

·教学·

高分子物理教学内容在《塑料材料与配方设计》 课程教学中的应用

——以“高分子链结构”为例

徐睿杰^{1*} 董智贤¹ 蒋强国^{2*} 邓宇^{2*} 雷彩红¹

(1. 广东工业大学材料与能源学院, 广州 510006; 2. 广东工业大学机电工程学院, 广州 510006)

摘要: 高分子物理作为高分子专业的核心课程, 着重研究高分子独特的物理性能。高分子链结构的教学内容阐明了高分子化学结构与物理性能间关系, 是理解高分子材料宏观性能的基础。塑料作为一大类重要的高分子材料, 其种类繁多、品类复杂, 同种塑料不同牌号间也存在性能差异。高分子物理作为前序课程, 其教学内容对塑料材料的讲解有重要的指导性作用, 本文以“高分子链结构”为例, 阐述了分子链链接序列结构、分子量及其分布、链拓扑构筑等特征的差异对塑料物理性质、加工性质的影响, 使用商品化塑料产品作为实例提升教学效果。在授课过程中, 引导学生建立不同课程间教学内容的联系, 构建高分子学科教学内容的连贯性。在教学中, 培养学生构建系统的高分子学科知识体系, 对学生学习和掌握高分子学科知识有重要意义。

关键词: 链结构; 高分子物理; 塑料

Application of Polymer Physics Teaching Content in the Teaching of *Plastic Materials and Formulation Design*

—Taking “Polymer Chain Structure” as an Example

XU Rui-jie^{1*}, DONG Zhi-xian¹, JIANG Qiang-guo^{2*}, DENG Yu^{2*}, LEI Cai-hong¹

(1. School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. School of Electromechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Polymer physics, as a core course in the field of polymer science, focuses on the unique physical properties of polymers. The teaching content related to polymer chain structures explains the relationship between the chemical structure and physical properties of polymers, forming the foundation for understanding the macroscopic properties of polymer materials. Plastics, as a major category of important polymer materials, are diverse and complex, with performance differences even among different grades of the same type of plastic. As a precursor course, the teaching content of polymer physics plays a crucial guiding role in the study of plastic materials. This paper uses “polymer chain structure” as an example to explain how variations in the sequence structure of molecular chains, molecular weight and its distribution, and chain topology affect the physical and processing properties of plastics. The use of commercial plastic products as examples enhances the effectiveness of teaching. Students are encouraged

2024-08-11 收稿, 2024-09-22 录用, 2024-11-07 网络出版

基金项目: 广工大教字 2022[59] 号新工科背景下基于 3D 打印技术的《材料力学》课程改革, 广工大教字 2024[75] 号互
换性与公差技术, 具有新质生产力前瞻性的高分子材料与工程专业人才培养模式探究与实践

* 通讯联系人: 徐睿杰, E-mail: xu565786@163.com; 蒋强国, E-mail: qiangguojiang@gdut.edu.cn; 邓宇, E-mail: yu.deng@gdut.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2024.24.233

to establish connections between the content of different courses, thus building continuity in the teaching content of polymer science. It is of great significance to cultivate students' ability to construct a systematic knowledge framework in polymer science for their learning and mastery of the subject.

Keywords: Polymer chain structure; Polymer physics; Plastics

引用: 徐睿杰, 董智贤, 蒋强国, 邓宇, 雷彩虹. 高分子物理教学内容在《塑料材料与配方设计》课程教学中的应用: 以“高分子链结构”为例. 高分子通报, 2024, 37(12), 1840–1846

Citation: Xu, R. J.; Dong Z, X.; Jiang, Q. G.; Deng, Y.; Lei, C. H. Application of polymer physics teaching content in the teaching of *Plastic Materials and Formulation Design*—taking “polymer chain structure” as an example. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2024, 37(12), 1840–1846

