doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.021

三回程有机肥颗粒转筒干燥设备中筒抄板设计与试验

张晓明[1]　贺　刚[2]　冯　晨[3]　王光辉[1]　王德成[1]　吕　豪[1]

(1.中国农业大学工学院,北京 100083;2.中国农业机械化科学研究院呼和浩特分院,呼和浩特 010010;
3.北京航天动力研究所,北京 100076)

摘要:为实现有机肥颗粒物料的高效干燥,提出了专用三回程转筒干燥工艺,着重对影响有机肥颗粒运动的中筒内抄板设计参数进行研究。分析了抄板的作用原理,设计出在中筒可以实现物料逆向"爬坡"的组合式抄板;应用 EDEM 离散元软件,通过正交试验设计,确定物料在中筒内停留时间的显著性影响因素为转筒安装倾角和组合抄板平面滑板角;通过试验验证,完成了转筒倾角和组合抄板平面滑板角对物料停留时间影响的单因素试验,建立了相应的数学模型;通过对试验结果和仿真分析结果对比分析,经偏移修正后的仿真模型可以很好地预测物料在中筒内的停留时间;根据试验结果,转筒安装倾角不超过 5°、组合抄板平面滑板角不小于 40°时干燥效果好。

关键词:有机肥颗粒;干燥;组合抄板;离散元分析;正交试验

中图分类号:S233.9　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2016)07-0151-08

Design and Experiment of Flights in Middle Drum of Triple-pass Rotary Drum Dryer for Organic Fertilizer Pellets

Zhang Xiaoming[1]　He Gang[2]　Feng Chen[3]　Wang Guanghui[1]　Wang Decheng[1]　Lü Hao[1]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Huhhot Branch*, *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Huhhot* 010010, *China*
3. *Beijing Aerospace Propulsion Institute*, *Beijing* 100076, *China*)

Abstract: Pelleting is an effective way to store and utilize organic fertilizer. A key step is to dry after pelleting. At present, one-zone rotary drying is often used for drying organic fertilizer pellets. But it has many problems, such as high energy consumption and etc. To guarantee the efficiency and high quality of the organic fertilizer in drying process, a triple-pass rotary drum drying technology was introduced. Therefore, the problems of long overall length, large occupied area and low plant utilization factor can be solved. This study combines the advantages of triple-pass rotary drum dryer. To explore the relationship among the residence time in the drum, the structure parameter of flight, and the drum installation angle, the EDEM software was used to simulate the movements of the pellets in the drum. The principle of the flight was analyzed, and a new type of combined flight was designed. The residence time in middle drum testing apparatus was set up, and the single-factor experiment design was conducted. Then, the significant factors on residence time were obtained by using orthogonal experiments, which turned out to be the drum installation angles and flight angles. The results of the simulation and experiment were compared, and it's verified a very highly prediction on the residence time and optimized parameters of the drum installation angle. Finally, the experiments showed that the installation angle should be less than 5° and flight angle should be higher than 40°.

Key words: organic fertilizer pellet; drying; combined flights; EDEM; orthogonal experimental

收稿日期:2015-12-03　修回日期:2016-03-09

基金项目:公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203007)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-35)

作者简介:张晓明(1987—),男,博士生,主要从事颗粒干燥机械研究,E-mail:ndzxm159357@163.com

通信作者:王光辉(1974—),男,副教授,博士生导师,主要从事畜牧、牧草和生物质加工机械研究,E-mail:guanghui.wang@cau.edu.cn

引言

有机肥是发酵腐熟的含碳有机物料,主要来源于植物或动物及其废弃物,其功能是改善土壤肥力、提供植物营养、提高作物品质[1-3]。农业生产中,有机肥与化肥配合混播时,当有机肥含水率(湿基)大于等于 10%,容易吸潮导致化肥潮解成团,影响施肥效果。因此,国家在有机肥质量标准中,要求有机肥颗粒含水率必须低于 10%。实际应用的湿法生产工艺中,制粒后的有机肥颗粒含水率高于 30%[4],需采用干燥工艺去除多余的水分。机械干燥有机肥湿颗粒具有干燥品质好、环境污染少、效率高等优势。然而,目前实际应用中,有机肥生产企业一般采用干燥泥沙、茶叶的单回程转筒干燥设备进行有机肥生产,并没有专用的有机肥干燥设备,致使生产效率低下[5]。颗粒干燥设备在化工领域应用广泛,目前工业生产上主要采用的干燥设备以单筒干燥设备、回转窑、流化床为主,其中流化床热效率较高但其生产效率却低于转筒干燥设备[6-8]。单回程转筒干燥机由于结构性缺陷,生产中容易造成产品过热或过干,而且干燥过程中热量损失大。针对有机肥干燥,SILÉRIO 等[9-10]提出了一种类似喷气射流的有机肥干燥设备,在一定程度上提高了生产效率和产品质量,但还是采用单回程的干燥方式,没有解决结构紧凑和高效生产的问题。

