



低能耗智能化食品速冻技术及装备开发

田长青

中国科学院理化技术研究所

国家重点研发计划项目课题（2018YFD0400605）

预制调理食品低能耗、智能化速冻技术及装备开发

承担单位：中国科学院理化技术研究所

参与单位：华南理工大学

上海海洋大学

河南农业大学

冰轮环境技术股份有限公司

研究目标与考核指标



研究目标

针对我国速冻食品加工装备能耗高、单位产能低、连续性和智能化程度低、装备占地面积大等问题，系统开展预制调理食品**高品质低能耗速冻工艺、超低温快速冻结技术、物理场辅助速冻技术、速冻装备部件和制冷系统优化**等**关键技术研究**和**装备研发**，并开展**示范应用**，提升我国速冻装备能效和智能化水平。

考核指标

- ✓ 开发智能化高品质**天然低温冷媒超低温快速冻结装备、单体式混合工质制冷快速冻结设备、大型自动化超声波辅助速冻装备、低能耗智能化平板冻结装备、低能耗智能化隧道式连续冻结速冻装备**各1台，**共计5台**，并形成相应的智能化、规模化和自动化生产技术体系
- ✓ 制定**标准3~5项**，建立**示范线4条**，在**1家大型企业示范应用**，申报**专利8项**，发表**论文10篇**



总体完成情况

1、约束性指标

考核指标		完成情况
装备	智能化天然低温冷媒超低温快速冻结装备	已完成试制
	低能耗智能化隧道式连续冻结速冻装备	已完成试制
	单体式混合工质制冷快速冻结装备	已完成试制
	自动化超声波辅助速冻装备	已完成试制
	低能耗智能化平板冻结装备	已完成试制
生产线	装备示范生产线-3条	完成数-3条
	速冻食品生产示范线-1条	完成数-1条
标准	建立标准3~5项	完成数-3项

