

自制实验视频在流变学教学中的应用实践^{*}

李科晶, 方波

(华东理工大学 化工学院, 上海 200237)

[摘要]非牛顿型流体在简单流动条件下可以表现出有趣的流变现象。文章介绍了流变学课程教学中引入流变实验短视频制作, 让学生组队自行设计实验并制作视频, 演示非牛顿流体与牛顿流体在一定流场和流动条件下的不同行为, 并用于课堂实例分析的实践。这种将理论与实践相结合, 制作系统性和科普性的视频作品的方式, 可以培养学生的创造力, 使其更好地理解课本上的知识并用于实践, 同时有助于增强学生的团队合作意识和沟通能力, 提高学生学习流变学的兴趣。

[关键词]流变学; 实验视频; 非牛顿流体

Practice of the Application of Experimental Videos on Non-Newtonian Fluid in Teaching of Rheology

Li Kejing, Fang Bo

(School of Chemical Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237)

Abstract: There are many non-Newtonian fluids in daily use that exhibit interesting rheological behaviors under simple flow conditions. In the teaching of rheology, these behaviors have been self-selected, filmed and analyzed by teams of students, showing particular deformation and shear responses under certain flow conditions. The video experiments are also analyzed as case examples. This from-theory-to-video way can be beneficial to the students for developing their creativity, further understanding the textbook knowledge and its application in realistic problems, building their teamwork and communication skills, as well as promoting their interest in studying the abstract subjects in rheology.

Key words: Rheology; Experimental videos; Non-Newtonian fluids

流变学正式作为一门独立的学科已发展了91年^[1]。该学科涉及场论、张量分析等具有一定

难度的数学知识, 与工程类基础科目(如高等数学和线性代数)之间有一定的跨跃度, 因此化学工程

[作者简介] 李科晶(1983-), 女, 讲师, 博士。

[通信作者] 李科晶, E-mail: kejing.li@ecust.edu.cn。

^{*} 基金项目: 国家教育部回国人员科研启动基金(编号: 教外司留[2015]1098号)。

专业的学生在学习流变学初期往往会产生畏惧感^[2]。但这些数学知识主要用于描述非牛顿流体在特定流场条件下应力和变形之间的关系,即本构方程,进而解决一定流动条件下的复杂工程和测量问题。教学中如果能让学生对流场有直观的理解,将流变学涉及的数学知识和术语与实际应用衔接起来,就可以调动学生主动学习的兴趣,同时使其对流变学不再感到抽象和枯燥^[3-5]。

有研究表明,视觉在短期和长期记忆方面的作用胜过其他感官^[6]。视频教学能够让学生对具体现象留下深刻的印象,而且对处于信息化时代的大学生而言比较容易接受。学生通过亲自设计实验,并借助智能手机和辅助软件进行视频拍摄,可以从观看变为参与,从被动接收外界泛娱乐信息转变为主动学习,从而有助于创作有价值的科普作品。

YouTube、梨视频、搜狐等媒体网站上有一些关于非牛顿流体现象的有趣视频,具有一定的科普性,但缺乏系统性和理论解释。鉴于此,笔者

尝试让选修石油流变学课程的大二学生组队观察非牛顿流体现象,并自制流变现象小视频。这一做法旨在调动学生的自主学习积极性,促进学生对流变学基本概念的思考 and 理解,强化学生的团队合作精神和沟通表达能力,培养他们运用所学理论知识解决实际问题的能力。

一、非牛顿流体现象视频制作

在学完非牛顿流体类型的相关内容后,笔者布置了课后作业,要求学生组成3人小组,用4周的时间完成非牛顿流体现象视频制作的作业。有超过40%的学生通过观察生活中的科学现象,组队进行实验设计和视频制作,并利用基本原理介绍实验现象和测量方法。视频中直观展示了典型的非牛顿流体流变现象与牛顿型流体行为的区别。

流变学主要关注不太复杂的流动条件,因此学生在日常生活中就能找到实验素材,视频制作比较容易操作和实现,且成本很低^[7-8]。图1给出了几个生活中常见非牛顿流体流变现象的例子。



图1 生活中常见非牛顿流体的流变现象

1. 挤出胀大:在使用泵出型容器装的洗发露时,我们匀速按压容器,会发现出口处的洗发露滴的直径大于容器出口直径;而对比实验中,小口径矿泉水瓶中的水流出时,出口处水柱的直径小于矿泉水瓶出口直径。

