

# 热泵流化床间歇干燥小麦仓储效果的试验研究

刘恩海<sup>1</sup>, 刘寅<sup>1</sup>, 范中阳<sup>2</sup>, 王喜芳<sup>2</sup>, 李帅<sup>3</sup>, 方保江<sup>3</sup>

(1. 中原工学院能源与环境学院, 河南 郑州 450007; 2. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093;  
3. 河南城建学院能源与建筑环境工程学院, 河南 平顶山 467036)

**摘要:**以豫麦9023为研究对象,通过采用自行设计组装的热泵流化床干燥试验装置与热风薄层干燥的对比试验,研究了50℃干燥温度工况下热泵流化床与热风薄层对豫麦连续式干燥的仓储效果。基于热泵流化床间歇干燥机理,结合连续式干燥方式对豫麦品质的影响,提出了间歇式干燥试验方案。试验表明:初始含水率相同的豫麦干燥过程,热泵流化床干燥速率大于热风薄层干燥,含水率降幅较大;与连续式干燥相比,间歇数 $\eta$ 值越大,系统能量利用及热效率越高,干燥后的豫麦品质较好,得出了以 $\eta = \frac{2}{3}$ 的间歇干燥方式仓储效果最佳。研究结果可为粮仓储粮干燥设备的设计及储粮工艺改进等提供参考依据,对于提高谷物、种子等颗粒状物料的仓储效果和延长其储藏期具有重要意义。

**关键词:**热泵流化床;间歇干燥;小麦储藏;干燥速度

**中图分类号:**S 375 **文献标识码:**A **文章编号:**1007-7561(2016)03-0101-03

## Experiment research on the effects of intermittent drying of wheat in the granary by heat pump and fluidized bed

LIU En-hai<sup>1</sup>, LIU Yin<sup>1</sup>, FAN Zhong-yang<sup>2</sup>, WANG Xi-fang<sup>2</sup>, LI Shuai<sup>3</sup>, FANG Bao-jiang<sup>3</sup>

(1. School of Energy&Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou Henan 450007;  
2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093; 3 School of Energy and Building Environment Engineering, Henan University of Urban Construction, Pingdingshan Henan 467036)

**Abstract:** Taking the wheat, Yumai 9023, as a research object, the effects of both drying methods, drying with heat pump and fluidized bed designed by ourselves and drying by thin layer hot-air method, were comparatively tested at 50℃. Based on intermittent drying mechanism of heat pump fluidized bed, combined with the effect of continuous drying method on the quality of the wheat, the intermittent drying experiment was designed. The test showed that the drying rate of the heat pump and fluidized bed was higher than that by thin layer hot-air and larger decline in water content with the same initial moisture content. Compared with continuous drying the greater the intermittent number  $\eta$ , the higher the system energy use and the thermal efficiency, the better quality of the dried wheat. The optimal effect by intermittent drying was when  $\eta = \frac{2}{3}$ . The results provide reference for design of drying equipment and improvement of grain storage process, which has an important significance for improving the grain, seeds and other granular material storage effect and prolong its storage period.

**Key words:** heat pump and fluidized bed; intermittent drying; wheat storage; drying rate

热泵流化床干燥技术在谷物、种子等颗粒状物

料干燥领域已经得到了实际的应用,具有干燥介质与物料的接触面积大,换热效果较好;设备的维护费用低、热效率高;干燥过程易控制,应用范围广泛等

收稿日期:2015-09-15

作者简介:刘恩海,1974年出生,男,讲师,博士研究生。

特点<sup>[1][2]</sup>。目前市场上已经有很多不同类型的流化床干燥的设备,技术应用已经相当成熟。然而,从现有的文献分析,研究热点多集中在箱式结构的热泵干燥工艺条件介绍、设备装置的设计及干燥过程传热传质的机理等方面,只有较少的学者研究过热泵流化床的干燥装置,提出了在流化床干燥过程比箱式热泵干燥过程干燥效率高、时间短,热质转换阻力减小等问题<sup>[23]</sup>,但是,对热泵流化床间歇干燥小麦仓储效果、间歇干燥方式的优化等方面的研究却很少。本试验以豫麦9023为研究对象,设计组装了一套热泵流化床干燥试验装置,以50℃为干燥温度工况,取等量的小麦样品,通过采用试验装置和热风薄层干燥的对比试验,进一步研究了流化床干燥小麦含水率与干燥时间的关系。根据热泵流化床间歇干燥机理,结合连续干燥仓储效果,提出了间歇干燥试验的设计方案,可为分析谷物、种子等颗粒状物料的干燥速率,热泵间歇干燥装置的设计提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

