一种果蔬清洗机数值和实验研究

吴 燕，金光远*，崔政伟，李 静

（1. 江南大学 机械工程学院，江苏 无锡 214122；2. 江南大学 食品先进制造装备技术江苏省重点实验室，江苏 无锡 214122）

摘要：设计了具有U型清洗槽的单涡旋式水流果蔬清洗机，对其清洗特性进行数值研究和局部实验验证，探讨U型清洗槽内横纵孔淹没水射流形成单涡旋水流清洗动力的规律，及涡旋流动对清洗湍流的强化作用；考察不同的横纵孔射流流量比和纵向射流孔位置下清洗槽内三维流动特性，结果表明：横纵射流流量比为2，纵向射流孔水平位置在左侧时清洗槽内单涡旋的三维分布以及横纵射流的相互作用强度较好，涡旋流动显著，可促使单涡旋向出口下游迁移，实验验证与数值模拟结果一致。

关键词：果蔬清洗；水流清洗机；单涡旋式；数值分析

中图分类号：TH 122　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673—1689(2015)12—1308—07

Study on Numerical and Experimental of Fruits and Vegetables Washer

WU Yan，　*JIN Guangyuan**，　*CUI Zhengwei*，　*LI Jing*

（1. School of Mechanical Engineering，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. Jiangsu Province Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China）

Abstract：A U-shaped single vortex water washer for fruits and vegetables was designed and its effect on vortex water washing was investigated. Results showed that the three-dimensional distribution and the intensity of interaction between transverse and longitudinal jets were optimal when the ratio of transverse to longitudinal jet flow was 2 and the longitudinal jet hole was left，significantly forming vortex and promoting the migration of single vortex to outlets. The experimental results were consistent with those from the numerical simulation.

Keywords：Fruit and vegetable washing，water washer，single vortex，numerical analysis

果蔬清洗在果蔬加工中非常重要，通常采用紊流或机械力（如摩擦力、振动力）使粘附在果蔬原料表面的污物脱落[1]。影响果蔬清洗效果的原因很多，如清洗时间、温度、清洗力作用方式，以及清洗液体的pH值、矿物质含量等[2-6]。目前果蔬清洗的两大主流技术为水流式清洗和气泡式清洗，大量的果蔬清洗试验研究表明[7-9]，水流式清洗具有清洗范围广、清洗量大、效果好等优点，优于气泡式清洗。

水流式清洗技术分为涡旋式和直线式，两者相比[10]，涡旋清洗可使清洗槽内水流运动轨迹呈螺旋状，射流冲击力对流场内的果蔬作用方式产生变化，物料清洗时间延长；且涡旋流动也增强了湍流

收稿日期：2014-10-13

基金项目：江苏省自然科学基金青年基金项目（BK20130150）；江苏省产学研前瞻性联合研究项目（SBY201320100）。

* **通信作者**：金光远（1979—），女，辽宁铁岭人，工学博士，副教授，主要从事食品加工装备研究。E-mail：gyuanjin@jiangnan.edu.cn

清洗过程中果蔬受到的摩擦作用，在这些摩擦作用之下，果蔬表面的污物也受到一定程度的破坏。喷口几何位置、射流流量及清洗槽的结构尺寸和形状等参数都影响涡旋流场特性[11]。淹没射流涡旋式水流清洗技术较为复杂，因而深入研究涡旋式水流清洗的机理，探索影响因素，以更好地控制清洗动力特性，实现最优清洗效果，对于为开发高效节能果蔬清洗加工单元，有着重要的指导意义。

作者所设计的单涡旋式水流清洗机具有 U 型清洗槽，采用计算流体动力学(CFD)方法，对基于淹没水射流的涡旋式水流清洗强化特性进行研究，并对计算结果进行实验验证。考察不同横纵射流流量比和纵向射流孔位置条件下清洗槽内涡旋流动特性，探讨清洗槽内多横孔淹没水射流形成单涡旋水流清洗动力的规律，及涡旋流动对清洗的强化作用，为开发高效的水流式果蔬清洗机提供理论参考。

