

V型条缝喷嘴切割比对速冻机钢带表面 换热特性的影响

Influence of V type slit nozzle cutting ratio on belt surface heat
transfer characteristics of quick freezer

王金锋^{1,2,3,4,5} 李文俊^{1,2} 谢晶^{1,2,3,4,5} 杨大章^{1,2,3,4,5}

WANG Jin-feng^{1,2,3,4,5} LI Wen-jun^{1,2} XIE Jing^{1,2,3,4,5} YANG Da-zhang^{1,2,3,4,5}

柳雨嫣^{1,2} 陆卫华⁶ 杨晓燕⁶

LIU Yu-yan^{1,2} LU Wei-hua⁶ YANG Xiao-yan⁶

- (1. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306; 2. 农业部冷库及制冷设备质量监督检验测试中心, 上海 201306;
3. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 4. 食品科学与工程国家级实验教学示范中心
〔上海海洋大学〕, 上海 201306; 5. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306;
6. 南通四方冷链装备股份有限公司, 江苏 南通 226371)

(1. College of Food Sciences & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Quality Supervision, Inspection and Testing Center for Cold Storage and Refrigeration Equipment, Ministry of Agriculture, Shanghai 201306, China; 3. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 4. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering [Shanghai Ocean University], Shanghai 201306, China; 5. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation Shanghai 201306, China; 6. Nantong Square Cold Chain Equipment Company, Nantong, Jiangsu 226371, China)

摘要:以冲击式速冻机的V型条缝喷嘴为研究对象,研究不同切割比(在V型条缝喷嘴喉部区域,喷嘴边缘被切割高度 T 与喷嘴纵向中心处高度 K 的比值,其中 $K=30\text{ mm}$)下,改变钢带与喷嘴出口间距 H 与条缝宽度 S 之比 H_s 对速冻机冻结区域表面换热特性的影响。结果表明:当 $H_s<10$,切割比 $\Psi=0$ 时,沿速冻机宽度方向即 X 方向钢带表面换热强度存在明显差异, X/S (速冻机宽度方向坐标与喷嘴宽度 S 之比) $=0$ 处的钢带表面 Nu 数明显大于 $X/S=150$ 处的;当 $H_s<10$,随着切割比 Ψ 增加,沿 X 方向钢带表面换热强度

差异性逐渐降低,到达临界切割比 Ψ_0 之后继续增加 Ψ ,钢带表面换热强度出现逆增长;临界切割比 Ψ_0 曲线随 H_s 的增加呈现先增大后减小的趋势;当 $H_s>10$,沿 X 方向钢带表面不同位置处换热均匀性较强,调整切割比反而降低了钢带表面换热均匀性。

关键词:速冻机;V型条缝喷嘴;切割比;换热强度

Abstract: V type slot nozzle in an impact type quick freezer was selected as the research object, and the surface heat transfer characteristics of the freezing area of the freezer were studied, based on different cutting ratio, the ration of distance between the belt and nozzle inlet H to slit width S , H_s . The results showed that the steel surface heat transfer intensity was obvious different along with width of freezer when the $H_s<10$ and $\Psi=0$. The steel surface Nu number in $X/S=0$ was significantly higher than that of $X/S=150$ (The ratio between width direction of quick freezer coordinates and nozzle width S). With the cutting ratio increasing along the X direction of the strip surface, heat transfer intensity difference gradually decreased, after the cutting critical ratio Ψ_0 , the metal surface heat transfer intensity reversed growth, which indicated that the Nu number at

基金项目:国家“十三五”重点研发项目(编号:2016YFD0400303);上海海洋大学科技发展专项基金(编号:A2-0203-17-100207);上海市科委平台能力提升项目(编号:16DZ2280300);上海市科委公共服务平台建设项目(编号:17DZ2293400);上海海洋大学博士科研启动基金(编号:A2-0203-17-100317)

作者简介:王金锋,女,上海海洋大学副教授,博士。

通信作者:谢晶(1968—),女,上海海洋大学教授,博士生导师,博士。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期:2017-12-08

$X/S=0$ was less than that at $X/S=150$. The cutting critical ratio with the increasing of H_s increased first and then decreased. When $H_s > 10$, the heat transfer coefficient was even in the direction of X , however, the adjusting of the cutting ratio would adversely affect the freezing heat transfer surface area.

