

上下冲击式速冻机流场和换热特性研究现状

吴昔磊¹, 许启军^{2,3}, 顾翰文^{2,3}, 谢晶^{2,3,4}

(1.上海开创国际海洋资源股份有限公司, 上海 200082; 2.上海冷链装备性能与节能评价专业技术服务平台, 上海 200082; 3.上海海洋大学 食品学院, 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)

摘要: **目的** 为了提高食品冻结的品质, 需要对冲击式速冻机的结构尺寸和内部流场进行优化, 改善冲击式速冻机的冻结效率。**方法** 综述影响该类速冻机换热特性的4个因素, 即喷嘴的形状和尺寸, 射流阵列的排布, 喷嘴到输送带距离和喷嘴间距的改变, 速冻机进出口压差等。**结果** 通过回顾计算流体力学技术和实验研究在这4个方面优化速冻机换热特性的案例, 总结了上下冲击式速冻机流场变化的规律。**结论** 该研究为新型速冻机的优化设计提供了理论支撑。

关键词: 计算流体力学; 喷嘴结构类型; 上下冲击式速冻机; 传热特性

中图分类号: TB61 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2021)11-0033-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.11.005

Current Situation of Flow Field and Heat Transfer Characteristics of an Upper and Lower Impact Freezer

WU Xi-lei¹, XU Qi-jun^{2,3}, GU Han-wen^{2,3}, XIE Jing^{2,3,4}

(1.Shanghai Kaichuang International Marine Resources Co., Ltd., Shanghai 201306, China; 2.Shanghai Professional Technology Service Platform on Cold Chain Equipment Performance and Energy Saving Evaluation, Shanghai 201306, China; 3.College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 4.National Experimental Teaching Demonstration Center for Food Science and Engineering (Shanghai Ocean University), Shanghai 201306, China)

ABSTRACT: In order to improve the quality of food freezing, it is necessary to optimize the structural size and internal flow field of impact freezer to optimize its freezing efficiency. Four factors influencing the heat transfer characteristics of the freezer, namely nozzle shape and size, arrangement of jet impingement, variation of nozzle to conveyor belt distance and nozzle spacing, and freezer import and export pressure were reviewed. By reviewing the cases of of CFD technology and experimental research in these four aspects of heat transfer optimization of freezer, the law of heat transfer in this kind of freezer was summarized. This study provides a theoretical support for the optimal design of the new quick freezer.

KEY WORDS: computational fluid dynamics; nozzle structure type; upper and lower impact freezers; heat transfer characteristics

民以食为天, 食品不仅是多组分、多相、非均质的物质系统, 而且是物理化学性质不稳定的极其复杂

的物质系统^[1]。为了更好地保存食品的口感和营养价值, 对食品在冻结方面的要求越来越高^[2-3]。冲击式

收稿日期: 2021-01-24

基金项目: 上海市科委科技创新行动计划(19DZ1207503); 上海市科委平台能力提升项目(20DZ2292200)

作者简介: 吴昔磊(1966—), 男, 工程师, 主要研究方向为渔业制冷工程、水产品加工。

通信作者: 谢晶(1968—), 女, 博士, 上海海洋大学教授, 主要研究方向为食品冷冻冷藏。

速冻设备主要由离心风机、上下冲击孔板、网带等部件组成,主要原理是利用低温气流的快速冲击,使冻结食品传热系数增大,实现快速冻结,使冻品内部冰晶细小、冻品品质好^[4-6]。如果能采用科学的研究方法对冻结过程中食品温度的变化进行准确预测,就可以有效地预测冻结时间,并且能指导速冻设备优化设计、提高设备能效。由于大多数食品存在非均匀的物性参数,并且冻结过程存在的相变导致食品冻结过程成为一个严格非线性变化过程,因此很难找到一个普遍适用的方法对冻结过程进行描述^[7-8]。目前最适合的方法是采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟速冻机内部流场和食品传热过程^[9]。文中回顾改变速冻机的喷嘴形状(条缝、圆孔、漏斗)、喷嘴与钢带表面的距离、喷嘴排布方式的差异等因素对该类速冻机流场和传热的影响,以期为该速冻机的优化设计提供理论依据。

