

Physical Properties of Foods

食品科学与工程类 系列规划教材

食品物性学

张志健 秦礼康 主编



科学出版社

食品科学与工程类系列规划教材
陕西理工大学教材建设经费资助

食品物性学

张志健 秦礼康 主编

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书由编者基于多年教学与科研的成果和经验,参考大量国内外相关资料编写而成。全书包括绪论、食品的结构特性、食品的几何特性、食品的力学特性、食品的热特性、食品的界面特性、食品的电特性和食品的光学性质 8 个部分。在概括性回顾和补充相关普通物理学知识和技术的基础上,重点介绍与食品贮藏、加工、检测相关的物理特性和技术基础,并对相关食品物性的研究方法、技术及目前尚未形成体系的相关零散研究成果作了简要介绍。全书以食品的物理特性为主线,使内容体系更符合基础学科的特点,同时阐述了食品物性学与食品质构学、食品感官评价的关系,避免了学科或课程教学内容的重叠。

本书适于食品类专业本科生和研究生学习使用,也可供食品、农产品开发研究和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

食品物性学 / 张志健, 秦礼康主编. —北京: 科学出版社, 2018. 11
(食品科学与工程类系列规划教材)
ISBN 978-7-03-058493-9

I. ①食… II. ①张… ②秦… III. ①食品-物性学-高等学校-教材
IV. ①TS201.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 181694 号

责任编辑: 席 慧 张静秋 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 铭轩堂

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>

北京九州迅驰传媒文化有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 19

字数: 480 000

定价: 59.80 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《食品物性学》编委会名单

主 编 张志健 (陕西理工大学)

秦礼康 (贵州大学)

副主编 燕 飞 (陕西理工大学)

孟永宏 (陕西师范大学)

王俊钢 (新疆农垦科学院)

编写人员 (按姓氏笔画排序)

卫永华 (山西师范大学)

王修俊 (贵州大学)

王俊钢 (新疆农垦科学院)

张志健 (陕西理工大学)

金文刚 (陕西理工大学)

孟永宏 (陕西师范大学)

钟 建 (上海海洋大学)

秦礼康 (贵州大学)

曾海英 (贵州大学)

燕 飞 (陕西理工大学)

前 言

食物物性学 (physical properties of foods), 也称为食物物理学, 与食物化学、食物生物学并列为食物科学的三大基础学科, 是一门以食物 (包括食物原料) 为研究对象, 主要研究食物物理特性的科学。

有关食物物性学相关内容的研究可追溯到胡克 (Hooke) 等建立的弹性理论和牛顿 (Newton) 等建立的流体力学理论, 距今已有 300 多年的历史, 而针对食物物性的研究始于荷兰人 Scott Blair 于 1953 年编写的 *Foodstuffs: Their Plasticity, Fluidity and Consistency* 一书。日本、韩国、美国等许多国家的食物类专业均开设有食物物性方面的课程, 并有相关的教材出版 (如美国康乃尔大学 Malcolm Bourne 教授的 *Food Texture and Viscosity*, 日本种谷其一教授的《食物物理》等)。我国有关食物物性的研究起步较晚, 始于 1987 年赵学笃、陈元生、张守勤编著的《农业物料学》。在 20 世纪末, 我国才开始对研究生开设食物物性学课程, 目前许多食物类本科专业也开设此课程, 已有多部《食物物性学》教材。

编者对食物物性学这门课程关注多年, 查阅了国内外出版的相关教材或专著, 发现目前国内外出版的《食物物性学》教材大多以“食物质构”为核心, 讨论与食物感官特性和评价有关的物理特性、研究方法、检测技术和仪器, 且用了大量篇幅来论述有关食物质构和感官评价的内容, 造成食物物性学与食物感官评价的内容大量重复, 与食物质构学的概念混淆。有的将食物的物性与食物物性的应用混淆, 在食物物性学教学中大篇幅介绍有关食物物性应用的技术和仪器设备。编者认为食物物性学是一门专业基础学科, 应将研究或教学重点放在食物 (包括原料) 的物理特性及研究方法 (技术) 方面, 为食品加工及检测技术 (特别是食物感官特性的客观评价) 的开发奠定基础, 不应过多、过细地介绍食物物性的应用, 应避免与食物感官评价、仪器分析、食物工程原理、食品加工技术等课程内容的重复。基于上述原因, 我们组织编写这本《食物物性学》教材, 期望克服现有教材的不足, 使该课程或学科的内容体系更趋科学合理, 能为食物工程原理、食物检测技术类课程 (如食物仪器分析、食物感官评价等) 和食物工艺学等课程的教学, 食物质构的研究, 食品加工技术、检测技术和仪器的开发奠定理论和技术基础。

