

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.02.002

流态化速冻装置布风板实验研究

陈殿宇, 刘宝林*, 宋晓燕, 莫凡, 杜杰

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:针对目前流态化速冻装置在速冻过程中速度分布和压力分布不均匀导致食品流化状态与冻结效果不佳等缺点,课题组从布风板孔隙形状(正方形、三角形和圆形)、孔隙率和孔隙分布3个角度出发,设计出16种布风板,以提高装置对不同种类食品的适应性要求,提高装置能效比从而达到节能的目的。文中研究设计的布风板可改善流态化速冻装置在冻结过程中的流化程度与冻结效果,同时不同孔隙形状的设计也满足食品颗粒形状的多样性需求。

关键词:流态化;布风板;孔隙形状;孔隙率;孔隙分布

中图分类号:TS205.7

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2020)02-0008-05

Experimental Study on Air Distribution Plate in Fluidized Quick-Freezing Device

CHEN Dianyu, LIU Baolin*, SONG Xiaoyan, MO Fan, DU Jie

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In view of the disadvantages of the fluidized quick-freezing device, such as the poor fluidization state and freezing effect of food caused by the uneven distribution of velocity and pressure in the freezing process, sixteen kinds of air distribution plate were designed based on the pore shape (square, triangle and circle), porosity and pore distribution of the plate to improve the equipment adaptability to different kinds of food and the energy efficiency ratio of the device so as to achieve the purpose of energy saving. The designed air distribution plate can improve the fluidization effect and freezing effect of the fluidized quick-freezing device in freezing process. Meanwhile, the design of different pore shapes can also meet the diverse requirements of food particle shapes.

Keywords: fluidization; air distribution plate; pore configuration; porosity; pore distribution

冷冻技术是目前食品保藏的重要技术之一^[1]。根据不同食品的理化性质与冻结要求,食品的冻结方法及装置多种多样,分类方式不尽相同。按照冷却介质与食品接触方式可分为:直接接触法、间接接触法和空气冻结法。直接接触法主要包括:液氮冻结装置、液态CO₂冻结装置等;间接冻结法主要包括:平板冻结装置、回转式冻结装置等;空气冻结法主要包括:隧道式冻结装置、螺旋式冻结装置和流态化冻结装置等^[2]。多种形式的冻结装置满足了食品冷冻工业的

基本需求。为了提高食品冷冻工业的发展,相应的冷冻方法及冷冻装置也要不断更新升级^[3]。以往学者分别从冻结装置的选择,装置运行参数的控制,冻结装置效率和能耗比等做出详尽的研究^[4-8]。对于颗粒状食品的冻结,流态化速冻装置是最合适的选择,它具有多种优点:冻结速度快、食品干耗少、可实现单体速冻、易于实现机械化和自动化连续生产^[9]。但是目前该应用的推广尚未成熟,首先是能耗较高,过多的成本投入使企业的利润空间降低;其次在速冻过程中,实现真

收稿日期:2019-08-15;修回日期:2019-12-16

基金项目:国家重点研发计划重点专项:食品绿色节能制造关键技术及装备开发(2017YFD0400404)。

第一作者简介:陈殿宇(1993),男,黑龙江双鸭山人,硕士研究生,主要研究方向为食品冷冻冷藏。通信作者:刘宝林(1968),男,山东滨州人,博士,教授,博士生导师,现任上海理工大学医疗器械与食品学院院长,上海市东方学者特聘教授,教育部新世纪优秀人才支持计划,主要研究方向为食品冷冻冷藏、低温生物医学工程、生物样本的低温保存及冷冻干燥。E-mail: dianxiao0@163.com

