

高性能纤维增强树脂基复合材料 3D打印*

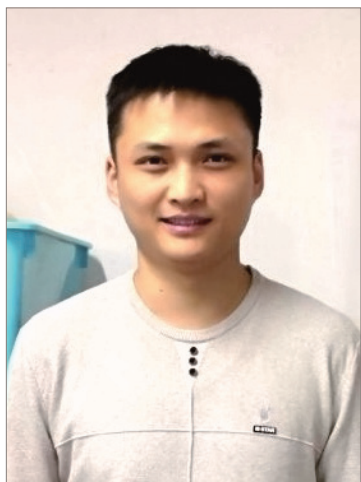
明越科,段玉岗,王 奔,肖 鸿,张小辉

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室,西安 710049)

[摘要] 3D 打印技术是一种逐层成形的增材制造技术,而纤维增强树脂基复合材料是一种力学性能优异的先进结构材料,结合 3D 打印的工艺先进性和纤维的材料性能优势,提出新型的纤维增强树脂基复合材料 3D 打印工艺,为进一步促进两者共同发展与应用提供了可能。综述并分析了纤维增强树脂基复合材料 3D 打印技术的研究现状与瓶颈,提出了一种连续纤维增强热固性树脂基复合材料 3D 打印工艺,将 3D 打印丝材制备、3D 打印预成型体、3D 打印预成型体固化分隔成 3 个独立的模块,并根据不同模块设计搭建了不同的试验平台及设备,成功制备得到了连续纤维增强热固性树脂基复合材料 3D 打印构件,还测试得出其(纤维含量为 52%)拉伸强度及拉伸模量分别达到 1325.14MPa 和 100.28GPa;弯曲强度及弯曲模量分别为 1078.03MPa 和 80.01GPa;层间剪切强度为 58.89MPa。大幅提高了纤维增强树脂基复合材料 3D 打印成型构件的力学性能。

关键词: 3D 打印;纤维增强;热塑性复合材料;热固性复合材料;力学性能

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2019.04.034



明越科

硕士研究生,研究方向为复合材料成型与 3D 打印。

3D 打印技术作为引领第 4 次工业革命的重要标志之一,正凭借其智能化优势快速抢占其他领域^[1-5]。3D 打印耗材成为了限制其进一步发展和应用的瓶颈。按照材料属性,将其分为金属和非金属两种。目前,常用的 3D 打印非金属耗材多为纯热塑性丝材,包括丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(ABS)、聚乳酸(PLA)等,其制件存在承载能力弱,层间性能差,强度及硬度较低等缺陷^[6-7]。改善方法之一是利用力学性能优异的纤维作为增强材料,复合热塑性或热固性树脂基体,形成纤维增强树脂基复合材料,然后通过 3D 打印成型实体构件^[8-10]。纤维的作用是用于增强负载能力,提高拉伸、弯曲强度及模量等力学性能;树脂基体则用于结合、保护纤维,并且均匀地传递

与分配载荷。

因此,结合 3D 打印技术的成型工艺先进性和纤维增强树脂基复合材料的材料力学性能优势,提出新型的纤维增强树脂基复合材料 3D 打印成型工艺为实现复合材料低成本快速制造提供了可能性。

近年来,纤维增强树脂基复合材料 3D 打印技术取得了一定的发展和成果。截至目前,短切纤维增强热塑性和热固性树脂基复合材料 3D 打印技术,以及连续纤维增强热塑性树脂基复合材料 3D 打印技术均已经实现。然而,关于连续纤维增强热固性树脂基复合材料 3D 打印技术的文献则相对较少。本文针对纤维增强树脂基复合材料 3D 打印技术发展现状进行了综述分析,并首次提出了一种连续纤维增强热固性树脂

* 基金项目:国家重点研发计划(2016YFB1100902)。

基复合材料 3D 打印工艺,设计并搭建了相关试验设备,还对其制备的复合材料构件进行了多种测试以获得其相应的力学性能表征,最后对纤维增强树脂基复合材料 3D 打印技术进行了总结和展望。

