

# 高性能纤维增强树脂基复合材料 3D打印及其应用探索\*

田小永, 刘腾飞, 杨春成, 李涤尘

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710054)

[摘要] 纤维增强树脂基复合材料具有优异的力学性能,能够实现轻质、高性能结构的制造,但传统的成型工艺过程复杂、成本高,难以实现纤维回收利用,限制了纤维增强树脂基复合材料的广泛应用。3D打印技术是一种新兴的零件成形工艺,将3D打印技术应用于纤维增强树脂基复合材料的制造,为实现复合材料低成本、绿色制造提供了可能性。综述了纤维增强树脂基复合材料3D打印技术研究的发展现状,提出了一种高性能连续纤维增强热塑性复合材料3D打印工艺及其回收再制造策略。

关键词: 3D打印; 热塑性复合材料; 纤维增强; 回收再制造

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2016.15.026



田小永

博士,副教授,中国机械工程学会高级会员,ISO增材制造标委会(TC 261)委员,Progress in Additive Manufacturing编委。主持国家863课题1项、国家自然科学基金2项、省部级项目3项,发表论文40余篇,SCI收录20余篇。

飞机结构的轻质化、高性能化对于降低飞机的飞行成本,提高飞机的飞行性能有着至关重要的作用,是飞机发展一直追求的目标。纤维增强树脂基复合材料具有高强度、高模量、比重小、热稳定好、可设计性强等优点<sup>[1]</sup>,应用在飞机结构上能带来明显的减重效果和综合性能的显著提高,在航空飞机结构上的应用越来越广泛,已成功应用在飞机的水平安定

面、尾翼、机翼、机身等飞机结构上,大大提高了飞机的结构效率与综合性能<sup>[2]</sup>。其中,军用飞机中纤维增强树脂基复合材料用量已占飞机结构重量的20%~50%,如美国F-22战斗机上用量达到25%左右;民用飞机中,美国波音787纤维增强树脂基复合材料用量达到50%,欧洲空客公司的A350XWB用量已达到52%<sup>[2-4]</sup>,如图1所示。

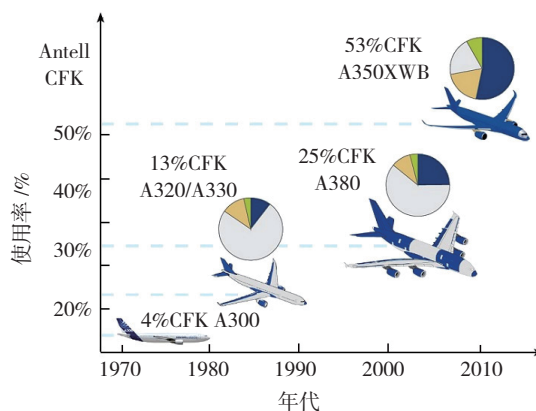


图1 空客公司复合材料应用水平

Fig.1 Application levels of composites in the products of Airbus

\*基金项目: 国家自然科学基金项目(51575430); 机器人技术与系统国家重点实验室开放研究项目(SKLR-2015-ZD-02)。

传统的纤维增强树脂基复合材料的成型工艺主要分为两个过程完成,首先要制备纤维预浸料,制备方法主要有浸渍法、沉积法、混编法等;然后将预浸料经过加工制成成型制件,加工方法有模压成型、拉挤成型、缠绕成型、铺放成型等<sup>[1,5]</sup>。传统的成型工艺过程较复杂,加工成本较高,且无法实现复杂结构件的快速制造,大大限制了纤维增强树脂基复合材料的应用范围<sup>[6]</sup>。同时,传统的纤维增强树脂基复合材料结构件对于纤维的回收大多采用物理粉碎、高温热解以及化学分解的方式进行,往往对环境造成污染,成本高且很难实现纤维与基体材料的高效再利用<sup>[7]</sup>。因此,开发面向高性能复合材料零件的低成本高效成型制造与回收再利用工艺,成为推动复合材料广泛应用的关键。