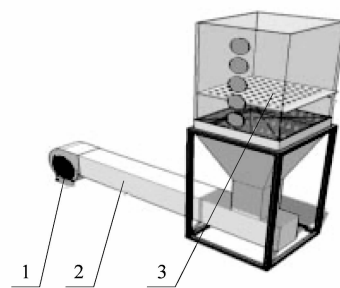
正意义上的流态化一直是难点。流化床气体分布的均匀性对于流体的流动特性、传热、传质和化学反应都具有重要作用,是影响流化床流化的重要因素^[10]。梁亚星等^[11]对流态化速冻装置风道进行了优化设计,保证风道内气流组织的均匀性。布风板作为流化床的核心部件,其结构影响着流化床的传热传质性能^[12]。因此,课题组针对流态化速冻装置的布风板进行研究,将气流参数和布风板孔隙形状及孔隙率作为变量,设计并优化布风板孔槽的分布;比较不同形式的孔槽及其排布对流态化速冻效果的影响,以期提高冷量利用率,缩短食品速冻周期,达到整套设备节能的目的。

1 实验设备与方法

1.1 实验台搭建

如图1所示,本实验设计的流态化速冻装置流化系统主要由离心风机1、风道2和布风板3组成。流化床床体是一个横截面为400 mm×400 mm,深度为600 mm的长方体。床体内侧装有卡槽,方便拆装不同

类型的布风板。为方便后期冷冻实验时,探测食品颗粒温度变化,在床体一侧设置5个直径为100 mm、间距为35 mm的孔,用于安装红外透视镜。



1—离心风机;2—风道;3—布风板。

图1 实验装置示意

Figure 1 3D model of experimental device

1.2 材料与仪器

实验所用新鲜青豌豆产自云南曲靖地区,选取直径在6~7 mm剥荚的豆粒进行实验。青豆的参数见表1。

表1 青豆的物性参数

Table 1 Physical properties of beans

食品冻前比热容 $c_1/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	食品冻后比热容 $c_2/$ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	食品冻前导热系数 $k_1/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	食品冻后导热系数 $k_2/$ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	食品冻前密度 $\rho_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	食品冻后密度 $\rho_2/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	食品堆积密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
3 530	1 770	0.51	1.66	1 200	1 115	750
静态时的床高 h/mm	食品静态时的空隙率 ε_0	食品含水质量分数 $W/\%$	食品开始冻结温度 $T_i/^\circ\text{C}$	食品结束冻结温度 $T_e/^\circ\text{C}$	食品初温 $T_0/^\circ\text{C}$	单体质量 G_p/g
40	0.375	74	-0.1	-18	20	0.63

专业级多功能环境测量仪 Testo 435-4 测量流化床布风板上下的风速及压差。测量仪含有内置式差压探头,量程为0~25 hPa,精度为 ± 0.02 hPa,分辨率为0.01 hPa,工作温度为-20~50℃;配有叶轮风速探头435-4,量程为0.6~40 m/s,精度为 ± 0.2 m/s 测量值,操作温度为0~60℃。探头位置如图2所示。

2 实验方法

2.1 探究布风板孔隙率对压降的影响

布风板的孔隙形状、孔隙率和排布方式对布风板压降都有影响。现以孔隙直径为6 mm的圆孔,孔隙率分别为25%,30%,32%,35%,37%,40%和45%的布风板,讨论不同风速时布风板的压降。调节电动机频率(10~50 Hz),使风以0~6 m/s的速度吹向物料,风速值以流化床入口处的表面平均速度为准,记录1.2,2.4,3.6,4.8和6.0 m/s时的压降值。分别进行3次实验,并对实验数据校核后取并均值,用Excel对数据进行处理。孔隙率为25%的布风板如图3所示。

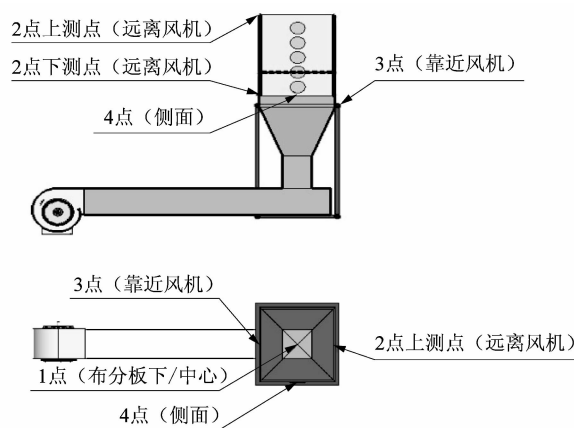


图2 实验装置实体图

Figure 2 Experimental device

2.2 探究布风板孔隙形状对压降的影响

采用孔隙率相同(孔隙率均为35%),孔隙形状分别为直径2,4和6 mm的圆孔;边长4和6 mm的正方形以及边长 $6\sqrt{3}$ mm三角形的布风板来探究孔隙形状