1　物理模型和数值方法

设计的单涡旋式水流清洗槽模型为 U 型开口结构，侧面设有一排横向射流管路，端面设有纵向射流管路，具有锥形收缩段出口。清洗槽体总长 2.9 m，深 0.8 m，宽 0.8 m，槽底圆弧半径为 0.4 m。其中横向射流管路，等间距分布 8 个横向射流孔 P_1—P_8(孔间距为 0.2 m，P_1 距离槽端面 0.3 m)，孔径为 0.04 m，总管直径为 0.065 m；纵向射流管路，分布两个纵向射流孔 P_{Z1}—P_{Z2}(孔间距为 2 m)，孔径为 0.025 m，纵向总管直径为 0.05 m；纵向射流孔垂直方向高于横向射流孔，高度差为 0.013 m。为研究纵向射流水平位置对涡旋流动形成的影响，建立 3 个清洗槽模型，其纵向射流孔位置，依次在清洗槽的左侧、中间和右侧位置(Z_3，Z_2，Z_3)。清洗槽主体结构特征如图 1 所示。

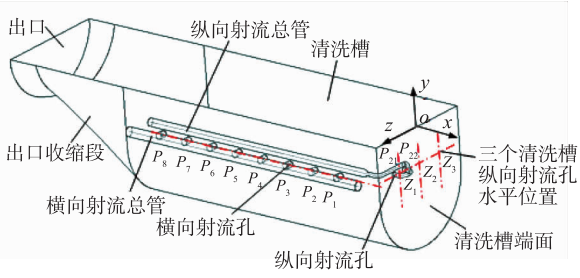


图 1　单涡旋式水流清洗机物理模型

Fig. 1　Single vortex water washer

假设流体充满整个清洗槽，液面与清洗槽上端面齐平，流体从横纵射流管路流入时忽略其他因素影响，计算域由 U 形清洗槽、出口区域和横纵向射流管路组成。采用 ANSYS ICEM 四面体/混合网格非结构化网格技术对计算域进行网格划分，壁面处进行加密处理，清洗槽模型网格数量约 530 万，最小单元尺寸为 2 mm，并检验网格无关性，如图 2 所示，密网格与精密网格下横向射流孔处平均速度和压力的差值小于 5%。采用基于有限体积法 FLUENT 求解器求解雷诺平均 Navier-Stokes 方程组，选用 Standard k-e 湍流模型，采用壁函数法处理壁面区域流动，采用 SIMPLEC 压力—速度耦合算法，以及二阶迎风格式的空间离散格式。边界条件设置为：横、纵管路入口给定为速度入口，槽体出口和液面出口给定为压力出口，壁面给定绝热固体壁面无滑移边界，环境压力给定为一个标准大气压，给定重力场。当进出口质量流量误差小于或等于 1×10^{-7} 认为计算达到收敛。

