

## 向日葵茎秆切割阻力影响因素试验研究

王洪明 王芳\* 杨铮 郭文斌

(内蒙古农业大学 机电工程学院,呼和浩特 010018)

**摘要** 针对向日葵收获机械在使用现有往复式切割器收割向日葵茎秆时存在适用性差及切割质量差等问题,在微机控制电子万能试验机上模拟直刃切刀配合的切割方式,对向日葵茎秆进行切割试验,研究刃口倾角、削切角度及斜切角度等参数改变对切割阻力和切割能量消耗的影响程度以及不同条件下向日葵茎秆的切割阻力变化规律。结果表明:1)切割速度一定,切刀刃口倾角为 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时,切割阻力峰值及切割能量消耗随着刃口倾角的增大逐渐减小,滑切效果逐渐增强,当刃口倾角在 $20^{\circ}$ 时的切割能量消耗较其他角度小。2)切割速度一定,削切角为 $0^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 时,切割阻力峰值与切割能量消耗先逐渐减小而后急剧上升,削切角为 $15^{\circ}$ 时,切刀对向日葵茎秆的切割阻力和切割能耗较小。3)切割速度一定,斜切角度为 $0^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 时,切割阻力峰值和切割能耗先逐渐减小而后迅速增大,斜切角为 $30^{\circ}$ 时,其切割阻力和切割能耗最小。

**关键词** 向日葵; 茎秆; 切割角度; 切割阻力

中图分类号 S23-01

文章编号 1007-4333(2018)05-0102-06

文献标志码 A

## Experimental study on the influencing factors of cutting resistance of sunflower stalk

WANG Hongming, WANG Fang\*, YANG Zheng, GUO Wenbin

(The College of Mechanical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

**Abstract** To investigate the applicability of the general-purpose cutter and poor cutting quality of current sunflower harvesting machinery during sunflower stalks harvesting, the cutting method of the sunflower stalk is simulated by the match way of the straight blade cutter on the microcomputer control electronic universal testing machine. The degree of influence on the cutting resistance and cutting power consumption and the variation rule of cutting resistance of sunflower stalk under different conditions are studied by changing the angle of the cutting edge, cutting angle and chamfering angle. The results show that: 1) When the cutting speed is constant and the angle of the cutting edge is  $0^{\circ} - 20^{\circ}$ , the cutting resistance peak and the power consumption decrease with the increase of the cutting edge angle, at the same time, the sliding effect is enhanced. When the bevel angle is about  $20^{\circ}$ , the cutting power consumption is smaller. 2) When the cutting speed is constant, the cutting angle changes from  $0^{\circ}$  to  $45^{\circ}$ . The peak cutting force and the cutting power consumption are gradually reduced and then sharply increased. When the cutting angle is about  $15^{\circ}$ , the blade is applied with cutting resistance and cutting power consumption is smaller on sunflower stalks. 3) When the cutting speed is constant, the chamfering angle is changed in the range of  $0^{\circ} - 60^{\circ}$ . The cutting resistance peak and the cutting power consumption are gradually reduced and then rapidly increasing. When the chamfering angle is about  $30^{\circ}$ , the cutting power consumption is smaller. This study can provide a theoretical basis for the design and improvement of sunflower cutting device.

**Keywords** sunflower; stalk; cutting angle; cutting resistance

收稿日期: 2017-06-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51665047); 内蒙古自然科学基金项目(2014MS0538); 内蒙古自治区 2017 年硕士研究生科研创新资助项目(S20171012905)

第一作者: 王洪明, 硕士研究生, E-mail: 492444407@qq.com

通讯作者: 王芳, 副教授, 从事农牧业机械智能化研究, E-mail: nndwangfang@163.com

向日葵茎秆含有丰富的纤维素,可以作为燃料,也可以制作隔音板、家具板等。我国向日葵的种植面积位居世界第六位,但对于向日葵茎秆收割、粉碎等相关机具的研究仍处于探索阶段,向日葵茎秆切割过程研究是相关机具研制的理论基础<sup>[1-2]</sup>。茎秆的切割过程与茎秆的物理机械特性、切割角度以及切割方式等关系密切,直接影响着收割及粉碎装置的能量消耗<sup>[3-4]</sup>。

