doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.020

锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆机理分析与参数优化

王德福[1,2]　王　沫[1,2]　李利桥[1,2]

(1.东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030;2.农业部生猪养殖设施工程重点实验室,哈尔滨 150030)

摘要:对锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆过程进行分析,并对其粉碎性能进行试验研究。借助高速摄像技术,得出玉米秸秆主要粉碎形式为:打击粉碎、撞击粉碎、搓擦粉碎,且在粉碎过程中打击粉碎与搓擦粉碎影响较大,并得出锤片末端线速度(主轴转速)、玉米秸秆含水率对锤片式粉碎机粉碎性能影响较大。在此基础上,以影响锤片式粉碎机粉碎性能的主要因素——主轴转速、含水率、筛孔直径为试验因素,以度电产量作为评价指标进行试验研究。试验结果表明,各因素对度电产量影响由大到小顺序为筛孔直径、含水率、主轴转速。选取筛孔直径 6 mm、含水率 10% ~50%、主轴转速 2 000 ~3 500 r/min,以度电产量最大为目标的参数优化试验表明:当含水率 10% ~32% 时,主轴转速宜 2 000 r/min;当含水率 33% ~50% 时,主轴转速宜 2 020 ~2 452 r/min,且随着含水率的增大而增大。

关键词:玉米秸秆;锤片式粉碎机;机理分析;参数优化

中图分类号:S817.12　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)11-0165-07

Mechanism Analysis and Parameter Optimization of Hammer Mill for Corn Stalk

WANG Defu[1,2]　WANG Mo[1,2]　LI Liqiao[1,2]

(1. *College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*

2. *Key Laboratory of Pig-breeding Facilities Engineering*, *Ministry of Agriculture*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: As the important resource of biomas energy convension and feed utilization, corn stalk needs to be smashed to improve the effective utilization rate. In order to study the performance of hammer mill for corn stalk, the process and performance of smashing corn stalk was studied by hammer mill. Based on the analysis of smashing process by high-speed photography, main smashing types of corn stalk were decided as following: impact smashing, hit smashing and rub smashing, and the impact smashing and rub smashing had greater influences, it could be obtained that the linear velocity of the hammer (the rotation speed) and moisture content of corn stalk had greater influences on the smashing performance of the hammer mill. Then, the main factors that affected the smashing performance of hammer mill (the rotation speed, moisture content of corn stalk and screen size) were chosen as the experimental factors, the output per kW·h was decided as the evaluation index, and experiments were conducted. The experimental results showed that the sequence of various factors' influence on the output per kW·h was screen size, moisture content of corn stalk and the rotation speed. Parameters were optimized based on regression models. With the maximum output per kW·h as the optimization object, the ranges of the factors were chosen as follows: the moisture content of 10% ~50%, the rotation speed of 2 000 ~3 500 r/min and the screen size was 6mm. Parameter optimization results showed that when the moisture content of corn stalk was 10% ~32%, the rotation speed was 2 000 r/min, when the moisture content of corn stalk was 33% ~50%, the rotation speed was 2 020 ~2 452 r/min, and the rotation speed was increased with the increase of moisture content of corn stalk. The research can provide theoretical and technical basis for design of hammer mill for corn stalk.

Key words: corn stalk; hammer mill; mechanism analysis; parameter optimization

收稿日期:2017-01-17　修回日期:2017-03-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0701300)和国家自然科学基金项目(51405076)

作者简介:王德福(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事畜牧机械研究,E-mail:dfwang0203@163.com

引言

我国玉米秸秆年产量已达约 2.4 亿 t[1-3],目前其主要利用技术包括饲料化技术、固化成型燃料技术、气化技术和干馏炭化技术等[4-5],玉米秸秆利用时都需要进行粉碎加工[6],因此,研究玉米秸秆的粉碎性能非常必要。

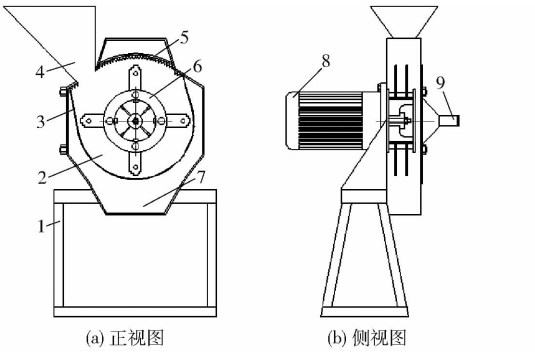
国外学者主要是对锤片式粉碎机粉碎理论及粉碎性能进行研究[7-8],其中 ZASELSKII 等[9]利用高速摄像等技术研究在粉碎室内锤片对物料粉碎作用过程,结果表明,物料受到的并非正面打击而是偏心打击,因此物料在粉碎过程中粉碎机耗能较高。而国内学者对锤片式粉碎机的研究以结构改进及其应用试验居多[10-14],其中田海清等[15]设计分段圆弧筛片代替环形平筛,使锤筛间隙不断变化,破坏物料环流层,改善锤片式粉碎机性能,过度粉碎也得到了改善。然而,国内外的研究主要是针对粉碎谷物类物料进行的,对锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆的机理研究较少。鉴于锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆时存在动力消耗大、湿秸秆加工性能差等问题,玉米秸秆粉碎机理及粉碎性能研究亟待开展。

