

新工科背景下高分子材料专业实验课程改革研究

——以“材料失效分析”为例

刘 杰,苗时雨,李佳璇,师红旗,罗亚莉*

(南京工业大学材料科学与工程学院,南京 211816)

摘要:基于新工科建设对人才培养的要求,本文以材料失效分析综合实验为例探讨了高分子材料专业实验课程教学改革方向。通过引入教师横向科研课题,依托国家、省级虚拟仿真实验教学共享平台,开展翻转课堂实验教学模式,引导学生主动查阅文献资料、设计实验思路、分析数据图谱,从而给出合理的失效分析结论;并通过卡丁车座椅螺丝柱断裂失效分析、消音垫圈失效分析两个教学案例,展示了学生实操过程。此类实验的开展不仅激发了学生学习兴趣,而且可以有效促进学生对多学科理论知识的掌握程度,提升其解决实际工程问题的能力。

关键词:新工科;高分子材料;实验教学;失效分析

引言

近年来,新兴产业发展迅速,5G、物联网、人工智能等新技术新业态不断涌现,对新型人才提出了迫切的需求,与此同时,我国创新型人才结构性不足,科技大师、领军人才、尖子人才缺乏,工程技术人才的培养与企业实际生产、研发环节脱节^[1,2]。针对这一情况,教育部于2017年推出新工科建设计划^[3],其内涵是以立德树人为指引,以“应对变化、塑造未来”为建设目标,通过继承创新、协调共享、交叉融合为手段,以期培养出一批多元化、创新型卓越工程人才^[4]。在人才培养过程中,既注重学生实践能力和创新能力的培养,又对学科交叉和综合知识运用提出更高要求。

高分子材料被广泛应用于日常生产生活的各个领域,相关产业发展关系着人们生活的方方面面。高分子材料专业实验作为高分子专业课程的核心组成部分,在其教学全过程中贯穿新工科教育理念,充分运用“创新、共享、交叉、融合”等技术手段,对于提升学生综合能力具有重要作用。本文以高分子材料失效分析实验项目为例,探讨了如何将企业实际生产过程中遇到的工程问题系统性地转换为专业实验教学内容,进而激发学生学习主动性、锻炼学生科研创新与知识融合运用能力、培养其工程实践思维,这种区别于传统实验教学模式能够更好地教育培养出高素质、创新复合型工程人才。

1 高分子材料失效分析综合实验特点

高分子材料失效分析综合实验是通过对失效高分子制品进行分析研究,查找失效原因,并给予解决方案的一门综合性较强的专业实验项目。材料失效分析研究对于材料设计研发来讲具有重要作用,是一种典型逆向思维的分析研究工作,其分析结论具有较强的警示作用,对于新材料的研发、使用、可靠性及内在机理有着重要意义^[5]。

10.14028/j.cnki.1003-3726.2022.09.015

收稿:2021-07-24;修回:2021-10-30;

基金项目:江苏省教育厅课题项目“江苏高校品牌专业建设工程二期项目(二批)省品牌131号-南京工业大学-高分子材料与工程”,材料类新工科人才培养实践创新平台建设探索与实践(E-CL20201920),江苏高校优势学科建设工程三期96号-南京工业大学-材料科学与工程(苏政办法[2018]87号);

作者简介:刘杰(1988-),男,硕士,实验师,主要研究方向为材料实验教学工作;

* **通讯联系人:**罗亚莉,E-mail: luoyali@njtech.edu.cn.

高分子材料失效分析综合实验的开展参考了全国失效分析大赛的比赛形式,通过对高分子材料失效案例的分析,引导学生运用高分子材料相关领域知识与分析方法,科学地剖析材料外部介质、内在组成成分对材料失效的影响,并通过 PPT 答辩的形式,展示分析结果给出失效原因。在这一过程中需要学生熟练掌握与运用高分子物理、高分子加工工艺、材料现代分析测试方法、材料力学、机械设计基础等多学科理论知识;了解大型仪器设备的使用规范及数据处理方法;强化其表达能力与综合分析能力,树立起服务社会需求和解决实际工程问题的责任心,潜移默化式的“德行教育”,间接实现了新工科“立德树人”的教育任务。

