

胡萝卜咀嚼力学模型构建与质构分析

彭飞*, 黄立俊, 宋雨龙, 张丽梅

(北京工商大学计算机与人工智能学院, 北京 100048)

摘要: 为了探究胡萝卜在不同咀嚼速率下的质构特性及其与力学参数之间的相关性, 该文以胡萝卜块 (厚度 5 mm) 为研究对象, 利用质构仪对其进行质地剖面分析 (Texture Profile Analysis, TPA) 测试, 分析不同咀嚼速率下胡萝卜块的质构力学参数 (硬度、粘附性、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性) 及其变化规律; 接着, 构建磨牙杵压运动下的咀嚼力学模型并进行有限元仿真 (Mises, Tresca, Max, Principal); 最后, 进行各参数间的相关性分析。结果表明: 在相同速度下, Tresca 最大、Mises 次之、Abs 应力最小; 测试速度与 Mises、Tresca 应力呈极显著正相关 ($P<0.01$), 相关系数分别为 0.878 和 0.868; 测试速度与 Abs 应力呈极显著负相关, 相关系数为 -0.862; Mises、Tresca 应力与粘附性、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性均具有显著相关性 ($P<0.05$), 这表明仿真应力可以一定程度上反映胡萝卜的质构特性, 同时也验证了模型的正确性。该研究有助于深入分析胡萝卜质构品质、促进其深加工与综合利用, 同时也为研究果蔬咀嚼行为与力学质构的关系提供了一种科学有效的方法。

关键词: 胡萝卜; 咀嚼力学; 质构力学参数; 质地剖面分析 (TPA) 测试; 有限元仿真

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.1164

Construction of Mechanical Model and Texture Analysis of Carrot Mastication

PENG Fei*, HUANG Lijun, SONG Yulong, ZHANG Limei

(School of Computer and Artificial Intelligence, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract: In order to investigate the textural properties of carrots under different chewing rates and their correlation with mechanical parameters, the carrot block (thickness 5 mm) was taken as the research object, and the texture profile analysis (TPA) test was carried out on it by using a texture meter to analyze the texture mechanical parameters (hardness, adhesion, cohesion, elasticity, adhesion, chewing) and their changing rules under different chewing rates. Then, a chewing mechanical model and finite element model were constructed to investigate the chewing mechanical properties of the carrot blocks under the grinding pestle and pestle pressure movement. Next, the masticatory mechanics model was constructed and finite element simulation (Mises, Tresca, Max, Principal) was carried out; finally, the correlation analysis among the parameters was performed. The results showed that: at the same speed, Tresca was the largest, Mises was the second largest, and Abs stress was the smallest; the test speed showed a highly significant positive correlation with Mises and Tresca stress ($P<0.01$), with correlation coefficients of 0.878 and 0.868, respectively; the test speed showed a highly significant negative correlation with Abs stress, with a correlation coefficient of -0.862; Mises, Tresca stresses were significantly correlated with adhesion, cohesion, elasticity, adhesion, and chewing ($P<0.05$), which indicated that the simulated stresses could reflect the textural properties of carrots to a certain extent, and also verified the correctness of the model. This study will contribute to deeply analyze the textural quality of carrot and promote its deep processing and comprehensive utilization, and also provides a scientific and effective method to study the relationship between chewing behaviour and mechanical texture of fruits and vegetables.

Key words: carrot; mastication mechanics; texture mechanics parameters; texture profile analysis test; finite element simulation

胡萝卜作为根茎类蔬菜, 其富含大量的胡萝卜素、纤维素、矿物质等多种营养成分^[1,2], 营养价值丰富, 是制作酱腌菜、泡菜以及雕花、各类工艺菜的常用原料。质构特性如硬度、弹性、咀嚼性等, 直接影响胡萝卜及其腌制品、深加工菜品的感官品质 and 产品质量^[3]。

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-09-29; 接受日期: 2024-10-09

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFD2101001); 江南大学食品安全与国家战略治理实验室开放型课题 (2025-012W)

作者简介: 彭飞 (1989-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工技术与装备, E-mail: feipeng2012zhu@163.com

胡萝卜的药用和食用价值很高,自古以来就有“小人参”的美誉;探究胡萝卜咀嚼过程中质构特性与变化规律,对于其品质及质地评价具有重要意义。当前,果蔬类食品的质构评价方法主要包括感官评价和质构仪测试两大类^[4,5],其中:感官评定法主要依靠人体口腔咀嚼来判断,其感知过程易受个体主观因素和外界影响,评定结果往往存在主观性^[6,7];质构仪测试通过采集探头对样品的压力来分析质构参数,难以真实反映咀嚼过程中的复杂力学变化,特别是样品不同区域的力学变化和物理响应^[8,9],测试结果存在一定局限性;在此基础上,本文引入有限元仿真方法作为 TPA 测试的补充,用以深入分析食材在口腔咀嚼过程中的破碎机理、建立可靠的食材质地评价系统、进而开发具有类咀嚼功能的仿生机器等^[10,11]。

本文基于有限元数值仿真方法构建胡萝卜的咀嚼力学模型,通过模拟分析不同咀嚼速率下胡萝卜的力学变化过程及其咀嚼效果,并对质地多面分析法(TPA 模式)进行试验验证及相关性分析,进而验证胡萝卜咀嚼力学模型的科学与有效性。该模型可用于测定胡萝卜及其制品的质地、设计和改进相应加工机械,提高其加工效率和品质。此外,还能深入研究咀嚼运动与食品质构关系提供一种科学有效的方法,对食品新型加工技术和多样化产品开发具有一定指导意义。

