



针对工科专业的高分子材料流变学教学实践和体会

陶 勇,王 新,胡海青*

(橡塑材料与工程教育部重点实验室,高分子科学与工程学院,青岛科技大学,青岛 266042)

摘要:高分子材料流变学对高分子加工工艺、成型设备以及模具的设计具有至关重要的指导意义,是高分子材料相关专业的必修基础课程。本文简介了流变学的发展概况和在青岛科技大学的开课情况,并总结了作者在工科专业学生的教学实践中针对具体内容的教授技巧与经验,提出针对本科阶段的学生应该着重介绍流变学的基础知识和基本原理,并注重理论和实践的有机结合,通过流变测量仪器的原理分析和高聚物加工成型工艺的流变学剖析来进一步阐明流变学基本概念和原理。

关键词:流变学;高分子;教学方法

引言

二战后由于石油化学工业提供了价廉易得的原料,高分子科学和工业化应用得到了飞跃式发展。由于以水、空气等牛顿流体为研究对象的经典流体力学不能解释和预测聚合物黏性流动和成型加工中出现的奇特现象和规律,因而以黏弹性体为研究对象的聚合物流变学(Polymer Rheology)应运而生,自 20 世纪 50 年代以来逐渐发展并完备起来。现在,聚合物加工工艺的确定、加工设备的设计等等都离不开流变学的辅助,以流变学方程为框架编制的流动模拟软件也成为聚合物加工企业和聚合物设备制造企业的必备辅助工具。迄今,流变学已经成为从事聚合物加工行业的科研人员必修的专业基础课程。

青岛科技大学高分子科学与工程学院自 1986 年开设《高分子材料流变学》课程,是国内最早开设该课程的高校之一,迄今已有 30 年的教学历史。这期间吴其晔教授带领一批年轻老师持续跟踪学科的发展,针对学科的前沿问题开展科研工作,成功申请了流变学领域的多项国家自然科学基金,科研成果在国内外形成了一定的学术影响力,达到科研教学相互促进的效果。在长期的教学、科研实践的积累基础上,学科带头人吴其晔教授编著出版了《高分子材料流变学》一书,作为本校高分子材料专业的教材,得到国内同行的肯定。

流变学的课程内容理论体系大致包括以下几个部分:(1)加工流变学,主要研究黏弹性液体的宏观流动规律,以及工艺条件、分子结构参数、配方和多相体系等对黏弹性的影响;(2)结构流变学,从分子结构模型出发,推导得到宏观的黏弹性规律,再以实验结果加以验证和修正;(3)流变测量学,以流变学原理为基础构建流变测量方法和仪器;(4)聚合物典型加工过程的流变学分析,是流变学原理在加工工艺和加工设备设计上的具体应用。

流变学有完备而深奥的理论体系、内容繁杂、学科交叉性强,这就对教师和学生都提出比较高的要求。从教师来看,既要具备一定的理论基础,也要有相当丰富的聚合物加工实践经验。从学生来看,既要求有较好的数学、物理基础,又要有相当好的高分子背景知识。教师在教学中要考虑学生的工科专业背景和培养目标,对复杂的数学工具、力学公式要处理的逻辑性强、脉络清晰,避免连篇累牍的公式推导,重

10.14028/j.cnki.1003-3726.2021.02.012

收稿:2017-10-12;修回:2020-12-16;

作者简介:陶勇(1969-),男,讲师,博士,主要从事高分子流变学教学和高分子材料合成及改性方面的研究工作;

* 通讯联系人:胡海青,E-mail:hhq@qust.edu.cn.

