



普通高等教育食品类专业“十二五”规划教材
高等学校食品类国家特色专业建设教材

食品冷藏与制冷技术

SHIPIN LENGCANG YU ZHILENG JISHU



关志强◎主编

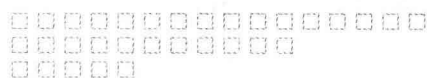
 郑州大学出版社



普通高等教育食品类专业“十二五”规划教材
高等学校食品类国家特色专业建设教材

食品冷藏与制冷技术

SHIPIN LENGCANG YU ZHILENG JISHU



关志强◎主编

 郑州大学出版社
郑州

内容提要

本书系统介绍了食品冷冻冷藏原理、食品冷冻冷藏用制冷技术、食品冷冻冷藏工艺方法、食品冷藏链和品质管理等内容,着力体现学科交叉和技术集成的总体要求,注重食品化学理论与工程热物理理论的融合渗透,注重食品冷藏技术与人工制冷技术的关联综合。可供食品科学与工程、农(水)产品加工及储藏工程、制冷与冷藏技术、冷冻冷藏工程等专业(专业方向)的本科学生或教师作为专业教材或教学参考书使用;通过选修部分内容,可供高职高专相关专业师生作为教材或教学参考书使用;也适于食品冷冻加工和冷藏物流相关企业的工程技术人员或从事食品冷冻冷藏技术研究的科技人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

食品冷藏与制冷技术/关志强主编. —郑州:郑州
大学出版社,2011.8
普通高等教育食品类专业规划教材
ISBN 978-7-5645-0485-4

I. ①食… II. ①关… III. ①食品冷藏-高等学校-
教材②食品冷加工-高等学校-教材 IV. ①TS205.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 107974 号

郑州大学出版社出版发行

郑州市大学路 40 号

出版人:王 锋

全国新华书店经销

河南新华印务有限公司印制

开本:787 mm×1 092 mm 1/16

印张:24.25

字数:574 千字

版次:2011 年 8 月第 1 版

邮政编码:450052

发行部电话:0371-66966070

印次:2011 年 8 月第 1 次印刷

书号:ISBN 978-7-5645-0485-4

定价:39.00 元

本书如有印装质量问题,由本社负责调换



近年来,我国高等教育事业快速发展,取得了举世瞩目的成就,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还不能完全适应经济社会发展的需要,迫切需要进一步深化高等学校教育教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质创新性人才的需要。为此,国家实施了高等学校本科教学质量与教学改革工程,进一步确立了人才培养是高等学校的根本任务,质量是高等学校的生命线,教学工作是高等学校各项工作的中心的指导思想,把深化教育教学改革,全面提高高等教育教学质量放在了更加突出的位置。

专业建设、课程建设和教材建设是“质量工程”的重要组成部分,是提高高等教育教学质量的关键。“质量工程”实施以来,在专业建设、课程建设方面取得了明显的成果,而教材是这些成果的直接体现,同时也是深化教学内容和教学方法改革的重要推动力。为此,教育部要求加强新教材和立体化教材建设,提倡和鼓励学术水平高、教学经验丰富的教师,根据教学需要编写适应不同层次、不同类型院校,具有不同风格和特点的高质量教材。郑州大学出版社按照这样的要求和精神,在教育部食品科学与工程专业教学指导委员会的指导下,在全国范围内,对食品类专业的培养目标、规格标准、培养模式、课程体系、教学内容等,进行了广泛而深入的调研,在此基础上,组织全国二十余所学校召开了食品类专业教育教学研讨会、教材编写论证会,组织学术水平高、教学经验丰富的一线教师,吸收了近年来食品类专业教育教学经验和成果特别是各校特色专业建设成果,编写了本套系列教材。

教育教学改革是一个不断深化的过程,教材建设是一个不断推陈出新、反复锤炼的过程,希望这些教材的出版对食品类专业教育教学改革和提高教育教学质量起到积极的推动作用,也希望使用教材的师生多提意见和建议,以便及时修订、不断完善。

编写指导委员会

2010年11月



食品冷冻冷藏学是以食品生物化学、食品物理化学、食品物性学、工程热力学、传热传质学等学科为基础,应用食品化学理论和人工制冷技术对新鲜食品原料进行冷冻加工、低温储藏和冷链流通,最大限度地保持食品品质和风味的交叉学科。本书力图从通俗易懂、全面实用的角度出发,系统介绍食品冷冻冷藏原理、食品冷冻冷藏用制冷技术、食品冷冻冷藏工艺方法、食品冷藏链和品质管理等内容,着力体现学科交叉和技术集成的总体要求,注重食品化学理论与工程热物理理论的融合渗透,注重食品冷藏技术与人工制冷技术的关联综合。本书编写,遵循理论先导、技术后续、深入浅出、循序渐进的原则,注重内容衔接,使之符合教学和认知规律,旨在通过教学实践转化,培养既掌握食品冷冻冷藏技术又具备制冷工程基本能力的复合型多样化人才。本书可供食品科学与工程、农(水)产品加工及储藏工程、制冷与冷藏技术、冷冻冷藏工程等专业或专业方向的学生和教师作为专业教材或教学参考书使用,也适于食品冷冻加工和冷藏物流相关企业的工程技术人员或从事食品冷冻冷藏技术研究的科技人员阅读。