考核指标		完成情况
申报专利5项		申报发明专利-18项
发表论文6篇		发表-32篇



报 告 内 容

- 智能化天然低温冷媒超低温快速冻结装备
- 低能耗智能化隧道式连续冻结速冻装备
- 单体式混合工质制冷快速冻结装备
- 自动化超声波辅助速冻装备

液氮速冻工艺包

➤ 液氮速冻工艺包优化-草莓

液氮速冻对草莓 冻结特性和品质 的影响研究

■ 液氮速冻温度对草莓冻结特性影响研究：

不同速冻温度对草莓冻结曲线、低温断裂等冻结特性的影响。

■ 液氮速冻温度对草莓品质影响研究：

不同速冻温度对草莓汁液流失率、TSS、pH、颜色等理化指标变化的影响；

不同速冻温度对草莓维生素C、酚类、花色苷等营养指标变化的影响；
不同速冻温度对草莓内源酶活性、质构和感官评价的影响。



液氮柜式速冻机



液氮速冻工艺包

➤ 液氮速冻工艺包优化-枸杞

液氮速冻对枸杞品质的影响研究

■ 液氮速冻温度对枸杞品质影响研究：

不同速冻温度对枸杞汁液流失率、TSS、pH、颜色等理化指标变化的影响；

不同速冻温度对枸杞酚类、类胡萝卜素等营养指标变化影响；

不同速冻温度对枸杞内源酶活性、质构和感官评价的影响。



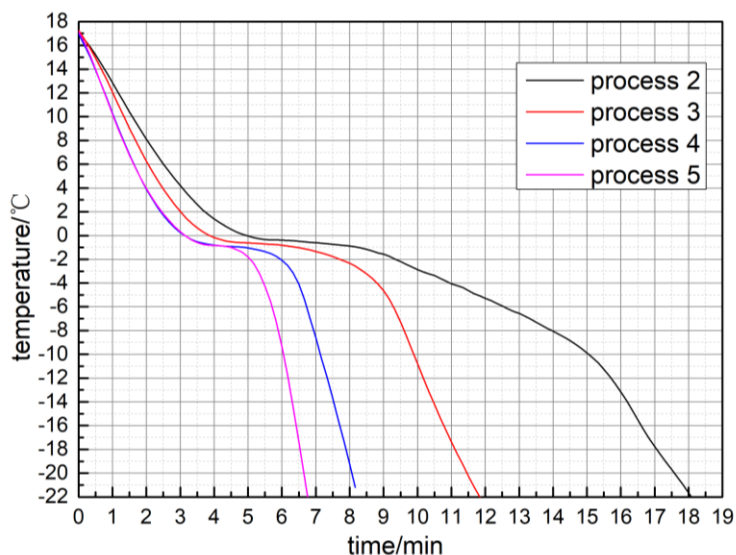
液氮柜式速冻机



液氮速冻工艺包

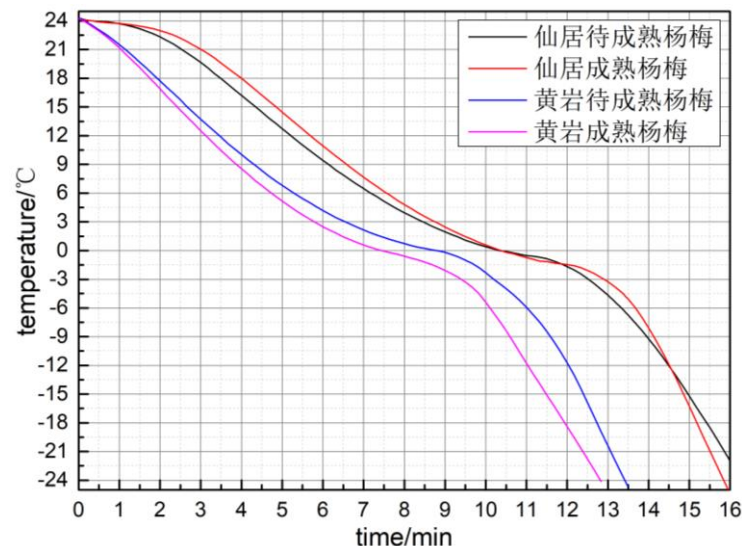
液氮速冻工艺包优化-杨梅