自20世纪20年代, 高分子学科开创者Staudinger提出高分子是由长链大分子构成的观点以来, 人工合成高分子材料开始了迅猛发展。人类社会的技术进步伴随着材料科学的发展, 二次世界大战后高分子材料以其轻质、高强、易于加工的优点开始进入社会生活的各个角落, 根据材料的性质和用途可分为塑料、橡胶和纤维几大类, 其中以塑料制品占比最大。2022年全世界各类塑料的总产量已经超过4亿吨, 在当今社会发挥着重要作用。

高分子材料的高速发展始于20世纪50年代, 关于高分子学科的知识体系也在同期建立, 并逐渐发展成高分子物理、高分子化学及高分子工程等三个分支学科。在目前我国的高分子专业教学中, 高分子化学和高分子物理是两门重要的专业基础课, 成为高分子专业课与数学、化学、物理等基础课的桥梁。《高分子物理》教学内容包括高聚物的微观结构与宏观性能, 以及它们之间的相互关系, 核心宗旨是揭示结构与性能的内在规律, 是后续课程的重要理论基础^[1,2]。在我校高分子专业的课程设置中《塑料材料与配方设计》是一门重要的专业课, 课程内容包含各类塑料材料的性质及典型应用、塑料中常用的助剂及塑料配方设计三部分内容。课堂教学内容量大、知识点分散、内容抽象, 学生难以记忆和掌握^[3,4]。在教学过程中发现, 学生对塑料材料的结构和性能间关系、均聚或共聚塑料的性能差异、同种塑料不同牌号间差异等基础教学内容掌握情况较差, 在面对实际应用性的问题时显得手足无措。实际上, 这些问题的根源在于学生无法将高分子物理课程中的抽象理论和塑料材料教学中的具体工程问题对应起来, 不能用所学知识来解决实际问题, 很难达到工程认证的目标要求^[5]。因

此, 在《塑料材料与配方设计》专业课教学过程中, 搭建高分子物理基础理论与塑料材料结构与性能关系的桥梁尤为重要。通过加深学生已经学习过的基础理论认识, 提高学生掌握和运用已有知识解决塑料材料领域复杂工程问题的能力, 引导学生真正理解所学基础知识并形成良好的专业素养。

1 “高分子链结构” 知识点回顾

高分子材料由单体经过不同聚合反应, 形成结构单元周期性出现的长链。链组成的连接性、链运动的柔顺性和链长短的多分散性是聚合物链的独有特征。高分子特殊的物理化学性质主要来自于其较长的分子链, 高分子链重复单元结构与链内和链间局部相互作用相关, 而链单元键接序列不规整、有限链长及其分布、链的立体拓扑构筑, 则对各种物理性质带来了约束作用^[6], 因此, 合理地将高分子链结构这个基础知识点与塑料材料的化学结构与其物理性质之间的关系结合起来是塑料材料理论教学中重要的一环。

我校高分子专业选用的高分子物理教材是由华幼卿、金日光编写的《高分子物理》(第5版)^[7], 高分子的链结构可以划分为近程结构和远程结构, 相关教学内容分布在该教材的第一章和第四章。第一章高分子链结构主要讲述高分子的近程结构, 包括结构单元的化学组成、高分子构型、分子构造和序列结构。远程结构则包括高分子链的构象及柔顺性(第一章)和分子量及分子量分布(第四章)。学生正确理解高分子链的近程和远程结构, 对学生掌握不同塑料材料的性质、了解塑料材料的典型应用领域, 理解塑料物理性能与应用领域技术要求之间的联系有重要的指导作用。

2 塑料材料与配方设计课程教学实践案例

2.1 构型异构

构型是指分子中由化学键所固定的原子在空间的几何排列,是对分子中最邻近原子的相对位置的表征,构型不随分子键旋转而变化,改变构型必须经过化学键的断裂和重组。单体构型差异带直接影响聚合物性质,在聚合物中常见的由构型差异带来的同分异构体包括三类,即旋光异构、键接异构和几何异构。

