doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.057

整叶类蔬菜清洗机设计与试验

马雪飞　杜志龙　马季威　李佳伟　赵　丹　曹光矗
(中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 针对整叶类蔬菜清洗过程中整叶、低损伤、有序的要求,设计了以气浴和水流为清洗动力的整叶类蔬菜清洗机。确定了清洗工艺流程,进行了清洗机整体结构设计,针对菜叶遇水粘附、上浮等清洗难点,模拟人工清洗过程,设计料筐周期性上下振动方式清洗。对清洗机清洗槽和过滤装置、气泡发生装置、水流喷射装置等关键部件进行设计,实现设备自动化运转。针对喷气管路进行流体动力学模拟仿真,对不同气流流速下的气相分布情况进行研究,确定气流流速范围为 2 ~ 8 m/s,用以指导风泵的选型。选定气流流速 6 m/s 作为参数,对不同喷气孔径、喷气孔间距的管路进行模拟仿真,以气相分布均匀程度作为评价指标,得出最优管路参数为喷气孔径 8 mm、喷气孔间距 50 mm。以整棵菠菜为清洗物料,选定清洗量、清洗时间、气浴强度作为因素,各选定三水平,同时设定空白列,进行四因素三水平正交试验。清洗试验以破损率和洗净率作为评价指标,按照破损率和洗净率各占 0.5 的权重进行正交试验分析和方差分析。清洗试验结果表明,清洗量、清洗时间、气浴强度对菠菜洗净率、破损率影响显著,最佳菠菜清洗参数清洗量为 4 kg、清洗时间为 120 s、气浴强度为 5 m/s。

关键词: 整叶蔬菜; 清洗机; 低损伤; 气浴清洗; 水流清洗
中图分类号: TS255.35　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2018)S0-0419-07

Design and Experiment on Washer for Whole-leaf Vegetables

MA Xuefei　DU Zhilong　MA Jiwei　LI Jiawei　ZHAO Dan　CAO Guangchu
(*Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: According to the requirements of leaf integrity, low damage and order in the cleaning process of whole-leaf vegetables, a washer was designed by integrating the cleaning power of air-bubble and water-jets. The cleaning process was determined, and the whole structure of the washer was designed. In view of difficulties in cleaning, such as leaves adhesion and floating in water, the basket was designed to vibrate and up-and-down motion periodically in order to simulate the manual cleaning process. The key components were designed, such as the rinse tank and filter, bubble generator and water jet, and the automatic operation of the equipment was realized. The computational fluid dynamics simulation was carried out for the air jet pipeline, and the distribution of gas phase at different air flow rates was studied, and the air flow rate range was determined as 2 ~ 8 m/s, and the selection of air pump was guided. The simulation of different pipelines with different diameters of air-jet hole and different hole spacings was done at air flow rate of 6 m/s. The gas phase distribution uniformity was used as the evaluation index, and the optimal pipeline parameters were got as air-jet hole diameter was 8 mm and hole spacing was 50 mm. Taking the whole spinach as the cleaning material, the washing weight, cleaning time and intensity of airflow were selected as factors which had three levels respectively, and a blank column was set at the same time for the four-factor and three-level orthogonal experiment. The damage rate and cleaning rate were used as evaluation indexes in cleaning test, and the comprehensive evaluation index was calculated according to the weight of damage rate and cleaning rate which accounted for 0.5. Orthogonal experimental analysis and variance analysis were performed. The test results showed that washing weight, cleaning time and intensity of airflow have signifcant influences on cleaning rate and damage rate of spinach, and the optimum cleaning parameters of spinach were obtained as washing weight was 4 kg, cleaning time was 120 s, and the intensity of airflow was 5 m/s.

Key words: whole-leaf vegetables; washer; low-damage; air-bubble cleaning; water-jets cleaning

收稿日期: 2018-07-05　修回日期: 2018-08-20
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0400404)
作者简介: 马雪飞(1993—),男,硕士生,主要从事净菜加工关键技术及装备研究,E-mail: 15910412261@163.com
通信作者: 杜志龙(1979—),男,研究员,主要从事果蔬加工工艺与装备研究,E-mail: 13810043018@163.com