全书共分9章。第1章由广东石油化工学院关志强编写,第2章的2.2、2.3、2.4、2.6、2.7节、第3章的3.1、3.2、3.3、3.5节和第5章的5.1、5.2、5.4节由广东海洋大学李敏编写,第4章和第5章的5.3、5.5节由广东海洋大学叶彪编写,第2章的2.1、2.5节、第3章的3.5节及第6、7章由广东海洋大学蒋小强编写,第8章由北海职业学院孙小红编写,第9章由广东海洋大学杨志娟编写。全书由关志强主编和统稿,由广东海洋大学章超桦教授主审。

本书由广东海洋大学省级名牌专业——食品科学与工程建设经费资助出版。章超桦教授对编写大纲和内容提出了非常宝贵的意见和建议,使本书内容更加充实完整。广东石油化工学院周如金教授、张钟教授对本书编写也提出了建设性的意见。广东海洋大学食品科技学院院长吴红棉教授、副院长吴晓萍副教授为本书的编写出版做了大量的组织协调工作。借此机会一并向他们表示衷心的感谢!

编者

2011年2月于广东湛江



Food

目录

第1章 食品冷冻冷藏基本原理	1
1.1 食品原料的热物理性质	2
1.2 食品原料的化学组成	9
1.3 新鲜食物组织的生物化学	21
1.4 食品原料的水分活度	31
1.5 食品原料中的溶液结晶	41
1.6 食品原料的玻璃态转化	46
1.7 食品冷冻冷藏保鲜原理	57
第2章 食品冻结与冻藏工艺	72
2.1 食品原料的冻结特性	73
2.2 食品冻结时的变化	81
2.3 食品冻结装置	87
2.4 食品冻结工艺	96
2.5 食品冻结时间的计算	103
2.6 食品冻藏时的变化和食品冻藏工艺	117
2.7 冻结食品的解冻	133
第3章 食品冷却与冷藏工艺	143
3.1 食品冷却和冷藏时的变化	144
3.2 食品冷却方法和装置	149
3.3 食品的冷却工艺	152
3.4 食品冷却过程的传热计算	155
3.5 食品冷藏工艺	164
第4章 食品冷冻冷藏的制冷原理	177
4.1 制冷基本方法	178
4.2 制冷工质	183
4.3 单级蒸气压缩式制冷理论循环	195
4.4 单级蒸气压缩式制冷实际循环	200
4.5 双级蒸气压缩式制冷循环	208
第5章 食品冷藏库的设计	217

5.1	食品冷藏库的组成与布置	218
5.2	食品冷藏库的制冷系统	224
5.3	食品冷藏库冷负荷计算	231
5.4	食品冷藏库制冷系统设备选型	240
5.5	食品冷藏库库房制冷工艺设计	255
第6章	食品真空冷冻干燥技术	262
6.1	真空冷冻干燥基本原理与过程	263
6.2	真空冷冻干燥数学模型	270
6.3	食品真空冷冻干燥设备	280
6.4	食品真空冷冻干燥工艺	285
第7章	食品热泵干燥技术	291
7.1	湿物料中的水分	292
7.2	食品干燥原理	294
7.3	热泵干燥装置基本原理	305
7.4	食品热泵干燥系统	307
第8章	食品冷藏链	313
8.1	概述	314
8.2	食品冷藏运输	318
8.3	冷藏柜和冰箱	325
第9章	冷冻食品的品质控制	329
9.1	冷冻食品原料的品质控制	330
9.2	冷冻食品加工过程中的品质控制	347
9.3	冷冻食品流通过程中的品质控制	365
9.4	冷冻食品生产的 HACCP 控制	367
参考文献		377

食品冷冻冷藏是食品加工和储藏的常用方法。食品冷冻冷藏的基本原理是:以食品生物化学、食品物理化学、食品物性学、工程热力学、传热传质学等学科为基础,人工制造和设置合理的低温环境,对新鲜食品原料进行冷冻加工、低温储藏和冷链流通,延缓或减弱其物理变化和化学变化,最大限度地保持食品品质和风味。