在塑料材料与配方设计的教学过程中,通常需要区分不同异构体同系物间的物理性能差异,如等规、间规和无规的聚丙烯或聚苯乙烯;在聚乳酸中左旋、右旋和消旋聚乳酸等。学生在理解这些材料物性差异的时候需要用到高分子物理中学习的旋光异构的内容。在分子物理的教学过程中,对旋光异构的讲述主要来自聚合物单体中存在手性中心原子,通常乙烯类共聚物都具有旋光异构的特征。进一步地,根据取代基排列位置的周期性分布,将旋光异构体分为全同、间同和无规异构三类。学生往往会模糊两者的概念,在面对实际塑料产品时很难区分两类异构体对材料性能的影响。

在塑料材料的教学中,应该使学生理解单体的旋光性与高聚物分子链旋光性的区别。如大部分的乙烯基塑料,如聚丙烯、聚苯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯等材料,虽然它们的单体都存在旋光异构体,但聚合后大分子并不显示旋光性。相较于旋光异构,构型异构对此类塑料凝聚物态结构和性能的影响更为显著。以聚丙烯为例,目前商业化的产品中,等规聚丙烯主要由Ziegler-Natta (Z-N) 催化剂得到,间规聚丙烯主要由茂金属催化剂催化聚合得到,两者都是半结晶性聚合物。而无规聚丙烯是非晶态聚合物,通常是高等规或间规度聚合样品的副产品,常用作分散剂或润滑剂,相关典型数据见表1。对各类材料而言,构型异构的序列规整性对材料的结晶性、成型能力及力学性能影响明显。构型异构的序列规整性指等规(或间规)链段的序列长度占比,又称为等规度。等规度越高,其规整程度、结晶度也越高,产品的机械性能提升,熔点、热稳定性、使用寿命也相应提高。等规度不

仅对聚丙烯树脂及制品的性能有影响,且对聚丙烯的生产及其树脂的加工性能也有重要影响^[8]。以聚丙烯膜的材料选用来说,通常干法锂电池隔膜原料要求原料等规度不低于98%,而双向拉伸膜的等规度则不低于96.5%。同样,当聚苯乙烯以本体聚合或自由基聚合时,通常得到无规的通用聚苯乙烯(GPPS),使用茂金属催化剂聚合则可以得到半结晶的工程塑料间规聚苯乙烯(sPS)。

表1 等规、间规和无规聚丙烯的物性典型值^[9]

Table 1 Typical values of physical properties of isotactic, isotactic and atactic polypropylene^[9]

	密度 (g/cm ³)	结晶度 (%)	熔点 (°C)	等规度 (%)
等规聚丙烯 (iPP)	0.946	50~70	165	>95
间规聚丙烯 (sPP)	0.87	40~60	130~140	>80
无规聚丙烯 (aPP)	0.83	/	/	/

在目前商业化塑料产品中,聚乳酸是唯一具有大分子旋光性的产品,可分为左旋、右旋和消旋聚乳酸,其化学结构见图1。具有旋光性的聚乳酸树脂是半结晶性聚合物,左旋和右旋聚乳酸的理化性质近似,主要是因为两者的差异仅为单体的旋光性。由于左旋乳酸的分离能力较高,目前市售的大宗产品主要是左旋聚乳酸。在左旋聚乳酸产品中,单体的光学纯度直接影响原料的结晶性和结晶完善性。以道达尔公司的LX175和L175两个牌号产品为例,两种树脂的分子量和分子量分布近似,但熔点分别为175和155 °C,相差达到20 °C。主要原因是L175单体的光学纯度达到99%,而LX175的仅有96%。光学纯度除了影响熔点高低外,对结晶速率、结晶晶型也有显著影响^[10]。