Keywords: quick freezer; V type slot nozzle; cutting ratio; heat transfer intensity

在强化传热、传质领域,采用喷嘴冲击式射流能在靶向区域换热表面产生较高的热传递系数,而影响喷嘴下方冲击板面换热强度的主要因素是喷嘴到冲击板面方向上的轴向速度。这种高效的传热机理主要应用于纺织、造纸、冶金、食品干燥、食品速冻等领域^[1-2]。

该类设备的设计通常将多个喷嘴按照一定的排列方式组合起来形成多重冲击的结构,以实现在较大范围内的冲击表面获得均匀一致的换热系数^[3];然而,在实际工作过程中,目标板面的换热强度存在差异性,这种差异性主要受以下几个因素影响:① 横流效应^[3-5];② 喷嘴与目标板面之间的距离^[5-7];③ 目标板面的粗糙度^[6]。Makatar等^[3]通过使用热显色液晶技术对冲击表面温度分布进行可视化处理,同时采用油膜技术实现冲击表面流场可视化,研究发现,沿横流方向,横流效应逐渐增强,在横流作用下努塞尔数(Nusselt number, Nu)峰值从喷嘴正下方往横流下游方向移动,并且努塞尔数峰值随横流速度上升而增加。Bernhard等^[4]研究了3种不同等级的横流效应对目标板面换热性能的影响,结果表明横流效应越弱,目标板面平均换热系数越高。Sebastian等^[6]研究了冲击射流在带肋凸起的目标板面的换热特性,结果表明在带肋凸起的目标板面平均Nu数大于平直板面,且在带肋凸起的目标板面滞止点范围小于平直板面,其Nu数峰值大于平直目标板面的。Katti等^[8]研究了喷嘴直径与目标板面间距 d 、 $2d$ 和 $3d$ (d 为喷嘴直径)对板面换热性能的影响,研究表明,沿横流方向努塞尔数在目标板面相邻滞止点之间呈波状分布,并且沿横流下游方向波逐渐衰减,波的衰减速率在喷嘴与板间距为 $3d$ 时最大,波的衰减是由于沿横流方向流体质量流量不断累积使横流效应增强。

本研究以冲击式速冻机V型条缝喷嘴为对象,拟解决沿速冻机宽度方向上钢带表面换热系数均匀性的问题;通过调节速冻机V型条缝喷嘴喉部高度按比例切割,提高钢带表面换热系数的均匀性,使速冻食品加工结束到达出料口时,冻品温度趋于一致。

1 数值模拟

1.1 建立数值模型

单个V型条缝喷嘴结构及其参数详见文献^[9]。本试验模拟研究了传统V型条缝喷嘴和改变喷嘴结构参数——调整切割比 Ψ (V型条缝喷嘴喉部区域,喷嘴边缘被切割高度 T 与喷嘴纵向中心处高度 K 的比值,其中 $K=30\text{ mm}$)两种情况下在速冻过程中沿速冻机宽度方向钢带表面换热均匀性问题。图1(a)为优化V型条缝喷嘴三维结构模型,图1(b)为喷嘴结构二维示意图,其中通过改变 T ,实现切割比调节。

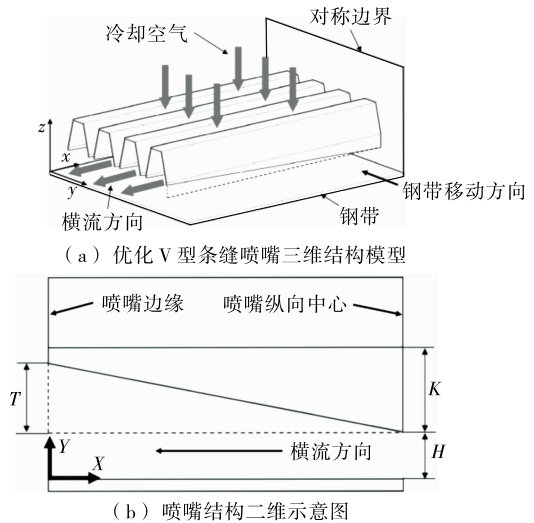


图1 V型条缝喷嘴结构优化示意图

Figure 1 Schematic diagram of V type slot nozzle structure optimization

1.2 数值模型条件设置

速冻机的流动介质为空气,模拟过程中假设:

- (1) 空气为不可压缩、密度均匀的黏性流体^[9]。
- (2) 静压腔壁面及条缝喷嘴壁面视为无滑移壁面^[9]。
- (3) 静压腔与喷嘴壁面绝热^[9]。

数值模拟过程中采用连续性方程、动量方程和能量方程联合求解,选择的计算模型设置为:

- (1) 入口边界条件为压力入口,出口边界条件为压力出口^[9]。
- (2) 计算模型与速冻机整体毗邻部分做镜像边界设置^[9]。
- (3) 选择 $k-\epsilon$ 湍流模型、SIMPLE算法及二阶迎风格式^[10]。

2 结果与讨论

2.1 切割比对钢带表面换热特性的影响

如图2、3所示,当 H_s (钢带与条缝出口间距 H 与条缝宽度 S 之比) $=2$ 时,不同切割比 Ψ 在钢带表面的换热强度呈现非一致性;当 $\Psi=0.00$ 时,即传统未切割V型喷嘴结构,沿钢带纵向方向(X 方向),钢带表面换热强度呈现较大差异性,在横流下游钢带表面Nu数明显高于横流上游;随着切割比 Ψ 增加,横流上游Nu数与下游之间的差异性逐渐降低,当 Ψ 超过临界切割比 Ψ_0 (沿 X 方向钢带表面Nu数不均匀度趋于0,即沿此方向钢带表面换热均匀) $=0.33$ 时,横流下游Nu数低于上游,并随着 Ψ 增大,两者差异性再次增加。分析上述现象:当喷嘴与钢带表面间距较小时,沿横流方向气流流通截面积较小,此时气流沿横流方向流动沿程阻力较大,因此沿速冻机宽度方向,靠近回风口处静压腔与喷嘴出口压差较大,流体传输动力较强,喷嘴射流速度较高,对应的钢带表面Nu数较高,反之在速冻机中心Nu数较低;因此,当 $\Psi=0.00$ 时,沿横流方向,喷嘴出口与钢带间距保持不变,此时沿横流方向钢带表面换热系数存在明显差异性;然

而,随着切割比增加,沿横流方向喷嘴出口与钢带间距逐渐增大,虽然靠近压力出口喷嘴出口气流速度较大,但随着靶向距离增加,气流拓展到钢带表面的能力减弱,此时钢带表面换热系数随之降低,并且当 Ψ 超过临界值后,靠近回风口侧钢带表面 Nu 数低于速冻机中心处钢带表面的。综上所述