2. 爬杆现象:取体积比约为3:1的玉米淀

粉和水,先后倒入淀粉和水,均匀混合,充分搅拌,制得淀粉悬浮液,用筷子作为搅拌棒,轻轻旋转搅拌,流体会向杯中心运动,并沿杆向上爬,同时液面凸起;而对比实验中,在透明的一次性塑料杯中搅拌水,从侧面可以发现液面呈凹形。

3. 无管虹吸:准备一个塑料针筒和两个烧

杯,将水和巧克力酱分别置于两个烧杯内,用针筒吸取巧克力酱,缓慢将针筒口提高液面,液体仍能继续进入针筒内;而对比实验中,用针筒吸取烧杯中的水,缓慢将针筒口提高液面,水不再进入针筒内。

4. 剪切增稠:少量淀粉悬浮液置于塑料饭盒中,将一个冰棒木条置于其上,静置后发现木条缓慢沉入淀粉中;若将木条缓慢浸入其中再快速抽出,则塑料饭盒与淀粉悬浮液被一起拽起。

5. 剪切致稀:配制一定浓度的洗手液水溶液,取两根相同的透明长管(A管和B管)标记刻度,长管下方用手指按住,垂直固定,两管下方分别放置相同的量筒,在两个长管内注入足量的洗手液水溶液,使B管中的液面高度为A管中液面高度的三倍,同时打开下方出口,几秒后同时按住出口,可见B管下方量筒中的液体量多于A管下方量筒中液体量的三倍;而使用清水做相同的实验,可见B管下方量筒中的水量为A管下方量筒中水量的三倍。

6. 屈服应力:取牙膏一支,若用力较小,牙膏不会被挤出;用超过某种程度的力时,牙膏才能被挤出;用更大的力,牙膏可以被更快地挤出。

通过寻找生活中的常见素材并制作非牛顿流体现象视频,学生明显提高了对流变学的学习热情。在设计实验的过程中,学生需要动脑筋寻找素材和设计方法,充分发挥创造力。这对学生而言是一个挑战自我和主动学习的过程。每组队员在展示视频成果时,精神饱满,全神贯注。讲解与这些非牛顿流体现象相关的理论时,他们会更加积极地思考。

二、结合理论分析实验现象

教师在讲解非牛顿流体流动分析的内容时,学生正好完成实验视频制作的作业。因此,教师可以针对学生制作的视频中的具体实验现象,在课堂上进行分析,以加深学生对理论知识的理解。

如进行幂率流体流动行为的理论推导时,教师可以借助学生制作的剪切致稀的实验视频,具体形象地给出压头、流速、流场、流量等概念;再通过推导,解释剪切致稀的流体在相同压头倍数下

流动更快的原因;然后将推导得到的公式与牛顿流体在圆管中的流动公式进行对比,使学生直观地理解两者的区别。

牛顿流体在圆管中流动的管路特性方程为:

$$Q = \frac{\pi \Delta P R^4}{8 \mu L} \quad (1)$$

幂率流体在圆管中流动的管路特性方程为:

$$Q = \frac{\pi n R^3}{3n + 1} \left(\frac{\Delta P R}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中, Q 为体积流量, ΔP 为压降, R 为管内半径, L 为管长;式(1)中 μ 为牛顿流体的黏度,式(2)中 n 为流动指数, K 为稠度系数。

以剪切致稀的现象为例,A管和B管是两个相同的圆管,B管中液体量是A管的3倍,则压头或 ΔP 也为3倍。如果管内液体为牛顿型流体,则根据式(1),B管和A管流量之比也为3:1;但如果管内为幂率剪切致稀流体,则 $n < 1$,那么根据式(2),在其他参数相同的情况下, ΔP 之比为3:1,而流量 Q 之比大于3:1。

以上分析表明,非牛顿流体不能使用传统的牛顿流体的泊谔叶方程。这个知识点可以作为补充知识告诉学生。在以后涉及相关液体的工程计算时,学生就容易联想到,流量估算需要使用相应流体的管路特性方程或使用本构方程进行重新推导计算,从而避免选用过高或过低功率的泵。

再如爬杆效应的现象,这一效应是Weissenberg于二战期间在英国伦敦帝国学院进行火焰喷射器燃料研究的系列实验时发现并解释的。该系列实验的目的之一是提高燃料在经过喷射孔时压降预测的准确性,其中一些实验被用来解释法应力效应。而爬杆效应也显示了拖曳流中的法应力效应。

