

一刀切断甘蔗动力学仿真试验*

周仕城¹ 杨望¹ 杨坚¹ 梁兆新² 莫建霖²

(1. 广西大学机械工程学院, 南宁 530004; 2. 广西农业机械研究院, 南宁 530001)

【摘要】 采用 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学仿真软件, 建立甘蔗-切割器系统的动力学仿真模型, 且进行了甘蔗切割物理试验验证。利用四因子二次通用旋转组合设计方法和甘蔗-切割器系统仿真模型进行一刀切断甘蔗的仿真试验, 建立影响因素与切割力和剪应力的数学模型, 研究了切割力和剪应力各影响因素及其交互作用的影响规律, 且对影响因素进行优化, 获得了一刀切断甘蔗时可靠性为 95% 的最佳切割力总区间。结果表明, 刀片刃角为 17.5°, 切割角为 27.73°, 刀盘倾角为 28°, 切割速度为 16 m/s 时, 可靠性为 95% 的最佳切割力范围为 235.82 ~ 297.98 N。

关键词: 甘蔗 最佳切割力 影响因素 动力学 仿真

中图分类号: S225.5*3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)01-0068-06

Dynamic Simulation Experiment of One-blade Cutting Sugarcane Process

Zhou Shicheng¹ Yang Wang¹ Yang Jian¹ Liang Zhaoxin² Mo Jianlin²

(1. College of Mechanical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China

2. Guangxi Research Institute of Agricultural Machinery, Nanning 530001, China)

Abstract

By using explicit dynamic simulation software ANSYS/LS-DYNA, the sugarcane-cutter system dynamics simulation model was established. The precision of the simulation model was verified by physical experiment. By using four-factor of second order general rotation composite design and the sugarcane-cutter system dynamics simulation model, the dynamics simulation of one-blade cutting sugarcane was carried out. The mathematical model of the influencing factors, cutting forces and shear stresses was established. The influence law of the factors and their interaction were analyzed, and the respective optimization of the factors was gained. The optimal cutting force interval with 95% reliability was obtained. The results showed that when knife-edge angle of blade is 17.5°, cutting angle of blade is 27.73°, obliquity of disc cutter is 28° and cutting velocity is 16 m/s, the optimal cutting force interval with 95% reliability is from 235.82 N to 297.98 N.

Key words Sugarcane, Optimal cutting force, Influencing factor, Dynamics, Simulation

引言

国内外采用物理试验和力学分析的方法, 对影响甘蔗切割力的因素进行了较多研究, 获得了各因素对切割力的影响规律及多个甘蔗切割力的经验公式^[1-5], 但采用动力学可视化仿真技术, 对影响切割力和引起甘蔗破头的轴向剪应力(以下均称剪应

力)的因素进行综合研究, 获取最佳切割力(一刀切断甘蔗时, 甘蔗不破头的最小切割力)鲜见报道。本文采用 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学仿真软件建立一刀切断甘蔗的仿真模型, 进行试验设计和仿真试验, 建立各影响因素与切割力、剪应力的数学模型, 研究各因素的影响规律, 优化切割力的影响因素, 获取最佳切割力, 为制定甘蔗坏切割状态判别标

收稿日期: 2010-04-17 修回日期: 2010-06-03

* 广西自然科学基金资助项目(0832028)和广西科技创新能力与条件建设项目(0842006)

作者简介: 周仕城, 硕士生, 主要从事甘蔗收获机械动力学仿真及性能优化研究, E-mail: 65800337@qq.com

通讯作者: 杨坚, 教授, 主要从事农业机械动力学仿真及性能优化研究, E-mail: yangokok@gxu.edu.cn

准^[6]提供依据。

1 仿真模型的建立

1.1 几何模型

甘蔗-切割器系统建模时,由于切割器刀片的回转半径(670 mm)比甘蔗直径(23~33 mm)大得多,为了便于建模和分析,把甘蔗-切割器系统简化成甘蔗受直线运动刀片切割的系统,甘蔗的直径取30 mm,高度取2 000 mm,甘蔗固定端到刀片的距离为20 mm,刀片为锐利光滑刀片,厚度为5 mm,甘蔗-切割器系统的结构简图如图1所示。其中, α 是刀片刃角, β 是刀片切割角, γ 是刀盘倾角。