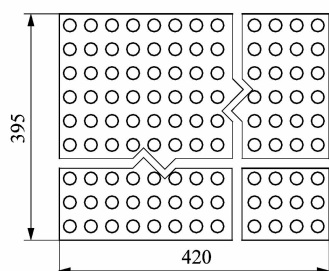


图3 孔隙率为25%的布风板

Figure 3 Air distribution plates with 25% porosity 对布风板压降的影响^[13]。如图4所示为不同形状的布风板,分别置于流化床内。表2展示了布风板具体的孔隙形状。调节电动机频率(10~50 Hz),使风以0~6 m/s的速度吹向物料,风速值以流化床入口处的表面平均速度为准,记录1.2,2.4,3.6,4.8和6.0 m/s时的压降值。分别进行3次实验,并对实验数据校核后取并均值,用Excel对数据进行处理。

表2 布风板孔隙形状

Table 2 Pore shape of air distribution plates

编号	孔隙形状	孔隙尺寸/mm	排布方式
1	圆形	直径 $d=2$	顺排
2	圆形	直径 $d=4$	顺排
3	正方形	边长 4	顺排
4	正方形	边长 6	顺排
5	等边三角形	边长 10.39	顺排
6	等边三角形	边长 10.39	叉排
7	正方形	边长 6	叉排
8	圆形	直径 $d=4$	叉排
9	圆形	直径 $d=6$	叉排

3 实验结果和分析

3.1 布风板孔隙率对压降的影响

将测点2,测点3,测点4得到的压降变化取平均值,得到整个食品层的平均压降变化,如图5所示。

大量固体颗粒(果蔬)悬浮于运动的流体中,此时不同压力降的各个阶段^{[2]170}如图6所示。图中曲线I为正常流化时的压降曲线;曲线II为流态化时产生流沟而得到的不稳定情况。B点的气流速度 u_k 为临界流化速度, Δp 为床层压力降。

