

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.035

# 鲜切果蔬包装机输送机构仿真与试验

郑兆启<sup>1</sup> 李树君<sup>2</sup> 王冰<sup>3,4</sup> 马季威<sup>3</sup> 李超<sup>1</sup> 卢黎明<sup>3</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国机械工业集团有限公司, 北京 100080;

3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 4. 中国包装和食品机械有限公司, 北京 100083)

**摘要:** 针对鲜切果蔬包装机输送机构作业时包装物料损伤和滑移的问题, 分析了输送机构对包装盒压缩变形原理, 通过 PET 包装盒的压缩试验, 得到了包装盒及盒内的果蔬产品避免造成机械损伤的条件, PET 包装盒压缩位移应在 10 mm 以内, 包装机输送机构压缩力应在 5~15 N 之间。采用参数化建模, 通过有限元仿真分析了输送机构对包装盒压缩变形的过程及机理, 分析了包装盒的易损伤位置及原因。根据压缩试验及仿真分析, 以滑移率为指标, 进行正交试验, 确定最佳参数组合: 包装盒质量为 19 g, 立式输送带对包装盒的压缩位移为 8 mm, 输送带速度为 0.25 m/s, 在包装盒及鲜切果蔬不压缩受损的同时 PET 包装盒和输送机构有较好的输送同步性。

**关键词:** 鲜切果蔬; 包装机; 输送机构; 仿真; 试验

中图分类号: TB484.3; TB486+.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)07-0252-07

## Simulation and Experiment on Conveying Mechanism of Fresh-cut Fruit and Vegetable Packaging Machine

Zheng Zhaoqi<sup>1</sup> Li Shujun<sup>2</sup> Wang Bing<sup>3,4</sup> Ma Jiwei<sup>3</sup> Li Chao<sup>1</sup> Lu Liming<sup>3</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. China National Machinery Industry Corporation, Beijing 100080, China

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

4. China National Packaging and Food Machinery Corporation, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to decrease the damage and slippage of packaging material during the operation of conveying mechanism of fresh-cut fruit and vegetable packaging machine, a study was conducted. In this work, the compression deformation principle of the packaging boxes compressed by the conveying mechanism was analyzed. Through compression test of PET packaging boxes, the force of the conveying mechanism should be between 5 N and 15 N, and the compression displacement should be less than 10 mm, which could avoid mechanical damage of packaging boxes and fruit-vegetable products. Then, based on parametric modeling, the process and mechanism of the compression deformation of the packaging boxes were analyzed by the finite element simulation. The easy damage position of the packaging boxes and the reason were analyzed. According to the above experiment and analysis, the quality of packaging boxes, the compression displacement and the speed of the vertical belt conveyors were selected as the orthogonal test factors. When the quality of packaging boxes was 19 g, the compression displacement between the vertical belt conveyors and the packaging boxes was 8 mm and the speed of the vertical belt conveyors was 0.25 m/s, the results showed that the slip rate was 0.043%. Under this condition, there was no compressed damage on packaging boxes and fresh-cut fruits and vegetables. Meanwhile, good transport synchronization was occurred between PET packaging boxes and conveying mechanism.

**Key words:** fresh-cut fruit and vegetable; packaging machine; conveying mechanism; simulation; experiment

收稿日期: 2016-04-05 修回日期: 2016-04-26

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD04B02)和北京市科技计划项目(Z151100001015010)

作者简介: 郑兆启(1989—),男,博士生,主要从事食品和包装技术装备研究, E-mail: zhengzhaoqi@163.com

通信作者: 李树君(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事农产品、食品加工工程技术装备及产业化研究, E-mail: lisj@caams.org.cn

