

现代食品深加工技术丛书

食品真空冷却技术

刘宝林 宋晓燕 编著



科学出版社

现代食品深加工技术丛书

食品真空冷却技术

刘宝林 宋晓燕 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书从基础理论、设备与工艺三方面系统介绍了食品真空冷却技术。其中,基本理论部分包括食品的热物性、真空系统基础理论、制冷系统基础理论以及传热传质数值模拟方法。设备部分不仅介绍了制冷系统与真空系统的常见类型,还介绍了真空冷却设备常用零部件的选择与维修方法。生产工艺相关章节介绍了常见食品的真空冷却工艺以及冷却后的品质检测方法。

本书具有较强的实用性,可为食品真空冷却机设计人员、科研人员、大专院校师生,以及食品真空冷却机操作人员提供技术参考。

图书在版编目(CIP)数据

食品真空冷却技术/林宝林,宋晓燕编著. —北京:科学出版社,2016.4

(现代食品深加工技术丛书)

ISBN 978-7-03-047667-8

I. ①食… II. ①刘… ②宋… III. ①食品加工-真空冷却
IV. ①TS205.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第049581号

责任编辑:贾超/责任校对:王瑞

责任印制:徐晓晨/封面设计:东方人华

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年4月第一版 开本:720×1000 B5

2016年4月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:200 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“现代食品深加工技术丛书”
编写委员会

主 编 孙宝国

副主编 金征宇

编 委 (以姓氏汉语拼音为序)

毕金峰 曹雁平 程云辉 段长青 哈益明

江连洲 孔保华 励建荣 林 洪 林亲录

刘新旗 陆启玉 马美湖 木泰华 单 杨

王 静 王 强 王 硕 王凤忠 魏益民

谢明勇 徐 岩 杨贞耐 叶兴乾 张 泓

张 敏 张 懋 张 偲 张春晖 张德权

张丽萍 张名位 赵谋明 周光宏 周素梅

秘 书 贾 超

联系方式

电话:010-6400 1695

邮箱:jiachao@mail.sciencep.com

丛 书 序

食品加工是指直接以农、林、牧、渔业产品为原料进行的谷物磨制、食用油提取、制糖、屠宰及肉类加工、水产品加工、蔬菜加工、水果加工和坚果加工等。食品深加工其实就是食品原料进一步加工,改变了食材的初始状态,例如,把肉做成罐头等。现在我国有机农业尚处于初级阶段,产品单调、初级产品多,而在发达国家,80%都是加工产品和精深加工产品。所以,这也是未来一个很好的发展方向。随着人民生活水平的提高、科学技术的不断进步,功能性的深加工食品将成为我国居民消费的热点,其需求量大、市场前景广阔。

改革开放 30 多年来,我国食品产业总产值以年均 10% 以上的递增速率持续快速发展,已经成为国民经济中十分重要的独立产业体系,成为集农业、制造业、现代物流服务业于一体的增长最快、最具活力的国民经济支柱产业,成为我国国民经济发展极具潜力的新的经济增长点。2012 年,我国规模以上食品工业企业 33 692 家,占同期全部工业企业的 10.1%,食品工业总产值达到 8.96 万亿元,同比增长 21.7%,占工业总产值的 9.8%。预计 2015 年食品工业总产值将突破 12.3 万亿元。随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,食品产业在保持持续上扬势头的同时,仍将有很大的发展潜力。

民以食为天。食品产业是关系到国民营养与健康的民生产业。随着国民经济的发展和人民生活水平的提高,人民对食品工业提出了更高的要求,食品加工的范围和深度不断扩展,其所利用的科学技术也越来越先进。现代食品已朝着方便、营养、健康、美味、实惠的方向发展,传统食品现代化、普通食品功能化是食品工业发展的大趋势。新型食品产业又是高技术产业。近些年,具有高技术、高附加值特点的食品精深加工发展尤为迅猛。国内食品加工起步晚、中小企业多、技术相对落后,导致产品在市场上的竞争力弱,特组织了国内外食品加工领域的专家、教授,编著了“现代食品深加工技术丛书”。