相对于上述设备类型,三回程转筒干燥设备具有明显减小设备轴向尺寸和占地面积的特点,而且经过内、中、外 3 层筒体的依次嵌套,热量损失降低,热效率提高。在物料干燥行程不变的情况下,三回程转筒干燥设备的外表面积缩小了近 70%,而内表面积却增加了近 70%[11-12]。目前应用的水平三回程转筒干燥设备,适宜于依靠风力输送的轻质物料干燥,如牧草、木屑等。如果能够解决有机肥颗粒这类质量大、密度高的物料在三回程筒体间的折返运动,着重对影响有机肥颗粒运动的中筒内抄板设计参数进行研究,设计出在中筒可以实现物料逆向“爬坡”的组合式抄板,则能够充分利用三回程转筒干燥的工艺优势,扩大这类型干燥设备的应用领域。

物料在三回程转筒设备中筒内的停留时间直接影响到设备效能和产品品质,其关键机构的设计非常重要。而目前停留时间的计算模型均基于传统抄板形式建立的[13],无法有效预测在特殊设计组合抄板作用下物料的停留时间。随着计算机技术的日益发展,离散元理论的不断成熟,该理论在农业设备开发过程中得到了大量的应用[14]。本文利用离散元仿真软件 EDEM,进行不同参数对物料停留时间影响的仿真分析,并通过设计试验台架进行试验验证,研究不同设计参数对物料停留时间影响的数学关系。

1 中筒抄板结构设计与工作原理

1.1 转筒干燥一般过程

对于有机肥颗粒这类质量大、密度高的物料,一般采用长度达 30 m 的倾斜式单筒干燥设备干燥。由位于倾斜筒体高处的入料口喂入后,物料依靠重力向前运动,通过低处的排料口排出,在干燥设备内停留时间长(几分钟到几十分钟)。设备采用单层筒且筒径大,生产中易形成跌落破碎损失(有机肥颗粒)和较大的热损失。若能够实现颗粒物料不依靠风力在三回程转筒干燥设备内有效流动,则能充分发挥三回程转筒干燥设备的优势。

1.2 中筒抄板结构设计

为此,本研究设计一种倾斜布置的三回程转筒干燥设备,特别对分布在中筒内的组合抄板进行设计,实现物料不依靠风力在转筒内的逆向“爬坡”上升。从图 1 可看出,有机肥颗粒物料在外筒和内筒内均在重力沿 X 轴分量作用下由高处向低处顺向流动。而在中筒,重力产生的沿 X 轴方向上的分量与物料流动方向相反。因此,中筒抄板应具有两种作用:转筒转动时,将物料抄起并逐渐洒落,增大物料与热风的有效接触面积,加速干燥过程;驱动有机肥颗粒逆向“爬坡”,提供有机肥颗粒在筒体内运动的动力。

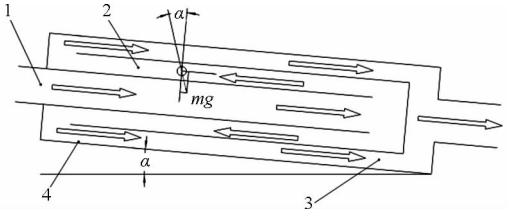
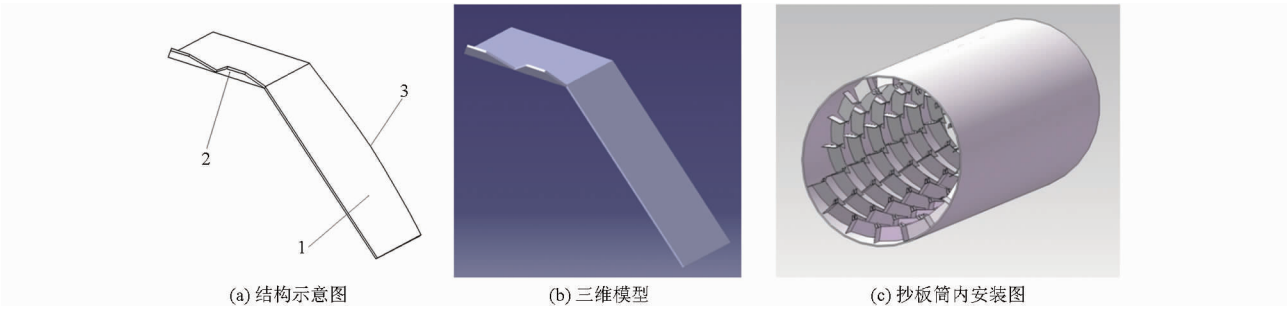