第一批杨梅（北京商场购买）



不同温度下杨梅冻结曲线

第二批杨梅（温岭购买）



不同地域不同成熟度杨梅冻结曲线



北京商场新鲜杨梅



解冻前



解冻后

-110°C速冻箱冻结贮藏35天杨梅



温岭新鲜成熟杨梅



解冻前

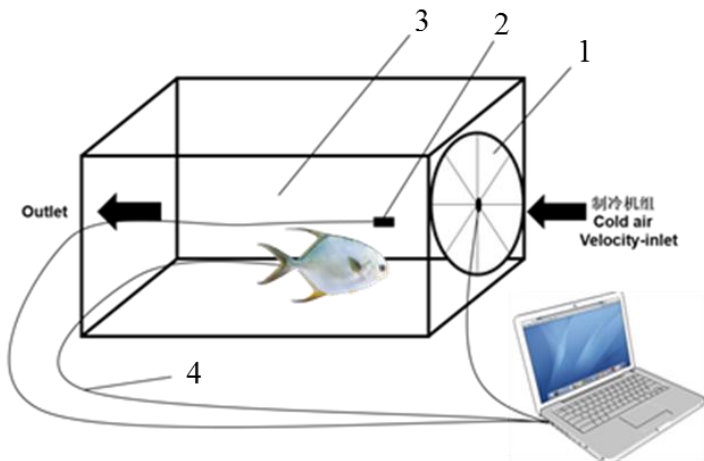


解冻后

-110°C速冻箱冻结冷藏1天杨梅

液氮速冻工艺包

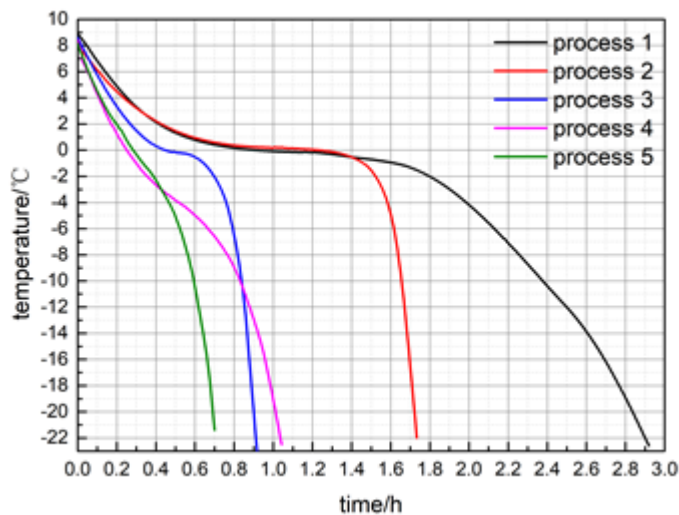
液氮速冻工艺包优化-金鲳鱼



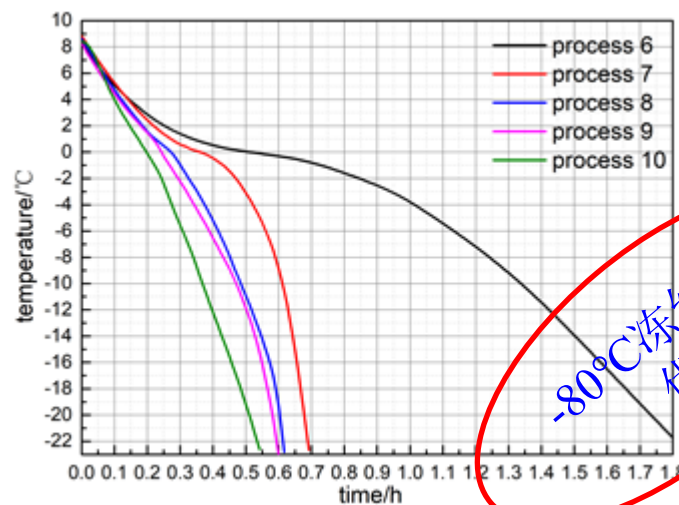
冻结金鲳鱼实验台示意图



金鲳鱼实物图



-60°C下金鲳鱼不同冷冻工艺冻结曲线



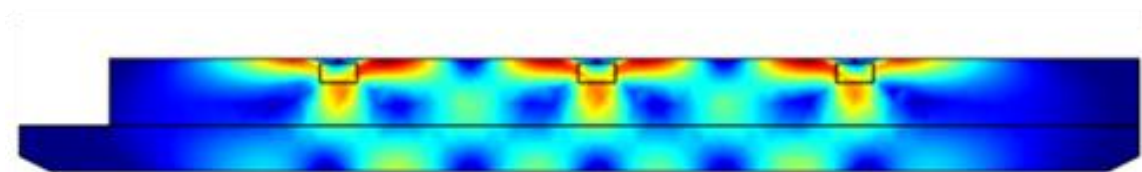
-80°C下金鲳鱼不同冷冻工艺冻结曲线

-80°C冻结最
优

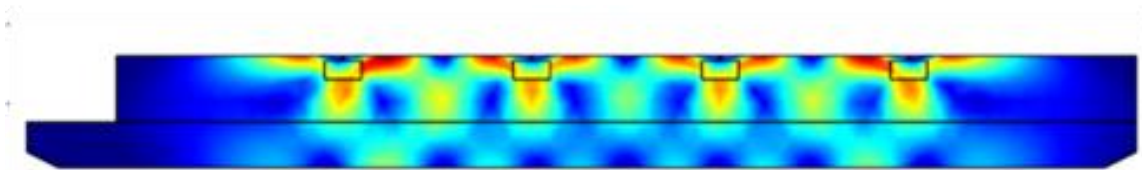
液氮快速冻结装备气流组织优化



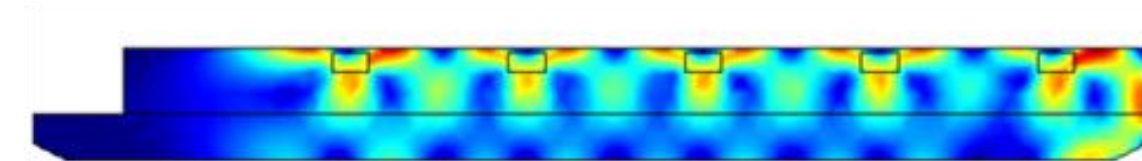
2个风机



3个风机



4个风机



5个风机

不同风机个数及排布下冷冻室内流场分布

智能化低温冷媒超低温快速冻结装备-应用



冻虾



冻鱼



冻藕片



冻蟹棒



水餃

