

从气流状态考察小麦深床干燥特性研究

李长友¹ 邵耀坚¹ 上出顺一²

(1 华南农业大学工程技术学院, 广州, 510642; 2 日本国山形大学)

摘要 利用通风过程中的气流状态变化, 考察小麦在深床下的干燥特性。讨论在深床干燥中, 气流与床上物料间的热和水分交换以及各层小麦的平均含水率变化。说明气流在深床内连续变化的过程和小麦的干燥速率。

关键词 小麦; 深床干燥; 气流状态; 干燥特性

中图分类号 S379

在深床干燥过程中, 气流与物料之间始终保持着热平衡和质量平衡。因此, 从气流状态的变化便可观察到床上物料的干燥特性(上出顺一等, 1991), 解析其干燥过程(西山喜雄, 1973)。本文介绍从送风空气温湿度变化, 观测到的小麦在深床下的干燥特性。实验小麦的初期水分在 26% ~ 34% wb。把送风温度在 25 ~ 50 ℃ 之间设定为 8 段; 相对湿度在 40% ~ 60% 之间设定为 3 段。采用热敏电阻及高分子湿度敏感元件, 测定干燥过程中气流的状态, 用温湿度记录仪和温度记录仪跟踪记录。

1 试验装置及试验测定

1.1 试验装置

试验测定装置的概略图如图 1 所示。为了得到温度湿度恒定的空气, 利用了恒温恒湿装置(本田叶井制作所 PL-4G)。该装置库内容量为 800L, 温度调节范围 -40 ~ 100℃, 湿度调节范围 30% ~ 98%, 调节精度分别为 ±0.3℃ 和 2.5%。为减少干燥箱壁的散热损失, 把断热密封好后的干燥箱, 直接放入恒温恒湿库中。在库内空气的温湿度稳定在设定值后的某一瞬间, 突然打开干燥塔底盖, 用吸引式风机从塔顶抽出干燥空气并返回恒温恒湿装置。

温湿度测定仪选用了神荣株式会社制的 TRH-DM2 型。感温件

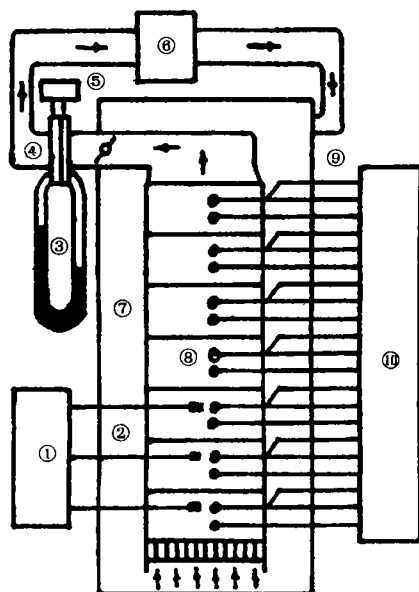


图 1 深床干燥试验装置

- ① 温-湿度记录仪 ② 传感器 ③ 皮软管 ④ 孔板 ⑤ 微压计
⑥ 风机 ⑦ 恒温恒湿装置 ⑧ 干燥塔 ⑨ 热电偶 ⑩ 温度记录仪

1995-03-06 收稿

为热敏电阻,感湿探针为高分子敏感元件(シンエクヒューメント HP-MQ 型)。测定温湿度范围分别在 $10 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 及 $10\% \sim 99.9\%$ 之间,测定精度分别为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 及 $\pm 2\%\text{RH}$ 。测定记录间隔在 $10 \sim 5\,995\text{ s}$ 之间,可按相隔 10 s 的整数倍间隔随意设定。机体内一次可收录 $15\,000$ 个数据,记录的数据通过 RC232 接口转送到计算机。

1.2 试验测定

干燥空气的温度和相对湿度,用温湿度记录仪,每间隔 30 s 测定记录一次。同时,对进气、排气及各层间空气的干球、湿球和谷物温度用电偶每间隔 6 s 测定记录一次,并选用 LOGGER MATE DL1 200 温度数据记录仪跟踪记录。测定中各探针均装夹在干燥箱的中部,自下向上依次称 $1 \sim 21$ 频道。谷物水分按 5 g , 105°C , 24 h 烘箱法测定。各次试验,风量均为 $0.003\text{ m}^3/\text{s}$ 。