点阐明结论中蕴含的物理意义和对高分子加工的指导意义;对于流变学的基本概念和基本物理量,在首次涉及之时要讲透彻,在教学过程中重复出现时要强调,引导学生尽快领会流变学的要点。另外,在教学中还要注重流变学知识的实际运用,在恰当的时机以实例介绍如何从流变学角度考虑高分子的分子设计、加工工艺和设备的设计和高分子材料的性能调控,增强其工程实践能力。下面作者结合自己的教学实践,谈谈对流变学教学的点滴体会。

1 从兴趣入手,注重基本概念的教学

流变学理论性强、公式繁多、需要高深的对数学基础需要较高,因此学生对流变学课普遍感到有畏难情绪,不得入手困难之处。如果一开始就展开结构流变学(微观流变学)的大量理论和公式推导,必然将大部分学生的学习热情彻底浇灭。所以,作者遵循吴其晔老师编著的《高分子材料流变学》一书的思路,先向学生展示高分子液体的“奇异流变现象”,用压差和孔压误差、Barus 效应、Weissenberg 效应等简明易懂的事例勾起学生的学习兴趣。在此基础上,然后顺理成章地介绍流变学的重要基础概念,如黏度和法向应力差、非线性黏弹性、非牛顿流体、幂律方程等等。以相应的概念来解释前面的奇异流变现象,使学生快速明确地掌握流变学理论的基本框架。

在教学中为了加强学生对新知识点的接受性,可与学过的概念进行对比讲解。流变学研究的是高分子液体(浓溶液和熔体)的“非线性黏弹性”。非线性黏弹性对于初学者是个新概念,在授课时,可将非线性黏弹性和学生已经学过的线性黏弹性相互对比,以加深学生的理解。线性黏弹性是高分子材料在小应力或小形变下表现的黏弹性,如蠕变和应力松弛现象。而非线性黏弹性是高分子材料在大应力下发生大形变时的表现。以下依次是高分子材料蠕变、应力松弛与流变行为的运动方程:

$$\frac{\sigma_0}{E_0} = \epsilon + \frac{\eta_0}{E_0} \frac{d\epsilon}{dt} \tag{1}$$

$$\frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{E_0} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\eta} \tag{2}$$

$$\sigma = K \cdot \left(\frac{d\gamma}{dt}\right)^n \tag{3}$$

由上式可见,描述蠕变和应力松弛现象用线性微分方程,而描述流变性的幂律是非线性微分方程(当 $n \neq 1$ 时)。阐明了这些,即可使以往所学与当下的学习内容联系起来,使得学生更易于接受和理解。

2 教学中指明理论的分析工具价值和实践应用价值

流变学是理论性很浓厚的边缘学科,建立在张量分析之上的,以张量工具表述。在国内高中数学中一般只介绍了标量和矢量,所以针对本校本专业的工科特点,在授课时还是基本上使用标量和矢量。但是流变学教学中张量概念不能一句不提。例如,法向应力差是高分子液体中剪切流动方向上与速度梯度方向上的法向应力分量之差,其根源是高分子液体在流动中发生大分子线团的取向和弹性形变。法向应力差效应具体表现为 Barus 效应、Weissenberg 效应、不稳定流动和熔体破裂等现象等,其宏观行为表现简单易懂。但只有对流场中某一点的受力状况进行张量分析,才能阐明法向应力差的由来,进而才能说明为什么高分子液体在黏性流动中还存在弹性形变。根据张量分析,通过流场中某一点的三个正交面元上的应力分别沿三个坐标轴分解,得到 9 个应力分量,其中 3 个(偏)法向分量分别记为 σ_{11} 、 σ_{22} 和 σ_{33} ,法向应力差定义为:

$$\begin{aligned} N_1 &= \sigma_{11} - \sigma_{22} \\ N_2 &= \sigma_{22} - \sigma_{33} \end{aligned} \tag{4}$$

在剪切流动下, $N_1 > 0, N_2 < 0$, 且 $|N_1| \gg |N_2|$ 。流动中的弹性形变大小即以 N_1 大小来定量

表征。至于粘黏弹性流动中为何 $N_1 > 0$, 可由“构象改变假说”中高分子线团在流动方向上的拉伸取向来解释。此处还可引导学生思考: 随着流动速率加快, N_1 会不会无限制增大下去? 显然高分子链在流动中的构象改变会趋于极限, 所以 N_1 不会无限制的增大。

