘干继续进行,温度与湿度进行有规律变化,干燥段内玉米水分的变化与温度和湿度的变化均表现出强相关性。

2.4 过程模拟

基于上述试验结果,利用过程模拟软件模拟并计算玉米干燥过程的能耗和能量效率,深入分析玉米干燥过程的能量分布情况,为玉米干燥实际操作过程提供理论指导及依据。

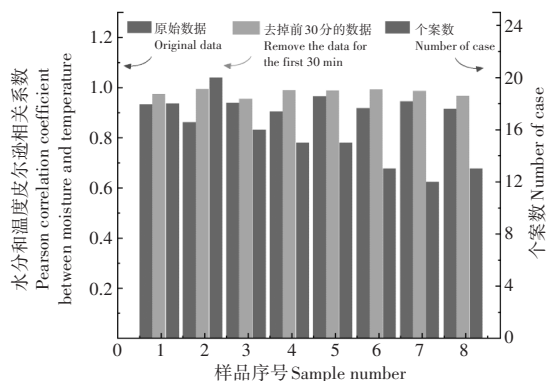


图6 不同个案数出机水分与温度皮尔逊相关系数
Figure 6 Pearson correlation coefficient between outgoing moisture and temperature in different cases

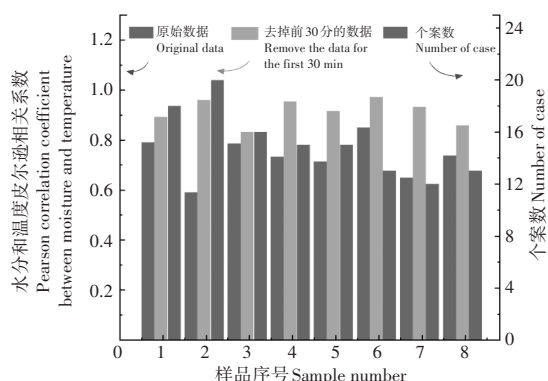


图7 不同个案数出机水分与湿度皮尔逊相关系数
Figure 7 Pearson correlation coefficient between outgoing moisture and humidity in different cases

2.4.1 能耗和能量效率 玉米干燥过程中的热风温度是非常重要的工艺参数之一,牵涉干燥速率(时间)、能耗值以及干燥后品质,需要综合考虑评估^[26-27]。不同温度对玉米干燥过程能耗和能量效率的影响结果见图8。由图8可知,干燥温度为45 °C时,随着空气加热温度从70 °C增加至100 °C,干燥过程能耗由5 100 kJ·kg⁻¹ H₂O显著降低至3 800 kJ·kg⁻¹ H₂O,相应的能量效率从54.8%明显升高至73.0%。这一结果说明,增加加热温度有助于降低玉米烘干过程的能耗,显著提升能量效率。不同干燥温度对干燥过程能耗和能量效率的影响结果见图9。由图9可知,当空气加热温度为100 °C时,随着干燥温度从45 °C升高至50 °C,干燥过程能耗由3 800 kJ·kg⁻¹ H₂O明显增加至4 300 kJ·kg⁻¹ H₂O,相应的能量效率从73.0%降低至66.4%。这一结果说明增大加热温度会导致玉米干燥过程能耗增大及能量效率降低。综合以上分析可知,加热温度和干燥温度对干燥过程能耗和能量效率均有显著影响。此外,相比于加热温度,干燥温度对干燥过程能耗和能量效率的影响更大。因此,在实际干燥操作过程中,如若条件允许,应优先选择较低干燥温度和较高加热温度条件,进而降低整个干燥过程的能耗,提高能量效率。

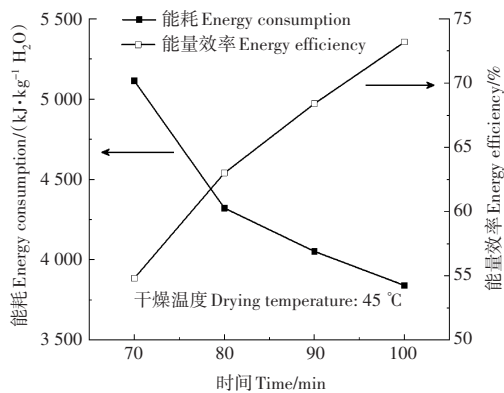


图8 加热温度对玉米干燥过程能耗和能量效率的影响
Figure 8 Effects of heating temperature on energy consumption and energy efficiency in the maize drying process

