

[综述·专论]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.06.020

食品流态化速冻技术研究进展

杨倩玉, 宋晓燕, 刘宝林

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:随着现阶段冷链产业的逐渐完善,作为最具潜力的速冻技术之一的流态化冷冻也越来越受到人们的重视。流态化冷冻易于实现单体速冻和连续化生产,冻品营养成分保存好的优势十分明显,而不足之处在于能耗大、运行成本高。笔者着重介绍了流态化冷冻发展过程中技术上的若干改进方案,包括预冷技术、节能技术以及冷冻过程的仿真手段。预冷技术和节能技术的更新升级将会在提升食品冻藏品质的同时减少能耗。由于流态化速冻过程受到的影响因素较多,仿真手段的应用可以更加省时省力地得到不同食品颗粒最佳的冷冻工艺参数。

关键词:食品冷冻;流态化;布风板;单体速冻;预冷技术

中图分类号:TS205.7

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2018)06-0096-05

Advances in Research on Fluidized Quick Freezing of Food

YANG Qianyu, SONG Xiaoyan, LIU Baolin

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

Abstract: With the improvement of the cold-chain industry currently, fluidized quick freezing, as one of the most promising quick-freezing technologies, has received increasing attention from people. Advantages of fluidized freezing are obvious that includes individually quick freezing, continuous production, and well preserving the nutritional content of the frozen product. And the disadvantages are high energy consumption and high operating costs. This paper focuses on several technical improvements of fluidized freezing bed, including pre-cooling technology, energy-saving technology, and simulation methods for the freezing process. The update of pre-cooling technology and energy-saving technology will reduce energy consumption while improving the quality of frozen food. Moreover, fluidized quick freezing process is affected by many factors. Simulation can get the best parameters in the freezing process for different food particle with more time-saving and labor-saving.

Keywords: food freezing; fluidization; air distributor; individual quick freezing; pre-cooling technology

速冻蔬菜加工在我国已经有40余年的历史,随着现阶段冷链产业的逐渐完善,人们对于速冻食品的需求也在增加,速冻工艺也越来越受到关注。速冻方法分为以空气冻结、低温液体冻结为代表的直接接触冻结方法和平板式冻结装置为代表的间接接触冻结方法。其中,直接接触冻结中的流态化冻结技术应用日趋广泛。

流态化速冻也是目前实现食品快速冻结(individually quick freezing, IQF)的一种理想方法,特别适用于颗粒状食品。它利用传送带的振动或自下而上吹动的冷风,使食品颗粒呈现出类似“沸腾”的状

态,确保冻结物品间互不粘连。与板式冻结等相比,流态化冻结大大提高了冻结质量和效率。

流态化速冻还具有冻结速度快、冻结产品质量好及干耗少等优点,尤其对于果蔬类单体食品效果更佳,能最大限度地保持食品原有的营养成分和新鲜状态。大部分食品中心温度从 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降至 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,近80%的水分可冻结成冰,这个温度区间称为最大冰晶体生成带^[1]。新鲜果蔬因含有大量的水分,在冻结过程中更容易受到冰晶的损伤^[2]。张庆钢等^[3]对比了蓝莓在流态化速冻和 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱慢冻2种冻结方式下的感官品质的变化规律,结果表明:流态化冷冻属于单体

收稿日期:2018-06-18;修回日期:2018-09-07

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:杨倩玉(1993),女,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向为食品冷冻冷藏。E-mail: yangqianyu19931228@163.com