纤维增强树脂基复合材料 3D 打印研究现状

1 短切纤维增强热塑性树脂基复合材料 3D 打印

北京航空航天大学 Zhong 等^[11]通过将短切玻璃纤维加入到 ABS 当中,制备短切玻璃纤维增强 ABS 基复合材料丝材,并且成功通过熔融沉积成型(FDM)设备进行 3D 打印,显著地提升了所制备复合材料样件的力学强度,其纤维含量为 18% 的样件拉伸强度最高达到 58.6MPa。

美国橡树岭国家重点实验室 Tekinalp 等^[12]将短切碳纤维加入到 ABS 当中,通过 FDM 设备进行 3D 打印,制备出具有高度纤维同向性(91.5%)的复合材料样件,对比传统注塑样件,纤维含量为 40% 的 3D 打印样件的拉伸强度和拉伸模量分别提高了 115% 和 700%,达到 65MPa 和 13.6GPa;而且还通过纤维取向、纤维分布和内部孔隙等微观结构来分析解释了其宏观性能优势。

美国德克萨斯理工大学的 Ning 等^[13]将不同质量分数和长度的短切碳纤维添加到 ABS 树脂基体当中,通过 FDM 设备制备测试样件;对比纯塑料样件、不同纤维长度增强样件以及不同纤维添加量增强样件,研究得出了其对于拉伸性能和弯曲性能的影响,并给出了针对强度、模量、孔隙率等不同指标的不同纤维长度、含量的最优化选择。

2 短切纤维增强热固性树脂基复合材料 3D 打印

美国哈佛大学 Compton 等^[14]

以短切碳纤维为增强材料,热固性环氧树脂为基体,咪唑类化合物为固化剂,在低温下混合后得到类似“墨水”的低黏度混合物,然后基于 FDM 原理进行挤出打印,打印成型的样件先进行中温预固化,然后再进一步高温彻底固化,其纤维含量为 35% 的样件拉伸强度最高达到 66.2 MPa;同时,研究人员还通过对纤维长径比和喷嘴直径的协调,实现了对短切碳纤维增强体的取向控制。

意大利米兰理工大学 Griffini 等^[15]将丙烯酸树脂、光引发剂、环氧树脂及热固化剂共混而成新型光热双固化树脂体系(Interpenetrating Polymer Network, IPN),并用短切碳纤维增强后通过 3D 打印技术成型实体零件,同时在 3D 打印过程中采用紫外光预固化定型,打印完成后再通过热后固化彻底成型。

华中科技大学 Yan 等^[16]发明了一项针对短切纤维增强热固性复合材料成型方法的专利,将整个短切纤维增强热固性复合材料成型过程分成 5 个部分:制备黏合剂和短切纤维的复合粉末、选择性激光烧结成型含孔隙的预成型体、制备液态热固性树脂池浸润预成型体、固化预成型体和后续打磨抛光。

3 连续纤维增强热塑性树脂基复合材料 3D 打印

美国南卫理公会大学 Saari 等^[17]提出一种新型的纤维封装增材制造技术(Fiber Encapsulation Additive Manufacturing, FEAM),可以将连续纤维封装于树脂基体内部并通过 3D 打印成型实体零件;其核心在于额外添加一根空心导引管紧贴着 3D 打印喷嘴并保持同步运动,喷嘴正常打印普通热塑性树脂,连续纤维经过导引管导入并包裹于树脂当中,随树脂一并粘附到打印平台上,从而实现连续纤维增强复合材料 3D 打印。

日本东京理科大学 Matsuzaki

等^[18]利用连续碳纤维作为增强材料和 PLA 作为树脂基体,将两种材料同时提供给 3D 打印机,并在打印之前加热喷嘴,实现纤维浸润过程,浸渍完成后,纤维随树脂一同从喷嘴挤出,粘附于打印平台之上,从而完成连续纤维增强的 3D 打印过程;较传统 3D 打印纯热塑性样件,连续纤维大为增强了其力学性能,纤维含量为 6.6% (体积分数)样件拉伸强度最高达到 185.2MPa。

