

# 基于 Hashin 模型的甘蔗剪切仿真

熊威

(桂林航天工业学院机械工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 使用有限元方法对甘蔗剪切过程进行仿真, 研究刀片几何角度对甘蔗断面形态的影响。通过编写 VUMAT 子程序, 将 Hashin 单向纤维复合材料失效准则应用于甘蔗剪切过程的仿真。仿真包括甘蔗剪切过程的断裂形态、剪切过程的最大剪切力、刀片楔角、后角和间隙对剪切断面的影响。结果显示, 断裂形态仿真结果与已有的试验和仿真结果一致, 最大剪切力为 270 N; 刀片楔角从 30° 减少到 5°, 可使甘蔗的上下断面都趋于平整; 刀片具有正的后角, 会使下断面平整; 2 mm 刀片间隙的存在, 导致甘蔗下部断口接近静止刀片一侧出现撕裂。

**关键词:** 甘蔗; 剪切; 失效准则; 仿真

中图分类号: S225.5+3

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2018)01-0101-05

## Simulation of sugarcane cutting based on Hashin failure model

XIONG Wei

(School of Mechanical Engineering, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin, Guangxi 541004 China)

**Abstract:** Finite element method is used to simulate the cutting process of sugarcane to study the influence of blade geometry on the morphology of sugarcane. Through programming VUMAT subroutine, the Hashin unidirectional fiber composite failure criterion is applied to the simulate the cane shearing process to achieve the fracture morphology of sugarcane shearing process, the maximum shear force of the shearing process, the influences of blade wedge angles, the relief angles and the clearance on the shear section. Results show that the fracture morphology obtained by simulation are consistent with existed experiment and simulation results. The maximum shear force is 270 N. When the wedge angle is decreased from 30° to 5°, the upper and lower shear section of sugar cane tends to be flat. Positive relief angle leads to smoother lower shear section. The existence of 2 mm blade gap causes tearing in the part of lower fracture near the stationary blade.

**Keywords:** sugarcane; cutting; failure criteria; simulation

中国甘蔗生产的机械化程度较低, 特别是在播种和收获环节上还依赖于人工作业<sup>[1]</sup>。在砍蔗机的设计当中, 为了获得切割力参数或者优化刀片零部件的结构, 需要建立一定规模的试验平台, 成本高、试验周期长, 而使用有限元仿真则能够大大节省试验费用, 缩短开发周期, 是砍蔗机设计的一个重要发展方向<sup>[2]</sup>, 并且相关结果还可为采用滚切斩种方式的甘蔗种植机械<sup>[3]</sup>的设计提供参考。林茂等<sup>[4]</sup>使用 ANSYS 软件对矩形、梯形和弧形 3 种砍蔗刀在切割力作用下的变形量和应力值进行了仿真, 但是

仿真中切割力直接使用了试验结果, 没有涉及甘蔗的材料模型, 仍旧依赖于试验。周仕城等<sup>[5]</sup>使用 ANSYS/LS-DYNA 显式动力学模拟软件, 对一刀切断甘蔗的过程进行仿真, 通过四因子二次通用旋转组合设计试验, 研究了刀片刃角、切割角、刀盘倾角以及刀片切割速度对最大切割力、最大剪应力的影响, 并且优化了切割参数, 但是在仿真中将甘蔗作为各向同性的弹塑性材料处理, 和实际情况有差异。同样使用 ANSYS/LS-DYNA 软件, 杨望等<sup>[6]</sup>对甘蔗一刀切断和两刀切断的过程进行仿真, 并对

入土切割的影响进行了研究,发现入土切割是降低切割破头的有效方法,但仿真中依然将甘蔗假定为各向同性的弹塑性材料,也没有说明甘蔗材料损伤破坏的相关模型。黄汉东等<sup>[2]</sup>使用 LS-DYNA 软件提供的 MAT\_WOOD 材料模型,对甘蔗的双刀切割进行了仿真,研究刀具倾角与切割速度对切割力,切割耗电的影响,并且提供了切割力的试验曲线,但在此项研究中单向复合材料的弹性参数和强度参数仍有改进空间。笔者使用正交各向异性复合材料弹性模型和 Hashin 单向复合材料失效模型描述甘蔗在切割过程中的力学行为,通过编写 VUMAT 材料子程序,使用有限元软件 ABAQUS 对甘蔗的剪切过程进行仿真,并对刀片的楔角、后角以及刀片的间隙对断口形态和剪切力的影响进行了研究。

