

热空气冲击加热果蔬片的换热特性研究

周天昊,韩东,汪胜,何伟峰,高斯杰,李世瑞
(南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016)

摘要:针对果蔬干燥设备中存在传热效率低的问题,利用数值仿真对一种高效传热的冲击加热方法进行换热特性研究,并用实验验证了仿真结果的正确性。研究了雷诺数 $Re = 5\ 000$ 时,冲击间距比 $H/d(0.2 \sim 8)$ 和冲击角度 $\theta(45^\circ \sim 90^\circ)$ 对换热特性的影响规律。研究结果表明: H/d 越小,换热面平均 N_u 越大; $H/d = 2$ 时,驻点附近的局部 N_u 最小;倾斜冲击 $H/d = 1$ 时,换热面平均 N_u 随着 θ 的增大而增大; $\theta = 60^\circ$ 时,峰值 N_u 最大,比垂直冲击时的峰值 N_u 提升 29%。

关键词:果蔬干燥设备;冲击加热;冲击角度;换热特性

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)05-0039-05

Study on Heat Transfer Characteristics of Hot Air Impingement Heating of Fruit and Vegetable Slices

ZHOU Tianhao, HAN Dong, WANG Sheng, HE Weifeng, GAO Sijie, LI Shirui
(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To improve low heat transfer efficiency in fruit and vegetable drying equipment, numerical simulation is conducted to study the heat transfer characteristics of a high-efficiency heat transfer impingement heating method, and the experiments are carried out to verify the correctness of the simulation results. The influence of impact distance ratio $H/d(0.2-8)$ and jet angle $\theta(45^\circ-90^\circ)$ on heat transfer characteristics with Reynolds number at 5 000 is studied. The research results show that the smaller the H/d , the larger the average N_u of the heat transfer surface. When $H/d = 2$, the local N_u near the stagnation point is the smallest. When the inclined impact $H/d = 1$, the average N_u of the heat transfer surface increases with the increase of θ . When $\theta = 60^\circ$, the peak N_u is the largest, 29% higher than the peak N_u during vertical impact.

Keywords: fruit and vegetable drying equipment; impingement heating; jet angle; heat transfer characteristics

0 引言

果蔬干燥是果蔬加工最基本的方法之一,目前很多干燥设备都采用热风干燥的方式,然而热风干燥采用的外掠强制对流换热存在传热效率低、能耗大的问题,因此需要一种提高传热效率的方法。气体冲击换热技术最初应用于航天领域的冷却和电器设备的加工,现已被引入食品干燥中。与热风干燥相比,气体射流冲击干燥具有更高的传热系数和更低的能耗,应用前景广泛。

近年来,已有大量文献对气体射流冲击干燥技术进行研究。付露莹等^[1]阐述了气体射流冲击干燥技术的原理、特点、影响因素和干燥工艺。贾梦科等^[2]探讨了气体射流冲击干燥苹果片过程中风温、切片厚度、风速及其交互作用的影响。杨惠等^[3]进行气体射流冲击干燥无核紫葡萄实验工艺研究,得到最佳工艺参数为温度 66°C 、风速 13 m/s 。总结上述文献发现,对于气体射流冲击干燥技术的研究主要集中在干燥动力学和品质方面;而对于冲击冷

却技术的研究主要集中在流动和传热方面。GUO Q 等^[4]给出了圆形射流冲击的瞬态传热特性的实验和数值研究结果。蒋新伟等^[5]研究了射流雷诺数、射流角度和出口缝的位置对 N_u 的分布和大小的影响。刘明阳等^[6]对比研究了稳态与瞬态单孔冲击射流的传热性能。

目前缺乏气体射流冲击干燥技术在流动及传热方面的研究。虽然冲击加热果蔬片包含传质过程,但传热效率的提高势必会增强传质的进行。所以很有必要进行热空气冲击加热果蔬片的换热特性研究,以得到不同因素的影响规律,在换热机理上对射流冲击干燥设备的设计进行指导。

