

基于流固耦合的淹没水射流柑橘分瓣研究

汤亮^{1,2}, 李倩^{1,2}, 胡新宇^{1*}, 李建^{1,2}, 卢文政^{1,2}

(1. 湖北工业大学机械工程学院, 武汉 430070; 2. 湖北省制造业创新方法应用工程技术研究中心, 武汉 430070)

摘要: 针对国内柑橘分瓣过程中存在的劳动力成本高、分瓣效率低下等问题, 通过对柑橘模型进行流固耦合的淹没水射流仿真研究, 验证了水分离在柑橘分瓣中的可行性。首先基于 Ansys Workbench 平台对柑橘结构和喷嘴内外部流场响应进行单向流固耦合联合求解; 其次对柑橘在流固耦合作用下的应力分布进行了分析; 最后采用不同喷嘴对柑橘模型进行仿真试验, 并通过建立试验平台加以验证。结果表明, 当喷嘴距为 50 mm 时, 在水射流的冲击作用下, 柑橘内部存在剪切破坏, 受到的最大剪切应力最大, 形成剪切裂纹, 裂纹进一步扩展使得柑橘分瓣。

关键词: 柑橘分瓣; 最优喷嘴; 喷嘴; 流固耦合

中图分类号: TS29

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2018)03-0569-06

Submerged waterjet technology in citrus splitting based on fluid-structure interaction

TANG Liang^{1,2}, LI Qian^{1,2}, HU Xinyu¹, LI Jian^{1,2}, LU Wenzheng^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430070;

2. Hubei Engineering Research Center for Manufacturing Innovation Method, Wuhan 430070)

Abstract: Due to high labor cost and low efficiency of citrus splitting, we simulated the process of submerged water jet flow solid coupling model to verify the feasibility of citrus splitting. Ansys workbench platform was used to solve the flow field of the internal and external nozzle and the structure response of citrus using the unidirectional fluid-structure interaction method. Meanwhile, the stress distribution of citrus under the fluid-structure interaction was calculated. The influence of different jet distances on the stress distribution of citrus was analyzed and compared. The experimental results showed that: when the target distance is 50 mm, under the impact of water jet, the shear stress is maximum. The formation of shear cracks and further extension of the cracks led to splitting of the citrus.

Key words: citrus splitting; optimum target distance; nozzle; fluid-structure interaction

我国柑橘产量大, 大量出口其他国家, 国内的柑橘罐藏产业庞大。柑橘分瓣是柑橘深加工流水线中的一个重要工序, 目前国内企业大部分依赖于人工操作, 容易造成生产率低, 食品卫生难以保障等问题。国外虽有全自动化柑橘分瓣装备, 但造价昂贵且不宜我国柑橘的大小、果皮紧实度等特性。国内人工劳动力成本正在逐年增加, 且市场对食品卫生的要求越来越严格, 因此实现柑橘自动化分瓣是柑橘加工行业急需解决的重要问题^[1]。由于水射流技术的切割、破碎和清洗的效果良好, 被广泛应用于各个工业领域^[2]。作为一种冲击分离技术, 水

射流具有成本低, 清洁无污染等特点。由于水射流本身的高紊动性, 使得射流流动区域内流场具有不确定性, 并且射流与材料接触过程中时间短暂且破坏机理复杂, 因此国内外的许多学者纷纷采用 CFD 方法来研究复杂的射流流场。基于流固耦合的两相流数值模拟方法是计算流体力学、固体力学和两相流模型建模方法相结合的计算机仿真方法^[3]。目前, 国内外诸多学者应用流固耦合分析方法, 针对射流冲击的应用范畴, 对一些较为热门的固体材料(岩石、橡胶、煤层等)研究较多。如宋守许等^[4]利用流固耦合方法研究了超高压水射流破碎子午线轮胎