切割试验是研究向日葵茎秆切割过程的重要手段,国内外对向日葵茎秆切割过程少有研究。国内已有研究对其他作物如玉米、棉花、甘蔗等茎秆进行了切割力学性能试验,得到切割其茎秆过程中切割阻力的变化规律,试验结果表明,切割速度、削切角、刀片形状、含水率等诸多因素对切割性能(切割力、切割能耗及切割质量)有显著影响,同时得出了各因素的最佳参数<sup>[4-10]</sup>。国外已有研究对作物如玉米、大麻、小麦等茎秆进行了切割试验,得到切割阻力随位移变化的曲线,试验证明,刀片斜角、切割方向、切割位置及刀片形状等因素对切割力及能耗影响显著<sup>[11-14]</sup>。综上,国内外已有研究主要集中在其他作物茎秆切割力学性能的研究,对向日葵茎秆的切割性能缺乏相关试验研究。为此,本研究拟采用万能试验机对向日葵茎秆进行切割试验,以探明向日葵茎秆切割过程中切刀与茎秆的相对作用关系对切割阻力和切割能耗的影响。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料选取与测量

试验所用向日葵茎秆于2016年10月向日葵收获期采自内蒙古农业大学农场。向日葵品种为美葵363,平均株高2 000~2 500 mm,茎秆平均直径28~36 mm,含水率8%~15%,选取生长正常、无明显缺陷且笔直的茎秆。由于切刀对茎秆切割力大小会受到向日葵茎秆的品种、含水率、外形尺寸、生长位置等因素的影响,因此尽量选取含水率基本一致且平均直径基本相同于中部80~120 mm高度处的向日葵茎秆作为试验样本<sup>[15]</sup>。

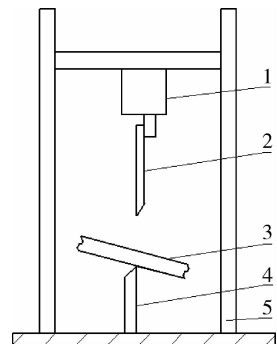
采用全自动水分测定仪测定茎秆含水率。采用游标卡尺测量茎秆的直径,由于茎秆并不是规则圆柱状,因此在切割前需要分别测量茎秆的最大外径和最小外径并取其平均值作为茎秆的直径。

### 1.2 试验设备

在DDL-200型微机控制电子万能试验机上进

行向日葵茎秆切割力学性能试验。该试验机主要是进行茎秆切割试验时施加切割力,利用自带力传感器及位移传感器测定刀片的位移和切割阻力,万能试验机的测试系统可完成切割过程中机架的自动控制及数据的采集和存储。

目前,向日葵收获机械采取的收割方式不同,大多数联合收获机械的切割器采用动定刀配合的往复式切割方式切割农作物茎秆<sup>[16]</sup>,因此,本研究利用万能试验机搭配自制切割装置模拟茎秆切割过程。在万能试验机的上部移动支架设计安装动刀片,下部安装定刀片,利用上部动刀片的运动与定刀片配合来模拟切割器的作用,从而实现向日葵茎秆的切割(图1);安装好上下夹具,使用塞尺调整动定刀间隙为0.3 mm<sup>[17]</sup>;试验时,使向日葵茎秆按要求置于定刀片上,手动调节上部移动架,使动刀刃口紧靠向日葵茎秆,在系统软件上设置好参数并清零。通过万能试验机的加载与测试系统可测得切割阻力随位移的变化的一系列数值,数据采集后采用Excel进行分析。



