

种子循环干燥系统设计与试验*

李长友 麦智炜 方壮东 李健民 张 烨

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

摘要: 基于种子的物性特征和干燥系统客观能势的利用,设计了一种小型种子循环干燥机及引风干燥工艺系统,给出了消除干燥机热惯性的准则数烟气热风比,设计了比例阀,依照种子的含水率和干燥历程开发了自适应控制系统;为保证干燥机清种的可靠性,设计了可在 360°范围内旋转的排粮翻板,不仅清种彻底,还能实现无级排粮。试验结果表明,在同样的干燥速率下,可使种子的干燥温度较传统的鼓风干燥低 9℃,干燥效率提高 20%,排粮结束后,干燥机内没有残留种子。

关键词: 种子 干燥系统 干燥机 干燥工艺

中图分类号: S226.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)06-0242-07

引言

种子干燥工艺及其操作参数对其发芽率和耐贮藏性影响极大,尤其是在高温、高湿环境中的种子,处理不及时或者工艺方法和干燥操作参数不当,都会明显加快种子老化变质的速率^[1-3]。为了获得干燥后具有旺盛生命力的种子,研究人员对种子的干燥条件、受热温度范围、含水率、物性特征和贮藏条件进行了大量研究^[4-6]。建立了种子干燥过程中发芽率损失的预测模型,对比分析了不同收获期稻谷及时干燥与延时干燥后的品质^[7-8],发现种子对干燥温度十分敏感,控制干燥温度、调节干燥时间和降水速率是保障干燥品质的关键,给出了一些不同工艺条件下,种子干燥温度和一次降水幅度的操作规程^[9]。

种子属热敏性物料,温度是保障种子干燥品质最重要的综合操作参数之一,是干燥工艺设计和影响干燥机使用效果的主要指标。传统的热风干燥过程是典型的大惯性、多变量、非线性工艺系统^[10-11],不论是升温,还是降温过程都存在严重的大滞后现象,很难适应种子的干燥需要。保障干燥温度不超限,提高设备调控的灵敏度是长期以来没有解决的一大难题。

本文基于种子物性特征和干燥系统客观能势的利用^[12],设计一种能够依照种子的含水率和干燥历程,自动匹配干燥介质和热能,大幅度提高干燥机温

度调控精度的小型循环干燥机及引风干燥工艺系统。

1 设计条件与干燥势场分析

1.1 设计条件

种子干燥既要保证适宜的干燥速率,又要保证种子的活力,使种子具有高发芽率和成活率,其干燥机设计的基本要求主要有:①尽可能接近自然阴干条件下的干燥品质。②机械结构设计应力求装卸方便、清种容易、不混种和机内无残留。③工艺设计符合及时干燥的要求,干燥时间不宜过长。④种子受热温度不超过规定值且干燥室内温度分布均匀。⑤出机种子含水率均匀,不均匀度小于 2.5%。⑥适应多种作物种子的干燥,通用性强。⑦能耗低,干燥效率高。⑧机内容量具有一定的变化范围,能适应少量种子的干燥。

1.2 干燥势场来源与分析

种子干燥介质一般选取自然空气,为了提高干燥速率,可通过升温、降压和除湿等技术手段。从高湿种子干燥势场的来源和性质看,热风干燥系统存在两类形式的传递。一类是种子内部因生命活动产生的势场和自然空气中的势场引起的传递,主要体现在水分在种子内部的运动和液态水分子气化时的饱和蒸气压与干燥介质中的水蒸气分压力差引起的质传递,此类是自然界提供给干燥系统,可以无偿利用的有用能,其传递是客观的,非人之所

收稿日期: 2013-12-29 修回日期: 2014-02-05
* 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

为^[12],也就是说,新收获的高湿种子,在自然空气中,必然会自发地到达与环境介质条件对应的平衡含水率状态。另一类是人为干燥操作行为产生的势场引起的传递,主要体现在,为强化干燥过程,提高干燥速率,向干燥介质输入热能、增大比容,降低介质的水蒸气分压力,提高介质流动速度等行为引起的质传递,此类属于主观,其传递具有恒定性、规律性和可控性的特点,受时间和空间的约束^[13]。