第 1 章

食品冷冻冷藏基本原理

1.1 食品原料的热物理性质

食品原料和其他物料一样,其热物理性质具有可加性或非可加性。从宏观上考察由 n 个成分组成的系统之物性 m 时,假定各成分固有的物性分别为 $m_1, m_2, \dots$, 各成分质量所占比例分别为 $X_{w1}, X_{w2}, \dots$, 如果式(1.1)成立,则称该物性 m 具有可加性。

$$m = m_1 X_{w1} + m_2 X_{w2} + \dots + m_n X_{wn} = \sum_{i=1}^n m_i X_{wi} \quad (1.1)$$

式(1.1)表明,系统全体的宏观物性可以用系统中各成分同样物性的和来表示,符合这一规律的物性被称为具有可加性或遵循叠加规律。具有可加性的物性,仅有成分组成就可以决定其宏观物性。密度和比热容是具有可加性的物性。如果系统全体的宏观物性不能用系统中各成分同样物性的和来表示,则称该物性具有非可加性或不遵循叠加规律。热导率以及与速度有关的分子扩散系数、黏度等物性,属于非可加性物性。

食品原料的热物理性质主要取决于食品组分、温度和水分含量,这种依赖性通常不能忽略,必须考虑。

1.1.1 食品材料的密度

食品材料的密度一般难以精确求得,文献中给出的食品材料的密度值大都是近似值,但都遵循叠加规律。Hsiek(1972年)提出用下式计算食品材料的密度:

$$\frac{1}{\rho} = \omega_w \left(\frac{1}{\rho_w} \right) + \omega_s \left(\frac{1}{\rho_s} \right) + \omega_i \left(\frac{1}{\rho_i} \right) = \sum_j \frac{\omega_j}{\rho_j} \quad (1.2)$$

式中 ρ_w, ρ_s, ρ_i ——未冻水、固体成分和冰的密度, kg/m^3 ;

$\omega_w, \omega_s, \omega_i$ ——未冻水、固体成分和冰的质量分数;

j ——食品系统中第 j 种组成。

图 1.1 给出了草莓密度随温度变化的情况。可以看出,草莓密度在初始冻结温度和 $-10\text{ }^\circ\text{C}$ 之间对温度的依赖性很强,当草莓从初始冻结温度降低到 $-40\text{ }^\circ\text{C}$ 时,其密度从 $1\,050\text{ kg/m}^3$ 降到 960 kg/m^3 。图 1.2 给出了玉米棒各组成部分密度随温度的变化情况。

在冻结过程中由于冰的形成,冰的质量分数增大,食品的密度往往减小。有关实验表明,与常温下的密度相比,胡萝卜、包菜等在 $-20\text{ }^\circ\text{C}$ 的密度约减少 1.7%,在 $-60\text{ }^\circ\text{C}$ 约减少 3.3%。所以,在工程计算中,对冻结过程中冰的质量分数是很关注的。实际上,冰的质量分数的多少不仅对食品的密度值有影响,而且与其他热物理性质相关。冰的质量分数与食品的初始冻结温度和最终冻结温度的关系可由式(1.3)粗略表示。

$$\omega_i = 1 - \frac{T_2}{T_6} \quad (1.3)$$

式中 ω_i ——冰的质量分数;

T_2 ——初始冻结温度;

T_6 ——最终冻结温度。

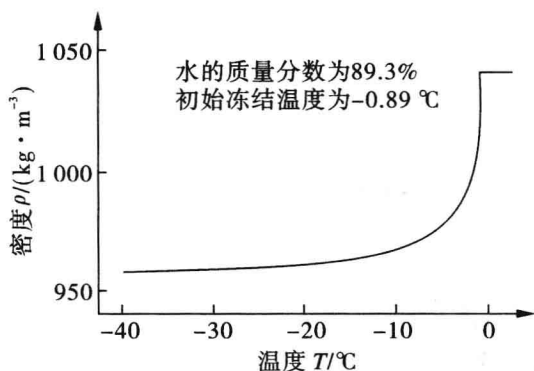


图 1.1 草莓密度随温度的变化

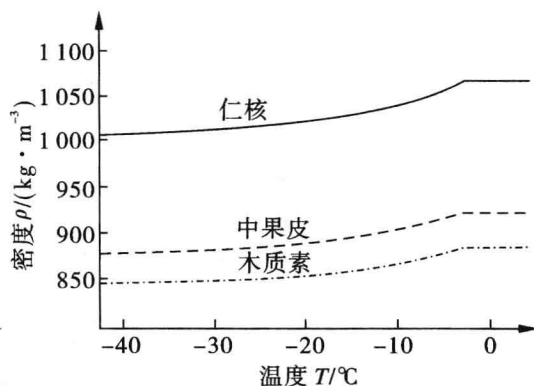


图 1.2 玉米棒各组成部分密度随温度的变化

1.1.2 食品材料的比热容

1.1.2.1 高于初始冻结温度的情况

食品材料的比热容和含水量有着明显的关系,因此,通常以水的质量分数 ω 为变量,拟合为一般形式:

$$c_p = c_1 + c_2 \omega \quad (1.4)$$

式中 c_p ——食品材料的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

c_1 、 c_2 ——经验公式的常数。

高于初始冻结温度时食品比热容的经验公式:

$$c_p = 0.837 + 3.349\omega \quad (\text{Siebel, 1892 年}) \quad (1.5)$$

$$c_p = 1.200 + 2.990\omega \quad (\text{Backstrom\&Emblak, 1965 年}) \quad (1.6)$$

$$c_p = 1.381 + 2.930\omega \quad (\text{Fikiin, 1974 年}) \quad (1.7)$$

$$c_p = 1.400 + 3.220\omega \quad (\text{Sharma and Thompson, 1973 年}) \quad (1.8)$$

$$c_p = 1.382 + 2.805\omega \quad (\text{Dominguez, 1974 年}) \quad (1.9)$$

$$c_p = 1.256 + 2.931\omega \quad (\text{Comini, 1974 年}) \quad (1.10)$$

$$c_p = 1.470 + 2.720\omega \quad (\text{Lamb, 1976 年}) \quad (1.11)$$

$$c_p = 1.672 + 2.508\omega \quad (\text{Riedel, 1956 年}) \quad (1.12)$$

上述公式中 c_p 的单位都是 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, ω 是食品材料中水的质量分数。

Sweat (1995) 综合了大量实验数据,并将它们画在图上,如图 1.3 所示。由图可以看出,对于含水量较高的食品材料,实测数据很一致,说明其比热容基本上可由含水量所确定;但对于含水量较低的食品材料,实测数据很分散,说明其比热容受到其他组分的强烈影响。

对于食品组分已知的食品,可以各主要组分的质量分数 ω_i 为变量,拟合高于初始冻结温度比热容的经验公式:

Leninger and Beverloo (1975 年)

$$c_p = 4.180(0.5\omega_f + 0.3\omega_s + \omega_w) \quad (1.13)$$

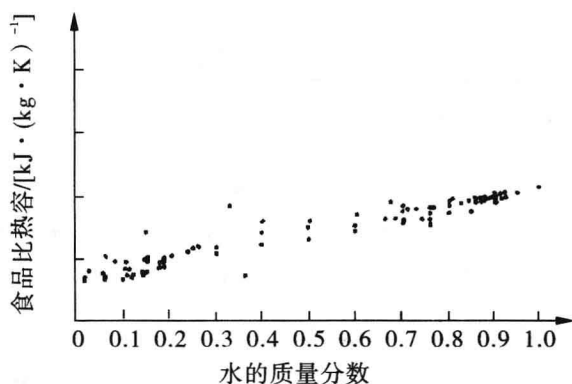


图 1.3 一些食品材料的冻结前比热容与含水量的实测数据分布

Van Beek(1976 年)

$$c_p = \sum (c_{pi} \omega_i) \quad (1.14)$$

Heldman 和 Singh(1981 年)

$$c_p = 4.18\omega_w + 1.549\omega_p + 1.424\omega_c + 1.675\omega_f + 0.837\omega_a \quad (1.15)$$

Choi 和 Okos(1983 年)

$$c_p = 4.180\omega_w + 1.711\omega_p + 1.574\omega_c + 1.928\omega_f + 0.908\omega_a \quad (1.16)$$

式中 $\omega_w, \omega_p, \omega_c, \omega_f, \omega_a, \omega_s$ ——分别表示食品中水分、蛋白质、碳水化合物、脂肪、灰分含量和固体材料的质量分数;

ω_i ——第 i 种组分的质量分数;

c_{pi} ——第 i 种组分的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

Choi 和 Okos (1986)提出了以下包含 n 种组分食品比热容计算公式:

$$c_p = \sum_{i=1}^n \omega_i c_{pi} \quad (1.17)$$

Choi 和 Okos (1986)给出了食品主要组分比热容的经验公式(公式中温度 T 为摄氏度):

$$c_{p(\text{水})} = 4081.7 - 5.3062T + 0.99516T^2 \quad (-40 \sim 0^\circ\text{C}) \quad (1.18)$$

$$c_{p(\text{水})} = 4176.2 - 0.0909T + 5.4731 \times 10^{-3}T^2 \quad (0 \sim 150^\circ\text{C}) \quad (1.19)$$

$$c_{p(\text{CHO})} = 1548.8 + 1.9625T - 5.9399 \times 10^{-3}T^2 \quad (-40 \sim 150^\circ\text{C}) \quad (1.20)$$

$$c_{p(\text{蛋白质})} = 2008.2 + 1.2089T - 1.3129 \times 10^{-3}T^2 \quad (-40 \sim 150^\circ\text{C}) \quad (1.21)$$