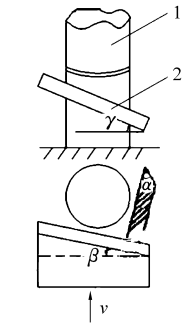


图1 甘蔗-切割器系统的结构简图
Fig.1 Structural diagram of sugarcane - cutter system
1. 甘蔗 2. 刀片

1.2 材料模型

甘蔗是一种各向异性、非均质、非线性的粘弹塑性材料,由蔗皮和蔗芯组合而成,蔗皮和蔗芯的物理力学特性差别大,且不同品种甘蔗的物理力学特性差别较大,同品种的甘蔗个体间也有差别,把甘蔗作为由蔗皮和蔗芯组合而成的各向异性、非均质、非线性的粘弹塑性材料建模,所需的物理力学特性参数测定较困难,但由于蔗皮较薄,且甘蔗被切断时,切口处甘蔗材料轴向的失效范围小,因此,为了便于建模,假设甘蔗为一各向同性的弹塑性材料,选取塑性随动模型作为甘蔗材料模型^[7]。塑性随动模型为

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta' E_p \epsilon_p^{eff}) \quad (1)$$

其中 $E_p = E_{tan} E / (E - E_{tan})$
式中 σ_Y ——屈服应力 ϵ_p^{eff} ——有效塑性应变
 σ_0 ——初始屈服应力 $\dot{\epsilon}$ ——应变率
 C, P ——应变率参数 β' ——硬化参数
 E_{tan} ——切线模量 E_p ——塑性硬化模量
 E ——弹性模量

甘蔗与刀片均采用实体单元 SOLID164 建模,并选择全积分单元算法。甘蔗(台糖 22)材料参数:密度为 1 067 kg/m³,弹性模量为 4.8 × 10⁸ Pa,泊松比为 0.4,屈服应力为 1.1 × 10⁷ Pa,切线模量为 4.8 × 10⁵ Pa,硬化参数为 0,应变率参数 C 为 100、P 为 10,失效应变为 0.012。刀片材料定义为各向同性线弹性材料,刀片材料参数:密度为 7 800 kg/m³,弹性模量为 2 × 10¹¹ Pa,泊松比为 0.27。刀片与甘蔗

之间的静摩擦因数为 0.6,动摩擦因数为 0.52。

1.3 网格划分及加载

网格划分时,为了保证精度,且节省仿真时间,甘蔗分成 4 个部分且采用 Sweep 方式进行网格划分,刀片切割部分加密,从下至上各部分依次划分成 4 268、65 800、4 560、868 个单元;刀片划分成 4 964 个单元。甘蔗的底部全约束,刀片尾部在 y、z 方向施加约束,刀片与甘蔗的接触方式选用点面接触。由于实际收割机收割甘蔗时,刀片的切割速度基本不变,因此,刀片上施加的载荷为水平向左的恒定速度,建立三维甘蔗-切割器系统动力学可视化仿真模型,利用 ANSYS/LS-DYNA 求解器进行仿真求解,其切割仿真过程及切割力-时间历程如图 2 所示。

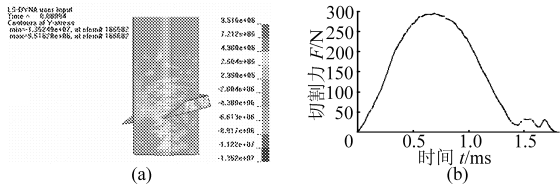


图2 甘蔗-切割器系统动力学仿真

Fig.2 Dynamics simulation diagram of sugarcane - cutter system

(a) 甘蔗切割仿真过程 (b) 切割力-时间历程曲线

2 仿真模型的试验验证

采用甘蔗冲击切割物理试验验证仿真模型的精度。试验设备为冲击试验机(型号:JB30A;冲击能量:147 J;冲击速度:5 m/s),刀片安装在冲击试验机质量块上(钻孔后用螺栓紧固),如图3所示。测试设备为江苏东华测试技术有限公司生产的 DH5937 动态应变测试仪,测定时选取的采样频率为 5 kHz。试验时采用两种不同结构参数的刀片:刀片 1,刃角 α 为 19.5°、切割角 β 为 20.5°;刀片 2,刃角 α 为 28.5°、切割角 β 为 33.5°。为了测出刀片对甘蔗的切割力,在刀片上切开一个切口使其形成悬臂梁,在

