

引文格式: 赵玉清, 齐文涛, 赵勇, 等. 青贮玉米粉碎物料压缩特性响应面优化试验[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2023, 38(4): 704–713. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202303039](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202303039)

# 青贮玉米粉碎物料压缩特性响应面优化试验<sup>\*</sup>

赵玉清<sup>1,2,3</sup>, 齐文涛<sup>1,3</sup>, 赵 勇<sup>1,3</sup>, 马兴彪<sup>4</sup>, 朱树早<sup>4</sup>,  
陈再兴<sup>1,3</sup>, 熊 坚<sup>2</sup>, 赵 伟<sup>1,3 \*\*</sup>

(1. 云南农业大学 机电工程学院, 云南昆明 650201; 2. 昆明理工大学 交通工程学院, 云南昆明 650093;  
3. 云南省高原特色农业产业研究院, 云南昆明 650201; 4. 云南省寻甸县农业机械技术推广站, 云南昆明 655200)

**摘要:**【目的】研究青贮玉米粉碎物料压缩特性, 解决青贮玉米压缩机械作业能耗大、压缩密度低的问题。

【方法】以喂入量、压缩密度和压缩速度为试验因素, 以比能耗、压缩时间和最大压缩力为试验指标, 开展二次回归正交试验, 进行试验因素显著性分析, 建立回归模型, 对试验结果进行响应面优化。【结果】各试验因素对比能耗影响顺序为压缩密度>喂入量>压缩速度, 对压缩时间影响顺序为压缩速度>压缩密度>喂入量, 对最大压缩力影响顺序为压缩密度>压缩速度>喂入量。响应面优化后的最佳因素水平组合为喂入量 0.90 kg、压缩密度 550 kg/m<sup>3</sup>、压缩速度 245.50 mm/min。【结论】本研究得到的回归模型误差小, 优化结果可信度高, 可用于青贮玉米饲料制备工艺参数选取, 也可为青贮玉米压缩装置设计提供理论参考。

**关键词:**青贮玉米粉碎物料; 压缩特性; 响应面优化

中图分类号: S513 文献标志码: A 文章编号: 1004-390X (2023) 04-0704-10

## Experiment Study on Compression Characteristics of Silage Corn Crushed Material Based on Response Surface Optimization

ZHAO Yuqing<sup>1,2,3</sup>, QI Wentao<sup>1,3</sup>, ZHAO Yong<sup>1,3</sup>, MA Xingbiao<sup>4</sup>, ZHU Shuzao<sup>4</sup>,  
CHEN Zaixing<sup>1,3</sup>, XIONG Jian<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>1,3</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;  
2. School of Transportation Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;  
3. Yunnan Plateau Characteristic Agricultural Industry Research Institute, Kunming 650201, China;  
4. Agricultural Machinery Technology Extension Station of Xundian County, Kunming 655200, China)

**Abstract:** [Purpose] To study the compression characteristics of crushed silage corn materials and solve the problems of high energy consumption and low compression density of silage corn compression machinery. [Methods] Using feeding amount, compression density, and compression speed as experimental factors, and specific energy consumption, compression time, and maximum compression force as experimental indicators, a quadratic regression orthogonal experiment was conducted to analyze the significance of experimental factors, establish a regression model, and optimize the response surface of the experimental results. [Results] The order of influence on specific energy con-

收稿日期: 2023-03-22 修回日期: 2023-07-01 网络首发日期: 2023-08-02

\*基金项目: 云南省重大科技专项—绿色食品国际合作研究中心项目(2019ZG009); 云南省教育厅科学硏究基金项目(2020Y198)。

作者简介: 赵玉清(1975—), 男, 云南大理人, 硕士, 副教授, 主要从事智能农业机械装备研究。

E-mail: [331863839@qq.com](mailto:331863839@qq.com)

\*\*通信作者 Corresponding author: 赵伟(1983—), 男, 山西长治人, 博士, 讲师, 主要从事农业收获技术与装备研究。E-mail: [93761946@qq.com](mailto:93761946@qq.com)

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/53.1044.S.20230801.1720.002.html>



sumption among various experimental factors was compression density>feeding amount>compression speed, the order of influence on compression time was compression speed>compression density>feeding amount, and the order of influence on maximum compression force was compression density>compression speed>feeding amount. The optimal factor level combination after response surface optimization was the feeding amount of 0.90 kg, compression density of 550 kg/m<sup>3</sup>, and compression speed of 245.50 mm/min. [Conclusion] The regression model obtained in this study has small error and high reliability of optimization results, which can be used for selecting process parameters for the preparation of silage corn feed and also provide theoretical reference for the design of silage corn compression equipment.

**Keywords:** crushed silage corn material; compression characteristics; response surface optimization

2015 年中国“粮改饲”政策实施以来, 玉米因含有丰富的糖类(73.2%)、粗蛋白(8.5%)和脂肪(4.3%)等营养物质而成为反刍动物的重要饲料来源之一, 被广泛运用于农牧产业, 逐步成为现代农业发展的重点农作物<sup>[1-5]</sup>。青贮玉米饲料是将处于乳熟末期至蜡熟前期的全株玉米经收获机械切割、揉搓、输送、压缩和打捆后密封储藏, 再经厌氧发酵后制备而成的一种营养丰富的饲料<sup>[6-8]</sup>。粉碎物料的压缩是青贮玉米饲料制备过程中的关键环节, 压缩效果直接对后续青贮玉米饲料发酵质量产生重要影响<sup>[9-11]</sup>。因此, 青贮玉米粉碎物料压缩特性研究对青贮玉米饲料机械化工艺参数的优化和压缩装置的设计开发具有重要意义。目前, 较多学者从优化玉米秸秆切割和粉碎等装备的工作参数角度出发, 对玉米秸秆的力学特性开展了系列研究<sup>[12-16]</sup>, 但对经切碎和揉搓后的青贮玉米粉碎物料开展压缩特性试验的研究相对较少。青贮玉米植株收获时的含水率达到 60%~70%, 其力学特性也与籽粒玉米收获后的秸秆差异较大。本研究以红单 10 号青贮玉米粉碎物料为研究对象, 利用万能试验机和自制压缩装置设计 3 因素 3 水平二次回归正交试验, 测定青贮玉米粉碎物料压缩过程中的力学特性参数, 可为后续青贮饲料制备工艺和青贮玉米压缩打捆装置的设计提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设备及材料

