



复合材料双真空成型装置的设计与实现

路鹏程, 王志平

(中国民航大学 航空工程学院, 天津 300300)

摘要: 专业实验实践教学是人才培养过程中知识综合运用和创新能力培养的重要手段, 通过自主设计和研制实验仪器设备对提高实验实践教学水平和科学研究具有重要的作用与意义。该文根据专业特色设计实现了一款航空复合材料结构制造及修复的双真空成型设备, 包括双真空机械结构设计、温控系统、真空系统和监测系统, 能满足航空制造标准要求的复合材料结构制造和修复成型, 能承担复合材料科学与工程专业主要实验实践项目, 具有安全可靠、操作简单、成本低等特点。该设计解决了复合材料成型设备因成本高、特种设备、多为大型工业贵重设备等原因无法实现教学和科研等问题, 可以充分发挥学生的主观能动性、提高学生的动手能力, 从而使学生能够在实验实践中灵活运用所学知识。

关键词: 复合材料; 双真空成型; 教学仪器设备研制; 拉伸性能; 自主创新

中图分类号: TP75

文献标志码: A

DOI: [10.12179/1672-4550.20230232](https://doi.org/10.12179/1672-4550.20230232)

Design and Implementation of the Double Vacuum Forming Device for Composite Materials

LU Pengcheng, WANG Zhiping

(College of Aeronautical Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In the process of developing talent, professional experimental practice teaching is a crucial tool for the thorough application of knowledge and the development of creative ability. Through independent design and development of experimental instruments and equipment, it is important to raise the standard of the scientific research and experimental practice teaching. This paper designs and implements a double vacuum debulking (DVD) equipment for the production and maintenance of aviation composite structures in accordance with professional characteristics. The equipment consists of a double vacuum mechanical structure, a temperature control system, a vacuum system, and a monitoring system. It can be used to form composite material structures and repair structures that adhere to aviation manufacturing standards. It can also be used to carry out the primary experimental practice projects related to composite material science and engineering. This equipment is inexpensive, safe, and easy to operate, thus problems such as excessive costs, specialized machinery, and large, costly industrial equipment that impede scientific instruction and research are resolved. With the use of this equipment, students can fully express their subjective initiative and develop their practical abilities, giving them more flexibility in applying the knowledge they have gained through experimentation.

Key words: composite; double vacuum forming; development of teaching instruments and equipment; tensile property; independent innovation

人类社会的发展, 总是伴随着新材料的产生与推广应用, 从而推动工业与科学技术的进步。20 世纪 60 年代中期, 复合材料作为一种新兴材料而兴起。在航空航天、海事、轨道交通、汽车、建筑、体育等行业中被广泛应用^[1-3], 特别是在航空航天方面, 为降低制造成本、提高运载能力以及可重复使用性, 复合材料的研发和成型制备越

来越受到重视, 因而, 伴随着复合材料技术的日益成熟, 飞机结构应用复合材料取得显著成就, 这一趋势还在不断扩大^[4-5]。

为适应国际民航事业的快速发展, 实现航空器设计、制造、运维以及其安全性和持续性, 需要大量具有航空材料知识背景和技能人才。航空材料在新材料开发、材料类型、结构设计、