1 基于 TPA 试验的胡萝卜质构特性分析

1.1 材料与仪器

选用新鲜、表面完整、无病虫害、无机械损伤、成熟度基本一致的山东莱西胡萝卜,均购于北京海淀区某超市。

TMS-Pilot 质构仪,北京盈盛恒泰科技有限责任公司;多功能手摇切片机,新余德智堂贸易有限公司;纯净水,杭州娃哈哈集团有限公司。

1.2 样品预处理

去除胡萝卜两端,放入切片机中,切成厚度为 5 mm 的胡萝卜片备用,如图 1a 所示。接着,去除胡萝卜片边缘部分,选取其中心位置,将其切为 20 mm×20 mm×5 mm (长×宽×高)的长方体块,如图 1b 所示。将切好的胡萝卜块以十二块为一组置于保鲜自封袋中,待测。



图 1 胡萝卜样品制备过程

Fig.1 The process of preparing carrot samples

注: a 果蔬切割机切削胡萝卜片示意图; b 胡萝卜样品。

1.3 质构仪测定方法

TPA 测试通过模拟人类牙齿的咀嚼运动,对固体、半固体样品进行两次压缩^[12,13],得到硬度、粘附性、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性等质构参数,各参数含义如表 1 所示^[14,15]。利用 TMS-Pilot 质构仪对胡萝卜块样品进行质构力学试验(如图 2 所示):取直径 25.4 mm 的圆柱形探头,设定力量感应元的量程为 0~500 N,测试前后速度为 30 mm/min,样品形变量为 50%,两次压缩停顿时间为 5 S,触发力为 0.75 N,输入探头回升到样品表面的高度为 12 mm,得到 TPA 特征曲线(如图 3 所示)。

人类咀嚼速度是指在进食过程中每分钟咀嚼的次数,该速度受个体差异、食物类型、饮食习惯等因素影响有所差异。通常,正常成年人的咀嚼速度大约在每分钟 60~120 次之间^[16,17];同时,结合佟鑫等^[18]在仿生咀

嚼研究中设定的测试速度，本文中设定试验测试速度分别为 30、60、90、120、150 mm/min。人类咀嚼速度在本文所设置的压缩速度数值之内（即：试验范围速度选择包括实际范围），每组平行试验进行 12 次。

表 1 TPA 质构参数及其定义

Table 1 TPA texture parameters and their definitions

质构参数	含义
硬度 (Hardness)	TPA 曲线上的最大峰值，如图 2 所示。即样品在第一次压缩时达到的最大力，反映的是样品抵抗变形的能力
粘附性 (Adhesiveness)	由第一次压缩和第二次压缩之间的面积差来确定，表示食品粘附在口腔内的能力
内聚性 (Cohesiveness)	第二次压缩面积 (S4) 与第一次压缩面积 (S1) 之比，表示样品在第一次压缩后保持其结构完整的能力
弹性 (Springiness)	由两次压缩周期下压时间之比来确定，反映样品在第一次压缩后恢复到原始形状的能力
胶粘性 (Gumminess)	硬度与内聚性的乘积，表示食品的粘稠度
咀嚼性 (Chewiness)	硬度、内聚性和弹性的乘积，表示食品在口中咀嚼时的感觉

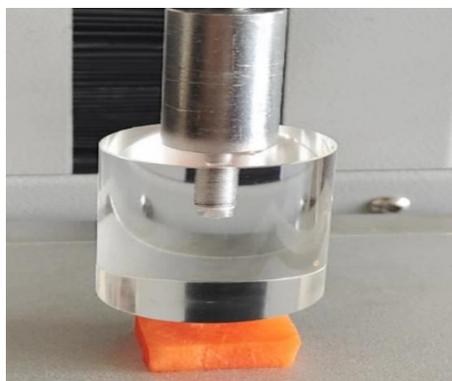


图 2 圆柱压头压缩胡萝卜块示意图

Fig.2 Squeezing carrots with a cylindrical head

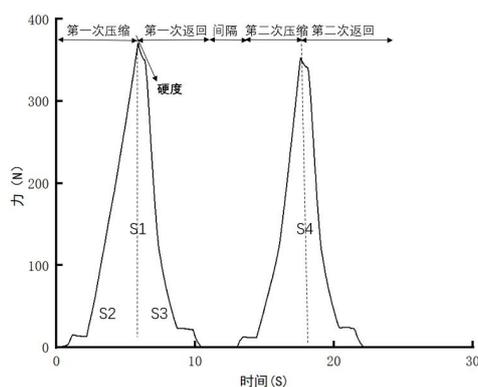


图 3 胡萝卜 TPA 试验质构特征曲线

Fig.3 Texture characteristic curve of carrot TPA test

1.4 数据处理与分析

采用 Origin 2021 版本进行数据处理和绘图，采用 IBM SPSS Statistics 26 软件对数据进行相关性分析。

1.5 结果与分析

按照 1.3 中的参数设定对胡萝卜块样品进行 TPA 测试，当测试速率分别为 30、60、90、120、150 mm/min 时，其硬度、粘附性、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性的试验结果如图 4 所示。