3D 打印技术是一种新兴的增材制造技术,区别于传统的减材或等材加工制造方法,它采用层层累加的原理,每层按照特定的打印路径铺放材料最终累加成形三维零件<sup>[8]</sup>。目前,将 3D 打印技术应用于纤维增强树脂基复合材料成为了一种新兴的复合材料制造工艺。相比于传统的成型工艺,3D 打印工艺过程简单,加工成本低,材料利用率高,降低了复合材料构件的制造成本,同时可实现复杂结构零件的一体化成形,无需模具与复合材料连接工艺,为轻质复合材料结构的低成本快速制造提供了一个有效技术途径。

本文对现有复合材料 3D 打印工艺及其应用现状进行综述分析,并首次提出了一种连续纤维增强的热塑性复合材料 3D 打印新工艺,可实现高性能复合材料构件的快速制造,通过对打印路径调控,可精确控制每一层的纤维取向,获得复合材料构件的最大整体力学性能;利用连续纤维堆积成形的工艺特征,提出了连续纤维增强复合材料构件的回收再制

造策略,为实现热塑性复合材料的高效回收利用提供了一个新方法。

## 纤维增强树脂基复合材料 3D 打印工艺现状

3D 打印工艺包含多种工艺方法,按照制造复合材料所采用基体材料的基本特征,可分为纤维增强热固性树脂复合材料 3D 打印、纤维增强热塑性树脂复合材料 3D 打印两类工艺。

### 1 纤维增强热固性树脂复合材料 3D 打印

目前,纤维增强热固性树脂复合材料 3D 打印主要包括分层实体制造(LOM)工艺、立体光固化(SL)工艺以及三维打印(3DP)工艺等。

#### 1.1 纤维增强热固性树脂复合材料 LOM 工艺

利用 LOM 技术进行纤维增强复合材料制造,需预先将纤维/树脂预浸丝束并排制成预浸带,预浸条带经传送带送至工作台,激光沿三维模型每个横截面的轮廓线切割预浸带,逐层叠加、固化,实现三维产品的制造。Donald Klosterman 等人将连续玻璃纤维与环氧树脂制备成的预浸条带应用于 LOM 打印成型三维实体零件,零件纤维与基体形成良好的界面性能,零件抗拉强度达到 700MPa 左右<sup>[9]</sup>。

#### 1.2 纤维增强热固性树脂复合材料 SL 工艺

利用 SL 技术进行纤维增强树脂基复合材料制造,成型过程中在试件中间层加入一层连续纤维编织布,在光敏聚合物发生聚合反应转变为固体过程中,将纤维布嵌入到树脂基体中形成复合材料零件。Karalekas 等人在光固化过程中将单层的非纺织布玻璃纤维嵌入到丙烯酸基光敏聚合物中光固化成型复合材料零件,零件的抗拉强度为 55MPa,略高于纯丙烯酸酯光固化件的 37MPa<sup>[10]</sup>。

另一种是将短纤维混合在液态

光敏树脂中,经紫外光扫描光敏树脂发生固化反应使短纤维与树脂复合在一起形成复合材料。Cheah 等人将短玻璃纤维与丙烯酸基光敏聚合物混合通过光固化成型复合材料零件,零件的抗拉强度提高 33%,同时降低了后固化过程引起的收缩变形<sup>[11]</sup>。

#### 1.3 纤维增强热固性树脂复合材料 3DP 工艺

美国哈佛大学研制了适用于 3D 打印的短切碳纤维增强环氧树脂基“墨水”,利用 3DP 工艺进行打印,再将打印好的部件进行加热固化成型试验,平均拉伸强度达到 66MPa,拉伸模量达到 24GPa。同时,研究者还通过控制喷嘴直径和纤维的长径比,使墨水在挤出流和剪切力作用下产生取向,实现了墨水取向的控制,获得了取向的纤维<sup>[12]</sup>。