本文利用自行设计的玉米秸秆锤片式粉碎机,借助高速摄像技术对其粉碎机理进行分析,并在此基础上开展玉米秸秆粉碎性能试验,以确定主要因素对锤片式粉碎机粉碎性能的影响规律及其优化参数组合,为玉米秸秆粉碎机的研发提供理论与技术支持。

1 总体结构和工作原理

玉米秸秆锤片式粉碎机主要由进料口、粉碎室、出料口、电动机等组成,如图 1 所示,其总体结构尺寸为 560 mm × 530 mm × 1 300 mm,配套动力为 4 kW。粉碎室由转子、筛片、齿板等组成,粉碎室宽度为 100 mm,筛片包角为 270°,齿板包角为 70°(加强撞击与搓擦作用),转子的直径为 360 mm。转子主要由锤片、锤架体、销轴等组成,锤片通过销轴铰接在锤架体上,锤片设计为阶梯型结构(材质为 65Mn,加强打击作用),如图 2 所示。粉碎机前挡板采用透明 PVC 材料制成,以利于观测玉米秸秆的粉碎过程。

工作时,玉米秸秆由进料口进入粉碎室,首先由高速旋转的转子带动锤片对其进行打击、搓擦,而后进一步受到围绕粉碎室设置的筛片、齿板的撞击与搓擦作用,实现粉碎加工,当玉米秸秆的粒度小于筛片筛孔直径时透过筛片由出料口排出。

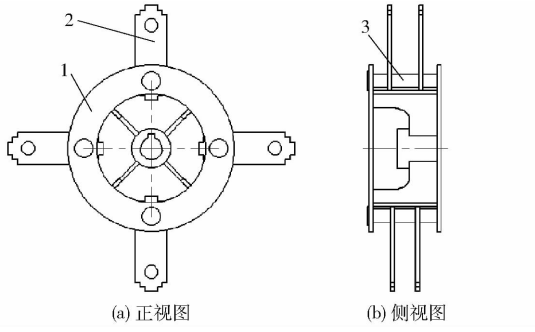


(a) 正视图 (b) 侧视图

图 1 锤片式粉碎机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of hammer mill

1. 机架 2. 粉碎室 3. 筛片 4. 进料口 5. 齿板 6. 转子 7. 出料口 8. 电动机 9. 进风口



(a) 正视图 (b) 侧视图

图 2 转子示意图

Fig. 2 Diagram of rotor

1. 锤架体 2. 阶梯型锤片 3. 销轴

2 玉米秸秆粉碎机理分析

通过高速摄像(美国 Vision Research 公司生产的 Phantom V5.1 - 4G 型高速摄像机,本文选择 1 200 帧/s)分析,玉米秸秆的主要粉碎形式归纳为打击粉碎、撞击粉碎与搓擦粉碎 3 种。打击粉碎是指高速旋转的锤片打击玉米秸秆而发生的粉碎形式,撞击粉碎是指玉米秸秆被锤片打击后撞击到筛片、齿板上而发生的粉碎形式,搓擦粉碎是指玉米秸秆与筛片、锤片、齿板之间搓擦而发生的粉碎形式。