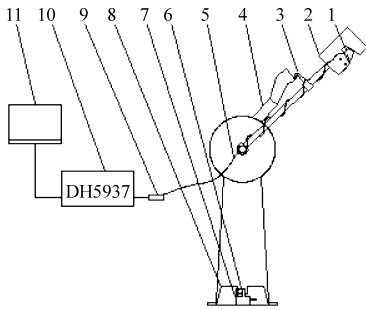


图3 甘蔗切割试验台

Fig.3 Test-bed of sugarcane cutting

1. 刀片 2. 摆锤 3. 固定端子 4. 控制系统 5. 数据线 6. 甘蔗 7. 夹具 8. 试样支座 9. 桥盒 10. 应变测试系统 11. 显示设备

悬臂梁的上下方各贴一片应变片,后接两个外电阻组成一个全桥电路进行测试^[8],刀片结构简图及桥路的接法如图 4 所示,刀片上的虚线部分为切口。试验使用的甘蔗品种为台糖 22,直径 d 为 29.5 ~ 32.5 mm,试样长 200 mm,每把刀重复 5 次切割试验。

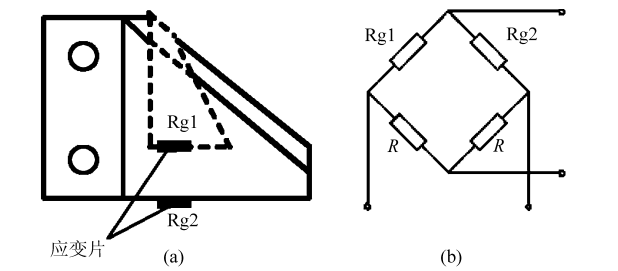


图 4 刀片的结构简图及接桥方式
Fig.4 Structural diagram and bridge of a blade
(a) 刀片结构简图 (b) 接桥方式

甘蔗切割力测试系统采用称重法加载标定时砝码重力与应变的回归方程为

$$W = (0.3829\varepsilon - 4.0409) \times 10^{-6} \quad (2)$$

式中 W ——砝码重力,N ε ——应变

回归方程在 0.001 水平上高度显著,砝码重力与应变的关系曲线如图 5 所示。

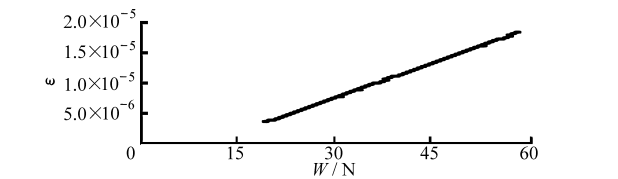


图 5 砝码重力与应变关系曲线
Fig.5 Curve of relationship between force and strain

物理试验的结果如图 6 所示。由图 6a、6b 可知,甘蔗的最大切割力差异性较明显,这是由甘蔗个体特性和直径的差异造成的。为了消除甘蔗直径大小不一产生的影响,分别把最大切割力除以相应的甘蔗直径,后乘以统一的直径 30 mm,且进行方差分析,结果最大切割力的平均值分别为 332.95 N 和 398.86 N,标准差为 31.62 和 15.25,变异系数为 9.5% 和 3.8%。表明不同甘蔗个体材料对最大切割力有一定影响,因此,验证模型时采用消除直径影响的试验结果平均值进行,其切割力平均值曲线如图 7 实线所示,其中,图 7a 是刀片 1 的结果,图 7b 是刀片 2 的结果。

仿真试验采用刀片的结构参数和物理试验的相同。根据切割试验台单摆的结构尺寸^[9]、质量和动量矩守恒定律、能量守恒定律求出等价质量和刀片切割甘蔗的初速度,其等价质量为 10.45 kg,初速度为 5 m/s。仿真试验时,考虑到摆轴与轴承间的摩擦影响,施加给刀片的初速度取 4.89 m/s,同时,为

