

# 基于三维激光扫描的大麦籽粒力学建模与试验

彭飞<sup>1</sup> 方芳<sup>2</sup> 王红英<sup>3</sup>

(1. 北京工商大学材料与机械工程学院, 北京 100048; 2. 郑州大学化工与能源学院, 郑州 450001;  
3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

**摘要:** 为研究大麦籽粒在收获、脱粒、贮藏及运输等作业过程的机械损伤, 对大麦籽粒进行加载压缩试验和有限元力学仿真。针对目前非规则形状农业物料常规建模方法将其近似处理为规则体, 存在测量难度高、数据误差大、仿真精度低等问题, 提出了一种基于三维激光扫描的大麦籽粒建模及其力学特性研究方法。以5种含水率、3种加载方式的大麦籽粒为研究对象, 利用万能材料试验机对其弹性模量、破碎负载等力学参数进行了测定, 结果分别是: 大麦籽粒的弹性模量为 87.39 ~ 167.84 MPa, 破碎负载为 70.40 ~ 157.32 N, 屈服强度为 0.85 ~ 2.12 MPa, 最大应变为 0.26% ~ 1.15%。结果表明: 随着含水率的增加, 3种加载方式下大麦籽粒的弹性模量、破碎负载和屈服强度均明显下降; 相同含水率条件下, 侧放加载时破碎负载最大, 立放加载时破碎负载最小。基于三维激光扫描技术获取了大麦籽粒点云数据, 利用 Geomagic Studio 和 Pro/E 对其进行点云处理、去噪和逆向建模, 得到与真实大麦籽粒形态高度相近的几何模型并进行有限元力学仿真。对比3种加载方式下的试验值和仿真值, 两者最大偏差为 7.2%, 表明了基于三维激光扫描的大麦籽粒建模方法的有效性和精确性。

**关键词:** 大麦籽粒; 三维激光扫描; 有限元; 力学建模

**中图分类号:** S126; S313 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)11-0342-07

## Modeling and Experiment on Mechanical Properties of Barley Grain Based on 3D Laser Scanning

PENG Fei<sup>1</sup> FANG Fang<sup>2</sup> WANG Hongying<sup>3</sup>

(1. School of Materials Science and Mechanical Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China  
2. College of Chemistry and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China  
3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to explore the mechanical properties of barley grain in the operation process of harvesting, threshing, storage, transportation and so on, the compression experiment and finite element simulation method (FEM) of barley grain were carried out. At present, the conventional modeling method of irregular shape agricultural material was simplified into regular body to deal with. Because of the difference between barley grain and simulation model in size and surface shape, the actual physical parameters of barley grain were not suitable for the finite element model which was approximately treated, thus existing a few problems, such as more sample consumption and cumbersome measurement. Five wet basis moisture content (7.94%, 11.02%, 14.29%, 16.85% and 20.37%) and three kinds of loading directions (horizontal, width and vertical directions) of barley grain were selected as test materials. Mechanical parameters like and different forms of damage, rupture strength, elastic modulus and compression work of barley grain were measured by universal materials tester. The compression tests results showed that under these conditions the elastic modulus of barley grain was 87.39 ~ 167.84 MPa, the rupture strength of barley grain was 70.40 ~ 157.32 N, the yield strength of barley grain was 0.85 ~ 2.12 MPa, and the maximum strain of barley grain was 0.26% ~ 1.15%. The results showed that the

收稿日期: 2018-07-10 修回日期: 2018-08-21

**基金项目:** 科技创新服务能力建设-基本科研业务费-青年教师科研能力提升计划项目 (PXM2018\_014213\_000033) 和现代农业产业技术体系建设项目 (CARS-43-01A)

**作者简介:** 彭飞(1989—), 男, 讲师, 博士, 主要从事农产品加工技术与装备研究, E-mail: feipeng2012zhn@163.com

**通信作者:** 方芳(1989—), 女, 副教授, 博士, 主要从事农副产物资源资源化利用研究, E-mail: fangf@zsu.edu.cn

elastic modulus, rupture strength and yield strength of barley grain were descended obviously with the increase of moisture content. The rupture strength in width direction was the maximum and in vertical direction was the minimum under the condition of the same moisture content. The elastic modulus in horizontal direction was bigger than that in vertical direction. Then the three-dimensional finite element model of barley grain was built based on 3D laser scanning technology, point clouds of barley grain were acquired by the software Geomagic Studio which were processed by cloud processing and reverse modeling techniques to get high quality point clouds, thus a geometric model highly similar to the real barley grain was obtained. And mechanical analogue simulation was performed based on the geometric model. The compression test results and finite element solutions were compared, and the maximal difference was 7.2%, which showed that the modeling method of barley grain based on 3D laser scanning technology was effective and accurate. The modeling method of barley grain provided a new technology to improve the accuracy of the irregular agricultural material model and reduce the simulation error. Meanwhile, the mechanics parameters and the rules of barley grain could provide reference for its utilization and optimization of related processing machinery.