收稿日期: 2017-10-26

基金项目: 国家科技部创新方法专项(2016IM020200-03)和湖北省自然科学基金重点项目(2012FFA059)共同资助。

作者简介: 汤亮, 博士, 副教授。E-mail: 47793012@qq.com

* 通信作者: 胡新宇, 博士, 副教授。E-mail: 728350303@qq.com

机理，找出了超高压水射流作用下橡胶材料内部的应力规律。黄飞^[5]对水射流冲击岩石过程中产生的“水锤压力效应”进行了研究，并且考察了不同固体表面形状对射流冲击的影响。陆华^[6]针对红砂岩进行了冲击载荷下的动力响应以及损伤效应研究。

目前国内利用淹没水射流技术冲击柑橘的流固耦合研究较少。本研究以柑橘为研究对象，基于 Ansys Workbench 平台，采用 Fluent 和 Workbench 软件对喷嘴内外部流场和柑橘结构进行单向流固耦合分析，研究了射流冲击过程中柑橘内部破坏机理，并且结合仿真试验分析了柑橘在不同靶距射流冲击下的应力分布，为水射流冲击柑橘的工程应用提供指导。

1 流固耦合计算方法

1.1 流体控制方程

进行数值模拟计算，可以看成是对方程的求解，而方程是经过离散来进行求解的，那么对于流体的流动问题，都要求求解质量守恒方程。射流喷射问题虽然形式是千变万化的，然而总体上都遵守三大基本守恒定律：质量守恒定律、动量守恒定律和能量守恒定律^[7]。

质量守恒方程为：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \tag{1}$$

X、Y、Z 方向动量方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_x \bar{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \\ \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_y \bar{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \\ \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u_z \bar{u}) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \end{aligned} \tag{2}$$

其中： p 为流体微元体上的压强； τ_{xx} 、 τ_{xy} 、 τ_{xz} 等是因分子粘性作用而产生的作用在微元体表面上的粘性应力 τ 的分量； f_x 、 f_y 、 f_z 为 3 个方向的单位质量力，若质量力只受重力，且 z 轴垂直向上，则 $f_x = f_y = 0$ 、 $f_z = -g$ ^[8]。

以温度 T 为变量的能量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w T)}{\partial z} = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\lambda}{C_p} \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_T \end{aligned} \tag{3}$$

其中： C_p 是比热容， T 是温度， λ 为流体的导热系数， S_T 是粘性耗散项，即流体的内热源及由于粘性作用流体机械能转换成热能的部分^[8]。

1.2 湍流模型

采用 Realized $k-\epsilon$ 模型进行数值模拟计算。

Realized $k-\epsilon$ 模型是在标准 $k-\epsilon$ 模型的基础上对湍动黏度计算公式及耗散率方程进行了改进和优化，已被有效应用于含有混合流和射流的边界层流动、管内流动和自由流动等，在一定程度上可以更好地反映冲击射流的流动情况，且计算耗时较少。有关 Realized $k-\epsilon$ 模型的具体描述如式 (4) 所示：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \\ \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\epsilon} S \epsilon - \rho C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{v \epsilon}} + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} C_{3\epsilon} G_b \end{aligned} \tag{4}$$

其中， $C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right]$ ， $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ ，

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon}, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

式 (4) 中， G_k 是由于平均速度梯度引起的湍动能； G_b 为由于浮力而产生的湍动能； Y_M 是可压缩湍流的过度扩散产生的湍动能变化； $C_{1\epsilon} = 1.44$ ， $C_{3\epsilon} = 0.09$ ， $C_2 = 1.9$ ， $\sigma_k = 1.0$ ， $\sigma_\epsilon = 1.2$ 。

1.3 固体控制方程

由牛顿第二定律推导出守恒方程：

$$\rho_s \ddot{d}_s = \nabla \cdot \sigma_s + f_s \tag{5}$$

式 (5) 中， ρ_s 是固体密度， σ_s 是柯西应力张量， f_s 是体积力矢量， \ddot{d}_s 为固体域当地加速度矢量。

由于射流冲击过程中存在能量传递过程，因此能量计算公式如下所示：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v h_{tot}) = \\ \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (v \cdot \tau) + v \cdot \rho f + S_E \end{aligned} \tag{6}$$

