

工程教育背景下“高分子物理”课程教学内容的重构

——知识架构与工程应用能力培养

吕瑞华*, 金天翔, 陈碧波, 张梦萌

(东华理工大学化学生物与材料科学学院, 南昌 330013)

摘要:工程教育的核心理念是以学生为中心,以成果为导向,并进行持续改进。为了解决高分子物理课程中知识点分散,学生难于灵活运用知识的困境,我们对课程教学内容进行了重新组织和架构。以“分子量和分子量分布”导入课程内容,以“高分子链共性—柔性”组织课程理论知识,以“不同的分子间凝聚方式以及分子运动—高分子应用个性”进行高分子工程应用内容组织。课程内容重构兼顾了高分子物理课程专业理论知识的纵深性和高分子工程实际应用的广延性,以培养学生掌握和灵活运用工程知识以及分析和解决高分子实际工程问题的能力。

关键词:工程教育; 高分子物理; 高分子链共性; 高分子应用个性

目前,国内高校工科人才培养开始实施工程教育专业认证工作,工程教育又称作基于产出的教育(OBE)^[1],关注产出及持续改进。对于工程教育的主要课程,为了达到学生培养毕业要求首要是对课程内容重新组织。高分子物理课程被公认为是高分子相关专业最重要的课程之一。课程一方面要为人才培养打下坚实的理论分析基石,另一方面担负着培养学生工程应用能力的任务。国内高分子物理传统教材编排多从“近程结构”出发导入课程,以“结构—分子运动—性能”的主线安排课程章节,体现出材料学的“结构决定性能”一般规律。但在课程早期引入众多知识点,包括不同高分子的化学结构、构型、构造以及共聚物序列结构等,难于让学生抓住高分子“链柔性”这一本质特征。并且由于学时有限,学生知识点掌握分散,不能建立扎实的理论分析基础,不能真正培养其分析应用能力,也不利于学生毕业后的实践工作或者继续深造。

近年来一些课程研究对高分子物理课程教学进行了有效改革。如励杭泉教授等^[2]以鲁宾斯坦的教材为基础,以“熵弹性”为主线核心,以研究“高分子热力学和运动学”为定位,进行逻辑性教学;胡文兵教授^[3]对高分子物理内容进行重新组织,总结出高分子链共性:柔顺性和链间相互作用的各向异性以及高分子的个性:长度有限且不均一,分子拓扑构造以及序列规整性。高分子物理课程是东华理工大学校级一流本科课程,结合工程教育背景,我们课程组以多年课程教学积累对课程内容进行重构。我们提出以“分子量及分子量分布”导入课程内容,以“高分子链共性—柔性”组织课程理论知识,以“不同的分子间凝聚方式以及分子运动—高分子应用个性”进行高分子工程应用内容组织,以达到帮助学生尽早建立高分子长链柔性概念,兼顾了高分子物理课程专业理论知识的纵深和高分子工程实际应用的广延。

1 课程主要内容

我们对比研究了国内主要《高分子物理》教材,包括何曼君、陈维孝和董西侠主编,华幼卿和金日光主

10.14028/j.cnki.1003-3726.2022.07.009

收稿:2021-05-20;修回:2021-08-06;

基金项目:东华理工大学校级教改课题(DHJG-21-44),东华理工大学校级一流本科课程建设项目(DHYLKC-2020-10);

* 通讯联系人:吕瑞华(1977-),女,副教授,博士,主讲高分子物理、高性能复合材料等课程,主要研究方向为高分子复合化和杂化改性。E-mail:rhlyv@ecut.edu.cn.

编,王槐三、张会旗和侯彦辉等主编以及方征平和王香梅主编的《高分子物理教程》、何平笙编著的《新编高聚物的结构与性能》等,均包括以下必修内容,如表 1 所示。

表 1 课程内容
Table 1 Course content

序号	章节	核心知识
1	高分子的链结构	近程结构、远程结构及链模型
2	高分子的聚集态结构	分子间作用力、分子链排列方式及结构模型
3	高分子溶液	溶解和 Flory-Huggins 溶液理论
4	分子量和分子量分布	分子量计算、测试方法及原理
5	分子运动与转变	分子运动、玻璃化转变应用及理论
6	高分子结晶和熔融	结晶热力学和动力学
7	橡胶弹性	熵弹性及橡胶状态方程
8	粘弹性	粘弹性及力学模型、WLF 方程及时温等效原理
9	强度和韧性	应力-应变行为、强度及韧性
10	流变性	非牛顿粘性、粘弹性