收稿日期: 2023-04-27; 修回日期: 2024-03-05

基金项目: 中国民航大学实验技术创新基金项目(2022CXJJ43); 天津市教委科研计划(2021KJ051)。

作者简介: 路鹏程(1986-), 男, 硕士, 高级实验师, 主要从事复合材料方面的研究。E-mail: pclu@cauc.edu.cn

使用环境、失效形式、安全性要求、损伤修复乃至材料标准、相关适航法律法规等方面均具有自身特色,需要针对这些需求进行专门人才培养。

教育部高教所提出:“要根据培养学生动手和实践能力需要,不断创新、改善和完善实验实践教学条件,培养学生运用知识解决问题的能力,培养学生的科学意识和创新能力,促进高校全面协调可持续发展”。实验实践教学是人才培养的重要环节,在学生能力和综合素质提高方面有其独特的作用^[6-8]。强化工程实践能力培养是高等工程教育发展的必然趋势,也是新工科建设的基本要求。在完成必要理论教学内容的同时,强调学生工程实践能力的培养,培养复合型工程技术人才,已经成为我国高等工程教育领域的共性理念^[9-12]。但是,由于投入资金的限制严重束缚了实验室的建设。本文结合航空复合材料特色,研发复合材料双真空(double vacuum debulking, DVD)成型和修复设备。实践证明,该设备在复合材料材料科学与工程专业教学中显著提升了教学效果,学生可以根据专业知识学习的深入,利用该设备设计制备/修复复合材料结构,实现材料设计、成型、性能评价和测试分析等全链条的学习,培养学生实践能力和创新能力。同时,该设备的研制加快了航空复合材料科学与工程特色实验室建设步伐,推动仪器设备的自主创新,促进航空复合材料实验室建设。

1 仪器设备研制的必要性和可行性

实验室是开展实验实践教学和科学研究的重要场所,教学和科研工作能否顺利进行,其中重要因素之一就是实验室建设能否满足现代科学技术的发展。为了满足航空复合材料特色专业教学更新和新技术发展的需要,要求实验实践教学不断发展和提高,仪器设备具有系统性、科学性和创新性。复合材料科学与工程专业的专业性很强,主要成型仪器设备多为独特、贵重、工业级大型仪器设备,设备成本高,涉及特种仪器设备,对环境场所、操作人员具有特殊要求。

据调研,我国各大高校及科研机构在复合材料科学与工程专业相关实验实践教学的场地和配套严重不足,造成教学内容不完善,导致对复合

材料科学与工程专业中材料开发、设计、成型、检测分析、损伤修复、标准制定等实验实践操作机会少的现状。目前高等学校及科研机构使用的仪器设备主要来自进口或国产两个渠道,其中,形式单一、批量少为主要特点,因此存在 3 个问题:设备周期长,商品仪器设备从研制到成熟需要很长时间;种类单一,一些具有特殊或精度较高的实验仪器设备无处购买;成本高,进口设备仪器价格昂贵,批量采购不现实。

创新自行研制实验仪器设备是对商品化、特殊用途仪器设备的补充,提高了教师和实验技术人员的技术水平,培养了人才,解决了实验实践教学和科研实验中的实际问题,同时节约了资金,自行研制仪器设备环节少、费用低,有利于加速实验室建设;可以弥补商品化仪器设备品种的不足,满足特色专业教学和科研的特殊需要;由于为自主研发仪器设备,因此对其每个零部件都比较熟悉,掌握了仪器的结构、性能、特点和工作原理,便于操作使用和维修。综上,自行研制实验仪器设备有着十分重要的现实意义^[13]。

2 复合材料双真空成型装置设计与研制

学校的复合材料科学与工程专业以民用航空领域和经济需求、社会发展为驱动,旨在为航空材料领域输送创新型、应用型和复合型人才。复合材料科学与工程专业在实验实践教学设施、设备和仪器等建设紧缺的状态下,实验技术、设备等创新尤为重要。材料成型是现代制造业的重要支柱,是材料研究、发展、产品设计和制造等的基础。航空复合材料有如下 3 个常用成型工艺。

1) 热压罐成型工艺

热压罐是纤维增强树脂基复合材料一种常用的构件成型设备,已经形成完整的技术体系,在复合材料结构制造、胶接连接和复合材料结构损伤修复等方面得到了广泛的应用,并已成为制造航空器结构件的优选技术^[14]。热压罐成型工艺是在模具上用真空袋密封复合材料构件、胶接件或损伤修理结构,放入热压罐,处于真空(或常压)情况下,经过升温、加压、保温、降却、卸压等过程,使其成为所要求的外形和质量的一种成型工艺。其主要特点有:罐内压力和温度均匀;可