式 (6) 中， λ 表示导热系数， S_E 表示能量源项。

2 流固耦合分析

2.1 基本参数、网格划分和边界条件

众所周知，柑橘由 9~10 瓣橘瓣组成，单个橘瓣之间有一定的结合力，且柑橘果肉内部材料分布情况复杂，因此在本研究中做了部分的简化处理。结合水射流冲击柑橘的实际情况，作如下的基本假设：

- (1) 柑橘为规则球形，内部是一个整体；
- (2) 柑橘是各向同性线弹性介质；
- (3) 将柑橘简化为塑性材料；模型关于中心轴对称，因此可以将模型简化为如图 1 所示的几何模型。图 2 为三维单孔喷嘴淹没射流冲击橘流场模型，其中柑橘表面为耦合面。在划分网格的过程中，针对喷嘴出口、射流核心段等区域进行了网格加密措施，网格划分示意图如图

3 所示, 其中网格节点数为 213 876, 网格平均质量为 0.753 47。为了方便添加约束, 给柑橘球形底部曲面简化为水平状, 如图 4 所示, 柑橘模型的网格节点数为 102 135, 网格平均质量为 0.726 14。

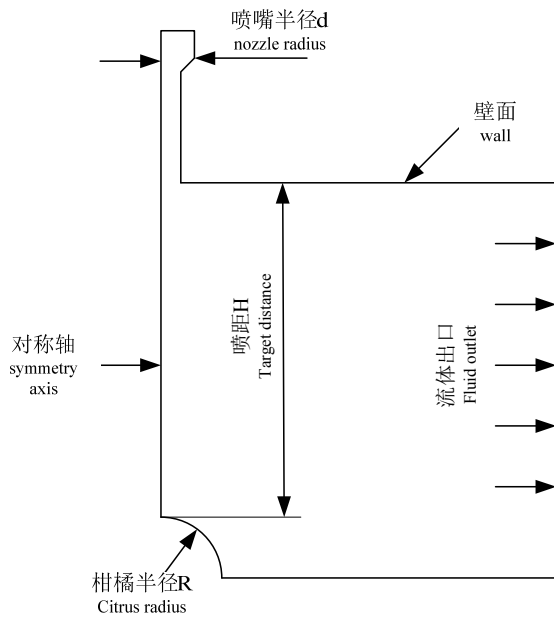


图 1 几何模型结构示意图

Figure 1 Schematic diagram of geometric model

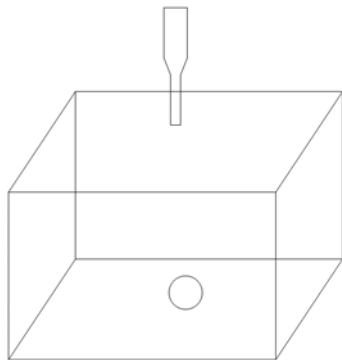


图 2 物理几何模型图

Figure 2 Physical geometry model diagram

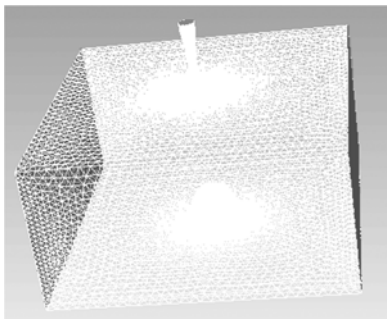


图 3 网格划分示意图

Figure 3 Schematic map of mesh generation

Gyasi 等^[9]对柑橘类水果的果肉和果皮进行了

关于弹性模量和泊松比数值测试的试验研究, 分别对柑橘样品进行了无限制和有限制的单轴压缩试验, 并得到了载荷与变形之间的关系曲线, 并将载荷峰值的一半处作为应变点用来计算弹性模量。柑橘力学参数如表 1 所示。

