

苹果采摘管道气力输送进风装置参数优化

陈春皓, 张建路, 李建平*, 边永亮, 刘洪杰, 吕林硕, 李绍波

(河北农业大学机电工程学院, 河北保定 071000)

摘要:【目的】探究苹果采摘管道气力输送进风装置结构参数对苹果机械损伤的影响, 并获取结构优化参数。【方法】采用自建苹果管道气力输送装置试验台, 以进风口数量、管道出口与进风口间距离、进风口倾角、进风口内径为试验因素, 以风机与管道入口处压差和苹果损伤体积为评价指标, 进行单因素试验分析各因素对评价指标的影响规律; 基于单因素试验结果, 进行四因素三水平的正交试验, 采用极差分析法、方差分析法及交互作用比较分析试验结果, 得到优化的进风装置结构参数组合, 并进行验证试验。【结果】单因素试验结果表明: 随着进风口数量及管道出口与进风口间距离的增加, 管道内压力逐渐降低; 随着进风口倾角及进风口内径的增加, 压差及损伤体积呈先降低后增加的趋势。正交试验结果表明: 影响管道输送苹果机械损伤因素的主次顺序为进风口数量>进风口内径>进风口倾角>管道出口与进风口间距离。【结论】优化参数组合为进风口数量 1 个、风机与管道入口间距离 50 mm、进风口倾角 30°、进风口内径 44 mm。通过验证试验得到优化组合下压差为 82.341 6 Pa、损伤体积为 85.670 2 mm³, 试验结果均优于正交试验中的指标值。该研究可为采用管道气力装置高效低损输送苹果提供参考。

关键词: 苹果; 管道输送; 进风装置; 压差; 损伤体积; 试验优化

中图分类号: S661.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-9980(2022)07-1308-15

Parameter optimization of pneumatic conveying air inlet device in apple picking pipeline

CHEN Chunhao, ZHANG Jianlu, LI Jianping*, BIAN Yongliang, LIU Hongjie, LÜ Linshuo, LI Shaobo
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Agricultural University, Baoding 071000, Hebei, China)

Abstract: 【Objective】China is the largest apple producing country in the world. Picking is the most time-consuming work in apple production and labor cost for apple harvesting would account for 40% of the whole operation spending. Unreasonable picking and conveying methods would cause apple damage, and the quality of picking operation also could directly affect the transportation, processing and sales of apples. The labor force engaged in orchard operations had gradually decreased as the acceleration of urbanization. In addition, the traditional manual picking has low working efficiency, high labor intensity and high cost. Therefore, mechanical picking is urgently needed for modern apple industry in China. Pneumatic conveying device for convey apples after picking is necessary for mechanical picking. Ventilation in the conveying pipeline could reduce the bumping damage of apples and realize continuous picking and low-loss conveying of apples. The air inlet device could have great influence on the distribution of wind field and the change of wind pressure in the pipeline, so it is of great significance to study the air inlet device. 【Methods】In this experiment, high-quality Fuji fresh fruits were used as raw materials, and a self-built pneumatic conveying device test-bed for apples was tested. The number of air inlets, the distance between pipe outlet and air inlet, the inclination angle of the air inlet and the inner diameter of the air inlet were taken as test factors, and the pressure difference between fan and pipe inlet

收稿日期: 2021-11-22 接受日期: 2022-03-26

基金项目: 河北省现代农业产业技术体系水果创新团队果园装备岗(HBCT2018100205); 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系项目(CARS-27)

作者简介: 陈春皓, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为农业机械化与装备工程。Tel: 17332276527, E-mail: chenchunhao1998@163.com

*通信作者 Author for correspondence. Tel: 18131239989, E-mail: ljpd327@126.com

and apple damage volume were taken as evaluation indexes. In the single factor test, we analyzed the influence of the number of the air inlets and the distance between the outlet and the air inlet on the air pressure in the conveying pipeline by simulation method. We analyzed the influence law of the inclination angle of the air inlet and the inner diameter of the air inlet on the pressure difference and damage volume by the bench test method. Based on the results of a single factor experiment, the orthogonal experiment of four factors and three levels were carried out. The range analysis method was used to determine the primary and secondary relationship of each factor, the variance analysis method was used to judge the significance of each factor, and then the SPSS software was used to analyze the interaction of each factor, so as to obtain the optimized structural parameter combination of the air intake device, and carry out the verification test. 【Results】The single factor experiment showed that the maximum pressure decreased when the number of the air intakes increased. And as the pipe length increased, the wind pressure in the pipe increased first and then decreased. The orthogonal test results showed that the primary and secondary order of the factors affecting the mechanical damage of apples transported by pipeline were the number of the air inlets > the inner diameter of the air inlets > the inclination angle of the air inlets > the distance between the outlet of pipeline and the air inlets, and each factor had significant influence on the test indexes, and there was interaction between each factor. The optimized parameter combination should be that the number of air inlets was 1, the distance between the fan and pipe inlet was 50 mm, the inclination angle of the air inlet was 30, and the inner diameter of the air inlet was 44 mm. Through the verification test, the pressure difference and damage volume under the optimized combination would be 82.341 6 Pa and 85.670 2 mm³, and the test results were better than the index values in the orthogonal test. 【Conclusion】The parameter optimization method of the air inlet device of the apple pipeline pneumatic conveying proposed in this study is reliable, The optimization effect is obvious, and the test steps are controllable, which would provide a reference for the pipeline pneumatic device to convey apples with high efficiency and low consumption.

Key words: Apple; Pipeline transportation; Inlet device; Pressure drop; Damage volume; Experimental optimization

我国是苹果生产大国,苹果种植面积居世界首位^[1]。在苹果的生产作业中,采摘是最耗时费力的环节^[2],苹果收获采摘所用劳动力占整个作业环节的40%,采摘作业质量直接影响到苹果的运输、加工及销售^[3]。随着我国城镇化进程的加快,农业人口大幅度转移到城镇,从事果园作业的劳动力逐渐减少^[4],且传统的人工采摘需要进行登高、采摘、弯腰、放果等动作,工作效率低、劳动强度大、投入成本高,传统作业方式逐渐不能满足人们对苹果采摘输送的要求^[5-6],亟需一种机械装置来辅助苹果采摘输送作业。果农采摘时利用气力输送装置输送苹果可减少弯腰放果的动作,在输送管道内通风可降低苹果的磕碰损伤,提高苹果的经济效益,实现苹果的连续采摘、低损输送^[7-8]。进风装置对输送管道内风场分布、风压变化均有较大影响,对进风装置进行研究具有重要意义。

Santiago等^[9]对管道气力输送的性能进行了分析,考虑了阻力、重力及颗粒间碰撞的影响,发现颗粒间碰撞明显时,管道内压降增加,管道输送需要的能量增加。Chen等^[10]采用试验与数值分析相结合的方法,对进风管道内的压降及进气损失进行了研究,揭示了黏性流体的流体力学特性,发现进风管道越宽,压降及进风损失越小。Rajan等^[11]采用一维双流体模型对垂直气力输送过程中2种气固流量比和4个进风口之间的多种气体分配比进行了模拟,发现增加进风口数量,且最终进风口前保持较高的气固比,可以得到更高的热回收率。刘秋兵等^[12]以相对布置的2台风机为对象,采用流体力学软件仿真模拟吸风口相对布置对气流的干扰情况,发现吸风口位置布置不合理时会产生管道阻力并使风机功耗增加。孙占朋等^[13]和程琼仪等^[14]分别进行了进风方式和进风位置对空间内气流的影响试验,并进行了

流体仿真模拟,发现进气方式和进风位置对空间内气流速度及气流分布有直接影响。陈皓等^[19]通过对水平及垂直管道压力损失、弯头阻力损失等进行分析 and 计算,得到系统压力损失总和,并提出了减小压力损失的措施和建议。国外学者^[9-11]对输送管道的物料性能、进风管压力损伤性能、进风口数量影响等进行了分析,但对进风口倾角、位置及直径的研究较少;国内学者^[12-15]对进风口位置、进风方式进行了研究,并进行了流场仿真分析。

笔者在本研究中综合考虑以上因素,以自建苹果采摘管道气力输送装置为试验台,以进风口数量、管道出口与进风口间距离、进风口倾角、进风口内径为试验因素,以风机与管道入口处压差和苹果损伤体积为评价指标,对苹果采摘管道气力输送进风装置参数进行了优化研究,通过单因素试验与正交试验分析了各因素对试验指标的影响,确定了进风装置的优化参数组合,验证了其可靠性,为采用管道气力装置高效低损输送苹果提供参考。

1 材料和方法

1.1 材料

试验所用苹果样本为富士鲜果,于2021年9月26日采自河北省保定市顺平县顺农果品现代农业

园区。经统计,果质量在150~250 g间的苹果占比为65.38%,选用中间值,即果质量为200 g的苹果进行试验,苹果为不规则球体,对应的果径为75~85 mm。

