

玉米秸秆切割过程的非线性数值模拟与仿真试验

王丽娟¹, 石林榕¹, 杨国军¹, 张 绢², 戴 飞¹, 张锋伟^{1*}

(1. 甘肃农业大学工学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 新疆农业大学机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要: 应用 Solidworks 软件建立玉米秸秆—切割刀片参数化模型, 借助 LS-DYNA971 非线性有限元软件模拟切割刀片切割玉米秸秆的过程。玉米秸秆切割的有限元数值模拟能降低试验成本和缩短试验时间, 可视化数值模拟过程可为玉米秸秆收获机械的设计提供理论参考。利用参数化模型特点, 通过改变玉米秸秆直径大小、秸秆含水率、切割方式和刀片刀端线速度进行正交仿真试验。结果表明: 对切割力来说, 含水率对其影响最显著, 其它影响依次为: 秸秆直径、切割方式、刀片刀端线速度; 对切割功耗来说, 含水率影响最显著, 其次分别为: 秸秆直径、刀片刀端线速度、切割方式。经正交综合平衡法分析可知: 当刀片刀端线速度为 $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 采取滑切方式, 玉米秸秆含水率、直径分别为 45%、26 mm 时为最优。玉米秸秆—切割刀片动力学可视化数值模拟仿真模型的构建和分析, 对玉米秸秆收获机械设计具有重要的参考价值。

关键词: 玉米秸秆; 切割; 数值模拟; 模型; 仿真试验

中图分类号: S225.5+1 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)06-0252-05

Nonlinear numerical simulation and simulation test on the cutting process of corn stalk

WANG Li-juan¹, SHI Lin-rong¹, YANG Guo-jun¹, ZHANG Juan², DAI Fei¹, ZHANG Feng-wei^{1*}

(1. College of Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Mechanical and Traffic, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: The parameters model of corn stalk—cutter cutting simulation was built by using the software Solidworks, the process of cutting corn stalk was simulated with the help of non-linear finite element software LS-DYNA971. Finite element numerical simulation of the corn stalk cutting can reduce the experiment cost, shorten the test time and provide theoretic references for the design of the harvesting machine of corn stalk. Using the characteristics of parameterized model, orthogonal simulated test was taken on the basis of changing diameter, moisture content of corn stalk, cutting way and cutter moving speed. The results showed: From the cutting force, the moisture content was the most significant effect, other impacts in sequence as diameter of corn stalk, cutting way and cutter moving speed. Through the analysis by the orthogonal comprehensive equation method, we have known it was the best when the cutter linear speed was $28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, using the sliding cutting, the moisture content and diameter wast 45% and 26 mm respectively. The establishment and analysis of the dynamic visual numerical simulation model for the corn stalk—cutter would have very important referential values for the design of corn stalk harvesting machines.

Keywords: corn stalk; cut; numerical simulation; model; simulation test

近年来,随着中国玉米种植面积不断扩大,玉米秸秆年产量高达约 $2.5 \times 10^{12} \text{ kg}^{[1-2]}$ 。玉米秸秆含有丰富的营养成分,是牲畜的主要粗饲料,还是一种优良的生物资源,亦可作为循环农业的重要有机能源。然而目前中国大部分地方焚烧秸秆,这样不仅造成了环境污染,同时也浪费了大量可利用资源^[3]。

随着对玉米秸秆资源化利用研究的同时,对玉米秸秆收获机械的研究也越来越迫切,而对玉米秸秆特性及切割刀具性能的研究尤显重要。

收获机械切割刀具分往复式和旋转式,而现实中大都使用功率较大的旋转式切割刀片^[4]。此外,在一般切割刀片设计过程中只通过成本较大、周期

收稿日期:2013-05-21

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目“西北绿洲农牧循环技术集成与示范”(2012BAD14B10)

