doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.016

谷子茎秆切割力学特性试验与分析

张燕青　崔清亮　郭玉明　李红波
（山西农业大学工学院，太谷 030801）

摘要：为减小谷子茎秆切割力、降低切割功耗，设计了茎秆往复式切割试验台，对谷子茎秆进行不同收获时间、茎秆部位、切割器组合形式、切割倾角、刀片斜角、平均切割速度和茎秆喂入速度的单因素切割试验，并在单因素试验基础上对平均切割速度、切割倾角和刀片斜角 3 个因素进行响应面试验。单因素试验结果表明：收获期茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随含水率的增大而减小；基部起茎秆极限切应力、单位面积切割功耗总体上随茎秆高度的增加而减小，茎秆茎节极限切应力、单位面积切割功耗较茎秆节间大；茎秆双支撑切割形式较单支撑切割形式极限切应力、单位面积切割功耗小；切割倾角 0°～20°时，茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随切割倾角的增大先减小后增大；刀片斜角 0°～48°时，茎秆极限切应力随刀片斜角的增大而减小，而单位面积切割功耗先减小后增大；平均切割速度 0.5～1.5 m/s 时，茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随平均切割速度的增大呈先减小后平稳变化的趋势；茎秆喂入速度对切割力学特性无显著影响。响应面试验结果表明：试验因素对茎秆极限切应力、单位面积切割功耗影响的主次顺序为平均切割速度、刀片斜角、切割倾角，且最优切割参数为：平均切割速度 1.19 m/s、切割倾角 7.2°、刀片斜角 36.4°，最优参数下茎秆极限切应力和单位面积切割功耗分别为 2.88 MPa、22.38 mJ/mm^2，验证试验值与预测值相对误差不超过 3.5%。刀片斜角对比试验表明：刀片斜角 36.4°较 30°（标准Ⅱ型动刀）切割谷子茎秆时，茎秆极限切应力、单位面积切割功耗分别减小了 6.6%、3.9%。

关键词：谷子茎秆；切割；力学特性；试验
中图分类号：S225.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2019)04-0146-10

Experiment and Analysis of Cutting Mechanical Properties of Millet Stem

ZHANG Yanqing　CUI Qingliang　GUO Yuming　LI Hongbo
(*College of Engineering*, *Shanxi Agricultural University*, *Taigu* 030801, *China*)

Abstract: In order to reduce the cutting force and energy of millet stem, the reciprocating cutting test bench was developed to carry out the single factor cutting tests in different harvesting dates, stem region, combination of cutter, cutting inclination angle, blade oblique angle, average cutting speed and stem feeding speed. The response tests were carried out for three factors: average cutting speed, cutting inclination angle and blade oblique angle based on the single factor tests. The results of single factor tests showed that the cutting stress and unit area cutting energy were decreased with the increase of moisture content during harvest period. The cutting stress and unit area cutting energy were decreased with the increase of stem height, and the cutting stress and unit area cutting energy of internodes were lower than those of nodes. The cutting stress and unit area cutting energy of double-support cutting form were lower than those of single-support cutting form. When the cutting inclination angle was 0°～20°, the cutting stress and unit area cutting energy was firstly decreased and then increased with the increase of cutting inclination angle. When the blade oblique angle was 0°～48°, the cutting stress was decreased with the increase of blade oblique angle, but the unit area cutting energy was decreased firstly and then increased. When the average cutting speed was 0.5～1.5 m/s, the cutting stress and unit area cutting energy were decreased firstly and then changed steadily with the increase of average cutting speed. The stem feeding speed had no significant effect on the cutting mechanical properties of the millet stem. The results of the response test showed that the order of three factors affecting the cutting stress and unit area cutting energy

收稿日期：2019－01－20　修回日期：2019－02－12
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFD0701801)
作者简介：张燕青(1990—)，男，博士生，主要从事农业生物力学与物料机械特性研究，E-mail：zhangyq0721@126.com
通信作者：崔清亮(1968—)，男，教授，博士生导师，主要从事农业生物力学与物料机械特性研究，E-mail：qlcui@126.com

were as follows: average cutting speed, blade oblique angle and cutting inclination angle. The optimal cutting parameters were the average cutting speed of 1.19 m/s, the cutting inclination angle of 7.2°and the blade oblique angle of 36.4°. Under the optimal parameters combination, the cutting stress and unit area cutting energy were 2.88 MPa and 22.38 mJ/mm^2, respectively, and the relative error between verification test value and predicted value was less than 3.5%. The comparative test showed that the cutting stress and unit area cutting energy were reduced by 6.6% and 3.9%, respectively, when the blade oblique angle was 36.4° compared with that was 30° (standard type Ⅱ moving blade).

Key words: millet stem; cutting; mechanical properties; experiment

0　引言

谷子是中国北方旱区广泛种植的特色杂粮作物,具有抗旱耐瘠、营养丰富,水分利用效率高、适应性广等特点[1-2]。谷子收获的机械化程度低,存在收获效率低、损失大等问题,制约了谷子产业的发展[3-5]。切割是谷子收获的主要环节之一,目前谷子收获切割装置仍借鉴稻麦等大田作物的切割技术,而谷子茎秆底部机械强度较高,存在切割力大、耗能高的问题[6-9]。研究谷子茎秆切割力学特性对减小切割力和降低切割功耗具有重要的意义。

茎秆的切割过程与其机械物理性质、切割部件结构和运动参数关系密切,直接影响其力学特性。有关茎秆机械物理性质对切割力学特性影响的报道主要以茎秆部位、含水率和截面尺寸参数为影响因素进行切割试验,研究发现以上因素均影响茎秆切割力学特性[10-15]。除茎秆机械物理性质外,国内外学者以切割刀片组合形式、切割方式为影响因素,分析切割部件结构参数对茎秆力学性质的影响,研究表明,锯齿刀片较光刃刀片切割力小,且滑切、斜切和削切茎秆时均可一定程度地减阻降耗[10-11,16-23]。关于切割部件运动参数对茎秆力学性质影响的研究,部分学者研制了具有完善测试系统的茎秆切割试验台,分析了切割速度、茎秆喂入速度对其切割性能的影响,发现切割速度对茎秆切割力和功耗影响显著[18,24-27]。但针对谷子茎秆切割力学特性的研究未见报道。

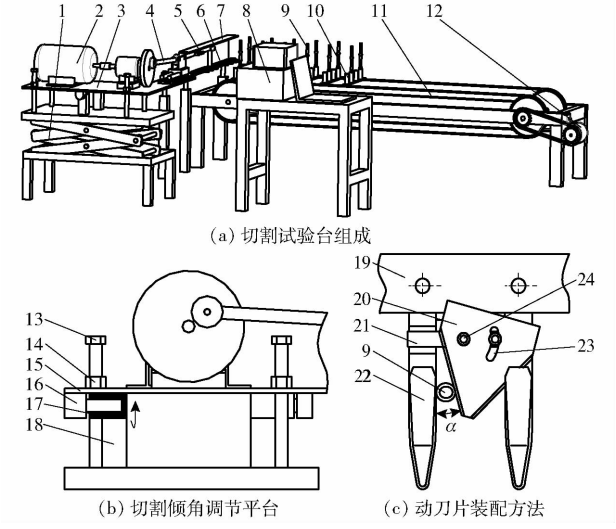
针对以上问题,本文设计作物茎秆往复式切割试验台,在对谷子茎秆进行不同收获时间、茎秆部位、切割器组合形式、切割倾角、刀片斜角、平均切割速度和茎秆喂入速度单因素切割试验基础上,以茎秆最小极限切应力和单位面积切割功耗为评价指标,以平均切割速度、切割倾角和刀片斜角为试验因素进行响应面试验,以期得到谷子茎秆切割的最优工作参数,为减小谷子茎秆切割力、降低切割功耗以及谷子收获机械切割部件的优化设计提供参考。

