

单涡旋式水流清洗机流场特性分析

Flow field characteristics analysis of single vortex water washer

吴 燕 金光远 崔政伟

WU Yan JIN Guang-yuan CUI Zheng-wei

(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)

(Jiangsu Province Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology,
Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:对具有 U 型清洗槽的单涡旋式果蔬水流清洗机, 涡旋式水流清洗强化特性进行数值研究, 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, 及涡旋流对清洗湍流强化作用。通过对不同的横纵孔射流流量比下清洗槽内三维流动的数值进行模拟, 计算结果表明: 横纵射流流量决定了单涡旋形成的三维分布和强度; 纵向射流的水平位置, 影响横纵射流的相互作用强度, 射流位置距离近相互作用强, 形成涡旋流动显著, 促进对单涡旋向出口下游的迁移; 涡旋流形成区具有较高的湍流强度, 表明具有显著清洗强化作用。

关键词:单涡旋式; 水流清洗机; 清洗动力; 数值分析

Abstract: The fluid dynamic characteristic of vortex flow washing in a fruits and vegetables washer unit with U-shaped structure was investigated by three-dimensional Computational Fluid Dynamic simulation (CFD). The single vortex flow formed by longitudinal and transverse water jet in washer unit was simulated at different flux rates of longitudinal and transverse water jet. The vortex flow dynamic characteristic in water unit and the effect of vortex flow on strengthening turbulent washing were discussed. The simulation results shows that flux rate has a dominant effect on vortex flow spacious distribution and intensity; the interaction between longitudinal and transverse water jet is controlled by location of longitudinal jet; when longitudinal jet appears near transverse jet the interaction occurs significantly and is benefit to transport washing flow towards outlet; vortex flow region appears high turbulent intensity to enhance the washing micro dynamic.

Keywords: single vortex; water washer; washing power; numerical analysis

基金项目:江苏省自然科学基金青年基金项目(编号: BK20130150);
江苏省食品先进制造装备技术重点实验室开放基金(编号: FM-201404)

作者简介:吴燕(1989—), 女, 江南大学在读硕士研究生。
E-mail: wuyan890918@163.com

通讯作者:金光远

收稿日期:2014-10-27

果蔬清洗是果蔬加工中的一个重要环节, 采用紊流的水流或采用机械力(如摩擦力、刷洗力以及振动力)使粘附在果蔬原料表面的泥土或其他污物松动、脱离果蔬原料^[1,2]。果蔬的清洗效果, 取决于清洗时间、清洗温度、清洗动力的作用方式以及清洗液体的 pH 值、硬度和矿物质含量等因素的影响^[3-7]。目前, 水流式清洗和气泡式清洗是目前果蔬清洗的两大主流技术。大量的果蔬清洗试验研究表明^[8-10], 水流式与气泡式果蔬清洗机清洗效果相比, 具有清洗范围广泛、清洗量大、清洗效果好等优点。水流式果蔬清洗技术又分为直线水流式清洗和涡旋水流式清洗技术。

涡旋式水流清洗技术与直线水流清洗技术相比^[11], 在清洗过程中引入非直线式的涡旋流动, 使流动槽内水流运动轨迹呈三维特性, 使得射流冲击力对场内的果蔬作用方式产生变化, 并使得清洗物料的停留时间延长; 另一方面涡旋流动也增强了湍流清洗过程中果蔬受到摩擦作用, 在这些摩擦的作用之下, 果蔬表面的污物也受到一定程度的破坏。淹没射流涡旋式水流清洗技术较为复杂, 这种复杂性主要体现在喷口几何位置、射流流量及清洗槽的结构尺寸和形状等参数都会影响涡旋流场特性^[12]。因此对涡旋式水流清洗的机理进行深入研究, 探索影响因素, 以更好控制清洗动力特性, 实现最优清洗效果, 对于开发高效节能果蔬清洗加工单元有重要的指导意义。