2 热风及谷物温度分布特性

2.1 热风温度

深床干燥过程中,不同床深处的

气流温度变化特性如图 2 所示。

在干燥的初期,进入谷层后的热风温度较快地下降到了入口空气的湿球温度以下,在图 2 中的这一现象一直持续到全层谷物温度上升到气流的湿球温度。对于深床干燥,初期温度降低的现象 Boyce(1965)在解析大麦的静置床干燥过程时也曾指出过,他把这一温度称为准饱和温度(Pseudou Saturation Temperature)。由图中的各曲线可以看出,在刚刚开始送风的瞬间,第 1 干燥层(由床面到床上 3 cm 处)的进排气温差最大,此后,逐渐缩小,排气温度较快地朝向入口湿球温度靠近。第 2 干燥层(离开床面 3 cm 到 6 cm 间)至第 4 干燥层(离床面 $9\text{ cm} \sim 12\text{ cm}$ 间)各层间的进排气温差均由零 $\rightarrow$ 极大 $\rightarrow$ 近似于零的过程变化。在全层即塔顶的排气温度回升到入口空气的湿球温度以后(图示的 b $\sim$ e 段),从塔顶排出的空气温度几乎不变,(等于入口湿球温度)。随着干燥的进行,气流通过

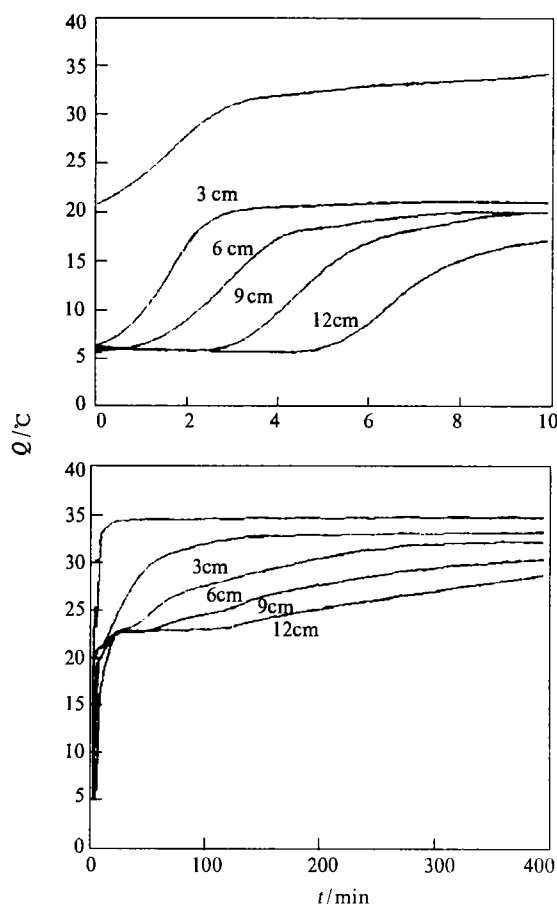


图 2 热风湿度变化特性

$3 \sim 12\text{ cm}$ 各层后的温度依次迎着进气温度继续回升。从在不同实验条件下获得的温度曲

线,可以看出,送风温度愈高(风-谷间温差愈大),相对湿度愈高,干燥床愈深,在干燥层中的热风温度低于和持续在入口湿球温度状态的时间愈长。在同一送风条件下存在着 $b \sim c < c \sim d < d \sim e$ 段的现象。

2.2 小麦温度

干燥过程中,与送风温度相对应的小麦温度变化特性如图3所示。

在干燥初期即热风温度到达入口空气湿球温度以前,谷物温度紧随着干燥层中热风温度的回升而上升。在3, 6, 9, 12 cm不同床深处,谷物与热风间的温度差随干燥时间的变化,由近似于零到极大,然后又趋向近似于零。在干燥进行至图示的b, c, d, e点以后,不同床深处的干燥温度依次,迎着进气温度在回升,风-谷间的温差沿着由零开始增大,最终又趋向于零的过程变化。但在这一变化过程中,干燥层内的空气温度与小麦温度相差较小,热风与小麦间的温度差可近似地看着同一值。由以上分析可知,在全干燥过程中,谷温滞后于热风温度的时间(图2与图3相对应的同一干燥时刻的热风温度曲线与谷物温度曲线的横座标差),主要依赖于热风与谷物间的温度差。但就深床干燥中的谷温滞后于风温的最短时间来讲,要比单一颗粒在非稳态换热过程中的升温速度慢很多。从这一热风与谷物间换热速度较慢的现象,可以推断,深床干燥中,物料与热风

