

# 高湿粮食贮藏干燥机设计与试验\*

李长友 张 焯 麦智炜

(华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642)

**摘要:** 在对高湿粮食干燥状态参数和水分结合能变化特征理论分析的基础上,设计了一种高湿粮食贮藏干燥机,从理论和试验两方面证实了干燥系统客观能势的利用效果,图解了高湿粮食在贮藏干燥机内的温度及其含水率状态变化过程。试验结果显示,温度在30℃、相对湿度40%时,利用自然空气可将粮食的温度降至低于环境温度10℃、降水速率在0.76%/h以上。研究结果为粮食干燥工艺系统设计指明了高效节能的途径,为大型粮食集中干燥设施提供了高效节能的预干燥设备。

**关键词:** 高湿粮食 贮藏干燥 干燥机 设计 试验

**中图分类号:** S226.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0231-05

## 引言

干燥是高能耗的单元操作,为了节能,研究人员围绕干燥工艺系统及设备设计进行了大量研究工作<sup>[1-7]</sup>,设计出了仓式、横流、逆流、混流、循环式<sup>[8]</sup>和滚筒式<sup>[9]</sup>等多种形式的干燥机,提出了很多改进粮食热风干燥能量利用的方法和建议<sup>[10-12]</sup>,但触及粮食干燥系统能量消耗本质的内容稀少,干燥机设计主要靠类比和小规模试验,对粮食干燥过程发生的机理及耗能结构的诸多问题还认识不清。为寻求新的节能降耗途径,研究人员探索通过改变能量发生与提供方式,尝试了微波干燥<sup>[13-14]</sup>、红外线热辐射干燥<sup>[15]</sup>等,这些试图以消耗高品位能为代价获取干燥节能的做法,对于粮食这种廉价的特殊商品,不论在理论上还是实际应用上,都难以取得令人信服的节能效果。问题的根源在于人们把干燥工艺技术节能的注意力集中在了干燥机系统的主观能量上,忽视了干燥系统存在的客观能势的利用,这是造成粮食机械化干燥能耗居高的主要原因之一。

由于粮食属于热敏性物料,尤其在高含水率状态时,对干燥温度比较敏感,温度过高或者工艺及其操作参数不当,都会造成质量损失。最优品质的干燥条件是尽可能接近自然阴干。为了从理论上定量评价自然空气干燥能量的利用效果及实现的技术手段。本文基于粮食干燥传递理论<sup>[16]</sup>,设计一种高湿粮食贮藏干燥机,说明设计的原理和评价能效的

方法,试验考证其干燥效果,为实现高湿粮食优质、高效节能干燥补充一些理论基础,为粮食机械化干燥工艺系统设计提供配套装备技术。

## 1 设计理论

### 1.1 干燥分析

干燥可以归结为及传递的过程。是指热力系统由任意状态可逆地变化到与环境态相平衡时所做的最大有用功<sup>[17]</sup>,所谓的传递是指干燥室内各状态点的干燥能力随时间变化的规律,传递的必要条件是必须存在能够反映到干燥系统湿分状态变化的势差,即温差、湿差、浓度差、蒸汽压差等,揭示的就是干燥过程中各状态点值的变化规律。从粮食干燥耗能的形式看,水分汽化消耗的是系统的热能,水分运动依赖不同形式的势差。而从干燥势差的来源和性质看,存在人为提供的主观和自然界提供的可以无偿利用的客观。客观传递也是客观的,非人之所为,此部分在干燥系统状态参数坐标图上的表达如图1所示。为使图线清晰,便于确定热风干燥系统粮食和介质的状态参数,分析其状态变化过程和能量消耗结构,纵坐标和横坐标之间夹角选取了135°。横坐标是空气的湿含量 $d$ 、纵坐标是干燥系统的焓 $h$ , $M_e$ 线是粮食的干基等平衡含水率线,即粮食水分出入的界限线,当干燥介质的状态处于其对应的粮食等平衡含水率线的左侧时,粮食被介质干燥,反之,粮食则被吸湿。从图1可以看