作者简介:王丽娟(1985—),女,甘肃榆中人,主要从事农业工程技术与装备研究。E-mail:14046150@qq.com。

*通信作者:张锋伟(1966—),男,甘肃渭源人,教授,博士,主要从事植物力学与农业机械装备研究。E-mail:zhangfw@gsau.edu.cn。

较长的试验测量^[5]。而本文采用的是基于 ANSYS/LS-DYNA 模拟切割刀片切割玉米秸秆的数值模拟方法,该方法不仅能降低试验设计费用、大幅度缩短玉米秸秆收获机械研发周期^[6],还可为减小玉米秸秆收获机械功率消耗及切割刀具的设计提供理论参考。

1 玉米秸秆切割过程仿真模型的建立

1.1 三维模型的建立

应用 Solidworks 建立玉米秸秆一切割刀片参数化模型时,仿真模型玉米秸秆直径 D 为 24.76 mm,高 H 为 150 mm,刀片与玉米秸秆中心轴间距为 20 mm。建立玉米秸秆模型时,在玉米秸秆轴向留长为 L 的空段,以便于在非线性有限元软件中建立玉米秸秆接触模型。玉米秸秆一切割刀片三维参数化模型如图 1 所示。

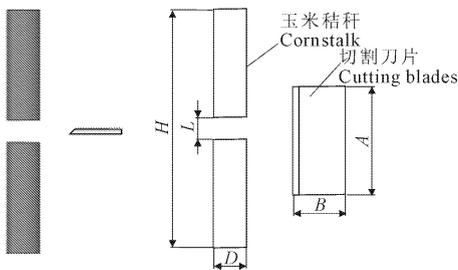


图 1 玉米秸秆一切割刀片模型

Fig.1 Cornstalk-cutter model diagram

1.2 有限元模型的建立

LS-DYNA 作为世界上最著名的以显示为主、隐式为辅的通用非线性动力分析有限元程序,能够模拟真实世界的各种复杂问题,特别适合求解各种二维、三维非线性结构问题,是显式有限元理论和程序的鼻祖^[7]。

将玉米秸秆一切割刀片三维参数化模型导入 Ansys/Ls-dyna 非线性有限元仿真环境中,对其添加 SOLID164 单元算法、材料信息并划分网格等前处理过程。SOLID164 可用于三维的显式结构 8 节点实体,可以对每个节点计算 X 、 Y 、 Z 方向的位移、速度和加速度^[8],因此,仿真模型中的玉米秸秆和切割刀片模型的单元算法均选用有连续应力的 Lagrangian 列式单元算法 SOLID164。切割刀片模型材料选用 65Mn,其密度为 $7.85 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、弹性模量为 $2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$ 、泊松比为 0.28。考虑到本文研究目的,同时为减少仿真时间,切割刀片选用刚体材料 *MAT_RIGID。为简化秸秆模型,选取塑性随动模型作为秸秆材料模型。玉米秸秆部分参数如表 1 所

示。

表 1 玉米秸秆仿真模型材料参数

Table 1 The material parameters of the corn stalk simulation model

密度 Density /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 Young's modulus /Pa	泊松比 Poisson's ratio	屈服应力 Yield stress /Pa	切线模量 Tangent modulus /Pa	硬化参数 Hardening parameter
1067	4.8×10^8	0.4	1.1×10^7	4.8×10^5	0

1.3 模型的网格划分

SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)称为光滑粒子流体动力学法,简称粒子法。由于 SPH 法不用网格,没有网格畸变问题,能在 Lagrangian 格式下处理大变形问题。加之,为减少分析时间、使接触分析更加准确,对玉米秸秆与切割刀片接触的秸秆部分采用 SPH 模型建立^[10]。先通过 ANSYS 对玉米秸秆模型采用扫描网格划分,切割刀片使用自由网格方式。划分完网格的模型以 K 文件形式导入 LS-DYNA971 非线性有限元软件中,再对玉米秸秆模型 L 段部分进行 SPH 无网格法建立。完整的玉米秸秆一切割刀片有限元模型如图 2 所示。