2 干燥系统设计

种子最理想的品质效果是在自然阴干条件下较快地到达其贮藏水分,干燥过程并不需要人为地提供过多的高品位热能。为了实现种子在相对较低温度条件下较快地干燥,本设计选用引风负压干燥方式;为了缓解干燥系统的热惯性,引入特征准数烟气热风比,设计比例阀,依照种子的含水率和干燥历程开发自适应控制系统;研制种子循环干燥系统及相应的小型循环干燥机。

2.1 引风设计原理

保全干燥品质的核心在于有效地提高种子在高含水率时的去水速度,降低种子自身的温度。引风负压干燥可使干燥层内的介质压力低于环境压力,伴随压力降低,介质的相对湿度必然同步降低^[14],增大了介质接纳水分的能力,从而在同样的送风温度条件下,使种子的去水速率得到提高,尤其在高分段。去水速率的提高,会使种子的温度进一步降低,又增强了热风与种子间的传热,这样不仅降低了干燥温度,保障了品质,同时也加快了干燥速率,减少了能量消耗,提高了干燥效率。引风干燥层内的温度梯度和压力梯度方向一致,弥补了介质在干燥层内流动过程中因温度降低而使干燥能力下降的缺陷,提高了层内种子干燥的一致性和均匀性。

2.2 节流匹配原理

种子干燥系统提供主观热能的主要手段是通过热风炉燃烧燃料产生烟气,再由换热器将其热量交换给空气形成热风,在换热器结构确定之后,干燥温度和烟气温度与烟气热风比(烟气流量与干燥空气流量之比)之间则存在确定的对应关系。基于此原理,设计了采用同一台风机实现引烟和引风干燥,通过在风道中设计比例阀,实时调节烟气热风比。在总引风量不变的情况下,比例阀开度下调,减少烟气量势必增加干燥介质量,这样就大大缓解了供热系统的热惯性,提高了干燥机温度调控的灵敏度,避免了种子热冲击。

2.3 控制系统设计

种子循环干燥控制系统的组成如图1所示,主要由含水率在线检测装置、温度检测装置、比例阀、变频器和控制器等组成。系统的输入量是种子干燥的目标含水率、总引风量和最高上限温度。实际的热风温度并不预先确定,依照种子的含水率和干燥历程由专家系统实时给定。环境温、湿度和烟气温度波动是该系统的扰动量,种子含水率及干燥时间是反馈量,控制量是变频赫兹数。该控制系统的控制器本身是一套完整的独立控制单元,同时又是一个基本的数据采集节点,可为专家系统提供参数信息^[15]。干燥机在运转过程中能依据种子的在线含水率和干燥历程,通过调节比例阀开度,得到不同热风温度和风量,确保种子实时的安全干燥条件。

