

“高分子物理实验”课程思政案例设计与实践 ——以经典项目“稀溶液黏度法测定高分子的分子量”为例

朱平平^{1,2,*}, 周强², 黄渝¹, 杨海洋¹, 何平笙¹, 肖石燕¹

¹中国科学技术大学化学与材料科学学院, 合肥 230026

²化学国家级实验教学示范中心(中国科学技术大学), 合肥 230026

摘要: “稀溶液黏度法测定高分子的分子量”是“高分子物理实验”、“物理化学实验”课程的经典实验项目。本项目在教学内容建设中, 深挖课程思政元素, 有机融入课程教学。如引入诺贝尔奖得主H. Staudinger对高分子概念的定义、助力学生从高分子学科的发展认识测定高分子分子量的意义; 基于哲学思考加深对高分子分子量多分散性和高聚物溶解特点的认识、强化科学思维的训练与运用等。

关键词: 稀溶液黏度法; 诺贝尔奖成果; 量变引起质变; 高分子中的整体与局部; 科学思维

中图分类号: G64; O6

Design and Practice of Ideological and Political Cases in the Course of Polymer Physics Experiments: Molecular Weight Determination of Polymers by Dilute Solution Viscosity Method as an Example

Pingping Zhu^{1,2,*}, Qiang Zhou², Yu Huang¹, Haiyang Yang¹, Pingsheng He¹, Shiyan Xiao¹

¹ School of Chemistry and Materials Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China.

² National Demonstration Center for Experimental Chemistry Education (University of Science and Technology of China), Hefei 230026, China .

Abstract: “Molecular weight determination of polymers by dilute solution viscosity method” is a classic experimental project in the courses of “Polymer Physics Experiment” and “Physical Chemistry Experiment”. This project incorporates ideological and political education elements into the teaching process to enhance educational impact. For example, the introduction of Nobel laureate H. Staudinger’s definition of macromolecules aids students in appreciating the significance of molecular weight determination in the development of macromolecular science. Furthermore, the program encourages students to deepen their understanding of polymer molecular weight polydispersity and solubility properties through philosophical inquiry, and to groom the cultivation and application of scientific thinking.

Key Words: Dilute solution viscosity method; Nobel Prize achievements; Quantitative to qualitative change; Global and local properties of polymers; Scientific thinking

收稿: 2024-05-27; 录用: 2024-07-16; 网络发表: 2024-12-20

*通讯作者, Email: zhupp@ustc.edu.cn

基金资助: 安徽省质量工程项目中的2门课程思政示范课程(2023kcszsf001, 2021kcszsfkc469); 2023年度中国科学技术大学校级本科质量工程项目(WW2060002301); 教育部首批虚拟教研室(大学化学实验课程群虚拟教研室)建设项目(WW2060002201); 教育部实验教学和教学实验室建设研究项目(WW2060002301); 教育部化学“101计划”——化学测量学实验课程建设项目; 教育部第三批虚拟教研室建设试点——“101计划”化学测量学实验课程虚拟教研室。

1 引言

“稀溶液黏度法测定高分子的分子量”是“高分子物理实验”课程的经典实验项目^[1],许多高校在“物理化学实验”课程中也开设此项目。

采用稀溶液黏度法测定高分子的分子量,主要操作是通过在同一支乌氏黏度计中连续测定一系列浓度成简单比例关系的高分子稀溶液的相对黏度,依据稀溶液的比浓黏度和比浓对数黏度与浓度的关系求取特性黏数。再根据特性黏数与分子量的关系,求得高分子的黏均分子量。总之,该方法操作便利,所用仪器设备简单,可测定的分子量范围大。但是需注意的是它是一种测定分子量的相对方法,因为特性黏数与分子量之间服从的关系式是要预先订定的,而订定时必须用到测定分子量的其他方法(绝对测定方法)。

本项目在教学内容建设中,挖掘课程思政元素,有机融入课程教学。如引入诺贝尔奖得主H. Staudinger对高分子概念的定义,认识建立高分子分子量的测定方法对高分子学科的发展所具有的重大意义;基于哲学思考(如“量变引起质变”“高分子中的整体与局部”)加深对高分子分子量多分散性和高聚物溶解特点的认识,强化科学思维的训练与运用等。