临界流化速度

$$u_k = 1.25 + 1.95 \lg G_p。$$

正常操作速度

$$u = 2.25 + 1.95 \lg G_p。$$

床层压力降

$$\Delta p = H_0(1 - \varepsilon_0)(\rho_s - \rho_f)g。$$

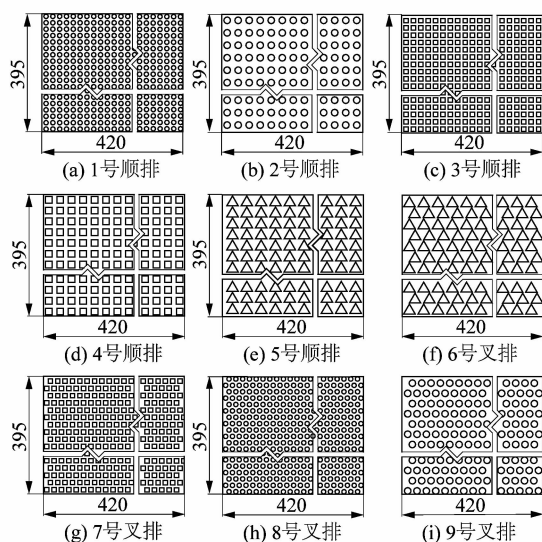


图4 孔隙率相同,孔隙形状不同的布风板

Figure 4 Air distribution plates with same porosity and different pore shapes

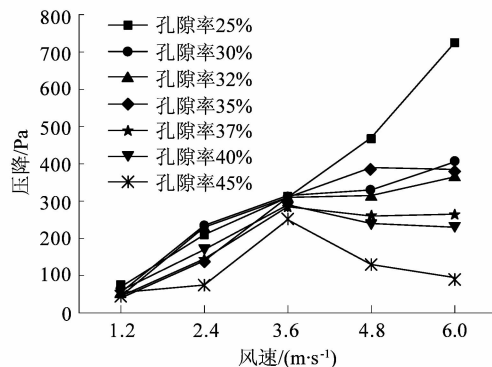


图5 孔隙率不同的布风板压降变化线

Figure 5 Pressure drop curve of air distribution plates with different porosity

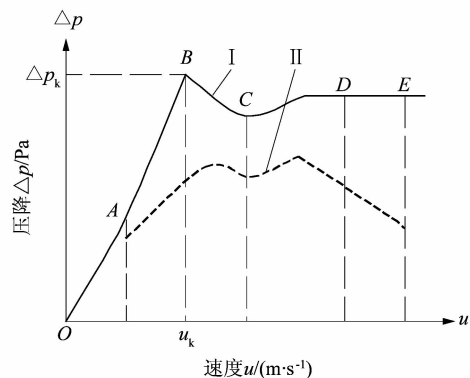


图6 气流速度与床层压力降的关系

Figure 6 Relationship between airflow velocity and bed pressure drop

式中: G_p 为冻品单体的质量, g ; H_0 为食品层的静态高度, N/m^2 ; ε_0 为食品颗粒床层的空隙率, $\varepsilon_0 = 1 - (\rho_b / \rho_s)$; ρ_b 为颗粒的堆积密度, kg/m^3 ; ρ_s 为颗粒自身密度, kg/m^3 ; ρ_f 为空气的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 。

1) 孔隙率为 25% 时

由图 5 中 25% 的曲线可看出压降随着气流速度增大而增大, 类似于图 6 中的 OA 段, 说明固定床有所松动, 但食品颗粒并不能进入流化床阶段。

2) 孔隙率为 30% ~ 37% 时

由图 5 中的 4 条曲线的走势类似于图 6 的 CDE 段, 可判断食品颗粒可以进入稳定的流化床阶段; 气流速度增大到一定程度后, 压降几乎保持不变。此阶段气体向上作用的总压力(压降与流化床截面面积的乘积)与食品层颗粒的总重力相平衡。此时尽管床层孔隙率持续增大, 但因食品颗粒的重力不变, 压降因而保持恒定。

3) 孔隙率为 40% 时

气流速度达到临界流化速度后, 压降开始有所下降(类似于图 6 中的 BC 段), 此时颗粒被上升气流托住, 床层开始流态化。压降降低的主要原因是由于床层膨胀, 食品层孔隙率增加, 因此气流的表观速度虽然增大, 但通过食品层之间的气流真实速度并未增加, 甚至略有减少。此阶段流化床内极不稳定, 容易发生不良流化现象。

4) 孔隙率为 45% 时

流速经过临界流化速度后, 压降下降明显, 此时流化床内部已经发生了极不稳定的流化情况, 类似于图 6 中的曲线 II。此阶段多种不良流化情况均可能存在。例如床层中出现“沟流”, 使得气流直接通过“沟流”流出, 导致压降降低; 又或者出现了夹带现象, 床内颗粒不断被气流带走, 平衡颗粒重力的压力不断下降。因此, 对于速冻新鲜青豌豆颗粒, 流化床布风板最佳的孔隙率范围是 30% ~ 37%。

3.2 布风板孔隙形状对压降的影响

将测点 2, 测点 3, 测点 4 得到的压降变化取平均值, 得到整个食品层的平均压降变化如图 7 所示。

分析 1 号, 2 号和 9 号的压降曲线可知, 进入稳定流态化后, 9 号布风板上下压差值大; 而孔径非常小的 1 号和 2 号布风板出现了不良流化的现象。这是因为气流在通过小孔径的布风板时, 风压损失会比通过大孔径时更多。分析 2 号和 8 号的压降曲线可知, 当孔隙形状为圆形时, 顺排的风压变化更稳定, 这是因为顺