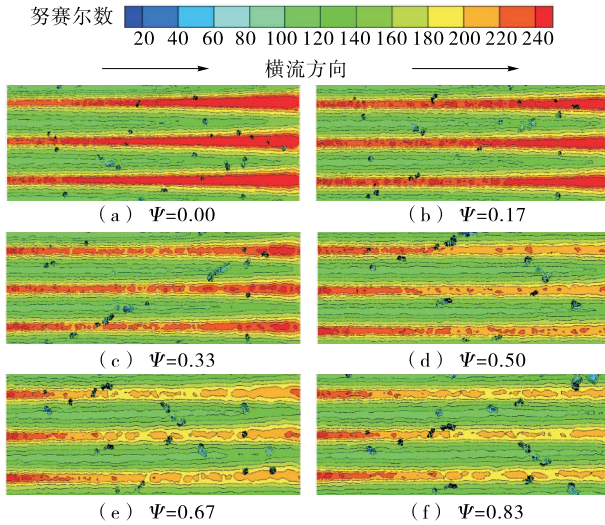


图 2 不同切割比下钢带表面 Nu 数分布

Figure 2 Different cutting ratio steel surface Nusselt number distribution

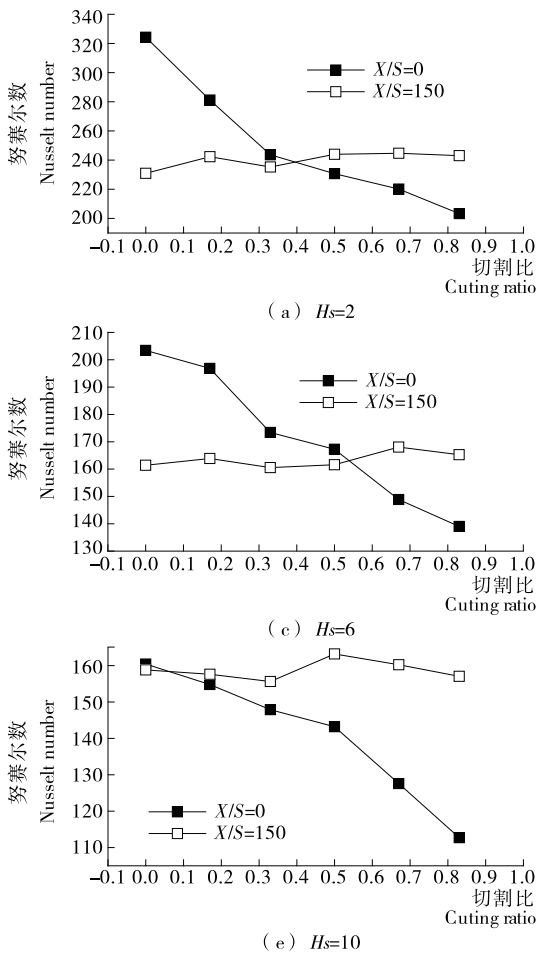


图 4 不同 H_s 与切割比 Ψ 时钢带表面 Nu 数分布

Figure 4 Different H_s and cutting ratio Ψ on the surface of steel strip Nusselt number distribution

述,当喷嘴出口与钢带间距发生改变时,选择合适的 Ψ 值(临界切割比 Ψ_0)能有效地提高钢带表面换热均匀性。

2.2 H_s 对钢带表面换热不均匀性的影响

调节喷嘴与钢带间距 H ,可实现对不同冻品尺寸的生产需求。本试验讨论了不同 H_s 与切割比 Ψ 时喷嘴正下方钢带表面换热特性,见图 4。结果表明:在相同 H_s ,不同切割比 Ψ 下, $X/S=150$ (其中: X 为横坐标, S 为喷嘴宽度, $S=5\text{ mm}$)即速冻机宽度方向中心,钢带表面换热强度差异性较小;但在 $X/S=0$ 即压力出口处,钢带表面换热不均匀性较高,且随着 Ψ 增大,Nu 数呈下降趋势。另一方面,随着 H_s 增加,钢带表面 Nu 数逐渐降低,其原因在于气流拓展到钢带表面的能力随着 H_s 增加而减弱,见图 5。

