

粮食干燥机旋淋扰动布料装置的研究与设计

Research and design on distributing device combined rotary shower and disturbance for grain dryer

刘珏¹ 谢泽良²

LIU Jue¹ XIE Ze-liang²

(1. 武汉轻工大学, 湖北 武汉 430048; 2. 湖北天和机械有限公司, 湖北 鄂州 436042)

(1. Wuhan Polytechnic University, Wuhan, Hubei 430048, China;

2. Hubei Tianhe Machinery Co., Ltd., Ezhou, Hubei 436042, China)

摘要:针对干燥作业中粮食在进料口易产生自动分级和布料不均匀而影响干燥品质的问题,研究旋淋布料增大进料口断面积20~50倍和扰动布料保持粮食锥顶角 $110^{\circ}\sim 170^{\circ}$ 的特性。设计旋淋扰动组合布料装置,增大干燥机顶层粮食的横向移动并控制干燥仓横断面上粮食容积密度值保持稳定。粮食干燥试验测试表明:旋淋扰动布料可控制干燥仓横断面上的粮食水分不均度 $<1\%$ 时,含杂量不均度 $<2\%$,优于目前广泛使用的甩盘或转盘布料方式,是一种工作稳定可靠的粮食布料装置。

关键词:粮食干燥机;旋淋;扰动;布料装置;锥顶角;含杂不均度

Abstract: According to the problems that drying quality was affected by the automatic grading and uneven distribution of grain in the inlet of material during drying process, the rotary shower distributing was researched to increase section area by 20~50 time, and the disturbance distributing was applied to maintain the cone-top angle of grain between $110^{\circ}\sim 170^{\circ}$. The distributing device combined rotary shower and disturbance was designed in order to increase transverse movement of grain on the top of dryer and to stabilize volume density of grain of cross section in dryer. The test of grain drying has showed that the distributing combined rotary shower and disturbance can control impurity content unevenness of cross section in dry storehouse less than 2% when grain moisture is less than 1%, which is a stable and reliable distributing device and better than that of throw tray or turntable widely used at present.

Keywords: grain dryer; rotary shower; disturbance; distributing device; cone-top angle; impurity content unevenness

粮食收获后的水分含量较高,不及时干燥将发生霉烂、变质,造成较大损失。干燥技术的优劣与粮食的干燥品质^[1-2]以及干燥效率、干燥费用等密切相关^[3-4]。通过优化干燥工艺^[5-6]以及干燥过程工作参数^[7-8],并对干燥过程进行在线控制^[9-10],有利于保证高效干燥。研究^[11]表明,仓内杂质分布和含杂不均度与进料口的布料装置有关,且粮食与杂质粒度相差越大、布粮器转速越高,粮食自动分级现象越明显。这种现象可以通过合理设计布料器结构与工作参数来缓解。如在浅圆仓中使用变速布粮器装仓入粮,可以减缓仓内杂质聚集,并降低含杂不均度^[12];通过数控布粮器小麦入仓储粮试验,解决粮食自然入仓所形成的中心区域杂质集聚现象^[13];利用离散元方法模拟溢料筒不同环宽下大豆颗粒入料过程,解决浅圆仓布料器在实际应用中常因环宽过小发生杂质堵塞或环宽过大导致偏流的问题^[14]。在干燥过程中,物料分布是否均匀直接影响到干燥介质的作用效果,进而影响物料干燥的均匀性。为此,黄正明等^[15]设计了一种用于大型立式干燥器的旋转布料与往复匀料相结合的布料装置,并以料面平整度作为评价指标,采用颗粒饲料为原材料,对影响布料均匀性的主要结构与工艺参数进行试验研究,得到布料板转速、高度以及浆叶角度等工作参数。但未涉及湿粮中的水分含量和杂质含量等因素影响物料流动以及造成自动分级从而影响干燥品质的问题。

针对干燥作业中粮食在进料口易产生自动分级和布料不均匀而影响干燥品质的问题,设计一种粮食干燥机旋淋扰动布料装置,分析旋淋扰动组合布料技术特点,并通过现场试验验证组合布料方式与单一布料方式的优劣。