可以看出,依据“结构—分子运动—性能”的主线,前 4 章节内容主要介绍高分子的结构内容,第 5、6 章介绍分子运动内容,而第 7~10 章可以概括为高分子性能。课程章节依据这样的编排,章节知识点之间彼此串联而成,学生以单线学习的模式进行学习,跨度大。我们以往教学过程中,很多学生反映,课程知识点多而散,很多知识点需要记忆,学习难度大。

2 课程内容重构

2.1 高分子物理的发展

高分子物理科学的发展从 Staudinger 建立大分子链学说开始,到 Flory 的链柔性^[4],到 P. G. de Gennes 的“软物质”概念以及“爬行理论”^[5],每一理论的出现,都使得我们对高分子达到全新的认识。从高分子物理发展的各个阶段来看,分子链柔性始终是核心。高分子的长链柔性也是高分子区别于小分子的根本。所以课程理论知识架构如果突出高分子的“长链柔性”这一本质特点,不但能够达到对高分子科学传承发展的目的,还可以激发学生的创新意识。借助相关知识单元的多角度,多层次分析,学生可以深刻掌握高分子物理根本理论,真正领会高分子物理的奇妙,激发学生学习的热情。

2.2 工程教育要求

工程教育核心理念是以学生为中心,以成果为导向,并进行持续改进^[1]。具体说来,强调以下问题:想让学生达到什么目标,如何让学生达到这些目标以及如何知道学生是否达到这些目标,强调对学生的能力培养。高分子物理课程与高分子化学、高分子工程共同构成高分子科学培养体系,高分子物理课程对高分子材料设计、改性和加工具有理论指导作用,课程注重培养学生高分子应用和研究的思路和方法,培养学生分析问题和解决问题的能力。根据以上培养目标我们确定毕业要求指标点,然后由毕业要求指标点确定课程目标(如表 2)。

2.3 课程内容重构方法

基于以上课程目标,我们将教学内容进行重新组织构建,如图 1。课程目标 1 要求学生掌握基础知识与基本原理,培养其推演、分析能力,课程内容对应于高分子物理最基本的知识和理论。高分子分子量巨大,且具有多分散性,学生对分子量概念比较熟悉,故作为课程导入部分,重点突出高分子的独特性,激发学生学习热情;理想链、实际稀溶液链、橡胶弹性以及多链缠结内容,反映了高分子沿链方向的柔性特

表 2 课程目标和对应毕业要求指标点

Table 2 Course objectives and corresponding graduation requirements index

课程目标	毕业要求指标点
1. 掌握高分子物理基础知识与基本原理,将所学知识用于推演、分析高分子材料科学与工程专业工程问题。	1. 工程知识 指标点 1.3: 能够将相关知识和数学模型方法用于推演、分析专业工程问题。
2. 构建和运用高分子多层次结构、相应分子运动机理与性能关系,对高分子材料科学与工程专业复杂工程问题进行正确表达。	2. 问题分析 指标点 2.2: 能基于相关科学原理和数学模型方法正确表达复杂工程问题。
3. 灵活运用基本原理,能通过文献研究,分析高分子材料科学与工程专业复杂工程问题,提出多种解决方案。	指标点 2.3: 能认识到解决问题有多种方案可选择,会通过文献研究寻求可替代的解决方案。

点,这也是高分子的共性特点之一。引导学生多角度,分层次认识高分子柔性这一根本特征,加深学生对高分子基本理论的认识。该部分内容通过统计计算、模型假设以及热力学基本方程演绎对学生的推演分析能力进行培养。课程目标 2 和 3 培养学生对实际工程问题的解析和表达以及依据基本原理对工程问题的解决能力。由于合成手段的复杂性,会带来高分子个性不同,体现在分子量及其分布、序列规整性、分子拓扑构造^[6]以及局部链间相互作用的差异性,这种差异性影响了实际应用中高分子的凝聚方式和分子运动规律,换句话说,高分子实际应用中的工程问题就是这些差异性的具体体现,该部分课程内容涵盖了玻璃化转变、结晶和熔融、粘弹性、流变性以及强度和韧性等专题。我们将这部分内容概况为高分子应用的个性问题。