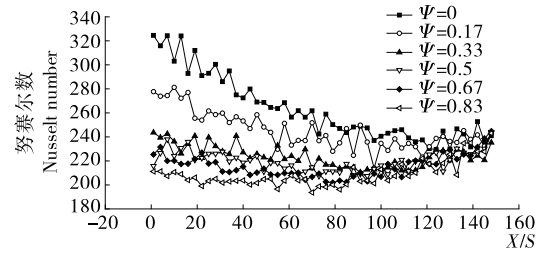
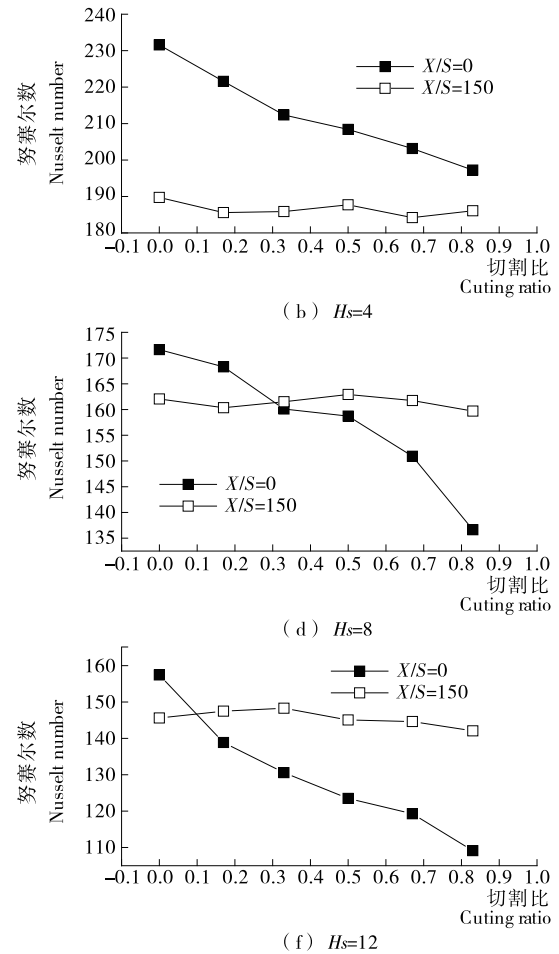


图 3 不同切割比对钢带表面换热的影响

Figure 3 Different cutting ratio effect on metal surface heat transfer



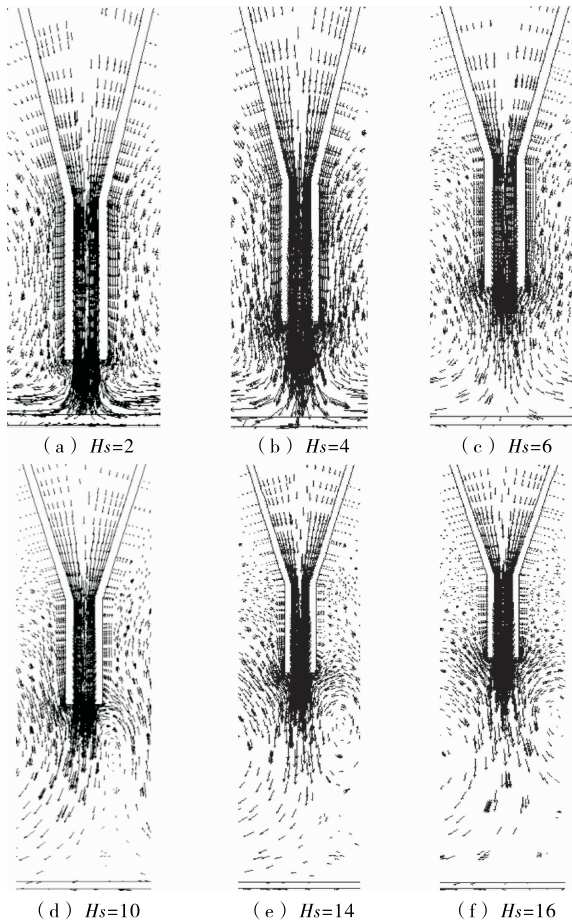


图5 喷嘴出口气流射流矢量图
Figure 5 Nozzle of air jet vector

通过对上述数据进一步分析发现,当 $\Psi=0$ 时,随着 H_s 增加,沿横流方向钢带表面换热差异性逐渐降低,见图4;当 $H_s > 10$ 时,随着切割比 Ψ 增加,在 $X/S=150$ 处钢带表面换热强度大于 $X/S=0$ 处的,即速冻机中心钢带表面换热能力强于钢带两侧。这是因为,随着喷嘴出口到钢带表面的靶向距离增加,使横流方向气流流通截面积增大,流体沿流动方向延程阻力降低,最终使横流方向条缝喷嘴出口压力极差减小,即在 $X/S=0$ 与 $X/S=150$ 处,静压腔与喷嘴出口两端的压差趋于一致,此时喷嘴出口流速相当,因此流体拓展到钢带表面的能力趋于相同,钢带表面 Nu 数分布较为均匀;另一方面,随着 Ψ 增加,从速冻机中心往钢带两侧移动过程中,喷嘴出口到钢带表面的靶向距离增大,流体拓展到钢带表面的能力减弱,所以 $X/S=0$ 处钢带表面 Nu 数小于 $X/S=150$ 处。因此,当 $H_s > 10$ 时,继续增大切割比,不仅不利于降低钢带表面换热差异性而且还将导致速冻机冻结速率下降。