在合成过程受聚合过程不可控性的影响,分子链上会出现局部的聚合缺陷,如有单取代基的单体会形成“头-头”或“尾-尾”结构,形成高分子物理课程提及的“键接异构”。在塑料材料的教学中,需要学生理解当聚合物单体中不存在双烯结构时,大部分的键接异构对材料性能的影响是负面的,是分子链的聚合缺陷。如在聚氯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯中“头头”结构含量的增加会导致热分解温度的降低,在聚乙烯醇中头头结构含量影响维纶纤维的尺寸稳定性,由于头头结构会影响缩醛反应,导致维纶纤维亲水性提升,影响

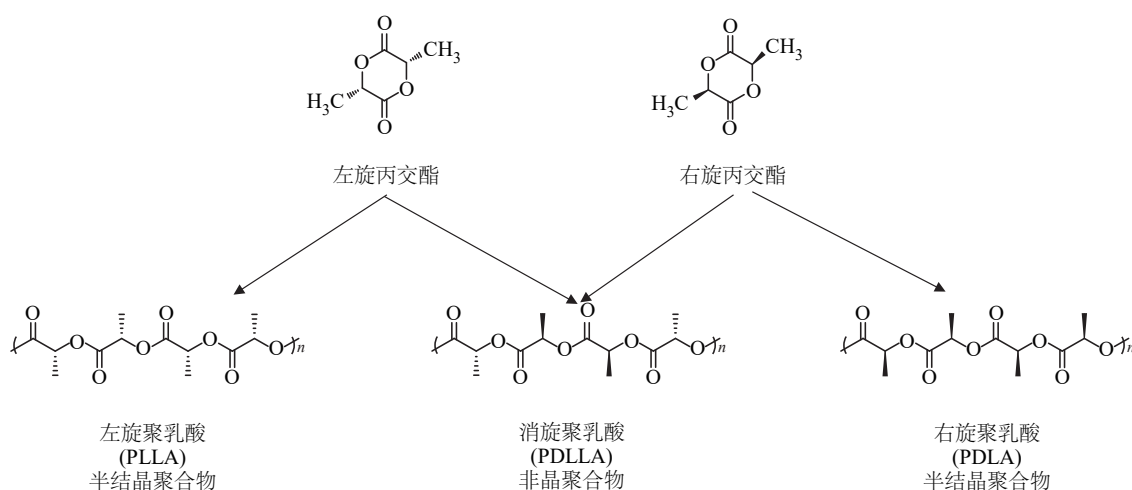


图1 聚乳酸的旋光异构体化学式

Figure 1 Poly(lactic acid) isomer chemical formula

尺寸稳定性^[9,11,12]。当聚合物单体中有双烯结构时则要注意,键接异构将带来性能上的差异。在热塑性弹性体苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物(SBS)中,存在以丁二烯段1,4加成占主要成份的普通线型SBS(L-SBS)和以丁二烯段1,2加成占主要成份的高乙烯基含量型SBS(HV-SBS)。相较于L-SBS, HV-SBS在180℃停放2周表现出优异的稳定性和抗老化性,加工黏度也低于L-SBS^[13]。

几何异构主要出现在主链含有双键的高分子材料中,这些聚合物由于链的柔顺性大,在室温下通常处于橡胶态,往往归属于橡胶材料,如顺式1,3-丁二烯和反式1,3-丁二烯,顺式异戊二烯(天然橡胶)和反式异戊二烯(杜仲胶)等。顺式结构的聚合物链往往柔顺性大,是非晶态聚合物,而反式结构聚合物结构规整性强,通常具有一定的结晶性。

2.2 分子构造

分子构造是指聚合物分子的各种几何形状,绝大多数塑料是线形大分子,少量的具有支化、星

形或交联结构。而在共聚物中,其序列结构更为复杂,根据单体的序列排布可以分为无规、交替、接枝和嵌段共聚物。这些结构给材料带来了性能上的差异,但是学生在实际运用的时候往往很难与具体的工程问题联系起来,导致解决工程问题的能力很差。因此在塑料材料的教学中,我们特别注意将两者结合起来,使学生能运用高分子物理的基本知识去理解化学组成近似,但分子构造有差异的塑料间的性能区别。