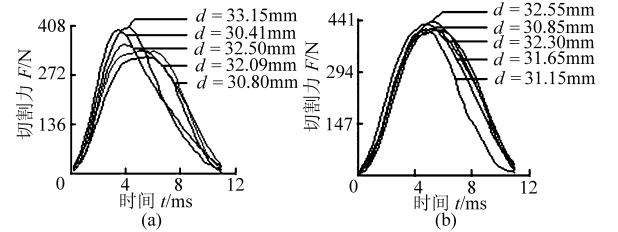


图 6 刀片一刀切断甘蔗的时间历程
Fig.6 Time history of one-blade cutting sugarcane
(a) 刀片 1 (b) 刀片 2

了保证甘蔗-切割器系统动力学可视化仿真模型结构尺寸不变,与刀片连接的 10.45 kg 等价质量通过改变刀片的密度获得。仿真试验结果如图 7 虚线所示,由图 7 可知,物理试验与仿真试验的最大切割力相对误差分别为 7.31% 和 8.29%,且切割力的变化趋势一致,表明所建的甘蔗-切割器系统动力学可视化仿真模型适用于甘蔗一刀切断的动力学仿真研究。

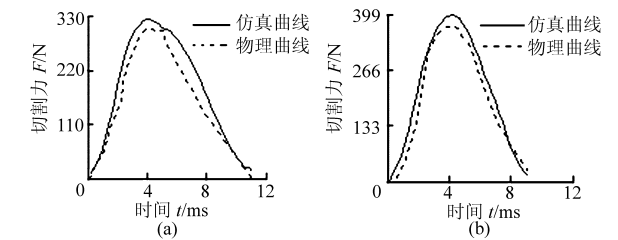


图 7 切割力物理试验与仿真试验对比
Fig.7 Diagrams of the cutting force on the physical and simulation experiment
(a) 刀片 1 (b) 刀片 2

3 仿真试验方案及结果

试验采用四因子二次通用旋转组合设计进行,选取刀片刃角 α 、切割角 β 、刀盘倾角 γ 以及刀片切割速度 v 作为试验因素,用甘蔗最大切割力和甘蔗切断截面直径方向上距离表皮表面 5 mm,轴向下方 10 mm 处的最大剪应力作为试验指标(作为判别甘蔗切割是否破头的依据)。因素水平编码、试验方案及试验结果如表 1、2 所示。

表 1 因素水平编码				
Tab.1 Coding table of factors and levels of the experiment				
编码	因素			
	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	$\gamma/(^{\circ})$	$v/m \cdot s^{-1}$
2	42	48	28	30
1	34	36	21	24
0	26	24	14	18
-1	18	12	7	12
-2	10	0	0	6

表 2 试验方案及结果
Tab.2 Design and results of the experiment

试验 序号	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	$\gamma/(^{\circ})$	v / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\hat{F}$ /N	$\hat{\tau}$ /MPa	试验 序号	$\alpha/(^{\circ})$	$\beta/(^{\circ})$	$\gamma/(^{\circ})$	v / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\hat{F}$ /N	$\hat{\tau}$ /MPa
1	18	12	7	12	255.37	0.47	17	10	24	14	18	268.65	0.41
2	18	12	7	24	285.45	0.28	18	42	24	14	18	262.20	0.77
3	18	12	21	12	262.19	0.41	19	26	0	14	18	318.08	0.55
4	18	12	21	24	315.50	0.17	20	26	48	14	18	220.84	0.89
5	18	36	7	12	241.49	0.89	21	26	24	0	18	262.10	0.67
6	18	36	7	24	282.34	0.66	22	26	24	28	18	270.80	0.29
7	18	36	21	12	258.17	0.47	23	26	24	14	6	218.23	0.81
8	18	36	21	24	280.77	0.33	24	26	24	14	30	315.96	0.42
9	34	12	7	12	265.39	0.91	25	26	24	14	18	248.14	0.68
10	34	12	7	24	300.47	0.68	26	26	24	14	18	248.14	0.68
11	34	12	21	12	275.45	0.73	27	26	24	14	18	248.14	0.68
12	34	12	21	24	326.66	0.42	28	26	24	14	18	248.14	0.68
13	34	36	7	12	246.10	0.65	29	26	24	14	18	248.14	0.68
14	34	36	7	24	291.17	0.39	30	26	24	14	18	248.14	0.68
15	34	36	21	12	266.49	0.48	31	26	24	14	18	248.14	0.68
16	34	36	21	24	336.86	0.34							