0 引言

清洗是蔬菜加工过程的关键环节之一,对提升蔬菜品质至关重要。此环节主要去除蔬菜表面的泥沙、虫卵、碎叶、腐殖质等杂质,为后续加工或直接食用提供干净、优质的菜源。

蔬菜清洗技术最早应用于对蔬菜原料破损率无特殊要求的场合,如用于榨汁、切割等蔬菜原料的清洗。此类清洗设备一般采用毛刷式或滚筒式清洗,机械结构简单,清洗过程作用力强,清洗效果好,但是对物料的损伤比较大,仅适用于根茎类蔬菜的清洗[1-3]。随着中央厨房概念的兴起,市场上出现鲜切蔬菜。鲜切菜清洗设备采用气泡式或水流式清洗,清洗作用力比较柔和[4-6],但是蔬菜在清洗过程中需经切块、切段处理,无法满足整叶类蔬菜清洗过程低损伤的要求,且清洗完成后蔬菜杂乱无序,不利于进一步整序包装。

本文结合气泡式和水流式两种清洗方法,改进工艺和结构,设计适用于整叶类蔬菜的自动清洗设备,在保证清洗率的前提下,减少整叶类蔬菜清洗过程中的受损情况,降低损伤率,确保清洗结束后蔬菜摆放相对整齐有序,便于后续的包装整理。

1 整机结构

整叶类蔬菜清洗机主要由水流喷射装置、气泡发生装置、清洗池、过滤装置、机架、料筐升降装置和控制箱等部分组成,如图 1 所示。隔板将清洗槽分为清洗池和循环水池两部分,清洗池内进行蔬菜清洗工作,循环水池内存储过滤后的循环水,为水泵提供水源。空气被风机压缩后进入气流管路,通过喷气管上若干喷气小孔形成大量不同压力和大小的气泡,利用气泡清洗机理实现对蔬菜的清洗[7-9]。另一方面,水泵将循环水池内的水注入喷水管,通过射流管路末端若干喷头将水流射向蔬菜,利用水流清洗机理实现对蔬菜的清洗,同时促进清洗水的过滤循环。清洗过程中,将料筐放置于料筐升降装置上,在气缸的作用下,料筐压紧随托架机构沿直线导轨下降至清洗槽底部进行清洗。控制箱配置人机交互界面,用于控制水泵、风机、气缸、电磁阀、进水阀和排水阀等元器件的工作。

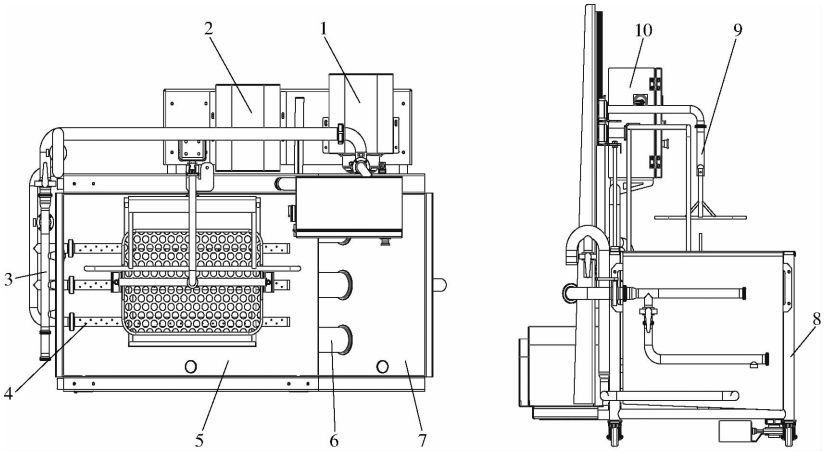


图 1 整机示意图

Fig. 1 Schematic of whole machine

1. 水流喷射装置 2. 气泡发生装置 3. 喷水管 4. 喷气管 5. 清洗池 6. 过滤装置 7. 循环水池 8. 机架 9. 料筐升降装置 10. 控制箱

2 清洗工艺过程

蔬菜清洗机的控制系统包括手动和自动两种控制状态。手动控制可以单独控制水泵、风机、气缸、电磁阀、进水阀和排水阀等元器件的工作情况,主要用于系统的调试和试验研究;自动控制状态下根据设定好的程序对水泵、风机、气缸、电磁阀、进水阀和排水阀等元器件进行有序控制,主要应用于实际清洗作业。清洗流程如图 2 所示。

清洗过程中采用上下振动方式进行清洗[10]。由于整叶类蔬菜的表面比较粗糙,各叶片之间相对摩擦力较大,清洗过程中叶片之间容易发生粘附现象,同时,由于浮力作用使叶菜聚集于上部压紧面板,进一步加重粘附现象,导致蔬菜的清洗效果较差。本设计中,整叶类蔬菜清洗机采用上下振动方式进行清洗。清洗过程中,料筐按照设定程序采取周期性上下振动,模拟人工清洗时的抖筐动作,可有效减少整叶类蔬菜之间粘附现象的发生,提升清洗效果。清洗过程采用气浴和水流两种清洗方法,作用力较柔和,对整叶类蔬菜的损伤也比较低,且清洗过程无需人工参与,实现清洗过程自动化。

