

稻谷干燥风量与谷物质量比的优化研究

杨洲 罗锡文 李长友

【摘要】 研究了风量与谷物质量比对干燥速率的影响。当风量与谷物质量比增大时,干燥速率大幅度上升;但是当风量与谷物质量比增大到一定程度,干燥速率增大率明显减小。干燥初期稻谷的含水率较大时,加大风量可以大大提高干燥速率,而干燥后期风量对干燥速率的影响不明显。以风量与谷物质量比为基准,研究了饱和相对湿度线的移行规律,给出了不同热风温度和稻谷含水率下合理的风量与谷物质量比以及拟合方程。

关键词: 稻谷 干燥 风量 优化

中图分类号: S226.6

文献标识码: A

Study on Optimal Ratio of Air Flux to Grain Mass for Rough Rice Drying

Yang Zhou Luo Xiwen Li Changyou
(South China Agricultural University)

Abstract

Parameters of airflow in deep bed were obtained by using thermocouples and temperature-humidity sensors. It was concluded that the air flux directly affected the drying rate of grain. The drying rate ascended rapidly when the ratio of air flux to grain mass ratio increased in initial period. But when the ratio of air flux to grain mass increased to a certain degree and continued, the accretion of drying rate would decrease in evidence. It was also shown that a large air flux could greatly improve drying rate during the initial period of drying, but its effect was not obvious in the later stage. The movement rule of saturation relative humidity line in deep bed was studied on the basis of air flux and grain mass ratio. The relationship among optimal air flux and grain mass ratio, air temperature and initial moisture content was correlated to an equation. The parameters of the equation were given. The results provide foundations for auto-control of rough rice drying.

Key words Rough rice, Drying, Air flux, Optimization

引言

稻谷合理干燥工艺参数的选择一直是我国谷物干燥研究的重点和难点。稻谷是由不同成分组成的复合体,又是热敏性物料,干燥速度过快或参数选择不当很容易产生爆腰^[1~2]。风量与谷物质量比是稻谷干燥的重要参数。在稻谷的干燥过程中一般把它设为一个定值,这并不能真正体现干燥过程中不同操作参数对稻谷品质和干燥能耗的影响机理。实际

上针对不同的稻谷含水率、不同的热风温度,要想获得较低的能耗,应该根据不同的干燥条件对风量与谷物质量比进行调节。本文研究热风温度、稻谷含水率和合理的风量与谷物质量比之间的关系,寻求优化的干燥工艺。

1 试验装置与方法

稻谷深层干燥试验装置和条件见文献[3~4]。经隔热密封处理的干燥塔,直接放入恒温恒湿箱内,

收稿日期: 2006-10-08

杨洲 华南农业大学工程学院 副教授 博士, 510642 广州市

罗锡文 华南农业大学工程学院 教授 博士生导师

李长友 华南农业大学工程学院 教授 博士生导师

用吸引式风机从塔顶抽出干燥空气,经过空气流量计再返回恒温恒湿箱内。4个内径20 cm、高4.4 cm的圆筒叠加在一起成为一个深层干燥塔,每个圆筒底部是网目为2 mm的钢丝网。为减少干燥塔壁的散热损失,整个干燥塔周围使用隔热性能较好的保温材料。

干燥塔中风量的大小由安装在风道中的涡街式流量计进行测定。干燥塔入口、出口以及干燥塔中部空气的温度和相对湿度用温湿度记录仪每隔30 s记录1次。同时,对于干燥塔入口、出口以及每隔2 cm干燥层的空气和稻谷的温度用热电偶测定,由DR240型综合数据记录仪每隔15 s跟踪记录1次。

2 试验

2.1 风量与谷物质量比和干燥速率的关系

风量的大小直接影响稻谷的干燥速率,特别是当稻谷处于高含水率的干燥初期。由于在风速恒定的干燥过程中,干燥塔内各个床层只有干空气的质量和干谷物的质量没有发生变化。所以选用干空气风量(g/s)与干谷物质量(kg)比 L 作为一个基准来分析。

不同干燥时间时,风量与谷物质量比 L 和深层平均干燥速率 R 的关系如图1所示。图中 M_0 表示稻谷的初始干基含水率(%), t_a 表示热风温度($^{\circ}C$), ϕ 表示热风相对湿度(%).