#### 1.1.1 试验材料

豫麦9023:取自河南某粮油储备库2014年收获,经分样、筛选后,实测样品平均含水率为18%。

#### 1.1.2 主要试验仪器

设计组装热泵流化床干燥试验装置:由溴化锂吸收式热泵机组系统,换热装置、供风控制系统,干燥系统等组成,试验装置系统原理图见图1;DHG-9030型电热恒温鼓风干燥机:浙江绍兴市舜光仪器设备有限公司;LSKC-4B型电调粮食水份测定仪:武汉市电子仪器二厂等。

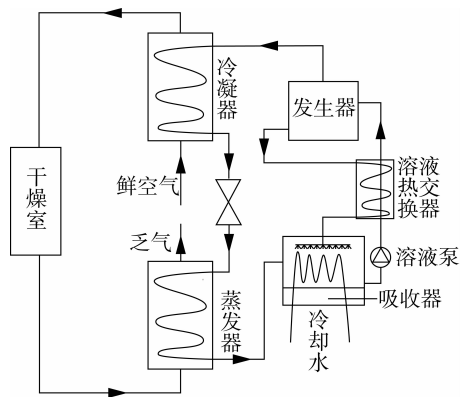


图1 热泵流化床干燥试验装置系统原理图

### 1.2 试验方法

试验以50℃为豫麦9023样品材料的干燥温度,取等量的小麦样品(约350g),分别采用热泵流化床干燥试验装置和DHG-9030型热风薄层干燥

试验台进行对比试验。试验分为两组(I组、II组),试验结束后,整理样品材料含水率的测试数据,分析含水率与干燥时间的变化关系。

I组:分别称取三份等量样品材料,放入热泵试验装置内干燥。试验时,采用水份测定仪测定样品材料的含水率(数据采集间隔为5min,小麦含水率控制在国家安全范围指标13%以下,使用Excel进行编辑。),取三次试验结果的平均值。

II组:采用热风薄层干燥试验台重复I组的试验步骤,进行样品材料热风薄层干燥试验(料层铺设成单层麦粒厚度)测试。

## 2 结果与分析

以50℃作为样品材料的干燥温度,取等量的豫麦9023样品,利用上述试验装置及试验方案分别对于热泵流化床和热风薄层2种干燥方式进行样品含水率的测试。干燥样品过程,样品的含水率随时间变化曲线及干燥效果比较分别如图2、图3和图4所示。

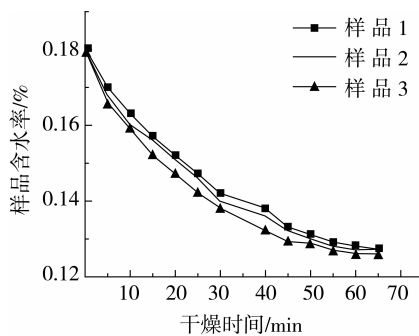


图2 热泵流化床干燥样品的水分变化曲线

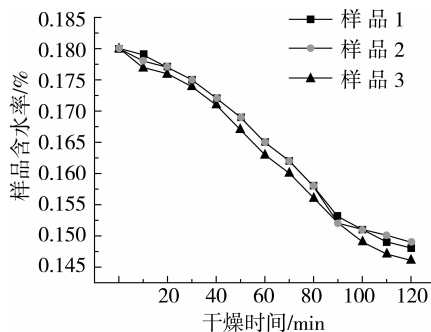


图3 热风薄层干燥样品的水分变化曲线

根据图2、图3,采用热泵流化床和热风薄层对样品材料干燥过程,其含水率达到国家安全范围值13%时,热泵流化床的干燥速率大于热风薄层的干燥速率,数值上提高占整个干燥周期的0.61%,干燥时间减小约75min。由图4可知,在相同的干燥时间内二者总体变化的趋势相似。根据曲线图,热泵流化床干燥的小麦含水率降幅较大;热风薄层的干燥含水率随时间变化趋势前期趋于平稳,中、后期