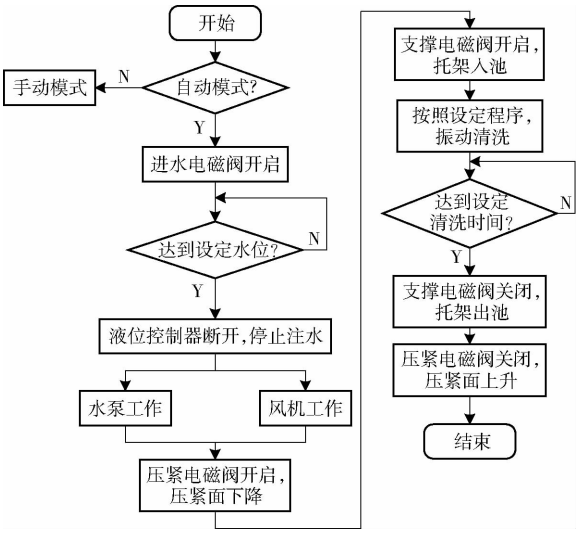


图 2　清洗流程图

Fig. 2　Cleaning flow chart

3　关键部件设计

整叶类蔬菜清洗机能够实现物料的输送和清洗作业，减少整叶类蔬菜在清洗过程中受损情况，确保清洗结束后蔬菜摆放相对整齐有序，便于后续包装整理。针对整叶类蔬菜清洗机气泡发生装置、水流喷射装置等关键部件进行了设计。

3.1　清洗槽和过滤装置

清洗槽包括清洗池和循环水池两部分，清洗池内进行清洗，循环水池内存储过滤之后的循环水；水循环过滤装置主要由弯头和过滤网袋组成，位于清洗槽中间隔板上，用于去除循环水中的泥沙、虫卵、碎叶、腐殖质等杂质。整叶类蔬菜清洗机的整个水循环流程如图 3 所示，图中箭头为循环水的流向。工作过程中，清洗池内的清洗液流经过滤装置后进入循环水池，然后在循环水泵的吸附作用下，循环水池内的清洗液被抽出并提升压力送入水流喷射装置的主流水管中，最后通过水流喷射装置的喷水头将清洗液再次喷入清洗池内。在淹没水流冲击力和循环水泵吸力的双重作用下[11-12]，清洗槽内的虫卵、毛发、碎叶等杂质流向隔板孔处，经过滤网袋进行过滤，实现清洗液循环利用。

清洗槽各部分均采用厚度为 2.5 mm 的 304 不锈钢板折弯、焊合而成，且对清洗槽内部槽面进行抛光处理，有效降低空化腐蚀[13]，满足食品级卫生要求。清洗池和循环水池底部分别设有气动排污阀和手动排污阀，可在气动系统故障时排出污水。此外，清洗槽上设有水位计、温度传感器、气动进水阀等安装孔。循环水池右侧设有溢流口，溢流口限定水位高度 550 mm。清洗池外尺寸为 1200 mm × 650 mm × 750 mm，循环水池外尺寸为 500 mm × 650 mm × 750 mm，两槽底部设有 2° 倾角，可使排水迅速、彻底。

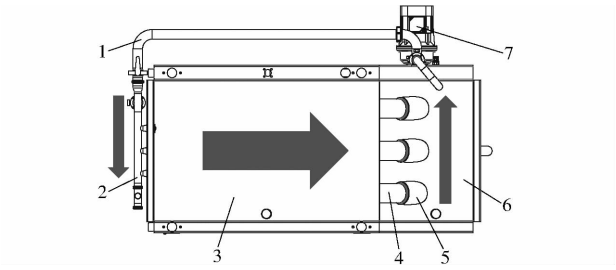


图 3　水循环流程示意图

Fig. 3　Schematic of water circulation process

1. 主流水管　2. 喷水头　3. 清洗池　4. 弯头　5. 过滤网袋　6. 循环水池　7. 循环水泵

3.2　气泡发生装置

气泡发生装置是蔬菜清洗机的主要清洗动力源，主要包括风机、分流调节阀、止回阀、喷气管路和接头等零部件，如图 4 所示。工作过程中，风机将空气压缩，经流量调节阀和止回阀等进入清洗池底部的喷气管，经喷气管路上若干喷气孔形成不同压力和大小的气泡，利用气泡清洗机理实现对蔬菜的清洗。