已在北京裕农、邳州心佳源等项目中应用



报 告 内 容

- 智能化天然低温冷媒超低温快速冻结装备
- 低能耗智能化隧道式连续冻结速冻装备
- 单体式混合工质制冷快速冻结装备
- 自动化超声波辅助速冻装备

产学研合作突破瓶颈问题，实现低能耗智能化隧道式连续冻结速冻设备的开发

瓶颈问题

- 缺乏冻结工艺数据
- 装备内部气流组织
- 系统综合能效提升
- 智能控制技术加载



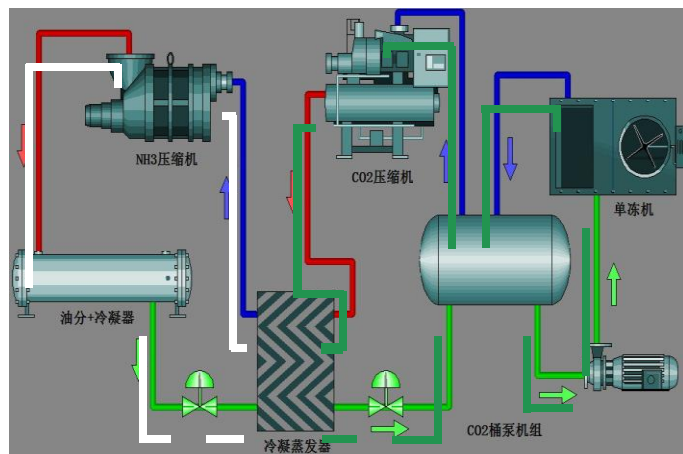
关键技术研究

核心部件开发

系统优化集成

冰轮环境、中科院理化所、上海海洋大学进行产学研联合攻关，研发低能耗智能化隧道式连续冻结速冻设备并进行示范应用与推广！

智能化隧道式连续冻结速冻装备-应用



NH_3/CO_2 复叠制冷系统



装备应用于滨州高盛、河南牧原等项目

- 自动化：全部设备皆在PLC控制下全自动运行；
- 与传统速冻库相比，冻结速度快,占地面积小；
- 技术指标：能耗比为61 kW/t, 占地面积为3.2 m²/t。

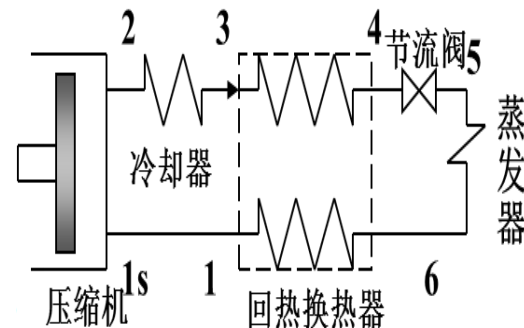


报 告 内 容

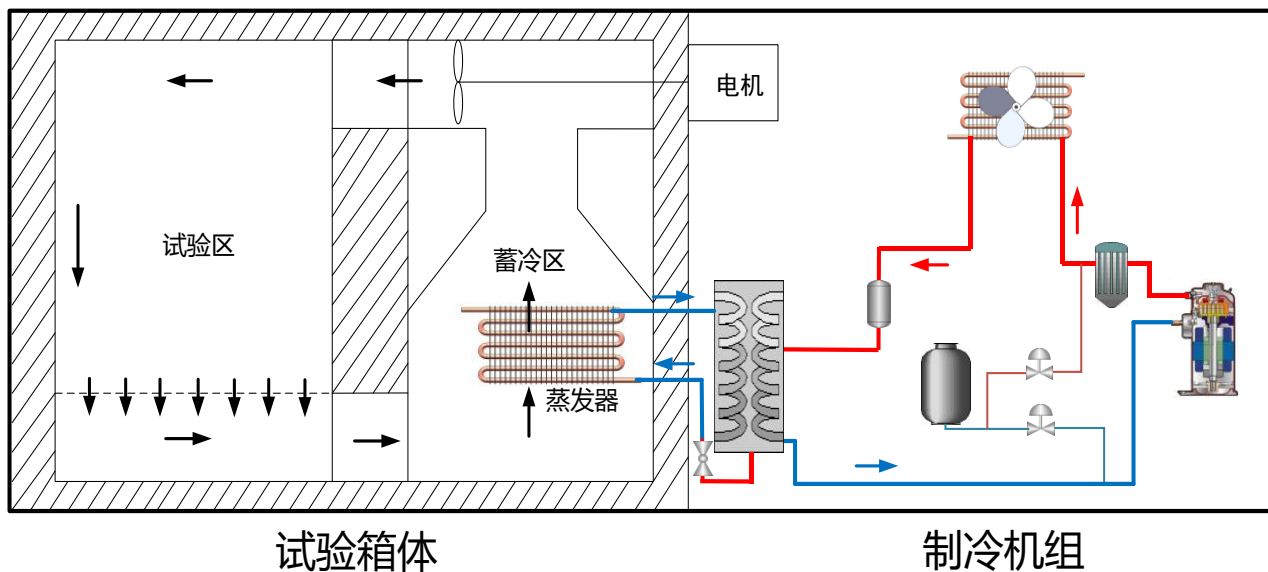
- 智能化天然低温冷媒超低温快速冻结装备
- 低能耗智能化隧道式连续冻结速冻装备
- 单体式混合工质制冷快速冻结装备
- 自动化超声波辅助速冻装备

