



张阔, 刘洪杰, 李建平, 刘树腾, 李绍波, 徐硕. 管道输送装置苹果下落过程分析与仿真[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(4): 152-163.

ZHANG Kuo, LIU Hongjie, LI Jianping, LIU Shuteng, LI Shaobo, XU Shuo. Analysis and simulation of the apple falling process in pipeline transportation system[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(4): 152-163.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.04.13

管道输送装置苹果下落过程分析与仿真

张阔¹ 刘洪杰^{1,2} 李建平^{1,2*} 刘树腾¹ 李绍波¹ 徐硕¹

(1. 河北农业大学 机电工程学院, 河北 保定 071001;

2. 河北省智慧农业装备技术创新中心, 河北 保定 071001)

摘要 针对苹果采后管道输送过程中果实碰撞损伤较大的问题, 对苹果在输送管道内下落的运动规律及管道输送装置最优参数组合进行研究。应用 Ansys Workbench LS-DYNA 软件进行苹果下落动力学仿真分析, 并建立苹果在输送管道内下落的动力学模型, 理论分析与仿真模拟相结合探究苹果在管道内的运动规律; 以输送管道曲率半径、苹果果径和缓冲材料类型为因素, 以苹果与果筐碰撞时的等效应力为试验指标, 进行单因素仿真试验和 3 因素 3 水平正交试验, 获得管道输送装置最优参数组合; 应用对标试验对苹果输送过程仿真结果的可靠性进行验证。单因素试验结果表明: 随着输送管道曲率半径的增大, 苹果与果筐碰撞位置越靠近筐底, 苹果与果筐碰撞时的等效应力逐渐增大; 随着苹果果径的增大, 苹果与果筐碰撞时的等效应力逐渐增大; 缓冲材料对缓冲效果的影响顺序为, 珍珠棉>EVA 泡棉>保温保湿带>气泡膜>瓦楞纸衬垫。正交试验结果表明: 3 个因素对响应值影响均显著, 显著程度由大到小为输送管道曲率半径>缓冲材料类型>苹果果径。当苹果果径为 75 mm 时管道输送装置最优参数组合为输送管道曲率半径 200 cm、缓冲材料为珍珠棉, 苹果与果筐撞击时的等效应力最小为 26.48 kPa, 管道输送装置对苹果保护作用最好。建立的苹果管道下落模型能准确模拟苹果下落的真实过程, 可为设计与优化苹果管道输送装置提供依据。

关键词 苹果; 管道输送; 动力学仿真; 等效应力

中图分类号 S22

文章编号 1007-4333(2024)04-0152-12

文献标志码 A

Analysis and simulation of the apple falling process in pipeline transportation system

ZHANG Kuo¹, LIU Hongjie^{1,2}, LI Jianping^{1,2*}, LIU Shuteng¹, LI Shaobo¹, XU Shuo¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China;

2. Hebei Province Smart Agriculture Equipment Technology Innovation Center, Baoding 071001, China)

Abstract In response to the significant issue of fruit collision damage during the post-harvest pipeline transportation of apple, research is conducted on the motion laws of apples falling within the pipeline and the optimal parameter combination for pipeline transportation devices. ANSYS Workbench LS-DYNA software was used to analyze the dynamic simulation of apple falling, and a dynamic model of apple falling within the pipeline was established. A theoretical analysis was combined with simulation to explore the motion laws of apples within the pipeline. Taking the curvature radius of transportation pipelines, the diameter of apples, and the type of buffering materials as factors, single-factor simulation experiments and

收稿日期: 2023-09-12

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系苹果创新团队现代果园装备与智能化项目(HBCT2023120202); 财政部 农业农村部 国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-27)

第一作者: 张阔(ORCID: 0009-0004-4001-7365), 硕士研究生, E-mail: zhangkuo0035@163.com

通讯作者: 李建平(ORCID: 0000-0003-2807-3888), 教授, 主要从事机械装备与自动控制研究, E-mail: ljpd327@126.com

a 3-factor and 3-level orthogonal experiment were conducted with the equivalent stress between apples and fruit baskets during the collision as the experimental indicator to obtain the optimal parameter combination for the pipeline transportation devices. Benchmark tests were applied to validate the reliability of the simulated apple transportation process. The results of single-factor experiments showed that: With the increasing of the curvature radius of the transportation pipelines, the positions of collisions between apples and fruit baskets moved closer to the bottom of the baskets, and the equivalent stress during collision increased gradually. With the increasing of the diameter of apples, the equivalent stress during collision also increased gradually. The impact of buffering materials on the buffering effect in descending order was as follows: pearl cotton>EVA foam>thermal insulation and moisture retention belt>bubble film>corrugated paper lining. The results of the orthogonal experiments showed that all the three factors had a significant impact on the response value, with the curvature radius of transportation pipelines having the greatest impact, followed by the type of buffering materials, and then the diameter of apples. When the diameter of apples was 75 mm, and the optimal parameter combination for the pipeline transportation devices was the curvature radius of 200 cm with pearl cotton as the buffering material, resulting in the minimum equivalent stress of 26.48 kPa during the collision between apples and fruit baskets. In conclusion, the pipeline transportation devices provided the best protection for apples. The model established for apple falling in pipelines accurately simulated the real falling process of apples, which can provide a scientific basis for designing and optimizing apple pipeline transportation devices.

Keywords apple; pipeline transport; dynamic simulation; equivalent stress

目前我国苹果主要采用人工或果园辅助作业平台进行采摘,采摘效率较低,且采摘过程中挤压等易对苹果造成损伤^[1-2];采用管道输送装置辅助采摘苹果能有效提高果实采摘效率,但在管道输送过程中会存在果实与果实、果实与管道内壁间的碰撞与摩擦,造成果实碰撞损伤^[3]。近年来,已有研究提出了提高管道输送装置采摘效率、减少输送过程中的机械损伤的方法:1)采用正压式气力输送系统并对管道气力输送装置结构进行参数优化,实现苹果无损输送^[4-6];2)利用真空管道进行果实输送,在输送管道内设置缓冲泡沫,降低苹果在输送管道内的运动速度,减缓苹果与管壁的撞击力度,达到果实减损的目的^[7-9];3)自动采摘机器人采摘苹果,采摘后经管道输送落入收集装置,通过在输送管道末端设置减速装置、瓣膜缓冲装置实现苹果减损^[10-11];4)利用有限元或数学建模的方法建立跌落高度、跌落次数等与苹果损伤程度之间的关系^[12-14],分析了苹果输送过程的损伤。以上研究均取得了良好的采摘效果,但已有研究只考虑了苹果落入收集装置后的损伤情况,对苹果在管道内的输送过程及果实与管道内壁、果实与果筐之间的碰撞损伤情况研究较少,因此还有必要研究苹果在管道输送过程的运动规律,用于优化管道输送装置参数以达到更好的采摘效果。