1 喷嘴的形状和尺寸

Maraza 等^[10]综述了冲击空气射流的传热特性,提出喷嘴的几何形状和排列方式是影响其传热的重要因素之一。Mcguin 等^[11]研究了平行狭缝射流阵列的横流强化传热效果,给出了不同雷诺数、行程长度和轴向间距时的平均努塞尔数分布。Xiong 等^[12-14]研究了矩形、方形、圆形喷嘴喷出的冲击射流的局部传热特性,进一步观察喷嘴形状对流场换热的影响,并通过热成像技术测量不锈钢箔的表面温度。实验结果表明,矩形孔口的平均努塞尔数分别比方形孔口和圆形孔口的平均努塞尔数高 25.4%和 32.8%。Choo 等^[15]认为 $Re=2500$ 处是宏观冲击射流与微尺度射流有所差别的点,并且在喷嘴与输送带间距的比值 $(Z/d_h) > 1$ 的情况下,在峰值处出现了最大努塞尔数,这不仅仅说明了喷嘴的尺寸和形状是关键因素之一,更是强调了喷嘴到输送带的距离是研究该设备内部传热的重要因素之一。Viskanta^[16]和 Polat 等^[17]指出,从层流到湍流的转变发生在雷诺数为 2500 处,在过渡层中会出现一个有利于增强传热的位移峰值,为了找出微尺度冲击射流的传热特性,并将其与在大范围的雷诺数下使用加热板和可忽略横向传导的宏观射流进行比较,他们采用了薄镀锌金聚酯基板作为加热器,利用 CFD 模拟流场在喷嘴尺寸和形状同时的变化,建立了微尺度下滞止点分布和平均努塞尔数的相关性,给出了雷诺数与喷嘴到输送带间距的函数关系。Pompert 等^[18]采用实验证明,狭缝式射流冲击系统可以在目标表面上提高整体传热,这一结论可以在提高效率、减少能耗的宗旨下优化冲击射流装置。Attalla 等^[19]采用圆形喷嘴与方形喷嘴作对比,研究发现,当 $2000 \leq Re \leq 10\ 000$ 时,圆形喷嘴的平均传热系数比方形喷嘴的平均传热系数高,方

型喷嘴的传热均匀性比圆形喷嘴的传热均匀性好。Sun 等^[20]以纳米流体为工作流体,研究发现,圆形喷嘴的对流换热系数比方形喷嘴的对流换热系数高。Guo 等^[21]研究了圆形喷嘴冲击射流的瞬时传热特性,发现局部努塞尔数随着雷诺数的增加而增加。Hofmann 等^[22]研究了在圆形喷嘴条件下,喷嘴与输送带的间距和雷诺数对局部换热系数的影响,给出了冲击射流的局部努塞尔数与喷嘴到输送带的间距和雷诺数的相关关系。Tepe 等^[23]通过实验和数值模拟发现,射流孔延长可以减小横流对传热的不利影响。Aminzadeh 等^[24]利用数值模拟研究喷嘴宽度对冲击振荡射流冷却系统的影响,结果显示,与常规静止冲击射流相比,自激振荡冲击射流具有更高的努塞尔数,其改善了冷却过程中的换热;同时减小喷嘴宽度可增加恒定流量下的振荡频率,提高传热效率。

综上所述,圆形喷嘴无论是在宏观尺度或是在微观尺度都比方形喷嘴的传热性能更好,并且在狭缝式喷嘴中的流动提升了射流的传热效率,同时,延长喷嘴的长度、减小喷嘴的宽度均对传热效率有很大的提高,这些有助于优化速冻机的研制。

2 射流阵列

喷嘴直列阵列或交错排布不同时,流场和换热特性会有所不同^[25]。利用 CFD 技术可以计算喷嘴处努塞尔数,从而更加直观地观察其变化。Shan 等^[26]通过对 2 种不同射流阵列的对比发现,交错阵列的“横流”效应或“通道状”流动行为比多排射流后排中的直列阵列更为明显,同时发现交错排列下第 1 排所产生的换热也比直列阵列稍高,体现了两者对于换热的差异性,交错阵列更适合于冲击式速冻机,可以大幅度提高换热效率。