2.1 打击粉碎

玉米秸秆由进料口进入粉碎室,受到高速旋转的锤片打击,如图 3 所示。不考虑锤片自重和气流阻力等的影响,根据冲量-动量定理可知

$$P\Delta t = m(v_1 - v_2) \tag{1}$$

即

$$P = \frac{m(v_1 - v_2)}{\Delta t} \tag{2}$$

式中 P——锤片对玉米秸秆单元的打击力,N

Δt——打击作用时间,s

m——玉米秸秆单元质量,kg

v_1——锤片末端线速度,m/s

v_2——玉米秸秆单元受打击前的速度,m/s

由式(2)可知,当玉米秸秆单元质量 m 一定时,

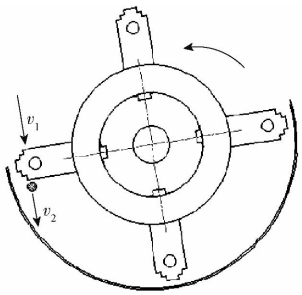


图 3　打击作用示意图

Fig. 3　Diagram of impact smashing

锤片对玉米秸秆单元的相对速度越大，则其受到的打击力越大；打击作用时间 Δt 越小，玉米秸秆受到的打击力越大；而打击作用时间 Δt 取决于玉米秸秆的硬度，硬度高则打击时间短；硬度低则打击时间长。当打击力超过玉米秸秆的内聚力时，玉米秸秆发生破碎。

玉米秸秆受锤片打击的形式如图 4 所示（图中 K 表示锤片，下文同），主轴转速为 2 500 r/min，含水率为 10%。玉米秸秆受锤片打击形式有垂直正心打击（图 4a）、垂直偏心打击（图 4b）、平行打击（图 4c）、倾斜打击（图 4d）。垂直正心打击的粉碎效果最好，但是在粉碎过程中大部分是垂直偏心打击或倾斜打击形式。当发生垂直偏心打击或倾斜打击时，锤片的动能一部分转换成玉米秸秆自转的能量，降低了玉米秸秆有效打击作用。

玉米秸秆受打击粉碎的效果与其含水率密切相关。当主轴转速为 2 500 r/min、含水率为 10%、锤片倾斜打击时，玉米秸秆粉碎成细小颗粒，如图 5a 所示；当含水率为 50%、锤片倾斜打击时，玉米秸秆只是裂开并没有粉碎，如图 5b 所示。这是由于玉米秸秆的内聚力与其物料特性有关，根据文献[16－17]，弹性模量是玉米秸秆机械特性的关键指标，随着含水率的增大，其弹性模量变小，玉米秸秆的弹性提高，其内聚力提高，不容易破碎。

2.2　撞击粉碎

玉米秸秆受锤片打击之后，以较高的速度向筛片或齿板撞击，当撞击力大于其内聚力时产生进一步粉碎。玉米秸秆单元撞击力学分析如图 6 所示。根据冲量-动量定理，玉米秸秆单元与撞击面的撞击力为

$$N_1 = \frac{m'}{\Delta t_1}(1+\lambda)v_n\cos\alpha \tag{3}$$

式中　N_1——玉米秸秆单元与撞击面的撞击力，N

v_n——玉米秸秆单元撞击前的速度，m/s

m'——玉米秸秆单元撞击前的质量，kg

Δt_1——撞击作用时间，s

λ——玉米秸秆弹性恢复系数

α——玉米秸秆对撞击面的入射角，(°)

由式(3)可知，在锤片式粉碎机结构不变的情况下，玉米秸秆单元与撞击面的平均正撞击力主要受到撞击前的速度 v_n 和玉米秸秆的弹性恢复系数 λ 的影响。而玉米秸秆的弹性恢复系数 λ 与其含水率有关。由于玉米秸秆属于纤维性物料，弹塑性变形较大，其与撞击面撞击后大部分反弹出去，只有少部分得到粉碎，因此，撞击粉碎不是玉米秸秆的主要粉碎形式。

2.3　搓擦粉碎

由于玉米秸秆与锤片、筛片、齿板都存在相对运动，由此受到搓擦撕扯作用而进一步粉碎。搓擦粉碎形式主要有：玉米秸秆分别与锤片、筛片、齿板之间的搓擦粉碎；玉米秸秆与锤片、筛片共同作用的挤