## 1 甘蔗的本构方程

根据甘蔗茎秆的力学试验结果,甘蔗材料表现出如下力学行为<sup>[7]</sup>:甘蔗茎秆是正交各向异性的;拉伸强度与压缩强度不同;在弯曲载荷下会出现中性层裂纹、横向裂纹、底部纵向裂纹和不规则裂纹 4 种破坏失效形式;在扭转载荷下,产生纵向裂纹;在压缩载荷下发生屈曲,并产生纵向裂纹;在拉伸载荷作用下,发生断裂。这些力学行为与单向复合材料的相似,而甘蔗茎秆内的维管束和单向复合材料的纵向纤维相似<sup>[7]</sup>,所以可以用单向复合材料的本构方程来描述甘蔗的力学行为。使用单向复合材料的弹性模型和描述单向纤维复合材料失效的 Hashin 准则<sup>[8]</sup>建立甘蔗的本构方程。因 ABAQUS 6.10 版中的 Hashin 模型只支持二维网格,所以需要通过编写 VUMAT 材料子程序实现上述模型。

单向复合材料弹性模型是正交各向异性模型的一个特例,考虑到正交各向异性弹性应力-应变关系的材料参数的互等关系,以及甘蔗在垂直于纤维方向的横截面内,可以认为是各向同性的,所以只需要 5 个弹性材料参数即可描述材料的弹性行为。由于在实际编程中,从代码重复使用的角度考虑,VUMAT 程序按照正交各向异性弹性模型编写,需要输入 9 个材料弹性材料参数,实际计算时,有 3 对材料参数的值是相同的。可以根据增量步开始时刻的应力应变和应变增量,计算出增量步结束时刻的应力。根据这些弹性应力,计算是否满足失效

准则。如果满足失效准则,则删除该处的网格。Hashin 失效准则包括:纤维拉伸模式(tensile fiber mode)、纤维压缩模式(compressive fiber mode)、基体拉伸模式(tensile matrix mode)和基体压缩模式(compressive matrix mode)4 种失效方式,以及纤维方向的拉伸失效力、纤维方向的压缩失效力、垂直纤维方向的拉伸失效力、垂直纤维方向的压缩失效力、横向剪切失效力和轴向剪切失效力 6 个材料参数<sup>[8]</sup>。

甘蔗的蔗皮和蔗芯 2 部分的力学行为相似,但材料参数不同。上述 VUMAT 子程序是同时适用于蔗皮和蔗芯 2 种材料,2 种材料通过传递不同的材料参数进行区分。如果要定义多种力学行为不同的材料,也只能有一个材料子程序,材料之间通过变量 cmname 传递的材料名称进行区分。

蔗皮和蔗芯的轴向拉伸强度、径向拉伸强度、轴向压缩强度、径向压缩强度、面向剪切强度各 5 个强度参数,以及轴向弹性模量、径向弹性模量、剪切弹性模量、泊松比各 4 个弹性参数,均取自文献<sup>[2]</sup>。对于缺少的 1 个弹性参数和 1 个强度参数则使用估计值。通过比较仿真剪切力与试验值检验估计值的合理性。