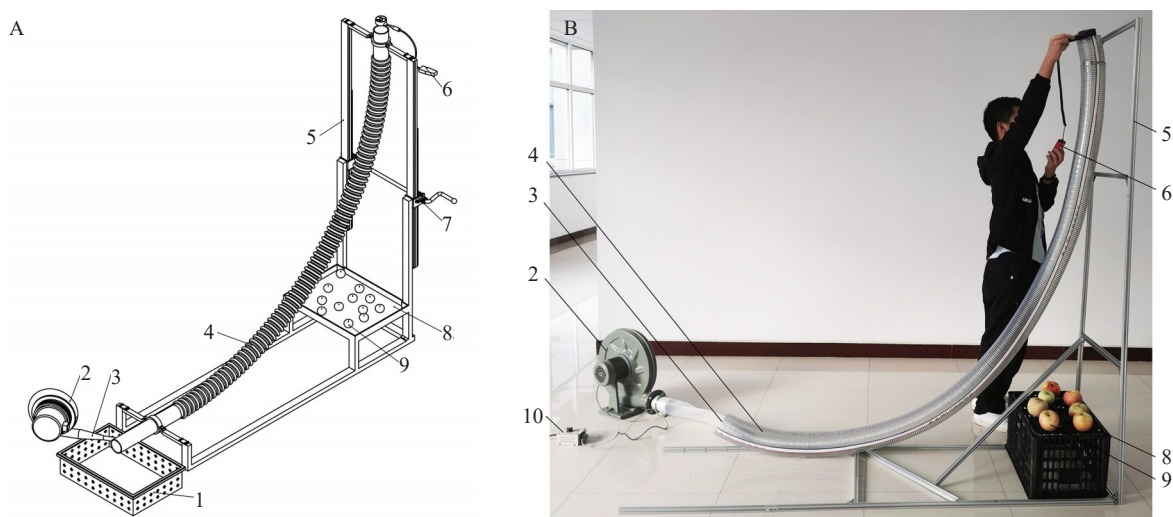
1.2 仪器与设备

PVC软质输送管道(内径为90 mm、壁厚为4 mm),惠民县鲁腾绳网厂;PVC硬质进风管道,贸盛五金商贸;CZ-LD370型中压离心式风机(功率370 W),佛山市澳旭机电有限公司;UT3636型数字式风速仪(测量精度为 $0.01 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),优利德科技股份有限公司;WBT-4000W型变频调速器,乐清市柳市科众风机销售中心。

试验装置为自建的苹果管道气力输送试验台,如图1所示,主要技术参数如表1所示。

1.3 试验方法

试验于2021年9月27日在河北农业大学工程实验楼室内进行,环境温度为 23.7°C 。搭建管道入口风压测试试验台,根据现代苹果园的种植模式,果树株距为1.2~2.0 m、行距为4 m、树高为3 m^[16],采摘果树顶端苹果时,需要登梯爬高,人在立姿的情况下,人手的最大操作范围是0.77~2.01 m^[17],采摘3 m处的苹果,只需将管道入口放在2 m高处即可,管道出口通常设置在两树之间,即输送管道的水平与竖直长度均为2 m,由于苹果在直管道内的输送速度



A 试验台三维图;B 试验台实物图。1. 果筐;2. 离心式风机;3. 进风管道;4. 输送管道;5. 台架;6. 风速仪;7. 手摇升降装置;8. 苹果损伤观测台;9. 富士苹果;10. 调速器。

A. Three-dimensional diagram of the test bench; B. Physical map of the test bench. 1. Fruit basket; 2. Centrifugal fan; 3. Air inlet pipe; 4. Conveying pipe; 5. Bench; 6. Anemometer; 7. Hand lifting device; 8. Apple damage observation platform; 9. Fuji apple; 10. Speed governor.

图1 苹果管道气力输送装置试验台

Fig. 1 Apple pipeline pneumatic conveying device test bench

表1 苹果管道气力输送装置主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of Apple pipeline pneumatic conveying device

参数 Parameter	数值 Numerical value	参数 Parameter	数值 Numerical value
长×宽×高 Length×Width×Height /(m×m×m)	2.0×0.5×2.0	风机出风口内径 Inner diameter of fan outlet/mm	68
输送管道内径 Inner diameter of conveying pipe /mm	90	风机最大流量 Maximum fan flow/(m ³ ·h ⁻¹)	680
输送管道外径 Outer diameter of conveying pipe /mm	98	风机额定转速 Rated fan speed/(r·min ⁻¹)	2820
风机类型 Fan type	中压离心式风机 Medium pressure centrifugal fan	风机风压 Fan pressure/Pa	1600
风机长×宽×高 Fan length×width×height /(mm×mm×mm)	340×231×373	风机电压 Fan voltage/V	220
风机出风口外径 Outer diameter of fan /mm	105	风速仪类型 Anemometer type	数字式风速仪 Digital anemometer

较快,会增加苹果的损伤,因此本研究采用45°圆弧软管,后续实际应用也采用此种安装方式,将风速仪放置在输送管道入口处,风速仪测量管道入口处的风速,利用公式计算风压。试验时,先调整风机风压、进风管直径及进风口与输送管壁间的倾角为相应组别的参数,打开风机,用风速仪测量管道入口处风速并记录下来,将苹果样本由输送管道入口处静止放下,在输送管道出口处接送苹果,每组使用5个苹果进行试验,输送后的苹果放置在苹果损伤观测台上观测损伤,调整试验参数,进行下一组试验,试验结束后,根据计算得到的风压及苹果损伤体积评价后续的试验效果。

1.4 进风装置参数分析

在果实输送过程中,风机提供的空气压力与输送管道内苹果的重力相接近,使苹果处于相对平衡状态^[8],才能使苹果低损输送,假设苹果为圆球形,当风力缓冲苹果垂直下落时,苹果运动平衡时受力如图2所示。

此时风压与苹果重力间关系为式(1)、(2):

$$mg=PA; \quad (1)$$

$$A=\int_0^{\frac{\pi}{2}} 2\pi r \cdot R \cos \theta d\theta. \quad (2)$$

式中: m 为苹果的质量,kg; R 为苹果的半径,mm; g 为重力加速度,N·kg⁻¹; P 为风压,Pa; A 为球形苹果的受力面积,m²; r 为苹果受力部分半径,mm; θ 为苹果半径与受力部分半径间夹角,°。

果质量为200 g的苹果对应的果径为75~85 mm,通过公式(1)、(2)计算得到风压为172.7~221.8 Pa,中间值为197.25 Pa,在本次试验中,因输送管道倾斜放置,在管道内存在5%以内的压力损失^[9],选择风压200 Pa进行研究。

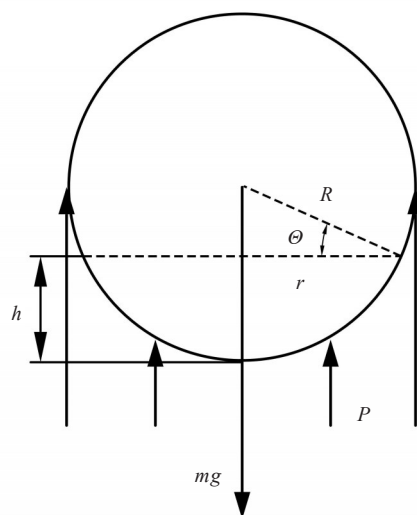


图2 苹果受力图

Fig. 2 Apple force diagram

风量、风速及风压的关系公式为(3)、(4):

$$Q=vA; \quad (3)$$

$$P=\frac{\rho v^2}{2}. \quad (4)$$

式中, Q 为风量,m³·s⁻¹; v 为平均风速,m·s⁻¹; A 为输送管道截面积,m²; P 为相对压力,Pa; ρ 为气体的密度,kg·m⁻³。

经过计算,风速为17.59 m·s⁻¹,风量为0.112 m³·s⁻¹。

1.5 试验因素

经过前期的多次试验,发现苹果与输送管道间存在摩擦碰撞,在输送管道内增加缓冲层可减小苹果损伤,本研究考虑进风装置对苹果缓冲性能的影响,为了得到更显著的试验数据,在输送管道内不设置缓冲层。总结试验结果,进风口数量、输送管道出口与进风口间距离、进风口倾角、进风口内径4个因素对进风装置的工作性能有较大影响,选用以上4

个因素为本次试验的影响因素。

(1) 由于输送管道的直径有限, 开设过多的进风口会降低输送管道的结构强度, 存在断裂的风险, 考虑到输送管道的结构性能, 进风口数量选取1、2、3、4个, 共4个水平。

(2) 为使苹果在管道内顺利输送到出口, 需要在管道出口处有一定的风压来缓冲苹果输送, 而管道出口与进风口间的距离对管道出口处的风压有直接的影响, 管道出口与进风口间距离不宜过长, 选取50、100、150、200 mm 4个水平。

(3) 当进风口与输送管道垂直放置时, 风会垂直流动到输送管壁上, 再向两侧流动, 进风口与输送管壁间倾角应小于 90° , 考虑到加工制造的难度问题, 倾斜角选取 20° 、 30° 、 40° 、 50° 、 60° 5个水平。

