

# 咀嚼运动对食品物料破坏效果的仿真分析

陈莉<sup>1</sup>, 孙永海<sup>1</sup>, 刘晶晶<sup>2</sup>, 谢高鹏<sup>1</sup>

(1.吉林大学生物与农业工程学院, 吉林长春 130022) (2.东北电力大学自动化工程学院, 吉林吉林 132012)

**摘要:** 采用逆向工程技术重构了切牙和在咀嚼运动中起主要作用的上、下第一磨牙的三维模型, 结合现代牙合理论与颞下颌关节运动理论构建了咀嚼运动的简化模型, 将咀嚼运动分为三种模式: 切割模式、杵压模式、研磨模式, 仿真了咀嚼破碎食品的过程; 基于食品物料的弹塑性本构模型, 引入联合强度理论, 分析了咀嚼运动规律对食品物料破坏程度的影响。匀速运动模式取5个不同的速率, 结果表明在研磨模式下, 较高的咀嚼速率对食物的破坏效果较好, 其中咀嚼0.3 s时产生的剪切应力和密赛斯应力最大, 分别为16.07 MPa和14.20 MPa; 变速运动模式的仿真时间均取0.2 s, 结果表明加速度变化对咀嚼效果的影响相对较弱, 其中, 匀加速运动能产生较大的剪切应力和密赛斯应力, 分别为15.64 MPa和13.86 MPa, 其更适合于研磨弹性和韧性食品。

**关键词:** 咀嚼运动; 仿真分析; 应力集中

**文章编号:** 1673-9078(2014)1-147-152

## Simulation Analysis of Food Materials Damage Effect Based on Chewing Movement

CHEN Li<sup>1</sup>, SUN Yong-hai<sup>1</sup>, LIU Jing-jing<sup>2</sup>, XIE Gao-peng<sup>1</sup>

(1.College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

(2.School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China)

**Abstract:** Reverse engineering technology was used to reconstruct three-dimensional models of the incisors as well as top and bottom first molars which played a major role in the chewing movement. The simplified chewing movement models were constructed by modern occlusion theory and temporomandibular articulation movement theory, and it was divided into three modes: cutting mode, compressing mode and grinding mode, which simulated the whole process of chewing and crushing food. Based on the elastic-plastic constitutive model of food materials, the joint strength theory was introduced to analyze the effect of chewing movement rule on the degree of material damage. Five different rates were taken by uniform motion mode, and the results showed that under the grinding mode, the higher rate of chewing had good effect on the destruction of the food. And the greatest shear stress and mises stress were achieved after chewing for 0.3 s, being of 16.07 MPa and 14.20 MPa respectively. When the simulation time of variable motion model was 0.2 s, the effect of chewing acceleration was relatively weak. Therefore, the larger shear stress and mises stress were produced by uniform variable motion, which were 15.64 MPa and 13.86 MPa, respectively. So it was more suitable for grinding flexible and durable food.

**Key words:** chewing movement; simulation analysis; stress concentration

人体感官系统对食品流变学特性的评价基本上都是通过对食物的咀嚼产生的。在咀嚼过程中, 牙齿咬合食物的运动变化规律会直接影响牙齿对食物的破坏效果, 从而影响到人们对食品脆性、弹性、硬度等力学性能指标的判断。研究咀嚼运动与咀嚼效果的关系对人们深入了解食品质构特性的感官评价机理具有重

收稿日期: 2013-09-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31271861)

作者简介: 陈莉(1983-), 女, 博士生, 主要从事农产品智能检测与评价方面的研究

通讯作者: 孙永海(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农产品智能检测与评价方面的研究

要意义。

目前, 利用咀嚼运动分析食品质构特性的研究主要是使用下颌运动描记仪和咀嚼肌电图等仪器进行测量<sup>[1-4]</sup>, 然而人类的咀嚼行为是一个十分复杂的生物运动过程, 下颌运动描记仪只能记录咀嚼过程中下颌骨的运动轨迹, 无法判断物料在口腔中的受力情况, 咀嚼肌电图能够通过电信号的变化测量咀嚼肌的活动强弱, 但咀嚼肌的活动受多种生理因素的制约, 不能仅仅将其归结于食品的质构特性, 将咀嚼肌电图的结果与食品的质构建立联系并不准确。本研究利用逆向工程技术重建了仿生牙齿模型, 采用数值仿真的方法构建了咀嚼食物的运动模型, 模拟了不同咀嚼模式下的