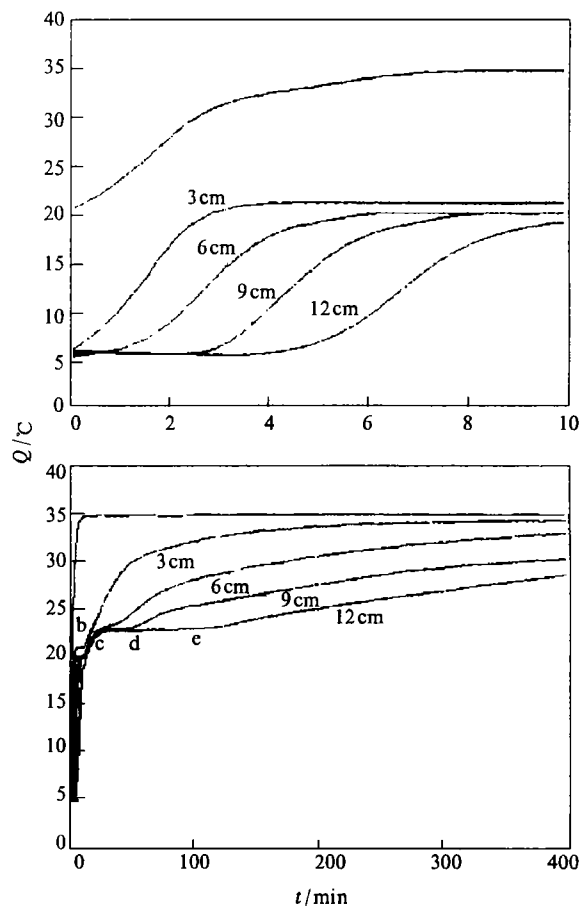


图3 谷物温度变化特性

间的有效接触面积远小于床上物料的几何学外表面积之和。

2.3 送风湿度变化

干燥中,不同床深处气流相对湿度的变化如图4所示。

图4中的b, c, d, e点分别为层厚度3, 6, 9, 12 cm时的排气饱和湿度临界点。在干燥的初期,图4所示的b点以前,气流在流至3 cm层厚度处以前,便达到了饱和状态,此后,通过以上各层时的相对湿度恒保持在100%。在干燥进行至b, c, d, e各点以后,从1到4各层流出的空气的相对湿度依次开始降低,其降低幅度随层厚度的增大而明显减小。从各测点气流状态的变化过程可以看出,气流在深床干燥中达到饱和状态时的位置,随着干燥的进行,不断上移,其移行过程如图5所示。在图5中,当干燥进行至图示曲线的右侧时,气流在干燥层中继续移行,仍具有干燥的能力;干燥处在曲线上及左侧时,气流在流动中,则丧失干燥的能力或者结露,相对湿度持续在100%。由在不同实验条件下获得的各测定地点的气流湿度曲线变化可以得

出,送入干燥层的谷物湿度愈低,即干燥初期风-谷间的温度差愈大及谷物初期的含水率愈高,干燥处在图4中b点以前的时间愈长,即气流在谷物层中处于结露状态的时间愈长;在同一谷物条件下,送风湿度愈大,在谷层中,气流的饱和线上移的速度愈慢;在同一送风及谷物条件下,存在着 $b \sim c < c \sim d < d \sim e$ 的现象。

