

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.07.014

增材制造工艺参数对 PLA/AF 复合材料层间剪切强度影响

邹爱玲^{1,2}, 单忠德³, 陈意伟^{1,2}, 战丽¹, 王绍宗², 刘晓军², 宋亚星^{1,2}

(1. 机械科学研究总院先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100044;

2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 100083; 3. 南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要:为解决芳纶纤维(AF)增强复合材料成形过程中工艺复杂、周期长、人工干预多、成形加工难等问题,基于连续纤维增材制造技术研究了AF增强聚乳酸(PLA)(PLA/AF)复合材料,实现从原料到复合材料的直接成形。探索了AF取向、打印速度、打印层厚、打印间距工艺参数对PLA/AF复合材料样品层间剪切强度的影响。结果表明,AF单向取向的复合材料样品的层间剪切强度达到最大值,为11.84 MPa;在打印层厚为0.75 mm、打印间距为1.2 mm工艺参数下,随着打印速度的增加,复合材料样品的层间剪切强度先增大后减小,当打印速度为16 mm/s时,层间剪切强度达到最大值,为14.22 MPa;在打印速度为16 mm/s、打印间距为1.2 mm工艺参数下,随着打印层厚的增加,复合材料样品的层间剪切强度减小,当打印层厚为0.66 mm时,层间剪切强度达到最大值,为14.85 MPa;在打印层厚为0.66 mm、打印速度为16 mm/s工艺参数下,随着打印间距的增加,复合材料样品的层间剪切强度减小,当打印间距为1.2 mm时,层间剪切强度达到最大值,为14.85 MPa。

关键词: 芳纶纤维; 聚乳酸; 增材制造; 层间剪切强度

中图分类号: TH145.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)07-0082-05

Effects of Additive Manufacturing Process Parameters on Interlaminar Shear Strength of PLA/AF Composites

Zou Ailing^{1,2}, Shan Zhongde³, Chen Yiwei^{1,2}, Zhan Li¹, Wang Shaozong², Liu Xiaojun², Song Yaxing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment of China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100044, China; 2. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 100083, China;

3. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex process, long cycle, many manual intervention and difficult forming in the forming process of aramid fiber (AF) reinforced composites, the AF reinforced polylactic acid (PLA) (PLA/AF) composites were studied based on continuous fiber additive manufacturing technology, and it was realized that composite was directly formed from raw materials. The effects of AF orientation, printing speed, printing layer thickness and printing spacing on the interlaminar shear strength of PLA/AF composites were investigated. The results show that the interlaminar shear strength of AF unidirectional orientation composites is the highest, which is 11.84 MPa. When the printing thickness is 0.75 mm and the printing spacing is 1.2 mm, the interlaminar shear strength of PLA/AF composite first increases and then decreases with the increase of printing speed. When the printing speed is 16 mm/s, the interlaminar shear strength reaches the maximum value of 14.22 MPa. When the printing speed is 16 mm/s and printing spacing is 1.2 mm, the interlaminar shear strength decreases with the increase of printing layer thickness. When the printing layer thickness is 0.66 mm, the interlaminar shear strength reaches the maximum value of 14.85 MPa. When the printing layer thickness is 0.66 mm and printing speed is 16 mm/s, the interlaminar shear strength of PLA/AF composite decreases with the increase of printing spacing. When the printing spacing is 1.20 mm, the interlaminar shear strength reaches the maximum value of 14.85 MPa.

Keywords: aramid fiber; polylactic acid; additive manufacturing; interlaminar shear strength

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB1100900), 机械科学研究总院技术发展基金项目(312005Q9), 国防科技基础加强计划项目

通信作者: 单忠德, 博士, 研究员, 主要研究方向为数字化机械装备与先进成形制造技术

收稿日期: 2021-04-22

引用格式: 邹爱玲, 单忠德, 陈意伟, 等. 增材制造工艺参数对 PLA/AF 复合材料层间剪切强度影响[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(7): 82-86.

Zou Ailing, Shan Zhongde, Chen Yiwei, et al. Effects of additive manufacturing process parameters on interlaminar shear strength of PLA/AF composites[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(7): 82-86.