张珍等^[27]通过改变冻品上下方的均分孔板开孔率来改变流场,通过设立 2%, 5%, 10%, 15% 的开孔率,比较静压箱内边界急剧变化区域处的压力场;当开孔率不断增加时,内部流场会趋于均匀,这样可以对设备起到很好的保护;当开孔率达到 5% 时,冻品冻结终止时的中心温度低于 $-18\text{ }^\circ\text{C}$,符合食品速冻的降温规定^[28]。Yang 等^[29]研究了不同湍流模型对冲击多射流计算的影响,当流体射出后,流体速度在不同区域呈现出不同的速度和流向,直到到达射流极点处,流体速度降到 0,射流流体沿方向平行于壁面加速,在其他区域和在极点处相比,墙体与冲击射流之间的传热特性有很大的差异。为研究不同湍流模型对冲击射流的影响,其使用 CFD 进行了数值计算,通过基于有限体积技术的 CFD 代码,利用二阶迎风、Simple 算法、 $k-\varepsilon$ 湍流模型^[30]对压力、动量、湍流动能和能量方程进行离散化,迭代至收敛为止^[31]。在改变喷嘴的孔径后发现, $d=5\text{ mm}$ 的努塞尔数是 $d=2\text{ mm}$

的 8 倍, 消耗的质量流量多出了接近 7 倍。Nuntadusit 等^[32]对比了喷嘴直列排布和交错排布的传热特性, 发现当细长型喷嘴的纵横比为 4 的情况下, 喷嘴的横流效果明显较小。在同样的纵横比下, 无论是直列排布还是交错排布, 两者的局部努塞尔数都比其他纵横比下的局部努塞尔数高。同样地, Tepe^[23]等利用数值模拟技术, 研究了交错射流阵列对传热的影响, 局部努塞尔数和平均努塞尔数随着喷嘴到目标面距离的减少而增大, 实现了更高的热传递。

综上所述, 同一形状的喷嘴因为排列方式的不同造成了传热特性的不同, 如交错阵列比直列阵列的传热要好, 细长的喷嘴可以得到更高的局部努塞尔数和平均努塞尔数, 使传热加强, 更重要的是传热系数也会随着喷嘴与目标面距离的缩短而逐渐增强。

3 喷嘴到输送带距离和喷嘴间距

改变喷嘴到输送带距离和喷嘴间距对优化速冻机的传热特性效果明显且简单易操作。Katti 等^[33]研究了喷嘴离输送带表面不同距离时的努塞尔数分布情况, 结果表明, 横流效应的影响造成努塞尔数在顺气流方向呈现出波状分布, 并不断衰减, 在喷嘴与输送带表面距离达到喷嘴直径的 3 倍时出现顶峰, 这说明喷嘴离输送带表面距离不同会影响速冻机内部的传热特性。另外, Lee 等^[34]认为喷嘴到输送带距离和射流喷嘴间距的改变会造成雷诺数的改变, 特别是当密集喷嘴阵列为 $5d$ 和 $8d$ (d 为喷嘴直径) 时, 在冲击通道交叉流动不利于局部努塞尔数的变化, 并且随着间距的增大, 局部努塞尔数峰值越来越大, 一定程度上破坏了换热的均匀性。Hoberg 等^[35]测量了不同尺度和不同高度的密集交错排列组合模式的冲击射流方式, 每种模式都由 6 个均匀喷嘴组成, 射流间距是喷嘴直径的 2.34 倍, 按照比例缩小几何形状后, 改变喷嘴直径, 从 8.46 mm 到 0.94 mm, 经过测试和比较 $Re=500\sim 10\,000$ 的不同阵列, 发现雷诺数与努塞尔数的相关性, 这些结果与射流管的长度无关。另外, 他们还发现当射流速度和射流间距不变时, 较高的喷嘴高度会导致传热系数降低。Beitelmal 等^[36]进行了实验研究, 确定了冲击射流对均匀加热平板传热的影响, 考虑了喷嘴间距与喷嘴直径的比值 ($4\leq H/d\leq 12$) 和雷诺数 ($4000\leq Re\leq 12\,000$) 这 2 个因素对传热特性的影响, 而且不同的喷嘴间距与喷嘴直径的比值往往会影响到喷嘴的倾斜角度, 进而造成平均努塞尔数的变化, 当喷嘴间距与喷嘴直径的比值较小时, 喷嘴的倾斜角度与平均努塞尔数呈现正相关关系, 反之呈负相关关系。Goldstein 等^[37]利用液晶技术, 研究了当喷嘴间距与喷嘴直径的比值 ($4\leq H/d\leq 10$) 和雷诺数 ($10\,000\leq Re\leq 30\,000$) 在一定范围内时, 从方形喷嘴射出射流的传热特性变化, 结果表明,

