

现代化学基础丛书·典藏版 32

胶体科学

[荷] M.A.Cohen Stuart◎著
阎云 黄建滨◎译



科学出版社

现代化学基础丛书·典藏版 32

胶体科学

[荷] M. A. Cohen Stuart 著

阎云 黄建滨 译

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书用通俗易懂的语言,引用大量的实例和图示,重点阐述胶体科学的基础知识和基本原理。全书分为如下5个部分:(一)胶体科学基础,包括第1、2、3、4章,这一部分的主要内容为胶体及胶体科学简介、胶体粒子的特点及其质量和尺寸表征方法、胶体研究中常见的大分子体系的特点;(二)胶体体系的重要性质,包括第5、6、7章,分别阐述胶体粒子的双电层现象、流变性质以及电动性质;(三)胶体的稳定性,包括第8、9两章,主要内容包括憎液胶体的抗聚结稳定性、大分子对胶体稳定性的影响;(四)不同胶体体系的制备及性质,包括第10、11、12章,主要阐述憎液溶胶的制备及生长规律、泡沫及乳状液的稳定性、缔合胶体的形成及胶束形成热力学;(五)习题及参考答案,包括各章思考题、第13章和第14章,其中第13章为附加习题,第14章为各章思考题/习题的参考答案。

本书适合作为胶体化学、高分子化学专业的本科生及研究生的参考教材,也适合作为物理化学、材料、食品、制药、生物等领域科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代化学基础丛书:典藏版/朱清时主编. —北京:科学出版社,2016.1

ISBN 978-7-03-046874-1

I. ①现… II. ①朱… III. ①化学 IV. ①O6

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第308944号

责任编辑:张淑晓 丛洪杰/责任校对:宋玲玲

责任印制:钱玉芬/封面设计:陈敬

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年1月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2016年1月第一次印刷 印张: 15 1/2

字数: 289 000

定价: 6000.00元(全42册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

胶体与界面科学领域的学者大凡都了解，胶体科学的发展与荷兰科学家的贡献密不可分。如，van't Hoff, van der Waals, Debye, Overbeek 等，无一不是这一领域如雷贯耳的科学大师。巨人虽逝，但他们对现代科学的贡献却永远留在了科学发展的史册上，并被不同的文字传承至今。在这一科学领域，当代的荷兰科学家无疑具有得天独厚的优势，他们比外人更容易理解自己先人的思想和文化，这也许正是胶体科学在荷兰一直兴旺并蓬勃发展的重要原因之一。

本书基于荷兰瓦格宁根大学胶体化学专业本科生的讲义，集中体现了作者 Martien A. Cohen Stuart 教授及其团队对胶体科学的深刻理解。全书从胶体科学的全局着眼，开篇就把胶体体系的特点、与之相关的概念及表征方法进行集中阐述，随后开始讨论胶体体系的共性，进而深入到对不同类别的具体胶体体系的认知。这种整体的认识及全局的构思，不仅提供了胶体科学的入门途径，也引导初学者逐步建立起分析问题及解决问题的知识框架。这与由不同作者分章节合写的著作有着本质的不同，本书最大程度地保证了知识体系的完整性。此外，本书不仅仅是现有相关基础理论的重排，更重要的是融入了作者对胶体科学领域全局性的认识和对初学者科学思路的引导，无疑，这对胶体科学及相关学科人才的培养是非常有益的。

我本人也曾有幸在荷兰瓦格宁根大学物理化学与胶体科学实验室学习过一段时间，对瓦格宁根大学深厚的胶体科学底蕴深有感触。北京大学阎云与黄建滨在繁重的教学科研工作之余，能够把这样一本书译成中文，以最大限度地惠及国内不同层次的读者，其热忱实属难得。希望本书的出版能够如译者所愿，为培养我国胶体科学人才发展作出贡献。也希望读者使用本书时，能够用心体会著者对知识脉络的梳理及独到的科学地分析问题的思路，从而把书本知识用活。若能在此书引导下进一步成长为胶体科学领域的未来之星，相信译者定然深感欣慰。