**Key words:** barley grain; 3D laser scanning; finite element; mechanical modeling

## 0 引言

大麦(*Hordeum vulgare* L.), 别名牟麦、饭麦、赤膊麦, 种植历史悠久, 是全球第四大禾谷类、第五大农作物, 产量仅次于玉米、小麦、水稻和大豆, 高于土豆和薯类等作物<sup>[1]</sup>。其具有生育周期相对较短、适应性广、抗逆性强(耐瘠、抗旱、抗寒和抗盐碱)等特性<sup>[2]</sup>, 长久以来都是欧洲东部、非洲北部、亚洲喜马拉雅地区和其他极端气候地区居民的主食和主要碳水化合物来源。大麦含有较高的蛋白质、膳食纤维、维生素、矿质元素等, 含淀粉 65% ~ 68%, 蛋白质 10% ~ 17%, 总膳食纤维 11% ~ 34%,  $\beta$ -葡聚糖 4% ~ 9%, 脂类 2% ~ 3%, 矿物质 1.5% ~ 2.5% 以及多种功能性成分<sup>[3]</sup>, 在动物饲料、麦芽饮料(啤酒)、食品等行业应用广泛<sup>[4-5]</sup>。

国内外学者对农产品领域果蔬、谷物及种子的力学特性做了一定的研究<sup>[6-8]</sup>, 如哈密瓜<sup>[9]</sup>、龙眼<sup>[10]</sup>、番茄<sup>[11]</sup>、荔枝<sup>[12]</sup>、苹果<sup>[13]</sup>等瓜果, 又如玉米<sup>[14]</sup>、小麦<sup>[15]</sup>、谷子<sup>[16]</sup>等谷物。研究表明, 含水率和加载方式是影响谷物及种子力学特性的重要因素<sup>[6,15-16]</sup>, 研究为探索大麦的力学特性提供了模型建立和研究方法等理论基础<sup>[10-14]</sup>。大麦籽粒在收获、脱粒、贮藏及运输等作业过程中均受到载荷作用, 从而引起大麦籽粒内部应力, 产生破裂或永久变形等机械损伤, 进而影响其品质和利用率、降低经济效益及种子的发芽率。因此研究大麦籽粒的力学特性具有重要意义, 但是国内外结合试验与有限元分析方法对大麦力学特性的研究鲜有报道。

精确地获得农业物料的三维形貌特征数据, 有助于更深入地研究与农业物料表面结构相关的性质<sup>[17]</sup>。传统方法在构建农产品及其谷物种子几何

模型过程中, 大都对研究对象的物理形态进行简化并作近似处理, 即通过游标卡尺对研究对象的几何尺寸进行测定, 基于所测的尺寸再将其简化为球体、椭球体等规则形状<sup>[6,12,15-16]</sup>。实际上, 绝大多数农业物料为非规则形状, 特别是大麦籽粒体积较小、形状不规则、有腹沟等凹陷<sup>[18]</sup>, 若采用传统方法测定并建立大麦模型, 存在测量难度高、所需时间长、数据误差大、仿真结果精度低等缺陷。

针对此问题, 本文首先以不同含水率的大麦籽粒为试验材料, 在常温静态加载下进行压缩力学试验并分析其力学特性; 然后基于三维激光扫描的建模方法, 提取大麦籽粒三维尺寸及整体轮廓几何特征参数, 依据实际外形轮廓特征建立非规则大麦籽粒有限元模型并进行压缩仿真试验, 以验证该建模方法的精确性和可靠性。

## 1 大麦籽粒力学参数的试验测定

### 1.1 试验材料、仪器与方法

#### 1.1.1 试验材料

大麦籽粒: 品种为鲁啤 1 号, 取自山东省枣庄市, 原始含水率 10.56%, 容重 647.50 g/L。大麦籽粒饱满、无损伤、无病虫害。利用数显游标卡尺(精度 0.01 mm, 张家口市锦丰五金工具制造有限公司)对随机选取的 50 粒进行几何尺寸测定(图 1), 最后测得其平均几何参数: 长 8.26 mm, 宽 3.41 mm, 高 2.57 mm。取样后将大麦筛选去除杂质, 自然晾干, 待大麦含水率降到 9% 左右时放入自封袋中, 在 4℃ 环境下进行贮藏。

