

## 改进型环形射流泵输送不同果蔬试验

龙新平, 邹佳林, 徐茂森, 左 丹, 龙 云, 王 炯

(1. 水射流理论与新技术湖北省重点实验室(武汉大学), 武汉 430072; 2. 武汉大学动力与机械学院, 武汉, 430072)

**摘 要:** 为了研究果蔬的形状、大小和密度对环形射流泵输送性能的影响, 该文采用喉管直径为 60 mm 的环形射流泵进行了马铃薯、胡萝卜、圣女果和金桔的输送试验, 对入口结构、流量比、输送高度和果蔬种类 4 个因素对输送性能的影响进行了研究, 并分析了不同工况对果蔬损伤的影响。结果表明: 吸入口结构对输送性能有很大的影响; 该环形射流泵输送马铃薯、胡萝卜、圣女果和金桔的最高输送能力分别为 3 038.13、2 158.83、2 302.92 和 1 949.50 kg/h; 在相同的面积比和输送高度下, 输送能力随工作流体流量的增加而增大; 在相同的面积比和工作流体流量下, 输送能力随输送高度的升高而降低; 在相同的工况下, 输送椭圆形的果蔬的能力要优于输送长条形果蔬的能力, 输送密度较大的果蔬的能力要优于输送密度较小的果蔬的能力。输送单位质量果蔬的能耗在低流量比时变化不明显, 在高流量比时有较大提升。马铃薯和胡萝卜在输送过程中损伤很小, 损伤原因是与管道或泵内壁或者管道接口处碰撞, 马铃薯和胡萝卜的最大质量损失率分别为 0.13%和 0.21%, 最大表面损失率为 0.68%和 1.20%, 圣女果和金桔在所有工况没有损伤。该研究可为今后环形射流泵输送果蔬的深入研究提供参考。

**关键词:** 泵; 农作物; 试验; 环形射流泵; 果蔬输送; 输送性能; 损伤

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.005

中图分类号: S233.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-07-0036-07

龙新平, 邹佳林, 徐茂森, 左 丹, 龙 云, 王 炯. 改进型环形射流泵输送不同果蔬试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 36—42. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.005 http://www.tcsae.org

Long Xinping, Zou Jialin, Xu Maosen, Zuo Dan, Long Yun, Wang Jiong. Experiment on using modified annular jet pump to deliver different fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 36—42. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.07.005 http://www.tcsae.org

### 0 引 言

随着农业产业与食品加工业的发展, 农产品的快速、无损与清洁输送成为了亟需解决的问题<sup>[1-3]</sup>。传统的物料输送方式多采用机械式输送机, 包括斗式提升机、刮板输送机、气力输送机、O 型带输送机、螺旋输送机等, 虽然各具特色, 但也有结构复杂、输送物料种类较为单一、适应性不广、成本高昂等缺点, 且果蔬在输送过程中易损伤<sup>[4-12]</sup>。因此开发一种物料输送方式就显得尤为重要。

射流泵是以高速射流作为工作介质, 通过流体微团的紊动扩散作用, 把能量传给被吸流体(气体、液体、固体或其混合物)的一种流体机械及混合反应设备<sup>[13]</sup>。该装置主要由喷嘴、吸入室、喉管和扩散管几部分组成。根据喷嘴和吸入室位置的不同, 可将射流泵分为中心射流泵和环形射流泵两类。中心射流泵的喷嘴在射流泵装置轴中心位置, 吸入管环绕喷嘴一周形成环形吸入室。与中心射流泵相反, 环形射流泵喷嘴和吸入室位置互换, 其工作流体环绕在被吸流体进口管道周围, 形成环形射流。

环形射流泵具有内部无运动部件、结构简单、过流

通道宽敞、对所输送物体损伤小等优点, 特别适合输送颗粒状物料。目前对于环形射流泵的研究主要集中在其内部流场分布<sup>[14-19]</sup>和结构优化<sup>[20-28]</sup>等方面, 学者对其在农业方面的应用较少涉及。Xiao 等<sup>[29-30]</sup>进行了环形射流泵输送草鱼的研究并观察及分析了草鱼在泵内的运动状态, 并且分析了内部流场对于输送性能的影响; 徐茂森等<sup>[31]</sup>进行了环形射流泵输送马铃薯的试验, 分析了流量比、面积比、输送高度等因素对环形射流泵输送马铃薯的输送能力的影响及马铃薯在输送过程中的损伤。

为了研究果蔬的形状、尺寸和密度等因素对输送性能的影响, 本文将在已有研究的基础上进行更多种类果蔬(马铃薯、胡萝卜、圣女果、金桔)的试验研究, 从更多方面分析影响输送性能的因素。另外, 文献[31]采用的锥形网管入口具有较大的局限性, 使得输送性能不高, 不利于实际应用。本文提出了一种新的入口设计, 以提高输送能力和改善其适用性。本文对不同种类果蔬在不同工况下的输送能力进行了研究, 并计算了各工况下驱动泵的水功率和输送单位质量果蔬的能耗(以下简称为单位质量能耗), 观察了果蔬的损伤情况, 以期今后环形射流泵进行果蔬输送的深入研究提供参考。