学生在牛顿流体和非牛顿流体的对比实验中观察到了相反的现象,可以用以下理论进行解释。对于牛顿流体(如水),由于离心力的作用,液体内部靠烧杯壁处的压力大于中心近旋转搅拌棒处的压力,液体表面类似于一个很敏感的压力计,由于微小的负压而略微下凹;而对于淀粉水溶液或其他黏弹性的非牛顿型流体,由于具有法向应力大

于离心力的作用,液体内部近搅拌棒液面下的压力大于近烧杯壁处液面下压力,因此液体会爬杆向上。

利用柱坐标系 r 分量的运动控制方程进行分析:

$$-\frac{\rho v_{\theta}^2}{r} = \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} - \frac{\tau_{\theta\theta} - \tau_{rr}}{r} \quad (3)$$

式(3)中等号右边第二项的分子即第一法应力差, $T_{11} - T_{22}$ 。对于第一项,如果圆柱状容器的内径较小,那么有

$$\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} \approx \frac{\tau_{rr}(R_i) - \tau_{rr}(R_o)}{R_o - R_i} \quad (4)$$

假设惯性和表面效应很小,忽略式(3)等号左边项,则该式可以简化为第一法应力差的表达式:

$$\tau_{\theta\theta} - \tau_{rr} = \frac{[\tau_{rr}(R_i) - \tau_{rr}(R_o)]\bar{R}}{R_o - R_i} \quad (5)$$

式(5)中 \bar{R} 是搅拌棒的外柱面和烧杯的内柱面中间点距中心的平均半径, $\tau_{rr}(R_i) - \tau_{rr}(R_o)$ 即内外柱面处的压差。由于第一法应力差的数值一般为正且可以很大,因此近搅拌棒处液面下压力大于近烧杯壁处压力,表现为液面向上凸起。

对于较大半径的模型,由于次流的存在,解释起来更为复杂,但仍可以得到相同的结论。爬杆实验的演示和模拟推导比较简单,教师可以向学生补充介绍法向应力的测量技术和原理,扩展学生的知识面。

三、结语

在生活和化工专业相关实验中,还有很多关于非牛顿流体现象的实例:由于膏霜类化妆品是黏弹性流体,因此其制作时会出现爬竿行为;水泥浆泵送需要缓慢进行,否则容易卡泵;纺丝时使用

聚氧化乙烯溶液,在吸管拉出时会出现无管虹吸现象;消防用水中加入聚丙烯酰胺添加剂会产生润滑减阻。这些具体实例都可制作成视频引入课堂教学中,用以促进学生学习和思考。

在流变学教学中,让学生组队制作非牛顿流体视频是可行且易操作的。教师在介绍完基本流体的分类和相关术语后,可以让学生利用课外时间分工合作,寻找资源、构思实验、动手制作,这样可以有效激发学生的学习兴趣,引导学生深入钻研、学以致用。

(文字编辑:李丽妍)

参考文献:

- [1] 方波. 关于构建轻化工工程流变学知识结构的思考[J]. 化工高等教育, 2011(1):46-49.
- [2] 林博, 刘兰, 曾兴业. 工科院校高分子流变学教学策略及激励途径[J]. 化工高等教育, 2015(6):94-96.
- [3] 赵丽芬, 刘欣. 聚合物流变学教学中的几点体会[J]. 高分子通报, 2012(12):88-90.
- [4] 李鹏.《高分子材料流变学》教学中的几点体会[J]. 科技信息, 2011(29):126.
- [5] 白绘宇, 罗静, 倪才华, 等. 高分子流变学教学的探讨——借鉴美国大学高分子流变学课程教学经验[J]. 高分子通报, 2015(7):89-94.
- [6] Liberatore M W, Vestal C R, Herring A M. YouTube Fridays: Student-led development of engineering estimate problems [J]. Advances in Engineering Education, 2012, 3(1):1-16.
- [7] 张立娟, 岳湘安. 石油工程流变学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- [8] 方波. 化工流变学概论[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2010.

(上接第 111 页)

- [2] 宁雷, 孙志仁, 乐清华, 等. 传递过程导论教学中引入远程实验的教学模式[J]. 化工高等教育, 2009(6):87-89.
- [3] 乐清华. 化学工程与工艺实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

- [4] 王化兰. 优化实践教学环节, 提高学生工程实践能力[J]. 实验室技术与管理, 2001, 18(6):83-84, 87.