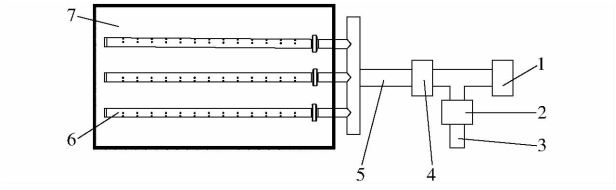


图 4　气泡发生装置结构示意图

Fig. 4　Schematic of bubble generation device

1. 风机　2. 分流调节阀　3. 分流口　4. 止回阀　5. 主流管路　6. 喷气管路　7. 清洗槽

气泡发生装置的喷气管路位于清洗池底部，主要作用是将流入的气体分流进而形成大量不同压力和大小的气泡。为了保证清洗槽内气泡充足，气流管路设计为一条喷气主管路和多条喷气支管路。每条支管路上设有两排错列布置的喷气孔，可使气泡充分溢出，对蔬菜进行冲击清洗。气流管路的主管路和支管路之间设有活接，方便气流管路的拆装，便于后期清洗和维护；各支管路尾部设有带螺纹的喷气管堵，便于各支管内残留清洗液的排出。气泡发生装置中的管路均选用符合食品级要求的 304 不锈钢管，与清洗槽等部件焊接固定；止回管路和风机之间的管路部分选用符合食品级要求的软管进行连接，使风机布置位置相对灵活，便于优化整体结构布局。

3.3　水流喷射装置

水流喷射装置是蔬菜清洗机的另一个清洗动力源，主要包括水泵、流量调节阀、止回阀、喷水口和堵

头等零部件,如图 5 所示。工作过程中,采用水泵将循环水池内的水增压后注入喷水管路,经流量调节阀和止回阀等,最后通过喷气管路末端的若干喷水口将水流射向蔬菜,利用水流清洗机理实现对蔬菜的清洗。

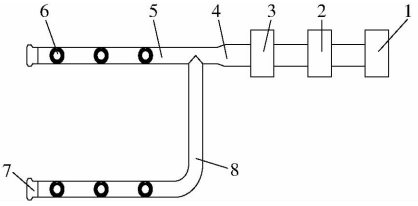


图 5 水流喷射装置结构示意图

Fig. 5 Schematic of water jet device

1. 水泵 2. 流量调节阀 3. 止回阀 4. 主流管路 5. 上分流管路 6. 喷水口 7. 堵头 8. 下分流管路

水流喷射装置的喷水口位于清洗池左侧面,主要作用是将水流喷向被清洗物料,促进水流循环[6]。喷水口结构为球面副结构,可对水射流进行多角度调整。主管路和支管路之间用活接进行连接,方便水流管路的拆卸,便于后期清洗和维护;各支管路尾部设有管堵,可以在清洗结束后将水管内的水全部排出,无积水残留。各部分均选用符合食品级要求的 304 不锈钢管,与清洗槽等部件焊接固定。

4 关键部件 CFD 分析与优化

整叶类蔬菜清洗机关键清洗动力来源为气泡发生装置,清洗液中的气泡分布直接影响气泡式清洗的效果。影响气泡分布情况的因素主要有喷气管路喷孔尺寸、结构和数量、风机的气流流量等[14-16]。针对气泡发生装置采用 Fluent 15.0 软件进行流体动力学仿真(Computational fluid dynamics,CFD),模拟不同参数下清洗液中气泡分布规律,依据仿真结果对气泡发生装置进行优化设计。

4.1 仿真模型构建及网格划分

依据流体动力学仿真要求,将喷气管路及清洗池等结构进行简化,采用 SolidWorks 软件进行三维建模,其中喷气管路直径 38 mm,模拟计算区域为 1 200 mm × 650 mm × 500 mm。建好的模型导入 ICEM 软件中进行适当修改,对各边界设定 part,生成非结构化网格,如图 6、7 所示。

对模型进行基于压力的瞬态模拟,设定重力加速度为 9.81 m/s^2。采用 $k-\varepsilon$ 模型进行求解不同流速下气相分布情况[17-20]。设定喷气管路左侧入口为气流速度入口,清洗池上表面为压力出口,喷气孔交界处为交界面,清洗池和喷气管的其他面为壁面。模拟过程中设定固定迭代步长 0.01 s,计算 100 个时间步长,每个步长最多迭代 20 次。

