

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2019.08.019

增材制造用 PLA/连续碳纤维复合材料力学性能

张肖男,单忠德,范聪泽,刘晓军,闫东东

(机械科学研究总院集团有限公司先进成形技术与装备国家重点实验室,北京 100044)

摘要:为提高连续纤维复合材料增材制造后的力学性能,通过连续纤维丝材成型机制备连续碳纤维增强聚乳酸(PLA)复合丝材,采用 3D 打印的方式成型测试样件,研究了打印间距、打印温度、层厚三个工艺参数对复合材料拉伸和弯曲强度的影响。试验表明,打印间距和层厚对样件的拉伸、弯曲强度影响较大,而打印温度对样件的拉伸、弯曲强度影响较小。在打印温度 230℃、层厚 0.9 mm 时,样件的拉伸和弯曲强度随着打印间距(0.50~1.10 mm)的增大先增加后降低;在打印温度 220℃、打印间距 0.65 mm 时,样件的拉伸和弯曲强度随着层厚(0.8~1.2 mm)的增大而逐渐降低;在打印间距 0.65 mm,层厚 0.9 mm 时,样件的拉伸强度随着打印温度(200~240℃)增大而增大,弯曲强度随着打印温度(200~240℃)的增大先增加后降低。

关键词:连续碳纤维;聚乳酸;复合材料;纤维增强;3D 打印;力学性能

中图分类号:TQ323.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2019)08-0091-05

Mechanical Properties of PLA/Continuous Carbon Fiber Composites by Additive Manufacturing

Zhang Xiaonan, Shan Zhongde, Fan Congze, Liu Xiaojun, Yan Dongdong

(State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment,

China Academy of Machinery Science and Technology Group Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract : To improve mechanical properties of continuous fiber reinforced composites by additive manufacturing, continuous carbon fiber reinforced polylactic acid (PLA) composite wires were fabricated by continuous fiber forming machine. The test samples were formed by 3D printing. The effects of printing space, printing temperature and layer thickness on the tensile and flexural strength of the composite were studied. The test results show that the printing space and layer thickness have great influence on tensile and flexural strength of the sample, while the printing temperature has little influence on the tensile and flexural strength of the sample. The tensile and flexural strength of the sample increase first and then decrease with the increase of printing space (0.50-1.10 mm) at 230 °C and 0.9 mm layer thickness. The tensile and flexural strength of the sample decrease with the increase of layer thickness (0.8-1.2 mm) at 220°C and 0.65 mm printing space. When the printing space is 0.65 mm and the thickness is 0.9 mm, the tensile strength of the sample increases with the increase of printing temperature (200-240 °C), and the flexural strength increases first and then decreases with the increase of printing temperature (200-240 °C).

Keywords : continuous carbon fiber ; polylactic acid ; composite ; fiber reinforcement ; 3D printing ; mechanical property

在单件小批量复杂零部件研发及生产过程中,增材制造(AM)技术,采用层层堆积的方式成型,具有可设计性强、复杂结构件一次成型的优点,可有效减少加工工序和缩短周期,被广泛应用于汽车行业、航空航天、生物医药、轨道交通等领域^[1]。熔融沉积成型(FDM)技术属于增材制造技术的一种,1988年由 Scott Crump 发明,其工艺是加热融化丝状的

热塑性材料,并从喷头中挤出,按照切片软件设置的路径逐道沉积固化,熔融态的热塑性材料层层堆积最终成型样件^[2]。FDM 技术具有打印材料种类丰富、成型速度快、成本低、便于操作等优势。

为提高热塑性材料 FDM 成型件的力学性能,将芳纶纤维、玻璃纤维、碳纤维等增强材料与热塑性材料复合^[3-7],通过 FDM 工艺制备出的纤维增强热

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1103400)

通讯作者:单忠德,博士生导师,主要从事建筑材料成型加工及应用工作 E-mail: shanzd@cam.com.cn

收稿日期:2019-06-03

引用格式:张肖男,单忠德,范聪泽,等.增材制造用 PLA/连续碳纤维复合材料力学性能[J].工程塑料应用,2019,47(8):91-95.

Zhang Xiaonan, Shan Zhongde, Fan Congze, et al. Mechanical properties of PLA/continuous carbon fiber composites by additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(8):91-95.