(4) 由于进风口开在输送管道的侧壁上, 进风口直径过大, 会造成输送管道的结构强度降低, 且较大直径的进风管道会使苹果在输送过程中卡在进风口, 造成堵塞, 综合以上问题选取进风管道内径为市面上常见的21、28、36、44、57 mm 5个水平。

1.6 试验指标

以风机与输送管道入口处的压差及苹果损伤体积为评价指标, 压差是气力输送系统选择的重要设计参数^[20], 压差越小, 说明在输送管道内的压力损失越少, 风压利用率越高^[21]; 苹果的损伤也就越小, 输送管道对苹果的保护效果越好^[22]。需要研究各因素对压差及损伤体积的影响, 具体如下:

(1) 风机与输送管道入口处压差的测定: 设置好参数进行试验时, 用风速仪测量输送管道入口处的风速, 根据式(4)计算风压, 再根据式(5)计算压差^[23]。

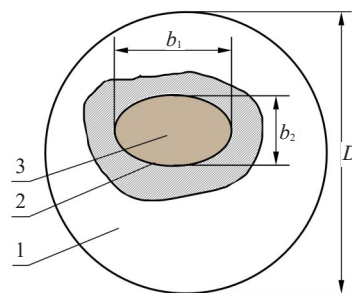
$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (5)$$

式中, ΔP 为压差, Pa; P_1 为风机出口处压力, Pa; P_2 为输送管道果实入口处压力, Pa。

(2) 苹果损伤体积的测定: 参考单明彻等^[24]的测定方法, 试验结束后, 将苹果室温下放置48 h, 待苹果破损组织处颜色变褐后, 去掉损伤处的果皮, 露出损伤处果肉; 利用型号为GD110640、精度为0.02 mm的游标卡尺测量苹果损伤宽度, 然后在损伤中心处将苹果沿着花-茎轴方向垂直切开, 即可见苹果的损伤组织与非损伤组织之间有着圆弧形分界线, 如图3与图4所示, 再利用游标卡尺测量苹果损伤深度, 苹果的损伤体积可近似看成两球冠体积之和, 即 $V = \frac{\pi}{24} [(D - \sqrt{D^2 - b_1 \cdot b_2})^2 \cdot (2D + \sqrt{D^2 - b_1 \cdot b_2}) + h(3b_1 \cdot$

$$b_2 + 4h^2)] \quad (6)$$

式中, V 为苹果损伤体积, mm^3 ; D 为苹果的平均直径, 为赤道区域横截面间隔 120° 测量取值3次的平均值, mm; b_1 为苹果损伤表面长轴, mm; b_2 为苹果损伤表面短轴, mm; h 为苹果损伤深度, mm。



1. 苹果; 2. 切开损伤处果皮; 3. 苹果损伤变褐处; D. 苹果的平均直径; b_1 . 损伤表面长轴; b_2 . 损伤表面短轴; h . 损伤深度。下同。

1. Apple; 2. Cut the peel of the damaged area; 3. Apple damaged browned area; D. Average diameter of the apple; b_1 . Damaged surface long axis; b_2 . Damaged surface short axis; h . Damaged depth. The same below.

图3 苹果损伤横切图

Fig. 3 Cross-sectional view of apple damage

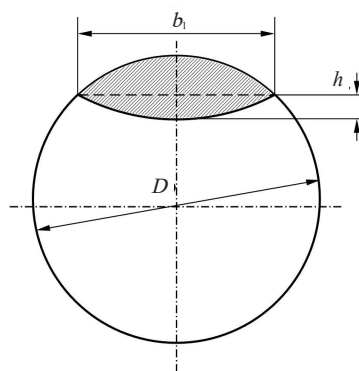


图4 苹果损伤纵切图

Fig. 4 Apple injury longitudinal section

2 结果与分析

2.1 单因素试验设计

进行单因素试验时, 进风口数量、管道出口与进风口间距离2个因素利用Solidworks flow simulation插件进行仿真分析, 评价指标选用风压; 进风口倾角、进风口内径2个因素利用台架试验的方法进行研究分析, 为保证试验结果的准确性, 每组试验3次重复, 取平均值。

2.2 单因素试验结果分析

2.2.1 进风口数量对通风性能的影响 管道为 45°

圆弧软管、进风口倾角为 40° 、进风口与管道出口间距离为100 mm,进风口内径36 mm,出风量由变频调速开关调节,在Solidworks 2018软件内等比建模,方案1~方案4中进风口数量分别为1、2、3、4个,如图5所示。经CFD软件Solidworks flow simulation 2018网格划分,分析类型为内流场、物理模型

为湍流、进风口体积流量为 $0.112\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ 、管道壁面条件为理想壁面、输送管道入口及出口设置为静压条件、目标检测选取静压、动压、总压和速度,由于气体在管道接口处的流动方向会发生改变,选择高级通道细化。进行网格无关性检验时,将输送管道内相对压力作为指标,选取网格细化3~6级进行检验,当网格数量为58 472、细化等级为5级时,评价指标趋于稳定,综合考虑计算结果的准确性及计算时长,确定全局网格的级别为6级,设置计算域与仿真运算等^[25]步骤后,网格划分及迭代数值如表2所示,局部网格划分情况如图5所示。

4种方案输送管道内相对压力变化情况如图6所示,风压分布情况如图7所示。4种方案输送管道内风压均随管道长度的增加呈先增加后降低的趋势,且方案1内相对压力峰值最大,方案4内相对压

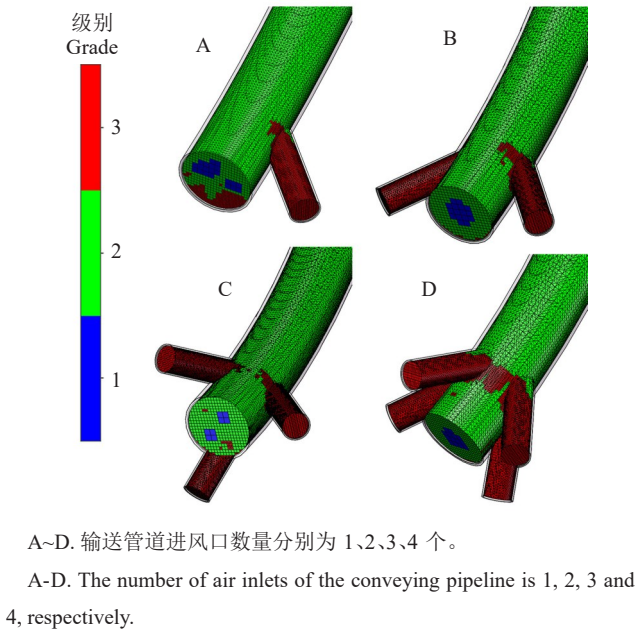
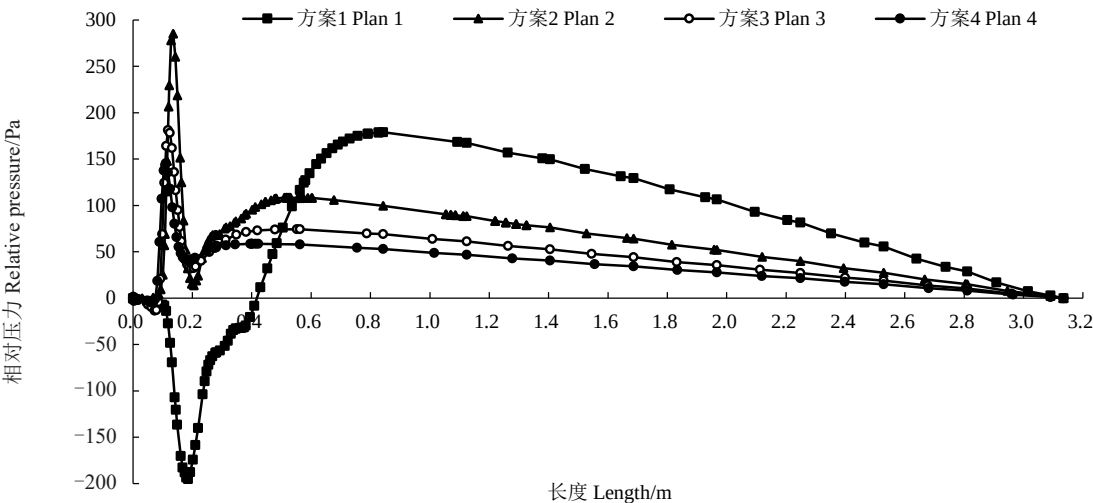


表 2 网格划分及迭代数值

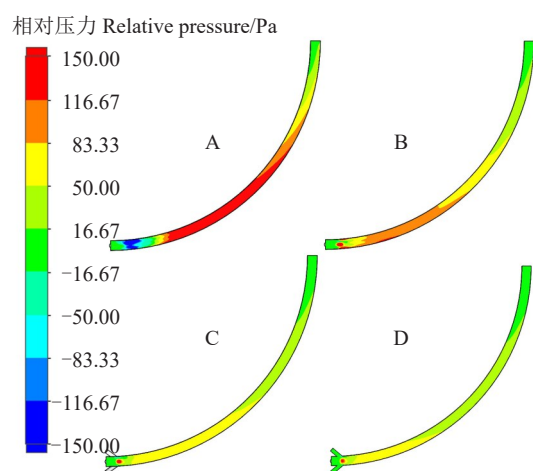
Table 2 Mesh division and iteration values

进风口数 Number of air inlets	网格数 Number of grids	迭代次数 Number of iterations
1	143 161	303
2	277 130	263
3	313 268	237
4	316 710	232



力峰值最小。
2.2.2 管道出口与进风口间距离对通风性能的影响 进风口布置在输送管道的侧壁上,输送管道的内径为90 mm,进风口内径为36 mm,进风口倾角为

40° ,进风口体积流量为 $0.112\text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$,利用solid-works 2018对输送管道进行等比三维建模。仿真参数设置参考2.2.1节内容,方案1~方案4中管道出口与进风口间的距离分别为50、100、150、200 mm。经



A~D. 输送管道进风口数量分别为 1、2、3、4 个。

A-D. The number of air inlets of the conveying pipeline is 1, 2, 3 and 4, respectively.