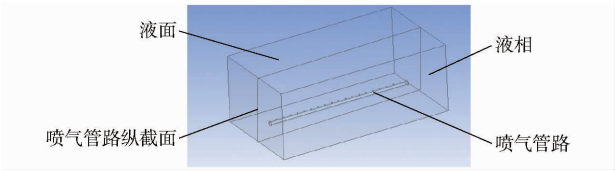


图 6 流场域几何模型

Fig. 6 Geometric model of flow field

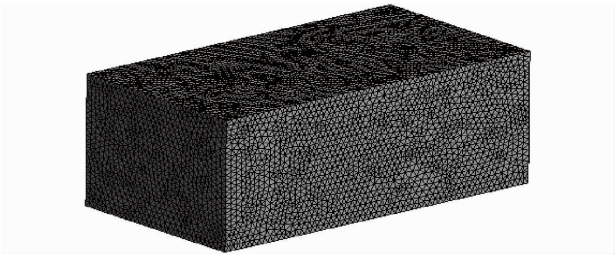


图 7 网格生成

Fig. 7 Mesh generation

4.2 仿真结果及分析

设定气流流速为 2、4、6、8、10 m/s 进行模拟,模拟时间为 1 s 时,喷气管路纵截面气流分布情况如图 8 所示。

从图 8 可看出,模拟时间为 1 s 时,2 m/s 的流速气流基本充满整个流场区域。随气流流速的增加,清洗池内气泡破碎数量增多。当气流流速为 2、8、10 m/s 时,中间喷气孔气流出现减弱现象,且气流流速为 10 m/s 时气流减弱情况比 8 m/s 和 2 m/s 时更加严重。产生这一结果主要与喷气孔孔径及喷气孔间距有关[21]。当气流流速为 6 m/s 时,气相在气液流场中分布最为均匀,流速为 4 m/s 次之。结合模拟效果,设备气流流速范围应控制在 2 ~ 8 m/s 之间,以此流速指导风泵的选型。

针对中间喷气孔气流出现减弱现象,对不同喷气孔径和喷气孔间距的喷气管路进行模拟,如图 9 所示(图中 α 代表喷气孔径,β 代表喷气孔间距)。

气流流速设定为 6 m/s 进行模拟,模拟时间为 1 s,模拟结果如图 10 所示。

从仿真结果可以看出,当 α = 4 mm、β = 50 mm(结构 a)和 α = 8 mm、β = 50 mm(结构 c)气相分布较为均匀,当 α = 4 mm、β = 100 mm(结构 b)气相分布紊乱,喷气孔处气相发生分流现象,造成气相分布均匀性进一步降低。对比结构 a,结构 c 气相分布更为均匀,且在垂直方向上,气相变化幅度小,有利于避免气浴强度不均所造成的清洗物料损伤。综合模拟结果,选定结构 c 作为喷气管路设计方案。

