干燥技术在果蔬中的应用综述*

丁俊雄　吴小华　王鹏　杨绪飞
（北京石油化工学院机械工程学院，深水油气管线关键技术与装备北京市重点实验室）

摘　要　果蔬的干燥加工能延长果蔬储存期、减小果蔬体积，便于运输。本文对当前市场上常见果蔬（红枣、柠檬、芒果、菠萝蜜、香蕉）的不同干燥工艺和技术进行了文献调研，对常用果蔬干燥技术在干燥模型、最优干燥工艺以及干燥产品质量等方面进行了分析。发现热泵干燥是一种节约能源、环境友好并且适用于常见果蔬干燥的技术，值得关注和推广应用。

关键词　果蔬；干燥技术；干燥模型；热泵干燥

Overview of the application of drying technology in fruits and vegetables

Ding Junxiong　Wu Xiaohua　Wang Peng　Yang Xufei
(School of Mechanical Engineering，Beijing Key Laboratory of Pipeline Critical Technology and Equipment for Deepwater Oil & Gas Development，Beijing Institute of Petrochemical Technology，Beijing)

ABSTRACT　The drying process of fruits and vegetables can prolong the storage period and reduce their volume for transportation. In this paper，different drying processes and techniques of common fruits and vegetables (red dates，lemons，mangoes，jackfruits，bananas) on the market have been summarized; drying model，drying process，and drying quality have been analyzed. It is found that heat pump drying is a technology that is energy-saving，environmentally friendly. Therefore it is suitable for drying common fruits and vegetables，and is worthy of attention and popularization.

KEY WORDS　fruit and vegetable；drying technology；drying model ；heat pump drying

1　果蔬干燥技术简介

我国是农业大国，农产品种类繁多，果品总面积和总产量居世界第一。《2018中国年鉴统计》显示，我国2017年水果总产量高达25 241.9万吨，其中瓜果类、梨等品类产量全球占比已超过64%[1]。但由于新鲜果蔬存在保质期短，容易腐烂且不易运输等原因，每年因保存不当造成大量的浪费。干燥是一种在一定条件下去除果蔬内的大部分水分，抑制果蔬中微生物的生长，延长果蔬储存时间的方法[2]。早期的干燥是对果蔬进行自然干燥，自然干燥是指运用自然（风能或太阳能等）的能源对农产品进行干燥，其生产过程中能耗较低，但生产效率和产品质量较差，且受限于气候和季节条件。随着工业革命的发展，人工干燥技术发展的特别迅速，人工干燥是指在人工控制的条件下对食品进行干燥，不受气候限制，干燥时间短，产品质量好。目前果蔬人工干燥主要采用的干燥技术有热泵干燥技术、热风干燥技术、真空冷冻干燥技术、微波干燥技术以及红外干燥技术等，如表1所示。

表1　常用果蔬干燥技术

干燥技术	优点	缺点
热泵干燥	环保节约能源	产品易发生形变
热风干燥（电加热）	操作简单生产能力大	耗时长，产品质量一般
真空冷冻干燥	干燥品质好	不易操作
微波干燥	均匀加热，干燥速度快	干燥成本高
红外干燥	高效，品质好	穿透能力受限

2　果蔬干燥实例分析

常见的干燥加工果蔬种类主要包括仁果类、核果类、坚果类、浆果类、柑橘类、热带及亚热带果

---

*国家重点研发计划（2018YFD0700200）
收稿日期：2019-05-10
作者简介：丁俊雄，硕士在读，研究方向为能源高效利用。

类和什果类等。

表 2 果蔬干制加工品

种类	主要品种
仁果类	苹果、梨、海棠、沙果、山楂、木瓜等
核果类	桃子、李子、杏子、梅、樱桃等
坚果类	栗子、核桃、榛子、开心果、银杏、香榧等
浆果类	葡萄、醋栗、树莓、猕猴桃、草莓、石榴等
柑橘类	柑、橘、橙、柚、柠檬等
热带及亚热带果类	香蕉、菠萝蜜、芒果、凤梨、龙眼、荔枝、杨梅、椰子等
什果类	枣、柿子、无花果等

