

喷嘴结构对冲击式速冻设备性能优化研究进展

Research progress on performance optimization of impingement quick-freezing equipment with nozzle structure

舒志涛^{1,2,3,4} 谢晶^{1,2,3,4} 杨大章^{1,2,3,4}

SHU Zhi-tao^{1,2,3,4} XIE Jing^{1,2,3,4} YANG Da-zhang^{1,2,3,4}

(1. 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306; 2. 上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 201306; 3. 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; 4. 上海海洋大学食品学院, 上海 201306)

(1. Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing & Preservation, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 3. National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering [Shanghai Ocean University], Shanghai 201306, China; 4. College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

摘要:利用高速气流对物体进行射流冲击,使其快速冻结的设备被称为冲击式速冻设备。其中,设备的喷嘴结构是决定冻结区内流场的重要因素之一,影响着物体与周围环境的传热。文章从冲击式速冻设备喷嘴结构出发,阐述了喷嘴的倾斜角度、排列布置以及形状对冲击式速冻设备内部气流流动和换热特性的影响。板间距与喷嘴直径比(H/d)以及流体雷诺数(Re_d)对喷嘴倾斜角度和平均努塞耳数之间的关系起到了决定性作用;此外,喷嘴的不同形状以及不同排列方式对系统内部气流组织也有着很大的影响。

关键词:冲击式;速冻设备;喷嘴;换热特性

Abstract: The equipment that impinges the object with high velocity airflow and freezes it quickly is called impingement quick-freezing equipment. The nozzle form of the equipment is one of the important factors to determine the flow field in the freezing zone, which affects the heat transfer characteristics between the object and the surrounding environment. Based on the nozzle structure of the impingement quick-freezing equipment, the influence of the inclined angle, arrangement and shape of the nozzle on the heat transfer characteristics of the flow field in the impingement quick-freezing equipment is discussed in this paper.

基金项目:国家“十三五”重点研发项目(编号:2016YFD0400303);上海高校青年教师培养资助计划(编号:ZZSHOU16013);上海海洋大学科技发展专项基金(编号:A2-0203-17-100207);上海海洋大学博士科研启动基金(编号:A2-0203-17-100317)

作者简介:舒志涛,男,上海海洋大学在读硕士研究生。

通信作者:谢晶(1968—),女,上海海洋大学教授,博士。

E-mail: jxie@shou.edu.cn

收稿日期:2018-01-21

Find that the nozzle-to-plate spacing(H/d) and the Reynolds numbers of the fluid play a decisive role in the relationship between the nozzle inclination angle and the average Nusselt numbers. In addition, the different shapes and arrangement of the nozzles also have a great influence on the airflow organization in the system.

Keywords: impingement quick-freezing equipment; nozzle shape; heat transfer characteristics; influence law

速冻可以较好地保证食品内部细胞组织的完整性,保存食品的口感和营养价值^[1]。随着人们对食品品质需求的不断提高,业界对速冻设备的开发和研究日益增多。如今速冻设备种类繁多^[2-3],从冻结速度角度出发可分为:慢速冻结(0.1~1.0 cm/h)、中速冻结(1~5 cm/h)和快速冻结(5~20 cm/h)设备,不同的冻结速度会使冻品内部冰晶大小、数量和分布不同^[4];从冷却介质角度出发可分为:喷淋式冻结、空气循环式冻结、浸渍式冻结设备和接触式冻结^[5],其中空气循环式冻结设备中应用较广的是隧道式冻结、螺旋式冻结和流态化式冻结设备等,冲击式冻结设备是其中的新型产品^[6]。

近年来,人们对冲击射流与物体间的传热特性进行了大量的研究^[7],发现冲击射流具有较高的传热和传质速率,可以应用于食品速冻和干燥、电子设备冷却和金属退火等领域。冲击式速冻设备也逐渐被开发和应用^[8]。Sundsten等^[9]将冲击式速冻技术、螺旋速冻技术和液氮速冻技术进行了比较,分别对厚度为10 mm、重量为80 g的汉堡包从4℃

冷冻到 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。螺旋速冻需要 $1\,320\text{ s}$,液氮速冻需要 330 s ,而冲击式速冻仅需要 160 s ,同时它们的失重率依次为 1.2% , 0.4% , 0.4% ,研究发现:冲击式速冻设备在冷却速率方面明显领先于螺旋式速冻和液氮速冻等其他速冻设备。