在讲述聚乙烯的教学内容中,通常需要学生从凝聚态结构角度区分低密度聚乙烯(LDPE)、高密度聚乙烯(HDPE)、线型低密度聚乙烯(LLDPE)的性能差异,见表2。首先需要学生区分LDPE和HDPE是乙烯的均聚物,而LLDPE是乙烯和 α 烯烃的共聚物(通常是1-己烯,约占目前商品化产品的96%),其中共聚单体的含量约6%~8%。由于LDPE的聚合温度高、聚合压力大,聚合过程副反应多,其化学结构是有多支链的线形聚合物,而HDPE使用Z-N催化剂,聚合温度和压力都较低,

表2 常见聚乙烯的物理性能

Table 2 Physical properties of polyethylene

类型	密度(g/cm ³)	熔点(°C)	结晶度(%)	分子量分布	适合制品
LDPE	0.910~0.940	105~115	45~65	宽, 20~50	薄膜、挤出涂覆、电线电缆、片材
HDPE	0.940~0.970	126~136	85~95	较窄, 2~10	中空容器、薄膜、单丝、管材、电线电缆、注塑制品
LLDPE	0.915~0.935	115~130	55~65	较窄, 2.8~5	薄膜、容器、管材、电线电缆、汽车零部件

得到线形聚合物,几乎没有支链。因此,HDPE分子链规整性高、结晶能力强,得到的塑料产品硬度、强度、模量、耐热性均优于LDPE,但是耐环境应力开裂性能不如LDPE。相较于LDPE,线形的有少量短支链的LLDPE具有更加优异的力学强度和结晶性,少量的支链也提升了链间缠结密度,使LLDPE的耐环境应力开裂明显优于HDPE,用LLDPE制作的膜产品具有优异的拉伸性和抗穿刺性,这也是少量短支链所赋予的性能优势。

在各类共聚聚合物中,共聚组分的序列结构直接影响塑料的硬度、玻璃化转变温度、结晶性能等理化性质。在分子物理的教学中,学生掌握了单体聚合物序列形式的不同会导致物理性能的差异,但是忽略了共聚组分的含量、共聚序列长度等结构参数对共聚物性能的影响。比如在聚丙烯共聚物中,当乙烯和丙烯两组分以嵌段形式存在时,得到嵌段共聚聚丙烯(PPB),此时材料的结晶性受影响较小,保证了PP的硬度、耐热性及光泽度。在PPB中乙烯组分的含量可达5%~20%,引入乙烯段能明显改善聚丙烯的透明性和低温抗冲击性。而当乙烯部分以无规序列存在时,得到无规共聚聚丙烯(PPR),受乙烯组分的影响,PP的结晶能力降低,材料的硬度下降。目前,PPR产品中,乙烯部分的含量一般仅有1%~3%,少量的乙

烯组分已经影响PP链的有序性,大幅降低PP的结晶性和热变形温度,PPR通常作为多层复合膜的热封层。无规共聚体系中乙烯含量进一步增加时,共聚物将丧失塑料的特征而转变为橡胶态的乙丙橡胶。