#### 1.1.1 试验设备

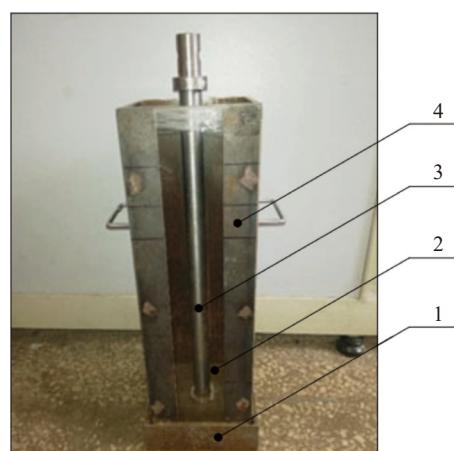
主要设备为美斯特 CMT6104 力学万能试验机(图 1)和自制可观测压缩装置(图 2)。万能试验机主要工作参数为: 工作电压 220 V, 最大压

力 10 kN, 功率 0.4 kW, 精度误差范围在-0.1%~0.1%之间, 能通过调节不同的压缩速度测定压缩状态下青贮玉米粉碎物料的力学特性数据。自制可观测压缩装置由压缩底座、压缩仓、压缩杆和透明压缩挡板组成, 压缩仓尺寸为 100 mm×



图 1 CMT6104 力学万能试验机

Fig. 1 CMT6104 mechanical universal testing machine



注: 1. 压缩底座; 2. 透明压缩挡板; 3. 压缩杆; 4. 压缩仓。

Note: 1. compression base; 2. transparent compression baffle; 3. compression rod; 4. compression bin.

#### 图 2 自制可观测压缩装置

Fig. 2 Self-made observable compression device

100 mm×350 mm(长×宽×高), 压缩杆底面积为98 mm×98 mm。试验时将压缩杆与万能试验机相连接, 通过控制万能试验机升降速度, 让压缩杆获得相应的升降速度从而实现压缩杆对压缩仓内青贮玉米粉碎物料的压缩, 可实时对压缩仓内的压缩过程进行观察。其他试验设备包括101-2A电热鼓风干燥箱和LT501电子天平称等。

### 1.1.2 试验材料

试验用青贮玉米粉碎物料试样(图3)于2020年9月在云南省寻甸县青贮玉米种植基地收获, 其初始密度为312 kg/m<sup>3</sup>。品种为红单10号, 种植行距60~70 cm, 株距15~20 cm, 种植方式为单株密植, 产量为4~6 kg/m<sup>2</sup>。按照《农业机械试验条件 测定方法的一般规定》(GB/T 5256—2008)中关于含水率的测定方法, 测得红单10号青贮玉米粉碎物料平均含水率为68.42%, 满足青贮农艺技术要求。



图3 青贮玉米粉碎物料

Fig. 3 Crushed silage corn material

## 1.2 二次回归正交试验设计

### 1.2.1 因素水平选取

根据青贮农艺技术要求, 农业纤维物料在压缩青贮时, 压缩密度应大于450 kg/m<sup>3</sup>, 且压缩密度对后期青贮饲料发酵品质有重要影响<sup>[17-18]</sup>。课题组前期对青贮玉米粉碎物料进行的单因素压缩试验结果表明: 喂入量和压缩速度对压缩特性有显著影响。因此, 选取喂入量(A)、压缩密度(B)和压缩速度(C)为试验因素, 设计青贮玉米粉碎物料压缩特性的正交试验(表1)。

### 1.2.2 试验指标选取

比能耗是指单位质量青贮玉米粉碎物料被压缩成型时所消耗的能量, 是压缩过程中评价能耗高低的重要技术指标。利用MATLAB软件对压

表1 二次回归正交试验因素水平表

Tab. 1 Factor level table of quadratic regression orthogonal test

水平 level	因素 factor		
	喂入量/kg feeding amount	压缩密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) compression density	压缩速度/(mm·min <sup>-1</sup> ) compression speed
-1	0.5	550	100
0	0.7	600	200
1	0.9	650	300

缩过程中压缩力与压缩量曲线图进行梯形数值积分, 梯形总面积即为比能耗<sup>[15]</sup>。压缩力和压缩量可由万能试验机测得, 比能耗计算公式为

$$\delta = \frac{W}{m} = \frac{10^{-3}}{m} \int F(x)dx.$$

式中:  $\delta$ 为压缩过程比能耗, J/kg;  $W$ 为压缩过程总能耗, J;  $m$ 为物料质量, kg;  $F(x)$ 为压缩过程中随压缩量变化的压力, N;  $x$ 为压缩过程中的压缩量, mm。

压缩时间是指压缩时青贮玉米粉碎物料状态由蓬松到压实所需的时间, 能反映压缩过程的压缩效率。最大压缩力是指将青贮玉米粉碎物料压缩成型时所需的压力, 能反映青贮玉米粉碎物料的可压缩程度, 对压缩装置的动力选择有重要指导意义。因此, 选取比能耗( $\delta$ )、压缩时间( $T$ )和最大压缩力( $P$ )为试验指标。

### 1.2.3 试验方案设计

响应面分析法(Box-Behnken)是一种综合试验设计和数学建模的优化方法, 采用多元二次方程来拟合因素和响应值之间的函数关系, 通过对回归方程的分析寻求最优工艺参数。响应面分析法能够以最少试验次数优化试验过程, 通过方差分析、响应面分析和响应面优化等试验数据分析得出因素的最佳组合和响应的最优值。