1 湿粮流动特性

湿粮与干粮的流动性有较大的差别,影响湿粮流动性的主要因素是水分含量和杂质含量。中国粮食标准有关粮食流动性的说明与规范,均是指符合贮藏标准的粮食,但对收

基金项目:国家重点研发计划项目(编号:国科农计字 201728)

作者简介:刘珏(1985—),男,武汉轻工大学讲师,博士。

E-mail: whliujue@sina.com

收稿日期:2017-12-25

割脱粒后湿粮的流动性很少涉及,相关湿粮流动性的研究与报道亦不多。由牛顿黏性理论^[16]:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}, \quad (1)$$

式中:

τ ——湿粮流动时的黏性力, N/m^2 ;

μ ——湿粮颗粒间相对运动时黏性系数, $\text{N}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度(速度沿垂直于速度方向的变化率), s^{-1} 。

收割脱粒后的湿粮中,水分含量大多为 20%~30%;杂质含量为 1%~10%。依据 2017 年 5 月~12 月湖北华苑粮油有限公司干燥车间干燥小麦、油菜籽、早稻、中稻、晚稻的生产纪录和湿粮流动性试验资料,综合分析表明:湿粮流动时的黏性力 τ 与粮食的粒径、形状、密度相关;与湿粮水分含量,特别是与粮食颗粒表层的自由水分含量密切相关;与湿粮中的杂质含量相关,特别是与高水分纤维性轻杂含量密切相关; du/dy 与湿粮流动发生的位置关联密切。在干燥机顶层布粮时,要求湿粮有较大的横向速度,使湿粮向四周均质与均匀扩散;在干燥机底层,要求湿粮有较大的向出料口方向的流动速度,使干燥机底层的物料较均匀地从出料口排出;在干燥机进风和排风风道处及干燥仓边壁形状发生突变处,要求 dy 方向的变化仅影响局部 du 的大小和方向,而不影响干燥机内湿粮的整体流动。 μ 为黏性系数,与湿粮的粒径、形状、表面粗糙度、水分及杂质含量、杂质状况等因素有关。

2 粮食均匀干燥机理

粮食干燥机的种类较多,但对流干燥机约占粮食干燥机总数量或总吨位的 90% 以上。图 1 为对流干燥模型。干燥仓 1 内装有需要干燥的物料 4,热风经进风角状盒 2 进入料层,在物料颗粒间渗流流动,然后进入位于进风角状盒上部和下部的排风角状盒 3 排出。热风穿过料层对物料加热,使物料温度升高,同时带走物料中的水分,使物料干燥。所以,位于上、下部排风角状盒之间的物料层处于干燥降水状态。若处于干燥机上排风角状盒排风口横断面的物料,经过 t 时间后,流动到下排风角状盒排风口的位置,且仍处于同一横断面内。即干燥机内的物料,流动距离为上、下排风角状盒之间的位置高度差 h 时,所需时间为 t ,由连续性方程可知:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2, \quad (2)$$

$$v = h/t, \quad (3)$$

式中:

ρ_1, ρ_2 ——上、下断面上物料的容积密度, kg/m^3 ;

A_1, A_2 ——上、下断面的有效断面积, m^2 ;

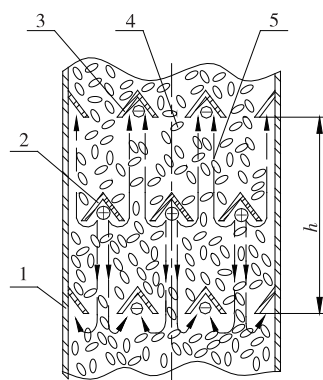
v_1, v_2 ——上、下断面上的物流流速, m/s ;

h ——上、下断面之间的距离, m ;

t ——物料流经干燥段的时间, s ;

v ——物料流经干燥段的平均流速, m/s 。

由式(2)、(3)可知,若要保持 t 或 v 为不变量,则需保持



1. 干燥仓 2. 进风角状盒 3. 排风角状盒 4. 物料 5. 干燥气流

图 1 干燥仓内对流干燥工作原理示意图

Figure 1 Schematic drawing of working principle for convective drying in dry storehouse

