DOI：10.19789/j.1004-9398.2023.01.012
文献引用：杨荣杰，冯海生，张文超，等．基于身边高分子材料的回收、鉴定、加工与性能的实践教学探索[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2023，44（1）：81-88. YANG R J，FENG H S，ZHANG W C，et al. Practice teaching exploration based on the recycling，identification，processing and performances of polymer materials[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2023，44（1）：81-88.

基于身边高分子材料的回收、鉴定、加工与性能的实践教学探索*

杨荣杰[1]，冯海生[1,2]，张文超[1]，刘宜娜[1]，潘也唐[1]，李佳乐[1]，梁倩倩[3]，李定华[1**]

（1. 北京理工大学材料学院，国家阻燃材料工程技术研究中心，北京　100081；
2. 中国人民警察大学防火工程学院，河北 廊坊　065000；
3. 四川东材科技集团股份有限公司，四川 绵阳　621000）

摘要：围绕身边高分子材料回收利用的实践课程教学，对实验课程的教学方法进行了探索和改革。在依托功能高分子与阻燃学科方向的国家级平台资源和科研优势的基础上，将互动式情景教学模式和研究型教学设计相结合。采用成绩评定、教学评价和学生访谈等方法进行了教学效果分析。分析表明：学生充分投入参与到实践教学每一个环节，主动开展团队合作和师生互动；在直观了解高分子材料从回收、鉴定到加工和性能测试等环节的同时，掌握了相关理论知识和实验技能，接触了学科发展前沿技术，增加了对高分子材料的学习兴趣。而且，通过引导学生重视低碳、绿色发展理念，实现了思政教育的自然融合。

关键词：高分子材料回收利用；互动式教学；研究型实践教学；聚对苯二甲酸乙二醇酯；阻燃
中图分类号：G424；G420　　**文献标识码**：A

Practice teaching exploration based on the recycling，identification，processing and performances of polymer materials*

YANG Rongjie[1]，FENG Haisheng[1,2]，ZHANG Wenchao[1]，LIU Yina[1]，PAN Yetang[1]，
LI Jiale[1]，LIANG Qianqian[3]，LI Dinghua[1**]

（1. National Engineering Research Center of Flame Retardant Materials，School of Materials Science and Engineering，Beijing Institute of Technology，Beijing　100081；2. School of Fire Protection Engineering，China People's Police University，Langfang Hebei　065000；
3. Sichuan EM Technology Co. LTD，Mianyang Sichuan　621000）

Abstract：Aiming to the recycling practice teaching of polymer materials，the interactive teaching model and the research-oriented practical teaching design has been combined and investigated with the support of national engineering center platform and discipline development superiority on functional polymer and flame retardancy. Grade evaluation，teaching evaluation and student interview has been

收稿日期：2022-02-25
* 北京理工大学研究生教育培养综合改革项目（2022YBJG013）
** 通信作者：dli@bit.edu.cn

applied to analyze the teaching effects. The results show that the students have fully devoted themselves to the course learning and shown strong initiative in team cooperation and teacher-student interaction. Not only the aspects of recycling, identification, processing and performances of polymer materials have been visually understood, but also the corresponding theoretical knowledge and experiment skills have been mastered. Furthermore, the students contact the frontier science and technology with a lively interest in polymer science and engineering. Meanwhile, the ideological and political education can be implemented naturally since more attention can be paid to the concepts of low carbon and green development during learning.

Keywords: recycling of polymer material; interactive teaching model; research-oriented practical teaching; PET; flame retardancy

CLC: G424; G420 **DC**: A

0 引 言

随着社会和工业的发展,高分子材料在诸多领域得以广泛应用,与之呼应的高分子材料的回收、鉴定、加工与综合应用,已成为世界范围内影响环境和人类可持续发展的主要问题之一[1-2],是国家“十四五”规划中加快绿色发展模式、实现2030年“碳达峰”的现代化生态环境建设的绿色产业,也是一件对于保护国民健康而言刻不容缓的大事[3]。

《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》[4]指出,培养工程实践能力和创新能力强的工程技术人才,是高校创新实践教学的重要任务。为了培养高层次工程技术人才,许多高校对工科类专业进行了积极的探索。如:赵紫芮[5]对领域内单一科学问题进行实验探索;郭婷等[6]和李晓虹[7]基于科学设备工作原理、操作和应用等,进行了大型实验仪器的教学改革。尽管目前对实践课程教学模式的探索取得了一定的效果,但传统的材料专业实验教学普遍存在:内容单一,实验内容关联度低,实验教学系统性差;缺乏实操练习,学生学习阶段缺乏探索性和自主性;综合性、设计性和创新性的实验占比少,无法激发学生的参与热情和积极性[8],这些不足均与培养高层次工程技术人才的目标不符。

聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate,PET)具有耐化学腐蚀、弹性好、强度高、力学性能优异且耐高温等优点,因此,在纤维、食品包装和电气绝缘等领域有大量应用[9],且产量呈逐年增长趋势。随着资源浪费、环境污染等问题的突出[10],有关PET产品的再利用和回收成为了新的研究热点[11-13]。如:回收PET加工制作成纤维、织物等;改性极限氧指数(limiting oxygen index,LOI)低、易燃烧的PET纤维,得到新的环保阻燃的PET等[14-15]。因此,本教学团队拟充分利用国家级工程中心平台和功能高分子和阻燃学科特色优势等资源的基础上,围绕身边高分子材料的回收、鉴定、加工与性能开展了实验实践课程教学,以激发学生参与实验实践学习的热情,提升学生的相关知识水平和实践技能,形成从研究与开发、生产到循环利用的高分子材料综合认知。

1 实验设计

1.1 教学设计

教学设计流程如图1所示,主要包括材料回收、加工和鉴定。(1)讲授高分子材料的基本概念,白色污染的定义,介绍高分子的鉴定、加工和性能表征的相关知识;(2)采用分组合作,实验课程容量为20~30人,学生4~5人/组;(3)采用校园公益活动等方式,学生在校园中收集足够量的可回收高分子材料作为研究对象;(4)高分子鉴定环节,学生选择红外光谱、X射线粉末衍射(X-ray powder diffraction,XRD)、热重分析(thermogravimetric analysis,TGA)、差热分析(differential scanning calorimeter,DSC)和凝胶渗透色谱(gel permeation chromatography,GPC)等仪器进行表征技术设计,分组讨论鉴定方案、确定表征方法,其余表征方法以了解为主;(5)高分子材料加工环节,学生以双辊混炼、压片成型、双螺杆挤出和注塑成型等设备装置设计实验;(6)高分子材料性能测试环节,以实验平台的氧指数、垂直燃烧、锥形量热仪、烟密度和力学性能等装置进行性能测试。

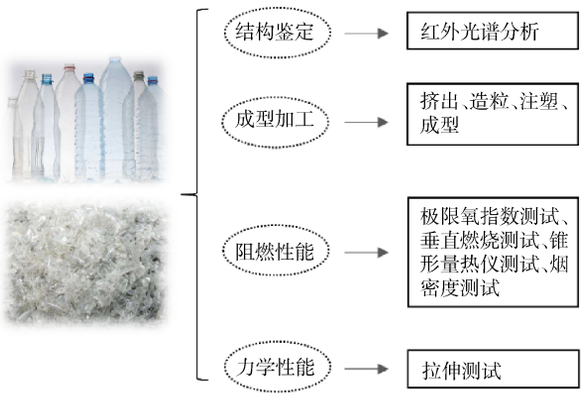


图 1　实验设计流程

1.2　实验原料与设备

EFR8601-11A 型 PET 阻燃母粒,购自四川东材科技集团股份有限公司。

使用上海一恒科学仪器有限公司生产的 DHG-9140 型号电热恒温鼓风干燥箱进行原料干燥处理,去除原料中的水分;使用江阴市宝利机械制造有限公司生产的 JB-200 型塑料粉碎机进行样品粉碎,以达到挤出机加工对原料尺寸的要求;使用德国 Brabander 公司生产的 Brabander 20/40 型双螺杆挤出机进行共混、挤出和造粒;使用宁波海天塑料机械有限公司生产的 HTF80X1 型注塑机进行测试样品的成型注塑。

采用美国赛默飞尼高力仪器公司生产的 6700 型全反射傅里叶变换红外光谱仪对回收高分子样品进行结构表征、鉴定,扫描次数 32 次,分辨率 8 cm^{-1};采用泰斯泰克(苏州)检测仪器科技有限公司生产的 TTech-1 型极限氧指数测试仪进行 LOI 的测定,样品尺寸 100.0 mm×6.5 mm×3.0 mm;采用昆山莫帝斯燃烧技术仪器有限公司生产的垂直燃烧测试仪对进行垂直燃烧性能测试,样品尺寸 130.0 mm×13.0 mm×3.2 mm 和 130.0 mm×13.0 mm×1.6 mm;采用英国 FTT 公司生产的锥形量热仪进行热释放、CO 和 CO_2 释放的测试,样品尺寸 100.0 mm×100.0 mm×3.0 mm;采用昆山莫帝斯燃烧技术仪器有限公司生产的 SDB 型 NBS 烟箱进行烟密度测试,样品尺寸 75.0 mm×75.0 mm×1.2 mm;采用美国 MTS 有限公司生产的万能试验机对拉伸性能进行测试,样品尺寸 150.0 mm×10.0 mm×4.0 mm。

