

DOI: 10.13652/j.issn.1003-5788.2019.10.031

速冻设备流场优化研究进展

Progress in research of flow field optimization in quick freezing equipment

朱一帆^{1,2} 谢晶^{1,2,3,4}

ZHU Yi-fan^{1,2} XIE Jing^{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. 上海海洋大学食品科学与工程国家级实验教学示范中心, 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:速冻是食品保鲜的重要技术之一, 冻结速率越快, 速冻食品解冻后品质越好。冻品表面风速越高, 换热强度越大, 冻结速率则越快。若只增加风机转速会导致风机效率降低, 流场不均匀度增加, 因此需要对流场进行优化。对风机设置锥形口等引导流体设施, 可以增加风机效率; 在流场中设置导流板, 可以消除流场中的涡流; 增加冷冻区域流速, 可以加强食品表面的对流换热; 隔断设备内外的空气交换, 可以减少蒸发器结霜, 降低设备的冷负荷。文章指出将多种措施结合, 减少制造与维护的成本、节省运行费用与提高冻品质量是未来速冻设备优化的方向。

关键词:速冻设备; 流场; 优化

Abstract: Quick freezing is an important technique for food preservation. The faster the freezing rate, the better the quality of frozen food after thawing. The greater the wind speed on the surface of the frozen product, the greater the heat exchange intensity and the faster the freezing rate. However, only increasing the fan speed will result in a decrease in fan efficiency and a decrease in flow field evenness, so the flow field needs to be optimized. The fan efficiency can be increased by setting the cone to the fan. The baffle can be arranged in the flow field to eliminate the eddy cur-

rent in the flow field. Increasing the flow rate in the freezing zone can enhance the convective heat transfer of the food surface. To prevent the air exchange inside and outside the device can be used to reduce the frosting of the evaporator and reduce the energy consumption of the equipment. Combining multiple measures to decrease manufacturing and maintenance costs, reduce operating costs, and improve the quality of frozen food is the direction of future quick-freezing equipment optimization.

Keywords: quick freezing equipment; flow field; optimization

随着生活水平的提高, 人们对食品品质的追求也越来越高。速冻是保存新鲜食品的重要技术之一^[1], 能最大程度地保留食品的风味与营养, 并有利于延长贮藏期。影响速冻食品品质的因素较多, 如原料质量、前处理工艺、冻结速率等^[2-4], 各因素间互相关联, 而冻结速率是决定性因素^[5-6]。

冻结设备按冻结速率可分为慢速冻结(0.1~1.0 cm/h)、中速冻结(1~5 cm/h)和快速冻结(5~20 cm/h), 不同冻结速度使食品冻结后内部冰晶大小、形状和分布均有差异^[7-9], 极大地影响了冻结食品的品质^[10]。速冻设备按冷却介质还可分为空气循环式冻结、喷淋式冻结、接触式冻结和浸渍式冻结^[11]。目前, 主要的空气循环式速冻机有隧道式速冻机、螺旋式速冻机和流态化式速冻机。文章主要从气流对表面换热的影响、空气循环式冻结设备流场规律、空气循环式冻结设备流场优化3个方面阐述气流组织对空气循环式速冻机性能的影响。

1 气流对食品冻结的影响

气流对食品冻结一直是食品速冻研究的热点。近年

基金项目: 国家“十三五”重点研发项目(编号: 2018YFD0400605); 上海市科委平台能力建设项目(编号: 16DZ2280300); 上海市科委公共服务平台建设项目(编号: 17DZ2293400)