这 3 种因素相互影响、相互作用于平均努塞尔数。Yan 等^[38]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, 考虑了喷嘴间距与喷嘴直径的比值 ($4.7\leq H/d\leq 12$) 和雷诺数 ($10\,000\leq Re\leq 23\,000$) 对努塞尔数的影响, 得到了相似的结论。Chiu 等^[39]采用液晶热图技术, 对 3 种排列的薄膜孔进行了对比, 实验表明, 随着射流雷诺数的增加, 努塞尔数随之增加, 对于较小的射流喷嘴间距的传热, 在输送带表面的孔隙结构排列效果的影响下, 3 种排布的薄膜孔的传热各不相同。降低射流间距既增加了冲击力, 又增加了横流, 冲击力的增量比横流的增量更大, 从而提高总传热。Shariatmadar 等^[40]对于特定排列的射流阵列的研究发现, 局部换热系数随雷诺数的增加而减小, 随喷嘴间距的增大而增大, 由于射流不均匀地影响输送带, 所以雷诺数和高射流的喷嘴间距会导致射流流体沿输送带不均匀冷却, 他们从雷诺数, 喷嘴与输送带间距, 喷嘴与喷嘴间距, 以及缝隙射流宽度等方面给出了平均滞止努塞尔数的经验关系式, 这些方程与实验结果吻合得很好。San 等^[41]测量了垂直于平板表面的 5 个受限环形空气射流的努塞尔数分布, 并使射流间距与射流直径的比值 (S/D) 和射流高度与射流直径的比值 (H/D) 分别为 $2\sim 8$ 和 $0.5\sim 3$ 。喷嘴射流雷诺数为 20 000, 当 S/D 和 H/D 较小 ($S/D=2$ 和 $H/D=0.5$) 时, 由于撞击板上的强流冲击 (喷流相互作用) 而产生最大努塞尔数; 当 S/D 小和 H/D 大的情况下, S/D 和 H/D 的增加会导致射流相互作用减小 ($S/D=2$ 和 $H/D>2$), 可以在射流阵列直接覆盖的区域内达到均匀的努塞尔数分布。Lytle 等^[42]利用红外热成像技术, 对从喷嘴间距与喷嘴直径的比值 (H/d) 较小的设备喷出的冲击射流的传热特性进行了研究, 发现当 H/d 小到一定程度时, 停滞点努塞尔数和 H/d 呈幂函数关系。Yu 等^[43]根据循环射流的水力直径的研究发现, 当 $20\,000\leq Re\leq 60\,000$ 时, 随着喷嘴与输送带间距的减小, 驻点附近的传热能力增强, 边界点附近的传热能力下降。Wachayee 等^[44]研究了在喷嘴间距与喷嘴直径的比值较小时, 不同喷嘴排列方式的传热特性, 结果表明, 当喷嘴交错排列时, 内部流场的横流对冲击射流的影响强于喷嘴直列排列, 并且 Re 为 5000~13 400 时, 喷嘴线性排列的平均努塞尔数比喷嘴交错排列的平均努塞尔数高。Donovan 等^[45]研究了轴对称冲击射流的流体流动和传热过程, 发现了在喷嘴到目标距离较小的情况下, 径向的平均传热会出现 2 次峰值。

综上所述, 过高的喷嘴与输送带的距离会增加横流效应对传热的影响, 并且喷嘴之间距离太小时, 输送带上的换热均匀性会遭到破坏。合适的喷嘴之间距离和喷嘴到输送带的距离会对这类速冻机的传热效率有极大的提高。