1　切割试验台

茎秆往复式切割试验台主要由切割装置、茎秆喂入装置和测试系统组成,该试验台结构简单、切割参数调节便捷,可实现不同割台高度、平均切割速度、茎秆喂入速度、切割倾角、刀片斜角等多个因素的切割力学特性测试试验。

1.1　切割装置

切割装置包括液压升降平台、切割倾角调节平台、变频调速电机、曲柄滑块机构、切割器和防护板等,如图 1a 所示。液压升降平台底部固定于地基,可 0 ~ 1 m 无级调节切割装置高度。切割倾角调节平台装配于液压升降平台上方,包括调节螺杆、支座、转动轴、转动轴轴套、调节平台和底座等,如图 1b 所示,转动轴轴套底部焊接于支座顶部,其顶部焊接于调节平台底部,转动轴内侧与转动轴轴套配合,外侧顶部焊接于调节平台底部,调节螺杆穿过螺母和调节平台,与支座共同支撑调节平台,通过调节螺杆,转动轴转动,切割倾角调节平台上翘,达到调节切割倾角的目的,调节范围 0° ~ 20°。变频调速电机、曲柄滑块机构、切割器和防护板等装配于切



(a) 切割试验台组成　(b) 切割倾角调节平台　(c) 动刀片装配方法

图 1　茎秆往复式切割试验台示意图

Fig. 1　Diagrams of reciprocating cutting test bench of stem

1. 液压升降平台　2. 变频调速电机　3. 切割倾角调节平台　4. 曲柄滑块机构　5. 拉压力传感器　6. 切割器　7. 防护板　8. 测试系统　9. 谷子茎秆　10. 茎秆固定座　11. 双排链条传动机构　12. 直流调速电机　13. 调节螺杆　14. 螺母　15. 调节平台　16. 转动轴　17. 转动轴轴套　18. 支座　19. 切割器底座　20. 动刀片　21. 动刀杆　22. 护刃器　23. 动刀片弧形孔　24. 动刀片中心孔

割倾角调节平台上方,切割器由变频调速电机提供动力,采用曲柄滑块机构驱动其往复运动,控制变频调速电机转速可调节平均切割速度,调节范围 0 ~ 2 m/s。刀片斜角 α(图 1c)调节方法简便,具体操作为:动刀片设有中心孔和围绕中心孔的弧形孔,以中心孔为支点旋转动刀片,改变动刀片弧形孔与动刀杆的相对位置,可 0° ~48°调节刀片斜角。

1.2 茎秆喂入装置

茎秆喂入装置包括直流调速电机、双排链条传动机构和茎秆固定座等,如图 1a 所示,其中茎秆固定座成列装配于双排链条传动机构之间,双排链条传动机构由直流调速电机提供动力,驱动茎秆固定座运动,使茎秆成列依次喂入切割器,完成茎秆输送,控制直流调速电机转速可调节茎秆喂入速度,调节范围 0 ~2 m/s。

1.3 测试系统

测试系统包括力传感器、TST5000 型数据采集仪等,如图 1a 所示。拉压力传感器装配于连杆 2 中部,可直接测量切割力,如图 2 所示,其激励电压 12 V,输出电压 -5 ~ 5 V,量程 0 ~ 3 000 N,精度 0.05%。数据采集仪基本原理:用带以太网接口的嵌入式 CPU 单元,控制 A/D 通道进行采集,并将采集的数据采用 TCP/IP 协议通过以太网接口上传至主控机显示,采集频率 5 kHz。

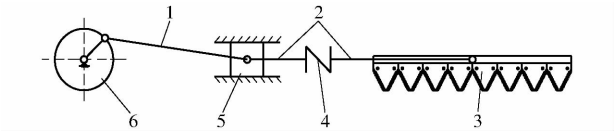


图 2 拉压力传感器连接示意图

Fig. 2 Connection diagram of force sensor

1. 连杆 1 2. 连杆 2 3. 切割器 4. 拉压力传感器 5. 滑块 6. 曲柄转盘

2 试验

2.1 试验材料

谷子茎秆取自山西省太谷县杂粮种植试验田,品种为晋谷 21 号,播种日期 2018 年 5 月 15 日,收获日期 9 月 27 日至 10 月 9 日。随机选取待收获无倒伏、无病虫害的茎秆,取回后的茎秆密封袋包裹并冷藏以防含水率变化,及时完成切割试验。

2.2 试验因素

茎秆机械物理性质、切割器结构参数和运动参数均影响其力学性质。茎秆机械物理性质影响因素的选择:谷子收获时间不同,茎秆含水率不同,含水率影响茎秆切割力学特性[12-14],谷子机收一般需 15 d,选用收获期(9 月 27 日至 10 月 9 日,每隔 3 d 取样一次)的茎秆进行切割力学特性测试。茎秆不同部位切割力学特性不同[10-12],考虑到作物茎秆低茬切割要求,田间实测联合收获机切割谷子茎秆留茬高度 8.5 cm,对应谷子第 2 节间茎秆,试验除茎秆部位影响因素外,其余因素试验时均取谷子第 2 节间茎秆作为切割部位。

切割部件结构参数影响因素的选择:谷物联合收获机(全喂入、半喂入型)广泛使用的切割器为国标Ⅳ、Ⅵ型[28-29],组合形式见表 1,本文分析表 1 中 3 种切割器组合形式对茎秆切割力学特性的影响。谷子收获时调节割台升降机构,切割倾角变化,对茎秆产生斜切作用,斜切影响茎秆切割力学性质[15,22-23],本文进行不同切割倾角(0° ~20°)切割试验。刀片斜角影响茎秆切割力学性质,斜角过大造成茎秆滑脱,斜角过小造成切割功耗增大[20-21]。切割茎秆时需满足的夹持条件是切割刀片能夹住或咬住茎秆形成稳定的切割,齿刃动刀切割茎秆时,齿尖首先刺入茎秆表皮将茎秆咬住立即进行稳定切割,茎秆夹持临界角为 34° ~48°[30],故选择刀片斜角 0° ~48°进行切割力学试验。

表 1 切割器组合形式

Tab. 1 Combination type of cutter

型号	组合形式		
	1	2	3
切割器	标准Ⅳ型	标准Ⅳ型	标准Ⅵ号
动刀片	标准Ⅱ型	标准Ⅳ型	标准Ⅴ型
定刀片			标准Ⅲ型
护刃器	标准Ⅳ型	标准Ⅳ型	

切割部件运动参数影响因素的选择:谷子收获时,籽粒平均含水率(18.21% ~21.30%)与茎秆平均含水率(64.45% ~70.75%)较高,谷物联合收获机作业速度不宜过快,一般为 2 ~5 km/h,且往复式平均切割速度为 1.0 m/s 左右[30],故选择茎秆喂入装置速度为 0.5 ~1.39 m/s,切割器平均切割速度为 0.5 ~1.5 m/s。

2.3 试验方法

切割试验为多株茎秆连续切割,试验前设定割台高度、切割倾角和刀片斜角等切割参数,并通过塞尺测量,设定切割面(动、定刀片或动刀片与护刃器)前端间隙为 0.4 mm,后端间隙为 1.0 mm[30]。随后测量茎秆切割部位外形尺寸参数(长轴和短轴,谷子茎秆横截面近似空心椭圆),并将茎秆紧固于茎秆固定座。试验时启动测试系统和切割装置,调节变频调速电机转速以设定平均切割速度,待试验台切割装置和测试系统稳定运转后,记录切割器空载阻力并启动茎秆喂入装置,调节直流调速电机转速以设定茎秆喂入速度,喂入切割器前,茎秆有一

