

网络首发时间: 2021-10-09 12:25:55

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1151.S.20211008.1541.022.html>

浙江农业学报 *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33(10): 0000–0000

<http://www.zjnyxb.cn>

郑航, 俞国红, 薛向磊. 榨菜缩短茎的切割力学特性[J]. 浙江农业学报, 2021, 33(10): 0000–0000.

DOI: 10.3969/j.issn.1004-1524.2021.10.18

榨菜缩短茎的切割力学特性

郑航, 俞国红*, 薛向磊

(浙江省农业科学院 农业装备研究所, 浙江 杭州 310021)

摘要:为了获得榨菜缩短茎的最佳切割要素组合,在 TMS-Pro 质构仪上开展榨菜缩短茎切割的单因素试验和正交试验,以最大切割力和平均切割力为试验指标,探究刀刃类型、滑切角度、切割速度、切割方式对榨菜缩短茎切割过程中切割力的影响。结果表明:滑切角度对最大切割力和平均切割力影响显著($P < 0.05$),刀刃类型对平均切割力影响显著($P < 0.05$),锯齿刃比光刃省力。为有效降低最大切割力和平均切割力,榨菜缩短茎切割的参数宜确定为锯齿刃,滑切角度 20° ,切割速度 $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。此时,最大切割力为 86.2 N,平均切割力为 53.1 N。研究结果可为榨菜收获机的切割装置设计提供理论依据。

关键词:榨菜;力学特性;缩短茎;切割;

中图分类号:S225.92

文献标志码:A

文章编号:1004-1524(2021)10-0000-00

Mechanical property of shorten stems of mustard tuber cutting

ZHENG Hang, YU Guohong*, XUE Xianglei

(*Institute of Agricultural Equipment, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China*)

Abstract: In order to obtain best parameters for the cutting of shorten stems of mustard tuber, the single-factor experiments and orthogonal tests were carried out on the TMS-Pro texture analyzer. The maximum cutting force and the average cutting force were selected as test indexes, and the effects of cutter type, sliding angle, cutting speed and cutting direction on the cutting force during the cutting process of shorten stems of mustard tuber were analyzed. It was shown that the sliding angle had significant ($P < 0.05$) effect on the maximum cutting force and the average cutting force. The cutter type had significant ($P < 0.05$) influence on the average cutting force, and the sawtooth cutter was more labor-saving than the light cutter. The most labor-saving combination for cutting of shorten stems of mustard tuber was as follows: sawtooth cutter, sliding angle of 20° , and cutting speed of $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Under this circumstance, the maximum cutting force was 86.2 N, and the average cutting force was 53.1 N. These findings could provide references for the design of the cutting device for shorten stems of mustard tuber.

Key words: mustard tuber; mechanical property; shorten stems; cutting

榨菜又名茎瘤芥,其茎可分为缩短茎和膨大茎 2 段,其中,膨大茎又被称为茎瘤,可供食用。榨菜种植在我国主要分布于重庆、浙江、江苏、福

建等地,其中,以重庆涪陵和浙江余姚两地的种植和加工规模最大。目前,我国榨菜年产量达 400 万 t,直接经济效益 200 亿元^[1-2]。作为农特

收稿日期:2021-04-19

基金项目:浙江省科技计划(2020C26001)

作者简介:郑航(1993—),男,浙江龙游人,硕士,研究实习员,主要从事智能农机装备理论与设计研究。E-mail:Zhrory@126.com

*通信作者,俞国红, E-mail: Yuguohong@163.com

产品之一,我国的榨菜与欧洲的酸黄瓜、德国的甜酸甘蓝同为世界三大名腌菜,也是我国对外出口的三大名菜之一^[3]。但目前,榨菜的收获完全依靠人工,随着农村劳动力短缺和人力成本升高,榨菜产业的发展迫切需要提升收获的机械化水平。作物的物理力学特性参数是研究机械化收获的基础,也是设计收获装备的重要依据。

国内外学者针对甘蓝、生菜、芦蒿、甘蔗等作物根茎部位的切割力学特性开展了大量的研究^[4-9]。杜冬冬等^[10]在万能试验机上研究了夹持方式、切割方式、切割方向和切割速度和对甘蓝根茎切割力的影响^[10];陈健^[11]在物性测试仪上分析了影响生菜根茎切割力的因素,并开展单因素和多因素切割力测试试验^[11];康峰等^[12]利用自制的往复式枝条切割试验台探究了枝条直径、平均切割速度、切割间隙和刀具滑切角对枝条峰值切割力的影响,并以切割力为目标进行各因素的优化试验,得到了最优的切割因素组合。