本教材除绪论外共设 7 章, 分别介绍食物的结构特性、几何特性、力学特性、热特性、界面特性、电特性和光学特性。每章在概括性回顾和补充相关普通物理学知识和技术的基础上, 重点介绍与食物贮藏、加工、检测相关的物理特性和技术基础, 对相关研究方法、技术及目前尚未形成体系的相关零散研究成果作了简要介绍。在整个内容体系的设计上, 主要按物理特性编排, 使内容体系更符合专业基础学科的特点。

本教材由陕西理工大学张志健教授规划设计, 张志健教授和秦礼康教授任主编, 燕飞博士、孟永宏博士和王俊钢研究员任副主编, 参编人员及分工情况如下: 绪论由张志健、秦礼

康负责、第1章由钟建负责、第2章由燕飞和张志健负责、第3章由王修俊和孟永宏负责、第4章由孟永宏和王俊钢负责、第5章由张志健和卫永华负责、第6章由金文刚和燕飞负责、第7章由孟永宏和曾海英负责。

由于食物物性学是一门新兴学科，内容体系尚不健全，有些方面还未达成共识，且不少方面的研究成果还很少甚至是空白，目前还很难保证内容体系系统、完整。同时编者学识、能力有限，在本教材编写中难免存在不足和缺陷，期望广大师生和读者批评指正。

在本教材编写过程中参考、引用了大量专家、学者编写的教材、专著及研究成果，并得到陕西理工大学教材建设经费的资助，陕西理工大学研究生刘永娟、邹庭等做了大量基础性工作，在此一并表示感谢！

编者

2018年6月

目 录

前言

绪论	1
0.1 食品物性学的概念、研究内容和目的	1
0.2 食品物性学与相关学科的关系	1
0.3 食品物性学的研究现状和发展	2
思考题	3
第1章 食品的结构特性	4
1.1 食品分子的结构与相互作用	4
1.1.1 食品分子间的作用力	4
1.1.2 食品高分子物质的分子结构	7
1.1.3 高分子链的构象与柔性	9
1.2 食品的分散体系	11
1.2.1 相的概念与特点	11
1.2.2 分散体系的概念与分类	12
1.2.3 食品中常见的分散体系	13
1.3 食品的聚集态	20
1.3.1 相态的概念与相图	21
1.3.2 晶态食品的结构	24
1.3.3 液态食品的结构	30
1.3.4 非晶态食品的结构	31
1.3.5 液晶态食品的结构	33
1.4 食品的组织结构	36
1.4.1 植物组织结构概述	36
1.4.2 谷物种子与淀粉粒的结构	38
1.4.3 肉质果实的组织结构	40
1.4.4 肉类食品的组织结构	42
1.4.5 禽蛋的结构	45
思考题	47