2 高分子材料失效分析综合实验教学内容与形式

2.1 实验教学内容改革

在传统实验教学过程中,一方面学生过度依赖实验指导书中的“实验步骤”,忽视实验思路的设计原由,另一方面验证性实验偏多,缺乏综合性、创新性和结果开放式的实验内容^[6],无法满足新工科对创新型卓越工程人才的培养要求。针对这一情况,我校在原有实验内容中引入教师企业横向科研课题,使学生近距离接触材料工程实践中的痛点与难题,以“第一人称”视角开展研究探索,极大地激发了学生的科研兴趣^[7]。学生在提出失效分析思路过程中,不仅需要完善自身的多元知识体系框架,夯实所学基础知识,而且可以有效地提升其创新意识及动手操作能力,以便能够适应未来工业发展的新变化、新模式与新需求。

2.2 实验教学形式改革

由于高分子材料失效分析实验项目教学难度大、综合性强,原有实验教学媒介难以应付复杂多变的分析对象,故提出在新工科背景下,对传统实验教学模式进行创新性继承,协调共享网络教学资源,积极引入新教学信息技术手段^[8]。为此,我校开展线上虚拟实验教学,引导学生在国家虚拟仿真实验教学项目共享平台、江苏省省高校虚拟仿真实验教学共享平台上学习有关材料分析检测设备的使用方法及技巧,如扫描电镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)等,从而提高大型仪器设备在教学中的使用效率,规避学生实操过程中出现意外情况^[9];同时,采用翻转课堂的实验教学模式^[10,11],将高分子材料特点、环境对材料影响、材料失效原因、失效形式及与课题相关的背景知识,通过线上教学进行讲授,将理论授课置于线上举行,留出足够多的实操环节;另一方面,教师与分组学生及企业相关工程师成立“失效分析攻关小组”微信群,随时在小组内部进行交流讨论;最后,学生以小组为单位通过 PPT 的形式展示失效分析实验设计思路及实验结论,分享心得体会,交流学习成果。在整个实验教学过程中,教师的身份也从原来的指导者转变成成为参与者、评价者,突破了原有实验教学的局限性。

3 高分子材料失效分析综合实验教学案例分析

3.1 卡丁车座椅螺丝柱断裂失效分析

某卡丁车主机厂在安装和拆卸一批座椅过程中,发现该批次螺丝柱常有断裂现象发生,螺丝柱断裂失效卡丁车座椅原貌如图 1(b)所示。

学生在拿到待分析样品后,首先在宏观形貌层面上对正常件与失效件进行辨析,正常卡丁车座椅宏观照片见图 1(a),从图中可以看出螺丝柱外表面有 4 根加强筋,其中 1 根加强筋与座椅连接充当连接筋作用,其余三根加强筋悬空。从图 1(b)中可以看出,左侧螺丝柱已经完全断裂,右侧螺丝柱局部尚连接在座椅上,根据右侧螺丝柱的开裂形貌可知,螺丝柱开裂从上表面开始,后慢慢向下扩展,最终螺丝柱上侧与座椅连接的加强筋完全断裂,螺丝柱整体从座椅上扭断。

卡丁车螺丝柱断口处的宏观照片见图 2,图 2(a)为座椅左侧陈旧性螺丝柱断口,图 2(b)为尚连接螺丝柱取下后的断口,从图 2(a)中可以看出陈旧性断口接触面积比较大,断口表面比较粗糙,学生初步推断原因为初期受力较小,断口左右撕扯受力较小,断口扩展充分。从图 2(b)可以看出加强连接筋的断口