1.3　实验操作

要求学生针对 PET 易燃特性,以含磷阻燃共聚聚酯母粒新产品为改性助剂,按照阻燃母粒添加比例不同(0、15%、30% 和 50%),设计开展回收 PET 的阻燃改性实验。每组独立完成实验。

1.3.1　材料回收

实验步骤为:(1)回收的高分子材料,其中以 PET 占比最多(矿泉水瓶等容器),另有少量聚丙烯(polypropylene,PP);(2)对收集的矿泉水瓶进行洗涤,撕除贴纸、外塑料薄膜,剥离瓶盖等矿泉水瓶附属物;(3)将不同大小的矿泉水瓶剪成条状或块状碎片,通过破碎机进一步粉碎成 1 cm×1 cm 左右片状原料备用;(4)取一小块片状平整试样,通过红外光谱仪对回收高分子材料的化学结构进行解析,并与标准谱图进行对比,确定回收材料的化学结构;(5)粉碎料放置于电热恒温鼓风干燥箱中,120 ℃干燥 8 h,待温度降至室温后,收集待用。

1.3.2　材料加工

按一定质量百分比,将回收处理后的 PET 与阻燃母粒混合,其中阻燃母粒质量百分比分别为 0、15%、30% 和 50%,对应样品名分别为 PET、PET-15%、PET-30% 和 PET-50%;采用双螺杆挤出机进行挤出、造粒,温区设置为一区 240 ℃、二区 245 ℃、三区 250 ℃、四区 250 ℃、五区 245 ℃和六区 240 ℃;按照实验原理与设备部分的要求,将上述粒料通过注塑机进行注塑成型,LOI、垂直燃烧性能、锥形量热仪、烟密度和拉伸性能测试样品分别为 10、5、3、3 和 5 个,温区设置为一区 240 ℃、二区 245 ℃、三区 250 ℃、四区 250 ℃和五区 245 ℃,模具温度为 80 ℃。

1.3.3　材料性能测试

依据相关标准[16-20],将样品进行必要的状态调节后,分别进行阻燃性能和力学性能测试,包括 LOI、垂直燃烧性能、锥形量热仪、烟密度和拉伸性能的测试。

(1)LOI 测定。尝试在空气中点燃试样,如果试样能被点燃,则 O_2 体积分数 < 21%,反之则将 O_2 体积分数调至 21%;根据《塑料 用氧指数法测定燃烧行为 第 2 部分:室温试验:GB/T 2406.2—2009》[16]规定,逐步调高或调低 O_2 浓度,寻找样品燃烧长度 50 mm 或燃烧时间 180 s 时的 O_2 浓度临界值。

(2)垂直燃烧性能测试。分别对厚度为 3.2 和 1.6 mm 的样品进行测试,记录其 5 个样品所需第 1 次(t_1)和第 2 次(t_2)点火后的续燃时间并计算平均值,观察是否有熔滴、熔滴是否引燃脱脂棉、余焰/余辉没有蔓延到夹具等现象;然后根据《塑料 燃烧性能的测定 水平法和垂直法:GB/T 2408—2008》[17]的分级判据确定垂直燃烧级别,如表 1 所示。

(3)锥形量热仪。根据《建筑材料热释放速率试

表1 垂直燃烧测试分级判据

判据	级别			
	V-0	V-1	V-2	无级别
每个试样的有焰燃烧时间/s	≤10	≤30	≤30	>30
每组5个试样有焰燃烧时间总和/s	≤50	≤250	≤250	>250
每个试验第2次施焰后有焰加上无焰燃烧时间/s	≤30	≤60	≤60	>60
每个试验有焰或无焰燃烧到夹具的现象	无	无	无	有
滴落物引燃脱脂棉现象	无	无	有	有或无

验方法:GB/T 16172—2007》[18],选择辐射照度50 kW/m^2,测量样品的点燃时间(time to ignition,TTI)、热释放速率(heat release rate,HRR)、总释放热(total heat release,THR)、热释放速率峰值(peak of HHR,pk-HRR)、有效燃烧热(effective heat of combustion,EHC)、炭残余率、CO和CO_2产量($Y(CO_2)$和$Y(CO)$)等[21-26]。