### 2 纤维增强热塑性树脂复合材料 3D 打印

现有纤维增强热塑性树脂复合材料 3D 打印工艺主要包括选区激光烧结(SLS)、熔融沉积成形(FDM)等工艺方法。

#### 2.1 纤维增强热塑性树脂复合材料 SLS 工艺

SLS 工艺采用激光按照一定的路径烧结粉末材料,逐层累加实现三维零件的制造。采用将该工艺进行复合材料零件的制造方法,通常采用短纤维为增强相,将短切纤维与热塑性树脂粉末混合制备成复合材料粉末,再将复合材料粉末烧结成复合材料实体零件<sup>[7]</sup>。德国 EOS 公司将碳纤维与 PA-12 通过物理混合的方式制备成复合材料粉末 CarbonMide,作为 SLS 的原材料成功打印出复合材料零件并将其商业化<sup>[13]</sup>。Yan 等人通过氧化改性对碳纤维进行表面改性增加其与 PA-12 的界面结合性能,并通过化学沉降的方式制备成复合材料粉末,烧结成型的零件当纤维含量达到 50% 时,抗弯强度

达到 115MPa 左右,比纯 PA-12 SLS 烧结件增加了 114%,抗弯模量达到 4.7GPa 左右,增加了 243.4%<sup>[14]</sup>。

## 2.2 纤维增强热塑性树脂复合材料 FDM 工艺

FDM 工艺采用打印头加热熔融树脂丝材,再按照一定路径挤出堆积成型单层轮廓,最终层层累加成三维实体模型。将该工艺应用于纤维增强热塑性复合材料 3D 打印主要通过 3D 打印头挤出熔融树脂基体以及增强纤维,将纤维与树脂按照一定的路径堆积成型<sup>[15]</sup>。根据纤维长度的不同,该工艺可分为短纤维 FDM 工艺和连续纤维 FDM 工艺。

### (1) 短纤维增强丝材 FDM 工艺。

基于 FDM 工艺的短纤维增强热塑性树脂复合材料 3D 打印工艺,通常利用热塑性树脂颗粒与短纤维为原材料,混合均匀后制备出短纤维增强丝材,然后将纤维复合材料丝材作为 FDM 工艺材料进行打印<sup>[16]</sup>。美国橡树岭国家重点实验室将短碳纤维(0.2~0.4mm)与 ABS 塑料复合而成的材料作为熔融沉积工艺(FDM)的原材料,制造出来的试件中短纤维分布具有高度的同向性(达 91.5%),并且与传统的注塑复合材料相比,抗拉强度与抗拉模量分别提高了 115% 和 700%<sup>[17]</sup>。美国 Local Motors 汽车公司在 2014 年 3D 打印了一辆汽车 Strati,该汽车由 40 个部件组成,其中,13%~20% 为碳纤维增强型复合材料,80%~87% 为 ABS 树脂<sup>[18]</sup>。北京航空航天大学通过将短切玻璃纤维加入到 ABS 中,制备成短切玻纤增强 ABS 复合材料丝材,成功应用于熔融沉积工艺(FDM),所制备的复合材料试件抗拉强度明显高于纯 ABS 打印件<sup>[19]</sup>。

### (2) 连续纤维预浸丝束 FDM 工艺。

短纤维增强热塑性树脂复合材料 3D 打印工艺发展较为成熟,但短纤维对试件的力学性能提升非常有

限<sup>[20]</sup>。为提高纤维增强热塑性树脂复合材料 3D 打印试件的力学性能,研究人员提出了连续纤维增强复合材料 FDM 工艺,目前对该工艺的研究仍处于起步阶段。2014 年,美国 Mark Forged 公司研发了连续碳纤维增强热塑性树脂复合材料 3D 打印机 Mark One,成功实现了连续纤维增强尼龙复合材料的制造。该打印机采用两个独立喷头;一个喷头挤出热塑性树脂;另外一个输送连续纤维预浸丝束,实现构件轮廓与内部填充结构的制造,以兼顾复合材料零件精度与性能<sup>[21]</sup>。2015 年,东京理科大学的研发人员同样采用连续纤维预浸丝束进行连续碳纤维增强聚乳酸(PLA)复合材料的 FDM 工艺研究,当纤维含量为 6.6% 时,所制备复合材料试样的拉伸强度达到了 200MPa,弹性模量达到 20GPa,相比采用 FDM 工艺制造的普通 PLA 试样,强度和模量分别增加了 6 倍和 4 倍<sup>[22]</sup>。