图 1 有机肥三回程转筒干燥设备颗粒流动方式

Fig. 1 Organic fertilizer particle type of flow in a triple-pass drum dryers

1. 内筒 2. 中筒 3. 外筒 4. 筒体

抄板的结构有平板型、折弯型、直角型和半圆型 4 种基本形式[15]。其几何形状不仅影响到它的举升能力,而且还影响到物料从转筒内部落下的方式。国内外许多学者对抄板的设计做了较为详细的研究,提出抄板的结构直接影响到物料在筒内的停留时间和运动状态[16-19]。最常用的举升式抄板可以很好地实现物料的倾洒,形成较稳定的物料帘,但是无法驱动物料逆向“爬坡”。半圆形抄板能够有效推动物料“爬坡”上升,但对物料没有抛洒效果。结合这些特点,提出一种组合抄板结构,如图 2a、2b 所示。



(a) 结构示意图　(b) 三维模型　(c) 抄板筒内安装图

图 2　组合抄板

Fig. 2　Combined flight

1. 平面滑板　2. 折角抄板　3. 平面滑板焊接边

组合抄板由平面滑板和折角抄板组成，在转筒内呈螺旋线方式布置（如图 2c 所示）。工作时，有机肥颗粒先接触折角抄板，并被带起，转筒转过一定角度后洒落。部分物料从平面滑板上滑下获得初动能，之后物料从平面滑板边缘抛出，在运动过程中克服重力分量的影响，驱动颗粒向前逆向“爬坡”。在组合抄板作用下，有机肥颗粒的运动有 2 种：单纯在折角抄板的作用下被举升到一定高度后自由落下；在平面滑板的作用下由平面滑板顶端滚动到滑板边缘，获得一定初速度做抛物线运动。第 1 种运动形式对物料在转筒内的逆向“爬坡”无明显作用，本文不做分析。

1.3　组合抄板工作原理

抄板在中筒内沿一定角度平行布置，实现物料在筒内的“接力”运动（图 3 表示中筒展开后抄板布置形式）。沿组合抄板平面滑板方向运动的颗粒，为了在 B 点时速度达到 v_1（图 4a 所示），根据能量守恒定律，从 A 点运动到 B 点减小的重力势能，需大于颗粒克服与抄板之间摩擦所需能量和转筒安装倾角产生的重力分量消耗能量之和。

$$mgL\cos\alpha - \mu mgL\sin\alpha - mgL\sin\alpha\sin\theta = \frac{1}{2}mv_1^2 \quad (1)$$

式中　m——有机肥颗粒的质量，kg

g——重力加速度，m/s^2

L——平面滑板长度，m

α——组合抄板平面滑板角，(°)

μ——有机肥颗粒和平面滑板之间的滚动摩擦因数

θ——转筒安装倾角，(°)

v_1——颗粒到达 B 点时沿平面滑板方向的速度，m/s

为保证图 4a 所示方向速度 v_1 大于零，根据公式(1)，平面滑板角需要满足

$$\tan\alpha < \frac{1}{\mu + \sin\theta} \quad (2)$$

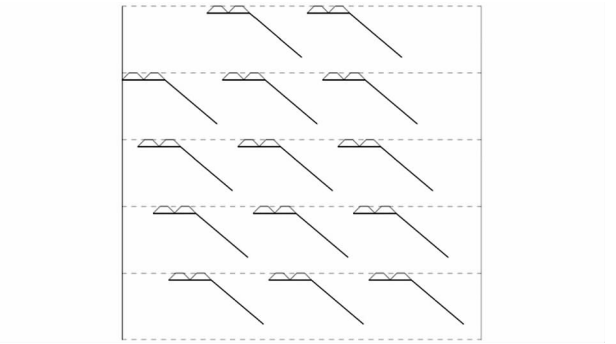
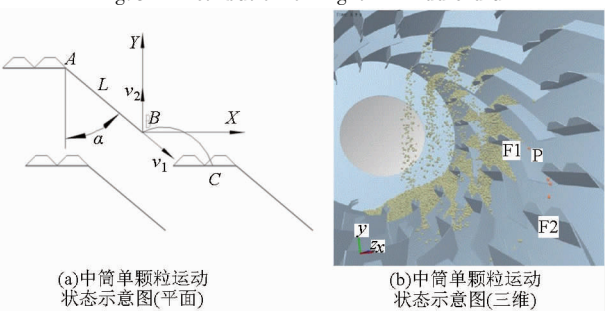


图 3　中筒抄板布置方式展开图

Fig. 3　Distribution of flight in middle drum



(a)中筒单颗粒运动状态示意图(平面)　(b)中筒单颗粒运动状态示意图(三维)

图 4　中筒颗粒群运动状态示意图

Fig. 4　Particle motion status in middle drum

根据在抄板作用下单颗粒的运动学分析，可看出标记为橙色的颗粒 P 从组合抄板 F1 上滑落到相邻组合抄板 F2 上，随着转筒转动，在组合抄板的作用下，颗粒 P 会从 F2 上向前滑落到下一片组合抄板上（如图 4b 所示）。该过程与图 4a 中分析的颗粒运动状态一致，实现了颗粒逆向“爬坡”。