随着先进成形技术的发展,连续纤维增强复合材料成形技术不断朝着高效率、低成本、低能耗、自动化等方向发展,改变了传统工艺过程复杂、周期长、人工干预多等问题。芳纶纤维(AF)复合材料已经在航空航天、国防军工等领域广泛应用^[1-3],但因其加工成形难、易出现抽丝和拉毛等问题,以至于尺寸精度、材料性能难以精确控制^[4-6]的现象日益凸显。近几年,很多国内外学者开展了连续纤维增强复合材料增材制造技术方面的研究^[7],较多采用将纤维原丝引入熔融沉积成形(FDM)工艺中,进行在线复合并打印成形,如 M. Heidari-Rarani 等^[8]采用 FDM 工艺,成形碳纤维增强 PLA 复合材料,对比纯 PLA,复合材料的拉伸性能与弯曲性能得到显著提升。Dou Hao 等^[9]采用 FDM 工艺,对碳纤维增强 PLA 线材进行浸渍打印,研究了复合材料的拉伸强度与拉伸弹性模量。刘腾飞等^[10-12]基于 FDM 工艺,研究了碳纤维增强 PLA 复合材料的力学性能。刘良强等^[13-14]采用 FDM 工艺,研究了不同参数下 AF 增强 PLA 复合材料的拉伸及压缩性能。上述研究采用纤维与树脂原位浸渍方式成形复合材料,其力学性能及浸渍效果受打印工艺参数的影响比较明显。单忠德等^[15-17]提出了连续纤维增材制造成形技术,主要通过调控纤维与树脂的配比制备预复合丝材,采用连续纤维增材制造成形设备将复合丝材进行加热熔融成形制备复合材料构件,该方法可成形碳纤维、AF 等高性能纤维增强热塑性树脂基复合材料,实现由原料(纤维原丝与树脂颗粒)到复合材料的直接成形。

笔者以 AF 为增强体、PLA 为基体、聚丁二酸丁二酯(PBS)为增韧剂,制备 PLA/AF 预复合丝材,采用连续纤维增材制造工艺制备 PLA/AF 复合材料,研究了纤维取向、打印速度、打印层厚、打印间距对层间剪切性能的影响。

1 实验部分

1.1 主要原材料

AF:泰普龙 529S,线密度为 840D,烟台泰和新材料股份有限公司;

PLA:4032D,美国 Nature Works 公司;

PBS:TH803S,新疆蓝山屯河化工股份有限公司。

1.2 主要仪器与设备

万能材料试验机:INSTRON5567 型,美国英斯特朗公司;

连续纤维复合丝材成形机、连续纤维增材制造原理样机:自制。

1.3 样品制备

AF 原丝经 30℃ 恒温水浴去浆处理、加热展纤、粉末浸渍、熔融挤出浸渍制备 PLA/AF 复合丝材,制备工艺如图 1 所示。

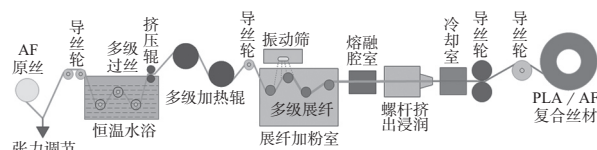


图 1 PLA/AF 复合丝材制备工艺流程示意图

PLA/AF 复合材料样品尺寸确定为 60 mm×30 mm×6 mm。在三维建模软件中进行样品建模并导出 STL 格式模型文件,将 STL 格式模型文件导入 Repetier-Host 开源切片软件中对其进行模型分析与路径规划,优化代码。将制备的 PLA/AF 复合丝材由连续纤维增材制造原理样机成形 PLA/AF 复合材料层间剪切测试样品。PLA/AF 增材制造工艺参数见表 1。

表 1 PLA/AF 复合材料增材制造工艺参数

项目	参数
打印层厚/mm	0.66, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85
打印间距/mm	1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6
纤维取向	单向, $\pm 45^\circ$, $0^\circ/90^\circ$
打印速度/(mm·s ⁻¹)	8, 12, 16, 24, 30
打印温度/℃	220
基板温度/℃	20
喷嘴直径/mm	1.5
复合丝材直径/mm	0.89