切割装置是榨菜收获机的重要部件,对榨菜收获机的整机性能和作业质量影响很大。榨菜缩短茎的切割力学特性是设计切割装置的基本依据,但在本研究检索范围内,尚未见对榨菜缩短茎切割力及其相关参数进行研究的文献报道,因此有必要就此开展试验研究。

本文以榨菜为研究对象,在 TMS-Pro 质构仪(美国 FTC 公司)上开展榨菜缩短茎切割试验,以最大切割力和平均切割力为评价指标,分析刀刃类型、切割速度、滑切角度、切割方式对切割力的影响,通过正交试验寻求主要影响因素,并选取最佳的切割参数组合,以为榨菜收获机中切割装置的设计提供试验依据与理论参考。

1 材料与方 法

1.1 试验设备

本研究的主要试验设备为 TMS-Pro 质构仪,利用自制的切割试验台完成榨菜缩短茎切割试验(图 1)。仪器的最大检测力为 2 500 N,速度测量范围在 0.1 ~ 500 mm · min⁻¹;检测位移行程 300 mm,精度 0.001 mm,内设力传感器和速度传感器,分别检测垂直方向的切割力和速度数值,并通过数据线与电脑相连,绘制切割力-位移曲

线。切割试验用的刀片材料为高速钢,刀片厚度 1.3 mm,刀刃宽度 60 mm,刃角 25°,共设 3 种滑切角度(0°、10°、20°)的刀型,以及齿形刃和光刃 2 种刀刃类型(图 2)。

1.2 试验材料

试验材料系浙江省余姚市种植的榨菜品种缩头种。随机选取成熟期一致的若干榨菜进行试验。观察发现:榨菜叶、叶柄、茎瘤位于地表以上,主根、须根位于地表以下,而榨菜的缩短茎同时位于地表和地下(图 3)。通过统计发现:茎瘤的纵向高度 H 在 70 ~ 110 mm,茎瘤的横向直径 L 在 80 ~ 120 mm,缩短茎长度 l 在 5 ~ 30 mm,缩短

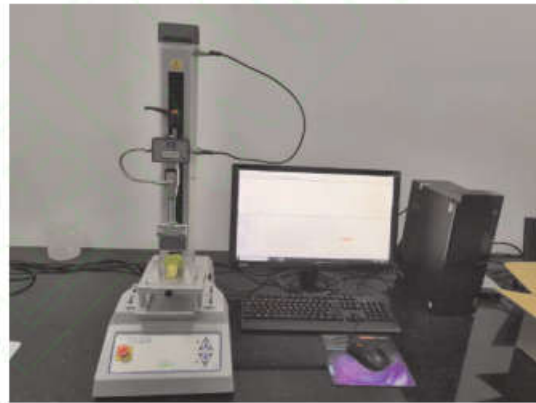


图 1 试验仪器

Fig. 1 Equipment for cutting test

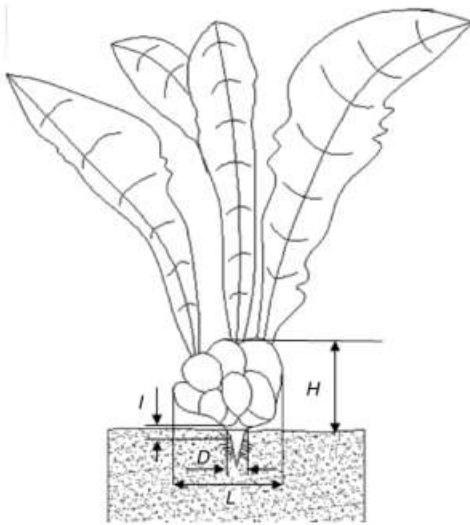


图中从左到右刀片的滑切角度依次为 0°、10°、20°。

The sliding angle of cutters from left to right in the figure is 0°, 10°, 20°, accordingly.

图 2 榨菜切割刀片

Fig. 2 Cutters used in this experiment



H , 茎瘤的纵向高度; L , 茎瘤的横向直径; l , 缩短茎长度; D , 缩短茎直径。

H , Height of stem tumor; L , Width of stem tumor; l , Length of shorten stems; D , Width of shorten stems.