5 清洗试验与分析

整叶类蔬菜清洗机各结构部分和控制系统设计

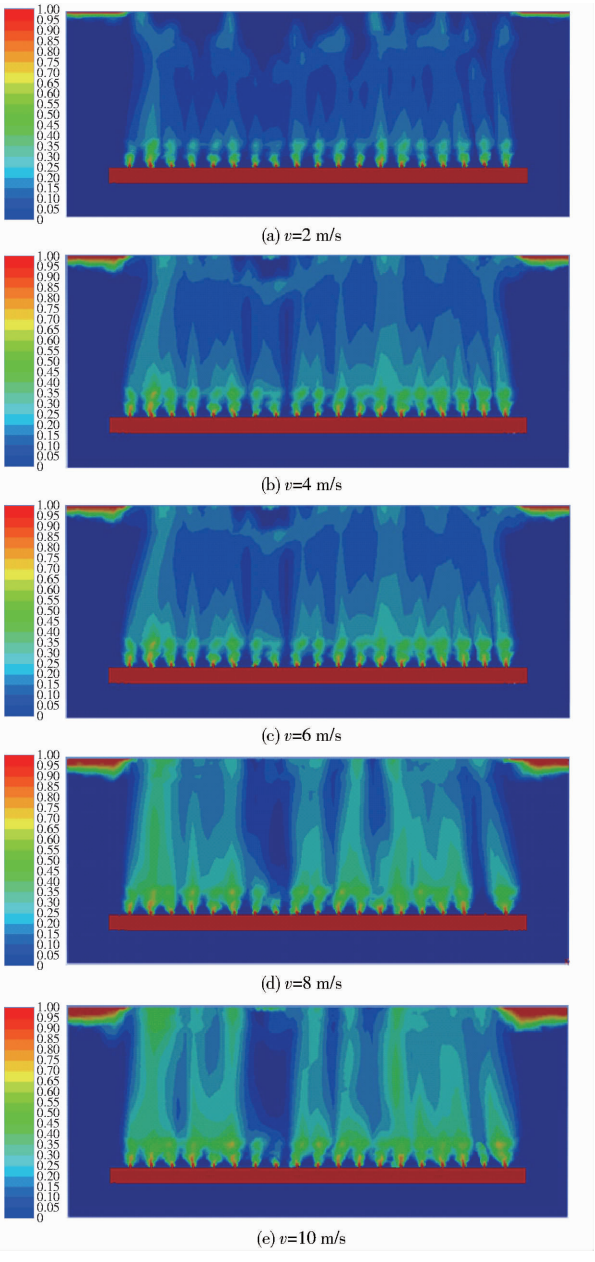


图 8　不同流速下 1 s 时纵截面气流分布

Fig. 8　Air distributions at different flow rate at 1 s

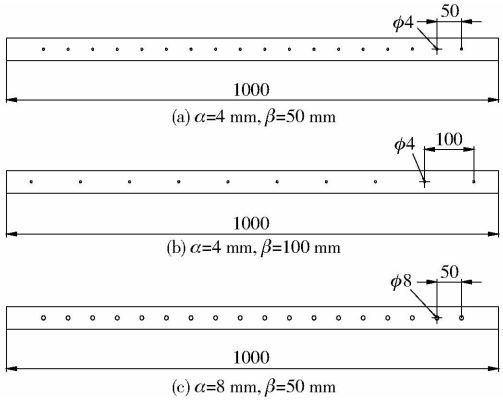


图 9　3 种规格喷气管路

Fig. 9　Three specifications of air-jet pipeline

完成后，进行样机的试制。整叶类蔬菜清洗机完成加工调试，选用同产地同批次的圆叶无刺菠菜作为

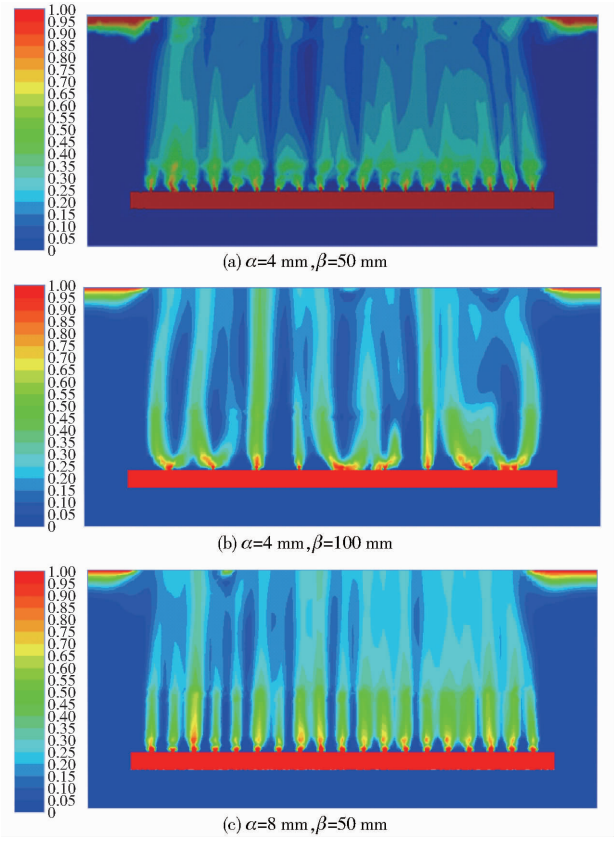


图 10　不同规格喷气管路模拟结果

Fig. 10　Simulation results of different air-jet pipelines

清洗物料，对样机进行试验研究。清洗前，对菠菜进行摘选，选取破损轻微的整棵菠菜，同时对损伤菜叶摘除，避免菠菜运输过程损伤对清洗试验的影响。

5.1　试验评价指标

试验选取洗净率和破损率作为清洗效果的评价指标。其中，破损率越低越好，洗净率越高越好。洗净率的检测方法：清洗后筛选洗净与未洗净的叶片，分别进行称量。目前蔬菜行业没有定量评价蔬菜是否清洗干净的判断标准，洗净率标准只是一种定性的概念，即清洗后肉眼观察蔬菜上无泥沙、腐殖质、毛发、虫卵、碎叶等杂质即为清洗干净。计算公式为

$$X=\frac{\omega_1}{\omega_2}\times 100\% \tag{1}$$

式中　X——洗净率，%

ω_1——洗净叶片质量，g

ω_2——所有叶片质量，g

破损率的检测方法：清洗后筛选完好与破损的叶片，分别进行称量。计算公式为

$$Y=\frac{\omega_3}{\omega_4}\times 100\% \tag{2}$$

式中　Y——破损率，%

ω_3——破损叶片质量，g

ω_4——所有叶片质量，g

5.2 试验因素及水平

影响蔬菜清洗效果的因素有清洗量 A、清洗时间 B、气浴强度 C 3 个因素。本试验以菠菜作为试验蔬菜,选取上述因素进行正交试验,每个因素各有 3 个水平,同时设置空白列,采用四因素三水平进行正交试验[22]。影响因素和水平如表 1 所示。