面较小,可能原因为开裂早期受力过大,值得注意的是断裂的最后位置往下取时韧性良好,说明卡丁车材料韧性未发生明显下降。

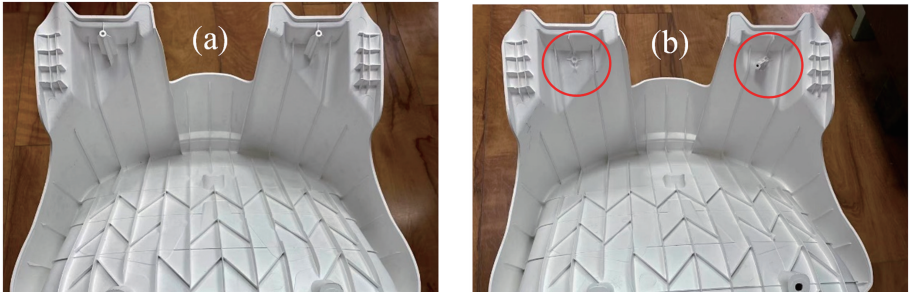


图 1 (a)正常卡丁车座椅宏观照片,(b)螺丝柱开裂卡丁车座椅宏观照片
Figure 1 Photomacrographs of (a) normal karting car seat and (b) failure karting car seat

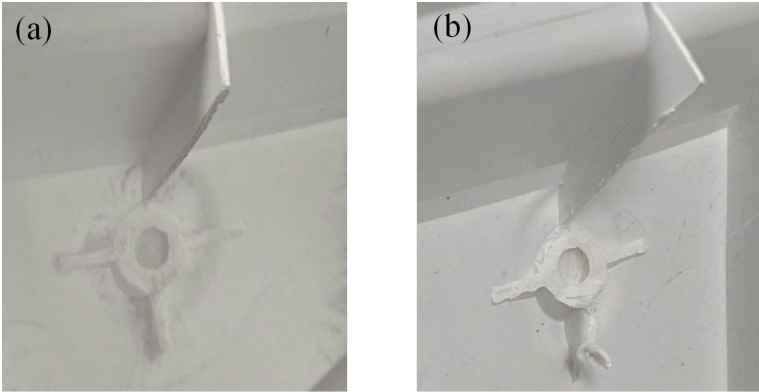


图 2 (a)陈旧性螺丝柱断口,(b)新破坏螺丝柱断口
Figure 2 Fracture surface of (a) old damaged screw column and (b) newly damaged screw column

考虑到材料成分的不同会对终端产品性能造成不同程度的影响,学生经小组讨论后,决定对样品的化学成分进行分析:分别从正常卡丁车座椅与失效卡丁车座椅取样,在平板硫化机 230℃下热压成膜进行全反射红外测试分析,结果见图 3,从图中可以看出两者红外吸收特征峰出峰位置基本一致,通过与红外谱图库对比可知为聚丙烯,二者主体材料基本相同。

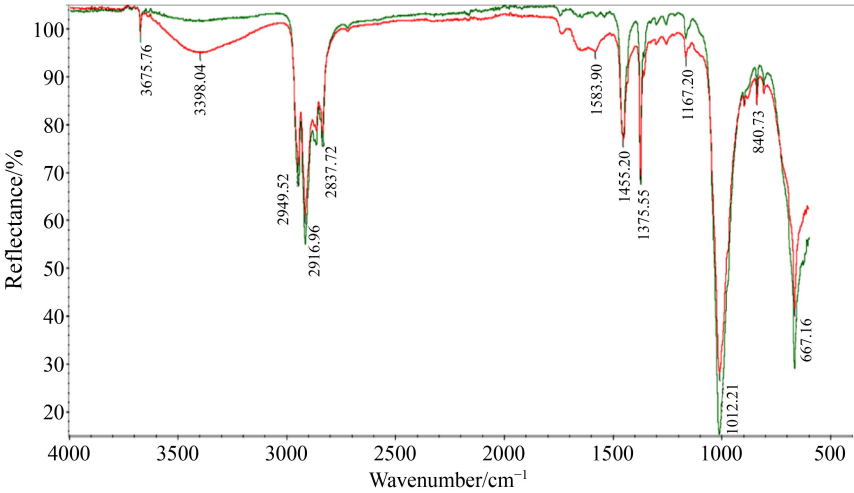


图 3 正常卡丁车座椅和失效卡丁车座椅红外光谱图(红色曲线为失效件)
Figure 3 FTIR spectra of normal karting car seat and failure karting car seat (The red curve is the failure seat)