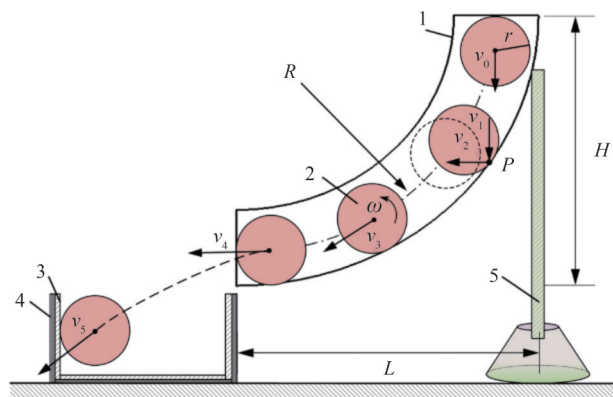
本研究拟采用Ansys Workbench LS-DYNA软件对苹果采摘后利用管道输送时苹果在管道内下落过程进行仿真模拟,分析苹果下落过程运动规律。以输送管道曲率半径、苹果果径和缓冲材料种类为影响因素,以苹果与果筐碰撞时的等效应力为试验指标,通过单因素仿真试验确定各因素对试验指标的影响规律;基于单因素仿真试验结果进行正交试验响应面分析,获得最优参数组合,并验证其可靠性,以期研究苹果管道输送装置提供依据。

1 管道内苹果下落动力学模型

苹果采摘后经管道输送装置落入果筐内,减少人工弯腰效果一直腰摘果的过程,实现果实采摘。管道输送装置包括输送管道、管道支架、果筐、缓冲材料(图1)。

苹果在管道内的下落运动过程相当复杂,受管道形状(曲率半径、弯曲形式等),苹果几何形状(苹果果径、圆度等),管道固有属性(材料、摩擦因数)等诸多因素影响。

苹果沿管道从入口下落至果筐的运动过程主要包括:苹果以初速度 v_0 做自由落体运动的过程;苹果以入射速度 v_1 与管道壁面碰撞的过程及碰撞后以速度 v_2 回弹的回弹过程;苹果以角速度 ω 沿管道壁面的滚动过程;苹果以抛射速度 v_4 从输送管道出口



1. 输送管道; 2. 苹果; 3. 缓冲材料; 4. 果筐; 5. 管道支架

1. Conveying pipeline; 2. Apple; 3. Buffer material; 4. Fruit basket;
5. Fruit basket support

P 为碰撞点。 H 和 L 分别为输送管道垂直高度和输送管道水平长度; R 和 r 分别为输送管道曲率半径和苹果半径。 v_0 、 v_1 、 v_2 、 v_3 、 v_4 和 v_5 分别为苹果的初始下落速度、入射速度、反弹速度、滚动下落速度、抛射速度和苹果与果筐的碰撞速度; ω 为苹果的角速度。

P is the collision point. H and L are the vertical height and horizontal length of the conveying pipeline. R and r are the curvature radius and apple radius of the conveying pipe, respectively. v_0 , v_1 , v_2 , v_3 , v_4 and v_5 are the initial falling velocity, incident velocity, rebound velocity, rolling falling velocity, ejection velocity and the collision velocity between the apple and the fruit basket, respectively. ω is the angular velocity of the apple's rotation.

图1 管道输送装置及苹果下落过程示意图

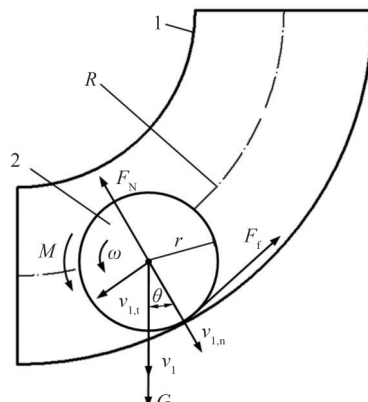
Fig. 1 Schematic diagram of the pipeline transport device and the apple falling process

的抛射过程和苹果与果筐的碰撞过程。由于苹果在管道内下落过程中回弹、变形等过程运动距离短且涉及能量变化较复杂,为便于分析计算,将苹果果实简化成近似直径的球形果实^[15-16]。结合实际采摘情况,以单个苹果在管道内下落过程为代表,分析苹果在管道内运动过程,苹果与管道内壁碰撞、苹果在管道内滚动、苹果从输送管道出口抛射的运动状态。

1.1 苹果在管道内运动分析

苹果由输送管道口进入管道,经自由落体运动后与管道内壁接触,苹果在输送管道内所受的力主要包括重力(G)、管道给苹果的支持力(F_N)、苹果与管道之间的摩擦力(F_f)。图2为苹果在弯管内的受力及运动示意图。依据动力学基本方程^[17]苹果下落过程的动力学模型^[18-19]为:

$$m \frac{dv_{1,n}}{dt} = G \sin \theta - F_f \quad (1)$$



1. 输送管道; 2. 苹果

1. Conveying pipeline; 2. Apple

F_N 、 F_f 和 G 分别为管道对苹果的支持力、苹果与管道间的摩擦力和重力; M 为苹果所受合力矩; θ 为 F_N 与 G 夹角的补角; v_1 为苹果的入射速度; R 、 r 和 ω 同图1。

F_N , F_f and G are the supporting force of the pipe on the apple and the friction force between the apple and the pipe, respectively. M is the moment of the apple. θ is the complement of the Angle between gravity and the supporting force. v_1 is the incident velocity of the apple. R , r , and ω are shown in Fig. 1.

图2 苹果下落受力及运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the force and motion of apple falling

$$m \frac{dv_{1,t}}{dt} + m \frac{v_{1,t}^2}{R} = F_N - G \cos \theta \quad (2)$$

$$\frac{2}{5} m r^2 \frac{d\omega}{dt} = M \quad (3)$$

式中: m 为苹果质量,g; r 为苹果半径,mm; R 为输送管道的曲率半径,mm; $v_{1,n}$ 为苹果法向运动速度,m/s; $v_{1,t}$ 为苹果切向运动速度,m/s; F_f 为苹果与管道间的摩擦力,N; F_N 为管道对苹果的支持力,N; θ 为 F_N 与 G 的夹角的补角,(°); ω 为苹果的角速度,rad/min; M 为苹果所受的合力矩,N·m。