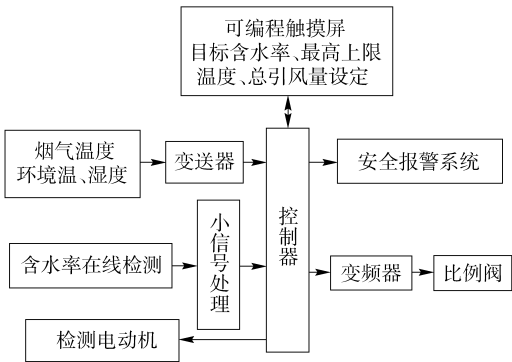


图1 控制系统的组成

Fig.1 Structure of control system

3 工艺流程设计

3.1 工艺流程

种子循环干燥工艺系统如图2所示。按照种子的输送方向,依次包括提升机、干燥机、含水率在线检测装置和输送机。供热系统包括热风炉、换热器、烟气比例阀和除尘器等。

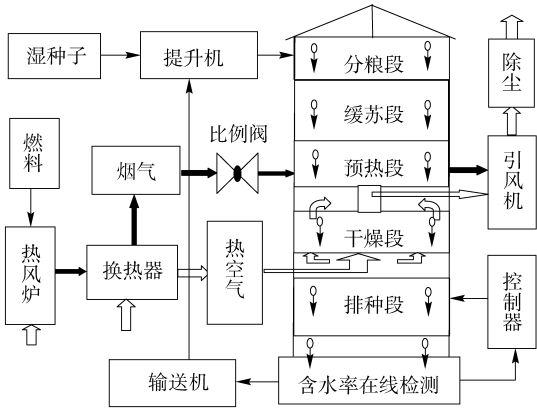


图2 种子循环干燥系统工艺流程

Fig.2 Process flow of seed circulation drying system

3.2 工艺原理

经初清除去大杂后的高湿种子,由提升机送入干燥机分粮段并缓慢地自上而下流动,依次经过分粮段、缓苏段、预热段、干燥段、排种段、含水率在线自动检测装置、输送机再到提升机,完成一次干燥循环。在此过程中,外界自然空气由引风机引入换热器形成烟气和热风。热风进入干燥室与种子进行热质交换,穿过干燥层后经过除尘器排到机外。烟气经过比例阀,进入热回收室,余热被预热段的种子回收变成低温废烟后经过除尘器排出机外。由于预热段设计在缓苏段的底部,种子流经预热段时,回收烟气余热自身温度升高,内部水分结合能降低^[16],这不仅提高了干燥系统热能的利用率,减少了种子升温热损失,也增大了介质接纳水分的能力。高湿种子在干燥室内向空气中释放显热和水分,蒸发消耗种子自身的热量,其状态变化沿去湿降温过程,而介质状态沿增湿增焓过程,实现了种子在较低温度下较快地干燥、同时也减少了干燥的单位气耗量。在强制引风条件下,由于流动的存在会使种子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还会得到进一步强化^[17]。

4 干燥机设计

4.1 干燥机设计

种子循环干燥机结构原理如图 3 所示。

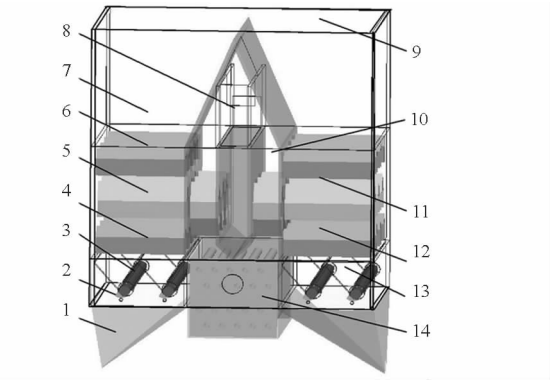


图 3 循环干燥机结构原理

Fig. 3 Structure principle of circulation dryer

1. 排种斗 2. 排种翻板 3. 排种轮 4. 进风道 5. 排风道
6. 预热段 7. 热回收段 8. 烟气道 9. 分粮缓苏段 10. 热风道
11. 顺流干燥段 12. 逆流干燥段 13. 排种段 14. 换热器

干燥机内的种子流道自上而下无死角,种子在流经干燥段的时间和在机内的循环速度取决于排种轮转动的速度,其结构如图 4 所示。排种翻板处于水平位置时,属于设计的正常工作位置。如果此时排种轮不转动,种子则充满翻板,粮面与翻板边缘夹角小于种子的休止角。只有在排种轮转动时,种子才能流出排种翻板,所以调节排种轮转速,即可控制

干燥过程。为了在干燥结束后,能一次清除干燥机内所有种子及杂物,排种翻板设计成可在 360°范围内旋转。当把排种翻板由水平位置旋转至垂直位置时,排种轮无需转动,即可自动排出机内所有种子。