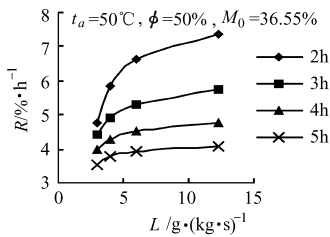


图1 不同干燥时间时风量与谷物质量比和平均干燥速率的关系曲线

Fig. 1 Curves of average drying rate versus air flux and grain mass ratio

由图1可以看到,当 L 开始增大时, R 大幅度上升,但是当 L 增大到一定值继续增大时, R 的增大程度明显减小。同时可以看到,干燥初期稻谷的含水率较大时,加大风量,可以大大提高干燥速率,但干燥后期稻谷的含水率较低时,风量对干燥速率的影响不明显。

分析不同条件下 L 和 R 的关系曲线发现, R 变化率的临界点大约在 L 为 $5 g/(kg \cdot s)$ 左右。温度升高,转折点向 L 减小的方向移动;温度降低则向 L 增大的方向移动。也就是说,在温度较低的情况下,可以采用较大的风量提高干燥速率,如果提高干燥

介质的温度,则可以适当减小风量。稻谷的初始含水率较大时,转折点也会向 L 增大的方向移动。相对湿度对转折点的影响不明显。就同一试验看,干燥初期稻谷的含水率较大时,转折点处的 L 值也比较大,随着干燥过程的进行稻谷的含水率不断下降,转折点逐渐向 L 减小的方向移动。

2.2 饱和相对湿度线移行规律

对于深层干燥,当热风由进口到出口干燥稻谷的同时,空气的相对湿度也在逐渐加大,最后达到饱和而失去干燥能力^[3]。这一饱和相对湿度线在干燥塔中逐渐向顶层推移。当饱和相对湿度线移动太慢,超过稻谷对应温度下的发芽霉变的极限时间,则会影响其干燥质量。如果没有饱和相对湿度线出现或者出口空气的相对湿度很低,这样会加大干燥能耗。为此需要对饱和相对湿度线的移行规律进行研究。

饱和相对湿度线虽然是沿着床层由下向上移动,但实际上是随着已经开始干燥的稻谷(不包括上层吸湿或还没有开始降水的稻谷)干谷量的增加而不断上移的,所以把已经开始干燥的干谷量作为饱和相对湿度线的移动标尺更为合适。图2为干谷量 m (kg)与饱和相对湿度线移出谷层所需时间 τ (min)的关系曲线。从图中可以看到,随着干谷量的增加,空气的饱和相对湿度线逐渐上移。空气的温度越高、相对湿度越大、稻谷的初始含水率越大,饱和相对湿度线的移动速度越慢。饱和相对湿度线移出谷层所需要的时间与干谷量呈正相关。

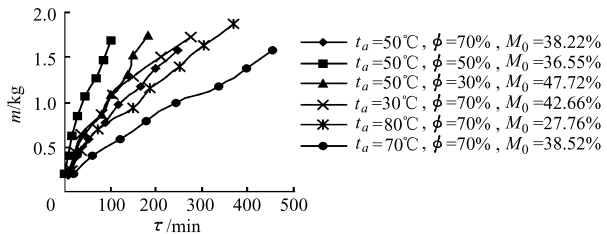


图2 饱和相对湿度线移行过程曲线

Fig. 2 Saturated humidity line moving process

以 L 为基准来研究饱和相对湿度线的移行规律,图3为 L 与 τ 的关系曲线。可以看到,当 L 增大时, τ 急剧下降,但 L 增大到一定程度, τ 的变化率就越来越小。当 L 不断增大时, τ 便趋近于零。实际上