混合工质节流制冷技术

- 混合工质单级节流
 - 全温区： $-40^{\circ}\text{C} \sim -186^{\circ}\text{C}$
 - 系统效率高：20%以上
 - 结构简单，造价低：20%以上
-
- “深冷混合工质节流制冷技术以及应用” 获得2006年度**国家技术发明二等奖**；
 - 在低温储存箱、高低温试验箱、天然气液化等**实现产业化推广**

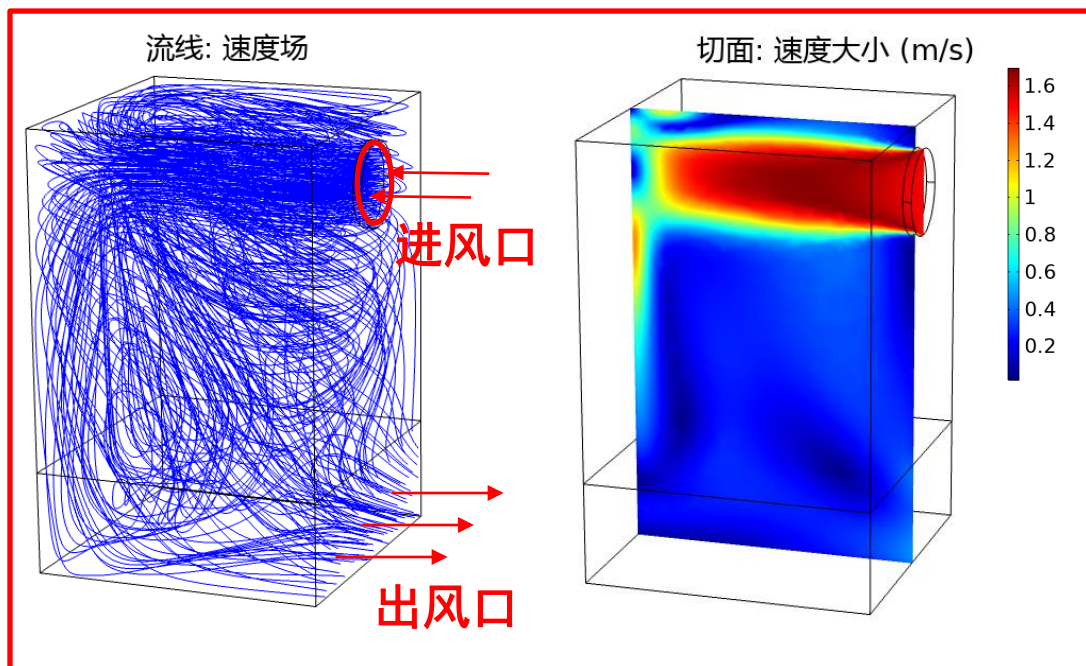


基本结构设计

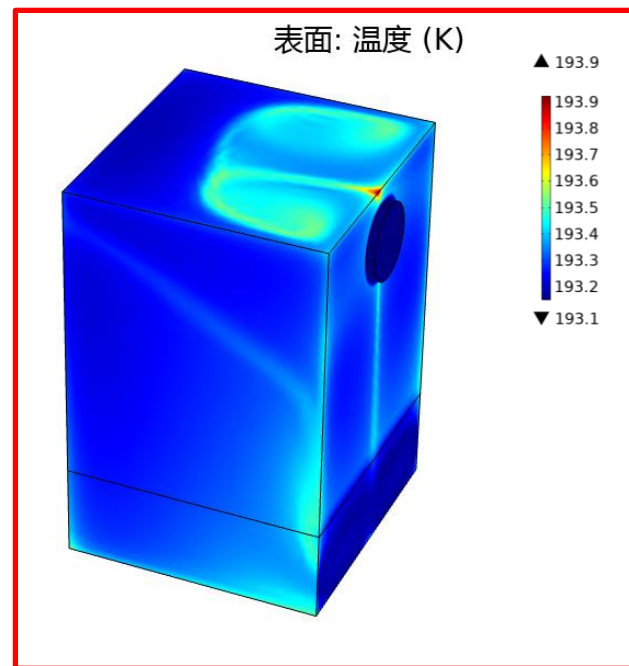


- 制冷机组采用具有自主知识产权的**单级压缩机驱动的混合工质节流制冷机**；
- 试验箱体保温材料采用专利**二次发泡技术**，增强保温效果，同时消除低温造成的变形；
- 箱体内采用**强制对流风机**，加快降温速率。

