

小型轴向多点进气式饲料制粒调质器设计与试验

彭 飞 康宏彬 王红英 沈 祥 杨 洁
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为实现颗粒饲料小批量生产,研究了饲料制粒机调质器工作原理和结构特点,设计了一种与小型制粒机配套的轴向多点进气式调质器。以桨叶安装角、调质轴转速、喂料转速为影响因素,调质器生产率和调质后物料温度为评价指标,按照三因素五水平正交旋转组合试验设计方法,对轴向多点进气式调质器进行了作业参数优化试验。利用 Design-Expert 8.0.6 软件回归分析法和响应面分析法,建立了3个因素对调质器作业评价指标的数学模型。试验结果表明,此3个因素对调质器生产率和物料温度都具有显著相关性,显著水平分别为 $P < 0.01$ 和 $P < 0.001$;通过响应面法对最佳参数组寻优,得到调质器最佳作业参数组合:桨叶安装角为 38.1° 、调质轴转速为 220.6 r/min 、喂料转速 17.4 r/min ,此方案下,调质器生产率为 12.7 g/s ,调质后物料温度为 65.0°C ,此时调质器生产率较高、物料温度在要求的加工工艺范围内。样机加工试验表明,生产率为 11.8 g/s ,调质后物料温度为 64.0°C 。

关键词: 小型饲料制粒机; 调质器; 轴向多点进气式; 设计; 试验

中图分类号: S220.1; TH6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)11-0121-07

Design and Experiment on Small-scale Axial Multi-point Gas Intake Conditioner for Pellet Mill

Peng Fei Kang Hongbin Wang Hongying Shen Xiang Yang Jie
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Pellet mill is one of main machines in the feed processing machinery, which occupies an important position in the feed granulation processing. In order to achieve the small quantities production need of pellet feed, the working principle and structural characteristics of the conditioner were investigated, and the main parameters of key components were determined with theoretical analysis. Accordingly, the small-scale axial multi-point gas intake conditioner was designed to be compatible with the small-scale pellet mill. The blade installation angle X_1 , speed of conditioner X_2 , and speed of feeder X_3 were selected as the influence factors, and the productivity of conditioner Y_1 , conditioned material temperature Y_2 were selected as evaluating indicators, thus the performance optimization experiments were carried out under the quadratic orthogonal rotation design. Based on the software regression analysis Design-Expert 8.0.6 and response surface analysis method, the relationship between the two influence factors and conditioning evaluating indicator was established. The results showed that X_1 , X_2 and X_3 were significantly correlated with Y_1 and Y_2 ($P < 0.01$ and $P < 0.001$, respectively). By using response surface method, the optimal aggregative index could be obtained under the condition that the blade installation angle was 38.1° , speed of conditioner spindle was 220.6 r/min , and speed of feeder was 17.4 r/min . Under this scheme, the productivity of conditioner was 12.7 g/s and the material temperature after conditioning was 65.0°C . In this case, the conditioner had the proper productivity and the conditioned material temperature was within the scope of the technical requirements. Therefore, this

收稿日期: 2016-04-19 修回日期: 2016-05-03
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201203015)
作者简介: 彭飞(1989—),男,博士生,主要从事饲料加工装备研究,E-mail: feipeng2012zhn@163.com
通信作者: 王红英(1966—),女,教授,博士生导师,主要从事饲料加工工艺与装备研究,E-mail: hongyingw@cau.edu.cn

conditioner has good practicability in the process of conditioning small quantities of feed raw materials; the research provides references for the design of small-scale conditioner and the parameters optimization of processing technology.

Key words: small-scale feed pellet mill; conditioner; axial multi-point gas intake; design; experiment

引言

随着我国畜牧养殖业的发展和颗粒饲料的广泛使用,制粒机已成为饲料生产机械的主机之一,其工作原理是将粉状饲料原料通过水、热调质,并经过机械压缩且强制通过模孔而聚合成型的过程。调质是制粒机作业过程中非常关键的环节,是影响颗粒饲料质量的重要因素^[1-2]。因此,调质器工作原理分析与创新设计,是制粒机高效率、低能耗工作的重要保证。

目前国内外调质器的设计和改进大多用于大批量生产,且蒸汽添加方式多采用沿调质器主轴的径向单点、多点添加或轴向单点添加^[3-4],对小型调质器的研究很少。小型调质器具有生产批量小、电能消耗少、操作方便等特点,在研究不同饲料原料、配方、加工工艺对饲料物理特性和营养价值的作用机理,特别是调质过程中维生素损失和酶制剂失活等添加剂变化规律方面,具有独特的优势。目前,国内对小型调质器的设计与研究刚刚起步,文献[5]提出了解决该问题的一个初步设想,但是不够深入。因此,本文研究设计一种与小型制粒机配套的、进气特征为轴向多点方式的小型调质器,以适合小批量和精细化饲料生产与研究。

