

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.015

番茄秸秆与发酵菌种立式螺旋混合设备参数优化

李萍萍^{1,2} 吴 硕¹ 张西良³ 王纪章¹ 徐云峰¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 南京 210037;
3. 江苏大学机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 针对番茄秸秆基质化造肥处理过程中秸秆碎料与发酵菌种难以混合问题, 提出立式螺旋混合搅拌装置。通过对物料的动力学分析、立式螺旋混合的离散元仿真分析和试验表明, 混合 3 min 以后, 混合变异系数小于 10%, 平均功耗小于 0.078 1 kW, 验证了对秸秆基质化处理的可行性; 随搅拌叶片螺距增加, 混合变异系数得到降低, 功耗呈先增大后减小的趋势; 随搅拌叶片转速的增加, 混合变异系数同样得到降低, 功耗呈大幅度提高的趋势; 随填料高度的增加, 混合变异系数和功耗呈增加趋势; 影响混合变异系数的主次顺序依次为螺距、转速和填料高度。构建了混合变异系数与结构和工作参数的数学模型, 并进行优化, 得到当填料高度 440 mm、转速 30 r/min、螺距 400 mm 时, 物料混合变异系数最优为 4.3%; 将离散元仿真功耗与试验值进行对比, 误差均值为 13.5%, 验证了仿真结果的正确性。

关键词: 番茄秸秆; 发酵菌种; 基质化; 混合搅拌装置; 参数优化

中图分类号: S224.2; S147.1+2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)11-0114-07

Parameter Optimization of Vertical Screw Mixing for Tomato Straw and Fermentation Strains

Li Pingping^{1,2} Wu Shuo¹ Zhang Xiliang³ Wang Jizhang¹ Xu Yunfeng¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Straw debris and fermentation strains are difficult to mix together in the fertilizer manufacturing process of tomato stalks. In order to solve the problem, a vertical screw mixer was put forward and the kinetics analysis of stuffing material was carried out, and the mixing process in the mixer was analyzed numerically by DEM simulation and measurement. The results showed that the variation coefficient of mixing was less than 10% and the average power consumption was less than 0.078 1 kW after stirring for 3 min, confirming the feasibility of the mixer in fertilizer manufacturing process of tomato stalks. The variation coefficient of mixing was decreased with the increase of pitch of blade, but the power consumption achieved the maximum at a medium pitch. With the increase of rotational speed, the variation coefficient of mixing was decreased as well, but the power consumption was increased substantially. With the increase of stuffing material height, variation coefficient of mixing and the power consumption were increased. The rank order for the effect on the variation coefficient of mixing from the most important to the least important was pitch of blade, rotational speed and stuffing material height.

收稿日期: 2016-04-15 修回日期: 2016-06-02

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD08B04)、国家公益性行业(农业)科研专项(201203095)、国家自然科学基金项目(51475212)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX12-0625)

作者简介: 李萍萍(1956—),女,教授,博士生导师,主要从事农业工程技术研究,E-mail: lipingping@ujs.edu.cn

通信作者: 张西良(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事高效节能机械设计与农业信息检测仪器研究,E-mail: 190337373@qq.com

A mathematical model of variation coefficient of mixing with mixer geometrical variables and work parameters was built and optimized. The optimum variation coefficient for mixing was 4.3% when stuffing material height was 440 mm, rotational speed was 30 r/min and pitch of blade was 400 mm. The simulated results were compared with the tested data, showing a 13.5% error between simulation and observation. This suggested that the simulated results were correct and revealed efficient mixing mechanism of the mixer. The study provides a theoretical basis for research and development of efficient and specific equipment in tomato straw and fermentation strains mixing.

