

棉花秸秆双支撑切割性能试验

宋占华, 宋华鲁, 耿爱军, 李玉道, 闫银发, 李法德^{*}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018)

摘要: 针对现有往复式切割器切割收获棉花秸秆过程中存在切割质量差与切割刀片易损坏等问题, 该文利用自制的棉花秸秆切割试验台和高速摄影系统, 以棉秆单位直径最大切割力和单位面积切割功为目标值, 对平均切割速度、切割倾角和切割速比等影响因素进行了棉秆往复式双支撑切割条件下的单因素试验、中心组合试验和验证试验。利用响应面法对中心组合试验数据进行了处理, 建立了目标值与各影响因素之间的回归模型, 优化了往复式双支撑切割器切割棉花秸秆时的工作参数。试验结果表明, 平均切割速度和切割倾角对棉花秸秆单位直径最大切割力和单位面积切割功的影响显著 ($P < 0.01$), 切割速比影响不显著 ($P > 0.05$), 但切割速比对棉秆切割截面的质量具有重要影响; 当切割速比为 1.25 和 1.5 时棉秆一次切断率为 85%, 比切割速比为 1、1.75 和 2 时高出 10%~15%, 割茬高度比切割速比为 1、1.75 和 2 时低 10~30 mm; 利用往复式双支撑切割器切割棉花秸秆时的工作参数的最佳组合是: 平均切割速度为 0.9 m/s、切割倾角为 12.7°、切割速比在 1.25~1.5 之间, 该条件下的棉秆切割性能目标值的平均实测值与预测值的误差均小于 7%, 表明棉花秸秆往复式双支撑切割器工作参数的优化结果可靠。该研究为高效、低耗的棉花秸秆切割收获机械装备及其切割器的研制和使用提供参考。

关键词: 机械化; 农作物; 优化; 棉花秸秆; 切割性能; 响应面法; 切割器

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.006

中图分类号: S225.91⁺2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-16-0037-09

宋占华, 宋华鲁, 耿爱军, 李玉道, 闫银发, 李法德. 棉花秸秆双支撑切割性能试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 37-45. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.006 http://www.tcsae.org

Song Zhanhua, Song Hualu, Geng Aijun, Li Yudao, Yan Yinfa, Li Fade. Experiment on cutting characteristics of cotton stalk with double supports[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(16): 37-45. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.16.006 http://www.tcsae.org

0 引言

棉花秸秆是一种重要的可再生农业生物质能资源, 其在工业、农畜业、能源等方面有着十分广泛的用途^[1-4]。中国作为世界上最大的棉花生产国和消费国, 已形成长江流域、黄河流域和西北内陆地区三大棉花主产区^[5], 2013 年中国棉花种植面积近 435 万 hm^2 ^[6], 可年产大量的棉秆。然而, 由于中国棉花种植区域广、种植农艺差别大, 因此目前国内对于棉秆的收获仍然是以人工拔取收获为主, 机械化收获水平低, 制约了中国棉花秸秆资源的利用。为了提高中国棉花秸秆机械化收获水平, 研究学者在借鉴小麦^[7-8]、玉米^[9-13]、甘蔗^[14-16]等作物秸秆^[17]切割与粉碎收获技术的基础上, 对棉花秸秆切割收获技术与装备进行了研究^[18-22]。

目前, 棉花秸秆切割器的研究主要集中在往复式切

割器^[19-21,23]、甩刀式切割器^[22]和回转式切割器^[22-24]上, 但甩刀式切割器和回转式切割器需要的功率较大, 且对对行技术要求较高, 因此棉花秸秆往复式切割器的研究成为了重点。然而, 目前对于棉花秸秆往复式切割性能的研究很少, 只有少数研究人员研究了低速切割状态下棉花秸秆往复式切割性能^[23], 并且只进行了定性研究, 未进行定量研究。田间实际工作状态下的棉花秸秆往复式切割性能的研究未见报道。对于棉花秸秆往复式切割器的主要工作参数如平均切割速度、切割倾角、切割速比等未进行有效的优化设计, 特别是对于已经商业化的棉花秸秆联合切割收获机^[25]采用的往复式双支撑切割器工作参数优化的研究也未见报道。棉花秸秆是一种木质化程度高的作物秸秆, 其茎秆的硬度和刚度大, 易造成棉秆往复式切割器功耗大、磨损快, 导致机具的使用寿命缩短、购机成本提高。针对上述问题, 本文在自制的棉花秸秆切割试验台上进行了田间实际工作状态下的棉花秸秆往复式双支撑切割试验, 优化了棉花秸秆往复式双支撑切割器的工作参数, 为降低棉秆往复式切割力与往复式切割刀片的磨损, 设计高效、低耗的棉花秸秆切割装备及其切割器提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

棉花秸秆取自山东省济南市商河县某一棉田, 棉种

收稿日期: 2015-05-31 修订日期: 2015-07-12

基金项目: 国家“863”计划资助项目(2009AA043601); 教育部博士点基金项目(20133702110011); 山东农业大学青年科技创新基金项目。

作者简介: 宋占华, 男, 山东临清人, 博士, 主要从事现代农业机械设计及理论研究。泰安 山东农业大学机械与电子工程学院, 271018。Email: songzh6688@163.com。中国农业工程学会会员: 宋占华(E040000302A)。

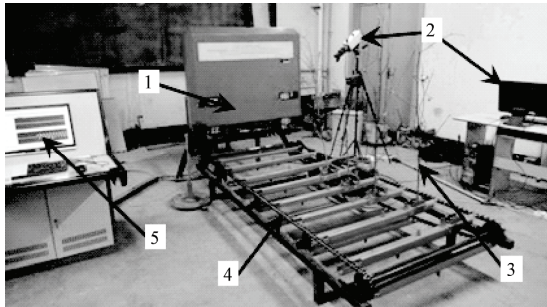
*通信作者: 李法德, 男, 山东潍坊人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事新型农业装备、农产品加工机械关键技术的基础理论及产品的开发研究。泰安 山东农业大学机械与电子工程学院, 271018。Email: lifade@sdau.edu.cn。中国农业工程学会高级会员: 李法德(E041200051S)。

为山东省棉花主导品种之一的银瑞 361。试样为棉花采收后长势良好待收获的成熟秸秆, 试样切割部位的含水率在 31%~37%之间、直径在 11.7~13.2 mm 之间。试样切割部位要求无虫害、无明显缺陷、没有表皮损伤或开裂。