颗粒从 B 点抛射运动的运动方程为

$$\begin{cases} S_x = v_1 t\sin\alpha \\ S_y = (v_2 - v_1\cos\alpha)t - \dfrac{1}{2}gt^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中　S_x——X 方向上颗粒运动的位移，m

S_y——Y 方向上颗粒运动的位移，m

t——颗粒做抛物线运动的时间，s

v_2——颗粒在 B 点由于转筒转动获得的初速度，m/s

由公式(3)可知，由于存在速度 v_1，颗粒抛出抄

板后存在 X 正向上的位移。该位移通过连续积累可以实现在中筒内逆向“爬坡”。颗粒从 B 点以抛物线轨迹运动到 C 点,而后被再次扬起,形成下一个运动循环,实现有机肥颗粒在中筒内连续运动。实际工作状态中,有机肥颗粒群在满足公式(2)的情况下,在转筒内会呈现 3 种运动状态:部分颗粒在组合抄板平面滑板上,以惯性颗粒流的形式滑落到紧邻同一条螺旋线的下一片组合抄板上,该运动状态实现了颗粒群在转筒内的逆向“爬坡”运动;部分颗粒在组合抄板中的折角抄板作用下,被带到一定高度后抛洒形成物料帘,有利于有机肥湿颗粒在中筒内与热空气的湿热交换;还有少部分颗粒存在“倒流”现象,但由于整个筒内抄板呈螺旋线方式布置,倒流的有机肥颗粒还会滑落到下一组抄板上,继续前述的运动过程。

2 仿真分析

2.1 接触模型

离散元法能够模拟颗粒流的运动过程,根据不同物料特性,实际应用中有多种接触模型的离散元分析。结合已有 EDEM 在各个领域的应用分析[14,20-25],假设本研究中的有机肥颗粒表面之间没有粘附力,性质接近于常见的农作物种子,故选择 Hertz - Mindlin 接触模型。

该接触模型将颗粒间接触作用按照静态弹性接触进行处理,得到了颗粒间圆形接触面积与弹性形变的关系,有效解决了颗粒曲面接触问题。

根据 Hertz - Mindlin 接触模型,定义颗粒间接触面为圆形,接触过程中法向重叠量为 a,切向位移为 δ(如图 5 所示),根据已知条件,可得到法向接触力 N 和切向接触力 T[26] 分别为

$$N=\frac{4}{3}E^{*}R^{*\frac{1}{2}}a^{\frac{3}{2}} \tag{4}$$

$$T=8aG^{*}\theta_k\Delta\delta+(-1)^{k}\mu_s(1-\theta_k)\Delta N \tag{5}$$

式中 R^{*}——有效颗粒半径,m

E^{*}——有效弹性模量,Pa

G^{*}——有效剪切模量,Pa

θ_k——加载系数

$\Delta\delta$——切向位移增量,m

k——常数,可取 0、1、2,分别对应切向力加载、卸载和卸载后重新加载的情况

μ_s——颗粒表面静摩擦因数

ΔN——切向力增量,N

其中有效颗粒半径、有效弹性模量和有效剪切模量的计算式为

$$\frac{1}{R^{*}}\equiv\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2} \tag{6}$$

$$\frac{1}{E^{*}}\equiv\frac{1-\vartheta_1^{2}}{E_1}+\frac{1-\vartheta_2^{2}}{E_2} \tag{7}$$

$$\frac{1}{G^{*}}\equiv\frac{2-\vartheta_1}{G_1}+\frac{2-\vartheta_2}{G_2} \tag{8}$$

式中 R——颗粒半径,m

E——弹性模量,Pa

ϑ——泊松比

G——剪切模量

下角标“1”、“2”分别代表颗粒 1 和颗粒 2。

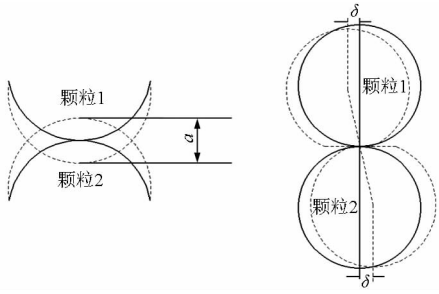


图 5 Hertz - Mindlin 颗粒接触模型

Fig. 5 Hertz - Mindlin particle contact model

2.2 颗粒和仿真模型

有机肥颗粒经过平模制粒机加工后,形成圆柱状颗粒体。通过测量 10 组,每组 10 粒,共 100 粒有机肥颗粒的直径和长度,具体有机肥颗粒几何参数见表 1。

有机肥颗粒平均长度为 9 mm,平均直径为 5.87 mm,而且颗粒长度分布的离散程度小。通过文献分析[15,22,25]和部分特性试验得到有机肥颗粒与转筒抄板之间的力学性能以及相互之间的物理特性,见表 2。