1.2 苹果与管道内壁碰撞过程分析

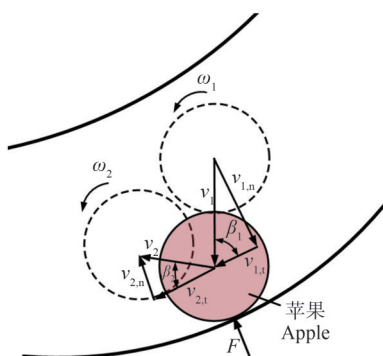
跌落碰撞是引起果品损伤的主要原因^[2],苹果与管道内壁碰撞模型见图3。

1.2.1 苹果与管道内壁碰撞分析

苹果与管道内壁碰撞后,其平动动量与角动量都发生变化,改变苹果的运动状态,根据动量定理和角动量定理得到苹果碰撞过程的动力学模型^[18]:

$$mv_{2,t} - mv_{1,t} = G \cos \beta_1 T - f T \quad (4)$$

$$mv_{2,n} - mv_{1,n} = (F_N - G \sin \beta_1 + \frac{mv_{1,t}v_{1,t}}{R}) T + F T \quad (5)$$



v_2 为碰撞后苹果的反弹速度; ω_1 和 ω_2 分别为碰撞前和碰撞后苹果的角速度。 β_1 和 β_2 分别为苹果入射角和反射角。 v_1 和 F 同图2。

v_2 is the rebound speed of the apple after collision; ω_1 and ω_2 are the angular velocities of the apples before and after collision, respectively. β_1 and β_2 are the apple incidence and reflection angles, respectively. v_1 and F are shown in Fig. 2.

图3 苹果与管道内壁碰撞模型

Fig. 3 Apple collision model with the inner wall of the pipeline

$$\left(\frac{2}{5}mr^2\right)\omega_2 - \left(\frac{2}{5}mr^2\right)\omega_1 = MT + rfFT \quad (6)$$

式中: $v_{2,t}$ 和 $v_{2,n}$ 分别为碰撞后苹果反弹的切向速度和法向速度,m/s; ω_1 和 ω_2 分别为碰撞前和碰撞后苹果的角速度,rad/min; F 为苹果对管道内壁的撞击力,N; f 为管道与苹果摩擦因数; β_1 和 β_2 分别为苹果入射角和反射角,(°); T 为碰撞时间,s。

1.2.2 苹果与管道壁面碰撞恢复系数

碰撞恢复系数为碰撞后法向分离速度 $v_{2,n}$ 与碰撞前法向接近速度 $v_{1,n}$ 的比值^[17],碰撞恢复系数是表征碰撞中能量损失的重要参数。苹果与管道内壁碰撞时,苹果表面与管道壁面相切,假定苹果与管道碰撞不发生滑移,苹果垂直下落与管壁发生撞击。根据速度矢量三角形几何关系(图3)碰撞恢复系数 e ^[20]为:

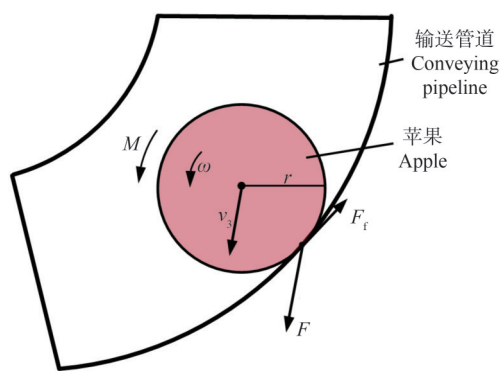
$$e = \frac{v_{2,n}}{v_{1,n}} \quad (7)$$

式中: $v_{1,n} = v_1 \sin \beta_1$, $v_{2,n} = v_2 \sin \beta_2$,其中 v_1 和 v_2 分别为碰撞前苹果入射速度和碰撞后苹果反弹速度,m/s。完全弹性碰撞时碰撞恢复系数为1,表示碰撞过程没有能量损失。实际苹果与输送管道内壁碰撞可能会发生反弹,并且会有一定的能量损失,碰撞恢复系数取值为0~1。

1.3 苹果在管道内滚动过程分析

苹果在管道内的滚动过程发生在苹果与管道

内壁碰撞后,碰撞过程伴随着能量损失,苹果的部分动能转化为苹果与输送管道的内能,使苹果运动速度减小。假定苹果发生纯滚动,即忽略苹果在运动中发生的滚滑现象。图4示出苹果在管道内滚动过程。



r 、 ω 和 v_3 同图1; F 、 F_t 和 M 同图2。

r , ω and v_3 are shown in Fig. 1; F , F_t and M are shown in Fig. 2.

图4 苹果在管道内滚动过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the apple rolling process inside the pipeline

在输送管道内苹果以滚动速度 v_3 与管道内壁碰撞,管道内壁对苹果的摩擦力 F_t ,方向与苹果运动方向相反,碰撞力 F 和摩擦力 F_t 对苹果产生力矩,当该力矩克服苹果的转动惯量时苹果发生转动。苹果发生滚动的条件为:

$$(F + F_t) \times r \geq \frac{2}{5}mr^2 \frac{d\omega}{dt} \quad (8)$$

当苹果与管道内壁的摩擦力和苹果与管道内壁的撞击力产生的外力矩大于苹果的转动力矩时苹果除发生定轴转动外还会沿管道内壁滚动。

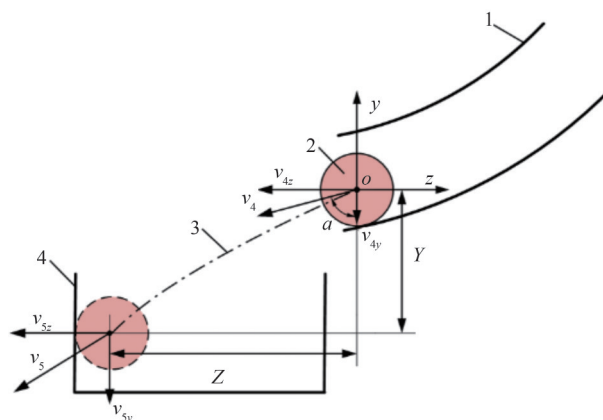
1.4 苹果在管道出口的抛射过程分析

苹果在管道输送装置出口以抛射的形式下落至果筐内与果筐发生碰撞^[21],苹果抛射过程见图5。

在苹果切面上,以苹果圆心 o 为原点,水平方向为 z 轴,垂直于 z 轴且通过原点 o 的直线为 y 轴建立坐标系,苹果的圆心初始坐标为(0,0),苹果在管道出口抛射过程的运动方程如下。

t 时刻,苹果速度为:

$$\begin{cases} v_z = v_4 \sin \alpha \\ v_y = v_4 \cos \alpha + gt \end{cases} \quad (9)$$



1. 输送管道; 2. 苹果; 3. 运动轨迹; 4. 果筐

1. Conveying pipeline; 2. Apple; 3. Motion trajectory; 4. Fruit basket

Z 和 Y 分别为碰撞时苹果的水平位移和竖直位移。 v_4 和 v_5 分别为苹果的抛射速度和碰撞速度。 α 为抛射速度与 y 轴的夹角。

Z and Y are the horizontal and vertical displacement of the apple during collision. v_4 and v_5 are the projectile velocity and collision velocity of the apple, respectively. α is the angle between the projectile velocity and the y axis.