Key words: tomato straw; fermentation strains; substrate; mixed stirring device; parameter optimization

引言

随着我国设施园艺快速发展,产生大量的园艺秸秆与残茬,造成环境污染,加重病虫害的发生^[1]。研究发现秸秆就近粉碎、混合、发酵基质化造肥处理是园艺秸秆低成本资源化处理的一种有效方法。此方法需要解决的关键问题之一,是如何实现秸秆碎料与发酵菌种的高效混合。目前国内外的物料混合设备按其结构型式分为立式螺旋式、拨轮式、螺旋卧式、链桨式和转筒式等 5 种基本型搅拌机^[2-4]。其中立式螺旋带式混合设备具有设备简单,占地面积小,使用与维护方便,混合方式多样高效等特点,是适合秸秆碎料与发酵菌种混合的主要结构类型。NIEDZIELSKA 等^[5]、饶应昌^[6]、姚维祯^[7]、冯静安等^[8]分别从热传递、功耗和机械结构等方面对立式螺旋混合方法进行研究,为其设备的研发提供理论依据,但现有的理论研究都将物料群当作连续介质进行宏观力学行为分析,忽略了其离散性的特征。

离散元法可以直接分析离散性物料,近些年发展迅速^[9]。CUNDALLB 等^[10]、KAFUI 等^[11]采用前人对球体弹塑性接触力学中的法一切向作用理论,发展了 Cundall 的颗粒接触模型与算法;OWEN 等^[12]、KANEKO 等^[13]、周德义等^[14]、俞良群等^[15]、李海燕^[16]分别将离散元法成功应用于农业工程或混合设备领域,得到了试验难以测量的数据,弥补了传统理论研究的不足。

物料混合的过程极其复杂,不同的物料特性对混合效果都有很大的影响。本文针对番茄秸秆碎料与发酵菌种搅拌混合问题,提出立式螺旋混合方法,在对其混合机理进行理论定性分析和物料的动力学分析的基础上,进一步开展基于离散元法的模拟仿真研究和样机试验研究,掌握结构和工作参数对混合性能影响,揭示立式螺旋高效混合机理,为研发园艺秸秆碎料与发酵菌种的高效搅拌混合专用装置提供理论依据。

1 立式螺旋混合方法及动力学分析

1.1 立式螺旋混合设备结构模型及混合方式

如图 1,立式螺旋混合设备结构主要由物料桶与一个垂直的内外双螺旋搅拌叶片组成;其外螺旋带叶片略小于物料桶直径,搅拌叶片顺时针转动时,径向外部区域的物料被外螺旋带叶片从底部推至顶部,径向内部区域的物料被内螺旋带叶片从顶部推至底部,形成桶内整体范围内的对流混合;当转速达到某个定值后,物料之间的作用力无法支持其离心力,会产生径向的扩散混合;在螺距之间区域,伴随着物料不停的翻滚,有湍流现象产生,发生剪切混合。

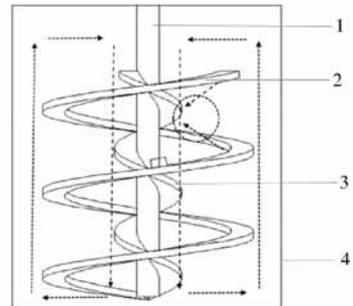


图 1 立式螺旋结构及混合过程示意图

Fig. 1 Structure of vertical mixer and schematic of mixing process

1. 驱动轴 2. 外螺旋带叶片 3. 内螺旋带叶片 4. 物料桶

1.2 立式螺旋混合物料动力学分析

如图 2、3 所示,假设位于螺旋搅拌叶片任意位置 A 处有质量为 m 的物料颗粒,搅拌叶片半径为 r ,螺距为 S ,螺旋升角为 α ,角速度为 ω 。在 Δt 时间后,螺旋搅拌叶片边缘从 BC 移动到 B_1C_1 ,由于物料之间摩擦力的影响,物料以 $\omega_m r$ 的圆周速度运动 ($\omega_m < \omega$),物料沿水平方向移动 $l_{AA'}$ 距离, $l_{AA'} = \omega_m r \Delta t$,物料沿螺旋搅拌叶片做相对运动的距离 $l_{A_1A_2}$,物料绝对运动距离 $l_{A_1A_2} = v_A \Delta t$ (v_A 为绝对速度)。易得物料运动学方程为

$$\tan \gamma = \frac{l_{A_1A_2}}{l_{AA'}} = \frac{v_V}{\omega r - \frac{v_V}{\tan \alpha}} \quad (1)$$