但是目前冲击式速冻设备普遍存在气流组织设计不合理,导致运行效率低、风机能耗高等问题,因此该设备的设计优化就显得尤为重要。本文着重从该设备的核心——喷嘴结构对内部流场传热特性的影响进行分析,综述喷嘴的倾斜角度、排列布置、形状以及特殊形状狭缝式喷嘴结构对喷射流场和换热强度的影响,以期为以后冲击式速冻设备的研发提供一定的理论依据。

1 喷嘴的倾斜角度对内部流场传热特性的影响

喷嘴的倾斜角度决定了冲击射流的倾斜角度,不同的倾斜角度会使冲击射流与物体表面间的传热强度发生变化。

不同的学者针对喷嘴倾斜角度对内部流场传热特性的影响进行了许多试验研究。图 1 为 Ingole 等^[10]进行喷嘴倾角试验的试验装置示意图。在试验后,发现在雷诺数(Re_d)为 $2\,000\sim 20\,000$ 、板间距与喷嘴直径比(H/d)为 $0.5\sim 6.8$ 的情况下,喷嘴倾角为 45° 和 60° 时冷却效果最好。Beitelmal 等^[11]通过试验研究确定了二维冲击式空气射流的倾角对均匀加热平板传热的影响,考虑了倾角($0^{\circ}\leq\theta\leq 50^{\circ}$)、板间距与喷嘴直径比($4\leq H/d\leq 12$)和雷诺数($4\,000\leq Re_d\leq 12\,000$) 3 因素对努塞尔数的影响,观察到冲击点和平均努塞尔数随着倾角的减小而略有减小。Goldstein 等^[12]利用液晶技术研究了从方形喷嘴射出的射流在不同角度($0^{\circ}\leq\theta\leq 50^{\circ}$)冲击平面时的局部换热速率,在板间距与喷嘴直径比($4\leq H/d\leq 10$)和雷诺数($10\,000\leq Re_d\leq 30\,000$)的范围内进行了试验,得出随着倾角的增大,冲击点和平均努塞尔数减小。Yan 等^[13]采用预热壁瞬变液晶技术研究了从圆形喷嘴射出的射流冲击平面时的传热过程,考虑了倾角($0^{\circ}\leq\theta\leq 45^{\circ}$)、板间距与喷嘴直径比($4.7\leq H/d\leq 12$)和雷诺数($10\,000\leq Re_d\leq 23\,000$)这 3 个因素对努塞尔数的影响,得知随着倾角的增大,冲击点和平均努塞尔数略有减小。

对上述前人的研究进行对比后发现:雷诺数的大小影响了最终的试验结果。当雷诺数较小时,冲击点和平均努塞尔数与倾角的大小呈正比;当雷诺数较大时,冲击点和平均努

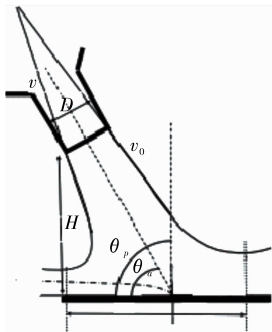


图 1 喷嘴倾角示意图^[10]

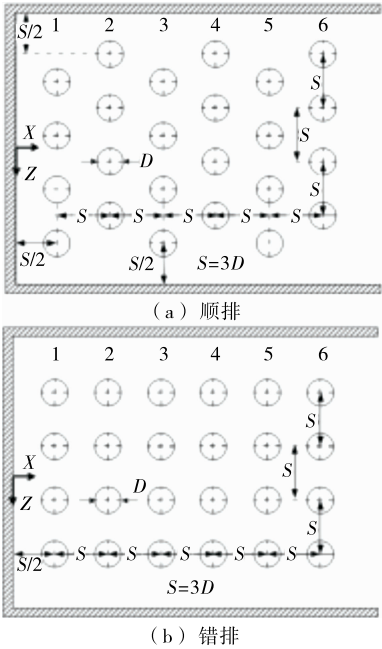
Figure 1 Nozzle inclination diagram^[10]

塞尔数与倾角的大小呈反比。但是目前的研究并没有对雷诺数的大、小有一个准确的定义,大小之间的临界区分值还很模糊,只能知道在 $10\,000$ 左右,所以这方面的内容还需进一步研究。