为提高仿真效率,采用双球模型简化有机肥颗粒模型。中筒模型长度为 2 000 mm,折角抄板长度

表 1 有机肥颗粒几何参数测定结果

Tab. 1 Measurement result of geometrical parameter of organic fertilizer pellets mm

参数	组别										平均值	标准差
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
平均长度	9.92	9.03	9.66	9.50	8.65	9.65	8.85	8.81	8.16	7.79	9.00	0.69
平均直径	5.95	5.87	5.82	5.81	5.85	5.85	5.92	5.88	5.90	5.89	5.87	0.04

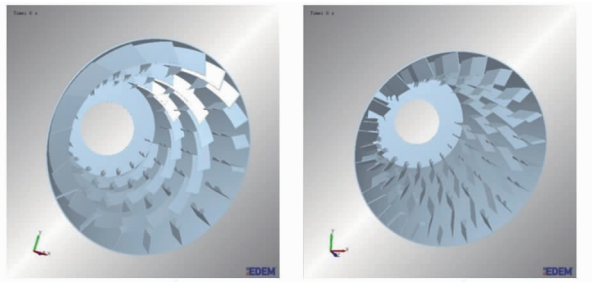
为 200 mm，平面滑板长度为 400 mm。利用公式(2)计算抄板临界角度，得到以上条件下组合抄板平面滑板的临界角度接近 75°，而且角度过小时，出现安装干涉，故选取组合抄板平面滑板角度为 30°和 70°，抄板在内筒安装方式按照螺旋线旋转布置，螺距为 590 mm，每个周期内布置 12 片组合抄板，生成的模型如图 6 所示。

表 2　材料力学特性

Tab. 2　Mechanical properties of material

材质	泊松比	剪切模量/MPa	密度/($g \cdot cm^{-3}$)	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
有机肥颗粒	0.3	100	1.25	0.01	0.30	0.17
钢板	0.3	70 000	7.80	0.07	0.25	0.05

统计当转筒内剩余颗粒数量小于 500 粒时，此时仿真的总时间作为颗粒的停留时间。为优化仿真次数，采用正交设计试验方法，对转筒倾角、转速和组合抄板平面滑板角 3 个影响因素各取 2 个水平，因素水平见表 3，仿真结果如图 7 所示。



(a)平面滑板角为30°　(b)平面滑板角为70°

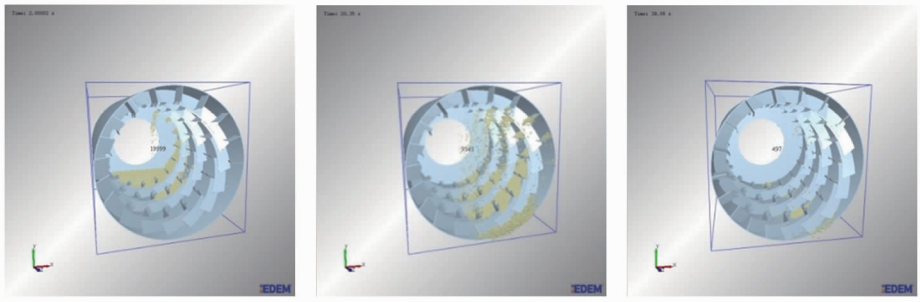
图 6　两种抄板角度的中筒仿真模型

Fig. 6　Simulation model of middle drum with two kinds of flight angle

表 3　因素水平表

Tab. 3　Factors and levels

水平	因素		
	转筒转速 A/($r \cdot min^{-1}$)	转筒倾角 B/(°)	组合抄板平面滑板角 C/(°)
1	6	2	70
2	10	6	30



(a) 仿真开始　(b) 仿真时间中点　(c) 仿真结束

图 7　仿真结果

Fig. 7　Result of simulation

2.3　仿真结果及分析

以七因素两水平($L_8(2^7)$)正交试验表安排试验，结果见表 4，方差分析结果见表 5。

由极差分析结果可知，影响停留时间因素的主次顺序为 C、B、A。以停留时间为评价指标时，在显著性水平为 0.05 的条件下，转筒倾角和组合抄板平面滑板角影响显著。

针对这两个显著性影响因素，分别进行单因素

表 4　正交试验结果

Tab. 4　Results of orthogonal experiments

试验号	列号							停留时间/min
	A	B	$A \times B$	C	$A \times C$	$B \times C$	空列	
1	1	1	1	1	1	1	1	82.30
2	1	1	1	2	2	2	2	54.80
3	1	2	2	1	1	2	2	181.40
4	1	2	2	2	2	1	1	74.40
5	2	1	2	1	2	1	2	67.00
6	2	1	2	2	1	2	1	39.05
7	2	2	1	1	2	2	1	133.45
8	2	2	1	2	1	1	2	63.05
T_1	392.9	243.15	333.6	464.15	365.8	286.75	329.2	
T_2	302.55	452.3	361.85	231.3	329.65	408.7	366.25	
极差	90.35	209.15	28.25	232.85	36.15	121.95	37.05	