咀嚼运动,并在此基础上分析了咀嚼运动对咀嚼效果的影响,为深入研究咀嚼运动与食品质构的关系提供了一种便捷的方法,并对研究咀嚼设备的运动规律具有指导意义。

由于咀嚼运动的复杂性,在仿真分析时,提出三条假设:(1)咀嚼是从下颌牙面与物料接触后开始至上下颌牙齿闭合在一起的过程。咀嚼对食物的破坏主要是在这一阶段发生的,其它时间段的影响不予考虑。

(2)在咀嚼过程中,食品物料仅仅发生由于齿面作用力而产生的物理变化,其中摩擦对物料的升温效果及热传导效应不予考虑,所有的化学反应忽略不计。(3)口腔的温度、湿度及其对物料力学特性产生的影响忽略不计。本文的研究结论都是在这些假设的基础上建立的。

### 1 食品物料的本构模型原理

食品物料的本构特性一般都十分复杂,然而大多数食品发生破碎之前的力学特性都比较接近线弹性,研究引用弹塑性力学理论,将食品物料假定为各向同性且具有线弹性的材料。研究设定仿真物料的参数如表1,大多数粮谷类食材的参数与此接近<sup>[5-6]</sup>。

表1 食品物料的仿真参数

Table 1 The simulation parameters of food materials

弹性模量 E/MPa	泊松比 $\lambda$	密度 $\rho/(g/cm^3)$	动摩擦系数 $e$
20	0.35	1.0	0.2

食品物料通常会发生两种形式的破坏,对于脆性食品,断裂是破坏的主要形式;对于非脆性食品,物料发生屈服时已经开始破坏,这里引用联合强度理论<sup>[7]</sup>作为食品物料发生破坏的依据,对于所有食品材料采用以下三种失效准则进行物料破坏的判断。

最大拉应力准则:无论是什么应力状态,只要最大拉应力 $\sigma_{max}$ 达到物料的极限值,物料就发生断裂破坏。坚果、巧克力、膨化食品等脆性物料的断裂失效行为符合最大拉应力理论,这一理论的断裂准则为:

$$[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3]_{max} \leq \sigma_b \quad (1)$$

注:  $\sigma_1$ -食材的第一主应力;  $\sigma_2$ -食材的第二主应力;  $\sigma_3$ -食材的第三主应力;  $\sigma_b$ -食材能够承受的最大拉应力

屈雷斯卡准则:无论何种应力状态,只要最大剪切应力 $\tau_{max}$ 达到物料的极限值,物料就发生屈服。香肠、馒头等食品在咀嚼时会发生非线性变形,其失效行为比较符合该理论,这一理论的屈服准则为:

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \leq \frac{\sigma_s}{2} \quad (2)$$

注:  $\sigma$ -食材的最大主应力;  $\sigma_3$ -食材的最小主应力;  $\sigma_s$ -食材的极限切应力。

密赛斯准则:无论何种应力状态,只要形状改变比能达到与材料性质有关的一极限值,材料就发生屈服。牛肉、芹菜等纤维类食品,具有良好的韧性和咀嚼性,可以使用形状改变比能作为其失效的准则,这一理论可表示为:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_s \quad (3)$$

注:  $\sigma_1$ -食材的第一主应力;  $\sigma_2$ -食材的第二主应力;  $\sigma_3$ -食材的第三主应力;  $\sigma_s$ -应力极限值

### 2 生物齿面模型的重构

#### 2.1 获取牙齿点云数据

以健康成年男子的口颌系统为采样标本,采用美国GE公司light speed螺旋CT扫描仪,自下颌底部开始至鼻骨底部对受试者进行断层扫描,扫描螺距1.375mm,层厚0.625mm,间隔2.5mm,共获得口腔结构的239张二维CT图像资料,将所有的CT断层扫描图片导入mimics10.0中,进行三维重组,将重组之后的图像进行阈值分割和区域特征提取,获得上颌牙列和下颌牙列的点云数据,如图1所示。