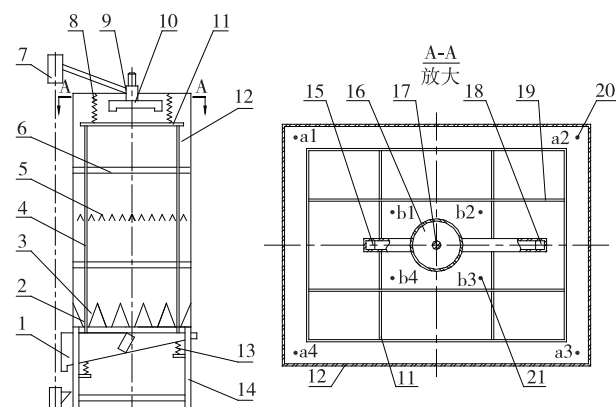
ρ_1 和 ρ_2 相同,即干燥机任一横断面上物料的容积密度相同,则 $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ 。由于干燥机仓体设计时,需减小仓壁对粮食向下流动的阻力,干燥仓仓体的仓壁大多与粮食流动方向平行。所以, $A_1 = A_2$, $v_1 = v_2 = v$, 且 $v = h/t$ 。通过控制干燥机的排料量,可以调节粮层整体流经 h 距离的时间 t ,从而控制粮食在干燥机内的干燥时间。并通过调节热风风量和热风温度,还可控制粮食的降水速度和粮食流经 h 距离时的降水幅度,实现粮食均匀干燥。

但粮食干燥机进料口的断面积比干燥仓的断面积小得多,进料口附近的粮食向下流动的同时,需要横向运动,才能使粮食布满干燥仓。所以,进料口附近粮食的实际流动方向是向下速度与横向速度的合成。由于横向速度的存在,以及粮粒与杂质的大小、形状、表面粗糙状况、真实密度和容积密度等均存在较大差异,将使粮食和粮食中的杂质自动分级,导致干燥仓横断面上各处的杂质分布不均匀。此外,由于湿粮中的水分含量和杂质含量高,湿粮的流动性更差,致使湿粮的自动分级现象更严重,且使干燥仓内粮食的容积密度 ρ 和粮流速度 v 产生变化,影响干燥品质。

3 旋淋扰动布料技术

3.1 旋淋布料机构设计

XH-30 型旋淋扰动粮食干燥机见图 2。旋淋布料机构 10 由汇料筒 16、短旋淋嘴 15、长旋淋嘴 18、旋转轴 17 以及电机传动机构等组成。旋淋布料机构安装在干燥机进料口 9 的下方,并位于扰动布料机构 11 的上方。旋淋布料机构的旋转轴通过安装在干燥仓顶部的电机传动机构做旋转运动。粮食经提升机落入干燥机的进料口 9 中,并落入旋转的汇料筒 16 中,汇料筒与长旋淋嘴和短旋淋嘴相通。由于长、短旋淋嘴的结构设计,在离心力的作用下,汇料筒中的粮食只能从长旋淋嘴和短旋淋嘴中甩出。随着旋淋布料机构匀速旋转布料,将在干燥机顶层粮食形成长旋淋嘴和短旋淋嘴为半径的两个同心圆环。由于粮食的流动性和自然堆角作用,粮食可布满干燥仓的横断面,并可改善粮食在布料过程中的自动分级现象,有利于减小干燥仓横断面上粮食容积密度的不均匀度。



1. 振动排料机构 2. 出料口 3. 集料斗 4. 导料杆 5. 前后置角状盒 6. 左右置角状盒 7. 提升机 8. 弹性吊座 9. 进料口 10. 旋淋布料机构 11. 扰动布料机构 12. 干燥仓 13. 弹性支座 14. 机架 15. 短旋淋嘴 16. 汇料筒 17. 旋转轴 18. 长旋淋嘴 19. 平料栅 20. 边缘测点 21. 中部测点