收稿日期: 2013-12-18 修回日期: 2014-01-10

\* 国家自然科学基金资助项目(31371871)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20114404110021)和广东省产学研资助项目(2012B091000135)

作者简介: 李长友,教授,博士生导师,主要从事农业装备技术研究,E-mail: lichyx@scau.edu.cn

到,粮食的干基含水率在20%以上时,对应粮食的等平衡含水率曲线非常接近空气相对湿度为90%的等相对湿度线,当干基含水率在30%以上时,则非常接近空气的饱和湿度线,表明在一般情况下,自然空气对高湿粮食具有相当的干燥能力,迎合粮食内部水分结合能与温度及粮食含水率间的变化趋势,有效地利用客观干燥,可以实现高湿粮食在较低温度条件下的快速干燥。

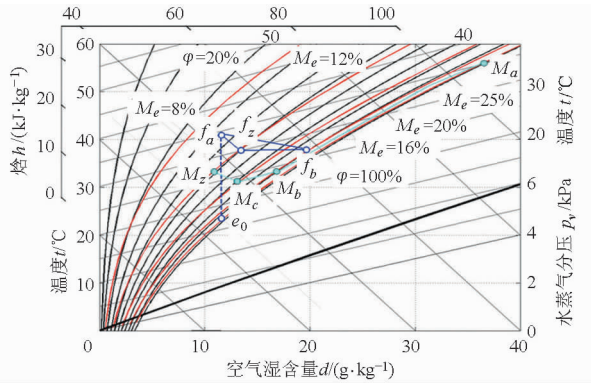


图1 粮食干燥系统状态参数图

Fig. 1 State parameter in grain drying system

## 1.2 粮食内部水分与结合能

存在于粮食内部的水分,因其存在的形式不同所受到的物料牵制作用并不一样,但不论水分以何种方式存在于物料之中,共同的特征是与物料结合后,都会使水分上表面的水蒸气分压力降低而减少水分的自由能,且自由能的减少量,在数量上相当于从物料中脱去1kg水的结合能<sup>[18]</sup>,所以,就干燥本身而言,可以把粮食中水分的自由能作为水分与粮食结合的唯一形式,自由能的减少量等同于水同物料的结合能。

基于图1所示的等平衡含水率线,绘制出玉米在不同温度条件下的水分结合能与其干基含水率的关系如图2所示。

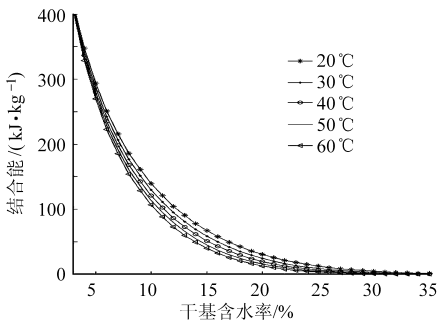


图2 玉米中水分结合能与含水率的关系

Fig. 2 Relationship between moisture binding energy of corn and its moisture content

从图2得知,水分与粮食的结合能随含水率和粮食温度的升高而降低。在粮食干基含水率超过30%后,温度对其结合能的影响非常小,而在低水分

域,结合能随含水率的降低而增大。表明在同样的降水和温度变化区间内,粮食在升温干燥过程中消耗于水分蒸发的那部分能量要比同样条件下的降温干燥过程多,这一规律精确拟合了粮食的实际干燥过程<sup>[19-20]</sup>,在理论上解析出了干燥过程水分蒸发的能量需求。可以断定,对于高含水率状态的粮食,提高干燥温度并不能有效地改善蒸发水分的能量消耗,而在低水分域提高干燥温度,有利于强化干燥过程,也会使水分蒸发耗能有所降低。