## 2 剪切过程的有限元建模

为了节省计算时间,只取整个系统的 1/2 进行建模,甘蔗剪切的有限元模型如图 1 所示。根据文献<sup>[2]</sup>,甘蔗直径为 21 mm,蔗皮厚 0.8 mm,长度 100 mm。砍蔗机械上的刀片有矩形、梯形和弧形 3 种<sup>[9]</sup>,矩形、梯形最为常见<sup>[10]</sup>。刀刃有锯齿刃和光刃 2 种,但锯齿刃引起的蔗糖细胞损失大<sup>[11]</sup>,并且容易损坏<sup>[10]</sup>。本研究使用矩形刀片,刀片的几何参数取自文献<sup>[12]</sup>,厚度为 5 mm,刃口厚度为 1 mm。蔗皮与蔗芯使用 C3D8R 单元,两者中部与刀片相互作用部分的网格进行局部加密。C3D8R 单元是一种缩减积分单元。在蔗皮的内表面与蔗芯的外表面定义 1 个捆绑(tie)方式的约束。蔗皮与蔗芯都定义方向,先定义局部坐标系,再在模型树中选定该局部坐标系,定义方向。同样出于节省计算时间的考虑,刀片的宽度取 20 mm。刀片的材料为钢材,使用 ABAQUS 提供的弹性模型,密度  $7.9 \times 10^{-9} \text{ t/mm}^3$ ,弹性模量 210 000.0 MPa,泊松比 0.33。边界条件约

束甘蔗和刀具不能垂直对称面移动，并完全约束甘蔗的下部端面和其中一个刀片静止不动。选择 ABAQUS/Explicit 求解器，因为实际的切割过程在 25~45 ms，所以分析步时间定为 0.05 s。

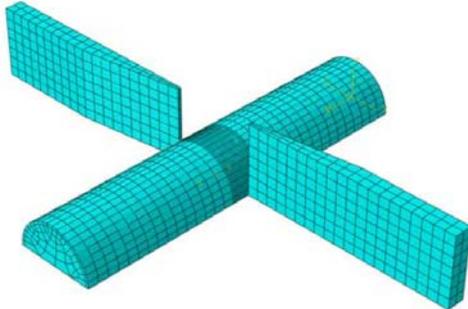


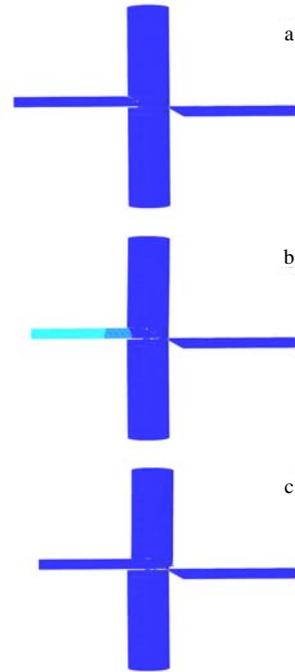
图 1 甘蔗剪切的有限元模型  
Fig.1 FEM model for sugarcane cutting

剪切过程的建模中还需要定义侵蚀接触，目的是使甘蔗的表面单元失效删除后，新露出的单元体仍可以和刀片相互作用。先在 ABAQUS/CAE 中将蔗皮与蔗芯定义成表面，然后定义通用接触。在完成其他建模工作后，生成 inp 文件，在 inp 文件中找到定义相应表面的部分，将单元体之后的参数改为“S1, S2, S3, S4, S5, S6”，表示单元体的所有面都在该表面内。完成 inp 文件的修改后，将 inp 文件作为模型导入 ABAQUS/CAE，重新定义 Job 进行仿真。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 甘蔗剪切断面形态的仿真

甘蔗的剪切过程如图 2 所示。在剪切的开始阶段，动刀直接挤入甘蔗，刃口和前刀面前的甘蔗组织失效，在主后刀面上形成比较光滑的切口；当前刀面的根部切入到接近甘蔗轴线的部分时，由于刀体楔入甘蔗体，对上部的甘蔗形成推挤，刃口之前的甘蔗单元也发生失效，出现开裂；裂纹扩展到静止刀片的刃口处，甘蔗茎秆部分被剪断，动刀继续前进，和静止刀片配合，挤断尚处于连接状态的少数单元。甘蔗断裂形态与文献[2]的结果一致，也和文献[13]中的断口相似，属于断面整齐无劈裂的情况。因为轴向劈裂会对来年宿根的发芽产生不利影响<sup>[14]</sup>，所以使用 2 个刀片相对运动剪切的方式更为有利。