本试验拟针对具有 U 形清洗槽的单涡旋式水流清洗机, 采用计算流体力学(CFD)方法, 对基于淹没水多孔横向射流和纵向错流的涡旋式水流湍流清洗强化特性进行研究。考察不同横纵射流流量和纵向射流孔位置条件下清洗槽内涡旋流场特性, 探讨 U 型清洗槽内多孔孔淹没水射流形成单涡旋水流清洗动力的规律, 以及涡旋流对清洗湍流强化作用, 为开发高效的果蔬清洗机提供理论参考。

1 物理模型和数值方法

本研究对象单涡旋式水流清洗槽模型, 具有 U 形开口

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 $L=2.9\text{ m}$,深 $H=0.8\text{ m}$,宽 $W=0.8\text{ m}$,槽底圆弧半径 $R=0.4\text{ m}$ 。其中横向射流管路,等间距分布 8 个横向射流孔 $P_1\sim P_8$ (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 $P_{Z1}\sim P_{Z2}$ (孔间距为 0.2 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,本试验建立 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_1, Z_2, Z_3)。清洗槽主体结构特征和坐标系见图 1。

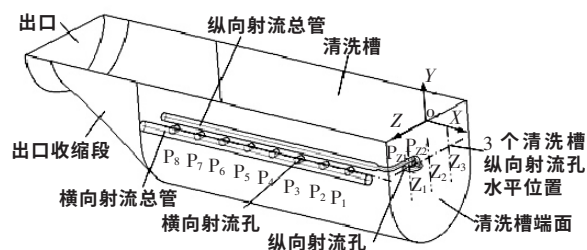


图 1 单涡旋式水流清洗槽模型

Figure 1 Model of single vortex water washing tank

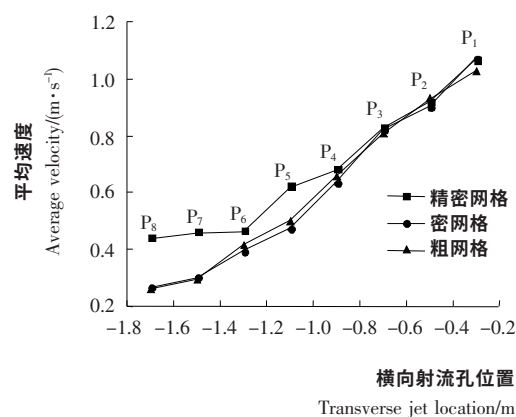
为获得清洗槽内涡旋流场特征,假设流体充满整个清洗槽,液面与清洗槽上端面齐平,流体从横纵射流管路流入时忽略其他因素影响,计算域由 U 形清洗槽、出口区域和横纵向射流管路组成。采用 ANSYS ICEM 四面体/混合网格非结构化网格技术对计算域进行网格划分,壁面处进行加密处理,清洗槽模型网格数量约 130 万,最小单元尺寸为 2 mm ,并检验网格无关性。如图 2 所示,密网格与精密网格下横向射流孔处平均速度和压力的差值小于 5% 。采用基于有限体积分法 FLUENT 求解器求解雷诺平均 Navier-Stokes 方程组,选用 Standard $k-\epsilon$ 湍流模型,采用壁函数法处理壁面区域流动,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 $1e-07$ 认为计算达到收敛。

本试验重点研究不同横、纵射流流量和纵向射流孔位置条件下清洗槽内涡旋流场特性,因此保持射流总流量值一定条件下(总流量 $Q=47\text{ m}^3/\text{h}$),定义横纵射流流量比为 R ,分别对射流工况流量比 $R=1, 2, 3$ 下的 3 种不同清洗槽内流动特性进行数值模拟。

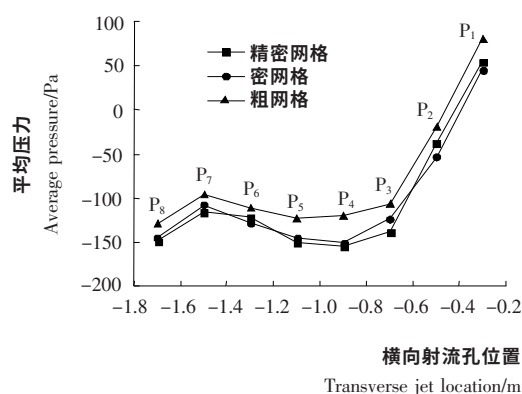
2 结果分析和讨论

2.1 清洗槽内单涡旋流动的三维特征

涡旋式水流清洗在清洗过程中引入非直线式的涡旋流



(a) 平均速度



(b) 平均压力

图 2 不同网格下横向射流孔处平均速度和压力比较

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

动,使流动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 3 所示,图 3 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。