1 计算模型及数值方法

1.1 几何模型

目前射流冲击干燥设备常采用阵列圆形喷嘴的形式^[1],本次研究的简化模型选取单圆形喷嘴。热空气通

基金项目:南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金立项资助项目(kfjj20200205; kfjj20200214)

第一作者简介:周天昊(1996—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为节能技术。

过一根直径 $d=10\text{ mm}$ 、长 20 mm 的圆管从高度 H 冲击一个边长 40 mm 、厚度 6 mm 的果蔬片。 H/d 分别取 0.2 、 0.4 、 0.6 、 1 、 2 、 8 。图 1 为射流垂直和倾斜冲击果蔬片的三维模型示意图。 θ 为冲击角度, θ 分别为 45° 、 60° 、 75° 、 90° 。 x 为表面上一点距离几何中心 O 的距离。图中还标明了上游和下游位置。

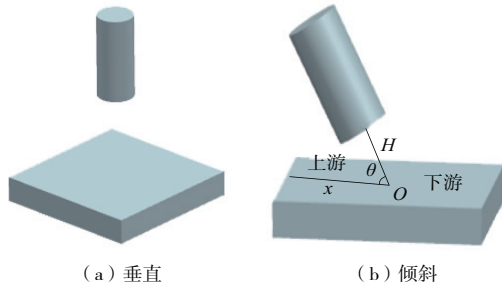


图 1 射流冲击果蔬片示意图

1.2 网格划分和边界条件

利用 ICEM 软件使用 O-Block 进行结构化网格划分,近壁面进行边界层网格加密,使第一个节点无量纲壁距离 $y^+ < 1$ 。

计算边界条件设置如下:射流冲击介质为空气,速度进口,对应的射流冲击雷诺数为 5000 。湍流强度 5% ,温度 333 K 。被冲击果蔬片上表面采用流固耦合边界,其余表面和圆管壁面设为绝热边界。外流场边界设为压力出口,压力与环境大气压相同。全局初始温度设为 300 K 。

使用 Fluent16.0 软件,基于质量、动量及能量守恒方程,对热空气射流冲击加热果蔬片模型进行瞬态数值求解。假设空气为三维不可压缩湍流, 333 K 空气的热物性参数设置如下: $\rho=1.06\text{ kg/m}^3$, $c_p=1005\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, $\lambda=0.029\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, $\mu=2.01\times 10^{-5}\text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。

以苹果为研究对象,物性参数如下: $\rho=900\text{ kg/m}^3$, $c_p=4000\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, $\lambda=0.5\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。由于温度变化不大,不考虑温度变化导致材料热物性变化。忽略浮升力和热辐射对传热的影响,采用二阶迎风格式进行数值离散,压力-速度耦合采用 SIMPLEC 方法,收敛的标准是各项残差精度均 $< 10^{-4}$,残差曲线趋于平直。

首先,对计算模型进行了网格无关性分析。以 $H/d=2$, $Re=5000$ 射流垂直冲击果蔬片模型的网格无关性验证为例,网格数分别选取 3.1 万、 9.8 万、 18.9 万、 26.2 万、 44.6 万。图 2 为网格数对驻点 N_u 的影响,当网格数增加至 26.2 万之后,局部 N_u 基本不变。考虑到数值计算成本,选取 26.2 万网格数。

1.3 湍流模型和计算方法验证

选择 GARDON R^[7] 等的圆形射流冲击平板的实验模型进行计算方法验证。计算分别选取 SST $k-\omega$ 、realizable $k-\varepsilon$ 、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行数值模拟。图 3 为雷诺数 5000 、 $H/d=2$ 时,沿径向的平均 N_u 计算结果与实验数据对比。可以看出在冲击驻点区域, $k-\varepsilon$ 湍流模型都对换热存在一定的高估,相比之下,SST $k-\omega$ 湍流模型最接近实