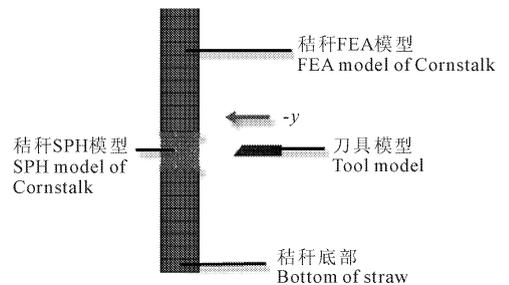


图 2 玉米秸秆一切割刀片有限元模型

Fig.2 Finite element model of Cornstalk-cutter

1.4 约束和接触定义

依据玉米秸秆收割机实际作业过程中切割刀片切割玉米秸秆的运动情况,如图 2 所示,对玉米秸秆模型底部进行固定约束,对切割刀片施加 X 、 Z 两项移动约束和 X 、 Y 、 Z 三向转动约束。为便于 SPH 模型与 FEA 模型连接,对 SPH 秸秆上下表面进行局部节点组建立。对整个玉米秸秆一切割刀片有限元模型施加重力约束。为使玉米秸秆成为完整体,对玉米秸秆的 FEA 模型与 SPH 秸秆部分使用 TIED_NODES_TO_SURFACE 接触方式连接。对切割刀具模型与玉米秸秆模型选用 *AUTOMATIC_NODES_TO_SURFACE 自动点面接触,其中,通过 SSID,MSID 定义玉米秸秆和切割刀具分别为从接触体和主接触体,均采用罚函数法。

2 仿真结果及分析

在 LS-DYNA971 非线性有限元仿真环境中,时间步越小越能真实反映刀具所受阻力大小的变化,但减少时间步能成倍增大仿真计算时间。因此,设置玉米秸秆一切割刀片有限元模型仿真时间为 0.1 s、时间间隔 1×10^{-3} s,计算仿真模型共需 21 min。

图 3(a~c)为不同时刻下刀片切割秸秆时秸秆的 Von-Mises 应力变化云图。由图 3(a)可知,刀具与秸秆模型刚接触时,刀具对秸秆有个顶压力,秸秆

开始弯曲,此时秸秆所受应力较小;由 3(b)图可以看到,随切割力的增大,玉米秸秆所受应力大于屈服应力时,秸秆模型破裂,当 $t = 0.05$ 时,秸秆与刀片接触位置出现了最大应力值 2.56×10^7 Pa,应力从 SPH 部与刀片接触部沿径向向边沿延伸,此时秸秆产生了较大的弯矩,随切割过程的进行,秸秆的应力值较破裂时有所下降且趋于稳定;图 3(c)显示为秸秆即将断裂,此时玉米秸秆的应力开始上升,但不会高于图 3(b)的最大应力值,直至秸秆断裂应力为零。

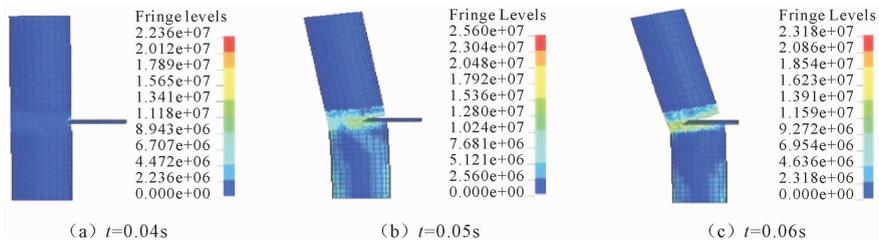


图 3 仿真结果应力云图

Fig. 3 Stress nephogram of simulation results

3 仿真试验方案设计与分析

3.1 试验安排

为优化玉米秸秆切割刀片作业时最佳影响切割阻力大小因素配比,利用玉米秸秆切割仿真参数化模型能方便修改参数等特点,对切割刀片—玉米秸秆仿真模型进行试验安排,以切割力、切割功耗为试验指标^[11]。其中切割力可由仿真过程获取,并取最大切割阻力。切断功耗 W 是指切断秸秆所消耗的功,由能量守恒定律可求出切断功耗^[12],如式(1)所示:

$$W = \frac{1}{2}mv_1^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (1)$$

式中, m 为切割刀片质量, $m = 0.308$ kg; v_0 为切割刀片初始速度($m \cdot s^{-1}$); v_1 为切割后刀片速度($m \cdot s^{-1}$)。