2 思政元素的挖掘与提炼

2.1 了解学科发展史:认识测定高分子分子量的重大意义

2.1.1 H. Staudinger建立高分子的概念

1920年,德国化学家H. Staudinger在德国化学会通讯发表了具有划时代意义的文献“论聚合反应”,随后他又在1922年的论文中提出macromolecule(大分子或高分子)的概念。他突破有机化学的传统观念,摒弃了当时把橡胶、纤维素、蛋白质等一些天然高分子体系当作是胶体的错误认识。他主张:这些物质具有巨大分子和链状结构(如图1所示的聚丙烯分子),首次提出了聚合反应的产物实际上是由化学键连接重复单元形成的分子量很大的聚合物,它们的长度不完全相同,所以不能用有机化学中的“纯化合物”的概念来理解高分子,聚合物实际是许多同系物的混合物,其分子量只能是一种平均值。

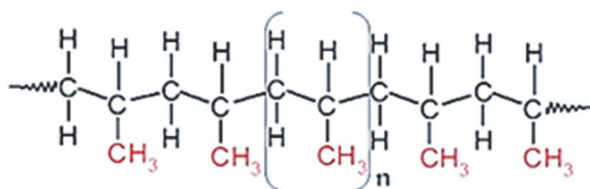


图1 聚丙烯分子的链状结构

然而,当时实验方法的粗糙,使高分子分子量的测定不能重复,这又给胶体缔合论的学者找到了反对“高分子”概念的理由^[2,3]。此后,人们不断改进实验方法、测定高分子的分子量,特别是H. Staudinger提出了高分子溶液黏度与分子量的关系式,证明“高分子”概念的合理性。所以说早期高分子分子量的测定研究对“高分子”概念的认可起着极其重要的作用。

H. Staudinger的经典之作标志着高分子科学的诞生,至今高分子科学作为一门独立的学科已经走过了一百余年的发展历程。Staudinger也因为在“大分子化学领域的发现”(for his discoveries in the field of macromolecular chemistry),于1953年荣获诺贝尔化学奖,他是高分子科学的奠基人,是第一位获得诺贝尔奖的高分子学者。

2.1.2 多种分子量的表征方法及平均分子量的统计意义

测定高分子分子量的方法很多。各种方法都有适用的分子量范围和优缺点。教学中,引导学生辨析由不同方法所测得的平均分子量的统计意义(表1)。

表1 常用测定分子量的方法及平均分子量的统计意义

测定方法	适用的分子量范围	平均分子量
端基分析法	$< 3 \times 10^4$	数均分子量
气相渗透压法	$< 3 \times 10^4$	数均分子量
膜平衡渗透压法	$5 \times 10^3 - 10^6$	数均分子量
光散射法	$> 10^2$	重均分子量
稀溶液黏度法	$> 10^2$	黏均分子量
凝胶渗透色谱法	$> 10^2$	各种平均分子量

2.2 基于高分子的“大”，运用哲学思想：助力学生深刻理解高分子物理的精髓

2.2.1 与小分子不同，高分子的分子量大、且具有多分散性

高分子最大的特点就是“大”，它是由几千到几十万个结构单元通过化学键连接而成^[4]。基于聚合反应的概率观点，从小分子的单体合成分子量巨大的高分子中，存在多个副反应同时发生，使得所生成的高分子分子量不可能是均一的，这就有了高分子的分子量分布和多分散性问题，这正是“量变引起质变”的结果。

2.2.2 基于“高分子中的整体与局部”的哲学思考，理解高聚物先溶胀后溶解的特点

(1) 高聚物的溶解过程比小分子物质的溶解过程要复杂得多

高分子溶液的形成，首先涉及高聚物的溶解问题^[5]。高聚物的溶解过程很特殊，通常经历先是体积胀大、然后才能溶解的缓慢过程。这是因为高分子的“大”，高分子间作用力很大，且长链间相互缠结。高聚物在溶剂中溶解需要经过两个过程。第一个过程为溶胀。在高聚物与溶剂接触初期，高分子链不可能松动并向溶剂相扩散。但是高分子链具有柔性，链段的热运动而产生空隙，这些空隙很快就被从溶剂中扩散而来的小分子溶剂所占据，高聚物体积胀大。此时，整个高分子链还不能摆脱相互之间的作用力而向溶剂中扩散。不过，随着溶胀的进行，必然有愈来愈多的链单元与溶剂分子混合，使得高分子链间的距离逐渐增大，链间的相互作用力逐渐减小，致使愈来愈多的链单元可以松动。当整个高分子链中的所有链单元都摆脱相邻分子链的吸引作用，整链就松动了，就可以发生缓慢向溶剂中的扩散运动，高分子与溶剂分子相混合，最后完成溶解过程，形成均一的高分子溶液。