在横纵射流的共同作用下,由图 3(a)、(b)可知,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 至 P_4 附近存在一个正负压力交替区域。从宏观层面上分析,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。由图 3(c)~(e)可知,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

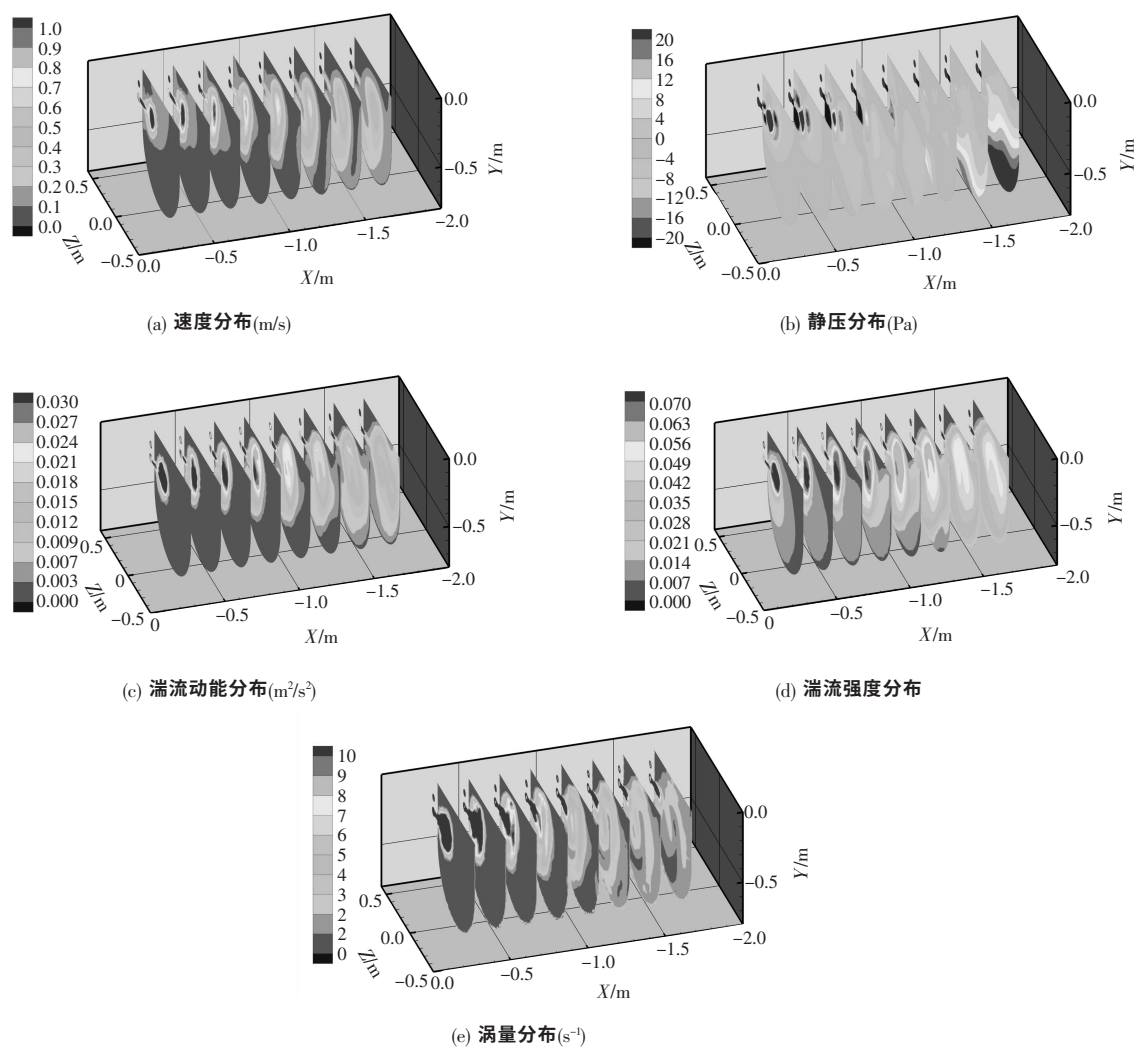


图 3 清洗槽内单涡旋流的三维特征

Figure 3 The three-dimensional characteristics of single vortex in washing tank

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。

2.2 不同横纵射流流量比下清洗槽内涡旋流动特征

清洗槽内的涡旋流动是在横纵射流的共同作用下产生的,其形成特征与横纵射流流量比有着密切关系。图 4 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。

由图 4 可知,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 4(a)中 P_7 位置、图 4(b)中 P_4 位置以及图 4(c)中 P_3 位置的涡旋效果较好。

3 种工况下纵向射流孔水平截面内的速度分布见图 5。由图 5 可知,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;当流量比增加至 $R=2$ 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。当流量比增大至 $R=3$ 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体向出口处运动,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。

2.3 不同纵向射流位置对涡旋流动形成的影响

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 6、7 给出了在射流工况 $R=2$ 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 $P_1 \sim P_4$ 喷水孔位置截面的速度分布。