图 7 进风口数量对管道内压力变化切面图

Fig. 7 Cross-sectional view of the number of air inlets versus the pressure change in the pipeline

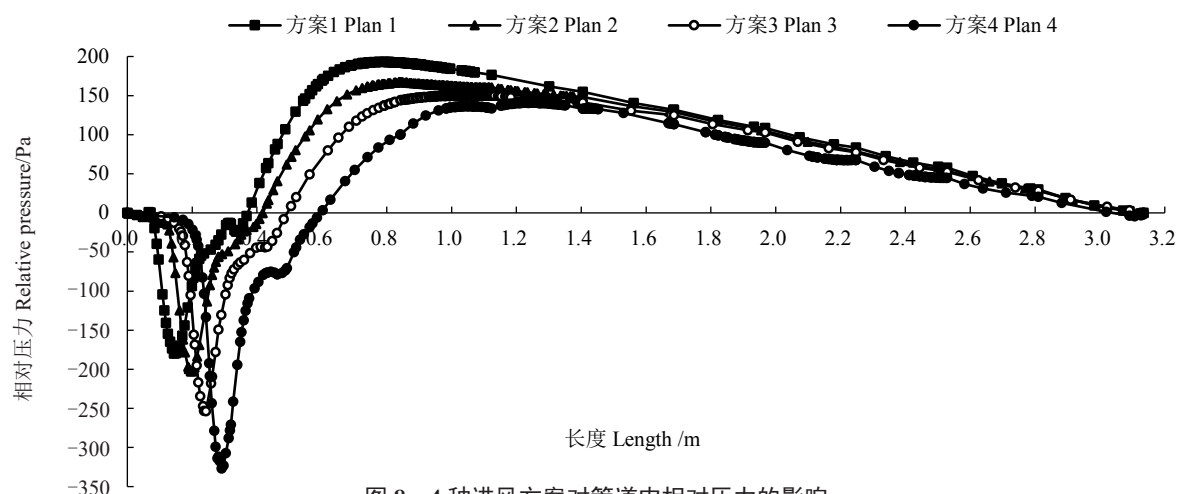
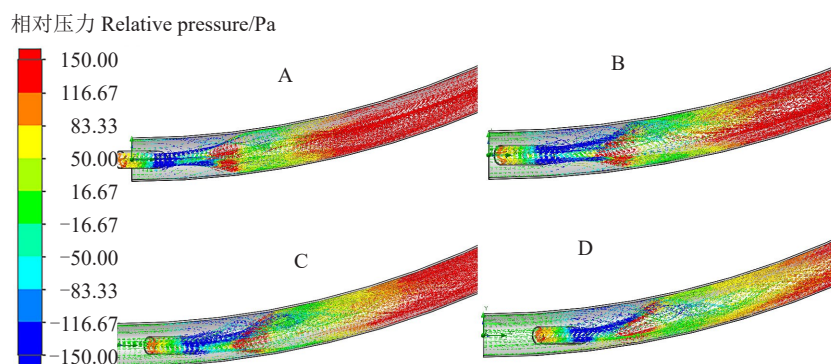


图 8 4 种进风方案对管道内相对压力的影响

Fig. 8 Influence of four air inlet schemes on relative pressure in pipeline



A~D. 管道出口与进风口间距离分别为 50、100、150、200 mm。

A-D. The distance between pipe outlet and air inlet is 50, 100, 150 and 200 mm, respectively.

图 9 4 种进风方案对管道内相对压力影响的局部视图

Fig. 9 A partial view of the influence of the four air inlet schemes on the relative pressure in the pipeline

CFD 软件 solidworks flow simulation 2018 进行仿真计算,4 种方案对管道内相对压力影响曲线图如图 8 所示,对管道内相对压力影响局部视图如图 9 所示。

由图 8 可知,随着管道出口与进风口间距离的增加,输送管道内的相对压力逐渐降低,且输送管道出口与进风口间的低压段逐渐变长,输送管道的缓冲保护性能降低。由图 9 可知,4 种进风方案的进风管道与输送管道连接处的风压较复杂,经过一段距离的缓冲过后,输送管道内风压分布呈现同种颜色,风压趋于平稳,输送管道出口与进风口间的风压相对管道内其他位置来说较低,苹果输送到此段位置时,由于风压突然低于苹果重力,使苹果离开输送管道时以较高的速度落入果箱,造成损伤,因此应尽量减少输送管道出口与进风口间的距离。

2.2.3 进风口倾角对通风性能的影响 进风口倾角单因素试验结果如表 3 所示,进风口倾角对压差的

表3 进风口倾角对各指标的影响结果

Table 3 The effect of the inclination angle of the air inlet on each index

进风口倾角 Air inlet inclination/°	压差 Pressure drop/Pa	损伤体积 Damage volume/mm ³
20	111.261 1	407.045 8
30	100.169 4	206.006 6
40	106.261 7	309.277 3
50	109.739 6	360.863 5
60	114.947 1	444.397 3
<i>F</i>	279.338 2	201.490 7
<i>p</i>	< 0.001	< 0.001

注: $p < 0.01$ (极显著,**); $0.01 \leq p < 0.05$ (显著,*); $p > 0.05$ (不显著)。F 为方差的统计量,F 值越大,效果越明显。下同。

Note: $p < 0.01$ (very significant, **); $0.01 \leq p < 0.05$ (significant, *); $p > 0.05$ (not significant). *F* is the statistic of variance, the larger the *F* value, the more obvious the effect. The same below.

影响极显著,F 值为 279.338 2、 p 值小于 0.001;进风口倾角对苹果损伤体积的影响极显著,F 值为 201.490 7、 p 值小于 0.001。进风口倾角对压差及损伤体积影响的点线图如图 10 所示,压差及损伤体积均随着进风口倾角的增加呈先减小后增大的趋势,其中当进风口倾角水平为 30°、40°、50°时,压差及损伤体积相对最小。

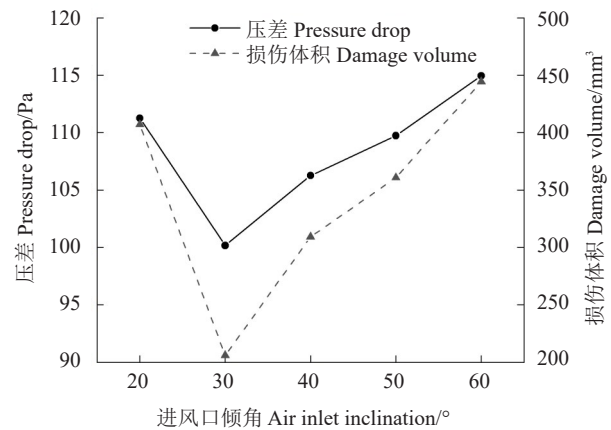


图 10 进风口倾角对各指标影响

Fig. 10 The influence of the inclination angle of the air inlet on each index

2.2.4 进风口内径对通风性能的影响 进风口内径单因素试验结果如表 4 所示,进风口内径对压差的影响极显著,F 值为 1 116.648 41、 p 值小于 0.001;进风口内径对苹果损伤体积的影响极显著,F 值为 46.791 51、 p 值小于 0.001。进风口内径对压差及损伤体积影响的点线图如图 11 所示,压差及损伤体积均随着进风口内径的增加呈先减小后增大的趋势,

表4 进风口内径对各指标的影响结果

Table 4 The results of the influence of the inner diameter of the air inlet on each index

进风口内径 Inlet diameter /mm	压差 Pressure drop/Pa	损伤体积 Damage volume/mm ³
21	135.661 2	483.884 6
28	114.622 7	361.083 9
36	105.447 1	261.057 2
44	100.673 7	102.939 0
57	118.229 4	405.575 3
<i>F</i>	1 116.648 41	46.791 51
<i>p</i>	< 0.001	< 0.001