式中 v_V ——轴向速度
 $l_{A'A_2}$ —— A' 到 A_2 的距离

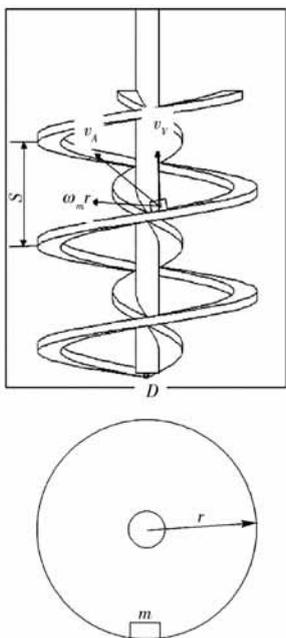


图 2 立式螺旋搅拌叶片示意图

Fig.2 Schematic of vertical screw mixing blade

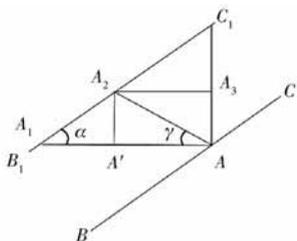


图 3 物料运动分析

Fig.3 Analysis of material movement

如图 4 所示,物料受到叶片支撑反力为 R , 叶片对物料的摩擦力为 F , 物料与叶片的摩擦因数为 μ_s , 物料间的摩擦因数为 μ_f , 叶片上点沿方向的圆弧半径 ρ 。易得物料力学方程为

$$\frac{1}{\cos\gamma} = \sqrt{1 + \tan^2\gamma} = \sqrt{1 + \left(\frac{v_V}{\omega r - \frac{v_V}{\tan\alpha}}\right)^2} \quad (2)$$

联立式(1)、(2)可得物料轴向速度与转速之间

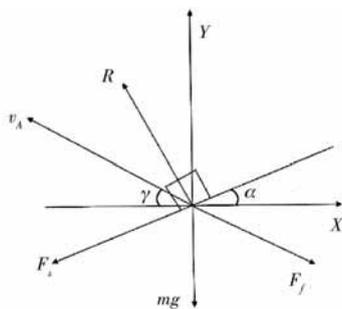


图 4 物料受力分析

Fig.4 Force analysis of material

的关系为

$$\mu_f r \left(\omega - \frac{2\pi v_V}{S} \right)^2 \left[\frac{1}{\tan(\varphi_s + \alpha)} - \frac{v_V}{\omega r - \frac{v_V}{\tan\alpha}} \right] = g \sqrt{1 + \left(\frac{v_V}{\omega r - \frac{v_V}{\tan\alpha}} \right)^2} \quad (3)$$

式中 φ_s ——物料与搅拌叶片的摩擦角

1.3 立式螺旋搅拌混合主要性能及影响因素分析

立式螺旋混合的性能主要有混合变异系数与功耗 2 个指标,物料的运动过程直接影响混合性能,根据式(3)对物料的混合方式与动力学分析发现,搅拌叶片半径、螺距、转速对物料的轴向运动和径向运动为非线性影响;同时依据马青山等^[17]提出的粉体搅拌功率计算公式得出填料高度 H 、叶片宽度 w 、转速 N 对功率有线性递增影响。

2 立式螺旋混合性能仿真分析

2.1 仿真建模及参数设置

本试验混合时先用少量番茄秸秆碎料对发酵菌种进行稀释,发酵菌种粘附在番茄秸秆碎料上,然后将该番茄秸秆碎料放入物料桶与需要发酵的番茄秸秆碎料进行混合,所以物料由粘附有发酵菌种的番茄秸秆碎料与待发酵的番茄秸秆碎料组成;因菌种的粉状特性且数量极少,故粘有发酵菌种的番茄秸秆碎料与待发酵的番茄秸秆碎料的物料特性差异不明显。

如图 5 和图 6 所示,粘有发酵菌种的番茄秸秆碎料与待发酵的番茄秸秆碎料的颗粒模型都由 5 个球形颗粒沿轴线叠加而成,半径分别为 1.15 mm,总长度为 6.9 mm;几何模型由 CAD 文件创建,导入 EDEM 软件中,保留了立式螺旋混合设备的核心结构,颗粒工厂的位置位于桶的上方;切向力、法向力采用默认 Hertz - Mindlin (no slip) 模型,考虑颗粒间的水分粘合作用,添加 Linear Cohesion 粘结模型,其粘性系数为 2 000;其他参数的测量结果见表 1。