表 2 中介绍了常见果蔬干制品的种类，其中，红枣、柠檬、芒果、菠萝蜜和香蕉是目前市场上最常见的干燥水果。下文以红枣、柠檬、芒果、菠萝蜜和香蕉为例进行干燥特性、干燥品质等方面的分析。

2.1 红枣干燥

红枣中含水率较高，不耐贮藏，如果储存不当，发生霉烂、失水、发酵等会导致极大浪费，造成经济损失。将新鲜红枣干燥加工使其含水率从 70%左右降低到 25%左右，可延长储存期减少红枣的浪费。近年来，国内学者对红枣干燥进行了大量研究，主要研究了不同干燥方式对干燥速率、产品品质等影响。

木合塔尔·米吉提等[3]使用红枣作为试验对象，以红枣的含水率、香气及色泽为评价指标，采用热风干燥技术，研究温度、湿度和排密等因素对红枣干燥品质的影响。结果表明，温度对红枣干燥速率的影响相比其他两个因素更大，风速主要影响香气，排密主要影响干燥过程中红枣的外观。

李超新等[4]对红枣进行了红外辐射干燥研究，结果表明，红枣红外辐射干燥适合 Page 干燥模型，该干燥模型能更好的预测红外干燥过程中红枣水分的变化。

刘小丹等[5]使用红枣作为试验对象，以红枣干燥速率、表面温度和内部温度为参数，在热风分段干燥和微波干燥的基础上，采用微波加高低温热风联合干燥等 6 种不同的干燥方式进行了试验研究，结果表明，微波加高低温热风联合干燥的方式比分段式热风干燥缩短将近 11%的干燥时间。

杨先亮等[6]用热泵对红枣进行干燥，通过对其干燥速率、干燥能耗以及干燥过程中含水率变化的分析，发现热泵干燥在干燥品质和节能方面上效果显著。

张艳[7]使用小型热泵对红枣进行干燥研究，以干燥热效率、能耗以及经济性等方面作为参数，对比分析了热风干燥与热泵干燥。结果表明，热泵干燥的热效率是热风干燥的 3 倍；有效热值是热风干燥的 5 倍；维护费用和使用年限均优于热风干燥。

上述文献表明主要用于红枣干燥的技术有热泵干燥、热风干燥、红外辐射干燥、微波联合干燥等。温度、风速和湿度是影响红枣干燥的重要因素。同时，Page 模型能够很好的适用于红枣红外干燥。试验和理论计算数据都表明，利用热泵对红枣进行干燥可节约能源，提高运行经济性，具有广阔的发展前景。

2.2 柠檬干燥

柠檬是继柑、橙之后的第三大柑橘类水果，因不易保存、流通损失大，目前主要以鲜果销售为主。通过将柠檬干燥加工成片再进行食用，可延长柠檬保存时间，减少柠檬的浪费。

王蓉蓉等[8]以厚度为 3 mm 的柠檬片作为试验对象，采用热风干燥技术，研究干燥风温对柠檬片干燥特性的影响。发现随着干燥风温的增大，干燥速率加快，干燥时间缩短；水分有效扩散系数随着物料含水率的减小而增大；70 ℃是较适合干燥柠檬片的温度，该温度下干燥处理后的柠檬片在外观和口感方面均较佳。

章斌等[9]采用真空冷冻干燥技术，以柠檬片的复水比、色差、细菌总数、大肠菌群数为评价指标，研究低温冷冻冻结方式及温度对柠檬干制品质量的影响。试验结果表明，柠檬片经过－100 ℃的快速冻结处理再进行干燥后无明显收缩，且有浓郁的柠檬清香；同时用这个温度处理得到的柠檬干复水比最高；微生物检测也符合国家标准，也表明速冻能够有效的抑制细菌生长；在色差方面，随着储存时间的增长，柠檬片色泽会逐渐加深。