为了进一步分析正常卡丁车座椅和失效卡丁车座椅的填料成分组成,学生将所取样品在 550℃ 下高温煅烧 2.5h,并将所得灰分进行 X 射线衍射分析,测试结果表明:正常件灰分含量为 35.2%,失效件灰分含量为 33.7%,两者灰分含量区别不大。填料 XRD 测试结果见图 4,从图中可以看出正常卡丁车和失效卡丁车的填料均为滑石粉和二氧化钛。

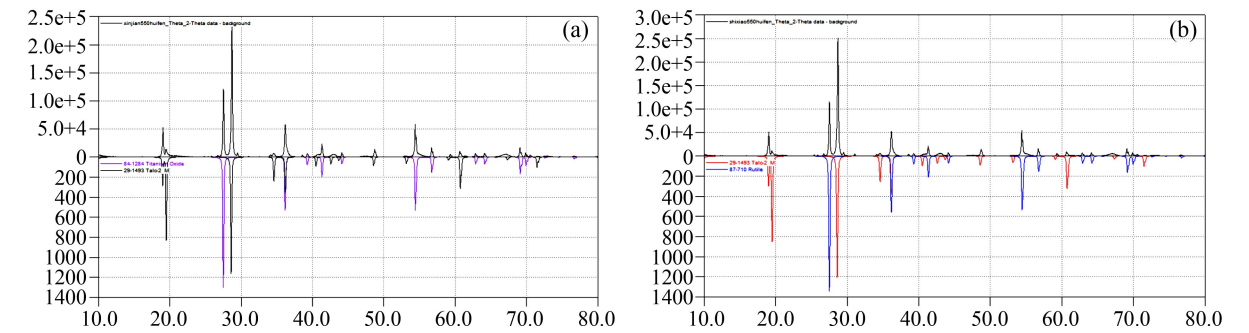


图 4 (a)正常卡丁车座椅灰分 XRD 测试结果;(b)失效卡丁车座椅灰分 XRD 测试结果
Figure 4 XRD results of ash content of normal karting car seat(a) and failure karting car seat(b)



图 5 失效卡丁车座椅螺丝柱断裂起始区体视显微镜微观形貌照片
Figure 5 Stereomicroscope micrograph of failure karting car seat screw column's fracture initiation zone

学生采用体视显微镜对座椅螺丝柱断裂起始区进行观察,从微观形貌图 5 中可以看出断裂起始区有反复摩擦的疲劳条带。还原卡丁车座椅安装、拆卸过程,结合上述成分分析及螺丝柱断口宏观照片推断卡丁车座椅螺丝柱断裂原因为,受到安装、拆卸时反复用力从而发生了疲劳断裂。

为验证上述推论,学生对螺丝柱断口形貌进行喷金处理,并在教师指导下通过扫描电镜进行微观观察,见图 6,与体视显微镜微观形貌照片类似,螺丝柱断裂起始区的扫描电镜图片中同样可以观察到疲劳辉纹,进一步验证了卡丁车座椅螺丝柱断裂的主要原因为,受到安装、拆卸时的反复受力。

学生最终以 PPT 答辩的形式,呈现出整个失效分析环节,给出失效分析结论:卡丁车螺柱断裂的原因为疲劳断裂;宏观形貌分析可知裂纹源起始于螺柱加强筋顶端;红外光谱及灰分 XRD 测试结果表明正常卡丁车和失效卡丁车原材料基本相同。同时,在答辩过程中,需要接受教师与同学们的提问与建议,从而进一步完善失效分析结论。

3.2 消音垫圈失效分析

某家电生产商在对一批洗衣机出厂检测过程中发现,其工作噪音较大,机箱内部的金属部件持续碰撞产生噪声,原本起减震、消音作用的消音垫圈(图 7)减震效果不明显,产生失效现象。

为查找消音垫圈失效原因,学生首先对正常消音垫圈与失效垫圈内径、外径等部位尺寸进行测量,两者数据结果一致,排除尺寸大小干扰原因。后对消音垫圈材质进行分析,考虑到样品呈黑色,使用红外透