图 5 颗粒模型

Fig.5 Particle model

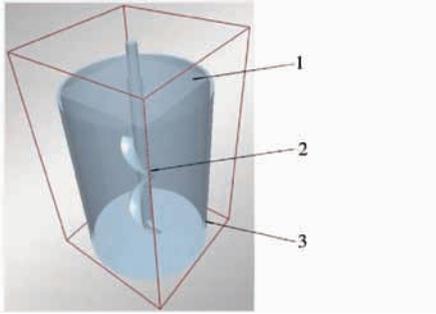


图 6 几何模型

Fig. 6 Geometrical model

1. 颗粒工厂 2. 搅拌叶片 3. 搅拌桶

表 1 参数设置

Tab. 1 Parameters setting

参数	数值
番茄秸秆碎料密度/($g \cdot cm^{-3}$)	0.453 72
弹性模量/MPa	235.2
剪切模量/MPa	5.38
颗粒之间的静摩擦因数	1.17
颗粒与钢板之间的静摩擦因数	0.97
颗粒之间的恢复系数	0.202 9
颗粒与钢板之间的恢复系数	0.193 5
颗粒之间的滚动摩擦因数	0.98
颗粒与钢板之间的滚动摩擦因数	0.85
物料桶高度/mm	600
物料桶直径/mm	400

2.2 仿真分析内容及步骤

2.2.1 仿真搅拌均匀度的统计方法

如图 7 所示,利用 EDEM 软件的后处理功能,对粘有发酵菌种的番茄秸秆碎料与待发酵的番茄秸秆碎料进行不同颜色的标记,将混合区域划分为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的三维网格,通过数据导出工具 Export Results Data,统计每个网格里粘有发酵菌种的番茄秸秆碎料颗粒的个数,剔除网格里颗粒数目小于 30 的网格(网格里颗粒太少说明网格在物料桶的上方或是外边缘),计算其变异系数 R_{CV} ,其计算公式为

$$R_{CV} = \frac{S_d}{M_n} \times 100\% \quad (4)$$

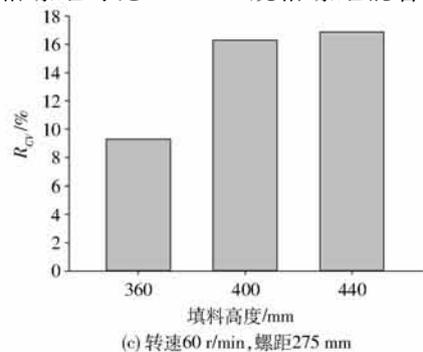
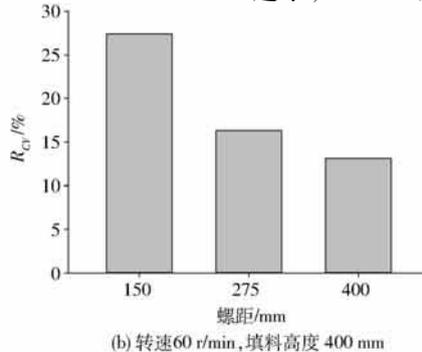
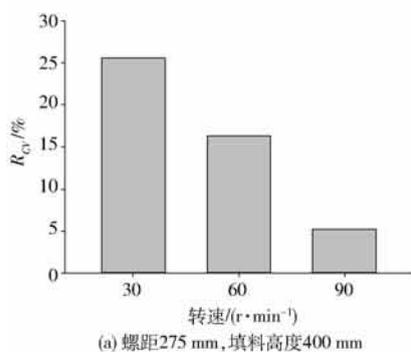