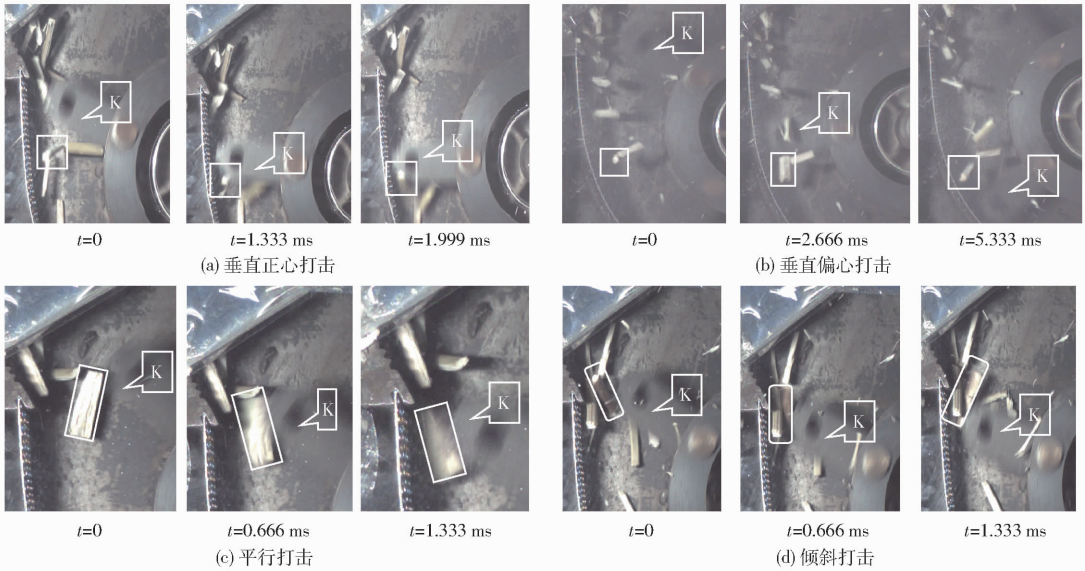


图 4　打击形式高速摄像

Fig. 4　High-speed images of impact type



(a) 含水率为10% (b) 含水率为50%

图 5 不同含水率玉米秸秆打击粉碎过程

Fig. 5 Impact process for different moisture contents of corn stalk

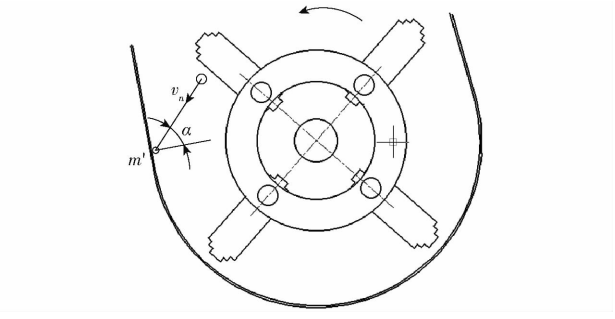


图 6 玉米秸秆单元撞击力学分析

Fig. 6 Force analysis of corn stalk in hit smashing

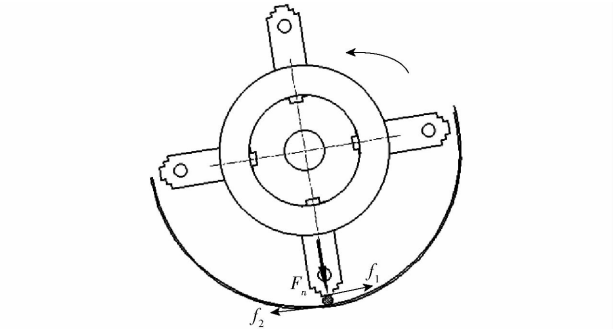


图 7 玉米秸秆单元挤压搓擦受力分析

Fig. 7 Force analysis of corn stalk under rubbing

压搓擦。其中,挤压搓擦粉碎最有效。

玉米秸秆单元挤压搓擦粉碎受力分析如图 7 所示。锤片末端和筛片表面分别对玉米秸秆单元产生挤压搓擦作用,其搓擦力分别为

$$f_1 = \mu_1 F_n \tag{4}$$

$$f_2 = \mu_2 \left(m \frac{v^2}{D+\delta} + F_n \right) \tag{5}$$

式中 f_1——玉米秸秆单元与锤片的搓擦力,N

f_2——玉米秸秆单元与筛片的搓擦力,N

F_n——锤片对玉米秸秆单元的挤压力,N

μ_1——玉米秸秆单元与锤片之间的摩擦因数

μ_2——玉米秸秆单元与筛片之间的摩擦因数

v——玉米秸秆单元的速度,m/s

D——转子直径,m δ——锤筛间隙,m

玉米秸秆受到搓擦力 f_1 和 f_2 的挤压搓擦作用,当搓擦力大于玉米秸秆内聚力时,玉米秸秆将产生破碎。不同含水率情况下,挤压搓擦粉碎过程如图 8 所示。当主轴转速为 2 500 r/min、含水率为 10% 时,玉米秸秆能够被搓擦成很细小粒度,如图 8a 所示;当含水率为 50% 时,玉米秸秆大部分先被撕裂,进而逐渐粉碎,如图 8b 所示。