图5 苹果抛射过程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of apple projectile motion

苹果圆心 o 坐标为:

$$\begin{cases} z_t = v_4 \sin \alpha t \\ y_t = v_4 \cos \alpha t + \frac{1}{2} g t^2 \end{cases} \quad (10)$$

由方程(10)得到苹果抛射轨迹方程:

$$y = \frac{z}{\tan \alpha} + \frac{1}{2} g \frac{z^2}{(v_4 \sin \alpha)^2} \quad (11)$$

式中: v_4 为苹果的抛射速度, m/s; α 为苹果抛射速度与 y 轴的夹角, ($^\circ$)。

由输送管道内苹果下落的动力学模型, 对苹果下落过程分析可知, 苹果与管道内壁碰撞时的入射速度、入射角度和苹果果径对苹果在管道内反弹、滚动等运动状态有影响; 苹果在输送管道出口的抛射速度和抛射速度与竖直方向的夹角对苹果与果筐的碰撞位置有影响。

2 仿真模型建立与数值模拟

2.1 试验方案

进行管道输送时, 苹果与果筐碰撞的撞击力越大, 碰撞对苹果造成的损伤程度越大。以输送管道曲率半径、苹果果径和果筐内缓冲材料种类为影响因素, 以苹果下落至果筐时苹果与果筐碰撞的等效应力为试验指标, 对管道输送装置进行参数优化。单因素仿真试验确定各因素的水平范围, 多因素试验得到各因素的交互作用, 并确定最优参数组合。

1) 因素选取。

现代化矮砧密植型果园, 通常果树株距为 0.8~1.5 m, 行距 3.5~4.0 m, 高纺锤形果蔬树高 3.5~4.0 m^[22]。输送管道配合采摘作业平台进行苹果输送, 作业平台高度 1.5 m, 因此管道高度设置为 1.5 m, 横向长度 2 m, 为保证苹果能够顺利通过管道输送至果筐, 管径选择 110 mm。由碰撞模型和滚动模型可知, 苹果与管道运动状态与苹果与管道碰撞时入射角有关, 即与管道弯曲程度有关。受果树行距及输送装置尺寸影响, 输送管道曲率半径需大于 122.6 cm。当输送管道曲率半径为 200 cm 时, 输送管道出口与水平方向相切, 输送管道曲率半径小于 200 cm 时由于管道出口与水平方向呈向上的倾角, 导致苹果不易落入果筐。因此, 选取输送管道曲率半径为 200、300、400、500、600 和 700 cm 6 个水平。为研究苹果果径对管道输送的影响选取 65、70、75、80、85 和 90 mm 6 个水平。选择市面上常见的包装材料珍珠棉、EVA 泡棉、保温保湿带、气泡膜、瓦楞纸板衬垫作为苹果管道下落果筐缓冲材料。

2) 仿真模型材料参数测定。

为得到苹果在管道内下落过程仿真模型的材料参数, 使用排水法测量苹果、硅胶软管、缓冲材料、果筐的密度, 利用 CF-200 良衡数字电子秤(量程 3 000 g, 精度 0.1 g)对试验样品称重后, 将试验

材料完全浸入烧杯(量程1 000 mL,精度10 mL)记录排开水体积,记录试验样品重量、体积用于计算样品密度。利用WDW-5E型万能试验机对苹果果肉进行压缩试验,对硅胶软管、缓冲材料、果筐进行拉伸试验,试验前苹果果肉制成圆柱体式样,设置

压缩试验速度为5 mm/min,将拉伸试验样品分别裁剪成200 mm×30 mm×4 mm的长条^[23],设置拉伸速度为50 mm/min,每种样品试验3次,导出保存到万能试验机的试验数据,根据式(12)计算每种材料的弹性模量。各仿真模型的材料参数见表1。

表1 苹果管道输送仿真材料参数

Table 1 Simulated material parameters for apple pipeline transport

材料 Material	密度(ρ)/(g/cm ³) Density	弹性模量(E)/MPa Elastic modulus	泊松比(ϵ) Poisson's ratio
苹果 Apple	0.92	3.29	0.33
硅胶管 Silicone tube	1.23	4.15	0.031
珍珠棉 EPE foam	0.018	1.30	0.064
EVA泡棉 EVA foam	0.074	1.06	0.013
保温保湿带 Thermal and moisturizing band	0.21	1.12	0.031
瓦楞纸板衬 Corrugated paper	1.33	314	0.315
气泡膜 Bubble film	0.03	1.49	0.072
果筐 Fruit basket	0.958 5	1 080	0.418 3

弹性模量计算式^[24]为:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} = \frac{F/A}{dL/L} = \frac{FL}{dLA} \quad (12)$$

式中: E 为材料的弹性模量,MPa; $\Delta\sigma$ 为拉伸应力,MPa; $\Delta\epsilon$ 为拉伸应变,mm; F 为拉断材料的最大拉力,N; A 为缓冲材料的截面积,mm²; dL 和 L 分别为样本材料的伸长量和原始长度,mm。

2.2 仿真模型建立

以富士苹果为研究对象,将其视为各向同性的线弹性材料,利用三维制图软件Autodesk Inventor Professional 2023(Autodesk, 2023, U. S.)对苹果、输送管道、果筐等进行等比建模,将模型导入Ansys Workbench LS-DYNA(ANSYS, 2022R1, U. S.)软件进行仿真模拟,在LS-DYNA中设定模型的材料属性,对苹果、输送管道、果筐和缓冲材料进行网格划分,为增加仿真结果的准确性对苹果模型和缓冲材料模型进行面网格加密,模型网格单元尺寸10 mm,面网格单元尺寸5 mm,输送管道和果筐网格单元尺寸为10 mm和20 mm,模型网格数量130 811个。

模拟苹果受重力作用自由下落与管道内壁发

生碰撞后滚落至果筐的过程,初始条件为对仿真模型施加的标准地球重力($g=9.81 \text{ m/s}^2$),方向垂直于地面,边界条件为管道与果筐底部固定支撑,苹果与果筐设置摩擦接触,设定仿真时间为1.2 s,模拟苹果下落至果筐的整个过程,仿真结果输出苹果与果筐碰撞的等效应力;为研究缓冲材料对苹果损伤的影响,采用等效速度碰撞的方法进行苹果跌落仿真,初始条件为苹果到缓冲材料间的落差,边界条件为缓冲材料模型底部施加固定支撑,跌落方向设置为重力方向,由于苹果与缓冲材料碰撞时间较短,仿真时间设定为0.005 s,仿真结果输出苹果与缓冲材料碰撞时的等效应力。