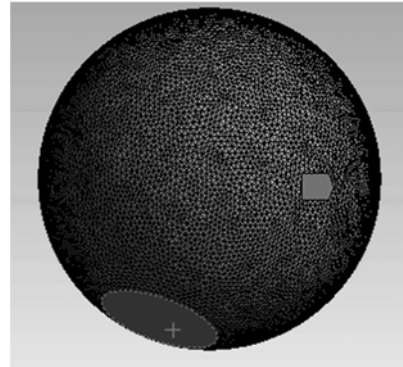


图 4 柑橘网格划分示意图

Figure 4 Schematic map of citrus splitting generation

表 1 柑橘力学参数

Table 1 mechanical parameters of citrus

力学参数 Mechanical parameter	密度 /kg·m ⁻³ Destiny	弹性模量/Mpa Elastic modulus	泊松比 Poisson's ratio
柑橘果肉 Citrus pulp	0.9	0.026 28	0.494

2.2 流固耦合求解方法

流固耦合分析是一种将流体分析和固体分析交叉耦合而产生的一种分析方法, 可分为单向流固耦合和双向流固耦合。单向流固耦合是把某个时间点的流场分析结果加载到结构面上进行计算, 一般用于固体变形较小的情况, 忽略其对流体的影响, 只考虑流体应力对结构的作用。双向流固耦合能实现流体和固体的数据双向传递。在对柑橘进行分析时, 柑橘材料受到射流冲击时的变形不大, 对流体的影响较小, 因此选择单向流固耦合进行模拟仿真。第一步, 求解流体域, 得到流场压力分布, 将所得结果加载到结构域上; 第二步, 将结构域的位移变化作为前提条件, 求解流体域的运动方程, 得到压力与速度的分布; 第三步, 根据耦合面的协调条件, 通过载荷传递, 将分析结果加载在柑橘材料上, 计算求解, 得到结果^[10]。

3 单向流固耦合结果分析

3.1 冲击应力仿真分析

利用 Ansys Workbench 软件对柑橘模型进行仿真分析, 仿真分析的初始条件设为: 喷嘴距为 60 mm,

射流入口速度为 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。仿真结果如图 5 所示，在柑橘材料与射流冲击接触处的中心位置向下凹陷最严重，说明此位置柑橘材料所受压应力最大，由于在柑橘底部有固定约束，因此在底部会有应力集中的现象。在远离柑橘与射流冲击接触的中心位置，柑橘所受的压力值急速下降，并逐渐转换为拉应力，通过软件分析可得，压应力最大为 7.44 Mpa ，拉应力最大为 2.32 Mpa 。