(4)烟密度测量。烟密度通常用比光密度表示,表示材料或部件在规定的实验条件下产烟浓度的光学特性。根据《塑料 烟生成 第2部分 单室法测定烟密度试验方法:GB/T 8323.2—2008》[19],选择测试模式1(辐射照度为25 kW/m^2,无引燃火焰),测量样品的最大烟密度。

(5)力学性能测量。力学性能是工程塑料的重要指标之一,依据《塑料 拉伸性能的测定 第1部分:总则:GB/T 1040.1—2018》[20],拉伸速率20 mm/min条件下,测量样品的拉伸强度,用于研究样品的拉伸性能及拉伸强度、拉伸模量和其他方面的拉伸应力/应变关系。

1.4 教学效果考核

以2018—2019、2019—2020学年秋季和春季学期的来自北京理工大学全校不同专业(包括但不限于航空航天工程、机械电子工程、信息工程、计算机科学与技术、软件工程、高分子材料与工程、生物医学工程、安全工程、应用物理学、车辆工程、材料化学、新能源材料与器件和应用物理学等)的135名学生进行教学效果统计。

1.4.1 成绩评定

成绩评定由平时成绩和考核成绩组成(图2),平时成绩包括考勤、实验设计、实验表现和小组合作,占总成绩的60%;考核成绩涉及实验答辩和报告,占总成绩的40%;其中互动相关的内容包括实验设计、实验表现、小组合作和实验答辩,约占总成绩的75%。

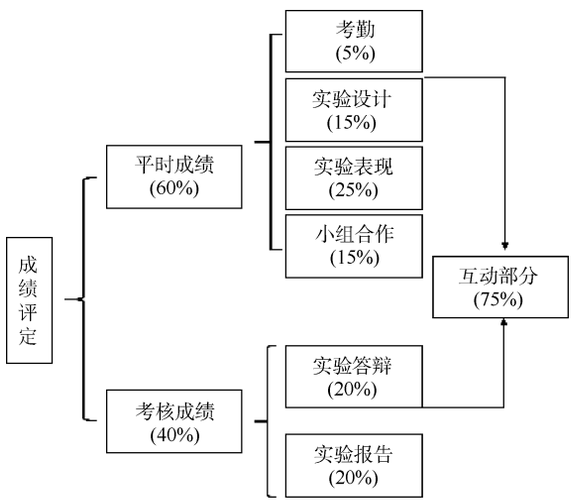


图2 课程成绩评定设置

1.4.2 教学评价

通过学校教学管理系统里的学生评教功能(匿名评价),收集选课学生对课程的教学评价。包括8个指标:(1)教师积极投入教学、言语得体,引导学生建立正确的世界观、人生观;(2)教师讲课思路清晰、重点突出,理论联系实际;(3)教师教学激发我对本课程的学习兴趣和主动学习;(4)教师注重与学生交流、培养学生独立思考的能力;(5)教师根据学生学习情况和教学安排有效地开展教学;(6)教师教学效果好,听课收获大;(7)教师认真批改作业,对于学生在学习过程中(课堂表现、作业、考核等)的问题,给予及时有帮助的指导和反馈;(8)教师教授课程可以完善我的知识结构、提升相关能力。

针对每个指标,学生在评教系统中从"优秀、良好、中等、及格、差"选择给出评教成绩;系统在该指标的所有评教成绩中分别统计出"优秀、良好、中等、及格、差"各自的百分比。最后系统根据各指标的评教成绩百分比统计情况,计算得到任课教师的最终评教得分(满分为100分)。

1.4.3 学生访谈

不定期地在教学过程中和教学环节结束后,选择学生进行访谈。每次的访谈对象,从各实验

分组中随机选取;课程结束时做到访谈学生全覆盖。访谈内容主要包括:教学内容的难度、实践设计的实施效果、课程教学形式的建议和课程学习感受等。

2　实验结果与分析

2.1　结构鉴定

回收的某矿泉水瓶的红外谱如图3所示。2 962 cm^{-1}吸收峰为脂肪族C—H键的伸缩振动峰,1 712 cm^{-1}处的强吸收峰为C═O键伸缩振动峰,1 504和1 453 cm^{-1}为苯环的振动吸收峰,1 407和1 338 cm^{-1}处的吸收峰为C—H键的弯曲振动峰,1 238和1 092 cm^{-1}处的吸收峰对应酯键的伸缩振动峰,1 016 cm^{-1}处的吸收峰为C—C键的伸缩振动峰[21-22]。经检索,与PET谱图相似度达90.1%,由此鉴定该回收材料主要为PET。