西安交通大学田小永等^[19]发明了一种连续纤维增强智能复合材料 3D 打印头,可以用热塑性基体材料将连续纤维包覆其中,实现边供给热塑性丝材和连续纤维,边挤出打印成型零件。研究人员利用此 3D 打印头基于 FDM 原理搭建相关试验平台,研究了各工艺参数对复合材料构件力学性能的影响;当纤维含量为 27% 时,其构件拉伸强度和弯曲强度分别达到 220MPa 和 335MPa;最后还针对连续纤维堆积成形的工艺特征,提出了一种回收再制造策略^[20]。

连续纤维增强热固性树脂基复合材料 3D 打印

虽然以上 3 种方式对于复合材料 3D 打印成型构件的力学性能有所增强,由于短切纤维以及热塑性树脂自身存在的诸多缺点,始终无法大幅提高纤维增强树脂基复合材料 3D 打印成型构件的力学性能,使其能够满足工程领域的严苛要求。

而连续纤维增强热固性树脂基复合材料作为综合性能更为优越的复合材料代表之一,既突破了短切纤维的性能局限,又避免了热塑性树脂的自身缺陷,但是关于其运用于 3D 打印技术成型的研究相对较少,一是由于成型方面的困难仍未彻底解决,二是由于热固性树脂涉及到较长时间的聚合交联反应,无法在打印过程中实现即时原位固化。

针对上述问题,本文提出了一种连续纤维增强热固性树脂基复合材料3D打印工艺,以高强度的连续碳纤维干丝复合热固性环氧树脂基体,依次经过3D打印丝材制备、3D打印预成型体、3D打印预成型体固化3个步骤,成功制备得到连续纤维增强热固性树脂基复合材料3D打印实体构件,还测试得出了其包括拉伸、弯曲、层间剪切等诸多力学性能。

1 3D打印工艺原理及试验设备

热塑性树脂的聚合物链依靠分子间作用力缔合,随着温度的升高,分子间作用力迅速减弱,并由此转变为黏流态。因此,热塑性树脂可以通过反复加热和冷却,多次重复成形。然而,不同于热塑性树脂可重复使用的特性,热固性树脂的聚合物链之间由于深度的聚合交联固化反应,导致形成牢固的三维空间网络;因此,一经固化,热固性树脂则无法被再次利用。但在固化之前,其仅仅作作为热固性的预聚物,分子链之间并没有发生聚合交联反应,与热塑性树脂无异。

本文提出的连续纤维增强热固性树脂基复合材料3D打印工艺,即借鉴了热塑性3D打印利用树脂在

玻璃态和黏流态之间的相互转变来实现制丝、打印的原理,同时考虑到后续热固性树脂涉及到的聚合交联固化反应,还单独设计了后固化模块,从而将整个工艺分成3D打印丝材制备、3D打印成型过程、3D打印预成型体固化3个独立的模块。首先,着眼于连续纤维增强热固性树脂基复合材料3D打印丝材的制备;其次,利用制得的丝材基于FDM原理进行3D打印成型,得到预成型实体构件;最后,将预成型体置于高温高压环境下,激活潜伏性固化剂活性,引发聚合交联反应彻底固化成型。

1.1 3D打印丝材制备

作为整个工艺的起点,丝材制备模块由于采用树脂在玻璃态和黏流态之间的相互转变来实现制备过程,故选取常温下为固态的环氧树脂E-20(601)作为热固性树脂基体,其熔点为64~76℃;选取潜伏性热固化剂双氰胺(DICY)作为固化剂,其最低反应温度为150℃,由于分子中氨基和氰基的双重作用导致与E-20在中低温下具有较长的稳定适用期^[21-22]。另外,根据打印效率和打印精度的要求,选择3K碳纤维作为增强材料。