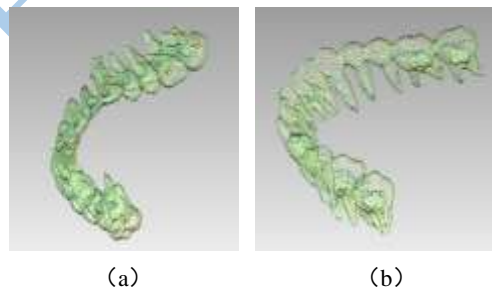


图1 牙齿点云数据

Fig.1 The point cloud data of teeth

注: a: 上颌牙列点云; b: 下颌牙列点云。

#### 2.2 重构牙齿三维模型

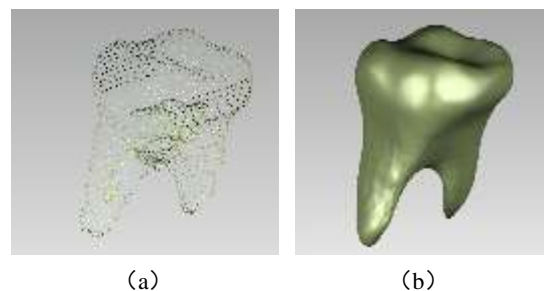


图2 上磨牙三维模型重构图

Fig.2 The reconstruction diagrams of top molar three-dimensional model

注：a：点云数据；b：三维模型。

将阈值分割得到的点云数据进行滤波、删减、修补等处理，分离出单颗牙齿的点云模型，图 2a 为上颌第一磨牙的点云模型。将修复完整的点云封装成多边形，再对多边形进行修补、平滑处理，提取出多边形曲面的曲率特征曲线，划分曲面栅格，最后采用 NURBS 曲面拟合方法重构出牙齿的三维模型，图 2b 为逆向工程重构得到的上颌第一磨牙模型。

### 3 咀嚼运动的仿真

咀嚼破碎食物是一个十分复杂的过程，实验者的身体状况，食品的质构特性都会影响咀嚼运动的具体形式<sup>[8-9]</sup>。根据人下颌运动的生理规律和咀嚼破碎食物的特点<sup>[10]</sup>，将咀嚼破碎过程大致分为三个阶段：首先，上下切牙将大块的食物切咬一块，经舌头送至磨牙处；其次，上下磨牙通过垂直挤压将块状物块压碎或压扁；最后，磨牙通过研磨将食物破碎成可以吞咽的小块。这里将咀嚼运动简化为三种模式：切割模式、杵压模式和研磨模式。

#### 3.1 切割模式

切咬食物是咀嚼的开始阶段，它可以简化为图 3 所示的模型，物料的一端固定（在切咬食物时，通常用手拿住食物防止其移动），在食物块中间某处加一限位挡板（上切牙限制食物块的滑动），食物块的另一端受到下切牙的剪切力的作用开始发生变形，至物块被切割下来。

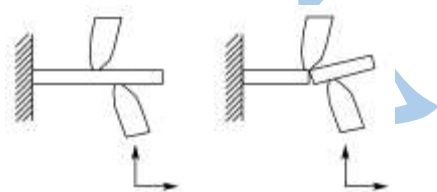


图 3 切割运动简化示意图

Fig.3 The simplified diagrams of cutting movement

按照表 1 给出的参数，模拟了切牙切割食物的运动过程，如图 4 所示。食物块大小为 8×8×1 mm，上下切牙在水平和竖直方向各发生 1 mm 的相对运动，仿真时间为 0.2 s。

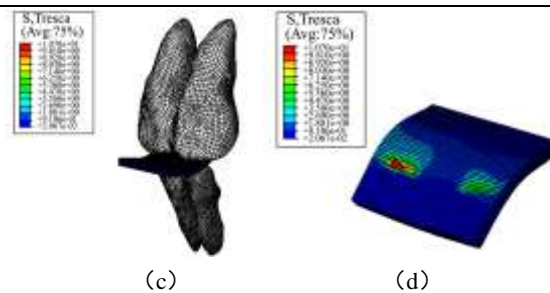
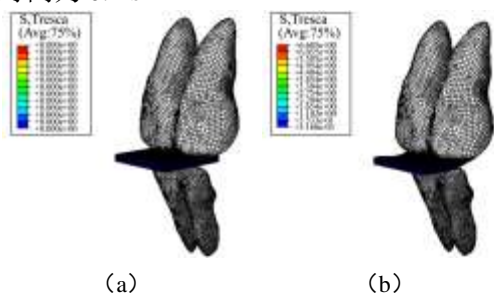