$$c_{p(\text{脂肪})} = 1984.2 + 1.4373T - 4.8008 \times 10^{-3}T^2 \quad (-40 \sim 150^\circ\text{C}) \quad (1.22)$$

$$c_{p(\text{灰分})} = 1092.6 + 1.8896T - 3.6817 \times 10^{-3}T^2 \quad (-40 \sim 150^\circ\text{C}) \quad (1.23)$$

$$c_{p(\text{水})} = 2062.3 + 6.0769T \quad (1.24)$$

湿空气的比热容可以表示为空气相对湿度 RH 的函数:

$$c_{p(\text{湿空气})} = c_{p(\text{干空气})}(1 + 0.837RH) \quad (1.25)$$

1.1.2.2 低于初始冻结温度的情况

如食品中的水分已被全部冻结,也可用 Seibel 建议的公式计算:

$$c_p = 0.837 + 1.256\omega \quad (\text{Siebel, 1892 年}) \quad (1.26)$$

附表1给出了一些食品原料的比热容数据,这些数据并非实验数据,是根据近似公式计算得到的。

1.1.3 食品材料的焓值

食品的焓值表征了食品的含有热量,它由显热和潜热两部分组成,包括了食品固态物、未冻结水、冻结水的显热和食品水分凝固或熔解潜热。显热与食品的温度有关,而潜热则与食品水分中被冻结水的质量分数有关。

对于像水这样的单一组分的物质,冻结相变过程是在某一确定的温度下进行的。因此,只要知道相变潜热(冰的融化热为 334.5 kJ/kg)、固相比热容和液相比热容,就可以计算冻结的冷负荷,没有必要计算焓值。

对于含有多种组分的食品材料,冻结过程从最高冻结温度(或称初始冻结温度)开始,在较宽的温度范围内不断进行,一般到 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 才完全冻结(个别食品到 $-95\text{ }^{\circ}\text{C}$ 还没完全冻结),在此温度范围内不会出现明显的温度平台。在冻结相变过程的热计算中除了考虑显热外,还需要考虑相变潜热这个因素,虽然可以用“表观比热容”表达,但使用并不方便,引入焓的概念可简化计算,所以常用焓值直接表达。

在传热计算中,我们只需考察食品冻结过程中焓值的相对变化,因此,可设食品材料在某一温度下的焓值为零。通常,设 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时食品材料的焓值为零。若已知食品原始含水量、冻前比热容、冻后比热容以及到某一温度时未冻水的质量分数或冻结水的质量分数,那么就能计算出该温度下食品的焓值。在工程实际中,通常采用查图表方法确定焓值。

附表2给出了一些食品材料在冷却时未冻水的质量分数和比焓。

Riedel 和 Dickerson 绘制了牛肉、水果汁和蔬菜汁的比焓与含水量的关系线图,如图1.4、图1.5所示。这些线图取 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 食品材料比焓为零。

对于含水量很高的食品,当温度稍低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,就有部分水被冻结,未冻水质量分数很快降低。以水的质量分数为90%的食品为例,当温度降到 $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,其中已有多于60%的水被冻结;而对于水的质量分数为60%的食品,只有温度降至 $-6\sim-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 才开始冻结;而到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,才能使其其中约60%的水被冻结。因此,食品原料的焓值主要与食品水分中被冻结水的质量分数有关。