作者简介: 朱一帆, 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: 2019-02-24

来对高速气流冲击冻品的研究逐渐增多,如 Salvadori 等^[12]指出将高速空气射流引导至食物表面以破坏围绕产品的传热边界层,可有效地减少食品的冻结时间,通过对汉堡包的冲击式冻结验证了气流垂直吹向钢带比平行吹向钢带的冷冻时间更短,质量损失也更少;而气流冲击板带上冻品的角度也会影响冻品的换热效率^[13]。研究^[14]表明,通过更高的风速可增加冻品表面的传热系数,以减少食品的冻结或冷却时间。Dominguez 等^[15]通过对馒头速冻中流场内低温空气的温度和速度的研究,验证了食品的冻结速度与空气冷却器进口风速成正比。Lawal 等^[16]在稳定和不定流动以及来自射流冲击恒定热通量壁面的热传递的数值研究中进行验证,发现较高的射流入口速度会导致不稳定流动,但可以增强目标板上的高传热效率。Erdogdu 等^[17]使用集总参数法来评估空气喷嘴出口速度为 14,28 m/s 时表面传热系数的空间变化,在停滞区域分别产生 71.6,101.7 W/(m²·K)的传热系数最大值。岳占凯等^[18]通过对马铃薯泥冻结研究,发现冻品受到的气流速度越大、温度越低,冻品中心与表面的温差越大,当风速达到一定值后增加风速对冷冻时间的影响逐渐减小;风速与温度的改变对相变阶段的影响比对预冷和深冷阶段大。因此,在空气循环式速冻机中,冻品表面的风速越大,冻品冻结速率越大。

李保国^[19]研究证明了有各向异性的纤维质肉品的冻结速率受气流与纤维组织方向的影响,冷空气顺着纤维方向的冻结速率高于垂直于纤维方向的。Erdogdu 等^[20]发现冻品在冷冻时,旋转改变迎风面可以加快冻结速率。而冻结体积较小的食品时,单个颗粒食品冻结的速率约为堆积冻结的 6 倍,故采用流态化冻结可极大地提高冻结速率。将冲击式速冻技术与流态化速冻技术结合,可设计出冲击流态化速冻机^[21]。

综上所述,在冻结时改变迎风面有利于冻结,增加风速可以获得更大的努塞尔特数,加快降温速率,增加冻品中心与表面温差;当风速增大后,会降低设备内部平均温度,增加冻品干耗,因此温度、风速与食品干耗间可能存在合理配比的关系。

2 对空气循环式冻结设备流场规律的研究

由 Plank 公式 $t = \frac{\Delta H \cdot \gamma}{\Delta \theta \cdot N} \cdot \frac{D^2}{4\lambda} + \frac{\Delta H \cdot \gamma}{\Delta \theta \cdot N} \cdot \frac{D}{\alpha}$ 可知,冻结时间受冻品的导热性能与表面对流换热强度的影响,而表面对流换热受速冻机内气流组织的影响,因此可以通过 $t_2 = \frac{\Delta H \cdot \gamma}{\Delta \theta \cdot N} \cdot \frac{D}{\alpha}$ 来评价气流组织。理想的气流组织应同时获得较低的空气温度及食品表面与空气间较高的对流换热系数,Huan^[22]定义气流组织效率 $\eta_f = (t_2)_0/t_2$,是冻品在速冻装置内由理想气流组织的冻结时

间与由实际气流组织的冻结时间的比值。对于确定的速冻机,气流组织的基准温度可用蒸发温度 θ_{e0} ,基准速度可取风机出口风速,对应对流换热系数 α_0 ,冻品温度可近似取 0 °C,则气流组织效率可表示为:

$$\eta_f = \frac{\alpha \cdot \theta_e}{\alpha_0 \cdot \theta_{e0}}, \quad (1)$$

式中:

α ——实际速冻机中的对流换热系数;