杜腾飞等[10]运用真空远红外干燥技术，研究温度和压力对柠檬片干燥特性以及外观的影响。发现在干燥过程中柠檬片干燥速率受温度影响较大，温度越高，干燥所需时间越短；当干燥温度较低时，主要影响因素是压力。对比研究了热风干燥、真空冷冻干燥和真空远红外干燥对柠檬干燥品质的影响，发现真空冷冻干燥得到的产品在干燥时间、复水比和维生素 C 保存率方面都优于真空远红外干燥和热风干燥。

王海鸥等[11]用耗电量、柠檬片的维生素 C 含

量以及复水比等作为评价指标,对真空冻结冷冻干燥、传统冷冻干燥和热风干燥 3 种干燥方式进行了对比,结果表明,真空冻结冷冻干燥和传统冷冻干燥的耗时都远大于热风干燥;但热风干燥维生素 C 保存率和复水比变化趋势却相反都要小于真空冻结冷冻干燥和传统的冷冻干燥。热风干燥的维生素 C 保存率仅为 19.14%,复水比也仅仅为 2.24。

龚丽等[12]选用热泵进行柠檬干燥,将柠檬干的复水比、维生素 C 保存率和色泽外观作为评价标准,控制干燥温度、切片厚度和风速的变化,结果表明,随着干燥温度升高,干燥速率加快,干燥时间也相应缩短;柠檬片厚度越薄干燥速度越快达到干燥平衡所需时间也越短;风速对干燥的影响小于干燥温度和切片厚度,风速越大干燥速率越快。在干燥温度 60 ℃,厚度 4 mm,风速 0.5 m/s 的干燥条件下维生素 C 的保存率最高能达到 67.72%。

如上所述,对柠檬干燥的方式主要有热泵干燥、热风干燥、真空冷冻干燥等。适合柠檬干燥的温度为 70 ℃。真空冷冻干燥在干燥质量方面优于热风干燥,但能耗高于热风干燥。在柠檬真空冷冻干燥中,可先进行－100 ℃的冷冻来减少柠檬干燥过程的收缩。用热泵干燥得出的柠檬片在色、香、味及营养物质上均较优。

2.3　芒果干燥

芒果作为呼吸活跃性水果,在储藏时易损耗。将芒果进行干燥加工,使其成为干制品可增长储存期[13]。

罗彩连等[14]用热泵对芒果片进行干燥,研究了干燥温度以及间歇时间对芒果干燥品质产生的影响。发现干燥温度越高,芒果干燥速度越快,干燥时间越短;间歇干燥时间越长,干燥速度越快;相比连续干燥,间歇干燥的干燥速度更高;Midilli 模型较适合作为芒果的干燥数学模型。

Thayane R.Braga 等[15]在芒果干燥中运用高强度脉冲紫外线进行预处理,并评估其干燥过程和干燥后芒果干的营养成分。研究表明,高强度脉冲紫外线预处理降低了芒果的含水率,但在干燥的过程中不影响其干燥动力学和水分扩散速率。经过预处理再干燥后的芒果维生素 C、类胡萝卜素的含量都比未处理的高,最高能高 40%;维生素 B1、B3 的含量也比未预处理的高,最高能高 25%;维生素 B6 则相反比预处理降低了最多 50%。

黄忠闯等[16]以芒果干燥后的外观色泽、维生素 C 保存率、蛋白质保存率、复水比以及芒果微观组织破坏程度作为评价参数,对热风干燥和真空冷冻干燥了进行对比试验。结果表明,热风干燥在耗时与耗能上都要少于真空冷冻干燥;但在外观色泽与口感上真空冷冻干燥优于热风干燥,真空冷冻干燥得到的芒果干色香味更佳;在维生素 C 和蛋白质的保存率方面真空冷冻干燥好于热风干燥,分别可以达到 81.02% 和 80.77%;复水比真空冷冻干燥更优,最高可达 8.25;经扫描电镜观察两种干燥方式干燥出的产品,真空冷冻干燥的芒果微观组织均匀而热风干燥的比较紧密。

段宙位等[17]利用太阳能-热泵干燥技术,以芒果含水率、维生素 C 含量、蛋白质含量、还原糖含量以及外观色泽作为参考指标,研究芒果干燥后其果肉的性质变化。发现随着干燥的进行,芒果含水率 、维生素 C 含量、蛋白质含量以及还原糖含量都逐渐降低,外观也逐渐收缩。16 h 的干燥时长比较适合芒果干燥,该干燥时长对于一些营养成分的保留较好。