### 1 材料与方法

#### 1.1 试验装置

本文采用的环形射流泵的结构和尺寸与文献[31]一致, 喉管直径为 60 mm, 其结构及工作原理如图 1 所示。

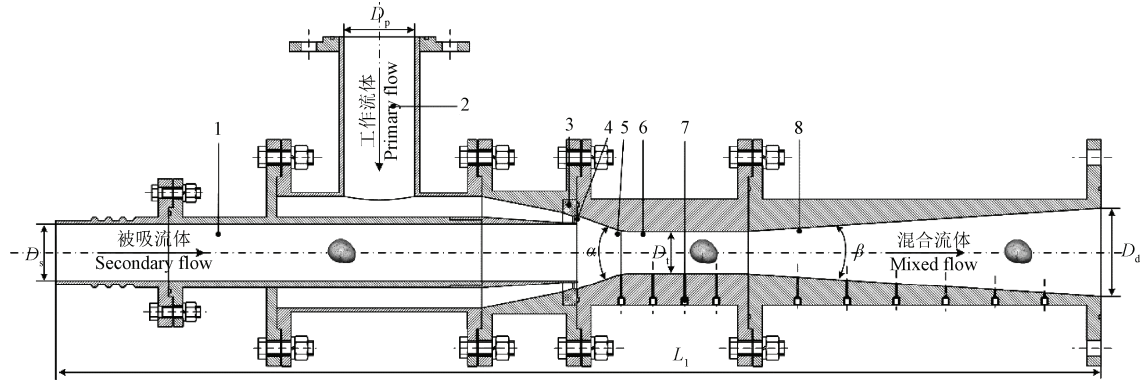
收稿日期: 2016-09-01 修订日期: 2017-04-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51179134, 11472197)

作者简介: 龙新平, 男, 湖北监利人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事流体喷射技术, 泵与泵装置的优化运行研究。武汉 水射流理论与新技术湖北省重点实验室(武汉大学), 430072。Email: xplong@whu.edu.cn

其工作原理是:工作流体由工作流体输送管进入环形喷嘴后高速喷出,压力降低卷吸含有果蔬的被吸流体经被吸流体输送管进入混合室与高速的工作流体混合并进行动量和能量交换,工作流体速度降低,被吸流体速度升高;在喉管出口处,工作流体和被吸流体的速度趋于一致;

随后混合流体在扩散管内动能降低,势能升高,最后经出口管排出。本试验采用的环形射流泵的控比环可由控比环调节。控比环是外径 150 mm 而内径不同的一系列环状部件,通过更换控比环可改变环形喷嘴截面积  $A_j$  从而改变环形射流泵的控比。



1.被吸流体输送管 2.工作流体输送管 3.控比环 4.环形喷嘴 5.收缩室 6.喉管 7.测压孔 8.扩散管  
1.Secondary flow tube 2.Primary flow tube 3.Control ring 4.Annular nozzle 5.Suction chamber 6.Throat tube 7. Pressure measuring hole 8.Diffuser

注:  $D_s$  为被吸流体输送管直径, 80 mm;  $D_p$  为工作流体输送管直径, 100 mm;  $D_t$  为喉管直径, 60 mm;  $D_d$  为出口管直径, 125 mm;  $L_1$  为泵总长度, 1 480 mm;  $\alpha$  为收缩角,  $39^\circ$ ;  $\beta$  为扩散角,  $7^\circ$ 。

Note:  $D_s$  is secondary flow tube diameter, 80 mm;  $D_p$  is primary flow tube diameter, 100 mm;  $D_t$  is throat tube diameter, 60 mm;  $D_d$  is outlet tube diameter, 125 mm;  $L_1$  is total length, 1 480 mm;  $\alpha$  is reduction angle,  $39^\circ$ ;  $\beta$  is diffusion angle,  $7^\circ$ 。

图1 环形射流泵结构示意图  
Fig.1 Sketch map of annular jet pump

环形射流泵的性能常用一组无量纲参数描述, 分别为

$$m = \frac{A_i}{A_j} \quad (1)$$

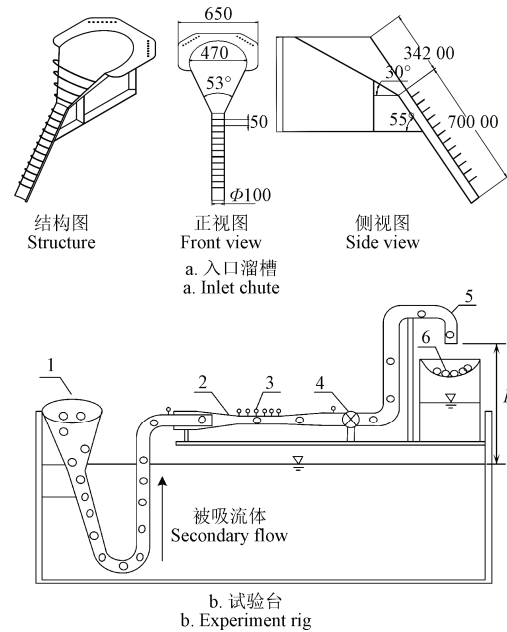
$$q = \frac{Q_s}{Q_j} \quad (2)$$

$$h = \frac{P_c - P_s}{P_j - P_c} \quad (3)$$

$$\eta_p = \frac{m_p}{t} \quad (4)$$

式中  $m$  为面积比;  $q$  为流量比;  $h$  为压力比;  $\eta_p$  为输送能力, kg/h;  $A_i$  为喉管截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $A_j$  为环形喷嘴截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $Q_s$  为被吸流体流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $Q_j$  为工作流体流量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $P_c$  为混合流体出口压力, kPa;  $P_s$  为被吸流体压力, kPa;  $P_j$  为工作流体压力, kPa;  $m_p$  为输送果蔬总质量, kg;  $t$  为输送时间, s。