保证成型构件的质量、力学性能稳定;构件孔隙率低、树脂含量均匀;适用范围较广、效率高;成型过程稳定、可靠。但是热压罐成型也有以下缺点:热压罐成本高,热压罐设备的制造、运输、安装、成型消耗的高压液氮和能源费用等过高;热压罐成型能耗大;热压罐设备利用率不高,热压罐一次只能成型一个结构部件,工效低,不能批量生产;热压罐为特种设备,操作人员需要具有资质,维保成本高。因此这使得热压罐应用于实验实践教学难上加难。

目前,虽然复合材料部件所用材料的成本降低了20%,但是,制造成本达到了复合材料部件整体成本的80%以上。在整个生产过程中,制造成本仍是单个费用中最高的。所以,未来复合材料成型工艺的发展趋势是降低成型工艺成本。

2) 单真空成型工艺

为了解决热压罐成型工艺缺点,实现高效、低成本、安全的复合材料成型,国际上开发了非热压罐工艺,即在不采用热压罐的情况下,可以生产出与热压罐相同的产品。其中单真空成型工艺是一种较好的选择。

目前,对于民用航空器复合材料结构制造/损伤修复中的较薄层板结构常采用单真空成型工艺,这种工艺操作简单,对于6层以下的复合材料层板制造/损伤修复效果好,其优势是:板内孔隙率小,通常在1%~3%,可以达到孔隙率4%以下的要求;热补仪装置体积较小,便于携带,对于复合材料结构损伤修复可以进行无需离位操作;对温度和真空进行控制,可以保证质量,尽量避免人为因素的影响。复合材料制造中单真空成型工艺如图1所示。在A阶段,当将真空袋放置在空气中(即没有真空条件)时,真空袋处于平衡,在这种情况下,复合材料不会受到任何外部压力的影响,并保持蓬松状态。在B阶段,树脂在升高的温度下软化并熔融,树脂发生化学反应产生挥发物(反应副产物和溶剂),为了使挥发物逸出,对真空袋抽真空以加速该过程。然而,由于真空袋内外压力差,真空袋紧紧地塌陷在垫板上并压紧复合材料,所以阻碍了挥发物的逸出,因此挥发物的管理成为一个关键问题。同时,如果要制备或修复层数大于6层的复合材料层板,其孔隙率通常会超过5%,不能达

到国际飞机制造商所规定的最大5%的孔隙率要求^[15-17]。

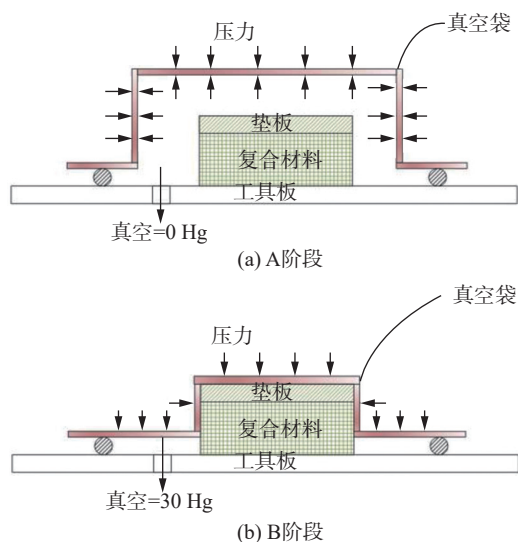


图1 单真空成型工艺示意图

3) 双真空成型工艺

近年来,随着复合材料工业技术的成熟、规模扩大、成本降低,复合材料在各个领域的应用受到了广泛的关注,由此制定了大量的复合材料成型研究方案和发展方案,开发出了各种成型工艺体系。

本文设计研制的复合材料双真空成型设备,借助其能制备出复合材料挥发物含量低于1wt.%,且能制备和修复大厚度复合材料层板结构的特点,同时使用双真空工艺成型制备低孔隙率热塑性复合材料成为可能。