定距离运行，待喂入速度稳定后，谷子茎秆成列依次被输送至切割器（每列 4 株，共 6 列），切割器往复运动，将茎秆切断（图 3）。数据采集仪实时记录拉压力传感器切割力信号，以标准电压形式输出，经传感器标定方程计算得到切割力与时间曲线（图 4），图中顶点 F_{max} 为测试系统所记录单列茎秆最大切割力，N；虚线 f 为切割器空载时平均切割阻力，N；阴影部分面积与平均切割速度的乘积为切割功耗，J。完成切割试验后，测量茎秆切断面附近未被挤压变形处的壁厚，并采用干燥法测定茎秆含水率。

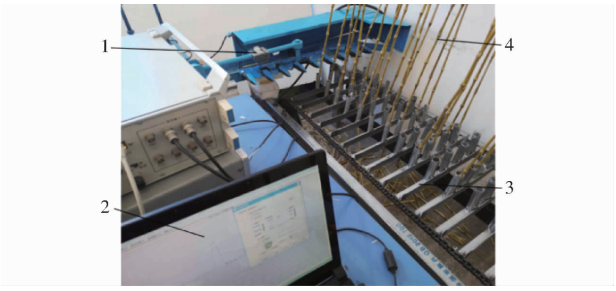


图 3　谷子茎秆往复式切割试验

Fig. 3　Reciprocating cutting test of millet stem

1. 切割装置　2. 测试系统　3. 茎秆喂入装置　4. 谷子茎秆

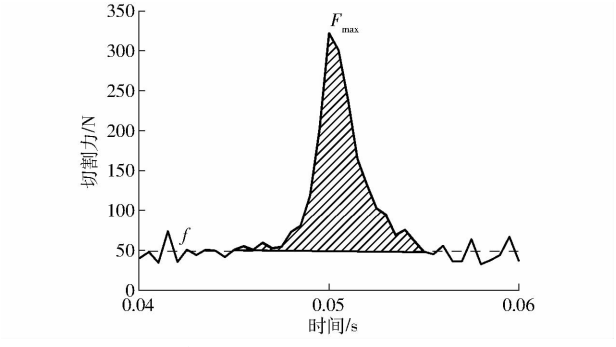


图 4　单列谷子茎秆切割力与时间曲线

Fig. 4　Curve of cutting force with time of single row millet stems

采用茎秆极限切应力、单位面积切割功耗作为评价指标，以避免同一高度的谷子茎秆横截面尺寸不同对试验结果的影响，相关计算公式为

$$F_c = 601.94U - 0.13 \quad (R^2 = 0.9999) \tag{1}$$

$$v = \frac{nd}{30} \tag{2}$$

$$W = \int_0^t (F_c - f)\, v\mathrm{d}t \tag{3}$$

$$A_i = \frac{\pi}{4\cos\beta}\left[D_{il}D_{is} - (D_{il} - 2T_i)(D_{is} - 2T_i)\right] \tag{4}$$

$$A_s = \sum_{i=1}^{4} A_i \tag{5}$$

$$\tau = \frac{F_{max} - f}{A_s} \tag{6}$$

$$w = \frac{1\,000W}{A_s} \tag{7}$$

式中　U——拉压力传感器输出电压，V

F_c——单列茎秆切割力，N

v——平均切割速度，m/s

n——曲柄转速，r/min

d——曲柄直径，m

W——单列茎秆切割功耗，J

t——切割器与单列茎秆作用时间，s

A_i——第 i 株茎秆切割部位横截面积，mm^2

A_s——单列茎秆切割部位总横截面积，mm^2

β——切割倾角，(°)

D_{il}——第 i 株茎秆切割部位横截面长轴长度，mm

D_{is}——第 i 株茎秆切割部位横截面短轴长度，mm

T_i——第 i 株茎秆切割部位横截面壁厚，mm

τ——极限切应力，MPa

w——单位面积切割功耗，mJ/mm^2

2.4　单因素试验

2.4.1　茎秆机械物理特性对切割力学特性的影响

（1）含水率

采用切割器组合形式 1，设定平均切割速度 1 m/s，茎秆喂入速度 0.63 m/s，切割倾角 10°，刀片斜角 30°，分析收获时间对其切割力学特性的影响，试验结果如图 5 所示。

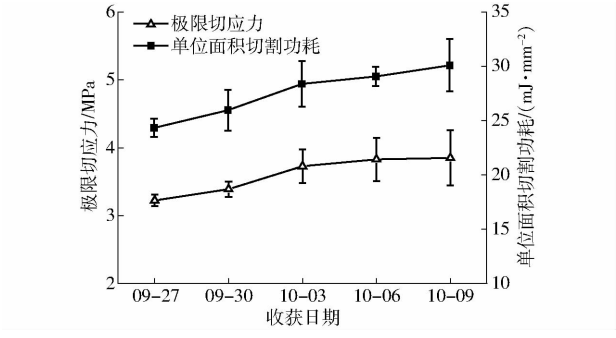


图 5　谷子茎秆切割力学特性随收获时间的变化曲线

Fig. 5　Variation curve of cutting mechanical properties of millet stem with harvest date

作物茎秆收获时间对茎秆机械力学特性的影响主要是茎秆含水率变化的影响[31]。收获期内茎秆含水率随时间的推移而下降，10 月 9 日茎秆平均含水率较 9 月 27 日下降了 6.3%，而茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随时间的推移分别增大了 16.25%、19.14%（图 5），且 10 月 9 日采集的谷子茎秆较 9 月 27 日和 30 日采集的茎秆极限切应力、单位面积切割功耗显著增大（$P < 0.05$），原因是茎秆含水率减少，干物质增多，茎秆韧性增强，其极限切应力、单位面积切割功耗增大[31]。将茎秆含水率与切割力学特性进行曲线回归拟合，拟合方程如图 6 所示，茎秆极限切应力、单位面积切割功耗与含水率拟合模型精度 $R^2 \geq 0.7014$，研究结果可为谷子

适宜收获时期的选择提供参考。

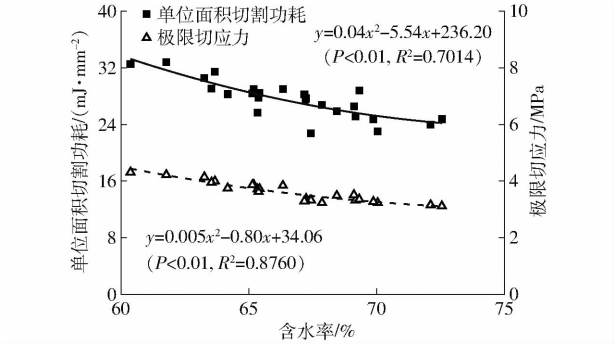


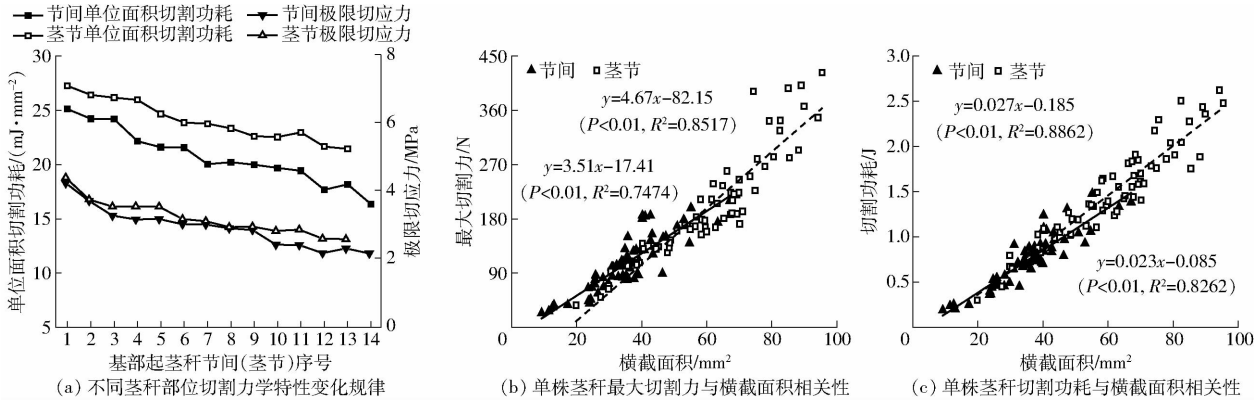
图 6 谷子茎秆切割力学特性与含水率相关性

Fig. 6 Correlation between cutting mechanical properties and moisture content of millet stem