图3 榨菜示意图

Fig.3 Sketch of mustard tuber

茎直径 D 在 15 ~ 30 mm。将榨菜茎瘤处和根部带须根部位切断, 选取中间部位, 即榨菜缩短茎作为切割试验材料, 其含水率在 85% ~ 95%。

1.3 试验方法

影响作物根茎切割力的因素主要包括切割部位、切割速度、滑切角度、刀刃类型、切割方式等^[13-15]。榨菜的切割部位必须控制在缩短茎部分, 切得太高, 损伤茎瘤造成浪费; 切得过低, 后续还需人工补修切根。因此, 本试验选取榨菜缩短茎部位进行切割试验。根据切割刀具切入茎秆方向的不同, 大体可以分为正切和滑切 2 种方式。当切割刀具的绝对运动方向与其刃口方向垂直时为正切。正切又可分为横切、斜切和削切 (图 4): 横切是茎秆被切面与刀具运动方向、茎秆轴线都垂直; 斜切是被切面与茎秆轴线偏斜, 与刀具运动方向平行; 削切是茎秆被切面与刀具运动方向、茎秆轴线都偏斜。当切割刀具的绝对运动方向和刀具刃口既不平行也不垂直时为滑切 (图 5)。由滑切理论^[16]知, 滑切角度增大, 则切割长度增长, 在一定范围内, 切割力随着滑切角的增大而减小, 当滑切角过大时, 作物茎秆会出现沿刀刃边外滑的现象^[17], 影响切割质量。

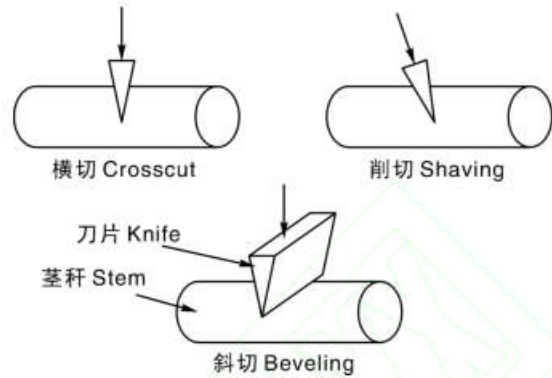


图4 切割方式示意图

Fig.4 Diagram of cutting methods

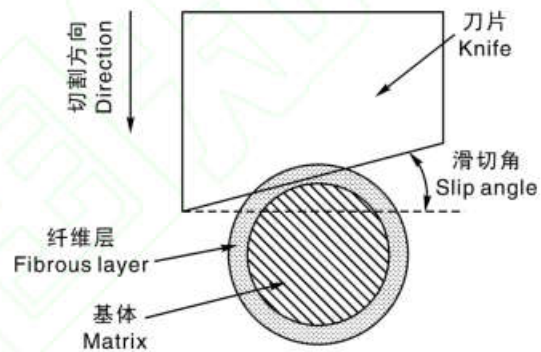
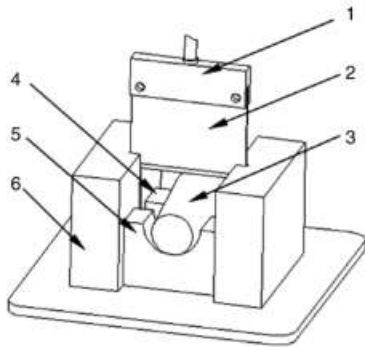


图5 滑切试验示意图

Fig.5 Diagram of sliding cut test

经试验, 榨菜缩短茎切割试验的滑切角度取值范围宜在 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 。考虑到 TMS-Pro 质构仪加载速度的调节范围和试验台操作的安全性, 分别在 $0 \sim 50$ 、 $50 \sim 100$ 、 $100 \sim 150 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 共 3 个速度区间进行切割试验, 每个区间分别选定 1 个速度 (30 、 80 、 $120 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) 用于试验。此外, 切割方式 (向上切削、横向切削、向下切削) 同样也是影响作物茎秆切割力的重要因素^[15]。

在 TMS-Pro 质构仪上用自制的切割试验台完成榨菜缩短茎切割试验, 试验因素包括切割速度、滑切角度、切割方式、刀刃类型等。试验时, 将榨菜缩短茎固定在专用夹具上, 安装好切割刀片, 设定好加载速度, 完成切割运动。通过设置加载速度改变刀片切割速度; 通过更换不同的切割刀片来实现滑切角度和刀刃类型的改变。利用自制的榨菜切割试验夹具 (图 6) 进行试验, 试验时将榨菜缩短茎在水平平面内斜放置于前后 2 个 U 型座的凹槽上, U 型座 1 固定在机架上方,



1, 刀片安装架; 2, 切割刀片; 3, 榨菜缩短茎; 4, U 型座 1; 5, U 型座 2; 6, 机架。

1, Blade mount; 2, Cutting blade; 3, Shorten stems of mustard tuber; 4, U-shaped seat 1; 5, U-shaped seat 2; 6, Frame.

