

基于工业 CT 的适收期水稻秸秆精细建模与失效机理分析

吴 涛¹ 李云伍¹ 廖怀毅¹ 唐 汉² 罗锦江¹ 舒 渝¹ 徐常塑¹

(1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 东北农业大学农业装备与能源工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 针对传统几何模型难以准确反映水稻秸秆复杂结构、导致力学仿真精度不足的问题, 本文提出基于工业 CT 扫描的真实结构有限元建模方法, 用于精确分析适收期水稻秸秆的力学特性与失效机理。通过高分辨率 CT 获取茎节断层图像, 三维重建并结合材料属性建立高保真有限元模型。经轴向拉伸、三点弯曲和剪切实验验证, 模拟结果与实验高度吻合 (拉伸实验 $R^2 \geq 0.985$, 弯曲实验 $R^2 \geq 0.988$, 剪切实验 $R^2 \geq 0.988$)。应力云图揭示失效机制: 拉伸时裂纹在茎节-节间过渡区萌生并沿纤维方向扩展, 呈脆性断裂; 弯曲破坏由拉伸应力主导, 裂纹同样沿纤维方向扩展; 剪切失效为刃口前缘应力集中引发的脆性断裂。为研究结构非均匀性的影响, 将秸秆按直径分为粗段 (A1)、中段 (A2) 和细段 (A3), 发现中段 (A2) 抗弯强度最高, 粗段 (A1) 抗剪强度最大, 细段 (A3) 抗拉强度最高。分段研究揭示了力学特性的结构性根源, 为农机部件针对性优化提供精细化的数据支撑。该方法显著提升了水稻秸秆力学分析的准确性与机理揭示能力, 为收获机、打捆机等关键部件优化设计提供了可靠仿真平台与理论依据。

关键词: 水稻秸秆; 三维重建; 工业 CT; 有限元法; 力学特性; 失效机理

中图分类号: S121

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)21-0240-11

OSID:



Fine Modeling and Failure Mechanism Analysis of Harvest-ready Rice Straw Based on Industrial CT

Wu Tao¹ Li Yunwu¹ Liao Huaiyi¹ Tang Han² Luo Jinjiang¹ Shu Yu¹ Xu Changsu¹

(1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

2. College of Agricultural Equipment and Energy Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Aiming to address the low accuracy of traditional geometric models in simulating rice straw mechanics, a finite element modeling method was proposed based on industrial CT scanning of the actual structure. A high-fidelity model was reconstructed from CT images and validated through physical experiments including axial tension, three-point bending, and shear tests. The simulation results were in good agreement with the experimental results (tensile test $R^2 \geq 0.985$, bending test $R^2 \geq 0.988$, shear test $R^2 \geq 0.988$). Stress nephograms revealed the failure mechanisms under different loading conditions: tensile failure initiated at the transition region between the node and internode, bending failure was dominated by tensile stress, and shear failure resulted from stress concentration at the cutting edge. Based on diameter variation, the straw was divided into three typical segments, namely the coarse segment (A1), the intermediate segment (A2), and the thin segment (A3). Significant differences in mechanical properties were observed among these segments: the intermediate segment exhibited the highest bending strength, the coarse segment demonstrated the greatest shear strength, while the thin segment showed the highest tensile strength. This method effectively enhanced the accuracy of mechanical analysis and provided a reliable simulation foundation for optimizing key agricultural machinery components such as harvesters and balers.

Key words: rice straw; three-dimensional reconstruction; industrial CT; finite element method; mechanical properties; failure mechanisms

收稿日期: 2026-05-09 修回日期: 2026-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52405294)、中央高校基本科研业务费专项资金项目 (SWU-KQ24038) 和黑龙江省重点研发计划项目 (2023ZX05B03)

作者简介: 吴涛 (2000—), 男, 博士生, 主要从事智慧农业技术与装备研究, E-mail: wutao322000472@email.swu.edu.cn

通信作者: 徐常塑 (1995—), 男, 讲师, 博士, 主要从事智慧农业技术与装备研究, E-mail: xuchangsu@swu.edu.cn

0 引言

水稻秸秆作为水稻生产系统的重要组成部分^[1],不仅直接影响作物的抗倒伏性能,还涉及收获环节的切割、脱粒效率以及秸秆还田、打包等后续作业质量^[2-4]。秸秆的力学特性是农业机械工作部件设计与优化的关键依据,其精确表征对于提高作业效率、降低能耗具有重要意义。然而,秸秆作为一种典型的生物质材料,具有复杂的微观结构和高度各向异性的力学行为,传统研究方法难以准确捕捉其在外载荷下的响应机制,制约了高性能农业装备的研发^[5-6]。

目前许多学者依赖于室内物理实验和经验公式推导秸秆力学特性。郭思佳等^[7]利用电子万能实验机对寒地整株玉米秸秆不同直径部位进行有节段轴向压缩、径向压缩及无节段抗弯实验,建立了直径与压力之间的二次拟合数学模型,揭示了寒地玉米秸秆力学特性随直径变化的显著阶段性特征;Wright 等^[8]利用万能实验机对玉米、小麦和大麦秸秆进行弯曲、拉伸和压缩实验,得出基于生物力学特性区分不同品种的模式与方法。这些方法虽在一定程度上提供了基础设计参数,但存在破坏性强、样本可变性大、难以获取局部力学信息等局限,尤其无法揭示秸秆在动态载荷下的渐进失效过程。随着计算机辅助工程的发展,有限元分析法逐渐应用于农业物料的力学行为分析中^[9],已成为研究作物茎秆拉伸、弯曲、剪切等过程的重要工具^[10-12]。然而,当前大多数有限元研究为了降低仿真模型复杂度而过度简化模型,往往将秸秆结构视为宏观均匀化的圆管或实心模型,完全忽略了其实际内部与表面的真实结构特征。颜利民等^[13]将棉秆颗粒简化为直径 7 mm、长度 126 mm 的圆柱体组合(由球颗粒聚合而成),用于分析抛撒轮转速和抛撒叶片数量对碎秆抛撒幅宽与抛撒均匀度的影响;Zhao 等^[14]将水稻秸秆模型简化为直径 6 mm、长度 350~420 mm 的圆柱体组合,用于模拟旋耕过程中秸秆的运动轨迹、破碎行为及埋覆效果。这种几何形态的简化导致仿真结果与物理实验之间存在显著偏差,尤其在预测破坏模式、应力集中区域和能量吸收机制时表现尤为明显。因此,构建能够精确反映秸秆真实结构的力学模型,已成为提升农业物料仿真置信度和应用价值的关键问题。

微 CT 技术能够在无损条件下精确捕捉植物组织内部与外部的复杂形态^[15-16],为构建高保真几何模型提供了可行的技术手段。然而,目前该技术在植物茎秆领域的应用多停留在微观结构观察或形态

学描述层面,尚未有将其输出的真实几何模型直接与有限元法耦合,系统开展秸秆多载荷力学响应与失效机理分析研究的报道^[17-18]。

本文应用工业 CT 断层扫描技术,构建一个可靠且精确的植物生物力学模型。系统研究水稻秸秆在拉伸、弯曲和剪切下的力学响应与失效机理,揭示微观结构对宏观力学行为的影响机理并验证水稻秸秆模型的准确性。以期可视化预测水稻秸秆机械损伤,提供更准确的定量评估方法,并为高性能农业装备(如收获机、脱粒装置、打捆机等)的数字化与智能化设计提供精准数据支撑和分析依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料制备