## 1.3 粮食及介质状态分析

基于图1和图2。假设向初期含水率30%、温度35℃的粮层中,通入相对湿度40%、温度35℃的自然空气,那么在图1中干燥系统的零点是干燥介质的初始等湿线与粮食最初的等平衡含水率线的交会点 $e_0$ 点。在持续通风过程中,自然介质在图1中的状态变化将由最初的状态点 $f_a$ ,对应粮食的初态点 $M_a$ 沿增焓增湿的路径到达 $f_b$ 点排出机外;高湿粮食的状态将沿去湿降温路径由 $M_a$ 点变化到 $M_b$ 点,在维持粮温基本不变的状态下,由高湿含水率状态持续降低到 $M_c$ 较低的含水率状态,到达 $M_c$ 以后,随着粮食含水率的持续降低,排气状态则由 $f_b$ 逐渐变化到 $f_z$ 终态点;此时粮食的含水状态则是沿升温去湿过程线,由 $M_c$ 状态变化到 $M_z$ 终态点。在粮食较低的含水率段,对应粮食去水速率的持续降低,干燥机内空气的状态将沿接近等焓的过程线到达终态点 $f_z$ 。在整个变化过程中,干燥机内空气的状态点始终处在对应的粮食等平衡含水率线的左侧,不出现粮食被介质吸湿的现象。

分析图1中的状态参数变化过程不难发现,对于高湿粮食,最初的自然空气携带有 $h_{f_a} - h_{e_0}$ 的干燥能,粮食携带有对应 $t_{M_a} - t_{e_0}$ 温差势的热量,粮食在高湿状态下,水分与粮食的结合能很小,利用自然空气不仅可以快速去除,同时,也可以使粮食的温度最低降至 $t_{e_0}$ ,在强制通风的条件下,由于流动的存在会使物料与静态介质对应的平衡含水率进一步降低,客观的干燥能力和降温效果都必然会得到进一步强化。

## 2 贮藏干燥机设计

### 2.1 干燥机结构参数

依照图3所示的每米粮层内的静压与风速的关系,按照通风层深1.6~2m设计原则,配置Y4-7310D型离心风机,流量35633m<sup>3</sup>/h,全压2033Pa,配套电动机Y225S-4型,功率37kW,确定出的最小通风面积为59m<sup>2</sup>。

干燥系统主要由提升机、多路阀、干燥机体、通

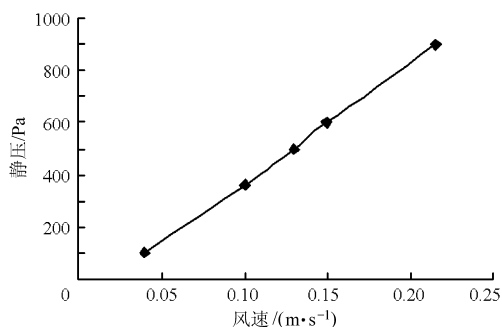


图 3 每米粮层内的静压与风速的关系

Fig. 3 Relationship between static pressure and air speed of grain layer per meter

风道、干燥室、排粮阀及风机等配套设备构成<sup>[21]</sup>。其基本结构属于方形透气仓体, 仓体的下部是锥形仓底, 仓底和仓体的四周安装带网眼的透气板, 上端敞开, 直接与大气相通。风道设计在干燥机中下部, 四周安装带网眼的透气板, 风道的底面敞开, 流动的粮面直接与干燥室相通。干燥机设计成多个干燥仓并排相接, 仓体与仓体之间用带网眼的透气板相隔, 每个仓体的最低端都安装有独立的排粮阀, 所以, 每个品种的粮食送入各自的干燥仓后, 在干燥过程中, 不会出现与其他仓体中的粮食相混的情况。此种设计, 不仅大幅度减少了干燥系统辅助设备的配置数量, 还满足了多个品种粮食同时干燥的需要。