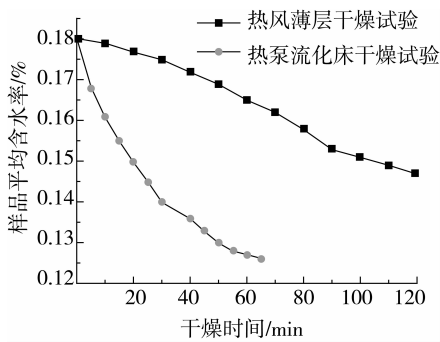


图4 热泵流化床干燥与热风薄层干燥效果

逐渐加快。研究表明,热风薄层干燥时,系统热风与样品麦层的下表面接触、并逐渐向样品颗粒内部传递,进行较慢的传热、传质过程<sup>[3-4]</sup>。分析其原因因为热风薄层干燥过程,样品颗粒与空气接触面积较小,换热不充分,其干燥速率小于热泵流化床(样品颗粒在热风作用下处于流化态,颗粒与热风的换热面积较大,其表层水分蒸发加快、颗粒水份梯度较大,促进了水份的迁移速度。)的干燥速率<sup>[5-7]</sup>。

### 3 间歇干燥试验设计

#### 3.1 间歇干燥方式

根据上述对比试验和热泵流化床间歇干燥机理,结合热泵流化床干燥速率与干燥时间关系分析及连续式干燥的仓储效果,设计了间歇干燥试验方案,即在干燥过程中进行周期性启停热泵流化床干燥试验装置,交替对豫麦9023样品进行干燥和缓苏,并提出3种间歇干燥运行方式<sup>[78]</sup>。以50℃为豫麦9023样品的干燥试验工况、取3份等量的小麦样品(约350g)进行试验。

间歇干燥试验方案中,间歇数  $\eta$  定义为试验停机时间占间歇周期的百分比,即:

$$\eta = \frac{t_1}{t_1 + t_2}$$

式中,  $\eta$  为间歇数;  $t_1$ 、 $t_2$  分别为停、开机时间, min。

(1) 间歇干燥方式 1: 恒温通风 5 min, 停机 10 min, 即:  $\eta = \frac{2}{3}$  ;

(2) 间歇干燥方式 2: 恒温通风 10 min, 停机 5 min, 即:  $\eta = \frac{1}{3}$  ;

(3) 间歇干燥方式 3: 恒温通风 5 min, 停机 5 min, 即:  $\eta = \frac{1}{2}$  。

#### 3.2 试验分析

根据图5~图7可以看出,间歇数  $\eta$  值越大,干燥耗时最长。在间歇干燥周期时间内,试验样品的含水率达到国家安全范围值13%时,第1种间歇干

燥方式耗时最长,约占整个干燥周期的93.75%;第2种间歇干燥方式耗时最短,约占整个干燥周期的85%;第3种间歇干燥方式耗时较长,约占整个干燥周期的91.67%。由图8可知,通过对样品含水率测试数据分析,得出3种间歇干燥方式的干燥效果对比曲线。从试验有效运行的时间分析,随着间歇数  $\eta$  值的递增,间歇干燥方式1的所用时间最小(30 min),且水分降幅相等时,试验样品颗粒内部水分在颗粒间内外水分梯度作用下,由内向外的迁移能力更充分,水分分布更加趋于均匀,单位能耗降水量最大。因此,在间歇干燥周期内,间歇时间越长( $\eta$  值越大),样品的干燥速率较大,仓储效果越好。

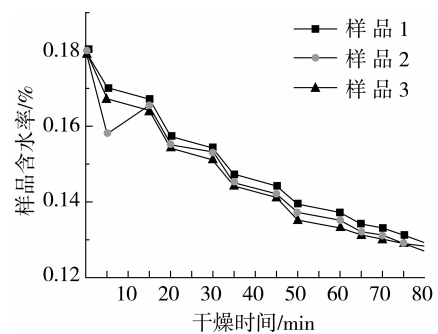


图5 间歇干燥方式1( $\eta = \frac{2}{3}$ )

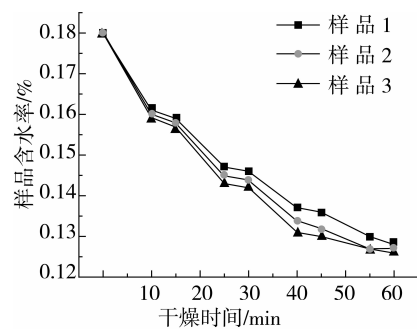


图6 间歇干燥方式2( $\eta = \frac{1}{3}$ )

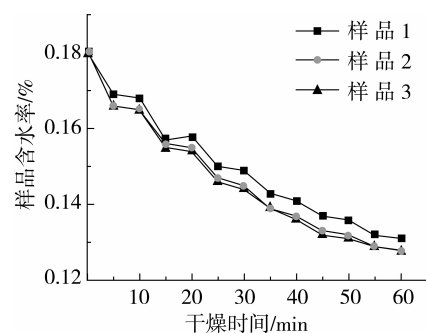


图7 间歇干燥方式3( $\eta = \frac{1}{2}$ )

(下转第110页)