影响切割刀片切割玉米秸秆阻力及功耗的因素较多,挑选其中影响较大者作为仿真试验影响因素,即以动力刀端线速度 A 、切割方式 B 、玉米秸秆含水率 C 、玉米秸秆直径 D 为试验因素,其中除 B 切割方式是两个水平(1 表示滑切、2 表示正切), A 、 C 和 D 三个因素都为三水平^[13],如表 2 所示。为方便设计试验,本文使用拟水平法对 B 因素拟合一个水平,为选择合理的拟合水平,需对滑切、正切切割方式进行分析,切割方式中正切为割刀的绝对运动方向与割刀刃口垂直的切割方式,滑切为割刀的绝对运动方向与割刀刃口既不垂直又不平行的切割方

式,如图 4(a)所示。切割刀刃口局部放大如图 4(c)所示。

设切割割刀在 A 点切入材料,切割方式分别为正切和滑切,正切刃口角为 γ ,滑切刃口角为 γ_1 ,对比二者大小,进入材料的刃口角越小,切割就越省力。当进行滑切时,几何分析结果如下:

$$\tan \gamma_1 = \tan \gamma \cos \alpha \quad (2)$$

由于 $0^\circ < \alpha < 90^\circ$, 因此 $0 < \cos \alpha < 1$, 即 $\gamma_1 < \gamma$ 。

由以上分析结果表明:滑切与正切相比,滑切进入材料时的实际刃口角 γ_1 比正切时的刃口角 γ 小,并据高略契金力学试验^[14],得出滑切比正切省力。因此,使用滑切作为 B 因素的第三个水平(用框把它围起来),如表 2 所示。

表 2 试验因素水平编码表

Table 2 Coding table of the experiments factor level

水平 Level	因素 Factor			
	A 刀片刀端线速度 Linear speed of the blade /($m \cdot s^{-1}$)	B 切割方式 Cutting mode	C 秸秆含水率 Water content of stalk /%	D 玉米秸秆直径 Stalk's diameter /mm
1	24	1	15	22
2	28	2	30	26
3	32	3	45	28

3.2 试验结果

现在就用 $L_9(3^4)$ 正交表来安排试验,对结果进行分析,整个分析过程记录在表 3。

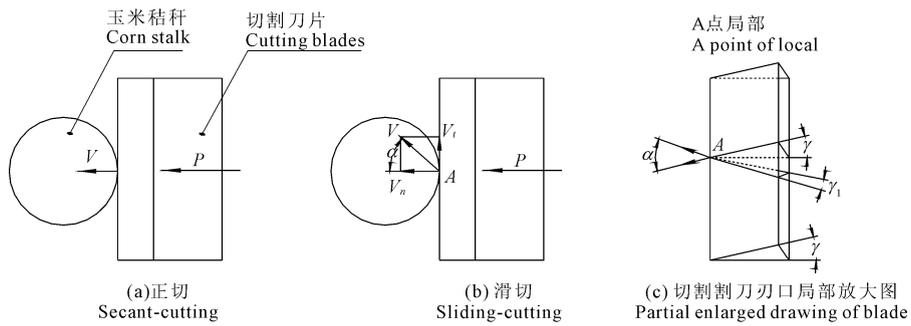


图 4 切割方式

Fig.4 Cutting way

注: P 为切割力(N); V 为切割速度($m \cdot s^{-1}$); V_n 为切割刀法向速度($m \cdot s^{-1}$); V_t 为切割刀切向速度($m \cdot s^{-1}$); α 为割刀运动的绝对速度方向与法向速度方向的夹角, 此处定义为滑切角($^\circ$); γ 为正切刃口角($^\circ$); γ_1 为滑切刃口角($^\circ$)。

Note: P is the cutting force(N), V is the cutting speed($m \cdot s^{-1}$), V_n is normal cutting speed($m \cdot s^{-1}$), V_t is tangential cutting speed($m \cdot s^{-1}$), α is the include angle between the absolute velocity and normal velocity, which is defined as sliding cutting angle($^\circ$), γ is tangential cutting blade angle($^\circ$), γ_1 is slipping cutting blade angle($^\circ$).