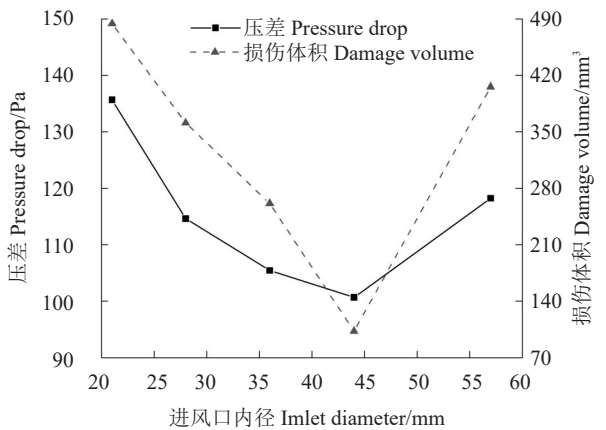


图 11 进风口内径对各指标影响

Fig. 11 The influence of the inner diameter of the air inlet on each index

其中当进风口内径水平为 28、36、44 mm 时,压差及损伤体积相对最小。

2.3 正交试验设计

通过单因素试验得到了各因素对各指标的影响趋势,并确定了各因素的研究水平。为了研究各因素对压差及苹果损伤体积的影响,减少试验次数,并尽可能全面地反映压差及苹果损伤体积在各因素影响下的实际效果,采用 $L_9(3^4)$ 正交表,做四因素三水平的正交试验^[26-27],试验因素及水平如表 5 所示。

表5 正交试验因素及水平

Table 5 Orthogonal test factors and levels				
水平 Level	进风口数量 Number of air inlets <i>A</i> /个	管道出口与进 风口间距离 Distance between pipe outlet and air inlet <i>B</i> /mm	进风口倾角 Air inlet inclination <i>C</i> /°	进风口内径 Inlet diameter <i>D</i> /mm
1	1	50	30	28
2	2	100	40	36
3	3	150	50	44

每组试验进行 2 次,共 18 组试验,正交试验结果

如表6所示,其中 A 、 B 、 C 、 D 分别为进风口数量、管道出口与进风口间距离、进风口倾角、进风口内径, Y_1 、 Y_2 分别为压差及苹果损伤体积,I、II分别为第1次试验结果与第2次试验结果。

表6 正交试验结果表

Table 6 Orthogonal test results

试验序号 Test number	因素 Factor				指标 Index			
	A	B	C	D	Y_1		Y_2	
					I	II	I	II
1	1	1	1	1	103.879 4	100.602 6	259.627 6	210.281 2
2	1	2	2	2	106.932 1	102.097 8	307.313 8	270.654 8
3	1	3	3	3	104.396 2	103.983 0	226.631 7	194.327 8
4	2	1	2	3	105.216 5	104.909 9	300.569 8	331.272 7
5	2	2	3	1	131.302 6	131.663 3	694.359 4	712.361 7
6	2	3	1	2	114.414 4	116.700 4	482.694 2	500.716 1
7	3	1	3	2	129.813 1	127.778 9	789.576 6	750.992 1
8	3	2	1	3	113.602 7	114.145 0	515.490 9	481.694 2
9	3	3	2	1	138.120 3	136.802 2	926.503 3	900.486 1

2.4 正交试验结果分析

2.4.1 正交试验极差分析 为确定各因素间的主次关系,对正交试验结果进行极差分析,极差分析结果如表7所示,极差分析法对各因素影响程度的评价指标是各因素的极差值,极差值越大,说明此因素对相应指标的影响程度越明显^[28]。

压差与损伤体积的评价目标均为指标值越小,进风装置的性能越好。对表7结果进行分析,因素的极差越大,说明该因素对试验指标的影响越显著,各因素对压差的影响程度主次顺序为 $A > D > C > B$,最优组合为 $A_1B_1C_1D_3$;各因素对损伤体积的影响程度主次顺序为 $A > D > C > B$,最优组合为 $A_1B_1C_1D_3$ 。

2.4.2 正交试验方差分析 相比于极差分析,方差分析可以排除试验误差的影响,且可以判断各因素的显著性水平^[29],利用SPSS 26.0软件对试验结果进行方差分析,如表8所示,根据因素项自由度及误差项自由度查 F 分布表可知^[30], F 的临界值: $F_{0.01}(2, 9) = 8.02$,当因素的 F 值大于 F 的临界值时,表示此因素具有显著性。

对于风机与输送管道入口处的压差: $F_A > F_D > F_C > F_B > F_{0.01}(2, 9)$,且各因素项的 p 值均小于0.01,则 A 、 B 、 C 、 D 均为极显著因素,主次顺序为 $A > D > C > B$,试验模型 p 值 < 0.01 ,整体模型显著;对于苹果的损伤体积: $F_A > F_D > F_C > F_B > F_{0.01}(2, 9)$,且各因素项的 p 值均小于0.01,则 A 、 B 、 C 、 D 均为极显著因素,

表7 正交试验极差分析表

Table 7 Orthogonal test range analysis table

指标 Index	项目 Project	A	B	C	D
压差 Pressure drop Y_1	k_1	103.648 5	112.033 4	110.557 4	123.728 4
	k_2	117.367 9	116.623 9	115.679 8	116.289 4
	k_3	126.710 4	119.069 4	121.489 5	107.708 9
	R	23.061 8	7.036 1	10.932 1	16.019 5
	优水平 Better levels	A_1	B_1	C_1	D_3
损伤体积 Damage volume Y_2	主次因素 Primary- sec- ondary factors	A	D	C	B
	k_1	244.806 2	440.386 7	408.417 4	617.269 9
	k_2	503.662 3	496.979 1	506.133 4	516.991 3
	k_3	727.457 2	538.559 9	561.374 9	341.664 5
	R	482.651 0	98.173 2	152.957 5	275.605 4
	优水平 Better levels	A_1	B_1	C_1	D_3
	主次因素 Primary- sec- ondary factors	A	D	C	B

注: k_1 ~ k_3 分别表示各因素各水平下指标总和的均值; R 为极差。下同。

Note: k_1 ~ k_3 respectively represent the mean value of the sum of indicators at each level of each factor; R is the range. The same below.

主次顺序为 $A > D > C > B$,试验模型 p 值 < 0.01 ,说明此模型显著,分析的结果有意义。

2.4.3 交互作用比较分析 在正交试验中,需要考察各因素不同水平间的复杂关系,当一个因素的水平在另一个因素的不同水平上变化趋势不一致时,则两因素间存在交互作用,且存在交互作用的2个因素在轮廓图中存在交点^[31]。2个因素间的交互作用称为一级交互作用,3个因素间的交互作用称为二级交互作用,二级和二级以上的交互作用称为高级交互作用,高级交互作用的影响很小,通常不加考虑^[29]。本试验只针对一级交互作用进行研究。各因素间的交互作用对压差的影响如图12所示,各因素间交互作用对损伤体积影响如图13所示。

由图12可知,对于风机与管道入口处的压差,图12内曲线均存在交点,各因素间均存在交互作用,由图12-A~C可知,单进风口与其他3个因素交互作用的压差值最低,故单进风口为进风口数量的最优水平;由图12-A、D~E可知,管道与进风口间距离为50 mm与其他3个因素交互作用的压差值最低,50 mm为管道与进风口间距离的最优水平;由图12-B、D、F可知,进风口倾角为30°与其他3个因素

表 8 正交试验方差分析表
Table 8 Orthogonal test variance analysis table

指标 Index	来源 Sources	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方和 Mean square	F 值 F values	p 值 p values
压差 Pressure drop Y_1	A	1 614.703	2	807.352	316.623	< 0.01**
	B	153.118	2	76.559	30.024	< 0.01**
	C	359.005	2	179.502	70.396	< 0.01**
	D	771.178	2	385.589	151.218	< 0.01**
	误差 Error	22.949	9	2.550		
	总和 Total	244 748.715	18			
损伤体积 Damage volume Y_2	模型 Model					< 0.01**
	A	700 085.402	2	350 042.701	648.100	< 0.01**
	B	29 139.284	2	14 569.642	26.976	< 0.01**
	C	71 992.096	2	35 996.048	66.646	< 0.01**
	D	233 507.177	2	116 753.588	216.168	< 0.01**
	误差 Error	4 860.953	9	540.106		
	总和 Total	5 396 298.058	18			
	模型 Model					< 0.01**