(2)茎秆部位

采用切割器组合形式 1,设定平均切割速度 1 m/s,茎秆喂入速度 0.63 m/s,切割倾角 10°,刀片斜角 30°,对谷子茎秆基部起各节间、茎节进行切割试验,茎秆含水率 69.17% ~74.26%,试验结果如图 7 所示。

由图 7a 可知,基部起谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随茎秆高度的增加总体呈减小趋势,基部起第 1 节间、茎节极限切应力显著大于其余部位茎秆节间、茎节($P<0.01$),且基部起茎秆第 1 节间、茎节与第 9 节及以上茎秆节间、茎节单位面积切割功耗差异性显著($P<0.05$),原因是第 1 茎秆



(a) 不同茎秆部位切割力学特性变化规律 (b) 单株茎秆最大切割力与横截面积相关性 (c) 单株茎秆切割功耗与横截面积相关性

图 7 谷子茎秆部位对切割力学特性的影响

Fig. 7 Effect of millet stem region on cutting mechanical properties

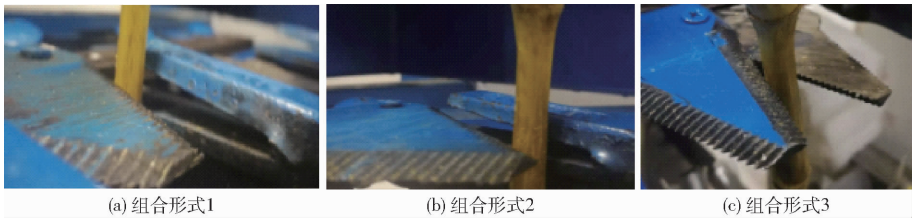
节间、茎节木质化程度较高,机械强度较高,造成茎秆极限切应力大、单位面积切割功耗高。茎秆节间、茎节最大切割力、切割功耗随茎秆高度的增加而减小,且差异性显著($P<0.01$),原因是茎秆被切处横截面积是影响切割力学性质的主要因素,茎秆基部起至顶部被切处横截面积逐渐减小,茎秆最大切割力、切割功耗也逐渐减小,将茎秆最大切割力、切割功耗与横截面积进行回归,拟合方程见图 7b、7c,拟合模型精度 $R^2\geq0.7474$。谷子茎秆茎节表面隆起,内部充实且机械组织发达,难以破坏,而节间内部为中空腔,因此谷子茎秆茎节极限切应力、单位面积切割功耗显著高于茎秆节间($P<0.05$),且茎秆茎节极限切应力、单位面积切割功耗较茎秆节间分别增加了 9.41%、13.74%。研究结果表明,在谷子茎秆收获切割过程中,根据具体要求(秸秆饲料利用和第 2 年耕整地等)适当提高割台高度且避免切割谷子茎秆茎节可减阻降耗。

2.4.2 切割器结构参数对茎秆力学特性的影响

(1)切割器类型

设定平均切割速度为 1 m/s,茎秆喂入速度 0.63 m/s,切割倾角 10°,茎秆含水率 69.17% ~72.55%,分析表 1 中 3 种切割器组合形式对茎秆切割力学特性的影响,切割器组合形式如图 8 所示,组合形式 1、2 为茎秆双支撑切割形式,组合形式 1 中动刀片厚度为 2 mm,组合形式 2 中动刀片厚度 3 mm。组合形式 3 为茎秆单支撑形式,刀片厚度 3 mm。

试验结果表明:组合形式 1 条件下,茎秆极限切应力、单位面积切割功耗分别为(3.20 ± 0.21) MPa、(24.24 ± 2.75) mJ/mm²;在组合形式 2 条件下,茎秆



(a) 组合形式1 (b) 组合形式2 (c) 组合形式3

图 8 不同切割器组合形式

Fig. 8 Combination types of different cutters

极限切应力、单位面积切割功耗分别为(3.26 ± 0.23) MPa、(25.12 ± 2.52) mJ/mm^2；在组合形式 3 条件下，茎秆极限切应力、单位面积切割功耗分别为(3.47 ± 0.77) MPa、(29.98 ± 4.56) mJ/mm^2。切割器组合形式 1 与组合形式 2 对茎秆极限切应力、单位面积切割功耗影响无显著差异($P > 0.05$)，但组合形式 2 较组合形式 1 茎秆极限切应力、单位面积切割功耗略微增大，原因是茎秆切割过程分为挤压和剪切两个过程[32]，刀片厚度的增加使刀片与茎秆接触面面积增大，引起茎秆变形增大，造成茎秆极限切应力、单位面积切割功耗增大。谷子茎秆抗弯刚度较强，采用切割器组合形式 3(单支撑)可顺利切断，但此组合形式较组合形式 1、2 茎秆极限切应力、单位面积切割功耗显著增大($P < 0.05$)，表明双支撑形式切割谷子茎秆较单支撑形式省力省功。综上，选择组合形式 1 切割谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗最小。

(2)切割倾角

谷子收获过程中，割台升降机构运动，切割倾角变化，对茎秆产生斜切作用，斜切影响茎秆切割力学性质，可降低切割力和功耗 30% ~40%[19,22-23]。采用切割器组合形式 1，设定平均切割速度 1 m/s，茎秆喂入速度 0.63 m/s、刀片斜角 30°，茎秆含水率 69.17% ~72.55%，分析切割倾角对其切割力学特性的影响，试验结果如图 9 所示。

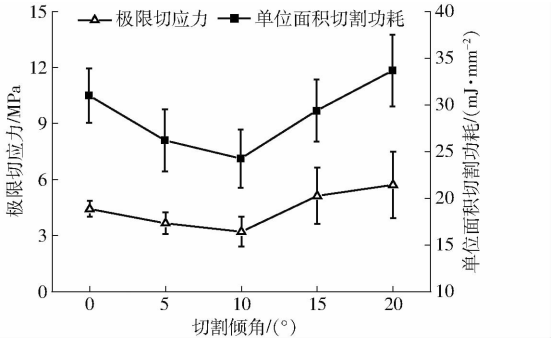


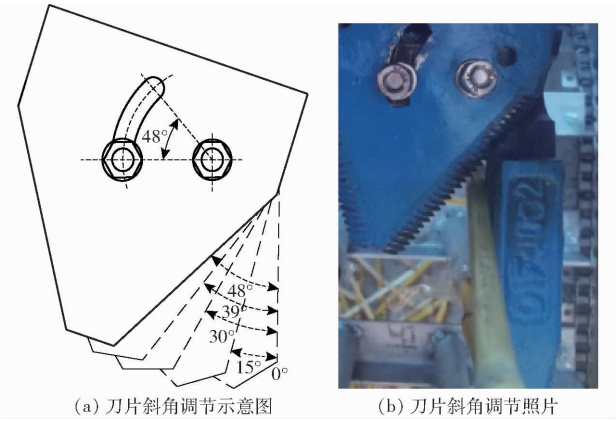
图 9　切割倾角对谷子茎秆切割力学特性的影响

Fig. 9　Effect of cutting inclination angle on cutting mechanical properties of millet stem