第2章 食品的几何特性	48
2.1 食品的大小	48
2.1.1 几何学粒径	48
2.1.2 当量直径	49
2.1.3 比表面积	51
2.1.4 平均粒径	53
2.2 食品的形状	54
2.2.1 颗粒的形式与形状	54
2.2.2 球形度	55
2.2.3 圆度	56
2.2.4 曲率半径	57
2.3 固体食品的体积	57
2.3.1 固体食品的多孔性	57
2.3.2 固体的膨胀与收缩	58
2.3.3 固体体积的测定方法	60
2.3.4 固体体积的表达方式与孔隙体积计算	63
2.4 食品的密度	64
2.4.1 液体的密度	64
2.4.2 固体的密度	65
2.4.3 食品物料密度与温度关系	66
2.5 食品的孔隙率	67
2.5.1 物料孔隙率的表示方式	67
2.5.2 物料孔隙率的变化	68
2.5.3 物料孔隙率的测定方法	70
2.6 颗粒粒径分析	71
2.6.1 颗粒粒径分析方法	71
2.6.2 粒径分布表示方式与方法	74
2.7 食品分散体系的特性	77
2.7.1 内相粒度对液体食品特性的影响	77
2.7.2 食品分散体系中粒子之间的相互作用	78
2.7.3 食品分散体系的失稳定现象	79
思考题	81
第3章 食品的力学特性	82
3.1 作用力与形变	82
3.1.1 作用力与应力	82
3.1.2 形变与应变	83
3.1.3 应力—应变关系	85

3.2 食品的基本力学特性	90
3.2.1 强度与硬度	90
3.2.2 弹性与塑性	91
3.2.3 韧性和脆性	92
3.2.4 黏性与黏弹性	93
3.2.5 应力松弛与蠕变	94
3.2.6 渗透性	97
3.2.7 扩散性	99
3.3 黏度	100
3.3.1 牛顿黏性定律	100
3.3.2 液体黏度的表示方法与应用	102
3.3.3 影响黏度的因素	104
3.3.4 黏度的测定	107
3.4 非牛顿型流体的特性	110
3.4.1 非牛顿性流体特性概述	110
3.4.2 剪切稀化流体	111
3.4.3 剪切增稠流体	112
3.4.4 宾汉塑性流体	113
3.4.5 非宾汉塑性流体	113
3.4.6 时间依赖性流体	114
3.4.7 力学模型	116
3.5 散粒体的摩擦性	120
3.5.1 散粒物料的黏聚性与变形	121
3.5.2 散粒物料摩擦性分析	123
3.5.3 散粒物料的摩擦角	125
思考题	130
第4章 食品的热特性	131
4.1 食品的热容量	131
4.1.1 食品热容量与比热容概述	131
4.1.2 食品比热容的测定	135
4.2 食品的导热性	138
4.2.1 食品导热性概述	138
4.2.2 食品的导热模型	142
4.2.3 食品热导率的测定	147
4.3 食品的导温性	150
4.3.1 导温性的概念与导温系数	150
4.3.2 影响导温性的因素	151
4.3.3 食品导温系数的测定	152

4.4 食品的相态变化	153
4.4.1 相态变化的概念与相变温度	153
4.4.2 小分子物质的玻璃化转变	155
4.4.3 高聚物的相态转变	157
4.4.4 淀粉加工过程的相态转变	160
思考题	167
第5章 食品的界面特性	168
5.1 界面张力	168
5.1.1 界面现象与界面能	168
5.1.2 固—液—气体系	171
5.1.3 液—液—气体系	175
5.2 界面特性的测定	177
5.2.1 界面张力的测定	177
5.2.2 接触角的测定	179
5.3 食品的吸附	180
5.3.1 吸附的概念与分类	180
5.3.2 吸附机理	182
5.3.3 吸附等温线	184
5.3.4 食品对水的吸附	188
5.4 食品界面特性的改变与应用	193
5.4.1 表面活性剂概述	193
5.4.2 乳化与破乳	194
5.4.3 起泡与消泡	203
思考题	210
第6章 食品的电特性	211
6.1 食品的极性与极化	211
6.1.1 食品的极性	211
6.1.2 食品的极化	212
6.2 食品的介电特性	216
6.2.1 介电常数与损耗概述	216
6.2.2 食品成分的介电特性及影响因素	221
6.2.3 食品介电特性的测定	231
6.2.4 食品介电特性的应用	234
6.3 食品的导电性	236
6.3.1 导电性的概念	236
6.3.2 液体食品的导电性	240
6.3.3 生物组织食品的导电性	246

