



鱼及肉制品真空冻干技术研究现状

江兆清, 周 然*

(上海海洋大学食品学院, 上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心, 上海 201306)

摘要: 本文对鱼、肉类真空冷冻干燥在国内外的研究及发展的历史和现状进行阐述。主要内容包括真空冷冻干燥理论研究的基本方法, 理论模型研究的主要成果和最新进展; 国内外真空冻干特别是在鱼、肉类冻干方面的理论、技术的发展及应用的历史和现状, 国内外对真空冻干技术的最新研究成果; 本文侧重鱼、肉类真空冻干的阐述, 着重阐明了鱼及肉类应用真空冷冻干燥技术进行贮藏的优势和必要性, 结合生产实践说明真空冻干的效果以及在实际应用中所存在的主要问题, 高能耗所带来的高成本依然制约着鱼、肉类真空冻干技术的迅速发展, 如何降低能耗而得到高质量的产品, 将是鱼及肉类真空冻干技术研究发展的主要方向。

关键词: 鱼肉冷冻干燥; 肉类冷冻干燥; 研究现状; 展望

Current Status of Research on Vacuum Freeze Drying of Fish and Meat Products

JIANG Zhao-qing, ZHOU Ran*

(Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing and Preservation, College of Food Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: This paper reviews the current research status and history of development of vacuum freeze drying technology in and outside of China. This review focuses on the basic methods used in the theoretical research of vacuum freeze drying technology, the recent major achievements and the latest progress of theoretical modeling research, the current application status and the history of theoretical and technological development of vacuum freeze drying for fish and meat products, and the latest research achievements of vacuum freeze drying technology in and outside of China. This review highlights the advantages and necessity of vacuum freeze drying technology in the preservation of fish and meat products, and the effectiveness and the main problems related to its practical applications. Quick development of vacuum freeze drying technologies for fish and meat products remains restricted due to high energy consumption and consequent high cost. Reducing energy consumption and producing high-quality products will be the main trends of development of vacuum freeze drying technologies for fish and meat products.

Key words: fish freeze drying; meat freeze drying; research status; prospect

中图分类号: TS251.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-8123(2012)07-0039-05

食品生物材料例如鱼及肉类材料在干燥过程中会发生一些影响其品质的变化。选择合适的干燥方式, 才能生产出高值鱼及肉制品。现在, 公认的真空冷冻干燥是最好的干燥方法, 相比其他的干燥脱水方法, 真空冻干能加工出的产品是最好的^[1]。

从原理上来说是将冻结到共晶点温度下的湿物料, 在较高的真空环境下, 通过给物料加热, 使冰直接升华, 从而达到干燥的目的。鱼及肉制品冷冻干燥的基本

工艺流程为: 准备处理→预先冻结→真空冷冻干燥→真空密封包装→成品。冻干鱼及肉制品与其他脱水鱼及肉制品相比, 具有很多优点。在真空条件下脱水, 不存在氧化问题, 可以杀死很多细菌; 在冰冻状态下, 微生物反应没法进行, 且不破坏热敏成分, 不流失芳香物质和色泽, 特别适合热敏性物料干燥; 在完整冻结后升华干燥, 保持了稳定的固体框格, 形成疏松多孔结构, 水溶性和复水性好; 析出了原来溶于水的物质, 使物料不发

收稿日期: 2012-05-20

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD38B09); 上海市科委工程中心建设项目(11DZ2280300);

上海市教育委员会重点学科建设项目(J50704); 上海海洋大学优秀青年学科骨干培养计划(海燕计划)

作者简介: 江兆清(1986—), 男, 硕士研究生, 研究方向为食品冻干节能。E-mail: jxhmn168@163.com

*通信作者: 周然(1977—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为食品物流。E-mail: rzhou@shou.edu.cn