图 6 榨菜切割试验专用夹具

Fig. 6 Special fixture for cutting test

通过选用不同高度的 U 型座 2 实现榨菜缩短茎在竖直平面内水平与倾斜放置状态的调整, 从而实现对榨菜缩短茎切割方式的改变: 当选用的 U 型座 2 高度低于 U 型座 1 时, 可以实现刀片的向上切削; 当选用的 U 型座 2 高度和 U 型座 1 一致时, 可以实现刀片的横向切削; 当选用的 U 型座 2 高度高于 U 型座 1 时, 可以实现刀片的向下切削。

选取榨菜的缩短茎部位进行试验, 由质构仪记录切割力-位移曲线, 记录切割过程中的最大切割力。将切割力-位移试验数据导入到 Excel 2016 软件中, 计算每次试验的平均切割力。

1.4 试验设计

1.4.1 单因素试验

按照每种设定的试验条件分别做 10 组榨菜缩短茎切割试验 (每组试验使用 1 个榨菜缩短茎), 记录最大切割力, 计算平均切割力, 对试验结果取平均值, 分别考查刀刃类型、切割速度、滑切角度和切割方式对榨菜缩短茎切割过程中切割力的影响。其中, 刀刃类型分为锯齿刃和光刃, 切割速度分别设定为 30、80、120 $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 滑切角度分别设定为 0° 、 10° 、 20° , 切割方式分别设定为向上切削、横向切削、向下切削。

1.4.2 正交试验

选取刀刃类型 (A)、滑切角度 (B)、切割速度 (C) 进行正交试验^[18-22] (表 1), 以切割过程中的

表 1 正交试验的因素与水平

Table 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	试验因素	Experiment factor	
Level	A	B/ $^\circ$	C/ $(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$
1	光刃	0	30
2	锯齿刃	10	80
3	—	20	120

最大切割力和平均切割力作为评价指标, 分别按照设定的试验条件进行试验, 具体的试验方法与材料同单因素试验一致。

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 刀刃类型对切割力的影响

设定试验工况: 滑切角度 0° , 切割速度 $30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 切割方式为横向切削。分别选用光刃和锯齿刃进行榨菜缩短茎切割试验, 结果表明: 2 种刀刃类型下的, 菜缩短茎切割过程中的切割力变化趋势一致 (图 7): 切割力先随着切割位移的增加而增大, 达到某一峰值后缓慢下降, 然后保持一定的切割力波动, 直到出现另一峰值后榨菜缩短茎被切断, 切割力降为 0。这一过程主要与榨菜缩短茎的结构有关: 榨菜缩短茎的外侧被一层环状纤维包裹, 其单位切割力要大于内侧芯部的单位切割力, 当刀片刚开始切入纤维层时, 切割力急剧增大, 切断上纤维层后, 刀片进入根茎芯部, 所受到的阻力较为均匀, 切割力变化平稳, 最

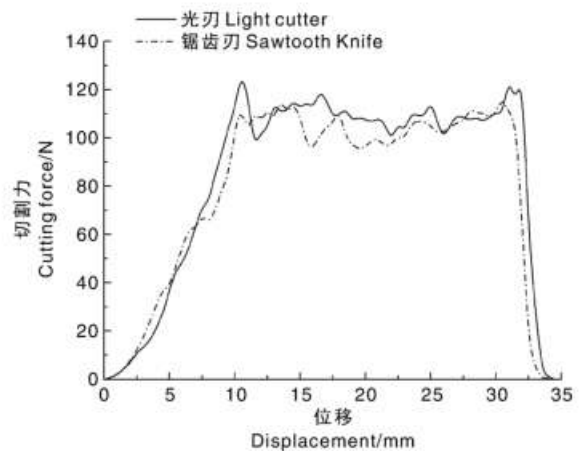


图 7 不同刀刃类型的切割力-位移曲线

Fig. 7 Cutting force-displacement curves under different cutters

后刀片进入下节知层,切蒿力再次增大直到切断缩更茎都部。光钢刀片切蒿时,最大切蒿力为131.6 N,平均切蒿力为84.2 N;榨割钢刀片切蒿时,最大切蒿力为123.8 N,平均切蒿力为70.3 N。在切蒿位置、滑切则度、切蒿速度和切蒿方式当相同的情况下,要切断茼蒿茎,光钢刀片消刃的切蒿力大于榨割钢刀片。