塑性复合材料力学性能明显提高。与短纤维、长纤维相比,连续纤维对力学性能提升效果更显著^[8-11]。Tian Xiaoyong等^[12]采用连续纤维与树脂基体从同一打印机头里共挤出的方式打印成型件,详细探究了层厚、打印间距、打印速度、送丝速度、打印温度等参数对连续纤维增强复合材料成型件的弯曲强度的影响。Zhang Fan等^[13]设计了一款闭环控制的连续碳纤维增强复合材料打印机,通过有限元模拟分析打印过程温度分布,将结果反馈到打印装置进行优化,并通过打印简单样件,评价模拟结果的准确性。F. V. D. Klift等^[14]使用 Mark Forged 公司打印机打印成型碳纤维增强尼龙复合材料。J. Justo等^[15]使用 Mark One 打印机对玻璃纤维和碳纤维增强尼龙体复合材料进行研究,并与预浸渍方式成型的试样性能进行对比。A. Kvalsvig等^[16]使用 Mark One 打印机对纤维增强蜂窝结构复合材料进行打印和初步表征。现阶段连续纤维增强复合材料 3D 打印成型主要采用 FDM 的方法,将连续纤维和树脂丝材融化混合,并层层沉积于打印平台。该方法中纤维与树脂在喷头内混合浸渍,浸润效果差,且打印单道与单道间存在很多孔隙,打印层与层间也存在较大空隙,降低了成型件的力学性能。因此,笔者利用自主设计的连续纤维丝材成型机制备的连续碳纤维复合丝材,通过 3D 打印机成型,探究打印间距、打印温度、层厚等工艺参数对连续纤维复合材料成型件力学性能的影响规律,提高连续碳纤维的增强效果。

1 试验部分

1.1 主要原材料

连续碳纤维 (CCF): T300, 3K, 拉伸强度 3860 MPa, 拉伸弹性模量 234 GPa, 日本东丽公司;
聚乳酸 (PLA): 4032D, 美国 Nature Works 公司。

1.2 主要设备及仪器

万能试验机: INSTRON5567 型, 英国英斯特朗公司;

万能试验机: INSTRON3345 型, 英国英斯特朗公司;

使用的 3D 打印机如图 1 所示。

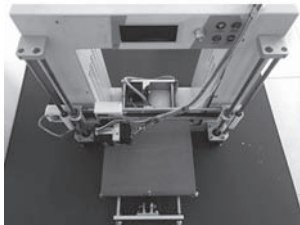
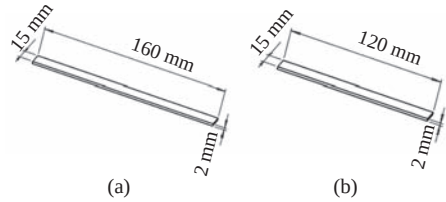


图 1 3D 打印机

1.3 试验试件制备

参照标准 ISO 527-1997、ISO 14125-1998 分别制备了拉伸样件和弯曲样件, 尺寸分别如图 2 所示。3D 打印工艺参数选择见表 1。打印的样件如图 3 所示。

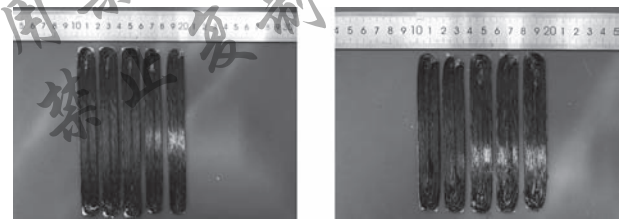


a—拉伸样件; b—弯曲样件

图 2 样件尺寸

表 1 参数选择

工艺参数	变化范围	固定其它参数
打印间距 (b)/mm	0.50, 0.55, 0.60, 0.65, 0.70, 0.75, 0.80, 0.95, 1.10	$T=230^{\circ}\text{C}$, $h=0.9\text{mm}$
打印温度 (T)/ $^{\circ}\text{C}$	200, 210, 220, 230, 240	$b=0.65\text{mm}$, $h=0.9\text{mm}$
层厚 (h)/mm	0.8, 0.9, 1.0, 1.1, 1.2	$T=220^{\circ}\text{C}$, $b=0.65\text{mm}$