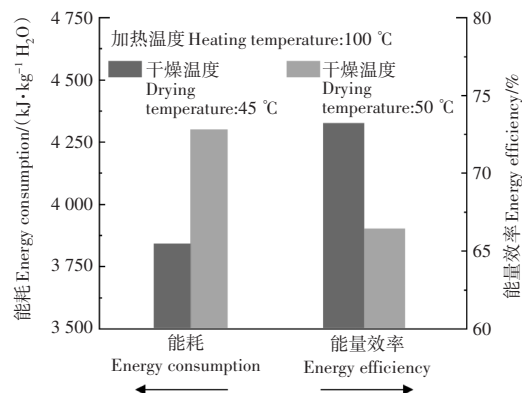


图9 干燥温度对玉米干燥过程能耗和能量效率的影响
Figure 9 Effects of drying temperature on energy consumption and energy efficiency in the maize drying process

2.4.2 能量分布 根据图8和图9的模拟数据分析结果,进一步探究玉米干燥过程中相应的能量分布情况,并深入阐明其对干燥过程的影响,有助于构建高效的粮食干燥模型,进而提高干燥效率^[28-29]。干燥温度为45 °C时,不同加热温度对应的能量分布结果见图10。由图10可知,随着空气加热温度从70 °C升高至100 °C,空气热损失占比逐渐降低,干燥过程的水相变消耗占比和玉米显热消耗占比逐渐

升高,这与图8能量效率结果分析一致。值得注意的是,水相变消耗能量占比是玉米温度升高消耗占比的6倍之多,成为干燥过程能量消耗主体。此外,空气加热温度为100℃时,不同干燥温度对应的能量分布结果见图11。由图11可知,随着干燥温度从45℃升高至50℃,空气热损失占比从27.0%明显增加至33.6%,玉米温度升高显热消耗占比增加,水相变消耗能量占比降低,但仍是显热消耗占比的近5倍。计算结果分析表明,当干燥温度升高5℃时,对应的玉米显热消耗能量增加仅为 $100 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$,但其引起的空气热损失增加约为 $400 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$ 。因此,空气热损失是干燥过程中能耗增加的重要原因。这也导致了干燥过程中能量效率的降低,与图9能量效率结果分析一致。因此,在实际干燥操作过程中,降低空气热损失是提高过程能量效率及降低能耗的重要途径。一方面可通过升高加热温度和减少空气用量的途径,进而减少空气热损失;另一方面可通过降低干燥温度,从而直接降低空气热损失。

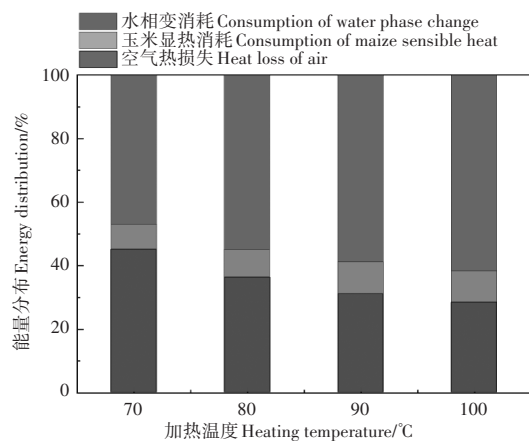


图10 加热温度对干燥过程能量分布的影响
(干燥温度45℃)

Figure 10 Effect of heating temperature on energy distribution in the drying process
(Drying temperature is 45 °C)