4 速冻机进出口压差

速冻机通过内部空气循环流动与目标进行换热,速冻机进出口压差的改变势必对速冻机换热效率造成影响。Everts 等^[46]比较了光滑圆管在层流、过渡、准湍流和湍流状态下的发展和充分发展流动的压降和传热特性,在 $500 \leq Re \leq 10\,000$ 的情况下进行了压降和传热测量,结果发现,在流体流动的开始和结束时,雷诺数对于压降和传热结果是相同的。Du 等^[47]对冲击射流的流动和对流换热进行了实验和数值研究,实验中测量了 $2020 \leq Re \leq 14\,260$ 的情况下,冲击射流的总换热系数和压力损失,压力损失系数随雷诺数的增加而减小。采用雷诺平均数值方法对冲击射流冷却的流场和换热进行了数值模拟计算,模拟计算的压降和传热特性与实验结果一致。数据结果也表明,冲击高速射流和强旋涡可以强化换热。Xie 等^[48]利用 CFD 数值计算方法,对低压状态下滑移流的流动和换热特性进行了数值研究,在基于无量纲连续性、动量和能量方程的基础上,对圆柱管内流动和传热特性进行了数值模拟,计算范围 Re 为 $0.001 \sim 20$,并建立了预测低压气体在滑流区流动阻力和强迫对流换热特性的经验关联式。

综上所述,速冻机进出口压差过大必然导致传热效率恶化,为了避免过大的压力损失可以通过调节喷嘴冲击射流的速度来实现,实验也证明高速射流和强旋流可以减少压力损失增强换热。

5 结语

上下冲击式射流技术的优化与新型速冻机的研制息息相关。文中从 4 个方面对影响上下冲击式速冻机流场的因素进行了归纳和总结,并且得到了以下结论。

1) 圆形喷嘴和椭圆形喷嘴均能很好地增加传热效果,其中椭圆形喷嘴比圆型喷嘴的传热效果更好。在喷嘴尺寸方面,在湍流区会出现传热峰值,并且峰值不是定值,随着喷嘴到输送带间距的变化而变化。局部努塞尔数随着滞止点横向距离的增加而增加,当增加到最大后,局部努塞尔数会随着滞止点横向距离的增加而减小。

2) 在喷嘴交错排列过于密集时,下方喷嘴的对流传热会受到上方喷嘴射流所诱导的横流的影响,这会极大地不利于气流与冻品的对流传热。

3) 交错阵列比直列阵列的传热更好,细长的喷嘴可以得到更高的局部努塞尔数和平均努塞尔数,传热得到加强,更重要的是传热系数也会随着喷嘴与目标面距离的缩短而逐渐增强。

4) 流场的进出口压差越高,平均努塞尔数会随着升高,有助于提高速冻机流场的均匀性。

目前,针对冲击射流技术的应用越来越多,如何将复杂流场简单化处理,如何在最短时间最大效率地冷冻冻品等一系列问题仍未很好地解决,表明目前对冲击射流传热机理的理解仍不全面,还需进一步从不同形式对喷嘴的优化、横流效应的影响等方面深入研究。

参考文献:

- [1] 谢晶,食品冷冻冷藏原理与技术[M].北京:中国农业出版社,2015:10—15.
XIE Jing. Food Freezing and Refrigeration Principle and Technology[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2015: 10—15.
- [2] KNORR D, AUGUSTIN M A. Food Processing Needs, Advantages and Misconceptions[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 108: 103—110.
- [3] 陈聪,杨大章,谢晶.速冻食品的冰晶形态及辅助冻结方法研究进展[J].食品与机械,2019,35(8): 220—225.
CHEN Cong, YANG Da-zhang, XIE Jing, et al. Review on Ice Crystal Shape and Assisted Freezing Methods of Quick-Frozen Food[J]. Food and Machinery, 2019, 35(8): 220—225.
- [4] ATTALLA M, MAGHRABIEH 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.
- [5] 唐婉,谢晶,王金锋,等.虾仁热物性的计算及冻结时间的数值模拟[J].食品与机械,2018,34(2): 106—110.
TANG Wan, XIE Jing, WANG Jin-feng, et al. Thermal Physical Property Calculation and Freezing Time Numerical Simulation of Shrimp[J]. Food & Machinery, 2018, 34(2): 106—110.
- [6] ZHU Zhi-wei, ZHOU Qian-yun, SUN Da-wen, et al. Measuring and Controlling Ice Crystallization in Frozen Foods: A Review of Recent Developments[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 90: 13—25.
- [7] STEBEL M, SMOLKA J, PALACZ M, et al. Numerical Investigation of the Fluid Flow Distribution for the Hydrofluidisation Food Freezing Method[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020, 151: 106284.
- [8] 唐君言,邵双全,徐洪波,等.食品速冻方法与模拟技术研究进展[J].制冷学报,2018,39(6): 1—9.
TANG Jun-yan, SHAO Shuang-quan, XU Hong-bo, et al. Progress In Research on the Food Quick-freezing Method and Simulation Technology[J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(6): 1—9.
- [9] 谢晶,舒志涛,杨大章,等.冲击式速冻设备上下送风速度对虾仁冻结过程的影响[J].农业工程学报,2020,36(6): 276—283.

- XIE Jing, SHU Zhi-tao, YANG Da-zhang, et al. Effect of Upper and Lower Air Supply Speed on the Freezing Process of Shrimp in Impact Type Quick-Freezing Equipment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(6): 276—283.
- [10] MARAZA T, MADYIRA D M, AKINLABI E T. Investigation of the Parameters Governing the Performance of Jet Impingement Quick Food Freezing and Cooling Systems—A Review [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 8: 754—760.
- [11] MCGUIN A, RYLATT D I, O'DONOVAN T S. Heat Transfer Enhancement to an Array of Synthetic Air Jets by An Induced Crossflow[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103: 996—1003.
- [12] DENG Xiong, LUO Zhen-bing, XIA Zhi-xun, et al. Experimental Investigation on the Flow Regime and Impingement Heat Transfer of Dual Synthetic Jet[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 145: 105864—105864.
- [13] SINGH P K, SAHU S K, UPADHYAY P K, et al. Experimental Investigation on Thermal Characteristics of Hot Surface by Synthetic Jet Impingement[J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 165: 114596.
- [14] MAGHRABIE H M. Heat Transfer Intensification of Jet Impingement Using Exciting Jets-A Comprehensive Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 139(9): 110684.
- [15] CHOO K S, YOUN Y J, KIM S J, et al. Heat Transfer Characteristics of A Micro-Scale Impinging Slot Jet[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2009, 52(13): 3169—3175.
- [16] VISKANTA R. Heat Transfer to Isothermal Gas and Flame Jets[J]. Experimental Thermal & Fluid Ence, 1993, 6(2): 111—134.
- [17] POLAT S, HUANG B, MUJUMDAR A S, et al. Numerical Flow and Heat Transfer Under Impinging Jets: A Review[J]. Annual Reviews of Heat Transfer, 1989, 2(2): 592—600.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] SUN Bin, QU Yi, YANG Di. Heat Transfer of Single Impinging Jet with Cu Nanofluids[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 102: 701—707.
- [21] GUO Qiang, WEN Zhi, DOU Rui-feng. Experimental and Numerical Study on the Transient Heat-Transfer Characteristics of Circular Air-Jet Impingement on A Flat Plate[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2017, 104: 1177—1188.
- [22] HOFMANN H M, KIND M, MARTIN H. Measurements on Steady State Heat Transfer and Flow Structure and New Correlations for Heat and Mass Transfer in Submerged Impinging Jets[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2007, 50(19): 3957—3965.
- [23] TEPE A M, YETIKEN Y, UYSAL U, et al. Experimental and Numerical Investigation of Jet Impingement Cooling Using Extended Jet Holes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 158: 119945.
- [24] AMINZADEH M, KHADEM J, ZOLFAGHARI A, et al. Numerical Study of Nozzle Width Effect on Cooling Performance of A Turbulent Impinging Oscillating Jet in A Heated Cavity[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 62(11): 4280—4292.
- [25] YERANEE K, WAE-HAYEE M, NUNTADUSIT C. Flow and Heat Transfer of Impinging Jet Array Associated with Entrained Air Ducts[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 21(2): 35—42.
- [26] SHAN Yong, ZHANG Jing-zhou, XIE Gong-nan. Convective Heat Transfer for Multiple Rows of Impinging Air Jets With Small Jet-to-Jet Spacing in a Semi-Confined Channel[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2015, 86: 832—842.
- [27] 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.
- ZHANG Zhen, XIE Jing. Numerical Simulation of the Flow and Temperature Fields in A Quick-Freezing Unit with Upper and Lower Aperture Plates[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(5): 36—40.
- [28] 时阳, 朱兴旺, 姬鹏先, 等. 冷库设计及管理[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2006: 95—110.
- SHI Yang, ZHU Xing-wang, JI Peng-xian, et al. Cold Storage Design and Management[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2006: 95—110.
- [29] YANG B, CHANG S, WU H, et al. Experimental and Numerical Investigation of Heat Transfer in an Array of Impingement Jets on A Concave Surface[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 127: 473—483.
- [30] VIKAS K, AI P W. 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.
- [31] 朱红均. FLUENT12 流体分析及工程仿真[M]. 北京: 清华大学出版社. 2011: 6—8.
- ZHU Hong-jun. Fluent 12 Fluid Analysis and Engineering Simulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 6—8.
- [32] NUNTADUSIT C, WAE-HAYEE M, TEKASAKUL P, et al. Local Heat Transfer Characteristics of Array Impinging Jets from Elongated Orifices[J]. International