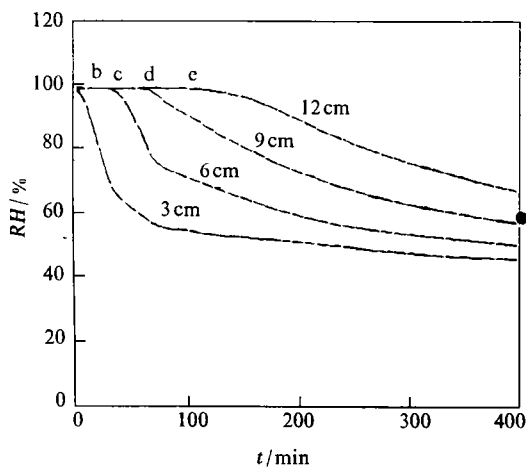


图4 干燥空气相对湿度变化

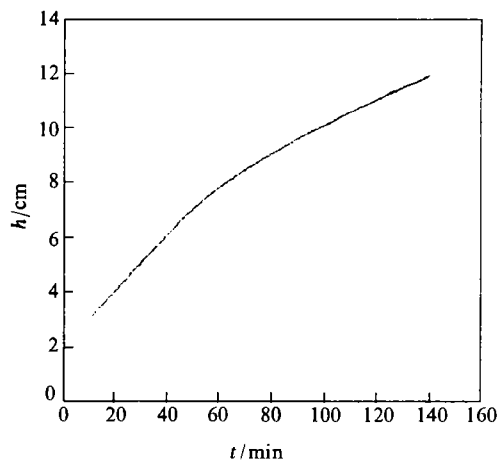


图5 饱和湿度线移行过程

3 小麦在深床下的干燥特性

由通风气流状态变化得到的小麦在深床下的干燥特性如图6~8所示。

从图8所示的累计去水量曲线看,深床干燥由升速到降速干燥的过程与充分湿的单一颗粒的干燥特性具有相似性;从干燥层总体上看,其干燥是沿由吸湿、升速并极快地经过定速段而进入降速干燥的过程。

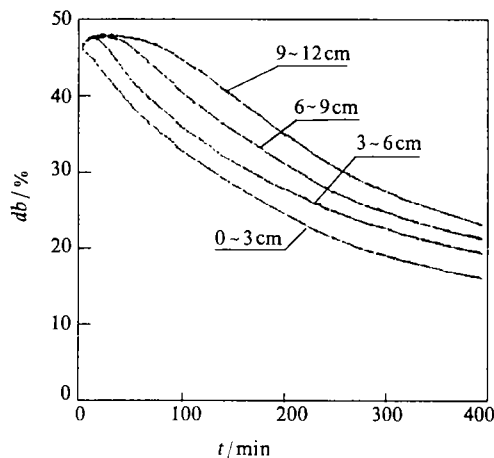


图6 各谷层平均含水率变化

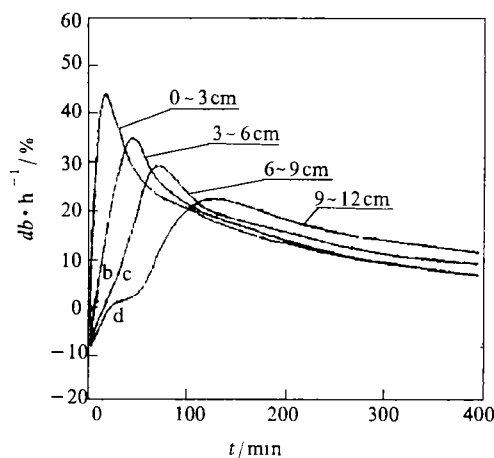


图7 各谷层平均干燥速率

3.1 吸湿段

深床干燥初期,小麦的吸湿过程如图8所示。由图示曲线变化可以看出,在此段,气流释放出的热量,基本上被谷物温度升高所吸收。吸湿过程取决于气流和谷物温度的变化过

程。在通风开始后的前一两分钟内,气流进入谷物层后温度急剧地下降,从 6,9,12 cm 床深处流出的气体,都存在着几乎等于谷物初期温度的区段。随着谷物温度的升高,而出现下层干燥加快上层吸湿的现象,就总体上讲,吸湿的速度随着吸湿层的上移逐渐地减慢。吸湿的过程,在提高送风温度、加大床深的前提下,进行的时间相应地在延长。当干燥进行至图 7 所示的 b~c 段间以后,全层谷物的温度相差较小,下层干燥上层吸湿的速度基本相等,上下层物料含水率差明显加大,湿度仍保持在 100%,但总体干燥速率接近于零。

3.2 升速干燥段

深床干燥进入升速干燥段(图 7 中的 c~d 以后),可以讲,全层谷粒的温度均已上升到入口气流的露点温度以上,从谷层中排出的空气温度在缓慢地上升,总体干燥速率较快地加大,气流释放出的热量主要消耗于下层谷物的干燥及蒸发吸湿过程中残留在谷层中的液态水分,但谷物温度升高所消耗的热量极少。这一特性与单一颗粒升速干燥过程的耗热量分配有本质的区别。由于在这一过程中层内谷物平均温度升高吸收的热量甚微,因此,干燥进行的过程,主要取决于送风空气容纳水分的能力。