θ_e ——冻结区冷空气的平均温度。

通过试验可知,气流组织效率主要受速冻装置内部结构、尺寸、送风方式、风向及冻结区风速等因素的影响,与冻品尺寸无关。

在速冻机中,不同的气流方向对传送带上的冻品冷冻过程有着巨大的影响。赖威娜^[23]在设计螺旋式液氮速冻机时,模拟了不同的送风方式,发现垂直流动的方式气流在经冻品后会产生涡流,导致预冷段风速不足,造成预冷效果较差;气流从转鼓中垂直流至预冷段后横掠过冻品的方式与顶部侧送横掠的送风方式,均能保证较低的平均温度与较高的风速,且后者风速比前者略大。牛新朝^[24]研究 -60 °C 低温速冻柜内流场及温度场时,发现送风口采用上下布置,回风口处于送风口中间时,流场的均匀性最佳。因此,在设计速冻机时,合理设计进风口位置对流场均匀性及提高气流组织效率有着重要影响。

徐斌等^[25]研究板带式速冻机时发现,相同流量下,通道高度越小,通道内气流压力损失越大,不均匀性也越大;相同通道高度下,流速越大,通道内气流压力损失越大,不均匀性也越大,在实际生产过程中会造成食品在流速较小处换热较差,在气流流速最大处,食品可能会被吹离板带。祁艳会^[26]通过对双螺旋速冻机的模拟研究发现,增大风速有助于减小低风速区域、增加低温区域,改善流场的均匀性,当风速达到某一值后,继续增大风速,设备内低风速区域并未减少,考虑到运行费用与节能,风速应有一个极限值。

目前,研究导流板可改善流场的均匀性,但仍存在以下问题:① 温度对流体黏度的影响,Lacerda 等^[27]研究发现,降低温度会增加空气密度和降低空气动力黏度,导致局部雷诺数增加;② 转角处流场有待改善,如张珍等^[28]对冲击式速冻机静压箱内的流场进行模拟时发现,当箱体内部气流均匀分布时,流体经过拐角时会产生不同程度漩涡,导致局部呈现紊乱,气流均匀性变差,使下方孔板的出口风速小于上方孔板的;③ 气流从下往上垂直流经网带时会发生绕流现象,由于网带的有效面积较小,对平均流速影响较小,当经网带后速度变化较大时,上方冻品的冻结速率会受影响^[29]。

综上所述,对于鼓风式速冻机,气流组织效率受设备自身结构的影响,与冻品大小形状无关,适当增加风速可

减少低风速区域,而达到一定的风速后继续增加风速无助于减少低速区域。出风口与回风口的布置会对内部流场产生重要影响,应尽量避免气流自下而上经过网带导致冻品处气流速度降低,避免流场中出现直角而形成涡流。

3 空气循环式冻结设备流场优化研究

3.1 从引导流体的角度

前期研究^[30]发现,增加风速可缩短冻结时间,而风机功率与气体速率的3次方呈正比。但Odey^[31]研究发现通过增加风扇转速简单地增加空气流量会形成大的不稳定涡流,导致风扇入口处速度受到负作用,使传热效率降低。在冷冻室顶部和侧面上设置挡板、在风机入口设置锥形口和扩散器、在角落上设置进气口和排气叶片、使用可变频风扇,可显著减少进入风扇的气流所形成的湍流。在此基础上,李堃^[32]通过数值模拟对轴流风机进行优化改进,将导流罩直角进口改为弧形进口可使风量提升20%以上,当进口处导流罩圆弧半径与轴流风机半径比值 $>1/5$ 时,风量不再发生改变;导流罩出口外接圆弧形管路导流可使风量获得提升,当出口处导流罩圆弧半径与轴流风机半径比值 $>1/3$ 时,风量不再发生改变。

在不增加风机功率的情况下,增加导流板可增强空气的流动^[33-34],并减少气流在经钝体后的绕流^[35-36]。通过在弯道处设置导流板将风道隔开,可有效控制流体在弯道处的离心现象与涡流的产生,改善风道出口处的流速与均匀性;导流板数量越多,效果越好,改变导流板间的相对位置及曲率半径,对风道内的流场也会产生影响^[37]。在螺旋式速冻机中将出流和回流隔开(见图1),可使冷冻区的部分空气流速增加50%,再增加导流板,可使冷冻区平均风速提高2.5~2.7倍;相应地,冻结时间缩短至78%~85%,能效和生产率提高了18%~28%^[22]。但同时采用多种导流方式,产生的边际效益会逐渐减小,