本套丛书由多部专著组成,不仅包括传统的肉品深加工、稻谷深加工、水产品深加工、禽蛋深加工、乳品深加工、水果深加工、蔬菜深加工,还包含了新型食材及其副产品的深加工、功能性成分的分离提取,以及现代食品综合加工利用新技术等。

各部专著的作者由国内工作在食品加工、研究第一线的专家担任。所有作者都根据市场的需求,详细论述食品工程中最前沿的相关技术与理念。不求面面俱到,但求精深、透彻,将国际上前沿、先进的理论与技术实践呈现给读者,同时还附有便于读者进一步查阅信息的参考文献。每一部对于大学、科研机构的学生或研究者来说都是重要的参考。希望能拓宽食品加工领域科研人员和企业技术人员的思路,推进食品技术创新和产品质量提升,提高我国食品的市场竞争力。

中国工程院院士



2014年3月

前 言

近年来,随着生活水平的不断提高,人民对生鲜食品的品质要求也越来越高,这促使食品冷藏链快速发展。食品冷藏链是利用制冷技术与设备,使易腐食品在加工、储藏、运输、销售等各个环节中始终处于规定的低温环境下,以保障食品质量、降低食品损耗的一项系统工程。冷却是食品冷藏链的第一个、也是最重要的环节,是保持食品品质、延长货架期的重要措施。在目前的几种冷却方法中,真空冷却具有冷却时间短、温度均匀、安全卫生等特点,其应用已经从普通的果蔬,扩展到了烘焙食品、熟米饭、熟肉及部分水产品等,其前景广阔。

真空冷却设备涉及真空、制冷和控制等技术,而冷却工艺又与食品热物性、真空传热传质、食品品质检测等密切相关。所以,真空冷却的推广应用需要专业技术人员掌握不同学科的知识。迄今为止,国内还未见到系统、全面地论述有关真空冷却技术的书籍。

我们研究团队从20世纪90年代开始进行食品冷冻冷藏研究,冷却也是主要的研究内容之一,虽然在设备研制、冷却工艺、模拟计算等方面培养了一批学生,发表了一些论文,但研究工作和编写的材料还不是很系统。值此国内食品冷藏链行业快速发展之际,从事食品冷冻冷藏业的人员也需要掌握食品冷却的基本原理、工艺设备及不断涌现的新知识,鉴于此我们总结了国内外该领域的最新成果,编写了本书,希望能够为从事食品冷藏链的技术人员提供一些帮助。

本书共8章。第1章主要讲述真空冷却的过程和系统构成;第2章是食品真空冷却的基本理论,论述了食品的热物性,以及与真空冷却相关的捕水、抽气和控制过程;第3章为真空系统的基础理论;第4章为制冷系统的基础理论与设备;第5章分析了真空冷却过程中的传热传质问题,并以熟肉和叶类蔬菜为例建立数学模型,进行计算;第6章介绍食品真空冷却的设备和工艺;第7章为食品真空冷却后的品质检测技术及储藏方法;第8章列举了真空冷却设备的相关标准、一些常见的故障,并提供了维修方法。

本书的内容来自国内外许多学者的研究成果，也包括我们团队近20年来30余位教师、研究生的研究工作。参加本书资料收集、整理及撰写工作的还包括刘洋、王一帆、梁红、张敏、陈华、李玲、陈良、宋萍等。