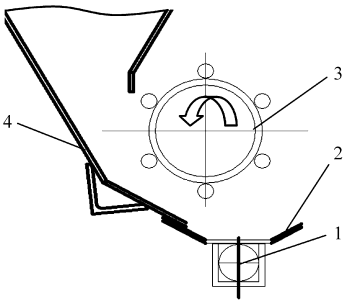


图 4 排粮装置结构图

Fig. 4 Structure diagram of grain discharging device

1. 转动轴 2. 排种翻板 3. 排种轮 4. 导流板

4.2 设计原理及主要技术参数

种子干燥遵循二段降速干燥过程^[18]。在高含水率段(干基含水率 22% 以上),利用常温自然空气就能使其较快地干燥。因为高湿种子表面存在自由水,内部水分的自由能也比较大,表面水分蒸发几乎不受物料限制,内部水分蒸发消耗的功也很小^[16,19],所以在同等条件下,高含水率段的干燥速率也就较大。在此过程中,影响干燥的主要因素是风量和介质接纳水分的能力。为了实现高湿种子低温、低能耗、大风量干燥,适应降水速率 0.6 ~ 3% /h 的稻谷种子干燥要求,确定最大风量谷物比为 10 kg/kg,选定风机型号为 4 - 72 - 6A,风量为 11 452 ~ 12 379 m³/h,风压为 836 ~ 919 Pa。基于干燥层内的通风阻力与层厚度增量存在 5 ~ 8 倍的递增关系^[20],设计了由中间进风向两边干燥层分风的配风方式^[21]。这相当于把干燥层的厚度减小了 1/2、通风面积加大了一倍,同时利用种子自上而下的自然流动特性,使物料层始终处于疏松状态,降低了通风阻力,减少了通风能耗,提高了生产率并实现了种子表面受热均匀,防止种子内部出现较大的温度梯度。

4.3 种子干燥温度及流动速度控制策略

干燥过程中种子的温度、干燥速率取决于干燥介质的状态、种子含水率状态变化、干燥时间、风量种子比等特征参数。在干燥机几何结构确定之后,干燥缓苏比是确定的常数。调整送风温度及种子的流动速度即可控制种子的温度和一次流经干燥室的降水幅度。

4.3.1 种子降水幅度计算理论依据

种子的薄层干燥速率服从扩散模型

$$-\frac{dM}{d\theta} = k(M - M_e) \tag{1}$$

式中 k ——干燥常数, $1/h$
 M ——干基含水率, %
 M_e ——平衡含水率, %
 θ ——干燥时间, h

在风速及干燥介质温度、湿度恒定的条件下, 对式(1)求积分得薄层干燥指数模型

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = e^{-k\theta} \tag{2}$$

式中 M_0 ——种子初始含水率%

定义种子在对应的干燥条件下所能去除的水分
为自由水, 令 $\phi = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e}$, 并称作自由含水比。干燥
常数 k 和平衡含水率 M_e 取决于干燥温度和湿度, 在
送风条件不变时 k 和 M_e 都是常数。用阴干时的 k
和 M_e 值作为深层干燥降水幅度和干燥速率的限定
条件。

假设种子在干燥初始点, 内部含水率均匀一致,
则不论 M_0 值的大小, 用自由含水比表示的种子干
燥水分变化范围都统一在了 $0 \sim 1$ 的区间内, 使得各
种干燥过程具有了统一的可比特征。在 $M = M_0$ 时
 $\phi = 1$, 在 $M = M_e$ 时 $\phi = 0$ 。基于阴干条件下的降水
幅度和干燥历程, 就可以限定比例阀在深层及不同
干燥条件下的调控参数。

4.3.2 干燥温度调控策略

种子循环干燥系统热平衡和质平衡式为

$$G_y(T_{y1} - T_{y2}) = G_f(T_{f1} - T_{f0}) \tag{3}$$

$$G_y + G_f = G \tag{4}$$

式中 G ——风机实际送风量, kg/h

G_y ——烟气流量, kg/h

G_f ——干燥介质流量, kg/h

T_{y1} ——换热器烟气入口温度, $^{\circ}C$

T_{y2} ——换热器烟气出口温度, $^{\circ}C$

T_{f1} ——干燥室热风入口温度, $^{\circ}C$

T_{f0} ——环境温度, $^{\circ}C$

由式(3)和(4)得到表征供热温度和送风量特
征数 $\frac{G_y}{G_f}$, 称其为烟气热风比, 并把 $\frac{G_y}{G_f}$ 作为控制干燥温
度的热能匹配准则。

$$\frac{G_y}{G_f} = \frac{G_y}{G - G_y} = \frac{T_{f1} - T_{f0}}{T_{y1} - T_{y2}} \tag{5}$$

基于式(5), 依照实时测量出的 T_{f0} 、 T_{y1} 和 T_{y2}
值, 即可得到干燥温度 T_{f1} 。

同时, 由式(5)可见 $\frac{G_y}{G_f}$ 反映的是干燥系统烟气
携带热量和热风获取热量的相对大小, 所以不论热
风炉燃烧温度和风机的送风量如何波动, 通过对烟