Salazar N A 等[18]利用冷冻干燥技术对芒果果肉进行干燥,发现在较高的冷冻速率下,干燥时间能缩短至 70%以内。在压强为 66.66～86.65 KPa,温度为－2 ℃～0 ℃,冷冻速率接近0.4 ℃/min的干燥工艺下,得到的芒果干质量最高。

潘莹瑛[19]用热风干燥、远红外真空干燥和微波干燥对芒果果肉进行干燥对比,发现在干燥耗时上,热风干燥、远红外真空干燥、微波热风干燥依次减小;在干制后芒果干的维生素 C 保存率上,微波热风干燥、远红外真空干燥、热风干燥依次降低;在外观色泽方面,远红外真空干燥、微波热风干燥、热风干燥依次降低。在复水比方面,远红外真空干燥和微波热风干燥的得到的芒果干均远大于热风干燥。

以上文献表明,芒果干燥的方式主要有热泵干燥、热风干燥、真空冷冻干燥、红外辐射干燥等。热泵间歇干燥要优于连续干燥。紫外线的预处理能够使芒果在干燥过程中保留大量维生素 C 和类胡萝卜素等。芒果的热风干燥在耗时与耗能方面都优于真空冷冻干燥,但在干燥质量上则比真空冷冻干燥差,而在复水比方面热风干燥得到的产品最差。

2.4　菠萝蜜干燥

菠萝蜜由于其果实果肉肥厚,不耐贮藏,大多

以干燥初加工产品为主,常见的为菠萝蜜鲜果干。

张彦军等[20]采用真空冷冻干燥技术,以菠萝蜜冻干后含水率、复水比、外观色泽、蛋白质含量以及抗氧化性作为试验指标,研究了四种不同干燥条件对菠萝蜜干燥品质的影响。发现适当地降低真空冷冻干燥温度能够增加菠萝蜜干燥后的口感且减少耗电量,最优干燥工艺是在-20 ℃预冻24 h,真空度为20-60 Pa,冷冻温度为-40 ℃,干燥时间控制在10~20 h内。

王萍等[21]运用真空冷冻联合膨化干燥和热风联合膨化干燥两种不同组合干燥技术,以干燥后产品的色泽、还原糖含量、类胡萝卜素含量、抗氧化性、复水性以及微观结构为评价依据,对比研究了两种不同组合干燥技术对菠萝蜜品质的影响。结果表明,真空冷冻联合膨化干燥后的菠萝蜜在还原糖和类胡萝卜素的保存率上都比较高,而在色泽、抗氧化性方面是热风联合膨化干燥更好。

徐飞等[22]采用微波真空干燥技术对菠萝蜜进行三因素正交试验,研究了微波功率、干燥时间和载物量等因素对菠萝蜜干燥生产的影响。发现指数模型适合作为菠萝蜜的干燥曲线模型;干燥生产中最大的影响因素是微波功率其次是干燥时间和载物量。

张容鹄等[23]用真空冷冻干燥的方式对菠萝蜜进行了干燥工艺的研究,通过电阻法测量出其共晶点温度为-32 ℃~-33 ℃,共熔点温度为-30 ℃。最佳干燥工艺为选用9成熟、切片宽度保持在4~7 mm、用0.9%的氯化钠溶液预处理过的菠萝蜜为生产对象,真空度保持在59.8~70.6 Pa之间,冷冻温度保持在-33 ℃~-33.5 ℃,其在真空冷冻干燥后外观色泽口感方面都要优于市面上销售的菠萝蜜干制品。

Srinang J等[24]确定了不同干燥技术对菠萝蜜干燥动力学及干燥品质的影响,发现菠萝蜜的薄层干燥动力学适合用Page模型来进行预测,通过微波真空干燥技术得到的菠萝蜜在水分含量以及质地结构方面均较优。