2.1.2 滑切角度对切割力的影响

设定试验工况:刀钢类型为光钢,切蒿速度 $30\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,切蒿方式为横向切削。分别以不同的刀片滑切则度进行茼蒿茎切蒿试验,结果显示:滑切则度为 0° 时,最大切蒿力为128.6 N,平均切蒿力为83.3 N;滑切则度为 10° 时,最大切蒿力为117.9 N,平均切蒿力为78.4 N;滑切则度为 20° 时,最大切蒿力为105.1 N,平均切蒿力为64.3 N(图8)。在切蒿位置、刀钢类型、切蒿速度和切蒿方式当相同的情况下, $0^\circ\sim 20^\circ$ 范围内滑切则度的增大有利于降低切断茼蒿茎消刃的切蒿力。

2.1.3 切割速度对切割力的影响

设定试验工况:刀钢类型为光钢,切蒿方式为横向切削,滑切则度 20° 。分别以不同的切蒿速度进行茼蒿茎切蒿试验,结果显示:切蒿速度为 $30\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,最大切蒿力为108.7 N,平均切蒿力为67.7 N;切蒿速度为 $80\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,最大切蒿力为102.9 N,平均切蒿力为63.7 N;切蒿速度为 $120\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 时,最大切蒿力为100.9 N,平均切蒿力为60.3 N(图9)。在切蒿

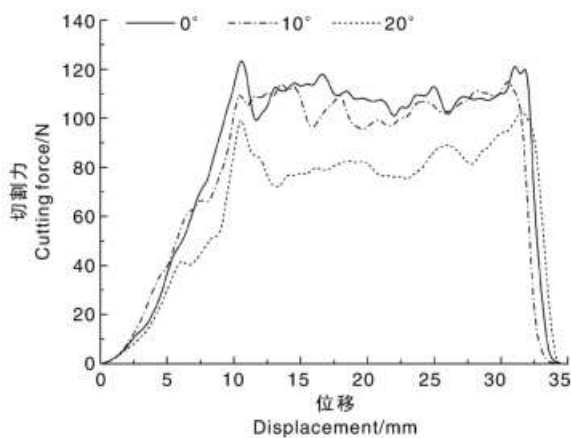


图8 不同滑切角度的切割力-位移曲线
Fig.8 Cutting force-displacement curves under different sliding angles

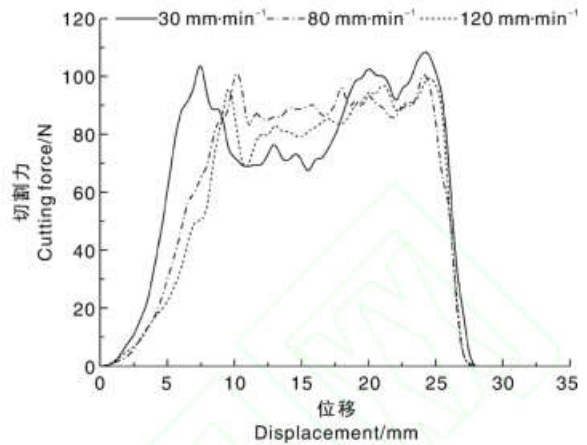


图9 不同切割速度的切割力-位移曲线
Fig.9 Cutting force-displacement curves under different cutting speeds

位置、刀钢类型、滑切则度和切蒿方式当相同的情况下,随着切蒿速度的增大($30\sim 120\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 范围内),最大切蒿力和平均切蒿力降低,但总体变异不明显。

2.1.4 切割方式对切割力的影响

设定试验工况:刀钢类型为光钢,滑切则度 20° ,切蒿速度 $120\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。分别以不同的切蒿方式进行茼蒿茎切蒿试验,结果显示:向下切削时,最大切蒿力为105.8 N,平均切蒿力为61.2 N;横向切削时,最大切蒿力为108.9 N,平均切蒿力为61.2 N;向上切削时,最大切蒿力为102.6 N,平均切蒿力为60.5 N。可以看出,切蒿