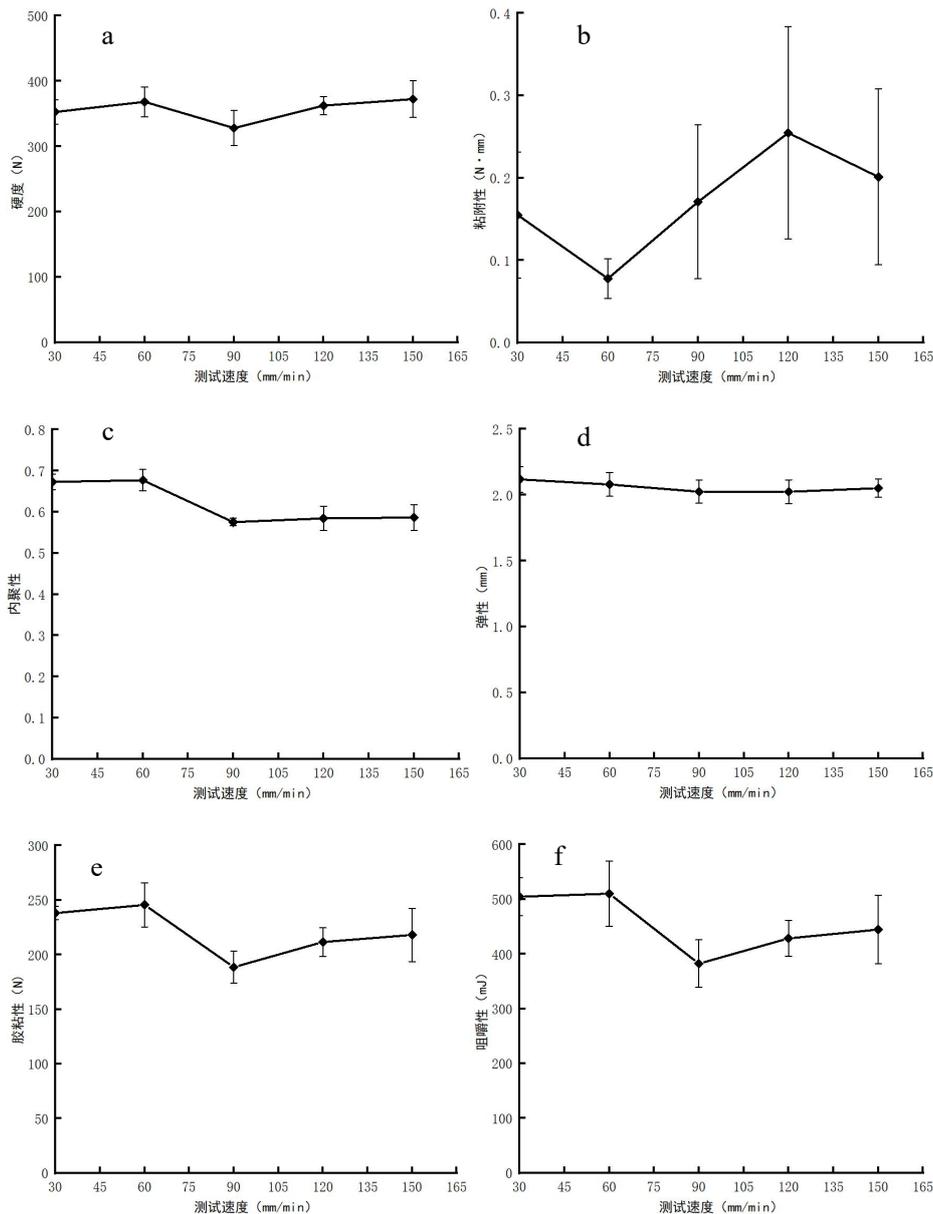


图4 测试速度对TPA 特性参数的影响

Fig.4 Influence of test speed on TPA characteristic parameters

注：a.测试速度对硬度的影响；b.测试速度对粘附性的影响；c.测试速度对内聚性的影响；d.测试速度对弹性的影响；e.测试速度对胶粘性的影响；f.测试速度对咀嚼度的影响。

由图4a和4d可知，硬度、弹性数值随着测试速度变化波动较小，其相对标准偏差分别为4.96%和1.93%，这表明测试速度对硬度、弹性的影响不显著。由图4c可知，内聚性数值随着测试速度的变化呈现较大波动状态，其相对标准偏差为8.25%；之所以数值波动较大，可能是因为较快的压缩速度不足以让样品有足够的时间恢复其结构，因此在第二次压缩时表现出更高的内聚性。此外，压缩速率的变化还会影响胡萝卜块样品内部结构的变形和恢复机制，从而也会影响内聚性的试验结果。

由图4e可知，胶粘性随着测试速度的变化呈现较大波动，其相对标准偏差为10.25%；胶粘性数值呈现先升后降再升的趋势。由于胶粘性在数值上等于硬度与内聚性的乘积，因此，在硬度、内聚性相对标准偏差分别为4.96%和8.25%的前提下，胶粘性试验计算后得出来的相对标准偏差相对更大，标准偏差10.25%具有合理性。由图4f可知，咀嚼性随着测试速度的变化呈现较大波动状态，其相对标准偏差为11.87%；咀嚼性数值呈现先升后降再升的趋势。由于咀嚼性在数值上为弹性和胶粘性的乘积，因此，在弹性相对标准偏差只有1.93%的前提下，咀嚼性的变化规律基本和胶粘性保持一致，均呈现先升后降再升的走势，因此，图4e和4f

的趋势变化具有相似性。孙钟雷等^[19]以胭脂萝卜为研究对象,探究了不同测试速度对胭脂萝卜质地特性的影响,结果同样表明,测试速度对硬度、弹性影响不大,误差棒折线图较为平缓,相对标准偏差范围分别为9%~27%和5%~14%;而随着测速速度的增大,内聚性、咀嚼性、回复性数值波动较大。王璐等^[20]比较了不同测试速度对甘薯豆粕营养膨化食品品质构特性指标值的影响,结果同样表明,随着测试速度的增大,硬度变化幅度很小;上述研究验证了本文结论的正确性,同时为后续深入探究胡萝卜质构特性和深加工提供借鉴与参考。