本研究利用Design-Expert 10.0.7中的Box-Behnken模块对青贮玉米粉碎物料试样进行3因素3水平二次回归正交压缩试验(表2), 建立回归模型以表达比能耗、压缩时间和最大压缩力3个试验指标与喂入量、压缩密度和压缩速度3个因素取值之间的变化规律, 共17次试验。试验过程中, 各因素水平组合重复3次, 结果取平均值。因素间交互效应可用响应面和等高线直观表示。响应面坡度越陡, 因素间交互作用越显著, 反之则不显著<sup>[19]</sup>; 等高线则用于反映因素间交互作用的强弱<sup>[20]</sup>。为获得压缩青贮玉米粉碎物

料过程中的最佳因素水平组合, 采用 Box-Behnken 模块对二次回归正交试验结果进行优化处理;

为验证优化后最佳因素水平组合的可信度, 按照最佳因素水平组合进行 10 次重复试验。

表 2 Box-Behnken 试验设计方案及结果  
Tab. 2 Box-Behnken experimental design and results

试验序号 test serial number	试验因素 test factors			比能耗/(J·kg <sup>-1</sup> ) specific energy consumption	压缩时间/s compression time	最大压缩力/kPa maximum compression force
	A	B	C			
1	-1	-1	0	30.89	46.10	51.77
2	1	-1	0	27.80	42.00	52.15
3	-1	1	0	44.20	50.70	85.89
4	1	1	0	45.26	49.60	86.04
5	-1	0	-1	37.39	96.90	68.12
6	1	0	-1	31.20	92.30	59.00
7	-1	0	1	41.41	32.30	67.74
8	1	0	1	35.65	30.80	72.72
9	0	-1	-1	29.65	87.40	50.33
10	0	1	-1	43.53	99.00	82.66
11	0	-1	1	29.23	29.10	52.32
12	0	1	1	43.79	33.20	87.91
13	0	0	0	32.40	46.90	68.51
14	0	0	0	37.19	46.80	66.61
15	0	0	0	37.09	45.90	68.35
16	0	0	0	37.02	46.70	69.99
17	0	0	0	37.68	46.80	68.66

## 2 结果与分析

### 2.1 压缩特性试验结果

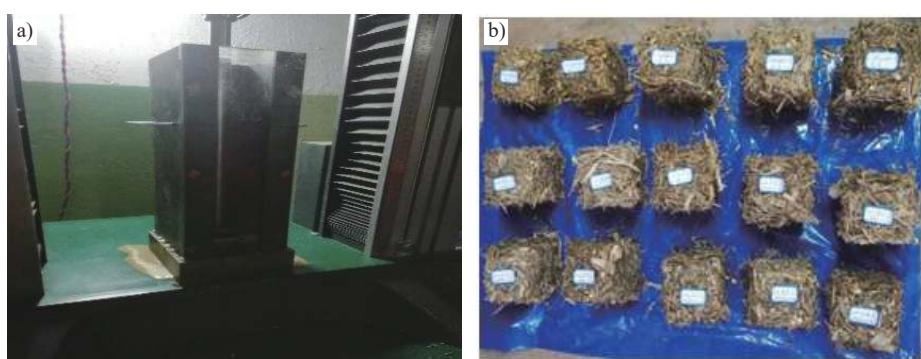
由表 2 可知: 青贮玉米粉碎物料压缩时, 比能耗、压缩时间和最大压缩力范围分别为 27.80~45.26 J/kg、29.10~99.00 s、50.33~87.91 kPa。在试验过程中, 当青贮玉米粉碎物料被压缩到一定

程度时, 会有汁液从压缩底板与压缩仓的间隙流出(图 4a)。压缩后的青贮玉米粉碎物料见图 4b。

### 2.2 各指标回归模型与方差分析

利用 Design-Expert 10.0.7 软件建立的回归方程分别为:

$$\delta = 36.55 - 1.75A + 7.40B + 1.04C;$$



注: a) 粉碎物料汁液流出; b) 压缩后的粉碎物料。

Note: a) crushed material juice flows out; b) crushed material after compression.

图 4 压缩试验过程及压缩试验后粉碎物料情况

Fig. 4 Compression test process and crushed material after compression test

$$T = 46.53 - 1.41A + 3.49B - 31.27C + 0.75AB + 0.78AC - 1.87BC + 0.68A^2 + 15.75C^2;$$

$$P = 68.16 - 0.45A + 16.99B + 2.57C - 0.06AB + 3.53AC + 0.81BC.$$

比能耗、压缩时间和最大压缩力的综合决定系数分别为 0.9090、0.9997 和 0.9910，校正决定系数分别为 0.8880、0.9993 和 0.9850，各回归模型  $P$  值均小于 0.0001，失拟项分别为 0.7247、

0.1277 和 0.2738，表明试验误差较小，以上 3 个指标的回归模型与实际过程相符，均具有较高可靠性，可用于预测比能耗、压缩时间和最大压缩力为最小的最佳因素水平组合。

由表 3 可知：对比能耗影响极显著的因素是压缩密度 ( $B$ )，影响显著的因素是喂入量 ( $A$ )，各因素对比能耗的影响顺序为压缩密度 ( $B$ )>喂入量 ( $A$ )>压缩速度 ( $C$ )。

表 3 比能耗回归模型方差分析

Tab. 3 Variance analysis of specific energy consumption regression model

方差来源 variance source	方差和 sum of variances	自由度 degree of freedom	均方差 mean square deviation	F值 F-value	P值 P-value
模型 model	471.29	3	157.10	43.26	<0.0001**
$A$	24.43	1	24.43	6.73	0.0223*
$B$	438.23	1	438.23	120.69	<0.0001**
$C$	8.63	1	8.63	2.38	0.1471
残差 residual error	47.20	13	3.63		
失拟项 misfit term	28.16	9	3.13	0.66	0.7247
纯误差 pure error	19.05	4	4.76		
总和 sum	518.49	16			

注：“\*\*”表示影响极显著( $P<0.01$ )，“\*”表示影响显著( $P<0.05$ )；下同。

Note: “\*\*” indicates an extremely significant impact ( $P<0.01$ ), “\*” indicates a significant impact ( $P<0.05$ ); the same as below.