## 引言

鲜切果蔬,又名半处理果蔬或轻度加工果蔬,这些产品采用装袋或预先包装,为消费者提供方便、高营养和良好风味的新鲜产品<sup>[1]</sup>。我国水果、蔬菜年产量居世界第一位,果蔬产业在我国是仅次于粮食作物的第二大产业<sup>[2]</sup>,鲜切果蔬已成为果蔬商品化的新形式。鲜切果蔬在发达国家已普遍实现产业化,在国内目前正处于高速发展期<sup>[3]</sup>。高质量的包装是维持鲜切果蔬良好品质的关键因素,也是发展鲜切果蔬需要重点解决的难题<sup>[4-5]</sup>。目前国内鲜切果蔬的包装主要依靠人工,劳动强度大,生产效率低,同时易产生食品安全问题,因此急需进行鲜切果蔬机械化包装方面的研究。

多年来,针对果蔬包装机械,国内外学者进行了大量研究<sup>[6-8]</sup>。目前国内鲜切果蔬包装机械化的研究工作刚刚起步,其中鲜切果蔬包装机输送机构是整个包装机运行时序稳定性的核心机构。然而目前输送机构稳定性很差,经常出现压缩力过小使包装盒滑移导致切盒现象,或者由于压缩力过大将包装盒及鲜切果蔬压伤。因此,本文进行鲜切果蔬包装机输送机构的仿真与试验研究。为深入分析输送机构对包装盒压缩变形的过程及机理,对包装盒进行压缩特性试验,并建立输送机构对 PET 包装盒压缩变形仿真分析力学模型进行有限元分析<sup>[9-11]</sup>,通过正交试验,确定输送机构运动和结构的最佳参数组合。

## 1 输送机构及对包装盒压缩变形原理

### 1.1 包装机输送机构

包装机输送机构主要包括前输送带、对称的立式输送带以及 3 组调节丝杠等。前输送带将包装盒输送到对称的立式输送带,对称的立式输送带夹紧包装盒向前输送,2 条立式输送带可通过丝杠调节相对距离。其结构如图 1 所示。

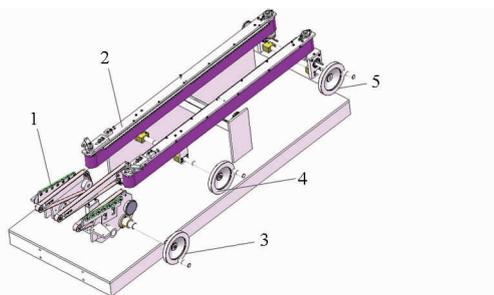


图 1 输送机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of conveying mechanism

1. 前输送带 2. 立式输送带 3, 4, 5. 调节丝杠

### 1.2 输送机构对包装盒压缩变形原理

包装机的输送机构是包装机的重要机构,通过

立式输送带夹持输送包装盒,向前输送物料。输送机构和 PET 包装盒之间的作用力主要是压缩力,受力过程如图 2 所示。压缩力过大导致包装盒变形破损,同时包装的蔬菜出现机械损伤;压缩力过小,导致相对摩擦力不够,机械结构和 PET 包装盒发生相对滑移,致使其它包装工序无法进行。压缩力必须根据 PET 包装盒力学特性设定。

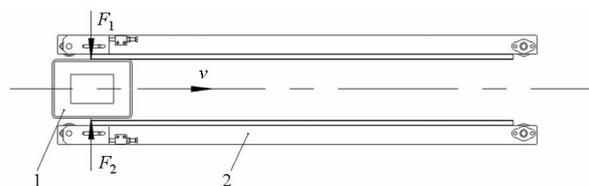


图 2 包装盒压缩受力示意图

Fig. 2 Schematic figure of compression force on packaging boxes

1. PET 包装盒 2. 立式输送带

PET 包装盒是典型的薄壁构件,输送机构对包装盒压缩变形可以使用板壳理论来分析,输送机构对包装盒压缩,其薄壁单元的受力如图 3 所示。从

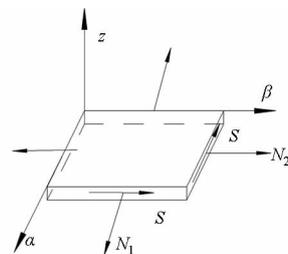


图 3 包装盒薄壁单元受力示意图

Fig. 3 Schematic figure of force on shell unit of packaging boxes

变形能的概念出发,诺沃日洛夫<sup>[12]</sup>推荐了薄壳物理方程,其受力为

$$N_1 = \frac{Eh}{1-\mu^2}(\varepsilon_\alpha + \mu\varepsilon_\beta) \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{Eh}{1-\mu^2}(\varepsilon_\beta + \mu\varepsilon_\alpha) \quad (2)$$