#### 1.1.2 试验仪器

PL2002 型电子天平, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司; DHG-9240A 型电热恒温鼓风干燥箱, 上海精宏实验设备有限公司; Instron-4411 型万能材



图1 大麦籽粒形态及其尺寸测定

Fig. 1 Morphology of barley grain and its determination

料试验机(最大载荷5 000 N,位移误差 $\pm 0.05\%$ ,载荷误差 $\pm 1.0\%$ ),美国英斯特朗公司。

### 1.1.3 试验样品的制备

为研究含水率对大麦力学特性的影响,通过赋水法<sup>[19]</sup>对大麦进行赋水处理。含水率测定采用 $(130 \pm 3)^\circ\text{C}$ 干燥箱干燥法,参考文献<sup>[20]</sup>。不同水分的调节方法如下:计算出调节到目标水分所需添加蒸馏水的质量,然后将蒸馏水均匀喷洒到大麦上,将加过水的大麦置于密封袋中,静置12 h使水分均匀。据此将大麦含水率处理为7.94%、11.02%、14.29%、16.85%、20.37%(大麦收获时含水率通常在18%~20%)。所需添加蒸馏水的质量计算公式为

$$Q = \frac{w_i(m_f - m_i)}{100 - m_f} \quad (1)$$

式中  $Q$ ——所需添加蒸馏水的质量,g

$w_i$ ——大麦的质量,g

$m_i$ ——大麦含水率,%

$m_f$ ——调节后大麦含水率,%

### 1.1.4 籽粒压缩力学性能试验

谷物及种子在贮藏、运输及加工等作业过程中,一般是在自然状态下承受各种外力的作用,因此在自然状态下对其进行整体力学研究有重要意义。由于大麦籽粒形状不规则,且一侧带有腹沟<sup>[4]</sup>,为保证试验方案的可靠性和数据结果的准确性,对大麦籽粒进行平放、侧放、立放共3种方式的力学加载,如图2所示。为避免应力集中,3种方式加载试验前,分别用锉刀磨去大麦籽粒上下两端0.3 mm的凸起部分。

试验选用刚性平板压头,底部直径30 mm,试验时将大麦籽粒放置于压头中心,调整压头底部至接触到大麦籽粒。万能材料试验机以1 mm/min速度对不同含水率、不同加载方向的大麦籽粒进行施压试验;当压头接触到大麦后,显示器开始记录并显示压力和位移数据,直至大麦因受力增大而破裂,压力急速降低而自动停机,实时动态显示力、位移、形变和力-位移试验曲线等。每组试验重复10次,最后

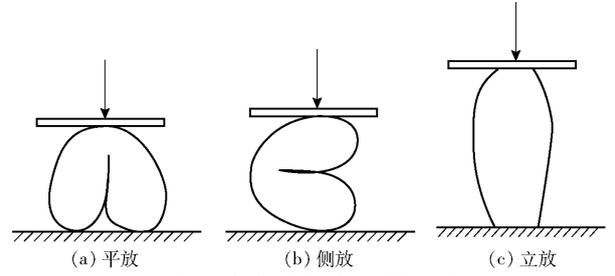


图2 大麦示意图及压缩方式

Fig. 2 Schematic and compression types of barley grain

取试验结果的平均值。

弹性模量是反映材料抵抗弹性变形能力的指标,基于赫兹接触应力理论,用刚性压板对球形或椭球形农业物料加载时,其试验材料的弹性模量为<sup>[17]</sup>

$$E = \frac{3F(1 - \mu^2)}{4D^{1.5}} \left( \frac{1}{R} \right)^{0.5} \quad (2)$$

式中  $E$ ——试样的弹性模量,MPa

$F$ ——大麦籽粒平均破碎负载,N

$\mu$ ——泊松比

$R$ ——物料的曲率半径,mm

$D$ ——试样的压缩变形量,mm

## 1.2 试验结果与分析

### 1.2.1 静态压缩试验

分别对5种含水率、3种加载方式(平放、侧放、立放)的大麦籽粒进行压缩试验,对测得的各项力学参数求平均值,试验结果如表1所示。

表1 大麦静态压缩试验结果

Tab. 1 Compression test results of barley grain

加载方式	含水率/%	弹性模量/MPa	最大应变/%	破碎负载/N	屈服强度/MPa
平放	7.94	167.84	0.88	150.36	1.62
	11.02	141.51	0.96	110.41	1.27
	14.29	128.37	0.75	98.39	1.13
	16.85	124.44	1.15	92.65	0.94
	20.37	116.95	0.92	72.18	0.85
侧放	7.94	152.96	0.95	157.32	2.12
	11.02	135.08	0.90	122.51	1.95
	14.29	130.07	1.15	115.76	1.63
	16.85	102.25	0.90	95.27	1.47
	20.37	94.04	0.26	84.18	1.18
立放	7.94	142.49	0.95	146.58	1.92
	11.02	123.54	1.12	105.21	1.86
	14.29	116.13	1.06	102.58	1.53
	16.85	100.11	0.75	85.62	1.45
	20.37	87.39	0.73	70.40	1.27