6.3.4 食品电导率的检测与应用	249
思考题	254
第7章 食品的光学性质	256
7.1 光的性质概述	256
7.1.1 光的概念	256
7.1.2 光的传播规律	257
7.1.3 色彩的概念与特性	258
7.2 食品与光的相互作用	260
7.2.1 食品对光的反射	260
7.2.2 食品对光的折射	262
7.2.3 食品对光的吸收、散射与透过	264
7.3 食品的生物发光	269
7.3.1 生物发光概述	269
7.3.2 有关食品生物发光的研究	272
7.4 食品色泽的形成	278
7.4.1 食品色泽形成的条件	278
7.4.2 食品颜色形成机理	279
7.4.3 食品颜色的调配	283
7.4.4 食品色彩的表达	285
思考题	289
参考文献	291

0.1 食品物性学的概念、研究内容和目的

食品的性质由其组成成分和组织结构决定,食品原料(农产品)的生理活动对食品的特性也有重要影响,而食品的物理特性决定了食品的加工方法和技术。此外,食品可消化吸收利用的特性也是人们感兴趣的食品特性之一。因此,食品(包括食品原料及中间产品)的基本特性包括物理性质、化学性质和生物学性质,从而形成了研究食品特性的三门基础学科:食品物理学(国内称为食品物性学)、食品化学和食品生物学(目前,国内将食品生物学特性的研究分散在食品生物化学、食品营养学、食品原料学等学科中,尚未设立研究食品生物学特性的专门学科,即食品生物学)。

食品物性学是以食品(包括食品原料)为研究对象,研究食品的物理结构、物理性质和物理变化及机理的科学。从研究对象来看,食品物性学是食品科学的一个分支学科;从研究内容来看,它又是物理学的一个新分支学科。因此食品物性学是一门典型的交叉学科。食品物性学的研究内容主要包括食品的结构特性、几何特性、力学特性、界面特性、热特性、电特性及光学特性等。由于食品种类繁多、构成复杂,并且人们研究食品物理特性的目的多样,因此食品物性学较物理学有更广阔的研究领域,如食品物性学不仅要研究食品本身的物理特性,食品物性的分析、检测和应用,食品物性与食品品质特性和加工处理特性的关系等,还要研究食品贮藏、加工及食品化学变化、生化变化等对食品物性的影响。

随着食品科学技术的发展,人们对食品研究、认识的不断深入及食品产业的高速发展,食品工程技术人员和科学家对食品的物理特性越来越感兴趣。人们已深刻认识到食品贮藏、加工主要是对食品原料的物理性处理,而化学、生物学技术方法的运用仅仅是为了满足某些特殊的需要或达到某种特殊要求;食品的物理特性与食品的品质有关,决定食品在被消费或食用时的外观、口感和心理感受;食品的物理特性(食品物性)反映了食品在各种加工和贮藏环境下的物理变化规律及对食品加工过程的重要影响,准确了解食品物性参数是科学选择食品加工方法、开发新食品加工技术或对传统加工方法和技术的改造,新食品和新食品资源开发及食品工程设计的基础。概括来讲,研究食品物理特性的目的主要有如下几个方面。