流变学中“输运过程的基本方程”一章基本是连篇累牍的公式推导, 工科学生学习此章内容时往往提不起兴趣, 也不清楚学这些内容有什么用。针对此不利局面, 作者在教学实践中做了几点改进。首先, 对于连续性方程, 原教材的推导方法比较深奥晦涩, 比较难于被初学者理解和接受, 所以笔者在流变学参考书中找到了一种更直观、更有趣味的推导过程, 以调动学生的学习兴趣。

在直角坐标系中, 流场中任一点 (x, y, z) 处在 t 时刻的速度为 v , 其分量为 v_x, v_y 和 v_z 。在该点选一个边长为 dx, dy, dz 的微元, 流体密度为 ρ , 计算通过流体元表面的的净流入(流出)流量。在 x 轴方向上, 同法向两个微面元在单位时间内净流入(流出)流体元的流量为

$$\left[\rho v_x + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) dx \right] dy dz - \rho v_x dy dz = \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} dx dy dz \quad (5)$$

同理可得在 y 方向和 z 方向上单位时间内净流入(流出)流体元的流量分别为 $\frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} dy dz dx$ 和

$\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} dy dz dx$ 。即通过流体元六个面单位时间内净流入(流出)流体元的总流量为

$$\left[\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right] dy dz dx \quad (6)$$

再考虑到流体元内的密度变化, 然后根据物质守恒定律, 即得到连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

对于运动方程, 还是展示传统的矢量分解方法, 但要强调在高黏度下表面力相对于体积力占绝对优势, 后者甚至可忽略不计。对于所得的最终结果即 Navier-Stokes 方程, 可将其在流体力学中的重要性类比如高分子物理学中的 WLF 方程, 使学生加深对此方程的印象。

年轻人求知欲旺盛, 他们在学习了理论之后往往会问“我学这些东西有什么用呢?”。所以在按部就班地完成基本方程的推导之后, 很重要的是, 应该向学生指明这些方程的应用之处, 如用于编制流动模拟软件; 模具设计过程中的流变学设计阶段要用到流动模拟软件, 如 MoldFlow, 就是以这些基本本构方程为基础编制的。流变学中基本上是非线性微分方程, 不能得到解析解, 只能采用数值解法, 在特定的初始条件和边界条件下求得数值解。

3 温故知新, 流变测量学是对前面所学的最好演绎

流变测量学一章在流变学中占重要地位: (1) 通过流变测量可得到表征黏性的重要参数——剪切黏度, 此外, 还可得到动态粘黏弹性数据以及表征弹性的法向应力差, 使得流变学大厦有了实实在在的基础; (2) 学生都对实用性的知识很感兴趣, 流变测量学涉及多种测试仪器, 如毛细管流变仪、锥-板流变仪、混炼机型流变仪等, 这些仪器原理各异、互相补充、相得益彰, 很能引起学生的求知欲; (3) 流变测量是将可测量与不可测量的物理量联系起来的过程, 其中所用到的流变学原理和数学推导都是学生力所能及的, 因此流变测量学实际上是对前面所学基础知识的一个综合运用, 通过学习此章, 可达到温故知新的效果。因此, 作者在授课时详细讲解流变测量仪的原理, 一步一步地推导公式, 力图使同学们绝不应付了事, 达到彻底理解和掌握, 并在最终考试中安排毛细管流变仪、锥-板流变仪、落球式黏度计测量黏度剪切黏度原理的题目, 考察掌握情况。另外, 安排了毛细管流变仪测定高聚物熔体剪切黏度黏度的实验, 使得学生通过动手操作加深对流变测量原理和仪器的理解和掌握。