由于本书涉及的领域广泛，编著者水平有限，难免有欠妥之处，我们真诚地欢迎各界人士批评指正。

著 者

2015年11月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 真空冷却技术的历史	1
1.2 真空冷却技术的优缺点	2
1.3 真空冷却的基本过程	3
1.3.1 真空冷却原理	3
1.3.2 真空冷却的工艺流程	3
1.4 食品真空冷却系统的构成	5
1.4.1 真空系统的构成	5
1.4.2 水的汽化对真空系统的技术要求	6
1.4.3 水的凝结对制冷系统的技术要求	7
1.4.4 控制系统的构成	7
1.5 真空冷却技术的应用	9
第 2 章 食品真空冷却的基本理论	10
2.1 水和水蒸气的性质	10
2.1.1 水的相图	10
2.1.2 水的蒸发和水蒸气的凝结	12
2.2 食品热物性基础	14
2.2.1 水的热物理性质	14
2.2.2 食品材料热物理性质的测量	15
2.2.3 导热系数的测量	18
2.2.4 热扩散系数的测量	20
2.2.5 食品材料的热物理数据	20
2.2.6 食品材料热物理性质的估算方法	27
2.3 捕水过程	30
2.3.1 凝结过程中真空室内混合气体的热力学性质变化	30
2.3.2 凝结过程中捕水器表面水分的状态	30
2.4 抽气过程	31
2.4.1 影响抽气速率的因素	31

2.4.2	抽气过程中系统各处的压力变化	32
2.4.3	抽气时间与抽气方式	33
2.5	控制过程	35
2.5.1	真空冷却过程中系统运行模式的控制	35
2.5.2	真空冷却过程中压降模式的控制	36
第3章	真空系统的基础理论	38
3.1	真空技术基础	38
3.1.1	真空的定义	38
3.1.2	食品真空冷却所涉及的真空范围及获得方法	38
3.2	真空获得设备	39
3.2.1	概述	39
3.2.2	机械真空泵	40
3.2.3	喷射真空泵	42
3.3	真空系统的测量	44
3.3.1	真空计的分类、选择及校准	44
3.3.2	抽速的测量	46
3.4	真空系统的密封	46
3.5	检漏	47
3.5.1	漏率和检测	47
3.5.2	泄漏测量	48
3.5.3	漏孔检测	49
3.6	真空系统操作规则	51
第4章	制冷系统的基础理论与设备	52
4.1	制冷的热力学基础	52
4.1.1	热力学的基本定律	52
4.1.2	逆卡诺循环	53
4.2	蒸气压缩制冷	54
4.2.1	蒸气压缩制冷的工作原理	54
4.2.2	蒸气压缩制冷的理论循环及其热效率	55
4.3	制冷剂	57
4.3.1	制冷剂的分类及其符号	57
4.3.2	制冷剂的性质	59
4.4	载冷剂	61

4.4.1	载冷剂的概念及分类	61
4.4.2	载冷剂的性质	62
4.5	制冷设备	62
4.5.1	压缩机	62
4.5.2	热交换器	63
4.5.3	节流机构	68
4.6	湿空气的性质	68
4.6.1	湿空气性质的表征	68
4.6.2	湿空气参数之间的关系	69
4.6.3	湿空气的热力学性质	69
4.6.4	饱和湿空气的热力学性质	71
4.6.5	湿空气的迁移性质	71
第 5 章	真空冷却过程传热传质分析及数理模型	72
5.1	食品真空冷却过程的数值模拟步骤	72
5.2	熟肉真空冷却的数值模拟模型	73
5.2.1	熟肉几何模型的获取	73
5.2.2	熟肉真空冷却的物理模型建立	74
5.2.3	子模型的控制方程	75
5.2.4	初始条件和边界条件的确定	79
5.2.5	多物理场计算的条件假设	80
5.2.6	求解器选择及求解结果	80
5.2.7	后处理	81
5.3	纯水真空冷却的数值模拟模型	82
5.4	叶类蔬菜的真空冷却数学模型	84
5.4.1	叶类蔬菜的几何模型获取	85
5.4.2	物理场的选择和添加	85
5.4.3	边界条件的处理	86
5.4.4	网格的细化	86
5.4.5	模拟结果	86
5.5	模拟软件的运行和使用	87
5.5.1	专用 App	88
5.5.2	模拟软件服务器	88
5.5.3	云计算	88