验值,总体误差 $< 10\%$ 。同时考虑到 SST $k-\omega$ 模型已被大量学者用于射流冲击换热的研究,所以本文采用 SST $k-\varepsilon$ 湍流模型。

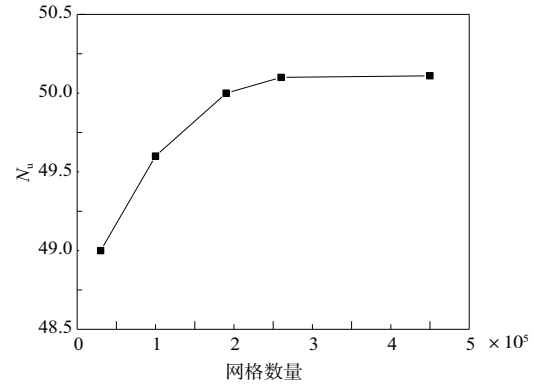


图 2 网格无关性验证

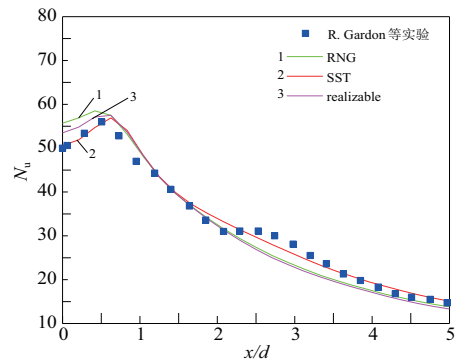


图 3 湍流模型验证

1.4 参数定义

本次研究中通过以下方程对努塞尔数 N_u 进行求解:

$$-\lambda_{\text{air}} \frac{\partial T}{\partial Z} = h(T - T_{\text{air}}) \quad (1)$$

$$N_u = \frac{h \times d}{\lambda_{\text{air}}} \quad (2)$$

式中: λ_{air} 代表空气热传导率; T 代表果蔬片上表面温度; T_{air} 代表空气温度; h 代表对流换热系数; d 代表圆管直径。此式求出的是局部 h 和 N_u ,平均 h 和 N_u 由面积加权平均获得。

2 结果与分析

2.1 冲击间距比对换热特性的影响

国内外学者对 $2 < H/d < 8$ 时的规律做了较为透彻的研究,本文主要研究小冲击间距比 ($H/d < 2$) 时对换热特性的影响。图 4 是 H/d 分别为 0.2 、 0.4 、 0.6 、 1 、 2 、 8 、 10 时换热面局部 N_u 在径向方向的分布曲线。各小冲击间距比下,局部 N_u 曲线呈双峰值分布,峰值并不在驻点处出现,而在偏离驻点 $x/d=0.55$ 附近出现峰值,这与 YU P P 等^[8] 的研究有着相似结论。而且随着冲击间距的减小, N_u 总体

上呈现增大的趋势。 H/d 在0.6以上时局部 N_u 曲线差别不明显,而在 $H/d < 0.4$ 时局部 N_u 出现了很大的提升,在 $H/d = 0.2$ 时峰值达到了90.7。