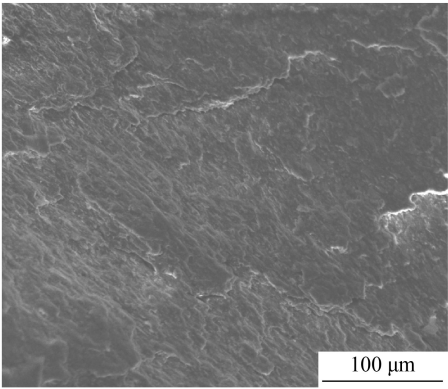


图 6 失效卡丁车座椅螺丝柱断裂起始区扫描电镜微观形貌照片

Figure 6 SEM micrograph of failure karting car seat screw column's fracture initiation zone



图 7 消音垫圈宏观照片

Figure 7 Photomicrograph of washer for noise deadening

射模式测试效果不理想,故对样品进行红外反射测试如图 8 所示,以及 X 射线荧光光谱分析(XRF)结果见表 1,从图 8 可以看出正常消音垫圈与失效消音垫圈红外特征峰出峰位置基本相同, 2923cm^{-1} — CH_2 —不对称伸缩振动, 2852cm^{-1} — CH_3 对称伸缩振动, 1459cm^{-1} — CH_2 —弯曲振动, 1166cm^{-1} — CH_3 面外摇摆振动等多处红外特征峰表明消音垫圈基体中存在聚丙烯、三元乙丙橡胶,结合红外谱图库检索结果以及产品的使用背景,推断消音垫圈基材为聚丙烯与三元乙丙橡胶的共混物—热塑性硫化橡胶 TPV,结合表 1 中元素含量对比,可判定正常消音垫圈与失效消音垫圈两者材质基本一致。

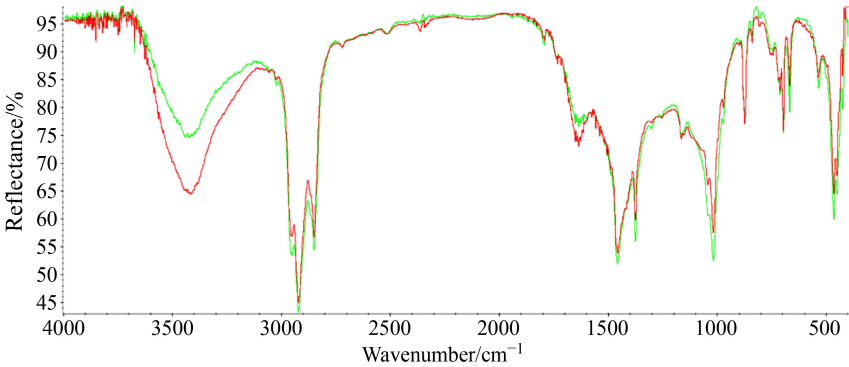


图 8 正常消音垫圈与失效消音垫圈红外谱图(红色曲线为失效消音垫圈)

Figure 8 FTIR spectra of normal and failure washer for noise deadening (The red curve is failure washer for noise deadening)

表 1 消音垫圈部分元素含量对比

Table 1 Comparison of some element contents of washer for noise deadening

样品名称	Ca(%)	O(%)	Si(%)	Mg(%)	Zn(%)
正常消音垫圈	3.25	1.96	0.483	0.352	0.0999
失效消音垫圈	3.23	1.94	0.470	0.351	0.101

考虑到消音垫圈中填料含量高低与种类会对产品的使用性能造成影响,故对其进行了高温煅烧及XRD测试,结果表明 550℃高温煅烧 2.5h 后灰分含量均为 12.4%;二者的灰分 XRD 对比见图 9,从图中可看出,2θ 对应出峰位置与面积基本相同,填料均由碳酸钙与滑石粉组成。

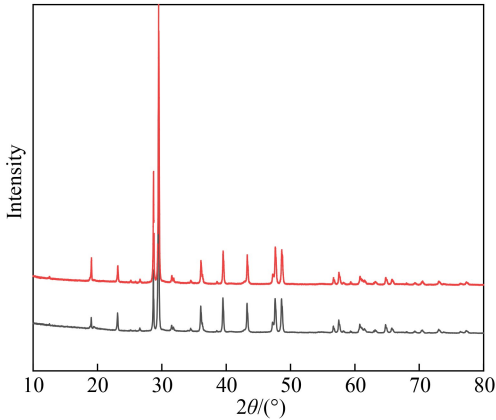


图 9 消音垫圈灰分 XRD 谱图(黑色曲线为失效消音垫圈)