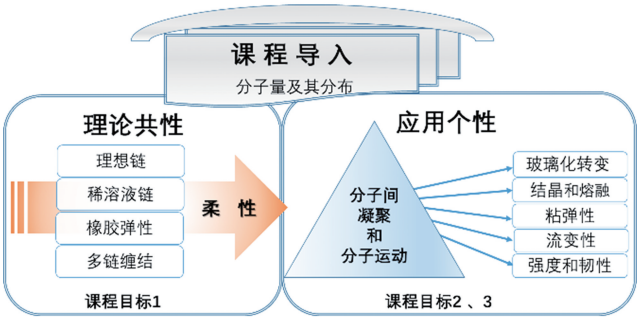


图 1 课程内容重构图

Figure 1 Course content reconstruction diagram

2.3.1 由分子量及分子量分布部分导入课程 高分子物理是高分子材料相关专业的一门重要专业课,学生一般已经接触过或者学习过传统的三大化学,对物质的化学结构有一定的知识储备。课程讲授如果从近程结构的化学组成出发,那么学生很容易认为,学习高分子结构的规律同小分子相同。所以重构课程内容时,我们关注于如何突出高分子的独特性,如何吸引学生注意力,如何激发学生思考等。基于此理念,课程内容调整为“分子量及分子量分布”开始导入,使学生尽早建立分子量很大,分子链很长的直观认知。进一步地,学生很容易注意到,高分子分子量巨大,长短不一,分子量必然是统计意义的。通过分子量的统计计算引导学生建立统计思想,学生初步领会到统计方法在课程学习中的重要性。

2.3.2 建立高分子链共性认识—柔性 单根高分子链中单键内旋转导致分子链内产生大自由度,高分子呈现有别于小分子的独特柔性。柔性是整个高分子物理理论的基石,课程内容设计从多角度,分层次引导学生认识柔性。

(1)理想链

首先是单元间无远程相互作用的理想链,即假定沿链相隔较远的单元间没有相互作用,即使沿链方向无远程相互作用。这一部分内容,围绕柔性的来源和体现进行展开,主要介绍理想链的各种模型,包括

自由连接链、自由旋转链、受阻链以及蠕虫状链等模型。这一部分重点介绍“链段”这一高分子物理中最根本的概念,也是学生最难于理解的一个概念。对于链段的描述通常有以下几个说法^[4]:

(a)链段是指高分子链上划分出来的可以任意取向的最小单元;(b)链段是指聚合物分子链中可以独立运动的基本单元;(c)链段是指大分子碳链中某一个链节发生内旋时,会影响到距它较近的链节,使它们随着一起运动,而这些受到相互影响的链节的集合体称作链段(segment)。要真正讲透链段,需要引导学生需要跳出价键的禁锢,考虑分子整链,采用统计思想进行处理。链段是统计意义的,链段之间自由连接,这样处理的高分子链称之为等效自由连接链(图 2)。

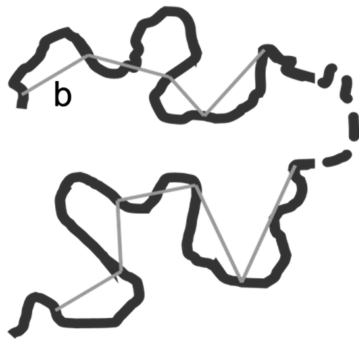


图 2 等效自由连接链

Figure 2 Equivalent free link chain

(2)稀溶液链

实际上,高分子链单元间存在远程相互作用。在稀溶液中,考虑拿出一根单独的高分子链,研究其柔性。利用 Flory 似晶格理论,可以得到稀溶液的混合熵(式 1):

$$\Delta S_M = -R(n_1 \ln \varphi_1 + n_2 \ln \varphi_2) \quad (1)$$

式中, ΔS_M 为混合熵, φ_1, φ_2 为溶剂和高分子的体积分数, n_1, n_2 为溶剂和高分子摩尔数, R 为气体常数。推导中,仅考虑了分子链段在溶剂中排列方式不同引起的构象变化,故称为构象熵。也是由于高分子所具有的链柔性,一个高分子在溶液中所作的贡献大于一个小分子在溶液中所作的贡献。链段单元之间以及链段与溶剂间的相互作用对于高分子链构象有显著影响,分子链团采取伸展或紧缩的形式。这里出现另一组非常重要的概念:排除体积、无扰链以及高分子流体力学体积。这些概念都是历年学生学习最头疼的地方,从分子链柔性视角能够更容易引导学生理解柔性。反过来讲,从这些不同角度理解柔性,也加深了学生对于柔性的认识。