生萎缩与表面硬化；真空冻干产品有极低的含水率，一般在5%以下，有利于贮藏，真空包装下常温就可以保存10年^[2]。

1 鱼及肉制品真空冷冻干燥的发展和应

1.1 理论模型的发展

最早描述真空冷冻干燥过程的模型是King提出的“冰面均匀后移”模型^[3]：有一个均匀连续移动的趋于无限薄的升华界面将物料分为干燥区和冻结区，因为界面运动缓慢，比较空间变化率，可以忽略控制方程中任意时刻的时间效应，并且物料的界表面的温度、水蒸气分压都不变化，即可以令过程维持在准稳定状态。很多科学家都研究、继承、发展了这个模型。Dalglish^[4]在其所著作中提到一种准稳条件下的传热和传质，建立起来连续方程、动能量的方程，通过计算得到了降低压力，以及通过升高温度能够大大缩短干燥所需要的时间这一理论。他们通过改变实验条件，运用辐射加热，对各种不同的外形制品的升华干燥过程进行分析研究，运用模型进行描述。de Beer等^[5]提出对于球柱状物品，准稳定状态下，研究了冻干多孔的干燥层内非凝性状的物质以及水蒸气的质量、动量和能量传递问题。应用此种准稳定状态模型，具有结构简易，好求解，容易计算求解证明，应用于升华阶段误差可以控制在很低的范围之内，但是这种模型的局限性是应用于解析阶段或者整个过程存在问题，而且难以简明地给出物料内温度对应时间的变化。

为了优化的冰面均匀后移(URIF模型)，克服其缺点，许多科学家运用非稳定状态模型进行分析，如有学者将非稳定状态模型用于研究无限大平板，实验条件控制在恒定升华温度下，侧重于冻干耦合传质传热的方面，求得了一些分析结果^[6-7]。也有类似研究^[8-9]，给出了很多非稳定状态模型的近似求解方法：利用相似性或是积分方法，但问题是很难清楚地给出结果，以至于在实际中很少应用。

成坚用达西定律和流方程描述了升华之后产出水蒸气的流动情况，求解能量方程时应用了有限差分方法^[10]。而华泽钊等^[11]在以上研究的基础上，通过假设升华温度恒定，运用数值方法对辐射加热和普通冻干加热两种同时混合加热的真空冷冻干燥模型进行了求解。李保国等^[12]在研究中采用的也是有限差分法，但引入了坐标变换，得出的结论是在非稳定状态下的模型的数值解。程江等^[13]提出的是冻干过程中的吸收、升华模型，该理论认为，冰升华和吸附水解析是同时进行的，在此前提下建立起来的冻干过程中传热和不凝性气体与水蒸气两种成分气体扩散的非稳定状态模型，其综合考察了冰升华以

及水汽的蒸发，理论值与实验值符合较好。

美国学者Sugars^[14]提出了一种升华和解析双运动形式界面的模型，即在一定条件下，干燥过程中物料的内部存在着解析和升华干燥两个界面，得出了模拟的近似解，但缺点是模型复杂，不便应用。付西光等^[15]研究了冻干反问题，并且建立了一个非稳态的模型。在给定冻干速率前提下，按照传热传质的反方向问题，采用积分方法，并且给出边界条件，但是所得结果还没有经过实验验证。近几年来，出现了很多数量关于干燥过程的数学模型模拟和分析的论文，例如：现阶段在干燥领域运用的主要数学模型以及分析的方法有：平衡分析颗粒群方法；有限元分析方法；中心网格模型；应用计算流体力学模型；神经网络模型等^[16-19]。应用计算机运用和开发大型商业软件，例如CFX、FLUENT、F11DAP等软件已经广泛地运用到了不同干燥过程模型中，明显提高了很多结果的准确性。