杨俊林

译者的话

本书系荷兰 Wageningen(瓦格宁根)大学物理化学与胶体科学实验室专门为胶体化学专业的本科生撰写的讲义, 主要介绍胶体科学的基础知识。

从表面上看, 本书所安排的都是大家熟知的经典内容, 但仔细读来, 你会发现这些看似熟知的内容经作者深入浅出地演绎后, 顿时变得无比鲜活生动。在整部书中, 作者从大处着眼, 着重阐述知识之间的逻辑, 而不是枯燥地陈述理论与公式, 这在光散射(3.6.3节)、大分子(第4章)、双电层(第5章)、流变学(第6章)、电动力学(第7章)、憎液胶体的抗聚结稳定性(第8章)、高分子对胶体稳定性的影响(第9章)、憎液溶胶的制备(第10章)、泡沫和乳状液的稳定性(第11章)及缔合胶体(第12章)等内容中体现得尤为突出。可以说, 每一章节都是一个娓娓道来的故事; 而每一条公式都是流动的故事中精彩的情节。

本书的一个重要特色是章节的标题大量使用语句, 而不是常规的短语, 使读者在看完标题或目录后即对本书的知识有了大致的了解, 有助于读者从全局把握本书内容。另一个重要特色是理论与实际的紧密结合。胶体科学是在生活中产生的学问, 其在生活中的应用无所不在。因此, 本书在相关章节中大量穿插了实际范例, 大大拉近了书本知识与实际生活的距离。此外, 本书安排了大量插图, 对很多抽象的现象给出了清晰的数学及物理图像, 并附有练习题, 有助于读者深入理解相关知识。

本书译者之一阎云博士有幸师从本书作者、荷兰皇家艺术与科学院院士 M.A. Cohen Stuart 教授从事欧盟玛丽-居里博士后研究, 期间耳濡目染了导师是如何用生动形象的语言来解释基础研究中一个个深奥的原理, 于是萌生了将导师理解问题的方式介绍给国内读者的想法, 这就是出版这部译著的初衷。在此, 感谢 M.A. Cohen Stuart 教授及 Wageningen 大学的同事们在本书翻译过程中给予的大力支持, 也非常感谢科学出版社为本书的出版做出的努力!

本书原稿是 M. A. Cohen Stuart 教授为该校的《胶体科学》课程准备的课堂讲义, 尚未正式出版, 所以原文中有些段落非常简单。在不影响理解的情况下, 译者在翻译过程中没有进行过多修饰。当然, 对希望深入学习胶体科学不同分支的读者来说, 本书介绍的基础内容稍显简单。因此, 我们建议这些读者也参考一下国内外相关著作; 在本书的最后, 原著也给出了国外一些经典著作的清单。总之, 希望广大读者理解, 本书的出版是希望给大家介绍一种不同的阐述胶体科学基础问题的方式, 以期帮助初学者更好地理解有关胶体科学的深奥原理。

本书在翻译过程中得到了很多前辈及同行的帮助。中国科学院化学研究所的江龙院士、北京大学的朱璠瑶教授、东北师范大学的褚莹教授、华东理工大学的李莉副教授均对本书全部或部分译稿提出了宝贵的意见和建议。北京大学的马玉荣副教授认真地将译文与原文进行了校对，对本书的定稿作出了巨大的贡献；北京大学胶体化学专业的博士研究生徐丽敏和赵莉翻译了第 1~12 章的习题答案。此外，北京大学的马季铭教授、华东理工大学的安学勤教授对本书的编译方式提出了宝贵的建议……在此，我们对所有为本书的出版作出贡献的人表示衷心的感谢！

由于时间仓促，加之译者水平有限，不当之处在所难免，恳请读者批评指正。

译 者

2012 年 6 月

于北京大学

前 言

在瓦格宁根大学，基础科学、生命科学及技术等专业的学生经常会遇到多相体系，即亚微米尺度上的有序材料。所有的生命体系、许多非生命物质及重要的技术材料都在这个范畴之内，而这些都是胶体科学的核心内容。这是瓦格宁根大学自1935年以来一直设立胶体科学教研室的原因。瓦格宁根大学胶体科学教研室的第一任主任是 H. C. Tendeloo 教授，前任是 J. Lyklema 教授。

近年来，胶体科学发展迅猛。新的测量方法不断建立，新的概念不断涌现。继 J. Lyklema 教授之后由我来担任胶体科学教研室主任。我意识到更新教学内容是非常必要的。本教材基于 G. J. Fleer 和 J. N. de Wit 编写的教材 (1975~1998 年在瓦格宁根大学使用)，曾于 1999 年修订并通过了广泛的检验。其间，我收到了来自学生和同行的许多宝贵意见，最后使本修订版得以面世。