试验箱体温度均匀性模拟和风道优化



箱体内速度场分布



箱体内温度分布

进风速度在1.5 m/s时，整个试验箱内的温度均匀度可达到 ± 1 K以内

混合工质制冷快速冻结装备研制



60L快速冻结设备:

最低温降至 -120°C , 常温到 -80°C 区间平均降温速率约 $1.14^{\circ}\text{C}/\text{min}$

报告编号: 2020-1574

科技查新报告

项目名称: 半封闭式混合工质制冷快速冻结设备

委托人: 中国科学院理化技术研究所

委托日期: 2020年10月9日

查新机构: 中国科学院文献情报中心
(科技查新中心)

查新完成日期: 2020年10月10日

二〇一八年制

NO.20085-W



测试报告

测试项目: SM/T 2100.2-2015/ISO 2100-2
(制冷制冷器 第2部分: 分卷, 空冷式试验
设备) - GB/T 2100.3-2015 (制冷制冷器
第3部分: 试验设备) - SM/T 10794.2-2012
(高纯内冷 第2部分: 分卷, 空冷式试验
设备)

报告编号: 20085-W

主 编: 张 川 日 期: 2020.09.26

审 核: 王 飞 日 期: 2020.10.16

批 准: 王 飞 日 期: 2020.10.16

产 品 名 称: 半封闭式混合工质制冷快速冻结设备

检测类别: 委托检测

委托单位: 中国科学院理化技术研究所

测试结论及说明: 检测合格, 符合标准要求

国家应用科学设备质量监督检验中心

本報告及附件由國家應用科學設備质量监督检验中心提供

NO.20085-W

序号	检测项目	测试内容	测试结果
1	使用性能	测试环境温度/相对湿度 (平均)	26.4℃/2.5%RH
		冻结腔内有无冷凝	400.00℃
		超低温冻结速率	99.3℃
		冻结腔空载降温至-80.0℃所需时间	21.8 min
		冻结腔空载降温至-120.0℃所需时间	55.8 min



图1. 外观



图2. 内部结构

测试结论及说明									
检测项目		检测内容		检测结果		检测内容		检测结果	
1.1 使用性能	测试环境温度/相对湿度 (平均)	26.4℃	2.5%RH	1.2 使用性能	冻结腔内有无冷凝	400.00℃	1.3 使用性能	超低温冻结速率	99.3℃
1.4 使用性能	冻结腔空载降温至-80.0℃所需时间	21.8 min		1.5 使用性能	冻结腔空载降温至-120.0℃所需时间	55.8 min	1.6 使用性能	冻结腔空载降温至-80.0℃所需时间	21.8 min
2. 性能指标及能效指标测试									
测试内容: 超低温试验箱能效指标									
能效指标 能效等级 (1/2)	制冷量 (kW)	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
	能效比 (EER)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
能效指标 能效等级 (1/2)	制冷量 (kW)	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
	能效比 (EER)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
能效指标 (kW)	能效比 (EER)	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									
能效指标 (kW)									



报 告 内 容

- 智能化天然低温冷媒超低温快速冻结装备
- 低能耗智能化隧道式连续冻结速冻装备
- 单体式混合工质制冷快速冻结装备
- 自动化超声波辅助速冻装备

在食品速冻的过程中，超声波能够在液体中产生气穴现象，气穴现象产生的气泡可以作为水结晶的晶核，可以得到更多和更小的冰晶。超声波可以缩短速冻时间，改善冷冻食品的微观特性，从而得到更加高品质的食品。