质构试验中的粘附性是指样品对探头的粘附能力。由图4b可知,随着测试速度的变化,粘附性波动最大,相对标准偏差达到37.79%。测试速度的变化会影响样品的变形和恢复时间:一方面,随着测试速率的增大,样品与探头接触的时间减少,从而减少了样品粘附在探头上的时间,这可能导致无法充分模拟口腔咀嚼过程中的实际情况,导致粘附性的测量结果与实际情况相比相对标准偏差较大;同时较高的测试速度无法给予样品足够的时间来展现粘附性,较低的测试速度可能允许更充分的粘附力的发挥。另一方面,较快的测试速率可能会增加样品的变形速率,这会导致样品粘性增加,因为样品没有足够的时间来重新排列内部组织结构,从而引起了粘附性数值大范围的波动;此外,还受到样品自身组织成分差异(不同位置胡萝卜切块的糖分、果胶等成分存在差异^[21])、系统响应时间以及样品差异等影响。

2 基于咀嚼仿真的胡萝卜质构分析

咀嚼是指生物体通过上下牙齿相互运动,将食材切割、研磨成较小颗粒的过程^[22]。基于ABAQUS有限元软件,研究不同速率压缩过程中胡萝卜块样品应力参数及其变化情况,进而分析其破碎效果。在分析时引入三大食物破坏强度理论^[23],即米塞斯准则(Mises):在三维应力状态下,当畸变能密度达到胡萝卜的屈服极限时,胡萝卜就会发生塑性变形,在食品研究中,这个理论常用来评估食品材料在咀嚼过程中的屈服和破碎行为;最大主应力准则(Abs):当物料内部的某个主应力达到物料的强度极限时,物料就会发生破坏;最大剪切应力(Tresca):最大力至物料最大承受度时会出现非线性屈服破坏。

将仿真得到的上述三种应力参数与TPA质构参数进行皮尔逊相关性分析,用于评价其咀嚼力学模型,探索为其质地评价提供一种新的方法。

2.1 咀嚼行为分析与模式选择

咀嚼运动是口腔内食材被牙齿研磨、切割和混合的过程^[24]。目前,咀嚼运动主要分为切牙切割、磨牙杵压、磨牙研磨三种模式^[25]。由于磨牙杵压在咀嚼各种质地食材时起到最重要的作用,同时结合相关参考文献^[26],因此选择磨牙杵压模式进行仿真。在磨牙杵压模式中,上颌固定不动,下颌向上直线运动,使得磨牙与食材接触并通过牙齿的咀嚼面进行研磨,其运动示意图如图5所示。

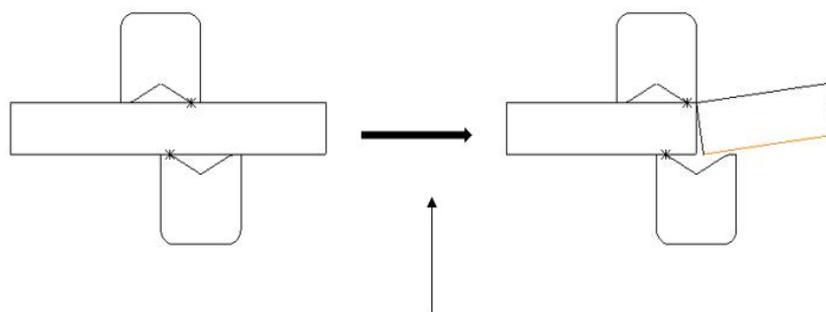


图5 杵压运动的简图

Fig.5 Schematic diagram of the pestle and pressure movement

2.2 仿真参数的确定

胡萝卜力学特性在被破坏前接近于线弹性^[25];基于弹塑性动力学理论,将胡萝卜设定为各向同性的线弹性材料^[27]。弹性模量、泊松比、密度是用于表征胡萝卜物性的主要参数^[28],查阅相关参考文献^[29-31],确定胡萝卜的主要仿真参数如表2所示。

表 2 胡萝卜块仿真参数

Table 2 Carrot block simulation parameters

弹性模量 (MPa)	泊松比	密度 (Kg/m ³)	动摩擦因数
2.8	0.3	1 023	0.2 ^[21]

2.3 咀嚼力学仿真分析

分别建立胡萝卜块和磨牙杵压模型并导入到 ABAQUS 中, 流程如图 6 所示。将上下磨牙模型以 IGS 格式导入 ABAQUS 软件中, 设置为离散刚体^[15]; 在上下磨牙底面中心位置, 各选取一点作为参考点。将在 SOLIDWORKS 中构建 20 mm×20 mm×5 mm 的胡萝卜块模型, 同样以 IGS 格式导入到 ABAQUS 中, 设置为可变性体^[18]; 并按表 2 参数赋予材料属性。将胡萝卜块网格全局尺寸设置为 0.5, 单元类型确定为八节点线性六面体减缩积分 (C3D8R); 磨牙全局尺寸设置为 1, 单元类型确定为四结点三维双线性刚性四边形 (R3D4)。以非独立网格类型进行装配, 调整磨牙与上下表面间的距离, 装配结果如图 7 所示。