气比例阀的调整都能控制种子的干燥温度, 保证
 $T_{f1} \leq T_{fmax}$ 。

基于上述特征数设计的比例阀及其调整规则如
图 5 所示。

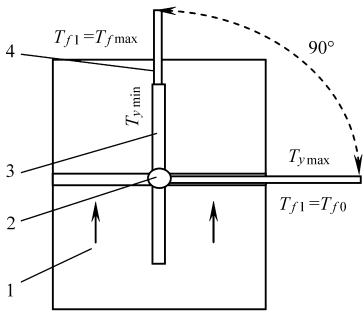


图 5 比例阀结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of proportional valve

1. 烟气通道 2. 旋转轴 3. 风舌 4. 控制柄

当风舌处于水平位置(风舌开度为 0°)时, 烟气
流量等于零, 此时 $T_{f1} = T_{f0}$ 烟气温度最高。风舌处
于垂直位置(开度 90°)时, 烟气流量最大, 把对应 G_y
的烟气温度 T_{y1} 设定为干燥系统的基准烟气温度, 得
到 $\frac{G_y}{G_f}$ 的基准值。当烟气温度超过标准值或者要求降
低干燥温度时, 依照式(5)的计算结果, 在 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$
的范围内, 调整风舌对应的转角, 即可保证种子实时
的安全干燥温度。

4.3.3 流动速度控制策略

在干燥室内, 种子经历了顺流和逆流干燥过程,
在顺流干燥段含水比率和去水速率为^[17]

$$\phi = \frac{\left[\phi_0 - \frac{1}{\phi_0} \frac{G_0 \chi_0}{v \rho_b (M_0 - M_e)} \right] \phi_0 \exp \left(\left[\phi_0 \frac{\rho_b (M_0 - M_e)}{\chi_0 G} - \frac{1}{\phi_0 v} \right] kz \right)}{-\frac{1}{\phi_0} \frac{G_0 \chi_0}{v \rho_b (M_0 - M_e)} + \phi_0 \exp \left(\left[\phi_0 \frac{\rho_b (M_0 - M_e)}{\chi_0 G} - \frac{1}{\phi_0 v} \right] kz \right)} \tag{6}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{v \frac{\rho_b k (M_0 - M_e)}{\chi_0} \left[\phi_0 - \frac{1}{\phi_0} \frac{G \chi_0}{v \rho_b (M_0 - M_e)} - \phi \right]}{G} \phi \tag{7}$$

式中 ρ_b ——绝干种子密度, kg/m^3
 χ_0 ——热风最大湿含量差, kg/kg
 z ——干燥层厚度, m
 v ——种子流动速度, m/h

在逆流干燥段的含水比率和去水速率为^[17]

$$\phi = \frac{\left[\phi_0 + \frac{\chi_r G_0}{v \rho_b (M_0 - M_e)} \right] \exp \left(\left(\phi_0 \frac{M_0 - M_e}{G_0 \chi_r} + \frac{1}{v \rho_b} \right) \rho_b kz \right)}{\frac{\chi_r G_0}{\phi_0 v \rho_b (M_0 - M_e)} + \exp \left(\left(\phi_0 \frac{M_0 - M_e}{G_0 \chi_r} + \frac{1}{v \rho_b} \right) \rho_b kz \right)} \tag{8}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{v \rho_b k \frac{M_0 - M_e}{\chi_r} \left[\phi - \phi_0 + \frac{\chi_r G}{v \rho_b (M_0 - M_e)} \right]}{G} \phi$$

(9)

式中 χ_r ——热风流经逆流层后的湿含量差,kg/kg

依照种子每一循环允许的降水幅度,确定出含水比率的变化量,即可由式(6)~(9)计算出种子的流经干燥室的时间,对应干燥室的种子容量,确定出小时排种量,即可实时控制种子流动速度,保证安全降水幅度。

5 循环干燥系统的试验验证

5.1 试验装置与仪器

试验样机如图 6 所示。



图 6 5HP-5 型种子循环干燥机
Fig.6 5HP-5 drying test dryer

种子含水率在线检测采用 CXR-ZX-I 10-40 型种子含水率在线实时检测仪。检测方式为电容式群粒在线检测,测量种子含水率范围为 10%~40%,工作环境-35~80℃,测量误差范围为±0.5%。上位机接口 RS-232C,可与控制双向通讯,实现检测数据的无线传输。