由表 4 可知：对压缩时间影响极显著的因素是  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $BC$  和  $C^2$ ，对压缩时间影响显著的

因素是  $AB$  和  $AC$ ，各因素对压缩时间的影响顺序为压缩速度 ( $C$ )>压缩密度 ( $B$ )>喂入量 ( $A$ )。

表 4 压缩时间回归模型方差分析

Tab. 4 Variance analysis of compression time regression model

方差来源 variance source	方差和 sum of variances	自由度 degree of freedom	均方差 mean square deviation	F值 F-value	P值 P-value
模型 model	9015.11	8	1126.89	3018.94	<0.0001**
$A$	15.96	1	15.96	42.76	0.0002**
$B$	97.30	1	97.30	260.67	<0.0001**
$C$	7825.01	1	7825.01	20963.22	<0.0001**
$AB$	2.25	1	2.25	6.03	0.0396*
$AC$	2.40	1	2.40	6.44	0.0349*
$BC$	14.06	1	14.06	37.67	0.0003**
$A^2$	1.95	1	1.95	5.21	0.0518
$C^2$	1047.90	1	1047.90	2807.33	<0.0001**
残差 residual error	2.99	8	0.37		
失拟项 misfit term	2.32	4	0.58	3.47	0.1277
纯误差 pure error	0.67	4	0.17		
总和 sum	9018.10	16			

由表 5 可知：对最大压缩力影响极显著的因素是  $B$ 、 $C$  和  $AC$ ，各因素对最大压缩力的影响顺序为压缩密度 ( $B$ )>压缩速度 ( $C$ )>喂入量 ( $A$ )。

### 2.3 响应面分析

压缩时间随喂入量的增加而缓慢减少，随压缩密度的增加而缓慢增加，随压缩速度的增加而

表5 最大压缩力回归模型方差分析

Tab. 5 Variance analysis of the maximum compressive force regression model

方差来源 variance source	方差和 sum of variances	自由度 degree of freedom	均方差 mean square deviation	F值 F-value	P值 P-value
模型 model	2416.56	6	402.76	178.22	<0.0001**
A	1.63	1	1.63	0.72	0.4157
B	2309.62	1	2309.62	1021.99	<0.0001**
C	52.94	1	52.94	23.43	0.0007**
AB	0.01	1	0.01	5.83E-003	0.9405
AC	49.70	1	49.70	21.99	0.0009**
BC	2.66	1	2.66	1.18	0.3037
残差 residual error	22.60	10	2.66		
失拟项 misfit term	16.79	6	2.80	1.93	0.2738
纯误差 pure error	5.81	4	1.45		
总和 sum	2439.16	16			

快速减小; 喂入量和压缩密度的交互作用以及喂入量和压缩速度的交互作用均对压缩时间的影响显著(图5~6), 压缩密度和压缩速度的交互作用对压缩时间的影响极显著(图7)。

当压缩速度在100~200 mm/min区间内, 最大压缩力随喂入量的增加而减少; 当压缩速度在200~300 mm/min区间内, 最大压缩力随喂入量的增加而增加、随压缩速度的增加而增加; 喂入量和压缩速度的交互作用对最大压缩力的影响极显著(图8)。

## 2.4 响应面参数优化与验证试验

### 2.4.1 响应面参数优化

根据响应面分析结果, 以3个试验指标最小

为优化目标对试验结果进行响应面优化。各因素和各指标间的约束条件设置见表6。通过分析, 得到青贮玉米粉碎物料压缩时的最佳因素水平组合为喂入量0.90 kg、压缩密度550 kg/m<sup>3</sup>、压缩速度245.50 mm/min, 在此因素水平组合下对应的各试验指标分别为比能耗27.88 J/kg、压缩时间31.67 s、最大压缩力53.18 kPa(图9)。

### 2.4.2 验证试验

由表7可知: 在青贮玉米粉碎物料压缩的最佳因素水平组合条件下, 比能耗、压缩时间和最大压缩力的平均值分别为28.50 J/kg、32.23 s和52.32 kPa。对比优化结果, 比能耗、压缩时间和最大压缩力相对误差分别为2.09%、1.36%和