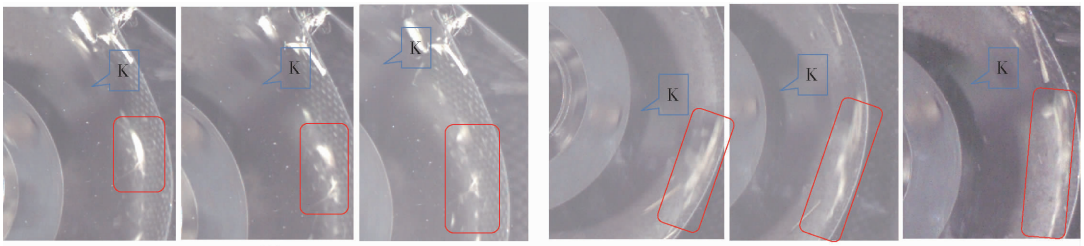
3 粉碎性能试验与参数优化

3.1 试验材料

本试验采用刚收获的玉米秸秆(含水率 60% ~ 70%),经过秸秆揉切机切碎的粒度为 19 ~ 22 mm,不同含水率的秸秆通过自然干燥获得。

3.2 试验方案

由文献[18]及玉米秸秆粉碎机理分析可知,影响锤片式粉碎机粉碎性能的因素主要包括锤片末端线速度、玉米秸秆含水率、筛片孔径等。由于玉米秸秆粉碎前,一般先经揉切机切碎,粒度通常为 19 ~ 22 mm,因此,玉米秸秆粒度不作为本文的试验因素。试验因素确定为:玉米秸秆含水率(%)、主轴转速(r/min)、筛孔直径(mm),并以度电产量为试验指标,对该锤片式粉碎机进行试验研究。



(a) 含水率为10% (b) 含水率为50%

图 8 不同含水率秸秆的挤压搓擦粉碎过程

Fig. 8 Rubbing process for corn stalk with different moisture contents

根据预试验及实际生产情况确定试验因素范围为：玉米秸秆含水率 10% ~50%、主轴转速 2 000 ~ 3 500 r/min、筛孔直径 2 ~ 10 mm。本试验采用 3 因素 5 水平二次正交旋转中心组合试验方法，各试验因素编码如表 1 所示。

表 1　试验因素编码

Tab. 1　Coding of experimental factors

编码	试验因素		
	含水率 x_1/%	主轴转速 x_2/(r·min^{-1})	筛孔直径 x_3/mm
1.682	50.00	3 500.00	10
1	41.89	3 195.90	8.38(8)
0	30.00	2 750.00	6
-1	18.11	2 304.10	3.62(4)
-1.682	10.00	2 000.00	2

注：括号内的参数为试验所取参数，根据实际操作的可行性对计算结果进行调整，取括号内的参数。

参照国家标准 GB/T 6971—2007《饲料粉碎机试验方法》，选取粉碎机的度电产量为试验评价指标。在粉碎机负荷程度满足规定工况条件下，待粉碎机达到正常工作状态开始测试，试验时间为 10 min。度电产量的计算公式为

$$G = \frac{Q_c}{G_n} \tag{6}$$

式中　G——度电产量，kg/(kW·h)

Q_c——工作时间内的作业量，kg

G_n——工作时间内耗电量，kW·h

3.3　试验结果与分析

试验结果如表 2 所示，A、B、C 表示各因素编码值。度电产量方差分析结果如表 3 所示。

由表 3 可知，度电产量整体模型为极显著（$P < 0.01$），失拟项检验结果为不显著（$P > 0.1$），模型决定系数为 $R^2 = 0.979\,9$，表明试验正确有效，对指标有显著影响的因素均已考虑，可以得到拟合良好、有实际分析意义的回归方程[19]。

其中含水率 A、主轴转速 B 和筛孔直径 C 对度电产量的影响强度最大，主轴转速与筛孔直径的交互项 BC、含水率的二次项 A^2 和主轴转速的二次项 B^2 对度电产量的影响均为极显著，含水率与主轴转速的交互项 AB 对度电产量的影响为显著，其他各项影响均为不显著，二次正交旋转组合设计具有正交性，将不显著项剔除，经 Design-Expert 8.0.6 软件重新计算，得到度电产量 G 的回归数学模型为

$$G = 24.84 - 7.60A - 5.50B + 8.86C + 2.06AB - 2.19BC + 1.99A^2 - 1.51B^2 \tag{7}$$