4 回归分析

采用 SPSS 统计分析软件对试验数据进行处理，得到试验指标甘蔗最大切割力和最大剪应力与刀片刃角、切割角、刀盘倾角以及刀片切割速度的数学模型分别为

$$\hat{F}=308.53-4.13\alpha-3.24\beta+0.091\alpha^2+0.047\beta^2+0.043\gamma^2+0.107v^2$$

$$\hat{\tau}=-0.659+0.067\alpha+0.035\beta+0.022\gamma-0.0012\alpha\beta-0.0006\alpha^2-0.0013\gamma^2-0.0005v^2$$

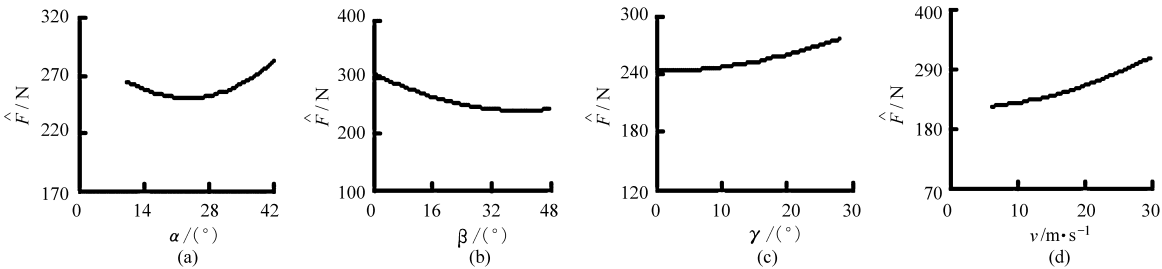


图 8 单因素与最大切割力的关系曲线
Fig.8 Relationship curves of single factors and the cutting forces

由图 8a、9a 可知，最大切割力随着刀片刃角增大呈开口向上的抛物线变化，当刀片刃角约为 21° 时最大切割力最小；最大剪应力随着刀片刃角增大先快速增大，后平缓减小。由图 8b 和图 9b 可知，最大切割力先随切割角增大而减小，后随着切割角增

对回归数学模型及回归系数进行 F 检验，结果回归数学模型及回归系数均在 0.001 水平上高度显著，表明回归数学模型拟合很好。

5 因素的影响分析及优化

5.1 单因素分析

运用 MathCAD 软件对式 (3)、(4) 进行模拟计算(作图时，除考虑的因素外，其他因素均取零水平值)，模拟结果如图 8、9 所示，其中，图 8 是单因素与最大切割力的关系曲线，图 9 是单因素与最大剪应力的关系曲线。

大而略有增大，与文献[10]的物理试验结果变化规律一致，而最大剪应力随着切割角的增大而线性增大。由图 8c 和图 9c 可知，最大切割力随着刀片倾角的增大而平缓增大；最大剪应力随刀盘倾角的增大呈开口向下的抛物线变化，大的刀盘倾角有利于