现在，很多新技术应用到鱼及肉制品冻干领域，许多新的模型应运而生。例如，微波冻干方面，Nastaj等^[20]学者研究了在微波加热条件下的冷冻干燥，提出了一种完整描述一次和二次干燥的模型，并且用数值的方法给出了模型较为精确的解，通过模型模拟得出了冻干曲线，并且与实验结果吻合的很好。学者王建楠等^[21]在与传统冻干对比的基础上，从传热传质方面、加热的机理和热惯性性以及系统的结构还有冻干工艺等许多的方面对微波冻干的节能优势进行了分析。微波冻干和微波加热的机理是自身生热，而正是此机理使其具有热自动平衡的特性，因此热惯性小，并且还有冻干过程中热、质传递同向的特点，并且微波冻干工艺可减少冻干系统的能耗。有些研究者研究了喷雾技术与冻干技术相结合条件下的冻干，发展了喷雾冷冻干燥技术。Liapis和Bruttini^[22]为了研究此种干燥条件在盘装和瓶装颗粒物料的一次干燥和解析干燥阶段的传热和传质的原理，推荐了一种喷雾冷冻干燥的数学模型。Saha等^[23]运用的实验材料是芒果，通过研究提出了一种数学模型来描绘真空冻干在运行参数对于一次干燥阶段的非稳定干燥速率的影响，模型结果与实验结果很好吻合，并且应用于在具有相似结构的鱼及肉制品的干燥速率、干燥层温度以及干燥时间的估计方面具有很大的潜力。Jin等^[24]对平板状鱼及肉制品产品的多维冻干进行了研究，所运用的方法是数字模拟，包括热值传递和冰的升华，还有升华界面的运动。左建国等^[25]运用先进的冻干显微镜对二元水溶液真空冷冻干燥过程中升华界面的临界温度进行了研究，测量指标是溶液的共晶熔融温度以及冻结浓缩溶液的最大玻璃化转变温度，采用差示扫描量热法(DSC)。结果表明，对于降温时发生共晶的溶液，临界温度是共晶熔融温度，高于此温度样品将发生融化；而对于在降低温度时发生玻璃化



转变的溶液,其临界温度是塌陷的温度,高于此温度样品将发生塌陷。例如对于以下几种样品,分别是质量分数5%的蔗糖、10%葡萄糖、10%麦芽糖、10%聚乙烯吡咯烷酮(PVP)二元水溶液,微塌陷温度与塌陷温度这两个指标的差值在2℃以内,微塌陷温度比玻璃化转变温度平均高出1~3℃。张华等^[26]研究建立了一种应用于冻干机冷阱室的几何模型,在此模型中阐述了内部气流的控制方程还有相应的边界条件,同时划分了有限元网格,于是可以采用数值模拟的方法来分析冷阱室内流场和温度场。对比添加导流板前后的模拟结果,能够看出在加入导流板后,模型流场比不加导流板均匀。所以说,导流板能够改善冷阱室内的运行状况。

总之,研究冻干过程时运用非稳态数学模型的方法主要有:1)求出精确解:此时仅仅局限于少数非常理想化的情形。2)应用积分方法:这只能应用在一维相变的问题,并且得到的结果非常复杂。3)一些其他的近似法:比如摄动法等,但是这种方法只适用在一些比较特殊的相变问题中,结果也不直观。4)有限差分法:此种方法求解的过程比较复杂,但是结果比较直观。5)运用有限元的方法:可以处理结构和边界条件比较复杂的问题。

1.2 鱼及肉制品冷冻干燥技术的应用研究

1.2.1 国外的应用研究状况

鱼及肉制品的冻干技术开始于20世纪30年代,40年代初年英国学者提出了用冷冻干燥方法进行鱼及肉制品处理的技术。到了1961年英国开始了鱼及肉制品冻干的研究,在综合运用了当时各国和本国研究成果的基础上公布了自己新的实验结果,结果充分证明真空冷冻干燥法用于鱼及肉制品是获得优质鱼及肉制品的一种非常有效的方法。到1965年全球范围内已有冻干鱼及肉制品厂50多家。70年代美国有冻干鱼及肉制品生产厂40多家,欧洲各国也差不多是这个数字。产量增加也很快,仅从美国统计,几十年时间里产量有了大幅增长,1985年日本有25家鱼及肉制品冻干公司^[27]。