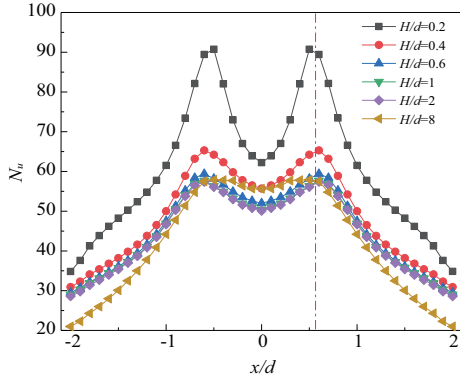


图4 不同 H/d 局部 N_u 在径向方向的分布曲线

图5是驻点 N_u 和面平均 N_u 随 H/d 变化曲线。 $H/d = 2$ 左右两边有着不同的驻点 N_u 趋势。当 $H/d < 2$ 时,随着冲击距离的减小,驻点 N_u 先缓慢增加,再大幅增加;而当 $H/d > 2$ 时,随着冲击距离增大,驻点 N_u 单调增加。 $H/d > 2$ 时,随着 H/d 增加,驻点处的湍流水平增加,驻点 N_u 会达到一个最大值。以往学者研究最大驻点 N_u 值出现在 $6 < H/d < 8$,与势核区的长度一致,势核区长度与入口的湍流强度和流动状态有关^[9]。如果再增加 H/d ,则超过势核区,射流速度衰减,驻点 N_u 必然会下降。而当 $H/d < 2$ 时,整体质量连续性要求流体在喷嘴和冲击表面之间加速,由此产生的加速度使边界层局部变薄,冲击间距减小,边界层越薄,换热效果越好。面平均 N_u 随着 H/d 的增大单调递减。

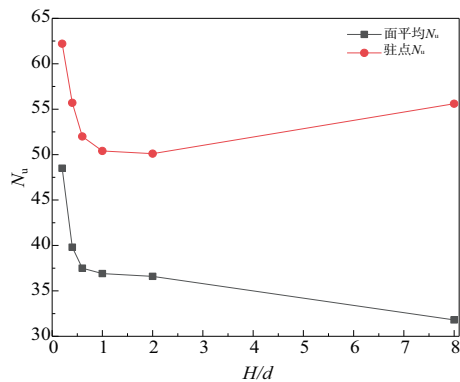


图5 驻点 N_u 和面平均 N_u 随 H/d 变化曲线

图6展示了 $H/d = 2$,加热300 s时果蔬片内 $x-z$ 截面温度分布云图。在热导率很小的果蔬片内部存在很大的温度梯度。

图7是4种典型 H/d 下的 $x-z$ 截面速度云图。不同 H/d 下,驻点附近均出现了速度接近0的现象,使得竖直方向的速度梯度很大,导致较薄的边界层和更好的换热效果。 $H/d = 1$ 时最大速度出现在圆管下游和壁面射流区的驻点区域外侧,而 $H/d = 0.4$ 和 $H/d = 0.2$ 时,最大速度出现在驻点区域外侧。这是因为圆管边缘的高湍流强度,流体在驻点处产生了很大的径向加速度。 $H/d = 0.2$ 时,壁面射

流处的最大速度相对于圆管出口提升90%,这让局部边界层变得很薄,这也解释了双峰现象。 $H/d = 8$ 时,速度最大值只出现在射流核心区,流场结构的不同解释了 $H/d = 8$ 与小冲击间距下 N_u 的径向变化曲线的不同。

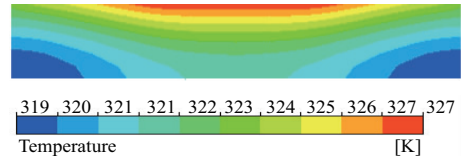
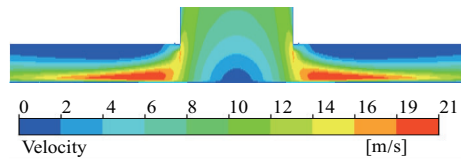
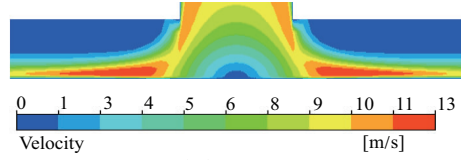