Choo 等^[14]研究了喷嘴倾斜角度对板间距与喷嘴直径比(H/d)不同系统换热特性的影响,结果表明:板间距与喷嘴直径比(H/d)较小的传热特性和板间距与喷嘴直径比(H/d)较大的有显著差异;在固定流量下,当板间距与喷嘴直径比较小时($H/d\leq 1.0$),冲击点和平均努塞尔数随着倾角的增大而增大,当板间距与喷嘴直径比较大时($H/d> 1.0$),冲击点和平均努塞尔数随着倾角的增大而减小。因此,在冲击式速冻设备的设计和应用中,还应该关注设备的喷嘴直径以及喷嘴和钢带间距离的大小,根据具体情况设计不同的喷嘴倾角,使平均努塞尔数达到最大,实现换热速率最快。

2 喷嘴的排列布置对内部流场传热特性的影响

射流冲击是换热设备强化传热的一种高性能技术,它会在局部传热区域提供快速的冷却或加热。但在实际设备中,通常传热区域较大,此时一般采用多次射流冲击或射流冲击阵列如图 2 所示的顺排与错排。通过以往的试验^[15]证明,不同的射流冲击阵列会对内部流场的传热特性造成影响。



(b) 错排

图 2 不同形式的冲击阵列

Figure 2 Different forms of impact arrays

其中,影响冲击射流在有限空间内流动和传热特性的一个重要因素是横流。横流被定义为垂直于冲击射流的流体流动。它的形成主要有两个来源:通过外部流动形成,或通过积累废射流形成。当有限空间内发生多个冲击射流时,废射流从通道的上游到下游不断累积,导致横流的流速从通道的上游到下游不断增加^[16]。因此,通道下游的横流流速最

大,横流对冲击射流的流动和传热特性的影响也最为显著。

由于喷嘴的排列布置对废射流的形成和积累有着很大的影响,因此很多研究都致力于找到合适的喷嘴排列布置方式,以减缓横流对传热特性的影响。Katti 等^[17]研究了在喷嘴线性排列的情况下,射流阵列冲击物体表面的传热特性。研究表明:当喷嘴间距 $S=4D$ (其中 D 为喷嘴直径) 时,射流向射流的延伸方向上的热传导速率大于喷嘴间距 $S=2D$ 和 $S=6D$ 时的热传导速率。Wachayee 等^[15]研究了在板间距与喷嘴直径比较小时,喷嘴排列布置对冲击射流阵列的影响,试验中喷嘴的排列布置分别采用了线性排列和交错排列(图 2),并用热变色液晶片(TLCS)研究了冲击表面的温度分布,利用油膜技术观察了冲击表面的流动特性,发现在喷嘴交错排列的情况下,内部流场的横流对冲击射流的影响强于喷嘴线性排列的情况,适度的横流速度反而可以增加冲击射流的换热峰值。这是因为流场中横流的相互作用,使其在射流冲击前与射流发生碰撞,增加了冲击射流的湍流程度;当雷诺数 Re_d 为 5 000~13 400 时,线性排列喷嘴的平均努塞尔数比交错排列的高 13%~20%。

张珍等^[18]针对冲击式速冻设备内部流场特点,利用计算流体技术数值模拟了孔板的开孔率对内部流场传热特性的影响,研究表明:随着孔板开孔率从 2% 增大至 15%,静压箱内的风速不断减小,在孔板和隔板间的区域内,压力分布逐渐均匀,应力集中也被减小。其中,孔板的开孔率为 5% 时最佳。

由此可知:为减少横流对冲击射流的影响,可以采用喷嘴顺排的布置形式,并且开孔率为 5% 时,横流对有限空间内流动和传热特性的影响最小,冲击射流与物体表面的换热强度最大,是比较好的一种喷嘴排列布置形式。