本研究选用西南地区广泛种植的籼型三系杂交水稻“西农优 30”为实验对象,基于五点取样法随机选取 80 株水稻,经去根去叶处理后得到适收期水稻秸秆(图 1a)。利用数显游标卡尺测量 80 株水稻秸秆样品的直径尺寸,不同的水稻秸秆部位直径尺寸差异显著,单根水稻秸秆样品直径尺寸范围为 1~7 mm,为了更精确表征水稻秸秆真实结构(薄壁结构和中空特征)并获取更可靠的实验数据,在后续实验中,水稻秸秆样品需依据直径进行分段裁剪,将单根水稻秸秆裁剪成 3 段长度为 100 mm 并保留茎节的实验样本。根据其直径尺寸的分布统计,将单根水稻秸秆样品划分为 3 种类型:其中中点处直径为 4.5、2.5、1.5 mm 的实验样本分别称为粗段(A1)、中段(A2)、细段(A3),如图 1b 所示。由此,从 80 株水稻中共获得 A1、A2、A3 样本各 80 个,为开展后续力学实验,分别从各区段样本中随机选取 10 个不同植株来源的样本,用于拉伸、三点弯曲及剪切实验的平行测试。

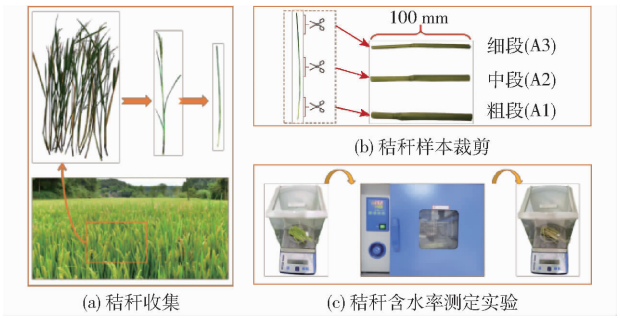


图 1 适收期水稻秸秆材料制备

Fig. 1 Preparation of rice straw materials at harvest time

在开展力学实验阶段,同时将 3 种类型的水稻秸秆样品通过电热鼓风干燥箱分别进行含水率测定,在温度(105±2)℃下烘 4 h 后,在温度 60℃下烘 12 h,待试样冷却至室温后,取出再次称量并记录相

关数据^[19]。最后计算得出粗段(A1)、中段(A2)、细段(A3)的含水率分别为 69.48% ± 2.37%、56.21% ± 3.05% 和 51.62% ± 1.86%，如图 1c 所示，含水率的计算式为

$$\omega = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

(1)

式中 ω ——水稻秸秆含水率，%
 m_1 ——水稻秸秆湿质量，g
 m_2 ——水稻秸秆干质量，g

1.2 工业 CT 扫描与三维重建

在扫描过程中，为减少样本脱水和收缩对重建精度的影响，将水稻秸秆直立置于聚苯乙烯方形容器中，并固定于高精度数控旋转台。采用 GE Phoenix 微焦点工业 CT 系统，设置射线源电流 100 μ A、电压 110 kV、曝光时间 1 000 ms、扫描分辨率 60 μ m，进行 360° 旋转扫描(图 2a)，共获取 1 227 幅 2 048 像素 × 2 048 像素的二维投影图像(图 2b)。针对原始 CT 图像中的噪声与伪影问题，综合考虑计算资源及样本尺寸，选取 227 幅经高斯滤波降噪的连续 CT 图像，导入 VG Studio MAX 进行三维重建，获得高分辨率三维网格模型。初始模型存在表面阶梯状瑕疵、三角面片过多及拓扑错误，依次导入 Geomagic Wrap 进行光顺优化，再经 Geomagic Design

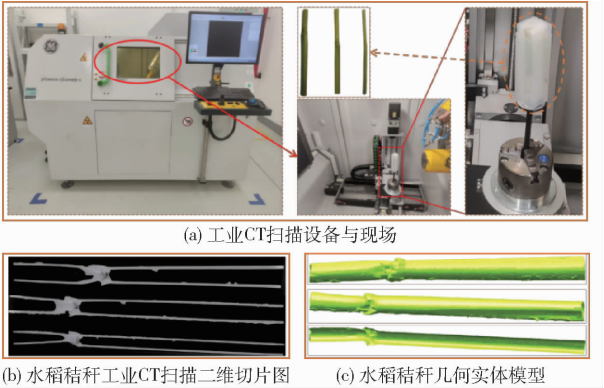


图 2 工业 CT 扫描流程
Fig. 2 Industrial CT scanning process

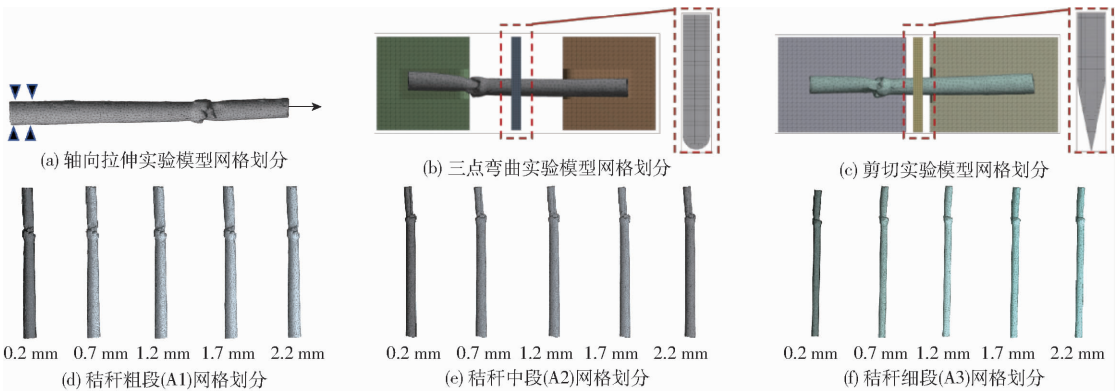


图 3 有限元仿真模型及网格划分
Fig. 3 Finite element simulation models and meshing

X 表面重构^[20]，最终得到结构完整、表面平整、茎节特征清晰的高质量三维实体模型(图 2c)。

1.3 有限元模型建立

(1) 几何模型导入与网格划分

将优化后的三维模型以 STP 格式导入 ANSYS Workbench。拉伸实验中，水稻秸秆一端固定，另一端施加速度载荷(图 3a)；弯曲实验采用直径 4 mm 的半圆柱体压头(图 3b)；剪切实验使用刃角 15° 的锋利刀具(图 3c)。针对秸秆内部复杂的不规则空腔结构，选用十节点二次四面体单元(C3D10)对 3 类区段模型进行网格划分(图 3d ~ 3f)，该单元适应性强且计算精度高。网格完成后，检查质量确保单元形状因子均大于 0.3、最大翘曲度低于 30，以避免数值奇异和收敛问题，保障后续有限元分析可靠性。

(2) 材料属性定义

适收期水稻秸秆属于一种粘弹性材料。然而，由于工作时机械部件与水稻秸秆接触时间较短，蠕变和应力松弛的粘性特性可以忽略不计，因此，本研究将适收期水稻秸秆视为弹塑性材料。首先，通过微机控制电子万能实验机完成轴向拉伸实验，平行测试 10 次，在实验的初始阶段出现弹性行为，力会随着位移呈线性增长，弹性模量计算式为

$$\begin{cases} E = \frac{\sigma_n}{\varepsilon_n} \\ \sigma_n = \frac{4F}{\pi d^2} \\ \varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l_0} \end{cases}$$

(2)

式中 σ_n ——工程应力，MPa
 ε_n ——工程应变
 E ——弹性模量，MPa
 F ——测试载荷，N
 d ——水稻秸秆直径，mm
 Δl ——水稻秸秆长度变化量，mm
 l_0 ——水稻秸秆初始长度，mm

密度需通过水置换法测量,计算式为

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1}$$
 (3)