表 3 综合平衡法试验结果

Table 3 Test result of comprehensive balance method

水平 Level	因素 Factor				试验指标 Test index		
	A	B	C	D	切割力 Cutting force /N	切断功耗 Power /W	切割力 - 350 Cutting force - 350
1	1	1	1	1	367.43	98.20	16.41
2	1	2	2	2	365.85	97.30	15.85
3	1	3	2	3	365.62	97.50	15.56
4	2	1	1	2	365.97	97.20	15.74
5	2	2	2	3	363.45	96.50	14.95
6	2	3	2	1	367.86	98.10	16.45
7	3	1	1	3	364.64	96.60	14.52
8	3	2	2	1	367.72	98.90	17.72
9	3	3	2	2	366.82	97.40	15.82
切割力 Cutting force	K_1	47.82	94.50	50.58	47.18		
	K_2	47.14	48.52	47.41	46.82		
	K_3	48.06		45.03	49.02		
	k_1	15.94	15.75	16.86	15.73		
	k_2	15.71	16.17	15.80	15.61		
	k_3	16.02		15.01	16.34		
	极差 Range	0.31	0.42	1.85	0.73		
最优方案 Optimal decision	A_2	B_1	C_3	D_2			
切割 功耗 Power	K_1	293.00	585.00	295.20	292.10		
	K_2	291.80	292.70	291.90	292.00		
	K_3	292.90		290.60	293.60		
	k_1	97.67	97.50	98.40	97.37		
	k_2	97.27	97.57	97.30	97.33		
	k_3	97.63		96.87	97.87		
	极差 Range	0.40	0.07	1.53	0.53		
最优方案 Optimal scheme	A_2	B_1	C_3	D_2			

3.3 最优组合试验

对两个指标分别进行分析计算,得出的两个最优方案均为 $A_2B_1C_3D_2$ 。按影响大小的次序分别为:切割力为 $C_3D_2B_1A_2$,切割功耗为 $C_3D_2A_2B_1$,这