2.3 苹果在管道内的下落轨迹分析

将输送装置模型中心面设置为投影面,分析每一时刻的苹果运动状态^[25],生成管道内苹果的运动轨迹(图6)。苹果由输送管道入口进入管道后,经过一段距离的自由落体运动与输送管道内壁下弧面发生碰撞;苹果与管壁接触后反弹,反弹后再次跌落至管道发生碰撞,由于摩擦力作用,苹果逐渐转变为滚动状态;苹果运动至输送管道出口,由于不同曲率半径的输送管道出口与水平夹角 Φ 不同,

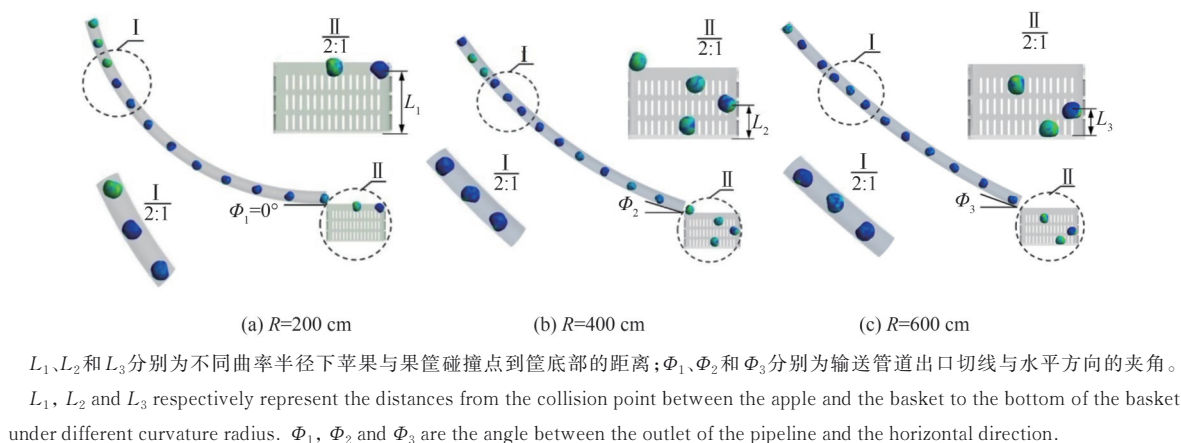
图6 不同曲率半径(R)管道内苹果的运动轨迹

Fig. 6 The motion trajectories of apples inside the pipeline under different curvature radius

导致苹果与果筐撞击位置发生变化。输送管道曲率半径越小管道出口与水平方向的夹角 Φ 越小,苹果与果筐撞击点与筐底的距离 L 越远。当输送管道曲率半径为200 cm时(图6(a)),管道出口与水平方向的夹角 $\Phi_1=0^\circ$,苹果从管道出口做平抛运动,苹果与果筐碰撞位置 L_1 距离筐底最远。

3 结果与分析

3.1 单因素试验

3.1.1 曲率半径对苹果运动状态的影响

进行输送管道曲率半径的单因素仿真试验时,苹果果径为70 mm,果筐不设置缓冲材料,输送管道曲率半径 R 对苹果与果筐碰撞的等效应力的影响见图7。 $R < 200$ cm时,苹果由管道出口以一定初速度抛出未落入果筐,因此,只对 $R \geq 200$ cm的输送管道进行分析。随着输送管道曲率半径的增加,苹果与

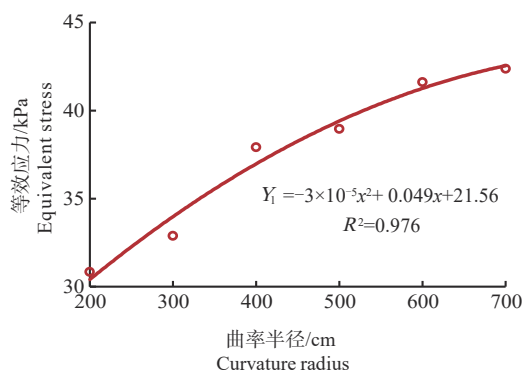


图7 曲率半径对苹果与果筐碰撞等效应力的影响

Fig. 7 Effect of curvature radius on the equivalent stress of collision between apple and fruit basket

果筐碰撞的等效应力呈逐渐增大的趋势,回归方程为 $Y_1 = -3 \times 10^{-5}x^2 + 0.049x + 21.56$ 。输送管道曲率半径为200~400 cm时,苹果与果筐碰撞时的等效应力相对较小,对苹果的缓冲效果较好,多因素试验时,输送管道曲率半径选取为200~400 cm。

3.1.2 果径对苹果运动状态的影响

进行苹果果径单因素仿真试验时,输送管道曲率半径为200 cm,果筐不设置缓冲材料。苹果果径对苹果与果筐碰撞等效应力的影响见图8。随着苹果果径的增大苹果与果筐碰撞的等效应力逐渐增大,呈近似线性递增趋势,回归方程为 $Y_1 = 0.0086x^2 - 0.70x + 37.85$ 。根据实际苹果果径占比情况,多因素试验时,苹果果径选取70、75和80 mm 3个水平。

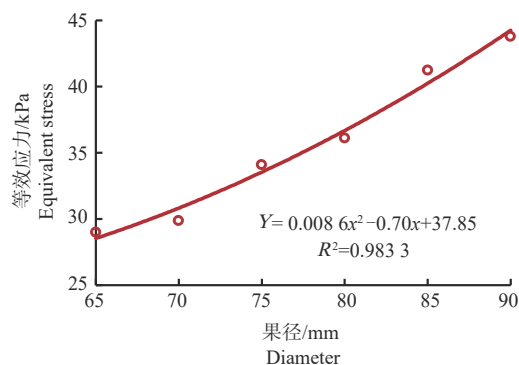


图8 苹果果径对苹果与果筐碰撞等效应力的影响

Fig. 8 Effect of apple diameter on the equivalent stress of collision between apple and fruit basket

3.1.3 缓冲材料对苹果运动状态的影响

进行缓冲材料单因素仿真试验时,设置苹果与

缓冲材料间的落差为 150 cm,苹果果径为 85 mm,缓冲材料厚度 5 mm,仿真结束后输出苹果与缓冲材料碰撞时的等效应力。苹果与 5 种缓冲材料碰撞的等效应力大小顺序为:珍珠棉>EVA 泡棉>保温保湿带>气泡膜>瓦楞纸衬垫。等效应力越大,越容易对苹果造成损伤。因此,本研究最佳缓冲材料为珍珠棉,珍珠棉作为缓冲材料时的等效应力云图见图 9。