再如混炼机型流变仪虽然不能得到剪切黏度黏度, 但可模拟实际加工过程(如混炼和挤出), 测得重

要的工艺参数如温度和时间。在讲解混炼机型流变仪时,要结合实例,如利用混炼机确定 PVC 塑化时间和塑化温度,研究交联剂用量和温度对 PE 交联行为的影响。

4 多联系实际,让流变学原理在应用中放光彩

流变学的理论性很强,但最终要服务于实践,否则就是空中楼阁。因此,流变学的后续章节是将流变学基本原理用于几个典型加工过程的流动分析,这部分所涉及的加工过程有混炼和压延、挤出成型、薄膜吹塑、纺丝工艺、注塑成型和模具设计等等,对学生以后的专业课学习以及工作和科研都很有用处。对于这些流变学理论实际应用的场合在授课时绝不能轻描淡写得一笔带过,而应该尽量详细阐述。此章节的内容包括大量的数学推导,但作者在教学实践中适当淡化了数学推导,把更多时间放在最终得到的结论性公式所蕴涵的物理意义上面。例如,混炼和压延是双辊之间的工艺过程,其重点是双辊之间的压力是如何分布的? 物料的黏弹性对辊间压力分布有何影响? 辊间物料的速度是如何分布的? 混炼作用如何达成? 以上问题都可通过结论性的几个公式一目了然,加强对学生的思维冲击,以收加深记忆和理解之效。

再如,挤出成型工艺中最重要部分是螺杆挤出机,这是通用设备,是学生们以后的本专业工作和学习中肯定要遇到的,因此要详细讲解螺杆挤出机的工艺特点,如螺杆为何有很强的混合作用? 然后在几个重要的结论性方程基础上讨论螺杆挤出机的工作特性,如螺杆的机头压力与输送量之间有何关系? 挤出机和挤出口模的配合如何达到稳定工作点? 总之,对几个常用的典型加工过程进行流变学分析,应适当避开繁琐枯燥的数学推导,引导学生重点关注实用性的流动分析,使学生对常用的加工机械及其工艺特性有了深刻的认识,拓宽学生的思路,学习分析问题的方法,意欲其在以后的科研和工作实践中展现出分析问题解决问题的能力。

5 结语

我国是高分子加工行业的大国,橡胶、塑料、纤维、涂料、粘合剂等领域都是聚物流变学一展身手之地,各种新材料的研发、表征、生产和应用也离不开流变学,需要大量掌握流变学知识的高级专业人才。这既是对高校毕业生的要求,也是对高分子专业教师的鞭策。如何通过聚物流变学教学内容的合理设置,教学方法的改进,教师素质的提高,来更好地培养人才,提高我国聚合物加工工业的水平和竞争力,是流变学领域同仁的使命。因此笔者不避粗陋,将自己的粗浅的教学经验体会总结如上,同时也希望得到诸位流变学教学和研究同仁的指导。

参考文献:

[1] 吴其晔,巫静安. 高分子材料流变学,北京:高等教育出版社,2002.
[2] 林师沛. 塑料加工流变学,成都:成都科技大学出版社,1989.
[3] 徐佩弦. 高聚物流变学及其应用. 北京:化学工业出版社,2003.
[4] 尼尔森 L E. 聚物流变学. 范庆荣等译. 北京:科学出版社,1983.
[5] 伦克 R S. 聚物流变学. 宋家琪等译. 北京:国防工业出版社,1983.

Teaching Experience in Polymer Rheology for College Students of Engineering Major

TAO Yong, WANG Xin, HU Hai-qing*

*(Key Lab of Rubber-Plastics, Ministry of Education, College of Polymer Science & Engineering,
Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)*

Abstract: The course of polymer rheology is very important for designs of polymer processing parameters, equipments and molds. It is a critical basic course for polymer discipline. In this paper the development and the course of polymer rheology in Qingdao University of Science and Technology were briefly introduced. Some teaching skills and experiences in lectures for students of engineering discipline were discussed. It is pointed out that, for undergraduate students, the basic concepts and basic principles, which are crucial, should be emphasized. It is also important to combine theory and practice in teaching process. The concepts and principles of Rheology could be easier to comprehended when exhibiting them in the design of rheological measurement instruments and typical processing of polymers.

Key words: Rheology; Polymer; Teaching method