(a)

(b)

a—拉伸样件; b—弯曲样件

图 3 打印样件

1.4 性能测试

拉伸测试在 INSTRON5567 万能试验机上进行, 弯曲测试在 INSTRON3345 万能试验机上进行, 测试样件的拉伸强度和弯曲强度。拉伸样件的标距为 50 mm, 拉伸速度为 10 mm/min, 直至样件被拉断失效; 三点弯曲测试的跨距 80 mm, 加载速度为 10 mm/min, 上压头半径为 5 mm, 支座半径为 2 mm, 直至样件失效。

2 结果与讨论

2.1 打印间距对成型件力学性能影响

打印间距是相邻道之间的中心距, 为了保证相邻之间有接触, 道与道之间一定要有重叠部分, 当样件层厚为 0.9 mm, 打印间距低于 0.50 mm 时, 由于搭接率增大导致层厚增大, 从而使得打印出来的样件中出现纤维磨损和断裂的现象, 以至于无法成型样件, 而当打印间距大于 1.10 mm 时, 样件道与道之间几乎没有搭接现象, 出现间隙, 从而导致样件成

型质量较差,因此选择打印间距参数的具体数值为 0.50~1.10 mm,见表 2。图 4 为不同打印间距时 PLA/ 连续碳纤维复合材料的拉伸和弯曲强度。

表 2 不同打印间距对应的打印道数

打印间距/mm	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75	0.80	0.95	1.10
打印道数/道	60	54	52	50	40	40	40	36	24

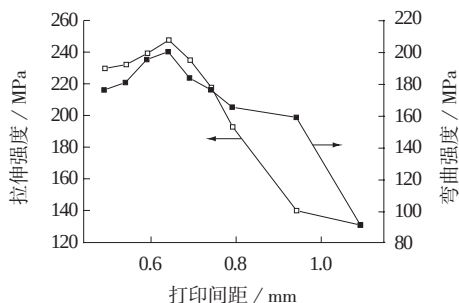


图 4 不同打印间距时 PLA/ 连续碳纤维复合材料的拉伸和弯曲强度

从图 4 可以看出,随着打印间距的增加,连续纤维增强复合材料样件的拉伸强度先上升后下降,当打印间距为 0.65 mm 时,复合材料样件的拉伸强度达到 248.05 MPa。随着打印间距的减少,复合材料样件的拉伸强度逐渐降低,当打印间距为 0.50 mm 时,比打印间距为 0.65 mm 的样件拉伸强度降低了 7.23%;当打印间距大于 0.65 mm 时,复合材料样件的拉伸强度也比打印间距为 0.65 mm 的复合材料样件拉伸强度低,并且随着打印间距的增加,拉伸强度逐渐降低,当打印间距为 1.10 mm 时,拉伸强度为 131.02 MPa,降低了 47.18%。这是因为打印间距决定了样件的打印道数,打印间距越大,对应的打印道数越少,在样件拉伸过程中起到承受拉伸力作用的连续纤维数量就越少,从而降低了拉伸强度。虽然打印间距为 0.70,0.75,0.80 mm 时,打印道数相同,但是打印间距的增大使道间的搭接率降低,减弱了打印头对丝束的挤压作用,从而降低了丝束中连续碳纤维的展开程度,减少了树脂浸渍丝束中原本未被树脂浸渍的连续碳纤维的量,使得实际起到承受拉伸力作用的连续碳纤维数量减少,因此降低了样件的拉伸强度。而当打印间距为 0.50,0.55,0.60 mm 时,由于道间搭接率的增大,样件在打印过程中会出现少量纤维磨损和刮断的现象,这在一定程度上降低了复合材料的拉伸性能,同时打印间距为 0.50,0.55,0.60 mm 的样件有翘曲现象存在,样件质量较差,这也是造成样件拉伸强度降低的原因。