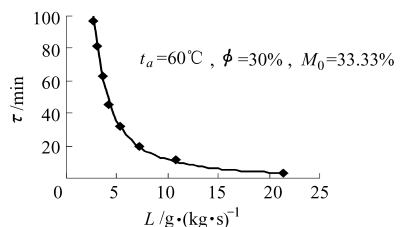


图3 饱和相对湿度线移行规律

Fig. 3 Saturated relative humidity line moving rule

L 增大时的干燥过程就是理论上的薄层干燥,从这一曲线便可以很明显地看到,薄层干燥的厚度很难用具体数字准确定量。

3 饱和相对湿度线移行规律的数学模拟

从图 3 的曲线可以推测, L 与 τ 可能是幂函数的关系,将所有试验数据进行非线性回归,幂函数的形式可表达为

$$\tau = aL^{-b} \quad (1)$$

回归后的相关系数 R^2 均在 0.957~0.999 之间。实际上式(1)中的系数 a 就是 $L=1 \text{ g}/(\text{kg} \cdot \text{s})$ 时,饱和相对湿度线移出谷层所需时间。所以通过 a 值就可以分析热风状态参数对饱和相对湿度线移动过程的影响。可以得出,热风温度升高,饱和相对湿度线移出谷层所需时间会延长;降低热风相对湿度,可以提高饱和相对湿度线的移动速度。高温、高湿的干燥条件会使饱和相对湿度线移出谷层所需时间大大增加。另外,高湿稻谷同样会延长饱和相对湿度线移出谷层所需时间。这些现象再一次表明,高湿稻谷干燥初期,应该减小干燥层的厚度,加大风量,用低温、低湿的介质进行干燥;当饱和相对湿度线移出谷层,干燥塔出口空气的相对湿度降低时,减小风量,采用高温、高湿的干燥介质仍然可以使深层有一个相当长的恒速干燥段,即单位时间内从层中蒸发出的水分相同,这也是深层干燥设计的一项参考指标。

4 风量与谷物质量比优化

从图 3 曲线可以明显看到,随着 L 增大,每个试验都存在一个 L 的临界点, L 超过这个临界点,饱和相对湿度线移出谷层所需时间的减小速度明显变缓。为了利用式(1)确定不同试验条件下临界点的 L 值,可将试验条件下的最大风量与谷物质量比看作 1,饱和相对湿度线移出干燥床最长时间看作 1,分别对图 3 的坐标轴进行无因次化(如图 4),再按式(1)进行回归。

根据回归结果,确定图中曲线曲率最大点所对应的 L 值,可称之为临界风量与谷物质量比,当风量增至临界风量与谷物质量比再继续增大时,饱和相对湿度线移出谷层所需时间减小的速度明显变慢,干燥速率的上升幅度也会明显减小,根据 L 与 R 的关系和饱和相对湿度线的移行规律,可以把临界 L 值看作是试验条件下优化的风量与谷物质量比 L_{opt} ,如表 1 所示。

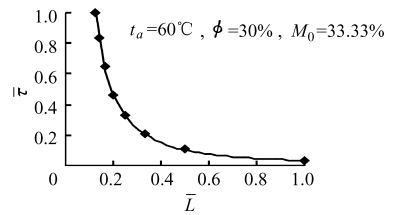


图 4 无因次化后饱和相对湿度线移行规律

Fig. 4 Saturated relative humidity line moving rule of dimensionless

表 1 不同干燥条件下风量与谷物质量比的优化结果
Tab. 1 Optimal ratio of air flux to grain mass in different drying conditions

| 热风温度 t_a/C | 相对湿度 $\phi/\%$ | 稻谷初始含水率 $M_0/\%$ | 风量与谷物质量比 $L_{\text{opt}}/\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{s})^{-1}$ |
|------------------------|-------------------|---------------------|---|
| 30 | 70 | 42.66 | 8.31 |
| 30 | 30 | 50.32 | 9.38 |
| 40 | 70 | 40.60 | 9.30 |
| 40 | 60 | 41.23 | 8.63 |
| 40 | 50 | 34.47 | 9.13 |
| 40 | 40 | 40.81 | 8.18 |
| 40 | 30 | 39.39 | 9.35 |
| 50 | 70 | 38.22 | 8.83 |
| 50 | 60 | 24.41 | 7.01 |
| 50 | 50 | 36.55 | 8.29 |
| 50 | 40 | 42.89 | 8.26 |
| 50 | 30 | 47.72 | 8.64 |
| 60 | 70 | 56.60 | 8.92 |
| 60 | 60 | 26.90 | 6.49 |
| 60 | 50 | 50.10 | 7.48 |
| 60 | 40 | 50.95 | 9.57 |
| 60 | 30 | 33.33 | 7.39 |
| 70 | 70 | 38.52 | 7.24 |
| 70 | 50 | 56.15 | 8.07 |
| 70 | 30 | 38.18 | 7.87 |
| 80 | 70 | 27.76 | 4.98 |
| 80 | 50 | 39.51 | 6.50 |
| 80 | 30 | 56.80 | 8.46 |