没有一本教材是一成不变的；好的教材总是与时俱进的。所以，我诚挚地欢迎读者对本书的修改、提高和扩展提出宝贵的意见和建议。

M. A. Cohen Stuart

于瓦格宁根，2010 年春

目 录

序

译者的话

前言

第 1 章 引言	1
1.1 什么是胶体科学?	1
1.2 胶体体系的重要特征	2
1.2.1 尺寸	2
1.2.2 界面	3
1.2.3 相互作用	3
1.2.4 时间尺度	3
1.3 胶体科学历史简要回顾	3
1.4 胶体的分类	4
1.4.1 按稳定性划分	4
1.4.2 按相组成划分憎液胶体	5
1.4.3 重要胶体概览	6
1.5 粒子形状	7
1.6 简单气体与溶胶的相似之处	8
思考题	10
第 2 章 粒子尺寸分布	12
2.1 多分散和单分散胶体	12
2.2 不同的平均方法	12
2.3 有代表性的质量分布	13
2.4 平均相对分子质量	15
2.4.1 数均相对分子质量	16
2.4.2 质均相对分子质量	16
2.4.3 Z 均相对分子质量	17
2.5 多分散度	18
2.6 比表面积	18
思考题	18

第 3 章 粒子质量和大小的测量	20
3.1 渗透压法	20
3.1.1 理想溶液	20
3.1.2 非理想体系的渗透压	21
3.1.3 第二维里系数的物理意义	22
3.1.4 非理想溶液示例	24
3.1.5 渗透压计	24
3.2 显微镜法	24
3.3 库尔特 (Coulter) 颗粒计数器	26
3.4 沉降法	27
3.4.1 沉降速度	27
3.4.2 沉降平衡	28
3.4.3 超离心机中的沉降	28
3.4.4 沉降测量技术	29
3.4.5 沉降天平	30
3.5 扩散和布朗运动	31
3.6 光的吸收和散射	33
3.6.1 引言	33
3.6.2 电磁波	34
3.6.3 光的散射	36
3.6.4 光散射法测定粒子摩尔质量	38
3.6.5 瑞利 (Rayleigh) 公式忽略了干涉效应	39
3.6.6 形状因子 $F(Q)$ 由粒子内部的干涉引起	39
3.6.7 结构因子 $S(Q)$ 由粒子间的干涉引起	41
3.7 超显微镜	42
3.8 利用动态光散射测量扩散系数	42
思考题	43
附录	44
3.A 连续沉降曲线	44
3.B 根据 Einstein 方法推导扩散系数 D	44
3.C 折射率增量的引入	45
3.D 由散射计算浊度	45
3.E 波矢量	45
3.F Zimm 图	46
3.G 光散射中的噪声分析	47

第 4 章 大分子	48
4.1 什么是大分子?	48
4.2 可溶性大分子	48
4.3 溶液中链状分子的构象	51
4.4 理想无规线团	52
4.5 大分子线团是稀薄的	54
4.6 链段间的相互作用导致线团膨胀或收缩	54
4.6.1 致密的大分子	55
4.6.2 溶胀的线团	55
4.7 稀溶液、半稀溶液和浓溶液	56
4.8 很多蛋白质分子可以视为不良溶剂中的链状大分子	58
4.9 聚电解质	58
4.9.1 强电解质举例	58
4.9.2 弱聚电解质举例	59
4.9.3 两性聚电解质	60
4.10 凝聚和复合凝聚	60
4.11 大分子链被溶剂溶胀形成具有网络结构的凝胶	61
思考题	63
附录	63
4.A 理想线团的均方根末端距	63
4.B 具有固定键角和侧链的碳链	64
4.C 高斯熵弹簧	65
第 5 章 双电层	66
5.1 胶体粒子在水中以反离子的形式释放出电荷	66
5.2 带电的胶体粒子被扩散的电荷所包围	66
5.3 反离子的扩散分布: 能与熵的折中	67
5.4 带电表面附近离子的 Boltzmann 分布	68
5.5 离子吸附造成表面荷电	69
5.6 表面电荷: 由离子吸附实验获得	70
5.7 能斯特定律决定表面对离子的吸附	71
5.8 古伊-查普曼 (Gouy-Chapman) 模型的双电层电势曲线	72
5.9 总的扩散电荷和表面电荷	74
5.10 斯特恩 (Stern) 模型	76
5.11 双电层中的熵与能	77
5.12 离子的特异性吸附可以使表面电荷发生反转	78