3 喷嘴的形状对内部流场传热特性的影响

3.1 圆形、矩形和椭圆形喷嘴对内部流场传热特性的影响

Weigand 等^[19]研究发现在所有影响冲击空气射流传热特性的因素中,喷嘴的几何形状是非常重要的影响因素之一。Attalla 等^[20]研究了圆形和矩形喷嘴对冲击射流在光滑平面上传热强度和传热均匀性的影响,结果表明:圆形喷嘴喷出的冲击射流与光滑平面间的平均传热速率比矩形喷嘴高出约 7.8%,但矩形喷嘴喷出的冲击射流与光滑平面间的传热均匀性更好。Vinze 等^[21]研究了当雷诺数 Re_d 在 10 000~23 000 时,圆形、矩形和三角形 3 种喷嘴形状对物体表面局部传热效率的影响,研究表明:与矩形和三角形喷嘴相比圆形喷嘴喷出的冲击射流与换热表面间的努塞尔数最大。Lee 等^[22-23]研究了从椭圆型喷嘴喷出的冲击射流的局部传热特性,得出:在射流冲击区,从椭圆型喷嘴喷出的射流的努塞尔值比从圆形喷嘴喷出的要高。Caliskan 等^[24-25]利用热红外成像技术和多普勒激光测速技术,研究了多个不同的椭圆形和矩形冲击射流阵列在冲击光滑平面时的传热系数分布以及流体测量结果,发现当板间距与喷嘴直径比 $H/d=2$ 且雷诺数 $Re_d=10\ 000$ 时,椭圆形冲击射流比矩形冲击射流换热强度高。Lytle 等^[26-27]在板间距与喷嘴直径比 $(H/d)<1$

的情况下进行了试验,研究了由长管喷嘴喷出的圆形冲击射流在平板上的局部传热分布,结果表明:在板间距与喷嘴直径比 $(H/d)<0.25$ 时,最大努塞尔数从停滞点移到次峰点,并且雷诺数越高,效应越明显。Dae 等^[28]研究了喷嘴直径对冲击射流传热和流体流动的影响,结果表明,在板间距与喷嘴直径比 (H/d) 为 0.0~0.5 时,局部努塞尔数随喷嘴直径的增大而增大。

从上述各试验结果中不难看出,喷嘴的几何形状对冲击射流与物体表面间的换热强度起到了很大的影响。在一定条件下,椭圆形喷嘴形成射流的努塞尔数大于圆形喷嘴和矩形喷嘴;在形状相同的情况下,喷嘴的规格又直接影响了板间距与喷嘴直径比 (H/d) 的大小,当板间距与喷嘴直径比 (H/d) 较小时,局部努塞尔数随喷嘴直径的增大而增大;而对于长管喷嘴喷出的不同形状的冲击射流在平板上的局部传热分布还有待研究,对于条缝形喷嘴和渐缩渐放形喷嘴在这一方面的研究也是相对较少。

3.2 狭缝式喷嘴对内部流场传热特性的影响

狭缝式喷嘴在结构上横向两端间隔较小,纵向两端间隔较大,形如条缝,是一种特殊的喷嘴形状。狭缝式喷嘴的狭缝宽度影响着射流速度核心区的长度^[29]。狭缝式射流冲击系统对控制目标物体表面与流动流体之间高能量转移的能力是被大家所共同认可的^[30]。从节能的角度来看,由于狭缝式射流冲击系统具有很高的风速,因此采用这种无源技术来增强能量的传递非常意义。Sarkar 等^[31-33]研究发现,冲击射流的典型特征是包含以下 3 个区域:自由射流区、停滞区和壁面射流区,但只有在停滞区,射流冲击表面时,射流速度突变为零,动能全部转化为静压能,传热系数非常高;而自由射流区和壁面射流区的传热系数较低,并且一直得不到改善。狭缝式射流冲击系统可以加强分布在目标表面的传热,改善壁面射流区内传热系数较低的情况^[34-35]。

Na-Pompet 等^[36]研究了在停滞区和壁面射流区内,狭缝通道对冲击表面传热的影响。有人^[37-38]采用计算流体力学软件对湍流流场进行了数值模拟,旨在通过狭缝通道强化传热。结果表明,对于狭缝式射流冲击系统,通过适当的设计,可以加强目标表面的传热。这一发现有利于降低能耗,也有利于拓宽射流的应用范围。Ghaffari 等^[39-40]研究了狭缝冲击合成射流的流动与传热特性,研究发现:① 在相同的喷射质量下,合成射流比稳定射流的冷却效果增强了 20%,在相同的出口速度和直径下,合成射流的冷却效果也更好;② 板间距与喷嘴直径比 (H/d) 在 5~10 时,冲击射流对表面的换热最大;③ 在相同雷诺数的情况下,较高的 Stokes 数具有较好的冷却性能。