图 8 单因素对混合变异系数的影响

Fig. 8 Effect of single factor on variation coefficient of mixing

式中 S_d ——划分网格内粘有发酵菌种的番茄秸秆碎料颗粒个数的标准差

M_n ——划分网格内粘有发酵菌种的番茄秸秆碎料颗粒个数的平均值

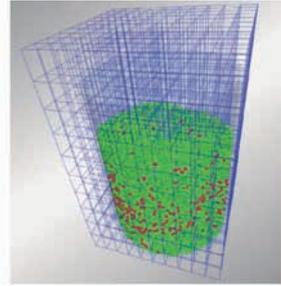


图 7 区域划分

Fig. 7 Domain partition

2.2.2 仿真搅拌功耗的统计方法

通过 EDEM 软件的数据导出工具 Export Results Data,导出仿真过程中搅拌叶片的扭矩,计算平均值 T 。根据转速 N ,计算平均功耗(kW),其计算公式为

$$P = \frac{NT}{9\ 549} \quad (5)$$

2.2.3 单因素试验安排

试验方案 1:采用螺距 275 mm 规格搅拌叶片,填料高度 400 mm,分别采用顺时针 30、60、90 r/min 转速进行混合试验,仿真时间为 12 s。

试验方案 2:填料高度 400 mm,搅拌叶片顺时针转速 60 r/min,分别采用螺距 150、275、400 mm 规格搅拌叶片进行混合试验,仿真时间为 12 s。

试验方案 3:采用螺距 275 mm 规格搅拌叶片,搅拌叶片顺时针转速 60 r/min,分别采用填料高度 360、400、440 mm 进行混合试验,仿真时间为 12 s。

2.3 仿真结果分析

2.3.1 单因素对混合变异系数的影响

如图 8 所示,搅拌叶片转速提高,相同时间内物料完成对流混合的循环次数越多,混合效果越好;搅拌叶片螺距增加,物料运动轴向速度越大,变异系数越小,275 mm 规格螺距对比 150 mm 规格螺距混合

效果有显著提高,而275 mm规格螺距与400 mm规格螺距混合效果差异不明显;填充高度增加,意味着所需混合物料增加,混合效果降低,360 mm与440 mm填充高度的混合变异系数差异明显,原因在于物料填充高度为360 mm时,低于搅拌叶片总高度400 mm,底部物料被推送至顶部时,增加了抛洒过程;但由于整体仿真时间限制,搅拌未充分,导致整体变异系数偏大。

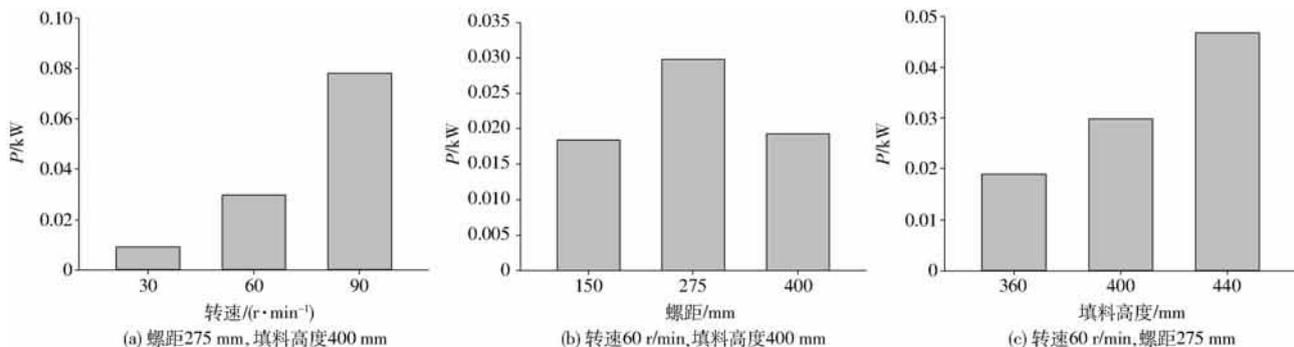


图9 单因素对功耗的影响

Fig. 9 Effect of single factor on power consumption

3 立式螺旋混合性能试验分析

3.1 立式螺旋混合试验装置

如图10所示,其动力装置采用750 W步进电动机与行星减速器的组合,行星减速器减速比为5:1;步进电动机可对转速进行精准控制,而行星减速器可以提供更大的扭矩;其升降装置由支架、手轮、丝杆、升降导轨和固定座等组成,通过手轮控制固定座沿升降导轨上升或下降,实现取料、加料和搅拌叶片的更换,其调节范围为0~600 mm;动力传动通过搅拌叶片与驱动轴法兰盘连接,法兰盘上端与驱动轴通过平键连接,通过螺母紧固连接,法兰盘下端与搅拌叶片轴端通过打孔形成螺钉连接。