表 2　试验方案与结果

Tab. 2　Experimental design and results

序号	含水率 A	主轴转速 B	筛孔直径 C	度电产量 G/(kg·(kW·h)$^{-1}$)
1	1	1	1	19.90
2	1	1	-1	7.36
3	1	-1	1	31.74
4	1	-1	-1	11.96
5	-1	1	1	31.72
6	-1	1	-1	17.75
7	-1	-1	1	53.33
8	-1	-1	-1	29.09
9	1.682	0	0	17.67
10	-1.682	0	0	43.15
11	0	1.682	0	12.87
12	0	-1.682	0	28.13
13	0	0	1.682	37.19
14	0	0	-1.682	7.21
15	0	0	0	24.99
16	0	0	0	23.01
17	0	0	0	26.77
18	0	0	0	25.35
19	0	0	0	27.90
20	0	0	0	23.58
21	0	0	0	26.65
22	0	0	0	22.24
23	0	0	0	28.24

表 3　度电产量回归模型的方差分析

Tab. 3　ANOVA on regression equation model

方差来源	自由度	均方	F	P	显著性
模型	9	273.61	70.41	<0.000 1	***
A	1	788.67	202.95	<0.000 1	***
B	1	412.48	106.14	<0.000 1	***
C	1	1071.18	275.65	<0.000 1	***
AB	1	34.07	8.77	0.011 0	**
AC	1	4.34	1.12	0.310 0	
BC	1	38.33	9.86	0.007 8	***
A^2	1	62.53	16.09	0.001 5	***
B^2	1	36.70	9.45	0.008 9	***
C^2	1	13.41	3.45	0.086 0	
残差	13	3.89			
失拟差	5	2.72	0.59	0.710 1	
总和	22				

注：*** 表示极显著（$P < 0.01$）；** 表示显著（$0.01 < P < 0.05$）。

根据方差分析表 3，各因素的一次项 F 值及回归数学模型中的一次项系数可知，各影响因素对度电产量的影响由大到小为筛孔直径 C、含水率 A、主轴转速 B。为了进一步分析各影响因素对度电产量的影响规律，两因素 AB、BC 的交互作用如图 9、10 所示。

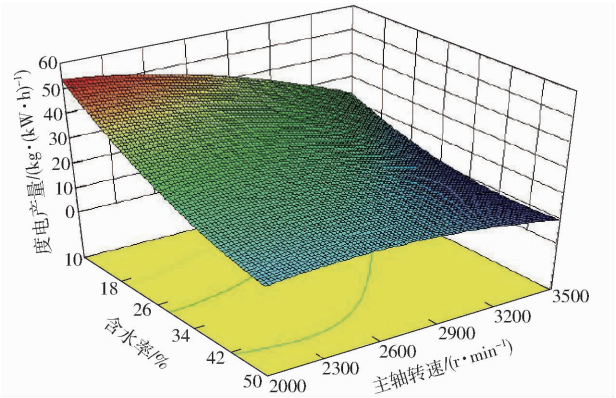


图 9 含水率与主轴转速交互作用对性能的影响

Fig. 9 Interact effect of moisture content and rotation speed

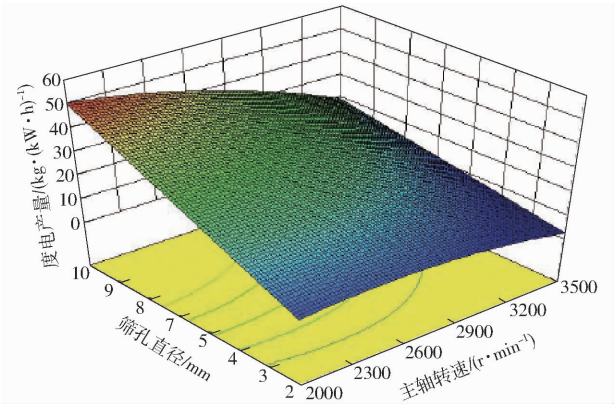


图 10 主轴转速与筛孔直径交互作用对性能的影响

Fig. 10 Interact effect of rotation speed and screen size

由图 9 可知,当筛孔直径为 6 mm 时,度电产量分别与含水率和主轴转速呈二次曲线关系。当主轴转速为 2 000 r/min 时,随着含水率的增加,度电产量先减小后趋于平缓;这是由于,当含水率较低时(<30%),玉米秸秆脆性变形占主导,在粉碎过程中容易粉碎;当含水率升高时(>30%),玉米秸秆具有一定的弹性,其剪切强度也有所提高,在粉碎过程中相对不易粉碎;另外玉米秸秆在粉碎时,由于湿玉米秸秆粉碎出的细粉易堵塞筛孔,减少排料。当含水率较高时(>30%),随着主轴转速的增大,度电产量先增大后减小且变化趋势平缓;当含水率较低时(<30%),随着主轴转速的增大,度电产量逐渐减小。说明含水率对粉碎机度电产量的影响更显著。