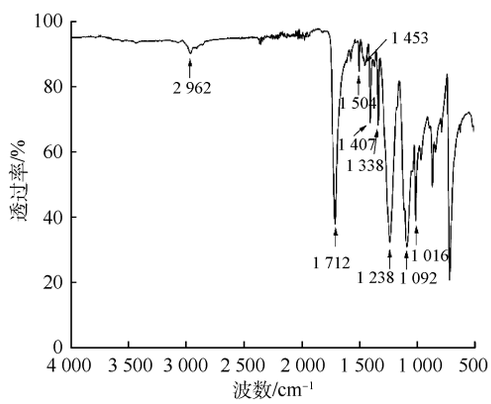


图3　回收聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)材料红外光谱

2.2　LOI

对样品进行LOI测定,PET、PET-15%、PET-30%和PET-50%的LOI值分别为21%、29%、32%和36%。结果表明,LOI随着阻燃母粒添加比例的提高而增加;与PET样品相比,PET-50%回收的PET提高了71%。由难燃材料的判断标准可知,PET-50%达到了难燃的标准。

2.3　垂直燃烧性能

1.6和3.2 mm厚度样品的垂直燃烧性能测试数据列于表2。结果表明,PET样品的熔滴会引燃脱脂棉,但是熔滴带走了热量使得续燃时间缩短,垂直燃烧级别达到V-2级;随着阻燃母粒的添加,续燃时间得以进一步缩短,熔融滴落现象也有明显改善。厚度1.6 mm的阻燃回收PET样品的续燃时间均为0,也就是离火自熄,但由于熔滴点燃了脱脂棉,判定为V-2级;而厚度3.2 mm的阻燃回收PET试样,虽然也有熔滴,但滴落物未引燃脱脂棉,所以垂直燃烧级别得以提高,判定为V-0级。

2.4　锥形量热仪测试

利用锥形量热仪测量的样品7个参数的结果列于表3,其中,4个参数随时间变化的曲线如图4所示。阻燃母料的少量添加,可以使得TTI有所延迟,pk-HRR数值大幅度下降。与PET样品相比,PET-50%的pk-HRR为257 kW/m^2,减少了75%;THR为51.3 MJ/m^2,下降了31%;这表明PET-50%随着阻燃母粒的添加,使得材料燃烧中的热释放明显被抑制;随着添加量的增加,热释放进一步逐渐减少,材

表2　不同厚度加工样品的垂直燃烧性能

样品	t_1/s		t_2/s		熔滴		引燃脱脂棉		蔓延至夹具		级别	
	1.6	3.2	1.6	3.2	1.6	3.2	1.6	3.2	1.6	3.2	1.6	3.2
PET	3.6	3.6	0	0	Y	Y	Y	Y	N	N	V-2	V-2
PET-15%	0	1.2	0	0	Y	Y	Y	N	N	N	V-2	V-0
PET-30%	0	1.8	0	0	Y	Y	Y	N	N	N	V-2	V-0
PET-50%	0	0	0	0	Y	Y	Y	N	N	N	V-2	V-0

注:t_1和t_2分别为第一次和第二次点火后的续燃时间;Y指观察到了对应现象;N指未观察到对应现象。

表3　回收PET材料的锥形量热仪测试数据

样品	TTI/s	THR/(MJ·m^{-2})	pk-HRR/(kW·m^{-2})	炭残余率/%	EHC/(MJ·kg^{-1})	$Y(CO_2)$/(kg·kg^{-1})	Y(CO)/(kg·kg^{-1})
PET	54±2	73.8±2.1	1 025±37	15.0±0.2	17.6±0.2	1.73±0.3	0.06±0.02
PET-15%	59±1	61.6±1.8	471±12	14.4±0.1	15.7±0.2	1.38±0.1	0.12±0.02
PET-30%	57±1	56.8±1.1	385±11	14.1±0.1	14.4±0.1	1.26±0.2	0.17±0.01
PET-50%	52±2	51.3±0.5	257±9	15.0±0.2	16.4±0.1	1.26±0.2	0.23±0.01

注:TTI为点燃时间;THR为总热释放;pk-HRR为热释放速率峰值;EHC为有效燃烧热;$Y(CO_2)$和Y(CO)分别为单位质量样品产生的CO_2和CO质量。