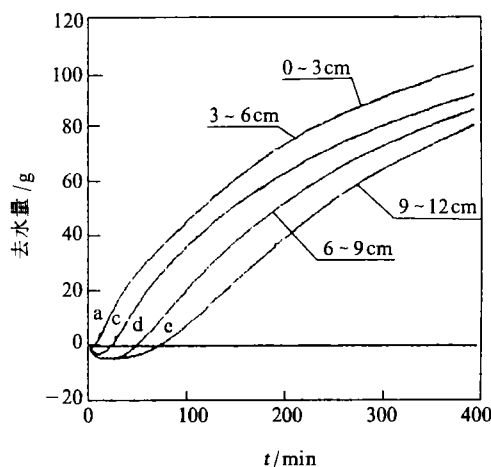


图 8 不同床深处的累计去水量

3.3 降速干燥段

降速干燥段是指随着从谷物层中排出的空气温度的提高,排气湿度下降,干燥速率减小的阶段。由图 6 所示的含水率和图 7 可以看出,在此干燥段,小麦表面的水分已被除去,全层物料的干燥速度都依赖着粒内水分向外表扩散的速度;上层物料的干燥速率加快,上下层物料的干燥速率差及水分差不断减小。在这一过程中谷物的温度也在徐徐地升高,排气的热损逐步加大。在干燥层内气流与谷物交换的热量,主要消耗于粒内水分蒸发和升高谷物的温度,可以推断,送风温度是影响深床降速干燥过程中,去水速率的主要因素。

4 结论

分析深床干燥过程中,气流状态的变化和观测到的小麦深床干燥特性,可得出以下结论。

(1)在深床干燥的初期,送风空气通过干燥层后,存在着低于送风湿球温度,即热风在干燥层内流动过程中,温度便降低到了入口空气露点温度以下的阶段。通风温湿度愈高,干燥层厚度愈大,层内谷物被吸湿的时间愈长。

(2)初期温度较低的材料,在深床下干燥时,沿吸湿、升速并极快地通过定速段而进入降速干燥段。

(3)物料在静置床下干燥时,存在着下层干燥上层吸湿而排气温湿度不变的阶段,且有送风温度愈高、堆积层厚度愈大,这一过程持续时间愈长的倾向。

(4)在吸湿段,气流的显热基本上消耗在升高层内的物料的温度。谷物温度迎着层内干燥空气的温度迅速上升。在升速段,谷物温度几乎不变,随着排气温度缓慢地升高,干燥速度迅速加快。干燥进入降速干燥段以后,排气热损明显增大,谷物温度开始迎着热风温度继续升高,但谷物吸热与蒸发水分显热相比很小,降速干燥的速度主要取决于送风的温度。

(5)干燥床愈深、送风温度愈高,干燥中形成的上下层物料的水分差及干燥速率差愈大。

(6)单一小麦颗粒在深床干燥过程中的有效换热面积,远小于其几何学外表面积。

参 考 文 献

上出顺一,李长友. 1991. 通气的状态变化からみた高水分小麦の厚层乾燥特性. (日)山形大学记要(农学), 11(2): 99~108

西山喜雄,隈元正治. 1973. 乾燥空气の状態变化からとられた谷类の乾燥过程. (日)农业机械学会志, 35(1): 69~74

Boyce D S. 1965. Grain moisture and temperature changes with position and time during through-drying. J Agr Eng Res, 10(4): 333~341

MEASURING THE DRYING CHARACTERISTICS OF WHEAT IN A DEEP-BED FROM CONTINUOUS DRYING AIR DYNAMICS

Li Changyou¹ Shao Yaojian¹ Kamide Junichi²

(1. College of Polytechnic, South China Agr. Univ., Guangzhou, 510642

2. Yamagata Univ., Tsuruoka, 997, Japan)

Abstract

The authors investigated the measuring of the drying characteristics of wheat during deep-bed drying by observing the dynamics of continuous drying air. The study elucidated fluid-to-grain heat and moisture transfer and the change in average moisture content of different layers of grain and demonstrated the change of fluid state and drying rate of wheat in a deep-bed.

Key words wheat; deep-bed drying; air-flow states; drying characteristics