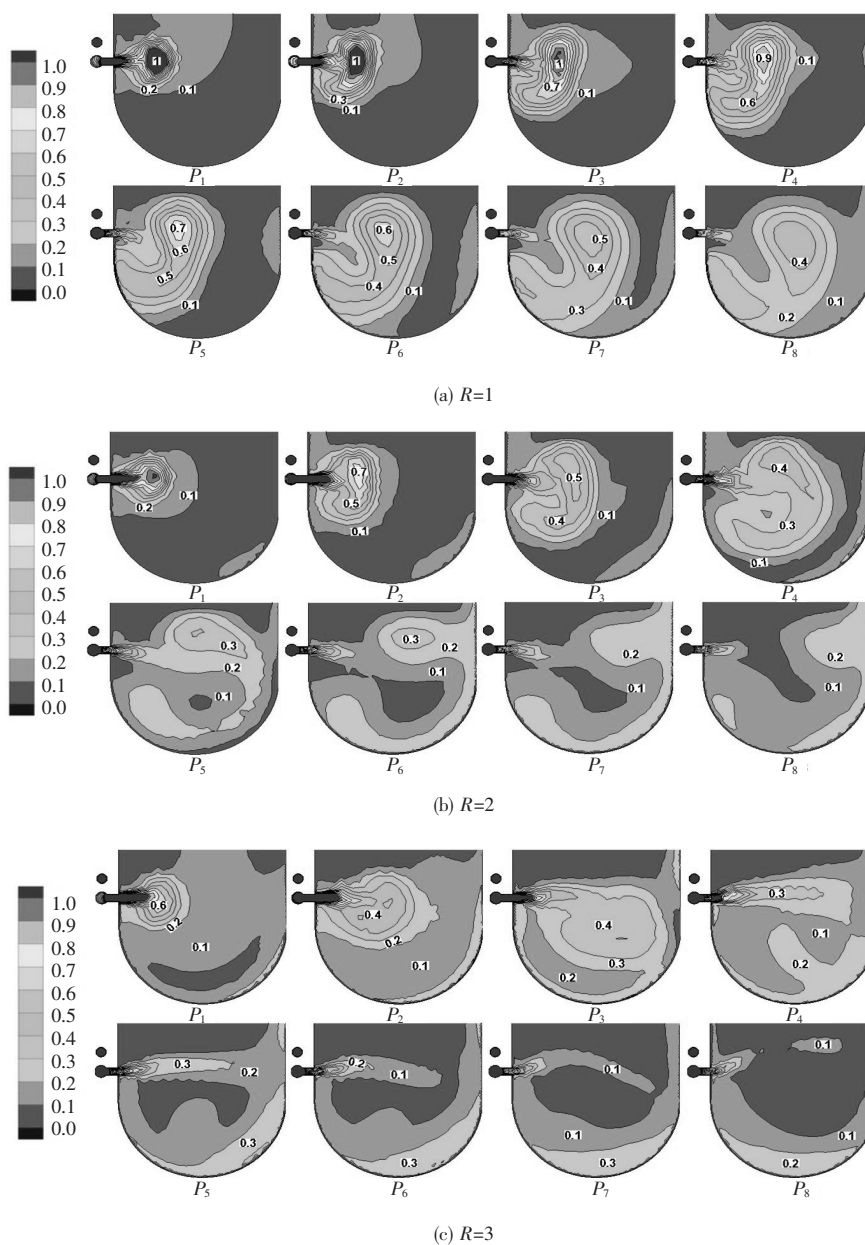


图 4 不同纵横射流流量比下清洗槽体内的涡旋流动分布情况(m/s)

Figure 4 Distribution of vortex flow in washing tank for different transverse and