本试验装置采用实验室现有的射流泵试验台<sup>[31]</sup>。文献[31]采用的进料口是锥形网管, 其收缩角过小会造成果蔬的堵塞, 降低输送能力, 且不固定, 投料时需人工扶持, 本试验在其基础上改进了物料入口结构, 根据增大入口溜槽收缩角度以及减小劳动量的原则设计了一种入口溜槽装置, 其结构及尺寸如图 2a 所示, 形状为逐渐收缩的弧形溜槽, 其下半部为白铝皮制造, 上半部采用尼龙绳编制的网封闭。试验表明, 新的入口溜槽装置能降低果蔬在进入泵时的机械损伤, 并改善快速投料时入口位置的堵塞现象从而提高果蔬的输送能力。环形射流泵试验台的整体布置如图 2b 所示。



1.入口溜槽 2.环形射流泵 3.压力传感器 4.电磁流量计 5.出口软管 6.回收箱  
1.Inlet chute 2.Annular jet pump 3.Pressure transducer 4.Electromagnetic flowmeter 5.Outlet hose 6.Recycling tank  
注:  $H$  为输送高度, m。 Note:  $H$  is transportation height, m

图2 果蔬输送试验台  
Fig.2 Experiment rig of fruits and vegetables transportation

## 1.2 测量设备

本试验在泵的入口位置、工作流体出口位置、喉管、扩散管以及混合流体出口位置安装有压力传感器, 采用武汉超宇公司生产的 CY3011BCP30N 型压力变送器, 其精度为 0.5%; 在射流泵工作流体管段和出口管段安装有 KROHNE 公司生产的分体式电磁流量计, 信号转换器和传感器型号分别为 IFC300F 和 IFS4000, 其精度为 0.2%。

流量计和压力传感器的信号线通过接线箱汇集然后通过数据传输总线传输到数据采集箱进行数据采集。质量测量设备采用电子秤,其精度为 0.5%;计时设备采用秒表。测量设备满足本试验的精度要求。

### 1.3 试验材料

试验采用的果蔬购自武汉大学工学部集贸市场,果蔬大小基本均匀,其特性如表 1 所示。

表 1 果蔬的特性  
Table 1 Features of fruits and vegetables

果蔬种类 Species of fruit and vegetable	密度 Density/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	形状 Shape	平均特征尺寸 Average feature sizes $L\times R/(\text{mm}\times\text{mm})$
马铃薯 Potato	1 057.47	椭球形	56.8×37.5
胡萝卜 Carrot	1 025.18	长柱形	198.4×39.5
圣女果 Cherry tomato	992.88	椭球形	30.4×28.6
金桔 Kumquat	939.10	椭球形	31.4×29.7

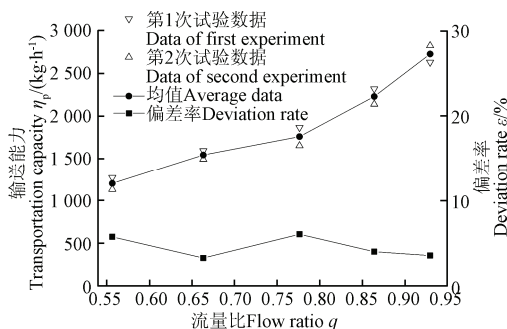
注:  $L$  表示果蔬长度,  $R$  表示果蔬直径。

Note:  $L$  is length of fruits and vegetables,  $R$  is diameter of fruits and vegetables.

### 1.4 试验设计

本试验的目的是为了考察不同因素对于环形射流泵输送果蔬性能的影响以及观察在输送过程中可能发生的损伤,其主要因素包括流量比  $q$ 、输送高度  $H$  (出口软管出口位置与水面的高度差)、不同的果蔬种类。试验时通过改变环形射流泵入口阀门开度调节工作流体流量来改变流量比,并保持其他因素不变;通过改变出口软管的高度来改变输送高度并保持其他因素不变;在同一工况下输送不同种类的果蔬;通过对比果蔬过泵前后的状态,分析损失类型及成因。主要试验过程为:首先调节试验需要的工况,并等待一段时间待系统稳定后,通过电子秤称量果蔬的质量,打开数据采集器,然后将果蔬倒入入口溜槽,同时按下秒表开关并在果蔬全部输送完毕后记录整个输送过程的时间。每种果蔬的每一个工况进行至少 2 次试验,记第 1 次试验值为  $D1$ ,第 2 次试验值为  $D2$ ,计算其偏差率  $\varepsilon$ ,当偏差率  $\varepsilon$  小于 10% 时认为试验数据有效,反之则重新进行试验,直到 2 次试验的偏差率小于 10%。图 3 给出了面积比为 3,输送高度为 1.95 m 时土豆输送试验的数据偏差图,其中偏差率最大为 6.07%,可以认为试验结果是可信的。

$$\varepsilon = \frac{|D1 - D2|}{D1 + D2} \times 100\% \quad (5)$$



注: 面积比为 3, 输送高度为 1.95 m

Note: Area ratio is 3, and transportation height is 1.95 m.

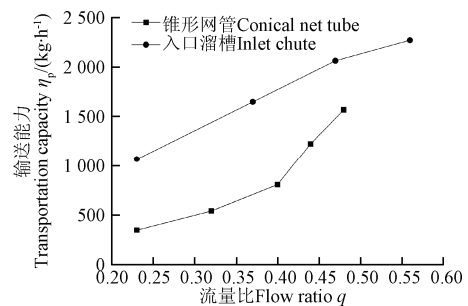
图 3 数据偏差图

Fig.3 Figure of data deviation

## 2 结果与分析

### 2.1 入料口结构对输送性能的影响

文献[31]采用锥形网管作为入口装置,在重复该试验时发现该入口装置存在着易堵塞、果蔬通过效率不高、投料麻烦等问题,故本试验对入口装置进行了改进,改进后的入口装置如图 2a 所示。图 4 给出了 2 种不同入口装置在相同的面积比 3 和输送高度 1.40 m 下不同流量比时输送马铃薯的输送能力对比图。当流量比为 0.23 时,采用锥形网管和采用入口溜槽的马铃薯输送能力分别为 349.08 和 1 067.61  $\text{kg}/\text{h}$ ;当流量比为 0.47 时,采用锥形网管和采用入口溜槽的马铃薯输送能力分别为 1 568.57 和 2 061.09  $\text{kg}/\text{h}$ ,采用新型入口装置时马铃薯的输送能力得到了提升。



注: 面积比为 3, 输送高度为 1.40 m。

Note: Area ratio is 3, and transportation height is 1.40 m.