## 2.2 干燥系统物质衡算

输入干燥物

$$G_1 = G_g + G_1 M_1 \quad (1)$$

输入干燥介质

$$L_1 = L + L d_1 \quad (2)$$

离开干燥物

$$G_2 = G_g + G_2 M_2 \quad (3)$$

离开干燥介质

$$L_2 = L + L d_2 \quad (4)$$

质平衡式

$$G_1 M_1 - G_2 M_2 = L(d_2 - d_1) \quad (5)$$

物料失水量

$$W_s = G_1 \frac{M_1 - M_2}{1 - M_2} \quad (6)$$

式中  $W_s$ ——单位时间内蒸发的水分量, kg/h  
 $G_g$ ——单位时间内绝干物质的流量, kg/h  
 $G_1, G_2$ ——进仓和出仓的粮食流量, kg/h  
 $L$ ——单位时间内绝干空气的流量, kg/h  
 $M_1, M_2$ ——物料进、出干燥室时的干基含水率, kg/kg  
 $d_1, d_2$ ——空气进、出干燥室的湿含量, kg/kg

湿物料和干燥产品的含水率通常以湿基含水率  $M_s$  与干基含水率  $M$  表示, 含水率取小数时, 两者之

间的关系为

$$M_s = \frac{M}{1 + M} \quad (7)$$

基于以上原理设计的机内容量 350 t, 风量谷物比  $102 \text{ m}^3 / (\text{h} \cdot \text{t})$ , 间歇通风日降水幅度  $10\% / \text{d}$  的贮藏干燥机实物外形结构如图 4 所示, 原理及主要结构尺寸如图 5 所示。



图 4 5HC-35 型粮食贮藏干燥机

Fig. 4 Type 5HC-35 grain storage dryer

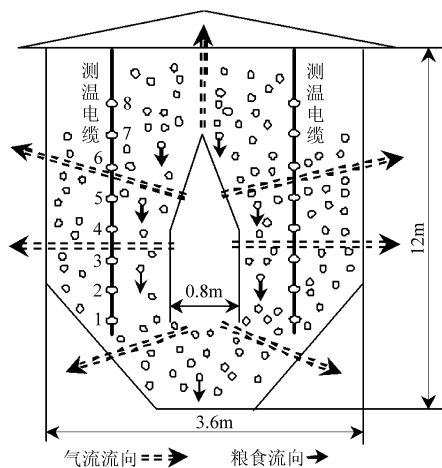


图 5 贮藏干燥机结构原理

Fig. 5 Structure principle of storage dryer

基于图 1, 可查出, 当粮食的干基含水率在 20% 以上时, 每千克干空气穿越粮层后平均可携带走的水分 0.007 6 kg/kg。而干基含水率降至 20% 以下后, 到达目标水分, 每千克干空气穿越粮层后平均可携带走的水分 0.35 kg/kg, 按照干燥机内高湿粮食及空气的状态变化过程, 累计间歇通风 13 h, 由式(1)~(6)计算出的高湿粮食平均降水幅度则达 10% 以上。

## 3 样机试验

为了考证样机的产能及可靠性, 2013 年 10 月

14日—10月27日,在新疆昌吉州奇台县老奇台镇牛王公村玉米产地干燥现场,连续进行试验考证。测温点位置如图5所示。

### 3.1 降水幅度测试结果

实测初期平均含水率36.6%的高湿玉米,由提升机喂入贮藏干燥机,装满后,谷物靠自重仓内缓慢向下移动,沿风道的两侧进入干燥段。粮食在贮藏干燥机内的走行时间24 h,累计间歇通风10 h,实测平均出仓水分23.3%。可见,绝大部分高湿水分已被去除,证实了自然空气对高湿粮食有明显的去水效果和设计的干燥机产能,实现了设计目标。

### 3.2 机内温度测试结果

为了验证干燥层内的温度分布,间接评价通风过程的压力及风量分布,在贮藏干燥机内不同位置悬吊了4根测温电缆,每根电缆上均布8个测温点,自下向上分别记为1~8测点(图5)。在不同时段测试出的干燥仓内(第2测点)的粮食温度及环境温度、湿度变化如图6所示。粮温沿仓体纵向分布如图7所示。