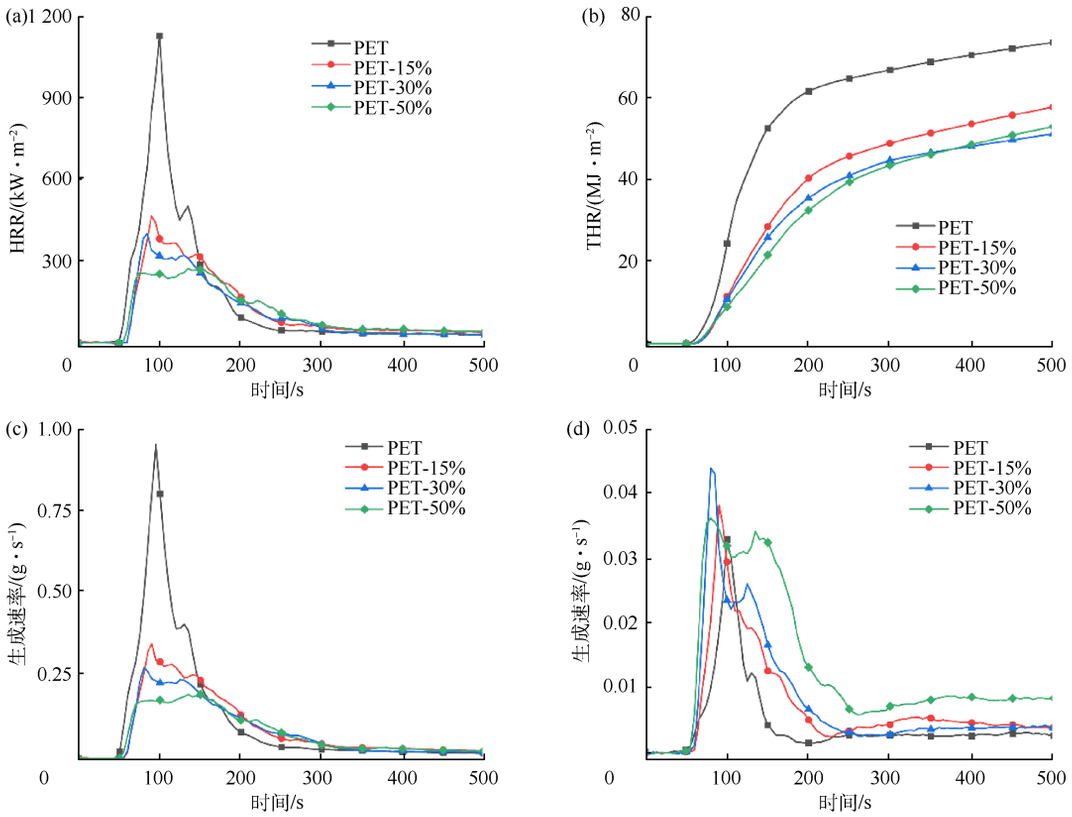


图4　回收PET材料的锥形量热仪部分参数随时间变化曲线

(a)HRR;(b)THR;(c)CO_2产量;(d)CO产量

料的火灾危险性显著降低,火灾危险性大幅度下降。CO_2和CO产量曲线表明,阻燃母粒抑制了材料的燃烧,因而表现为CO_2产量减少,CO产量增加;与PET样品相比,PET-15%样品CO_2的产生就得到了明显抑制,CO_2生成速率峰值降低约60%,但是CO产量显著增多,说明不完全燃烧程度增加;由此可见,本实验中采用的含磷阻燃母粒是在气相中通过磷氧类自由基影响燃烧链式反应的继续而发挥了阻燃作用[21-24]。

2.5　烟密度

样品在测试模式1时测试的比光密度曲线如图5所示。PET、PET-15%、PET-30%和PET-50%样品的最大比光密度值分别为395、501、423和516。与PET样品相比,其他样品的烟密度均增加了,表明含磷阻燃母粒使得PET在受热燃烧过程中气相产物增多,发烟量增大[25-26];与PET-15%和PET-50%样品相比,PET-30%样品的光密度最大值在阻燃回收PET试样中相对最低(<450),在通常的工程应用中处于可接受的范围。

2.6　力学性能

PET、PET-15%、PET-30%和PET-50%样品的拉伸强度分别为64.41、48.69、56.24和46.74 MPa。与PET样品相比,其他样品的拉伸强度略有下降,这主要是由于阻燃母粒在PET基体中属于异质点,两相界面处应力集中,致使拉伸过程中强度有所降低;不过,添加量不同并没有表现出拉伸强度的明显差异。单独添加阻燃剂,往往容易导致分布不均匀而显著恶化力学性能,而阻燃母粒是阻燃剂高含量预分散的聚合物,可以有效改善阻燃剂在基体中分布分散状况,阻燃母粒技术的采用,是上述样品拉伸强度没有显著降低的原因。