试验物料为水稻种子,试验时间为 2012 年 9 月—10 月,试验地点为江西省宜春市明月山隆平高科生态农业有限公司干燥基地。测试仪器如表 1 所示。

表 1 试验仪器

Tab.1 Main test instrument

仪器名称和型号	量程	精度
风速仪	0.4~30.0 m/s	0.1 m/s
温湿度表	-20~60℃、 0~100%	0.1℃、0.1%
8925 型声级计	40~130 dB(A)	±0.2 dB
QY-200 型轻便式倾斜微压计	0~2 000 Pa	1 级
ES-C600 型电子天平	0~600 g	0.1 g
数字钳型功率表	0~600 V, 1~1 000 A	

5.2 试验测定

将干燥机调整到稳定状态,记录干燥条件及环境参数、配套电动机功率、引风量和风压;按照机内容量、试验时间和次数准备试验用稻谷,平均含水率范围在 22%~24%,含杂率不大于 2%,其中长茎秆(小于 50 mm)含量不超过 0.2%。将烟气温度传感器安装在换热器烟气入口和出口位置,热风温度的传感器安装在干燥室热风进口和出口位置。种子温度传感器安装在干燥段进气和出气角盒之间。测量环境湿度、相对湿度和压力的传感器安装可完全排除干燥机影响的位置。测量排气口风速和相对湿度的传感器安装在排气出口的中间位置。含水率在线测量仪安装在干燥机种子出口位置,实时采集在线测量值。

5.3 试验结果及数据分析

试验设定的排种频率为 10 Hz,此频率下每次循环干燥时间约 12 min,缓苏时间约 50 min。气流及种子状态变化过程如图 7 所示。现场测试数据如表 2 所示。

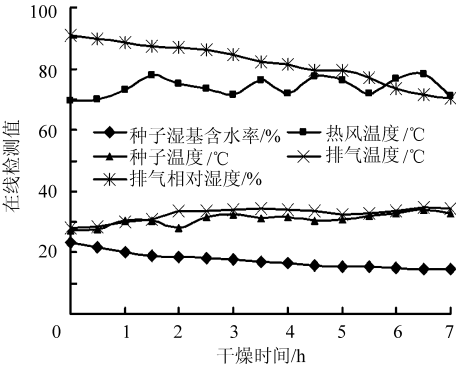


图 7 气流及种子状态变化曲线

Fig.7 State change of flow and seed

从表 2 和图 7 可以看出:①热风温度变化过程比较平缓,在稻谷种子干燥全过程中,实际测量出的热风温度变化最大极差为 8.6℃,表明干燥机成功地抑制了供热系统的热惯性,比例阀调控手段可行,烟气热风比可以作为循环干燥机干燥温度的匹配准则。②在送风温高达 69.7~78.3℃范围内,试验得到的种子最高温度为 34℃,与传统的鼓风循环干燥方式相比降低了 9℃;而对应的平均去水速率为 1.2%/h,与传统的鼓风方式相比提高了 20%。表明引风干燥,明显增大了介质的干燥能力,提高了种子去水速率,降低了种子自身的干燥温度。③由种子排气相对湿度保持在 71.2%~91.1%的状态变化过程得知,依据在线检测装置,实时检测种子含水率,调节烟气通道上的比例阀开度,改变烟气热风比,能够保证实时的最优操作条件,实现高效、安全干燥。④在烟气热风比相同的条件下,种子在高水