从图 4 还可以看出,随着打印间距的增加,连

续碳纤维复合材料样件的弯曲强度呈先增加后减少的趋势,当打印间距为 0.65 mm 时,复合材料样件的弯曲强度为 201.87 MPa,当打印间距为 0.70,0.75,0.80,0.95,1.10 mm 时,样件的弯曲强度相比于打印间距为 0.65 mm 的样件降低,并且随着打印间距的增加,样件的弯曲强度逐渐降低,打印间距为 1.10 mm 时,样件的弯曲强度为 92.66 MPa,下降了 54.10%。这是因为打印间距的增加会降低道间的搭接率,从而使得道间的压力降低,道间粘接性能降低;同时道间搭接率降低导致层厚降低,降低了样件层间的压力,层间粘接性能降低。样件道间和层间粘接性能降低导致样件中增加孔隙,这就减弱了整个样件抵抗弯曲变形的能力,从而使得样件的弯曲强度降低。当打印间距为 0.50,0.55,0.60 mm 时,复合材料的弯曲强度低于打印间距为 0.65 mm 的样件的弯曲强度,这是因为当打印间距为 0.50,0.55,0.60 mm 时,样件出现纤维磨损、断裂和翘曲的现象,样件成型质量较差,影响了整个样件抵抗弯曲变形的能力,从而降低了样件的弯曲强度。

2.2 打印温度对成型件力学性能影响

打印温度是 FDM 工艺的一个重要参数,它会影响 PLA/ 连续纤维复合丝材中碳纤维与 PLA 之间的界面粘接性能、同一打印层内道与道之间和相邻两层之间的粘接性能。为了探究打印温度对打印件力学性能的影响规律,在相同的其它打印参数下,选取 200~240℃进行打印样件,图 5 为不同打印温度时 PLA/ 连续碳纤维复合材料的拉伸和弯曲强度。

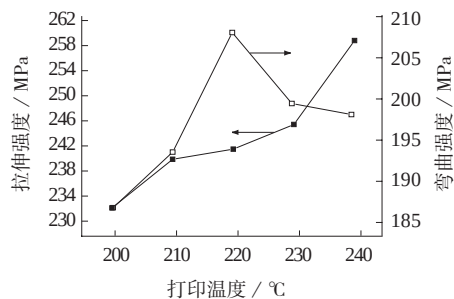


图 5 不同打印温度时 PLA/ 连续碳纤维复合材料的拉伸和弯曲强度

由图 5 可以看出,样件的拉伸强度随着打印温度的增加而增加,当打印温度为 240℃时,样件的拉伸强度为 258.68 MPa,相比于打印温度为 200℃的样件,拉伸强度提高了 11.50%。这是因为随着打印温度的增加,连续纤维丝材表层的 PLA 黏度降低,流动性增强,重新融化的 PLA 流入连续碳纤维丝束的内部,与更多的连续碳纤维浸渍,当样件受拉伸力

作用时,有更多的连续碳纤维承担拉伸力,从而增强样件的拉伸强度。

由图5还可以看出,随着打印温度的增加,样件的弯曲强度先增大后减小。当打印温度为220℃时,样件的弯曲强度为207.89 MPa,打印温度为200℃时,样件的弯曲强度为186.25 MPa,降低了10.41%。这是因为打印温度的增加导致PLA的黏度降低、流动性增强,提高了样件的道间、层间粘接性能,减少了样件中的孔隙和翘曲现象,提高了样件的打印质量,从而增强了样件抵抗弯曲破坏的能力。当打印温度大于220℃时,随着温度的增加,样件的弯曲强度逐渐降低,当温度为240℃时,样件的弯曲强度为197.76 MPa,相比于打印温度为220℃的样件,弯曲强度降低了4.87%。这是因为PLA的热分解温度为260℃,当打印温度接近260℃时,PLA中的大分子链开始分解,降低了PLA的力学性能,从而降低了整个样件抵抗弯曲破坏的能力,导致弯曲强度的降低。

2.3 层厚对成型件力学性能影响

层厚是3D打印过程中的一个重要的参数,它是打印头与打印结束层之间的距离,影响到打印的精确度、效率以及成型件的力学性能。对于连续纤维增强PLA复合丝材而言,由于本身的丝材直径已经确定,而且丝材会出现受热膨胀现象,层厚选择过小在打印过程中会出现纤维磨损和断裂现象,层厚过大会导致丝材与底板、层与层之间粘接不上,在打印间距为0.65 mm时,当层厚低于0.8 mm时,纤维磨损和断裂现象较多导致复合材料拉伸和弯曲样件无法成型,而当层厚高于1.2 mm时,复合材料拉伸和弯曲样件与底板粘接效果较差,同样无法成型。因此在本次试验中选择的层厚为0.8~1.2 mm,打印温度220℃,打印间距0.65 mm,打印速度6 mm/s,图6为不同层厚时PLA/连续碳纤复合材料的拉伸强度和弯曲强度。由图6可以看出,随着层厚的增加样件的拉伸强度逐渐降低,当层厚0.8 mm