复合材料双真空成型装置原理如图2所示,包括双真空主体机械结构、真空控制系统、温度控制系统、温度和压力监测系统。

1) 真空主体结构采用铸造的铝合金板制备,各铝合金板之间通过开榫槽互相咬合装配,保证装配精度,且在装配前在开榫槽内注入耐高温密封胶,保证密封性。

2) 真空系统,包括真空管路,采用单向气流控制,避免气流扰动带来的不安全因素。在保证复合材料成型质量的前提下,复合材料双真空成型装置工作压力范围0~0.1 MPa。

3) 温控系统采用耐用复合材料成型电热毯进行加热,K型热电偶进行复合材料成型过程温度实时监测。

4) 温度和压力检测系统可以实时检测复合材料成型过程中整个系统中的压力变化,也可进行

压力和温度调节,使得温度和压差变化保持与设计工艺一致,提高复合材料工件或修理结构的质

量;复合材料双真空成型装置具有安全、结构简单、操作方便、高效节能等优点。

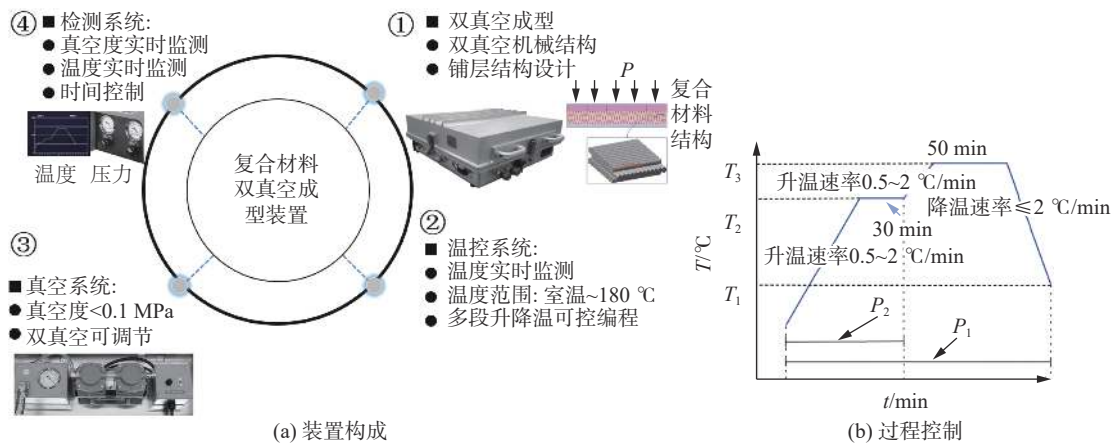


图 2 复合材料双真空成型装置原理

复合材料双真空成型装置工作原理如下。

双真空成型装置结构是在单真空结构基础上外加一套有一定刚性的密封支撑结构,支撑结构能够完全包裹住单真空结构(内真空),在内真空和密封支撑结构之间创造出一片真空区域(外真空)。双真空压实过程中,内外真空结构均处于真空状态,通过控制调节内外真空结构的压力,使复合材料构件在抽真空和加热固化的过程中不被大气压压紧,从而更好地从层间抽吸空气和其他气体达到降低孔隙率、促进树脂基体反应、提高复合材料结构质量的目的。

复合材料双真空成型工艺分为以下 2 个阶段。

1) 脱气阶段

在内、外腔下方分别同时抽真空(双重真空),并调节使内、外腔真空度尽可能保持一致,从而使内袋不会压实在复合材料组件上,使复合材料铺层中的气体被完全排除。

2) 压实阶段

内袋下方继续保持真空状态,释放外腔的真空至大气压,此时复合材料结构将承受压力使其被压实。因为阶段 1 使得复合材料铺层结构中的气体被排除,不会在阶段 2 压实过程中将气体困于内,导致复合材料结构孔隙率过高而无法达到要求的情况。该过程的关键是何时从阶段 1 切换到阶段 2,即当内、外腔的真空度达到设计值后根据复合材料结构件大小保持一定时间即可。复合材料双真空成型过程的工作原理如图 3 所示。