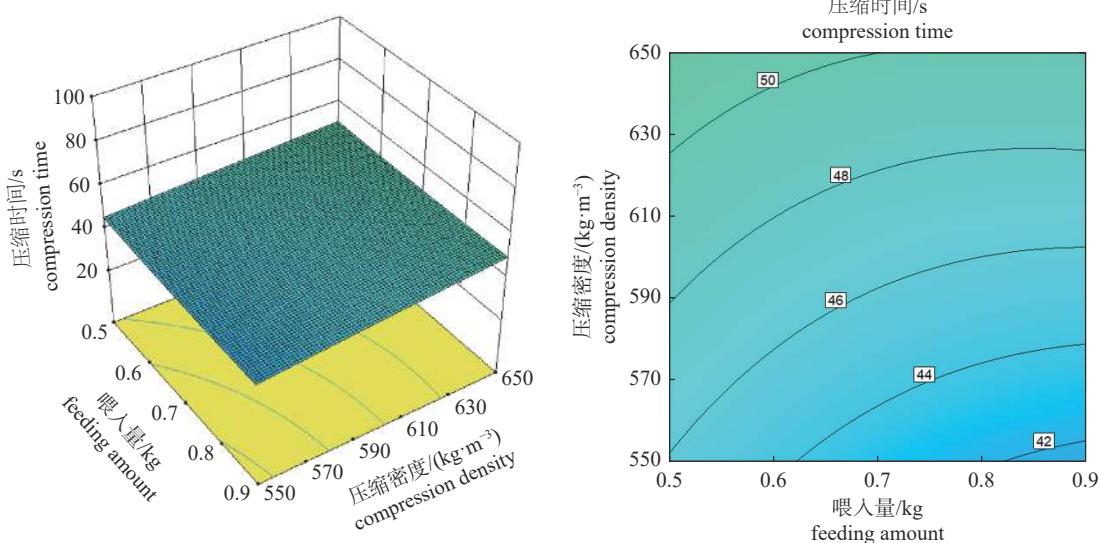


图5 喂入量与压缩密度对压缩时间的交互效应

Fig. 5 Interaction effect of feed amount and compression density on the compression time

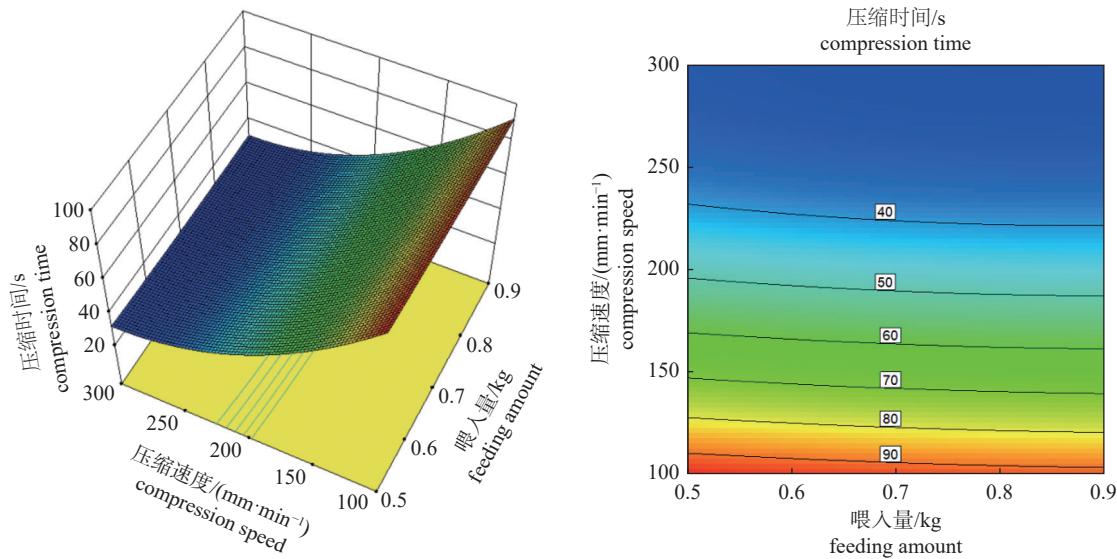


图6 喂入量与压缩速度对压缩时间的交互效应

Fig. 6 Interaction effect of feed amount and compression speed on the compression time

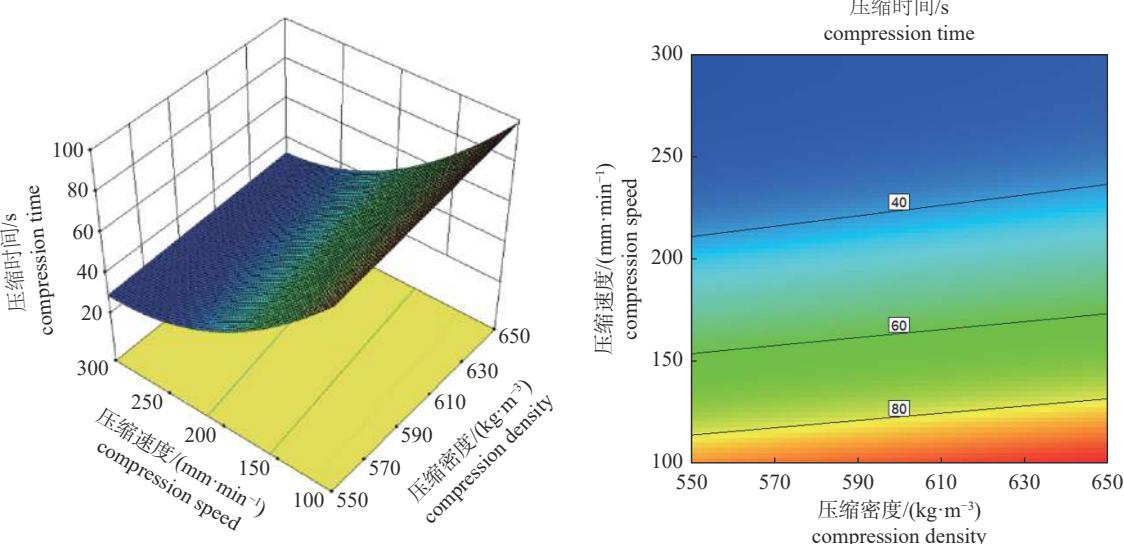


图7 压缩密度与压缩速度对压缩时间的交互效应

Fig. 7 Interaction effect of compression density and compression speed on the compression time

1.62%，说明优化结果可信度较高。该优化结果及回归模型可用于实际生产过程中各参数的选取。

### 3 讨论

#### 3.1 青贮玉米粉碎物料压缩特性

中国是世界养殖生产大国之一，也是饲料原料需求大国。李艳等<sup>[21]</sup>研究表明：玉米秸秆经发酵后，粗蛋白质和粗纤维含量均增加，秸秆中木质素、半纤维素和纤维素含量都显著降低，可有效改善饲料适口性及安全性。在推广种养结合循