### 1.2.2 各因素对力学参数的影响

利用SPSS数据统计软件对大麦力学参数试验结果作方差分析,模型中因变量为弹性模量、破碎负载、最大应变、屈服强度,固定因子为加载方式和含

水率,分析结果如表 2 所示。

表 2 大麦籽粒加载力学结果方差分析

Tab.2 Variance analysis of barley grain loading

mechanical results

变异来源	因变量	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
加载方式	弹性模量	1 211. 224	2	605. 612	20. 292	0. 001
	破碎负载	456. 296	2	228. 148	20. 949	0. 001
	最大应变	0. 030	2	0. 015	0. 304	0. 746
	屈服强度	0. 765	2	0. 383	58. 539	0. 001
含水率	弹性模量	5 530. 900	4	1 382. 725	46. 331	0. 001
	破碎负载	9 733. 206	4	2 433. 302	223. 428	0. 001
	最大应变	0. 262	4	0. 065	1. 311	0. 344
	屈服强度	1. 185	4	0. 296	45. 329	0. 001

由表 2 分析可知,加载方式对大麦籽粒的弹性模量( $P < 0.01$ )、破碎负载( $P < 0.01$ )、屈服强度( $P < 0.01$ )等力学参数影响极显著,加载方式对大麦籽粒的最大应变影响不显著( $P = 0.746$ )。含水率对大麦籽粒的弹性模量( $P < 0.01$ )、破碎负载( $P < 0.01$ )、屈服强度( $P < 0.01$ )等力学参数影响极显著,含水率对大麦籽粒的最大应变影响不显著( $P = 0.344$ )。固定因子对大麦的最大应变影响不显著,这可能是由于大麦籽粒较小,个体力学性质差异较大造成的。3 种不同加载方式下,弹性模量、破碎负载、屈服强度都随着含水率的增大呈递减趋势,这一现象与其它谷物籽粒力学参数随含水率变化的规律相似<sup>[14-15]</sup>,这可能是因为籽粒的含水率越低,其内部组织结合越紧密,硬度越高,因此承受载荷和抵抗破裂的能力也越强;随着含水率增大,内部组织软化,因此承受载荷和抵抗破裂载荷的能力减弱,故大麦的弹性模量、破碎负载、屈服强度呈降低趋势。基于降低大麦机械损伤的角度,当大麦播种器、排种器、收获机等农业机械作业时,作用力应小于大麦的破碎负载;由于较低含水率的大麦抵抗机械损伤的能力更强,大麦播种前尽量晾晒充分。

## 2 基于三维激光扫描的大麦籽粒建模

### 2.1 三维激光扫描原理

三维激光扫描技术利用全自动高精度立体扫描仪,获取实物表面的位置坐标点数据,通过点云处理、去噪、逆向建模等后续操作,获得精确的实物模型及其物理参数。三维激光扫描能够克服传统测量技术的局限性,具有扫描速度快、实时性强、精度高、主动性强、数据密度大、非接触测量等特点<sup>[21-22]</sup>,快速重构被扫描实体的点云模型,且输出格式可以在多种软件中进行后处理、便于将现实中的目标结构信息转换成可以处理的数据,现在广泛应用于工程

测量、逆向工程、虚拟建模等领域<sup>[23-24]</sup>。本文将三维激光扫描技术应用到大麦籽粒建模。

### 2.2 大麦籽粒模型的构建

采用北京博维恒信科技发展有限公司生产的三维扫描仪(MSC 五/四轴全自动扫描系统,工作台面直径 200 ~ 500 mm,扫描精度 0 ~ 0.03 mm,最大角速度 35(°)/s),通过高精度数控转台多角度扫描精确自动拼接,生成三维点云数据,利用自动化逆向工程软件 Geomagic Studio 将点云数据转换成精确的数字模型,作为有限元三维建模的模型基础。图 3a 为生成的点云集合,依次对其进行着色、除噪、点云注册、点云三角片化、合并、模型修正操作,最终得到大麦籽粒多边形模型,如图 3b 所示。