通过上述研究,可以得知狭缝式喷嘴是一种出风速度较大,形状特殊的喷嘴。该喷嘴不但加工方便,可以较好地改善壁面射流区内传热较差的情况,同时利用狭缝式喷嘴喷出合成射流也在一定程度上提高了射流与物体表面间的换热强度,降低了能耗。但是,狭缝式喷嘴与其他形状喷嘴对内部流场传热特性的影响对比研究还没有;此外,对于其他喷嘴喷出合成射流是否也能达到提高换热强度的效果,也需要

今后进一步研究。

4 冲击式速冻设备应用情况

冲击式速冻设备作为一种高效的新型速冻设备,正在逐渐被国内外速冻机厂商所关注。作为设备最核心的喷嘴结构也成为了各大速冻机厂商探究的重点。目前,中国冰轮集团研发的 MJN 系列隧道式(网带)速冻装置利用了如图 3(a)所示的喷嘴结构,与其前两代产品相比冻结时间缩短 30%。星诺冷冻设备有限公司研发的 TPB 系列冲击式隧道板带速冻机则利用了如图 3(b)所示的喷嘴结构,与公司其他设备相比,流场均匀性更好,冻结效率提高。南通四方冷链装备股份有限公司研发的隧道系列冻结设备则在图 3(b)的喷嘴结构上多加了一段导流板见图 3(c)。这样的喷嘴结构增大了气流流量,减少了冻结时间。该设备特别适用于扁平状或小块状的食品快速冻结。以上 3 种型号的冲击式速冻设备是中国目前使用最多的。但由于喷嘴结构多变,对气流影响很大,因此喷嘴结构依然处在不断优化的阶段。

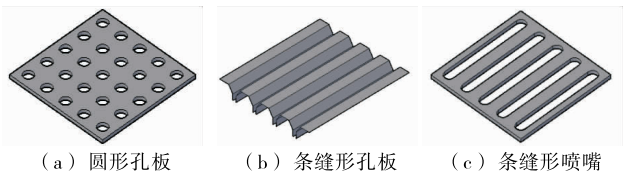


图 3 各厂家冲击式速冻机喷嘴结构

Figure 3 Nozzle structure of impingement quick-freezing Machine in various factories

5 结论与展望

冲击式速冻技术因为能提高冻结速率、冻品质量,因而逐渐受到了关注和青睐。本文研究了设备的喷嘴结构对设备内部换热情况的影响,得到如下一些结论:

- (1) 板间距与喷嘴直径比(H/d)的大小对喷嘴的倾斜角度和平均努塞耳数之间的关系起着决定性的作用。当比值偏大时,平均努塞耳数随着倾角的增大而减小;当比值偏小时,则随着倾角的增大而增大。然而 H/d 的大小是否会对其他喷嘴结构因素产生重要影响还需进一步研究。
- (2) 通常情况下,由于线性排列减少了废射流的积累,缓解了横流对传热过程的影响,所以喷嘴线性排列时的平均努塞耳数要大于交错排列时的,传热效果更好,冻结时间更短。
- (3) 目前椭圆形喷嘴喷出的冲击射流与目标壁面之间的换热强度最大,但是椭圆形喷口最佳的长短轴之比还要继续深入研究。
- (4) 狭缝式喷嘴有助于增加壁面射流区内的传热强度,较好地解决了除停滞区以外其他区域传热强度很低的问题,是一个值得继续开发研究的方向。

参考文献

[1] 张珍, 谢晶. 带有上下均风孔板的速冻装置中流场及温度场的数值模拟[J]. 制冷学报, 2009, 30(5): 36-40.

[2] 谢晶. 食品冷冻冷藏原理与技术[M], 北京: 中国农业出版社,

2015; 162-163.

[3] 段雪涛, 徐斌, 胡振武, 等. 速冻装置的分类及研究方法[J]. 冷饮与速冻食品工业, 2003, 9(1): 40-42.

[4] 岳希举, 余铭, 崔静, 等. 速冻食品及速冻设备的发展概况及趋势[J]. 农产品加工·学刊, 2012(12): 94-96.

[5] 卓传敏. 大型速冻设备高效蒸发器传热技术的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006: 2-3.

[6] 唐婉, 谢晶. 速冻设备的分类及性能优化的研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(23): 362-366.