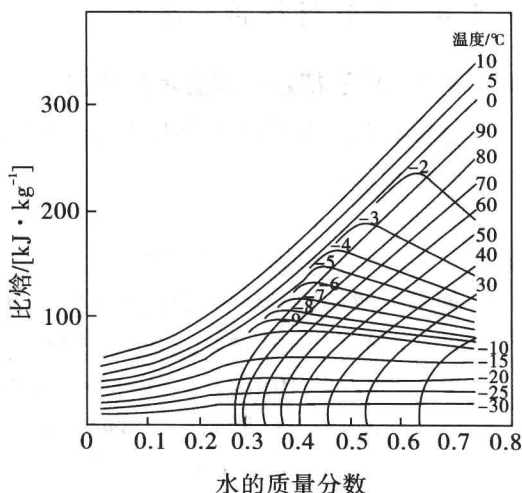


图1.4 牛肉的比焓图

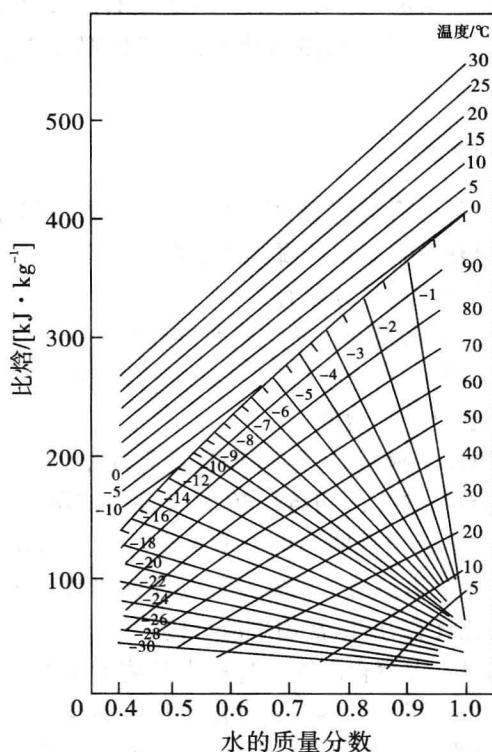


图 1.5 水果汁和蔬菜汁的比焓图

1.1.4 食品材料的热导率

1.1.4.1 高于初始冻结温度的情况

食品材料的热导率和含水量有着明显的关系,通常也以水的质量分数 ω 为变量,拟合为一般形式:

$$\lambda = c_1 + c_2\omega \quad (1.27)$$

式中 c_1 、 c_2 ——经验公式的常数。

如果不清楚食品材料的详细组分,只知道水的质量分数 ω ,可选用下述计算公式:

$$\lambda = 0.46 \text{ (肉)} \quad (\text{Sweat, 1975 年})$$

$$\lambda = 0.50 \text{ (肉)} \quad (\text{Backstrom, 1965 年})$$

$$\lambda = 0.18 \text{ (脂肪)} \quad (\text{Backstrom, 1965 年})$$

$$\lambda = 0.26 + 0.34\omega \quad (\text{Backstrom, 1965 年}) \quad (1.28)$$

$$\lambda = 0.056 + 0.567\omega \quad (\text{Bowman, 1970 年}) \quad (1.29)$$

$$\lambda = 0.081 + 0.568\omega \quad (\text{Bowman, 1970 年}) \quad (1.30)$$

$$\lambda = 0.564 + 0.0858\omega \text{ (高粱)} \quad (\text{Sharma and Thompson, 1973 年}) \quad (1.31)$$

$$\lambda = 0.26 + 0.33\omega \quad (\text{Comini, 1974 年}) \quad (1.32)$$

$$\lambda = 0.148 + 0.493\omega \text{ (水果和蔬菜)} \quad (\text{Sweat, 1974 年}) \quad (1.33)$$

$$\lambda = 0.0324 + 0.329\omega \text{ (鱼)} \quad (\text{Annamma and Rao, 1974 年}) \quad (1.34)$$



$$\lambda = 0.096 + 0.34\omega \text{ (碎肉) (Sorenfors, 1974 年)} \quad (1.35)$$

$$\lambda = 0.080 + 0.52\omega \text{ (鱼和肉) (Sweat, 1975 年)} \quad (1.36)$$

上述公式中 λ 的单位都是 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, ω 是食品材料中水的质量分数。因为多孔性食品的热导率与孔隙率有很大关系,孔隙率对热导率的影响有时比含水量对热导率的影响还大,所以,上述关系并不适用于多孔的、疏松的食品。

如果清楚掌握食品中各组分的质量分数,可采用如下近似公式计算热导率。

Dominguez et al. (1974 年) 提出

$$\lambda \approx 0.60\omega_w + 0.20\omega_p + 0.245\omega_c + 0.18\omega_f \quad (1.37)$$

Choi 和 Okos (1983 年) 提出

$$\lambda \approx 0.61\omega_w + 0.20\omega_p + 0.205\omega_c + 0.175\omega_f + 0.135\omega_a \quad (1.38)$$

Sweat (1995 年) 提出

$$\lambda \approx 0.58\omega_w + 0.155\omega_p + 0.25\omega_c + 0.16\omega_f + 0.135\omega_a \quad (1.39)$$

式中 $\omega_w, \omega_p, \omega_c, \omega_f, \omega_a$ ——食品中水分、蛋白质、碳水化合物、脂肪和灰分含量的质量分数。

由于蛋白质和碳水化合物的 λ 值与它们的化学、物理状态有关,因此上述计算式之间的偏差仍然很大。

1.1.4.2 低于初始冻结温度的情况

冻结过程中,食品材料的密度、孔隙率等会发生明显的变化,这些物性参数对热导率产生很大的影响。热导率还与食品原料的纤维方向有关,因此,要预测冻结食品的热导率是非常困难的。低于初始冻结温度的食品热导率计算可参考其他文献选用预测模型进行估计。