$$S = \frac{Eh}{2(1+\mu)}\gamma^{\alpha\beta} \quad (3)$$

式中  $\varepsilon_\alpha$ —— $\alpha$  方向上的正应变  
 $\varepsilon_\beta$ —— $\beta$  方向上的正应变  
 $N_1$ —— $\alpha$  方向上的薄膜力, N  
 $N_2$ —— $\beta$  方向上的薄膜力, N  
 $S$ ——切向薄膜力, N  
 $h$ ——薄壁厚度, N  
 $E$ ——材料弹性模量, Pa  
 $\mu$ ——材料泊松比  
 $\gamma^{\alpha\beta}$ —— $\alpha$  和  $\beta$  平面上的切应变

由薄壳物理方程可知, PET 包装盒作为薄壁结构,在整体结构一定的条件下,其单元压缩性能主要

由厚度、弹性模量和泊松比决定,试验中采用的 PET 包装盒是目前果蔬加工企业广泛采用的盒型,在结构和材料上具有代表性。因此通过选用不同厚度的盒型,分析输送机构对包装盒压缩变形的过程及机理。

## 2 PET 包装盒压缩变形受力分析

### 2.1 试验方法

影响食品包装机输送机构的运行和控制相关的最主要因素就是输送机构对 PET 包装盒的压缩特性,在保证输送机构对包装盒有足够压缩力的同时不能对盒内果蔬等包装物造成损伤。包装盒强度测试试验所使用的盒型是目前食品加工工厂使用量最大的 2116 型,包装盒长为 210 mm,宽为 160 mm。由于包装盒冲压成型厚度并不均匀,因此以质量来表示厚度,本试验采用包装机最常用的 14、16、19 g 的 PET 包装盒进行试验。目前并没有对 PET 包装盒测试的标准方式,常用的包装盒压缩方法有平板压缩支撑结合法,固定板和圆球压头压缩法以及双板式压头压缩法等方式<sup>[13-15]</sup>。本试验采用双板式压头压缩法测试包装盒压缩特性,此方法最接近输送机构对包装盒的压缩状态。压板由上下压盘沿包装盒长度方向加载,SUNS 电子万能试验机选择 5 kN 量程力传感器,加载速率设定为 10 mm/min,缓慢压缩。每种质量的包装盒进行 5 次重复试验,结果取平均值。

### 2.2 试验结果

图 4 是 PET 包装盒压缩试验的力-位移曲线。由图 4 可见,不同厚度 PET 包装盒在 15 mm 的变形范围内,力-位移基本呈现线性特征,随着 PET 包装盒质量的增加,即厚度的增加,PET 包装盒刚度增大,包装盒在此范围内基本处于弹性变形阶段;随着压缩位移超过 20 mm,PET 包装盒发生较大的结构变形,压缩力发生突变,但 PET 包装盒经过峰值载荷后,包装盒体发生塑性变形,PET 包装盒出现刚度强化。图 5 是极值载荷后试样的变形情况,从图 5 中可以看出,经压缩后,16 g PET 包装盒破坏裂纹均布在盒的 4 个边角处,而其他位置基本没有塑性变

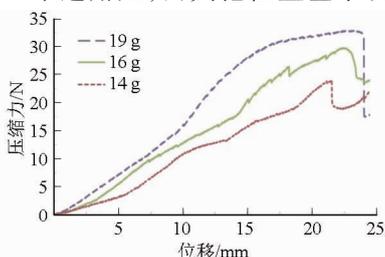


图 4 PET 包装盒力-位移曲线

Fig. 4 Force - displacement curves of PET packaging boxes

形情况,14、19 g 的包装盒变形情况与上述基本一致,说明 PET 包装盒压缩变形的主要承压位置是包装盒的 4 个边角,结构压缩变形主要由包装盒力学结构决定,与厚度变化没有关系。