切割试验中，当切割倾角为 0° ~20°时，茎秆顺利被一次切断，未发生明显重割漏割现象。由图 9 可知，茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随切割倾角的增大呈先减小后增大的趋势，且 10°切割倾角下极限切应力、单位面积切割功耗显著低于其余切割倾角下的目标值($P < 0.05$)，10°切割倾角较 0°切割倾角茎秆极限切应力和单位面积切割功耗分别减小了 27.55%、21.76%，原因是茎秆为粘弹性材料，极限切应力与其法向应力和粘聚力有关，粘聚力是茎秆纤维之间的相互吸引力，这种吸引力是物质分子之间存在分子力的表现，随着切割倾角增大，切割时易使纤维组织撕裂[23]，粘聚力减小，故茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随切割倾角的增大而减小；当切割倾角继续增大，茎秆被切处横截面积逐渐增大，此时其影响程度大于切割倾角破坏纤维组织的影响程度，谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随后呈增大趋势。

(3)刀片斜角

刀片斜角影响作物茎秆切割力学性质[20-21]。采用刀片组合形式 1，设定平均切割速度 1 m/s，茎秆喂入速度 0.63 m/s，切割倾角 10°，茎秆含水率 69.17% ~72.55%，分析刀片斜角对茎秆极限切应力、单位面积切割功耗的影响，动刀片调节如图 10 所示，试验结果见图 11。



(a) 刀片斜角调节示意图　　(b) 刀片斜角调节照片

图 10　动刀片调节示意图

Fig. 10　Diagrams of adjustment of moving blade

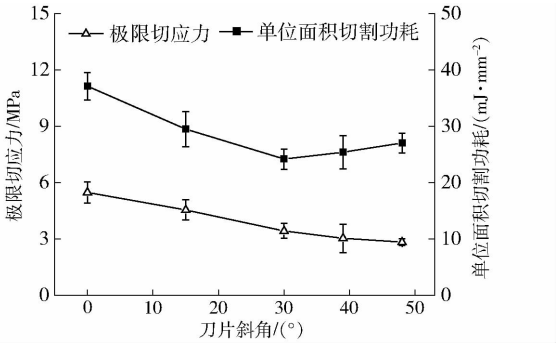


图 11　刀片斜角对谷子茎秆切割力学特性的影响

Fig. 11　Effect of blade oblique angle on cutting mechanical properties of millet stem

由图 11 可知，刀片斜角为 0° ~48°时，谷子茎秆极限切应力随刀片斜角的增大而减小，且刀片斜角对茎秆极限切应力影响显著($P < 0.05$)，48°较 0°刀片斜角切割茎秆极限切应力减小了 48.25%；茎秆单位面积切割功耗随刀片斜角增大呈先减小后增大的趋势，且刀片斜角对茎秆单位面积切割功耗影响显著($P < 0.05$)，30°较 0°刀片斜角切割茎秆单位面积功耗减小了 34.84%。原因是在切割茎秆时，茎

秆首先被切割刀片夹持,切割刀片瞬时将其切断,刀片斜角起到滑切茎秆的作用,刀片斜角越大,滑切角越大。根据高略契金力学试验结果,滑切材料时,滑切角越大,刀刃切入茎秆的实际楔角变小,所需法向力减小,茎秆极限切应力和单位面积切割功耗减小[19];当滑切角过大时,切割功耗不仅用于切断茎秆,茎秆与切割刀刃相对行程增大,摩擦功耗增大,虽极限切应力减小,但摩擦功耗影响更显著[19,33],故茎秆单位面积切割功耗随后呈现增大趋势。

2.4.3 切割运动参数对茎秆力学特性的影响

(1)平均切割速度

切割速度影响作物茎秆切割力学性质[18,24-27],采用切割器组合形式 1,设定茎秆喂入速度 0.63 m/s、切割倾角 10°,刀片斜角 30°,茎秆含水率 69.17% ~ 72.55%,分析平均切割速度对茎秆切割力学特性的影响,试验结果如图 12 所示。

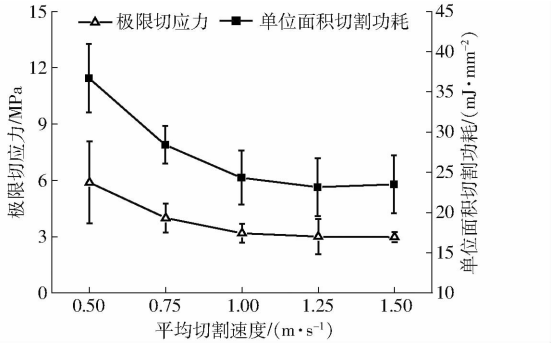


图 12 平均切割速度对谷子茎秆切割力学特性的影响

Fig. 12 Effect of average cutting speed on cutting mechanical properties of millet stem

由图 12 可知,谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随平均切割速度的增大均呈先减小后平稳变化的趋势。当切割速度 0.5 ~ 1 m/s,茎秆极限切应力、单位面积切割功耗下降明显($P < 0.05$),平均切割速度 1 m/s 较 0.5 m/s 茎秆极限切应力、单位面积切割功耗分别减小了 45.96%、33.76%;当切割速度 1 ~ 1.5 m/s,单位面积切割功耗变化不大($P > 0.05$)。研究结果与棉秆、玉米茎秆切割试验结果相似[11,24],原因是谷子茎秆为多相组织构成的复合材料,属于粘弹性体,整个切割过程分为刀片预挤压茎秆阶段和切割阶段,切割速度较慢时,被切茎秆有较大的压缩变形,随切割速度的增大,茎秆切割点传递变形的时间逐渐减小,茎秆因刀片压缩的变形量也逐渐减少,造成极限切应力和单位面积切割功耗减小;当切割速度超过某个数值继续增加时,动刀片对谷子茎秆切割点传递变形的时间不再显著变化,挤压变形量变化不明显[11,24],即较高速度下,动刀片易切入茎秆完成切割。故茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随平均切割速度的增大呈先下降后平稳变化的趋势。

(2)茎秆喂入速度

采用切割器组合形式 1,设定平均切割速度 1 m/s、切割倾角 10°,刀片斜角 30°,茎秆含水率 69.17% ~ 72.55%,分析茎秆喂入速度对其切割力学特性的影响,试验结果如图 13 所示。

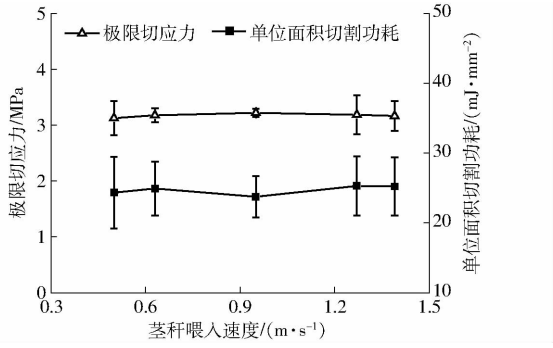


图 13 茎秆喂入速度对谷子茎秆切割力学特性的影响

Fig. 13 Effect of stem feeding speed on cutting mechanical properties of millet stem