石维善等[25]采用热泵干燥技术,试验研究了热泵干燥温度和风速对菠萝蜜品质的影响。结果表明,干燥温度相比风速对干燥速率的影响较大,干燥温度越高干燥所需时间越短,且随着温度、风速的增大,菠萝蜜外观色差也加大,维生素C保存率降低。适合菠萝蜜热泵干燥的工艺为:物料大小25 mm×15 mm×2 mm,干燥温度设定55 ℃,风速3.5 m/s。通过该工艺干燥得出的菠萝蜜维生素C含量最高能达到50.12%,同时口感也最佳。

综上可以得出主要用于菠萝蜜干燥的技术有热泵干燥、微波干燥、真空冷冻干燥、联合干燥等。在热泵最佳干燥工艺干燥的菠萝蜜维生素C含量最高能达到50.12%。Page模型较适合作为菠萝蜜微波真空干燥的模型。真空联合干燥技术主要影响的是菠萝蜜中的营养物质,而热风联合干燥技术影响的则是菠萝蜜的外观。

2.5 香蕉干燥

香蕉富含多种营养成分并且能够提供能量、提高免疫力,被誉为“新的水果之王”,但新鲜香蕉难于保存,将其制作成干制品后可长时间的储存。

郭雪等[26]用微波真空干燥方法,研究了微波功率、真空度以及切片厚度对香蕉干燥过程中内部水分和温度变化的影响,发现微波功率和切片厚度一定时,真空度越大,干燥速率越快干燥时间越短;真空度和切片厚度一定时,微波功率越大,干燥温度的峰值越大干燥时间也越短;真空度和微波功率一定时,切片厚度越薄,香蕉干燥时水分迁移越快,干燥所需时间越短。

蒋思杰等[27]用热泵对香蕉片进行干燥,研究了干燥温度、切片厚度和载物量对香蕉片干制所需时间、品质以及复水比的影响。发现干燥温度和切片厚度是影响产品感官的重要因素,复水比受切片厚度的影响最大。最佳干燥工艺为干燥温度60 ℃,切片厚度3.5 mm,载物量2.2 kg/m^2,该工艺干燥下的香蕉片复水比达到2.16,外观评分高达8.7。

巩桂芬等[28]研究了香蕉热风联合微波真空干燥技术的最佳干燥工艺。发现最佳工艺是先在温度60 ℃下进行热风干燥25 min,再放入85 KPa真空下进行微波强度为4.0 W/g、时间15 min的真空微波干燥。

陈仪男[29]以香蕉干燥后维生素C保存率、外观口感以及固酸比为评价指标,研究了香蕉真空冷冻干燥的最佳工艺。发现最佳工艺为香蕉片厚度5~7 mm,加热板温度设定为45 ℃,真空度控制在20~30 Pa之内,在采用速冻的速冻方式。

盛金凤等[30]利用热泵干燥技术,研究了干燥温度、切片厚度以及干燥风速等对香蕉干燥过程的影响。发现干燥温度和切片厚度对干燥的影响远大

于风速,Page 模型适合作为香蕉片的干燥模型。

Zhang 等[31]为提高香蕉片干燥质量,干燥设备的能量效率。设计了一台空气源热泵干燥机,该热泵干燥机 COP 值约为 8,与传统的热风干燥方式相比,可节能 85%。

综上所述,主要用于香蕉干燥的技术有热泵干燥、微波干燥、真空冷冻干燥等。干燥温度和切片厚度是影响香蕉干制品感官的重要因素,切片厚度也对香蕉干燥后复水比产生影响。先进行热风预热再进行微波干燥能提高干燥效率。Page 模型能够作为香蕉片的干燥模型。真空冷冻干燥通过速冻的方式进行能够使干燥出的香蕉外观口感均较佳。通过研究发现热泵干燥能够节约大量的能源。

3 结束语

本文通过大量文献调研,简单介绍了常见的果蔬干燥技术,面对市场上常见果蔬以红枣、柠檬、芒果、菠萝蜜和香蕉为例进行干燥应用的总结,主要结论如下:

1) 干燥方式、干燥温度、风速、切片厚度以及载物量等都能影响果蔬干燥品质,其中干燥温度影响最大;

2) 不同品种的果蔬适用的干燥方法和最佳工艺并不相同,需要通过试验研究找到最佳工艺;

3) 通过干燥试验可得到不同果蔬的适用干燥动力学模型,用以预测果蔬干燥过程中不同时刻水分比的变化,其中 Page 模型是较常见的果蔬干燥动力学模型;

4) 热泵干燥技术因具有高效节能、环境友好等特点,相对于热风干燥有更高的能源利用效率,且带来更好的干燥品质。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 中国统计出版社,2018.