式中 ρ ——密度, g/mL
 m ——水稻秸秆试样质量, g
 V_1 ——初始注入量筒内水的体积, mL
 V_2 ——水稻秸秆试样与水的总体积, mL

泊松比则根据参考文献[21]获得。塑性属性选用适用于水稻秸秆材料的多线性各向同性硬化模型,通过导入轴向拉伸实验测得的应力-应变曲线参数完成材料属性定义。拉伸实验参数为:轴向拉伸实验中引伸计长度为 10 mm,实验速率为 2 mm/min,

平行测试 10 次。

(3) 边界条件与载荷设置

为模拟水稻秸秆在实际受力下的力学响应,分别设置轴向拉伸、三点弯曲和剪切 3 种准静态载荷工况。拉伸实验反映韧性与纤维强度:一端固定,另一端以垂直速率 2 mm/min 加载至断裂(图 4a)。弯曲实验关联抗倒伏能力:底部两端铰支,跨中用直径 4 mm 刚性压头以速率 10 mm/min 施加位移载荷(图 4b)。剪切实验模拟收获切割过程:试件水平放置,一端固定,另一端用刃角 15°的刀具以速率 10 mm/min 垂直轴线加载至剪断(图 4c)。所有分析均采用准静态加载以获取准确的力学参数。

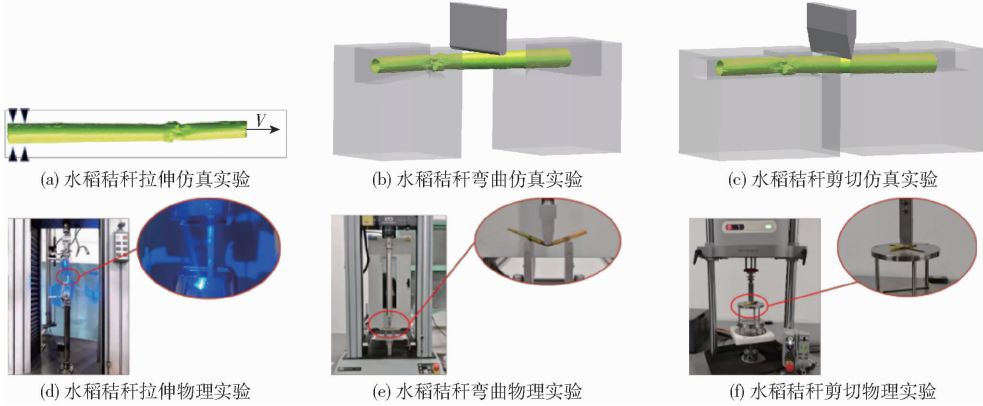


图 4 水稻秸秆有限元仿真与物理实验

Fig. 4 Finite element simulation and physical experiments of rice straw

1.4 物理实验验证

(1) 轴向拉伸实验方案

利用微机控制电子万能实验机进行轴向拉伸实验(图 4d)。试样两端用专用夹具夹持,夹持段内衬柔性垫片以防止应力集中与滑移。采用位移控制模式,以 2 mm/min 的恒定速率施加拉伸载荷直至断裂。通过引伸计实时记录标距段变形,同步采集载荷-位移数据。所得应力-应变曲线和抗拉强度等参数将作为仿真模型验证的关键依据。

(2) 三点弯曲实验方案

在微机控制电子万能实验机上开展三点弯曲实验(图 4e),三点弯曲实验压头直径 4 mm,支座直径为 4 mm,跨距为 40 mm,实验速率为 10 mm/min,平行测试 10 次。试样平放于两圆柱支撑辊上,调整跨距与有效长度一致;上压头亦为圆柱形,避免局部压溃。以极低恒定位移速率准静态加载,对跨中施加集中载荷直至明显断裂或达预定变形。系统连续记录载荷-位移及应力-应变数据,重点关注初始线性段的抗弯强度,用于验证仿真结果的准确性。

(3) 剪切实验方案

采用微机控制电子万能实验机进行单次剪切实验(图 4f),剪切实验刀具刃角为 15°,跨距为

10 mm,实验速率为 10 mm/min,平行测试 10 次。定制剪切夹具的固定底座与活动刃口经热处理保持锋利。试样水平放置,轴线与刃口垂直,调节刃口间隙至最小以避免弯曲。活动刃口以恒定低速垂直下压实施单侧剪切,连续记录剪切力-位移数据直至断裂。测得的抗剪强度、最大载荷及力-位移曲线将用于与仿真结果定量对比,验证本构模型与失效准则的准确性。

1.5 数据处理

为保障实验数据的可靠性与仿真结果的准确性,本研究对物理实验与数值模拟所获取的数据进行了系统处理。首先,基于轴向拉伸、三点弯曲与剪切实验获取的载荷-位移原始数据,依据材料力学理论计算应力-应变关系,进而提取抗拉强度、抗弯强度与抗剪强度等关键力学参数。各参数取 10 次平行实验的平均值,并以“均值 ± 标准差”形式表示,以反映样本变异特性。其次,利用工业 CT 扫描图像重建的三维几何模型经网格划分后,导出节点与单元信息,结合 ANSYS 仿真输出的应力、应变及位移场数据,提取关键路径上的力学响应曲线。最后,将模拟与实验所得的力-位移曲线进行叠加对比,采用决定系数(R^2)与均方根误差(RMSE)评估模型拟

合优度,并计算峰值载荷等参数的相对误差,以量化模型预测精度。所有数据处理及统计分析均在 Origin 2018 软件中完成,确保过程可追溯、结果可复现。

2 结果与讨论

2.1 网格灵敏度分析

为确保有限元仿真结果的可靠性与计算效率,本研究在模型校验前开展网格灵敏度分析(图 5)。由于网格尺寸直接影响计算精度和效率,单元尺寸过小会导致网格数量增加,延长求解时间;而单元尺寸过大则可能因模型几何细节丢失而低估应力集中效应,影响失效预测的准确性。为此,本研究针对粗段(A1)、中段(A2)和细段(A3)3类区段秸秆几何模型,分别设置了0.2、0.7、1.2、1.7、2.2 mm 5种单

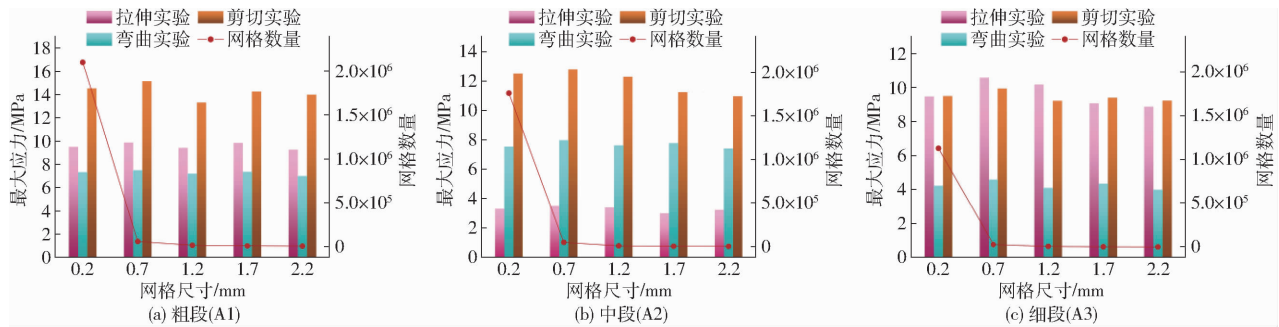


图 5 3 类区段秸秆模型网格灵敏度分析

Fig. 5 Mesh sensitivity analysis for three segment types of straw models

2.2 水稻秸秆材料属性分析

准确的材料属性是有限元仿真结果可靠性的基础。本研究获得了粗段(A1)、中段(A2)和细段(A3)3类典型区段秸秆的关键物理参数,如表1所示。对表1中数据分析表明,不同区段秸秆的材料属性存在差异,这与其结构特征和生理状态密切相关。