[7] 陈洪嘉. 效益明显的空气冲击式冷冻技术[J]. 中国食品工业, 2002(1): 32-32.

[8] 叶琼娟, 余铭, 张全凯, 等. 速冻技术在食品工业中的应用研究进展[J]. 农产品加工·学刊, 2012(12): 97-100.

[9] SUNDSTEN S, ANDERSSON A, TORNERG E. The effect of the freezing rate on the quality of hamburger[C]// Rapid Cooling of Food, Meeting of IIR Commission C2. Bristol: [s.n.], 2001: 181-186.

[10] INGOLE S B, SUNDARAM K K. Experimental average Nusselt number characteristics with inclined non-confined jet impingement of air for cooling application[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2016, 77: 124-131.

[11] BEITELMAL A H, SAAD M A, PATEL C D. The effect of inclination on the heat transfer between a flat surface and an impinging two-dimensional air jet[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2000, 21(2): 156-163.

[12] GOLDSTEIN R J, FRANCHETT M E. Heat transfer from a flat surface to an oblique impinging jet[J]. Journal of Heat Transfer, 1988, 110(1): 84-90.

[13] YAN X, SANIEI N. Heat transfer from an obliquely impinging circular, air jet to a flat plate[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 1997, 18(6): 591-599.

[14] CHOO K, KANG T Y, KIM S J. The effect of inclination on impinging jets at small nozzle-to-plate spacing[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2012, 55(13/14): 3 327-3 334.

[15] WAEHAYEE M, TEKASAKUL P, NUNTADUSIT C. Influence of nozzle arrangement on flow and heat transfer characteristics of arrays of circular impinging jets[J]. Songklanakarin Journal of Science & Technology, 2013, 35(2): 203-212.

[16] VISKANTA R. Heat transfer to impinging isothermal gas and flame jets[J]. Experimental Thermal Fluid Science, 1993, 6(1): 103-107.

[17] KATTI V, PRABHU S V. Influence of spanwise pitch on local heat transfer distribution due to confined multiple jets with spent air exiting in two opposite directions[J]. Thermophysics Conference, 2013, doi: 10.251416.2018-4126.

[18] 张珍, 谢晶. 上下冲击式高效鼓风冻结装置速度场的数值模拟与验证[J]. 低温工程, 2008(6): 45-50.

[19] KAYS W M, CRAWFORD M E. Convective Heat And Mass Transfer[M]. New York: McGraw Hill, 1980: 409-453.

[20] ATTALLA M, MAGHRABIE H M, QAYYUM A, et al. Influence of the nozzle shape on heat transfer uniformity for in-line array of impinging air jets[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 160-169.

[21] VINZE R, CHANDEL S, LIMAYE M D, et al. Influence of jet temperature and nozzle shape on the heat transfer distribution between a smooth plate and impinging air jets[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 99: 136-151.

[22] SANG J L, JUNG H L, DAE H L. Local heat transfer measurements from an elliptic jet impinging on a flat plate using liquid crystal[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1994, 37(6): 967-976.

[23] LEE J, LEE S J. The effect of nozzle aspect ratio on stagnation region heat transfer characteristics of elliptic impinging jet[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2000, 43(4): 555-575.

[24] CALISKAN S. Flow and heat transfer characteristics of transverse perforated ribs under impingement jets[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2013, 66(6): 244-260.

[25] CALISKAN S, BASKAYA S. Velocity field and turbulence effects on heat transfer characteristics from surfaces with V-shaped ribs [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2012, 55(21/22): 6 260-6 277.

[26] LYTLE D, WEBB B W. Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1994, 37(12): 1 687-1 697.

[27] CHOO K S, KIMS J. Air jet impingement heat transfer at low nozzle-to-plate spacings under a fixed pumping power condition[C]// ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference Collocated with the Interpack09 and, Energy Sustainability Conferences. [S.l.]: Journal of Heat Transfer, 2009: 459-465.

[28] DAE H L, JEONGHOON S, MYEONG C J. The effects of nozzle diameter on impinging jet heat transfer and fluid flow[J]. Journal of Heat Transfer, 2004, 126(4): 554-557.

[29] 耿铁, 李德群, 周华民, 等. 冲击射流及其强化换热的研究进展[J]. 机械设计与制造, 2006(6): 154-156.