一直以来,国外冻干技术不断发展。目前,鱼及肉制品的品种之多,已超过所有传统的加工方法,例如罐头加工贮藏方法及其他热干方法贮存制品,某些品种已经近乎完全占有了市场。例如,美国现在销售的快餐鱼及肉制品中冻干品已经占到了40%~50%;欧洲和美国销售的速溶咖啡中冻干品比例也达到了40%~70%。冻干品产量增长很快,冻干鱼及肉制品在民用鱼及肉制品中已确立了稳固的地位,冻干品在很多特别是发达国家中已经达到了相当高甚至是普及的水平^[28]。

1.2.2 国内的应用研究状况

与发达国家相比,我国真空冷冻干燥技术的发展历史较短。20世纪中叶,在1961年才开始引进了真空冷冻

干燥技术,主要用于医药和生物制品的生产。基于战略目的大型城市相继建立了冷冻干燥鱼及肉制品基地。70年代又在上海兴建工业装置,但在当时都是经营困难^[29]。最近10年来,伴随国际上冻干技术的迅速发展特别是我国经济的飞跃,人民生活水平得到了不断提高,于是真空冷冻干燥技术得以在我国也重获生机。目前,已有十几家冻干工厂建成或正在筹建中^[30]。目前在国内从事这方面研究的大专院校有上海海洋大学、华南理工大学、华中理工大学、东北大学、合肥工业大学、上海交通大学、东北农业大学、清华大学等学校。例如,程远霞等^[31]对部分蔬菜生物材料的共晶点进行了测定,在此基础上制定了相应的生产工艺和绘制了相应制品的冻干曲线。何强等^[32]对片状鱼肉制品真空干燥工艺进行了研究,提出了最佳工艺,并且建立了数学模型。江南大学徐艳阳等^[33]测定了几种物料的共晶点和共熔点,采用的方法是差示扫描量热法,得出了不同溶质会对物料共晶点和共熔点产生影响。上海海洋大学纪宝芳等^[34]以鲜牛肉为研究对象,分别对冻干传质控制模型下的干燥时间及速率进行了数学计算和不同工艺条件下的干燥速率进行了实验研究,得出了通过减缓预冻速率,改变升华干燥时物料的放置方式,并保持垂直肌肉纤维方式进行切片等途径来保证在冻干过程中的热湿传递的一致性,从而缩短冻结干燥的时间,达到提高冻干效率,减少能耗的目的。

还有针对果蔬冻干的研究:张晋路等^[35]对食品真空冷冻干燥工艺进行了研究,得到了包括肉类、蔬菜在内的多种食品的真空冷冻干燥特性变化曲线。陈仪男等^[36]应用真空冻干技术加工脱水香蕉片,提出了获得优质冻干香蕉生产的最佳工艺参数。上海海洋大学龚皓等^[37]对猕猴桃果浆的冻干进行了研究,通过三因素均匀试验,以猕猴桃果浆冻干过程中VC含量、含水量、冻干时间为指标,确定了冻干的优化工艺条件。邹同华等^[38]研究了火龙果的真空冷冻干燥工艺,表明以干燥时间和产品质量为前提,火龙果样品切片在厚度为11mm,一次干燥加热温控25℃,二次干燥加热温控为50℃时真空冷冻干燥效果较好,冻干完成后火龙果的含水量为4%。而进行复水实验,冻干品放入60℃的水中,5min左右就可复水成新鲜时的形状。

侧重鱼及肉制品方面:我国是一个鱼、肉类制品消费大国,开展对鱼及肉制品加工技术的研究将有着十分重要的意义。上海海洋大学徐瑛等^[39]对真空冻干鱼及肉制品工艺进行了研究,得出了牛、羊肉和黄颡等不同种类鱼及肉制品冻干工艺上的区别,同时,针对上述分析指出了鱼及肉制品冻干过程中存在的一些技术难点。上海海洋大学郑建珊等^[40]研究了青鱼片顺、逆两种纹理特征和4种冻干速率下不同厚度的青鱼片冻干效率的差异,得出了在加工生产中应选用顺纹理切割、慢冻方式,可以