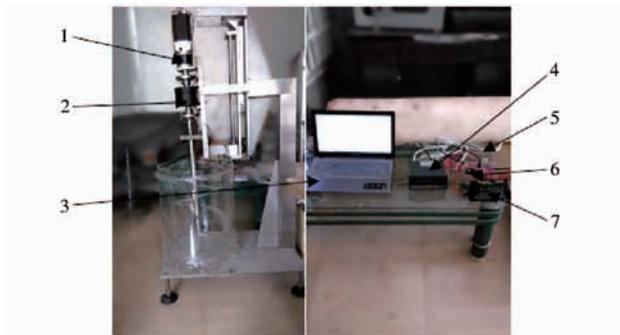


图10 立式螺旋混合试验样机

Fig. 10 Prototype of vertical screw mixer

1. 动力装置 2. PK型光耦扭矩传感器 3. 计算机 4. 数据采集装置 5. 24 V开关电源 6. 三菱PLC控制器 7. 电动机驱动器

如图11所示,其测控系统硬件主要由电动机控制系统、数据采集系统和上位机等组成;电动机控制系统由步进电动机、驱动器和三菱FX系列PLC控

2.3.2 单因素对功耗的影响

如图9所示,转速提高时,混合装置功耗大幅度提高,90 r/min时混合装置平均功耗为0.078 1 kW,30 r/min时混合装置平均功耗为0.009 1 kW;螺距变化过程中,平均功耗呈现先上升后降低的趋势,螺距275 mm时混合装置最大平均功耗为0.029 8 kW;填充高度提高,平均功耗呈现缓慢增大趋势。

制器组成。数据采集系统包括PK型光耦扭矩传感器、F/V转换模块和NI数据采集卡6008等,数据采集卡读取通过F/V模块的转矩信号,实现转矩的实时采集。上位机通过PLC控制器实时改变转速,也可以实时显示和保存数据。

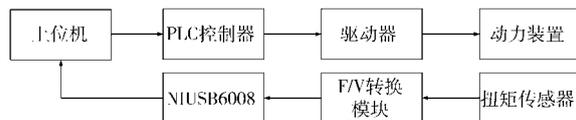


图11 测控系统

Fig. 11 Measurement and control system

3.2 试验安排

3.2.1 试验材料

试验材料采用江苏省镇江市丹徒区合作社的成熟期番茄藤,收获后自然阴干15 d,在江苏大学自主研制的粉碎机上粉碎成碎料。试验采用MJ33型水分测试仪测得秸秆碎料含水率在30%~60%范围内,另外准备少量小麦颗粒。

3.2.2 试验内容及方案

3.2.2.1 物料混合均匀度的测定

试验针对番茄秸秆碎料与发酵菌种,为了方便统计发酵菌种的分布情况,以小麦颗粒代替发酵菌种作为示踪颗粒;取样点如图12所示,轴向分2个区域(5、6),横截面分为4个区域(1、2、3、4)。试验中,在规定时间内,分别在8个取样点取出物料样品,统计物料样品中示踪粒子的变异系数。

3.2.2.2 回归正交试验

根据上文中的仿真分析结果,本回归正交试验的因素设定为搅拌叶片转速、填充高度和螺距,混合

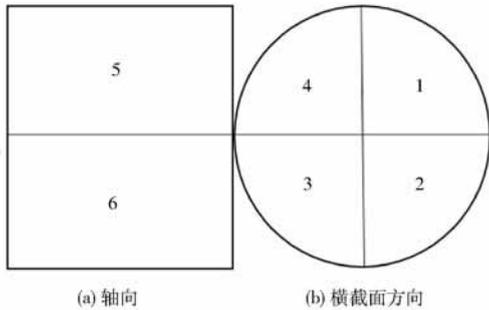


图 12 取样区域划分示意图

Fig. 12 Schematics of sampling zones

时间为 3 min, 其试验方案及结果如表 2 所示, 其中 X_1 代表填料高度, X_2 代表转速, X_3 代表螺距, 编码值 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 水平都为 -1、0、1, 变异系数 R_{CV} 越小, 搅拌均匀度越好; 不同规格螺距搅拌叶片如图 13 所示, 搅拌叶片的其他尺寸: 内螺旋带直径为 120 mm, 外螺旋带直径为 380 mm, 叶片宽度为 40 mm, 高度为 400 mm。