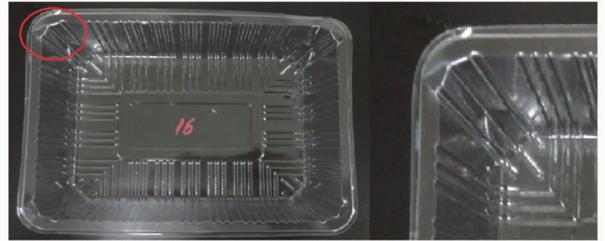


图 5 16 g PET 包装盒压缩破坏图

Fig. 5 Damage of PET packaging boxes (16 g)

分别选用番茄(果菜类)、胡萝卜(根茎类)和菠菜(叶菜类)放入 PET 包装盒内进行压缩试验。当压缩位移在 10 mm 以内,压缩位移导致的盒体变形基本不损伤盒内蔬菜;压缩位移为 10~20 mm,盒内蔬菜有轻微的机械伤,尤其是果菜类;超过 20 mm,盒内蔬菜出现挤压变形和较严重机械伤害。

由于食品包装机使用过程中不允许对包装盒及盒内果蔬等产品造成机械损伤,因此包装机输送机构对 PET 包装盒压缩位移应在 10 mm 以内,压缩力应在 5~15 N 之间,随选用 PET 包装盒规格的不同进行调整。

## 3 输送机构对 PET 包装盒压缩变形仿真分析

由于 PET 包装盒形状不规则,在输送机构压缩外力下无法直接测定其内部的应力分布以及应变规律<sup>[16]</sup>,也无法进一步确定输送机构对 PET 包装盒压缩导致的损伤位置与损伤方式的原因,因此利用 ANSYS 软件,建立输送机构对 PET 包装盒压缩变形仿真分析力学模型,对其进行有限元分析。

### 3.1 建立 PET 包装盒力学模型

利用 ANSYS 的建模功能,建立 PET 包装盒力学模型,见图 6。包装盒材料的横截面厚度是影响其压缩力学特性的主要因素,由于 PET 包装盒为非均匀厚度,自底部向上,将 PET 包装盒分割为 11 个区间,按照包装盒实际厚度的平均值设定力学模型横截面厚度。根据 KARALEKAS 等的研究<sup>[17]</sup>,对 PET 包装盒进行有限元分析时,采用单向力学性能进行计算是可接受的,因此,在有限元分析中,用材料的拉伸模量进行简化设置,包装盒模型加载方式如图 6 所示,在包装盒长度方向两侧施加作用力。

### 3.2 PET 片材基本力学参数的测定

PET 材料具有阻隔性好、机械性能高、可以多次回收再利用等优点,被大量应用于各种产品的包

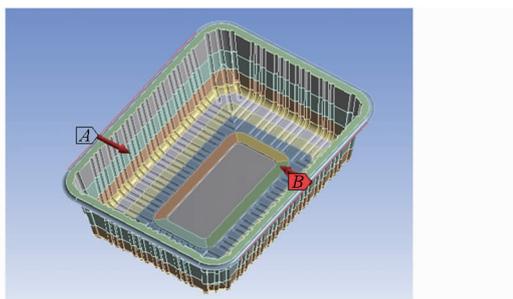


图 6 PET 包装盒有限元模型

Fig. 6 Finite element model of PET packaging boxes

装<sup>[18]</sup>。对 PET 包装盒进行有限元分析时, PET 材料的弹性模量和泊松比是基本力学参数。PET 薄片因其粘度、成分、取向、结晶等诸多因素的不同, 其力学性能存在较大差异<sup>[19]</sup>, 因此需要对包装机使用的 PET 包装盒壁薄片进行力学性能测试。由于研究重点是 PET 包装盒在压缩情况下的力学特性, 而 PET 薄片的压缩模量测试困难, 故根据沃德的研究<sup>[20]</sup>, 使用拉伸代替压缩, 测量弹性模量和泊松比。根据国家相关标准<sup>[21-22]</sup>, 将 PET 片材制成标准试样, 用 SUNS 电子万能试验机对试样进行拉伸试验, 进行多点测量, 试验速度为 5 mm/min, 用 CS INV1861A 型便携式应变调理器连接应变片, 采用 1/4 电桥, 电压 5 V, 采集应变片数据。材料在拉伸线性阶段, 弹性模量  $E$  和泊松比  $\mu$  计算式分别为<sup>[23]</sup>