减少甘蔗切割破头,与文献[11]的研究结果一致。由图8d和图9d可知,最大切割力在速度6~18 m/s之间变化较慢,速度在19~30 m/s之间随着切割速

度的增大而较快增大;最大剪应力随着切割速度的增大而减小,大的切割速度有利于减少甘蔗切割破头。

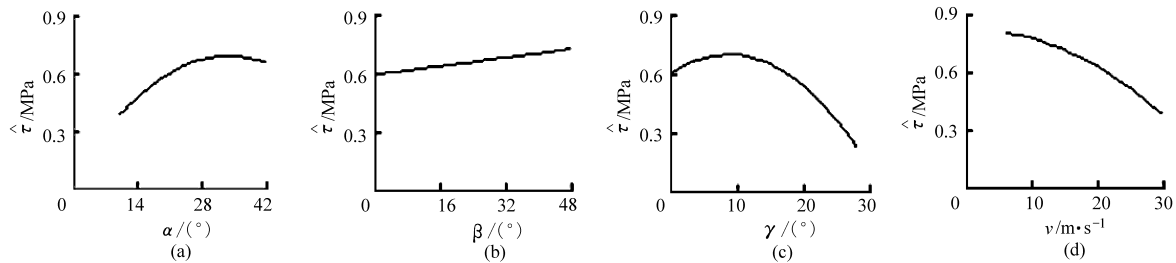


图9 单因素与最大剪应力的关系曲线

Fig.9 Relationship curves of single factors and the shear stresses

5.2 因素交互作用对最大剪应力的影响分析

对式(4)进行模拟计算(作图时,除考虑的因素外,其他因素均取零水平值),模拟结果如图10所示,由图10可知,小的刀片刃角与小的切割角组合时,最大剪应力最小,当刀片刃角10°与切割角10°组合时,最大剪应力为0.07 MPa,同时,大的刀片刃角与大的切割角组合也能得到较小的最大剪应力值,当刃角42°、切割角48°组合时,最大剪应力为0.24 MPa,而大的刀片刃角与小的切割角组合或小的刀片刃角与大的切割角组合,最大剪应力大,甘蔗切割易于破头。

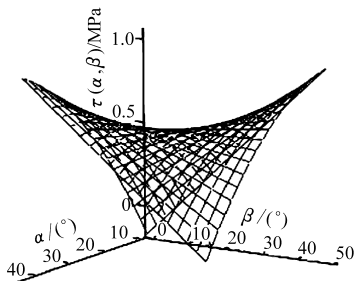


图10 因素交互作用对剪应力的影响

Fig.10 Interactive effect curves of factors on the shear stress

5.3 试验因素的优化

为获得一刀切断甘蔗的最佳切割力,以最大切割力最小为目标,以可靠性为99%的最大剪应力 τ 的最大值(保证甘蔗切割不破头)小于 $[\tau_0]$ 为条件,其中, $[\tau_0]=0.43$ MPa(实测值),可靠性为99%的最大剪应力 τ 的最大值由式(4)和标准差确定。采用Matlab分析软件中的非线性规划优化方法对试验因素(在因素试验的取值范围内)进行优化,获得两组较优的因素组合,第1组:刀片刃角 $\alpha=10^\circ$,切割角 $\beta=14.47^\circ$,刀盘倾角 $\gamma=20^\circ$,切割速度 $v=$

6 m/s,第2组:刀片刃角 $\alpha=17.5^\circ$,切割角 $\beta=27.73^\circ$,刀盘倾角 $\gamma=28^\circ$,切割速度 $v=16$ m/s,考虑到刀片实际使用过程中,刀片刃角过小,刀片容易破坏产生钝口,因此,选取第2组因素组合作为优化结果,在该因素组合下,最大切割力为266.9 N,最大剪应力为0.42 MPa $<[\tau_0]$,即最佳切割力为266.9 N,可靠性为95%的最佳切割力范围为235.82~297.98 N。在上述的较优因素组合下进行仿真甘蔗切割试验,结果最佳切割力为252.06 N,在可靠性为95%的最佳刀割力235.82~297.98 N范围之内,表明优化结果可靠。

6 结论

(1) 通过甘蔗冲击切割物理试验对仿真模型的验证,表明把甘蔗视为各向同性的弹塑性材料建模及建立的甘蔗-切割器系统动力学可视化仿真模型适用于甘蔗一刀切断过程及切割力的仿真研究。

(2) 最大切割力随着刀片刃角的增大呈开口向上的抛物线变化,刀片刃角约为21°时最大切割力达最小值;最大切割力随着切割角的增大而减小,刀盘倾角对最大切割力的影响不大,而最大切割力随着切割速度的增大而增大。

(3) 最大剪应力随着刀片刃角、切割角的增大而增大,随刀盘倾角、切割速度的增大而减小;小的刀片刃角与小的切割角组合最大剪应力最小。小的刀片刃角与小的切割角组合、大的刀盘倾角、大的切割速度有利于减少甘蔗切割破头。