快速冻结,细胞通过最大冰结晶生成带的时间最短,不利于细胞内水分向外迁移,冰结晶颗粒体积小,对细胞的破坏较小,能够保持水果原有的营养成分和风味。

即使流态化冷冻在冻结果蔬方面有诸多优势,但是目前仍然没有像其他冷冻方式那么普及。影响流态化冷冻装置普及应用的主要障碍有:①冷冻过程成本。以往的冷冻流化床主要是与液氮低温制冷相结合。郭旭峰等^[4]对比了浸渍式、喷淋式和冷风循环式3种不同的液氮冻结装置耗氮量和冻结能力。尽管流化床冷冻属于冷风循环式,相同冷冻能力下耗用的液氮量小于另外2种,但是考虑到液氮10元/L的价格,目前流态化冷冻只适合加工单品价值高的食品。②能耗大。由于流态化冷冻过程中要求冷却介质的风速大、风量均匀,温度低,导致即使是机械式的制冷系统耗电也很大。目前我国生产的流态化速冻机多为振动流化装置,是指在送冷风的同时,辅助以机械振动,使食品在布有孔隙的食品传送带上按一定振幅和频率呈跳跃式抛物线型向前运动,造成食品层沸腾而成流态化。

1 预冷手段

流态化冷冻过程中,在气流的作用下食品颗粒之间会有一定的碰撞和摩擦,造成机械损伤,这就要求食品颗粒在冷冻之前先经过预冷,增加其机械强度,也避免粘连^[5]。最常见的预冷手段是液氮浸没式技术。常压下液态氮的温度为 $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$,作为无毒性的冷冻剂,可直接与被冷冻的食品所有表面紧密接触。预冷阶段,食品颗粒先在液氮中浸没,而后食品表面形成了冰膜,既锁定了食品中的水分,又增加了食品颗粒的机械强度。预冷后的食品颗粒再进入流化床中冷冻^[6]。但传统的液氮浸渍超速冻方法易使食品产生低温断裂问题,因此根据不同的食品类型,可设定所需的浸没时间。考虑到液氮的成本问题,为了精准地控制液氮的使用量,后逐渐使用液氮喷淋式代替液氮浸没式^[7]。

除此之外,在流态化与液氮冷冻技术结合方面,也有一些设备使用液氮喷雾蒸发系统直接取代流态化装置中原有的机械式制冷装置,使得占地面积更小。液氮喷雾蒸发系统是指液氮蒸发后的低温氮气通过风机的作用,从下而上地流过食品颗粒^[8]。通过控制液氮喷雾蒸发量,来改变流化床内的温度。这样不仅可以实现食品部分玻璃化冻结,又不因为温度过低造成食品的低温断裂,最大限度地保持了食品原有的新鲜状态和营养成分,提高冷冻食品的品质^[9]。虽然这样的液氮流态化冷冻设备结构简单,但液氮的成本较高,是普通空气冻结成本的2倍,到目前为止,只适用于生产

一些高附加值的产品。

2 流化床的主体技术

在以往的研究中,国内外学者分别从送风参数、风机调控、食品传送方式、冻结分段、在线控制以及整体结构优化等方面开展了很多节能技术研究。

2.1 调频技术与风量调节

为了适应不同食品颗粒的冷冻加工工艺要求,流态化速冻装置多采用变频器控制风机电机和输送电机来节约能耗^{[10]29}。GRUDA等^[11]发现采用液氮制冷和流态化技术结合时,风机消耗的功率占整个装机功率的绝大部分,其他机械装置只占总功率的3%,因此采用变频器十分必要。

郑志皋等^[12]对冷风温度在计算机控制、温控仪二位控制和温控仪AI人工智能控制这3种不同温控方式进行比对试验,结果发现AI人工智能控制温度,效果最好,温度分布均匀,上下波动小,温度偏差约为 $\pm 1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

传统的流态化设备一般为2段式,第1段在网带上进行预冻结,使食物表面冻结,增加机械强度。第2段为深度冻结,此时的气流速度略低于第1段,冷风的温度更低。两段式的结构传动装置较多,装置制造成本和使用、维护难度都很高。四方冷链公司的季汉琴^[13]对设备中的风量调节进行了新的设计,设备采用的是一段式冻结,占地面积更小。不同于以往的风机调频技术,而是采用手柄控制风门开度,如图1所示。同样的风量,风门开度越小,相应风压就越大,其流化操作速度就越高。还可以通过风门的开闭控制风量的集中程度。