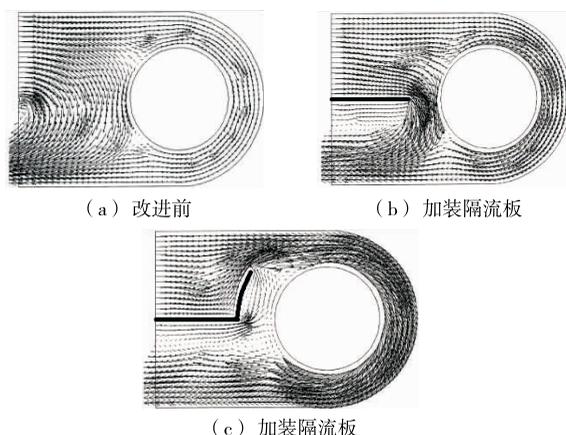


图1 侧送侧回螺旋速冻装置流场^[29]
Figure 1 The flow field of spiral quick freezing equipment

因此在增加导流设备时还应考虑制造成本与生产周期^[38]。

3.2 从隔断速冻设备内外流体的角度

除了优化速冻机内部流场,还可以通过降低速冻机的冷负荷来达到降低能耗的目的。在实际生产过程中,速冻设备的进出料口始终处于敞开状态,导致设备内外的冷空气在开口处进行热质交换^[39],造成设备内的冷空气溢出,周围工作环境变差,影响工人的身体健康;外界热空气侵入内部,使系统冷负荷增加,且湿度较大的热空气进入设备后容易造成蒸发器结霜,使换热效率变差。开口处的热质交换主要由温度梯度引起的热压差、风机产生的气流流动形成的风压、传送带与食品运动带动气流形成的风压3部分构成^[40]。尹从绪^[41]通过能量平衡方程分析速冻机内部温度与料口跑冷的关系;毛利等^[42]通过使用 NH_4Cl 白色烟雾对单螺旋速冻机进行料口跑冷的可视化试验,验证了热压在热质交换中起主导作用,冷空气从下部进料口流出,热空气在上部出料口流入。

黄建昌等^[43]分析得出,在热压的作用下,装置内外温差越大,料口之间高度差越大,上部料口热空气侵入和下部料口冷空气外泄的速度越快。经初步计算,双料口处于不同高度情况下,料口形成的冷负荷约占总制冷量的20%,超过围护结构传热量。吕静等^[44]在进、出料口增加隔板形成两个通道(图2),使热压与风压进行抵消可以让进、出料口的风速减小为原来的1/3,根据冷量的损失与料口风速呈正比可以大致推算出,改进后的冷量损失仅为原先的1/3,并运用Phoenics软件对速冻机进行模拟,得出在进、出料口附近各放一个隔板为最佳布置方法,且找出了最佳的放置距离。

通过模拟^[45]发现,在冻结区与料口之间加设遮流板还可以有效减小料口处的进出气流速度,且遮流板后方区域的气流速度基本为零。由于热压压差导致的冷风流

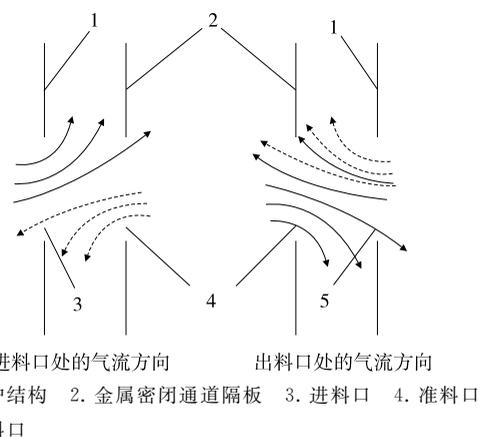


图2 加装隔流板后的气流方向^[44]
Figure 2 Airflow direction after installing the baffle

出是跑冷的最直接原因,而内外压差形成的进风是被动的,因此对出风料口进行遮流处理效果优于对进风料口的处理。陆蓓蕾等^[46]通过定义不均匀系数 k_u (速度的方差和速度的算数平均值的比值)与温度不均匀系数 k_t (温度的方差和温度算术平均值的比值)来评价气流组织的均匀性,并通过 k_u 、 k_t 来判断遮流板的最佳位置。