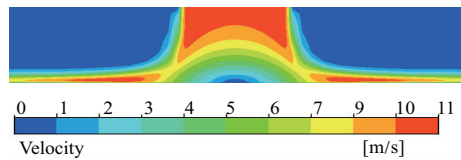
图6 果蔬片内 $x-z$ 截面温度分布云图



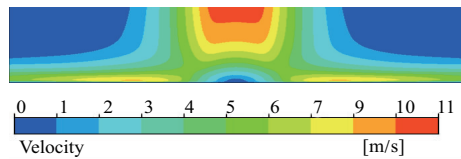
(a) $H/d = 0.2$



(b) $H/d = 0.4$



(c) $H/d = 1$



(d) $H/d = 8$

图7 不同 H/d 时的 $x-z$ 截面速度云图

2.2 冲击角度对换热特性的影响

针对垂直射流冲击干燥设备存在装料量小、干燥不均匀等问题,有学者提出一种倾斜料盘式射流冲击干燥设备^[10],所以很有必要研究冲击角度对换热特性的影响。

图8是 $H/d = 1$,冲击角度 θ 分别为 45° 、 60° 、 75° 、 90° ,10 s时换热面局部 N_u 在径向方向的分布曲线。倾斜冲击时,局部 N_u 分布曲线不对称,峰值 N_u 在上游,且峰值 N_u 左侧的局部 N_u 比右侧的局部 N_u 下降得更快。随着冲击角度的减小,峰值 N_u 向上游偏移;随着冲击角度的减小,下游的局部 N_u 单调减小。

图9是中心 N_u 、峰值 N_u 、面平均 N_u 随冲击角度的变化曲线。中心 N_u 和面平均 N_u 均随着冲击角度的增大而增大,峰值 N_u 随着冲击角度的增大先增大后减小, $\theta = 60^\circ$ 时,峰值 N_u 最大。

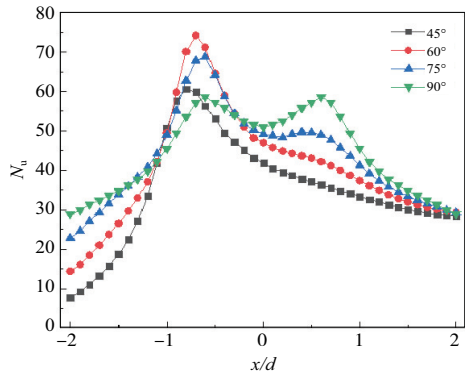


图 8 不同 θ 局部 Nu 在径向方向的分布曲线

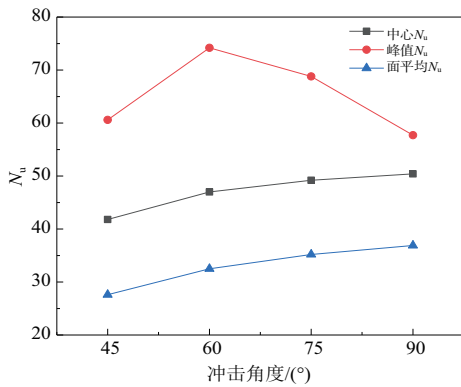


图 9 各 Nu 随 θ 变化曲线

图 10 和图 11 分别是不同冲击角度下的换热面 Nu 云图和 $x-z$ 截面速度云图。局部 Nu 云图形状由圆环形变成了月牙形。随着冲击角度的减小,驻点向上游偏移,这也是导致峰值 Nu 向上游偏移的原因。冲击角度越小,射流对周围冷空气的卷吸更强烈,导致更多能量的耗散,因此面平均 Nu 随着冲击角度的减小而减小。