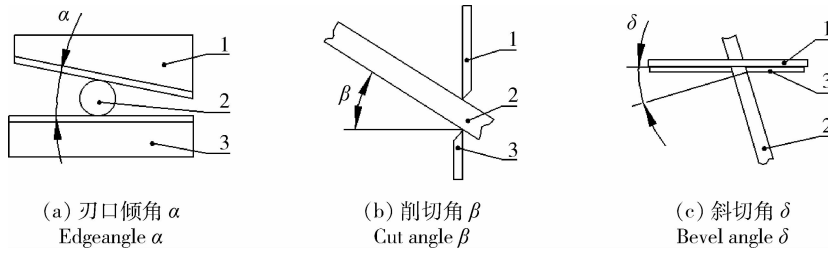
1. 力传感器;2. 动刀片;3. 向日葵茎秆;4. 定刀片;5. 机架  
1. Force sensor; 2. Moving blade; 3. Sunflower stalk;  
4. Fixed blade; 5. Frame

图1 向日葵茎秆切割试验装置

Fig. 1 Cutting test device of sunflower stalk

### 1.3 试验内容

茎秆属于各向异性、非匀质、非线性的具有复合特性的植物纤维材料,向日葵茎秆各部分的组织结构以及化学成份含量不同,因此在不同方向必然会表现出不同的力学特性<sup>[15,18]</sup>,所以切割阻力和切割能耗的大小与刀刃切入向日葵茎秆的方向有关,为了研究向日葵茎秆的切割性能,选定动刀片相对于向日葵茎秆的刃口倾角、削切角、斜切角3个因素(图2)进行切割力试验。

(a) 刃口倾角  $\alpha$   
Edgeangle  $\alpha$ (b) 削切角  $\beta$   
Cut angle  $\beta$ (c) 斜切角  $\delta$   
Bevel angle  $\delta$ 

1. 动刀片; 2. 向日葵茎秆; 3. 定刀片

1. Moving blade; 2. Sunflower stalk; 3. Fixed blade

图2 向日葵茎秆切割角度示意

Fig. 2 Schematic diagram of sunflower stalk for cutting angle

向日葵茎秆个别差异会产生数据误差,为了减小试验误差,影响因素下的每种参数需要重复3次试验后取平均值。利用万能试验机随机测得一组向日葵茎秆切割阻力随位移的变化曲线(图3),向日葵茎秆直径为34 mm,试验机加载速度为30 mm/min。试验中发现,在同种条件下,对各种影响因素变换不同的切割参数,切割阻力随位移变化曲线的规律具有相似性。可以看出,从起始点到前半段最高点的过程中,随着位移的增加,切割阻力在近似成线性的增大,这是由于向日葵茎秆中部结构是质地很软的髓质部,茎秆逐渐被压扁的缘故,实际田间作业时割刀对向日葵茎秆的切割过程亦存在茎秆被压扁的状态,而实际作业时切割速度快,预压时间很短,所以被压扁状态呈现不明显。在前半段最高点处,向日葵茎秆在该力的作用下受挤压发生破裂;前半段最高点至整段最低点曲线下降,这是由于该过程中茎秆被压扁,向日葵茎秆受力减小;整段最低点到整段最高点  $F_{\max}$  曲线又上升,这是因为刃口开始挤压向日葵茎秆,切割力逐渐增加,然后刃口开始切割向日葵茎秆,使得茎秆的髓质被压扁且上下层木质部几乎重合,从而剪切时所需的剪切力越来越大<sup>[19]</sup>;当到达整段最高点  $F_{\max}$  时,峰值切割力使得茎秆被完全切断,剪切力直线下降,直到切割过程结束,曲线上的峰值为向日葵茎秆所受最大切割阻力。对切割阻力  $F$  积分可获得切割能耗,以此衡量整个切割过程中的能量消耗,切割能耗采用式(1)计算:

$$W = \int_0^s F ds \quad (1)$$

式中:  $W$  为切割能耗, J;  $F$  为切割阻力, N;  $s$  为切割位移, mm。利用 Origin 软件求得切割阻力变化曲线(图3)的积分面积,即为切割能耗  $W$ 。