表 1 试验因素与水平

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	清洗量 A/kg	清洗时间 B/s	气浴强度 C/(m·s^{-1})
1	4.0	100	5
2	5.0	110	6
3	6.0	120	7

5.3 试验结果与分析

本正交试验选定 4 个因素,每个因素 3 个水平,在不考虑交互作用的情况下,选用 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验,正交试验设计和试验结果如表 2 所示。据研究,分别以洗净率和破损率作为评价指标时,所得出各因素的显著性并不一致,需要综合考虑这两个评价指标对清洗效果进行一个合理的评判。利用模糊评判方法,确定出对叶类蔬菜清洗效果的综合评价指标 Z,Z 的表达式为

$$Z = Xa + (1 - Y)b \tag{3}$$

其中 $$a + b = 1$$

式中 Z——综合评价指标

a——洗净率在综合评价指标 Z 中的权重

b——破损率在综合评价指标 Z 中的权重

试验中,破损率和洗净率在综合评价指标 Z 中的权重均为 0.5,即 $a = 0.5$,$b = 0.5$。每次试验重复 3 次取平均值,试验结果如表 2 所示。

表 2 正交试验结果

Tab. 2 Results of orthogonal test

试验号		因素				试验结果/%		
		A	B	C	空白 D	洗净率 X	破损率 Y	综合指标 Z
1		1	1	1	1	88.16	9.43	89.37
2		1	2	2	2	94.94	11.47	91.74
3		1	3	3	3	97.06	13.88	91.59
4		2	1	2	3	88.36	8.18	90.09
5		2	2	3	1	93.19	11.37	90.91
6		2	3	1	2	91.96	10.64	90.66
7		3	1	3	2	83.31	8.91	87.20
8		3	2	1	3	83.52	8.63	87.45
9		3	3	2	1	89.28	9.96	89.66
综合指标	K_1	272.70	266.66	269.94				
	K_2	271.66	270.10	269.60				
	K_3	264.31	271.91	269.13				
	k_1	90.90	88.89	89.98				
	k_2	90.55	90.03	89.87				
	k_3	88.10	90.64	89.71				
	R	2.80	1.75	0.27				
	最优	$A_1B_3C_1$						
	主次	$A > B > C$						

综合评价指标的试验数据分析结果如表 3 所示。

表 3 正交试验数据分析

Tab. 3 Analysis of orthogonal test data

方差来源	离差平方和	自由度	均方值	F	P
A	13.944	2	6.972	126.432	0.008
B	4.741	2	2.371	42.990	0.023
C	2.690	2	1.345	24.393	0.039
误差	0.110	2	0.055		
总和	21.485	8			

从表 3 可看出,因素 A、因素 B 和因素 C 对综合指标的影响显著($P < 0.05$)。根据各因素显著性水平得出各因素影响由大到小顺序为:A、B、C,与直观分析结果一致。从试验方案和数据表可以看出,因素 A 应选取第 1 水平,因素 B 应选取第 3 水平,因素 C 应选取第 1 水平。因此,最优蔬菜清洗组合参数为 $A_1B_3C_1$,即清洗量为 4 kg、清洗时间为 120 s、气浴强度为 5 m/s。

如图 11 所示,清洗后筐内菠菜相对整齐,通过简单整理即可进行后续包装,满足整叶类蔬菜清洗后相对整齐有序的清洗需求。



(a) 清洗前　　(b) 清洗后

图 11　菠菜清洗前后对照

Fig. 11　Contrast of spinach before and after cleaning

6　结论

(1)针对整叶类蔬菜在清洗过程中易损伤,且清洗结束后杂乱无序难以后续包装整理的现有情况,开发了一种采用气浴式和水流式清洗的整叶类蔬菜清洗机。能够在确保蔬菜清洗率较高的前提下,有效降低整叶类蔬菜在清洗过程中的受损伤情况,且整个清洗过程无需人工参与,实现清洗过程自动化。

(2)菠菜清洗试验结果表明,清洗量、清洗时间、气浴强度对菠菜洗净率、破损率影响显著,影响由大到小顺序为清洗量、清洗时间、气浴强度,最佳的蔬菜清洗参数为清洗量 4 kg、清洗时间 120 s、气浴强度 5 m/s。

参　考　文　献

1　康维. 食品工业清洗技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2003.