同样的例子还出现其他塑料中,如常见的苯乙烯和丁二烯的共聚物,随着两个单体聚合序列的不同,得到的塑料材料的性能差别巨大,如图2所示。两者的无规共聚物是橡胶态的丁苯橡胶(SBR)。当两者通过阴离子聚合可以得到二元或三元的嵌段共聚物。在二元嵌段共聚物中,当苯乙烯含量占比超过70%时,得到丁苯透明抗冲树脂,又称K-树脂;当丁二烯含量超过60%时,材料的玻璃化转变温度将大幅降低,转变为二元的热塑性弹性体(DB-SBS)。而三嵌段共聚物SBS是典型的热塑性弹性体。在三嵌段的SBS中,存在分子构造差异的两类热塑性弹性体,即L-SBS和支化SBS(B-SBS)。其中,B-SBS具有更佳的耐磨性、回弹性、抗撕裂性等,但B-SBS的流动性、与PP的相容性、拉伸强度和光泽度均明显低于L-SBS。除了分子构造差异外,丁二烯和苯乙烯两单体的摩尔比对SBS性能也有明显影响,随着丁二烯组分含量增加,SBS的硬度下降、拉伸强度降低,断裂伸长率增加,吸油率提升。常见的苯

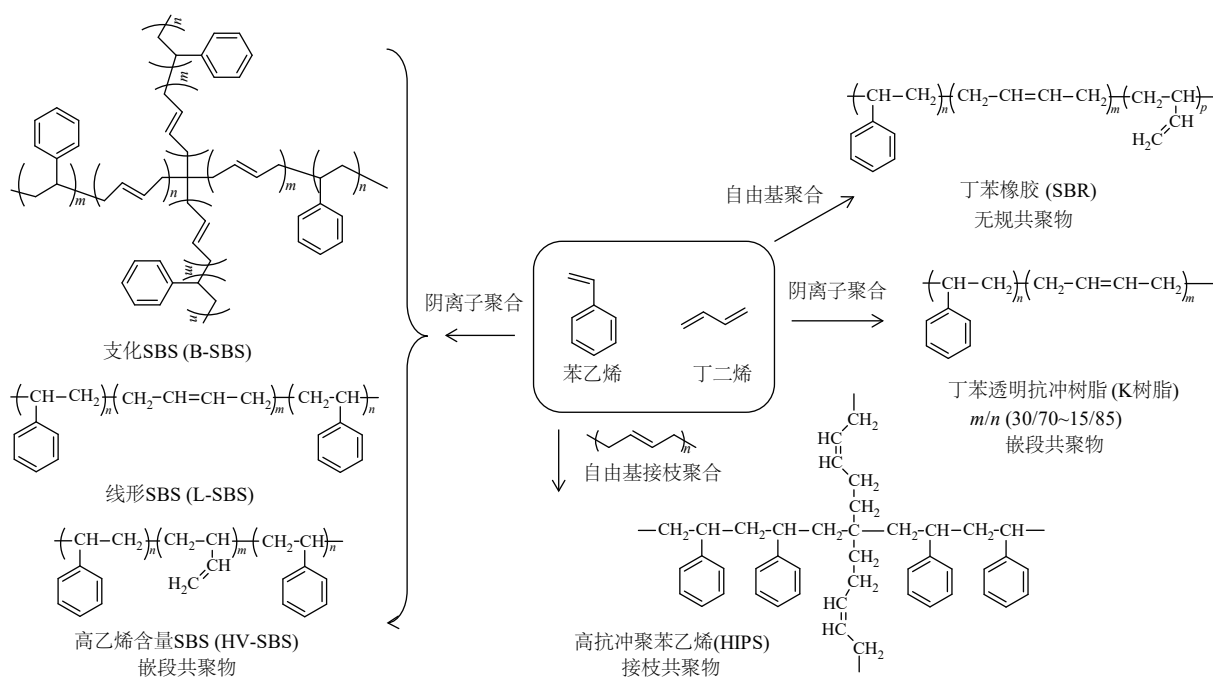


图2 典型的苯乙烯/丁二烯共聚物

Figure 2 Typical styrene/butadiene copolymer

表3 常见的苯乙烯/丁二烯嵌段共聚物的典型理化性能^[14]Table 3 Typical physicochemical properties of common styrene/butadiene block copolymers^[14]