(2) 基于“整体与局部”的哲学思考，理解高聚物先溶胀后溶解的特点

高聚物溶解必须要经过溶胀阶段，这是高聚物的特点。溶胀是由于链段与溶剂分子的混合，而溶解则是当高分子中的所有链段松动后，才能发生的整个高分子链与溶剂分子混合的结果。先有局部的混合、再有整体上的混合。所以，高聚物的溶解能力与它的分子量相关，分子量越大，溶解度越小。而链的柔性也会影响到高聚物的溶解能力。

2.2.3 与小分子溶液不同，高分子稀溶液的黏度是纯溶剂黏度的数倍

液体的流动是因受外力作用分子进行不可逆位移的过程，而黏度则是对反抗其相对位移的分子间相互作用力(内摩擦力)的量度。高聚物溶入溶剂后，同样是因为高分子的“大”，引起液体黏度变化较大，这也是本方法建立的基本条件。而小分子溶液的黏度与纯溶剂的黏度差别很小。

2.3 强化科学思维的训练与运用

2.3.1 本方法依据的前提条件是什么？

通过在同一支Ubbelohde式稀释黏度计(即乌式黏度计，图2所示)中，连续测定一系列浓度成简单比例关系的高分子稀溶液的相对黏度，依据稀溶液的比浓黏度和比浓对数黏度与浓度的关系求取特性黏数。再根据特性黏数与分子量的经验方程式，求得高分子的黏均分子量^[6]。

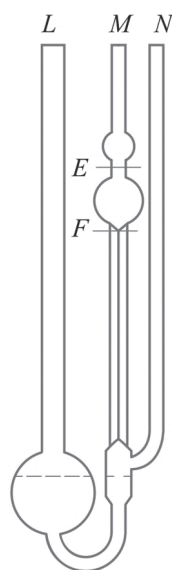


图2 乌式黏度计示意图

将液体自L管加入，在M管管口采用洗耳球将液体缓慢吸至E线以上的小球一半高度后，令N管接通大气，这样M管中的液柱上下均接通大气，任液体自由流下，这样促使液体流过毛细管(半径为 R 、长度为 L)的力，就是液柱高 h 的压力， h 值在 h_E 和 h_F 间逐渐改变，并且假设促使液体流动的力($\pi R^2 P$)全部用于克服内摩擦力。注意，通常选择纯溶剂流出时间大于100 s的黏度计，就可以略去流动时能量损耗的主要部分——动能消耗的影响，即认为液体在流动时没有消耗能量。这样液体的黏度可表示为：

$$\eta = \frac{\pi g h \rho R^4 t}{8LV} \quad (1)$$

式中， h 为流经毛细管的液柱的平均高度， ρ 为所测液体的密度， t 为液面从E线流到F线所需的时间(称为流出时间)， g 为重力加速度。令 $A = \frac{\pi g h R^4}{8LV}$ ，显然 A 是由黏度计所决定的常数，与液体性质无关。

则高分子溶液的黏度可表示为

$$\eta = A \rho t \quad (2)$$

纯溶剂的黏度为

$$\eta_0 = A \rho_0 t_0 \quad (3)$$

在用稀溶液黏度法表征高分子分子量时，只要测定不同浓度稀溶液的相对黏度。当测定的溶液很稀时， $\rho \approx \rho_0$ ，所以，溶液的相对黏度为

$$\eta_r = \frac{\eta}{\eta_0} \approx \frac{t}{t_0} \quad (4)$$

这样只要在同一温度下测定纯溶剂和不同浓度稀溶液的流出时间 t_0 和 t (t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5)，就可计算不同浓度稀溶液的相对黏度 η_r 。

2.3.2 动能校正是否必要？

当纯溶剂流出时间小于100 s的黏度计，实际上液体在流出毛细管时获得了一部分动能，这部分用于使液体获得动能的压力消耗，须予以校正，即动能校正。

2.4 避免照方抓药式教学：引导学生理解方案设计的基本原理、知其然并知其所以然

本实验是在同一支黏度计内直接稀释溶液，测定不同浓度溶液的流出时间，然后再测溶剂的流出时间。另一种测定方法，是先测定纯溶剂的流出时间后，烘干黏度计，再测定一系列浓度成简单