表 5 方差分析结果

Tab. 5 Results of variance analysis

来源	平方和	自由度	均方和	F	显著性
A	1 020. 39	1	1 020. 39	7. 042 056	*
B	5 467. 965	1	5 467. 965	37. 736 27	**
$A \times B$	99. 757 81	1	99. 757 81	0. 688 462	
C	6 777. 39	1	6 777. 39	46. 773 05	**
$A \times C$	163. 352 8	1	163. 352 8	1. 127 353	
$B \times C$	1 858. 975	1	1 858. 975	12. 829 41	**
e	171. 587 8	1	171. 587 8		
修正误差	434. 698 4	3	144. 899 5	$F_{0.2}(1,3)=2.7$, $F_{0.1}(1,3)=5.54$ $F_{0.05}(1,3)=10.13$, $F_{0.01}(1,3)=34.12$	
和	15 559. 42	7	2 222. 774		

注：**为置信度大于 95%，说明显著；* 为置信度处于 80% ~90% 区间，说明有一定影响。

仿真试验。控制转筒转速为 6 r/min，转筒倾角和组合抄板平面滑板角各取 5 个水平，分析单因素对物料在中筒停留时间影响的关系。

3 试验验证

为验证仿真结果，对转筒倾角和组合抄板平面滑板角两个显著性影响因素进行单因素试验验证。试验材料取自河北宣化沃丰农业科技有限责任公司生产的颗粒有机肥，该有机肥为沼渣、生牛粪和腐殖酸按一定比例配比的混合物，试验在河北固安金科源机电设备有限公司完成，试验装置如图 8 所示。

图 8 中筒试验装置

Fig. 8 Testing apparatus of middle drum

3.1 试验设计与结果分析

试验中，选取组合抄板平面滑板角为 70°，分配 5 个转筒倾角水平；选取转筒倾角 2°，分配 5 个组合抄板平面滑板角水平，分别进行单因素试验，每组试验重复 5 次。通过拟合方程分析停留时间与以上两因素的数学关系，试验选定中筒转速为 6 r/min，转筒长度为 2 m。试验结果见表 6。

根据试验结果分析，在组合抄板平面滑板角为 70°时，转筒倾角与停留时间的关系式为 $y = 41.296e^{0.229\,5x}$，呈指数关系，当转筒倾角增加，停留时间呈指数增长。

转筒倾角为 2°时，组合抄板平面滑板角与停留时间关系式为 $y = 0.019\,4x^2 - 1.077\,9x + 47.726$，呈二次多项式关系，当滑板倾角增大时停留时间呈平方增长。

表 6 试验验证结果

Tab. 6 Results of verification tests

转筒倾角/(°)	组合抄板平面滑板角/(°)	停留时间均值/min	标准差/min
2	70	66. 96	1. 82
3		80. 28	6. 97
4		102. 26	6. 22
5		131. 68	6. 52
6		164. 6	5. 86
2	70	66. 96	1. 82
	60	53. 20	3. 35
	50	42. 40	2. 59
	40	35. 00	3. 56
	30	33. 10	2. 03

3.2 仿真与试验结果比较

仿真结果与试验结果比较（如图 9 所示）可看出，仿真结果所得到的转筒倾角与停留时间的关系、组合抄板平面滑板角与停留时间的关系，与试验结果变化趋势及拟合度非常一致。这表明，仿真能够非常好地模拟实际试验过程，也证明了 Hertz - Mindlin 接触模型适用于本研究。

从图 9 中还能够看出，仿真分析与试验结果之间存在一定偏移。由于试验所用材料为干燥后的有机肥料颗粒其表面摩擦因数低，且试验的有机肥颗粒为圆柱体，而在仿真中采用了球形颗粒，同时物料的泊松比和剪切模量等力学特性参数参考了近似物料设置，与真实值可能存在差异。

在上述参数不变的情况下，实际应用中可对仿真模型进行一定数值偏移修正。通过对图 9 分析，将两组仿真结果所得到停留时间曲线向下偏移 20 s，仿真曲线与试验曲线拟合度很高（修正后结果如图 10 所示），可以很好地预测物料在筒体内实际的停留时间。