图2 旋淋扰动粮食干燥机工作原理示意图

Figure 2 Schematic diagram of working principle for grain dryer combined rotary shower and disturbance

3.2 扰动布料机构设计

XH-30型旋淋扰动粮食干燥机的扰动布料机构由平料栅19、弹性吊座8、导料杆4和振动排料装置1等组成。振动排料装置1利用弹性支座13安装在机架14上。平料栅19利用弹性吊座8悬挂在干燥仓12的顶部。导料杆4的上端与平料栅19铰接;导料杆下端与振动排料装置铰接。当振动排料装置工作时,带动导料杆振动。导料杆由外套筒和内导杆组成,外套筒外侧与粮食接触,而内导杆位于外套筒内,不与粮食接触,可传递振动力。当导料杆穿过振动排料装置与平料栅之间的粮层,导料杆的振动力亦将衰减,平料栅的运动亦衰减至扰动。如图2所示,平料栅的横向与纵向肋板将扰动力传递给与之接触的粮食,将使粮食的自然堆角增大,粮食产生横向位移,从而布满干燥仓的横断面。所以,在平料栅扰动力的作用下,干燥机顶层的粮食将有向四周的横向运动。因扰动力较小,粮食与平料栅之间相对运动的速度较小,且粮食颗粒之间的横向运动速度亦较小,不易使粮食与粮食中所含的杂质产生自动分级。所以,扰动机构的作用既有利于粮食布满干燥仓顶层的整个横断面,又有利于防止布料过程中产生粮食自动分级现象,控制干燥仓横断面上粮食容积密度的不均匀度。

3.3 旋淋扰动组合布料技术特点

HX-30型粮食干燥机干燥仓断面面积为 $3\text{ m}\times 3\text{ m}$,从提升机到干燥仓的溜管断面面积为 $0.2\text{ m}\times 0.2\text{ m}$ 。由于粮食在溜管中运动有速度、方向和动量,存在自动分级现象。将旋淋布料机构设计为长短旋淋嘴结构,并取长旋淋嘴半径为 1.25 m ,短旋淋嘴半径为 0.75 m ,使两个同心圆环的面积为溜管进料口断面面积的 $20\sim 50$ 倍。并依据试验测定,旋淋布料机构的转速在 $10\sim 100\text{ r/min}$ 时,从旋淋嘴甩出粮粒的速度在 $0.5\sim 5.0\text{ m/s}$,不易造成粮食的损伤与杂质分级。当粮食粒径较大时,旋淋布料机构的转速取较小值;反之,取较大值。同时,由于扰动布料机构对两个同心圆环粮食实测堆角

增大到 $110^\circ\sim 170^\circ$,基本布满干燥仓顶部横断面,并有效防止了进料口粮食的自动分级现象。另外,长、短旋淋嘴布置在同一轴线上,具有结构简单、制造成本低等优点,有利于配重与平衡;有利于安装、维护和磨损后现场配重平衡。所以,旋淋扰动布料机构将旋淋布料机构与扰动布料机构进行组合,可有效控制干燥仓横断面上粮食的容积密度。

如图2所示,将旋淋布料机构置于扰动布料机构的上方。干燥机工作时,粮食经提升机落入匀速转动的汇料筒中。粮食从长旋淋嘴和短旋淋嘴中甩出,在干燥仓内粮食顶层形成以长旋淋嘴为半径的大圆环和以短旋淋嘴为半径的小圆环。两圆环同心,相当于两个同心圆环进料口的布料效果。由于两个同心圆环的有效布料断面面积要比单点或多点布料口的有效断面面积大 $20\sim 50$ 倍,可以改善单点或多点布料效果。扰动布料机构的平料栅的中间部分置于粮层中,但四周边缘部分暴露在空气中,当振动排料装置工作时,振动力通过导料杆传递给平料栅时,平料栅产生扰动。平料栅上的横向或纵向肋板将粮食向四周边缘扰动,使旋淋布料机构布料形成的两个同心圆环粮食的锥顶角不断增大,使同心圆环粮食的锥顶角保持在 $110^\circ\sim 170^\circ$,粮食向四周边缘移动,充满干燥仓顶部的横断面,实现旋淋扰动组合布料过程。