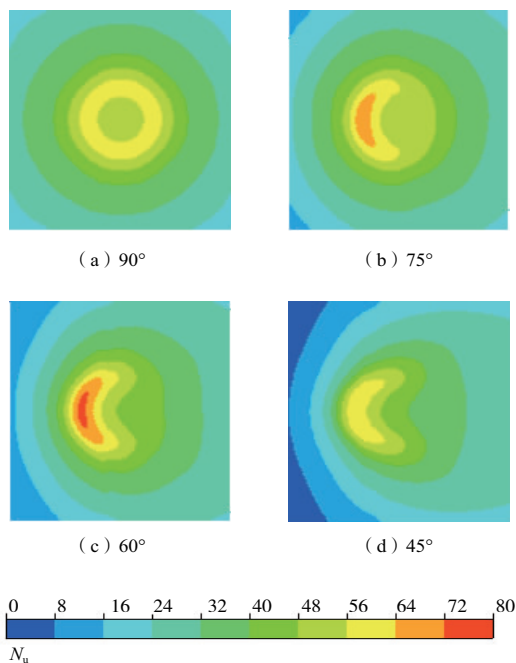


图 10 不同 θ 换热面 Nu 云图

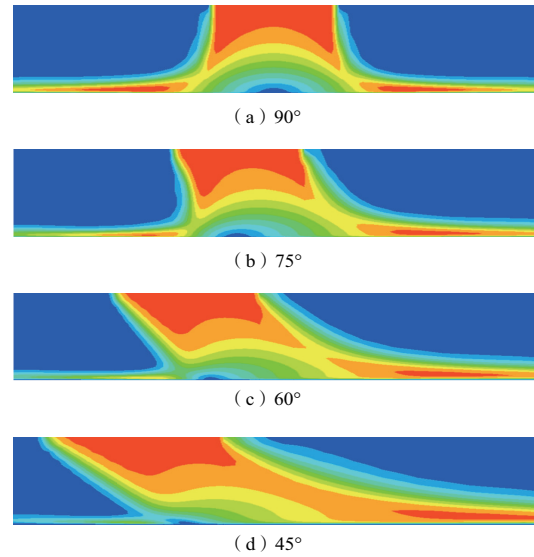


图 11 不同 θ 时的 $x-z$ 截面速度云图

3 实验验证研究

为了验证仿真结果的正确性,以苹果片为研究对象,搭建了冲击加热苹果片试验台。图 12 是实验系统图,该系统主要由热风枪、苹果片和温度采集系统组成。热风枪通过支架固定在苹果片正上方,该工业级热风枪可调节风速,智能控温,风嘴直径 10 mm。将苹果用水果刀切成 $40\text{ mm} \times 40\text{ mm} \times 6\text{ mm}$,用保温棉包围,插入热电偶。温度采集系统采用型号为 WRNK-191 的 K 型 1 mm 探针热电偶,在苹果片中心位置(测点 1)以及横向中轴线上的两个位置(测点 2,3)布置温度测点,图 13 为实物图。热电偶与 XMD-2000 A 31 型温度巡检仪相连,再通过 USB 接口将数据在计算机上监控并储存。实验仪器误差主要为:热电偶 0.4%,温度巡检仪 0.2%。

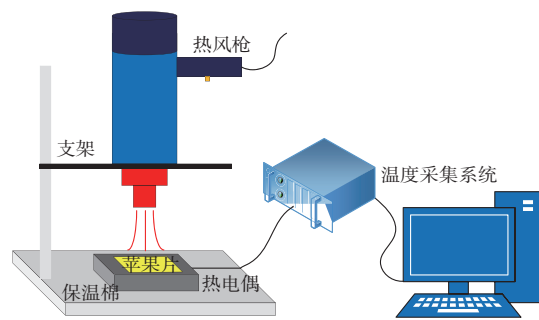


图 12 冲击加热苹果片系统图

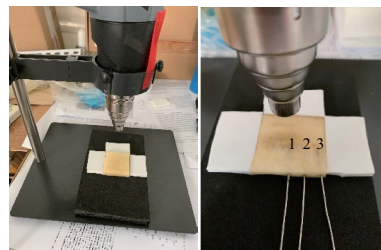


图 13 冲击加热苹果片实物图

将热风枪温度调至 333 K,最小挡风速由皮托管风速仪测量为 15.2 m/s, H/d 选定为 2。在常温常压下进行冲击加热苹果片验证实验,加热时间为 300 s,每做完一次实验后重新切好苹果片,重复 3 次实验取平均值。