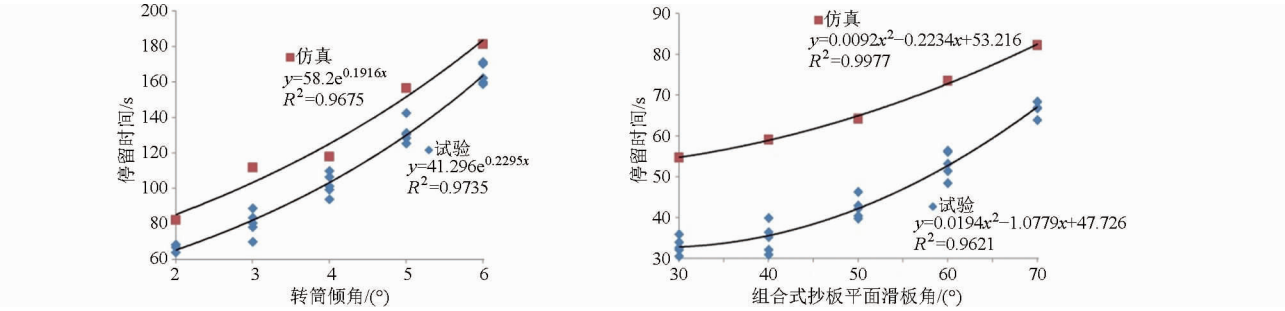


图 9　试验结果

Fig. 9　Result of testing

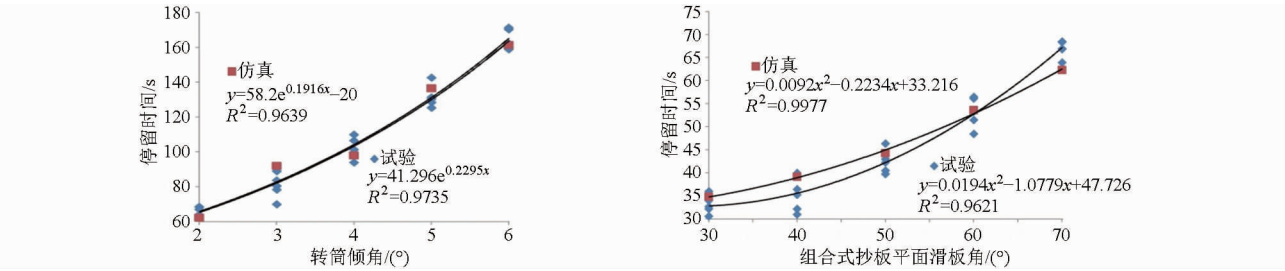


图 10　修正后结果对比图

Fig. 10　Comparison results before and after modification

经过仿真分析和试验验证，EDEM 建立的模型能够很好模拟物料在筒内的停留时间。实际设计中，通过物料衡算和能量衡算可以计算出物料在筒内的停留时间，依据时间参数和本研究构建的数学模型，可以得到组合抄板平面滑板角，实现优化设计。

3.3　抄板角度和阈值分析

试验过程中发现当转筒安装倾角大于 5°时，会有大量颗粒物料从进料端外流，这样在实际生产过程中会造成中筒进料端易堆积物料现象，加大该段抄板的工作负荷，影响抄板的使用寿命。试验过程中当组合抄板平面滑板角低于 40°时，停留时间明显缩短，但整个流动过程中抛洒效果差，不能形成稳定的物料帘，不利于物料与热空气进行热交换。根据公式(3)，颗粒在 X 方向上的位移与 v_1 成正比，故当平面滑板与水平线夹角过大时获得较大的速度 v_1；在运动相同时间内，颗粒物料在 X 方向上的位移增加，导致颗粒物料通过组合抄板的滑板加速后，直接被抛到下一块组合抄板的平面滑板上，而平面滑板没有抛洒物料的作用，此时虽然停留时间有效缩短，该角度一般还是不可取。

4　结论

(1)配有专用组合抄板的有机肥三回程转筒干燥设备，筒体倾斜安装时，依然可实现物料在中筒内的逆向爬坡上升，为质量大、密度高物料干燥提供了方法。

(2)建立了组合抄板平面滑板临界角度和该抄板作用下颗粒运动状态的数学模型，并根据模型，计算设计了组合抄板的结构；同时利用 EDEM 仿真分析得到在该抄板作用下，物料在转筒内停留时间的显著性影响因素为转筒倾角和组合抄板平面滑板角。

(3)根据仿真结果得到的停留时间与试验验证得到的停留时间数据，确定转筒倾角和组合抄板平面滑板角对停留时间的影响数学模型为：$y = 58.2e^{0.1916x} - 20$，$y = 0.0092x^2 - 0.2234x + 33.216$，该模型可为干燥设备参数设计提供依据，也验证了 EDEM 仿真分析在转筒干燥停留时间设计时的有效性。根据试验过程出现的现象，提出在设计过程中转筒倾角不应超过 5°、组合抄板平面滑板角不应小于 40°。

参　考　文　献

1　徐阳春，沈其荣. 有机肥和化肥长期配合施用对土壤及不同粒级供氮特性的影响[J]. 土壤学报，2004，41(1)：87－92.
XU Yangchun, SHEN Qirong. Influence of long-term combined application of manure and chemical fertilizer on supplying characteristics of nitrogen in soli and soil particle fractions[J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(1):87－92. (in Chinese)