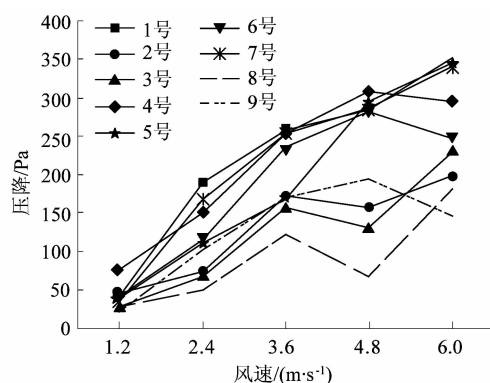


图 7 孔隙形状不同的布风板压降变化线
Figure 7 Pressure drop curve of air distribution plates with different pore shapes

排时布风板边缘处的开孔更均匀, 进风更均匀。

观察 3 号和 4 号的压降曲线可知, 当孔隙形状为正方形时, 孔径越大的布风板进入稳定流态化后, 压降值的范围会大于孔径小的布风板, 这一点与圆形孔隙时的结论一致。观察 4 号和 7 号的压降曲线可知, 孔隙形状为正方形时, 顺排与叉排的压降曲线相差不大, 顺排的压降变化更稳定, 此处的结论与孔形为圆形时相同。观察布风板孔隙分布情况可以发现, 压降的变化主要取决于布风板边缘处的开孔情况。当边缘处孔隙分布均匀时, 进风更加均匀。

观察 5 号和 6 号的压降曲线可知, 当孔隙形状为三角形时, 孔隙叉排的布风板流化情况优于孔隙顺排的布风板, 颗粒进入稳定流化床后, 压降趋势也比较稳定。但无论顺排还是叉排, 压降曲线均不如孔隙为正方形孔和圆孔理想。

比较直径为 4 mm 圆形孔的布风板(2 号)和边长为 4 mm 的正方形孔隙的布风板(3 号), 可以发现圆形孔的布风板流化情况更稳定一些, 这与孔隙形状有关。当气流通过正方形孔隙时, 正方形的四角与正方形的中心区域, 进风速度略有差异, 这也是影响最终流态化效果的一个因素。

4 结论

当孔隙率 < 30% 时, 青豆处于固定床微微松动的状态, 布风板开孔直径越小, 压降越大, 越容易达到稳定^[14]; 当孔隙率处于 30% ~ 37% 之间时, 流化可以进入稳定的状态, 压降恒定; 孔隙率逐渐增加到 > 40% 后, 流化极不稳定, 易发生不良流化现象。相同孔隙率的情况下, 圆形孔隙的流化情况优于正方形孔隙, 正方形孔隙优于三角形孔隙。相同孔隙率不同孔形的条件下, 顺排与叉排的流化情况难以得到概括性结论, 但可