图 4 不同入口装置下马铃薯的输送能力

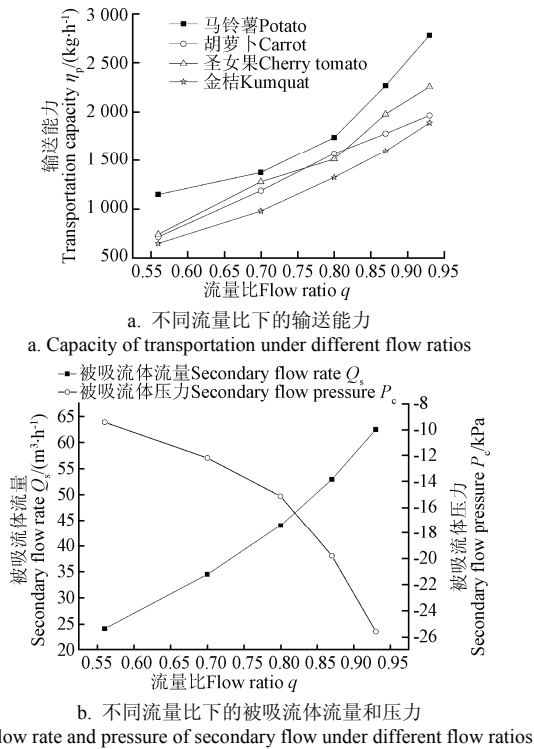
Fig.4 Transportation capacity of potato using different inlet devices

入口溜槽采用的是直接投料的方式,果蔬直接倒入入口溜槽之中,然后经过入口溜槽直接进入管道之中,果蔬的浓度反映了投料时的快慢程度。果蔬的浓度会影响输送性能,浓度过低时,果蔬只会间歇性地被输送,其输送性能得不到发挥;果蔬过浓时,部分情况下可能出现堵塞现象。一般来说,果蔬进入入料口时,堆积在入料口的果蔬会被入口结构控制,并选择性地先后进入吸入口,然后被输送。为了减小堵塞的可能性,应适当控制投料的速度。

### 2.2 输送能力影响因素

在试验中,马铃薯、胡萝卜、圣女果和金桔的最高输送能力分别为 3 038.13、2 158.83、2 302.92 和 1 949.50  $\text{kg}/\text{h}$ 。为分析流量比对果蔬输送的影响,在保持其他工况不变的情况下通过改变入口阀门开度调节流量比并依次进行 4 种不同果蔬的输送试验。在保持面积比为 3,输送高度  $H$  为 1.75 m 的工况下的试验结果如图 5a 所示,结果表明,环形射流泵输送马铃薯的能力最强,输送金桔的能力最弱,在低流量比时输送胡萝卜和圣女果的能力大致相似,在高流量比时圣女果的输送能力稍大于胡萝卜的输送能力。4 种果蔬的输送能力随着流量比变化的趋势大致相似,输送能力随着流量比的增大而增大。这是因为,随着流量比升高,被吸流体流量  $Q_s$  越大,单位时间内能被吸入的果蔬就越多,被吸流体压力  $p_s$  越低,被吸流体对果蔬的卷吸能力越强(图 5b)。试验中证明在同

一工况下,有无果蔬通过对于其被吸流体流量和被吸流体压力的影响不大,故本文均采用无果蔬通过时采集的被吸流体流量与压力数据。



注:面积比为3,输送高度为1.75 m。

Note: Area ratio is 3, and transportation height is 1.75 m.

图5 不同流量比下的输送能力及被吸流体流量和压力  
Fig.5 Capacity of transportation and flow rate and pressure of secondary flow under different flow ratios

由表1可知,马铃薯与胡萝卜的密度相似,密度对于输送性能的影响可以忽略,但形状上有着极大的差异;而圣女果与金桔外形和大小相似,但密度上相差较大。由图5a可以看出,在相同的工况下,输送马铃薯的能力要远大于输送胡萝卜的能力。这是因为:1)胡萝卜的形状是长条状,如果投料过快,在进入斗形入口时极易造成堵塞;2)胡萝卜的运动大致与泵的轴线平行,相较于土豆,单位质量上受到水流对其作用力较小,从而使水流对其的卷吸能力较小,在管道中不能达到较大的速度,导致其输送能力较小;3)果蔬一方面随水流向下游流动,一方面相对水流质点运动,其相对运动在某种程度上可以看成果蔬颗粒在复杂流动条件下的绕流问题,后面会形成类似卡门涡街的流动结构,导致果蔬的摆动,胡萝卜相较其他果蔬摆动较大,使其轴向速度下降,从而影响其输送效率;4)由于试验条件限制,试验所用管道并不是全程平滑的,在软管与钢管的连接处具有台阶,胡萝卜的摆动导致其在通过台阶时容易与台阶碰撞,削弱了胡萝卜的运动速度,严重时由于猛烈撞击胡萝卜还会直接卡在台阶处,严重影响胡萝卜的输送效率。图6显示了到胡萝卜在泵内的摆动和堵塞现象。