由图 10 可知,当含水率为 30% 时,度电产量分别与筛孔直径呈线性关系、与主轴转速呈二次曲线关系。当筛孔直径较小时,随着主轴转速的增大,度电产量先增大后减小且变化趋势平缓;这是由于主轴转速的增大,锤片对玉米秸秆的打击力变大,玉米秸秆容易被粉碎,但主轴转速继续增大时,粉碎机的能耗也随之变大且变化的趋势更显著;当筛孔直径较大时,随着主轴转速的增大,度电产量逐渐减小,这说明筛孔直径对粉碎机度电产量的影响更显著。

由图 9 和图 10 对比分析,筛孔直径对粉碎机度电产量的影响明显高于另外 2 个因素,含水率对粉碎机度电产量的影响明显高于主轴转速的影响。

3.4 参数优化与试验验证

通过响应面分析目标参数可知,粉碎机达到较高的度电产量,需要较高主轴转速、较低含水率和较大筛孔直径。由于各因素对目标参数影响不一致,因此需要综合考虑。玉米秸秆粉碎后,为了能满足后续的利用要求,固定筛孔直径为 6 mm[20],以含水率为自变量,度电产量最大为目标函数,求出对应的主轴转速。利用 Design-Expert 8.0.6 软件的优化模块,对回归模型(式(7))进行有约束目标优化求解,优化目标函数为:

$$\begin{aligned} &\text{目标函数} \quad F=\max\ G(A,B,C) \\ &\text{约束函数} \quad -1.682\leqslant A\leqslant 1.682 \\ &\qquad\quad -1.682\leqslant B\leqslant 1.682 \\ &\qquad\quad C=0 \end{aligned} \tag{8}$$

经 Numerical optimization 项目优化,得到各因素优化参数组合,如图 11 所示。

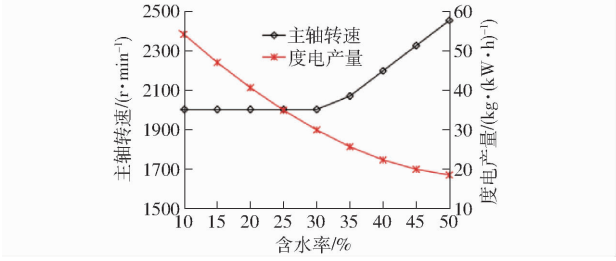


图 11 优化参数组合

Fig. 11 Combination of optimized parameters

由图 11 可知,当含水率为 10% ~32% 时,主轴转速宜 2 000 r/min;当含水率为 33% ~50% 时,主轴转速宜 2 020 ~2 452 r/min,且随着含水率的增大而增大。综上,可选取含水率 18.11%、主轴转速 2 000 r/min、筛孔直径 6 mm 进行粉碎机粉碎玉米秸秆性能验证试验,验证试验所使用材料如前文所述,试验重复 5 次,得到度电产量为 42.35 kg/(kW·h)。试验结果与响应面优化间的误差均在 5% 以内,说明试验获得的参数模型可靠,优化结果可信度高。

4 结论

(1)由玉米秸秆粉碎过程分析及高速摄像研究可知,玉米秸秆主要粉碎形式为:打击粉碎、撞击粉碎、搓擦粉碎,且在粉碎过程中打击粉碎与搓擦粉碎影响最大,并确定锤片末端线速度、含水率对玉米秸秆粉碎性能影响较大。

(2)通过粉碎性能试验研究,确定各因素对度电产量影响由大到小顺序为筛孔直径、含水率、主轴

转速。建立了各因素对度电产量影响的数学模型，分析了各因素的影响规律。以度电产量最大为目标的参数优化试验表明：固定筛孔直径 6 mm，当含水率 10% ~32% 时，主轴转速宜 2 000 r/min；当含水率 33% ~50% 时，主轴转速宜 2 020 ~2 452 r/min，且随着含水率的增大而增大。

参 考 文 献

1 尹冬敏，吴敏，李栋. 超微粉碎玉米秸秆微观结构与秸秆-淀粉共混膜蠕变特性[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(增刊)：297 - 304. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2016S046&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.046.
YIN Dongmin, WU Min, LI Dong. Microstructure of ball milling cornstalk and creep behavior of corn starch-based films[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 297 - 304. (in Chinese)

2 刘娅. 农作物秸秆治理与综合利用[J]. 辽宁农业科学，2003(1)：18 - 23.
LIU Ya. Treatment and comprehensive utilization of crop straw[J]. Liaoning Agricultural Science, 2003(1): 18 - 23. (in Chinese)

3 王琪，史宇亮，李济宁，等. 玉米秸秆板加工工艺优化[J]. 农业机械学报，2007，38(8)：199 - 201.