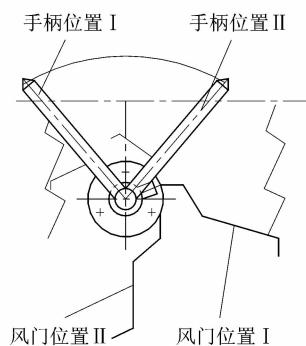


图1 风量控制手柄

Figure 1 Air flow control handle

2.2 改良风道

在食品流态化冻结过程中常出现沟流现象、粘结现象和夹带现象等不正常的流态化现象。气流速度、压力降和气流组织的均匀性是造成这些不良流化现象

的关键因素。因此合理地设计风道和气流进风方式就显得十分重要。

刘贵庆等^{[10]29}研制出了以液氮为冷源的液氮喷雾式流态化速冻机,其风道如图2所示。在此基础上,梁亚星等^[14]又利用圆弧弯管和2个导流板将风道改进成如图3所示的新型风道,导流板和壁面把弯道处分割成3个风道,有效地控制了流体在拐弯处的离心作用,同时有效地减小了涡流现象。并用模型计算证明了改进后的风道流场分布和出口处的风速分布都更加均匀。

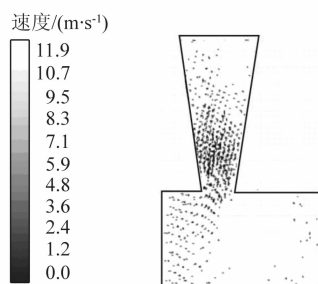


图2 液氮喷雾式流态化速冻机的风道速度矢量图

Figure 2 Airflow velocity vector of liquid nitrogen spraying fluidized quick-freezing machine

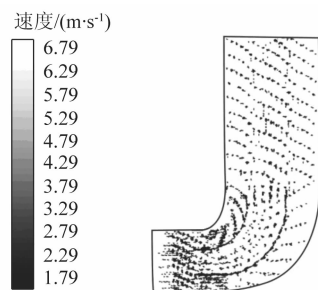


图3 改进后的风道速度矢量图

Figure 3 Improved airflow velocity vector

杜英芬^[15]在其他设备不变的基础之上,将2个离心风机(2个风机用一台电机控制)分置在风箱两侧,如图4所示。两侧的风机同时进风向设备中间吹,取代原有的一个轴流风机直吹。改进风机布置后,食品颗粒的悬浮效果明显优于之前。

2.3 布风板

布风板是流化床的重要组成部分,起到支撑静态物料,使食品颗粒换热均匀的作用。布风板上送风孔槽的结构和排布会直接影响到流化床内部气固两相的混合和固体颗粒冷冻过程的快慢。然而,目前关于流化床布风板结构和新种类开发的研究还相对较少,需要借鉴流态化干燥和流态化燃烧方面的研究成果。

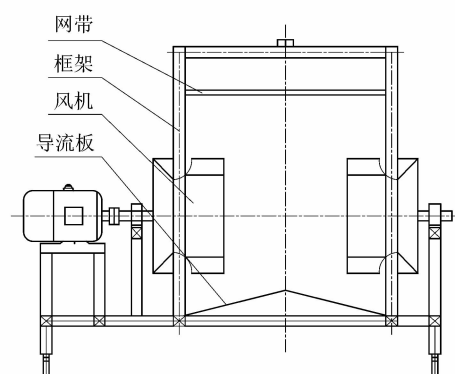


图4 更换风机后的设备布置

Figure 4 Equipment layout after replacing fans

2016年天津科技大学的李占勇等^[16]在研究流化床干燥时,曾经针对D类颗粒设计了一种狭缝型分布板。D类颗粒是指平均粒度在0.6 mm以上的颗粒,由于粒径较大,临界流化速度也较大,难以流化,而流态化冷冻方面的食品颗粒均属于D类颗粒。结果表明狭缝型分布板比传统多孔分布板的床层膨胀率提高了约5%,最小流化速率降低约8%,并且床内颗粒比较分散,壁面区域以及四周角落的颗粒也可以得到很好的流化,如图5所示。这主要是因为狭缝型布风板的V型气流通道结构限制了气流向四周扩散,因而形成气流喷射,高速气流向上运动并带动床内固体颗粒实现流化。而在多孔分布板流化床内,气流通过圆孔后,向四周扩散,造成速度下降。