[2] CUI Z W ,XU S Y ,SUN D W . Dehydration of garlic slices by combined microwave-vacuum and air drying [J]. Drying Technology,2003(7):1173-1184.

[3] 木合塔尔·米吉提,吾尔泥沙·吐尼牙孜,玛依努尔·托乎提. 红枣热风干燥特性的单因素试验分析[J]. 农机化研究,2018,40(6):178-182.

[4] 李超新,张学军,刘松,等. 红枣红外辐射干燥数学模型[J]. 中国农机化学报,2015,36(4):88-90.

[5] 刘小丹,张淑娟,贺虎兰,等. 红枣微波-热风联合干燥特性及对其品质的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(24):280-286+363.

[6] 杨先亮,谢英柏,靳光亚. 热泵干燥婆枣的方案改进和试验对比[J]. 农业工程学报,2009,25(9):329-332.

[7] 张艳. 红枣热风干燥工艺与技术研究[D]. 郑州:中原工学院,2018.

[8] 王蓉蓉,丁胜华,李高阳,等. 柠檬片热风干燥特性及品质研究[J]. 食品科技,2016,41(5):48-53.

[9] 章斌,丁心,侯小桢,等. 柠檬片的低温冻结与真空冷冻干燥工艺研究[J]. 食品研究与开发,2015,36(22):86-90.

[10] 杜腾飞,赵丽娟,王丹丹,等. 柠檬片真空远红外干燥特性及对品质的影响[J]. 天津科技大学学报,2019:1-5.

[11] 王海鸥,谢焕雄,陈守江,等. 不同干燥方式对柠檬片干燥特性及品质的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(14):292-299.

[12] 龚丽,刘清化,刘军,等. 柠檬热泵干燥工艺参数优化[J]. 食品研究与开发,2017,38(7):79-83.

[13] 罗彩连. 芒果真空渗透脱水联合热泵干燥工艺研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2015.

[14] 罗彩连,林羡,吴继军,等. 芒果高温热泵间歇干燥特性的研究[J]. 热带作物学报,2015,36(12):2295-2299.

[15] THAYANE R B,EBENEZER O S ,SUELI R ,et al. Drying of mangoes (Mangifera indica L.) applying pulsed UV light as pretreatment[J]. Food and Bioproducts Processing,2019:114.

[16] 黄忠闯,李全阳,姚春杰,等. 热风干燥和真空冷冻干燥芒果品质的比较研究[J]. 农业机械,2011(26):101-105.

[17] 段宙位,窦志浩,谢辉,等. 太阳能-热泵干燥过程中芒果果肉的品质变化[J]. 食品工业科技,2014,35(20):125-127+132.

[18] SALAZAR N A ,ALVAREZ C ,ORREGO C E . Optimization of freezing parameters for freeze-drying mango (Mangifera indica L.) slices[J]. Drying Technology.2017.

[19] 潘莹瑛. 芒果果脯热风干燥及组合干燥对比研究[D]. 南宁:广西大学,2013.

[20] 张彦军,朱科学,贺书珍,等. 菠萝蜜果肉真空冷冻干燥工艺及其理化性质研究[J]. 热带作物学报,2015,36(9):1665-1671.

[21] 王萍. 联合干燥对菠萝蜜理化性质及微观结构的影响[A]. 中国食品科学技术学会.中国食品科学技术学会第十一届年会论文摘要集[C]. 中国食品科学技术学会:中国食品科学技术学会,2014:2.