1) 了解与食品加工有关的物理特性,以指导食品加工、新食品加工技术开发或传统加工方法与技术的改造,新食品和新食品资源开发,及食品工程设计和加工机械设备开发等。

2) 了解与食品品质有关的物理特性,以指导食品品质客观评价、质量控制方法的建立、检测仪器设备的开发等。

3) 了解与食品贮藏、加工过程变化有关的物理特性,以指导食品科学研究方法的建立及食品货架寿命的预测等。

0.2 食品物性学与相关学科的关系

食品的物理、几何等特性与感官特性紧密相关,不可分割,是表象与本质的关系。例

如,冰淇淋的口感不爽滑、有砂粒感的主要原因是冰淇淋中冰晶较大;酱类食品易涂抹的主要原因是屈服应力小、流动性好;面条类食品筋道、有咬劲、耐咀嚼的主要原因是弹性模量大、断裂伸长率大等。因此,对食品质构的研究涉及两个重要的分支学科:一是食物物性学,即研究与食品贮藏、加工及品质(包括质构)有关的物理、几何等特性,通过对与食品质构有关的物理、几何等特性的研究,形成对食品质构的客观认识;二是食品感官评价,即研究与食品品质(包括质地)有关的感官特性,通过人的感觉器官对食品的感知,形成对食品品质的主观认识。从而也形成对食品特性测定的两类方法:具有客观性的仪器检测法和具有主观性的感官评价法。这类似于Muller认为对光的研究有两个不同的分支学科:一个是光学,即研究光的物理性质,包括反射、折射、光波理论等;另一个是视觉科学,即研究人类对光的生理和心理反应,如视觉的形成、对颜色的感知、亮暗适应性等。

虽然食品感官评价存在评价结果不可量化,受评价环境条件(温度、光线等)和评价人员年龄、生理、经验等影响较大,描述感官评价结果的术语可能存在不同的解释或理解等问题,但食品的感官品质或特性是决定消费者能否接受食品的关键,只有符合消费者感官要求或满足消费者嗜好的食品才有可能被接受或喜好。这便向人们提出一个重要问题,即如何建立食品的物理或几何特性与感官特性之间的关系,并能利用各种物理、机械手段对与食品感官特性相关的物理、几何特性进行检测,形成对食品感官品质的客观认识。对此,人们已做了大量研究工作,并开发出多种模拟感官评价的食品检测技术和仪器设备,如质构多面剖析技术(texture profile analysis, TPA)、质构仪等。这也表明食物物性学与食品质构学、食品感官评价存在紧密的联系。

食物物性学是研究食品物理特性的专业基础学科,学习和研究食品的物理特性必须具备扎实的物理学基础知识和技能,能熟练运用甚至开发物理特性检测仪器。研究食品的物理特性还需要一定的高等数学知识,以便能科学处理实验数据、建立数学模型。食品的物性取决于食品的组成与结构,大部分食品原料是生物组织或器官。因此,学习和研究食品物理特性还需要具备化学(有机化学、无机化学、食品化学、生物化学等),生物学,生理学等相关知识和技术。可见食物物性学与物理学、化学、生物学、生理学、高等数学等学科有着密切的关系,是建立在这些学科基础之上的新学科。

食物物性学的研究目的在于为食品加工、食品品质评价、食品科学研究及预测食品货架寿命等奠定基础。因此,食物物性学又是学习和研究食品工程原理,食品质构学,食品工艺学,食品工程设备,食品工程设计,食品检验(感官评价、理化检验、仪器分析等),食品质量控制,食品包装等学科知识和技术的基础,是食品科学体系的重要专业基础学科。

0.3 食物物性学的研究现状和发展

食物物性学中研究最早的是食品力学方面的性质,即食品流变特性,并最早形成了食品流变学。食品流变学的基础是流体力学和黏弹性理论。黏弹性理论是从20世纪初在欧美等地开始的,是胡克等建立的弹性理论及牛顿等建立的流体力学理论的发展。弹性理论、流体力学理论距今已有300多年的历史。美国化学家宾汉姆(Bingham)最早提出“流变学”(rheology)的概念,“流变”即流动的意思。最早将流变学引入食品加工研究的是荷兰人Scott Blair,1953年他编写了*Foodstuffs: Their Plasticity, Fluidity and Consistency*一书,并第一个定义了“texture”,即“质地”的概念。1966年Mohsenin出版了*Physical Properties of Plant and Animal Materials*,该书主要对农产品物料的力学、热学、光学和电学性进行了系统