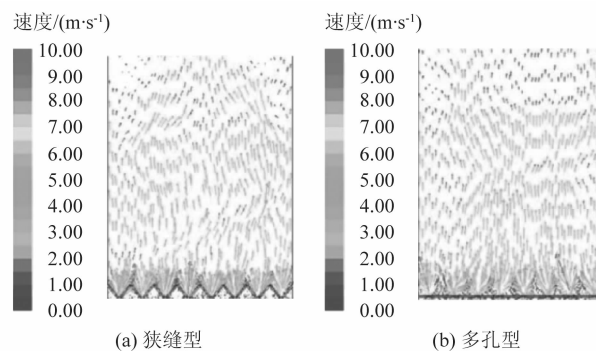


图5 气体速度矢量分布

Figure 5 Airflow speed vector

王战辉等^[17]在探究孔隙分布方式对流化床内部流场影响时,利用FLUENT软件研究对比了不同开孔形式的布风板的压力和速度分布。结果发现2种孔隙分布方式都是在中心点处压降最大,远离中心点后,压降趋于稳定状态,形成等压室,而孔隙呈三角形分布的布风板流化床压降比正方形分布的流化床压降要小,能耗降低,节省成本。魏新利等^[18]也发现类似结论,

认为布风板圆心处开孔对于出口速度影响较大,所以应该避免在中心处开孔。用时发现,孔隙排列方式相同时,开孔直径越小,流场越容易达到稳定。

目前,在平面式的布风板设计上,布风板形状、孔隙率大小、孔隙形状及排布方式对于流态化均匀性的影响尚未有概括性的结论,未来仍然有很大的研究空间。

3 模拟手段

为了确保冻结食品的品质,在探究某一冻结食品的最佳流态化操作参数时,纯实验手段是最简单直接的一种方法。这种方法主要是依靠改变不同的实验条件,用热电偶探头跟踪食品的中心温度变化。波兰学者 Go'ral^[19]在用喷射冲击的方法研究流态化冷冻过程时,用热导硅胶在胡萝卜片上粘结热流传感器,使用 K 型热电偶测量环境温度和样品表面的温度,进而得到降温速率。如果热电偶测量得到的产品表面温度不准确或样品表面温度不均匀,则会干扰实验结果。

影响流态化冷冻的因素众多,比如颗粒的热性质(比热容和热导率),颗粒特性(密度,颗粒尺寸),流体的热性质,流体的流速以及流体与颗粒之间的温差等^[20]。纯实验手段需要做大量的重复性实验,才能归纳出某一参数对于冷冻效果影响的概括性结论。此时数值模拟软件省时省力的优点就凸显出来了,越来越多的学者倾向于利用模拟软件来研究流态化问题。冷冻过程中食品颗粒的运动轨迹、食品内部的相变以及冷空气和颗粒换热时的流态都使得模拟实验十分复杂。

食品流态化冻结过程中,颗粒状、片状及块状等食品与冷气流之间的流动过程属于气固两相流体的流动过程。整个冷冻过程,冷却气流与食品颗粒紧密接触,同时食品颗粒与冷冻气体之间存在着速度差异,会产生非常高的传热系数。热交换过程中的导热(食品颗粒之间的导热,食品颗粒与流化床壁面之间的导热)、对流(冷空气与食品颗粒间的对流换热)和少部分的辐射换热均会产生传热系数。通常情况下,辐射传递的热量在低温下可以忽略不计。流态化冷冻过程也是一种两相流动问题,目前应用最多的就是欧拉-拉格朗日方法和欧拉-欧拉法。