图 14 为 $Re=8000$,射流温度 333 K, $H/d=2$ 时,冲击加热苹果片实验的 3 个测点温度随时间变化曲线与中心测点数值模拟的对比图。中心测点的实验值与数值模拟的最大误差出现在 132 s,为 13.5%。分析原因如下:苹果片在温度上升过程中存在水分的蒸发,蒸发需要吸热带走热量;苹果片存在散热,没有完全做到四周绝热。所以实验值小于模拟值,但总体上吻合良好,该实验验证了仿真结果的准确性。中心测点温度上升最快,测点 2 其次,测点 3 温度上升最慢,也大致符合数值模拟的局部 N_u 分布规律。

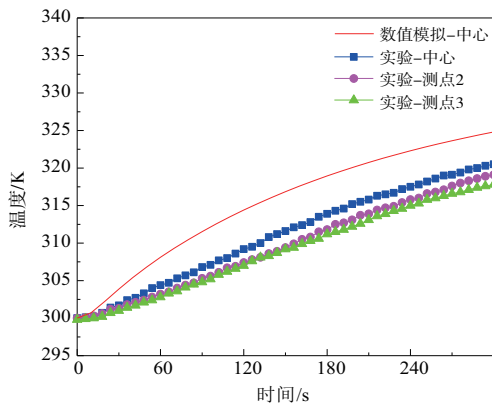


图 14 温度变化曲线对比图

4 结语

采用数值模拟和实验验证结合的方法,研究了 $Re=5000$ 时,冲击间距比和冲击角度对冲击加热换热特性的影响规律。结果如下所述。

1) 小冲击间距比($H/d < 2$)时,局部 N_u 曲线呈双峰值分布,峰值在偏离驻点 $x/d=0.55$ 附近出现。 $H/d < 0.4$ 时局部 N_u 出现了很大的提升。

2) H/d 越小,换热面平均 N_u 越大。尽量减小冲击间距,减少能量的耗散,提高整体换热效率。 $H/d=2$ 时,驻点附近的局部 N_u 最小。

3) 倾斜冲击 $H/d=1$ 时,换热面平均 N_u 随着 θ 的增大而增大; $\theta=60^\circ$ 时,峰值 N_u 最大,比垂直冲击时的峰值 N_u 提升 29%。可以参考局部 N_u 分布规律采用倾斜射流冲击得到最佳的局部换热效果。

参考文献:

- [1] 付露莹,张润光,赵珂,等. 气体射流冲击技术在果蔬干燥中的应用[J]. 保鲜与加工,2019,19(6):204-210.
- [2] 贾梦科,吴忠,赵武奇,等. 气体射流冲击干燥苹果片的响应面试验及多目标优化[J]. 中国农业科学,2019,52(15):2695-2705.
- [3] 杨慧,贾文婷,金新文,等. 气体射流冲击干燥无核紫葡萄中试工艺研究[J]. 食品研究与开发,2020,41(22):113-117.
- [4] GUO Q, WEN Z, DOU R F. Experimental and numerical study on the transient heat - transfer characteristics of circular air - jet impingement on a flat plate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2017,104:1177-1188.
- [5] 蒋新伟,许卫疆,朱惠人,等. 楔形通道内带角度射流冲击换热特性研究[J]. 推进技术,2017,38(8):1819-1825.
- [6] 刘明阳,常士楠,杨波. 稳态与瞬态冲击射流换热性能实验对比[J]. 推进技术,2019,40(3):619-623.
- [7] GARDON R, AKFIRAT J C. The role of turbulence in determining the heat - transfer characteristics of impinging jets[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1965,8(10):1261-1272.
- [8] YU P P, ZHU K Q, SHI Q, et al. Transient heat transfer characteristics of small jet impingement on high-temperature flat plate[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2017,114:981-991.
- [9] VIOLATO D, IANIRO A, CARDONE G, et al. Three-dimensional vortex dynamics and convective heat transfer in circular and chevron impinging jets[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2012,37:22-36.
- [10] 代建武,肖红伟,谢龙,等. 倾斜料盘式气体射流冲击干燥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(7):238-244.

收稿日期:2021-06-09