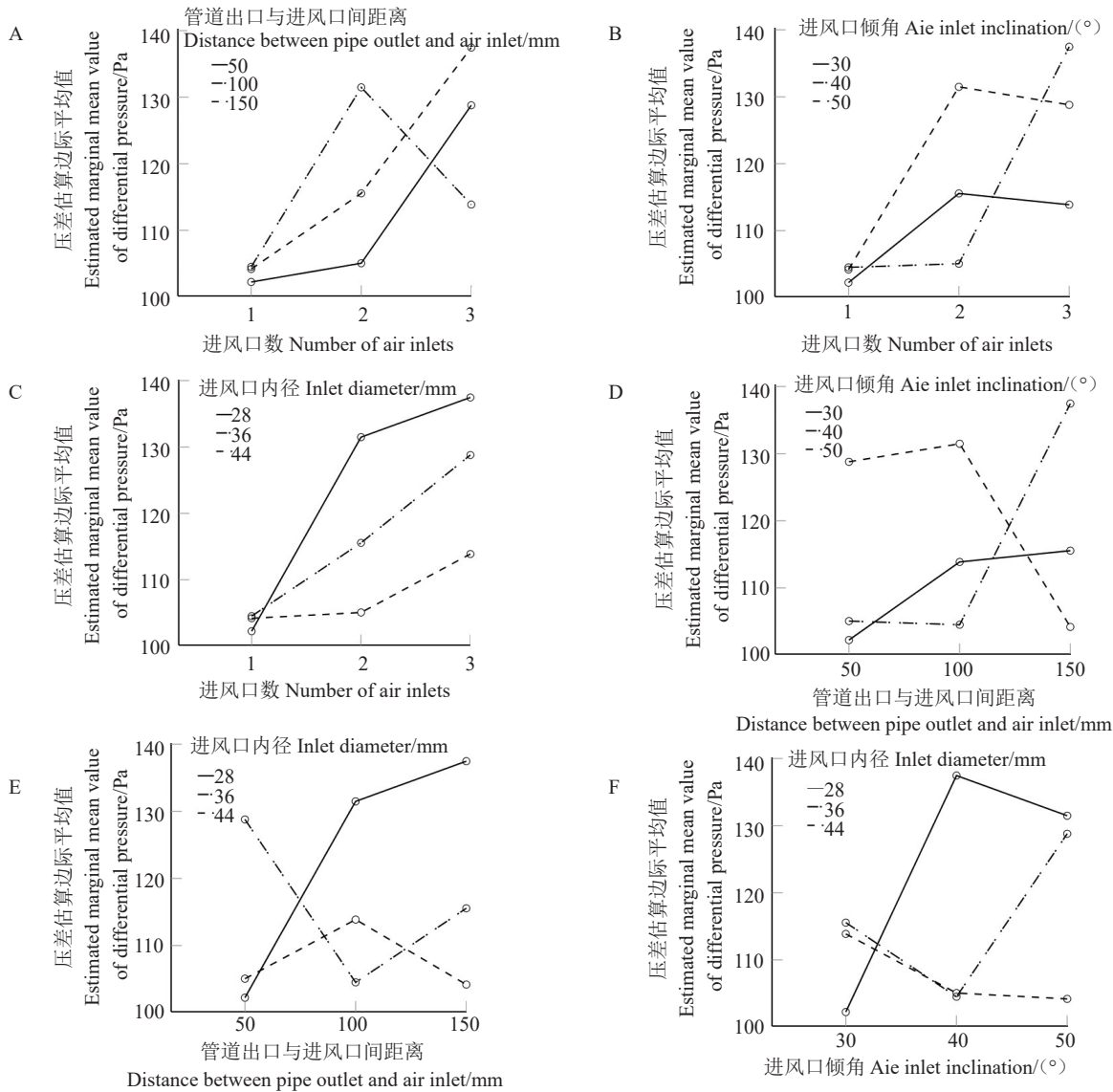


图 12 各因素交互作用对压差值的影响

Fig. 12 The influence of the interaction of various factors on the differential pressure value

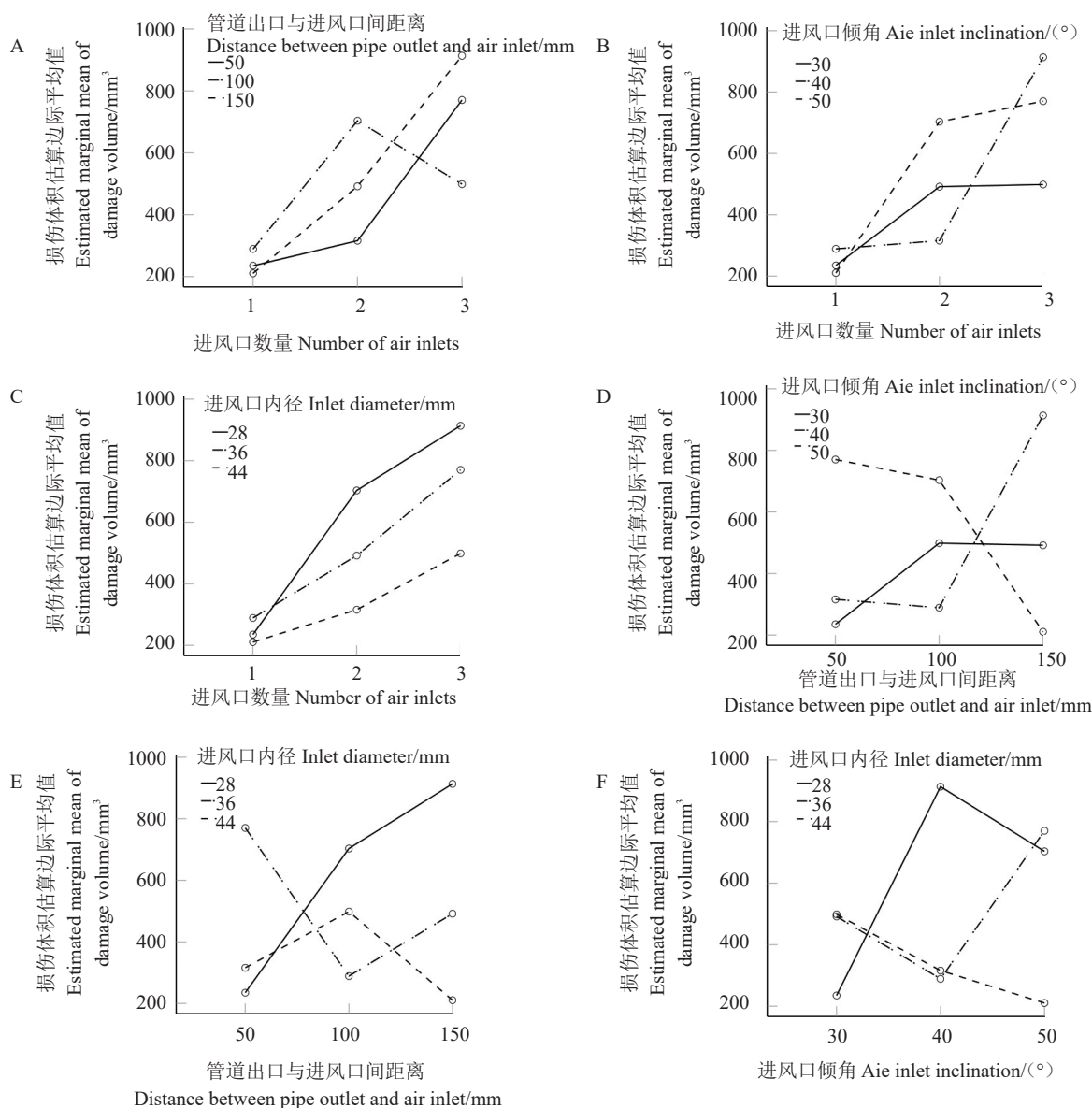


图 13 各因素交互作用对损伤体积值的影响

Fig. 13 The influence of the interaction of various factors on the damage volume value

交互作用的压差值最低,故 30° 为进风口倾角的最优水平;由图12-C、E~F可知,进风口径为44 mm与其他3个因素交互作用的压差值最低,进风口径的最优水平为44 mm。

由图13可知,对于苹果的损伤体积,图13内曲线均存在交点,各因素间均存在交互作用,由图13-A~C可知,单进风口与其他3个因素交互作用的损伤体积值最低,单进风口为进风口数量的最优水平;由图13-A、D~E可知,管道与进风口间距离为50 mm与其他3个因素交互作用的损伤体积值最低,50 mm为管道与进风口间距离的最优水平;由图13-B、D、F可知,进风口倾角为 30° 与其他3个因素交互

作用的损伤体积值最低, 30° 为进风口倾角的最优水平;由图13-C、E~F可知,进风口径为44 mm与其他3个因素交互作用的损伤体积值最低,进风口径的最优水平为44 mm。

综合对试验结果数据的极差分析、方差分析与交互作用分析,各因素对压差及损伤体积影响的主次顺序为进风口数量>进风口径>进风口倾角>管道出口与进风口间距离;进风口数量最优水平为1个、管道出口与进风口间距离最优水平为50 mm、进风口倾角最优水平为 30° 、进风口径最优水平为44 mm。对于压差,模型拟合的 p 值小于0.01,失拟项不显著,模型的决定系数 $R^2=0.992$,校正决定系数

$R^2_{\text{adj}}=0.985$; 对于损伤体积, 模型拟合的 p 值小于 0.01, 失拟项不显著, 模型的决定系数 $R^2=0.992$, 校正决定系数 $R^2_{\text{adj}}=0.985$, 说明模型拟合度较高, 误差较小, 可以对苹果管道气力输送进风装置进行优化分析及预测^[32]。进风口数量是影响进风装置性能的首要因素, 在进风量相同的情况下, 进风口数量越多, 进风装置性能呈现逐渐降低的趋势; 进风口内径与进风口倾角是影响进风装置性能的主要因素, 随着进风口内径与进风口倾角的增加, 进风装置性能呈现先降低后增加的趋势; 管道出口与进风口间距离是影响进风装置性能的次要因素, 随着管道出口与进风口间距离的增加, 进风装置性能呈现逐渐降低的趋势。