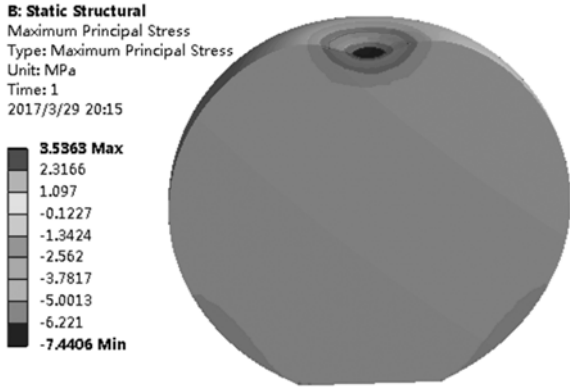


图 5 最大主应力分布规律

Figure 5 Distribution law of the maximum principal stress

在仿真分析过程中，柑橘材料内部对称面上切应力分布规律如图 6 所示，由图可以看到随着射流冲击时间的推移，切应力最初从表面冲击中心下部

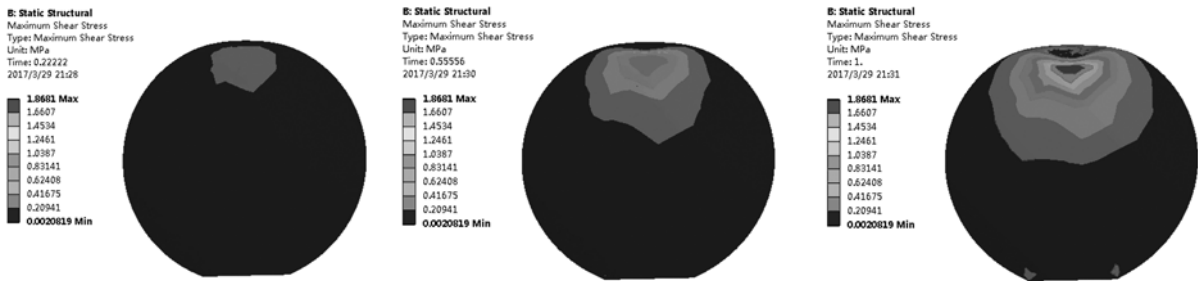


图 6 0.2 s、0.5 s 和 1 s 时切应力分布云图

Figure 6 Nephogram of shear stress distribution at 0.2 s, 0.5 s and 1 s

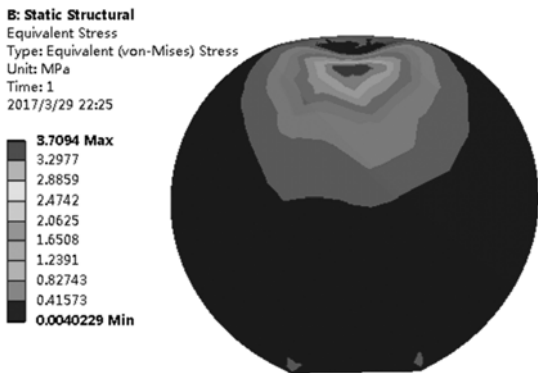


图 7 等效应力分布云图

Figure 7 Nephogram of equivalent stress distribution

某个位置开始，并逐渐向外扩展，在 $t=1\text{s}$ 的时候可知柑橘材料受到的剪切应力最大。

图 7 及图 8 分别表示柑橘内部有效应力分布云图及等值线图。由于柑橘材料的抗剪强度要低于其抗压强度，因此在水射流过程中，柑橘材料所受的压应力逐渐下降，并在射流边缘处转化为剪切应力，在剪切应力的作用下形成了碗状的剪切裂纹，随着裂纹的进一步扩展使得柑橘橘瓣分离。

3.2 喷距仿真分析

喷距与射流打击力紧密相连，不同的喷距对应不同的柑橘材料表面的冲击压力以及柑橘材料内部的切应力。图 9 所示为不同喷距条件下柑橘材料对称轴最大切应力分布图。由图 9 可知，随着喷距的降低，柑橘材料对称面最大切应力逐渐增大，这是因为喷距在逐渐向射流初始段靠拢。当喷距降低至 50 mm 时，在离冲击中心距离为 5 mm 处出现最大切应力值，而当喷距继续减小时，切应力值反而下降，这是因为当喷距过小时射流的反射阻力逐渐增大，使得作用在柑橘材料上的作用力减小，这不是想要的结果，因此由仿真结果可知喷距存在一个最佳值，当喷距为 50 mm 时，满足了其在射流核心段的要求，也使得柑橘材料内部切应力值较大，是想要得到的最优喷距。