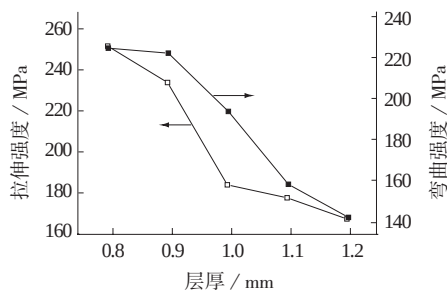
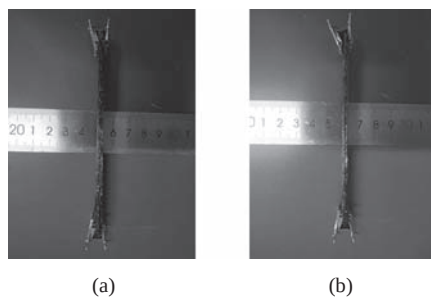


图6 不同层厚时PLA/连续碳纤复合材料的拉伸和弯曲强度

时强度逐渐降低,当层厚0.8 mm时,样件的拉伸强度为253.28 MPa,当层厚增加到1.2 mm时,样件的拉伸强度为167.63 MPa,降低了33.82%。这是因为在打印过程中,打印头对连续纤维复合材料样件具有一定的压实作用,层厚越小,打印头对丝材的压实作用越明显,连续纤维丝材中包裹的连续纤维丝束被展开的效果越好,熔融的树脂有机会浸渍到丝材内部原本未浸渍到的连续碳纤维,在样件受拉伸力时,起到增强作用的纤维数量增加,从而增加了样件的拉伸强度。

由图6还可以看出,随着层厚的增加,样件的弯曲强度也逐渐降低,当层厚0.8 mm时,样件的弯曲强度为224.78 MPa,当层厚增加到1.2 mm时,样件的弯曲强度为141.22 MPa,降低了37.17%。这是因为层厚的增加导致层间压力降低,减弱了样件与底板之间粘接效果,导致样件出现翘曲现象,同时层间压力的降低也会减弱样件的道间、层间粘接效果,这就使得样件打印过程中会出现孔隙等缺陷,在受到弯曲力作用时,翘曲和孔隙等缺陷的存在降低了样件的弯曲强度。

图7所示分别为0.8 mm和1 mm层厚的弯曲样件,从图7可以看出,0.8 mm厚的样件结合更加紧密,而1 mm厚的样件两层之间有些间隙,这说明在打印过程中,层厚的减少使得打印头的压实作用更加明显,从而使打印成型件结合性更好,两层之间的间隙更少,因此其抵抗弯曲变形的能力更强,弯曲强度更高。



a—0.8 mm ; b—1 mm

图7 不同厚度的弯曲样件

3 结论

探究了打印间距、打印温度、层厚三个工艺参数对连续碳纤增强复合材料成型件的拉伸和弯曲强度的影响,得到以下结论:

(1) 优化打印参数能够有效地改善连续碳纤增强复合材料的拉伸和弯曲强度,打印间距和层厚对力学性能影响较为显著,而打印温度影响效果较小。

(2) 打印间距的减少增加了样件打印道数,提高复合材料的拉伸和弯曲强度,而打印间距过小,产生的连续纤维磨损、断裂现象则会降低样件拉伸、弯曲强度。

(3) 打印温度升高会降低 PLA 的黏性,提高其流动性,使其浸渍更多连续纤维,减少层间与道间孔隙,从而提高拉伸和弯曲强度,而温度过高则会降低 PLA 性能,减弱样件抵抗弯曲变形的能力。