1 总体结构与原理

如图 1 所示,小型制粒机主要由料斗、喂料器、调质器、制粒室、动力及传动机构和机架等组成^[6]。整机工作时,饲料原料由料斗经喂料器输送到调质

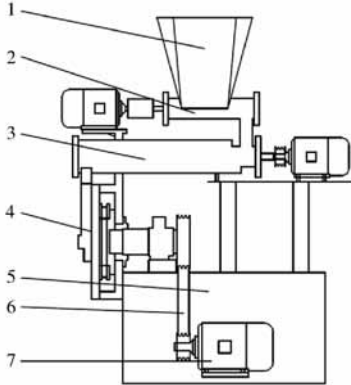


图 1 小型制粒机结构简图

Fig. 1 Structure diagram of small-scale pellet mill

1. 料斗 2. 喂料器 3. 调质器 4. 制粒室 5. 机架 6. 传动机构 7. 电动机

器内,在调质器内发生水热反应,调质后的物料进入到制粒室中,在环模和压辊的作用下挤压成型,进而完成整个制粒过程。

小型制粒机外形尺寸为 1 200 mm (长) × 750 mm (宽) × 1 400 mm (高),喂料器和调质器电动机功率均为 0.55 kW,制粒室电动机功率为 3 kW,各部件对应的电动机均由变频器控制、转速可调;配有孔径参数为 2.0、2.5、3.0 mm,压缩比为 1:6、1:8、1:10 等多种型号的环模,以适应不同原料和配方饲料的加工需要,设计产量为 40 ~ 50 kg/h。

2 轴向多点进气式调质器设计

2.1 轴向多点进气式调质器工作原理

调质器主要由进料单元和调质单元组成,具体包括:进料口、进料螺旋、蒸汽腔、蒸汽添加口、调质器外壁、主轴、桨叶、调质腔、出料口及联轴器等,如图 2 所示。蒸汽进口位于调质单元物料进入处,并与调质腔体连通。在调质器驱动电动机和变频器的带动下,进口螺旋叶片推动原料至调质腔内;蒸汽发生器产生蒸汽,经蒸汽腔、环形分布的蒸汽加工孔,进入到调质腔内;在调质腔内旋转扇形桨叶的搅拌作用下,饲料原料和蒸汽受到挤压、剪切、翻滚和抛出等强制混合作用,进而在剧烈的相对运动中均匀混合并产生水热反应,由出料口流出,完成调质过程。

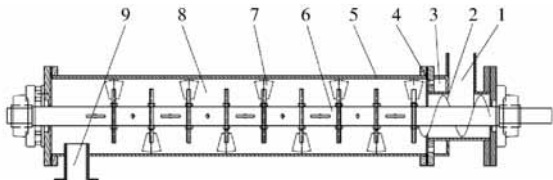


图 2 轴向多点进气式调质器结构简图

Fig. 2 Structure diagram of conditioner with axial multi-point gas intake

1. 进料口 2. 进料螺旋 3. 蒸汽腔 4. 蒸汽添加口 5. 调质器外壁 6. 调质器主轴 7. 桨叶 8. 调质腔 9. 出料口

2.2 桨叶设计和调整

为了减少调质腔内壁残余并使得搅拌效果更佳,设计桨叶为扇形,且其弧线的曲率半径和调质腔的内径相同;为便于调整扇形桨叶叶面与调质轴轴向的角度以及微调扇形桨叶与腔体内壁的间隙,将扇形叶片与螺纹杆焊接连接,该螺纹杆穿过调质器主轴,两侧由紧固螺母锁紧。桨叶安装角是指桨叶

表面与调质器轴线法向所夹的锐角,该设计可实现扇形桨叶安装角的调节范围为 $-90^{\circ} \sim 90^{\circ}$,扇形桨叶与腔体内壁间隙的调节范围为 $1 \sim 2 \text{ mm}$ 。

2.3 蒸汽进口设计

如图 3 所示,为保证蒸汽与调质腔内物料充分接触混合,蒸汽采用轴向多点均匀添加的方式,蒸汽添加孔呈环形均匀分布在调质器进料口处;物料由进料段的螺旋叶片推进,在调质段进口处形成料封,解决了蒸汽的返流问题。