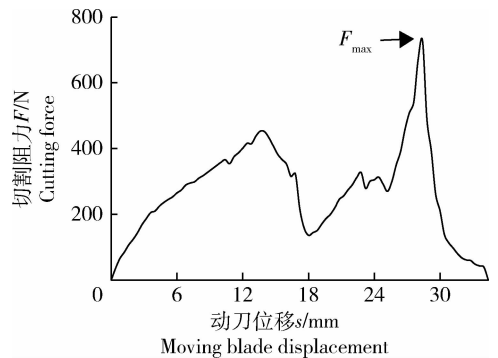


图3 切割阻力-位移曲线

Fig. 3 Cutting resistance-displacement curve

## 2 试验结果与分析

### 2.1 刃口倾角对切割过程的影响

刃口倾角是直刃动刀片刃口相对于直刃定刀刀片的夹角(图2(a))。为了分析刃口倾角的改变对向日葵茎秆切割阻力及切割能耗的影响,选择不同的刃口倾角进行试验,当加载速度为40 mm/min时,得出切割阻力随位移变化曲线(图4)。可见,向日葵茎秆在变换不同的刃口倾角进行切割时,切割阻力的变化规律具有相似性;随着刃口倾角的增大,切割阻力峰值  $F_{\max}$  及能耗  $W$  (图5)逐渐减小,这是因为切割向日葵茎秆时会产生滑切作用,随着刃口倾角增加,滑切角在变大,滑切作用增强,切割阻力减小,从而刀刃对向日葵茎秆的切割能力增强。在刃口倾角为从15°变化到20°过程中,切割阻力峰值  $F_{\max}$  及能耗  $W$  数值变化较小,因此,设计直刃刀结构时,刀刃斜角应适当增大,同其他角度相比,选择刃口倾角在20°为宜,此时切刀所受切割阻力小,能量消耗较低。

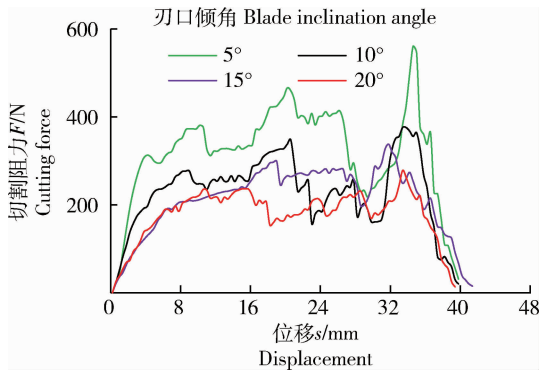


图 4 不同刃口倾角下的切割阻力-位移曲线  
Fig. 4 Cutting force-displacement curve of different blade inclination angle

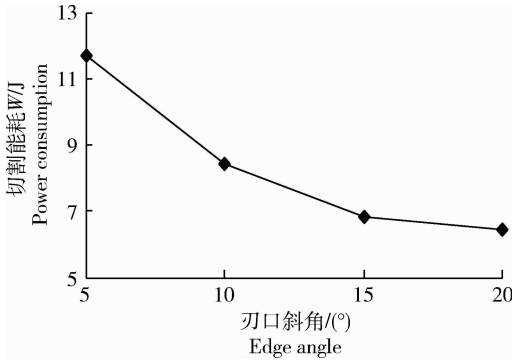


图 5 不同刃口倾角下的向日葵茎秆切割能耗  
Fig. 5 Cutting energy consumption of sunflower stem under different blade inclination angle

### 2.2 削切角度对切割过程的影响

削切角为切割方向与茎秆纤维的法线方向的夹角(图 2(b))<sup>[20]</sup>。选取 40 mm/min 的切割速度,削切角范围为 0°~45°时,从峰值切割力  $F_{max}$  随位移变化的曲线(图 6)可以看出:不同削切角的切割阻力曲线变化规律具有相似性。削切角在 0°~15°时,峰值切割阻力  $F_{max}$  与切割能耗  $W$ (图 7)随着削切角的增大有逐渐减小的趋势,这是因为当削切角增大后,刀刃在向日葵茎秆切向方向上的位移便会增大,切割茎秆纤维的法线方向上所需的分力即法向切割力会减小;随着削切角增加,直到接近 30°时,  $F_{max}$  与  $W$  反而又逐渐上升,原因是法向切削力的突然增加,同时茎秆的等效直径增大产生的影响程度大于削切角增大产生的影响程度。试验中发现,横断切时向日葵茎秆端面的切割效果较好,因为横断切导致茎秆直接沿纵向产生破裂,但削切角过大,刀刃会对向日葵茎秆的外表层产生撕裂现象。所以,当削切角为