综上所述,在设计速冻装置时,可以通过在风机的入口与出口增加锥形口,在直角处增加弧形板等措施来消除涡流,增加流场的均匀程度,提高平均流速;也可以在流场中增加导流板,在未增加风机功率的前提下使冻结区域流速增加;此外,还可以通过增加挡板减少机器内外的空气交换,降低设备的冷负荷,但目前的研究还不能对挡板设置的数量和位置给出明确的建议。

4 结论与展望

冻结时间是衡量速冻设备的重要标准,为了缩短冻结时间就需提高换热效率,需提供更低的温度与更大的风速。仅增加风速会导致气流的不均匀度增加,通过调整风机的位置改变整体流场的走向可以使流场更均匀。为了获得更大的风速仅增加风机转速会起到相反的作用,使风机效率降低;增加导流板分割气流并消除涡流、风机安装锥形入口等方式均可在不增加能耗甚至减小风机功耗的情况下达到改善流场的效果。在实际生产中料口跑冷是设备冷负荷的一个重要原因,通过增加挡板降低料口风速可以有效地减少冷量流失。

后续速冻机流场的优化研究可进一步关注:对于预冷段气流温度与速度的优化;气流经过冻品形成的扰流与冻品尺寸的关系,寻求更合理的冻品摆放间隔;导流板形状与弧度改变后对气流速度的影响;通过隔板将出流与回流分割,以减小不同方向气流间的干扰;减少速冻机的跑冷情况。中国的速冻设备虽然发展很快,但与世界先进水平相比依然有较大的差距,如中国产速冻装置结构复杂、效率低、冻品损耗大等,仍需进一步改进和提升,同时考虑效果与实际生产的成本和可行性。

参考文献

- [1] JAMES C, PURNELL G, JAMES S J. A critical review of dehydro freezing of fruits and vegetables[J]. Food & Bioprocess Technology, 2014, 7(5): 1 219-1 234.
- [2] TANSEY F, GORMLEY R, BUTLER F. The effect of freezing compared with chilling on selected physico-chemical and sensory properties of sous vide cooked carrots[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2010, 11(1): 137-145.
- [3] ZHAO Hong-xia, LIU Sheng, TIAN Chang-qing, et al. An overview of current status of cold chain in China[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88(27): 483-495.
- [4] 申志远, 刘斌, 杨瑞丽, 等. 西兰花速冻过程温度分布的数值模拟研究[J]. 食品科技, 2014, 39(5): 52-55.
- [5] MARAZANI 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(3): 754-760.
- [6] HECHT S S, KENNEY P M J, WANG Ming-yao, et al. Benzyl isothiocyanate: An effective inhibitor of polycyclic aromatic hydrocarbon tumorigenesis in A/J mouse lung[J]. Cancer Lett, 2002, 187(32): 87-94.
- [7] 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.
- [8] BULUT M, BAYER Ö, KIRTIL E, et al. Effect of freezing rate and storage on the texture and quality parameters of strawberry and green bean frozen in home type freezer[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 88(34): 360-369.
- [9] DIMA J B, SANTOS M V, BARON P J, et al. Experimental study and numerical modeling of the freezing process of marine products[J]. Food and Bioprocess Processing, 2014, 92(37): 54-66.
- [10] LUAN Lan-lan, WANG Li-ping, WU Tian-tian. A study of ice crystal development in hairtail samples during different freezing processes by cryosectioning versus cryosubstitution method[J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 87(23): 39-46.
- [11] 舒志涛, 谢晶, 杨大章. 喷嘴结构对冲击式速冻设备性能优化研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(6): 187-191.
- [12] SALYADORI V O, MASCHERONI R H. Analysis of impingement freezers performance[J]. Journal of Food Engineering, 2002, 54(2): 133-140.
- [13] 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 and Fluid Science, 2016, 77(29): 124-131.
- [14] KAALE L D, EIKEVIK T M, RUSTAD T, et al. Superchilling of food: A review[J]. Journal of Food Engineering, 2011, 107(35): 141-146.
- [15] DOMINGUEZ M, ELVIRAC, FUSTER C. Influence of air velocity and temperature on the two-stage cooling of perishable large-sized products[J]. Bulletin de L'institut International du Froid, 1975, 22(4): 83-90.
- [16] LAWALD U, ABUBAKARA A, ALHARBIM B, et al. A numerical study of steady and unsteady flow and heat transfer from a confined slot jet impinging on a constant heat flux wall[J]. Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2014, 6(2): 1-17.
- [17] ERDOGDU F, SARKAR A, SINGH R P. Mathematical modeling of air-impingement cooling of finite slab shaped objects and effect of spatial variation of heat transfer coefficient[J]. Journal of Food Engineering, 2005, 71(15): 287-294.
- [18] 万金庆, 岳占凯, 厉建国, 等. 马铃薯泥鼓风冷冻数值模拟与实验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 298-304.