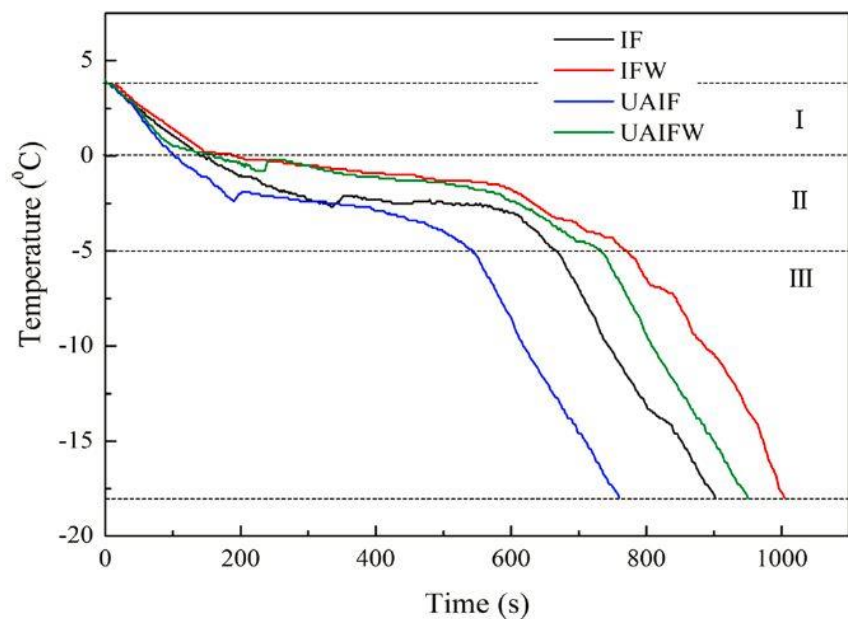
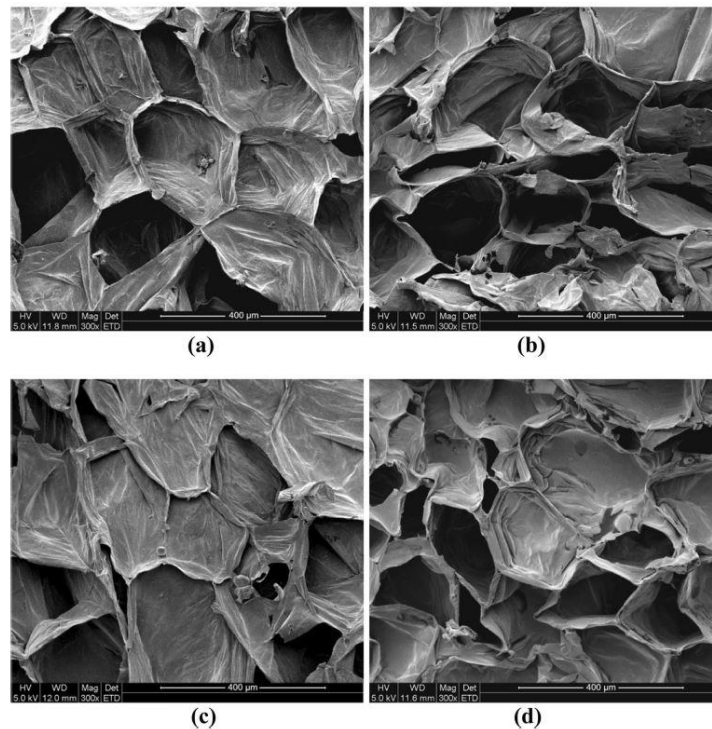


Fig. 1 The freezing curves of radish cylinders under different freezing conditions. IF (immersion freezing), IFW (immersion freezing with wrapped treatment), UAIF (ultrasound-assisted immersion freezing), UAIFW (ultrasound-assisted immersion freezing with wrapped treatment)

不同条件萝卜冻结曲线

Xu et al. Food Bioprocess Technol, 2015



不同冻结情况微观结构

(a) IF (b) IFW (c)UAIF (d)UAIFW

马铃薯超声波冻结实验



正交单频超声波对马铃薯冷冻品质的影响

处理方式	总钙含量 (mg/100g)	L-抗坏血酸含量 (mg/100g)	总酚含量 (mg GAE/100 g)
鲜样	8.57 ± 0.92 ^a	24.36 ± 2.06 ^a	151.37 ± 3.82 ^a
IF	5.62 ± 0.71 ^c	16.27 ± 1.87 ^c	86.72 ± 3.57 ^c
BUF	7.02 ± 1.03 ^b	19.14 ± 2.13 ^b	102.59 ± 4.12 ^b
SUF	6.87 ± 0.65 ^b	18.73 ± 1.05 ^b	98.34 ± 3.71 ^{bc}
OUF	7.31 ± 0.59 ^{ab}	19.63 ± 1.02 ^b	108.37 ± 4.05 ^b