(4) 刀片刃角 $\alpha=17.5^\circ$,切割角 $\beta=27.73^\circ$,刀盘倾角 $\gamma=28^\circ$,切割速度 $v=16$ m/s时,最佳切割力为266.9 N,可靠性为95%的最佳切割力范围为235.82~297.98 N。

参 考 文 献

1 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.甘蔗茎秆切割力的计算[J].农业机械学报,2006,37(9):89~92.
Liu Qingting, Ou Yinggang, Qing Shangle, et al. Cutting force calculation of sugarcane stalk [J]. Transactions of the

Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9):89 ~ 92. (in Chinese)

2 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)

3 Kroes S, Harris H D. Cutting forces and energy during an impact cut of sugarcane stalks [C]//Proceedings of EurAgEng'96, Madrid, 1996:1 ~ 8.

4 Mello R da C, Harris H D. Angled and serrated blades reduce damage, force and energy for a harvester base cutter [J]. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol., 2001, 23:212 ~ 218.

5 Bianchini A, Magalhaes P S G. Evaluation of coulters for cutting sugarcane residue in a soil bin [J]. Biosystems Engineering, 2008, 100 (3):370 ~ 375.

6 吕勇,杨坚,梁兆新,等.单圆盘甘蔗切割器影响破头率的运动学仿真[J].农业机械学报,2008,39(4):50 ~ 55.
Lü Yong, Yang Jian, Liang Zhaoxin, et al. Simulate kinematics analysis on the affecting factors of rate of broken biennial root of single base cutter of sugarcane harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(4):50 ~ 55. (in Chinese)

7 陈永继,杨坚,黄丽丽,等.甘蔗-土壤系统仿真模型的研究[J].农机化研究,2009,31(3):134 ~ 136,146.
Chen Yongji, Yang Jian, Huang Lili, et al. Research on the sugarcane-soil system simulation model [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009,31(3):134 ~ 136,146. (in Chinese)

8 葛宜元,王金武,李世伟,等.整株秸秆还田机刀轴载荷谱编制与疲劳寿命估算[J].农业机械学报,2009,40(3):77 ~ 80.
Ge Yiyuan, Wang Jinwu, Li Shiwei, et al. Load spectrum compiling and fatigue life estimation of the cutter shaft of the whole-straw recycling machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40 (3):77 ~ 80. (in Chinese)

9 唐忠,李耀明,徐立章,等.单茎秆切割试验台的设计与试验[J].农机化研究,2009,31(12):141 ~ 143.
Tang Zhong, Li Yaoming, Xu Lizhang, et al. The design and test of single stem cutting test-bed [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009,31(12):141 ~ 143. (in Chinese)

10 刘庆庭.甘蔗切割机理[D].广州:华南农业大学,2005.
Liu Qingting. The cutting mechanism of sugarcane [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2005. (in Chinese)

11 杨坚,陈国晶,梁兆新,等.单圆盘甘蔗切割器切割破头率影响因素的试验[J].农业机械学报,2007,38(3):69 ~ 74.
Yang Jian, Chen Guojing, Liang Zhaoxin, et al. Experimental study on influencing factors of broken biennial root rate for a single base cutter of sugarcane harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3):69 ~ 74. (in Chinese)

(上接第 43 页)

7 Gentner C, Staehle M, Sallaberger M. Unsteady numerical analysis of pressure pulsations in the spiral casing and runner of a pump turbine [C]//Proceedings of the 21st IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, Lausanne, Switzerland. 2002.

8 Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3(2):269 ~ 289.

9 Wilcox D C. Multiscale model for turbulent flows [J]. AIAA Journal, 1988, 26(11):1 311 ~ 1 320.

10 Menter F R. Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal, 1994, 32(8):1 598 ~ 1 605.

11 王磊,常近时.混流式水轮机转轮优化设计的空化流计算[J].农业机械学报,2009,40(9):98 ~ 102.
Wang Lei, Chang Jinshi. Cavitation simulation of Francis turbine runner for hydraulic optimization design[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):98 ~ 102. (in Chinese)