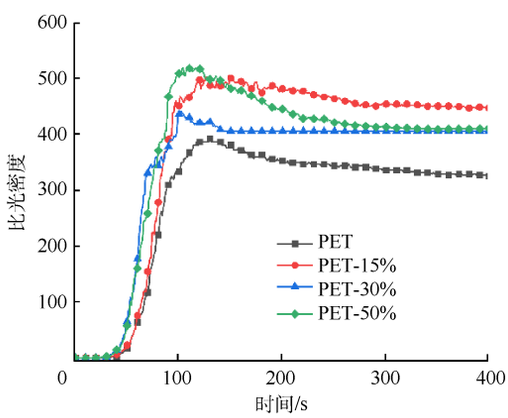


图5　回收PET材料的比光密度曲线

综合以上数据,PET-30%的综合应用性能最优,具有明显的实用价值,为基于回收材料的阻燃制品的应用开发奠定了基础。

3　教学效果

本课程2018—2019学年秋季学期第1次面向全校授课,截止2022年1月已经完成6次授课。成绩评定表明,学生均在调研基础上,能够以红外光谱和晶体结构的测试与分析作为重点鉴定手段,正确选择了双螺杆挤出和注塑成型来完成回收PET的加工,并通过阻燃和力学性能测试完成回收PET改性后的性能评价。在实验设计、实验实践、数据分析、报告总结和汇报答辩等过程中,学生表现出了高涨的热情和认真钻研的态度,也达到了学有所获的教学目标。每次课程结束,学生的学习成绩优良率均在90%以上。

本课程8个评价指标的具体评教分数统计见表4。在学校的历次匿名学生评教中,均获得了不俗的评分(95.2~99.4分),评教分数远远高于学校同期平均水平。8个评价指标在不同学期均曾获得过满分肯定。在匿名评教系统中有关对该门课程的建议,学生纷纷给予了充分的认可。绝大多数学生在理论联系实际、激发主动学习、师生交流、培养独立思考能力、教学安排有效和听课收获等方面给予了充分的肯定。

表4　不同学期8个评价指标学生教学评价　单位:分

学期	1	2	3	4	5	6	7	8	合计
2018—2019秋季	100	100	100	100	100	95.8	100	100	99.4
2018—2019春季	95.8	100	95.8	95.8	95.8	91.6	91.6	91.6	96.7
2019—2020秋季	84.3	90.6	81.2	87.5	90.6	81.2	75.0	87.5	95.2
2020—2021秋季	96.0	100	100	100	100	100	96.0	96.0	98.5

注:1~8分别代表1.4.2教学评价中8个指标。

自授课以来,在与学生的访谈中,教师都可以感受到该课程深受学生喜爱。学生表示:在本课程学习中受益匪浅,不但熟悉和了解了高分子材料在社会生活中的重要性及鉴定方法、加工方法和应用性能测试方法,更体会到了材料回收的势在必行、“双碳”理念,掌握了高分子材料回收的方法。另外,部分学生希望增加本课程的选课人数。

4　讨　论

实践训练课程从回收高分子材料的鉴定、加工、性能测试的方法、技术、工艺与实例等进行系统全面地实践教学,既有理论也有对实践应用的指导,通过对多种可选择工艺与技术实例的实践训练和阻燃前沿技术的接触,有助于学生对高分子材料再循环利用的理念、工艺与技术以及清洁生产的重要性有更高层次的认识。作为参与教学的2个主体,教师和学生之间高效、主动的互动和研究型学习,对提高学生的知识技能掌握程度、提升学生对高分子及回收利用的关注、培养学生分析问题、解决问题的能力具有至关重要的作用。互动式教学设计和研究型教学方法在身边高分子材料回收利用的实验实践课程中的综合运用,达到了教学目标,取得了良好的教学效果,实现了知行合一的教学理念。同时,课程中贯穿了未来低碳、绿色发展的理念,实现了思政教育在课程学习中的自然融合。

在后续的课程教学中,考虑到课程教学内容涉及到的粉碎、高温和燃烧测试等有安全风险的环节,且教学过程用到多种仪器,为了强化安全意识,培养良好科研习惯,将进一步研究在教学中增加仪器设备使用安全培训的环节,及有关材料的化学品安全技术说明书(material safety data sheet,MSDS)特性的认知。另外,PET材料也是产生微塑料颗粒的原料之一,微塑料颗粒是当前全世界日益关注的话题,所以在课程教学中,将研究增加PET粉碎形成微塑料的实验设计内容以及相关检测手段,以让学生获得更多具体的科学认知。既清楚其危害,又不至于因噎废食,以形成一种科学的认识观。

5　结束语

实践教学是材料专业教学过程中的重要环节。将互动式情景教学模式和研究型教学设计相结合是目前实践教学改革的热点,如何主动开展团队合作和师生互动,使学生充分投入参与到实践教学每一个环节,掌握相关理论知识和实验技能,接触学科发展前沿技术,增加对高分子材料的学习兴趣,是整个教学团队乃至管理层需要与时俱进地深入探讨的课题。

致谢　感谢北京理工大学国家阻燃材料与制品质

量监督检验中心的欧良工程师以及材料学院的康铭佳、杨帆和张鑫同学等的通力协作!