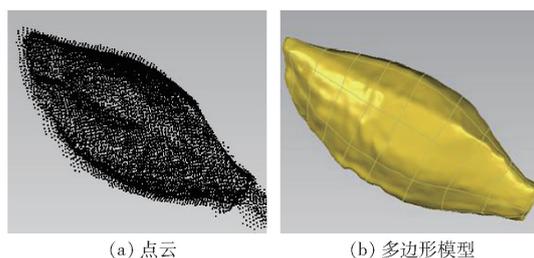


图 3 大麦籽粒三维模型的建立

Fig. 3 Modeling process of 3D model of barley grain

扫描时,三维扫描仪对大麦设定一个坐标系来记录点云空间数据。在 Geomagic Studio 中继续沿用这一坐标系,利用该软件自带测量工具测定大麦籽粒体积、三维尺寸等几何特征参数。将 Geomagic Studio 中创建的籽粒三维模型保存为 igs 格式,导入到三维软件 Pro/E 中,通过逆向建模构建大面籽粒的轮廓曲面,得到 Pro/E 三维模型如图 4a 所示。

为避免压缩时接触点应力集中,与真实试验相一致,将大麦籽粒的 Pro/E 三维模型两端去掉 0.3 mm 的尖端部分,建立大麦籽粒的 Pro/E 几何模型如图 4b ~ 4d 所示。

## 3 大麦籽粒有限元分析

### 3.1 参数设置

利用有限元分析软件 Abaqus 13.0,对大麦籽粒的压缩过程进行仿真模拟。基于三维激光扫描生成的大麦籽粒 Pro/E 三维模型(图 4),将其保存为 stp 格式,导入到 Abaqus 软件中,按照压缩真实试验中籽粒所受的力和约束条件设置仿真环境下的边界条件。

选用初始条件下(含水率 14.29%)的试验数据,大麦籽粒纤维化不明显,因此可以将其材质近似假定为各向同性材料<sup>[25-26]</sup>,材料类型选用线弹性材料,类比小麦、水稻和坚果<sup>[15, 23, 25]</sup>,材料属性中泊松

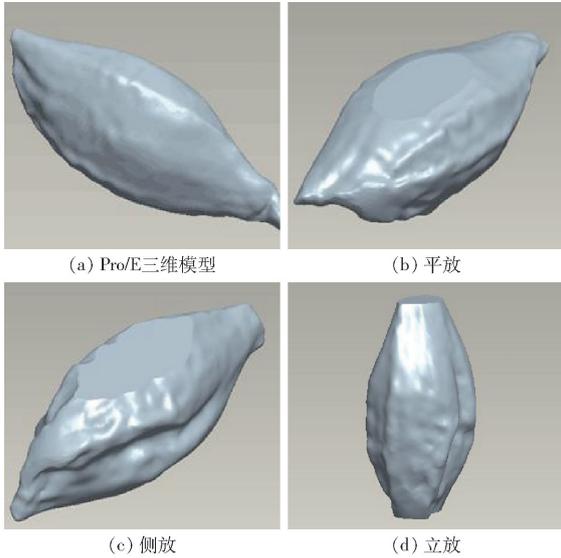


图4 大麦籽粒 Pro/E 三维模型

Fig. 4 3D Pro/E model of barley grain

比取 0.3, 弹性模量选用试验测得数据(表 1): 平放加载时为 128.37 MPa, 侧放加载时为 130.07 MPa, 立放加载时为 116.13 MPa。考虑到有限元网格划分的特点以及大麦籽粒的几何尺寸, 选用三维 Tet 中的 C3D4 类型对大麦籽粒模型进行网格划分。在大麦上端中心加载垂直于压头的大麦籽粒破碎负载, 根据试验测得的压缩试验数据(表 1) 设置加载载荷, 平放加载时为 98.39 N, 侧放加载时为 115.76 N, 立放加载时为 102.58 N, 大麦模型下端采用固定约束。

### 3.2 结果与分析

有限元仿真结果中的应力应变图可直观反映大麦内部的应力应变规律, 并据此来分析大麦在压缩载荷下产生破碎的力学行为和破碎方式, 对大麦籽粒破碎和机械损伤的研究具有重要的意义。分别对平放、侧放、立放 3 种方式压缩的大麦籽粒进行有限元模拟, 得到大麦籽粒在压缩载荷作用下的应力云图如图 5 所示。