3.2 多因素试验

3.2.1 试验结果及方差分析

对输送管道曲率半径、苹果果径和缓冲材料种类交互作用对苹果运动的影响进行试验研究,试验因素及水平见表 2。

在单因素仿真试验基础上,利用 Design-Expert 13 软件进行试验设计,试验方案及结果见表 3。方差分析见表 4。得到的管道曲率半

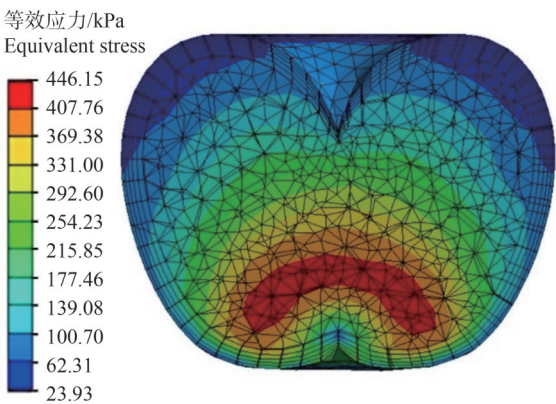


图 9 苹果与珍珠棉碰撞的等效应力云图

Fig. 9 Equivalent stress cloud map of the collision between apple and pearl-cotton

径 x_1 、苹果果径 x_2 和缓冲材料 x_3 对苹果与果筐碰撞时的等效应力 Y_1 的二次多项式回归方程为：

表 2 苹果管内下落试验因素与水平

Table 2 Factors and levels of apple tube fall test

水平 Level	因素 Factor		
	x_1 ,管道曲率半径/cm	x_2 ,苹果果径/mm	x_3 ,缓冲材料类型
	Pipe radius of curvature	Apple diameter	Buffer material type
−1	200	70	珍珠棉
0	300	75	EVA 泡棉
1	400	80	保温保湿带

表 3 参数优化试验方案及结果

Table 3 Test and results of Parameter optimization

序号 Number	因素水平 Factor level			Y_1 /kPa	序号 Number	因素水平 Factor level			Y_1 /kPa
	X_1	X_2	X_3			X_1	X_2	X_3	
1	1	0	−1	36.141	10	1	−1	0	36.249
2	−1	1	0	30.315	11	0	−1	1	32.127
3	0	−1	−1	30.917	12	0	0	0	33.847
4	−1	0	1	29.395	13	1	1	0	36.946
5	0	0	0	33.698	14	1	0	−1	34.679
6	0	0	0	33.998	15	0	0	0	33.982
7	0	0	0	34.071	16	0	1	1	34.567
8	−1	0	−1	26.499	17	0	1	−1	32.233
9	−1	−1	0	27.004					

注: X_1 , X_2 和 X_3 分别为管道曲率半径、苹果果径和缓冲材料类型的水平值; Y_1 为苹果与果筐碰撞时的等效应力。
Note: X_1 , X_2 and X_3 are the horizontal values of pipe curvature radius, apple diameter and buffer material type, respectively; Y_1 is the equivalent stress when the apple collides with the fruit basket.

$$Y_1 = -131.99 + 0.048x_1 + 2.3722x_2 - 1.4348x_3 - 0.0026x_1x_2 - 0.0071x_2x_3 + 0.0562x_1x_3 - 0.0102x_2^2 - 1.2041x_3^2 \quad (13)$$

模型显著性 $P<0.000\ 1$,回归方程极显著,能够描述各因素与响应值的关系;失拟项 $P>0.05$,失拟项不显著,说明无失拟因素存在,误差较小;决定系数 $R^2=0.997\ 8$,校正系数

$\text{Adjusted } R_{\text{adj}}^2=0.995\ 5$,二者相接近,说明准确性及通用性较好;一次项(x_1 、 x_2 、 x_3),交互项(x_1x_2)和二次项(x_1^2 、 x_3^2)对苹果受力影响极显著,二次项(x_2^2)和交互项(x_1x_3 、 x_2x_3)对苹果受力的影响显著。各因素对苹果与果筐碰撞时等效应力影响的主次顺序为管道曲率半径>缓冲材料类型>苹果果径。

表4 影响苹果与果筐碰撞等效应力的方差分析

Table 4 Analysis of variance affecting the equivalent stress of collision between apple and fruit basket

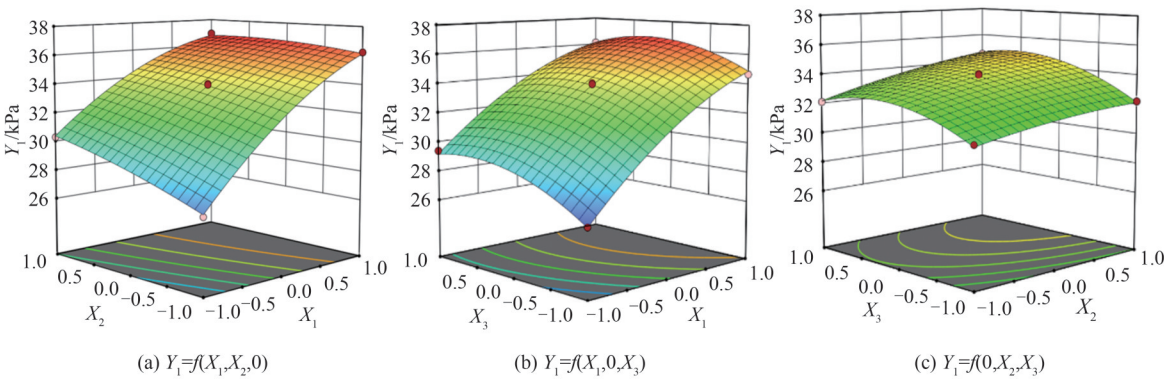
来源 Source	<i>F</i>	<i>P</i>	来源 Source	<i>F</i>	<i>P</i>
模型 Model	396.47	<0.000 1**	X_2X_3	7.60	0.028 2*
X_1	2 853.66	<0.000 1**	X_1^2	108.87	<0.000 1**
X_2	181.31	<0.000 1**	X_2^2	6.54	0.037 7*
X_3	187.81	<0.000 1**	X_3^2	146.89	<0.000 1**
X_1X_2	41.10	0.000 4**	失拟项 Lack of fit	3.11	0.151
X_1X_3	12.37	0.001*			

注:**和*分别表示极显著($P<0.01$)和显著($P<0.05$)。
Note: ** and * mean extremely significant ($P<0.01$) and significant ($P<0.05$), respectively.

3.2.2 响应面分析

管道曲率半径与苹果果径交互作用对苹果与果筐碰撞的等效应力影响最显著,当缓冲材料为珍珠棉时,随着管道曲率半径和苹果果径的增大,苹果与果筐碰撞时的等效应力逐渐增大(图10(a))。当苹果果径为75 mm时,随着

管道曲率半径的增大,苹果与果筐碰撞时的等效应力逐渐增大,缓冲材料为珍珠棉时等效应力最小(图10(b))。在管道曲率半径为200 cm的情况下,随着苹果果径的增大,苹果与果筐碰撞时的等效应力逐渐增大,缓冲材料为珍珠棉时等效应力最小(图10(c))。



X_1 、 X_2 和 X_3 分别为管道曲率半径、苹果果径和缓冲材料的水平编码值; Y_1 为苹果与果筐碰撞时的等效应力。
 X_1 , X_2 and X_3 are horizontal coded values for pipe curvature radius, apple diameter and buffer material, respectively. Y_1 is the equivalent stress when the apple collides with the fruit basket.