参 考 文 献

[1] 刘丛丛.《塑料产品可回收再生设计指南》如何解决回收再生实际问题?[J].资源再生,2021(12):44-47.

[2] 王月,赵秦峰,张占全,等.碳中和背景下国内外废塑料裂解法回收进展[J].化工进展,2022,41(3):1470-1478.

[3] 姜小毛.塑料行业绿色发展,路该怎么走?[J].中国石油和化工,2021(8):27-29.

[4] 中华人民共和国教育部.国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)[EB/OL].(2010-07-29)[2022-01-06]. http://www. moe. gov. cn/srcsite/A01/s7048/201007/t20100729_171904.html.

[5] 赵紫芮.我国终身教育体系构建政策的成就、问题与建议:基于《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》实施十年的思考[J].成人教育,2021,41(1):8-13.

[6] 郭婷,梁立,郑奕娜.核磁共振波谱仪应用于本科实验教学的探索[J].广东化工,2018,45(6):229-230+233.

[7] 李晓虹.核磁共振波谱课程教学探索[J].山东化工,2020,49(23):158-159.

[8] 殷勤俭,周歌,何波兵,等.高分子科学实验教学改革初探[J].高分子通报,2007(7):65-68.

[9] KUSUMOCAHYO S P,AMBANI S K,KU-SUMADEWI S, et al. Utilization of used polyethylene terephthalate (PET) bottles for the development of ultrafiltration membrane [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering,2020,8(6):1-11.

[10] CLADUIA P, MANFRED S, PETER F. PET recycling-contributions of crystallization to sustainability [J]. Chemie Ingenieur Technik,2020,92(4):452-458.

[11] 唐剑.废旧塑料资源再生循环利用管理和发展现状[J].塑料助剂,2021(1):71-75+43.

[12] 余黎明,饶伟.塑料循环利用产业发展现状与前景分析[J].新材料产业,2018(3):21-25.

[13] 黄璐,郑楠.我国废弃塑料再生循环利用产业发展现状分析[J].橡塑资源利用,2015(6):27-33.

[14] CHANG S,ZHOU X,XING Z Q,et al. Probing polarity of flame retardants and correlating with interaction between flame retardants and PET fiber[J]. Journal of Colloid and Interface Science,2017,498:343-350.

[15] 何勇,岳海生,王桦,等.涤纶阻燃研究现状[J].纺织科技进展,2016(8):7-10.

[16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.塑料 用氧指数法测定燃烧行为 第2部分:室温试验:GB/T 2406.2—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.塑料 燃烧性能的测定 水平法和垂直法:GB/T 2408—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.建筑材料热释放速率试验方法:GB/T 16172—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.

[19] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.塑料 烟生成 第2部分 单室法测定烟密度试验方法:GB/T 8323.2—2008 [S].北京:中国标准出版社,2008.

[20] 中国国家标准化管理委员会.塑料 拉伸性能的测定 第1部分:总则:GB/T 1040.1—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.

[21] FENG H S, LI D H, CHENG B, et al. A cross-linked charring strategy for mitigating the hazards of smoke and heat of aluminum diethylphosphonate/polyamide 6 by caged octaphenyl polyhedral oligomeric silsesquioxanes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022(424):127420.

[22] 王德义.含磷共聚酯/无机纳米复合材料的制备、性能与阻燃机理研究[D].成都:四川大学,2007.

[23] FENG H S, QIAN L J, LU L G. Synergistic effect of polyimide charring agent and hexaphenoxycyclotriphosphazene on improving fire safety of polycarbonate: high graphitization to strengthen the char layer [J]. Polymers for Advanced Technologies,2020,32(3):1135-1149.

[24] 张新星,王庆印,孙腾,等. PET共聚阻燃改性研究进展[J].精细化工,2021,38(1):34-43.

[25] 潘映佟,齐天一,罗钟琳,等. PET/PC/氨基硅油共混物的制备及阻燃机理[J].高分子材料科学与工程,2020,36(6):55-62.

[26] 司明明,丁率,郝建薇,等.纳米Sb_2O_3与次膦酸铝阻燃聚对苯二甲酸乙二醇酯协同作用研究[J].高分子学报,2013(12):1483-1491.

(责任编辑:王 媛)