15°时,刀刃对向日葵茎秆的切割力和切割能耗较小,切割效果较好。

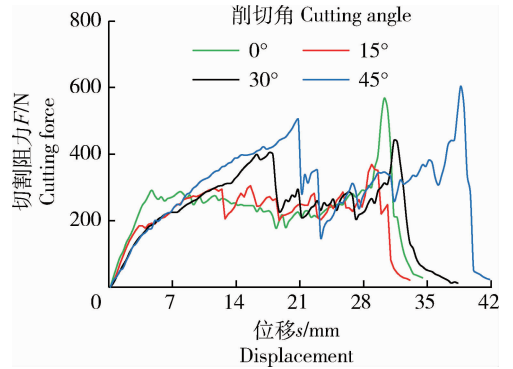


图 6 不同削切角下的切割阻力-位移曲线  
Fig. 6 Cutting force-displacement curve of different cutting angle

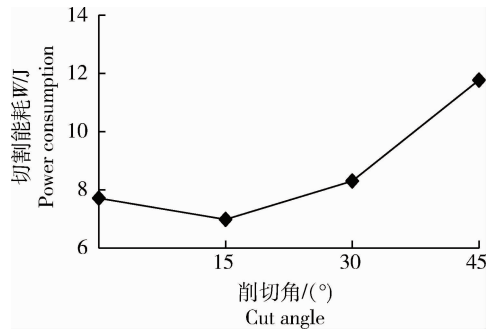


图 7 不同削切角下的向日葵茎秆切割能耗  
Fig. 7 Cutting energy consumption of sunflower stem under different cutting angle

### 2.3 斜切角度对切割过程的影响

斜切是指切割面与茎秆轴线偏斜,但切割方向与茎秆轴线垂直的切割方式(图 2(c))<sup>[20]</sup>。茎秆截面组织由表皮(外皮层)、维管束(髓芯)和基本组织(木质部)构成<sup>[21]</sup>。斜切时刀刃先触碰到茎秆的表层,且刀刃方向与表皮纤维方向垂直,不容易被切开,茎秆在施加力作用下逐渐被压缩,随着变形增加,向日葵茎秆所受的切割力增大;刀刃切开上层表皮后,与茎秆中间的髓质部和木质部接触,因其组织较软,随着茎秆变形的不断增加,茎秆所受的切割力反而有所减小,当切刀切到茎秆半径便开始接触下层的木质部,刀片需要完全切断向日葵茎秆的纤维组织,所以切割阻力很快达到峰值,而后茎秆被切断,切割阻力直线下降。设定加载速度为 40 mm/min,当斜切角为 0°即横断切时,需要克服茎秆纵向的抗拉

强度,所以切割阻力峰值  $F_{\max}$  (图 8) 和切割能耗  $W$  (图 9) 均较大,但随着斜切角度的增大,  $F_{\max}$  和  $W$  幅值在逐渐减小。当斜切角度超过  $45^\circ$  后,由于切割横截面积增大,出现茎秆切口不齐,切割阻力及切割能耗迅速增大。因此,在斜切角为  $30^\circ$  时,  $F_{\max}$  和  $W$  数值都达到最小,此时切割性能指标较好。