最大应变产生在平板压头与大麦接触位置附近, 大麦上端加载处的应变最大。从图 5a 分析可以看出, 平放加载时在大麦中心受到最大的应力, 当应力峰值超过大麦材料的压缩强度极限时, 首先在籽粒中心局部破裂产生裂纹, 裂纹向周围延伸最终导致整个籽粒被压碎。可以预测大麦破裂形式是以籽粒中心向四周扩散, 这样导致其籽粒整体破裂, 破碎率较大, 产生的局部裂纹点少, 造成小的碎粒比较多。

由图 5b 分析可知, 侧放加载时, 籽粒与压头的接触面积小于平放加载, 沿加载方向接触面积较小, 因此侧放应力与变形量比平放更大, 由圣维

南原理可知, 在加载载荷作用下, 接触面区域局部范围内应力分布明显不均匀, 且这种现象在侧放加载时比横向加载更明显。此外, 由于籽粒腹沟的存在, 侧放加载时沿籽粒腹沟凹陷的方向, 较其他方向更容易破裂。由图 5c 可以看出, 立放加载时, 载荷作用在籽粒长度方向的两端, 且其有效长度分别为平放和侧放的 2.7 ~ 3.9 倍, 应力在加载面接触附近的应力更大, 所以立放加载破坏形式为加载面附近产生破裂, 这与万能材料试验机加载破碎现象一致。

对比以上 3 种加载方式可知, 侧放加载时的最大应力大于平放加载, 立放加载时最小, 这与试验结果相同。大麦籽粒在平放和侧放加载时, 应力沿加载面延伸至整个大麦籽粒断面, 应力在籽粒中心部位较大; 而立放加载时, 应力在加载面附近的部位较大。由此可分析: 大麦平放加载时, 裂纹首先出现在籽粒的内部中心, 之后沿着截面方向扩展至四周; 侧放加载时裂纹首先出现在腹沟部分, 随后沿腹沟经内部中心延伸至四周, 大麦破裂。这与实际试验时在加载点处出现裂纹的情况一致。本文基于三维激光扫描建立的大麦籽粒几何模型, 与真实大麦籽粒形态尺寸高度一致, 模型能够反映真实大麦籽粒的凹凸等形态, 仿真模拟时会出现局部点的应力峰值, 这与大麦籽粒实际压缩试验情况高度吻合, 因此仿真模拟精度更高。

将有限元计算得到的力-位移曲线与大麦籽粒压缩试验得到的力-位移曲线进行比较, 以平放加载为例, 如图 6 所示。结果显示模拟值和试验值二者最大偏差为 7.2%, 表明基于三维激光扫描建立大麦籽粒模型并据此模型进行有限元法研究分析大麦的压缩力学特性具有可行性与精确性。造成误差的可能原因有: 大麦粘弹性材料简化为各向同性线性弹性材料; 模型加载点与实际工况加载点间存在误差。

## 4 结论

(1) 通过大麦籽粒进行压缩力学试验, 测量 5 种含水率、3 种加载方式下大麦的弹性模量、屈服强度、破碎载荷、最大应变参数, 分析大麦力学特性参数随含水率、加载方式的变化规律。具体是: 弹性模量为 87.39 ~ 167.84 MPa, 屈服强度为 0.85 ~ 2.12 MPa, 破碎负载为 70.40 ~ 157.32 N, 最大应变为 0.26% ~ 1.15%。含水率对大麦的弹性模量、破碎负载、屈服强度有极显著影响 ( $P < 0.01$ ), 大麦弹性模量、破碎负载、屈服强度随含水率的增大呈递减趋势, 含水率对大麦最大应变影响不显著。加载方