图 4 切割模式下的运动过程仿真

Fig.4 The simulation of movement process in the cutting mode

注：a：T=0.0s；b：T=0.1s；c：T=0.2s；d：食物块的 *tresca* 应力分布。

#### 3.2 杵压模式

被切牙切割下来的食物块，需要使用磨牙将其破碎为较小的食物颗粒，磨牙压碎食物的运动方式如图 5。食物块顶部受磨牙突出部位的支撑而处于静止状态，食物块底部受到下牙尖的杵压（下牙尖朝着上牙窝挤压食物），开始发生变形至物块断裂。

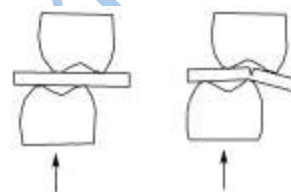


图 5 杵压运动简化示意图

Fig.5 The simplified diagrams of compressing movement

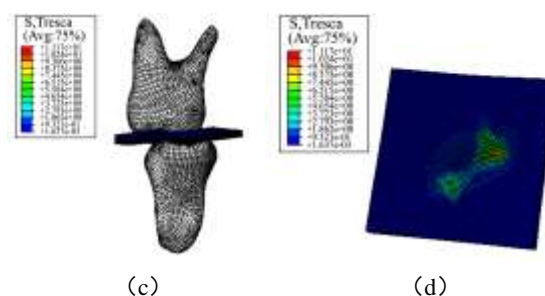
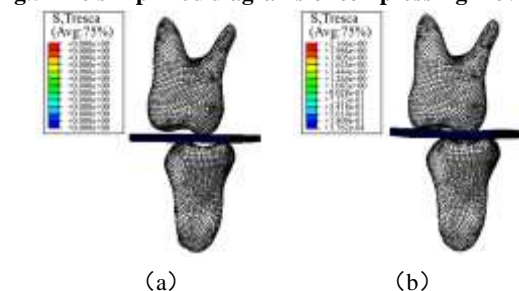


图 6 杵压模式下的运动过程仿真

Fig.6 The simulation of movement process in the compressing mode

注：a：T=0.0s；b：T=0.1s；c：T=0.2s；d：食物块的 *tresca* 应力分布。



按照表 1 给出的参数, 模拟了磨牙杵压食物的运动过程, 如图 6 所示。食物块大小为 8×8×1 mm, 上下磨牙仅在竖直方向发生 1 mm 的相对运动, 仿真时间为 0.2 s。

### 3.3 研磨模式

当食物块被挤压成小颗粒之后, 磨牙开始研磨、粉碎食物, 其运动模型如图 7 所示。开始阶段, 物料被上下牙齿夹紧而处于静止状态, 而后上下牙面开始发生错动。

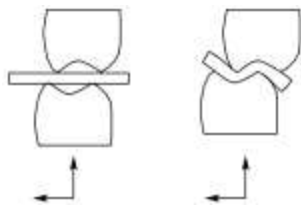


图 7 研磨运动简化示意图

Fig.7 The simplified diagrams of grinding movement

研磨模式下, 咀嚼对食物的破坏是由上下牙面对物块的挤压、剪切、撕裂、摩擦等综合作用导致的。按照表 1 给出的参数, 模拟了磨牙研磨食物的运动过程, 如图 8 所示。食物块大小为 8×8×1 mm, 上下磨牙在水平和竖直方向各发生 1 mm 的相对运动, 仿真时间为 0.2 s。