4 刘玉环，王应宽，阮榕生. 玉米秸秆常压快速液化最佳工艺参数研究[J/OL]. 农业机械学报，2012，43(8)：110 - 115. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20120821&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.021.
LIU Yuhuan, WANG Yingkuan, RUAN Rongsheng. Optimization of processing parameters for rapid liquefaction of corn stover under atmospheric pressure[J/OL]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(8): 110 - 115. (in Chinese)

5 刘宇，史同瑞. 玉米秸秆利用现状及其生物发酵技术研究进展[J]. 科技与实践，2014，50(6)：61 - 63.

6 李海军，戴益敏，张英. 玉米秸秆粉碎特性试验研究[J]. 节能，2007，26(4)：34 - 36.

7 SCHELL D J, HARWOOD C. Milling of lignocellulosic biomass: results of pilot-scale testing[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 1994, 45 - 46: 159 - 168.

8 VIGNEAULT C, ROTHWELL T M, BOURGEOIS G. Hammer mill grinding rate and energy requirement for thin and conventional hammers[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1992, 34(2): 203 - 208.

9 ZASELSKII V I, ZAITSEV G L, ZASELSKAYA T A. Influence of the granulometric composition of coal batch on the energy requirements of a hammer mill[J]. Coke and Chemistry, 2012, 55(7): 282 - 285.

10 耿令新，师清翔，刘师多，等. 玉米秸秆粉碎装置结构、运动参数对粉碎性能的影响[J]. 农业装备技术，2005，31(5)：18 - 21.

11 李燕燕. 锤片式粉碎机筛网结构设计与实验研究[D]. 包头：内蒙古科技大学，2015.
LI Yanyan. Design and experimental research on the screen of hammer mill[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)

12 朱新华，郭文川，阎晓利，等. 锤片式粉碎机的理论分析和结构改进措施探讨[J]. 西北农业大学学报，1999，27(1)：108 - 111.

13 付敏，李锐，马雷. 轴向振筛式秸秆粉碎机研制与试验[J]. 农业工程学报，2012，28(22)：16 - 22.
FU Min, LI Rui, MA Lei. Development and test of straw grinder with axial vibration screen type[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(22): 16 - 22. (in Chinese)

14 刘宪，吉颖风，李博强，等. 锤片式饲料粉碎机内碎物料分离速度的分析[J]. 农业机械学报，2004，35(1)：182 - 183.

15 田海清，屈丰富，刘伟峰，等. 锤片式粉碎机分段圆弧筛片设计与粉碎性能试验[J]. 农业机械学报，2011，42(4)：92 - 95.
TIAN Haiqing, QU Fengfu, LIU Weifeng, et al. Design and experiment of piecewise arc-shaped screen on hammer mill to grinding performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 92 - 95. (in Chinese)

16 陈争光，王德福，李利桥，等. 玉米秸秆皮拉伸和剪切特性试验[J]. 农业工程学报，2012，28(21)：59 - 65.
CHEN Zhengguang, WANG Defu, LI Liqiao, et al. Experiment on tensile and shearing characteristics of rind of corn stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(21): 59 - 65. (in Chinese)

17 王春芳，毛明，泮进明，等. 玉米秸秆取样条件对其弹性模量的影响研究[J]. 农业工程，2012，2(1)：48 - 53.
WANG Chunfang, MAO Ming, PAN Jinming, et al. Study of sampling conditions on the elastic modulus of corn straw[J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(1): 48 - 53. (in Chinese)

18 张雷，阮竞兰. 锤片式粉碎机工作性能影响因素及研究现状[J]. 包装与食品机械，2013，31(6)：55 - 57.
ZHANG Lei, RUAN Jinglan. The analysis of influence factor and research status of hammer mill[J]. Packaging and Food Machinery, 2013, 31(6): 55 - 57. (in Chinese)

19 王德福，陈争光，于克强. 玉米秸秆剥穗机构参数优化[J/OL]. 农业机械学报，2012，43(10)：90 - 94. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20121016&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.016.
WANG Defu, CHEN Zhengguang, YU Keqiang. Parameter optimization on separating mechanism for rind and pith of corn straw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 90 - 94. (in Chinese)

20 李在峰，雷廷宙，何晓峰，等. 玉米秸秆颗粒燃料致密成型电耗测试[J]. 农业工程学报，2006，22(增刊 1)：117 - 119.
LI Zaifeng, LEI Tingzhou, HE Xiaofeng, et al. Analysis on electricity cost of corn stalk granule compression molding[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(Supp.1): 117 - 119. (in Chinese)