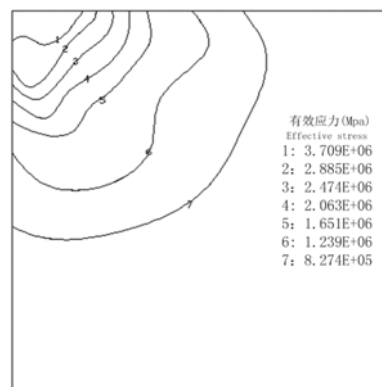


图 8 柑橘内部有效应力等值线分布

Figure 8 Distribution of effective stress contours in citrus

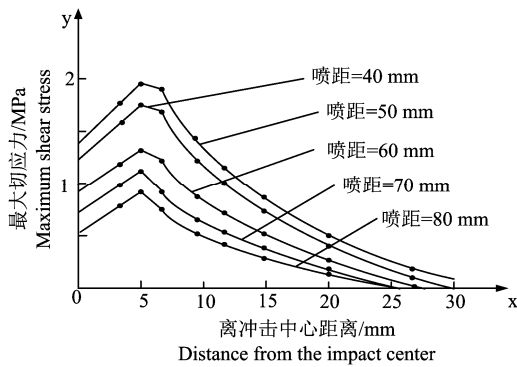


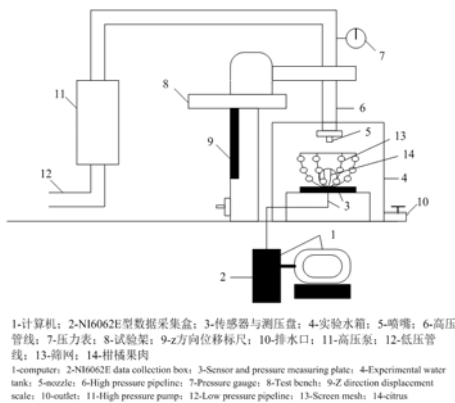
图 9 柑橘对称轴最大切应力分布

Figure 9 The maximum shear stress distribution of symmetric axis in citrus

3.3 试验验证

为了验证不同喷距对柑橘材料表面平均应力的影响作用,建立了如图 10 所示的射流冲击压力分布测试装置平台,进行淹没水射流冲击压力试验,将试验结果与已做仿真值进行对比,得到了平均冲击压力与喷距的关系。

试验装置主要包括:水泵、射流喷嘴、试验台架、数据采集与分析系统。试验时每当取定一个喷距值后,将水泵升压至 1 Mpa,多次记录由传感器测得的数据,算得平均值,将试验值与仿真值相对比,得到如图 11。



1-计算机; 2-NI6062E 型数据采集盒; 3-传感器与测压盘; 4-实验水箱; 5-喷嘴; 6-高压管线; 7-压力表; 8-试验架; 9-z 方向位移标尺; 10-排水口; 11-高压泵; 12-低压管线; 13-筛网; 14-柑橘果肉
1-computer; 2-NI6062E data collection box; 3-Sensor and pressure measuring plate; 4-Experimental water tank; 5-nozzle; 6-High pressure pipeline; 7-Pressure gauge; 8-Test bench; 9-Z direction displacement scale; 10-outlet; 11-High pressure pump; 12-Low pressure pipeline; 13-Screen mesh; 14-citrus

图 10 试验平台

Figure 10 Experimental platform

通过对比试验值与仿真值,由图 11 可得试验值比仿真值稍高,这是由于仿真时未考虑淹没射流环境下的空化效应,空泡溃灭产生的瞬时压力不可忽略。在射流核心段范围内,喷距越短,水射流在冲击材料时对材料的反作用力越明显,射流反弹造成的阻力使材料表面所受平均压力值较小,因此,喷距为 40 mm 时的平均压力值要低于 50 mm 时的平均压力值。随着喷距的增加,射流进入基本段范围

内,材料表面平均应力值逐渐减小,因此需要将射流喷距在等速核以内,以提高水射流对柑橘分瓣效率。

由图 11 可知,当喷距为 50 mm 时,柑橘所受的平均冲击压力在 0.7~0.8 Mpa 之间。为了进一步验证喷距 50 mm 是最优喷距,随机选取了 250 个柑橘作为样本,通过图 10 所示的试验平台进行柑橘分瓣,并通过传感器测得每个柑橘所受的冲击压力,每 5 个柑橘所测的压力的平均值作为一个样本,所得到的平均冲击压力图如图 12 所示。从图 12 可以看出,通过进行柑橘实物试验,当喷距固定为 50 mm 时,柑橘所受的平均冲击压力在 0.7~0.8 Mpa 范围内,与仿真结果相符。在试验过程中统计柑橘能否分瓣,统计结果表明有近 3/4 的柑橘经过水射流的冲击能达到分瓣效果,如在后期增加机械振荡,能达到完全分瓣的效果,由此可以验证将水射流技术应用于柑橘分瓣是可行的。