第 6 章 食品的真空冷却设备与工艺	90
6.1 食品的真空冷却设备.....	90
6.1.1 间歇式真空冷却设备.....	90
6.1.2 连续式真空冷却设备.....	90
6.1.3 移动式真空冷却设备.....	91
6.1.4 喷雾式真空冷却设备.....	92
6.2 食品的真空冷却工艺.....	92
6.2.1 果蔬的真空冷却.....	92
6.2.2 水产品的真空冷却.....	96
6.2.3 烘烤食品的真空冷却.....	98
6.2.4 肉制品的真空冷却.....	100
6.2.5 调味品的真空冷却.....	102
6.2.6 豆制品的真空冷却工艺.....	103
6.2.7 白米饭及粽子的真空冷却工艺.....	104
6.2.8 汤圆、馄饨等包馅类熟食品的真空冷却工艺.....	104
6.2.9 快餐的真空冷却.....	104
第 7 章 食品真空冷却后的品质检测技术及储藏方法	106
7.1 食品真空冷却后的品质主要检测成分及其方法.....	106
7.1.1 水分.....	106
7.1.2 蛋白质.....	112
7.1.3 糖类.....	114
7.1.4 脂肪.....	118
7.1.5 维生素.....	121
7.1.6 矿物质元素的测定.....	126
7.1.7 微生物.....	141
7.1.8 力学分析.....	142
7.2 食品真空冷却后的储藏方法.....	145
第 8 章 真空预冷机的相关标准、常见故障及维修	149
8.1 食品真空预冷机的国内贸易行业标准.....	149
8.1.1 真空预冷机的命名规则.....	149
8.1.2 真空预冷机的检验项目表.....	150
8.1.3 真空预冷机的标志、包装、运输与储存.....	151
8.2 制冷系统常见故障分析.....	152

8.2.1 制冷量不足.....	152
8.2.2 制冷压缩机出现不正常现象.....	153
8.3 真空系统的常见故障分析.....	154
8.3.1 真空室真空度低.....	154
8.3.2 真空泵不启动.....	156
8.3.3 真空泵抽气能力下降.....	157
8.3.4 真空泵噪声过大.....	158
8.3.5 液环式真空泵的其他常见故障及消除方法.....	159
8.3.6 旋片式真空泵的其他常见故障及消除方法.....	159
参考文献.....	161

第 1 章 绪 论

1.1 真空冷却技术的历史

温度是影响食品质量安全最重要的参数之一。例如,采摘后的果蔬内部依然进行着旺盛的呼吸作用、蒸腾作用和生物合成作用,这将引起产品内部的生理变化和温度升高,从而导致产品质量下降和储藏时间缩短。1904年,“食品冷却”的概念首先被 Powell 和他在美国农业部的同事提出,他们希望通过吹冷风的方式迅速消除果蔬田间热,使其中心温度降至接近储藏所需温度。但是,当时冷风机的出风温度一般在 0℃左右,容易冻伤蔬菜,并且冷风冷却时间较长,易产生冷却不均的现象,易留有死角。用冷水冷却时,产品被水润湿,易带细菌,不符合流通要求。

20世纪40年代末,西方发达国家开始对真空冷却(vacuum cooling)技术进行研究。1948年,加利福尼亚州西部城市萨利纳斯建成了世界上第一座真空冷却工厂,用于莴苣的采后冷却。真空冷却过程中的莴苣不仅没有冻伤现象,而且整个冷却周期由冷风冷却时的 20~30min 降到了 10min,各部位之间的降温速率也比较均匀。现在,真空冷却技术在欧美发达国家已经达到了相当成熟的水平,并被政府强制规定为果蔬采摘后进入冷藏链的第一道工序。

1966年,日本鹿儿岛大学也开始真空冷却技术的研究。1967年日本科学技术厅分别在川上村、长野县的洗马和静冈县的岛田市进行了真空冷却实验。1986年,日本已经拥有真空冷却库 177 座。目前,日本蔬菜冷却年加工量已经超过 200 万 t,其中用真空冷却加工蔬菜量占总量的 52%以上,而差压冷却和强制通风冷却的加工量分别占 16%和 30%左右。