1.4 性能测试

层间剪切强度按 JC/T 773-2010 测试,跨距为 30 mm,加载速度为 3 mm/min、加载头圆角半径为 (2 ± 0.2) mm,支座圆角半径为 (2 ± 0.2) mm。

2 结果与讨论

采用连续纤维增材制造技术制备不同 AF 取向、打印速度、打印层厚、打印间距的 PLA/AF 复合材料测试样品,研究不同工艺参数对复合材料层间剪切强度的影响。

2.1 AF 取向对 PLA/AF 复合材料层间剪切强度的影响

针对 AF 不同取向的 PLA/AF 复合材料,设计了单向、 $\pm 45^\circ$ 和 $0^\circ/90^\circ$ 共 3 种 AF 取向结构,在 Repetier-Host 开源切片软件中对层间剪切样品模型进行分层和路径规划,为保证样品内部 AF 取向的一致性,对生成的代码进行优化和完善。考虑复合材料样品成形过程中, $\pm 45^\circ$ 取向的结构中小线段

路径较多,选择较小的打印速度,以避免较多且频率过快地加、减速对增材制造的成形效果产生影响,选择打印速度为 8 mm/s,打印层厚为 0.75 mm,打印间距为 1.2 mm,其它工艺参数见表 1,成形 AF 不同取向下的复合材料样品。AF 不同取向向下成形复合材料样品的层间剪切强度如图 2 所示。

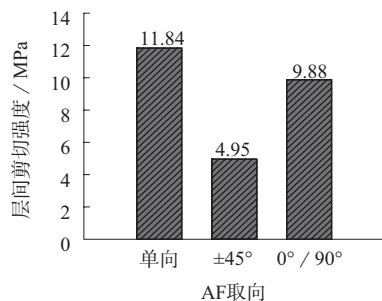


图2 AF不同取向向下成形复合材料样品的层间剪切强度

由图2可以看出,单向、±45°和0°/90°取向复合材料样品的层间剪切强度分别为11.84, 4.95 MPa和9.88 MPa,其中AF单向取向复合材料的层间剪切强度最大,0°/90°取向的层间剪切强度次之,±45°取向的层间剪切强度最小。AF单向取向的层间剪切强度比±45°取向提高139.19%,比0°/90°取向提高19.84%;0°/90°取向的层间剪切强度比±45°取向提高99.60%。因此,AF取向对复合材料的层间剪切强度有明显影响,在其他工艺参数相同的情况下,AF单向取向的复合材料层间剪切强度最好。

2.2 打印速度对复合材料层间剪切性能的影响

基于高效率成形复合材料,研究不同打印速度成形复合材料,设计8,12,16,24,30 mm/s共5种打印速度,选择打印层厚为0.75 mm,打印间距为1.2 mm,其它工艺参数见表1,成形不同打印速度下的复合材料样品。不同打印速度下成形复合材料的层间剪切强度如图3所示。由图3可以看出,随着打印速度的提升,复合材料样品的层间剪切强度先增大后减小,在打印速度为16 mm/s时,复合材料样品的层间剪切强度达到最大值,为14.22 MPa;打印速度为30 mm/s时的层间剪切强度达到最小值,为12.40 MPa,最大层间剪切强度较最小层间剪切强度提高14.68%。其原因是打印喷头的温度恒定,随着打印速度的升高,打印喷头对复合丝材的加热熔融作用时间缩短,相同长度的熔融复合丝材的加热量减少,其与已打印层进行层间复合的热量降低,直接影响复合材料的层间结合强度。