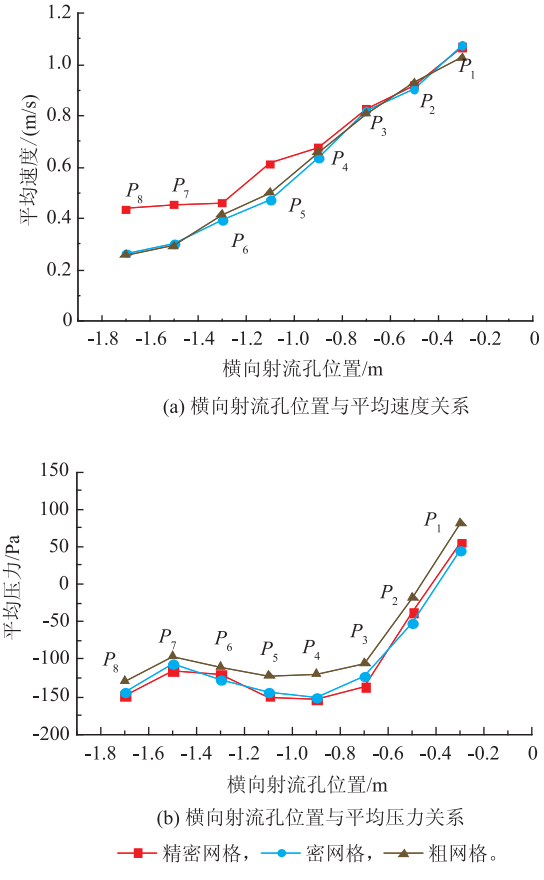


图 2　不同网格下横向射流孔处平均速度和压力比较

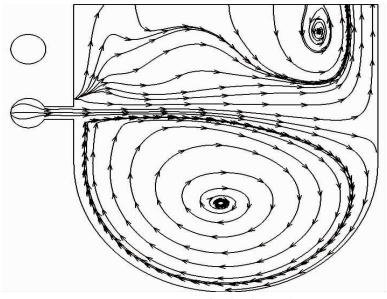
Fig. 2　Comparison of average velocity and pressure for transverse jets under different grids

本文重点研讨不同横纵射流流量比和纵向射流孔位置条件下清洗槽内涡旋流场特性,因此在纵射流量一定的条件下(总流量 Q=47 m^3/h),定义横纵射流流量比为 R,射流工况流量比 R=1,2,3。实验工况为,纵向射流孔位置在清洗槽左侧,流量比 R=2,实验时只考察清洗槽端面水流运动轨迹。

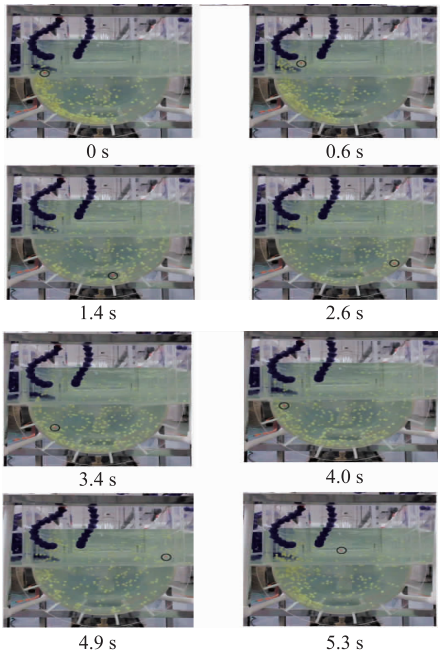
2 结果分析

2.1 流动特性的实验验证

验证材料采用塑料小球, 小球直径 80 mm,经测量,小球密度为 1.071 g/mL,接近水的密度。实验过程采用荧光色和红色小球,主要观察红色小球的运动状态。小球在水中很容易随波逐流,水流运动状态基本限定了小球的运动[5],因而小球运动形态可以代表水流运动状态。图 3(a)(b)为试验工况下的数值模拟速度流线分布与单涡旋实验验证。



(a) 速度流线分布



(b) 实验验证

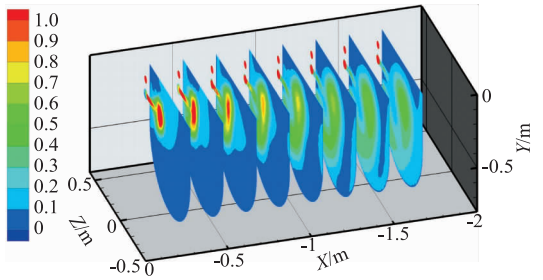
图 3 水流在清洗槽内的运动状态

Fig. 3 Motion state of water in the washing tank

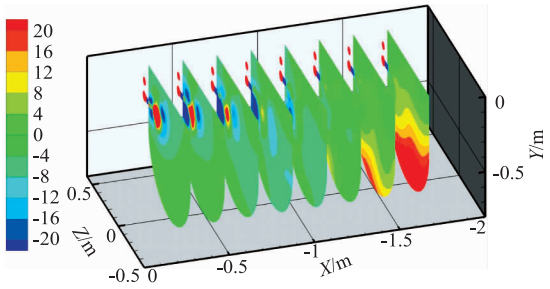
从图可见,红色小球在清洗槽内随水流按顺时针运动,运动过程中小球沿清洗槽内壁运动,水流呈涡旋状运动,与数值模拟结果一致,表明计算结果可靠。