a 10 ms 时的断裂形态；b 22.5 ms 时的断裂形态；c 27.5 ms 时的断裂形态。

图 2 甘蔗剪切过程的仿真结果

Fig.2 Simulation results of sugarcane cutting

甘蔗剪切过程仿真的边界条件并不对称，甘蔗的下部有约束，而上部是自由的。如果使动刀前刀面的法线方向指向下方(反装刀片)，仿真结果如图 3 所示。此时，与动刀之前的单元尚有一部分保留在被剪断甘蔗的上部没有失效(图 2)不同，动刀之前的单元，除了少量被剪断后飞出，几乎全部失效。甘蔗上部的断面相对光滑，下部的断面，由于动刀刀体的摩擦和挤压，有部分单元失效，断口不平整。在动刀挤压和边界条件的共同作用下，甘蔗在断口以下、静止刀片一侧的外壁上，也出现了部分单元失效。

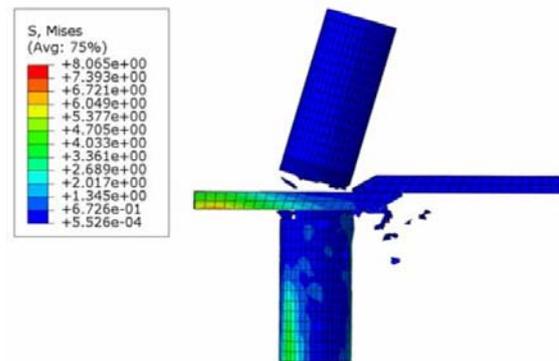


图 3 反装刀片断裂形态的仿真结果

Fig.3 Simulation results of fracture morphology with reversing knives

将动刀的刀背端面定义成为 1 个集合(set), 并在 History output 中定义相应的输出, 可以输出刀背端面的应力, 再乘以端面面积的 2 倍, 得到剪切力。在将动刀的速度设为 19.6 m/s, Amplitude 设为 Equally Spaced(0.0, 1.0)的情况下, 在切割过程中, 最大剪切力约为 270 N, 和文献[12]和[15]中的试验结果相近, 但大约只有文献[16]中结果值的 1/5。原因是文献[16]的试验是缓慢加载的, 最大切割速度只有 250 mm/min, 不完全等同于高速切割的情况。在切割完成后, 动刀继续前进, 由于两刀片的间隙为 0, 摩擦等阻力因素使动刀背上的应力增加到约 42 MPa。如果动刀速度的 Amplitude 设为 Instantaneous, 即赋给动刀固定的初速度, 并且该初速度在剪切过程中保持不变, 此时刀背上最大应力出现于动刀与甘蔗接触的一瞬间, 此后动刀的速度逐渐减小。

### 3.2 刀片楔角对剪切的影响

固定动刀的速度为 0.7 m/s, 将刀片的楔角改为 15°, 仿真结果如图所示。相对于图 2-c 中使用 30°楔角的情况, 由于楔角减小, 刃口变得尖锐, 静止刀片也明显切入甘蔗, 但剪切仍然主要由动刀形成。甘蔗上部断口的形态与 30°楔角的情况不同, 因为静止刀片切入甘蔗的另一侧, 当动刀刀尖运动刚超过甘蔗轴线, 甘蔗就向静止刀片一侧倾折, 同时由于前刀面的挤压作用减小, 上段甘蔗的剪切区域有更多材料保留下来。

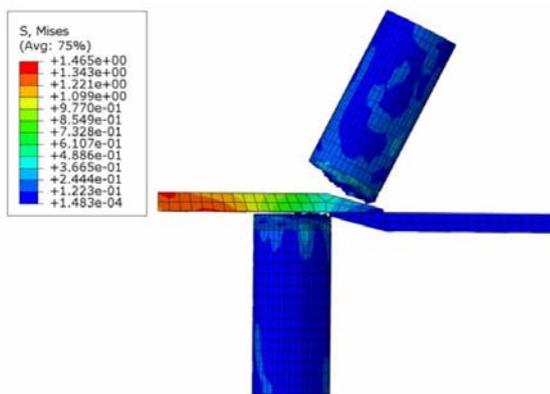


图4 使用15°楔角刀片剪切的仿真结果

Fig.4 Simulation results of cutting with 15° wedge angle knives

如果进一步将动刀的楔角减小到 5°, 仿真结果如图 5 所示。此时, 由于前刀面推挤形成的甘蔗上部断面不平齐的现象几乎消失。这是因为刀尖的厚度减小, 在剪切开始阶段切口较为平直, 而到了开裂阶段, 甘蔗倾折形成的裂口角度大于刀片楔角,