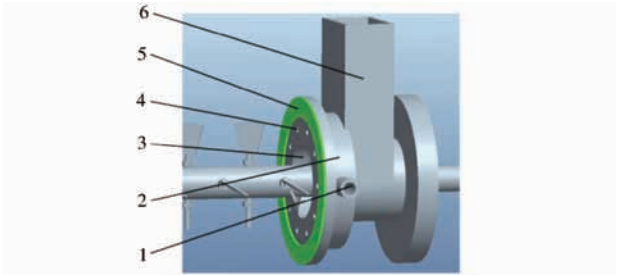


图 3 蒸汽添加方式示意图

Fig. 3 Diagram of adding steam style

1. 蒸汽进口 2. 蒸汽腔 3. 调质单元物料进口 4. 蒸汽添加孔
5. 密封圈 6. 进料口

2.4 调质器主体参数设计

2.4.1 调质器内物料运动分析

为研究调质器内物料的运动状态和规律,对调质器内的物料进行运动学分析。按单质点法,设桨叶安装角为 α ,以距离轴线 r 处的颗粒物料 A 为研究对象;当调质器主轴以角速度 ω 旋转时,该颗粒物料 A 上的运动速度可由速度三角形求解。A 处的线速度为该处的牵连运动的速度 v_0 ,方向为沿 A 回转的切线方向;物料 A 相对桨叶的滑动速度平行于桨叶平面 v_n 。若考虑桨叶摩擦,则物料 A 的运动速度 v 的方向与法向偏转摩擦角相同,设为 β 。对 v 进行速度分解,则可求得物料 A 轴向速度 v_1 和圆周速度 v_2 ;其中, v_1 为腔体内物料的轴向移动速度, v_2 为腔体内物料径向运动速度,如图 4 所示。宏观上,原料颗粒在调质腔内连续不断地被旋转的桨叶翻扬、推进,呈螺旋面环流轨迹向前旋进。

物料 A 轴向移动速度

$$v_1 = v \cos(90^{\circ} - \alpha + \beta) \tag{1}$$

其中
$$v = \frac{v_n}{\cos \beta} \quad v_n = v_0 \sin(90^{\circ} - \alpha)$$

$$v_0 = \omega r = \frac{2\pi n}{60} r$$

代入可得

$$v_1 = \frac{\pi r n (\sin(180^{\circ} - 2\alpha + \beta) - \sin \beta)}{60 \cos \beta} \tag{2}$$

2.4.2 调质器主体结构参数设计

由调质器工作原理可知,调质器的基础尺寸和

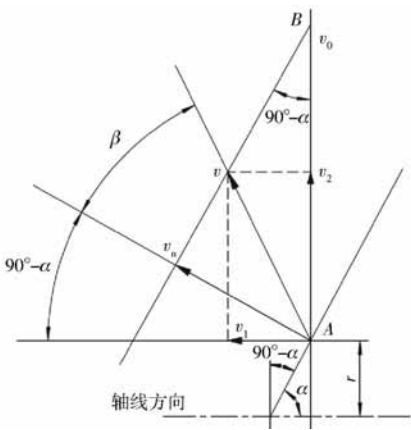


图 4 调质器内物料的运动速度分解图

Fig. 4 Velocity of moving material analysis in conditioner

调质筒体的直径、长度、转速、调质时间有关^[7],其数学关系计算公式为

$$V = \frac{Q}{\rho \varphi} t \tag{3}$$

$$V = \frac{D^2}{4} \pi L \tag{4}$$

- 式中 V ——调质器容积, m^3
 Q ——调质器产量, kg/h
 ρ ——物料密度,一般取 $500 \sim 550 \text{ kg/m}^3$
 φ ——充满系数,一般取 $0.3 \sim 0.5$
 t ——调质时间, s
 D ——调质器直径, m
 L ——调质器长度,一般取 $(2.6 \sim 10) D$

基于该调质器最大产量约为 50 kg/h ,调质时间约为 $8 \sim 30 \text{ s}$ 这一生产需要来设计主体结构参数,将 $Q = 50 \text{ kg/h}$ 、 $\rho = 500 \text{ kg/m}^3$ 、 $\varphi = 0.3$ 、 $t = 30 \text{ s}$ 代入式(3),得 $V \approx 2.8 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,同时考虑到调质器中安装有桨叶轴、扇形桨叶等部件需要合适的体积,参阅文献[7],最终调整调质器腔体体积为 $4 \times 10^{-3} \text{ m}^3$;假设 $L = 6D$,将体积代入到式(4),求得调质器内径为 0.1 m ,调质段长度为 0.6 m 。