2.2 单涡旋流动三维特征

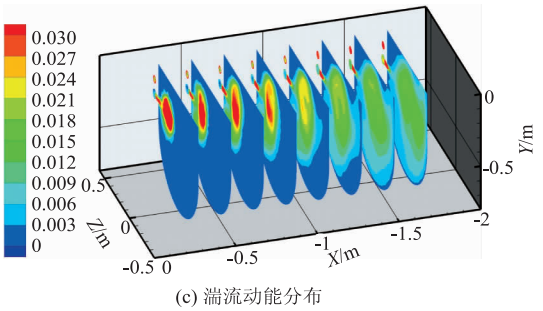
在清洗过程中引入非直线式的涡旋流动,清洗槽内水流运动轨迹呈三维特性。清洗槽内的三维流动发展如图 4 所示,图中给出了纵向射流位于左侧 Z_1 位置的清洗槽在横纵射流比 R=1 的工况下清洗槽内 8 个横向射流孔截面的速度、静压、湍流动能、湍流强度及涡量分布。



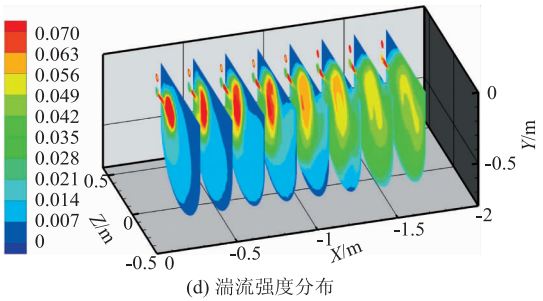
(a) 速度分布



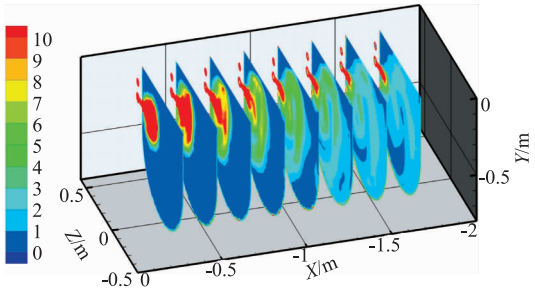
(b) 静压分布



(c) 湍流动能分布



(d) 湍流强度分布



(e) 涡量分布

纵向射流位于 Z_1 的清洗槽，R=1

图 4　清洗槽内单涡旋流的三维特征

Fig. 4　Three-dimensional characteristics of single vortex in the washing tank

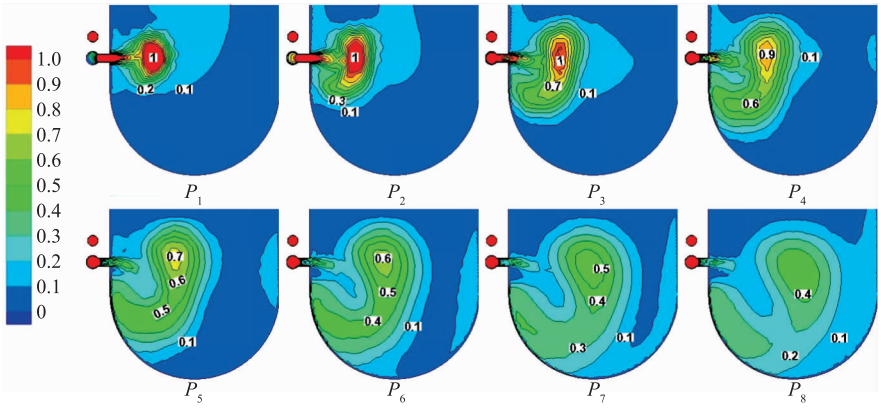
由图 4(a)(b)看出，在横纵射流的共同作用下，清洗槽内产生了由横向射流主导的单涡旋流动，该涡旋流循序产生并逐渐发展，到射流孔 P_8 时已覆盖整个清洗槽，清洗槽上游横向射流孔 P_1—P_4 附近存在一个正负压力交替区域。从宏观层面分析，清洗槽靠近横向射流孔一侧形成一个具有三维特征的涡流流动，该涡流由清洗槽上游产生，由纵向射流推动涡旋流动向清洗槽出口处扩散。涡流运动轨迹的三维特性表明，一方面，射流冲击力对果蔬物料的作用方式发生改变，使流体与物料之间摩擦增大，使得物料表面污垢能更大程度被破坏，增加物料在清洗槽内的行程，确保物料的清洗时间及效果。另一方面，由图 4(c)(d)(e)可看出，清洗槽内存在强烈的湍流流动，湍流分布区域由横向射流孔附近逐渐布满清洗槽，呈涡旋状展开；涡量分布主要集中在射流孔口附近，该区域具有高涡量值的流动，存在较高速度梯度，揭示流体微团自旋强烈，对清洗有强化作用。清洗槽内涡旋流动的这种湍流微观脉动和涡旋，暗示流体与物料之间的微观摩擦和冲击力的增加，对果蔬清洗有强化作用。