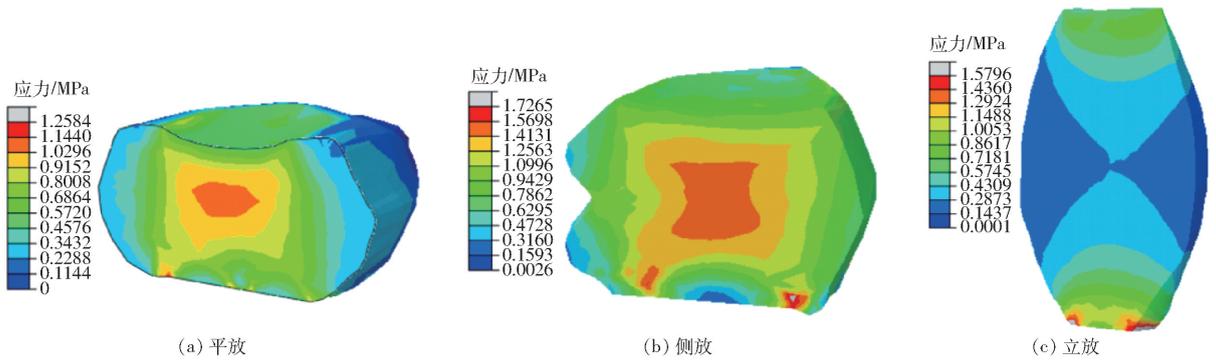


图 5 大麦籽粒在压缩载荷下的应力分布云图

Fig. 5 Stress distribution maps of barley grain at different loading types

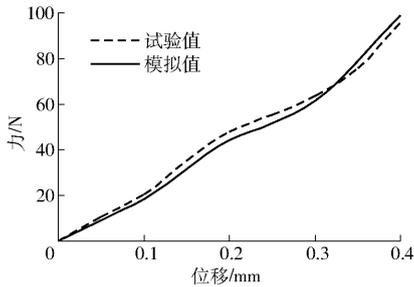


图 6 平放压缩试验与仿真计算的力-位移曲线对比

Fig. 6 Comparison of force - displacement curves between horizontal compression test and simulation calculation

式对大麦弹性模量、破碎负载、屈服强度具有极显著影响 ( $P < 0.01$ ), 含水率相同条件下, 侧放加载时破碎负载最大, 立放加载时破碎负载最小。

(2) 提出了一种基于三维激光扫描的大麦籽

粒建模方法, 通过点云处理、逆向建模等技术得到与真实大麦籽粒外形尺寸高度相近的大麦籽粒三维模型, 能够解决目前常规建模方法中将非规则农产品近似处理为规则几何形状而导致的测量难度高、所需时间长、失真度高、仿真误差大的问题。同时该方法可以为提高其他非规则农产品建模精度提供参考。

(3) 基于三维激光扫描构建的大麦籽粒模型, 通过有限元计算法进行与真实压缩条件尽量一致的压缩力学试验, 对比仿真值与试验值, 得到最大偏差为 7.2%, 比常规建模方法具有更高的仿真精度, 表明了大麦籽粒三维激光建模方法及进一步运用有限元法研究大麦籽粒压缩力学特性的有效性和精确性。

## 参 考 文 献

- 曹文, 叶晓汀, 谢静, 等. 大麦营养品质及加工研究进展[J]. 粮油食品科技, 2016(2): 55-59.  
CAO Wen, YE Xiaoting, XIE Jing, et al. Research progress on nutritional quality and processing technology of barley[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016(2): 55-59. (in Chinese)
- 夏岩石, 冯海兰. 大麦食品及其生理活性成分的研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2010(6): 27-30.  
XIA Yanshi, FENG Hailan. Research progress of barley food and its bioactive components[J]. Cereal & Feed Industry, 2010(6): 27-30. (in Chinese)
- 张敏, 赵兵, 梁杉. 大麦及其制品质量安全风险及控制[J]. 食品科学技术学报, 2016, 34(5): 21-25, 32.  
ZHANG Min, ZHAO Bing, LIANG Shan. Quality and safety risk and its control of barley and barley products[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 34(5): 21-25, 32. (in Chinese)
- 陈明贤, 张国平. 大麦的利用现状及前景探讨[J]. 大麦与谷类科学, 2010(3): 11-14.  
CHEN Mingxian, ZHANG Guoping. The situation and prospect of barley utilization[J]. Barley and Cereal Sciences, 2010(3): 11-14. (in Chinese)
- 申德超, 李杨, 吴勃. 挤压蒸煮大麦作啤酒辅料的糖化试验研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(1): 100-103.  
SHEN Dechao, LI Yang, WU Bo. Study on the saccharification experiment for extrusion cooked barley used as beer adjunct [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1): 100-103. (in Chinese)
- 张锋伟, 谢军海, 张雪坤, 等. 鲜枣整果力学特性研究及其有限元分析[J]. 食品科学, 2016, 37(23): 100-104.  
ZHANG Fengwei, XIE Junhai, ZHANG Xuekun, et al. Finite element analysis of mechanical properties of whole fresh jujubes [J]. Food Science, 2016, 37(23): 100-104. (in Chinese)
- SALARIKIA A, ASHTIANI S H M, GOLZARIAN M R, et al. Finite element analysis of the dynamic behavior of pear under impact loading[J]. Information Processing in Agriculture, 2017, 4(1): 64-77.
- 吴亚丽, 郭玉明. 果蔬生物力学性质的研究进展及应用[J]. 农产品加工(学刊), 2009(3): 34-37.  
WU Yali, GUO Yuming. Progress of research and application in biomechanical properties of fruits and vegetables[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2009(3): 34-37. (in Chinese)