5.13 带电粒子的排盐效应	79
5.14 可视为膜平衡的排盐现象——唐南 (Donnan) 效应	81
思考题	83
附录	84
5.A 静电作用的相关公式	84
5.B 能斯特 (Nernst) 定律	87
5.C 泊松-玻耳兹曼 (Poisson-Boltzmann) 方程的不同求解	88
5.D 斯特恩 (Stern) 模型	89
5.E 双电层中能量和熵的计算	90
5.F 平板附近的同离子排出效应	90
第 6 章 流变学	91
6.1 流变学描述物质在外力作用下的流动和形变行为	91
6.2 流动是通过剪切速率和剪切应力之间的关系来表征的	93
6.3 泊肃叶 (Poiseuille) 定律描述牛顿流体在管中的流动	94
6.4 测量黏度的两种方法	94
6.5 非牛顿行为的分类	95
6.5.1 静态行为	96
6.5.2 非静态行为	97
6.6 分散的粒子增加体系黏度	98
6.7 亲液溶胶的黏度仅取决于粒子的体积分数, 而与粒子大小无关	98
6.7.1 非溶胀粒子	99
6.7.2 非溶胀型粒子的浓溶液	100
6.8 溶胀的粒子: 低剪切速率下的不带电高分子溶液	100
6.9 低剪切速率下的聚电解质溶液	102
6.10 形变与粒子间相互作用导致非牛顿行为	103
6.11 高剪切速率下的高分子溶液的黏度	103
思考题	104
附录	105
泊肃叶 (Poiseuille) 方程的推导	105
第 7 章 电动力学	107
7.1 液体通过带电表面时产生电动现象	107
7.2 剪切平面是流动液体和带电表面之间的边界	108
7.3 离子拖动液体: 电渗	109
7.4 液体沿着带电表面的流动引起的电流或电压: 流动电流或流动电势	110
7.5 胶体粒子在电场中的运动: 电泳	111

7.6 电泳速度的测量	113
7.6.1 界面移动法	113
7.6.2 显微电泳法	114
7.6.3 高频方法	115
7.6.4 利用电泳原理的定性测量方法	115
7.7 Zeta 电势的解释	116
思考题	116
附录	117
7.A 电渗方程的推导	117
7.B 大粒子的电泳速度	118
7.C 流动电流的计算	118
第 8 章 憎液胶体的抗聚结稳定性及 DLVO 理论	119
8.1 憎液胶体的分散状态并不是热力学平衡	119
8.2 当胶体粒子之间的距离小于粒子直径时, van der waals 引力很大	120
8.3 同号双电层的重叠导致排斥	123
8.4 总相互作用能有极大值,但在高盐浓度下此值降低	126
8.5 临界絮凝浓度	127
8.6 絮凝开始时的情况	129
8.6.1 絮凝速率的测量	131
8.6.2 聚集体的尺寸分布	132
8.7 分形絮体和粒子凝胶的形成	133
8.8 悬浮液的稳定性	134
8.9 胶体的稳定性在哪些地方起作用?	135
思考题	136
附录	137
8.A Hamaker 公式的推导	137
8.B 静电斥力公式的推导	138
8.C 临界絮凝浓度表达式的推导	139
第 9 章 高分子对胶体稳定性的影响	140
9.1 憎液溶胶的稳定性可通过加入高分子提高或降低	140
9.2 非吸附高分子的影响:排空作用	140
9.3 胶体粒子表面的厚高分子层具有稳定胶体的作用	141
9.3.1 具有高分子刷的粒子	141
9.3.2 用环与尾吸附的高分子	144

9.3.3	饱和吸附的高分子链提高胶体稳定性	146
9.3.4	不饱和吸附的高分子层通过在粒子间“成桥”降低胶体稳定性	146
9.4	聚电解质可以使憎液溶胶稳定或絮凝	148
9.5	高分子在许多胶体体系中均有应用	149
	思考题	149
第 10 章	憎液溶胶的制备	151
10.1	憎液溶胶是介稳的	151
10.2	由相图得出共存相的组成	151
10.3	分散：从粗糙到精细	153
10.4	凝聚法：从非常精细到精细	154
10.5	由过饱和体系制备粒子（凝聚法）	155
10.6	两种情形	157
10.6.1	成核与生长同步	157
10.6.2	先成核，后生长	157
10.7	溶胶的老化	159
10.8	溶胶的纯化	159
	思考题	160
第 11 章	泡沫和乳状液的稳定性	161
11.1	泡沫和乳状液	161
11.2	气泡和液滴内部的压力高于外部	162
11.3	小气泡或液滴在大气泡或液滴存在时收缩：歧化（Ostwald 熟化）	162
11.4	液体由气泡或液滴之间的缝隙流出：排液	164
11.5	DLVO 理论适用于界面上有离子型表面活性剂的排液水膜	165
11.6	有关液膜破裂的完全理论尚未建立	166
	思考题	167
第 12 章	缔合胶体	168
12.1	两亲分子缔合为胶体粒子	168
12.2	胶束化可用“封闭缔合”模型来描述	169
12.3	质量守恒定律在胶束化过程中得以充分体现	170
12.4	“停止”机制并非停止胶束在一维或二维空间的生长	173
12.5	微乳	176
12.6	测定 CMC 的五种方法	176
	思考题	180
	附录	181