## 3 现状分析

纤维增强树脂基复合材料 3D 打印技术为复合材料的低成本制造提供了可能性,在航空航天、新能源汽车等领域有着巨大的应用前景,同时复合材料的低成本制造还将进一步扩大纤维增强树脂基复合材料的应用范围。通过对研究现状的分析,不难发现现有热固性树脂基复合材料 3D 打印技术仅在实验室实现了打印,且热固性树脂基韧性差,耐冲击性能差,尚未进行应用推广。热塑性树脂基复合材料 3D 打印技术中目前只有短纤维打印工艺较为成熟,实现了商业化推广,但短纤维对于试件力学性能的提升非常有限,因此连续纤维增强热塑性树脂基复合材料 3D 打印技术成为了目前的研究前沿,有望实现高性能复合材料的低成本快速制造。然而,Mark Forged 与东京理科大学所提出的工艺方法采用纤维预浸丝束为原材料实现复合材料

FDM 制造,受限于预浸丝束类型的限制,很难适用于多种类型复合材料的制造,尤其是后者的 3D 打印工艺尚未见到系统的研究报告,工艺不成熟,零件精度低。同时,尚未涉及 3D 打印连续纤维增强树脂基复合材料回收再制造问题。

为解决上述纤维增强树脂基复合材料 3D 打印工艺存在的问题,本文提出一种基于 FDM 工艺的连续纤维增强热塑性树脂复合材料 3D 打印方法(CFRTPCs),利用连续碳纤维干丝与热塑性基体材料聚乳酸为原材料进行复合材料(CF/PLA)3D 打印制造,开展了系统的工艺研究,优化了工艺参数,实现了高性能复合材料构件的制造,并对所制造复合材料的回收再制造策略进行了初步探讨。

## 连续纤维增强热塑性复合材料 3D 打印工艺

### 1 工艺原理与试验装备

本文提出了一种连续纤维增强热塑性树脂复合材料 3D 打印工艺(CFRTPCs),其原理如图 2 所示<sup>[23]</sup>:以纤维干丝与热塑性树脂丝材为原材料,丝材通过送丝电机送入到 3D 打印头中,在打印头内部加热熔融,熔融树脂在丝材推力作用下送入到喷嘴内部。与此同时,连续纤维通过纤维导管送入到同一个 3D 打印头内,穿过整个打印头在喷嘴内部被熔融树脂浸渍包覆形成复合丝材,浸渍后的复合丝材从喷嘴出口处挤出,随后树脂基体迅速冷却固化粘附在工件上层,使得纤维能够不断地从喷嘴中拉出。同时,在计算机控制下,X-Y 运动机构根据截面轮廓与填充信息按照设定路径带动打印头运动,复合材料丝不断从喷嘴中挤出堆积,形成单层实体;单层打印完成后,Z 轴工作台下降层厚距离,重复打印过程,实现三维连续纤维增强热塑性复合材料构件的制造。该工艺的工作过程与 FDM 相似,不同点在于该工

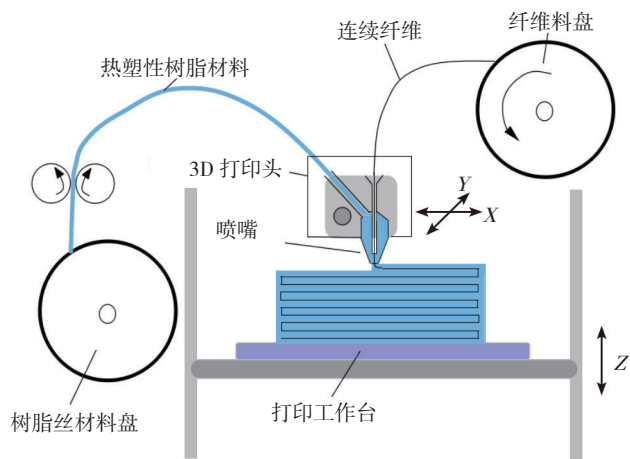


图2 连续纤维增强热塑性树脂复合材料3D打印工艺原理图  
Fig.2 Schematic representation of 3D printing process for CFRTPCs