表 1.1 给出了一些食品原料热导率的实验数据。

表 1.1 一些食品原料热导率的实验数据

	温度/℃	水的质量分数	$\lambda/[\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}]$ (实验者)
苹果汁	20	87%	0.599 (Ricdel)
	80		0.631
	20	70%	0.504
	80		0.564
	20	36%	0.389
	80		0.435
苹果	8		0.418 (Gance)
干苹果	23	41.6%	0.219 (Sweat)
干杏	23	43.6%	0.375 (Sweat)
草莓酱	20	41.0%	0.338 (Sweat)

续表 1.1

	温度/℃	水的质量分数	$\lambda/[W \cdot (m \cdot K)^{-1}]$ (实验者)
牛肉脂肪	35	0	0.190 (Poppendick)
	35	20%	0.230
瘦牛肉 =	3	75%	0.506 (Lentz)
	-15		
瘦牛肉 =	20	79%	0.430 (Hill)
	-15		1.43
瘦牛肉 $\perp$	20	79%	0.408 (Hill)
	-15		
	3		0.471 (Lentz)
瘦牛肉 $\perp$	-15	74%	1.12
猪肉脂肪	3	6%	0.215 (Lentz)
	-15		0.218
瘦猪肉 = (6.1% 脂肪)	4		0.478 (Lentz)
	-15	72%	1.49
=	20		0.453 (Hill)
(6.7% 脂肪)	-13	76%	1.42
$\perp$	4		0.456 (Lentz)
(6.1% 脂肪)	-15	72%	1.29
$\perp$	20		0.505 (Hill)
(6.7% 脂肪)	-14	76%	1.30
蛋黄 (32.7% 的脂肪, 16.75 蛋白质)	31	50.6%	0.420 (Poppendick)
鳕鱼 $\perp$	3	83%	0.534
(0.1% 脂肪)	-15		1.46
鲑鱼 $\perp$	3		0.531 (Lentz)
(12% 脂肪)	-5	67%	1.24
全奶 (3% 脂肪)	28	90%	0.580 (Leidenfrost)
巧克力蛋糕	23	31.9%	0.106 (Sweat)

注:表中符号 = 和 $\perp$ 分别表示平行和垂直纤维方向。

1.1.5 食品材料的热扩散率

食品材料的热扩散率是涉及热导率 λ 、密度 ρ 和比热容 c_p 的一个比值,可以表述为:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (1.40)$$

式中 α ——食品材料的热扩散率, m^2/s 。



如果热导率、密度和比热容已知,可以计算出热扩散率。

食品材料的热扩散率强烈地依赖于食品中的水分含量。下面给出几个估算食品材料的热扩散率的经验模型。

(1) Dickerson's (1969) 模型

$$\alpha = 0.088 \times 10^{-6} + (\alpha_w - 0.088 \times 10^{-6}) \omega_w \quad (1.41)$$

(2) Marten's (1980) 模型

$$\alpha = 0.057363 \omega_w + 0.00028(T + 273) \times 10^{-6} \quad (1.42)$$

式中 α_w ——食品中水的热扩散率, m^2/s ;

ω_w ——食品中水的质量分数。

(3) Choi 和 Okos(1986) 提出,对液体食品使用以下模型:

$$\alpha = \sum \alpha_i V_i \quad (1.43)$$

式中 α_i ——食品中 i 组分的热扩散率, m^2/s ;

V_i ——食品中 i 组分的体积分数。

V_i 用下式计算:

$$V_i = \frac{\omega_i / \rho_i}{\sum (\omega_i / \rho_i)} \quad (1.44)$$

式中 ω_i ——食品中 i 组分的质量分数;

ρ_i ——食品中 i 组分的密度, kg/m^3 。

1.2 食品原料的化学组成

食品由多种化学物质组成,其化学成分十分复杂,主要有水分、蛋白质、脂肪、糖类、维生素、酶和矿物质等。这些物质是维持人体正常生理机能、保持人体健康不可缺少的营养物质。在冷冻冷藏过程中,这些物质均会发生一系列的物理和化学变化,以至于影响食品的食用价值和营养价值,因此,应尽量减少或避免食品原料营养成分的破坏与损失,保持新鲜食品原有的营养价值和风味。

1.2.1 主要动物性食品原料的化学组成

1.2.1.1 畜禽肉类的化学组成

畜肉和禽肉为人体提供所需要的蛋白质、脂肪、无机盐和维生素等。肉的化学组成包括水分、蛋白质、脂肪、无机物、维生素以及微量成分(含氮浸出物、糖原、乳酸)等,其含量与动物的种类、性别、季节、年龄有关,也受饲料、役用程度、营养状况以及肌肉部位等因素的影响。畜肉和禽肉味道鲜美、营养丰富,是实用价值很高的食品。