以通过观察布风板边缘处的孔隙分布,凡边缘处孔隙分布均匀时,则进风均匀,流化效果更好;当流化床进入稳定流态化阶段后,孔径越大的布风板压降值越大。孔径极小的布风板会出现不良流化的现象,原因是气流在通过布风板时已经损失过多风压。在整个流态化速冻过程中,风速和布风板设计是影响冷冻效果的关键因素。课题组以青豌豆为例,得出了直径在6~7 mm球状食品较适宜的操作条件;但在实际生产中,块状、条状食品颗粒的流化程度远远大于球形颗粒,容易出现堆积和互锁的现象,其较适宜的操作条件等待进一步验证。在未来的研究中可以通过更改已有操作参数,总结出规律,再加以实验证明。此外,在实验过程中发现气流组织均匀性有待加强,其原因在于风道设计存在缺陷,因此,对于该装置风道的改善,进一步加强气流组织的均匀性,减少气流阻力损失是下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] 赵金红,胡锐,刘冰,等.几种冷冻新技术对食品冻结过程中冰晶形成的影响[J].食品与机械,2012,28(6):241-244.
- [2] 华泽钊,李云飞,刘宝林.食品冷冻冷藏原理与设备[M].上海:机械工业出版社,1999:164-170.
- [3] 孙向阳,侯丽芬,隋继学,等.我国速冻食品产业发展现状及趋势[J].农业机械,2012(21):69-72.
- [4] 郑晓峰.流态化速冻装置的性能优化探讨[C]//中国制冷学会冷藏冻结专业委员会学术年会.天津:中国制冷协会,2006:193-196.
- [5] HELDMAN D B, LUND D B, SABLIOV C. Handbook of food engineering[M]. 3rd ed. [S. L.]: CRC Press, 2018.
- [6] CLELAND A C, OZILGEN S. Thermal design calculations for food freezing equipment: past, present and future[J]. International Journal of Refrigeration, 1998, 21(5):359-371.
- [7] 刘贵庆,陶乐仁,郑志皋.基于VB的液氮喷雾流态化速冻机监控系统设计[J].自动化与仪表,2004,19(5):51-53.
- [8] 季汉琴.流态化冻结装置风量调节的设计[J].科技创新与应用, 2014(16):103.
- [9] 杨倩玉,宋晓燕,刘宝林.食品流态化速冻技术研究进展[J].轻工机械,2018,36(6):101-105.
- [10] 朱沈瑾.布风板结构对煤气化流化床流动特性的影响研究[D].杭州:浙江工业大学,2015:5.
- [11] 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].机械与设计,2005(2):37-40.
- [12] 王战辉,李瑞瑞.布风板开孔形式对流化床内部流场的影响[J].内燃机与配件,2018(1):208-210.
- [13] 李少华,张锐,车德勇.流化床布风板结构对流场影响的数值模拟研究[J].东北电力大学学报,2014(5):39-42.
- [14] 王战辉,李瑞瑞.布风板对流化床内部流场的影响[J].内燃机与配件,2018(2):37-39.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

西门子助推中国化工企业加速数字化转型

西门子在今天于南京举办的“2020 西门子化工行业客户日”上全面展示了其针对化工行业数字化转型的产品和解决方案,帮助化工企业在提质、降本、增效和寻求绿色发展之路上寻求新的可能性。

西门子数字化咨询团队基于丰富的技术专业性和化工行业的经验形成了数字化标准和咨询方法,依据统一思想、对标基准、梳理需求、可行分析和定义路径的“五步走”战略,帮助客户量身定制可落地的数字化转型实施路线图。

在本次客户日上,西门子展示了流程行业首个完全基于 Web 接入的控制系统 SIMATIC PCS neo,其开放而灵活的架构集成了独立于设备供应商和工艺的 MTP(模块类型包)标准,可以支持客户实现模块化生产,在推进流程行业朝向模块化发展方面迈出了重要一步。此外,通过 SIMATIC PCS neo 首创的 SAL(信号抽象层),DCS 系统编程组态可与系统硬件成套并行进行,使自动化系统的灵活性和效率得到大幅提升。

通过数字化网络管理平台来整合网络中的各个设备,共同构建统一的立体化的工业通讯网络防线。SINEC NMS 作为西门子最新的网络设备管理软件,能够 24 小时全方位对整个工控网络进行诊断、分析和处理,同时能够统一查看并设置设备的安全选项,根据需要随时显示工厂整个网络系统的状态。SINEC NMS 可以整合包括 I/O 设备在内的网络中的所有组件,并构建立体的信息安全网络,从而为企业解决在数字化转型过程中面临的信息安全风险。

西门子还展示了包括阀门状态监测、设备预测性分析、报警管理与优化、控制回路性能分析、DCS 全生命周期管理等在内的多个针对流程行业特定场景开发的 APP。这些 APP 可以灵活部署在 MindSphere 之上,充分挖掘工业数据价值,优化企业生产和设备运维。

本次活动以“数字化企业——思考流程工业未来”为主题,聚焦中国化工行业数字化转型过程中的痛点和难点,与合作伙伴深入探讨打造数字化企业加快数字化转型步伐的方法。

(梁秀璟)