艺采用热塑性树脂与连续纤维为原材料,在打印头内部进行熔融浸渍,实现复合材料制备与成形一体化,可用于该工艺的热塑性树脂包括 PLA、ABS 与 PEEK 等,连续纤维包括碳纤维、玻璃纤维等。

根据上述工作原理,实验室自主搭建了 CFRTPCs 实验台(如图 3 (a) 所示)<sup>[24]</sup>,该实验台运动与控制系统采用传统的 FDM 桌面式打印台,打印头采用实验室研发的专用复合材料打印头(如图 3 (b) 所示)<sup>[24]</sup>,打印头出口直径为 1.5mm。

## 2 工艺参数研究

采用图 3 所示的试验装备,以连续碳纤维、聚乳酸(PLA)丝材为原材料,进行 CF/PLA 复合材料 3D 打印工艺的系统研究。温度和压力是复合材料制备过程中的关键工艺参

数,对复合材料的性能起到了决定性的作用,因此,通过梳理各个工艺参数对复合材料打印过程中对温度和压力的影响,以打印头温度( $T$ ,  $^{\circ}\text{C}$ )、打印速度( $F$ ,  $\text{mm}/\text{min}$ )、分层厚度( $Z$ ,  $\text{mm}$ )、吐丝速度( $E$ ,  $\text{mm}/\text{min}$ )、扫描间距( $X$ ,  $\text{mm}$ )等作为复合材料打印工艺的关键参数,系统开展工艺研究。

研究表明,打印头温度  $T$  的变化对试件的力学性能影响较大。随着打印温度的升高,PLA 丝材的熔融粘度降低,基体与纤维的浸润性能大幅度提升。打印头温度在  $210\sim 230^{\circ}\text{C}$  范围时,纤维与基体的界面结合性能较好,PLA 基体所受的外界载荷较好地传递到纤维上,增强效果显著。打印速度  $F$  的变化对复合材料样件的力学性能影响不大,但打印速度过大,会影响复合材料零

件的成型精度,当打印速度保持在  $100\sim 200\text{mm}/\text{min}$  之间时,获得了良好的打印效果。

复合材料制备过程中的压力决定了基体与纤维束之间的浸润程度,在本文提出的复合材料 3D 打印工艺中,成型压力主要体现在喷头中的熔融浸渍压力和打印过程中喷头与基板之间的接触压力,压力的大小影响着纤维与基体之间的浸渍程度,进而决定了对复合材料制件的力学性能。与此同时,打印工艺参数同样会影响复合材料构件中的纤维含量,而纤维含量也是复合材料力学性能的决定性因素之一。

试验研究表明,分层厚度  $Z$ 、扫描间距  $X$ 、吐丝速度  $E$  的变化会同时影响复合材料构件的纤维含量与接触压力,结果表明分层厚度  $Z$ 、扫描间距  $X$  与纤维含量和接触压力都成负相关的关系,较小的分层厚度和扫描间距能够同时提升工艺过程中的接触压力和制件中的碳纤维含量,综合制件性能与制造精度及效率,选定分层厚度为  $0.5\sim 0.6\text{mm}$ ,扫描间距为  $0.6\sim 1\text{mm}$ ;而吐丝速度  $E$  与制件中的纤维含量成负相关,但与接触压力成正相关关系,复合材料制件的力学性能由这两个因素共同决定,当吐丝速度为  $80\sim 100\text{mm}/\text{min}$  时,制件能够获得较好的力学性能。

利用上述推荐工艺参数,所制备复合材料制件的最高抗弯强度能够达到  $335\text{MPa}$ ,抗弯模量  $30\text{GPa}$ ,平均抗拉强度达到  $220\text{MPa}$ ,远高于 3D 打印的传统 PLA 零件。采用本文提出的复合材料 3D 打印工艺,能够实现复杂结构的复合材料制件的低成本快速制造,如图 4 (a) 所示的飞机垂直尾翼模型,图 4 (b) 所示的汽车壳体模型等。