4 装置性能试验

4.1 试验材料

晚稻:黄花粘,含水率 $26\%\sim 28\%$,市售。

4.2 试验设备与条件

4.2.1 试验设备

旋淋扰动粮食干燥机:HX-30型,湖北天和机械有限公司;

米麦两用水分计:1D-6型,上海三久机械有限公司;

单粒水分计:CTR.500ET型,上海三久机械有限公司;

爆腰检查器:DC.50型,上海三久机械有限公司。

4.2.2 试验地点

湖北华苑粮油有限公司的干燥车间。

4.2.3 试验时间与试验条件

2017年10月26日~11月7日,大气温度 $9\sim 23^\circ\text{C}$,相对湿度 $60\%\sim 85\%$ 。

4.3 试验方法

将刚收割的晚稻黄花粘装入HX-30型旋淋扰动粮食干燥机,进行干燥试验。试验过程中,采用停机进行顶部取样的方式,按GB/T 6970—2007《粮食干燥机试验方法》以及GB/T 21015—2007《稻谷干燥技术规范》测定试样的含水率、含杂率、水分不均匀度、含杂不均匀度等。

4.4 试验结果与分析

由表1可知,随着干燥作业进行和粮食水分含量降低,图2所示测点的水分值、含杂量、水分均值、含杂量均值、水分不均匀度、含杂量不均匀度值都在降低。粮食中含杂量的降低,说明杂质的含水量比粮食含水量大;当粮食水分降低时,杂质的失水更多,故杂质的含量降低。同时,当粮食水分 $<17\%$ 以后,水分不均匀度值 $<1\%$ 。粮食中含杂量的不均匀度值随着粮食水分降低而减小,并小于 0.5% ,说明旋淋扰动布料过程中没有出现自动分级现象,粮食干燥机内粮食的容积密度变化很小,可以忽略不计,达到了均匀布料的设计要求。

表 1 旋淋扰动布料装置试验结果

Table 1 Experiment results of distributing device combined rotary shower and disturbance %

布料方式	测试序号	测量参数	测点位置								边缘测点均值	中部测点均值	水分不均匀度	杂质不均匀度
			a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4				
旋淋扰动布料	1	水分	25.1	25.3	24.8	26.2	25.3	25.7	25.3	24.7	25.4	25.3	1.5	—
		含杂	2.8	3.4	3.9	2.7	2.9	2.5	3.3	3.6	3.2	3.1	—	1.4
	2	水分	22.5	23.2	23.7	22.9	22.8	23.2	23.1	22.6	23.1	22.9	1.3	—
		含杂	3.0	3.1	2.7	3.3	3.4	3.2	2.8	2.9	3.0	3.1	—	0.7
	3	水分	19.7	20.1	19.5	20.3	19.6	19.8	20.3	20.5	11.9	20.1	1.0	—
		含杂	2.8	2.9	3.1	3.2	3.0	2.8	3.0	2.9	3.0	2.9	—	0.4
	4	水分	17.2	17.6	17.9	17.5	17.3	17.8	17.5	18.1	17.6	17.1	0.9	—
		含杂	2.8	2.8	2.6	3.0	2.6	2.6	3.0	3.0	2.8	2.8	—	0.4
	5	水分	15.3	15.7	15.5	15.4	15.5	15.4	15.4	15.3	15.5	15.4	0.4	—
		含杂	2.5	2.7	2.4	2.3	2.4	2.6	2.6	2.7	2.5	2.6	—	0.4
甩盘布料	1	水分	24.5	25.5	24.9	25.1	25.4	26.1	25.8	25.2	25.2	25.6	1.2	—
		含杂	4.0	4.2	4.0	3.9	2.8	2.8	3.0	2.6	4.0	2.8	—	1.6
	2	水分	18.6	19.1	19.2	18.3	18.5	19.2	18.8	18.4	18.8	18.7	0.9	—
		含杂	3.5	3.6	3.8	3.9	3.5	3.4	3.4	3.2	3.7	3.4	—	0.7
	3	水分	15.7	16.1	15.5	16.2	15.8	15.4	16.2	15.6	15.9	15.8	0.8	—
		含杂	3.2	3.0	3.1	3.9	3.4	3.4	3.7	3.4	3.3	3.5	—	0.9