由图 13 可知,谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随茎秆喂入速度增大呈平稳变化趋势,通过均值多重比较得到茎秆喂入速度对其极限切应力和单位面积切割功耗影响均不显著($P > 0.05$),结果表明:喂入切割器的茎秆被切割刀片立即夹持,瞬时切断,力学性质与茎秆机械物理性质、切割速度和刀片形式等因素有关,与茎秆喂入速度关系不大。但是选择适宜茎秆喂入速度可提高茎秆切割质量,试验中观察到,平均切割速度 1 m/s,茎秆喂入速度大于等于 0.95 m/s 时,16.6% 的茎秆未来得及切割,在切割台前折断,造成损失;当茎秆喂入速度为 0.5 m/s 时,茎秆全部被切断,但 8.3% 的茎秆切割后出现撕裂现象,割茬不平整;茎秆喂入速度0.63 m/s时,可顺利切断,且割茬较平整,即平均切割速度 1 m/s、喂入速度 0.63 m/s 时割茬质量最好,即切割谷子茎秆时切割速比应控制在 1.59。

2.5 响应面试验

2.5.1 试验结果及回归模型建立

为优化谷子茎秆切割参数,利用 Design-Expert 8.0.6 软件,采用 Central - Composites 试验设计原理,根据单因素试验结果,选取显著影响谷子茎秆力学特性的切割参数(平均切割速度、切割倾角和刀片斜角),以茎秆极限切应力、单位面积切割功耗为评价指标,在切割器组合形式 1,切割速比 1.59、茎秆含水率 69.17% ~ 72.55% 的条件下进行响应面切割试验。响应面试验因素编码见表 2,每组试验重复 5 次,求平均值。

表 2　因素编码

Tab. 2　Coding of factors

编码	因素		
	平均切割速度 v/(m·s^{-1})	切割倾角 β/(°)	刀片斜角 α/(°)
−1.682	0.58	1.6	14.9
−1	0.75	5.0	21.0
0	1.00	10.0	30.0
1	1.25	15.0	39.0
1.682	1.42	18.4	45.1

试验结果见表 3，表中 x_1、x_2、x_3 分别为平均切割速度、切割倾角、刀片斜角的编码值。对表 3 试验数据进行方差分析（表 4），得到茎秆极限切应力、单位面积切割功耗回归方程

$$\tau = 14.28 - 10.50v - 0.43\beta - 0.19\alpha + 0.09v\beta + 0.05v\alpha + 0.003\,7\alpha\beta + 3.51v^2 + 0.013\beta^2 + 0.001\,4\alpha^2 \quad (8)$$

$$w = 65.47 - 24.37v - 1.41\beta - 1.30\alpha + 0.13v\beta + 0.05v\alpha + 0.02\beta\alpha + 8.58v^2 + 0.04\beta^2 + 0.02\alpha^2 \quad (9)$$

由表 4 可知，茎秆极限切应力、单位面积切割功耗回归模型极显著（$P < 0.01$），失拟项不显著（$P > 0.05$），模型决定系数 $R^2 \geqslant 0.8914$，拟合精度较高，表明该模型在试验取值范围内可分析各因子的影响程度与预测最优值。

通过比较 P 值可判断回归模型中各因素显著程度。对于茎秆极限切应力，模型中因素 v、α、v^2、β^2 为极显著项（$P < 0.01$）；β、$\beta\alpha$ 为显著项（$P < 0.05$）；其余为不显著项（$P > 0.05$）。对于茎秆单位面积切割功耗，模型中因素 v、α、β^2、α^2 为极显著项（$P < 0.01$）；$\beta\alpha$ 为显著项（$P < 0.05$）；其余为不显著项（$P > 0.05$）。综上，各因素对谷子茎秆极限切应力和单位面积切割功耗影响程度从大到小依次为平均切割速度 v、刀片斜角 α、切割倾角 β。

表 3　响应面试验结果

Tab. 3　Results of response surface test

试验序号	x_1	x_2	x_3	极限切应力 τ/MPa	单位面积切割功耗 w/(mJ·mm^{-2})
1	−1	−1	−1	4.75	28.94
2	1	−1	−1	3.52	26.52
3	−1	1	−1	4.34	26.89
4	1	1	−1	4.01	26.44
5	−1	−1	1	3.36	24.36
6	1	−1	1	3.00	23.75
7	−1	1	1	4.05	26.88
8	1	1	1	3.72	25.56
9	−1.682	0	0	4.11	27.70
10	1.682	0	0	3.20	21.67
11	0	−1.682	0	3.78	24.93
12	0	1.682	0	4.09	27.31
13	0	0	−1.682	3.64	28.58
14	0	0	1.682	3.05	25.05
15	0	0	0	3.19	23.43
16	0	0	0	3.24	23.45
17	0	0	0	3.18	24.01
18	0	0	0	3.25	21.91
19	0	0	0	2.99	23.91
20	0	0	0	2.96	22.78

表 4　回归方程方差分析

Tab. 4　Variance analysis of regression equation

方差来源	极限切应力						单位面积切割功耗					
	平方和	自由度	均方差	F	P	显著性	平方和	自由度	均方差	F	P	显著性
模型	4.68	9	0.52	14.60	0.000 1	**	77.13	9	8.57	9.12	0.000 9	**
v	1.05	1	1.05	29.37	0.000 3	**	16.35	1	16.35	17.40	0.002 0	**
β	0.30	1	0.30	8.31	0.016 3	*	2.82	1	2.82	3.00	0.114 0	
α	0.89	1	0.89	24.92	0.000 5	**	14.72	1	14.72	15.67	0.002 7	**
$v\beta$	0.11	1	0.11	3.03	0.112 2		0.20	1	0.20	0.21	0.655 6	
$v\alpha$	0.10	1	0.10	2.65	0.134 3		0.11	1	0.11	0.12	0.738 8	
$\beta\alpha$	0.22	1	0.22	6.20	0.031 9	*	5.22	1	5.22	5.55	0.040 2	*
v^2	0.69	1	0.69	19.44	0.001 3	**	4.15	1	5.15	4.41	0.062 0	
β^2	1.46	1	1.46	40.96	<0.000 1	**	15.70	1	15.70	16.71	0.002 2	**
α^2	0.17	1	0.17	4.86	0.052 0		23.96	1	23.96	25.51	0.000 5	**
残差	0.36	10	0.04				9.39	10	0.94			
失拟项	0.28	5	0.06	3.40	0.102 6		6.29	5	1.26	2.03	0.228 1	
纯误差	0.08	5	0.02				3.10	5	0.62			
总和	5.04	19					86.25	19				

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

2.5.2 交互因素对茎秆切割力学特性的影响

由表4可知,交互项$\beta\alpha$对谷子茎秆极限切应力和单位面积切割功耗影响显著($P<0.05$),以交互项$\beta\alpha$对极限切应力和单位面积切割功耗的影响进行分析。

由图14可知,茎秆极限切应力随刀片斜角的增大而减小,单位面积切割功耗随刀片斜角的增大先减小后增大,原因是刀片斜角作用的本质是对茎秆产生滑切作用,刀片斜角越大,刀片刃口切入茎秆时的实际楔角越小,切割越省力[19]。切割功耗由切割力和刀片楔面与茎秆摩擦阻力产生,当刀片斜角0°~36.4°时,切割力为影响切割功耗的主要因素,随着刀片斜角的增大,刀刃切进茎秆时所需的切割力减小,切割功耗减小[19];当刀片斜角继续增大时,刀片切割行程增大,摩擦阻力成为影响切割功耗的主要因素,消耗于刀片楔面与茎秆间的摩擦功显著增大,茎秆单位面积切割功耗增大[33]。茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随切割倾角的增大先减小后增大,原因是切割倾角作用的本质是对茎秆产生斜切作用,当切割倾角0°~7.2°时,随着切割倾角的增大,刀片易破坏茎秆纤维组织[23],茎秆极限切应力和单位面积切割功耗减小;当切割倾角继续增大时,茎秆被切处横截面积增大,对其切割力学特性影响程度大于斜切破坏茎秆纤维的影响程度,茎秆极限切应力、单位面积切割功耗增大。图14中显示的三维曲面坡度明显,二维等高线呈椭圆形,说明切割倾角和刀片斜角之间的交互作用对响应值影响较大,与方差分析结果一致,表明斜滑切谷子茎秆时可减小切割力,降低切割功耗。