如图1所示,设计并搭建了相关预浸制丝设备。纤维从料卷放出,经输送至熔融树脂槽中,温度控制为(130±5)℃。为避免树脂无法渗透进入纤维束内部的现象,在树脂槽内设置了多个展纱辊,通过多次偏折预浸路径以及配合控制输送张力,可以有效地改善预浸效果。浸渍完热熔树脂后,丝束通过一个微型喷嘴,刮掉多余树脂,并由延展的纤维束重新塑形成圆形,再经冷却凝固、收卷即得到所需的连续纤维增强热固性树脂基复合材料3D打印丝材,其纤维含量达到48%±5%。

1.2 3D打印预成型体

对于3D打印成型模块,同样是利用了E-20在玻璃态和黏流态之间的相互转变,来提供打印过程中所需的黏附力和维持预成型体形状的支撑力。

如图2所示,设计并搭建了基于FDM原理的3D打印设备。预浸制得的3D打印丝材需要预先穿过加热头和打印喷嘴,通过电阻式加热棒在加热头内加热至(130±5)℃,其树脂部分再次熔化成黏流态,在加热头的内部空间形成一个微型熔融树脂槽,纤维束束在加热头及打印喷嘴的共同作用下进行了二次预浸。丝

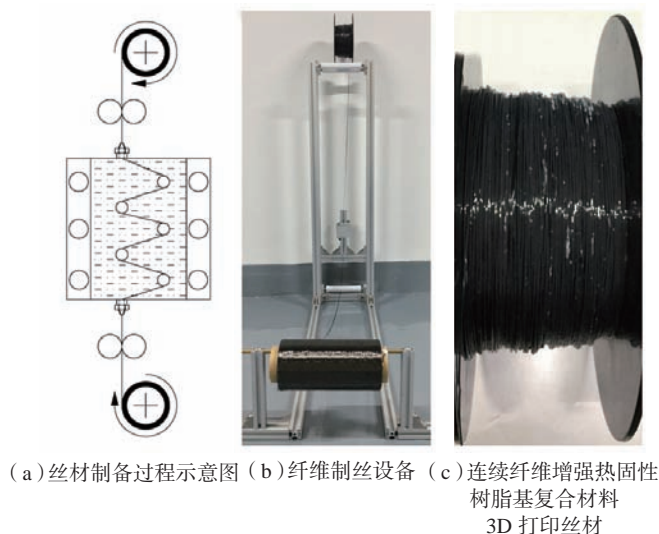


图1 预浸制丝设备

Fig.1 Presoak silk equipment

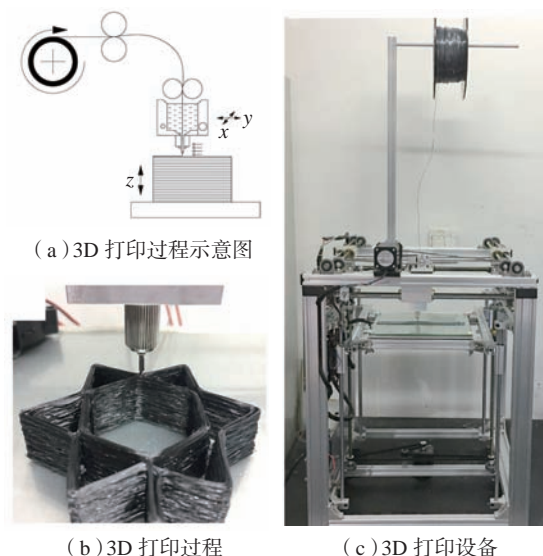


图2 基于FDM原理的3D打印设备

Fig.2 3D printing device based on the principle of FDM

束从打印喷嘴挤出后,迅速冷却并附着于打印平台或前一层上。加热头与 $x-y$ 运动机构链接,可沿由3D模型处理得到的截面轮廓和内部填充轨迹移动。在单层打印完成后,打印平台沿 z 轴方向下降单层厚度的距离,循环上述步骤直到打印完成整个预成型体。