在相同的工况下,输送圣女果的能力要大于输送金桔的能力。主要因为圣女果的密度大于金桔的密度。由于入口装置是将果蔬放入溜槽中,管道的吸入口距离水

面有一定的距离,称之为淹没深度。在果蔬倒入到水中后,果蔬由于吸入口的卷吸作用被吸入到管道之中,此时果蔬的密度大小将会影响其能否顺畅的进入管道,圣女果由于其密度与水相近,在吸入口的卷吸作用下能够非常流畅的进入管道,而金桔密度由于比水的小,其在放入溜槽后水对其的浮力将对抗吸入口的卷吸作用,导致其进入管道的过程相较于圣女果更加困难,尤其是当工作流体流量较低时,由于卷吸作用较小,金桔往往不能被吸入到管道之中,造成入口的堵塞。

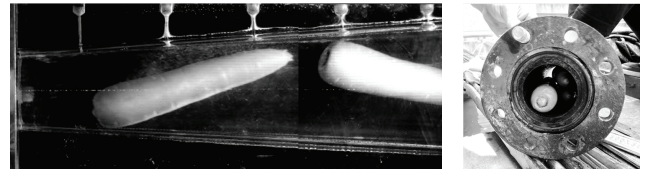


图6 胡萝卜的摆动和堵塞现象  
Fig.6 Swing and blocking phenomenon of carrot

为分析输送高度的影响,在保持其他工况不变的情况下通过改变出口高度调节输送高度并依次进行4种不同果蔬的输送试验。在保持面积比为3、工作流体流量67 m<sup>3</sup>/h的工况下的试验结果如图7a所示。结果表明,4种果蔬的输送能力都随着输送高度的升高而降低,其中马铃薯的输送能力在低流量比的下降趋势较为明显。这是因为随着输送高度升高,被吸流体流量  $Q_s$  越小,单位时间内能被吸入的果蔬就越多,被吸流体压力  $P_s$  越高,被吸流体对果蔬的卷吸能力越弱(图7b)。

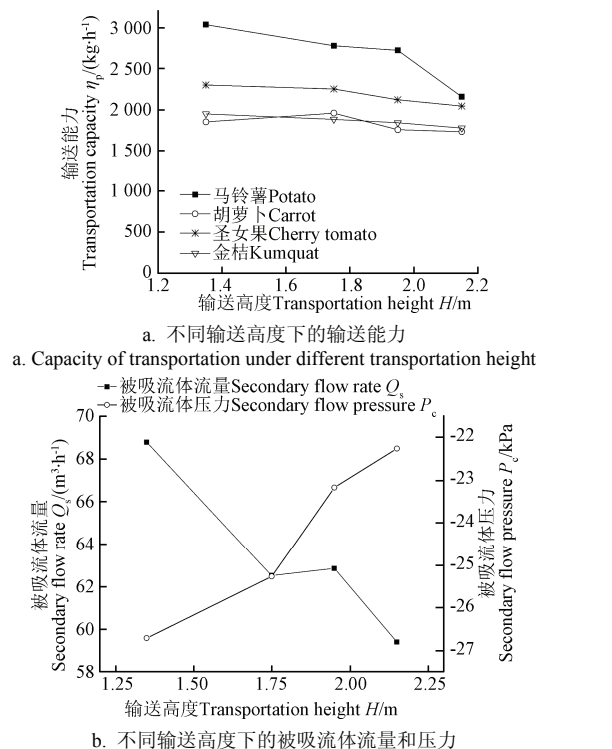


图7 不同输送高度下的输送能力及被吸流体流量和压力  
Fig.7 Capacity of transportation and flow rate and pressure of secondary flow under different transportation height

注:面积比为3,工作流体流量为67 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>。  
Note: Area ratio is 3, and primary flow rate is 67 m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>.

2.3 果蔬输送能耗分析

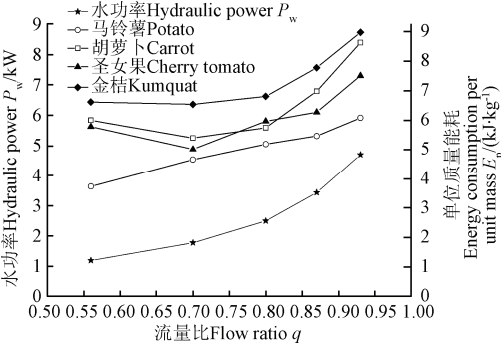
在果蔬输送过程中，能耗是评价环形射流泵性能的重要指标。环形射流泵水功率  $P_w$ （输入功率）可由式（6）计算。由此可以得到输送单位质量果蔬消耗的能量即单位质量能耗  $E_p$ 。

$$P_w = \frac{1}{3.6} Q_j \cdot P_j \tag{6}$$

$$E_p = \frac{P_w}{\eta_p} \times 3.6 \times 10^3 \tag{7}$$

式中  $P_w$  为水功率，kW； $E_p$  为单位质量能耗，kJ/kg。

图 8 所示为面积比 3，输送高度 1.75 m 时不同流量比下的水功率和不同果蔬的单位质量能耗。随着流量比的增加，水功率随着流量比的增加而增加，这是因为工作流体流量和工作流体压力都会随流量比的增加而增加。从单位质量能耗的角度，4 种果蔬的变化趋势大致相似，在一定的流量比范围内，单位质量能耗变化不大，但在较高的流量比时，单位质量能耗有较大升高，这是因为高流量比时环形射流泵出现的空化现象会导致泵的性能下降。



注：面积比为 3，输送高度为 1.75 m。  
Note: Area ratio is 3, and transportation height is 1.75 m.