$$E = \frac{\sum P_i - n \sum P_i^2}{A_0 \left( \sum P_i \sum \varepsilon_i - n \sum P_i \varepsilon_i \right)} \quad (4)$$

$$\mu = \left| \frac{\sum P_i \sum \varepsilon'_i - n \sum P_i \varepsilon'_i}{\sum P_i \sum \varepsilon_i - n \sum P_i \varepsilon_i} \right| \quad (5)$$

式中  $P_i$ ——给定的载荷, N  
 $\varepsilon'_i$ ——载荷  $P_i$  下的横向应变  
 $\varepsilon_i$ ——载荷  $P_i$  下的纵向应变  
 $n$ ——试验测得  $P_i$  数据点的个数  
 $A_0$ ——拉伸试样的初始横截面积,  $m^2$

PET 片材试样测得的弹性模量和泊松比数据如表 1 所示。将 PET 片材试验获得的弹性模量和泊松比参数赋予力学模型。

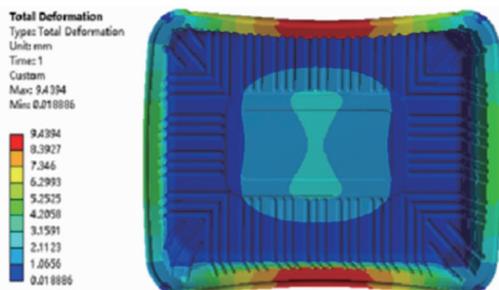


表 1 PET 包装盒材料力学性能参数  
 Tab.1 Parameters of mechanical property of PET material

编号	泊松比	弹性模量/GPa
1	0.39	1.75
2	0.37	1.68
3	0.38	1.43
4	0.39	1.58
5	0.40	1.50
平均值	0.39	1.59

### 3.3 包装盒损伤位置与损伤方式分析

PET 包装盒有限元模型和试验压缩整体变形可以从图 7 中看出, 整体变形非常近似, 结构发生内凹, 受力面积变小, 14 g 和 19 g PET 包装盒有限元模型和试验压缩整体变形对比也是类似的。通过对比分析, 有限元模型在整体压缩趋势以及变形方面可以较好地模拟试验压缩变形。

包装盒在外力压缩作用下, 其内部应力场的分布对 PET 包装盒微观损伤研究有着重要意义。通过分析易损伤位置, 可以改进包装机的输送机构, 减小或避免对包装盒的损伤。通过有限元模拟, 得到加载力为 12.5 N 时 PET 包装盒的内部等效应力如图 8 所示。由图 8 可知: 相同加载力下, 14 g PET 包装盒最大应力为 188.35 MPa, 16 g PET 包装盒最大应力为 164.29 MPa, 19 g PET 包装盒最大应力为 99.886 MPa; 随着 PET 包装盒质量的增加, 即厚度的增加, 最大应力逐渐变小, 14 g 和 19 g 质量仅相差 5 g, 但最大应力相差将近 50% (88.464 MPa)。增加包装盒厚度可以显著降低包装盒的应力值。由于包装盒的压缩变形, 4 个外凸边角出现应力集中现象, 峰值应力均出现于此位置, 剩下的盒体应力很小。这说明整个包装盒的主要承压位置是包装盒最外侧的棱边。

14、16、19 g 包装盒最外侧长度方向棱边为主要受力结构, 为更细致地研究棱边受力, 在 PET 包装盒棱边位置创建路径 Path, 如图 9 所示, 并沿路径绘制包装盒的应力变化曲线, 如图 10 所示。棱边所受



图 7 16 g 包装盒压缩变形有限元模型和试验压缩的比较

Fig. 7 Comparison of finite element model with experimental results of 16 g packaging boxes