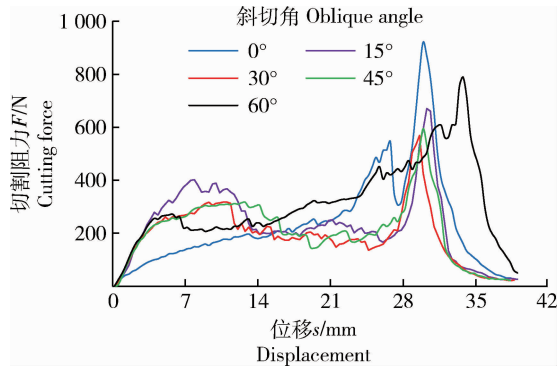


图 8 不同斜切角下的切割阻力-位移曲线

Fig. 8 Cutting force-displacement curve of different oblique angle

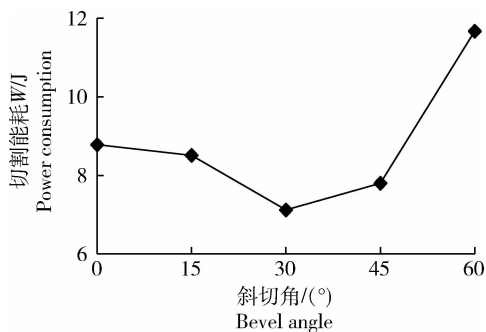


图 9 不同斜切角下的向日葵茎秆切割能耗

Fig. 9 Cutting energy consumption of sunflower stem under different chamfering angle

### 3 结论

本研究对向日葵茎秆进行了切割试验,探明了不同刃口倾角、削切角和斜切角下向日葵茎秆的切割阻力变化规律,以及各因素对切割能耗的影响程度,得到以下结论:

1) 当切割速度一定,切刀刃口倾角为  $0^\circ \sim 20^\circ$  时,切割阻力峰值  $F_{\max}$  及能耗  $W$  随着刃口倾角的增大逐渐减小。因此,设计直刃刀结构时,刀刃斜角应适当增大,从而使滑切作用增强,刃口倾角为  $20^\circ$  时切割功耗较低。

2) 当切割速度一定,削切角为  $0^\circ \sim 45^\circ$  时,随削

切角的增大,切割阻力峰值  $F_{\max}$  与切割能耗  $W$  先逐渐减小而后急剧上升。当削切角为  $15^\circ$  时,刀刃对向日葵茎秆的切割力和切割能耗较小,切割效果较好。

3) 当切割速度一定,斜切角度为  $0^\circ \sim 60^\circ$  时,切割阻力峰值  $F_{\max}$  和切割能耗  $W$  先逐渐减小而后迅速增大。当斜切角为  $30^\circ$  时,  $F_{\max}$  和  $W$  最小,此时切割阻力和切割能耗较小。

### 参考文献 References

- [1] 胡莹莹. 黑龙江省向日葵生产发展对策研究[D]. 哈尔滨: 中国农业科学院, 2014  
Hu Y Y. Study in the countermeasures of the sunflower production development in Heilongjiang Province[D]. Harbin: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014 (in Chinese)
- [2] 周艳生, 张静, 朱豪杰, 赵晓伟, 刘宇, 杨宛章. 我国葵花收获机研究现状及发展前景[J]. 农业工程, 2015, 5(2): 11-14  
Zhou Y S, Zhang J, Zhu H J, Zhao X W, Liu Y, Yang W Z. Research status and development prospects of sunflower harvester in China[J]. *Agricultural Engineering*, 2015, 5(2): 11-14 (in Chinese)
- [3] 滕绍民, 王泽群, 李洋, 杨宏伟, 李雷霞. 切割方式与切割阻力的理论研究[J]. 农机化研究, 2009(5): 89-90, 96  
Teng S M, Wang Z Q, Li Y, Yang H W, Li L X. The theory study of the cutting ways and cutting resistance[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009(5): 89-90, 96 (in Chinese)
- [4] 杨坚, 梁兆新, 莫建霖, 王汝贵, 古梅英. 甘蔗切割器切割质量影响因素的试验研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 60-64  
Yang J, Liang Z X, Mo J L, Wang R G, Gu M Y. Experimental research on factors affecting the cutting quality of sugarcane cutter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(5): 60-64 (in Chinese)
- [5] 丁龙朋, 陈永成, 葛云, 王璐. 棉秆剪切力学特性的研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(2): 116-118, 122  
Ding L P, Chen Y C, Ge Y, Wang L. Research on the shear mechanical properties of cotton stalks[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(2): 116-118, 122 (in Chinese)
- [6] 侯加林, 蒋韬, 吴彦强, 刘林, 吕钊钦, 杨启勇. 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 J L, Jiang T, Wu Y Q, Liu L, Lv Z Q, Yang Q Y. Design and experiment of wheat straw cutting reciprocating test bench [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(S1): 101-106 (in Chinese)
- [7] 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