2.3　不同流量比 R 对涡旋流动形成的影响

清洗槽内的涡旋流动是在横纵射流的共同作用下产生，其形成特征与横纵射流流量比有着密切关系。图 5—7 给出了纵向射流位于左侧 Z_1 位置的清洗槽，横纵射流流量比 R 分别取 1、2、3 时槽内 8 个射流孔位置截面上的速度分布。

对比可看出，3 种流量比下都出现了涡旋现象，但形成较好涡旋的位置以及覆盖区域不同。涡旋现象循序渐进产生，在涡旋形成过程中，主体区域与边界之间都出现了部分低速区域。根据涡旋形成的形状，图 5 中 P_7 位置、图 6 中 P_4 位置，以及图 7 中 P_3 位置的涡旋效果较好。

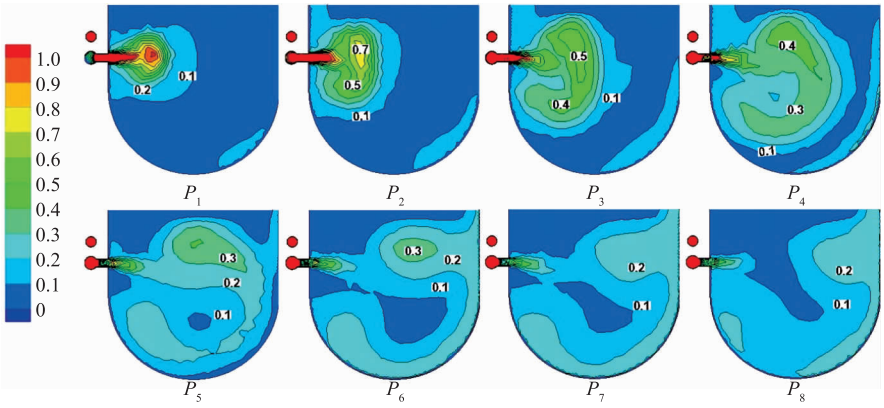
图 8 为 3 种工况下纵向射流孔水平截面内的速度分布。可看出流量比 R=1 时横向射流速度小，流体不能到达清洗槽另一侧壁面；流量比 R=2 时，横向射流流动可到达清洗槽另一侧壁，纵向射流可推动涡旋流体向清洗槽出口处运动；当流量比 R=3 时，纵向射流在第一个横向射流孔 P_1 处发生转折，不能有效推动涡旋流动向出口处运动，清洗槽中部到出口之间存在较大的低速区域。因此当清洗槽内横向流动可到达清洗槽另一侧壁面，且纵向射流有效推动涡流向下游出口方向运动，此时横纵射流流量比为最佳射流流量之比，可使清洗槽内中部位置产生较好的涡旋流动，具有较好的清洗动力。