- 9 SEYEDABADI E, KHOJASTEHPUR M, SADRNI H. Predicting cantaloupe bruising using non-linear finite element method [J]. *International Journal of Food Properties*, 2015, 18(9): 2015–2025.
- 10 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)
- 11 LI Z, WANG Y. A multiscale finite element model for mechanical response of tomato fruits [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2016, 121: 19–26.
- 12 陈燕, 蔡伟亮, 邹湘军, 等. 荔枝鲜果挤压力学特性[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(8): 360–364.  
CHEN Yan, CAI Weiliang, ZOU Xiangjun, et al. Extrusion mechanical properties of fresh litchi [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(8): 360–364. (in Chinese)
- 13 AHMADI E, BARIKLOO H, KASHFI M. Viscoelastic finite element analysis of the dynamic behavior of apple under impact loading with regard to its different layers[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2016, 121: 1–11.
- 14 李心平, 高连兴, 马福丽. 玉米种子力学特性的有限元分析[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(10): 64–67.  
LI Xinping, GAO Lianxing, MA Fuli. Analysis of finite element method on mechanical properties of corn seed [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(10): 64–67. (in Chinese)
- 15 张克平, 黄建龙, 杨敏, 等. 冬小麦籽粒受挤压特性的有限元分析及试验验证[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(6): 352–356.  
ZHANG Keping, HUANG Jianlong, YANG Min, et al. Finite element analysis and experimental verification of wheat grain under compression loads [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(6): 352–356. (in Chinese)
- 16 杨作梅, 孙静鑫, 郭玉明. 不同含水率对谷子籽粒压缩力学性质与摩擦特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(23): 253–260.  
YANG Zuomei, SUN Jingxin, GUO Yuming. Effects of moisture content on compression mechanical properties and friction characteristics of millet grain [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(23): 253–260. (in Chinese)
- 17 周祖饬. 农业物力学[M]. 北京: 农业出版社, 1994.
- 18 AGHAJANI N, ANSARIPOUR E, KASHANINEJAD M. Effect of moisture content on physical properties of barley seeds [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2011, 14(1): 161–172.
- 19 彭飞, 杨洁, 王红英, 等. 小麦粉摩擦特性的试验研究[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(8): 7–12.  
PENG Fei, YANG Jie, WANG Hongying, et al. Experimental research on friction characteristics of wheat meal [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2015, 30(8): 7–12. (in Chinese)
- 20 国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定: GB 5009.3—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- 21 魏学礼, 肖伯祥, 郭新宇, 等. 三维激光扫描技术在植物扫描中的应用分析[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(20): 373–377.  
WEI Xueli, XIAO Boxiang, GUO Xinyu, et al. Analysis of application of 3D laser scan technology in plant scanning [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(20): 373–377. (in Chinese)
- 22 温维亮, 王勇健, 许童羽, 等. 基于三维点云的玉米果穗几何建模[J]. *中国农业科技导报*, 2016, 18(5): 88–93.  
WEN Weiliang, WANG Yongjian, XU Tongyu, et al. Geometric modeling of maize ear based on three-dimensional point cloud [J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2016, 18(5): 88–93. (in Chinese)
- 23 刘彩玲, 王亚丽, 宋建农, 等. 基于三维激光扫描的水稻种子离散元建模及试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(15): 294–300.  
LIU Cailing, WANG Yali, SONG Jiannong, et al. Experiment and discrete element model of rice seeds based on 3D laser scanning [J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(15): 294–300. (in Chinese)
- 24 王佳, 杨慧乔, 冯仲科. 基于三维激光扫描的树木三维绿量测定[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(8): 229–233. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20130839&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130839&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.039.  
WANG Jia, YANG Huiqiao, FENG Zhongke. Tridimensional green biomass measurement for trees using 3-D laser scanning [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(8): 229–233. (in Chinese)
- 25 涂灿, 杨薇, 尹青剑, 等. 澳洲坚果破壳工艺参数优化及压缩特性的有限元分析[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 272–277.  
TU Can, YANG Wei, YIN Qingjian, et al. Optimization of technical parameters of breaking Macadamia nut shell and finite element analysis of compression characteristics [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(16): 272–277. (in Chinese)
- 26 曹成茂, 蒋兰, 吴崇友, 等. 山核桃破壳机加载锤头设计与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(10): 307–315. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20171039&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20171039&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.039.  
CAO Chengmao, JIANG Lan, WU Chongyou, et al. Design and test on hammerhead of pecan shell-breaking machine [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(10): 307–315. (in Chinese)