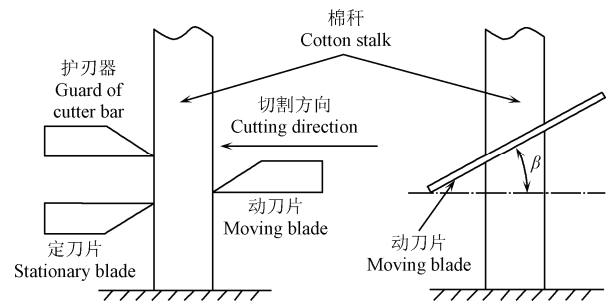
1.2 试验仪器设备

试验用的主要仪器有图 1a 的自制棉花秸秆切割试验台, 图 1b 为棉秆切割示意图。该试验台采用偏置式曲柄连杆机构驱动切割器, 棉秆平均切割速度和喂入速度均在 0~2 m/s 范围内可调, TQ-660 型扭矩传感器的最大测

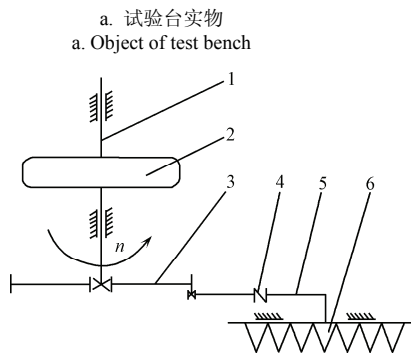
试值为 100 N·m、测试精度为 0.1 N·m, CZL-3E 型拉压力传感器的最大测试值为 4.9 kN、测试精度为 0.1 N, 传感器与切割器联接方式如图 1c、1d 所示。试验用仪器还包括高速摄像系统及其分析软件 Image-Pro Plus 6.3 (Cam Record 1000 高速摄像机、拍摄帧速 1 000~20 000 fps, 德国 Optronis 公司)、数码相机、202-2 型电热干燥箱 (上海第二五金厂)、JA5003A 型电子天平 (精度为 0.001 g, 上海精天电子仪器有限公司)、干燥器、称量瓶、培养皿、镊子、米尺、游标卡尺、普通木工锯等。



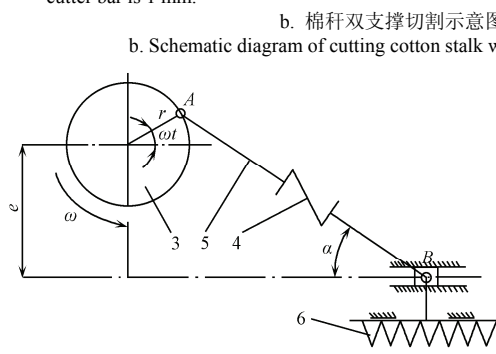
1. 割台 2. 高速摄像系统 3. 棉秆 4. 棉秆输送装置 5. 测控系统
1. Header 2. High-speed camera system 3. Cotton stalk device 5. Measure and control system



注: β 为切割倾角, ($^{\circ}$)。动刀片与定刀片的间隙为 0.4 mm、动刀片与护刃器的间隙为 1 mm。
Note: β is cutting inclination angle, ($^{\circ}$). Interval between moving blade and stationary blade is 0.4 mm. Feeding interval between moving blade and guard of cutter bar is 1 mm.



c. 传感器与切割器联接方式主视图
c. Front view of connection type of sensors with cutter



d. 传感器与切割器联接方式俯视图
d. Top view of connection type of sensors with cutter

1. 主传动轴 2. 扭矩传感器 3. 曲柄转盘 4. 拉压力传感器 5. 连杆 6. 割刀
1. Main shaft 2. Torque sensor 3. Crank 4. Tension-compression force sensor 5. Connecting rod 6. Cutting knife

注: e 为偏心, mm; n 为曲柄转盘转速, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$; ω 为曲柄转盘转动角速度, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$; t 为曲柄转盘转动时间, s; r 为曲柄转盘半径, m; α 为连杆与水平方向夹角, ($^{\circ}$); A 为连杆与曲柄连接点; B 为连杆与割刀连接点。

Note: e is deviation, mm. n is rotational speed of crank disc, $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$. ω is angular velocity of crank disc, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$. t is run time of crank disc. r is disc radius, m. α is horizontal angles of connecting rod, ($^{\circ}$). A is connection between connecting rod and crank disc. B is connection between connecting rod and cutting knife.

图 1 棉花秸秆切割试验台
Fig.1 Cotton stalk cutting test bench

1.3 试验方法

在棉花秸秆切割试验台上, 利用往复式双支撑切割器 (标准 II 型) 对棉秆进行双支撑切割试验, 棉秆切割示意图如图 1b 所示。按文献[12]设计的试验台的测控系统自动将拉压力传感器测得的数据转化为切割器的切割力记录下来, 同时记录切割器驱动扭矩, 并显示扭矩和切割力与切割时间的关系曲线图 (图 2), 将图 2a 中切割棉秆过程中得到的切割扭矩峰值减去空载状态下切割扭矩峰值的平均值作为棉秆最大切割扭矩, 将图 2b 中切割棉秆过程中得到的切割力峰值减去空载状态下切割力

峰值的平均值作为棉秆最大切割力。高速摄像系统自动采集完整的棉秆切割过程, 用来观察、分析棉秆切割质量, 试验结束后由数码相机记录割茬切割截面的形态。有研究指出采用单位切割力与单位面积切割功作为研究目标更加合理^[26-27], 因此, 为了消除棉花秸秆切割部位直径差异对试验结果的影响, 本文采用单位直径最大切割力和单位面积切割功作为目标值, 研究往复式双支撑切割器工作参数: 平均切割速度 v_p (按式 (1) 计算)、切割倾角 β (图 1b) 与切割速比 k 对棉秆切割性能的影响, 并建立相应的数学模型。

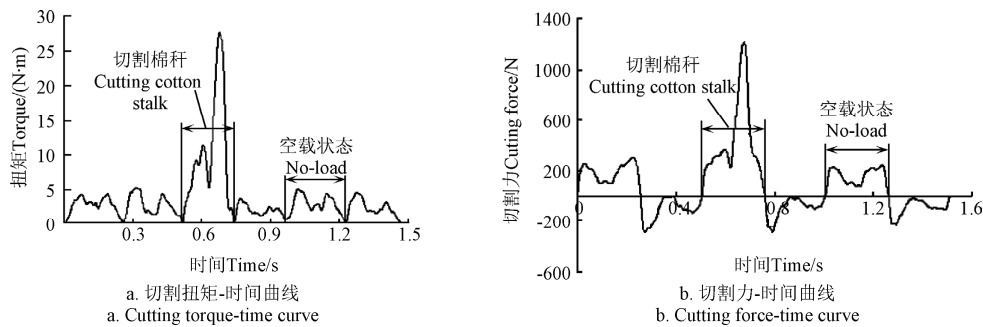


图 2 传感器测量值与时间曲线图
Fig.2 Curves with measured values of sensors and cutting time

$$v_p = \frac{r \cdot n}{15} \tag{1}$$

式中： v_p 为平均切割速度，m/s； r 为曲柄转盘半径，m； n 为曲柄转盘转速，r/min。

棉秆单位直径最大切割力按式（2）计算，棉秆单位面积切割功按式（3）计算：

$$p_q = \frac{F_{q\max}}{d_m} \tag{2}$$

$$\begin{cases} w = \frac{4000 \int_0^t F_q \cdot v \cdot dt}{\pi d_m^2} \\ v = r \omega \sin \omega t \end{cases} \tag{3}$$