纵向射流位于 Z_1，m/s

图 5　横纵射流流量比 R=1 时清洗槽体内涡旋流动分布

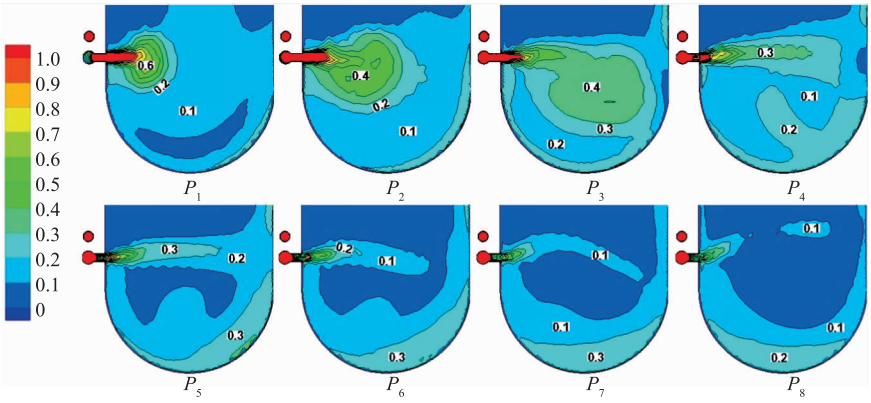
Fig. 5　Distribution of vortex flow in the washing tank for a transverse and longitudinal jet flow ratio R=1



纵向射流位于 Z_1,m/s

图 6　横纵射流流量比 R=2 时清洗槽体内涡旋流动分布

Fig. 6　Distribution of vortex flow in the washing tank for a transverse and longitudinal jet flow ratio R=2



纵向射流位于 Z_1,m/s

图 7　横纵射流流量比 R=3 时清洗槽体内涡旋流动分布

Fig. 7　Distribution of vortex flow in the washing tank for a transverse and longitudinal jet flow ratio R=3