为了更加直观地描述沿 X 方向,喷嘴正下方钢带表面 Nu 数的分布情况,本试验通过引入 $X/S=0$ 与 $X/S=150$ 处 Nu 数极值之差进行差异性描述。如图6所示,当切割比 $\Psi=0$ 时,在 $H_s=2$ 处,沿 X 方向, Nu 数分布差异性最大,其极差值达到93;随着 H_s 增加,极差值逐渐降低,并逐渐趋于0,这意味着当 $\Psi=0$ 时, $X/S=0$ 处换热强度始终大于

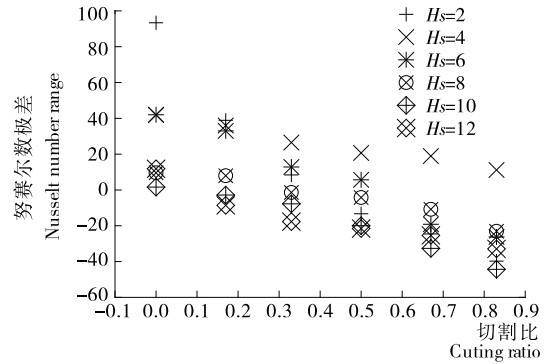


图6 Nu 数极差分布
Figure 6 Nusselt number range distribution

$X/S=150$ 处;随着 Ψ 值增加, $X/S=0$ 与 $X/S=150$ 处 Nu 数极值之差呈现明显下降趋势,当切割比 Ψ 突破临界切割比 Ψ_0 时,极差出现负增长趋势,即在 $X/S=0$ 处表面 Nu 数低于 $X/S=150$ 处。通过数据分析不难发现随着 H_s 增加临界 Ψ_0 逐渐降低,见图7;当喷嘴与钢带间距一定时,通过图7的临界 Ψ_0 曲线可以有效地确定V型条缝喷嘴的最佳切割比(即 Ψ_0)。

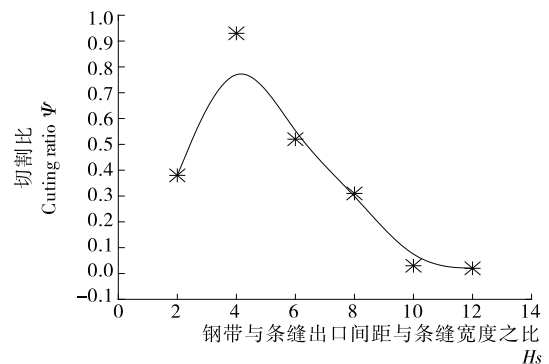


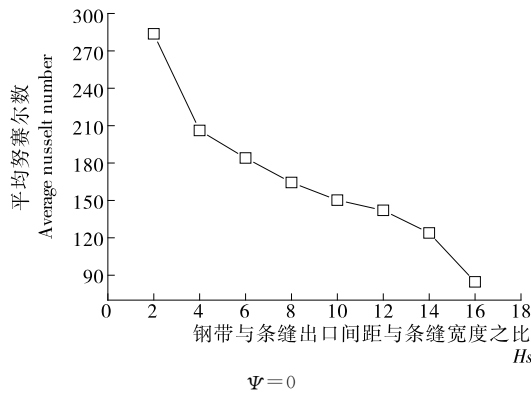
图7 临界切割比分布曲线
Figure 7 Critical cutting ratio distribution curve