longitudinal jet flow ratio (m/s)

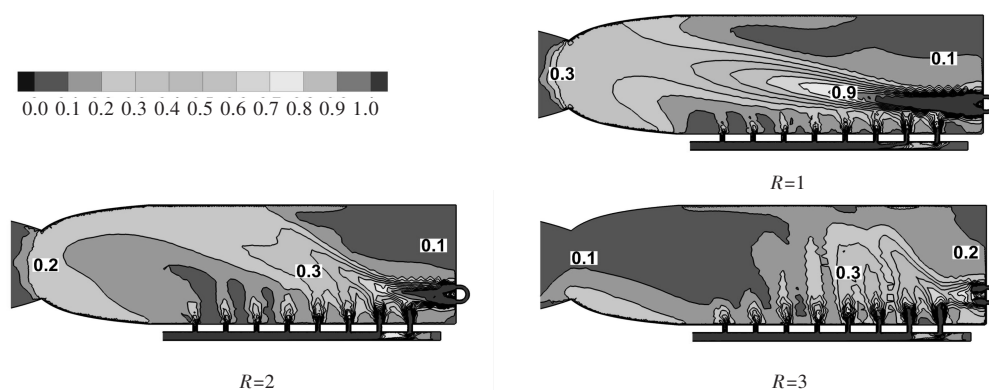
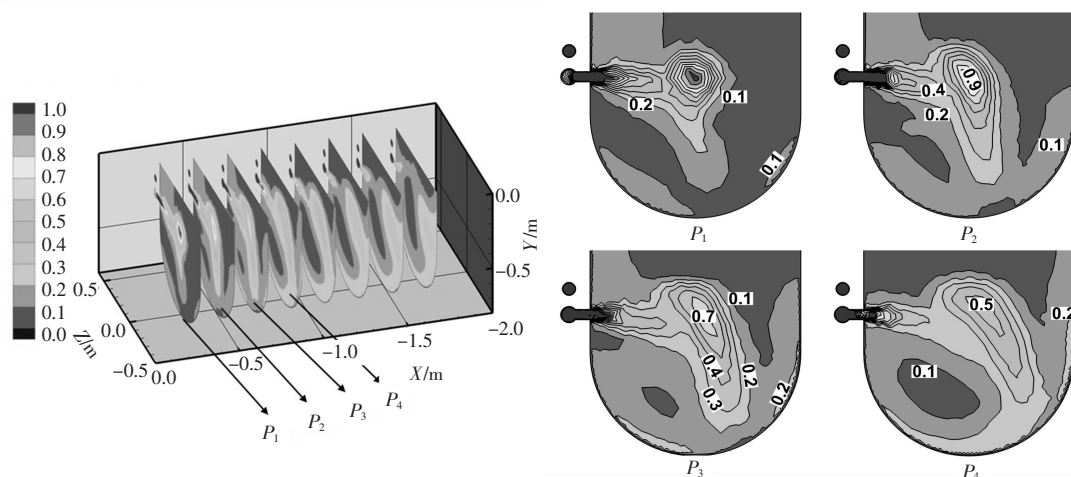
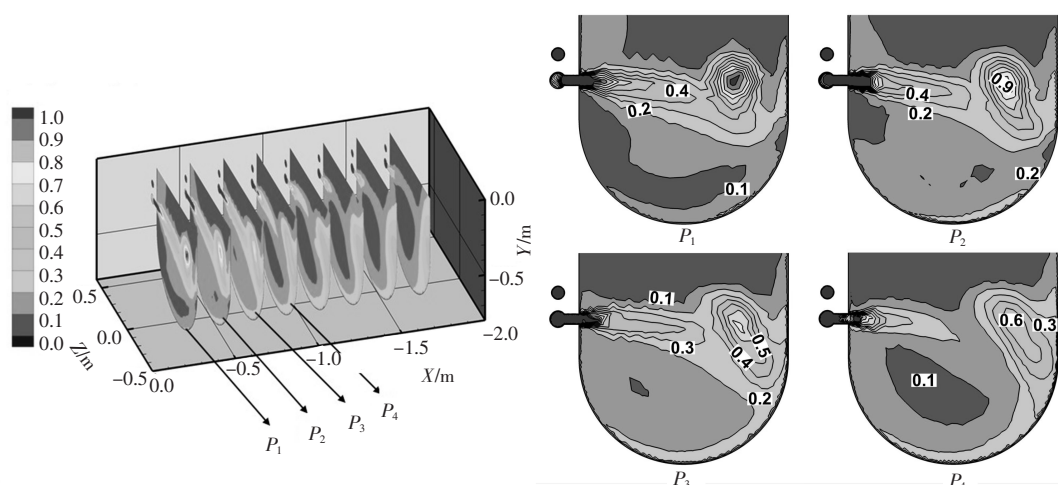