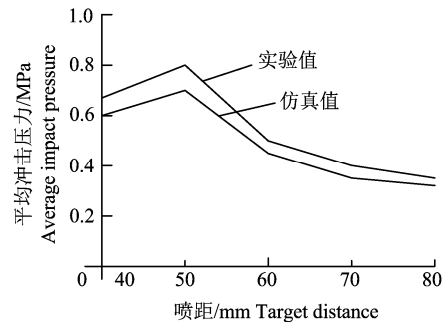


图 11 平均冲击压力与喷距的关系

Figure 11 Relationship between average impact pressure and target distance

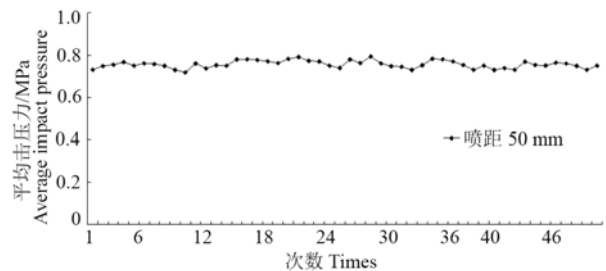


图 12 平均冲击压力

Figure 12 Average impact pressure

4 结论

本研究运用 ANSYS Workbench 平台对淹没水射流柑橘分瓣模型的流场域进行仿真,根据实际情况简化柑橘物理模型,建立了淹没水射流柑橘分瓣的三维几何模型,研究了柑橘表面及内部的应力分布,初步分析了柑橘分瓣过程中柑橘内部的破坏情况。通过建立射流冲击压力试验平台,结合流固耦

合仿真分析研究了不同喷距对柑橘表面冲击压力及柑橘材料内部切应力的影响,得到了如下结论:

(1) 在淹没水射流过程中,柑橘材料与水射流接触面的中心位置处的压应力最大;

(2) 柑橘材料在距离冲击表面下方大约 0.5 倍喷嘴直径处所受的剪切应力最大,并会形成碗状剪切裂纹;

(3) 当喷距为 50 mm 时,既满足了其在射流核心段的要求,也使得柑橘内部切应力最大;

(4) 通过设计淹没射流冲击压力分布测试试验平台,测试不同喷距对柑橘材料表面平均冲击压力的影响,将所得数据与本章仿真数据相比较,所得结果近似,验证了淹没射流冲橘流固耦合仿真的准确性与合理性。

参考文献:

[1] 卢敏. 宽皮柑橘剥皮方法的试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.

- [2] 王丹丹. 水射流冲击破碎的数值分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [3] 陈黎卿, 张栋, 陈无畏. 基于流固耦合的分动器齿轮两相流动数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 54-61.
- [4] 宋守许, 田光涛, 余德桥. 超高压水射流破碎子午线轮胎机理[J]. 机械工程学报, 2014, 50(12): 36-43.
- [5] 黄飞. 水射流冲击瞬态动力特性及破岩机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [6] 陆华. 冲击荷载下红砂岩流固耦合的动力响应及损伤效应研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.
- [7] 任伟. 采空区多孔介质阻力系数的数值模拟研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [8] 汤亮, 叶方平, 龚发云, 等. 湍流模型在折流板换热器壳侧结构优化中的应用[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2015, 39(2): 62-67.
- [9] GYASI S, FRIDLEY R B, CHEN P. Elastic and viscoelastic Poisson's ratio determination for selected citrus fruits[J]. T ASAE, 1981, 24(3): 747-750.
- [10] 施卫东, 王国涛, 张德胜, 等. 基于流固耦合的轴流泵叶片应力特性[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(9): 737-740.