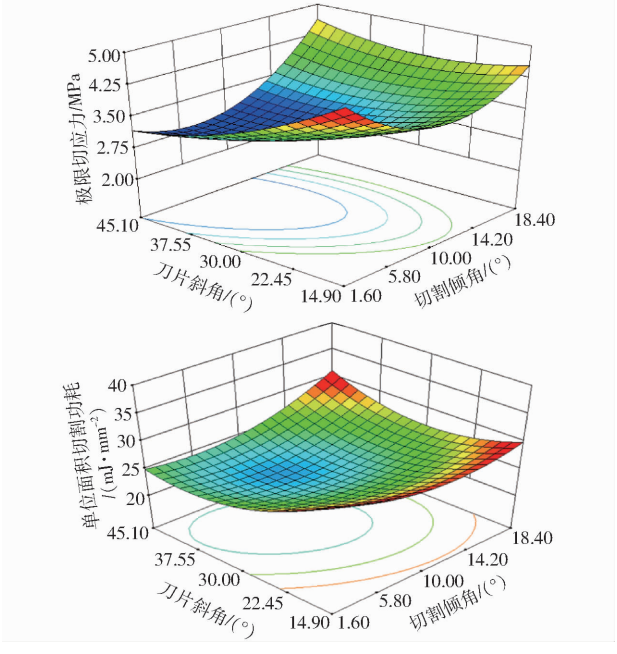


图14 切割倾角和刀片斜角对茎秆极限切应力、单位面积切割功耗的影响

Fig. 14 Effect of cutting inclination angle and blade oblique angle on cutting stress and unit area cutting energy of stem

2.5.3 参数优化及验证对比试验

为得到最小谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗,利用响应面设计软件中Optimization功能,得到切割谷子茎秆最优切割参数组合:平均切割速度1.19 m/s,切割倾角7.2°,刀片斜角36.4°,在该组合下进行验证试验。在平均切割速度1.19 m/s,切割倾角7.2°条件下,比较刀片斜角36.4°和30°(标准Ⅱ型动刀片)切割力学特性,试验结果见表5。

表5 验证试验与对比试验结果

Tab.5 Results of verification test and comparative test

项目	刀片斜角/(°)	极限切应力/MPa	单位面积切割功耗/(mJ·mm⁻²)
预测值	36.4	2.88	22.38
验证试验值	36.4	2.97	23.16
对比试验值	30.0	3.18	24.10

由表5可知,茎秆极限切应力、单位面积切割功耗验证试验值分别为2.97 MPa、23.16 mJ/mm^2,与回归模型预测值相对误差不超过3.5%,表明该模型可用于预测谷子茎秆极限切应力和单位面积切割功耗。谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗在最优切割参数下,刀片斜角36.4°较刀片斜角30°(标准Ⅱ型动刀片)茎秆极限切应力、单位面积切割功耗分别减小了6.6%、3.9%。

3 结论

(1)谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗随收获时间(9月27日至10月9日)的推移而增大;基部起谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗总体上随茎秆高度的增加呈减小趋势;茎秆茎节极限切应力、单位面积切割功耗较茎秆节间大。

(2)谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗在双支撑切割形式下较单支撑切割形式小;平均切割速度、切割倾角和刀片斜角对茎秆切割力学特性有显著影响;茎秆喂入速度对茎秆切割力学特性无显著影响。响应面试验结果表明,试验因素对谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗影响的主次顺序为:平均切割速度、刀片斜角、切割倾角。

(3)分别建立了茎秆极限切应力、单位面积切割功耗与平均切割速度、刀片斜角、切割倾角的二次多项式方程。以最小极限切应力和单位面积切割功耗为目标,获得谷子茎秆最优切割参数为:平均切割速度1.19 m/s、刀片斜角36.4°、切割倾角7.2°,此时茎秆极限切应力和单位面积切割功耗分别为2.88 MPa、22.38 mJ/mm^2。刀片斜角36.4°较刀片斜角30°(标准Ⅱ型动刀片)谷子茎秆极限切应力、单位面积切割功耗分别减小了6.6%、3.9%。

参 考 文 献

[1] 李顺国,赵宇,刘斐,等. 中国谷子生产的要素变化与机械化水平分析[J]. 中国农学通报,2018,34(10):153 - 158.
LI Shunguo, ZHAO Yu, LIU Fei, et al. Elements change and mechanization level of foxtail millet production[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018,34(10):153 - 158. (in Chinese)

[2] 李顺国,刘斐,刘猛,等. 我国谷子产业现状、发展趋势及对策建议[J]. 农业现代化研究,2014,35(5):531 - 535.
LI Shunguo, LIU Fei, LIU Meng, et al. The current industry situation, development trend, and suggestions for the future of foxtail millet in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2014, 35(5): 531 - 535. (in Chinese)

[3] 张喜文. 谷子收获机械现状与存在问题[J]. 农业技术与装备,2012(10B):32 - 34.

[4] 刘敬科,刁现民. 我国谷子产业现状与加工发展方向[J]. 农业工程技术(农产品加工业),2013(12):15 - 17.

[5] 刁现民. 中国谷子产业与产业技术体系[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2011.

[6] 杨志杰,刘焕新,吴海岩,等. 谷子收获机械化发展方向及配套机具[J]. 河北农业科学,2013,17(3):6 - 8.
YANG Zhijie, LIU Huanxin, WU Haiyan, et al. Developing direction of millet harvesting mechanization and the associated machines[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2013,17(3):6 - 8. (in Chinese)

[7] 陈翠英,王新忠,何增富. 谷物联合收获机油菜收获割台的设计[J]. 农业机械学报,2003, 34(5):54 - 56.
CHEN Cuiying, WANG Xinzhong, HE Zengfu. Design of header for rape harvesting using grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5): 54 - 56. (in Chinese)

[8] 康栋,吴崇友,梁苏宁,等. 谷子联合收获机脱粒装置设计与试验[J]. 中国农业大学学报,2017, 22(2):135 - 143.
KANG Dong, WU Chongyou, LIANG Suning, et al. Design and test of the threshing device of millet combine harvester[J]. Journal of China Agricultural University, 2017,22(2): 135 - 143. (in Chinese)

[9] 梁苏宁,金诚谦,张奋飞,等. 4LZG - 3.0 型谷子联合收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015, 31(12):31 - 38.
LIANG Suning, JIN Chengqian, ZHANG Fenfei, et al. Design and experiment of 4LZG - 3.0 millet combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12): 31 - 38. (in Chinese)

[10] 吴明亮,官春云,汤楚宙,等. 油菜秸秆切割力影响因素试验[J]. 农业工程学报,2009, 25(6):141 - 144.
WU Mingliang, GUAN Chunyun, TANG Chuzhou, et al. Experiments on influencing factors of cutting force of rape stem[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(6):141 - 144. (in Chinese)

[11] 李耀明,秦同娣,陈进,等. 玉米秸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. Experiments and analysis on mechanical property of corn stem reciprocating cutting [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1):160 - 164. (in Chinese)

[12] 李玉道,杜现军,宋占华,等. 棉花秸秆剪切力学性能试验[J]. 农业工程学报,2011,27(2):124 - 128.
LI Yudao, DU Xianjun, SONG Zhanhua, et al. Test of shear mechanical properties of cotton stems[J]. Transactions of the CSAE , 2011, 27(2): 124 - 128. (in Chinese)

[13] AYDIN İ, ARSLAN S. Mechanical properties of cotton shoots for topping[J]. Industrial Crops & Products, 2018, 112:396 - 401.