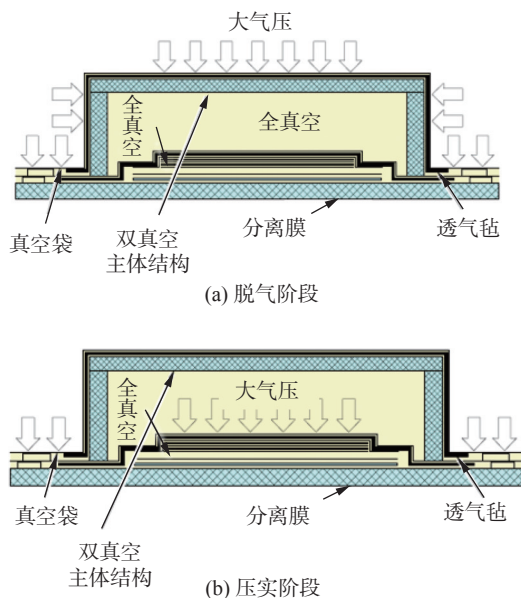


图 3 复合材料双真空成型工作原理图

复合材料双真空成型装置制备复合材料层板结构时的封装截面如图 4 所示,由内到外包括:复合材料层板结构、相关辅料、电热毯、温度监测热电偶、绝缘保温材料、真空袋、模板、双真空成型装置主体结构。相比热压罐、热补仪、浇注机、树脂传递模塑成型机(RTM)等设备进行复合材料成型更安全、便捷、高效节能,所需辅料耗材用量也减少,大大降低了设备和实验成本。