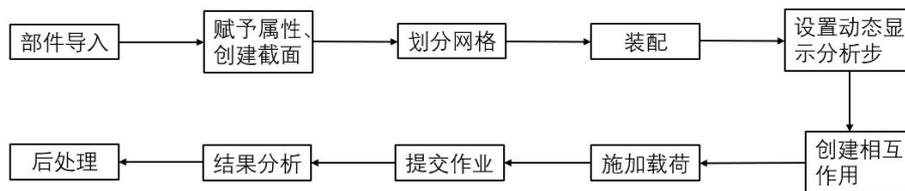


图 6 仿真流程图

Fig.6 Simulation flowchart

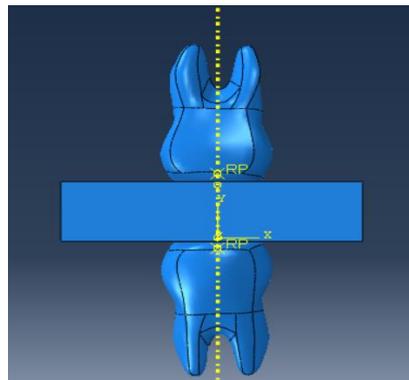


图 7 磨牙杵压模式示意图

Fig.7 Molar press mode

设置边界条件: 上磨牙参考点设置为固定不动, 下磨牙沿 U2 方向, 垂直向上运动 2.5 mm; 创建相互作用属性, 表面与表面接触, 切向行为为摩擦系数设置为 0.2; 设置动态显示分析步, 固定 U2 方向位移始终为 2.5 mm; 通过改变仿真时间 T, 来改变测试速率。研究单齿咀嚼磨牙杵压模式时, 不同速率压缩过程中胡萝卜块样品应力参数及其变化情况, 结果如图 8~12 所示; 对结果中 Mises、Tresca、Abs 等应力参数进行整理, 结果如表 3 所示。