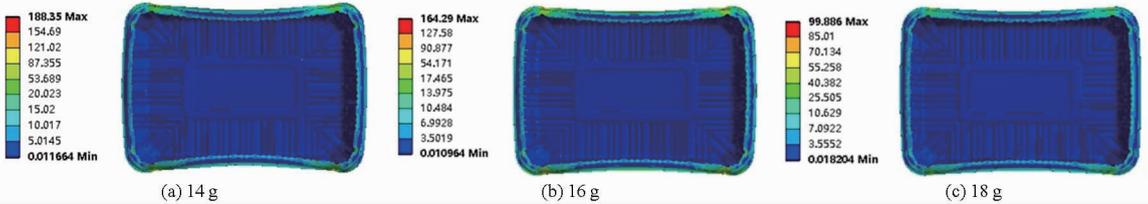


图8 不同质量包装盒压缩变形应力比较

Fig. 8 Comparison of compression deformation stress of packaging boxes with different weights

应力基本按箱体呈现几何对称,但棱边受应力并不是均匀分布的,应力沿棱边先是快速下降,然后是跳跃变化,平均每隔 15 mm 产生一次应力跳跃式变化。这与实验室输送机构对 PET 包装盒压缩变形出现的外观损伤呈现出很强的一致性。

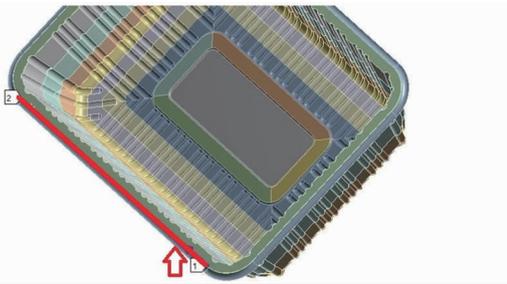


图9 棱边路径

Fig. 9 Path of edge

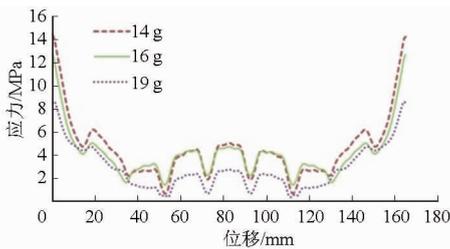


图10 不同质量包装盒棱边应力比较

Fig. 10 Comparison of edge stress of packaging boxes with different weights



图11 输送机构测试现场

Fig. 11 Scene of conveying mechanism test

对包装盒的压缩位移  $l$  (mm)、输送带速度  $v$  (m/s) 为主要因素进行 PET 包装盒的输送试验。

### 4.3 试验结果与分析

三因素三水平的试验因素水平见表 2, 采用  $L_9(3^4)$  表, 试验次数  $N=9$ , 每组重复试验 5 次, 结果取平均值, 得出每组 PET 包装盒相对输送机构的滑移率  $Y$ , 试验设计及结果见表 3。表中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  为编码值。

表2 试验因素水平

Tab. 2 Experimental factors and levels

水平	因素		
	包装盒质量/g	压缩位移/mm	输送带速度/(m·s <sup>-1</sup> )
1	14	4	0.25
2	16	6	0.35
3	19	8	0.45

表3 试验设计及结果

Tab. 3 Design and results of experiment

试验序号	包装盒质量 $A$	压缩位移 $B$	输送带速度 $C$	滑移率 $Y/\%$
1	1	1	1	2.481
2	1	2	2	2.701
3	1	3	3	2.398
4	2	1	3	1.590
5	2	2	1	0.344
6	2	3	2	0.245
7	3	1	2	0.105
8	3	2	3	0.050
9	3	3	1	0.043

## 4 包装机输送机构试验分析

### 4.1 试验设备

根据输送机构对 PET 包装盒压缩变形受力分析的试验结果,对已有的样机进行改进优化。试验在自制的试验台上进行,包装机输送机构试验装置如图 11 所示,立式输送带由一台伺服电机 (ECMA-C10804R7 型) 驱动,由伺服驱动器 (ASD-A2-0421-M 型) 控制并驱动伺服电机。设定好试验参数,启动伺服驱动器转动输送带。