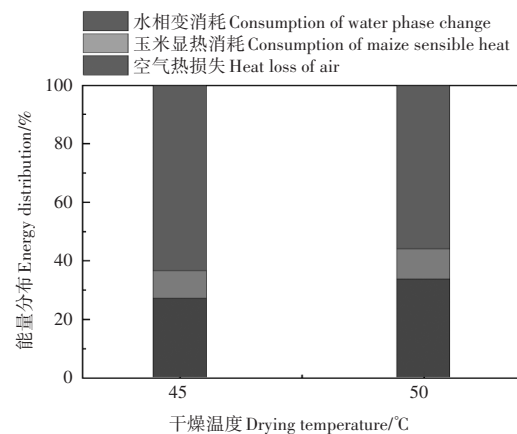


图11 干燥温度对干燥过程能量分布的影响
(加热温度100℃)

Figure 11 Effect of drying temperature on energy distribution in the drying process
(Heating temperature is 100 °C)

3 讨论与结论

采用顺逆干燥模式进行玉米干燥过程中,热风温度、干燥温度、干燥时间、排量频率对玉米达到安全水分所需时间以及所需能量和干燥过程的能量效率都有重要的影响^[13,30-31]。玉米干燥过程中,热风从2段进入流向3段,物料从上端进入,分别经过进行干燥,然后进入缓苏段,因此低频率(10 Hz)时,各段温度为1段<2段<3段,而提高频率(20 Hz)干燥一段时间后1段和2段温度基本一致。但是气相湿度,由于2段通入热空气,所以2段湿度最小,而由于加热玉米内水分增发使3段水分含量最高。玉米干燥初始30 min内,由于水分含量高导致气相温度和湿度波动较大,而30 min后,随着干燥段内热风均匀分布,干燥段内玉米的温度和湿度均可达到均匀分布状态,且根据皮尔逊相关性研究表明,烘干30 min后计算的玉米水分与温度及湿度的 R 值都大于0.9,表明干燥过程中玉米的水分变化与干燥段内温度和湿度均具有强相关性。干燥过程涉及传热、传质、水相变等过程,通过过程模拟软件对玉米干燥过程进行模拟,研究玉米干燥过程的能耗和能量效率。在一定条件下,当干燥空气温度增加,从70℃增加至100℃时,相应的能量效率从54.8%明显升高至73.0%,可能高温有利于传热且空气量少热损失小,而玉米干燥温度增加,从45℃升高至50℃时,会导致热损失增加,相应的能量效率从73.0%降低至66.4%。此外,干燥温度高也会导致玉米理化性质发生变化^[32]。

本研究结果表明,高水分玉米在热风深层顺逆流干燥过程中水分的变化与温度和湿度之间的变化均具有强相关性,排粮频率低会增加干燥段间温度差,而排粮频率增加会减小各干燥段温度差,各段温度更均匀。通过模拟对玉米干燥过程能耗和能量效率进行分析,表明在一定条件下达到相同干燥度和

不影响玉米性质情况下,降低干燥过程能耗和提高能量效率,可以采用较高加热空气温度和较低玉米颗粒干燥温度。本研究也为实际生产中大型粮食干燥设备提高干燥控制和干燥工艺优化提供基础。

参考文献:

- [1] 国家统计局关于2022年粮食产量数据的公告. 国家统计局[EB/OL].2022-12-12. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202302/t20230203_1901673.html.
- [2] 徐成海. 真空干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012.
- [3] 朱靖宇, 王启民. 考虑流场作用的玉米籽粒热风干燥特性分析[J]. 现代食品, 2022, 28(15): 164-167.
- [4] 崔鑫宇, 崔冰波, 马 振, 等. 几何路径跟踪组合算法及其农业机械自动驾驶应用[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2023, 4(3): 24-31.
- [5] 翟晓娜, 谢奇珍, 师建芳, 等. 我国玉米产业链标准现状及发展需求研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 100-106.
- [6] 全国粮油标准化技术委员会. 农户小型粮仓建设技术规范(征求意见稿)[EB/OL]. (2017-09-06) [2020-01-03]. <http://down.foodmate.net/ziliao/sort/41/51913.html>.
- [7] 陈思羽, 李捷涵, 刘春山, 等. 稻谷热风干燥水分扩散特性及含水率预测[J]. 农机化研究, 2023, 45(6): 188-192.
- [8] 白学峰, 常江雪, 滕兆丽, 等. 我国智能农业拖拉机关键技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文), 2022, 3(2): 10-21.
- [9] 车 刚, 高瑞丽, 万 霖, 等. 水稻负压混流干燥室结构优化设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(4): 87-96.
- [10] 孔宁华. 基于实体模型的玉米颗粒热风干燥模拟研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [11] 王德华, 高树成, 刘国辉, 等. 粮食干燥系统替代燃煤的热源比较与分析[J]. 粮食加工, 2020, 45(1): 71-72.
- [12] 邢思敏, 高香兰, 林子木, 等. 基于极限学习机的玉米干燥系统出机水分含量预测模型[J]. 沈阳农业大学学报, 2023, 54(5): 619-626.
- [13] 刘紫薇, 贾宗友, 杨浩勇, 等. 粮食烘干机变频式热泵系统的开发及试验研究[J]. 南京农业大学学报, 2022, 45(6): 1286-1294.
- [14] 王 洁, 王丹阳, 王文钰, 等. 变温干燥工艺对稻谷干燥特性和品质的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2022, 53(2): 239-247.
- [15] 王庆远, 叶长安. 对流干燥设备设计中的相关计算[J]. 农机化研究, 2002, 24(2): 80-81.
- [16] 刘相东, 李占勇. 现代干燥技术[M]. 第3版. 北京: 化学工业出版社, 2022.
- [17] 李小化, 李 杰, 王宝东, 等. 一机两用的顺逆流粮食干燥机[J]. 粮食流通技术, 2004(4): 26-28.
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [19] GAO M Y, CHENG X D, DU XC. Simulation of bulk density distribution of wheat in silos by finite element analysis[J]. Journal of Stored Products Research, 2018, 77: 1-8.
- [20] 王远成, 张忠杰, 吴子丹, 等. 计算流体力学技术在粮食储藏中的应用[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(5): 86-91.
- [21] GETAHUN E, DELELE M A, GABBIYE N, et al. Importance of integrated CFD and product quality modeling of solar dryers for fruits and vegetables: A review[J]. Solar Energy, 2021, 220: 88-110.
- [22] ÇELİK E, PARLAK N, ÇAY Y. Experimental and numerical study on drying behavior of corn grain[J]. Heat and Mass Transfer, 2021, 57: 321-332.
- [23] 赵春雨, 赵学工, 迟庆雷, 等. 玉米多段干燥出机粮含水率与干燥过程温度关系的试验研究[C]//中国粮油学会成立20周年庆祝大会暨中国粮油学会年会, 2006.
- [24] 张宇镭, 党 琰, 贺平安. 利用Pearson相关系数定量分析生物亲缘关系[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(33): 79-82.
- [25] ADLER J, PARMRYD I. Quantifying colocalization by correlation: The Pearson correlation coefficient is superior to the Mander's overlap coefficient[J]. Cytometry Part A, 2010, 77(8): 733-742.
- [26] 周静宜, 赵一霖, 张 浩, 等. 热风干燥温度对糯玉米理化特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 83-88.
- [27] LIU P, RER G, DUAN X, et al. Application of microwave treatment technology in the field of food drying[J]. Food and Machinery, 2023, 36(12): 194-202.
- [28] 翁 拓, 吴家正, 范 立, 等. 粮食干燥技术的能耗浅析[J]. 节能技术, 2014, 32(3): 210-213.
- [29] LI B, ZENG Z, ZHANG X, et al. Study on the variable-temperature drying process of corn drying in an industrial corn-drying system equipped with a self-adaptive control heat exchanger[J]. Applied Sciences, 2021, 11(6), DOI: 10.3390/app11062772.
- [30] 赵春雨, 赵 学, 迟庆雷, 等. 玉米多段干燥出机粮含水率与干燥过程温度关系的试验研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(3): 358-365.
- [31] 孙庆运, 韩梦龙, 贾振超, 等. 玉米干燥技术与装备研究进展[J]. 农业装备与车辆工程, 2024. <https://link.cnki.net/urlid/37.1433.TH.20240628.1433.004>.
- [32] 周静宜, 赵一霖, 张 浩, 等. 热风干燥温度对糯玉米理化特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 83-88.

[责任编辑 李 薇]