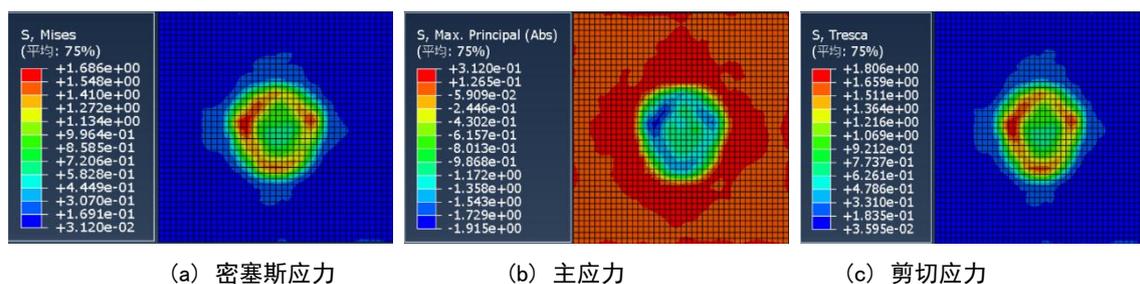


图 8 0.5 mm/s 时胡萝卜切块应力云图

Fig.8 Food stress cloud image at 0.5 mm/s

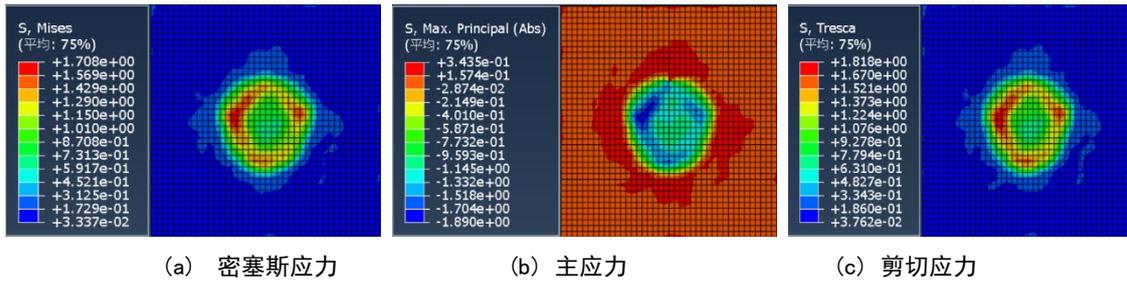


图 9 1 mm/s 时胡萝卜切块应力云图

Fig.9 Food stress cloud map at 1 mm/s

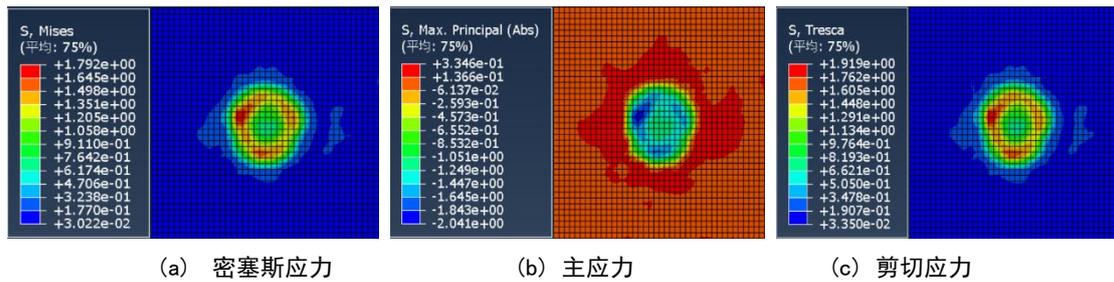


图 10 1.5 mm/s 时胡萝卜切块应力云图

Fig. 10 Food stress cloud map at 1.5 mm/s

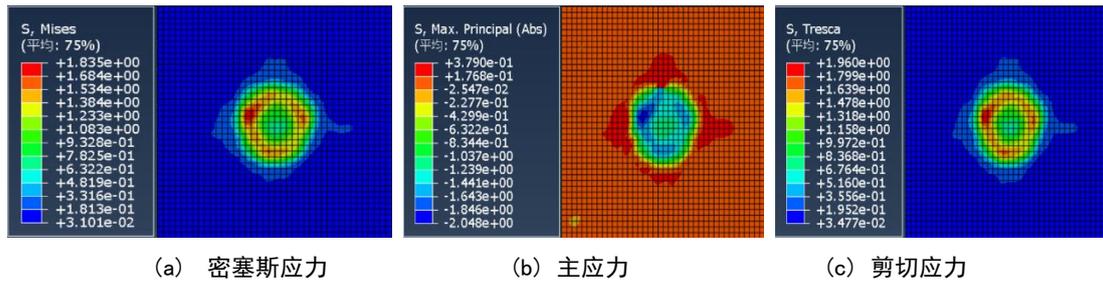


图 11 2 mm/s 时胡萝卜切块应力云图

Fig.11 Food stress cloud map at 2 mm/s

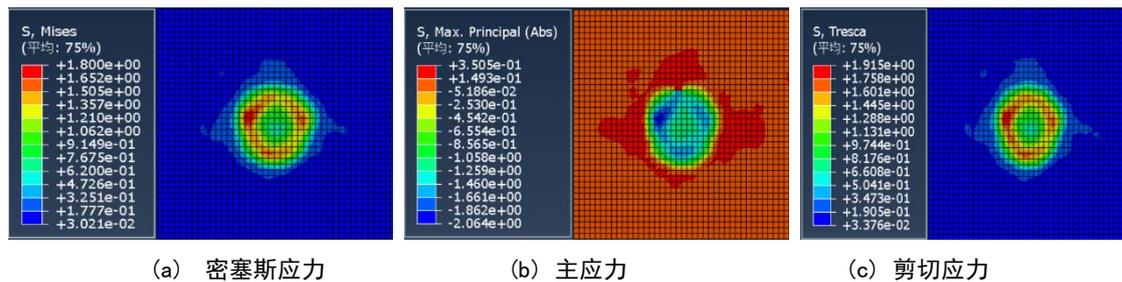


图 12 2.5 mm/s 时胡萝卜切块应力云图

Fig.12 Food stress cloud image at 2.5 mm/s

表 3 测试速率对杵压效果的影响

Table 3 Influence of test speed on the effect of clubbing pressure

S/mm	T/s	速率/(mm/s)	Mises/MPa	Abs/MPa	Tresca/MPa
2.5	5	0.5	1.686	0.312	1.806
2.5	2.5	1	1.708	0.344	1.818
2.5	1.67	1.5	1.792	0.334	1.919
2.5	1.25	2	1.835	0.379	1.960
2.5	1	2.5	1.800	0.351	1.915

由表 3 可知，在相同速率下，Tresca 最大、Mises 次之、Abs 应力最小。毛倩等^[32]对比了匀速运动下，双

齿、单齿、柱形、波形四种压头在杵压模式下的应力结果,结果同样表明,在相同速率下,Tresca 最大、Mises 次之、Abs 应力最小。

随着测试速率的增大,三种应力值在均值上下范围内波动,均呈现先升后降的趋势。当测试速率为 2 mm/s 时,Mises、Abs、Tresca 应力均达到最大值,表明 2 mm/s 时咀嚼行为较为充分。当加载速率为 0.5 mm/s 时,三种应力值最小,这可能是由于仿真时间较长,磨牙在压缩过程中速率较小导致的。

由于胡萝卜具有纤维结构^[33],Mises 对胡萝卜块影响最大,只有当 Mises 达到最大值时,胡萝卜块才会出现屈服现象^[18]。此外,胡萝卜块选取的位置、厚度,磨牙底面面积、食品物料参数也会对仿真的结果有一定的影响。综上,由表 3 数据可知,在一定范围内,牙齿运动速率越快,胡萝卜块咀嚼效果越好。

2.4 TPA 测试与咀嚼力学仿真的相关性分析

将仿真应力参数与 TPA 质构所获得的 6 种胡萝卜质构参数进行皮尔逊相关性分析。得出 TPA 测试所得的质构参数(硬度、粘附性、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性)与磨牙杵压模式仿真结果(Abs、Tresca、Mises 应力)之间的相关系数如表 4 所示。

表 4 食品质构仪与杵压仿真的相关系数

Table 4 Correlation coefficients between food texture analyzer and pestle pressure simulation

	硬度	粘附性	内聚性	弹性	胶粘性	咀嚼性	Mises	Tresca	Abs
速度	0.183	0.364**	-0.730**	-0.299*	-0.396**	-0.415**	0.878**	0.868**	-0.862**
硬度	1	0.03	0.127	0.607**	0.703**	0.745**	-0.011	-0.095	0.107
粘附性		1	-0.549**	-0.08	-0.363*	-0.313*	0.425**	0.397**	-0.390**
内聚性			1	0.159	0.772**	0.665**	-0.822**	-0.860**	0.861
弹性				1	0.529**	0.741**	-0.335*	-0.333*	0.330*
胶粘性					1	0.961**	-0.579**	-0.654**	0.662**
咀嚼性						1	-0.573**	-0.630**	0.635**
Mises							1	0.966**	-0.954**
Tresca								1	-0.999**
Abs									1

注: *表示相关性显著, $P < 0.05$; **表示相关性极显著, $P < 0.01$ 。

由上表可知,测试速度与粘附性、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性等 5 种质构参数均有显著的相关性,这表示测试速度对胡萝卜切块的质构特性存在明显影响;其中,测试速度与内聚性的相关性最为显著,相关系数为-0.730。这是因为,内聚性是食品质构分析中的一个重要参数,测试速度的增加意味着胡萝卜受到压缩和释放的时间减少,对于胡萝卜这类多纤维结构的食品,快速的压缩可能无法给予足够的时间让内部结构重新排列和恢复,导致其在第二次压缩时表现出较低的内聚性,从而得出胡萝卜的内聚性与测试速度相关性最为显著这一结论。