图 5 纵向射流孔水平截面内的速度分布(m/s)

Figure 5 Distribution of velocity in longitudinal jet horizontal cross section(m/s)

图 6 纵向射流位于 Z_2 清洗槽内速度分布 (m/s)Figure 6 Distribution of velocity for longitudinal jet located Z_2 in washing tank (m/s)图 7 纵向射流位于 Z_3 清洗槽内速度分布 (m/s)Figure 7 Distribution of velocity for longitudinal jet located Z_3 in washing tank (m/s)

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。

清洗槽内纵向射流孔水平截面内的速度分布见图 8。纵向射流位置位于中间 Z_2 及右侧 Z_3 时,纵向射流与横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;喷水嘴位置在左侧 Z_1 时,横向射流孔 P_3 处发生明显偏转,结合图 4(b) 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的相互作用,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。

2.4 清洗槽内涡旋流动的湍流特性

由 2.2、2.3 可知,横纵射流流量比 $R=2$ 、纵向射流位置

在左侧 Z_1 时,清洗槽内流体可形成显著的涡流流动和三维流动特征,获得较好清洗动力的涡旋流动分布。图 9 为横纵射流流量比 $R=2$ 、纵向射流位于左侧 Z_1 位置时,清洗槽内 8 个横向射流孔位置截面上的湍动能以及湍流强度分布。

由图 9(a)可知,射流孔处湍动能较大,随着射流的扩展,能量耗散,下游区域湍动能减弱,在涡旋形成区,即射流孔 P_4 、 P_5 截面位置处,湍动能大致布满槽体,清洗槽中部区域涡旋流动强烈,具有良好的清洗微观动力;而图 3(c)中清洗槽下游区域湍动能较大,出口区域附近涡旋流动强烈,可观的清洗动力难以发挥作用。图 9(b)中射流孔处湍流强度大,湍流强度分布从清洗槽上游区域逐渐布满清洗槽,槽体内湍流运动剧烈,流体涡旋流动增强清洗动力特性, P_4 、 P_5 截面位置处湍流强度较大,分布较好,表明清洗槽中部区域流体涡旋流动强烈,流体间的微观摩擦和冲击力增加,利于果蔬清洗;图 3(d)中清洗槽内的湍流强度较高,由上游位置扩散