[14] MNAZARI G, JAFARI A, MOHTASEBI S, et al. Effects of moisture content and level in the crop on the engineering properties of alfalfa stems[J]. Biosystems Engineering, 2008, 101(2):199 - 208.

[15] 赵春花,张锋伟,曹致中. 豆禾牧草秸秆的力学特性试验[J]. 农业工程学报,2009,25(9):122 - 126.
ZHAO Chunhua, ZHANG Fengwei, CAO Zhizhong. Experiment on stalk mechanical properties of legume forage and grasses [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(9):122 - 126. (in Chinese)

[16] 罗海峰,汤楚宙,邹冬生,等. 龙须草秸秆往复式切割试验研究[J]. 农业工程学报,2012,28(2):13 - 17.
LUO Haifeng, TANG Chuzhou, ZOU Dongsheng, et al. Experiment on reciprocating cutting of eulaliopsis binata stem[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 13 - 17. (in Chinese)

[17] 李小强,王芬娥,郭维俊,等. 甘蓝根茎切割力影响因素分析[J]. 农业工程学报,2013,29(10):42 - 48.
LI Xiaoqiang, WANG Fen'e, GUO Weijun, et al. Influencing factor analysis of cabbage root cutting force based on orthogonal test[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(10):42 - 48. (in Chinese)

[18] 沈成,李显旺,张彬,等. 苎麻茎秆台架切割试验与分析[J]. 农业工程学报,2016, 32(1):68 - 76.
SHEN Cheng, LI Xianwang, ZHANG Bin, et al. Bench experiment and analysis on ramie stalk cutting[J]. Transactions of the CSAE , 2016, 32(1):68 - 76. (in Chinese)

[19] 滕绍民, 王泽群, 李洋,等. 切割方式与切割阻力的理论研究[J]. 农机化研究, 2009, 31(5): 89 - 90.
TENG Shaomin, WANG Zequn, LI Yang, et al. The study of the cutting ways and cutting resistance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(5):89 - 90. (in Chinese)

[20] MATHANKER S K, GRIFT T E, HANSEN A C. Effect of blade oblique angle and cutting speed on cutting energy for energycane stems[J]. Biosystems Engineering, 2015, 133:64 - 70.

[21] 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(1): 42 - 48.

[22] 施印炎, 陈满, 汪小旦, 等. 芦蒿有序收获机切割器动力学仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2):110 - 116.
SHI Yinyan, CHEN Man, WANG Xiaochan, et al. Dynamic simulation and experiments on *Artemisia selengensis* orderly harvester cutter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2):110 - 116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170215&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.015. (in Chinese)

[23] IGATJINATHANE C, WOMAC A R, SOKANSANJ S. Corn stalk orientation effect on mechanical cutting[J]. Biosystems Engineering, 2010, 107(2):97 - 106.

(下转第 162 页)

reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160306&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.006. (in Chinese)
[14] 余志生. 汽车理论[M]. 5 版. 北京:机械工业出版社,2009.
[15] 袁玲合. 三轮高地隙中耕精量施肥机设计与试验[D]. 郑州: 河南农业大学,2017.
YUAN Linghe. Design and experiment of three-wheel high ground gap cultivating precision fertilizer machine [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2017. (in Chinese)
[16] 路敌,郭康权. 柔性底盘的转向运动模型[J]. 农机化研究,2011,33(4):219 - 222.
LU Di, GUO Kangquan. Steering motion model of flexible chassis[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(4): 219 - 222. (in Chinese)
[17] 曾锦锋,陈晨,杨蒙爱. 基于阿克曼转向原理的四轮转向机构设计[J]. 轻工机械,2013,31(3):13 - 16,19.
ZENG Jinfeng, CHEN Chen, YANG Mengai. Design of four-wheel steering mechanism based on Ackerman steering principle [J]. Light Industry Machinery, 2013, 31(3): 13 - 16,19. (in Chinese)
[18] 张骞,李年裕,杨怀彬,等. 基于 RecurDyn 和 Matlab/Simulink 的一种小型轮式平台的联合仿真[J]. 计算机测量与控制,2018,26(3):112 - 115.
ZHANG Qian, LI Nianyu, YANG Huaibin, et al. Cosimulation of a small wheeled platform based on RecurDyn and Matlab/Simulink[J]. Computer Measurement & Control,2018,26(3):112 - 115. (in Chinese)
[19] 李波,张承宁,李军求. 基于 RecurDyn 和 Simulink 的电传动车辆转矩控制策略[J]. 农业机械学报,2009,40(7):1 - 5.
LI Bo, ZHANG Chengning, LI Junqiu. The torque control strategy of electric drive vehicle based on RecurDyn and Simulink [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 1 - 5. (in Chinese)
[20] 宋树杰,瞿济伟,李翊宁,等. 农用车底盘偏置转向轴驱动轮运动与动力特性试验[J]. 农业工程学报,2015,31(23):28 - 34.
SONG Shujie, QU Jiwei, LI Yining, et al. Test on motion and dynamic characteristics of driving wheel of steering shaft with offset chassis of agricultural vehicle[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(23): 28 - 34. (in Chinese)
[21] 戴飞,赵武云,马明义,等. 双垄耕作施肥喷药覆膜机工作参数优化[J/OL]. 农业机械学报, 2016,47(1): 83 - 90.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, MA Mingyi, et al. Parameters optimization of operation machine for tillage-fertilization and spraying-filming on double ridges[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(1): 83 - 90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20160112&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.012. (in Chinese)

(上接第 155 页)

[24] 宋占华,宋华鲁,耿爱军,等. 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 Zhanhua, SONG Hualu, GENG Aijun, et al. Experiment on cutting characteristics of cotton stalk with double supports [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(16):37 - 45. (in Chinese)
[25] 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 CSAE, 2007, 23(7): 90 - 94. (in Chinese)
[26] 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/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 101 - 106.
HOU Jialin,JIANG Tao, WU Yanqiang, et al. Design and experiment of wheat straw cutting reciprocating test bench[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(Supp.): 101 - 106. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2014s117&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.017. (in Chinese)
[27] 蒋韬, 侯加林, 李天华,等. 田间玉米茎秆往复切割试验台[J/OL]. 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 stalks[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2):32 - 36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2013s207&flag = 1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.007. (in Chinese)
[28] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 农业机械 切割器 第 1 部分:总成:GB/T 1209.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社,2009.
[29] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 农业机械 切割器 第 3 部分:动刀片、定刀片和刀杆:GB/T 1209.1—2009[S]. 北京: 中国标准出版社,2009.
[30] 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,2007:877 - 920.
[31] 胡良龙,王公仆,凌小燕,等. 甘薯收获期藤蔓秸秆的机械特性[J]. 农业工程学报,2015,31(9):45 - 49.
HU Lianglong, WANG Gongpu, LING Xiaoyan, et al. Mechanical properties of sweet potato vine and stalk during harvest[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 45 - 49. (in Chinese)
[32] 田昆鹏,李显旺,沈成,等. 天牛仿生大麻收割机切割刀片设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(5):56 - 61.
TIAN Kunpeng, LI Xianwang, SHEN Cheng, et al. Design and test of cutting blade of cannabis harvester based on longicorn bionic principle[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 56 - 61. (in Chinese)
[33] 庞声海. 关于滑切理论与滑切角的选用[J]. 华中农学院学报, 1982,1(2):64 - 69.
PANG Shenghai. On the theory of sliding cutting and the choice of its angle[J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1982,1(2):64 - 69. (in Chinese)