2　李佳伟, 杜志龙, 宋程. 我国蔬菜清洗技术及设备研究进展[J]. 包装与食品机械, 2017, 35(3):46 – 51.
LI Jiawei, DU Zhilong, SONG Cheng. Developing status of vegetables cleaning techniques and equipments in China[J]. Packaging and Food Machinery, 2017, 35(3):46 – 51. (in Chinese)

3　谢复强. 一种根茎类蔬菜深加工成套流水线:205431993U[P]. 2016 – 08 – 10.

4　陈勤超. 水流式与气泡式蔬菜清洗机清洗效果的比较与研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2007.
CHEN Qinchao. Study on the cleaning effects for water jets washer and air bubble washer of vegetable by comparison[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007. (in Chinese)

5　王海鸥, 胡志超, 吴峰, 等. 超声波臭氧组合果蔬清洗机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7):165 – 169.
WANG Haiou, HU Zhichao, WU Feng, et al. Design and experiment on ultrasonic-ozone washer for fruits and vegetables[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7):165 – 169. (in Chinese)

6　杨红兵, 丁为民, 陈坤杰, 等. 新型蔬菜清洗机的研制[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1):92 – 96.
YANG Hongbing, DING Weimin, CHEN Kunjie, et al. Research and development of a new-style washer of vegetable[J]. Transactions of CSAE, 2005, 21(1):92 – 96. (in Chinese)

7　TAKAHASHI M, CHIBA K, LI P. Free-radical generation from collapsing microbubbles in the absence of a dynamic stimulus[J]. Journal of Physical Chemistry B, 2007, 111(6):1343 – 1347.

8　BURFOOT D, LIMBURN R, BUSBY R. Assessing the effects of incorporating bubbles into the water used for cleaning operations relevant to the food industry[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(8):1894 – 1903.

9　AGARWAL A, NG W J, LIU Y. Principle and applications of microbubble and nanobubble technology for water treatment[J]. Chemosphere, 2011, 84(9):1175 – 1180.

10　高英武, 刘毅君, 任述光, 等. 振动喷淋式蔬菜清洗机的研究[J]. 农业工程学报, 2000, 16(6):92 – 95.
GAO Yingwu, LIU Yijun, REN Shuguang, et al. Vibrating and spraying washer of vegetable[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(6):92 – 95. (in Chinese)

11　吴燕. 涡旋水流清洗技术的机理与实验研究[D]. 无锡:江南大学, 2015.
WU Yan. Study on mechanism and experimental of vortex flow washing technology[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015. (in Chinese)

12　王莉. 淹没水射流清洗机清洗蔬菜的作用原理与运动分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6):130 – 135.
WANG Li. Working principle and kinematic analysis of submerged jet vegetable washer[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(6):130 – 135. (in Chinese)

13　李根生, 沈晓明, 施立德, 等. 空化和空蚀机理及其影响因素[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(1):97 – 102.

14　李中华, 王德成, 刘贵林, 等. 气流分配式排种器 CFD 模拟与改进[J]. 农业机械学报, 2009, 40(3):64 – 68.
LI Zhonghua, WANG Decheng, LIU Guilin, et al. CFD simulation and improvement of air-stream distributive metering device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(3):64 – 68. (in Chinese)

15　李海亮, 胡军, 于海明, 等. 气力式水稻穴盘成型机气流分配室流场仿真与优化设计[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4):94 – 101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20180411&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.011.
LI Hailiang, HU Jun, YU Haiming, et al. Simulation and optimum design on airflow distribution chamber of pneumatic forming machine for rice seeding-growing tray[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4):94 – 101. (in Chinese)

16　陈育辉. 水汽浴与超声波技术在蔬菜洁净加工中的应用研究[J]. 现代农业装备, 2008(12):44 – 46.

17　于勇. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2008.

18　NIE Baisheng, WANG Hui, LI Lei, et al. Numerical investigation of the flow field inside and outside high-pressure abrasive waterjet nozzle[J]. Procedia Engineering, 2011, 26(4):48 – 55.

19　GAO Hongtao, LIU Bingbing, YAN Yuying. Numerical simulation of bubbles motion in lifting pipe of bubble pump for lithium bromide absorption chillers[J]. Applied Thermal Engineering, 2017(115):1398 – 1406.

20　孙帮成, 李明高. ANSYS FLUENT 14.0 仿真分析与优化设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.

21　吴望一. 流体力学.下册[M]. 北京:北京大学出版社, 1983.

22　陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2006.