(4) 层厚减少增强打印头压实效果,提高丝材中连续纤维浸渍效果和样件层间、道间粘接性能,从而提高样件的拉伸、弯曲强度。

参考文献

- [1] 卢秉恒,李涤尘.增材制造(3D打印)技术发展[J].机械制造与自动化,2013,42(4):1-4.
Lu Bingheng Li Dichen. Development of the additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machine Building and Automation, 2013, 42(4):1-4.
- [2] 刘洋子健,夏春蕾,张均,等.熔融沉积成型3D打印技术应用进展及展望[J].工程塑料应用,2017,45(3):130-133.
Liu Yangzajian, Xia Chunlei, Zhang Jun, et al. Application progress and prospect of fused deposition molding 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(3):130-133.
- [3] Zhong Weihong, Li Fan, Zhang Zuoguang, et al. Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling[J]. Materials Science & Engineering A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing), 2001, 301(2):125-130.
- [4] Tekinalp H L, Kunc V, Velez-Garcia G M, et al. Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing[J]. Composites Science and Technology, 2014, 105:144-150.
- [5] 董超亮,王耀先,周洁鹏,等.芳纶纤维增强树脂基复合材料的界面粘结性能研究[J].工程塑料应用,2012,40(3):73-76.
Dong Chaoliang, Wang Yaoxian, Zhou Jiepeng, et al. Interfacial bond property of aramid fibers reinforced polymer matrix composites[J]. Composites Science and Technology, 2012, 40(3):73-76.
- [6] 刘晓军, Shalkar Y, 李飞,等.纤维增强复合材料3D打印研究进展[J].塑料,2017,46(6):61-66.
Liu Xiaojun, Shalkar Y, Li Fei, et al. Research progress of 3D printing fiber reinforced composite[J]. Plastics, 2017, 46(6):61-66.
- [7] Yang Chuncheng, Wang Bingjie, Li Dichen, et al. Modelling and characterisation for the responsive performance of CF/PLA and CF/PEEK smart materials fabricated by 4D printing[J]. Virtual and Physical Prototyping, 2017, 12(1):69-76.
- [8] Norton R V. The composite loss factor of reinforced thermoplastic molding compounds as a function of resonant vibration frequency, fiber orientation and temperature[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 1990, 88(1):111-112.
- [9] Hou Zhanghao, Tian Xiaoyong, Zhang Junkang, et al. 3D printed continuous fibre reinforced composite corrugated structure[J]. Composite Structures, 2018, 184:1 005-1 010.
- [10] Li Nanya, Li Yingguang, Liu Shuting. Rapid prototyping of continuous carbon fiber reinforced polylactic acid composites by 3D printing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 238:218-225.
- [11] Yang Chuncheng, Tian Xiaoyong, Li Dichen, et al. Influence of thermal processing conditions in 3D printing on the crystallinity and mechanical properties of PEEK material[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 248:1-7.
- [12] Tian Xiaoyong, Liu Tengfei, Yang Chuncheng, et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 88:198-205.
- [13] Zhang Fan, Ma G, Tan Yuegang. The Nozzle structure design and analysis for continuous carbon fiber composite 3D printing[C]// International conference on advanced design & manufacturing engineering, 2017:193-199.
- [14] Klift F V D, Koga Y, Todoroki A, et al. 3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermo-plastic (CFRTP) tensile test specimens[J]. Open Journal of Composite Materials, 2016, 6(1): 18-27.
- [15] Justo J, Távara L, García-Guzmán L, et al. Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites: Composite Structures[J]. 2018, 185:537-548.
- [16] Kvalsvig A, Yuan X, Potgieter J, et al. 3D printing of fibre reinforced honeycomb structured composite materials[C]// International Conference on Mechatronics & Machine Vision in Practice.IEEE, 2017.

本刊声明

近期有不法网站和个人假借本刊名义向广大读者征稿,同时收取高额注册费、审稿费、版面费。本刊特此声明:《工程塑料应用》为中国兵器工业集团第五三研究所(山东非金属材料研究所)主办,杂志社所在地为山东省济南市,本刊唯一合法投稿网址为 www.epa1973.net,本刊未委托任何机构和个人从事征稿和组稿业务。请广大作者牢记本刊投稿网址,辨别来电属地,不要给个人账户汇款,防止受骗。本刊保留对相关网站和个人追究法律责任的权利。

(工程塑料应用杂志社)