如图7所示,临界 Ψ_0 曲线随 H_s 增加,呈现先增大后减小的趋势,并在 $H_s=4$ 附近, Ψ_0 达到峰值,其原因在于:当 $H_s < 4$ 时,喷嘴出口与钢带间的靶向距离较小,钢带处于气流射流的核心区域,气流在钢带表面进行附壁流动,钢带表面的换热速率十分剧烈,此时 H_s 的细微变化对钢带表面换热效果影响较大;因此,当 $H_s=2$ 时,随着 Ψ 增加, $X/S=0$ 处钢带表面 Nu 数迅速降低,并达到临界 Ψ_0 ;另一方面,随着 H_s 增加,钢带表面换热强度降低,因此需要将 Ψ 调节到较大值使钢带表面换热差异性降低,当 $H_s=4$ 时 Ψ_0 达到峰值(0.95);当 $4 < H_s < 12$ 时,钢带表面换热能力受 H_s 影响较小,见图8;因此,在此范围内随 H_s 增加临界切割比 Ψ_0 逐渐降低,直至 Ψ_0 趋近0。当 $H_s > 10$ 之后,调整切割比 Ψ 对冻结区域换热表面将造成不利影响。

3 结论

本试验以V型条缝喷嘴为研究对象,探索了在不同切割比下,改变喷嘴与钢带表面间距 H 对速冻机冻结区域表面换热特性的影响。得到以下结论:

- (1) 当 $H_s < 10$, $\Psi=0$ (即传统V型条缝喷嘴结构) 时,

图 8 平均 Nu 数随 H_s 的变化曲线Figure 8 Average number of Nu versus H_s

沿 X 方向钢带表面换热强度存在明显差异性, 即 $X/S=0$ 处钢带表面 Nu 数明显大于 $X/S=150$ 处的。

(2) 当 $H_s < 10$, 随着 Ψ 增加, 沿 X 方向钢带表面换热强度差异性逐渐降低, 当超过临界切割比 Ψ_0 之后, 钢带表面换热强度将出现负增长, 即 $X/S=0$ 处钢带表面 Nu 数低于 $X/S=150$ 处的。

(3) 临界切割比 Ψ_0 曲线随 H_s 增加, 呈现先增大后减小的趋势, 在 $H_s=4$ 附近, Ψ_0 达到峰值; 临界切割比 Ψ_0 曲线针对不同尺寸的冻品调整 H_s , 并确定最佳切割比具有重要的指导意义。