Figure 9 XRD patterns of ash content of washer for noise deadening (The black curve is failure washer for noise deadening)

在 高 分 子 制 品 加 工 过 程 中,出 于 成 本 的 考 量 部 分 厂 家 会 使 用 回 收 料 来 进 行 加 工,这 在 一 定 程 度 上 会 影 响 终 端 产 品 的 机 械 性 能 及 使 用 寿 命。学 生 对 两 件 样 品 分 别 进 行 了 差 示 扫 描 量 热 测 试 DSC(图 10a),热 重 分 析 TG(图 10b)以 及 硬 度 测 试。从 图 10 可 以 看 出 样 品 的 热 历 史 及 热 分 解 曲 线 趋 势 基 本 相 同,在 TG 曲 线 200~400℃ 区 域 内,失 效 件 相 对 于 正 常 件 向 高 温 偏 移,550℃,750℃ 下 残 留 量 基 本 一 致。正 常 消 音 垫 圈 和 失 效 消 音 垫 圈 的 邵 氏 硬 度 结 果 列 于 表 2,从 表 中 可 以 看 出 失 效 消 音 垫 圈 硬 度 略 高,平 均 值 为 82.0HA。

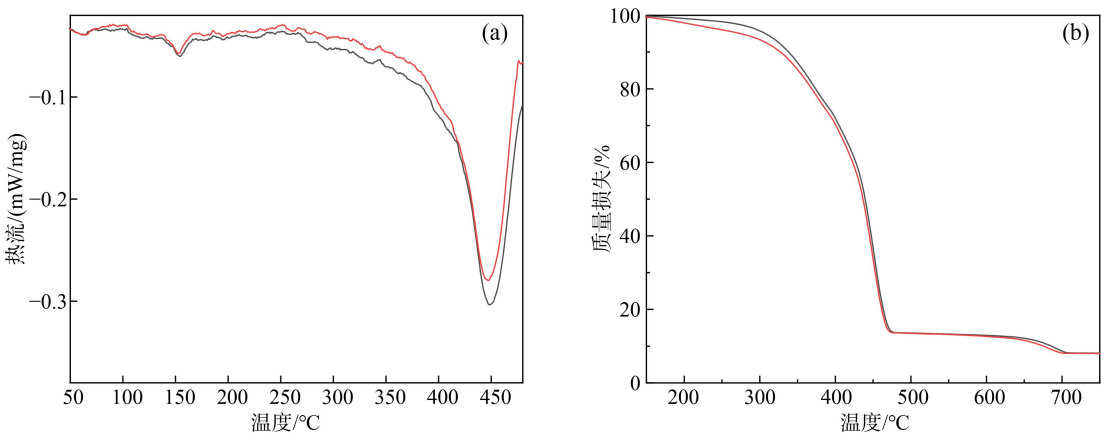


图 10 消音垫圈(a)DSC 曲线,(b)TG 曲线(黑色曲线为失效消音垫圈)

Figure 10 DSC (a)and TG (b)curves of washer for noise deadening (The black curve is failure washer for noise deadening)

表 2 消音垫圈邵氏硬度测量结果

Table 2 Shore hardness measurement results of washer for noise deadening

样品名称		测试值				平均值
正常消音垫圈	81.5	79.7	82.3	79.2	82.0	80.9
失效消音垫圈	81.8	82.6	84.1	79.6	81.7	82.0

学生与该企业工程师沟通交流后,结合失效消音垫圈比正常消音垫圈热稳定性高,硬度大等实验现象,推测失效原因有可能为材料交联度的不同,引起的回弹性差异,最终造成失效消音垫圈不能有效地减缓金属杆的振动。为验证这一推论,学生一方面对消音垫圈进行交联度测试,将样品放入索氏抽提器中,使用二甲苯作为提取液加热回流,测得正常件与失效件交联度分别为 38%和 41%;另一方面查阅相关标准,发现已加工成型的消音垫圈形状大小无法满足 GB/T 1681-2009《硫化橡胶回弹性的测定》中对测试样品形状的要求,同时由于橡胶制品的交联度与回弹性之间并不存在线性关系。通常来讲,随着交联度的增加,回弹性升高,当出现极大值后,交联度继续增加回弹性反而会下降。在这一情况下,最终学生给出的失效原因为,由于多种原因如挤出温度、螺杆转速、硫化体系用量变化等导致失效消音垫圈交联度增加,降低了消音垫圈的减震效果,建议后期在材料加工工艺过程中严把质量关卡。