表 2 回归正交试验设计及结果

Tab. 2 Orthogonal experiment design and results

试验序号	X_1/mm	$X_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	X_3/mm	$R_{CV}/\%$
1	440	90	400	7.8
2	440	90	150	16.3
3	360	90	400	6.8
4	360	90	150	6.5
5	440	30	400	11.4
6	440	30	150	17.5
7	360	30	400	10.3
8	360	30	150	15.1
9	400	60	275	9.2
10	400	60	275	8.5
11	400	60	275	7.5



图 13 不同规格螺距搅拌叶片

Fig. 13 Mixing blade with different leads

3.3 试验结果分析

3.3.1 线性回归分析

根据表 2 中的试验结果, 依据一次回归方程系数公式, 计算方程各回归系数, 得 $a = 10.63$, $b_1 = -2.1125$, $b_2 = 1.7875$, $b_3 = -2.3375$, 故混合变异系数与各因素存在如下关系

$$y = 10.63 - 2.1125Z_1 + 1.7875Z_2 - 2.3375Z_3 \quad (6)$$

根据回归方程的偏回归系数可知, 各因素对混

合变异系数影响的主次顺序为: 螺距、转速、填料高度; 根据方差分析结果进行回归方程的显著性检验, 结果见表 3, 检验结果表明: 搅拌叶片的螺距、转速以及填料的高度对物料搅拌变异系数都有显著的影响, 所建立的线性方程是显著的。

表 3 方差分析

Tab. 3 Variance analysis

差异源	SS	df	MS	F	显著性
Z_1	35.701	1	35.701	4.884	*
Z_2	25.561	1	25.561	3.497	*
Z_3	43.711	1	43.711	5.980	*
回归	104.974	3	34.991	4.787	*
残差	51.169	7	7.310		
总和	266.116	10			

3.3.2 回归方程优化求解

为了获得最优的立式螺旋混合方式的结构与工作参数组合, 根据式(6)构建了混合变异系数与结构和工作参数的数学模型, 列出目标函数与约束条件

$$y = 33.32 - 0.0528X_1 + 0.0596X_2 - 0.0187X_3$$

$$360 \text{ mm} \leq X_1 \leq 440 \text{ mm}$$

$$30 \text{ r/min} \leq X_2 \leq 90 \text{ r/min}$$

$$150 \text{ mm} \leq X_3 \leq 400 \text{ mm}$$

通过 MathCAD 软件的求解与优化功能, 对目标函数进行优化求解

$$X = \min f(X_1, X_2, X_3) = \begin{bmatrix} 440 \\ 30 \\ 400 \end{bmatrix}$$

最优化结果为填料高度 440 mm、转速 30 r/min、螺距 400 mm 时, 物料混合变异系数最优结果为 4.3%。

3.3.3 试验结果与仿真对比

如表 4 所示, 由于实际试验中番茄秸秆碎料中有少量类似于土壤杂质的影响, 离散元仿真功耗与试验值最大误差为 20%, 误差均值为 13.5%, 并且仿真功耗略小于试验实际功耗, 基本符合试验值。

表 4 仿真功耗与试验值对比

Tab. 4 Comparison of simulated and tested power consumption

试验号	功耗仿真值/kW	功耗试验值/kW	误差/%
1	0.0091	0.0114	20.20
2	0.0298	0.0351	15.10
3	0.0781	0.0868	10.00
4	0.0184	0.0212	13.21
5	0.0193	0.0233	17.17
6	0.0189	0.0206	8.25
7	0.0468	0.0524	10.68

4 结论

(1)立式螺旋混合设备核心结构由物料桶与一个垂直的内外双螺旋搅拌叶片组成,其混合方式是由对流、扩散和剪切同时完成,对混合性能影响主要因素有填料高度、转速、叶片半径和螺距等。

(2)通过 EDEM 软件仿真试验分析得到:随叶片螺距增加混合变异系数得到降低,功耗呈先增大后减小的趋势;随搅拌叶片转速的增加,混合变异系数同样能降低,功耗呈大幅度提高的趋势;随填料高度的增加,混合变异系数和功耗呈增加趋势。