此时, 大部分切入甘蔗的前刀面和甘蔗是不接触的, 仅仅是依靠刀刃的推挤完成剪切, 但是甘蔗下部切口靠近静止刀片一侧的部分材料失效。因为动刀的初速度是固定的, 所以最大剪切力出现在剪切开始, 且变化不明显。

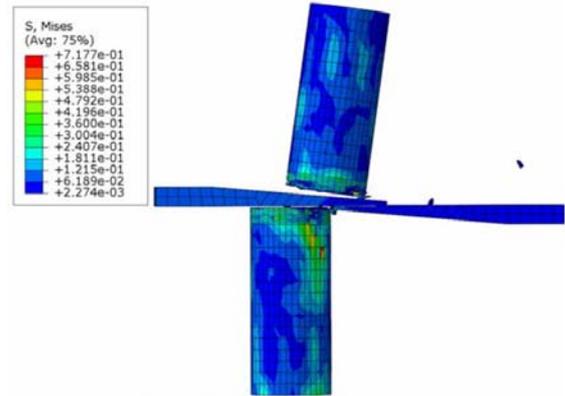


图5 使用5°楔角刀片剪切的仿真结果

Fig.5 Simulation results of cutting with 5° wedge angle

### 3.3 刀片后角对剪切的影响

图 6 所示是使刀片带有 1°后角, 而其他参数保持不变时的仿真结果, 图中隐去了动刀。对比刀片后角为 0 的情况, 带有后角的下端断面更加平整, 只是在和静止刀片接触部位的蔗皮上有个别单元失效, 在截面中部有少量单元残存。在后角为 0 时, 断面在接近动刀的一侧较为平整(截面的前半段), 但也有个别单元失效, 而在静止刀片一侧, 有部分单元失效, 截面不平整。前半段截面上的个别单元失效和后半段截面的不平整形成的原因相似。因为在后角为 0 时, 刀尖对其前方的单元的挤压更剧烈, 会造成前下方的单元失效。当存在正的后角时, 刀尖更容易切入甘蔗, 从而对前下方的单元挤压变小, 不易造成刀尖下方的单元失效。

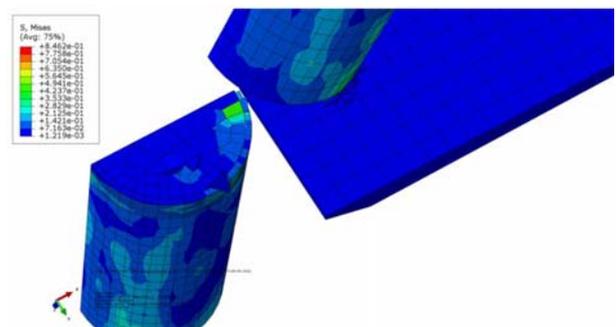


图6 使用1°后角刀片剪切的断面仿真结果

Fig.6 Fracture morphology simulation results of cutting with 1° relief angle knives

刀片如果有小的负后角,形成的下部断面也会是平整的。主要原因是由于网格离散,刀尖前下方的一层单元在刀片的运动过程中几乎全部失效,因而后刀面和更下一层网格没有接触,于是断口的前半部分保持平整,只有后半段和静止刀片接触的部位,有少量单元失效。

### 3.4 刀片间隙对剪切的影响

图7是动刀和静止刀片之间具有2 mm间隙时的仿真结果。甘蔗上部的断口形态以及下部断面前半段的平整程度与没有间隙时的仿真结果相似。不同之处在于下部断口靠近静止刀片的部分单元也出现了失效。是因为在剪切的最后阶段,甘蔗上部在前刀面的作用下出现了整体的倾斜,此时甘蔗上下两部分之间还有部分单元处于连接状态,因而产生了撕扯。由于刀片间隙的存在,这部分单元在侧向缺少支撑,发生撕裂失效。