表 1 适收期水稻秸秆材料属性

Tab.1 Material properties of rice straw at optimal harvest stage

物理参数	水稻秸秆区段		
	粗段(A1)	中段(A2)	细段(A3)
弹性模量/MPa	1 902.94 ± 1.56	1 064.69 ± 2.09	3 355.42 ± 1.87
密度/(kg·m ⁻³)	1 150 ± 5.17	1 240 ± 4.23	1 360 ± 8.14
泊松比	0.32	0.36	0.35

由表1可知,3类区段的弹性模量呈“两端高、中间低”的特点:细段(A3)最高(3 355.42 MPa),组织纤维化程度高、结构致密;粗段(A1)次之(1 902.94 MPa);中段(A2)最低(1 064.69 MPa),因其含水率高、微观结构疏松。密度从基部向顶端递增,由粗段(1 150 kg/m³)增至细段(1 360 kg/m³),与生长发育规律一致:上部新生组织细胞壁更厚、木质素

元尺寸进行网格划分,并在拉伸、弯曲与剪切3种典型载荷工况下,提取了模型中的最大应力值进行对比分析。结果表明,随着单元尺寸的增大,模型单元总数逐步减少,计算效率相应提升,但最大应力值总体呈现先升后降的趋势。在单元尺寸0.7 mm下,3类区段秸秆在拉伸、弯曲与剪切工况中均表现出最高的最大应力值,且其单元数量显著低于0.2 mm的细化网格,在保证计算精度的同时有效控制了计算规模。单元尺寸为1.2 mm及以上时,最大应力值出现明显下降,说明网格已过于粗糙,无法充分捕捉秸秆局部几何特征引起的应力集中。因此,本研究最终选用0.7 mm作为全局网格尺寸,该选择在求解质量与求解效率之间取得了最佳平衡,为后续可靠的力学响应仿真奠定了基础。

沉积更多。密度差异影响惯性特征,与弹性模量共同决定固有频率和动态响应。泊松比介于0.32~0.36,差异小,符合植物纤维材料特性,表明横向与纵向变形比值相对稳定。

综上所述,水稻秸秆的材料属性表现出明显的结构性梯度。细段(A3)具有高刚度、高密度的特点,力学行为偏向脆性;粗段(A1)刚度与密度适中,但受较高含水率影响;中段(A2)则表现出较低的刚度和适中的密度。这些差异不仅是其宏观力学行为分化的内在原因,也为后续建立分区段、差异化的力学仿真模型提供了精准的物理参数。

2.3 有限元模型验证

为验证基于工业CT构建的有限元模型的准确性与可靠性,本研究将模拟所得力-位移曲线与物理实验结果进行叠加对比(图6)。在轴向拉伸实验中,3类区段秸秆(粗段(A1)、中段(A2)、细段(A3))的模拟结果与物理实验表现出良好的一致性(图6a)。模拟所得力-位移曲线在弹性阶段与实验曲线基本重合,峰值载荷预测误差均小于5%。线性回归分析显示(图6b),粗段(A1)、中段(A2)和细段(A3)的模拟值与实验值之间均存在显著正相关(R 分别为0.994 08、0.997 75和0.996 37, $P <$

0.01), 决定系数 R^2 分别为 0.985 82、0.994 60 和 0.991 29, 均方根误差 RMSE 分别为 3.900、1.152、1.792 N, 拟合曲线斜率 (k 分别为 0.956、0.988、

1.063) 均接近 1。上述指标充分验证了本研究所建有限元模型在轴向拉伸工况下的预测精度, 表明该模型能够准确再现水稻秸秆在拉伸载荷下的力学响应。

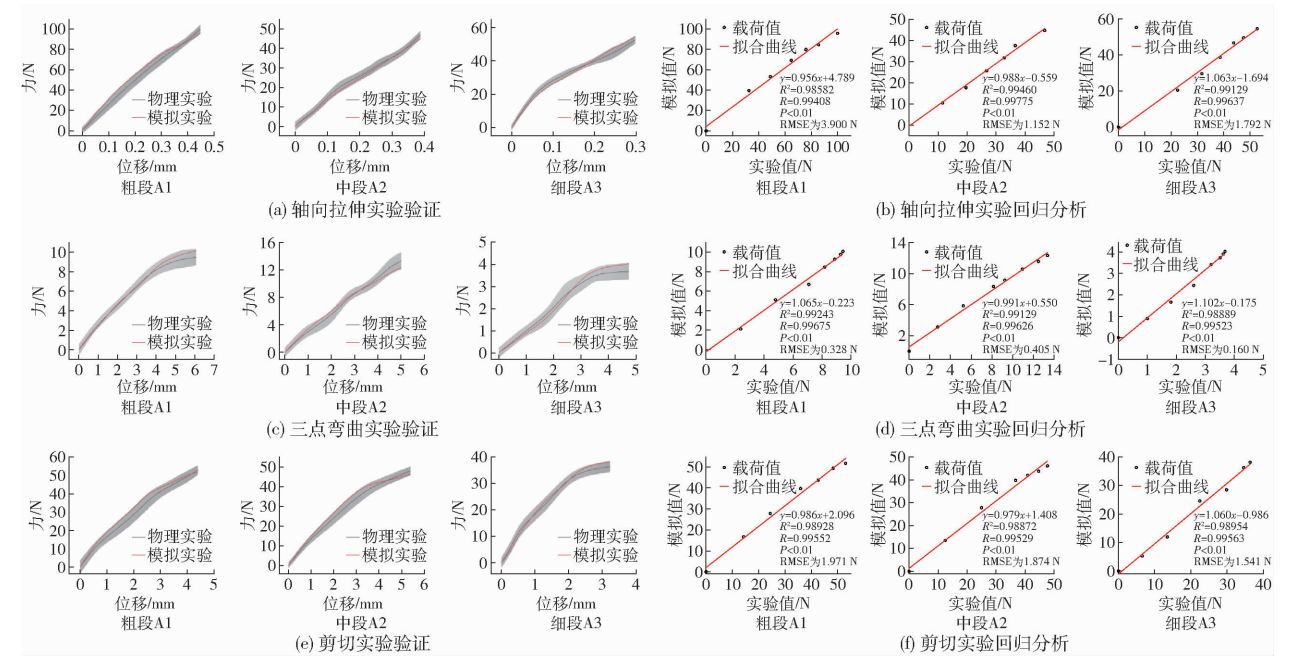


图 6 拉伸、弯曲与剪切的实验与模拟结果
Fig.6 Experimental and simulation results of three-point bending

在三点弯曲实验中,3 类区段秸秆的模拟曲线与实验曲线在弹性阶段高度吻合(图 6c), 根据图 6d 所示的线性回归分析,两者之间存在显著的正相关 ($R = 0.996\ 75, P < 0.01; R = 0.996\ 26, P < 0.01; R = 0.995\ 23, P < 0.01$), 拟合度非常高 (R^2 分别为 0.992 43、0.991 29、0.988 89), 模拟与实验数据偏差非常小 (RMSE 分别为 0.328、0.405、0.160 N), 且曲线斜率 (k 分别为 1.065、0.911、1.102) 均接近于 1。这些指标表明模拟结果与实验结果之间的误差很小, 而且该模型能够准确反映秸秆在弯曲过程中的宏观机械响应。