比例关系的溶液的流出时间。

基于课程组的系列研究成果^[7-11]，我们选取前一种测定方法。这是我们对稀溶液黏度法测定高分子的分子量的第一次改进^[7]。考虑到高分子溶液流过毛细管后，常会有高分子吸附在毛细管管壁，相当于毛细管管径变细，为了得到高分子溶液真实的相对黏度，选择后测纯溶剂的流出时间，这样，纯溶剂流过的也是较细的毛细管，消除了高分子在毛细管上的吸附对结果的影响。

我们对稀溶液黏度法测定高分子的分子量的第二次改进^[8]，则是考虑到高分子在黏度计毛细管管壁上的吸附不仅会导致毛细管有效管径减小，而且可以导致毛细管界面性质发生显著改变。

本项目教学中，我们通过引导学生思考和理解方案设计的基本原理，避免了照方抓药式教学，使学生知其然并知其所以然。

3 课程思政设计的教学效果

本项目在教学内容的改进和更新优化中，自然融入了诺贝尔奖成果、学科发展史、哲学思想和科学思维等多个维度的思政元素(图3)，拓展了课程的广度与深度。引导学生和助教(研究生)参与教学研究和实验项目改进，再将相关成果引入教学，实现教学相长。本项目的设计就是依据了课程组的系列研究成果^[7-11]，这些工作均由本科生和助教(研究生)在教师指导下参与完成。


H. Staudinger-突破传统观念	量变引起质变	高分子中的整体与局部	科学思维
 <p>1920年，H. Staudinger在Ber. Dtsch. Chem. Ges.发表了划时代的文献“论聚合反应”，首次提出了橡胶、纤维、淀粉等实际上是由化学键连接重复单元而形成的分子量很大的大分子物质。当时所有的著名化学家(包括一些诺贝尔奖获得者)都不同意他的观点，他突破有机化学的传统观念，以大量先驱性工作为高分子化学奠基。他于1953年荣获诺贝尔化学奖，是第一位获得诺贝尔奖的高分子学者。</p>	<p>量变引起质变 辩证理解高分子与小分子的本质不同</p> <ul style="list-style-type: none"> ◆ 高分子最大的“特点”——“大” ◆ 就是因为这个“大”，量变导致质变 ◆ 形成了高聚物特有的结构与性能 ◆ 如，分子量巨大且分散、高分子链特有的柔性 	 <p>高分子中的整体与局部既对立又统一。如，大区域结构和小区域结构，在有序性上可能不一样，高分子有大尺寸运动单元和小尺寸运动单元(如整链与链段)，它们的松弛时间差别很大，取向状态也有可能不同，服从的规律也不一样。高分子链的形态还有分成大区域和小区的假定等等。高聚物的溶解过程也是在局部与溶剂混合后，才能发生整个高分子链的松动、与溶剂写成分子分散的体系。</p>	 <p>假设促使液体流动的力全部用于克服内摩擦力，即认为液体在流动时没有消耗能量，不考虑动能消耗的影响，则液体的黏度正比于流过毛细管的流出时间，溶液的相对黏度近似为溶液流出时间与纯溶剂流出时间的比值。考虑到高分子溶液流过毛细管后，常会有高分子吸附在毛细管管壁，所以毛细管变细。为了得到溶液真实的相对黏度，后测纯溶剂的流出时间，消除了高分子在毛细管上的吸附对结果的影响。</p>

图3 教学内容中融入的思政元素

教学内容的创新设计对培养学生理论联系实际和创新实践的能力有所帮助，助力学生实现知识重构和知识迁移。如在课程讨论环节，2位同学从纸尿裤出发(图4)，结合在**高分子化学实验**中做过的超吸水性树脂制备实验，运用诺贝尔奖成果深度解读尿不湿——既吸水又能保住水的道理，那是因为超吸水性高分子材料为交联结构，只能吸水后溶胀、但不能溶解，而溶胀程度取决于其化学结构、交联度、溶液的离子强度等因素。