2.5 蒸汽发生器的原理和设计

2.5.1 调质过程传热模型

在调质器工作过程中,物料和蒸汽进行热交换,传热过程分为 2 个阶段:物料在桨叶搅拌下翻滚阶段与蒸汽流以颗粒分散状态接触;物料以床层状态与蒸汽流接触。在物料搅拌阶段,蒸汽流与物料接触面积大、传热系数大,是传热的主要阶段^[8]。

根据假设,物料在搅动翻滚阶段与蒸汽进行热交换,传热方程为

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{\rho c_e} \nabla^2 T \tag{5}$$

- 式中 T ——物料颗粒温度, $^{\circ}\text{C}$
 k ——物料颗粒表面导热系数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

c_c ——物料的定压比热容, J/(kg·K)
经饱和热蒸汽调质后, 饲料温度可通过王京法热力学原理公式计算^[9]。

$$T = \frac{(h_0 + 7.1)\sigma\psi + 1.674T_0}{1.674 + 4.176\sigma\psi}$$

(6)

式中 h_0 ——工作压力下蒸汽的焓值, kJ/kg
 σ ——蒸汽添加率, %
 ψ ——修正系数, 一般取 0.95
 T_0 ——物料的初始温度, K

2.5.2 蒸汽发生器选用

合理的蒸汽供给系统, 是保证饲料原料所需热量和水分的前提, 也是改进颗粒质量和提高生产效率的主要环节^[9-11]。基于传热理论, 结合设备的功率和参数指标, 计算并选用合适的蒸汽发生器, 为该调质器提供蒸汽。

饱和蒸汽焓值即饱和蒸汽的总能量, 是水的焓值和蒸发焓的总和^[12], 计算公式为

$$h_g = H + qH_f$$

(7)

式中 h_g ——蒸汽的热焓值, kJ/kg
 H ——蒸汽的表观热, kJ/kg
 q ——蒸汽的质量, 是指蒸汽中的水分处于汽态的比例^[8], %
 H_f ——蒸汽的潜热, kJ/kg

由饲料原料所需要的热量和蒸汽状态, 可以求出所需的蒸汽量。蒸汽用量计算公式为

$$M_q = \frac{C_w(T_1 - T_0)Q_1}{h_g - h_1}$$

(8)

式中 M_q ——蒸汽量, kg/h
 C_w ——物料的比热容, kJ/(kg·K)
 T_1 ——调质后的物料温度, K
 h_1 ——蒸发热焓值, kJ/kg
 Q_1 ——制粒机产量, kg/h

假设调质前的物料温度即环境温度 $T_0 = 20^\circ\text{C}$, $T_1 = 70^\circ\text{C}$, 蒸汽的质量 $q = 90\%$; 查阅饱和蒸汽表^[8,12], 得 $H = 550\text{ kJ/kg}$ 、 $H_f = 2\,750\text{ kJ/kg}$, 代入式(7), 得 $h_g \approx 2\,500\text{ kJ/kg}$ 。将 $h_g \approx 2\,500\text{ kJ/kg}$ 、 $h_1 \approx 260\text{ kJ/kg}$ 、 $C_w = 1.67\text{ kJ/(kg}\cdot\text{K)}$ 、 $Q = 50\text{ kg/h}$ 代入式(8), 求得 $M_q \approx 1.86\text{ m}^3/\text{h}$ 。但在实际生产过程中, 考虑到蒸汽热损失和效率等因素, 扩大调整蒸汽流量范围为 $1 \sim 3\text{ m}^3/\text{h}$, 选用的蒸汽发生器功率为 9 kW , 该蒸汽发生器如图 5 所示。

3 试验设计与指标测定

3.1 试验设计

由文献[13-16]可知, 调质器工作性能的主要影响指标为桨叶安装角、调质轴转速、喂料转速。依



图 5 蒸汽发生器

Fig. 5 Steam generator for conditioner

据调质器工作原理, 以桨叶安装角 X_1 、调质轴转速 X_2 、喂料转速 X_3 为试验变量, 基于二次正交旋转组合试验原理, 建立因素水平表如表 1 所示(x_1 、 x_2 、 x_3 为各变量真实值, X_1 、 X_2 、 X_3 为各变量编码值)。

表 1 二次回归正交试验设计因素水平

Tab. 1 Factors and levels of quadratic regression orthogonal rotating experiment design

编码	因素		
	桨叶安装角	调质轴转速	喂料转速
	$x_1/(^\circ)$	$x_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	$x_3/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$
1. 682	60	290	18
1	50	270	16. 8
0	35	240	15
- 1	20	210	13. 2
- 1. 682	10	190	12