复合材料部件中孔隙的形成来源于两个方面,树脂基体中的小分子挥发物和铺层过程中层间包裹的空气。因此,双真空工艺能降低复合材料部件的孔隙率归因于以下两个方面。

1) 对内袋抽真空降低了树脂基体中挥发物的蒸气压和沸点,加速了挥发物在复合材料成型低温阶段的挥发速率。

2) 对内袋和外腔同时抽真空降低了层间的压紧力,减轻了挥发物及空气逸出通道的物理束缚,从而更有利于气泡的排出。气泡在复合材料成型中的产生和消除如图5所示。

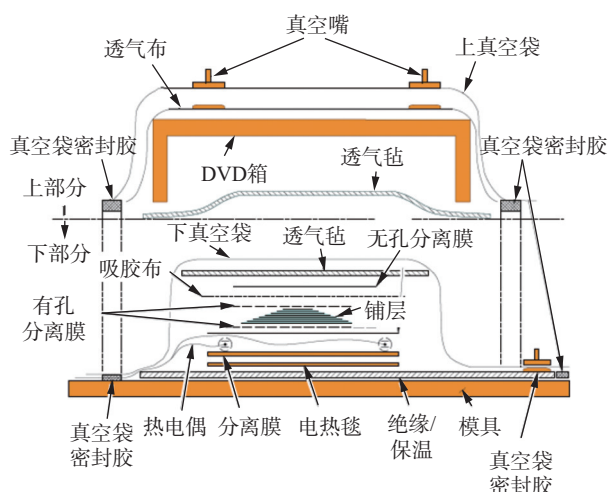


图4 复合材料双真空成型装置制备复合材料层板封装截面图

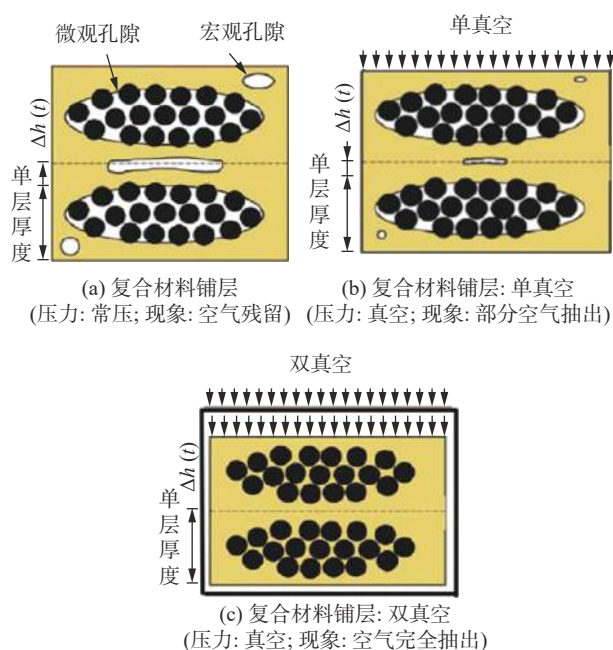


图5 气泡在复合材料成型中的产生和消除

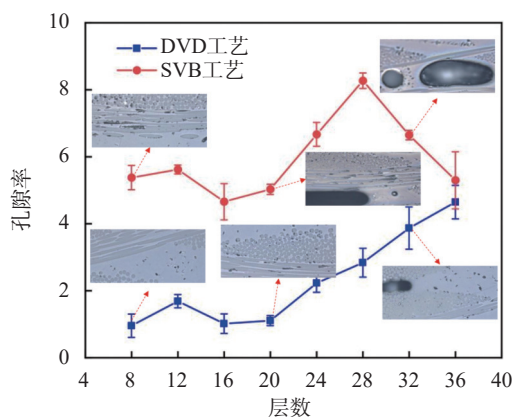
本文开发的复合材料成型双真空装置可以消除复合材料成型过程中过多的树脂溢出,从而对复合材料结构进行精准的形状控制。另外,双真空工艺具有适应性广、使用方便灵活,可在烘箱

中进行固化,也可使用微波、超声、电子束固化等优点。双真空工艺不再局限于常规热压罐成型制造复合材料结构所需的尺寸、工具以及资本限制。该双真空工艺可以安全高效的进行复合材料层板工件制备和损伤结构修理,可以生产出微孔隙的复合材料工件和修理结构^[18-19];在高黏度树脂体系情况下,也能提供充足的附加压力,从而确保复合材料工件或修复的成型质量。

3 复合材料双真空成型设备的成效

3.1 孔隙率

采用研制的复合材料双真空成型设备和单真空工艺分别制备了8、12、16、20、24、28、32、36层玻璃纤维增强环氧树脂基复合材料层板,对其孔隙率进行测试分析,如图6所示。当铺层数目增加时,两种工艺制备的层压板孔隙率均出现明显的增大趋势。采用自主研发的双真空设备制备的层压板孔隙率明显低于单真空工艺制备的层压板。双真空工艺制备的层压板孔隙率在8层时最低,仅为0.92%,在36层时孔隙率为4.7%(航空工程要求的最大极限孔隙率为5%)。所以,本文设计双真空设备制备的玻璃纤维/环氧树脂复合材料层压板最高铺层数为28层。利用单真空工艺制备层压板,在20层以后孔隙率会出现大幅度增加,并出现较大的宏观孔隙。



注: SVB-单真空袋(single vacuum bag)。

图6 玻璃纤维/环氧树脂层压板面积孔隙率

3.2 拉伸性能

采用热压罐、双真空和单真空工艺制备的玻璃纤维增强环氧树脂复合材料层板的拉伸性能如图7所示。从图7(a)可以看出,双真空工艺制备的层压板拉伸强度为350 MPa,热压罐工艺制备

的层压板拉伸强度为 356 MPa, 单真空工艺制备的层压板拉伸强度为 315 MPa。与热压罐工艺相比, 双真空工艺制备的层压板拉伸强度保持率在 98%, 下降了 2%, 单真空工艺制备的层压板拉伸强度保持率在 88%, 下降了 12%。