## 3 3D打印复合材料回收再制造

连续纤维增强热塑性复合材料 3D 打印工艺是按照一定的打印路径采用逐层累加的方式进行打印的,复

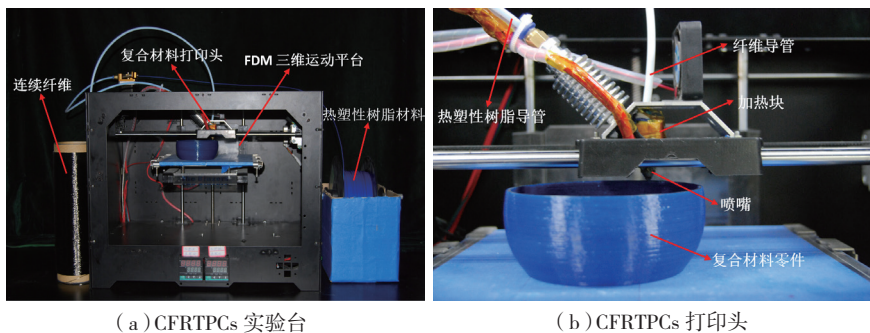


图3 连续纤维增强热塑性复合材料3D打印(CFRTPCs)实验台及打印头  
Fig.3 Experimental platform and printing head for CFRTPCs

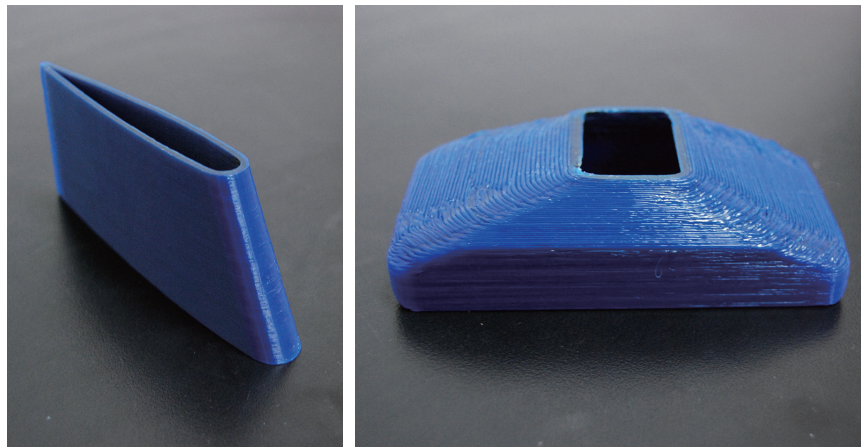
合材料中的纤维是按照连续有序的方式进行排列的,基于该工艺原理,本文初步研究了 CF/PLA 零件的纤维回收再制造技术,如图 5 (a)所示。该技术采用热风枪非接触式加热熔融的方式地沿着逆打印路径将连续纤维从工件中一层一层抽离出来,通过模具重新成型为复合材料丝材(如图 5 (b)所示),并再次用于连续纤维增强复合材料制件的 3D 打印制造(如图 5 (c)所示),可以很好地实现连续纤维的回收与复合材料再制造,最大化连续纤维的使用效率,同时降低对环境的二次污染。高性能复合材料的回收再制造技术在一些如空间环境等资源匮乏条件下显得

尤为重要,对于实现废弃物的零排放回收再制造,突破空间环境资源缺乏的瓶颈,十分重要。复合材料回收再制造的相关研究仍在进行中。

### 总结与展望

复合材料 3D 打印技术是复合材料制备、3D 打印制造领域的交叉研究方向,是一种前沿应用技术。本文通过对复合材料 3D 打印工艺研究进展的综述研究,系统分析了复合材料 3D 打印技术工艺与材料瓶颈,提出了连续纤维增强热塑性复合材料 3D 打印工艺,旨在实现复合材料零件的低成本快速制造技术,通过工艺参数调控,实现性能可控的复合材