图 8 不同流量比下的水功率和单位质量能耗

Fig.8 Hydraulic power and energy consumption per unit mass under different flow ratios

2.4 果蔬损伤

在试验过程中，每个工况的试验均采用新鲜无损的果蔬，对比试验前后果蔬的状态，如图 9a 所示，马铃薯出现了表皮破损的情况，出现损伤的原因可能是马铃薯在输送过程中与泵内或管道内壁面或者是管道连接处的

台阶碰撞，图 9b 展示了马铃薯的碰壁现象。胡萝卜也出现了表皮破损的情况，胡萝卜在管道中运动时，会相对于管道轴线摆动，且可能与管道连接处的台阶碰撞，当胡萝卜以较快的速度碰撞时则可能对其造成较大的损伤，故为了减少果蔬的损伤，应采用全程光滑的管道。在输送圣女果和金桔的过程并没有发现其表面有明显的损伤，只有少量的圣女果有掉蒂现象。

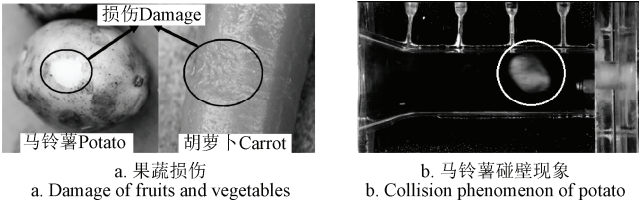


图 9 果蔬的损伤情况

Fig.9 Damage of fruits and vegetables

为了衡量马铃薯和胡萝卜在输送后的损伤程度，进行了果蔬损伤试验，试验步骤为：1）将马铃薯和胡萝卜用清水洗净，并用吸水纸将表面水分吸干，然后置于干燥处 2 min 待其表面水分充分挥发，然后用电子秤分别测量马铃薯和胡萝卜的质量；2）调整环形射流泵的工况，待工况稳定后将马铃薯和胡萝卜投入入口溜槽进行输送，输送完成后进行回收；3）将回收的马铃薯和胡萝卜用吸水纸将表面水分吸干，然后置于干燥处 2 min 待其表面水分充分挥发，然后用电子秤分别测量马铃薯和胡萝卜的质量；4）测量马铃薯和胡萝卜的损伤面积，由于损伤表面的不规则，测量时将损伤表面简化为矩形或者圆形，测量其特征尺寸即可，同理，测量马铃薯和胡萝卜的整体表面积时简化为圆柱形，只测量其特征尺寸。试验步骤中输送前将果蔬洗净是为了避免输送过程果蔬表面泥土等杂质脱落对试验结果的影响，输送前后均用吸水纸将其表面水分吸干是为了避免输送过程中果蔬吸收水分对试验结果的影响。

表 2 给出了在面积比为 3、输送高度为 2.15 m 时果蔬的损伤试验结果。试验结果表明，马铃薯在输送过程中存在质量损失和表面破损，试验中马铃薯和胡萝卜的最大质量损失率分别为 0.13%和 0.21%，最大表面损失率为 0.68%和 1.20%。

表 2 果蔬损伤试验

Table 2 Damage test of fruits

果蔬种类 Species of fruits and vegetables	流量比 Flow ratio	过泵前质量 Mass before transportation/g	过泵后质量 Mass after transportation/g	质量损失 Mass loss/g	质量损失率 Mass loss rate/%	损伤面积 Damaged area /mm <sup>2</sup>	表面积 Surface area/mm <sup>2</sup>	表面损伤率 Surface damaged rate/%
马铃薯 Potato	0.900	823.7	822.6	1.1	0.13	676	100 354	0.67
	0.802	806.8	806.6	0.2	0.02	667	98 295	0.68
	0.701	890.9	890.6	0.3	0.03	108	108 541	0.10
	0.563	821.1	821.1	0.0	0.00	0	105 967	0.00
胡萝卜 Carrot	0.900	536.3	535.2	1.1	0.21	822	68 392	1.20
	0.802	618.5	617.8	0.7	0.11	493	63 855	0.77
	0.701	643.5	643.1	0.4	0.06	436	70 619	0.62
	0.563	554.4	554.1	0.3	0.05	240	64 854	0.37

注：面积比为 3，输送高度为 2.15 m。  
Note: Area ratio is 3, and transportation height is 2.15 m.

### 3 结 论

入口结构对于输送性能具有很大的影响,本文中设计的入口溜槽能够显著地提高果蔬的输送性能;在相同的面积比和输送高度下,环形射流泵的输送能力随着工作流体流量的增加而增大,其原因是被吸流体流量和压力随着工作流体流量的增大而分别增大和减小从而提升了吸入口的卷吸能力。在相同的工况下,环形射流泵输送椭圆形的果蔬的能力要大于输送长条形果蔬的能力;输送密度较大的果蔬的能力要大于输送密度较小的果蔬的能力。

在相同的面积比和工作流体流量下,环形射流泵的输送能力随着输送高度的升高而降低,其原因是被吸流体流量和压力随着输送高度的升高而分别减小和升高从而导致卷吸能力减弱。环形射流泵输送马铃薯、胡萝卜、圣女果、金桔的最大输送能力分别为 3 038.13、2 158.83、2 302.92、1 949.50 kg/h。果蔬输送过程中低流量比时单位质量能耗较低,高流量比时单位质量能耗较高。马铃薯和胡萝卜在输送过程中均出现了表面损伤的情况,损伤原因是与管道或泵内壁或者管道台阶处碰撞,马铃薯和胡萝卜的最大质量损失率分别为 0.13%和 0.21%,最大表面损失率为 0.68%和 1.20%,圣女果和金桔在所有工况没有损伤。