在剪切实验中,3 类区段秸秆的模拟结果与实验趋势一致(图 6e), 根据图 6f 所示的线性回归分析,两者之间存在显著的正相关 ($R = 0.995\ 52, P < 0.01; R = 0.995\ 29, P < 0.01; R = 0.995\ 63, P < 0.01$), 拟合优度非常高 (R^2 分别为 0.989 28、0.988 72、0.989 54), 模拟与实验数据的偏差较小 (RMSE 分别为 1.971、1.874、1.541 N), 且拟合曲线斜率 (k 分别为 0.986、0.979、1.060) 均接近于 1。上述指标表明,模拟与实验结果之间的误差较小, 秸秆模型能够准确反映其在剪切过程中的宏观机械响应。综上所述,本研究建立的基于真实微观几何结构的有限元模型,在统计指标上均通过了严格验证。它不仅实现了对水稻秸秆在拉伸、弯曲与剪切载荷下力-位移曲线的高精度量化预测,更因其对不同区

段、不同载荷类型的一致性、偏差小,体现了模型出色的泛化能力与物理机理的保真度。这为该模型有效复现水稻秸秆在实际载荷下的力学行为的工程适用性与后续机理研究奠定了坚实基础。

2.4 水稻秸秆拉伸失效机理分析

为揭示水稻秸秆在轴向拉伸载荷下的失效机理,本研究基于仿真结果提取了 3 类区段秸秆的应力-应变曲线及关键力学参数(图 7),并结合应力云图分析了裂纹萌生与扩展过程。从应力-应变曲线可知,3 类区段均呈典型脆性断裂,无塑性变形。粗段(A1)抗拉强度为 9.883 MPa,屈服应变为 0.32,破坏应变为 0.57,承载能力较高,但峰值附近有波动,反映内部纤维束逐步断裂。中段(A2)抗拉强度最低(3.551 MPa),屈服应变为 0.18,破坏应变为

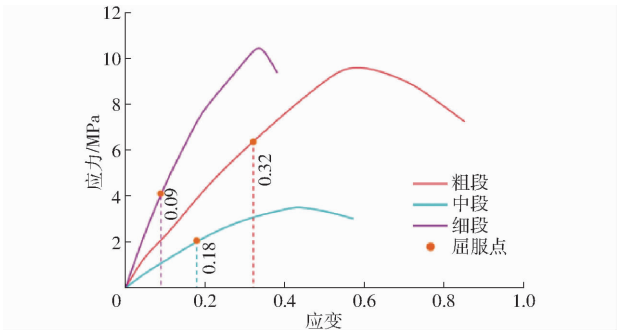


图 7 拉伸仿真实验 3 类区段秸秆应力-应变曲线
Fig.7 Stress - strain curves of three straw segment types in tensile simulation test

0.44,因弹性模量低、含水率高,刚度不足,低应力下即断裂。细段(A3)抗拉强度最高(10.597 MPa),屈服应变为0.09,破坏应变为0.33,木质化程度高、纤维致密,抗拉能力最强,但断裂突然,脆性最显著。

应力云图进一步揭示了拉伸失效的起源与扩展路径(图8)。在粗段(A1)中,拉伸载荷下应力首先集中于茎节与节间过渡区域的表皮薄弱处,随着载荷增加,裂纹在受拉侧表面萌生,随后沿纤维方向迅速扩展,最终导致断面呈不规则阶梯状形态(图8a),表明粗段(A1)虽具有较高的抗拉强度,但其结构非均匀性显著。中段(A2)的失效则表现为典型的均匀拉伸断裂,应力分布相对均匀,裂纹起始于截面最薄弱处,沿垂直于载荷方向快速扩展,断口较为平整(图8b),反映出其材料均匀性相对较好,但整体强度不足。细段(A3)的拉伸失效呈现明显的脆性断裂特征,裂纹在最大应力截面处瞬间萌生并贯穿整个截面,无明显纤维拔出或撕裂痕迹(图8c),表明其纤维-基体界面结合紧密,但韧性较

差。对比3类区段的拉伸失效行为可以发现,秸秆的拉伸力学性能与其结构特征和材料属性密切相关。细段(A3)因高木质化程度表现出最高的抗拉强度,但脆性最大;粗段(A1)虽强度适中,但茎节等结构特征使其失效模式更为复杂;中段(A2)因高含水率与较低刚度成为力学性能最薄弱的环节。从农业机械作业角度而言,拉伸载荷主要作用于秸秆在收割、输送、打捆等环节中受到的轴向拉拽作用。细段(A3)的高抗拉强度意味着在拉拽过程中不易断裂,有利于保持秸秆的完整性,但同时也增加了拉断所需能耗;粗段(A1)的阶梯状断裂特性提示在机械拉拽过程中可能出现局部断裂后的渐进失效,需关注夹持部位的应力集中;中段(A2)则因其较低的拉伸强度,在收获输送过程中更容易发生非预期断裂,影响秸秆的后续处理质量。综上,轴向拉伸失效机理的系统分析进一步完善了水稻秸秆在多载荷工况下的力学响应图谱,为农机输送、夹持等环节的设计优化提供了理论依据。

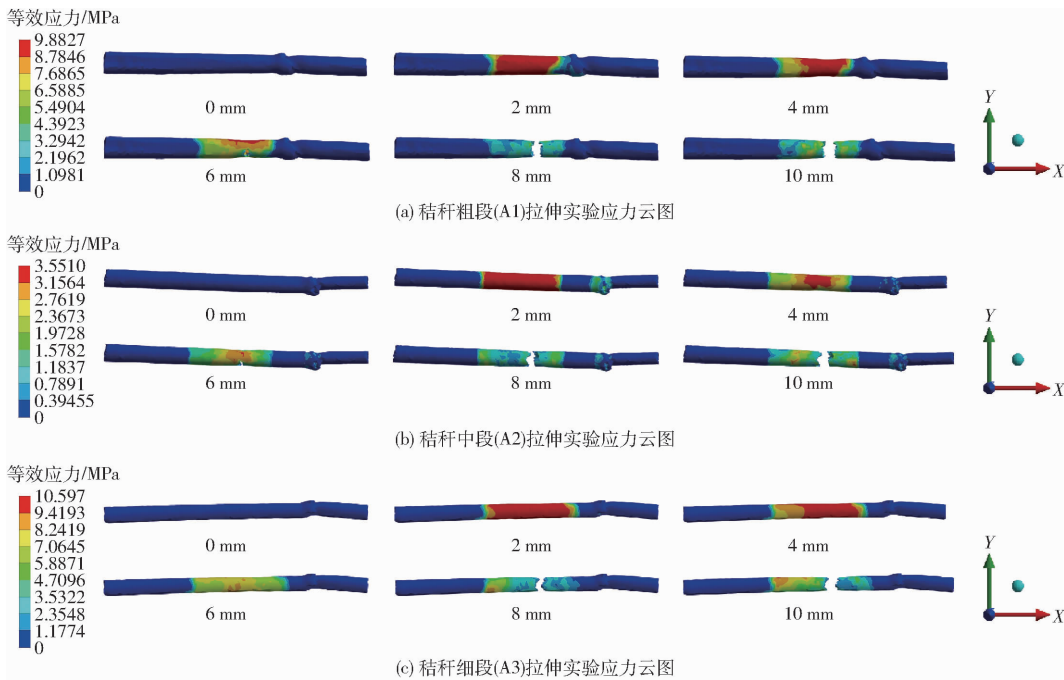


图8 3类区段水稻秸秆拉伸实验应力云图

Fig. 8 Stress cloud diagrams of rice straw tensile test in three types of sections

2.5 水稻秸秆弯曲失效机理分析

为深入揭示水稻秸秆在弯曲载荷下的失效机理,通过结合应力场量化分布与秸秆结构特征,对不同区段秸秆的弯曲行为进行多尺度关联分析。本研究提取了弯曲仿真中3类区段秸秆的应力-应变曲线(图9),并统计了其关键力学参数。从应力-应变曲线可以看出,3类区段秸秆的应力-应变曲线均呈典型脆性断裂:弹性阶段线性上升,达峰值后迅速下降。中段(A2)抗弯强度最高(7.960 MPa),屈服应