但是,测试速度与硬度的相关性并不显著,相关系数为 0.183,这主要与胡萝卜样品自身属性有关。首先,硬度侧重表征样品整体抗压能力,与测试速度的关系不如其他参数直接;其次,与胡萝卜固有属性有关,胡萝卜的物理和化学特性使得硬度在不同的测试速率下变化不大,例如胡萝卜中的水分含量在一定程度上缓冲了测试速度变化对硬度的影响,因为水分可以在压缩过程中重新分布,从而减少硬度变化;最后,为保证咀嚼仿真的合理性,本文 TPA 测试所选择的五种测试速度属于人类正常咀嚼速度范围内,在这个测试速度范围内,胡萝卜的细胞结构和纤维含量对硬度影响有限,尚未引起硬度的显著变化。上述原因共同导致了测试速度与硬度相关性不显著这一结果。这与陈丽等^[6]以甘薯块根为研究对象,发现测试速度对样品硬度参数影响不显著的结论相一致。

同时,测试速度与仿真模拟得出的 Mises、Tresca 应力呈极显著正相关,相关系数分别为 0.878 和 0.868;测试速度与 Abs 应力呈极显著负相关,相关系数为-0.862。Mises 应力常用于预测材料的屈服行为,测试速度的增加,可能导致胡萝卜内部结构的快速变形,增加了局部应力集中,从而提高了 Mises 应力;Tresca 应力用于预测胡萝卜的塑性变形和破坏,测试速度的增加会导致胡萝卜的剪切变形速率变化,从而导致剪切应力

的变化; Abs 应力反映了胡萝卜在受到压缩时的最大应力状态, 测试速度的增加, 减少了胡萝卜在压缩过程中的应力松弛时间, 导致 Abs 应力的降低, 快速压缩可能使胡萝卜在未达到最大应力承载能力前就发生破坏, 从而降低了 Abs 应力。因此, 测试速度与仿真得出的三种应力均具有极显著相关性。

在质构参数之间的相关性方面, 该 6 种质构参数之间均具有显著相关性; 其中, 咀嚼性与胶粘性之间的相关性最为显著, 其相关系数为 0.961。从相关系数的数值上来看, 由于胶粘性等于硬度与内聚性的乘积, 因此在皮尔逊的相关性分析中, 胶粘性、内聚性均呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.703 和 0.772; 由于咀嚼性等于胶粘性与弹性的乘积, 因此咀嚼性与硬度、内聚性、弹性均呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.745、0.665 和 0.741。陈月清等^[34]以猕猴桃果干为研究对象, 探究了 TPA 质构指标间的相关性, 结果表明, 所有样品的硬度与胶粘性、咀嚼性都呈极显著正相关, 胶粘性与咀嚼性的相关系数最为显著, 为 0.968。

在应力参数之间的相关性方面, 仿真得到的 Mises、Tresca、Abs 三种应力两两之间也具有极显著相关性, 相关系数分别为 0.966、-0.954、-0.999。胡萝卜的塑性变形通常涉及到胡萝卜内部结构的重新排列和破坏, Mises 应力和 Tresca 应力都与胡萝卜的塑性变形有关, 但 Mises 应力更侧重于样品的畸变能, 而 Tresca 应力侧重于剪切面上的最大剪切应力, 在仿真过程中, 当胡萝卜发生塑性变形时, Mises 应力和 Tresca 应力往往会同时增加, 这也导致它们之间具有高度正相关性, 相关系数为 0.966; Abs 应力表示样品内部主应力的绝对值, 反映胡萝卜在受到压缩或拉伸时的最大应力状态, 在复杂的应力状态下, Mises 应力、Tresca 应力和 Abs 应力之间存在相互转换的关系, 从而导致其都具有显著相关性。

在应力与质构参数相关性方面, Mises、Tresca 应力与试验测得的 5 种质构参数, 粘附性、内聚性、弹性、胶粘性、咀嚼性均具有显著相关性, 与硬度相关性不显著; 硬度作为反映样品抵抗变形能力的指标, 其与仿真应力参数的相关性不显著可能与胡萝卜的物理结构有关, 胡萝卜的细胞结构和纤维含量在一定程度上缓冲了测试速度变化对硬度的影响; 水分含量在胡萝卜组织中起到润滑作用, 减少了细胞间摩擦, 从而减少了不同测试速度下硬度的波动。Abs 应力与粘附性、弹性、胶粘性、咀嚼性质构参数均有明显的相关性, 与硬度、内聚性相关性不显著。通过 TPA 测试与咀嚼力学仿真相关性分析, 结果表明两者之间存在显著相关性, 验证了咀嚼力学模型的有效性, 其仿真应力参数能够用于表征胡萝卜的质构特性。

3 结论

本文基于有限元数值仿真方法构建了胡萝卜的咀嚼力学模型, 模拟了不同咀嚼速率下胡萝卜的力学变化过程, 并对比质地多面分析法 (TPA 模式) 进行了试验验证及相关性分析, 结果表明, 随着测试速度的增大, 硬度、弹性整体波动较小, 相对标准偏差分别为 4.96% 和 1.93%; 内聚性、咀嚼性、胶粘性数值波动较大, 相对标准偏差分别为 8.25%、11.87%、10.25%; 粘附性的相对标准偏差最大, 为 37.79%, 当测试速率相同时, Tresca 最大、Mises 次之、Abs 最小。TPA 测试所得的 6 种质构参数与仿真得到的 3 种应力之间大多数都具有极显著相关性, 表明仿真得到的三种应力可以反映胡萝卜的质构, 验证了咀嚼力学模型的科学性与有效性。

基于有限元数值仿真方法构建的胡萝卜咀嚼力学模型, 能够准确模拟咀嚼过程中胡萝卜的力学变化规律, 对于研发新型胡萝卜制品、优化加工工艺, 进而满足消费者需求具有重要意义。此外, 构建的胡萝卜咀嚼力学模型, 还为深入研究咀嚼运动与食品质构关系提供了一种新的科学有效的方法。