环生产模式中，科学推进青贮饲料技术与装备是重要举措之一。国内外对青贮玉米压缩打捆关键部件的研究和设计手段分为两类：一是将全株玉米秸秆的生物性状与其力学特性相关联，探索其机械力学特性描述模型，用于指导压缩装置的设计；二是应用统计学方法，以全株玉米秸秆的生物特性、收获期含水率、生长环境和机器结构的特定参数为影响因素，以损失率、含杂率和秸秆粉碎质量等为衡量指标分析收获效率，并依据试验数据对工作部件进行设计改进。

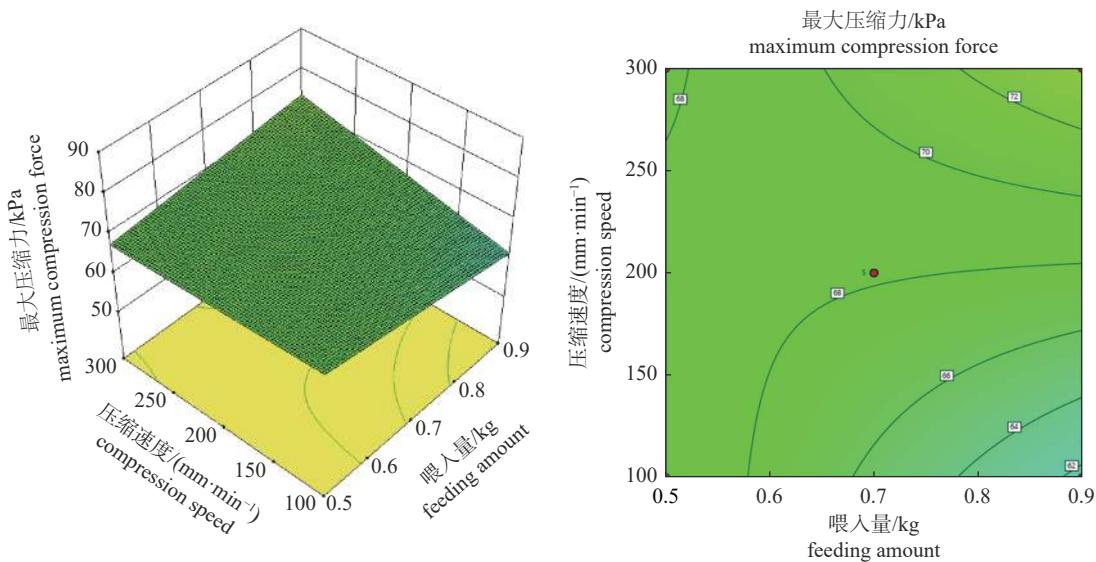


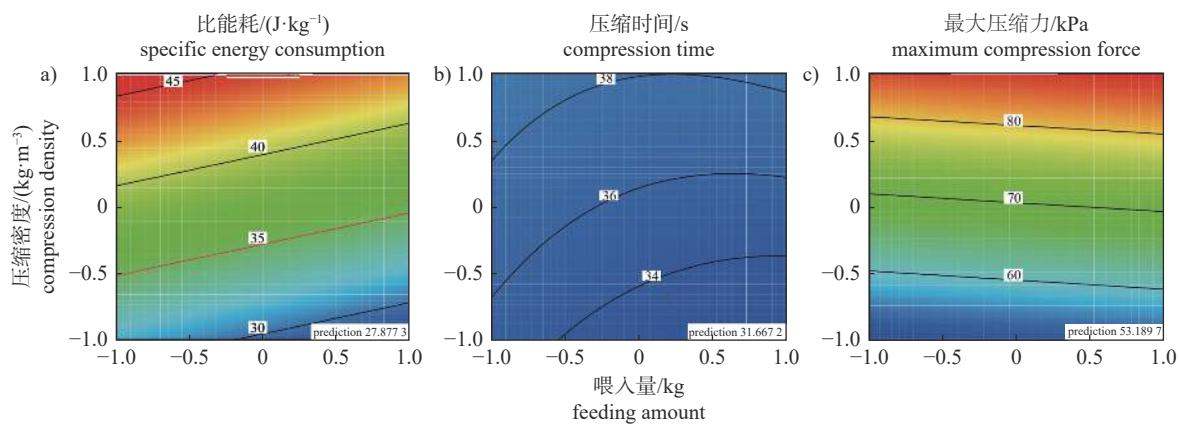
图8 喂入量与压缩速度对最大压缩力的交互效应

Fig. 8 Interaction effect of feed amount and compression speed on the maximum compression force

表6 优化约束条件设置

Tab. 6 Optimization constraint settings

试验因素及指标 test factors and indicators	优化目标 optimization objectives	最小值 minimum value	最大值 maximum value
喂入量/kg feeding amount	范围内 in scope	0.50	0.90
压缩密度/(kg·m⁻³) compression density	范围内 in scope	550	650
压缩速度/(mm·min⁻¹) compression speed	范围内 in scope	100	300
比能耗/(J·kg⁻¹) specific energy consumption	最小值 minimum value	27.80	45.26
压缩时间/s compression time	最小值 minimum value	29.10	99.00
最大压缩力/kPa maximum compression force	最小值 minimum value	50.33	87.91



注: a) 比能耗优化; b) 压缩时间优化; c) 最大压缩力优化。

Note: a) optimization of specific energy consumption; b) optimization of compression time; c) optimization of maximum compression force.