### 4.2 试验因素的选择

根据压缩受力分析,为保证输送过程中包装盒及果蔬不压缩受损,根据文中第 2 节的结论调整立式输送带之间距离,立式输送带对包装盒的压缩位移为 2、5、8 mm;以 PET 包装盒相对输送机构的滑移率  $Y(\%)$  为指标,以包装盒质量  $m(g)$ 、立式输送带

根据方差分析表 4,可知对于滑移率指标,压缩位移是唯一的显著性因素。这与输送机构对 PET 包装盒压缩变形受力分析结果较为吻合,包装机输送机构对包装盒的压缩位移对输送机构的影响很显

著。对于滑移率指标,最佳组合为  $A_3B_3C_1$ ,即包装盒质量为 19 g,立式输送带对包装盒的压缩位移为 8 mm,立式输送带速度为 0.25 m/s 时,滑移率为 0.043%,在包装盒及鲜切果蔬不压缩受损的同时保证了包装机输送机构的运行同步性和稳定性,包装机运行性能得到了改善,符合鲜切果蔬包装机的生产作业要求。

表 4 方差分析结果

Tab.4 Variance analysis result

指标	方差源	平方和	自由度	F 比	显著性
	包装盒质量/g	0.49	2	0.94	
	压缩位移/mm	10.62	2	20.28	*
滑移率	输送带速度/( $m \cdot s^{-1}$ )	0.08	2	0.14	
	误差	0.52	2		
	总和	23.80	8		

\* 显著性水平  $\alpha = 0.05$ 。

## 5 结论

(1) 针对输送机构对包装盒压缩变形进行了原

理分析,为深入研究包装盒压缩变形的性能,通过 PET 包装盒的压缩试验,得到了为避免对包装盒及盒内的果蔬等产品造成机械损伤,PET 包装盒压缩位移应在 10 mm 以内,包装机输送机构压缩力应在 5 ~ 15 N 之间。

(2) 通过对输送机构与包装盒压缩变形的过程及机理的参数化建模和有限元仿真分析发现,模型可以较好地模拟输送机构对包装盒的压缩变形,包装盒最外侧的棱边为整个包装盒的承压位置并且是主要的易损位置。

(3) 根据输送机构对 PET 包装盒压缩变形受力分析的结果,通过正交组合试验,得出包装机输送机构对包装盒的压缩位移是唯一影响输送机构滑移率的显著性因素,综合分析得出,包装盒最佳质量为 19 g,立式输送带对包装盒的压缩位移为 8 mm,立式输送带速度为 0.25 m/s 时,该条件下滑移率为 0.043%,可保证包装盒及鲜切果蔬不压缩受损的同时 PET 包装盒和输送机构有较好的输送同步性。