共聚物种类	二嵌段含量 (%)	共聚聚合物种类	苯乙烯/丁二烯 (摩尔比)	乙烯基含量	熔融指数 (g/10min)	拉伸强度 (MPa)
L-SBS	<15	三嵌段	≈30/70	≤15	<1	33
B-SBS	<15	三嵌段	≈30/70	≤15	<1	27
HV-SBS	<15	三嵌段	≈30/70	≥30	<1	33
DB-SBS	>75	二嵌段	≈30/70	≥30	20	2

乙烯-丁二烯嵌段共聚物的物理性能^[14]如表3所示。在高抗冲聚苯乙烯(HIPS)中,存在苯乙烯和丁二烯的接枝共聚物,有效改善聚苯乙烯和聚丁二烯两相的相容性。

相容剂是一种重要的塑料助剂,用以改善2种以上高分子之间共混互不相容的聚合物而加入的第三组分,通常是接枝物。高分子共混物中使用的相容剂一般具有较高的分子量,含有极性和非极性的官能团,这些接枝物通常是接枝聚合物,一般以非极性的高分子为主链,将具有高反应活性的单体通过化学反应接枝到侧链上。常用的高分子主链包括聚乙烯、聚丙烯、聚烯烃弹性体、三元乙丙橡胶等,高反应活性单体包括马来酸酐、甲基丙烯酸缩水甘油酯、丙烯酸及其衍生物等,常见的用作相容剂的接枝聚合物包括马来酸酐接枝聚丙烯(PP-g-MAH)、马来酸酐接枝聚烯烃弹性体(POE-g-MAH)等。经混合混炼后,相容剂可以分散在两种高分子之间的界面上,起到降低界面张力、增加界面层厚度、降低分散粒子尺寸的作用,使体系最终形成具有宏观均匀微观相分离特征的热力学稳定的相态结构。

2.3 分子量及分子量分布

在塑料材料的教学中,除了使学生掌握典型的塑料类型,还需要学生了解塑料的牌号这一概念。在塑料产品中,树脂的牌号区分标准往往是熔融指数。在塑料中通常使用熔融指数代替具体的分子量数值,熔流比代表分子量分布。因而不同牌号产品的差异往往与分子量及其分布有关。在分子物理教材中提及“分子量是高分子链结构的一个组成部分,是表征高分子大小的重要指标”,“无论是天然还是合成聚合物,分子量都是不均一的,具有多分散性,因此聚合物的分子量只有统计意义”^[7]。因此在塑料的教学过程中,需要结合分子量及分子量分布的知识点讲解“塑料牌号”这一概念,将树脂的流动性、结晶性、力学强度等物理性能与熔融指数结合起来。以通用塑料

均聚聚丙烯(PP)为例,商业化的聚丙烯产品,随着其适合的成型工艺不同,其熔融指数范围可达0.1~2000 g/10min。拉丝级PP,熔融指数一般在2~4 g/10min,可用于拉丝、吹膜、挤出板材片材等,常见的牌号有F401、T30S、S1003等,注塑级PP的熔融较大,一般高于10g/10min,相较于拉丝级PP分子量略低,分子量分布更宽,常见牌号有Y600、K1008、HP500N等,短丝级的PP料熔指与注塑级的近似,一般在15~40 g/10min,两种可以互相替代,但短丝级PP分子量分布明显窄与注塑级树脂,注塑得到的产品一般是硬而脆。用于涂覆或熔喷的PP料的熔指较大,往往在20 g/10min以上,用于熔喷的树脂最高可达2000 g/10min,典型牌号有Exxon Mobil的6936G2, Basell的MF650X、HP461Y, Borealis公司HL5123FR, ATOFINA公司的9718等。