(4) 当 $H_s > 10$, 沿 X 方向, 钢带表面不同位置处换热均匀性较强, 调整切割比反而将降低钢带表面换热均匀性。

参考文献

- [1] GRASSI C, SCHR A, GLOY Y S, et al. Reducing environmental impact in air jet weaving technology[J]. International Journal of Clothing Science & Technology, 2016, 28(3): 283-292.
- [2] WANG Gang, DENG Yun, XU Xin. Optimization of air jet impingement drying of okara using response surface methodology[J]. Food Control, 2016, 59: 743-749.
- [3] MAKATAR W H, PERAPONG T, SMITH E A, et al. Effect of cross-flow velocity on flow and heat transfer characteristics of impinging jet with low jet-to-plate distance[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(7): 2 909-2 917.
- [4] BERNHARD W. Experimental investigation of impingement heat transfer on a flat and dimpled plate with different crossflow schemes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53(19/20): 3 874-3 886.
- [5] KATTI V, PRABHU S V. Influence of spanwise pitch on local heat transfer distribution for in-line arrays of circular jets with spent air flow in two opposite directions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 33(1): 84-95.
- [6] SEBASTIAN S, BERNHARD W. Experimental and numerical investigation of impingement heat transfer on a flat and micro-rib roughened plate with different crossflow schemes[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2011, 50(7): 1 293-1 307.
- [7] SEBASTIAN S, BERNHARD W. Experimental and numerical investigation of heat transfer characteristics of inline and staggered arrays of impinging jets[J]. Journal of Heat Transfer, 2010, 132(9): 1-11.
- [8] KATTI V, PRABHU S V. Influence of spanwise pitch on local heat transfer distribution for in-line arrays of circular jets with spent air flow in two opposite directions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2008, 33(1): 84-95.
- [9] 王金锋, 李文俊, 谢晶, 等. 两种喷嘴结构对冲击式速冻机流场及换热特征的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 80-85, 90.
- [10] VIKAS K, AI P W, SOHAN B. A 3-D computational fluid dynamics model for forced air cooling of eggs placed in trays[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(3): 480-492.
- [11] 王金锋, 李文俊, 谢晶, 等. 两种喷嘴结构对冲击式速冻机流场及换热特征的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 80-85, 90.
- [12] 王金锋, 李文俊, 谢晶, 等. 两种喷嘴结构对冲击式速冻机流场及换热特征的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 80-85, 90.
- [13] 王金锋, 李文俊, 谢晶, 等. 两种喷嘴结构对冲击式速冻机流场及换热特征的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 80-85, 90.
- [14] 王金锋, 李文俊, 谢晶, 等. 两种喷嘴结构对冲击式速冻机流场及换热特征的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 80-85, 90.
- [15] 王金锋, 李文俊, 谢晶, 等. 两种喷嘴结构对冲击式速冻机流场及换热特征的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 80-85, 90.
- [16] 王金锋, 李文俊, 谢晶, 等. 两种喷嘴结构对冲击式速冻机流场及换热特征的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(12): 80-85, 90.
- [17] CHEN Hai-hua, XU Shi-ying, WANG Zhang. Interaction between flaxseed gum and meat protein[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 80(4): 1 051-1 059.
- [18] ZHANG Li-li, ZHANG Feng-xiang, WANG Xia. Changes of protein secondary structures of Pollock surimi gels under high-temperature (100 °C and 120 °C) treatment[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 171: 159-163.
- [19] 殷俊, 梅灿辉, 陈斌, 等. 肉丸品质的质构与感官分析[J]. 现代食品科技, 2011, 27(1): 50-55.
- [20] FUNAMI T, UNAMI M, YADA H, et al. Gelation mechanism of curdlan by dynamic viscoelasticity measurements[J]. Journal of Food Science, 1999, 64(1): 129-132.
- [21] CHEN Cong-gui, WANG Rui, SUN Gao-jun, et al. Effects of high pressure level and holding time on properties of duck muscle gels containing 1% curdlan[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2010, 11(4): 538-542.
- [22] HU Ya-qin, LIU Wen-juan, YUAN Chun-hong, et al. Enhancement of the gelation properties of hairtail (Trichiurus haemulonoid) muscle protein with curdlan and transglutaminase[J]. Food Chemistry, 2015, 176: 115-122.
- [23] 姚周麟, 桑卫国, 林媚, 等. 利用物性仪测定鲑鱼片不同含水量的质构特性研究[J]. 现代农业科技, 2010(21): 372-373.
- [24] PARK J W. Surimi gel colors as affected by moisture content and physical conditions[J]. Journal of Food Science, 2010, 60(1): 15-18.
- [25] 程珍珠, 赵伟, 杨瑞金. 膳食纤维对鱼糜凝胶工艺特性的影响[J]. 食品与机械, 2011, 27(6): 75-79.
- [26] WANG Man-jun, CHEN Cong-gui, SUN Gao-jun, et al. Effects of curdlan on the color, syneresis, cooking qualities, and textural properties of potato starch noodles[J]. Starch-Stärke, 2010, 62(8): 429-434.
- [27] FUNAMI T, YADA H, NAKAO Y. Curdlan properties for application in fat mimetics for meat products[J]. Journal of Food Science, 2010, 63(2): 283-287.
- [28] WEI Yi-nong, ZHANG Tao, YU Fan-qian-hui, et al. Effects of curdlan on the texture and structure of Alaska Pollock surimi gels treated at 120 °C[J]. International Journal of Food Properties, 2017, DOI: 10.1080/10942912.2017.1306557.
- [29] BUAMARD N, BENJAKUL S. Improvement of gel properties of sardine (Sardinella albellata) surimi using coconut husk extracts[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 146-155.