图10 各因素交互作用对苹果与果筐碰撞等效应力的影响

Fig. 10 The impact of the interaction between various factors on the equivalent stress of apple and fruit basket collision

3.2.3 参数优化及验证

为获取苹果与果筐碰撞等效应力最小值,利用 Design-Expert 13 软件,在 3 因素 3 水平正交试验基础上进行优化,当苹果果径为 75 mm 时,管道输送装置最优参数组合为,输送管道曲率半径 200 cm、缓冲材料为珍珠棉,苹果与果筐撞击时的等效应力为 26.48 kPa。

按照最优参数组合,利用 Ansys Workbench LS-DYNA 显示动力学分析软件进行仿真试验,苹果表面等效应力和苹果与果筐碰撞接触力分别为 26.50 kPa 和 11.421 N。图 11 示出苹果与果筐撞击时的等效应力云图。

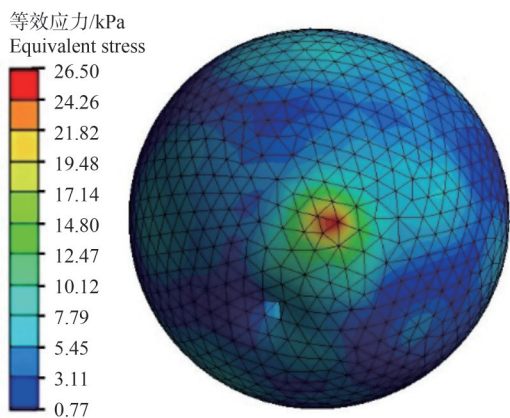


图 11 苹果与果筐撞击时的等效应力云图

Fig. 11 Equivalent stress cloud map during apple and fruit basket collision

3.3 试验验证

为检验仿真试验的准确性,进行管道输送装置内苹果下落与果筐碰撞加速度测试台架试验。试验于 2023-04-21 在河北农业大学工程实训楼进行。富士苹果,果径范围 70~85 mm。硅胶输送管道,管道内径 110 mm,晟鑫硅胶科技;缓冲材料珍珠棉,宁波新势力包装材料有限公司,厚度为 5 mm;维特加速度传感器,维特智能旗舰店;良衡数字电子秤,广州良衡电子有限公司。

装置参数设置为仿真试验得到的最优参数组合,输送管道曲率半径为 200 cm、苹果果径 75 mm、缓冲材料为珍珠棉。苹果与果筐碰撞的加速度由维特加速度传感器测量,测量时将加速度传感器放置在苹果内部。将苹果放入输送管道,苹果经管道输送后与果筐碰撞,进行 5 次重复试验记录加速度数据。

管道输送装置内苹果下落与果筐碰撞加速度测试试验结果见表 5,加速度平均值为 58.72 m/s²,苹果平均质量为 207.99 g,计算得到苹果与果筐碰撞力为 12.213 N,与仿真结果 11.421 N 相比,误差为 6.5%,误差在 10% 以内,证明仿真试验可靠。

表 5 管道输送装置内苹果下落与果筐碰撞加速度测试试验结果

Table 5 Test results of the collision acceleration between falling apple and fruit basket in pipeline conveying device

序号 Serial number	加速度/(m/s ²) Acceleration	苹果质量/g Apple weight
1	63.725	214.36
2	54.742	207.52
3	58.495	205.80
4	62.546	211.26
5	54.105	201.30
平均值 Average value	58.72	207.99

4 结 论

本研究基于单因素试验与正交试验相结合的方法,以输送管道曲率半径、苹果果径和缓冲材料类型为因素,以苹果与果筐碰撞时的等效应力为试验指标,进行单因素和 3 因素 3 水平正交试验,并获得管道输送装置最优参数组合,主要结论如下:

1)为研究苹果在管道输送装置中的运动规律,建立了管道内苹果下落动力学模型,对苹果与管道内壁碰撞、苹果在管道内滚动过程和苹果从管道出口的抛射过程进行了分析,管道曲率半径和苹果果径对苹果在管道内运动有显著影响。

2)单因素试验确定了各因素的较优水平范围,输送管道曲率半径为 200~400 cm;苹果果径为 70~80 mm;缓冲材料类型珍珠棉、保温保湿带和 EVA 泡棉。单因素仿真试验结果表明:随着输送管道曲率半径的增大,苹果与果筐碰撞时的等效应力逐渐增大;随着苹果果径的增大,苹果与果筐碰撞时的等效应力逐渐增大;缓冲材料对缓冲效果的影响顺序为,珍珠棉>EVA 泡棉>保温保湿带>气泡膜>瓦楞纸衬垫。

3)正交试验结果表明:输送管道曲率半径、苹

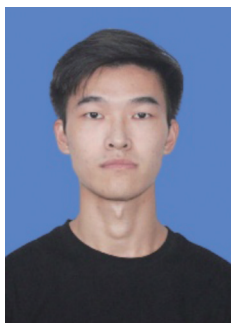
果果径和缓冲材料种类对苹果与果筐碰撞时的等效应力影响均显著,显著程度由大到小为输送管道曲率半径>缓冲材料类型>苹果果径。当苹果果径为75 mm时,管道输送装置最优参数组合为,输送管道曲率半径200 cm,缓冲材料为珍珠棉,此条件下苹果与果筐撞击时的等效应力为26.48 kPa。