式中： p_q 为棉秆单位直径最大切割力，N/mm； $F_{q\max}$ 为棉秆最大切割力，N； d_m 为棉秆直径，mm； w 为棉秆单位面积切割功，kJ/m²； F_q 为棉秆切割力，N； t 为棉秆切割时间（棉花秸秆切割试验台的测控系统自动记录），s； v 为棉秆切割速度，m/s； ω 为曲柄转盘转动角速度，rad/s； t 为曲柄转盘转动时间，s。

1. 3. 1 单因素试验设计

参考文献[19-21,23,28]选定的棉秆切割单因素试验的试验因素和水平见表 1。进行平均切割速度单因素试验时，切割倾角为 13°、切割速比（棉花秸秆平均切割速度与喂入速度的比值）为 1.5；进行切割倾角单因素试验时，平均切割速度为 0.8 m/s、切割速比为 1.5；进行切割速比单因素试验时，平均切割速度为 0.8 m/s、切割倾角为 13°。每一水平下重复 3 次，在 $P=0.05$ 水平进行 F -检验。

1. 3. 2 中心组合试验设计

为了进一步研究往复式双支撑切割器主要工作参数（平均切割速度、切割倾角、切割速比）对棉秆切割性能的影响，寻求三者最佳组合，在单因素试验的基础上，以平均切割速度 v_p 、切割倾角 β 和切割速比 k 为因素，采用中心组合试验设计（central composite design, CCD）方法优化设计试验方案，利用响应面法分析试验结果，建立相应的数学模型，探讨平均切割速度、切割倾角和切割速比对棉秆单位直径最大切割力和单位面积切割功的综合影响。基于 CCD 方案的编码值和实际值的关系如表 2 所示。中心组合试验每组重复 3 次，在 $P=0.05$ 水平进行 F -检验。

表 1 单因素试验的因素和水平
Table 1 Factors and levels of single-factor test

水平 Levels	平均切割速度 Average cutting velocity v_p /(m·s ⁻¹)	切割倾角 Cutting inclination angle β /(°)	切割速比 Ratio of cutting velocity and feeding velocity k
1	0.6	3	1
2	0.7	8	1.25
3	0.8	13	1.5
4	0.9	18	1.75
5	1.0	23	2

表 2 CCD 编码值与实际值对应关系
Table 2 Relation of practical and coding values with CCD

编码值 Coding values	实际值 Practical values		
	平均切割速度 Average cutting velocity v_p /(m·s ⁻¹)	切割倾角 Cutting inclination angle β /(°)	切割速比 Ratio of cutting velocity and feeding velocity k
-1.68	0.63	4.6	1.08
-1	0.7	8	1.25
0	0.8	13	1.5
1	0.9	18	1.75
1.68	0.97	21.4	1.92

2 结果与分析

2. 1 单因素试验结果与分析

2. 1. 1 平均切割速度对棉秆切割性能的影响

平均切割速度与棉秆切割性能的关系如图 3a 所示。从图 3a 中可以看出，当平均切割速度从 0.6 增加到 0.8 m/s 时，棉秆单位直径最大切割力和单位面积切割功随平均切割速度增加而快速下降（ $P<0.01$ ）；当平均切割速度在 0.8 增加到 1 m/s 时，棉秆单位直径最大切割力和单位面积切割功随平均切割速度的增加变化趋势不明显（ $P>0.05$ ），这与前人研究的结果是一致的^[29]。造成这一现象的主要原因是：随着切割速度的增加，棉秆开始切割前的挤压阶段所占比例会下降，即割刀挤压棉秆层移动的距离就会减少，导致棉秆切割力和切割功减少，而当切割速度超过某个值再继续增加时，割刀挤压棉秆层移动的距离减少量变化不再显著^[30-31]，造成棉秆单位直径最大切割力和单位面积切割功的变化范围不大。

2. 1. 2 切割倾角对棉秆切割性能的影响

切割倾角与棉秆切割性能的关系如图 3b 所示。由图 3b

可知, 棉秆单位直径最大切割力和单位面积切割功随切割倾角的增大先降低再增加。在切割倾角为 13° 时, 棉秆单位直径最大切割力和单位面积切割功最小。这主要因为随着切割倾角的增大, 刀刃沿秸秆的切向位移愈大, 切割时所需的法向切削力 (秸秆纤维法线方向上的分力) 便愈小,

同时齿刃刀的刃口在切向上沿秸秆产生滑移, 微齿起了切开秸秆纤维的作用, 则切割力减小^[32]。但当切割倾角增加到一定值时, 法向切削力急剧上升, 原因是由于随切割倾角的增加刀具的楔角逐渐减小, 当楔角减小至仅凭法向切削力来切断秸秆时, 切割力将随切割倾角增加而增大^[29]。