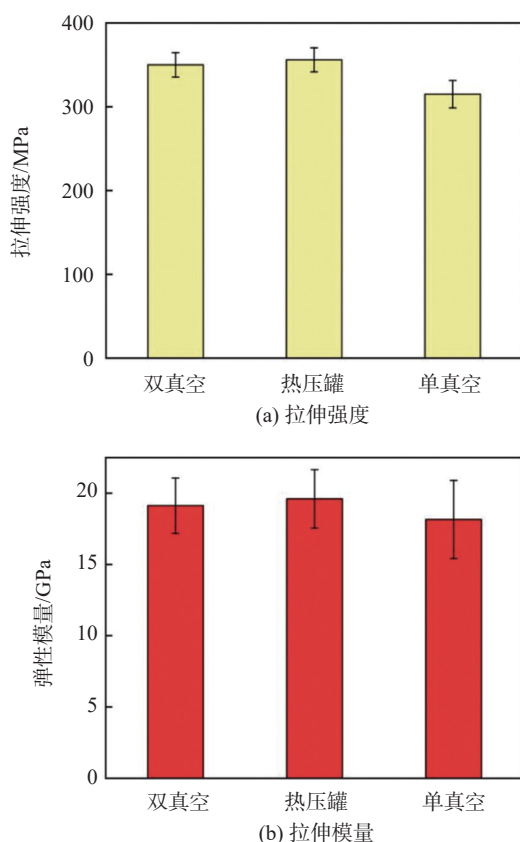


图 7 不同工艺制备的层压板拉伸性能

从图 7(b)可以看出, 双真空工艺制备的层压板弹性模量为 19.1 GPa, 热压罐工艺制备的层压板弹性模量为 19.6 GPa, 单真空工艺制备的层压板弹性模量为 18.2 GPa。与热压罐工艺相比, 双真空工艺制备的层压板弹性模量大约下降了 2.4%, 单真空工艺制备的层压板弹性模量大约下降了 7%。双真空工艺与热压罐工艺制备的层压板在弹性模量和拉伸强度上差距非常小, 几乎可以忽略。

3.3 复合材料双真空成型设备在教学中的应用

高等学校的教学质量和科研水平是衡量其办学水平的标志之一。实验室的仪器设备是保证教学质量和科研水平的基本物质条件之一。特别是工科类院校的教学体系、课程整合、教学内容以及教学方法的改革需要相适应的实验实践教学体系的改革, 需要实验仪器设备和实验方法的更

新, 自制仪器设备的开发研制最大限度地满足了教学改革对实验实践教学的要求。本次研制复合材料双真空成型设备实现了学生对复合材料设计、制备、成型、检测、损伤修复、失效分析等环节的“绿色全链条”复合材料构件或样件制备实验实践培养。

复合材料双真空成型装置是对商品化仪器的补充, 解决了先有复合材料成型设备(如热压罐、热压机等)复杂、操作繁琐、成本高、耗资大、需持证操作、台套数受限等问题, 有助于学生实验实践技能培养。复合材料双真空成型装置研制成功不但补充了一批实验设备, 改善了实验装备条件, 而且节约了大量资金, 在教学和科研中发挥了重要作用, 加快了学校航空特色复合材料实验室建设步伐。

4 结束语

复合材料双真空成型设备的研制完成, 实现了满足航空标准要求的复合材料构件/样件的高效、低成本成型制备和损伤修复, 不仅满足了教学基本要求, 而且拓宽了学生的知识面, 拓展了复合材料科学与工程实验实践教学平台, 为培养自主创新型人才提供了优秀的教学资源, 在实验实践教学发挥了重要作用。

参考文献

- [1] 贡向辉, 谢倍珍, 王江雪, 等. 反应器技术研究性综合实验设计与探索[J]. *实验科学与技术*, 2023, 21(1): 7-12.
- [2] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. *复合材料学报*, 2007(1): 1-12.
- [3] FENG S H, LI I S. Application of resin matrix composites in aircraft and development of its manufacturing technology[J]. *The Frontiers of Society, Science and Technology*, 2020, 2(16): 153-158.
- [4] 张辉. 我国大型民用飞机产业发展战略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [5] FU Y, YAO X. A review on manufacturing defects and their detection of fiber reinforced resin matrix composites[J]. *Composites Part C: Open Access*, 2022, 8: 100276.
- [6] 万建, 汪兵, 周权, 等. 自制核心耗材促进大型仪器设备在实验教学中的应用[J]. *实验室研究与探索*, 2022, 41(1): 162-164.
- [7] 刁其恩. 探究加强实验教学仪器设备管理的思考[J]. *教育信息化论坛*, 2018, 2(1): 88-89, 91.