12.A ΔG 与 K_m 之间的关系	181
12.B 关于 Gibbs 公式	181
第 13 章 附加习题	182
13.1 粒子尺寸分布	182
13.2 渗透压	182
13.3 沉降	183
13.4 光散射	184
13.5 大分子	184
13.6 双电层	185
13.7 双电层与 Donnan 平衡	186
13.8 流变学	187
13.9 电动学	189
13.10 溶胶的制备和稳定性	191
13.11 缔合胶体	193
第 14 章 参考答案	195
参考书目	228

第1章 引言

1.1 什么是胶体科学？

在天然和工业产品中，粒子的大小通常远大于单个分子。这样的例子不胜枚举，如织物、纸张、胶片，油漆、墨水、沥青、水泥、陶瓷，农药、润滑油、胶水，肥皂、洗涤剂及泡沫、塑料等。大的粒子也存在于许多食品中，如牛奶、黄油、果酱和冰淇淋等。在农业领域内也是如此。水及空气中的许多污染物也都含有大的粒子。土壤是由黏土和沙的聚集粒子组成。农业中广泛用来保护庄稼的杀虫喷雾剂通常是颗粒较大的液滴。而所有的生物材料都是由非常大的分子或它们的聚集体构成的。

虽然这些体系各具特色，但有一个共同点，即它们的性质与组成体系的粒子的大小及粒子之间的相互作用密切相关。这些大的粒子被称为胶体。胶体体系有别于其他简单均相物质（如液体、晶体及溶液）之处是它们在微观尺度上是多相的，即具有非常小的可辨别的区域。这些与胶体尺寸相应的可以辨别的畴区大小在几纳米到几微米数量级，我们把这一尺寸范围称为胶体范畴。图 1.1 是按照粒子尺寸大小排出的序列，并指出了胶体区域涵盖的范围。可以看出，这个范畴是在小分子与微观粒子（如细菌和真核细胞）之间。对胶体体系，特别是对粒子之间相互作用的研究就是胶体科学。

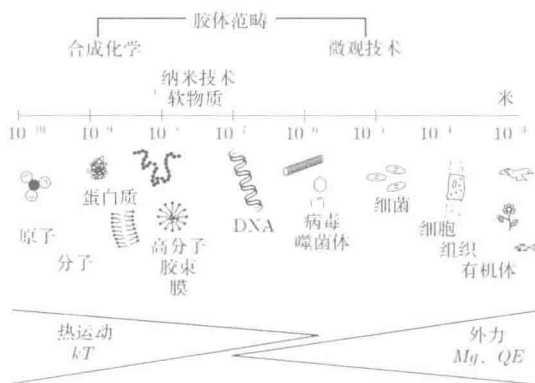


图 1.1 胶体范畴：尺寸及不同种类的粒子

胶体科学的主要任务是发现大量不同体系的通用法则，以及用物理和化学的

原理来描述所观察到的现象，并运用这些原理来准确证明对一个胶体体系处理方式的正确性。一个粒子从环境中所受到的作用力随其尺寸的增大而迅速增加。例如，重力与物质的质量成正比；静电相互作用力与粒子荷电量成正比，而大的粒子的荷电量一般较多。因此，对于非常小的粒子，这些作用力通常很小，于是热运动的影响就非常显著*。化学反应、溶解、蒸发及扩散等都是分子所特有的。然而，这些热运动的能量在给定温度下是一定的，与粒子的大小无关。这就是为什么对于大粒子来说，热运动相对而言并不是那么重要，甚至可以忽略的原因。而在胶体范畴之内，外力和热运动同等重要。图 1.1 给出了一些示意性的信息。