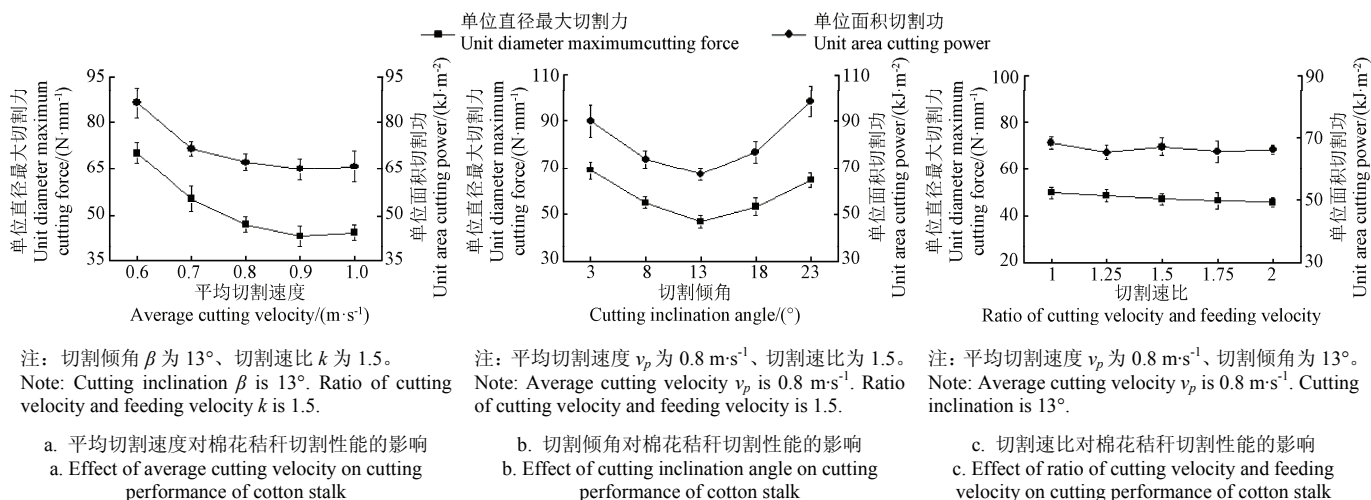


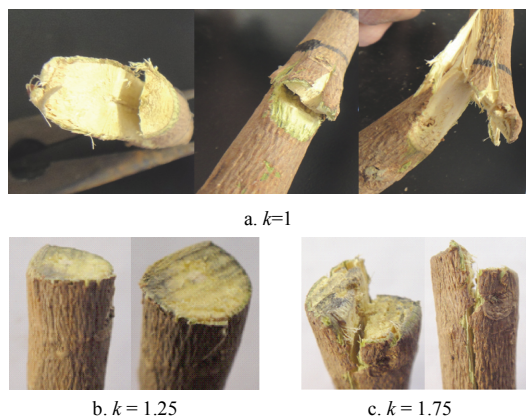
图 3 单因素试验结果

Fig.3 Results of single factor tests

2.1.3 切割速比对棉秆切割性能的影响

切割速比与棉秆切割性能的关系如图 3c 所示。从图 3c 中可以看出, 随着切割速比的增加, 棉秆单位直径最大切割力呈下降趋势, 但是下降不显著 ($P>0.05$); 而棉秆单位面积切割功随切割速比的增加呈现无规律变化, 且变化也不显著 ($P>0.05$)。这表明, 切割速比对棉秆单位直径最大切割力和单位面积切割功的影响不显著。

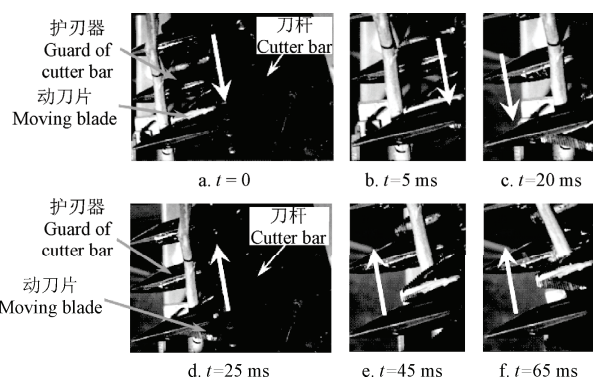
分析高速摄像图像发现, 当切割速比为 1 时, 棉秆喂入速度过快, 棉秆被刀杆向前推到, 发生严重前倾现象, 造成割茬截面为一个倾角较大的倾斜面, 并带有劈裂现象出现 (图 4a), 割茬高度比切割速比为 1.25 和 1.5 时高出 25~30 mm, 严重时棉秆未被完全切割, 被刀杆推到在喂入输送装置上, 此情况易加剧切割刀片的磨损



注: k 为切割速比, 棉花秸秆平均切割速度与喂入速度的比值。
Note: k is ratio of cotton stalk cutting velocity and feeding velocity.

图 4 不同切割速比下的棉秆割茬

Fig.4 Cutting stubbles of cotton stalk under different ratios of cutting velocity and feeding velocity



注: $v_p=0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $\beta=13^\circ$ 、 $k=1.25$, 图中箭头指向为动刀运动方向。
Note: $v_p=0.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $\beta=13^\circ$ 、 $k=1.25$. Direction of arrow is motion direction of moving blade.

图 5 $k=1.25$ 的棉花秸秆切割过程序列图

Fig.5 Sequence image of cutting process of cotton stalk when k is 1.25

或折断。当切割速比为 1.25 和 1.5 时, 通过分析高速摄像系统拍摄的切割过程时序图 (图 5) 发现, 棉秆能顺利地被一次性切断, 割茬截面较平整 (图 4b)。当切割速比为 1.75 和 2 时, 棉秆至少被切割 2 次, 而且割茬还容易出现劈裂现象 (图 4c), 此时割茬高度比切割速比为 1.25 和 1.5 时要高出 10 mm 左右, 出现此情况时, 不仅会造成切割功耗的增加, 而且也会增加切割刀片的磨损。

高速摄像试验结果显示, 当切割速比为 1.25 和 1.5 时棉秆一次切断率为 85%, 比切割速比为 1、1.75 和 2 时高出 10%~15%。虽然切割速比对棉秆单位直径最大切割力和单位面积切割功的影响不显著, 但对棉秆切割截面的质量具有较大影响。切割速比为 1.25~1.5 时, 适合应用于棉秆往复切割收获机械装备。