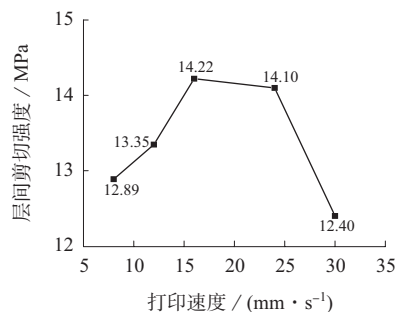


图3 不同打印速度下成形复合材料的层间剪切强度

2.3 打印层厚对复合材料层间剪切强度的影响

针对不同打印层厚的复合材料设计了0.66, 0.7, 0.75, 0.8 mm和0.85 mm共5种打印层厚,设定打印速度为16 mm/s,打印间距为1.2 mm,其它参数见表1,成形不同打印层厚下的复合材料样品。不同打印层厚下成形复合材料样品的层间剪切强度如图4所示。

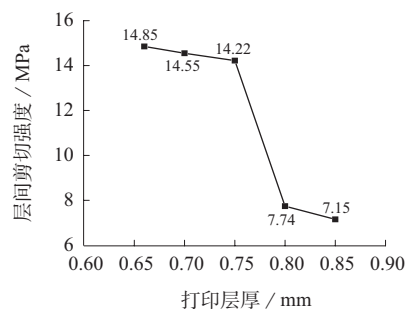


图4 不同打印层厚下成形复合材料样品的层间剪切强度

由图4可以看出,随着打印层厚的增加,复合材料样品的层间剪切强度逐渐减小。当打印层厚从0.66 mm增加到0.85 mm时,复合材料的层间剪切强度由最大值14.85 MPa降低到最小值7.15 MPa,降低了51.85%。因为随着打印层厚的增加,打印喷头与工作台或已打印层之间的距离增大,打印喷头对其挤出的熔融复合丝材的随形打印压力减小,使样品层间的结合效果降低;同时随着打印层厚的增加,样品的层间和道间孔隙或缝隙变大,进一步降低了样品的层间结合效果,因此随着打印层厚的增加,复合材料样品的层间剪切强度降低。研究采用的复合丝材直径为0.89 mm,当打印层厚等于或超过复合丝材直径时,熔融的复合丝材无法粘附于工作台上,最终无法成形复合材料样品。

2.4 打印间距对复合材料层间剪切性能的影响

针对不同打印间距的复合材料,设计了1.2, 1.3, 1.4, 1.5, 1.6 mm共5种打印间距,设定打印速度为16 mm/s,打印层厚为0.66 mm,其它工艺参

数见表 1,成形不同打印间距下的复合材料样品。不同打印间距下成形复合材料样品的层间剪切强度如图 5 所示。

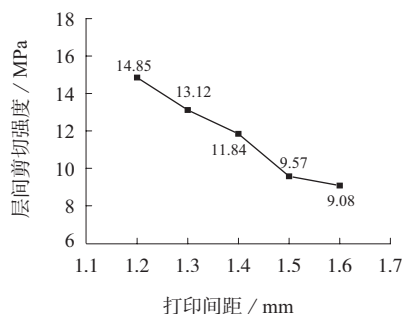


图 5 不同打印间距下成形复合材料样品的层间剪切强度

从图 5 可以看出,随着打印间距的增加,连续纤维增强复合材料的层间剪切强度逐渐降低。当打印间距从 1.2 mm 增加到 1.6 mm 时,复合材料的层间剪切强度由最大值 14.85 MPa 降低到最小值 9.08 MPa,降低了 38.86%。通过观察打印样品外观发现,打印间距为 1.6 mm 时打印样品道间的缝隙十分明显。这是由于打印间距为 1.6 mm 时,已超过喷嘴直径 1.5 mm,以至于一定长度的熔融复合丝材被挤出打印后,其成形单束宽度小于等于 1.5 mm,因此打印道间产生了明显缝隙,致使复合材料抵抗层间剪切破坏的能力降低。

3 结论

针对连续纤维增材制造技术成形 PLA/AF 复合材料,研究了不同纤维取向、打印速度、打印层厚、打印间距工艺参数对复合材料层间剪切强度的影响,得出如下结论:

(1) 在 AF 不同取向的复合材料样品中,AF 单向取向的复合材料层间剪切强度最高, $0^\circ/90^\circ$ 取向的层间剪切强度较高,而 $\pm 45^\circ$ 取向的层间剪切强度最低。