由于 L_{opt} 是根据热风温度、相对湿度以及稻谷的初始含水率来确定的,为此可将 L_{opt} 作为因变量,热风温度、相对湿度和稻谷的初始含水率作为自变量,对表 1 中的数据进行三元一次回归分析,回归方程为

$$L_{\text{opt}} = 8.34 - 0.0467t_a - 0.958\phi + 6.746M_0 \quad (2)$$

方差分析如表 2 所示。

表 2 方差分析表
Tab. 2 Variance analysis

| 方差来源 | 自由度 | 平方和 | 方差 | F 值 | F 临界值 | 显著性 |
|------|-----|--------|-------|--------|-----------------------|-----|
| 回归 | 3 | 20.169 | 6.723 | 17.099 | $F_{0.05}(3,19)=3.13$ | |
| 剩余 | 19 | 7.470 | 0.393 | | $F_{0.01}(3,19)=5.01$ | * * |
| 总计 | 22 | 27.639 | | | | |

表中极显著的水平说明从整体上看所建立的线性回归方程是有意义的。

为了考察热风温度、相对湿度和稻谷的初始含水率分别对 L_{opt} 的影响程度,可以进行偏回归系数的显著性 t 检验: $t_{t_a} = -5.352, t_{\phi} = -1.081, t_{M_0} = 4.430$ 。由 t 分布表^[5]查得: $t_{0.05,19} = 2.093, t_{0.01,19} = 2.861$ 。热风温度和稻谷的初始含水率均达到了极显著的水平,而相对湿度不显著,可以将其从自变量中剔除,建立二元一次线性回归方程为

$$L_{opt} = 7.6847 - 0.04688t_a + 7.19036M_0 \quad (3)$$

方差分析如表 3 所示。

表 3 方差分析表
Tab. 3 Variance analysis

| 方差来源 | 自由度 | 平方和 | 方差 | F 值 | F 临界值 | 显著性 |
|------|-----|--------|-------|--------|-----------------------|-----|
| 回归 | 2 | 19.709 | 9.854 | 24.854 | $F_{0.05}(2,20)=3.49$ | |
| 剩余 | 20 | 7.9299 | 0.397 | | $F_{0.01}(2,20)=5.85$ | * * |
| 总计 | 22 | 27.639 | | | | |

可以看到,剔除相对湿度以后所建立的回归方程的 F 值明显增大,显著水平更高。所以,相对湿度对 L_{opt} 值的确定不起太大的作用。热风温度对 L_{opt} 值

的选择影响程度最大;其次是稻谷的初始含水率。这样,在实际干燥过程中便可根据不同的热风温度和稻谷含水率由式(3)确定 L_{opt} 值。图 5 为不同热风温度下 L_{opt} 值与稻谷含水率的关系曲线。

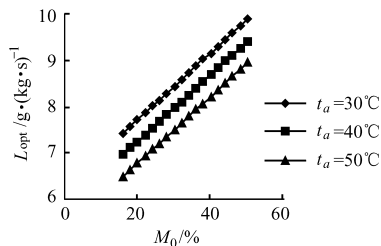


图 5 不同热风温度时稻谷初始含水率与优化的风量与谷物质量比关系曲线

Fig. 5 Optimal ratio of air flux to grain mass in different conditions

5 结论

(1)当风量与谷物质量比增大时,干燥速率大幅度上升,但是当风量与谷物质量比增大到一定程度,干燥速率增大率明显减小。干燥初期稻谷的含水率较大时,加大风量可以大大提高干燥速率,而干燥后期风量对干燥速率的影响不明显。

(2)饱和相对湿度线移出谷层所需时间与已经开始干燥的干谷量呈正相关。热风温度升高,饱和相对湿度线移出谷层所需时间延长,降低热风相对湿度可以提高饱和相对湿度线的移动速度。稻谷的初始含水率越高,移动速度越慢。

(3)以风量与谷物质量比为基准,得出了饱和相对湿度线的移行规律,不同热风温度和稻谷含水率下优化的风量与谷物质量比,给出了拟合方程。

参 考 文 献

- 曹崇文. 中国稻谷干燥现状和稻谷干燥设备的开发[J]. 农业工程学报, 2001,17(1): 5~9.
- 夏朝勇,朱文学,张仲欣,等. 红外对流组合干燥稻谷试验[J]. 农业机械学报,2006,37(8):235~238.
- 杨洲. 高湿稻谷干燥中热质运动机理与过程优化研究[D]. 广州:华南农业大学,2001.
- 杨洲,罗锡文,李长友. 高湿稻谷逐步升温干燥工艺试验研究[J]. 农业工程学报,2002,18(6): 137~140.
- 邓勃. 分析测试数据的统计处理方法[M]. 北京:清华大学出版社,1995.