- [19] 李保国. 食品冷冻过程的试验研究与数值模拟[C]//第四届全国食品冷藏链大会暨 2002 全国气调冷库技术研讨会论文集. 西安: 中国制冷学会, 2002: 6.
- [20] ERDOGDU F, FERRUA M, SINGH K S, et al. Air-impingement cooling of boiled eggs: Analysis of flow visualization and heat transfer[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(17): 920-928.
- [21] DARIUSZ G, KLUZA F. Heat transfer coefficient in impingement fluidization freezing of vegetables and its prediction[J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(4): 871-879.
- [22] HUAN Zhong-jie. Performance evaluation indexes for quick-freezers[J]. International Journal of Refrigeration, 2003, 26(7): 817-822.
- [23] 赖威娜. 交通运载工具用液氮速冻机提高液氮利用率的设计研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2017: 31-40.
- [24] 牛新朝. -60 °C 低温速冻柜内流场及温度场模拟分析与实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2015: 22-28.
- [25] 徐斌, 胡振武, 王志远, 等. 板带式速冻机内部通道流场的数值模拟[J]. 制冷学报, 2004(1): 55-59.
- [26] 祁艳会. 速冻隧道流场模拟及隧道的优化设计[D]. 郑州: 郑州大学, 2017: 62-80.
- [27] LACERDA V T, MELO C, BARBOSAIR J, et al. Measurements of the air flow field in the freezer compartment of a top-mount no-frost refrigerator: The effect of temperature[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(5): 774-783.
- [28] 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, 3(6): 45-50.
- [29] 朱必佳, 孙宇. 自堆积式螺旋速冻机流场数值模拟[J]. 包装与食品机械, 2017, 35(5): 37-42.
- [30] 赵文锋, 杨洲. 微型冷库货物降温特性的 CFD 数值模拟[J]. 中国科技, 2015, 10(5): 546-551.
- [31] ODEY M. Meat carton blast chilling/freezing cabinet performance improvements [C]//Proceedings IIR-IRHACE 2006 Conference. Madrid: Atlantis Press, 2006: 118-124.
- [32] 李堃. CO₂冷风机结构参数研究与优化[D]. 天津: 天津商业大学, 2018: 49-53.
- [33] CHENG Qiong-yi, LI Hao, RONG Li, et al. Using CFD to assess the influence of ceiling deflector design on airflow distribution in hen house with tunnel ventilation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 151(29): 165-174.
- [34] WU Tao, GE Zhi-hua, YANG Li-jun, et al. Flow deflectors to release the negative defect of natural wind on large scale dry cooling tower[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128(26): 248-269.
- [35] RAINA A, HARMAIN G A, HAQ M I U. Numerical investigation of flow around a 3D bluff body using deflector plate[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 131/132: 701-711.
- [36] KIM J J, KIM J J, LEE S J. Substantial drag reduction of a tractor-trailer vehicle using gap fairings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2017, 171(25): 93-100.
- [37] 梁亚星, 陶乐仁, 郑志皋. 新型流态化食品速冻机内风道流场的数值模拟[J]. 食品与机械, 2005, 21(2): 37-40.
- [38] 张翔, 韩佳伟, 杨信廷, 等. 不同构造冷藏车厢体的冷却性能模拟与对比[J]. 制冷学报, 2018, 39(2): 89-98.
- [39] 张亮. 隧道式速冻装置风场均衡性研究[C]//第七届中国冷冻冷藏新技术新设备研讨会论文集. 天津: 中国制冷空调工业协会, 2015: 5.
- [40] 郭振华. 螺旋式快速冻结装置进出口热质交换的研究[D]. 天津: 天津商学院, 2002: 3.
- [41] 尹从绪. 遮流板对螺旋式速冻装置料口热质交换的节能研究[C]//中国制冷学会第十七次团体会员大会暨第五届全国食品冷藏链大会论文集. 长沙: 中国制冷学会, 2004: 5.
- [42] 毛力, 郇中杰. 螺旋式速冻机料口跑冷的可视化实验研究[J]. 制冷与空调: 四川, 2004(1): 24-26.
- [43] 黄建昌, 何绍书. 螺旋式速冻机料口跑冷机理分析[J]. 低温工程, 2003(2): 36-40.
- [44] 吕静, 郇中杰, 何绍书, 等. 单螺旋吹风式速冻装置料口改进的实验研究[J]. 制冷学报, 2004(3): 33-36.
- [45] 毛力, 黄建昌, 何绍书. 螺旋式速冻装置料口气流组织的研究[J]. 低温工程, 2004(2): 30-35.
- [46] 陆蓓蕾, 陈瑞球, 黄建昌. 低温流场气流组织的数值分析[J]. 流体机械, 2006, 3(10): 84-86.