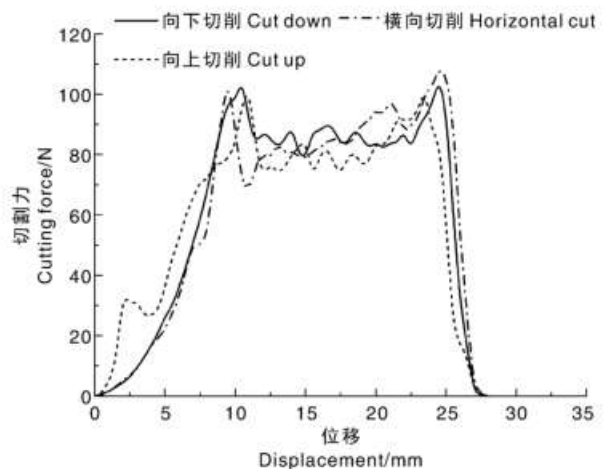


图10 不同切割方式的切割力-位移曲线
Fig.10 Cutting force-displacement curves under different cutting directions

方式对榨菜航短茎切割过程中的切割力影响不大。

2.2 单正试验结果与分析

设正交段速的结果整理此表2。以宜差检速可知,各因素对榨菜航短茎最大切割力和平均切割力的影响从高到低均依组为滑切角度 > 刀刃类型 > 切割型度。

方差分析结果显示,滑切角度对最大切割力影响显著($P < 0.05$),滑切角度和刀刃类型对平均

切割力影响显著($P < 0.05$)。

根据正交段速结果,为有效降低榨菜航短茎切割过程中的最大切割力和平均切割力,段速茎数员合庆确定为 $A_2B_3C_2$,即刀刃类型为锯齿刃,滑切角度 20° ,切割型度 $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。益该茎数员合开展速证段速(平类测定3组),得到的最大切割力的平均值为 86.2 N ,平均切割力的平均值为 53.1 N ,地明分析结果可薛。

表2 单正试验设计与结果

Table 2 Orthogonal test design and result

段速序号 Test number	段速因素 Experiment factor			最大切割力 Maximum cutting force/N	平均切割力 Average cutting force/N
	A	B	C		
1	1	1	1	131.6	84.2
2	1	2	2	107.9	72.4
3	1	3	3	100.8	60.5
4	1	1	2	125.6	82.3
5	1	2	3	113.6	71.6
6	1	3	1	105.1	64.3
7	2	1	3	119.7	69.2
8	2	2	1	94.3	60.5
9	2	3	2	86.8	53.5

3 红航国郑航

机最大切割力和平均切割力为段速指标,开展于因素段速,探究刀刃类型、滑切角度、切割型度、切割方式对榨菜航短茎切割过程中切割力的影响,结果表明:相同参况下,锯齿刃要比光刃省力;在本段速切定的数时下,随着滑切角度和切割型度的其降,切割力会减小;切割方式对切割力无明显影响。

机刀刃类型、切割型度、滑切角度为段速因素,进类正交段速,结果表明:滑切角度对榨菜航短茎切割过程中切割力的影响最大,刀刃类型的影响组之,切割型度的影响最小。综合考虑最大切割力和平均切割力,为降低切割能耗,确定最佳切割茎数如下:刀刃类型为锯齿型,滑切角度为 20° ,切割型度为 $80 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。试要注工的是,本文实出的切割型度仅为 $50 \sim 100 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 区开的代表值,在验体的切割型度切目与优化中,应与割国菜头的姚送装目,机经置器底盘类走型度匹配,机防影响作业效率。

参考文献(References):