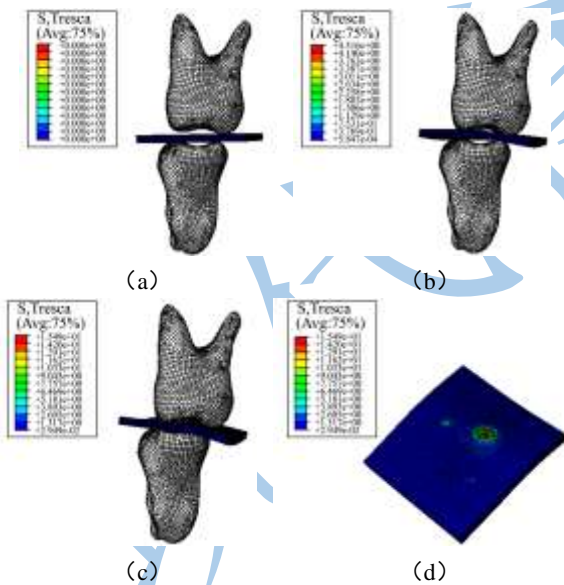


图 8 研磨模式下的运动过程仿真

Fig.8 The simulation of movement process in the grinding mode

注: a: T=0.0s; b: T=0.1s; c: T=0.2s; d: 食物块的 tresca 应力分布。

## 4 咀嚼运动规律对咀嚼效果影响分析

这里将咀嚼运动规律简化为四种模型: 匀速运动、匀加减运动、等跃度运动和简谐运动。

### 4.1 咀嚼速率的影响

将牙齿咬合运动简化为匀速运动模式, 即下牙齿在极短的时间内加速至  $V_0$  (将这段时间忽略不计), 然后以速度  $V_0$  逐渐与食物接触, 并开始挤压食物。对于任一时刻  $t$ , 匀速咀嚼过程中下颌牙面的相对位移  $s$  可由方程 4 表示

$$s = V_0 t = \frac{S_0}{T_0} t \quad t \in [0, T_0] \quad (4)$$

注:  $S_0$ -一次咬合运动时上下牙面之间的相对位移量, mm;  $T_0$ -咬合运动的总时间, s。

在三种咀嚼模式下, 分别采用不同的咀嚼速度对咀嚼运动进行仿真, 计算出上下牙面咬合后, 食品材料的应力值, 仿真结果如表 2-4,  $S'$  为水平和竖直方向的位移矢量和,  $\sigma_{max}$  为最大主应力,  $Tresca$  为剪切应力,  $Mises$  为密赛斯应力。

表 2 速率对切割效果的影响

Table 2 The influence of rate on cutting effect

$S'$ /mm	$T_0$ /s	$V_0$ /(mm/s)	$\sigma_{max}$ /MPa	$Tresca$ /MPa	$Mises$ /MPa
1.41	0.5	2.83	6.45	10.78	9.44
1.41	0.4	3.54	6.39	10.79	9.45
1.41	0.3	4.71	6.48	10.83	9.49
1.41	0.2	7.07	6.27	10.70	9.39
1.41	0.1	14.14	6.16	10.85	9.53

表 3 速率对杵压效果的影响

Table 3 The influence of rate on compressing effect

$S'$ /mm	$T_0$ /s	$V_0$ /(mm/s)	$\sigma_{max}$ /MPa	$Tresca$ /MPa	$Mises$ /MPa
1.0	0.5	2.0	3.45	11.13	10.49
1.0	0.4	2.5	3.52	11.11	10.48
1.0	0.3	3.3	3.64	11.15	10.51
1.0	0.2	5.0	3.72	11.17	10.54
1.0	0.1	10.0	3.72	11.16	10.53

表 4 速率对研磨效果的影响

Table 4 The influence of rate on grinding effect

$S'$ /mm	$T_0$ /s	$V_0$ /(mm/s)	$\sigma_{max}$ /MPa	$Tresca$ /MPa	$Mises$ /MPa
1.41	0.5	2.83	5.41	15.70	13.90
1.41	0.4	3.54	5.56	15.78	13.97
1.41	0.3	4.71	5.46	16.07	14.20
1.41	0.2	7.07	5.44	15.49	13.79
1.41	0.1	14.14	8.64	15.13	13.58

由表 2 和 3 可知, 杵压运动在位移矢量和小于切割运动的情况下, 却产生了更大的剪切应力和密赛斯

应力,这也解释了人们为什么偏向于使用磨牙去破碎坚硬的食物。

由表 2 和 4 可知,在相同的运动速率和相对位移下,研磨运动要比切割运动产生更大的剪切应力和密赛斯应力,这表明研磨运动能起到良好的破碎弹性和韧性食品的效果;另外,发现切割运动能够产生更大的主应力,说明切牙适合于切咬脆性食物。