打印完成后,由于发生了二次预浸,刮去少量树脂,预成型体的纤维含量可略微提高至 $52\% \pm 5\%$,而且凭借纤维本身具有一定的强度和韧性,此方法可以制备多种复杂结构的的功能样件,如薄壁结构、中空结构、点阵结构、悬臂结构等。

1.3 3D打印预成型体固化

在预成型体固化模块中,由于采用热引发的固化方式,树脂在高温固化环境当中,依旧会转变成黏流态,而纤维一旦失去了固态树脂的约束,则会产生严重的翘曲变形,并且由于固化环境中还存在真空负压的作用,因此原始预成型体样品更容易发生凹陷或坍塌。

针对如何在高温高压的后固化环境中保持样品原始形状的问题,本文提出了一种纤维增强热固性复合材料3D打印构件后固化方法,并搭建了相关固化设备,如图3所示。利用氯化钠的热稳定性和水溶性,将样品完全埋入其中,通过外接真空泵从侧面抽真空,两端的柔性薄膜不断向内挤压,填充内部空隙和排除空气,由此氯化钠粉末和预成体形成一个致密的整体,从而保持住其原始形状;然后,将整个装置放在烘箱当中,加热至 180°C ,固化1.5h。在固化反应中,DICY中胺上的氢原子与环氧基发生开环反应,胺基与羟基反应生成酰胺,进一步与环氧基反应,经过不断扩散后,持续消耗E-20直到聚合交联反应完成;最后,取出样品,冲洗干燥即得到最终成品。

该方式利用了粉末填充、真空

加压和高温固化的原理,适用于3D打印成型的各类复杂结构部件的后固化处理。氯化钠颗粒直径为 $50\sim 100\mu\text{m}$,保证了固化零件表面的成型质量,且固化工艺过程中没有树脂损失,最终成品的纤维含量不变。

2 3D打印构件力学性能

通过电液伺服力学试验机(MTS SYSTEMS (CHINA) CO., LTD)对制备的复合材料构件进行了包括拉伸测试,三点弯曲测试和层间剪切强度测试在内的多种力学测试以获得其相应的性能表征,如图4所示。

测试结果表明,该3D打印构件的拉伸强度及拉伸模量分别为 1325.14MPa 和 100.28GPa ;弯曲强度及弯曲模量分别为 1078.03MPa 和 80.01GPa ;层间剪切强度为 58.89MPa 。综合了连续碳纤维和热固性环氧树脂的双重优势,将3D打印成型构件的力学性能大幅提升。