参考文献

- [1] IKRAM A, RASHEED A, KHAN AA, et al. Exploring the health benefits and utility of carrots and carrot pomace: a systematic review [J]. *International Journal of Food Properties*, 2024, 27(1): 180-193.
- [2] BOEV M, STANESCU C, TURTURICA M, et al. Bioactive potential of carrot-based products enriched with *Lactobacillus plantarum* [J]. *Molecules*, 2024, 29(4): 917.
- [3] 罗斌, 赵有斌, 尹学清, 等. 质构仪在果蔬品质评定中应用的研究进展 [J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(5): 209-213.
- [4] 匡凤军, 刘群, 曹倩蕾, 等. 质构仪在食品行业中的应用综述 [J]. *现代食品*, 2020, 3: 112-115.
- [5] 王志鹏. 玉米发糕生产工艺及储藏品质研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2016.
- [6] 陈丽. 甘薯块根质构特性的评价研究 [D]. 浙江: 浙江农林大学, 2013.
- [7] 林芳栋, 蒋珍菊, 廖珊, 等. 质构仪及其在食品品质评价中的应用综述 [J]. *生命科学仪器*, 2009, 7(5): 61-63.

- [8] 孙钟雷.基于咀嚼模拟的食品质地评价研究[D].长春:吉林大学,2012.
- [9] FULKS BA, CALLAGHAN KX, TEWKSBURY CD, et al. Relationships between chewing rate, occlusion, cephalometric anatomy, muscle activity, and masticatory performance [J]. Archives of Oral Biology, 2017, 83: 161-168.
- [10] 胡成强.咀嚼过程中物料破碎的离散元仿真分析[D].南京:南京林业大学,2022.
- [11] 张奋楠,周星宇,俞经虎,等.基于仿口腔平台的食品咀嚼效果评定方法研究[J].食品科学技术学报,2022,40(6):163-171.
- [12] LI J, HUANG BH, WU CP, et al. Nondestructive detection of kiwifruit textural characteristic based on near infrared hyperspectral imaging technology [J]. International Journal of Food Properties, 2022, 25(1) :1697-1713.
- [13] 孙海涛.即食玉米物性学评价体系的研究[D].长春:吉林农业大学,2011.
- [14] 刘翔,张平,徐伟欣,等.TPA 测试条件对甜瓜质构参数的影响[J].中国蔬菜,2015,3:38-44.
- [15] 谢桂林.仿生咀嚼食品质地分析模型的设计及分析[D].沈阳:辽宁大学,2021.
- [16] BATES JF, STAFFORD GD, HARRISON A. Masticatory function-a review of the literature: (II) Speed of movement of the mandible, rate of chewing and forces developed in chewing [J]. Journal of oral rehabilitation, 1975, 2(4): 349-61.
- [17] PAPHANGKORAKIT J, LEELAYUWAT N, BOONYAWAT N, et al. Effect of chewing speed on energy expenditure in healthy subjects [J]. Acta Odontologica Scandinavica, 2014, 72(6): 424-427.
- [18] 佟鑫.基于有限元分析的咀嚼运动和口腔环境的仿生咀嚼研究[D].沈阳:辽宁大学,2021.
- [19] 孙钟雷,熊玥,李宇.胭脂萝卜质地特性分析研究[J].中国调味品,2020,45(7):53-58.
- [20] 王璐,夏菠,易有金,等.甘薯豆粕营养膨化食品感官指标与质构特性相关性研究[J].食品工业,2018,39(1):184-188.
- [21] 郝海,关尚玮,尼米策仁·娜琴,等.枣泥馅料质构参数与感官品质的相关性[J].现代食品科技,2021,37(6):244-250+275.
- [22] 张奋楠.基于仿口腔平台的食品咀嚼效果评估方法研究[D].无锡:江南大学,2022.
- [23] 杨杰.仿咀嚼机实验平台的研究设计及食品质地分析[D].长春:吉林大学,2018.
- [24] TUNICK MH. Food texture analysis in the 21st Century [J]. Journal of Agricultural And Food Chemistry, 2011, 59(5):1477-1480.
- [25] 董佳旭.鲍鱼咀嚼性能分析及其评价系统构建[D].大连:大连工业大学,2018.
- [26] TOGASHI M, MORITA A, NAKAZAWA F, et al. Rhythmic and irregular movement of the first molar while eating foods with different textures [J]. Journal of Texture Studies, 2000, 31(3): 257-271.
- [27] 许丛丛.胡萝卜冷、热加工后力学性能变化及与水状态关系的研究[D].上海:上海交通大学,2015.
- [28] 王霞.胡萝卜断裂力声行为特征和微观形态分析[D].长春:吉林大学,2017.
- [29] 杨佳.温度对胡萝卜拉伸弹性模量的影响[J].食品安全导刊,2022,20:89-91.
- [30] 顾思忠,刘斌,杨兆丹.胡萝卜在微波干燥条件下的热物理性质和孔隙特性[J].江苏农业学报,2018,34(4):897-903.
- [31] BAJEMA R, HYDE G, BARITELLE A. Temperature and strain rate effects on the dynamic failure properties of potato tuber tissue [J]. Transactions of The Asae, 1998, 41(3): 733-740.
- [32] 毛倩.仿咀嚼食品质地评价及咀嚼效能研究[D].长春:吉林大学,2016.
- [33] SIQUEIRA G, OKSMAN K, TADOKORO SK, et al. Re-dispersible carrot nanofibers with high mechanical properties and reinforcing capacity for use in composite materials [J]. Composites Science And Technology, 2016, 123: 49-56.
- [34] 陈月清,牛坡.热风干燥下不同品种猕猴桃果干感官评价与质构特性的相关性分析[J].食品工业科技,2024,45(17):273-281.