(3)橡胶熵弹性

橡胶态是指非晶态高聚物处于玻璃化温度 T_g 与粘流温度 T_f 之间的状态,橡胶弹性可逆形变量大(高达 1000%)。由热力学分析可知,橡胶高弹性的本质来源于体系内部熵值变化。借助等效自由结合链模型,可以得到单个线性柔性分子链的构象熵以及理想交联网络模型的构象熵。进一步地,恒温恒容条件下,外力所做的功等于系统 Helmholtz 自由能的增量,得到橡胶的状态方程^[4]。抓住分子链柔性这一特征,将微观的柔性分子链构象变化与宏观的力学形变联系起来。

(4)多链缠结

高分子浓溶液和高分子熔体均表现出超高粘度,来源于柔性高分子链之间相互贯穿、缠绕。分子链缠结最早认为源自于柔性链的几何缠结(图 3a),但是分子链缠结的套环结构使得分子链的滑移不可实现。之后,钱人元等^[7]提出分子链之间的 Van de Waals 作用形成凝聚缠结作用(图 3b),由于其缠结的相互作用能很小,所以易于形成和解开。借助于标度理论和平均场理论,由 P. G. de Gennes 提出 Reptation 模型(图 3c),即爬行模型,后来经由 Edwards 和 Doi 发展提出的管道理论^[8,9],认为一根柔性分子链由于

受限于周围分子链所形成的管道,其运动只能沿其轮廓方向(管道方向)运动,而在垂直于轮廓方向的运动被限制,当分子链从管道一端移出时,管道限制脱除,即解缠。

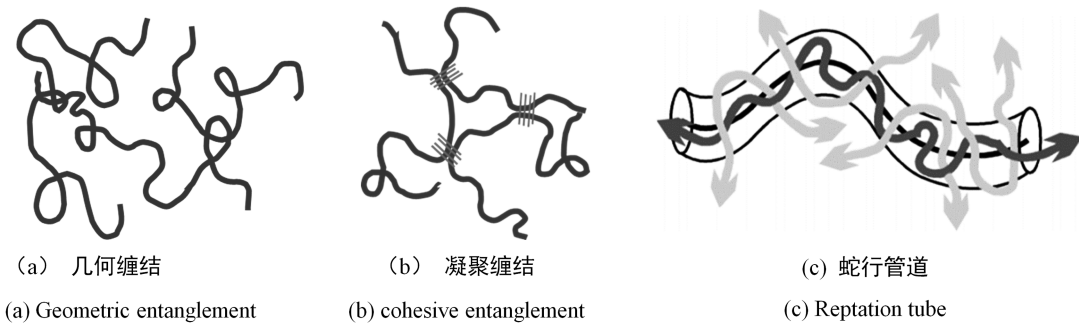


图 3 多链缠结
Figure 3 Multi chain entanglement

2.3.3 不同的分子间凝聚方式以及分子运动—高分子的应用个性 高分子链段单元之间的相互作用不同,影响了高分子最终聚集态结构的形成,而不同的聚集态结构是材料应用的基本。高分子分子内作用不同,导致统计链段不同,分子运动情况不同。高分子材料的工程应用,实际上就是分析高分子不同的凝聚方式和不同的分子运动规律。

(1)非晶玻璃化转变

玻璃化转变是高分子物理中的一个重要知识点,玻璃化转变理论虽然存在很多争议,但是将玻璃化转变视为链段开始运动或冻结的温度却在高分子物理中已经达到了共识。不同化学结构的高分子,其分子内作用力不同,统计链段不同。链段可以用玻璃化转变温度反映,将微观的结构和宏观性能联系起来,有助于学生分析高分子材料在实际运用中出现的工程问题。

(2)结晶和熔融

超过 2/3 的合成高分子材料都是可结晶的,所以结晶高分子材料在工程应用中占据举足轻重的地位。影响结晶高分子材料使用的关键因素是其熔点,结合分子间作用力和链段分析熔融熵和熔融热,得出结晶高分子熔点的一般规律。实际工程应用中的热处理、结晶度升高、片晶增厚等现象都可以从链段出发进行分析。

(3)粘弹性

高分子的粘弹性现象是高分子物理中的核心知识之一,也是高分子材料使用中的重要表现。粘弹性的本质是链段运动的体现。在粘弹性教学中,静态粘弹性现象的蠕变和应力松弛,动态粘弹性的滞后和损耗,学生分析其内部机理时很困难,如果从链段运动角度出发分析,问题就会迎刃而解。例如蠕变是由于链段的运动造成的,这也是松弛行为室温等效原理的体现。