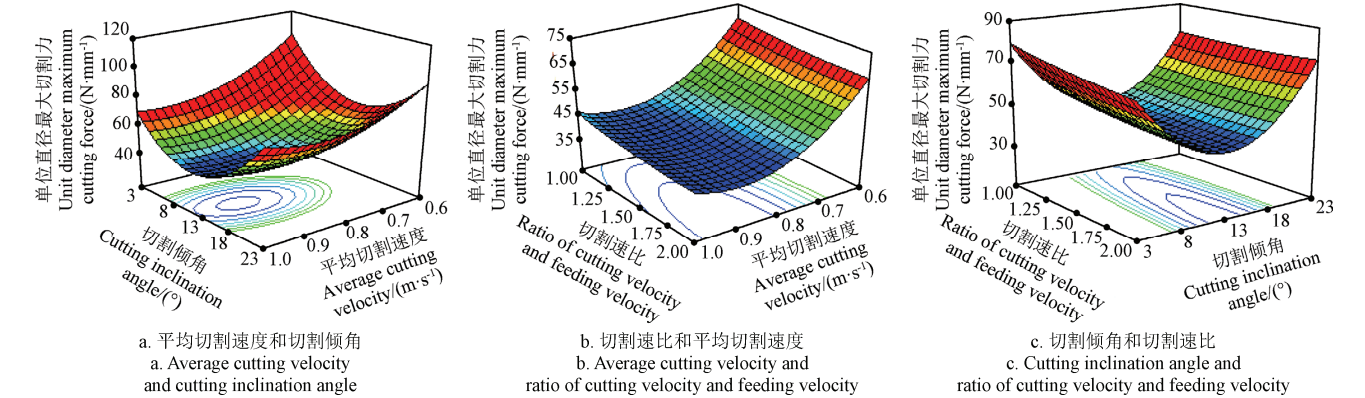
2.2 中心组合试验结果与分析

依据表 2 中棉秆往复式双支撑切割器 3 个工作参数水平的设计，针对每组试验进行 3 次重复试验，取平均值后录入到中心组合试验设计的方案表中。棉秆单位直径最大切割力和单位面积切割功与 3 个工作参数的关系如表 3 所示。应用响应面法对表 3 的试验结果进行分析，研究棉秆切割性能目标值（单位直径最大切割力和单位面积切割功）与影响因素（平均切割速度、切割倾角、切割速比）之间的关系。根据试验分析结果绘制了响应面图 6 和图 7，显示了影响因素对棉秆切割性能目标值的影响，以及各因素间对目标值的交互作用影响。

由图 6 和图 7 可知，棉秆切割性能目标值随着平均切割速度的增加先快速减少后缓慢减少，当超过某一速度时，目标值有随平均切割速度的增加而增加的变化趋势；棉秆切割性能目标值随切割倾角的增加呈现出先降后升的变化趋势，在 13°左右时，目标值最小；在不同的平均切割速度和切割倾角下，随着切割速比的变化，棉秆切割性能目标值变化不明显，表明切割速比棉秆切割性能目标值的影响不显著。以上利用响应面法分析的试验结果与单因素试验结果基本一致。从图 6 和图 7 中还可以看出，3 个影响因素之间的两两交互作用对目标值影响不显著。

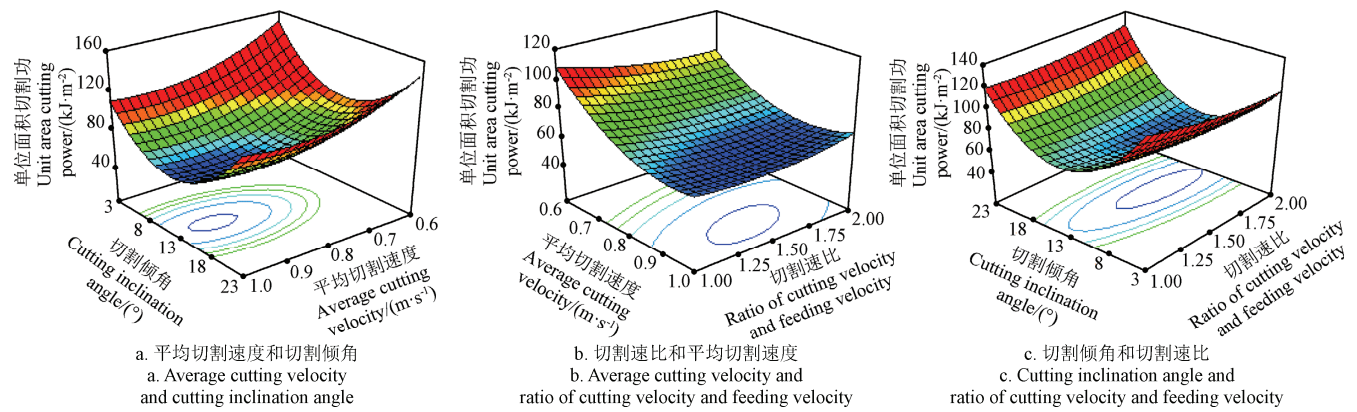
表 3 棉花秸秆切割试验响应面分析数据
Table 3 Response surface analysis date of cotton stalk cutting test

试验号 Testing number	因素水平 Factor levels			目标值 Objective values	
	平均切割速度 Average cutting velocity	切割速比 Ratio of cutting velocity and feeding velocity k	切割倾角 Cutting inclination angle	单位直径最大切割力 Unit diameter maximum cutting force/(N·mm ⁻¹)	单位面积切割功 Unit area cutting power/(kJ·m ⁻²)
	v_p		β		
1	0	0	0	44.2	62.6
2	1	1	-1	42.7	66.4
3	1	-1	-1	52.3	80.0
4	1	1	1	48.2	77.8
5	0	1.68	0	43.5	68.3
6	1.68	0	0	40.3	58.9
7	1	-1	1	48.9	72.4
8	-1	1	1	54.6	84.2
9	0	0	0	40.9	63.0
10	-1	1	-1	60.4	88.0
11	0	0	0	39.8	56.5
12	-1	-1	1	61.5	96.2
13	0	0	0	45.8	64.6
14	0	0	0	39.7	60.2
15	0	0	0	43.0	66.0
16	-1	-1	-1	63.3	94.9
17	0	-1.68	0	41.2	64.2
18	-1.68	0	0	60.2	88.6
19	0	0	1.68	66.5	104.5
20	0	0	-1.68	62.1	96.2



注：图 6a 中，切割速比为 1.5；图 6b 中，切割倾角为 13°；图 6c 中，平均切割速度为 0.8 m·s⁻¹。
Note: Ratio of cutting velocity and feeding velocity is 1.5 in Fig.6a. Cutting inclination angle is 13° in Fig.6b. Average cutting velocity is 0.8 m·s⁻¹ in Fig.6c.

图 6 棉秆单位直径最大切割力与试验因素的响应面
Fig.6 Response surface plots of unit diameter maximum cutting force of cotton stalk with respect to experiment factors



注：图 7a 中，切割速比为 1.5；图 7b 中，切割倾角为 13°；图 7c 中，平均切割速度为 0.8 m·s⁻¹。
Note: Ratio of cutting velocity and feeding velocity is 1.5 in Fig.7a. Cutting inclination angle is 13° in Fig.7b. Average cutting velocity is 0.8 m·s⁻¹ in Fig.7c.