学生在面对一件真实材料失效工程案例时,从一开始通过宏观观察进行初步判断,到提出实验思路、设计实验方案、开展实验,再到结合实验现象、分析图表数据,调整失效分析方向,最终给出失效原因。这一实验教学过程不单单提升了学生对制样设备、分析仪器的动手操作能力而且锻炼了其工程实践思维与科学研究、解决实际工程问题的能力;同时,不论是原材料的挤出、注塑还是高分子制件的安装调试,亦或是使用环境的变化等诸多环节均可能造成高分子材料的失效破坏,得出科学、客观的失效分析结论就需要学生能在一定程度上了解、把握整条高分子材料产业链,这在一定程度上也强化了学生的综合素养。

4 结束语

本文探讨了新工科背景下高分子材料专业实验教学改革方向,以高分子材料失效分析综合实验教学为例,通过引入教师横向科研课题,改进实验教学模式,以虚拟仿真实验教学为辅助手段,采用翻转课堂的形式来促进学生理论学习、提升实验技能。不论是教学内容还是教学形式的改变,其核心始终围绕着重新工科建设提出的人才培养要求,教学实践结果也表明,该教学模式具有良好的教学效果,培养了学生的实践动手能力与工程创新思维,为培养复合型、创新型、综合型材料工程人才打下坚实基础。

参考文献:

[1] 周端明,沈燕培. 高等工程教育研究,2021,4(4):1~7.

[2] 栗婧,王真,解北京,张志珍,胡振启. 中国安全科学学报,2021,31(5):83~90.

[3] 方正军,易兵,李靖,邬峰. 实验室研究与探索,2020,39(10):208~211.

[4] 钟登华. 高等工程教育研究,2017, 3:1~6.

[5] 徐书根,赵延灵,蒋文春. 实验技术与管理,2017,34(2):80~83.

[6] 何明宇,侯公伯,买买提江·依米提. 高分子通报,2021,(4):65~69.

[7] 陈世良,黄亦军,黄嘉驰. 实验技术与管理,2020,37(9):170~173,178.

[8] 罗静,刘仁,施冬健,魏玮,东为富,刘晓亚. 高分子通报,2021,(5):107~114.

[9] 张建庭,吴纯鑫,王祁宁,屠美玲,李琰君,贾继宁,蔡金法,杨阿三. 实验技术与管理,2021,38(6):16~20.

[10] 孙艳娜,洪玲,孙大权,任琤. 实验技术与管理,2021,38(6):233~236.

[11] 唐萍,牛慧,张春庆. 高分子通报,2021,(3):55~58.

Reform of the Course of Polymer Specialty Experiments in the Background of New Engineering——Taking “Material Failure Analysis” as an Example

LIU Jie, MIAO Shi-yu, LI Jia-xuan, SHI Hong-qi, LUO Ya-li *

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: Based on the requirements of new engineering construction for training talents, the paper discusses the reform orientation of polymer specialty experiments teaching, taking the material failure analysis comprehensive experiment as an example. By introducing teachers' crosswise scientific research subjects, relying on the national and provincial virtual simulation experiment teaching project sharing platform and carrying out the experiment teaching modes of flipped classroom, teacher guide students to consult literature, design experimental methods, analyze data diagrams and give reasonable analysis conclusions for failed products. Meanwhile, two teaching cases of karting car seat screw column fracture failure analysis and washer for noise deadening failure analysis are presented to show students' practical operation process. The experiment not only stimulates the students' learning initiative, but also effectively promotes students to master multi-disciplinary theoretical knowledge, and enhances their ability to solve practical engineering problems.

Key words: New engineering; Polymer materials; Experiment teaching; Failure analysis