达到节能降耗的目的,达到较好的冻干效果。李敏等^[41]以罗非鱼背部肌肉为材料,切片不同厚度,以冻干能耗为指标对罗非鱼肌肉在真空冷冻干燥过程,通过调节加热温度和压力进行压力温度组合研究,不同参数的组合对冻干品进行了复水率比较,发现参数变化会对罗非鱼冻干能耗和品质产生影响,为鱼类产品冻干提供了优化的冷冻干燥工艺。结果表明,在相同的干品含水率条件下,过程调温可以缩短冻干过程的解析时间,影响冻干能耗的过程参数主次关系顺序是:厚度>压力和物料中心温度>加热板低温温度>加热板高温温度,并提出了进行优化组合的参数。任炜等^[42]研究了鸡肉的冻干,多孔的冻干鸡肉在贮藏过程中很容易吸湿,从而升高自身水分活度,导致微生物的生长而变质,还研究了冻干鸡肉的吸附等温特性,从而为冻干鸡肉的贮藏提供了理论依据。

2 鱼及肉制品真空冻干技术主要存在的问题

真空冻干的鱼及肉制品仍然存在成本高的问题,尤其在我国鱼及肉制品市场上很难见到真空冻干鱼及肉制品。目前我国真空冻干鱼及肉制品主要还是作为特殊用途的食品。如探险、登山、礼品和保健品、旅游用品等,因其价格昂贵,普通消费者无法承受。要使冻干鱼及肉制品被普通消费者接受,必须从两个方面考虑:一是从消费者方面考虑,生活水平达到一定高度,人们才肯花钱买方便与享受;另一方面是冻干鱼及肉制品厂,必须不断完善其技术,不断降低生产成本,使冻干鱼及肉制品在市场上具有竞争力。从两个途径入手来完善技术:一是冻干设备及工艺的改善,节能降耗是关键;二是冻干原料选择要合理,应使其具有高附加值^[43]。

目前我国真空冻干很不完善,具体表现如下:单一的冻干设备类型,落后的性能,差的工作可靠性,开发制造也比较混乱。目前国内生产的真空冻干机很多都是仿制20世纪70、80年代国外产品,作业方式多是间歇式,冻干室组成是冷热间隔的多层搁板。该种冻干机应用在生物技术和医药领域确实很实用,但用来冻干性质差异很大的鱼及肉制品物料很不合理。国外鱼及肉制品冻干搁板面积至少是几十平方米,有的甚至达到千平方米,作业方式兼有连续式和间歇式。而我国自行生产的冻干机搁板面积很少在10m²以上。因此,许多单位只能是联合几台设备进行生产,造成了成本增加^[44]。

目前研究冻干工艺多集中在小型冻干实验机上,并且绝大多数集中在工艺参数对冻干速率的影响方面。这些工作大多脱离了鱼及肉制品冻干工艺过程的特点,几乎没有对冻干工艺参数之间的关系进行分析。其研究结果无法为鱼及肉制品冻干厂制定鱼及肉制品冻干工艺,更不能为冻干机生产厂家在冻干设备工程设计过程作参考。

在制定冻干工艺时注意冻干原料的特点很关键:对于具有细胞结构的鱼及肉制品,该类制品在冻干时应特别注意冻干速率及冻结控制温度。有研究证明,慢冻易使细胞壁破裂,汁液外溢,造成冻干产品品质降低,而鱼、肉类都是细胞结构;二是具有芳香气味的物料,应该尽量保留其风味不被破坏,目前很多研究表明,慢冻有利于保留风味物质。

真空冷冻干燥理论包括:研究冻干物料预冻、冻干过程的热质传递理论;冻干介质的非稳态温度场和流动模型理论研究;水在预冻和冻干过程中的相变理论研究。目前,这几种理论还没有深入的研究,尤其是后几种理论研究成果还相当欠缺^[45]。