图9 最佳参数优化过程

Fig. 9 Optimization process for optimal parameters

目前, 对青贮玉米秸秆机械力学的特性研究较广泛。陈美舟等<sup>[14]</sup>对全株青贮玉米的节间、节部和带苞叶果穗进行了不同加载速度和加载方向

的局部压缩试验; 李心平等<sup>[22]</sup>测试了玉米果穗在不同含水率条件下的抗压特性; 刑芳<sup>[15]</sup>以干玉米秸秆为试验对象, 测试了含水率、取样位置和加

表7 优化结果验证试验  
Tab. 7 Validation test of optimization results

试验号 test number	比能耗/(J·kg <sup>-1</sup> ) specific energy consumption	压缩时间/s compression time	最大压缩力/kPa maximum compression force
1	23.59	32.90	48.73
2	24.93	33.63	50.17
3	24.16	32.18	49.75
4	33.97	29.94	58.86
5	32.32	30.58	56.42
6	31.95	30.75	57.38
7	25.93	32.23	51.23
8	29.13	35.40	46.82
9	30.27	29.88	55.33
10	28.34	34.49	48.46
平均值 average	28.50	32.23	52.32

载速度对秸秆抗压强度的影响；朱振伟等<sup>[16]</sup>对玉米秸秆的各个部位进行拉伸和压缩试验；刘立意等<sup>[23]</sup>研究了不同压缩条件对玉米秸秆裂纹和机器功耗的影响；刘禹辰等<sup>[24]</sup>研究发现青贮玉米秸秆内穰与外表皮木质部的力学特性差异显著；赵玉清等<sup>[25-26]</sup>对青贮玉米全株各部分的纵向和横向力学特性进行了试验研究。针对压缩打捆作业环节中青贮玉米粉碎物料压缩特性的研究相对较少。刘晓东<sup>[27]</sup>通过单因素试验获得了影响青贮玉米秸秆圆捆应力松弛的主要因素及其影响规律和取值范围，同时得到了青贮玉米秸秆圆捆的应力松弛模型；宫泽奇<sup>[28]</sup>提出了一种螺旋致密成型工艺，并进行了螺旋压缩物料压缩力和径向应力全过程规律试验研究以及螺旋压缩单元压缩力变化规律研究，开展了不同含水率、不同切断长度和不同压缩密度条件下物料松弛特性研究以及不同机械化加工工艺参数对螺旋压缩装置的功耗影响研究。类似的农业物料压缩特性试验研究还有如马斌等<sup>[29]</sup>通过对相同初始密度、压缩方向和压缩速度条件下进行二次高密压缩试验，获得了不同含水率苜蓿干草的高密压缩特性曲线；杜晓雪<sup>[13]</sup>研究发现：青贮甜高粱秸秆粉碎物料的压缩密度越大，其可压缩性越差。本研究利用万能试验机和自制压缩装置，设计3因素3水平二次回归正交试验测定了青贮玉米粉碎物料压缩过程中的力学特性参数，为青贮玉米压缩打捆机的设计提供了依据。

### 3.2 青贮玉米粉碎物料压缩作业参数对压缩性能的影响

农业机械装备的作业质量、作业效率和作业效益主要取决于整机结构方案和关键部件的设计制造，但是其运行参数也显著影响其作业性能。刘晓东<sup>[27]</sup>为提高青贮玉米秸秆圆捆的成型率和青贮品质、降低成本，通过响应曲面法设计了参数优化试验，各因素对应力迅速衰减时间和平衡弹性模量影响的主次顺序均为：含水率>缠网松紧度>喂入次数；宫泽奇<sup>[28]</sup>研究发现：在不同含水率条件下，各因素对螺旋压缩装置总功耗的影响排序为压缩密度>行进速度>切断长度，压缩密度为400 kg/m<sup>3</sup>、切断长度为30 mm、含水率为65%、行进速度为0.6 m/s时压缩装置总功耗最小；吴海辉<sup>[30]</sup>以黄贮玉米秸秆粉碎物料的喂入量为试验因素，对压缩室内压缩力与压缩密度之间的关系进行研究，得到了压缩力随压缩密度的增加而不断增加的结论。

本研究中，各试验因素对比能耗的影响顺序为压缩密度>喂入量>压缩速度，对压缩时间的影响顺序为压缩速度>压缩密度>喂入量，对最大压缩力的影响顺序为压缩密度>压缩速度>喂入量。从青贮玉米饲料品质角度考虑，压缩密度越大，发酵效果越好，更有利于保证青贮饲料质量。但是，从青贮玉米压缩打捆机的设计角度而言，压缩密度越大，所需机械动力越大，结构越复杂，其使用的经济性和适用性会变差。在一定的作业条件下，通过试验研究得到相对较优的作业参数组合，对青贮玉米压缩打捆机的设计具有较大的理论意义和实际应用价值。

## 4 结论

青贮玉米粉碎物料压缩过程中，压缩密度对比能耗的影响极显著，喂入量对比能耗的影响显著；喂入量与压缩密度交互作用、喂入量与压缩速度交互作用对压缩时间的影响显著；喂入量与压缩速度交互作用对最大压缩力的影响极显著。青贮玉米粉碎物料压缩过程的最佳因素水平组合为喂入量0.90 kg、压缩密度550 kg/m<sup>3</sup>、压缩速度245.50 mm/min，对应的比能耗、压缩时间和最大压缩力分别为27.88 J/kg、31.67 s和53.18 kPa。