表 2 试验测试数据
Tab.2 Test data

干燥时间 /h	种子含水率/%	热风温度 /℃	稻谷温度 /℃	平均降水速率 /(%·h ⁻¹)	排气相对湿度/%	排气角盒出口风速 /(m·s ⁻¹)	排气温度 /℃
0.0	23.2	69.7	27.3	0.0	91.1	4.3	28.0
0.5	21.6	70.0	27.5	3.2	89.6	4.3	28.3
1.0	20.2	73.0	30.6	2.8	88.4	4.2	30.0
1.5	19.0	78.0	30.4	2.4	87.3	4.2	31.0
2.0	18.5	75.0	28.2	1.0	86.9	4.2	33.4
2.5	18.0	73.4	31.5	1.0	86.0	3.9	33.5
3.0	17.7	71.5	32.4	0.6	84.7	3.8	34.0
3.5	17.1	76.3	31.4	1.2	82.4	3.8	34.2
4.0	16.6	71.8	31.7	1.0	81.5	3.7	33.8
4.5	16.0	77.5	30.5	1.2	79.6	3.7	33.7
5.0	15.6	76.3	31.0	0.8	79.4	3.6	32.5
5.5	15.3	71.8	32.0	0.6	76.9	3.6	33.0
6.0	14.9	76.5	32.7	0.8	73.5	3.5	33.5
6.5	14.7	78.3	34.0	0.4	71.7	3.5	34.6
7.0	14.5	71.3	33.0	0.4	70.2	3.4	34.3
平均值		74.0	30.9	1.2	81.9	3.8	32.5

注：环境平均温度 21℃、平均相对湿度 63%、大气压力 101.325 kPa。

分段干燥时排气风速高于低水分段。表明高水分段干燥层中的通风阻力小于低水分段,干燥层中的空隙率随含水率降低而减小,必然引起干燥过程中的

风量谷物比发生变化,会使实际过程与式(4)~(7)的理论计算结果产生偏差。⑤循环干燥机排气温度非常接近种子温度,表明负压干燥热能利用率较高,排气热损失较小。

6 结论

(1) 基于种子的物性特征和干燥系统客观能势的利用,设计的小型种子循环干燥机能够依照种子的含水率和干燥历程,自动匹配烟气热风比,抑制了供热系统的热惯性,干燥效果好且通用性强。

(2) 引风干燥方式,明显增大了介质的干燥能力,提高了种子去水速率,降低了种子自身的干燥温度。在送风温度高达 69.7~78.3℃ 的温度变化范围内,试验得到的种子最高温度为 34℃,比传统的鼓风循环干燥方式降低了 9℃,平均去水速率为 1.2%/h,比传统的鼓风方式提高了 20%。

(3) 给出了消除干燥机热惯性的烟气热风比准则数,并设计了比例阀来实现这个准则数,在理论上阐明了调控的依据,试验证实了依照温度匹配准则调控干燥过程的有效性。

(4) 排粮翻板可以在 360°范围内旋转,不仅可以实现无级排粮,同时在完成同批种子干燥后,能够一次彻底排空干燥机,避免了干燥机内残留种子。

参 考 文 献

1 戴天红,曹崇文. 种子热风干燥发芽率的预测[J]. 农业机械学报,1996,27(1):63-66.
Dai Tianhong,Cao Chongwen. Prediction of seed viability during hot air drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1996,27(1):63-66. (in Chinese)

2 宋松泉,傅家瑞. 成熟脱水对种子发育和萌发的作用[J]. 植物学通报,1998,15(2):23-32.
Song Songquan,Fu Jiarui. Role of maturation drying in seed development and germination[J]. Chinese Bulletin of Botany, 1998, 15(2):23-32. (in Chinese)

3 许惠滨,魏毅东,连玲,等. 水稻种子人工老化与自然老化的分析比较[J]. 分子植物育种,2013,11(5):552-556.
Xu Huibin,Wei Yidong,Lian Ling,et al. Comparative analysis of artificial aging and natural aging with rice seeds [J]. Molecular Plant Breeding,2013,11(5):552-556. (in Chinese)

4 叶元瑜,刘有明,计福来,等. 谷物种子干燥机的现状和发展[J]. 中国农机化,2003(5):22-24.
Ye Yuanyu,Liu Youming,Ji Fulai, et al. The present situation and development of crop seed dryers[J]. Chinese Agricultural Mechanization,2003(5):22-24. (in Chinese)

5 黄先晖,杨远柱,姜孝成. 水稻种子脱水耐性的形成及其与贮藏特性的关系[J]. 种子,2010,29(7):25-29.
Huang Xianhui,Yang Yuanzhu,Jiang Xiaocheng. Studies on the formation of desiccation tolerance and the correlation with storage of oryza sativa[J]. Seeds, 2010,29(7):25-29. (in Chinese)

6 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.