- [1] 中国农业科学院蔬菜花卉研究所. 中国蔬菜加种志[M]. 北京: 中国农业科技出版, 2002.
- [2] 艾仪苏. 重义市涪陵榨菜产业可持续发展研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
AI H T. Sustainable development research of the Chongqing Fuling pickled mustard tuber[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [3] 况觅, 董鹏, 李姗蓉. 重义市青菜头产菜现状与分析[J]. 中国园艺文摘, 2015, 31(3): 51-54.
KUANG M, DONG P, LI S R. Analysis on the production and sales of tumorous stem mustard in Chongqing[J]. Chinese Horticulture Abstracts, 2015, 31(3): 51-54. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李小单, 王芬娥, 郭维俊, 等. 甘蓝根茎切割力影响因素分析[J]. 农业参程学报, 2013, 29(10): 42-48.
LI X Q, WANG F E, GUO W J, et al. Influencing factor analysis of cabbage root cutting force based on orthogonal test[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(10): 42-48. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈芥, 王新忠, 吴又新, 等. 温备生菜根茎的剪切力学特性研究[J]. 农置化研究, 2020, 42(11): 173-178.
CHEN J, WANG X Z, WU Y X, et al. Study on shear me-

- chanical properties of greenhouse lettuce roots[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(11): 173 - 178. (in Chinese with English abstract)
- [6] 施印炎, 汪小岳, 章永年, 等. 芦蒿有序收获机往复切割力影响因素试验与分析[J]. *中国农机化学报*, 2018, 39(12): 46 - 53.
SHI Y Y, WANG X C, ZHANG Y N, et al. Test and analysis on the influence factors of reciprocating cutting force of *Artemisia selengensis* harvester[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2018, 39(12): 46 - 53. (in Chinese with English abstract)
- [7] 袁洁. 往复式甘蔗收割机设计及仿真分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
YUAN J. The design and simulation analysis on reciprocating sugarcane harvester[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [8] LEBLICQ T, VANMAERCKE S, RAMON H, et al. Mechanical analysis of the bending behaviour of plant stems[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 129: 87 - 99.
- [9] MENG Y M, WEI J D, WEI J, et al. An ANSYS/LS-DYNA simulation and experimental study of circular saw blade cutting system of mulberry cutting machine[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2019, 157: 38 - 48.
- [10] 杜冬冬, 王俊, 袁姗姗. 甘蓝根茎部切割部位及方式优化试验研究[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(12): 34 - 40.
DU D D, WANG J, QIU S S. Optimization of cutting position and mode for cabbage harvesting[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(12): 34 - 40. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈健. 温室叶菜的收获力学特性试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
CHEN J. Experimental study on harvesting mechanical properties of greenhouse leafy vegetables[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [12] 康峰, 仝思源, 张汉石, 等. 苹果枝条往复式切割剪枝参数分析与试验[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(16): 9 - 16.
KANG F, TONG S Y, ZHANG H S, et al. Analysis and experiments of reciprocating cutting parameters for apple tree branches[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(16): 9 - 16. (in Chinese with English abstract)
- [13] DORAN C F, MCCORMACK B A O, MACEY A. A simplified model to determine the contribution of strain energy in the failure process of thin biological membranes during cutting[J]. *Strain*, 2004, 40(4): 173 - 179.
- [14] 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 Z H, SONG H L, GENG A J, et al. 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 with English abstract)
- [15] 耿端阳, 张道林, 王相友. 新编农业机械学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [16] 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(2): 64 - 69.
PANG S H. On the theory of sliding cutting and choice of its angle[J]. *Journal of Huazhong Agricultural College*, 1982, 6(1): 64 - 69. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陈诚, 俞国胜. 往复式灌木切割器滑切角对灌木切割的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2011, 33(2): 115 - 119.
CHEN C, YU G S. Effect of sliding cutting angle of bush reciprocating cutter on bush cutting[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2011, 33(2): 115 - 119. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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.
- [19] 何晓东, 朱德泉, 朱健军, 等. 双速毛刷辊式水果清洗机设计与试验[J]. *浙江农业学报*, 2020, 32(9): 1702 - 1710.
HE X D, ZHU D Q, ZHU J J, et al. Design and experiment on washer with two-speed hair brush rollers for fruits[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2020, 32(9): 1702 - 1710. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [21] 俞国红, 郑航, 薛向磊. 自适应仿形甘薯削皮机优化设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(3): 135 - 142.
YU G H, ZHENG H, XUE X L. Optimization design and experiment of auto-adaptive profiling sweet potato peeler[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(3): 135 - 142. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张燕青, 崔清亮, 郭玉明, 等. 谷子茎秆切割力学特性试验与分析[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(4): 146 - 155.
ZHANG Y Q, CUI Q L, GUO Y M, et al. Experiment and analysis of cutting mechanical properties of millet stem[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(4): 146 - 155. (in Chinese with English abstract)

(责任编辑 高峻)