图 7 棉秆单位面积切割功与试验因素的响应面
Fig.7 Response surface plots of unit area cutting power of cotton stalk with respect to experiment factors

应用响应面法对表 3 的试验结果进行分析，建立棉秆切割性能目标值与影响因素实际值之间的二次多项回归模型分别为式 (4) 和式 (5)：

$$p_q = 385.2 - 577.1v_p - 22k - 10.99\beta - 2.5v_pk + 2.4v_p\beta + 0.49k\beta + 306.2v_p^2 + 4.3k^2 + 0.32\beta^2 \quad (4)$$

$$w = 694.4 - 885.6v_p - 149.3k - 17.4\beta + 53.5v_pk + 1.58v_p\beta + 1.39k\beta + 437.2v_p^2 + 27.5k^2 + 0.55\beta^2 \quad (5)$$

式中： β 为切割倾角，(°)； k 为切割速比。

对上述模型进行方差分析，结果如表 4 所示。由表 4 可知，回归模型的 $P=0.0001$ ，表明回归模型是极显著的 ($P<0.01$)；两个目标值的失拟项 P 值分别为 0.193、0.1339，

均大于 0.05，模型失拟度不显著，表明模型是合理的；信噪比分别为 10.706、12.801，均大于 4，表明模型是较优的，可以用来进行优化预测。

回归方程中各变量对目标值影响的显著性由 F 检验来判定。由表 4 可知，平均切割速度 v_p 的一次项和二次项对棉秆切割性能目标值影响极显著 ($P<0.01$)；切割倾角 β 的二次项对目标值影响极显著 ($P<0.01$)，而一次项对目标值影响不显著 ($P>0.05$)；切割速比 k 的一次项和二次项对目标值影响均不显著 ($P>0.05$)；各因素之间的交互作用对目标值的影响也均不显著 ($P>0.05$)。综合分析，各因素对棉秆切割性能目标值影响的主次顺序是：平均切割速度、切割倾角、切割速比。

表 4 棉秆切割试验响应面方差分析结果
Table 4 Variance analysis of response surface of cotton stalk cutting test

来源 Source	单位直径最大切割力 Unit diameter maximum cutting force		单位面积切割功 Unit area cutting power	
	F 值 F value	P 值 Significant level P	F 值 F value	P 值 Significant level P
模型 Model	16.51	<0.0001**	19.60	0.0001**
v_p	46.901	<0.0001**	44.47	0.0001**
k	1.876	0.201	1.33	0.2749
β	0.026	0.876	0.76	0.4035
v_pk	0.003	0.957	0.64	0.4427
$v_p\beta$	1.143	0.310	0.22	0.6480
$k\beta$	0.292	0.601	1.08	0.3236
v_p^2	13.133	0.005**	12.29	0.0057**
k^2	0.101	0.757	1.90	0.1978
β^2	90.322	<0.0001**	122.07	<0.0001**
失拟 Lack of fit	2.287	0.193	2.9	0.1339
信噪比 Adeq precisor	10.706		12.801	

注： v_p 为平均切割速度，m·s⁻¹； β 为切割倾角，(°)； k 为切割速比； $P<0.01$ 为极显著，用**表示； $P<0.05$ 为显著，用*表示。
Note: v_p is average cutting velocity, m·s⁻¹. β is cutting inclination angle, (°). k is ratio of cutting velocity and feeding velocity. * represents significant ($P<0.05$), ** represents highly significant ($P<0.01$).

以棉秆切割性能目标值的最小值为优化目标，结合切割速比的选择范围为 1.25~1.5，利用响应面法对二次多项回归数学模型式 (4) 和式 (5) 进行数学优化，得到棉花秸秆往复双支撑切割器的工作参数最优组合是：平均切割速度为 0.9 m/s、切割倾角为 12.7°、切割速

比为 1.5，此时，棉秆单位直径最大切割力为 39.3 N/mm，单位面积切割功为 58 kJ/m²。由于切割速比对棉秆切割性能目标值的大小影响不明显，再结合高速摄影试验结果和实际工作情况，确定切割速比的选择范围为 1.25~1.5。

2.3 验证试验

为检验利用响应面法得到的棉秆往复式双支撑切割器工作参数的最优组合的正确性，选择了 3 组复式双支撑切割器工作参数组合（第 1 组： $v_p=0.9\text{ m/s}$ 、 $\beta=12.7^\circ$ 、 $k=1.25$ ；第 2 组： $v_p=0.9\text{ m/s}$ 、 $\beta=12.7^\circ$ 、 $k=1.4$ ；第 3 组： $v_p=0.9\text{ m/s}$ 、

$\beta=12.7^\circ$ 、 $k=1.5$ ）进行验证试验。每组试验重复 5 次，试验结果见表 5。从表 5 中可以看出，3 组验证试验目标值的平均实测值与预测值的误差均小于 7%，表明试验值与预测值之间有较好的拟合性，证明了响应面法对棉秆往复式双支撑切割器工作参数的优化是可靠的、有效的。

表 5 试验验证结果
Table 5 Results of verifying tests

组数 Groups	平均实测值 Average measured values		预测值 Predicted values		单位直径 最大切割力误差 Error of unit diameter maximum cutting force/%	单位面积 切割功误差 Error of unit area cutting power/%
	单位直径最大切割力 Unit diameter maximum cutting force/(N·mm ⁻¹)	单位面积切割功 Unit area cutting power/(kJ·m ⁻²)	单位直径最大切割力 Unit diameter maximum cutting force/(N·mm ⁻¹)	单位面积切割功 Unit area cutting power/(kJ·m ⁻²)		
1	39.8±2.44	62.2±2.70	40.3	59.6	1.2	4.4
2	42.1±2.39	61.3±2.24	39.6	58.2	6.3	5.3
3	40.6±3.12	59.5±3.26	39.3	58.0	3.3	2.6

2.4 讨 论

本文采用单位直径最大切割力和单位面积切割功作为目标值，利用响应面法对中心组合试验数据进行了处理，从定性和定量两个方面研究了往复式切割器工作参数对棉花秸秆切割性能与质量的影响，确定平均切割速度与切割倾角对棉秆切割性能影响显著、切割速比对棉秆割茬质量和割茬高度具有重要影响，并同时优化得到了棉秆往复式切割器工作参数的最优组合。这不同于前人以峰值切割力和切割功为目标值，单一从定性方面研究切割器工作参数对棉花秸秆切割性能的影响^[22-24]，指出平均切割速度对棉秆切割性能影响显著，而切割倾角对棉秆切割性能的影响较小^[23]。另外，本文在单因素试验和中心组合试验的基础上，利用响应面法优化得到棉秆最佳的平均切割速度为 0.9 m/s、切割倾角为 12.7°，这不同于文献[23]通过正交试验确定棉秆平均切割速度的最佳值为 0.6 m/s、文献[21]凭借经验选定棉秆平均切割速度为 0.8 m/s、文献[25]报道的商业化的棉秆联合切割收获机的往复式切割器的切割倾角为 20°左右（参照小麦、玉米等秸秆往复式切割器的切割倾角）。本文的研究对棉秆往复式切割器与装备的研制和使用更具有意义。

切割速比也是棉秆往复式切割器的一个重要工作参数，本文在借鉴前人利用高速摄像技术研究机器前进速度对作物茎秆切割质量影响^[33-34]所取得的成果的基础上，应用高速摄像技术不仅研究了切割速比对棉秆割茬质量的影响，更进一步研究了切割速比对割茬高度的影响，从而得到适合棉秆往复式切割器的切割速比为 1.25~1.5。