欧拉-拉格朗日方法是指流体相被处理为连续相,直接求解 Navier-Stokes 方程,而离散相是通过计算流场中大量的粒子,气泡或是液滴的运动得到的,离散相和流体相之间可以有动量、质量和能量的交换。李晓光等^[21]借助数值模拟手段,将气相当作连续介质,颗粒相作为离散相,通过提取不同操作条件下大颗粒流化床内颗粒受力的瞬间信息,分析影响颗粒在做无

规则运动时的主要因素。颗粒运动时会受到自身重力、气体对颗粒的曳力和碰撞力的同时作用,当流化床进入充分流化状态时,颗粒的无规则运动主要来自于颗粒之间的碰撞力。这种方法的计算成本很大,因为需要跟踪每个颗粒的运动来描述颗粒相流。

欧拉-欧拉方法(也称为双流体模型)着眼于空间的点,基本思想是将颗粒看成拟流体,把气相和固相看成是相互穿插且不可压缩的两个连续相的流动^[22]。欧拉-欧拉法模型运算成本比欧拉-拉格朗日方法小一些,但仍然需要求解 2 组 Navier-Stokes 方程组(每个相对应一组方程,以计算其速度场)和一个附加的运输方程来追踪分散相的体积分数。陆慧林等^[23]在研究垂直管内的气固两相流的模拟计算时,采用的是双流体模型,颗粒相湍流模型采用的是颗粒动力学中的颗粒脉动动能模型(KTGF),气体湍流动能采用的是 SGC 模型。

此外,模拟与实际实验通常会存在一些差异,Vollmari 等^[24]在比较不同尺寸、不同形状的 D 型颗粒(如图 6 所示)在流化床中的压降、颗粒高度和角度取向时,发现对于非球形的颗粒更容易积聚在流化床的角落,而堆积在角落的颗粒的具体数量在模拟和实际实验之间略有不同,导致压降也有所差异。立方体和圆柱体这类颗粒因为容易出现聚集、互锁的现象,所以冷空气以很低的风速就会使流化床内部形成通道。这些通道导致压降变小,此时并非所有颗粒都处于悬浮状态,而在模拟中却无法描述此行为。未来如果在 DEM 代码中添入颗粒间静摩擦的分析,可以缩小模拟与实际实验之间的差异。模拟时常常忽略的一些力,如升力、Magnus 力和 Basset 力,也是使模拟和实验结果存在差异的主要因素。在未来的模拟计算中,这些都是需要继续完善的地方。

表 1 13 种不同形状的 D 型颗粒

Table 1 13 different shapes of D-type particles

名称	图形	当量尺寸/mm	名称	图形	当量尺寸/mm
球形		7	立方体		5
球形		5	立方体		7
理想圆柱		7	方形平板		5
细长圆柱		7	方形平板		7
细长长方体		5	细长板		5
细长长方体		7	细长板		7
细长长方体		5			

4 结语

目前流态化应用面窄的主要原因是采用液氮制冷时,液氮的成本导致初期的流态化冷冻只适合冻结一些附加值高的产品。而采用机械式制冷系统时,风机电机所占的能耗比例较大,因此变频调控、风道设计、布风板改造成为了研究重点。通过仿真模拟的手段来研究流态化冷冻过程可以大大地缩小人力、物力,但当模拟结果与实际实验结果差距较大时,仍需要进一步分析。

参考文献:

- [1] KHADATKAR R M, KUMAR S, PATTANAYAK S C. cryofreezing and cryofreezer[J]. Cryogenics, 2004, 44(9): 661-678.
- [2] 任青,包建强,李越华,等. 6种蔬菜在-20℃的冻结特性比较[J]. 广东农业科学, 2014, 41(23): 82.
- [3] 张庆钢,陶乐仁,邓云,等. 蓝莓不同冻结方式下工艺特性及贮藏品质的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(4): 348-351.
- [4] 郭旭峰,陶乐仁,华泽钊,等. 液氮冻结装置中液氮耗量与冷冻能力的分析[J]. 低温与特气, 2002, 20(5): 9-11.
- [5] 顾安忠,邱嘉昌. 论流态化冻结装置设计的先进性[J]. 制冷学报, 1988(3): 2.
- [6] 林文胜,鲁雪生,顾安忠. 食品液氮速冻处理的热力与经济分析[J]. 食品科技, 2003(5): 49.
- [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] 刘宝林,郭勇建,屠建祥. 一种新型的流态化速冻装置[J]. 制冷学报, 2000(4): 49-52.
- [9] GRUDA Z. The combined fluidized bed & LN₂ (Liquid Nitrogen) freezing[J]. International journal of biometeorology, 1999, 45(6): 696.
- [10] 刘贵庆,陶乐仁,郑志皋. 液氮喷雾流态化速冻机的研制[J]. 冷饮与速冻食品工业, 2004, 10(3): 29.
- [11] GRUDA Z. 床高对流化床冻结效率的影响[J]. 制冷学报, 1988, 9(3): 68.
- [12] 郑志皋,陶乐仁,黄理浩. 液氮喷雾流态化速冻机的稳定性研究[J]. 流体机械, 2016, 44(4): 59-63.
- [13] 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.
- [14] 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(2): 37-40.
- [15] 杜英芬,王宗礼,张亮. 流态化速冻装置的节能应用研究[J]. 冷藏技术, 2010(3): 16-20.
- [16] 李占勇,王少铁,王娟,等. 狭缝型分布板流化床提高核桃壳颗粒的流化效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 225-232.
- [17] 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.
- [18] 魏新利,马新辉. 应用FLUENT软件研究流化床中布风板结构[J]. 能源工程, 2006(2): 15-19.
- [19] GORAL D, KLUZA F. Heat transfer coefficient in impingement fluidization freezing of vegetables and its prediction[J]. International journal of refrigeration, 2012, 35(4): 871-879.
- [20] REYES A, VEGA R V, BRUNA R D. Effect of operating conditions in atmospheric freeze drying of carrot particles in a pulsed fluidized bed[J]. Drying technology, 2010, 28(10): 1185-1192.
- [21] 李晓光,徐德龙,范海宏. 大颗粒流化床中颗粒受力的数值模拟[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(7): 836-840.
- [22] 李静海. 颗粒流体复杂系统的多尺度模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 160.
- [23] 陆慧林,赵广播,刘文铁,等. 垂直管内气固两相流数值模拟计算: 颗粒动力学理论方法[J]. 机械工程学报, 1999, 35(5): 75-78.
- [24] VOLLMARI K, JASEVICIUS R, KRUGGEL-EMDEN H. Experimental and numerical study of fluidization and pressure drop of spherical and non-spherical particles in a model scale fluidized bed[J]. Powder technology, 2016, 291: 506-521.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

西门子携手阿里云推出 MindSphere

2018年9月19日,西门子和阿里云就 MindSphere 落地中国内地市场的技术路线图和具体实施计划进一步签订了合作协议,计划于2019年第1季度末面向中国客户发布“MindSphere on Alibaba Cloud”正式(general availability)版本,这是继2018年7月在柏林签署合作备忘录后,双方合作的进一步深化。

西门子基于云的开放式物联网操作系统 MindSphere 连接现实与数字世界,能够提供强大的工业应用和数字化服务以帮助企业获得商业成功。MindSphere on Alibaba Cloud 融合了西门子和阿里云在平台即服务(PaaS)和基础设施即服务(IaaS)方面的实力,拥有强大的连接性、数据分析能力和工业专长,将为中国企业实现数据驱动的全新商业模式提供更广阔的平台。

西门子与阿里云依托双方技术优势和资源实现强强联合, MindSphere on Alibaba Cloud 将帮助中国企业把握工业物联网所带来的机遇,驱动中国工业的快速发展。”

(王 乐,徐 然)