3 结 语

目前,在国际市场上冻干鱼及肉制品已达到相当高的比例,而且国内市场也已经出现,发展是非常迅速的。冻干鱼及肉制品是一种高附加值产品。在目前国际市场上,冻干鱼及肉制品的价格高出速冻鱼及肉制品7~8倍,是热风干燥鱼及肉制品的4~6倍,经济效益很可观。但是鱼及肉制品的冻干过程电耗大、效率低。通过预冻结阶段冻结速率的改变,冰晶结构的改善,纤维方向的改变,冰晶分布的改变等方式协同冻结阶段和干燥阶段介质内部水分的湿扩散途径,有利于非饱和含湿多孔介质冻干速率的提高,冻干工艺改进,制品的应用领域扩大以及合理化冻干工艺和冻干装备的评价标准,具有较高的学术价值和重要的研究意义,这些将会成为冻干应用研究的热点内容。

参考文献:

- [1] BMLEY M D, HENRIST M, RABECKI F. The use of freeze dried fruit and vegetable juice crystals[J]. Food Engineering International, 2003, 14(6): 13-14.
- [2] GOLDBLITH S A, REY L, ROTHMAYR W W. Freezing drying and advanced foods technology[M]. London: Academic Press, 2005: 123-125.
- [3] SANDAL O C, WILKE C R, KING C R. The relationship between transport properties and rates of freeze drying of poultrymeat[J]. AIChE Journal, 1997, 13(3): 428-434.
- [4] DALGLEISH J M. Freeze drying for the food industry[M]. London: Academic Press, 2001: 108-135.
- [5] de BEER T R, ALLESφ M, GEOTHALS F, et al. Implementation of a process analytical technology system in a freeze drying process using Raman spectroscopy for in Line process monitoring[J]. Analytical Chemistry, 2007, 79(21): 7992-8003.
- [6] 赵鹤泉, 林秀诚. 冷冻干燥技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004: 212-214.
- [7] 迟大鹏, 黄翔. 食品真空冷冻干燥设备的原理与应用[J]. 冷藏技术, 2004, 10(2): 5-8.