(2) 在打印层厚为 0.75 mm、打印间距为 1.2 mm 工艺参数下,随着打印速度的增加,复合材料样品的层间剪切强度先增大后减小,当打印速度为 16 mm/s 时,复合材料样品的层间剪切强度达到最大值,为 14.22 MPa。

(3) 在打印速度为 16 mm/s、打印间距为 1.2 mm 工艺参数下,随着打印层厚的增加,复合材料样品的层间剪切强度降低,当打印层厚为 0.66 mm 时,复合材料样品的层间剪切强度达到最大值,为 14.85 MPa。

(4) 在打印层厚为 0.66 mm、打印速度为

16 mm/s 工艺参数下,随着打印间距的增加,复合材料样品的层间剪切强度降低,当打印间距为 1.2 mm 时,复合材料样品的层间剪切强度达到最大值,为 14.85 MPa。

参考文献

- [1] 赵浩. 芳纶树脂基复合材料的应用与发展[J]. 新材料产业, 2019(1):13-15.
Zhao Hao. Application and development of aramid resin matrix composites[J]. Advanced Materials Industry, 2019(1):13-15.
- [2] 陈虹, 虎龙, 艾青松, 等. 芳纶复合材料在防弹车上的应用研究[J]. 中国个体防护装备, 2017(2):5-8.
Chen Hong, Hu Long, Ai Qingsong, et al. Study on the application of aramid composite in bulletproof vehicles[J]. China Personal Protection Equipment, 2017(2):5-8.
- [3] 李莹新, 莫纪安, 王秀云, 等. 固体火箭发动机壳体复合材料研究进展[J]. 航天制造技术, 2020, 222(4):69-73.
Li Yingxin, Mo Ji'an, Wang Xiuyun, et al. Progress of composite for solid rocket motor case[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2020, 222(4):69-73.
- [4] 王晋宇, 刘海波, 刘阔, 等. 芳纶纤维增强树脂复合材料液氮冷却钻孔试验[J]. 复合材料学报, 2020, 37(1):89-95.
Wang Jinyu, Liu Haibo, Liu Kuo, et al. Experiment of liquid nitrogen cooling drilling test of aramid fiber-reinforced polymer composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2020, 37(1):89-95.
- [5] 李小波, 孙树凯. 芳纶纤维增强复合材料的机械加工实例研究[J]. 化工设计通讯, 2019, 45(6):47, 62.
Li Xiaobo, Sun Shukai. Case study on machining of aramid fiber reinforced composites[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2019, 45(6):47, 62.
- [6] 申斐斐, 杨涛, 刘畅, 等. 高韧性芳纶纤维铣削表面质量和铣削力[J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(3):37-42.
Shen Yifei, Yang Tao, Liu Chang, et al. Surface quality and milling force of high toughness aramid fiber milling[J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(3):37-42.
- [7] 毕向军, 田小永, 张帅, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料 3D 打印的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(2):138-142.
Bi Xiangjun, Tian Xiaoyong, Zhang Shuai, et al. Research progress in 3D printing technology of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):138-142.
- [8] Heidari-Rarani M, Rafiee-Afarani M, Zahedi A M. Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Composites Part B:Engineering, 2019, 175.doi:10.1016/j.compositesb.2019.107147.
- [9] Dou Hao, Cheng Yunyong, Ye Wenguang, et al. Effect of process parameters on tensile mechanical properties of 3D printing continu-