表 1 显示,当粮食水分较高时,甩盘布料方式中,边缘测点含杂量高于中部测点的。当粮食水分较低时,甩盘布料方式中,边缘测点含杂量略低于中部测点的,说明粮食水分较高时,杂质的含水量更高,杂质更重,甩得较远,边缘测点处的杂质含量较高;当粮食水分较低时,杂质失水更多,重量减少更快,甩的距离亦减小,中部测点处的杂质含量增多。

5 结论

分析高水分、高含杂湿粮对流动性的影响,设计旋淋扰动组合布料机构。试验表明:旋淋布料形成两个同心圆环,且两个同心圆环的断面积比进料口断面积大 20~50 倍;扰动布料使两个同心圆环粮食的锥顶角增大到 110°~170°,既使干燥机顶层粮食有水平运动,又控制了粮食与杂质的相对运动速度,防止自动分级现象出现。采用旋淋扰动布料机构,使边缘测点位置 and 中部测点位置所测含杂不均匀度小于 2%,且各测点水分不均匀度均小于 1%,说明旋淋扰动布料机构可增大进料口断面积和增加粮食水平运动,使干燥机顶层粮食基本保持水平状态,是一种工作稳定可靠的粮食布料装置。

参考文献

[1] 任广跃,曾凡莲,段续. 利用低场核磁分析玉米干燥过程中内部水分变化[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(8): 95-99.

[2] 徐凤英,黄木水,陈震,等. 稻谷烘干过程中的水分扩散特性与品质特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 261-267.

[3] 李长友,麦智炜,方壮东,等. 高湿稻谷节能干燥工艺系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 1-9, 294.

[4] 车刚,陈武东,吴春升. 大型 5HFS-10 负压自控粮食干燥机的设

计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(16): 267-275.

[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] 王继焕,刘启觉. 高水分稻谷分干干燥工艺及效果[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 245-250.

[7] THATCHAPOL Chungcharoen, SOMKIAT Prachayawarakorn, SOMCHART Soponronnarit. Effect of drying temperature on drying characteristics and quality of germinated rices prepared from paddy and brown rice[J]. Drying Technology, 2012, 30(13): 1 844-1 853.

[8] XIAN Zhe-zheng, CHENG Hai-liu, ZHI Ying-chen. Effect of drying conditions on the texture and taste characteristics of rough rice[J]. Drying Technology, 2011, 29(11): 1 297-1 305.

[9] 徐凤英,陈震,李长友. 稻谷热风、微波干燥品质与玻璃化转变研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 187-192.

[10] 李长友. 稻谷干燥含水率在线检测装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2008, 39(3): 56-59.

[11] 李永祥,任曼曼,曹宪周,等. 基于 MATLAB 的浅圆仓进粮自动分级动力学建模及仿真研究[J]. 粮食科技与经济, 2014, 39(1): 66-68.

[12] 张峻岭,陈艺,张卓青. 布粮器在浅圆仓入粮防分级中的研究与应用[J]. 粮食流通技术, 2012(6): 16-19, 22.

[13] 郑超杰,张明学,赵东虎. 数控布粮器小麦入仓储粮试验[J]. 粮食流通技术, 2013(3): 20-21.

[14] 裴永胜,杨国峰,丁超,等. 基于离散元方法的布粮器落料问题优化研究[J]. 粮食科技与经济, 2017, 42(3): 52-56.

[15] 黄正明,谭鹤群,陆锐. 大型立式干燥机械布料装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(13): 56-59.

[16] 张兆顺,崔桂香. 流体力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2015: 275-293.