(1) 蛋白质 肉的化学成分中除水外,固体部分约有 $4/5$ 是蛋白质,其质量分数在 18% 左右。肌肉中的蛋白质,按其生物化学性质的不同或在肌肉组织中部位的不同,可以分为肌浆蛋白质、肌原纤维蛋白质和间质蛋白质。不同种类的蛋白质存在于肌膜、肌浆、肌原纤维、肌细胞核以及肌细胞间质之中。

1) 肌浆蛋白质 肌浆是指肌细胞中环绕并渗透肌原纤维的液体和悬浮于其中的各

种有机物、无机物以及亚细胞的细胞器如肌核、肌粒体、微粒体等。通常可以把由新鲜的肌肉中压榨出的含有可溶性蛋白质的液体称为肌浆。肌浆蛋白质包括肌溶蛋白、肌红蛋白、球蛋白以及肌粒中的蛋白质等。肌浆的含量一般占肉蛋白质总质量的20%~30%，在肌肉中约占6%。肌浆蛋白质易溶于水或低离子强度的中性盐溶液，是肉中最易提取的蛋白质，又因其提取液黏度很低，故常称之为肌肉的可溶性蛋白质。

2) 肌原纤维蛋白质 肌原纤维由细丝状的蛋白质凝胶组成。这些细丝平行排列成束，是肌肉的收缩单位，直接参与收缩过程。如果去掉肌原纤维蛋白质，肌纤维的组织形状将遭到破坏，所以常被称为肌肉的结构蛋白质或肌肉的不溶性蛋白质。肌原纤维蛋白质主要包括肌球蛋白、肌动蛋白、肌动球蛋白，此外尚有原肌球蛋白和2~3种调节性结构蛋白质。肌原纤维蛋白质的含量随肌肉活动而增加，并因静止或萎缩而减少，占肌肉蛋白质总质量的40%~60%。

3) 间质蛋白质 间质蛋白质又称基质蛋白质，是组成肌纤维坚硬组织的主要成分，主要包括胶原蛋白和弹性蛋白。间质蛋白质主要存在于结缔组织中，属于硬蛋白类，是不溶性蛋白质，其含量在肌肉中约占2%。

(2) 脂类 动物脂肪主要由硬脂酸、软脂酸和油酸组成。此外，还有不皂化物、甘油和微量脂溶性维生素、卵磷脂、脑磷脂(分布于内脏脂肪中)等。动物体内脂肪分布很广，一般家畜体内脂肪质量分数为10%~22%，肥育阶段可高达30%以上。每100g瘦猪肉、牛肉和羊肉中含有总胆固醇70~75mg。

脂肪的性质随动物的种类而异，主要受脂肪酸含量的影响。由于动物脂肪含有大量的高级饱和脂肪酸(如硬脂酸)，所以在常温下多呈凝固状态。如果其中含熔点低的油酸或低级脂肪酸较多时，则呈柔软或流动状态。磷脂在空气中极易氧化，且产生异味和变色，加热会促进其变化，如猪肉、牛肉中脑磷脂受热时，产生强烈的鱼腥味。磷脂变黑时，伴有酸败现象。

(3) 糖类 糖类在动物组织中含量很少，以游离或结合的形式存在于动物组织或组织液中，具有重要的生理功能。葡萄糖是提供肌肉收缩能量的来源，核糖是细胞核酸的组成成分，而糖原(葡萄糖的聚合物)则是动物体内糖的主要储存形式。

糖原是一种广泛分布于哺乳类及其他动物肝、肌肉等组织的多分散性的高度分支的葡聚糖，由肝脏和肌肉合成和储存，是含有许多葡萄糖分子和支链的动物多糖，因此也称动物淀粉。糖原的两个主要储藏部位分别为肝脏及骨骼肌。糖原在肝脏中的质量分数高达2%~8%，这一比例高于肌肉，但在肌肉中储存的糖原总量比肝脏多。肝脏中储存的糖原可维持正常的血糖浓度，肌肉中的糖原可提供肌体运动所需要的能量。动物肌肉中的肌糖原在自溶酶所促进的无氧分解的酵解作用下产生乳酸，使肉的pH值降低，由中性变成酸性，促进肉的成熟。糖原多数与肌球蛋白结合，与肌肉的生理作用有着密切的关系。运动激烈部分的肌肉内糖原的质量分数较高，但经屠宰后随时间的延长逐渐减少。以牛肉为例，最初含糖原0.71%，在室温下放置4h后，则减至0.32%。若以畜禽种类而言，糖原的质量分数也各不相同，兔肉及马肉中的质量分数最高。

(4) 浸出物 广义上说，浸出物是煮肉时溶出的成分；狭义上说，浸出物是将其中的无机物、蛋白质、脂类、维生素等除去后剩余的有机物。浸出物成分中含有的主要有机物为核苷酸类物质(ATP、ADP、ITP等)、肽、氨基酸、有机酸、嘌呤碱、糖原等。组织中浸出