3.2 指标测定

利用自主研制的小型轴向多点进气式调质器进行作业性能试验, 地点为北京市密云区听三峰饲料厂。试验对象为乳猪料, 其配方成分为: 52% 膨化玉米、32% 膨化豆粕、2% 啤酒酵母、2% 进口鱼粉、5% 乳清粉、2% 红糖、4% 预混料、1% 豆油, 原料理化指标性能良好。试验采用 65°C 的低温制粒加工工艺, 将蒸汽流量固定为 $1.8\text{ m}^3/\text{h}$, 预期调质温度波动范围为 $63 \sim 67^\circ\text{C}$ 。

调质器生产率是指在单位时间内处理物料的质量, 代表了其生产能力的大小, 是其工作性能重要的评价参数; 通过统计一段时间内调质器出料口流出物料的质量, 来测定调质器的生产率^[17]。

调质后物料的温度很大程度上决定了其糊化程度, 直接影响到颗粒饲料的品质^[18]; 调质后物料温度测定方法为: 调整调质器作业参数, 待其工作稳定后, 将温度计置于调质出料观测口并使其与物料直接接触, 进而测得物料的温度。本试验以调质器生产率 Y_1 和调质后物料温度 Y_2 为评价指标。按照试验组合, 通过该调质器进行饲料原料调质试验, 试验设计与结果如表 2 所示。

表 2 二次回归正交旋转组合试验设计与结果

Tab.2 Experimental levels and results of quadratic regression orthogonal rotating test

试验序号	X_1	X_2	X_3	$Y_1/(\text{g}\cdot\text{s}^{-1})$	$Y_2/^\circ\text{C}$
1	1	1	1	13.53	64.5
2	1	1	-1	11.62	68.0
3	1	-1	1	13.19	66.5
4	1	-1	-1	11.47	72.5
5	-1	1	1	13.57	64.5
6	-1	1	-1	12.27	72.5
7	-1	-1	1	12.67	71.5
8	-1	-1	-1	11.28	77.0
9	1.682	0	0	11.94	60.5
10	-1.682	0	0	11.37	72.0
11	0	1.682	0	12.71	61.5
12	0	-1.682	0	10.84	78.0
13	0	0	1.682	12.55	58.0
14	0	0	-1.682	10.65	81.0
15	0	0	0	11.60	65.0
16	0	0	0	11.55	67.5
17	0	0	0	11.58	66.0
18	0	0	0	11.75	64.5
19	0	0	0	11.59	66.5
20	0	0	0	11.65	65.0
21	0	0	0	11.48	67.0
22	0	0	0	11.52	66.5
23	0	0	0	11.71	64.0

4 试验结果与分析

4.1 回归模型建立

对 Y_1 的方差分析结果显示, $F = 6.46, P < 0.01$, 回归较显著, 决定系数 $R^2 = 0.82$, 对决定系数进行显著性检验结果, 如表 3 所示。由回归方程中 P 值可知, 各因素对 Y_1 影响大小依次为 X_3 、 X_2 、 X_1 。各项的交互作用对 Y_1 的影响不显著。

表 3 调质器生产率显著性检验结果

Tab.3 Result of significance test for regression coefficient of productivity of conditioner

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
常数项	10.92	9	1.21	6.46	0.001 5
X_1	0.071	1	0.071	6.38	0.054 9
X_2	2.24	1	2.24	11.93	0.004 3
X_3	6.62	1	6.62	35.19	<0.000 11
X_1X_2	0.24	1	0.24	1.29	0.276 2
X_1X_3	0.11	1	0.11	0.59	0.457 1
X_2X_3	1.57×10^{-3}	1	1.56×10^{-3}	8.34×10^{-3}	0.928 6
X_1^2	0.50	1	0.50	2.67	0.125 9
X_2^2	0.77	1	0.77	4.08	0.064 4
X_3^2	0.39	1	0.39	2.07	0.173 8

对 Y_2 的方差分析结果显示, $F = 8.80, P < 0.001$, 回归极显著, 决定系数 $R^2 = 0.86$, 对决定系数进行显著性检验, 结果如表 4 所示。由回归方程

中 P 值可知, 各因素对 Y_2 影响大小依次为 X_3 、 X_2 、 X_1 。各项的交互作用对 Y_1 的影响不显著。

表 4 调质后物料温度显著性检验结果

Tab.4 Result of significance test for regression coefficient of conditioned material temperature