从表 4 看出,随着咀嚼速率的增加,咀嚼效果基本呈上升趋势,但速率并不会一直影响咀嚼效果,当  $T_0=0.3$  s, 剪切应力和密赛斯应力最大,  $T_0=0.2$  s 时,剪切应力和密赛斯应力反而下降。说明在研磨弹性和韧性食品时,匀速运动的速率在一定的范围之内,越大越好。关于物料的压缩速率与断裂效果的关系已经有一些研究,程绪铎等利用 CT3 质构仪对大豆进行压缩试验,选择 3 个方位,发现在同一压缩方位时,随着压缩速率的增加,最大破坏力逐渐增加<sup>[11]</sup>; Dan Haruka 等利用万能试验机测试了 4 种奶酪在不同测试速率下的受力变化,发现随着速率的增加,同一样品的断裂载荷增加<sup>[12]</sup>。这些研究都说明速率与破坏效果之间的关系基本呈正相关。

#### 4.2 咀嚼加速度的影响

匀速运动是一种理想化的运动方式,在实际的咀嚼过程中,下牙面朝上牙面运动时,总会先有一个加速阶段,当上下牙面将要接触时,速率降低,上下牙面最终以减速运动方式缓慢接触。这种特殊的相对运动方式可由以下三种变速运动模型近似表示。

匀加减运动模型:下牙先以匀加速的方式朝上牙面运动,而后又以匀减速的方式继续朝上运动,直至速率为零时上下牙面咬合在一起。对于任一时刻  $t$ , 位移  $s$  可由式 (5) 表示。

$$s = \begin{cases} \frac{S_0}{T_0 T_1} t^2 & t \in [0, T_1] \\ \frac{T_1 S_0}{T_0 - T_1} \left( \frac{2}{T_1} t - \frac{1}{T_0 T_1} t^2 - 1 \right) & t \in [T_1, T_0] \end{cases} \quad (5)$$

注:  $S_0$ -一次咬合运动时上下牙面之间的相对位移量, mm;  $T_0$ -咬合运动的总时间, s;  $T_1$ -加速阶段的所用的总时间, s。

等跃度运动模型:下牙面先以加速度逐渐减小的方式做加速运动,而后又以加速度逐渐增大的方式做减速运动。对于任一时刻  $t$ , 位移  $s$  可由方程 (6) 表示。

$$s = \frac{S_0}{T_0^2} \left( 3t^2 - \frac{2}{T_0} t^3 \right) \quad t \in [0, T_0] \quad (6)$$

注:  $S_0$ -一次咬合运动时上下牙面之间的相对位移量, mm;  $T_0$ -咬合运动的总时间, s。

简谐运动模型:下牙先做余弦加速运动,后做余弦减速运动,当速度为零时,上下牙咬合在一起。对于任一时刻  $t$ , 位移  $s$  可由方程 (7) 表示。

$$s = \frac{S_0}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi}{T_0} t\right) \right] \quad t \in [0, T_0] \quad (7)$$

注:  $S_0$ -一次咬合运动时上下牙面之间的相对位移量, mm;  $T_0$ -表示咬合运动的总时间, s。

在三种咀嚼模式下,模拟了咀嚼加速度变化时的咀嚼效果,仿真结果如表 5-7,  $S'$  为水平和垂直方向的位移矢量和,  $\sigma_{max}$  为最大主应力,  $Tresca$  为剪切应力,  $Mises$  为密赛斯应力。

表 5 加速度对切割效果的影响

Table 5 The influence of acceleration on cutting effect

运动方式	$S'$ /mm	$T_0$ /s	$\sigma_{max}$ /MPa	$Tresca$ /MPa	$Mises$ /MPa
匀加减	1.41	0.2	6.37	10.73	9.39
等跃度	1.41	0.2	6.32	10.73	9.41
简谐	1.41	0.2	6.27	10.79	9.49

表 6 加速度对杵压效果的影响

Table 6 The influence of acceleration on compressing effect

运动方式	$S'$ /mm	$T_0$ /s	$\sigma_{max}$ /MPa	$Tresca$ /MPa	$Mises$ /MPa
匀加减	1	0.2	3.71	11.16	10.53
等跃度	1	0.2	3.72	11.16	10.53
简谐	1	0.2	3.70	11.16	10.53

表 7 加速度对研磨效果的影响

Table 7 The influence of acceleration on grinding effect

运动方式	$S'$ /mm	$T_0$ /s	$\sigma_{max}$ /MPa	$Tresca$ /MPa	$Mises$ /MPa
匀加减	1.41	0.2	6.03	15.64	13.86
等跃度	1.41	0.2	6.55	15.29	13.69
简谐	1.41	0.2	7.26	15.57	13.85