料制备、成形一体化,未来有望应用于复合材料飞行器结构设计,将大幅度提升飞行器结构效率以及综合性能,同时该技术还可能应用于新能源汽车、空间 3D 打印等前沿领域,拓展复合材料应用范围;所提出的复合材料回收再制造技术,将突破传统纤维增强复合材料制造工艺理念,真正实现绿色、轻质、高性能复合材料创新应用。然而,作为一项前沿创新技术,连续纤维增强热塑性复合材料 3D 打印工艺仍然存在大量的关键问题亟待解决,比如基体材料类型的扩展,复合材料界面性能优化,成形精度,复杂结构复合材料零件的制造能力等。

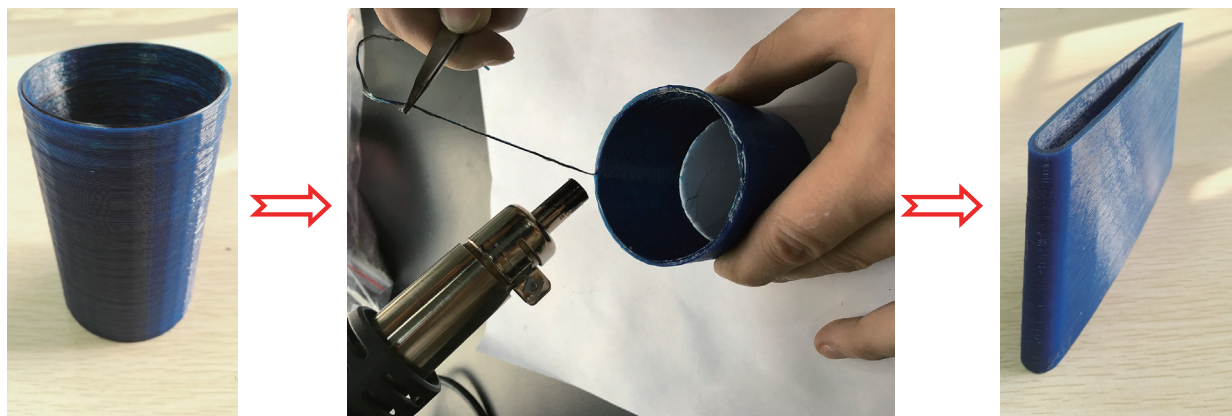


(a) 飞机垂直尾翼模型 (b) 汽车外壳模型

图4 连续碳纤维增强PLA复合材料构件模型  
Fig.4 PLA composites models by CFRTPCs

### 参考文献

[1] 何亚飞, 矫维成, 杨帆, 等. 树脂基复合材料成型工艺的发展[J]. 纤维复合材料, 2011(2): 7-13.  
HE Yafei, JIAO Weicheng, YANG Fan, et al. The development of polymer composites forming process[J]. Fiber Composites, 2011(2): 7-13.  
[2] 沈军, 谢怀勤. 航空用复合材料的研究与应用进展[J]. 玻璃钢/复合材料, 2006(5): 48-54.  
SHEN Jun, XIE Huaiqin. Recent progress in study and application of composite materials for aeronautical engineering[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2006(5): 48-54.  
[3] 唐见茂. 航空航天复合材料发展现状



(a) 复合材料零件增材制造 (b) 复合材料回收预浸丝 (c) 复合材料零件再制造

图5 纤维回收再制造工艺过程及其回收复合材料丝材  
Fig.5 Recycling and remanufacturing processes for CFRTPCs

及前景[J]. 航天器环境工程, 2013, 30(4): 352-359.

TANG Jianmao. Current status and trends of advanced composites in aerospace[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2013, 30(4):352-359.

[4] World market news Nr. 439[EB/OL]. [2016-05-16]. <http://www.airliners.de>.

[5] VAIDYA U K, CHAWLA K K. Processing of fibre reinforced thermoplastic composites[J]. International Materials Reviews, 2008, 53(4): 185-218.

[6] MAHIEUX C A. Cost effective manufacturing process of thermoplastic matrix composites for the traditional industry: the example of a carbon-fiber reinforced thermoplastic flywheel[J]. Composite Structures, 2001, 52(3): 517-521.

[7] OLIVEUX G, DANDY L O, LEEKE G A. Current status of recycling of fibre reinforced polymers: review of technologies, reuse and resulting properties[J]. Progress in Materials Science, 2015, 72: 61-99.