参考文献 References

- [1] 陈青,殷程凯,郭自良,王金鹏,周宏平,蒋雪松.苹果采摘机器人关键技术研究现状与发展趋势[J].农业工程学报,2023,39(4):1-15
Chen Q, Yin C K, Guo Z L, Wang J P, Zhou H P, Jiang X S. Current status and future development of the key technologies for apple picking robots [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(4): 1-15 (in Chinese)
- [2] 胡广锐,卜令昕,张恩宇,寇倩雯,程玉明,赵健,陈军.苹果两向异性力学特性和跌落试验研究[J].农机化研究,2021,43(4):154-160
Hu G R, Bu L X, Zhang E Y, Kou Q W, Cheng Y M, Zhao J, Chen J. Experimental research of anisotropic mechanical properties and drop test of apples [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2021, 43(4): 154-160 (in Chinese)
- [3] 赵超超,孔德刚,霍俊伟,王业成,何宇,张韵.气吸式小浆果捡拾输送装置仿真与试验[J].农业工程学报,2016,32(17):32-39
Zhao Y C, Kong D G, Huo J W, Wang Y C, He Y, Zhang Y. Simulation and experiment of air-suction collecting and conveying equipment for small berry [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(17): 32-39 (in Chinese)
- [4] 陈春皓,王佳,张建路,李建平,王鹏飞,吕林硕.缓冲装置对苹果跌落冲击影响的试验研究[J].中国农业大学学报,2022,27(9):149-159
Chen C H, Wang J, Zhang J L, Li J P, Wang P F, Lv L S. Experimental study on the impact of buffer devices on the falling of apples [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(9): 149-159 (in Chinese)
- [5] 王佳,陈春皓,李建平,张阔.苹果管道气力输送装置参数优化与试验[J].中国农业大学学报,2023,28(8):259-271
Wang J, Chen C H, Li J P, Zhang K. Parameter optimization and experiment of the pneumatic conveying device of apple pipe [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(8): 259-271 (in Chinese)
- [6] 陈春皓,张建路,李建平,边永亮,刘洪杰,吕林硕,李绍波.苹果采摘管道气力输送进风装置参数优化[J].果树学报,2022,39(7):1308-1322
Chen C H, Zhang J L, Li J P, Bian Y L, Liu H J, Lv L S, Li S B. Parameter optimization of pneumatic conveying air inlet device in apple picking pipeline [J]. *Journal of Fruit Science*, 2022, 39(7): 1308-1322 (in Chinese)
- [7] Zhang Z, Heinemann P H, Liu J, Schupp J R, Baugher T A. Brush mechanism for distributing apples in a low-cost apple harvest-assist unit [J]. *Applied Engineering in Agriculture*, 2017, 33(2): 195-201
- [8] Schupp J, Baugher T, Winzeler E, Schupp M. Preliminary results with a vacuum assisted harvest system for apples [J]. *Fruit Notes*, 2011, 76(4): 1-5
- [9] Zhang Z, Heinemann P H, Liu J, Schupp J R, Baugher T A. Design and field test of a low-cost apple harvest-assist unit [J]. *Transactions of the ASABE*, 2016, 59(5): 1149-1156
- [10] Zhao D A, Lv J D, Ji W, Zhang Y, Chen Y. Design and control of an apple harvesting robot [J]. *Biosystems Engineering*, 2011, 110(2): 112-122
- [11] 杜博.苹果采摘机器人的机构设计及运动仿真[D].兰州:兰州理工大学,2022
Du B. Mechanism design and motion simulation of apple picking robot [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022 (in Chinese)
- [12] 卢立新,王志伟.苹果跌落冲击力学特性研究[J].农业工程学报,2007,23(2):254-258
Lu L X, Wang Z W. Dropping impact mechanical characteristics of apple [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(2): 254-258 (in Chinese)
- [13] 卢立新.跌落冲击下果实动态力学模型[J].工程力学,2009,26(4):228-233
Lu L X. Non-linear viscoelastic modeling of the fruits under dropping impact [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(4): 228-233 (in Chinese)
- [14] Stopa R, Szyjewicz D, Komarnicki P, Kuta T. Determining the resistance to mechanical damage of apples under impact loads [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 146: 79-89
- [15] 何晓东.苹果清洗损伤特性研究及无损清洗设备研制[D].合肥:安徽农业大学,2021
He X D. Research on apple cleaning damage characteristics and development of non-destructive cleaning equipment [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021 (in Chinese)
- [16] Cao M L, Zhang J L, Sun Y Z, Zhu J Y, Hu Y. A novel air-suction classifier for fresh sphere fruits in pneumatic bulk grading [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2023, 17(4): 3390-3402
- [17] 叶伟国.大学物理[M].北京:清华大学出版社,2012:34-43
Ye W G. *College Physics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 34-43 (in Chinese)
- [18] 沈鹏,曾凯,都东,李红克,张海泉.球床堆近等径球流管路气力输送动力学建模及应用[J].清华大学学报:自然科学版,2012,52(8):1075-1080
Shen P, Zeng K, Du D, Li H K, Zhang H Q. Dynamic modeling and application of pneumatic near-diameter spheres in pipeline transportation in a pebble bed reactor [J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2012, 52(8): 1075-1080 (in Chinese)
- [19] Liu H B, Du D, Han Z D, Zou Y R, Pan J L. Dynamic analysis and application of fuel elements pneumatic transportation in a pebble bed reactor [J]. *Energy*, 2015, 79: 33-39
- [20] 章广成,向欣,唐辉明.落石碰撞恢复系数的现场试验与数值计算[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1266-1273
Zhang G C, Xiang X, Tang H M. Field test and numerical calculation of restitution coefficient of rockfall collision [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(6): 1266-1273 (in Chinese)
- [21] 章豪.落石撞击对钢混组合梁桥上部结构的动力响应分析[D].武汉:武汉理工大学,2020
Zhang H. Dynamic response analysis of superstructure of steel-concrete composite beam bridge in rockfalls impact [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020 (in Chinese)
- [22] 范晓文.苹果多工位低损收获系统仿真研究[D].保定:河北农业大学,2020
Fan X W. Simulation study on multi-station and low-damage harvesting system used for apples [D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020 (in Chinese)
- [23] GB/T 6344—2008 软质泡沫聚合材料:拉伸强度断裂伸长率的测定[S].北京:中国标准出版社,2008
GB/T 6344—2008 Flexible cellular polymeric material: Determination of

- tensile strength and elongation at break [S]. Beijing: Standard Press of China, 2008 (in Chinese)
- [24] 杜昱雯. EPE 动态冲击的计算机仿真分析与研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2016
- Du Y W. Computer simulation analysis and study on dynamic impact properties of EPE [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2016 (in Chinese)
- [25] 姚颖杰, 王玉兴, 唐艳芹, 罗锡文. 水稻气力有序抛栽钵苗运动过程研究[J]. 农机化研究, 2019, 41(7): 159-165
- Yao Y J, Wang Y X, Tang Y Q, Luo X W. Research on the movement of paddy pot seedlings in the process of pneumatic ordered throwing transplantation [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2019, 41(7): 159-165 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 张阔, 硕士研究生, 现就读于河北农业大学机电工程学院机械专业, 研究方向为农业装备工程。参与研究河北省现代农业产业技术体系水果创新团队果园装备、国家现代农业(苹果)产业技术体系果园生产管理机械化项目等2项。在《中国农业科技导报》期刊发表论文1篇; 授权“一种果品运输减损装置”和“一种宽度可调的果箱输送装置及果箱输送系统”实用新型专利2项。



通讯作者简介: 李建平, 教授, 现任河北农业大学机电工程学院农业工程系党支部书记兼副主任。主要从事果园生产管理机械化及智能装备、生物生产自动化技术与装备的教学、科研和社会服务工作, 主持或主研完成国家重点研发计划课题等国家级省部级科研项目8项, 在研国家苹果产业技术体系、河北省现代农业产业技术体系等项目3项, 获省部级科学技术进步奖3项; 第一作者或通讯作者发表学术论文40余篇, 获授权发明专利17件, 实用新型专利120余件。