- [8] 曾垂省, 梁亦龙, 舒坤贤, 等. 自主研制实验教学仪器设备的作用与意义[J]. 实验科学与技术, 2010, 8(4): 178-180.
- [9] 李树娜. 研究型化工综合教学实验设计与探索[J]. 实验室研究与探索, 2018, 37(9): 181-184.
- [10] 钱玉恒, 杨亚非. 自动化专业核心课柔性实验平台设计与实现[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(10): 106-110.
- [11] 李如琦, 贺秋丽, 王辑祥, 等. 自制实验教学仪器设备促进实验教学改革[J]. 高等理科教育, 2009(1): 71-74.
- [12] 张静, 白守礼, 姜广峰. 自制实验教学仪器设备运行机制的研究与实践[J]. 高等理科教育, 2011(4): 50-52.
- [13] 徐宁, 王玫, 吴倩. “精品实验项目”建设重在诠释经典和方法创新[J]. 实验室研究与探索, 2013, 32(2): 112-115.
- [14] 陶家祥. 碳纤维预浸料性能与固化工艺研究[D]. 上海: 东华大学, 2016.
- [15] CHONG H M, WU Z A, NG S P, et al. Influence of double vacuum debulking process on co-cured soft-patch carbon fibre composite repairs[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 168: 367-374.
- [16] EVENS M W, NELSON K E, SPALDING J F, et al. Systems and methods for on-aircraft composite repair using double vacuum debulking: 8986479B2[P/OL]. (2015-03-24)[2024-04-04]. <https://patents.google.com/patent/US8986479B2/en>.
- [17] The Boeing Company. Patent issued for systems and methods for on-aircraft composite repair using double vacuum debulking[J]. *Defense & Aerospace Week*, 2015, 11(6): 234-256.
- [18] BETKE U, LIEB A. Micro-Macroporous composite materials-preparation techniques and selected applications: A review[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(9): 1800252.
- [19] JIANG W, HUANG Z, WANG Y, et al. Voids formation and their effects on mechanical properties in thermoformed carbon fiber fabric-reinforced composites[J]. *Polymer Composites*, 2019, 40(2): 1-9.

编辑 钟晓

(上接第95页)

- [7] 张建忠, 徐敬东, 吴英. 面向综合能力培养的计算机网络实验教学[J]. 计算机教育, 2023(7): 188-192.
- [8] 谢逸, 张又方. 计算机网络实验课在线教学探索[J]. 计算机教育, 2023(5): 35-39.
- [9] 顾军, 张瑾. 网络思维与工程思维双驱动的计算机网络课程教学模式探索[J]. 计算机教育, 2023(4): 83-86.
- [10] 刘宴涛, 秦娜. “计算机网络”课程实验仿真教学的路径探索[J]. 电气电子教学学报, 2021, 43(5): 174-182.
- [11] 杨乐, 丁芝侠, 李赛. 自动化专业计算机网络课程实验的教学研究[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(4): 111-117.
- [12] 符发, 杨厚群, 黎才茂, 等. 新工科背景下计算机网络实验教学改革探索[J]. 计算机教育, 2022(3): 39-42.
- [13] 张进, 杨宁, 方曼, 等. 基于复杂工程问题的网络专业综合性实验项目建设[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(4): 160-163.
- [14] 李景涛, 阚海斌, 黄启轩. 新工科背景下计算机网络实验的渐进式项目设计[J]. 计算机教育, 2023(5): 198-201.
- [15] 王章豹, 张宝. 培养新工科人才解决复杂工程问题能力的探讨[J]. 高教发展与评估, 2019, 35(6): 74-85.
- [16] Association for Computing Machinery (ACM), IEEE Computer Society (IEEE-CS). Computing Curricula 2020 (CC2020): Paradigms for Global Computing Education[EB/OL]. [2020-09-30]. <https://dl.acm.org/doi/pdf/10.1145/3467967>.

编辑 葛晋