[8] TURNER B N, STRONG R, GOLD S A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling[J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20(3): 192-204.

[9] KLOSTERMAN D, CHARTOFF R, GRAVES G, et al. Interfacial characteristics of composites fabricated by laminated object manufacturing[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1998, 29(9): 1165-1174.

[10] KARALEKAS D E. Study of the mechanical properties of nonwoven fibre

mat reinforced photopolymers used in rapid prototyping[J]. Materials & design, 2003, 24(8): 665-670.

[11] CHEAH C M, FUH J Y H, NEE A Y C, et al. Mechanical characteristics of fiber-filled photo-polymer used in stereolithography[J]. Rapid Prototyping Journal, 1999, 5(3): 112-119.

[12] COMPTON B G, LEWIS J A. 3D - printing of lightweight cellular composites[J]. Advanced Materials, 2014, 26(34): 5930-5935.

[13] CarbonMide<sup>®</sup> product information[EB/OL]. [2016-03-05]. <http://www.eos.info/en/products/materials/materials-for-plastic-systems/carbonmide.html>.

[14] YAN C, HAO L, XU L, et al. Preparation, characterisation and processing of carbon fibre/polyamide-12 composites for selective laser sintering[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(16): 1834-1841.

[15] KUMAR S, KRUTH J P. Composites by rapid prototyping technology[J]. Materials & Design, 2010, 31(2): 850-856.

[16] NING F, CONG W, QIU J, et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 80: 369-378.

[17] 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.

[18] Local Motors company[EB/OL]. [2016-

03-06]. <https://localmotors.com/>.

[19] ZHONG W, LI F, ZHANG Z, et al. Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 301(2): 125-130.

[20] FUJIHARA K, HUANG Z M, RAMAKRISHNA S, et al. Influence of processing conditions on bending property of continuous carbon fiber reinforced PEEK composites[J]. Composites Science and Technology, 2004, 64(16): 2525-2534.

[21] 王强华, 孙阿良. 3D 打印技术在复合材料制造中的应用和发展[J]. 玻璃钢, 2015(4): 9-14.

WANG Qianghua, SUN Aliang. Application and evolution of 3D printing technology in composites manufacturing[J]. Fiber Reinforced Plastics, 2015(4): 9-14.

[22] Unima 塑料新材网[EB/OL]. [2015-11-25]. <http://mt.sohu.com/20151125/n428105313.shtml>. Unima-塑料[EB/OL]. [2015-11-25]. <http://mt.sohu.com/20151125/n428105313.shtml>.

[23] YANG C C, TIAN X Y, LIU T F, et al. 3D printing for continuous fiber reinforced thermoplastic composites: mechanism and performance[J]. Rapid Prototyping Journal, 2016. DOI: 10.1108/RPJ-08-2015-0098.

[24] 田小永, 杨春成, 曹毅, 等. 一种连续长纤维增强复合材料3D打印机及其打印方法: CN104149339A[P]. 2014-11-19.

TIAN Xiaoyong, YANG Chuncheng, CAO Yi, et al. A continuous long fiber reinforced composite 3D printing machine and printing methods: CN104149339A[P]. 2014-11-19.

## 3D Printing for High Performance Fiber Reinforced Polymer Composites and Exploration on Its Applications

TIAN Xiaoyong, LIU Tengfei, YANG Chuncheng, LI Dichen

(State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710054, China)

**[ABSTRACT]** Fiber reinforced polymer composites can lead to significant weight loss and great improvement of combination properties because of their inherent advantages. However, the disadvantages of conventional forming processes, such as complex process, high cost, difficult recycling, have limited the wide applications of fiber reinforced polymer composites. 3D printing is a new forming process of parts, and it is possible to realize low-cost and green manufacturing for fiber reinforced polymer composites. This paper reviews the research status of 3D printed fiber reinforced polymer composites, and meanwhile presents a new 3D printing process for high performance continuous fiber reinforced thermoplastic composites as well as the recycling and remanufacturing strategy for the parts fabricated by this new process.

**Keywords:** 3D printing; Thermal plastic composite; Fiber reinforcement; Recycling and remanufacturing

(责编 谷雨)