(4)流变性能

高分子熔体的流变性质与链段的运动紧密相关,高分子的熔体流动是以链段为运动单元的流动机理,粘流活化能与分子量无关。学生学会分析高分子熔体的假塑性 with 链段运动的关系,粘弹性效应与链段运动的对应,对于工程问题分析起到关键的指导作用。

(5)强度与韧性

高分子材料在室温下表现出宽广的力学行为,从模量几个 MPa 的橡胶到几百个 MPa 的工程塑料。高分子材料的断裂力学性能极易受到外界条件的影响。静载荷下,高分子材料能够表现出一定的韧性,但在动载荷下,材料则比较脆。这主要归因于链段运动的松弛特性。

3 结论

在我们的教学组织中,以“高分子链共性—柔性”进行理论架构,涵盖理想链、稀溶液链、橡胶熵弹性

以及多链缠结体系等内容,通过这种多角度、分层次的分析,学生易于达到对高分子物理理论知识理解和掌握,能够逐步加深对高分子物理基础知识与基本原理的认识,培养学生将专业理论知识用于推演、分析高分子材料科学与工程专业工程问题的能力。以“不同的分子间凝聚方式以及分子运动—高分子的应用个性”分专题分析高分子实际工程应用,围绕如何分析不同条件下分子运动的特性,培养学生思考和分析方法,培养学生对实际工程问题的解析和表达能力以及对工程问题的解决能力。通过我们对教学内容的重新组织,能够在有限的学时教学内,实现布鲁姆教学目标,教育的基础目标是实现知识的认识并记忆,对事物的领会理解,以及将所学习的概念、原理进行应用。

高分子物理课程建设日新月异,如何在工程教育背景下,培养出具有扎实理论知识,并达到灵活运用理论知识的高质量工程应用人员是课程建设的最终目标。我们对高分子物理课程教学内容进行的重构,是适应工程教育要求,提高教学质量的一次大胆尝试。

参考文献:

- [1] Spady W G, Marshall K J. *Educational Leadership*, 1991, 49(2):67~72.
- [2] 励杭泉, 张晨, 吴丝竹. *高分子通报*, 2008, 10:60~64.
- [3] 胡文兵. *高分子通报*, 1998, 2:93~95.
- [4] 何曼君, 陈维孝, 董西侠. *高分子物理*. 第三版, 上海:复旦大学出版社, 2001.
- [5] de Gennes P G. *J Chem Phys*, 1971, 55: 572~580.
- [6] 胡文兵. *高分子结晶学原理*. 北京:化学工业出版社, 2013: 9~15.
- [7] 沈德言, 钱人元. *高分子通报*, 1993, 4:193~196, 216.
- [8] (美)鲁宾斯坦, (美)科尔比. *高分子物理*. 励杭泉译. 北京:化学工业出版社, 2007:232~244.
- [9] Strobl G. *Phys Polym: Concepts for understanding their structure and properties*. 3rd Edition. Berlin Heideberg: Springer, 2007: 333~343.

Reconstruction of Teaching Content of Polymer Physics under the Background of Engineering Education—Knowledge Structure and Cultivation of Engineering Application Ability

LV Rui-hua^{*}, JIN Tian-xiang, CHEN Bi-bo, ZHANG Meng-meng

(School of Chemistry, Biology and Materials Science, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: The core idea of Engineering Education is Student-Centered, Outcome-Oriented and Continuous Quality Improvement. The teaching content of the course of Polymer Physics is reorganized and restructured in order to solve the problem that students encounter, including mastering knowledge points scatteredly and failing to use them flexibly. The course content is introduced by Molecular Weight and Molecular Weight Distribution of macromolecules, the theoretical knowledge is organized by General Characteristic of Flexibility of Polymer Chain, and the content of polymer engineering applications is organized by various Interchain Aggregations and Molecular Motions—Individuality of Polymer Applications. The reconstruction of course content takes into account the profundity of professional theoretical knowledge of polymer physics and the extensiveness of practical engineering application of polymers, so as to cultivate students' ability to master and flexibly use engineering knowledge as well as develop the ability to analyze and solve practical engineering problems of polymers.

Key words: Engineering education; Polymer physics; General characteristic of flexibility of polymer chain; Individuality of polymer applications