变为0.61,破坏应变为0.85。粗段(A1)因组织老化、含水率高,弹性模量最低,破坏前出现局部屈曲,抗弯性能略低于中段(抗弯强度为7.508 MPa,屈服应变为0.57,破坏应变为0.78)。细段(A3)刚度低、直径小,较低应力下整体弯折,抗弯强度为4.035 MPa,屈服应变为0.36,破坏应变为0.52,脆性更明显。

应力云图进一步揭示了弯曲破坏的起源与扩展路径(图10)。所有区段的破坏均起始于受拉侧表

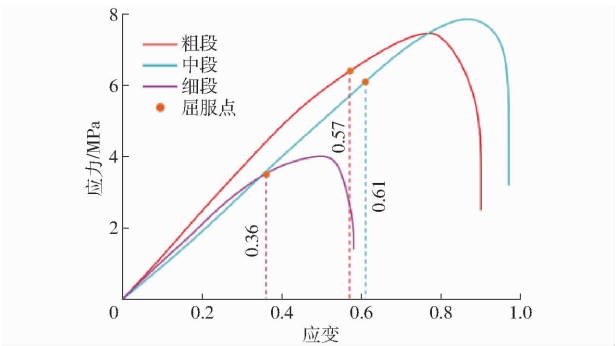


图 9 弯曲仿真实验 3 类区段秸秆应力-应变曲线
Fig. 9 Stress - strain curves of three straw segment types in bending simulation test

面,在跨中附近形成初始裂纹,随后裂纹沿轴向扩展并逐渐向受压侧延伸,最终导致整体结构失稳。不同区段秸秆表现出明显的破坏模式差异:粗段(A1)由于直径较大、壁厚相对较大,在破坏前受压侧出现明显的局部屈曲现象(图 10a),表明秸秆在持续或循环载荷下可能发生渐进式失稳,所以在抗倒伏育种中应关注壁厚均匀性和表皮力学性能的协同提升,而非单纯增加直径。在农机设计上,对于粗茎秆作物,接触部件应避免单点持续施压,转而采用多点多向支承结构,以分散压力、抑制屈曲发生;中段(A2)具有最为均匀的壁厚分布,其破坏表现为典型的拉伸断裂(图 10b),且抗弯强度最高,表明在切割或弯折作业中,若能使秸秆受拉侧充分受力,可更高效地引发断裂。因此,在收获机刀片设计上,可依据此断裂特性优化刃口倾角与运动轨迹,确保刀片在接触秸秆时能迅速在受拉侧形成应力集中,从而降

低切割能耗、提高切断效率;细段(A3)则因直径较小、结构刚度不足而呈现整体弯折破坏(图 10c),这导致其在较低载荷下即发生失效,但同时也意味着其在机械作业中更易发生非预期弯折,造成秸秆堵塞或断口不齐。因此,在打捆机、还田机等处理细茎秆作物时,应控制辊压速度与间隙,避免瞬间过载导致秸秆破碎或机器堵塞,同时保持秸秆结构性完整以便后续利用。该结果表明水稻秸秆的弯曲失效并非单纯由材料强度控制,而是秸秆结构几何与材料属性共同作用的系统响应,并为农业机械中秸秆的抗倒伏设计与接触部件优化提供了依据。

2.6 水稻秸秆剪切失效机理分析

剪切失效是水稻秸秆在收获过程中最主要的破坏形式之一,其机理涉及复杂应力状态下材料的损伤起始与演化。为系统分析其剪切力学响应,本研究绘制了 3 类区段在剪切仿真中的应力-应变曲线(图 11),并统计了相应力学参数。由剪切应力-应变曲线和应力云图可知(图 12),所有区段均呈现脆性剪切破坏特征,但强度与变形能力存在差异,粗段(A1)表现出最强的抗剪能力,其剪切强度达到 14. 219 MPa,与其较高的木质化程度和致密的纤维排列密切相关。在剪切载荷下,刃口前缘形成高强度应力集中,但由于其壁厚较大、纤维束之间结合紧密,裂纹萌生需要更高的能量输入。裂纹扩展方向约 55°,接近最大剪应力方向,表明其失效受剪切主导,破坏应变为 0. 56。中段(A2)在强度与韧性之间取得平衡,在剪切过程中损伤逐步累积,其剪切强度达到 12. 802 MPa,破坏应变为 0. 48,断裂角度约

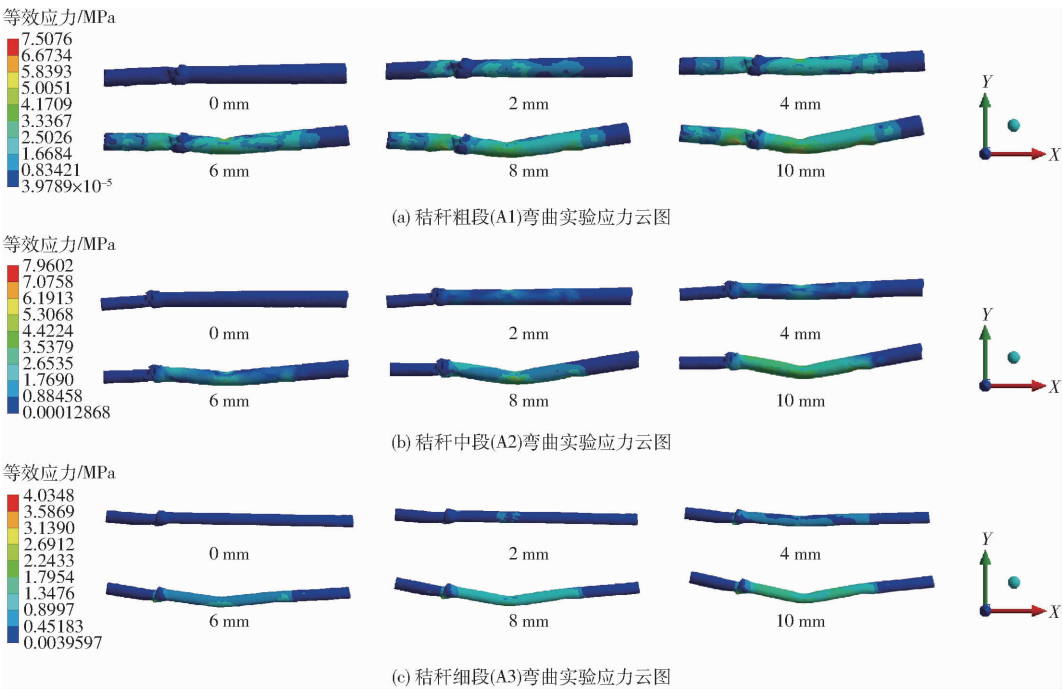


图 10 3 类区段水稻秸秆弯曲实验应力云图

Fig. 10 Stress cloud diagrams of rice straw bending experiment in three types of sections

为 58°。细段(A3)由于壁薄且纤维结构紧密,剪切强度最低为 9.401 MPa,破坏应变为 0.31,裂纹一旦萌生即迅速沿弱界面扩展,断裂角度约为 52°,反映出其材料均匀性较差与抗剪能力薄弱。

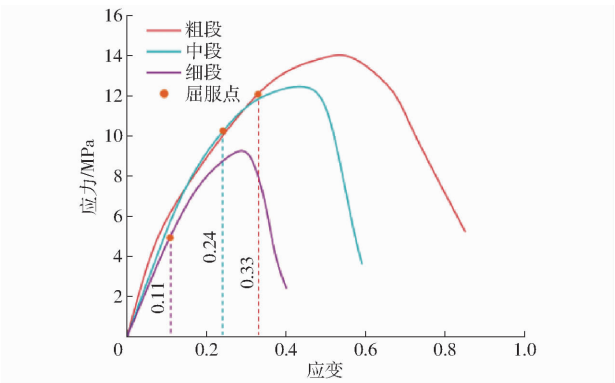


图 11 剪切仿真实验 3 类区段秸秆应力-应变曲线
Fig. 11 Stress - strain curves of three segment types of straw in shear simulation tests