(上接第 154 页)

- [45] BREEUWER P, LARDEAU A, PETERZ M, et al. Desiccation and heat tolerance of *Enterobacter sakazakii* [J]. Journal of Applied Microbiology, 2003, 95(5): 967-973.
- [46] IVERSEN C, LANE M, FORSYTHE S J. The growth profile, thermotolerance and biofilm formation of *Enterobacter sakazakii*, grown in infant formula milk[J]. Letters in Applied Microbiology, 2010, 38(5): 378-382.
- [47] RIEDEL K, LEHNER A. Identification of proteins involved in osmotic stress response in *Enterobacter sakazakii* by proteomics[J]. Proteomics, 2007, 7(8): 1 217-1 231.
- [48] OGRODZKI P, FORSYTHE S. Capsular profiling of the *Cronobacter* genus and the association of specific *Cronobacter sakazakii* and *C. malonaticus* capsule types with neonatal meningitis and necrotizing enterocolitis[J]. BMC Genomics, 2015, 16(1): 1-15.
- [49] 陈启明. 克罗诺杆菌免疫学和分子生物学检测方法研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016: 1.
- [50] 刘秀梅, 裴晓燕, 郭云昌. 中国安徽阜阳劣质婴儿配方粉中阪崎肠杆菌的污染[J]. 中国食品卫生杂志, 2005, 17(1): 10-12.
- [51] RAMSEY M M, KORGAONKAR A K, WHITELEY M. Quorum-sensing in bacteria[J]. Encyclopedia of Microbiology, 2009, 55(2): 357-374.