由表 5~7 可知,不同的运动方式使物料产生的应力集中值比较接近,这说明加速度的变化对咀嚼效果的影响相对较小,对于杵压模式这种影响几乎可以忽略。但在研磨模式下,匀加减运动产生的剪切应力和密赛斯应力最大,简谐运动次之,加速度变化相对剧烈的等跃度运动应力集中最小,这表明平稳的加速度能够起到更好的研磨破碎效果。在研磨咀嚼性较强的食品时,采用匀加减运动规律更为合适。

## 5 结论

5.1 利用逆向工程技术重构了人类的磨牙和切牙模型,依据咀嚼运动的生理学规律建立了咀嚼运动的简化模型,并采用数值仿真的手段,模拟了食物的咀嚼

破坏过程。

5.2 基于弹塑性力学和强度理论,仿真分析了咀嚼速率和加速度对咀嚼破碎食物效果的影响。仿真结果表明:下颌匀速运动时,咀嚼速率在一定的范围内增大时,研磨运动产生的剪切应力和密赛斯应力的增长趋势明显高于切割运动,说明研磨运动更适合于破碎弹性和韧性食品;稳定的咀嚼加速度会产生相对较强的应力集中,在研磨弹性和韧性等不易破碎的食品时,匀加减运动规律能产生较大的剪切应力和密赛斯应力。

### 参考文献

- [1] Wilson EM, Green J R. The Development of Jaw Motion for Mastication [J]. *Early Human Development*, 2009, 85(5): 303-311
- [2] Kohyama K, Sasaki T, Hayakawa F. Characterization of Food Physical Properties by the Mastication Parameters Measured by Electromyography of the Jaw-closing Muscles and Mandibular Kinematics in Young Adults [C]. *Annual Meeting of the Japanese-Society-for- Mastication- Science- and - Health - Promotion*. Osaka, JAPAN: Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2008: 1690-1695
- [3] Kohyama K, Nakayama Y, Watanabe H, et al. Electromyography of Eating Apples: Influences of Cooking, Cutting and Peeling [J]. *Journal of Food Science*, 2005, 70(4): S257-S261
- [4] Cakir E, Vinyard C J, Essick G, et al. Interrelations Among Physical Characteristics, Sensory Perception and Oral Processing of Protein-based Soft-solid Structures [J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 29(1): 234-245
- [5] 李毅念,徐小琴,丁为民.糙米三点弯曲破碎力学性能试验分析[J].*农业机械学报*,2010,41(8):121-124
- [6] 刘志云,温吉华.大豆弹性模量的测量与研究[J].*粮食储藏*.2010,39(3):27-30
- [7] Li Yi-nian, Xu Xiao-qin, Ding Wei-min. Experiment Analysis on Three-point Bending Breaking Force of Brown Rice [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(8): 121-124
- [8] Liu Zhi-yun, Wen Ji-hua. The Measure and Study on the Elastic Modulus of Soybean [J]. *Grain Storage*, 2010, 39(3): 27-30
- [9] Г C 皮萨林科,А А 别捷列夫著,江明行译.复杂应力状态下的材料变形与强度[M].北京:科学出版社,1983
- [10] Filipic S, Keros J. Dynamic Influence of Food Consistency on the Masticatory Motion [J]. *Journal of Oral Rehabilitation*, 2002, 29(5): 492-496
- [11] Lucas P W, Prinz JF, Agrawal K R, et al. Food Texture and its Effect on Ingestion, Mastication and Swallowing [J]. *Journal of Texture Studies*. 2004, 35(2): 159-170
- [12] Chen jianshe. Food Oral Processing-A Review [J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(1): 1-25
- [13] 程绪铎,黄之斌,唐福元,等.压缩速度与压缩方位对大豆籽粒压缩特性的影响[J].*中国粮油学报*,2013,28(2): 10-14,21
- [14] Cheng Xu-duo, Huang Zhi-bin, Tang Fu-yuan, et al. Study on Influence of Compressive Velocity and Direction on Compressive Characteristics of Soybean Particles [J]. *Journal of the Chinese Cereals and oils association*, 2013, 28(2): 10-14, 21
- [15] Dan H, Kohyama K. Interactive Relationship Between the Mechanical Properties of Food and the Human Response During the First Bite [J]. *Archives of Oral Biology*, 2007, 52(5): 455-464