两种方案不完全相同,对一个指标是好方案,但对另一指标却不一定是好方案。为便于综合分析,我们将两指标随因素水平变化的情况用图形表示出来,如图 5 所示。

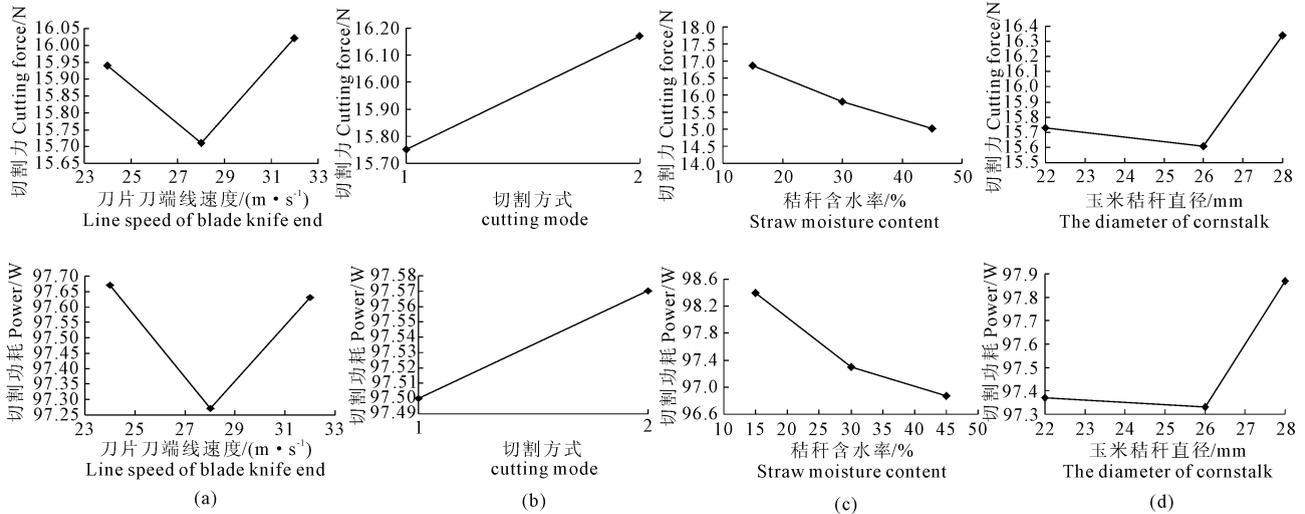


图 5 因素对指标的影响曲线图

Fig.5 The influence curves of factors on the indicators

在实际作业过程中,切割力和切割功耗两个指标越小越好。刀片刀端线速度对切割力和切割功耗的影响,从图 5(a)可知,刀片刀端线速度 A 为 $28 m \cdot s^{-1}$ 时切割力和切割功耗均最小,即 A_2 ;从图 5(b)可知,切割方式对切割力和切割功耗的影响走势相同,采用切割方式为滑切 1 时,切割阻力和切割功耗均为最小,即 B_1 ;由表 3 和图 5(c)可知,含水率对切割力和切割功耗的影响最大,且含水率在 45% 时切割力和切割功耗均为最小,即 C_3 ;由图 5(d)可知,玉米秸秆为 26 mm 时切割力和切割功耗为最小,即 D_2 。通过各因素对各指标影响的综合分析,得出的最优方案为 $C_3D_2A_2B_1$ 。

4 结论

通过改变玉米秸秆一切割刀片有限元模型的玉米秸秆直径、切割方式、秸秆含水率和刀片刀端线速度进行试验,结果表明:对切割力来说,含水率对其影响最显著,其它依次为:秸秆直径、切割方式、刀片刀端线速度;对切割功耗来说,含水率影响最大,其次分别为:玉米秸秆直径、刀片刀端线速度、切割方式。通过各因素对各指标影响的综合分析,得出的最优方案为 $C_3D_2A_2B_1$,即当含水率为 45%、玉米秸秆直径为 26 mm、刀片刀端线速度 $28 m \cdot s^{-1}$ 、滑切时对切割力和切割功耗为最优。

参考文献:

- [1] 张世杰. 4GRS-1000 型玉米秸秆收获机关键部件设计研究[J]. 农业工程, 2012, (2): 84-85.
- [2] 韩鲁佳, 闫巧娟, 刘向阳, 等. 中国农作物秸秆资源及其利用现状[J]. 农业工程学报, 2002, 18(3): 87-91.
- [3] 杨家军, 刘锋, 刘喜云. 甘蔗收获机切割刀片的动态设计[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(6): 923-926.
- [4] 马洪亮, 高焕文, 魏淑艳. 驱动缺口圆盘玉米秸秆根茬切断装置的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 86-89.
- [5] 赵锋. 微型气力式砍蔗器的设计与研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2007.
- [6] 杨坚, 梁兆新, 莫建霖, 等. 甘蔗切割刀片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.
- [7] 李裕春, 时党勇, 赵元, 等. Ansys11.0/ls-dyna 基础理论与工程实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [8] 郝好山. ANSYS12.0/LS-DYNA 非线性有限元分析从入门到精通[M]. 天津: 机械工业出版社, 2012: 72.
- [9] 黄汉东, 王玉兴, 唐艳芹, 等. 甘蔗切割过程的有限元仿真[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 161-166.
- [10] John O H. Ls-dyna 971 key word user's manual volume, Livermore Software Technology Corporation, Livermore[EJ/OL]. CA, 2012.
- [11] 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.
- [12] 龚有容. 应用统计学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [13] 魏冰阳, 蔺公振, 杜新武. 双立轴圆盘刀玉米秸秆切碎器正交试验[J]. 洛阳工学院学报, 2002, 13(2): 5-7.
- [14] 高建和. 工程力学试验[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.