在胶体体系里，体系的行为由粒子之间的作用力与热运动之间的精巧平衡所决定。因此，准确测定这些作用力非常重要。大约在 1940 年，人们发现特定胶体粒子的抗聚集稳定性与粒子所带的电荷密切相关。由于静电斥力的存在，粒子的聚集被有效抑制。当时，在实验观察的基础上，人们建立了一个关于粒子稳定性的理论，这一理论至今在胶体领域仍然非常重要，即 DLVO 理论。

为了获得一个非常有用的理论，我们往往从一个非常简单的模型体系出发，这样才能保证测量结果的准确性。然后以这些测量结果为基础，提出一个假说或理论（最初经常是靠直觉）。接下来，再对这一理论进行实验验证。实际上，这一方法并非仅适用于胶体科学，而是通用于自然科学。这意味着模型体系、通用规则及基础理论是研究胶体科学的重要工具。胶体科学中经常使用的力和能量属于物理范畴，所以胶体科学是化学与物理的交叉领域，属于物理化学学科。正因如此，这一领域有时也被称为胶体化学或胶体化学工程。

1.2 胶体体系的重要特征

1.2.1 尺寸

如图 1.1 所示，胶体粒子最重要的特点是它们的尺寸。与低相对分子质量化合物溶液的测量方法不同，采用特殊的技术可以测得胶体粒子的大小。例如：

(1) 小分子在溶液中是看不见的，而大的粒子可以借助显微镜直接观察。因此，胶体粒子可以通过超显微镜 (3.7 节) 或电子显微镜观察 (3.2 节)。

(2) 小分子在溶液中并不沉降，而大的粒子在重力作用下形成沉积物，这使得测量大粒子的尺寸成为可能。由于胶体粒子通常介于上述两种情况之间，人们发明了超离心的方法来沉降胶体粒子，进而测量其尺寸。

* 热能 kT 对于粒子尺寸小于 $1\mu\text{m}$ 的体系非常重要，而在粒子尺寸很大的体系中，重力变得越来越重要。

(3) 胶体粒子的大小可以通过光散射的方法进行测量。

人们也发展了一些适用于胶体科学其他分支的特殊测量方法。

胶体粒子的直径一般在几纳米到几百纳米之间,但这个范围并不严格。例如,乳液液滴虽然可达几微米,但通常也被视为胶体。现在,胶体范畴也被称为“介观范畴”,主要是为了区别于微观(小于 1nm)和宏观(大于 1 μ m)区域。“介观物理”一词也常常使用。

1.2.2 界面

胶体体系中经常遇到一个相均匀分散在另一个相中的情况,因此胶体体系的第二个特点是两相间存在巨大的界面。该界面的性质对胶体体系非常重要。所以,胶体科学与界面化学或界面物理之间有非常紧密的联系。

1.2.3 相互作用

如前所述,胶体科学的第三个重要特点是粒子间的相互作用,因为它在很大程度上决定着胶体体系的性质。粒子的性质与体系的性质之间的关系是胶体科学的核心主题。

1.2.4 时间尺度

最后要说明的是,胶体体系中发生的所有过程在时间尺度上不同于分子体系中的过程。由于自身尺寸的缘故,胶体粒子与环境之间存在更大的摩擦力,因此它们的运动比小分子慢得多。

1.3 胶体科学历史简要回顾

胶体科学最初是在 19 世纪中叶以胶体化学的形式出现的。Selmi(1845 年)和 Graham(1860 年)发现一些溶液并不具备稀溶液的典型特征(如测不到凝固点降低和渗透压*)。这种反常现象只能用“假设溶解的粒子非常大,以至于这些量小得无法测量”来解释。这种假设在当时是非常具有革命性的想法。Graham 将这些粒子称为胶体。这一领域后来被 Ostwald(粒子的歧化和老化)、Tyndall(发现粒子散射光的现象)和 Einstein(在光散射、黏度、布朗运动等方面作出了贡献)等在 19 世纪末进一步发展。20 世纪初,许多新方法相继出现,人们开始从理论上解释胶体的特点,代表性人物如下:Langmuir(研究界面及单层膜),Freundlich(标志性著作《毛细化学》),Kruyt(研究胶体稳定性),Tiselius(在电泳方面贡献卓著)和 Svedberg(发明了超离心技术)等。亲液胶体(将在 1.4.1 节介绍)领域在 Staudinger 和 Mark 的

* 稀溶液通常具有凝固点下降,沸点上升,渗透压等现象。——译者注