- Song Z H, Song H L, Geng A J, Li Y D, Yan Y F, Li F D. Experiment on cutting characteristics of cotton stalk with double supports[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 37-45 (in Chinese)
- [8] 杜现军, 李玉道, 颜世涛, 李秀芝, 宋占华, 李法德. 棉秆力学性能试验[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(4): 87-91  
Du X J, Li Y D, Yan S T, Li X Z, Song Z H, Li F D. Mechanics characteristics of cotton stalks[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011 (4): 87-91 (in Chinese)
- [9] 李耀明, 秦同娣, 陈进, 赵湛. 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 Y M, Qin T D, Chen J, Zhao Z. Experimental study and analysis on mechanical property of corn stalk reciprocating cutting [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 160-164 (in Chinese)
- [10] 蒋韬, 侯加林, 李天华, 邵园园, 王震, 刘林. 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 T, Hou J L, Li T H, Shao Y Y, Wang Z, Liu L. Field reciprocating cutting test bench for corn stalks[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44 (S2): 32-36 (in Chinese)
- [11] İnce A, Uğurluay S, Güzel E, Özcan M T. Bending and shearing characteristics of sunflower stalk residue [J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 92(2): 175-181
- [12] Chen Y, Gratton J L, Liu J. Power requirements of hemp cutting and conditioning[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 87 (4): 417-424
- [13] Eshaghbeygi A, Hoseinzadeh B, Khazaei M, Masoumi A. Bending and shearing properties of wheat stem of alvand variety[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2013, 6(8): 1028-1032
- [14] Ighathinathane C, Womac A R, Sokhansanj S. Corn stalk orientation effect on mechanical cutting [J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 107(2): 97-106
- [15] 曹玉, 刘伟峰, 张欣达. 玉米茎秆切割力影响因素试验研究[J]. *农机化研究*, 2012(11): 129-132, 137
- Cao Y, Liu W F, Zhang X D. Experiments and research on influencing factors of cutting force of corn stalk[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012(11): 129-132, 137 (in Chinese)
- [16] 蒋恩臣. 畜牧业机械化[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 118-126  
Jiang E C. *Mechanization of Animal Husbandry*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 118-126 (in Chinese)
- [17] 张强, 梁留锁. 农业机械学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 179-186  
Zhang Q, Liang L S. *Agricultural Machinery* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016: 179-186 (in Chinese)
- [18] 孟海波, 韩鲁佳. 秸秆物料的特性及其加工利用研究现状与应用前景[J]. *中国农业大学学报*, 2003, 8(6): 38-41  
Meng H B, Han L J. Analysis of application and prospects and study status of the processing properties of straw materials [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, 8(6): 38-41 (in Chinese)
- [19] 赵湛, 李耀明, 徐立章, 宋淑君. 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 Z, Li Y M, Xu L Z, Song S J. 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)
- [20] 滕绍民. 自走式青饲收割机不分行割台切割机理的研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2004  
Study of cutting mechanism on self-propelled row independent forage harvester's cutter bar[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2004 (in Chinese)
- [21] 王宏立, 张伟, 董晓威, 李庆达, 李宝玉. 玉米根茬剪切力学性能试验与分析[J]. *实验力学*, 2014, 29(1): 73-82  
Wang H L, Zhang W, Dong X W, Li Q D, Li B Y. Experiment and analysis of shear mechanical property of corn stubbles[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2014, 29(1): 73-82 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春