- [8] 姚爱如, 刘静初. 真空冷冻干燥过程中传热传质分析[J]. 华中科技大学学报, 2009, 9(2): 10-21
- [9] 倪静安, 张墨英. 鱼及肉制品真空冷冻干燥技术进展[J]. 冷饮与速冻鱼及肉制品工业, 2010, 3(4): 35-37.
- [10] 成坚, 马赫. 食品冻干燥速率的强化措施[J]. 食品与机械, 2009, 9(1): 20-22.
- [11] 华泽钊, 李云飞, 刘宝林. 食品冷冻冷藏原理与设备[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 100-105.
- [12] 李保国, 华泽钊, 刘占杰. 鲜花真空冷冻干燥实验研究[J]. 制冷学报, 2003, 3(3): 54-58.
- [13] 程江, 涂伟萍. 辐射传热冷冻干燥速率的简洁估算[J]. 化学工业与工程, 2002, 5(1): 36-37.
- [14] SUGARS Y. Structural models related to transport properties for the layer of food materials undergoing freeze drying[J]. *Drying Technology*, 2005, 19(2): 281-296.
- [15] 付西光, 刘成林. 鱼及肉制品真空冷冻干燥研究[J]. 江苏理工大学学报, 2010, 11(4): 19-21.
- [16] TANBUNAN A H, KISDIYANI Y. Freeze drying characteristics of medicinal herbs[J]. *Drying Technology*, 2004, 19(2): 325-331.
- [17] CARAPEUE A, HENRIST M, RABECKI F. A study of vacuum freeze drying of frozen wet papers[J]. *Drying Technology*, 2003, 19(6): 1113-1124.
- [18] 汪喜波. 不同操作条件对食品真空冷冻干燥过程的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2000.
- [19] 左建国, 华泽钊, 周国燕, 等. 冻干溶液的低温显微研究与热分析[J]. 工程物理学报, 2006, 27(2): 307-309.
- [20] NASTAJ J F, WITKIEWICZ K. Mathematical modeling of the primary and secondary vacuum freeze drying of random solids at microwave heating[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(21/22): 4796-4806.
- [21] 王建楠, 左晓佳, 李丽芬. 微波冻干节能探析[J]. 江苏农业科学, 2010, 8(4): 112-114.
- [22] LIAPIS A I, BRUTTINI R. A mathematical model for the spray freeze drying process: the drying of frozen particles in trays and in vials on trays[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 11(2): 100-111.
- [23] CHAKRABORTY R, SAHA A K, BHATTACHARYA P. Modeling and simulation of parametric sensitivity in primary freeze-drying of foodstuffs[J]. *Separation and Purification Technology*, 2006, 5(2): 258-263.
- [24] JIN H N, CHI S S. Numerical simulation of conjugate heat and mass transfer multi-dimensional freeze drying of slab-shaped food products[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50(23/24): 4891-4900.
- [25] 左建国, 李维仲, 翁林崇. 冷冻干燥升华界面的临界温度实验[J]. 农业机械学报, 2010, 21(10): 56-59.
- [26] 张华, 方金杰. 鱼及肉制品冻干机冷室内气流组织数值模拟及节能优化研究[J]. 流体机械, 2009, 7(10): 78-81.
- [27] 李志平. 真空冷冻干燥技术分析研究及应用[J]. 四川食品与发酵, 2005, 12(3): 51-54.
- [28] 童建民, 徐光. 鱼及肉制品真空冷冻干燥机加热系统[J]. 真空与低温, 2004, 7(1): 121-124.
- [29] 赵怡红, 左银虎. 真空冷冻干燥技术在鱼及肉制品加工中的应用和研究综述[J]. 常州工程职业技术学院学报, 2007, 6(3): 33-37.
- [30] 徐言生, 罗瑞明. 大型鱼及肉制品真空冻干设备系统设计与研究[J]. 真空科学与技术学报, 2008, 2(4): 35-48.
- [31] 程远霞, 王国华, 刘兴利. 冻干蔬菜预处理的研究[J]. 淮海工学院学报, 2003, 9(1): 55-57.
- [32] 何强, 谭敏, 姚开. 冻干青鱼片的研究[J]. 食品科技, 2002, 2(5): 26-27.
- [33] 徐艳阳, 陶乐仁. 真空冷冻干燥毛竹笋的实验研究[J]. 食品工业科技, 2005, 3(2): 28-42.
- [34] 纪宝芳, 陈天及. 提高鱼及肉制品冷冻干燥工艺效率途径的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2008.
- [35] 张晋路, 张俊杰, 吴立业. 食品冻干过程参数的优化选择[J]. 江苏食品与发酵, 2001, 12(4): 14-19.
- [36] 陈仪男, 杨学敏. 冻干香蕉预处理条件优化研究[J]. 漳州职业技术学院学报, 2006, 8(1): 22-25.
- [37] 龚皓, 万金庆. 猕猴桃果浆冻干工艺研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 4(1): 123-127.
- [38] 邹同华, 陈见兴, 易小红, 等. 真空冷冻干燥技术在火龙果冻干中的应用[J]. 食品研究与开发, 2009, 2(5): 46-49.
- [39] 徐瑛, 谢堃, 陈天及. 冷冻干燥工艺及模型研究[J]. 食品工业科技, 2008, 7(6): 78-81.
- [40] 郑建珊, 谢堃, 陈天及. 提高青鱼片冻干工艺效率的研究[J]. 湖南农业科学, 2010, 2(2): 121-123.
- [41] 李敏, 左建国. 过程温度调节对罗非鱼冻干能耗及复水率的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 8(1): 156-159.
- [42] 任炜, 段续. 冻干鸡肉的吸附等温特性研究[J]. 食品研究与开发, 2010, 9(8): 212-215.
- [43] 李保国, 周伟伟. 方便鱼及肉制品冷冻干燥[J]. 干燥技术与设备, 2005, 3(4): 179-184.
- [44] 鲍明慧, 刘大林. 冻干技术极其在鱼及肉制品加工中的应用[J]. 化工装备技术, 2007, 16(4): 75-79.
- [45] 刘占杰, 王红卫. 鱼及肉制品冷冻干燥过程中的玻璃化作用[J]. 制冷技术, 2007, 31(8): 8-12.