#### [参 考 文 献]

- [1] 卢秉福,张祖立,朱明,等. 农业机械化发展关键影响因素的辨识与分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 114—117. Lu Bingfu, Zhang Zuli, Zhu Ming, et al. Discrimination and analysis of the key influencing factors for agricultural mechanization development[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(11): 114—117. (in Chinese with English abstract)
- [2] 朱明,沈瑾,孙洁,等. 中国农产品产地加工产业布局分析及发展对策[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 1—6. Zhu Ming, Shen Jin, Sun Jie, et al. Industrial layout and development countermeasures of agricultural products processing in producing areas of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [3] 朱明. 中国农业工程发展展望[J]. 农业工程学报, 2003, 19(11): 1—8. Zhu Ming. Projection on the development of China's agricultural engineering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(11): 1—8. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘洪义,朱晓民,谭海林,等. 马铃薯分级生产线及其关键设备的设计[J]. 农机化研究, 2010(4): 84—86. Liu Hongyi, Zhu Xiaomin, Tan Hailin, et al. The design of potato grading production line and its key equipment[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010(4): 84—86. (in Chinese with English abstract)
- [5] 赵玉文,李云海. 带式输送机的现状与发展趋势[J]. 煤矿机械, 2004:1—3. Zhao Yuwen, Li Yunhai. The present and future development of belt conveyor[J]. Coal Mine Machinery, 2004:1—3. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李玉瑾. 带式输送机的动态特性分析与软启动设计[J]. 煤炭学报, 2002, 27(3): 294—299. Li Yujin. Dynamic analysis and soft starting design of belt conveyor[J]. Journal of China Coal Society, 2002, 27(3): 294—299. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘凯,张安宁,叶国徽. 基于 ANSYS 的带式输送机传动滚筒的有限元分析[J]. 煤矿机械, 2011, 32(1): 101—102. Liu Kai, Zhang Anning, Ye Guohui. Finite element analysis of driving pulley of belt conveyor based on ANSYS[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(1): 101—102. (in Chinese with English abstract)
- [8] 史增录,赵武云,吴建民,等. 4UX-550 型马铃薯收获机悬挂机组液耦合仿真[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 98—102. Shi Zenglu, Zhao Wuyun, Wu Jianmin, et al. Suspension unit hydraulic-mechanical coupling simulation of 4UX-500 potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 98—102. (in Chinese with English abstract)
- [9] 魏宏安,王蒂,连文香,等. 4UFD-1400 型马铃薯联合收获机的研制[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 11—17. Wei Hongan, Wang Di, Lian Wenxiang, et al. Development of 4UFD-1400 type potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(1): 11—17. (in Chinese with English abstract)
- [10] 魏宏安,张俊莲,杨小平,等. 4UFD-1400 型马铃薯联合收获机改进设计与试验[J]. 农业工程学报, 2014, 30(3): 12—17. Wei Hong'an, Zhang Junlian, Yang Xiaoping, et al. Improved design and test of 4UFD-1400 type potato combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 12—17. (in Chinese with English abstract)
- [11] 吕金庆,田忠恩,杨颖,等. 4U2A 型双行马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 17—24. Lü Jingqin, Tian Zhong'en, Yang Ying, et al. Design and experimental analysis of 4U2A type double-row potato digger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(6): 17—24. (in Chinese with English abstract)
- [12] 吕金庆,田忠恩,吴金娥,等. 4U1Z 型振动式马铃薯挖掘机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 39—47. Lü Jinqing, Tian Zhong'en, Wu Jine, et al. Design and experiment on 4U1Z vibrating potato digger[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(12): 39—47. (in Chinese with English abstract)
- [13] Shimizu Y, Nakamura S, Kuzuhara S, et al. Studies of the configuration and performance of annular type jet pumps[J]. Journal of Fluids Engineering, 1987, 109: 205—212.
- [14] Xiao Longzhou, Long Xinping. Cavitating flow in annular jet pumps[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, 71: 116—132.
- [15] Xiao Longzhou, Long Xinping, Lyu Qiao, et al. Numerical investigation on the cavitating flow in Annular Jet Pump under different flow rate ratio[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IOP Publishing, 2014, 22(5): 052001.
- [16] 杨雪龙,龙新平,肖龙洲,等. 不同湍流模型对射流泵内部流场模拟的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31: 98—102. Yang Xuelong, Long Xinping, Xiao Longzhou, et al. Influence of different turbulence models on simulation of internal flow field of jet pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31: 98—102. (in Chinese with English abstract)
- [17] Gazzar A A E, Meakhail T, Mikhail S. Numerical study of flow inside an annular jet pump[J]. Journal of Thermophysics & Heat Transfer, 2012, 20(4): 930—932.
- [18] Xiao Longzhou, Long Xinping, Zhang Junqiang. Shear cavitation in an annular jet pump under recirculation conditions[J]. Journal of Fluids Engineering, 2016, 138(6): 1—14.
- [19] Elger D F, Taylor S J, Liou C P. Recirculation in an annular-type jet pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 1994, 116: 735—740.
- [20] Narabayashi T, Yamazaki Y, Kobayashi H, et al. Flow analysis for single and multi-nozzle jet pump[J]. Jsme International Journal, 2006, 49(4): 933—940.