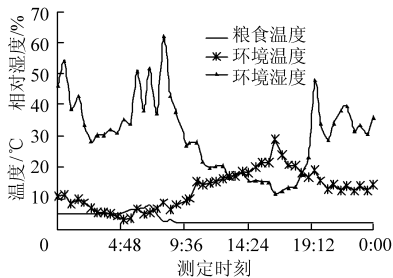


图6 粮食温度与环境温湿度变化

Fig.6 Changing of grain temperature and environmental temperature and humidity

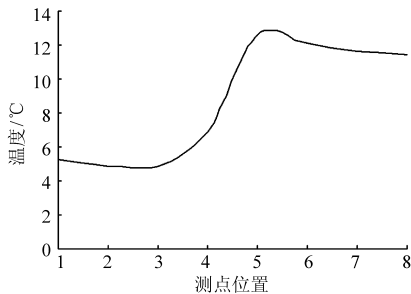


图7 机内粮食温度纵向分布

Fig.7 Longitudinal distribution of grain in dryer

从图6可以看出,利用自然空气干燥高湿粮食,粮食在所设计的贮藏干燥机内经历的是降温、维持较低温度不变的去水过程,在环境温度4.4~29°C的变化范围内,粮食温度由最初的12.2°C降至4.4°C后,无论环境温度如何变化,而粮食的温度保持了4.4°C,同时,粮食的温度远远低于环境介质的温度。这一事实验证了基于图1和图2的理论曲线,可以从理论上预测出粮食的干燥状态变化过程,也证实了预测理论的可靠性。找到了粮食保持在温度相对较低的条件下,高效去水的技术方案,探明了实现粮食优质、高效节能干燥的技术途径。

从图7可以看出,在层厚度相对较小的干燥段,粮食的温度较低,而层厚度较大的位置,粮食温度存在明显差异,表明干燥介质在不同的蒸发层厚度内的静压损失存在较大差异,这一事实,验证了图3所示的每米粮层内静压与风速关系曲线的可靠性。

## 4 结论

(1)粮食的干基含水率在20%以上时,对应粮食的等平衡含水率曲线非常接近空气90%的等相对湿度,当干基含水率在30%以上时,则非常接近空气的饱和湿度线,表明在一般情况下,自然空气对高湿粮食具有相当的干燥能力。

(2)在粮食干基含水率超过30%后,温度对其结合能的影响极小,对于高湿粮食提高干燥温度并不能有效地改善蒸发水分的能量消耗,而在低水分域提高干燥温度,有利于强化干燥过程,也使水分蒸发耗能有所降低。

(3)设计的5HC-35型高湿粮食贮藏干燥机,从理论和试验两方面证实了干燥系统客观能势的利用效果,图解了高湿粮食在贮藏干燥机内的温度及其含水率状态变化过程,试验结果显示,温度在30°C、相对湿度40%时,利用自然空气可将粮食的温度降至低于环境温度10°C、降水速率在0.76%/h(干基)以上。

(4)流动会使物料与静态介质对应的平衡含水率进一步降低,会使客观的干燥能力和降温效果得到进一步强化。

## 参 考 文 献

- 胡万里,李长友,徐凤英. 稻谷薄层快速干燥工艺的试验[J]. 农业机械学报,2007,38(4):103-106.  
Hu Wanli, Li Changyou, Xu Fengying. Experimental study on fast dry craft of rough rice thin layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4):103-106. (in Chinese)
- 付志一,华云龙. 稻谷吸湿过程中内部应力峰值分析[J]. 农业机械学报,2000,31(3):59-62.  
Fu Zhiyi, Hua Yunlong. Analysis of peak stress in rice kernel during moisture absorption[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(3):59-62. (in Chinese)
- 郑先哲,夏吉庆,杨悦乾. 增湿加热稻谷干燥工艺试验[J]. 农业工程学报,2000,16(3):81-83.