(下转第 58 页)

回热循环，增大了制冷剂的过冷度，提高了制冷系数；实现融霜与制冷同步运行，库温波动很小。

不足之处是系统所使用的电磁阀多，导致电路控制系统复杂，制冷系统的密闭性不强，可靠性降低；解决的办法是使用 PLC 或者单片机自动控制电路，实现制冷、融霜工况全自动转换控制，防止系统电磁阀的误码动作，确保系统的稳定运行。

3 结束语

上述热氟融霜系统是一中典型的节能融霜方案，通过增加适当的制冷辅件，改变制冷剂流程的流向和循环，克服了现有热氟融霜方法的不足。实现制冷与融霜工况同步运行，融霜效率高；增加了制冷剂过冷度，提高了制冷效率，广泛适用于风机库和排管库。通过 PLC 智能化控制系统可大幅降低电路控制系统的复杂性。此外，系统运行的稳定性还有待在实践中不断完善和改进。

参考文献

[1] 刘清江.冷库空气冷却器融霜节能的研究[J].制冷，2005，24(4)：12-15.

[2] EMERY A F，SIEGEL B L. Experimental measurements of the effects of frost formation on heat exchanger performance [C] // Proceedings of AIAA/ASME Thermonphysics and Heat Transfer Conference，1990，139：1-7.

[3] 庄友明.食品冷库除霜方法及其能耗分析[J].集美大学学报(自然科学版)，2006，11(1)：62-65.

[4] 尉迟斌，卢士勋，周祖毅.实用制冷与空调工程手册[M].北京：机械工业出版社，2011.

(上接第 27 页)

[22] 徐飞，谭乐和，吴刚，等. 菠萝蜜果肉干燥特性试验研究[J]. 干燥技术与设备，2013，11(4)：31-37.

[23] 张容鹄，万祝宁，何艾，等. 菠萝蜜真空冷冻干燥工艺的研究[J]. 食品科技，2012，37(4)：69-73.

[24] SRINANG J，CHATASUWANKUL N，BOROMPICHAICHARTKUL C. Effect of drying methods on chemical and physical properties of osmotically dehydrated jackfruit [J]. Acta Horticulturae，2015 (1088)：579-582.

[25] 石维善，李保国. 菠萝蜜热泵干燥机理及工艺研究[J]. 食品研究与开发，2015，36(22)：102-105.

[26] 郭雪，邹同华，刘斌，等. 香蕉微波真空干燥的实验研究[J]. 中国农机化学报，2013，34(01)：146-150.

[27] 蒋思杰，姬长英，张波，等. 香蕉片热泵干燥工艺参数优化[J]. 中国农机化学报，2017，38(09)：65-69.

[28] 巩桂芬，李阳. 香蕉片热风-微波真空联合干燥研究[J]. 食品与发酵工业，2016，42(11)：138-141.

[29] 陈仪男. 香蕉的真空冷冻干燥技术[J]. 热带作物学报，2005(03)：68-73.

[30] 盛金凤，李丽，孙健，等. 香蕉片热泵干燥特性及数学模型研究[J]. 食品研究与开发，2016，37(20)：89-94.

[31] ZHANG M，HUAN Z. Exprimental setup of an air source heat pump for drying banana chips [C]. Proceedings of the Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy，ICUE，2013：1-6.

(上接第 55 页)

用户，并满足管网、末端设备承压、不倒空等水力工况稳定和运行安全性的要求。为今后类似改造项目提供了一定的借鉴作用。

参考文献

[1] 刘亚萌，刘兰斌，邹艾娟. 直供式供热管网热力站设计探讨[J]. 暖通空调，2014(9)：40-45.

[2] 孙刚. 直接式供热系统与间接式供热系统的特点及对比分析[J]. 区域供热，1990(4)：6-15.

[3] 贺平，孙刚，王飞，等. 供热工程[M]，第四版. 北京：中国建筑工业出版社，2009：252-253.

[4] 石兆玉，李德英，王红霞. 供热系统循环水泵传统设计思想亟待更新[C]//2004 年全国供热技术研讨会论文集，2004：18-27.

[5] 石兆玉. 供热系统分布式变频循环水泵的设计[J]. 区域供热，2016(2)：1-5.