(3)搭建立式螺旋混合试验装置进行物料的多因素回归正交试验,结果表明:混合变异系数与搅拌叶片螺距和转速存在一次线性递增关系,与填料高度存在一次线性递减关系,影响的主次顺序依次为螺距、转速、填料高度;构建了混合变异系数与结构和工作参数的数学模型,通过 MathCAD 软件的求解与优化,得到当填料高度为 440 mm、转速为 30 r/min、螺距为 400 mm 时,最优物料混合变异系数为 4.3%;将离散元仿真功耗与试验值进行对比,误差均值为 13.5%,基本符合试验值,验证了仿真的可行性。

参 考 文 献

- 张金凤.农产品质量安全的田间考察—基于济南市一蔬菜大棚种植基地的实证分析[D].苏州:苏州大学,2008.
ZHANG Jinfeng. Field study on quality safety of agricultural products-based on positive analysis of a plastic sheeting of vegetables base in Jinan[D]. Suzhou: Suzhou University, 2008. (in Chinese)
- 孙瑜.双层高效混合机的数值模拟及结构优化[D].南京:南京理工大学,2009:2-9.
- 邓春香.近十年饲料混合机的发展概况[J].湖南饲料,2001,3(3):22-23.
- KAMMEL D W. Design, selection and use of TMR mixers[C]//Proceedings of Tri-State Dairy Nutrition Conference, 1998: 21-22.
- NIEDZIELSKA A, KUNCEWICZ C Z. Heat transfer and power consumption for ribbon impellers mixing efficiency[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(8-9):2439-2448.
- 饶宜昌.混合机的混合原理与计算[J].饲料工业,1983(2):25-29.
- 姚维祯.垂直搅龙的临界转速和最佳参数[J].饲料工业,1984(4):4-10.
- 冯静安,张宏文,梅卫江.基于 SolidWorks 的锥形螺旋叶片展开图的绘制[J].安徽农学通报,2009,15(2):131-132.
- 徐泳,孙其诚,张凌,等.颗粒离散元法研究进展[J].力学进展,2003,33(2):251-260.
XU Yong, SUN Qicheng, ZHANG Ling, et al. Advances in discrete element methods for particulate materials[J]. Advances in Meachanics, 2003, 33(2):251-260. (in Chinese)
- CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems[C]//Proceedings of the International Society for Rock Mechanics(ISRM), 1971:129-136.
- KAFUI K D, THORNTON C. Numerical simulations of impact breakage of a spherical crystalline agglomerate[J]. Powder Technology, 2000, 109(1):113-132.
- OWEN P J, CLEARY P W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM) [J]. Powder Technology, 2009, 193(3):274-288.
- KANEKO Y, SHIOJIMA T, HORIO M. Numerical analysis of particle mixing characteristics in a single helical ribbon agitator using DEM simulation[J]. Powder Technology, 2000, 108(1):55-64.
- 周德义,马成林,左春桢,等.散粒农业物料孔口出流成拱的离散单元仿真[J].农业工程学报,1996,12(2):186-189.
ZHOU Deyi, MA Chenglin, ZUO Chuncheng, et al. Discrete element simulation for arch flowing of agricultural particle material in outlet [J]. Transactions of the CSAE, 1996, 12(2):186-189. (in Chinese)
- 俞良群,邢纪波.筒仓装卸料时力场及流场的离散单元法模拟[J].农业工程学报,2000,16(4):15-19.
YU Liangqun, XING Jibo. Discrete element method simulation of forces during filling and discharging materials in silos [J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(4):15-19. (in Chinese)
- 李海燕.基于 EDEM 的垂直螺旋输送机性能参数仿真研究 [D].太原:太原科技大学,2011.
- 马青山,冯连芳,顾雪萍,等.卧式单轴粉体搅拌反应器搅拌功率研究[J].高校化学工程学报,1999,13(1):31-37.
MA Qingshan, FENG Lianfang, GU Xueping, et al. Power consumption for powder in horizontal agitated reactor[J]. Journal of Chemical Engineering, 1999, 13(1):31-37. (in Chinese)