2.5 验证试验

通过单因素试验分析与正交试验分析, 得到苹果管道气力输送进风装置的最优水平组合是: 进风口数量为单个、管道出口与进风口间距离为 50 mm、进风口倾角为 30°、进风口内径为 44 mm。对最优组合进行重复试验, 试验按照前述方法进行, 试验 3 次重复, 结果取平均值, 苹果经无气力输送与经最优组合下气力输送后的损伤对比如图 14 与图 15 所示, 得到最优组合下压差为 82.341 6 Pa、损伤体积为 85.670 2 mm³; 将最优组合利用 CFD 软件进行仿真分析, 设置进风口体积流量为 0.112 m³·s⁻¹, 得到输送管道内相对压力分布流动迹线图如图 16 所示, 输送管道内压力在进风口处较复杂, 输送管道入口与进风口间压力相对较均匀, 结合正交试验结果分析, 此最优组合下的压差及损伤体积均优于正交试验中的指标值, 达到了较好的输送效果。



图 14 苹果经无气力输送后的损伤

Fig. 14 Damage of the apple after pneumatic conveying



图 15 苹果经最优组合下气力输送后的损伤

Fig. 15 Damage of an apple after pneumatic conveying under the optimal combination

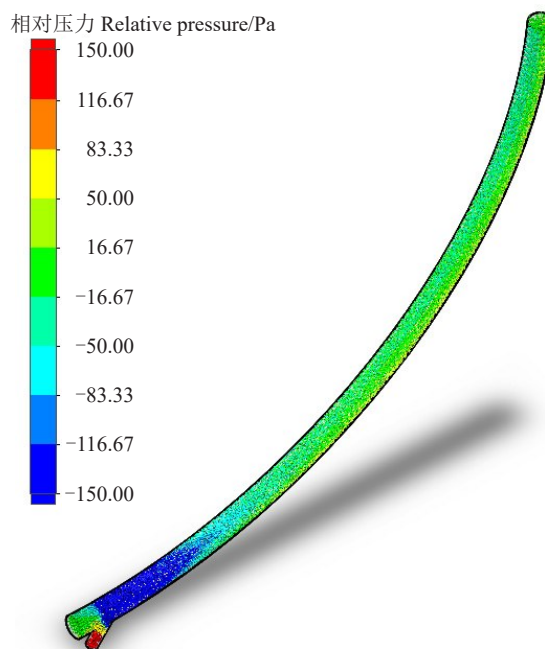


图 16 最优组合下管道内压力分布图

Fig. 16 The pressure distribution in the pipeline under the optimal combination

3 讨论

本研究的影响因素为: 进风口数量、管道出口与进风口间距离、进风口倾角、进风口内径; 试验指标为风机与输送管道入口处的压差及苹果损伤体积。

(1) 对于进风口数量单因素试验, 管道内风压随管道长度的增加呈先增加后降低的趋势, 这是由于进风管道与输送管道出口间存在 100 mm 的间距, 风向输送管道入口处流动, 在此间距内风压较小; 随着进风口数量的增加, 输送管道内压力的最大值逐渐降低, 这是由于各个进风口之间进风存在相互抵

消作用,形成涡流,随着进风口数量的增加,抵消作用变大^[33]。

(2)对于管道出口与进风口间距离单因素试验,随着管道出口与进风口间距离的增加,输送管道内的相对压力逐渐降低,但降低幅度较小,输送管道出口与进风口间距离为低压段,在低压段内风压较小,风力的缓冲保护性能较低,苹果输送到此段位置时,由于风压突然低于苹果重力,使苹果离开输送管道时以较高的速度落入果箱,造成损伤,应尽量减少输送管道出口与进风口间的距离。

(3)对于进风口倾角单因素试验,风机与输送管道入口处的压差随着进风口倾角的增加呈先减小后增大的趋势,这是由于进风口设置在输送管道侧壁上,风经过进风管道斜吹在输送管道内壁,再沿着输送管道流动,期间会造成一定的损耗^[34],在一定范围内,进风口倾角越小,损耗越低,当进风口倾角过小时,风会沿着靠近进风口一侧的管道内壁流动,使输送管道内风压分布不均匀,从而使管道入口与风机间的压差变大;苹果损伤体积随着进风口倾角的增加呈先减小后增大的趋势,这是由于在一定范围内,进风口倾角越小,输送管道内风压越大,对苹果的缓冲保护效果越好,苹果受到的损伤体积越小,当进风口倾角过小时,管道内风压分布不均匀,苹果在管道内进行不规则运动,使苹果与管壁间发生多次碰撞,从而加大苹果的损伤体积。

(4)对于进风口内径单因素试验,风机与输送管道入口处的压差随着进风口内径的增加呈先减小后增大的趋势,这是由于风机出风口直径与进风管道直径不同,风经过进风管道时会造成损耗,进风管道内径越大,损耗越低,由于输送管道直径一定,当进风管道内径过大时,在进风管道与输送管道接口处风会向四周吹散,使一部分风吹向了输送管道出口,造成输送管道入口处风压变低;苹果损伤体积随着进风口内径的增加呈先减小后增大的趋势,这是由于在一定范围内,进风口内径越大,风压损耗越低,输送管道内风压越大,对苹果的缓冲保护效果越好,苹果受到的损伤体积越小,当进风口内径过大时,输送管道内一部分风吹向了管道出口,使管道内风压降低,苹果与管壁间发生碰撞,从而加大苹果的损伤体积。

(5)对试验过程与结果进行分析,得到苹果存在损伤原因及解决办法为:苹果与输送管道内存在摩

擦碰撞,可在输送管道内增加缓冲层,减少苹果与管壁的撞击;进风口与输送管道连接处风压不均匀,可在进风口处设置风网,将气体分散开来,使管道连接处的风压分布相对均匀;气体在管道内存在损耗,可增加装置的气密性,将转角处做得更加圆滑,并适当增加进风量。

笔者在本研究中提出的苹果管道气力输送进风装置参数优化方法可靠,试验步骤可控,对苹果采摘管道气力输送装置的研究具有重要意义。

4 结 论

随着进风口数量及管道出口与进风口间距离的增加,管道内压力逐渐降低;随着进风口倾角及内径的增加,压差及损伤体积呈先降低后增加的趋势;对压差及损伤体积影响的主次顺序为进风口数量>进风口内径>进风口倾角>管道出口与进风口间距离;最优水平组合为单个进风口、管道出口与进风口间距离为50 mm、进风口倾角为30°、进风口内径为44 mm。

参考文献 References:

- [1] 常倩,李瑾. 2000年以来中国苹果产业发展趋势分析[J]. 北方园艺, 2021(3):155-160.
CHANG Qian, LI Jin. Development trend of apple industry in China since 2000[J]. Northern Horticulture, 2021(3):155-160.
- [2] 宋怀波,张阳,黄俊华,石富磊. 偏心切割式苹果采摘装置设计与试验[J]. 农机化研究, 2020, 42(5):94-99.
SONG Huaibo, ZHANG Yang, HUANG Junhua, SHI Fulei. Design and experiment of eccentric cutting device for apple picking[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2020, 42(5):94-99.
- [3] 宋健,张铁中,徐丽明,汤修映. 果蔬采摘机器人研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2006, 37(5):158-162.
SONG Jian, ZHANG Tiezhong, XU Liming, TANG Xiuying. Research actuality and prospect of picking robot for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(5):158-162.
- [4] 成前,王晓宇,刘金伟. 城镇化进程中农业转移人口市民化的健康效应分析[J]. 人口学刊, 2020, 42(1):42-54.
CHENG Qian, WANG Xiaoyu, LIU Jinwei. The health effect of citizenization of rural migrants in the process of urbanization[J]. Population Journal, 2020, 42(1):42-54.
- [5] ORNWIPA T, KIT G, MARIA T F, LOVENOOR A, LINDA N B, RANDAL P C, KEVIN J M, PETER W J. Comparisons of physical exposure between workers harvesting apples on mobile orchard platforms and ladders, part 1: Back and upper arm pos-