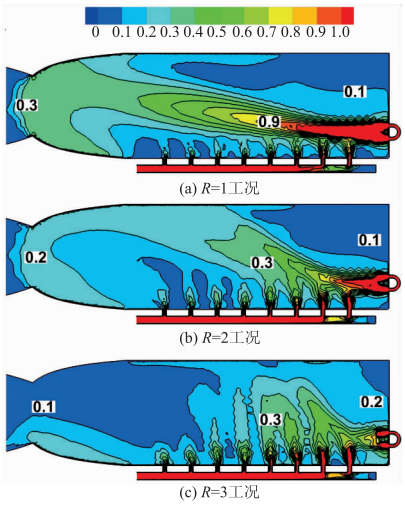


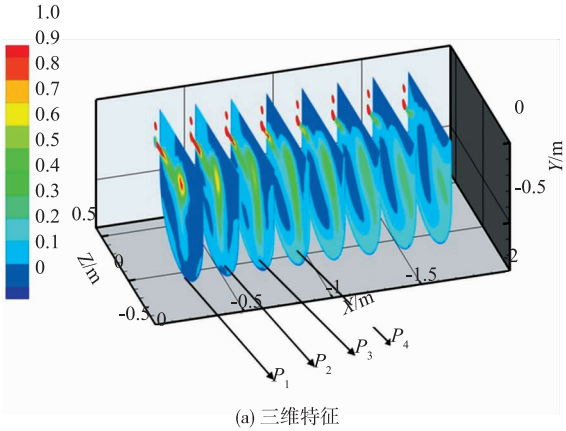
图 8　纵向射流孔水平截面内的速度分布

Fig. 8　Distribution of velocity in the longitudinal jet horizontal cross section

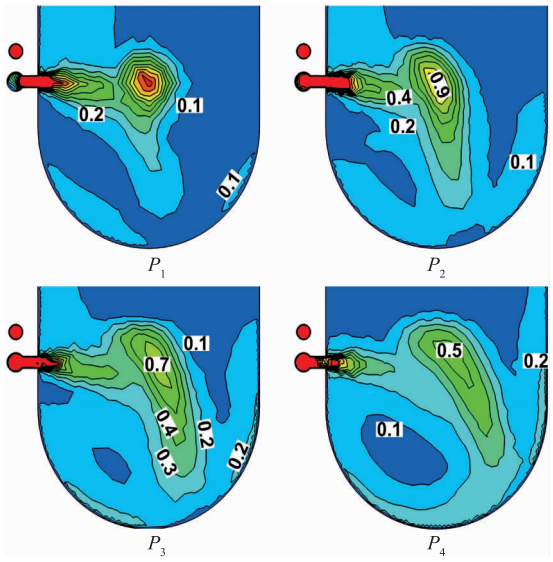
2.4　不同纵向射流孔位置下涡旋流动特征

清洗槽内涡旋流动是横纵射流的相互作用下产生,纵向射流又有推动横向射流形成的涡旋流动向出口下游方向迁移的作用,其不同的射流位置对涡旋流动形成和其运动轨迹有着重要影响。由上节分析可知,横纵射流比 R=2 时可获得较好清洗动力的涡旋流动分布,图 9、10 给出了射流工况 R=2 时,纵向射流位置位于 Z_2 和 Z_3 清洗槽内,8 个横向射流孔位置以及 P_1—P_4 喷水孔位置截面的速度分布。

与纵向射流位于 Z_1 时相比,纵向射流位于中部位置 Z_2 清洗槽，纵向射流在清洗槽中间区域运动,与横向射流作用形成很好的涡旋效果;而在右侧 Z_3 位置时纵向射流贴近清洗槽壁面处运动,与横向射流的相互作用较弱,清洗槽底部有流体产生回旋流动,整体上形成涡旋流动不明显。



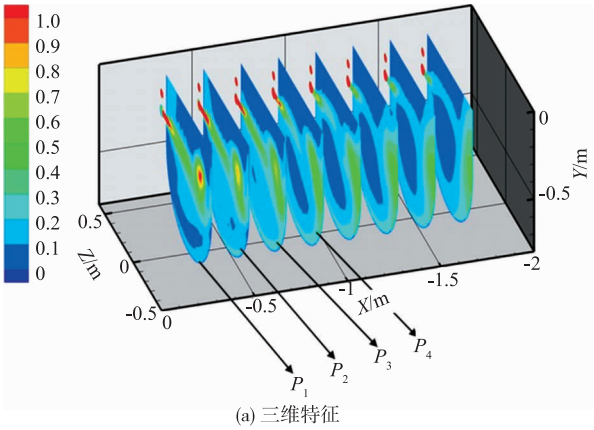
(a) 三维特征



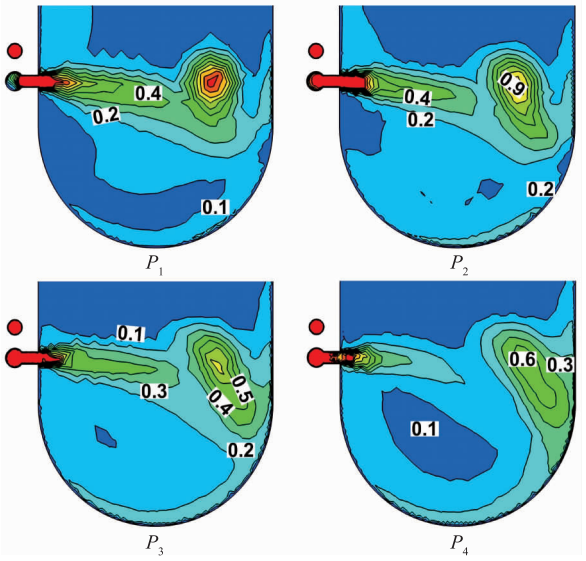
(b) 截面速度分布

图 9　纵向射流位于 Z_2 清洗槽内速度分布

Fig. 9　Distribution of velocity for the longitudinal jet located Z_2 in the washing tank



(a) 三维特征



(b) 截面速度分布

图 10　纵向射流位于 Z_3 清洗槽内速度分布

Fig. 10　Distribution of velocity for the longitudinal jet located Z_3 in the washing tank

图 11 为清洗槽内纵向射流孔中心面内的速度分布。纵向射流位置位于中间 Z_2 及右侧 Z_3 时，横纵向射流相互作用不明显，横向射流未发生明显偏转，靠近出口处存在较大面积的低速区；纵向射流在左侧 Z_1 时，横向射流孔 P_3 处发生明显偏转，结合图 6 中 P_3、P_4 速度分布，可知纵向射流位置在左侧 Z_1 时，可与横向射流发生显著相互作用并推动其向下游迁移，形成显著的涡流流动和三维流动特征。