在塑料制品中,管材是一大类制品。对管材而言,既要求加工中有良好的流动性,确保管材的直径均一性,又要求管材具有较高的力学强度和环刚度。对于这种特殊要求,石化企业开发了特殊的双峰分布材料,即分子量分布曲线呈现2个峰值,典型的如双峰分布聚乙烯(Borealis, HE3490)。对双峰聚乙烯的讲解,需要将管材的性能与链结构特性联系起来,使学生从分子量大小与流动性、结晶性等性能角度展开思考。管材是一类中空的、高长径比的制品,要求有较高的力学强度和抗蠕变性,同时要有较高的环刚度以抵抗管内压力,防止爆破。此外,管内壁要求光滑,降低流动阻力。要满足这些要求,就需要树脂的分子量较大,分子量分布相对较窄,链规整性高。同时考虑到挤出成型时离模膨胀尺寸稳定,管壁不出现鲨鱼皮等缺陷,要求在树脂中有部分低分子量组分以改善管材的加工性。

3 结语

在教学实践中,我们发现学生对已学习的

基础知识的运用能力较差,解决复杂工程问题的能力较弱,其根本原因是学生不会建立知识与问题间的桥梁,核心是学生不能将已学习的知识串联起来。因此在教学过程,注重前后课程的学习内容的连贯性,注重高分子学科知识体系的构建,对学生学习和掌握高分子学科知识有重要意义。

参考文献

- 1 朱平平,何平笙,杨海洋. 浅谈高分子物理课程的教学方法. *高分子通报*, **2007**, (8), 55–59.
- 2 李振华,沈雷. “科教深度融合”的高分子物理教学探索与实践. *高分子通报*, **2023**, (12), 1740–1744.
- 3 徐睿杰,雷彩虹,董智贤,盛鑫鑫. 专业认证背景下塑料材料与配方设计课程教学改革与实践. *武汉轻工大学学报*, **2020**, 39(1), 101–104.
- 4 徐睿杰,雷彩虹,董智贤. 基于应用案例的《塑料材料与配方设计》教学实践探索. *高分子通报*, **2021**, (11), 100–103.
- 5 艾娇艳,刘保华,宋丽娜,赵晨. 《高分子物理》课程中交联相关知识的模块化教学. *高分子通报*, **2024**, 37(5), 707–712.
- 6 胡文兵. 高分子链结构的系统介绍. *大学化学*, **2024**, doi: 10.3866/PKU.DXHX202401014.
- 7 华幼卿,金日光. *高分子物理(第五版)*. 北京: 化学工业出版社, **2019**.
- 8 谷宇,宋美丽. 聚丙烯等规度分析方法研究进展. *当代化工*, **2013**, 42(10), 1450–1453.
- 9 雷彩虹,徐睿杰,董智贤,陈大华. *塑料材料与助剂*. 北京: 中国轻工业出版社, **2021**, 29–30.
- 10 Song, P.; Sang, L.; Jin, C. H.; Wei, Z. Y. Temperature-dependent polymorphic crystallization of poly(L-lactide)s on the basis of optical purity and microstructure. *Polymer*, **2018**, 134, 163–174.
- 11 Manring, L. E.; Sogah, D. Y.; Cohen, G. M. Thermal degradation of poly(methyl methacrylate). 3. Polymer with head-to-head linkages. *Macromolecules*, **1989**, 22(12), 4652–4654.
- 12 Al-Yaari, M.; Dubdub, I. Pyrolytic behavior of polyvinyl chloride: kinetics, mechanisms, thermodynamics, and artificial neural network application. *Polymers*, **2021**, 13(24), 4359.
- 13 Islam, S. S.; Ransinchung, G. D. R. N.; Singh, B.; Singh, S. K. Effect of short-term and long-term ageing on the elastic and creep behaviour of modified binder containing different SBS copolymer. *Mater. Struct.*, **2022**, 55(5), 144.
- 14 Sohel Islam, S. K.; Singh, S. K.; Ransinchung R N, G. D.; Ravindranath, S. S. Performance degradation during elevated storage temperature of SBS-modified binders and asphalt mixes: impact of SBS molecular structure. *J. Mater. Civ. Eng.*, **2023**, 35(3), 04022457.