- tures[J]. *Applied Ergonomics*, 2020, 89: 103-193.
- [6] 刘晓洋, 赵德安, 贾伟宽, 阮承治, 姬伟. 基于超像素特征的苹果采摘机器人果实分割方法[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(11): 15-23.
- LIU Xiaoyang, ZHAO De'an, JIA Weikuan, RUAN Chengzhi, JI Wei. Fruits segmentation method based on superpixel features for apple harvesting robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(11): 15-23.
- [7] OPARA U L, PATHARE P B. Bruise damage measurement and analysis of fresh horticultural produce: A review[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2014, 91: 9-24.
- [8] 高迎旺, 耿金凤, 饶秀勤. 果蔬采后内部损伤无损检测研究进展[J]. *食品科学*, 2017, 38(15): 277-287.
- GAO Yingwang, GENG Jinfeng, RAO Xiuqin. Non-invasive bruise detection in postharvest fruits and vegetables: A review[J]. *Food Science*, 2017, 38(15): 277-287.
- [9] SANTIAGO L, MARTIN S. Numerical calculation of pneumatic conveying in horizontal channels and pipes: Detailed analysis of conveying behaviour[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 39: 105-120.
- [10] CHEN F Q, LI X S, HU B, REN X D, WANG Z Y, GU C W. Pressure drop analysis and aerodynamic design of compressor L-inlet duct[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 107: 107.
- [11] RAJAN K, SRIVASTAVA S, PITCHUMANI B, MOHANTY B. Simulation of gas-solid heat transfer during pneumatic conveying: use of multiple gas inlets along the duct[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2006, 33(10): 1234-1242.
- [12] 刘秋兵, 桂文杰, 贾燕, 仇晓龙, 胡国明. 风机吸风口相对距离对管道流场与阻力的影响分析[J]. *流体机械*, 2016, 44(10): 32-36.
- LIU Qiubing, GUI Wenjie, JIA Yan, QIU Xiaolong, HU Guoming. Influence of relative distance between air inlet ducts on the resistance of ducts[J]. *Fluid Machinery*, 2016, 44(10): 32-36.
- [13] 孙占朋, 孙国刚, 刘庆刚, 晁继阳. 进气方式和气速对卧轮式分级机性能的影响[J]. *化工进展*, 2019, 38(9): 3956-3961.
- SUN Zhanpeng, SUN Guogang, LIU Qinggang, CHAO Jiyang. Effects of air inlet type and velocity on classification performance of horizontal turbo air classifier[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(9): 3956-3961.
- [14] 程琼仪, 穆钰, 李保明. 进风位置对纵向通风叠层鸡舍气流和温度影响 CFD 模拟[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(15): 192-199.
- CHENG Qiongyi, MU Yu, LI Baoming. CFD Simulation of influence of air supply location on airflow and temperature in stacked-cage hen house with tunnel ventilation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(15): 192-199.
- [15] 陈皓, 耿震. 气力垃圾输送系统压力损失分析计算[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(7): 64-66.
- CHEN Hao, GENG Zhen. Analysis and calculation of pressure loss of pneumatic waste conveying system[J]. *China Water and Wastewater*, 2014, 30(7): 64-66.
- [16] 李建平, 边永亮, 霍鹏, 王鹏飞, 薛春林, 杨欣. 喷雾机风送式环形喷管喷雾装置设计与试验优化[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 79-88.
- LI Jianping, BIAN Yongliang, HUO Peng, WANG Pengfei, XUE Chunlin, YANG Xin. Design and experimental optimization of spray device for air-fed annular nozzle of sprayer[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 79-88.
- [17] 王亚龙. 牵引式果园采摘作业平台设计与研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- WANG Yalong. Design and research on tractive orchard picking platform[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.
- [18] 陈明哲, 周洲, 王睿. 风梯度下无动力无人机最优获能指令研究[J]. *飞行力学*, 2020, 38(6): 8-13.
- CHEN Mingzhe, ZHOU Zhou, WANG Rui. Research on optimal energy acquisition commands of unpowered uav under wind gradient[J]. *Flight Dynamics*, 2020, 38(6): 8-13.
- [19] 袁海燕. 提升管道系统固液两相流工程应用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.
- YUAN Haiyan. Applied research of pipelines system coarse particles solid-liquid two-phase flows[D]. Changsha: Hunan University, 2012.
- [20] WANG Y, KENNETH W, MARK J, CHEN B. CFD simulation methodology for gas-solid flow in bypass pneumatic conveying: A review[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 125: 185-208.
- [21] 刘大明, 李卫, 王天友, 田福全, 甄旭东. 汽油机进气过程缸内气流及边界层流动特性[J]. *内燃机学报*, 2021, 39(3): 241-249.
- LIU Daming, LI Wei, WANG Tianyou, TIAN Fuquan, ZHEN Xudong. In-cylinder flow and boundary layer in gasoline engines during induction process[J]. *Transactions of CSICE*, 2021, 39(3): 241-249.
- [22] ROMAN S, DANIEL S, PIOTR K, LUKASZ K. Determining the resistance to mechanical damage of apples under impact loads[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2018, 146: 79-89.
- [23] 高兴华, 李建永, 贾双林, 王明旭. 介质压差驱动管道机器人在线取能方法研究[J]. *液压与气动*, 2017(5): 84-88.
- GAO Xinghua, LI Jianyong, JIA Shuanglin, WANG Mingxu. Method of on-line obtain energy for medium differential-pressure drive in-pipe robot[J]. *Chinese Hydraulics and Pneumatics*, 2017(5): 84-88.
- [24] 单明彻, 徐朗. 苹果的机械特性和机械损伤[J]. *农业机械学报*, 1988, 19(2): 72-79.
- SHAN Mingche, XU Lang. Mechanical characters and mechanical bruise of apples[J]. *Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery*, 1988, 19(2): 72-79.
- [25] 薛超. 基于 Solidworks 的 Y 形岔管应力变形和流场特性分析及体型优化[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(3): 177-184.

- XUE Chao. Stress deformation, flow field characteristics and shape optimization of Y-type branch pipe with solidworks[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 177-184.
- [26] 刘大为, 谢方平, 叶强, 任述光, 李旭, 刘敏章. 1K-50 型果园开沟机开沟部件功耗影响因素分析与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 19-28.
- LIU Dawei, XIE Fangping, YE Qiang, REN Shuguang, LI Xu, LIU Minzhang. Analysis and experiment on influencing factors on power of ditching parts for 1K-50 orchard ditching[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(18): 19-28.
- [27] 关正军, 尹恒, 韩威, 章恬恬, 吴应涛, 陈科昭. 基于玉米秸秆滤料的养禽冲洗废水过滤技术[J]. 农业工程学报, 2021, 37(13): 216-223.
- GUAN Zhengjun, YIN Heng, HAN Wei, ZHANG Tiantian, WU Yingtao, CHEN Kezhao. Filtration technology of poultry washing wastewater based on maize stover filter media[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(13): 216-223.
- [28] 姚盼, 袁艳平, 孙亮亮, 曾乃晖, 邓志辉. 基于交互正交试验的热水系统太阳能保证率影响因素研究[J]. 太阳能学报, 2017, 38(2): 400-408.
- YAO Pan, YUAN Yanping, SUN Liangliang, ZENG Naihui, DENG Zhihui. Research of factors affecting solar fraction of shws based on interactive orthogonal experiment[J]. Acta Ener-giae Solaris Sinica, 2017, 38(2): 400-408.
- [29] 李平, 赵焰杰, 王李波. 基于交互正交试验的 304 不锈钢冲蚀磨损性能的影响因素研究[J]. 材料导报, 2020, 34(8): 8149-8153.
- LI Ping, ZHAO Yanjie, WANG Libo. Research on factors affecting erosion wear performance of 304 stainless steel based on interactive orthogonal experiment[J]. Materials Review, 2020, 34(8): 8149-8153.
- [30] 杭美艳, 彭雅娟, 刘欣欣, 张海燕, 陶旭. 基于砂浆强度解耦量化研究对铬铁渣的改性影响[J]. 无机盐工业, 2021, 53(1): 72-76.
- HANG Meiyao, PENG Yajuan, LIU Xinxin, ZHANG Haiyan, TAO Xu. Quantitative study on influence of ferrochrome slag modification based on mortar strength decoupling method[J]. In-organic Chemicals Industry, 2021, 53(1): 72-76.
- [31] 张续, 吴红波, 朱可可, 高郁凯. 基于 SPSS 软件优化耐低温乳化炸药配方研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(6): 42-47.
- ZHANG Xu, WU Hongbo, ZHU Keke, GAO Yukai. Optimiza-tion of low temperature resistant emulsion explosive by soft-ware SPSS[J]. Explosive Materials, 2020, 49(6): 42-47.
- [32] 虎云青, 巩芳娥, 朱建朝, 汪海, 任志勇. 应用响应面法优化鲜核桃低温贮藏保鲜工艺[J]. 果树学报, 2021, 38(10): 1802-1812.
- HU Yunqing, GONG Fang'e, ZHU Jianzhao, WANG Hai, REN Zhiyong. Optimization of low temperature storage and preserva-tion technology of fresh walnut by response surface method[J]. Journal of Fruit Science, 2021, 38(10): 1802-1812.
- [33] 刘师多, 王显仁, 师清翔, 倪长安. 横流风机位置对双风机圆筒筛清选机构性能的影响[J]. 农机化研究, 2006(3): 131-133.
- LIU Shiduo, WANG Xianren, SHI Qingxiang, NI Chang'an. In-fluence of cross flow fan's position on function of the two-fan cylinder screen cleaning unit[J]. Journal of Agricultural Mecha-nization Research, 2006(3): 131-133.
- [34] 周晨, 王翔, 赵正予, 张援农. 次声波在非均匀大气中的超视距传播特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(15): 230-240.
- ZHOU Chen, WANG Xiang, ZHENG Zhengyu, ZHANG Yuan-nong. Properties of over-the-horizon propagation of infrasonic wave in the inhomogeneous atmosphere[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(15): 230-240.