- [21] Tohru M, Osamu K, Yamamoto M. Effects of inlet swirl on the performance of annular jet pump[J]. *Astrophysical Journal*, 2007, 673(1): 598.
- [22] 肖龙洲, 龙新平. 吸入室角度对环形射流泵空化性能的影响[J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2015, 49(1): 123–129. Xiao Longzhou, Long Xinping. Influence of inclined angle on cavitation performance of annular jet pump[J]. *Journal of Zhejiang University: Engineering Science*, 2015, 49(1): 123–129. (in Chinese with English abstract)
- [23] Xiao Longzhou, Long Xinping, Wu Wei, et al. Numerical investigation on the impact of the converging angle of the suction chamber on annular jet pumps[J]. 2013, 52(7): 668–672.
- [24] Lyu Qiao, Xiao Zhihui, Zeng Qinglong, et al. Implementation of design of experiment for structural optimization of annular jet pumps[J]. *Journal of Mechanical Science & Technology*, 2016, 30(2): 585–592.
- [25] Lu Xinxiao, Wang Deming, Shen Wei, et al. Experimental investigation on liquid absorption of jet pump under operating limits[J]. *Vacuum*, 2015, 114: 33–40.
- [26] Mohan S, Samad A. Jet pump design optimization by multi-surrogate modeling[J]. *Journal of the Institution of Engineers (India): Series C*, 2015, 96(1): 13–19.
- [27] Long Xinping, Zeng Qinglong, Yang Xuelong, et al. Structure optimization of an annular jet pump using design of experiment method and CFD[C]// *Proceedings of the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2012: 052020.
- [28] 曾庆龙, 龙新平, 肖龙洲, 等. 环形射流泵结构优化设计[J]. *排灌机械工程学报*, 2014, 2: 98–102. Zeng Qinglong, Long Xinping, Xiao Longzhou, et al. Structure optimization of annular jet pumps[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2014, 2: 98–102. (in Chinese with English abstract)
- [29] Xiao Longzhou, Long Xinping, Li Li, et al. Movement characteristics of fish in a jet fish pump[J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 480–492.
- [30] Long Xinping, Xu Maosen, Lyu Qiao, et al. Impact of the internal flow in a jet fish pump on the fish[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 126: 313–320.
- [31] 徐茂森, 龙新平, 祝叶, 等. 射流式马铃薯输送泵性能试验[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(11): 48–53. Xu Maosen, Long Xinping, Zhu Ye, et al. Performance experiment of jet potato transport pump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(11): 48–53. (in Chinese with English abstract)

## Experiment on using modified annular jet pump to deliver different fruits and vegetables

Long Xinping, Zou Jialin, Xu Maosen, Zuo Dan, Long Yun, Wang Jiong

(1. Key Laboratory of Hubei Province for Waterjet Theory and New Technology (Wuhan University), Wuhan 430072, China;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** With the development of agricultural industry, the requirement of fruits and vegetables conveying is increasing, the traditional way of gradually conveying fruits and vegetables cannot satisfy demand. As a result, the improvement or innovation of the way of fruits and vegetables conveying is particularly important. Compared with the traditional way of fruits and vegetables conveying, the use of annular jet pump (AJP) for fruit and vegetable conveying have the advantages of nondestructive, reliable, fast and strong adaptability, etc. In this study, we conducted experiments to search the performance of annular jet pump with the throat diameter of 60 mm and area ratio in 1.75 and 3 to measure its transmission capacity for transporting different fruits and vegetables (potato, carrot, cherry tomato and kumquat) under different conditions. We also analyzed the effect of various factors (flow, head, and fruit and vegetable species) on the transmission capacity, recorded and analyzed the damage in the process of conveying fruits and vegetables. Considering the characteristics of the fruits and vegetables conveying, a conical net tube was used to centralize fruits and vegetables with extremely low possibility of mechanical damage and the lift of AJP was used to control the outlet pressure instead of the outlet tube valve, which avoided potential mechanical damage on fruits and vegetables. Based on the experiments, we demonstrated the impacts of flow ratio and the lift of AJP, as well as different fruits and vegetables on the capacity in fruits and vegetables conveying. The experimental results show that: 1) the maximum transmission capacity of potato, carrot, cherry tomato and kumquat were 3 038.13, 2 158.83, 2 302.92, 1 949.50 kg/h, respectively. The performance of transmission capacity of four fruits and vegetables changes with flow ratio was similar. The transmission capacity increased with the increase of flow ratio under the same area ratio and lift of AJP because the secondary flow rate increased and pressure decreased. Energy consumption per unit mass changed little under small flow ratio but increased sharply under big flow ratio when the hydraulic power continuously increased; 2) the transmission capacity decreased with the increase of lift of AJP under the same flow ratio and area ratio because the secondary flow rate decreased and pressure increased; 3) conveying fruits and vegetables with ellipsoid shape was easier than fruits and vegetables with elongated shape, conveying fruits and vegetables with large density was easier than fruits and vegetables with low density; 4) there was no damage in the process of conveying cherry tomatoes and tomatoes when there were scratches on the surface of the potatoes and carrots. The maximum mass loss rates were 0.13% and 0.21% and the maximum surface loss rates were 0.68% and 1.20% for potatoes and carrots, respectively. Consequently, the main contribution of our work was to demonstrate the influence of flow ratio,  $H$ , and different fruits and vegetables on the transportation of fruits and vegetables and to discuss the potential damage risks caused by operation conditions for fruits and vegetables in the AJP. More importantly, the present paper proves the potential of AJP for fruits and vegetables conveying and provides references for the optimization of AJP, which aims to minimize the fruits and vegetables damage rate and improve the transportation capacity of fruits and vegetables.

**Keywords:** pumps; crops; experiments; annular jet pump; fruits and vegetables conveying; transmission capacity; damage