- Communications in Heat & Mass Transfer, 2012, 39(8): 1154—1164.
- [33] KATTI V, PRABHUS 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.
- [34] LEE J, REN Z, LIGRANI P, et al. Cross-Flow Effects on Impingement Array Heat Transfer with Varying Jet-to-Target Plate Distance and Hole Spacing[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014, 75(75): 534—544.
- [35] HOBERG T B, ONSTAD A J, EATON J K. Heat Transfer Measurements for Jet Impingement Arrays with Local Extraction[J]. International Journal of Heat & Fluid Flow, 2010, 31(3): 460—467.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] CHIU H C, JANG J H, YAN W M. Experimental Study on the Heat Transfer under Impinging Elliptic Jet Array Along A Film Hole Surface Using Liquid Crystal Thermograph[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2009, 52(19): 4435—4448.
- [40] SHARIATMADAR H, MOUSAVIANM S, SADOUGHI M, et al. Experimental and Numerical Study on Heat Transfer Characteristics of Various Geometrical Arrangement of Impinging Jet Arrays[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2016, 102(3): 26—38.
- [41] SAN Jun-yang, CHEN J. Effects of Jet-to-Jet Spacing and Jet Height on Heat Transfer Characteristics of an Impinging Jet Array[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2014, 71(1): 8—17.
- [42] 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): 1687—1697.
- [43] YU Ping-ping, ZHU Ke-qian, SHI Qiang, et al. Transient Heat Transfer Characteristics of Small Jet Impingement on High-Temperature Flat Plate[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2017, 114: 981—991.
- [44] 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.
- [45] O'DONOVAN T S, MURRAY D B. Jet Impingement Heat Transfer—Part I: Mean and Root-Mean-Square Heat Transfer and Velocity Distributions[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2007, 50(17): 3291—3301.
- [46] EVERTS M, MEYER J P. Relationship Between Pressure Drop and Heat Transfer of Developing and Fully Developed Flow in Smooth Horizontal Circular Tubes in the Laminar, Transitional, Quasi-Turbulent and Turbulent Flow Regimes[J]. International Journal of Heat & Mass Transfer, 2018, 117: 1231—1250.
- [47] DU Meng-meng, ZHONG Feng-quan, XING Yun-fei, et al. Experimental and Numerical Investigation on Flow and Heat Transfer of Impingement Jet Cooling of Kerosene[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 15(2): 78—95.
- [48] XIE Fu-shou, LI Yan-zhong, WANG Xin-bong, et al. Numerical Study on Flow and Heat Transfer Characteristics of Low Pressure Gas in Slip Flow Regime[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 124: 131—145.