## [参考文献]

- [1] 侯燕红, 张一桦, 周凯, 等. 不同青贮玉米品种农艺性状及营养价值评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(4): 604. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202201037](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202201037).
- [2] 叶瑞卿, 薛世明, 杨国荣, 等. 云南适种高产优质青贮玉米品种筛选试验研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2012, 27(4): 467. DOI: [10.3969/j.issn.1004-390X\(n\).2012.04.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-390X(n).2012.04.002).
- [3] 宗亚倩, 鲁洪智, 段新慧, 等. 青贮玉米中乳酸菌的分离和鉴定[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(6): 1071. DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).202009016](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).202009016).
- [4] 耿端阳, 孙延武, 牟孝栋, 等. 基于差速辊的青贮玉米籽粒破碎仿真试验及优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(3): 693. DOI: [10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200812](https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20200812).
- [5] 王国伟, 朱庆辉, 于海业, 等. 基于数字化农机装备的青贮饲料可追溯系统[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(1): 242. DOI: [10.13229/j.cnki.jdxbgxb20210392](https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20210392).
- [6] 段珍, 张红梅, 张建华, 等. 浅谈青贮玉米品种的选择[J]. 饲料研究, 2017, 40(2): 4. DOI: [10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2017.09.002](https://doi.org/10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2017.09.002).
- [7] 刘组钊, 刘杰, 何静. 青贮玉米的概念分类及高产栽培技术[J]. 农业与技术, 2019, 39(2): 98. DOI: [10.19754/j.nyyjs.20190130055](https://doi.org/10.19754/j.nyyjs.20190130055).
- [8] 张钰, 田海清, 赵志宇, 等. 基于改进离散粒子群算法的青贮玉米原料含水率高光谱检测[J]. 农业工程学报, 2019, 35(1): 285. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2019.01.035](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2019.01.035).
- [9] 韩战强, 宋艳丽, 王志方. 影响青贮玉米品质因素的研究进展[J]. 饲料研究, 2020, 43(1): 106. DOI: [10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2020.01.029](https://doi.org/10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2020.01.029).
- [10] 王帅, 张彬, 李显旺, 等. 玉米鲜秸秆力学特性试验研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(3): 171. DOI: [10.13427/j.cnki.njyi.2018.03.034](https://doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.2018.03.034).
- [11] 刘富强, 李景彬, 坎杂, 等. 粉碎玉米秸秆压缩特性试验研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(1): 169. DOI: [10.13427/j.cnki.njyi.2019.01.030](https://doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.2019.01.030).
- [12] 张锋伟, 宋学锋, 张雪坤, 等. 玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 58. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2019.09.007](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2019.09.007).
- [13] 杜晓雪. 青贮甜高粱秸秆压缩及应力松弛特性试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [14] 陈美舟, 徐广飞, 宋志才, 等. 全株青贮玉米径向局部压缩特性试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 6(1): 1. DOI: [10.13229/j.cnki.jdxbgxb20201008](https://doi.org/10.13229/j.cnki.jdxbgxb20201008).
- [15] 邢芳. 玉米秸秆物理机械特性试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [16] 朱振伟, 张开飞, 李赫, 等. 玉米秸秆力学特性的研究[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(12): 178. DOI: [10.15889/j.issn.1002-1302.2017.12.047](https://doi.org/10.15889/j.issn.1002-1302.2017.12.047).
- [17] 王旭哲, 张凡凡, 马春晖, 等. 压实度对玉米青贮开窖后营养品质及有氧稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(6): 300. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2018.06.038](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.06.038).
- [18] 盛凯, 冉毅, 艾平, 等. 不同压缩比和青贮时间下玉米秸秆厌氧发酵性能研究[J]. 农业工程学报, 2020, 51(7): 338. DOI: [10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.038](https://doi.org/10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.038).
- [19] 王秀文, 柴智, 王颖莉. 响应面优化复方黄芪饲料添加提取工艺与体外抗氧化作用研究[J]. 饲料研究, 2021, 44(3): 53. DOI: [10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2021.03.013](https://doi.org/10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2021.03.013).
- [20] 王亚玲, 陶然, 梁峰源, 等. 响应面法优化中药降脂复方多糖提取工艺及抗氧化研究[J]. 当代化工, 2020, 49(3): 555. DOI: [10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2020.03.012](https://doi.org/10.13840/j.cnki.cn21-1457/tq.2020.03.012).
- [21] 李艳, 李彤, 张丹娜, 等. 发酵饲料在畜牧养殖业中的应用[J]. 中国畜禽种业, 2021, 17(12): 86. DOI: [10.3969/j.issn.1673-4556.2021.12.040](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-4556.2021.12.040).
- [22] 李心平, 熊师, 耿令新, 等. 含水率对玉米果穗抗压特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(2): 25. DOI: [10.11975/j.issn.1002-6819.2018.02.004](https://doi.org/10.11975/j.issn.1002-6819.2018.02.004).
- [23] 刘立意, 邵媛媛, 董欣, 等. 玉米秸秆压缩加载条件对其裂纹和机器功耗的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 163. DOI: [10.3969/j.issn.1002-6819.2014.03.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-6819.2014.03.022).
- [24] 刘禹辰, 张锋伟, 宋学锋, 等. 基于离散元法玉米秸秆双层粘结模型力学特性研究[J]. 东北农业大学学报, 2022, 53(1): 45. DOI: [10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2022.01.006](https://doi.org/10.19720/j.cnki.issn.1005-9369.2022.01.006).
- [25] 赵玉清, 赵勇, 杨志, 等. 青贮玉米秸秆径向和轴向剪切特性试验研究[J]. 饲料研究, 2021, 44(17): 93. DOI: [10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2021.17.022](https://doi.org/10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2021.17.022).
- [26] 赵玉清, 方佳梦, 杨志, 等. 青贮玉米植株剪切力学特性试验研究[J]. 饲料研究, 2021, 44(3): 93. DOI: [10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2021.03.022](https://doi.org/10.13557/j.cnki.issn1002-2813.2021.03.022).
- [27] 刘晓东. 青贮玉米秸秆圆捆应力松弛特性试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- [28] 宫泽奇. 青贮玉米秸秆螺旋致密成型工艺及压缩过程流变学试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [29] 马斌, 韩少平, 贺成柱, 等. 不同含水率苜蓿干草的高密压缩成型特性的试验研究[J]. 农机化研究, 2022, 44(5): 152. DOI: [10.13427/j.cnki.njyi.2022.05.028](https://doi.org/10.13427/j.cnki.njyi.2022.05.028).
- [30] 吴海辉. 玉米秸秆高密度压缩过程中的压缩及应力松弛特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.

责任编辑: 何馨成