2　李菊梅，徐明岗，秦道珠，等. 有机肥无机肥配施对稻田氨挥发和水稻产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2005，11(1)：51－56.
LI Jumei, XU Minggang, QIN Daozhu, et al. Effects of chemical fertilizers application combined with manure on ammonia

volatilization and rice yield in red paddy soil [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(1): 51 – 56. (in Chinese)
3 袁飞,彭宇,张春兰,等. 有机物料减轻设施连作黄瓜苗期病害的微生物效应[J]. 应用生态学报,2004,15(5):867 – 870.
YUAN Fei, PENG Yu, ZHANG Chunlan, et al. Effect of organic materials in controlling cucumber seedling diseases [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(5): 867 – 870. (in Chinese)
4 隋文志,刘文志,赵晓锋,等. 生物有机肥烘干温度与有效活菌数关系研究[J]. 生物技术,2010,20(4):82 – 83.
SUI Wenzhi, LIU Wenzhi, ZHAO Xiaofeng, et al. Connection of drying temperature and number of effective strains alive of bio-organic fertilizer[J]. Biotechnology, 2010, 20(4): 82 – 83. (in Chinese)
5 鲁聪达,秦苗,朱永强,等. 有机废物快速烘干设备研究[J]. 浙江工业大学学报,2004,32(1):57 – 59.
LU Congda, QIN Miao, ZHU Yongqiang, et al. Research of quick drying equipment for organic wastes[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2004, 32(1): 57 – 59. (in Chinese)
6 GUI N, YAN J, XU W, et al. DEM simulation and analysis of particle mixing and heat conduction in a rotating drum[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 97: 225 – 234.
7 LIU P Y, YANG R Y, YU A B. DEM study of the transverse mixing of wet particles in rotating drums[J]. Chemical Engineering Science, 2013, 86: 99 – 107.
8 HOBBS A. Simulation of an aggregate dryer using coupled CFD and DEM methods[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2009, 23(2): 199 – 207.
9 ARRUDA E B, FAÇANHA J M F, PIRES L N, et al. Conventional and modified rotary dryer: comparison of performance in fertilizer drying[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2009, 48(9): 1414 – 1418.
10 SILVÉRIO B C, ARRUDA E B, DUARTE C R, et al. A novel rotary dryer for drying fertilizer: comparison of performance with conventional configurations[J]. Powder Technology, 2015, 270: 135 – 140.
11 高扬. 生物质干燥设备设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2013.
12 杨世昆,苏正范. 饲草生产机械与设备[M]. 北京:中国农业出版社,2009.
13 HAMAWAND I, YUSAF T. Particles motion in a cascading rotary drum dryer[J]. The Canadian Journal of Chemical Engineering, 2014, 92(4): 648 – 662.
14 史嵩,张东兴,杨丽,等. 基于 EDEM 软件的气压组合孔式排种器充种性能模拟与验证[J]. 农业工程学报,2015,31(3):62 – 69.
SHI Song, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Simulation and verification of seed-filling performance of pneumatic-combined holes maize precision seed-metering device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 62 – 69. (in Chinese)
15 BAKER C J G. Industrial drying of foods[M]. New York: Chapman & Hall, 1997: 194 – 209.
16 黄志刚. 转筒干燥器中颗粒物料流动和传热传质过程的研究[D]. 北京:中国农业大学,2004.
17 SHEEHAN M E, BRITTON P F, SCHNEIDER P A. A model for solids transport in flighted rotary dryers based on physical considerations[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(15): 4171 – 4182.
18 AJAYI O O, SHEEHAN M E. Application of image analysis to determine design loading in flighted rotary dryers[J]. Powder Technology, 2012, 223: 123 – 130.
19 LEE A, SHEEHAN M E. Development of a geometric flight unloading model for flighted rotary dryers[J]. Powder Technology, 2010, 198(3): 395 – 403.
20 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等. 基于 EDEM 的离心式排种器排种性能数值模拟[J]. 农业机械学报,2014,45(2):109 – 114.
LIAO Qingxi, ZHANG Pengling, LIAO Yitao, et al. Numerical simulation on seeding performance of centrifugal rape-seed metering device based on EDEM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 109 – 114. (in Chinese)
21 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. 农业工程学报,2011,27(5):117 – 121.
LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 117 – 121. (in Chinese)
22 VAN LIEDEKERKE P, TIJSKENS E, DINTWA E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader [J]. Powder Technology, 2009, 190(3): 348 – 360.
23 胡建平,郭坤,周春健,等. 磁吸滚筒式排种器种箱振动供种仿真与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(8):61 – 65.
HU Jianping, GUO Kun, ZHOU Chunjian, et al. Experiment of supplying seeds in box of magnetic precision cylinder-seeder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 61 – 65. (in Chinese)
24 YOSHIYUKI S, CUNDALL P A. Three dimensional DEM simulation of bulk handling by screw conveyors [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(9): 864 – 872.
25 陈进,周韩,赵湛,等. 基于 EDEM 的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J]. 农业机械学报,2011,42(10):79 – 83,100.
CHEN Jin, ZHOU Han, ZHAO Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79 – 83, 100. (in Chinese)
26 孙其诚. 颗粒物质力学导论[M]. 北京:科学出版社, 2009.