变异来源	平方和	自由度	均方	F	P
常数项	607.11	9	67.46	8.80	0.000 3
X_1	78.98	1	78.98	10.31	0.006 8
X_2	156.63	1	156.63	20.44	0.000 6
X_3	283.13	1	283.13	36.95	<0.000 1
X_1X_2	3.78	1	3.78	0.49	0.494 7
X_1X_3	2.53	1	2.53	0.33	0.575 3
X_2X_3	0.031	1	0.031	4.08×10^{-3}	0.950 0
X_1^2	1.59	1	1.59	0.21	0.656 1
X_2^2	38.37	1	38.37	5.01	0.043 4
X_3^2	42.85	1	42.85	5.59	0.034 3

使用 Design - Expert 软件对数据进行分析, 得出工作参数桨叶安装角、调质轴转速、喂料转速与调质器生产率 Y_1 、调质后物料温度 Y_2 的回归方程

$$Y_1 = 11.588 + 0.072X_1 + 0.405X_2 + 0.696X_3 - 0.174X_1X_2 + 0.118X_1X_3 + 0.014X_2X_3 + 0.178X_1^2 + 0.220X_2^2 + 0.156X_3^2 \quad (9)$$

$$Y_2 = 65.762 - 2.404X_1 - 3.339X_2 - 4.553X_3 + 0.688X_1X_2 + 0.563X_1X_3 - 0.063X_2X_3 + 0.316X_1^2 + 1.554X_2^2 + 1.642X_3^2 \quad (10)$$

4.2 各因素对性能指标的影响规律

运用响应曲面法分析各因素对喂料器落料质量流率和落料稳定性的影响; 通过固定 3 个因素中 1 个因素为零水平, 考察其他 2 个因素对调质器生产率和物料温度的影响。

4.2.1 调质器生产率的影响因素与分析

由图 6a 分析可知, 在该试验条件下 X_1 和 X_2 对 Y_1 的影响显著, 随着 X_1 的增大和 X_2 的增加, 生产率逐渐提高; 这是因为随着 X_1 增大和 X_2 增加, 桨叶对物料的推动能力增强, 物料前进的运动速度变快, 故生产率 Y_1 有提高趋势。由表 3 可知, X_1 和 X_2 对 Y_1 无显著交互作用。

由图 6b 可知, 随着 X_1 的增大和 X_3 的增大, 调质器生产率提高; 喂料转速对生产率的影响比桨叶安装角的影响更显著。 X_1 和 X_3 的交互作用不显著。

由图 6c 分析可以, Y_1 随着 X_2 和 X_3 的增加而提高, 且 X_3 对 Y_1 的影响比 X_2 显著; 这是因为当喂料转速一定时, 调质轴转速增加, 生产率提高, 同时调质腔充满系数降低, 调质轴转速增加使得生产率提高作用有限; 当调质轴转速一定时, 喂料量随喂料转速的增加而增大, 调质腔内物料充满系数增大, 对提高生产率起主导作用, 故喂料转速对生产率影响更显

著。 X_2 和 X_3 对 Y_1 的交互作用不显著。

4.2.2 调质后物料温度的影响因素与分析

由图6d分析可知,调质后 Y_2 随着 X_1 的增大逐渐降低,这是因为桨叶安装角在一定范围内时,桨叶安装角的增大对物料的轴向推动能力增强,物料前进速度增加,与蒸汽发生传热传质反应的时间缩短,故物料温度降低;物料温度随调质轴转速的增加而增大,这是因为调质轴转速增加,调质时间缩短,故

物料温度呈降低趋势。 X_2 对 Y_2 的影响比 X_1 显著。

由图6e分析可知, Y_2 随 X_1 和 X_3 的增加而降低, X_3 对 Y_2 的影响比 X_1 显著;随着喂料转速增加,物料喂入量增大,当通入的蒸汽量一定时,单位物料颗粒接触到的蒸汽量减少,故物料温度呈降低趋势。

由图6f分析可知, Y_2 随着 X_2 和 X_3 的增加而降低。 X_3 对 Y_2 的影响比 X_2 显著; X_2 和 X_3 对 Y_2 的交互作用不显著。