论述。1968年日本东京召开了首届国际流变学会议。1969年荷兰创办了 *Journal of Texture Studies* 专业杂志,大量发表关于食品物性研究的论文,推进了食品物性学的发展。研究最多的是植物组织(水果、蔬菜)的评价,其次是食品力学性质的测定、感官评价与仪器测定的比较和相关关系。1973年 B.Muller 出版了 *Introduction to Food Rheology*,进一步推动了食品物性学的研究和应用。1975~1995年,日本化学学会组织了食品物性学年会,共出版论文集19集。1980年 Mohsenin 出版了 *Thermal Properties of Food and Agricultural Materials*,主要论述了农产品物料的热学测定、热传导的基本知识,及食品冷却、冷冻、干燥、热处理、呼吸和膨胀的有关知识。1984年 J.Prentice 出版了 *Measurement in the Rheology of Foodstuffs*,阐述了食品流变特性的测量原理和方法,同时从微观结构的角度的角度分析了影响食品流变性质的因素和机理。1989年种谷真一出版了《食品的物理》,从物理学的角度分析各种状态的物料在加工、烹饪、发酵过程中物性变化的机理。1989年川端晶子出版了《食品物性学》,从食品的流变学性质和质地两个方面论述了食品胶体体系的特征,以及凝胶状、凝脂状、细胞状、纤维状、多孔状食品的物理特性。

我国有关食品物性的研究起步较晚,相对来说,对谷物、果实等农产食品物理特性的研究较早、较多。1987年赵学笃、陈元生、张守勤出版了《农业物料学》。1994年周祖锔出版了《农业物料学》。1998年李里特、彭明喜出版了《食品物理学》《生物物料学》。1998年李里特出版了《食品物性学》,并对研究生开设食品物性学课程。2005年肖生苓、江礼家出版了《物料学》。2006年屠康、姜松、朱文学,2008年李云飞、殷涌光、金万镐,2016年宋洪波等分别出版了《食品物性学》教材。

总之,几十年来食品物性学有很大的发展,但仍然处于发展阶段,还需要进行大量研究。到目前为止,对食品流变性的研究比较深入,而对光、电、热、声等特性的研究相对较少,从整体来看仍缺乏系统和完整性。

思考题

1. 什么是食品物性学?它是一门什么样的课程?
2. 食品物性学的主要研究内容有哪些?
3. 研究(学习)食品物性学的目的或意义是什么?
4. 食品物性学在食品科学体系中处于什么样的地位?它和哪些学科或课程关系最为紧密?并作简要说明。
5. 简要说明食品物性学、食品质构学和食品感官评价的关系。

第1章 食品的结构特性

物质的结构是指物质的组成单元原子或分子之间相互吸引和排斥的作用达到平衡时在空间的几何排列。将分子内原子或基团的排列称为分子结构，分子之间的排列称为聚集态结构。从食品组成来看，食品绝大部分属于复杂的混合物，不仅包含无机物、有机物，有的食品还是具有细胞结构的生物体。从食品的形态上来看，食品有液状、凝胶状、细胞状、纤维状、多孔状、块状、粉粒状等。从分子层面来看，任何食品都是由一定量的大分子和小分子所组成。食品加工会改变食品的宏观形态结构，这往往是其组成和微观结构变化的结果。结构决定性质，构成食品的物质种类不同、分子结构和聚集态不同，必然导致不同食品具有不同的特性，包括化学特性、物理特性和生物学特性。因此，食品加工不仅会改变食品的结构，而且会改变食品的性质。要研究食品的性质，必须先搞清楚食品的结构。

1.1 食品分子的结构与相互作用

1.1.1 食品分子间的作用力

构成食品的分子间既存在吸引力又存在排斥力。当吸引力和排斥力达到平衡时就形成了平衡态结构。分子间的相互作用力有键合力和非键合力（图 1-1）：键合力包括共价键、离子键、金属键等；非键合力包括范德瓦耳斯力、氢键、疏水键等。下文只介绍非键合力即次级键。