本文研究主要是在室内利用自制的棉花秸秆切割试验台进行的，试验结果未应用于田间实际作业。因此，进一步的研究内容是：在室内研究的基础上，进行棉秆往复式双支撑切割器田间实际切割收获棉秆的试验，在考虑地面状况对机器产生振动激励的情况下，进一步研究往复式切割器工作参数对棉秆切割性能和质量的影

3 结 论

利用带有测控系统和高速摄像系统的棉花秸秆切割试验台对棉花秸秆进行了往复式双支撑切割的单因素试验、中心组合试验以及验证试验。

1) 根据高速摄像试验结果分析得出，切割速比对棉秆切割截面的质量具有重要影响，当切割速比为 1.25 和 1.5 时棉秆一次切断率为 85%，比切割速比为 1、1.75 和 2 时高出 10%~15%，割茬高度比切割速比为 1、1.75 和 2 时低 10~30 mm；切割速比为 1.25~1.5 时，适合应用于棉秆往复式切割收获机械装备。

2) 结合高速摄像试验结果，应用响应面法优化得到最终的棉花秸秆往复式双支撑切割器的工作参数最优组合是：平均切割速度为 0.9 m/s、切割倾角为 12.7°、切割速比为 1.25~1.5。

3) 棉花秸秆往复式双支撑切割器最优工作参数组合的验证试验结果显示，棉秆切割性能目标值的平均实测值与预测值的误差均小于 7%，表明棉花秸秆往复式双支撑切割器工作参数的优化结果可靠。

该研究可为高效、低耗的棉花秸秆往复式切割装备及其切割器的设计和使用提供参考。

【参 考 文 献】

[1] Gemtos T A, Tsiricoglou T. Harvesting of cotton residue for energy production[J]. Biomass and Bioenergy, 1999, 16(1): 51—59.

[2] Coates W. Using cotton plant residue to produce briquettes[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 18(3): 201—208.

[3] 黄新平. 棉秆粉碎收获机的设计[J]. 农业工程学报, 2003, 19(4): 136—138.

Huang Xinping. Design of cotton-stalk harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(4): 136—138. (in Chinese with English abstract)

[4] 李怡, 张国忠, 周勇, 等. 棉秆田间起拔力测量系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(18): 43—50.

Li Yi, Zhang Guozhong, Zhou Yong, et al. Design and field experiment of drawing resistance measurement system for cotton stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(18): 43—50. (in Chinese with English abstract)

- [5] 王锋德, 陈志, 董世平, 等. 自走式棉秆联合收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 66—70.
Wang Fengde, Chen Zhi, Dong Shiping, et al. Exploiture and experiment of self-walking cotton stalk combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 66—70. (in Chinese with English abstract)
- [6] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014.
- [7] 侯加林, 蒋韬, 吴彦强, 等. 小麦秸秆往复式切割试验台设计与应用[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊 1): 101—106.
Hou Jialin, Jiang Tao, Wu Yanqiang, et al. Design and experiment of wheat straw cutting reciprocating test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.1): 101—106. (in Chinese with English abstract)
- [8] 韩正晟, 粟震霄, 魏宏安, 等. 齿形链式切割器的试验研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 86—89.
Han Zhengsheng, Li Zhenxiao, Wei Hong'an, et al. Test research on toothed chain-cutter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1998, 14(2): 86—89. (in Chinese with English abstract)
- [9] Jia Honglei, Li Changying, Zhang Zhihong, et al. Design of bionic saw blade for corn stalk cutting[J]. Journal of Bionic Engineering, 2013(10): 497—505.
- [10] 张居敏, 贺小伟, 夏俊芳, 等. 高茬秸秆还田耕整机功耗检测系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(18): 38—46.
Zhang Jumin, He Xiaowei, Xia Junfang, et al. Design and field experiment of power consumption measurement system for high stubble returning and tillage machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(18): 38—46. (in Chinese with English abstract)
- [11] 蒋韬, 侯加林, 李天华, 等. 田间玉米茎秆往复切割试验台[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 32—36.
Jiang Tao, Hou Jialin, Li Tianhua, et al. Field reciprocating cutting test bench for corn stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2): 32—36. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张世福, 宋占华, 闫银发, 等. 农作物秸秆切割试验台测控系统的研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(增刊 1): 10—17.
Zhang Shifu, Song Zhanhua, Yan Yinfa, et al. Development and experiment of measure and control system for stalk cutting test bench[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(Supp.1): 10—17. (in Chinese with English abstract)
- [13] 贾洪雷, 姜鑫铭, 郭明卓, 等. V-L 型秸秆粉碎还田刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(1): 28—33.
Jia Honglei, Jiang Xinming, Guo Mingzhuo, et al. Design and experiment of V-L shaped smashed straw blade[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(1): 28—33. (in Chinese with English abstract)
- [14] Manhães C M C, Garcia R F, Junior D C, et al. Evaluation of visible losses and damage to the ratoon cane in the mechanized harvesting of sugarcane for different displacement speeds[J]. American Journal of Plant Sciences, 2014, 5: 2956—2964.
- [15] 周勇, 区颖刚, 莫肇福. 斜置式甘蔗切割喂入装置设计及试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 17—23.
Zhou Yong, Ou Yinggang, Mo Zhaofu. Design and experiment of oblique cutting and feeding device for sugarcane[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(14): 17—23. (in Chinese with English abstract)
- [16] 麻芳兰, 韦荣发, 范志达, 等. 小型整秆式甘蔗收割机切割系统的改进与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(15): 18—24.
Ma Fanglan, Wei Rongfa, Fan Zhida, et al. Improvement and experiment on cutting system of small whole-stalk sugarcane harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(15): 18—24. (in Chinese with English abstract)
- [17] Johnson P C, Clementson C L, Mathanker S K, et al. Cutting energy characteristics of *Miscanthus x giganteus* stems with varying oblique angle and cutting speed[J]. Biosystems Engineering, 2012, 112: 42—48.
- [18] 胡凯, 王吉奎, 李斌, 等. 棉秆粉碎还田与残膜回收联合作业机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 24—32.
Hu Kai, Wang Jikui, Li Bin, et al. Development and experiment of combined operation machine for cotton straw chopping and plastic film collecting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(19): 24—32. (in Chinese with English abstract)
- [19] 宋占华, 肖静, 张世福, 等. 曲柄连杆式棉秆切割试验台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊 1): 162—167.
Song Zhanhua, Xiao Jing, Zhang Shifu, et al. Design and experiment on crank-connecting rod cotton stalk cutting test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.1): 162—167. (in Chinese with English abstract)
- [20] 宋占华, 田富洋, 张世福, 等. 空载状态下往复式棉秆切割器动力学仿真与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16): 17—22.
Song Zhanhua, Tian Fuyang, Zhang Shifu, et al. Simulation and experiment of reciprocating cutter dynamics of cotton stalk under no-load[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(16): 17—22. (in Chinese with English abstract)
- [21] 孙玉峰. 棉秆联合收获机的研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2009.
Sun Yufeng. Study on Cotton-stalk Combine Harvester[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [22] 李景彬, 葛云, 朱江丽, 等. 棉秆切割性能的试验研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2011, 46(1): 136—139.
Li Jingbin, Ge Yun, Zhu Jiangli, et al. Experimental study on cotton stalk cutting harvester[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2011, 46(1): 136—139. (in Chinese with English abstract)
- [23] 杜现军. 棉秆力学特性研究与切割实验台的研制[D]. 泰安: 山东农业大学, 2011.
Du Xianjun. Cotton Stalk Mechanical Characteristics Research and Development of Cutting Test Bench[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李玉道. 回转式棉花秸秆切割试验台的研制与试验研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
Li Yudao. Rotary Experimental Study on Development of Cotton Stalk Cutting Test Bench and Experimental Investigations[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [25] 中国农机院生物质能工程技术研究中心. 中农机4MG-275型自走式棉秆联合收获机[EB/OL]. (2011-05-11) [2015-04-11]. <http://www.caams.org.cn/products/kzsnyyhjbhgczb/swzsjghycxzb/>