至出口端,下游区域流体涡旋运动强烈,但清洗时间短。因而当横纵射流流量比 $R=2$ 、纵向射流位置在左侧 Z_1 时,可

使清洗槽中部区域获得较好微观清洗动力。

3 结论

(1) 对于单涡旋式水流清洗而言,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,具有显著的三维涡流流动和较高的湍动特征,意味着其宏观射流冲击力和微观摩擦力越佳,涡旋清洗流动与微观湍流脉动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,及纵向射流位置,有密切关系。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,目前结果显示,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,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.
- 2 杨红兵. 新型蔬菜清洗机的研制与试验研究[D]. 南京:南京农业大学,2004.
- 3 Mulugeta E, Geyer M. Characterising the washing processes of vegetables and potatoes[J]. Biosystems engineering, 2005, 91(4): 441~453.
- 4 Butz P, Fernández García 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.
- 5 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.
- 6 高愿军,樊振江,路源,等. 清洗方式对鲜切莴笋品质和农残去除的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(5): 159~162.
- 7 张向阳,王丹,马越,等. 清洗方式对鲜切胡萝卜处理效果的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(5): 189~192.
- 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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Ball C G, Fellouah H, Pollard A. The flow field in turbulent round free jets[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2012(50): 1~26.
- 12 许晓东,史桂宏. 一种果蔬涡旋清洗机:中国,200910031700[P]. 2010-12-29.

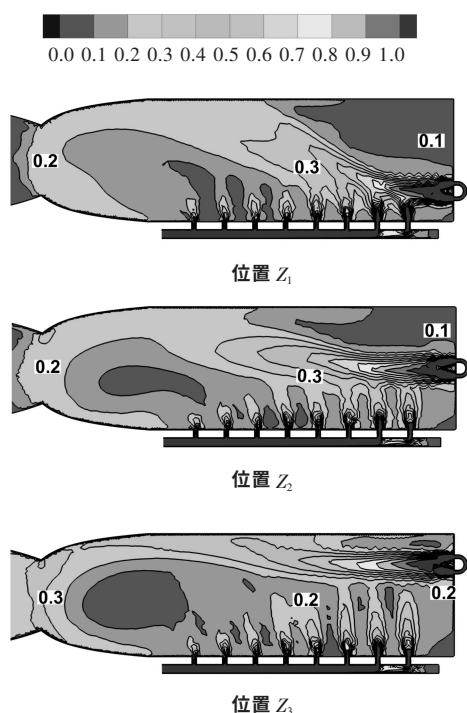


图 8 不同纵向射流位置纵向射流孔水平截面内的速度分布($R=2$)(m/s)

Figure 8 Distribution of velocity in longitudinal jet horizontal cross section for different longitudinal jet location($R=2$)(m/s)

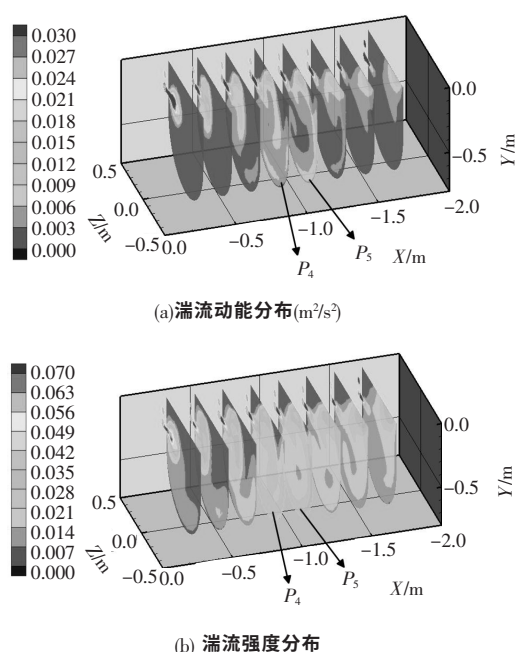


图 9 清洗槽内湍流特性

Figure 9 Turbulence characteristics in washing tank