通过应力云图分析可知,剪切破坏始于刃口接触区域,随后裂纹沿 45° ~ 60° 的方向快速扩展,最终形成较为平整的倾斜断裂面(图 12)。不同区段秸秆在剪切载荷下表现出显著的性能差异:粗段(A1)由于壁厚较大、木质化程度高,需要最大的剪切力才能引发破坏(图 12a);中段(A2)在结构强度和韧性之间达到最佳平衡(图 12b);细段(A3)则因壁厚较薄、结构脆弱而在较低载荷下即发生破坏(图 12c)。从农业机械作业角度而言,粗段所需剪切力最大,提示在切割高秆或基部秸秆时应采用更

高强度的刀具或更优的刃口设计;细段则易在较低载荷下脆断,但易产生碎裂,影响后续打捆或还田质量。本研究通过量化不同区段的剪切力学响应,所获取的剪切强度、破坏应变及断裂角度等关键参数,可直接用于构建更真实的农机-秸秆互作仿真模型,从而在虚拟环境中优化刀具设计、预测切割质量、评估功耗,减少实物实验成本,为差异化切割策略与刀具几何优化提供了依据。

综合两种载荷工况,水稻秸秆的失效模式主要表现为脆性断裂。弯曲失效由拉伸应力控制,而剪切失效则由剪应力主导。本模型通过可视化应力传递与裂纹扩展过程,明确了秸秆在不同载荷下的破坏阈值与演化规律,为农业机械切割、打捆等作业中的失效防护与结构优化提供了理论支撑。

2.7 讨论

本研究采用工业 CT 断层扫描与有限元分析相结合的技术路径,成功构建了适收期水稻秸秆的高精度力学模型,并系统性地研究了其在拉伸、弯曲与剪切载荷作用下的力学响应与失效机理。相较于传统方法,本模型在几何真实性、预测精度与物理机制揭示方面均取得了显著进展。在应力分析与预测方面,本模型展现出了显著优势。传统简化模型常低估秸秆的应力集中程度,导致峰值载荷预测偏差超过 20%,而本模型将误差控制在 5% 以内,这证明了考虑生物材料真实几何形态对于准确评估其承载极限至关重要^[16-17]。在失效机理的揭示上,传统的均质模型通常预测秸秆发生整体性的、突然的脆性断

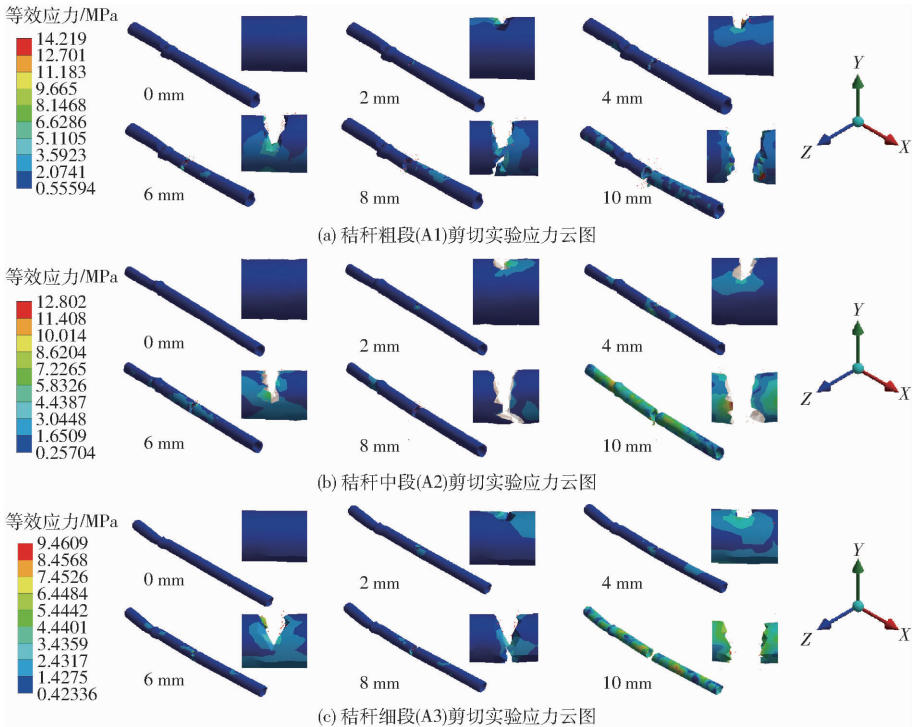


图 12 3 类区段水稻秸秆剪切实验应力云图
Fig. 12 Stress cloud diagrams of rice straw shear test in three types of sections

裂。然而,本研究的仿真结果清晰地揭示了一个渐进式的、由局部损伤累积驱动的失效过程。在拉伸仿真中,失效始于茎节与节间过渡区域的表皮薄弱处,裂纹沿纤维方向逐步扩展,呈现典型的脆性断裂特征;在弯曲仿真中,失效始于受拉侧应力集中最严重的表层,随后损伤向内扩展;在剪切仿真中,破坏首先从秸秆表皮最薄弱的区域萌生,表现为微裂纹的起始与扩展,最终导致宏观上的斜向剪切断裂。这种对局部失效模式的精确捕捉,是传统模型无法实现的。本模型的核心优势在于其“高保真度”。它不仅在数值上提供了更精确的载荷-位移响应预测,更重要的是,它能够可视化内部应力演变、精确定位失效起源、并再现真实破坏过程。这为深入理解秸秆作为一种生物复合材料的破坏物理机制,提供了强大的分析工具。

本研究集成高分辨率工业 CT 扫描、三维重建与非线性有限元分析,建立了一套适用于植物茎秆的精细化力学表征类似方法体系,克服了传统方法在几何还原上的局限,实现了真实结构建模,推动了农业物料力学向模型与机理驱动转型,提升了预测能力与机理揭示深度,为植物生物力学研究提供了新参考。成果实现了秸秆从宏观力学响应到微观结构诱因的多尺度表征,为作物抗逆育种提供了分析手段,也为农机设计提供了高精度力学参数与失效模式支撑。例如,可依据抗剪强度优化收获机切割器参数,参考抗弯强度设定打捆机压辊行程。未来通过参数化建模可形成不同品种、含水率的力学模型库,与农机虚拟样机耦合仿真,缩短研发周期,推动农业机械智能化、高效化发展。

尽管本研究在模型精度与结构真实性方面取得了显著进展,但仍存在局限性。首先,材料模型采用理想弹塑性假设,忽略秸秆的粘弹性特征(蠕变、松弛、率敏感性),可能导致高应变率工况下对刚度的高估或峰值应力的低估,影响切割能耗等指标的预测精度。其次,模型未纳入含水率的动态变化,而实际田间作业中含水率波动会显著改变弹性模量与强度,限制了模型的环境泛化能力。此外,将秸秆分为 3 段分别建模,重点分析了各段中心区域的力学行为,但农机作业可能发生在区段交界处。现有模型虽基于连续 CT 重建而具备模拟交界处的几何基础,但缺乏针对交界处的实验验证,其定量预测精度尚需进一步标定。针对上述问题,未来研究可从 3

方面展开:①发展更先进的材料本构模型,将粘弹性模型与塑性模型结合,并引入应变率相关的强化准则,以更准确地模拟动态和长期载荷行为。②建立考虑含水率与应变率的多物理场耦合模型,提升模型的环境适应性。③针对交界区域补充验证实验,校准模型在全秸秆长度范围内的预测能力,并将模型应用于具体农机-秸秆互作系统的耦合仿真中,以验证其工程实用价值。通过持续改进,基于工业 CT 的力学建模方法有望成为农业物料仿真领域的标准工具。