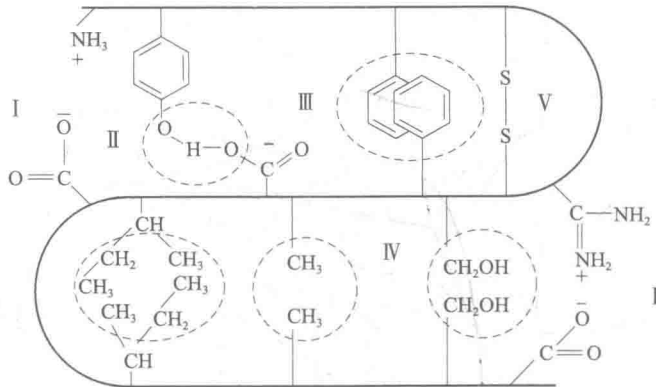


图 1-1 常见次级键

I. 盐键；II. 氢键；III. 疏水键；IV. 范德瓦耳斯力；V. 二硫键

1.1.1.1 范德瓦耳斯力

范德瓦耳斯力（又称分子作用力）是产生于分子或原子之间的静电相互作用，包括取向力、诱导力和色散力。虽然范德瓦耳斯力只有 $0.4 \sim 4.0\text{kJ/mol}$ ，但是大量分子间的相互作用则会使物质变得十分稳固。

(1) 取向力 取向力 (orientation force, dipole-dipole force) 发生在极性分子与极性

分子之间。由于极性分子的电性分布不均匀，一端带正电，一端带负电，形成偶极（固有偶极）。因此，当两个极性分子相互接近时，由于彼此偶极的同极相斥、异极相吸，两个分子必将发生相对转动。这种偶极子的互相转动，使偶极子相反的极相对，称为“取向”。这时由于相反的极相距较近，同极相距较远，导致引力大于斥力，两个分子靠近，当接近到一定距离之后，斥力与引力达到相对平衡。这种由于极性分子的取向而产生的分子间的作用力，称为取向力。取向力与分子的偶极矩平方成正比，即分子的极性越大，取向力越大。取向力与绝对温度成反比，温度越高，取向力越弱。

（2）诱导力 在极性分子和非极性分子之间，及极性分子和极性分子之间都存在诱导力（induction force）。由于极性分子偶极所产生的电场对非极性分子产生影响，使非极性分子电子云变形（即电子云被吸向极性分子偶极带正电的一侧），结果使非极性分子的电子云与原子核发生相对位移。本来非极性分子的正、负电荷重心是重合的，相对位移后就不再重合，使非极性分子产生了偶极。这种电荷重心的相对位移称为“变形”，因变形而产生的偶极，称为诱导偶极，以区别于极性分子的固有偶极。诱导偶极和固有偶极相似，也存在相互吸引或排斥，这种由于诱导偶极而产生的作用力，称为诱导力。在极性分子和极性分子之间，除了取向力外，极性分子之间的相互作用，也会产生诱导偶极，其结果使分子的偶极矩增大，即极性分子间既具有取向力又具有诱导力。在阳离子和阴离子之间也会出现诱导力。

（3）色散力 色散力（dispersion force）是分子的瞬时偶极间的作用力，即由于电子的运动和原子核的不停振动，在某一瞬间一些电子与原子核之间必然会发生相对位移，产生正电荷重心和负电荷重心瞬时的不重合，从而产生瞬时偶极。色散力和相互作用分子的变形性有关，变形性越大（一般分子质量越大，变形性越大）色散力越大。色散力也与相互作用分子的电离势有关，分子的电离势越低（分子内所含的电子数越多）色散力越大。色散力存在于一切极性和非极性分子中。

可见，极性分子与极性分子之间同时存在取向力、诱导力和色散力；极性分子与非极性分子之间则存在诱导力和色散力；非极性分子与非极性分子之间只存在色散力。这三种类型力的比例决定于相互作用分子的极性和变形性。极性越大，取向力的作用越重要；变形性越大，色散力就越重要；诱导力则与这两种因素都有关。但对大多数分子来说，色散力是主要的，只有偶极矩很大的分子（如水）取向力才是主要的，而诱导力通常很小。

1.1.1.2 氢键

氢原子与电负性大、半径小的原子 X（氟、氧、氮等）以共价键结合，若与电负性大的原子 Y（可以与 X 相同）接近，在 X 与 Y 之间以氢为媒介，生成 X—H…Y 形式的一种特殊的分子间或分子内相互作用，称为氢键（hydrogen bond）。其本质是强极性键（X—H）上的氢核与电负性很大的、含孤电子对并带有部分负电荷的原子 Y 之间的静电作用力。氢键是一种比范德瓦耳斯力稍强，比共价键和离子键弱很多的相互作用，其稳定性弱于共价键和离子键。氢键键能大多在 25 ~ 40kJ/mol。