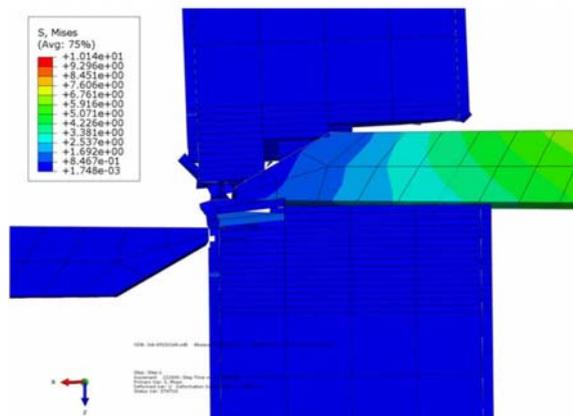


图7 使用2 mm刀片间隙剪切的仿真结果

Fig.7 Simulation results of cutting with 2 mm knife gap

## 4 结论

通过编写 VUMAT 材料子程序,将基于 Hashin 单向纤维复合材料失效准则和单向复合材料的弹性模型应用于甘蔗剪切仿真当中,建立了相应的有限元模型。使用该模型对甘蔗剪切的断裂形态、最大剪切力以及刀片楔角、后角和刀片间隙对剪切断面的影响进行了仿真。模型对于断裂形态和最大剪切力的仿真结果与现有试验和仿真结果一致。可以替代部分实物试验,供甘蔗收获机研制参考。刀片楔角减小,使甘蔗剪切的2个断面变得平整。刀片具有正的后角会使甘蔗的下部断面平整。刀片间隙的存在使甘蔗下部靠近静止刀片一侧的部分材料

发生撕裂,从而影响断面质量。

### 参考文献:

- [1] 王晓鸣,莫建霖.甘蔗生产机械化现状及相关问题的思考[J].农机化研究,2012,34(10):6-11.
- [2] 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.
- [3] 蒲明辉,李兆龙,李竞,等.基于 Recurdyn 和 ANSYS 的甘蔗切割机构研究[J].农机化研究,2012,34(12):36-39.
- [4] 林茂,符新,梁栋,等.甘蔗切割器不同形状刀片切割力的仿真分析[J].西南农业学报,2011,24(2):782-788.
- [5] 周仕城,杨望,杨坚,等.一刀切断甘蔗动力学仿真试验[J].农业机械学报,2011,42(1):68-73.
- [6] 杨望,杨坚,刘增汉,等.入土切割对甘蔗切割过程影响的仿真试验[J].农业工程学报,2011,27(8):150-156.
- [7] 刘庆庭,区颖刚,王万章,等.甘蔗茎秆的材料模型与本构方程[C]//中国农业工程学会.2007年中国农业工程学会学术年会论文摘要集.大庆:中国农业工程学会,2007:1-4.
- [8] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(2):329-334.
- [9] 林茂,李粤,廖宇兰,等.三种形状刀片的甘蔗切割器运动学仿真分析[J].机械设计与制造,2011(12):234-236.
- [10] 尹雨,林茂,李粤,等.甘蔗切割器刀片切割效果的研究[C]//十三省市区机械工程师学会科技论坛暨2008海南机械科技论坛.海口:海南、北京、重庆等13省市区机械工程师学会,2008:622-625.
- [11] 林茂,符新,冯活伦,等.甘蔗切割器研究现状分析及展望[J].中国农机化学报,2011(2):15-19.
- [12] 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.
- [13] 郭金兵,谢峰,马小斌,等.甘蔗切根刀切割参数组合的优化分析[J].安徽农业科学,2016(10):248-250.
- [14] 刘庆庭,区颖刚,卿上乐,等.光刃刀片切割甘蔗茎秆破坏过程高速摄像分析[J].农业机械学报,2007,38(10):31-35.
- [15] 郭金兵.甘蔗收割机切割参数分析与切割刀耐磨强化的试验研究[D].北京:中国农业机械化科学研究院,2016.
- [16] 李丽萍,王涛,方赛拼,等.甘蔗节点的切割试验[J].湖北农业科学,2014,53(13):3174-3176.

责任编辑:罗慧敏

英文编辑:吴志立