- Zheng Xianzhe, Xia Jiqing, Yang Yueqian. Experimental study on paddy drying technology by using humidified and heated air[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3): 81-83. (in Chinese)
- 4 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.  
Xie Qizhen, Liu Jin, Shi Jianfang, et al. Experimental study on continuous mixed-flow drying technology for rice[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 129-132. (in Chinese)
- 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 邢佐群, 孙佩东, 尹思万, 等. 降温缓苏多级顺流粮食干燥工艺的模拟研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(3): 243-246.  
Xing Zuqun, Sun Peidong, Yin Siwan, et al. Simulated study on multi-stage concurrent flow grain drying technology with ventilation tempering[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(3): 243-246. (in Chinese)
- 7 陈军, 史琳, 张金龙, 等. 高温除湿干燥机的试验研究[J]. 工程热物理学报, 2006, 27(3): 376-378.  
Chen Jun, Shi Lin, Zhang Jinlong, et al. Experimental study of a high temperature heat pump dehumidification dryer[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(3): 376-378. (in Chinese)
- 8 潘永康, 王喜忠, 刘相东. 现代干燥技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 945-969.
- 9 刘立山, 吕宝君, 匡军, 等. 滚筒式种子干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 77-80.  
Liu Lishan, Lü Baojun, Kuang Jun, et al. Development of a crop seeds dryer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 77-80. (in Chinese)
- 10 潘九君, 路少昆, 闫立衡, 等. 粮食干燥机械节能减排现存问题及完善措施[J]. 粮食流通技术, 2011(1): 13-15.
- 11 李杰. 我国粮食干燥节能减排技术发展现状与展望[J]. 粮食储藏, 2011, 40(4): 13-16.  
Li Jie. Present situation and development of energy saving and emission reduction technology in grain drying[J]. Grain Storage, 2011, 40(4): 13-16. (in Chinese)
- 12 牛兴和, 曹崇文. 谷物干燥节能技术[J]. 农业工程学报, 1990, 6(3): 87-94.
- 13 张习军, 熊善柏, 赵思明. 微波处理对稻谷品质的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 224-229.  
Zhang Xijun, Xiong Shanbai, Zhao Siming. Effect of microwave on paddy quality[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(1): 224-229. (in Chinese)
- 14 董铁有, 朱文学, 木村俊范, 等. 糙米的厚层微波干燥[J]. 农业工程学报, 2003, 19(2): 160-162.  
Dong Tiejou, Zhu Wenxue, Toshinori Kimura, et al. Microwave drying of thick layer brown rice[J]. Transactions of the CSAE, 2003, 19(2): 160-162. (in Chinese)
- 15 Naret Meeso, Adisak Nathakaranakule, Thanid Madhyanon, et al. Modelling of far-infrared irradiation in paddy drying process [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1248-1258.
- 16 李长友. 粮食热风干燥系统 评价理论研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 1-6.  
Li Changyou. Exergy evaluation theory of hot air drying system for grains[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 1-6. (in Chinese)
- 17 李长友. 热工基础[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011: 74-80.
- 18 金兹布尔格 A C. 食品干燥原理与技术基础[M]. 北京: 轻工业出版社, 1986: 172-278.
- 19 Li Changyou, Liu Jiangtao, Chen Lina. The moisture distribution of high moisture content rough rice during harvesting storage and drying[J]. Drying Technology, 2003, 21(6): 1115-1125.
- 20 Li Changyou. Analytic solution of mass conservation equation for drying process[J]. International Journal of Food Engineering, 2010, 6(1): 1-11.
- 21 李长友. 高湿粮食干燥机: 中国, ZL 201010019518.1[P]. 2012-05-30.

## Design and Experiment of Dryer for High Moisture Grain Storage

Li Changyou Zhang Ye Mai Zhiwei

(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of excessive energy consumption of high moisture grain drying, a high moisture grain dryer was designed, and the state parameters in high moisture grain drying and the change characteristics of moisture binding energy were analyzed. From the theoretical and experimental evidences, the utilization effects of drying potential energy and the changing process for the temperature and moisture of high moisture grain dryer were illustrated and observed. The experimental result showed that the temperature of grain could be reduced and was lower than environment temperature nearly 10°C when temperature was 30°C, relative humidity was 40% and drying rate was more than 0.76%/h. The result also pointed out the design method of grain drying process for saving energy and provided energy efficiency of pre-drying equipment for large-scale grain drying companies.

**Key words:** High moisture grain Storage drying Dryer Design Experiment