[30] 王超, 王昭东, 李广阔, 等. 超宽狭缝式喷嘴流场数值模拟和射流速度凸度控制[J]. 轧钢, 2013, 30(2): 6-9.

[31] SARKAR A, NITIN N, KARWE M V, et al. Fluid Flow and Heat Transfer in Air Jet Impingement in Food Processing[J]. Journal of Food Science, 2004, 69(4): CRH113-CRH122.

[32] SARKAR A, SINGH R P. Spatial variation of convective heat transfer coefficient in air impingement applications[J]. Journal of Food Science, 2010, 68(3): 910-916.

[33] SARKAR A, SINGH R P. Air impingement technology for food processing: visualization studies[J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37(8): 873-879.

[34] ADAMS T M, ABDEL-KHALIK S I, JETER S M, et al. An experimental investigation of single-phase forced convection in microchannels [J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 1998, 41(6/7): 851-857.

[35] OWHAIB W, PALM B. Experimental investigation of single-phase convective heat transfer in circular microchannels[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2004, 28(2): 105-110.

[36] NA-POMPET K, BOONSUPTHIP W. Effect of a narrow channel on heat transfer enhancement of a slot-jet impingement system[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 103 (4): 366-376.

[37] 陆蓓蓓. CFD 在低温流场中的应用[J]. 发电与空调, 2005, 26 (4): 21-24.

[38] 陆蓓蓓, 陈瑞球, 黄建昌, 等. 低温流场气流组织的数值分析[J]. 流体机械, 2006, 34(10): 84-86.

[39] GHAFARI O, IKHLAQ M, ARIK M. An Experimental Study of Impinging Synthetic Jets for Heat Transfer Augmentation[J]. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 2015, 23(3): 83-94.

[40] GHAFARI O, SOLOVITZ S A, ARIK M. An investigation into flow and heat transfer for a slot impinging synthetic jet[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2016, 100: 634-645.

(上接第 45 页)

[28] CHATTERJEE S, CHATTERJEE S, LAD S J, et al. Mersacidin, a new antibiotic from Bacillus. Fermentation, isolation, purification and chemical characterization[J]. Journal of Antibiotics, 1992, 45(6): 832-838.

[29] KIMS Y, LEE N K, HAN E J, et al. Characterization of subtilin KU43 Produced by *Bacillus subtilis*, KU43 isolated from traditional Korean fermented foods[J]. Food Science & Biotechnology, 2012, 21(5): 1 433-1 438.

[30] STEIN T, BORCHERT S, CONRAD B, et al. Two different lantibiotic-like peptides originate from the ericin gene cluster of *Bacillus subtilis* A1/3[J]. Journal of Bacteriology, 2002, 184 (6): 1 703-1 711.

[31] PAIK S H, CHAKICHERLA A, HANSEN J N. Identification and characterization of the structural and transporter genes for, and the chemical and biological properties of, sublancin 168, a novel lantibiotic produced by *Bacillus subtilis* 168[J]. Journal of Biological Chemistry, 1998, 273(36): 23-34.

[32] ZHENG Guo-lu, SLAVIK M F. Isolation, partial purification and characterization of a bacteriocin produced by a newly isolated *Bacillus subtilis* strain[J]. Letters in Applied Microbiology, 1999, 28(5): 363-367.

[33] MARX R, STEIN T, ENTIAN K D, et al. Structure of the *Bacillus subtilis* peptide antibiotic subtilosin A determined by 1H-NMR and matrix assisted laser desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry[J]. Journal of Protein Chemistry, 2001, 20(6): 501-506.

[34] 赵朋超, 王建华, 权春善, 等. 枯草芽孢杆菌抗菌肽生物合成的研究进展[J]. 中国生物工程杂志, 2010, 30(10): 108-113.

[35] IL P, RYU J, KIM Y H, et al. Production of Biosurfactant Lipopeptides Iturin A, Fengycin, and SurfactinA from *Bacillus subtilis* CMB32 for Control of Colletotrichum gloeosporioides[J]. Journal of Microbiology & Biotechnology, 2010, 20 (1): 138-145.

[36] 孙珊, 郝林, 王倩. 枯草芽孢杆菌 W321 产抑菌物质的理化性质及抑菌谱研究[J]. 食品工业, 2012(11): 110-112.