## 参 考 文 献

- ALOTHMAN M, BHAT R, KARIM A A. UV radiation-induced changes of antioxidant capacity of fresh-cut tropical fruits [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2009, 10(4): 512 - 516.
- 金山, 伍小红. 我国果蔬加工产业现状与发展策略 [J]. *科技信息*, 2011(24): 72 - 75.
- 单杨. 中国果蔬加工产业现状及发展战略思考 [J]. *中国食品学报*, 2010, 10(1): 1 - 9.  
SHAN Yang. Current situation and development strategic consideration of the fruits & vegetables processing industry in china [J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2010, 10(1): 1 - 9. (in Chinese)
- 孙炳新, 杨金玲, 赵宏侠, 等. 鲜切果蔬包装的研究现状与进展 [J]. *食品工业科技*, 2013, 34(7): 392 - 396.  
SUN Bingxin, YANG Jinling, ZHAO Hongxia, et al. Advance in packaging of fresh-cut fruit and vegetables [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(7): 392 - 396. (in Chinese)
- 李亚慧, 吕恩利, 陆华忠, 等. 鲜切果蔬包装技术研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2014, 35(16): 344 - 348.  
LI Yahui, LÜ Enli, LU Huazhong, et al. Research advances on the packaging technology of fresh-cut fruits and vegetables [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(16): 344 - 348. (in Chinese)
- 朱小芹. 基于三伺服枕式包装机的设计与研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2011.  
ZHU Xiaoqin. Design and research pillow packing machine based on three servo [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2011. (in Chinese)
- 吴双. 果蔬自动包装机的设计与开发 [D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.  
WU Shuang. Mechanical design and development on automatic fruit-vegetable packing machine [D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2014. (in Chinese)
- 卢立新, 王杰. 盒式气调包装机气体置换结构内部 3-D 流场的模拟 [J]. *农业机械学报*, 2009, 40(7): 119 - 123.  
LU Lixin, WANG Jie. Simulation analysis of 3-D flow field within gas replacement devices of modified atmosphere packaging machine with trays [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(7): 119 - 123. (in Chinese)
- HU Qingchun, SHA Wenjian, LI Yanhui, et al. Structural optimization and lightweight design of PET bottle based on ABAQUS [C] // *International Conference on Sustainable Construction Materials and Computer Engineering*, 2012.
- 李强, 刘淑莲, 应光耀, 等. 考虑流固耦合 PET 瓶跌落碰撞数值仿真 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2012, 46(6): 980 - 986.  
LI Qiang, LIU Shulian, YING Guangyao, et al. Number simulation for drop impact of PET bottle considering fluid-structure interaction [J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2012, 46(6): 980 - 986. (in Chinese)
- 阿伦, 呼斯勒, 田野, 等. 基于 ANSYS 的植物纤维餐具静态力学特性的仿真实验 [J]. *包装工程*, 2011, 32(3): 33 - 35.  
A Lun, HU Sile, TIAN Ye, et al. Simulation experiment of static mechanical properties of tableware processed with plant fiber based on ANSYS [J]. *Packaging Engineering*, 2011, 32(3): 33 - 35. (in Chinese)
- 刘鸿文. 板壳理论 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1987.
- LINVILL Eric. Box compression strength: a crippling approach [J]. *Packaging Technology and Science*, 2015, 28(12): 1027 -

1037.

- 14 ERIKSSON Daniel, KORIN Christer, THUVANDER Fredrik. Damage to carton board packages subjected to concentrated loads[C]// 19th IAPRI World Conference on Packaging, Melbourne, 2014.
- 15 GB/T 8168—2008 包装用缓冲材料静态压缩试验方法[S]. 2008.
- 16 高德, 景全荣, 徐锋. 玉米秸秆包装容器压缩性能分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3): 117 - 120.  
GAO De, JING Quanrong, XU Feng. Compression property analysis of plant straw packaging container[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3): 117 - 120. (in Chinese)
- 17 KARALEKAS D, RAPTI D, PAKALIAKIS G, et al. Numerical and experimental investigation of the deformational behaviour of plastic containers[J]. Packaging Technology and Science, 2001, 14(5): 185 - 191.
- 18 宗大全, 朱弟雄. 聚酯瓶生产技术[J]. 塑料, 1999(4): 40 - 42.  
ZONG Daquan, ZHU Dixiong. Processing technology of PET bottle[J]. Plastics, 1999(4): 40 - 42. (in Chinese)
- 19 李炎辉, 胡青春. PET瓶基于 ABAQUS 的轴压分析[J]. 包装工程, 2009, 30(10): 18 - 20.  
LI Yanhui, HU Qingchun. Analysis of axial pressure of pet bottle based on ABAQUS[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(10): 18 - 20. (in Chinese)
- 20 沃德 I M. 固体高聚物的力学性能[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- 21 GB/T 1040.1—2006 塑料拉伸性能的测定 第1部分: 总则[S]. 2006.
- 22 GB/T 1040.3—2006 塑料拉伸性能的测定 第3部分: 薄膜和薄片的试验条件[S]. 2006.
- 23 郭太松. PET 饮料瓶轻量化设计研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
GUO Taisong. Research and application of lightweight design for PET beverage bottle[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012. (in Chinese)