7 戴天红,钱壬章,李宏顺. 种子干燥过程中发芽率损失的预测模型[J]. 郑州粮食学院学报,1997,18(2):32-36.
Dai Tianhong,Qian Renzhang, Li Hongshun. A prediction model of seed germination rate loss durion drying[J]. Journal of Zhengzhou Grain College,1997,18(2):32-36. (in Chinese)

8 张慧明,郑先哲,宋翔宇. 不同收获期稻谷及时干燥与延时干燥后品质对比研究[J]. 东北农业大学学报,2012,43(8):30-33.
Zhang Huiming,Zheng Xianzhe,Song Xiangyu. Study of rice quality compared immediately drying with deferred drying in different harvest time[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2012,43(8):30-33. (in Chinese)

9 诸凯,褚治德,杨光. 种子干燥过程中水分迁移的传热传质机理[J]. 天津大学学报,2000,33(5):634-637.

Zhu Kai,Chu Zhide,Yang Guang. Study on the mechanism of wet moving in seed drying process[J]. Journal of Tianjin University, 2000,33(5):634-637. (in Chinese)

10 Li Changyou, Ban Hua, Shen Wenhao. Self-adaptive control system of grain drying device [J]. Drying Technology, 2008, 26(11):1351-1354.

11 Li Changyou. Analytic solution of mass conservation equation for drying process[J]. International Journal of Food Engineering, 2010,6(2):1-11.

12 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)

13 朱明善.能量系统的 分析[M].北京:清华大学出版社,1988:18-25.

14 李长友.热工基础[M].北京:中国农业大学出版社,2011:82-93.

15 李长友,班华.基于深层干燥解析理论的粮食干燥自适应控制系统设计[J].农业工程学报,2008,24(4):142-146.
Li Changyou, Ban Hua. Self-adaptive control system of grain drying device based on deep-bed analytical ventilating drying theory [J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(4):142-146. (in Chinese)

16 李长友,麦智炜,方壮东.粮食水分结合能与热风干燥动力解析法[J]. 农业工程学报,2014,30(7):236-242.
Li Changyou, Mai Zhiwei, Fang Zhuangdong. Analytical study of grain moisture binding energy and hot air drying dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(7):236-242. (in Chinese)

17 李长友,张烨,麦智炜.高湿粮食贮藏干燥机设计与试验[J].农业机械学报, 2014 ,45(4):231-235.
Li Changyou,Zhang Ye,Mai Zhiwei. Design and experimental study of dryer for high moisture grain storage [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(4):231-235. (in Chinese)

18 李长友,邵耀坚,上出顺一.颗粒物料深床降速干燥过程的解析[J].农业工程学报,1998,14(1):194-199.
Li Changyou,Shao Yaojian,Kamide Junichi. Analytical solution of granular product in a deep-bed falling rate drying process[J]. Transactions of the CSAE, 1998,14(1):194-199. (in Chinese)

19 李长友,方壮东.高湿稻谷多段逆流干燥缓苏解析模型研究[J].农业机械学报, 2014,45(5):179-184.
Li Changyou,Fang Zhuangdong. The analytical model of high moisture content paddy in multistage countercurrent drying and tempering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(5):179-184. (in Chinese)

20 李健民.小型批式循环粮食干燥机及关键技术的研究[D].广州:华南农业大学,2013.
Li Jianmin. Study on small-scale batch type recirculating grain dryer and the key technology [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2013. (in Chinese)

21 华南农业大学.高湿粮食干燥机:中国,201010019518.1[P].2012-05-30.

Development of Seed Circulation Drying System

Li Changyou Mai Zhiwei Fang Zhuangdong Li Jianmin Zhang Ye
(Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education,
South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A small scaled seed circulating dryer and an induced-draft drying process system were developed by analyzing physical properties of seeds and objective potential energy of drying systems. A kind of proportional valve was designed to eliminate thermal inertia of dryer thermal (the ratio of exhaust gas to hot air) and an adaptive control system was developed base on the relationship between seed moisture and drying process by using the proportional valve. To ensure the reliability of the drying machine cleaning, a delivery flap, which could rotate 360°, was designed to clean up the dryer and realize step-less delivery. The result showed that the drying temperature was lower than the traditional drum wind dryers by 9℃, and the drying efficiency was increased at least by 20%, and no seeds were leave over after delivering.

Key words: Seed Drying system Dryer Drying process