注：同一列中不同字母之间代表具有显著性差异 ($p < 0.05$)

图 3-12 不同方向单频超声波对马铃薯总钙含量、L-抗坏血酸含量和总酚含量的影响 (IF: 直接冷冻, BUF: 底面单频超声波, SUF: 侧面单频超声波, OUF: 正交单频超声波)

正交超声处理后的样品营养成分保存最好, 总钙含量、L-抗坏血酸含量和总酚含量最高, 这主要与正交超声处理后较低的汁液流失率有关, 同时空化效应产生的自由基对L-抗坏血酸含量和总酚含量的影响也较弱。

正交双频超声波对马铃薯冷冻效率的影响

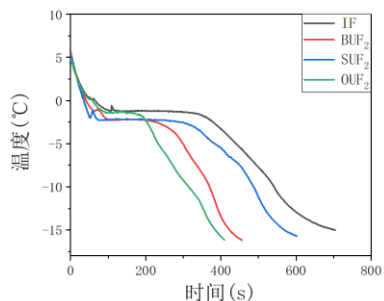
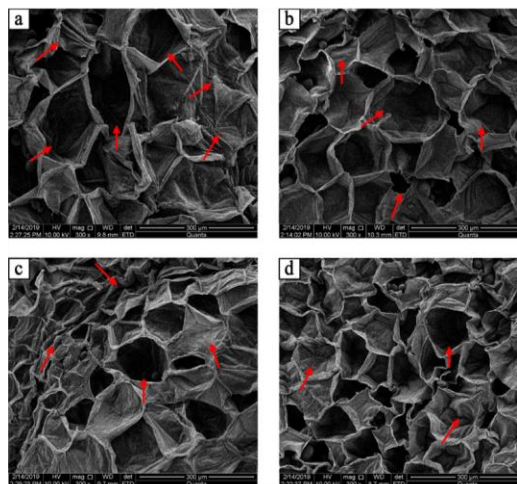


图 3-14 不同方向双频超声波处理的冷冻曲线 (IF: 直接冷冻, BUF₂: 底面双频超声波, SUF₂: 侧面双频超声波, OUF₂: 正交双频超声波)

在 20+28kHz 的条件下, 正交双频超声处理后样品的冷冻效率最高, 而侧面双频超声处理对冷冻效率的提高并不显著, 这可能是由于侧面不同频率超声波形成了 120° 的夹角, 其在轴向上的质点振动位移产生了一定的抵消作用。

正交单频超声波对马铃薯微观结构的影响



图a中可以看到, 浸渍冷冻处理的马铃薯样品的细胞壁出现了明显的扩张和塌陷现象

从图b中可以看到, 底面超声作用下样品内形成了部分尺寸较大的冰晶。从图c中可以看到, 侧面超声处理后样品的细胞壁结构有很大的不均匀性。

图d中可以看到, 正交超声处理后的马铃薯样品的细胞壁结构最为紧密均匀, 冰晶对细胞壁结构的破坏程度最小

正交双频超声波对马铃薯冷冻品质的影响

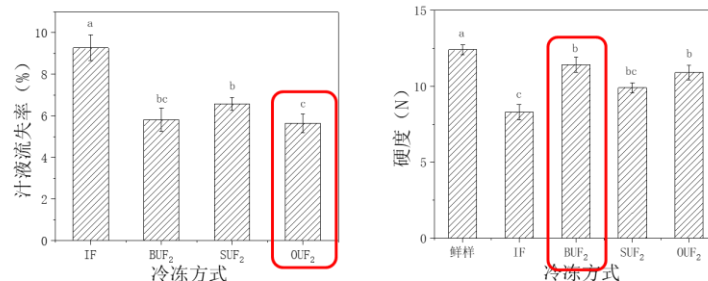


图 3-15 不同方向双频超声波对马铃薯汁液流失率和硬度的影响 (IF: 直接冷冻, BUF₂: 底面双频超声波, SUF₂: 侧面双频超声波, OUF₂: 正交双频超声波)

正交双频超声处理后的样品的汁液流失率显著降低, 同时硬度值有一定的提高, 而侧面双频超声处理对汁液流失和硬度的改善并不明显。

敬请提出宝贵意见！



田长青

中国科学院理化技术研究所

邮编：100190

地址：北京市海淀区中关村东路29号

电话：13911618319，010-82543696

Email: chqtian@mail.ipc.ac.cn