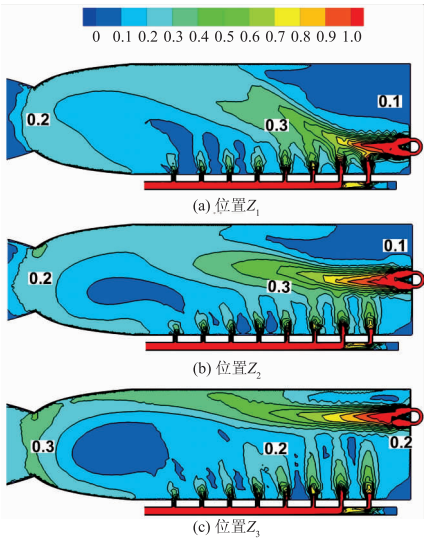


图 11　不同纵向射流位置纵向射流孔水平截面内的速度分布

Fig. 11　Distribution of velocity in the longitudinal jet horizontal cross section for different longitudinal jet locations

3 结 语

对单涡旋式水流清洗机清洗槽内流体运动特性进行了数值模拟研究和实验验证,结论如下:

1) 清洗槽内流体宏观的运动特性和微观的湍动特性对最终清洗效果具有重要的影响。即在清洗槽整体区域内,具有显著的三维涡旋流动和较高的湍动能,以及湍流强度。意味着湍流流动显著,宏观射流冲击力和微观摩擦力越佳,对物料清洗具有强化作用。

2)涡旋水流式清洗的动力特性与清洗槽结构、横纵射流流量比, 以及纵向射流孔位置密切相关。对应具有 U 型开口清洗槽, 适当的横纵射流流量比,是清洗槽内形成较好的涡旋流动的关键。计算结果表明,在一定的射流流量下,横纵射流流量比为 2 时可获得较好的三维涡旋流动。

3)纵向射流有助于形成三维涡旋流,并推动涡旋流动向出口迁移,其位置影响横纵射流的相互作用强度。纵向射流孔位置在左侧时,两者作用愈强,可获得显著的涡旋流动。

参考文献:

[1] 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 the CSAE**,2005,21(1):92-96.(in Chinese)

[2] 陈勤超. 流体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.

[3] Butz P,Fernά ndez Garcia A,Lindauer R,et al. Influence of ultra high pressure processing on fruit and vegetable products[J]. **Journal of Food Engineering**,2003,56(2):233-236.

[4] Mulugeta E,Geyer M. Characterising the washing processes of vegetables and potatoes [J]. **Biosystems Engineering**,2005,91(4):441-453.

[5] 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 submerge jet vegetable washer[J]. **Transactions of the CSAE**,2007,23(6):130-135.(in Chinese)

[6] Zhou B,Feng H,Pearlstein A J. Continuous-flow ultrasonic washing system for fresh produce surface decontamination [J]. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**,2012,16:427-435.

[7] 王莉,陈勤超. 淹没水射流方式清洗樱桃番茄的试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(9):86-90.
WANG Li,CHEN Qinchao. Experimental study on washing cherry tomatoes with submerged jets mechanism[J]. **Transactions of the CSAE**,2007,23(9):86-90.(in Chinese)

[8] 王莉,丁小明. 淹没水射流方式清洗蔬菜的探索研究[J]. 农业工程学报,2007,23(12):124-130.
WANG Li,DING Xiaoming. Experimental investigation of washing vegetables with submerged jets of water[J]. **Transactions of the CSAE**,2007,23(12):124-130. (in Chinese)

[9] 陈勤超,朱明,王莉. 淹没射流清洗方式清洗物料的效果研究[J]. 中国水运:学术版,2007(5):1.
CHEN Qinchao,ZHU Ming,WANG Li. Study on the effects of washing materiels by submerged jets cleaning [J]. **China Water Transport:Academic Version**,2007(5):1.(in Chinese)

[10] Ball C G,Fellouah H,Pollard A. The flow field in turbulent round free jets[J]. **Progress in Aerospace Sciences**,2012,50:1-26.

[11] 许晓东,史桂宏. 一种果蔬涡旋清洗机:中国,200910031700[P].2010-12-29.