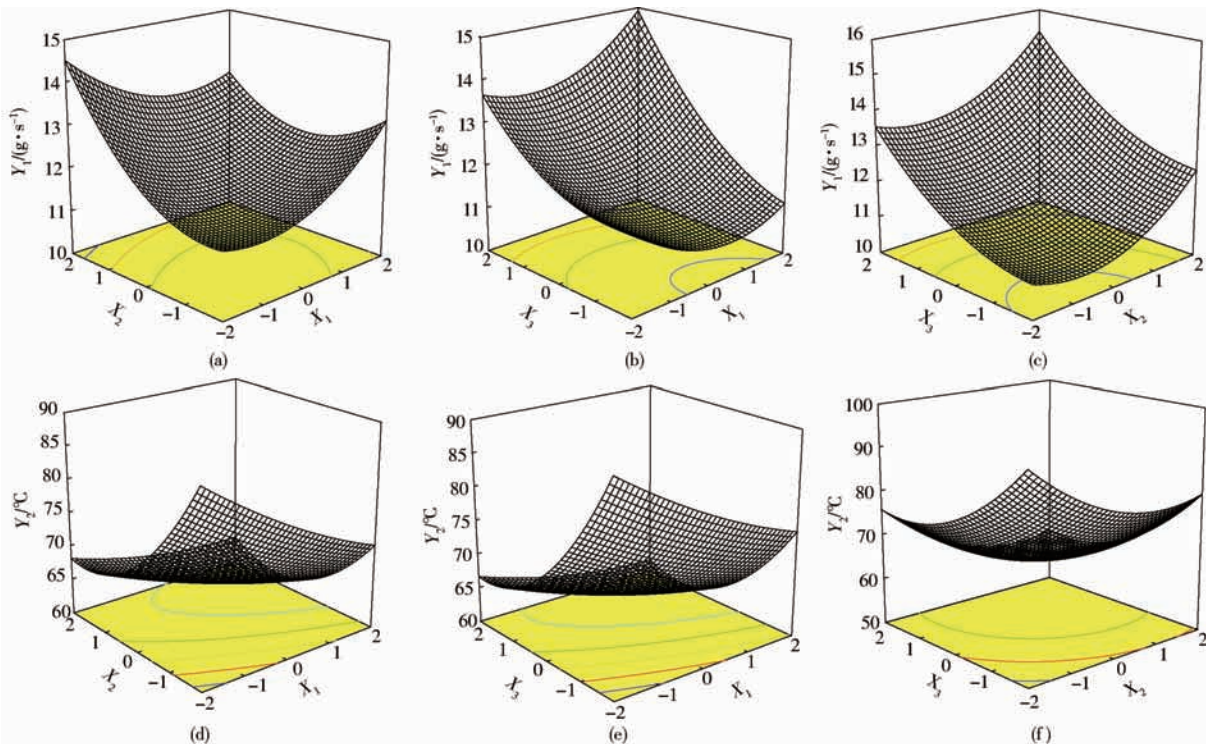


图 6 试验因素与调质效果的响应面

Fig. 6 Response surfaces of experiment parameters and conditioning results

4.3 回归模型的寻优

应使小型轴向多点进气式调质器获得最佳加工性能,即保证作业稳定后调质器生产率取较大值,并且调质后的物料温度在加工工艺要求的范围内。由于该调质器最大生产率为 50 kg/h,一般以取最大生产率的 80%~90% 为宜,故 Y_1 在该范围内为宜;由于该乳猪料加工工艺要求的调质温度范围为 63~67℃,故 Y_2 应在该范围内。结果表明当 X_1, X_2, X_3 均取最大值 1.682 时,调质器生产率 Y_1 获得最大值;而当 X_1, X_2, X_3 均取最小值 -1.682 时,调质后物料温度可以获得较大值。因此,合理的 X_1, X_2, X_3 才能使得调质器生产率较佳,调质后物料温度在要求的工艺范围之内。

基于显著性分析可知, X_3 对于 Y_1 和 Y_2 的影响最为显著,由图 6 可知, X_3 的取值对 Y_1 和 Y_2 均取到最优解很重要;因此需要进一步分析如何取值才能既能得到相对较高的生产率,又能使调质后的物料温度在该料加工工艺要求的温度范围之内。为了尽可

能兼顾 2 个指标 Y_1 和 Y_2 都能取到较优解,由响应面法对各参数进行进一步寻优,利用 Design - Expert 8.0.6 软件在 $-1.682 \leq X_i \leq 1.682$ ($i = 1, 2, 3$) 范围内得到调质器作业过程中综合最优工作参数为: $X_1 = 0.210, X_2 = -0.632, X_3 = 1.340$,即调质器桨叶安装角为 38.1°、调质轴转速为 220.6 r/min、喂料转速为 17.4 r/min 时,调质器生产效率为 12.7 g/s,调质后物料温度为 65.0℃。

4.4 试验验证

取最优参数组合,在北京市密云区听三峰饲料厂进行调质器部件车间试验,如图 7 所示;加工对象为同配方的乳猪料原料,物化理化指标良好。调整设备至最优参数组合,待调质器工作稳定后,测得调质器生产率为 11.8 g/s,调质后物料温度为 64.0℃,其它指标性能良好,调质效果基本与优化试验结果一致。