3 结论

(1)为克服传统简化模型在表征水稻秸秆复杂内部结构方面的不足,本研究融合工业 CT 扫描、三维重建与有限元仿真技术,构建了基于真实结构的高保真力学模型,系统分析了适收期水稻秸秆在拉伸、弯曲与剪切载荷下的力学特性与失效机理。

(2)基于工业 CT 扫描与三维重建技术,模型精确再现了适收期水稻秸秆的薄壁中空、茎节突起等复杂结构特征。物理实验验证结果显示,仿真与实验的力-位移曲线在拉伸、弯曲与剪切载荷下均高度吻合,决定系数 R^2 均高于 0.985,峰值载荷预测误差均小于 5%,有效证实了该模型在表征水稻秸秆宏观力学行为方面的准确性。

(3)依据直径差异将水稻秸秆划分为粗段(A1)、中段(A2)和细段(A3)3 类典型区段,研究发现其力学行为存在显著区别:中段(A2)抗弯强度最高,达到 7.960 MPa,粗段(A1)为 7.508 MPa,细段(A3)为 4.035 MPa;粗段(A1)抗剪强度最大,为 14.219 MPa,中段(A2)为 12.802 MPa,细段(A3)为 9.401 MPa;而细段(A3)抗拉强度最高,为 10.597 MPa,粗段(A1)为 9.883 MPa,中段(A2)为 3.551 MPa。应力云图进一步揭示了其失效机理:拉伸破坏始于茎节与节间过渡区域的表皮薄弱处,裂纹沿纤维方向逐步扩展;弯曲破坏主要由受拉侧应力集中引发,裂纹沿纤维方向扩展;剪切破坏则为刃口前缘应力集中导致的脆性断裂。

(4)本研究构建的模型能够直观呈现秸秆在机械载荷下的内部应力演变与损伤扩展过程,所输出的高精度力学参数与失效模式,可直接用于指导收割、打捆等装备中切割器、压辊等部件的结构与作业参数优化,为农业物料的精细化力学分析与农机设计优化提供了有效手段。

参 考 文 献

[1] Zhang F, Luo Z, Li W, et al. Structural design and optimization of crushing and strip-laying device based on discrete element method with wet-adhesive flexible straw model[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237: 110537.

[2] 赵颖,周枫,罗佳琳,等. 水稻秸秆还田配施肥料对小麦产量和氮素利用的影响[J]. 土壤, 2021, 53(5): 937-944.
Zhao Ying, Zhou Feng, Luo Jialin, et al. Effects of rice straw returning combined with fertilizer application on yield and nitrogen utilization of wheat[J]. Soils, 2021, 53(5): 937-944. (in Chinese)

[3] 王秋菊,刘峰,迟凤琴,等. 秸秆还田及氮肥调控对不同肥力白浆土氮素及水稻产量影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 105-111.
Wang Qiuju, Liu Feng, Chi Fengqin, et al. Effect of straw returning and nitrogen fertilizer regulation on nitrogen and rice yield in albic soil with different fertilities[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(14): 105-111. (in Chinese)

[4] Li R, Li H, Yang S, et al. DEM simulation of straw-soil-cutting system interactions for performance assessment of a spin-descent straw cutter[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 239: 111022.

[5] 贾彭程,徐福东,王金武,等. 轻简型水稻秸秆捡拾打捆一体机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 298-307.
Jia Pengcheng, Xu Fudong, Wang Jinwu, et al. Design and test of light-weight rice straw picking and baling integrated machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 298-307. (in Chinese)

[6] Chang G, Lyu H, Wang L, et al. Design and parameter optimisation of a cotton straw crushing device based on DEM-MBD [J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101584.

[7] 郭思佳,刘新柱,刘向东,等. 寒地玉米秸秆力学特性研究[J]. 农机化研究, 2024, 46(6): 170-174.
Guo Sijia, Liu Xinzhu, Liu Xiangdong, et al. Experimental study of mechanical properties of corn straw in cold region[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2024, 46(6): 170-174. (in Chinese)

[8] Wright C, Pryfogle P, Stevens N, et al. Biomechanics of wheat/barley straw and corn stover[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2005, 121: 5-19.

[9] 卿艳梅,李长友,黄汉东,等. 龙眼力学特性的有限元分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 143-147.
Qing Yanmei, Li Changyou, Huang Handong, et al. Finite element analysis on mechanical properties of longan [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 143-147. (in Chinese)

[10] Chen H, Guo T, Jin L, et al. Prediction of damage characteristics of apple fruit based on test and finite element method[J]. Journal of Stored Products Research, 2025, 111: 102543.

[11] 孙月铢,白雪卫,李永奎. 玉米秸秆粉料单模孔压缩成型过程有限元分析[J]. 农机化研究, 2016, 38(4): 237-242.
Sun Yuezhu, Bai Xuewei, Li Yongkui. Finite element analysis of corn stalk powder's extrusion process based on single die hole compression mould[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(4): 237-242. (in Chinese)

[12] Sun B, Xie Z, Xue Y, et al. Study on damage characteristics of loquat based on test and finite element method[J]. Journal of Food Process Engineering, 2025, 48(7): 70195.

[13] 颜利民,吴涛,蒋德莉,等. 侧抛式棉秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(3): 216-226.
Yan Limin, Wu Tao, Jiang Deli, et al. Design and experiment of side-throwing cotton stalk crushing and returning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(3): 216-226. (in Chinese)

[14] Zhao Z, Liu H, Wu M, et al. Motion and burial characteristics of rice straw during rotary tillage in high-stubble fields using discrete element method[J]. Soil & Tillage Research, 2026, 257: 106926.

[15] Liu C, Komatsu T, Moreno L H, et al. Internal structure, density, and mechanical properties of cranberry fruits[J]. Journal of Food Science, 2025, 90(3): 70153.

[16] 周虎,彭新华,张中彬,等. 基于同步辐射微 CT 研究不同利用年限水稻土团聚体微结构特征[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 343-347.
Zhou Hu, Peng Xinhua, Zhang Zhongbin, et al. Characterization of aggregate microstructure of paddy soils cultivated for different years with synchrotron based micro-CT[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(12): 343-347. (in Chinese)

[17] 黄成龙,华向东,黄诗豪,等. 基于 Micro-CT 和改进 DeepSORT 的再生稻再生芽追踪计数与再生力评价[J]. 农业工程学报, 2023, 39(11): 165-174.
Huang Chenglong, Hua Xiangdong, Huang Shihao, et al. Regenerated buds tracking and regenerative ability evaluation of ratooning rice using Micro-CT imaging and improved DeepSORT[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(11): 165-174. (in Chinese)

[18] 赵欢,王璟璐,张颖,等. 基于 Micro-CT 的玉米自交系茎秆维管束表型高通量获取与精准解析[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(12): 201-211.
Zhao Huan, Wang Jinglu, Zhang Ying, et al. High-throughput acquisition and accurate analysis of stem vascular bundle phenotypes in maize inbred lines based on Micro-CT[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(12): 201-211. (in Chinese)

[19] Song D H, Wang M, Li Y J, et al. Research progress of non-destructive testing techniques in moisture content determination [J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 11: 100878.

[20] Jiang N, Li G, Li Y, et al. The evolution of hygroscopic internal stress of jute/PLA composites based on X-ray computed tomography[J]. Composite Structures, 2025, 373: 119603.

[21] Tang H, Xu W, Zhao J, et al. Comparison of rice straw compression characteristics in vibration mode based on discrete element method[J]. Biosystems Engineering, 2023, 230: 191-204.