- 2011/05/2911. shtml.
- [26] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 甘蔗茎秆切割力试验[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 90—94.
Liu Qingting, Ou Yinggang, Qing Shangle, et al. Cutting force test of sugarcane stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(7): 90—94. (in Chinese with English abstract)
- [27] 赵湛, 李耀明, 徐立章, 等. 超级稻单茎秆切割力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 72—75.
Zhao Zhan, Li Yaoming, Xu Lizhang, et al. Experiment on cutting mechanical property of single super rice stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 72—75. (in Chinese with English abstract)
- [28] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册: 下册[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [29] 李耀明, 秦同娣, 陈进, 等. 玉米茎秆往复切割力学特性试验与分析[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 160—164.
Li Yaoming, Qin Tongdi, Chen Jin, et al. Experimental study and analysis on mechanical property of corn stalk reciprocating cutting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 160—164. (in Chinese with English abstract)
- [30] 卡那沃依斯基. 收获机械[M]. 曹崇文, 吴春江, 何保康, 等译. 北京: 中国农业机械出版社, 1983.
- [31] 宋占华. 棉花秸秆力学模型与切割技术研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.
Song Zhanhua. Study on Mechanical Model and Cutting Technology of Cotton Stalk[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [32] 马弘跃. 沙柳削片机飞刀切削角对切削力影响的试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007.
Ma Hongyue. Test and Research on the Cutting Force Change Caused by Cutting Angle Diversification of the Blade of Salix-Psammophila Chipper[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [33] 廖庆喜, 舒彩霞, 田波平, 等. 基于高速摄像技术的芦竹切割过程的研究[J]. 华中农业大学学报, 2007, 26(3): 415—418.
Liao Qingxi, Shu Caixia, Tian Boping, et al. Research on the cutting process based on high-speed photography technology for the *arundo donax* L.[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2007, 26(3): 415—418. (in Chinese with English abstract)
- [34] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 光刃刀片切割甘蔗茎秆破坏过程高速摄像分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 31—35.
Liu Qingting, Ou Yinggang, Qing Shangle, et al. High-speed photography analysis on the damage process in cutting sugarcane stalk with smooth-edge blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 31—35. (in Chinese with English abstract)

Experiment on cutting characteristics of cotton stalk with double supports

Song Zhanhua, Song Hualu, Geng Aijun, Li Yudao, Yan Yinfa, Li Fade[✉]

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China;

2. Shandong Province Key Laboratory of Horticultural Machineries and Equipments, Taian 271018, China)

Abstract: In order to explore the effect of the reciprocating cutter's working parameters on cutting characteristics of cotton stalk as well as to optimize the working parameters of the reciprocating cutter, the cutting tests of cotton stalk under the double support condition were performed with a self-developed cutting test bench of cotton stalk. The samples were the ripe cotton stalks with the diameter of 11.7-13.2 mm and the moisture content of 31%-37%. The main test equipment included the self-developed cutting test bench of cotton stalk, a high-speed camera system and a digital camera. The self-developed cutting test bench of cotton stalk consisted of 3 parts: A header, a feeding device and a measurement control system. The cutting tests were grouped into the single factor tests, the response surface tests and the verifying tests. The testing factors were average cutting velocity (ranging from 0.6-1.0 m/s), cutting inclination angle (ranging from 3°-23°) and ratio of cutting velocity to feeding velocity (ranging from 1-2), and 5 levels was set for each factor. The response surface testing scheme designed with the central composite design (CCD) method was a three-factor five-level testing scheme. The response surface analysis method was used to analyze the testing dates and to optimize the working parameters of the cotton stalk reciprocating cutter. The results from the tests showed that the change trends of the objective values (the maximum cutting force per unit diameter and the cutting power per unit cutting area) with the changes of the testing factors were basically consistent with the results of the single factor tests. The effects of the average cutting velocity and the cutting inclination angle on the objective values were significantly different ($P < 0.01$), and the effect of the ratio of cutting velocity to feeding velocity on the objective values was not significantly obvious ($P > 0.05$), but its effect on the morphological structure of the cutting section of the stubble was significantly different. When the ratio of cutting velocity to feeding velocity ranged from 1.25 to 1.5, it was observed that the cotton stalk could be completely cut off by means of the high-speed camera system and the cutting section was even and smooth, therefore, the quality of the cutting section was the best in the ratio range of from 1.25 to 1.5. It was concluded that the optimal combination of the working parameters of the reciprocating cutter for cutting cotton stalk was as follows: the average cutting velocity of 0.9 m/s, the cutting inclination angle of 12.7°, the ratio of cutting velocity to feeding velocity ranging from 1.25 to 1.5. According to the results from the response surface tests, a regression model was established, which described the cutting characteristics of cotton stalk under the double supports. On the basis of the results of the verifying tests, it was found that the results from the regression model were well consistent with the optimal results obtained from the response surface tests. Therefore, the regression model was fit under the experimental conditions. The results of this research can provide technical support for not only developing a cotton stalk cutter, but also designing the equipment with high efficiency and low energy consumption for harvesting hard stalk.

Key words: mechanization; crops; optimization; cotton stalk; cutting characteristics; response surface analysis method; cutter