5 结论

(1) 对调质器工作过程中物料的运动状态进行



图 7 样机车间作业

Fig.7 Prototype working in workshop

了分析,得到了物料沿调质器轴向的运动速度方程和模型。对桨叶、蒸汽添加方式等关键部件特征进

行了设计与分析,设计了一种参数可调的小型轴向多点进气式调质器,并配备了合适的蒸汽发生器装置。

(2)通过三因素五水平正交组合试验,分析并优化了该调质器主要工作参数;得出各因素对调质器生产率的影响显著性顺序为:喂料转速、调质轴转速、桨叶安装角;各因素对调质后物料温度的影响显著性顺序为:喂料转速、调质轴转速、桨叶安装角。由 Design - Expert 软件优化得出调质器最佳加工参数组合:调质器桨叶安装角为 38.1°、调质轴转速为 220.6 r/min、喂料转速为 17.4 r/min,此时调质器生产率和调质后物料温度都可获得最优解。

参 考 文 献

1 李艳聪,万志生,单慧勇,等.影响颗粒饲料质量和制粒性能的因素分析[J].安徽农业科学,2011,39(10):5929-5930.
LI Yancong, WAN Zhisheng, SHAN Huiyong, et al. Factors affecting quality and granulation property of pellet feed[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(10): 5929-5930. (in Chinese)

2 CUTLIP S E, HOTT J M, BUCHANAN N P, et al. The effect of steam-conditioning practices on pellet quality and growing broiler nutritional value[J]. The Journal of Applied Poultry Research, 2008, 17(2): 249-261.

3 苗健.几种常见调质器的工作机理[J].渔业现代化,2007,34(1):44,47.
MIAO Jian. Working mechanism of several common conditioners[J]. Fishery Modernization, 2007, 34(1): 44,47. (in Chinese)

4 曹康,郝波.中国现代饲料工程学[M].上海:上海科学技术文献出版社,2014.

5 中国农业大学.小型试验用调质器:中国,CN201110460460[P].2013-03-15.

6 中国农业大学.一种自密封小型环模制粒机:中国,CN104923126A[P].2015-09-23.

7 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.

8 曹康,金征宇.现代饲料加工技术[M].上海:上海科学技术文献出版社,2003.

9 王京法.正确控制颗粒机蒸汽供给量[J].中国饲料,1992(3):32-33.
WANG Jingfa. Proper control of the supply of steam of pellet mill [J]. China Feed, 1992(3):32-33. (in Chinese)

10 石永峰.颗粒饲料调质系统中蒸汽的质量控制[J].西部粮油科技,1997,22(2):49-51.
SHI Yongfeng. The quality control of steam in the conditioning system in pellet feed[J]. West Oils and Technology, 1997, 22(2): 49-51. (in Chinese)

11 GILPIN A S, HERRMAN T J, BEHNKE K C, et al. Feed moisture, retention time, and steam as quality and energy utilization determinants in the pelleting process[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2002, 18(3): 331.

12 朱明善.工程热力学[M].北京:清华大学出版社,2011.

13 朱勇.双层单轴桨叶式饲料调质器关键技术研究[D].武汉:武汉轻工大学,2014.
ZHU Yong. A study of the key technology of double-layered sing shaft paddle feed conditioners [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2014. (in Chinese)

14 刘凡.桨叶式饲料调质器性能试验方法研究及其行业标准制定[D].郑州:河南工业大学,2012.
LIU Fan. Study on the test methods for the performance of paddle feed conditioners and its industry standard making [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2012. (in Chinese)

15 陈义厚.环模制粒机调质器设计与研究[J].长江大学学报:自然科学版,2014,11(11):63-67.
CHEN Yihou. Design and research of conditioner for ring die pellet mill[J]. Journal of Yangtze University: Natural Science Edition, 2014, 11(11): 63-67. (in Chinese)

16 谢正军,易炳权.蒸汽与调质[J].中国饲料,2002(11):26-27.
XIE Zhengjun, YI Bingquan. Steam and conditioning[J]. China Feed, 2002(11): 26-27. (in Chinese)

17 闫飞.饲料调质器性能参数的试验研究[D].北京:中国农业机械化科学研究院,2010.
YAN Fei. Experimental study on performance parameters of feed conditioner [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2010. (in Chinese)

18 初琪洋.不同调质温度对乳猪颗粒饲料质量及制粒生产率的影响[J].猪业观察,2014(4):106-108.
CHU Qiyang. Effects of conditioning temperature on piglet feed quality and the pelleting productivity [J]. Journal of Rural Animal-Breeding Technology, 2014(4): 106-108. (in Chinese)