20世纪90年代末,肉制品及水产品的安全问题引起了世界各国的重视。美国农业部(USDA)的食品安全检验局(FSIS)建议将未腌制的熟肉从 54.4℃冷却到 26.6℃的时间不能超过 90min,降到 4℃的最长时间为 300min。爱尔兰和英国规定将熟肉块(2.5kg, 100mm 厚)从 74℃冷却到 10℃的最长时间为 150min。而利用传统的方法如空气冷却、冷水冷却根本无法实现,唯有真空冷却技术才能达到上述要求,这又进一步推动了真空冷却技术的发展。

我国对食品真空冷却技术的研究始于 20 世纪 80 年代中期,政府通过各种渠道进口了大型真空冷却机械,但机器价格高,能耗大,不便于搬运,更缺乏

与其相应的配套技术，严重制约了真空冷却技术在我国推广应用。1990年，广州制冷设备研究所设计出我国第一台真空冷却设备。目前，真空冷却技术在我国已得到了较广的应用，尤其是在东南部沿海城市，真空冷却保鲜技术广泛应用于蔬菜、鲜花、食用菌、水果等新鲜果蔬原料及制品的采后即时保鲜处理。除此之外，盒饭、快餐、汤圆等具有中国特色的食品加工行业也开始使用真空冷却技术。

几十年来，人们对真空冷却技术和工艺的研究一直没有停止过。例如，国内外学者已经针对肉制品，尤其是熟肉和火腿发明了多种真空冷却技术，其中包括变抽速真空冷却、浸没式真空冷却、蒸煮设备与真空冷却一体化技术、卤水注射法、压力脉动法、机械搅拌辅助真空冷却等。然而，目前还没有一种技术在商业上能完全被接受。

1.2 真空冷却技术的优缺点

真空冷却主要是依靠蒸发水分来获取冷量。与其他冷却方式相比，真空冷却的主要优势体现在以下几方面：

(1) 降温速度快。例如，将6kg的火腿从70℃降到4℃只需要2h，而风冷却要9.4h。因此，它给食品加工行业带来很多好处，如缩短食品的滞留时间、增加生产能力、降低能耗、利于搬运、减小冷却设备的占地面积以及提高卫生标准等。

(2) 降温均匀。真空冷却时，在冷却室中堆放的食物，其任何部位的降温速率都基本相同。

(3) 机械损伤小。因为真空冷却过程中食品不受强空气流的冲击，无论怎么放置都不会影响食品的冷却效果，所以减小了很多劳动量，同时也避免了很多不必要的机械损伤。例如，真空冷却后的面包收缩和塌陷现象明显减少。

(4) 处理成本低。Thompson等比较了真空冷却、水冷、风冷以及喷水后真空冷却的用电能效比（冷却负荷与用电量的比值）。结果是真空冷却最好（1.8），其次分别为水冷（1.4）、喷水后真空冷却（1.1）、风冷（0.4）。

(5) 清洁。冷却过程中温度的精确控制是通过绝对压力的控制实现，空气只有当真空冷却室被打开时才能进入，这保证了食物的清洁。

(6) 保持熟食制品质量。由于冷却时间短，真空冷却可最大限度地避免食物物料在高温时产生的油脂氧化、淀粉糊化等生物化学反应。同时也极大地避免了高温食物物料在30~65℃所产生的生物发酵（细菌繁殖），从根本上保障了食物长期保鲜的生理条件。这样，大量的熟食制品就可避免添加防腐剂，从而使熟食制品成为真正的“绿色食品”有了根本保障。

(7) 提高熟食制品品质。基于真空浸渍的原理，可以使食物外部因失水而

浓缩的汤汁（调料调味品）很方便迅速地进入到食品内部，从而提高食品的口（风）味。

真空冷却是通过蒸发实现降温，只有含有自由水的食品才能被真空冷却，因此要求一定量的水分损失不能对食品质量造成显著的损坏。最关键的是使用真空冷却时产品质量损失比其他方式要多，总收益也就比其他方法要少。不过，因水分蒸发带来的质量损失可以通过改进工艺进行弥补，如采用冷前预湿处理和浸没式真空冷却等新型工艺。