4 结语

在中国科学技术大学，“高分子物理实验”面向高分子方向学生开设，为专业核心基础课，80学时。本课程先后被认定为省级精品课程和省级课程思政示范课程。秉持“基础宽厚实，专业精新活”的教学传统，团队对课程持续开展教学研究，动态建设教学内容，而思政元素就蕴含在持续建设的教学内容中，以达到润物无声的实效。本文为作者的一点教学思考及实践心得，愿与同行共同交流“高分子物理”和“高分子物理实验”的教研心得体会^[12-14]。

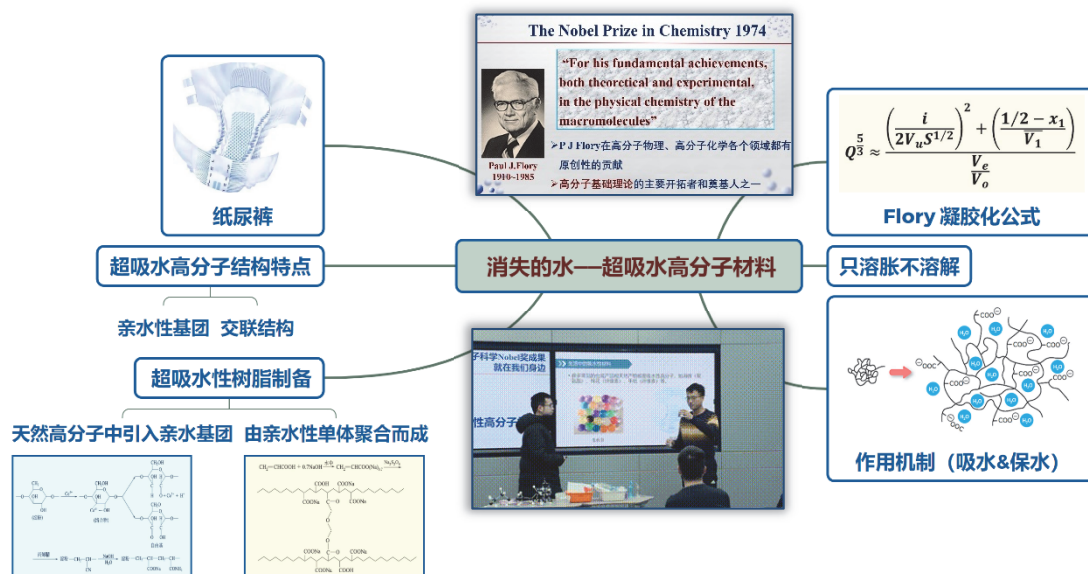


图4 知识重构和知识迁移之超吸水高分子材料

参 考 文 献

- [1] 杨海洋, 朱平平, 何平笙. 高分子物理实验. 第2版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.
- [2] 何平笙. 新编高聚物的结构与性能. 第2版. 北京: 科学出版社, 2021.
- [3] 何曼君, 陈维孝, 董西侠. 高分子物理. 修订版. 上海: 复旦大学出版社, 1990.
- [4] 朱平平, 谢永军, 易院平, 黄渝, 周强, 肖石燕, 杨海洋, 何平笙. 大学化学, 2024, 39 (2), 83.
- [5] 朱平平, 何平笙, 杨海洋. 高分子物理重点难点释疑. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2011.
- [6] 钱人元. 高聚物的分子量测定. 北京: 科学出版社, 1958.
- [7] 杨海洋, 朱平平, 任峰, 李国锋, 吴澎. 化学通报, 1999, 62 (5), 47.
- [8] 杨海洋, 李浩, 朱平平, 朱清仁, 范成高. 化学通报, 2002, 65 (9), 631.
- [9] 杨海洋, 严宇亮, 朱平平, 朱清仁, 何平笙. 化学通报, 2004, 67 (10), w87.
- [10] Yang, H. Y.; Zhu, P. P.; Huang, M. J. *Eur. Polym. J.* 2001, 37, 1939.
- [11] Yang, H. Y.; Li, H.; Zhu, P. P.; Yan Y. F.; Zhu, Q. R.; Fan, C. G. *Polym. Test.* 2004, 23 (8), 897.
- [12] 胡文兵. 大学化学, 2025, 40 (4), 15.
- [13] 刘一新, 李剑锋, 张红东. 大学化学, 2022, 37 (1), 2103041.
- [14] 陶勇, 王新, 陈学刚, 胡海青. 大学化学, 2017, 32 (1), 64.