- ous carbon fiber-reinforced PLA composites[J]. Materials, 2020, 13(17).doi:10.3390/ma13173850.
- [10] 刘腾飞, 田小永, 朱伟军, 等. 连续碳纤维增强聚乳酸复合材料 3D 打印及回收再利用机理与性能 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(7):128-134.
- Liu Tengfei, Tian Xiaoyong, Zhu Weijun, et al. Mechanism and performance of 3D printing and recycling for continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7):128-134.
- [11] Luo Meng, Tian Xiaoyong, Shang Junfan, et al. Impregnation and interlayer bonding behaviours of 3D-printed continuous carbon-fiber-reinforced poly-ether-ether-ketone composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 121:130-138.
- [12] Liu Tengfei, Tian Xiaoyong, Zhang Manyu, et al. Interfacial performance and fracture patterns of 3D printed continuous carbon fiber with sizing reinforced PA6 composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 114:368-376.
- [13] 刘良强, 肖学良, 董科, 等. 3D 打印连续芳纶纤维 / 聚乳酸波纹夹层结构复合材料的压缩性能研究 [J]. 塑料工业, 2020, 48(1):91-95.
- Liu Liangqiang, Xiao Xueliang, Dong Ke, et al. Compression properties of 3D printed continuous kevlar fiber / PLA corrugated sandwich composites[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(1):91-95.
- [14] 刘良强, 肖学良, 董科, 等. 3D 打印连续芳纶纤维增强聚乳酸复合材料的拉伸性能研究 [J]. 塑料工业, 2019, 47(12):27-30.
- Liu Liangqiang, Xiao Xueliang, Dong Ke, et al. Tensile properties of 3D printed continuous kevlar fiber reinforced PLA composites[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(12):27-30.
- [15] 单忠德, 范聪泽, 孙启利, 等. 纤维增强树脂基复合材料增材制造技术与装备研究 [J]. 中国机械工程, 2020, 31(2):221-226.
- Shan Zhongde, Fan Congze, Sun Qili, et al. Research on additive manufacturing technology and equipment for fiber reinforced resin composites[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(2):221-226.
- [16] Fan Congze, Shan Zhongde, Zou Guisheng, et al. Interfacial bonding mechanism and mechanical performance of continuous fiber reinforced composites in additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1).doi:10.1186/s10033-021-00538-7.
- [17] Fan Congze, Shan Zhongde, Zou Guisheng, et al. Performance of short fiber interlayered reinforcement thermoplastic resin in additive manufacturing[J]. Materials, 2020, 13(12).doi:10.3390/ma13122868.

欢迎订阅 2022 年《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘

邮发代号 24-42, 24-138 全国各地邮局均可订阅

也可直接通过邮局或银行汇款向《工程塑料应用》编辑部订阅《工程塑料应用》、《化学分析计量》及合订本光盘, 请注明订阅期刊 / 光盘的名称、收件人、邮编及地址。

《工程塑料应用》国内外公开发行的全国性塑料专业技术类刊物, 月刊, 大 16 开本, 每月 10 日出版。本刊为中文核心期刊, 是中国合成树脂供销协会会刊, 荣获首届、第二届、第三届国家期刊奖等多项国家、省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2022 年定价 20 元 / 期, 全年 240 元。目前编辑部尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系编辑部。

《化学分析计量》国内外公开发行的全国性分析、计量专业技术类刊物, 月刊, 大 16 开本, 每月 20 日出版。本刊为中国科技核心期刊, 荣获多项省部级优秀期刊奖, 入选美国化学文摘 (CA) 千种表。2022 年定价 20 元 / 期, 全年 240 元。目前编辑部尚有部分 2000 年以来的单册和合订本库存, 如需订阅, 请联系编辑部。

《工程塑料应用》、《化学分析计量》合订本光盘 编辑部已将《工程塑料应用》自创刊号 (1973 年) 至 2020 年底共 48 卷 374 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售; 同时也将《化学分析计量》自创刊号 (1992 年) 至 2020 年底

共 29 卷 142 期的期刊电子化, 并制成合订本光盘, 现公开发售。合订本光盘既可按作者、文题、关键词、年、期等分类查阅各期刊已发表的所有科技文章和科技信息的全文, 又可根据读者自定义的关键词进行全文检索, 非常方便、实用。《工程塑料应用》合订本光盘优惠售价 550 元; 《化学分析计量》合订本光盘优惠售价 250 元。

邮局汇款:

收款地址: 济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》编辑部

邮编: 250031

电话: (0531)85878223 85878057 85878278

传真: (0531)85947355

银行汇款:

户 名: 山东非金属材料研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

账 号: 1602001229014425546

网上订阅: <http://www.epa1973.com>