1.3 真空冷却的基本过程

1.3.1 真空冷却原理

在一个标准大气压(101.325kPa)下，水的沸点是 100°C ，蒸发潜热为 2256.28kJ/kg ，而当压力下降到 610.6Pa 时，水的沸点是 0.01°C ，蒸发潜热为 2834.20kJ/kg 。可见，随着压力的降低，水的沸点降低。

食品中含有大量的水，按其和食品材料的结合情况，大致可分为两类：一类是束缚水（bound water），与食品材料结合而很难分离；另一类是自由水（free water），容易被除去。任何含有自由水的食品被放在一个密闭的容器内，用真空泵不断地降低容器的压力，食品中的自由水就会不断蒸发，达到降温的效果。真空冷却的基本原理就是对真空室中的食品不断抽真空，食品中的自由水在低压、低温下快速汽化，在吸收自身热量的同时，使食品内能减少、品温下降。

在真空制冷过程中，食品中水分蒸气压与真空冷却室压力之差是被冷却物体中水分蒸发的驱动力。产生的蒸汽必须被及时抽走，否则真空室内压力会不断增加，影响食品的冷却过程。食品的最终温度可以通过调节食品最终的周围压力来实现，终压一般都设置在 650Pa 以上，以防冻伤。与传统的冷却方法不同，真空冷却过程不需要外界传热介质参与，它是靠食品自身水分蒸发而降温的过程。

1.3.2 真空冷却的工艺流程

食品真空冷却工艺大致可分为以下几步：

1. 原料的挑选

食品所处的品质状态和外形特征对真空冷却效果有较大的影响，例如，对于有局部缺陷的蘑菇，真空冷却会加速蘑菇的褐变；局部破损严重的叶类蔬菜经真空冷却后会被冻伤；而对于尺寸过大的肉块，真空冷却后其不仅失重大，而且处

理时间较长。因此，为保障冷却效果，实验前对于缺陷较大、表面损伤较严重的果蔬应及时剔除，食品原料的尺寸也要适当。

2. 原料的预处理

对原料的预处理主要包括包装（使用条板箱、PE袋、纸箱等）和捆扎、喷水、注水等。包装和捆扎是将准备真空冷却的食品装在箱子里或者用保鲜膜包裹，这样可减少商品真空冷却后储藏过程中的干耗。包装所用的箱子和薄膜必须均匀地打上足够数量的孔，以免影响真空冷却效果。在用薄膜捆绑芹菜、莴苣等蔬菜时，不能捆得太紧。喷水是指通过高压喷雾装置先将水雾化，然后均匀淋在蔬菜表面。注水一般用于肉制品，目的是减小失水率并保持食品冷却后的品质。

3. 食品的装载率

不同食品对真空室容积的装载率也有要求，但目前对于不同食品的装载率还没有明确的规定，具体操作依经验而行。例如，已经有学者研究了切花的真空冷却装载率，对于月季切花而言，以50枝为一簇真空冷却后的失重最小、寿命最长，而对于非洲菊切花，单枝花要比一束花的冷却效果好。

4. 设置参数

把待冷却食品放进真空室内，关上真空室门。设置食品冷却的终温、终压、捕水器温度、真空泵抽速。

5. 真空冷却处理

真空冷却过程可分为两个阶段：

1) 初始阶段

真空泵开启，真空泵从真空室里抽走空气，真空室压力不断降低，将真空室的压力降到与物料初始温度对应的饱和压力，食品中水分开始大量汽化，与此同时从食品中吸收热量，使得食品迅速降温，此时的状态称为闪点（flash point）。真空室的压力与食品表面温度的对应关系如图 1.1 所示。在“闪点”出现之前，蒸发速率很慢，产生的冷量较少，降温效果不是很明显。当闪点出现之后，蒸发速率剧增，吸收大量热量，使得物料温度快速降低。通常真空室的压力必须尽快降低到闪点，因为此阶段真空泵所抽走的基本都是空气，仅有微量冷量产生，当达到闪点的时候，水分才开始大量蒸发。

2) 降温阶段

继续为真空室降压，当真空室压力降到终压并维持一段时间之后，食品的最高温部分达到目标温度，真空冷却过程结束。