氢键通常是物质在液态时形成的，但形成后有时也能继续存在于某些晶态甚至气态物质中。能够形成氢键的物质很多，如水、水合物、氨合物、无机酸和某些有机化合物等。氢键的存在影响到物质的某些性质。分子间有氢键的物质熔化或气化时，除了要克服纯粹的分子间力外还必须额外供应一份能量来破坏分子间的氢键，所以这些物质的熔、沸点比同系列氢化物的熔、沸点高（图 1-2），但分子内生成氢键，熔、沸点常降低。因为物质的熔、沸点与

分子间作用力有关，如果分子内形成氢键，那么相应的分子间的作用就会减弱。

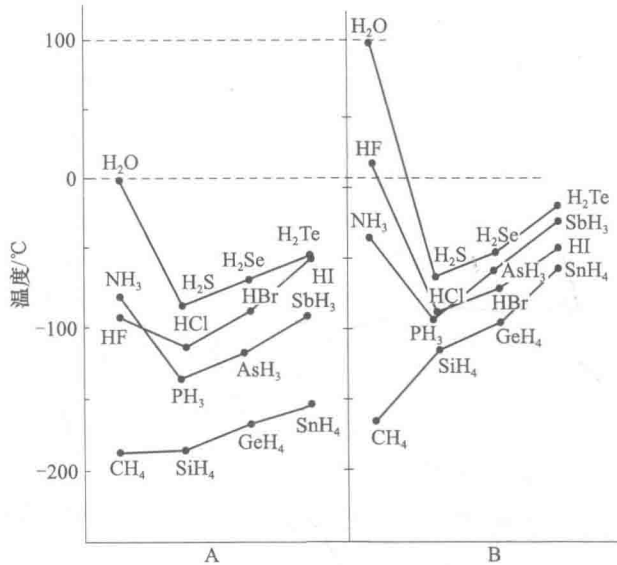


图 1-2 结构相似的同系物熔沸点的比较

A. 熔点; B. 沸点

在极性溶剂中，如果溶质分子与溶剂分子之间可以形成氢键，则溶质的溶解度增大。分子间有氢键的液体，一般黏度较大。

由若干个简单分子联成复杂分子而又不会改变原物质化学性质的现象称为分子缔合。液体分子间若形成氢键有可能发生缔合现象，分子缔合的结果会影响液体密度。

由于具有静电性质和定向性质，氢键在分子形成晶体的堆积过程中有一定作用。尤其当体系中形成较多氢键时，通过氢键连接成网络结构和多维结构在晶体工程学中有重要意义。

1.1.1.3 疏水键

疏水键 (hydrophobic bond) 是不溶于水的分子或基团间的相互作用。当疏水化合物或基团进入极性溶剂 (如水) 中时，因不能被水溶剂化，界面水分子整齐排列，导致体系熵值降低，能量增加，产生界面张力。为了降低界面张力，使体系趋于稳定，疏水化合物会自发地相互靠近及疏水基团收缩、卷曲和结合，将原来规则排布于界面的水分子挤出，减少疏水物与水的接触面积，挤出的水分子呈无序状态，熵值回升，焓变值减少，从而降低体系能量。这种非极性的疏水化合物及疏水基团因能量效应和熵效应等热力学作用在水中相互结合的作用称为疏水键。可见，疏水键并不是疏水基团之间存在的引力，不是真正的化学键，而是体系为了稳定而进行的自发调整，因此也称为疏水作用力。

1.1.1.4 内聚能

内聚能是衡量聚集态物质间作用力的参数，是指聚集态物质除去分子间作用力需要外界提供的能量，反映分子间相互作用力的大小，其定义是 1mol 的凝聚物汽化时 (相互作用力为零的距离) 所吸收的能量：