经过力学性能测试后,通过电镜观测及CT扫描得到了其预成型体及测试样件破坏截面的微观形貌及内部孔隙,如图5所示。预成型体中,纤维表面仅部分包裹着树脂,孔隙密

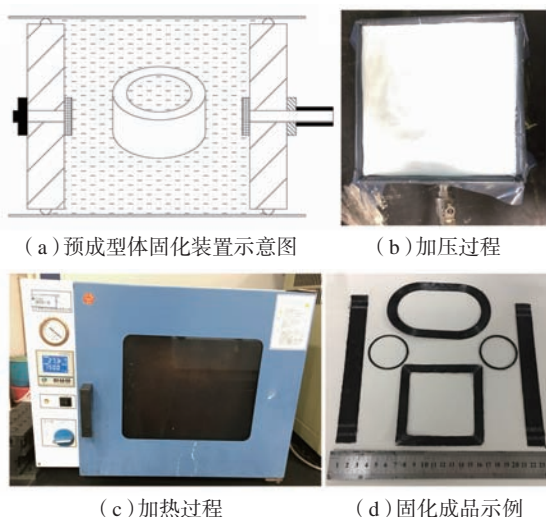


图3 3D打印构件后固化方法

Fig.3 Post curing method of 3D printing structures

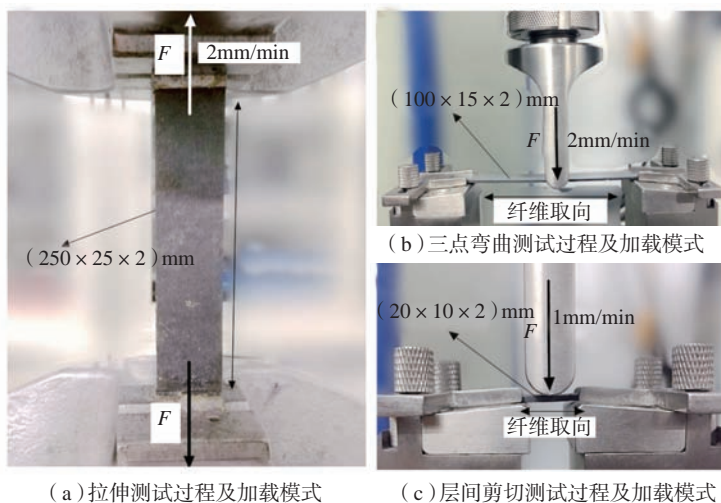


图4 力学测试

Fig.4 Mechanical test

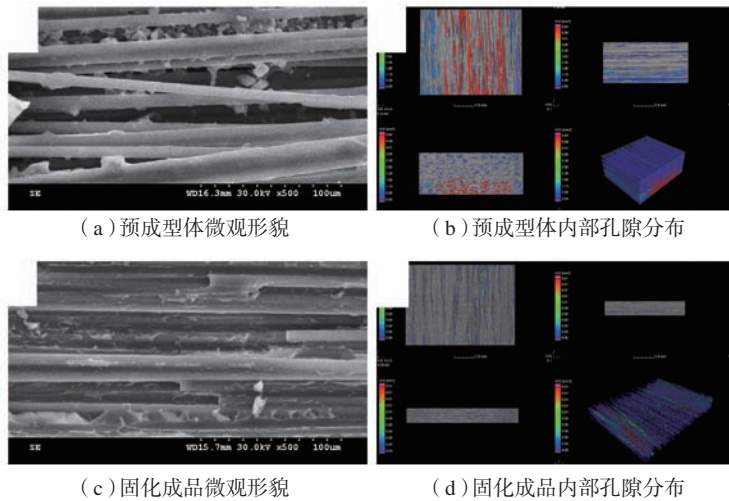


图5 预成型体及测试样件破坏截面的微观形貌及内部孔隙
Fig.5 Sectional microstructure damage and internal porosity of preforming body and testing samples

集, DICY 颗粒零散分布其中; 经过高温高压的热后固化过程, 可以有效地促进树脂流动, 纤维-树脂分布均匀、结合紧密, 孔隙率由 10.05% 降至 2.53%。

结论

纤维增强树脂基复合材料 3D 打印技术是一种复合材料领域和 3D 打印领域交叉应用的前沿技术。本文通过对纤维增强树脂基复合材料 3D 打印技术的研究现状进行综合探讨, 提出了一种连续纤维增强热固性树脂基复合材料 3D 打印工艺, 旨在结合连续纤维、热固性树脂和 3D 打印技术, 实现高性能连续纤维增强热固性树脂基复合材料的低成本快速制造。连续纤维和热固性树脂的材料性能优势弥补了短切纤维和热塑性树脂的不足, 3D 打印技术更是有望替代传统的复合材料预浸带制备、模具成型和热压罐固化的复杂步骤。整个工艺分为 3D 打印丝材制备、3D 打印预成型体、3D 打印预成型体固化 3 个模块, 根据不同模块设计搭建了不同的试验平台及设备, 并成功制备了连续纤维增强热固性树脂基复合材料 3D 打印实体构件, 还测试得出了其(纤维含量为 52%) 拉伸强

度及拉伸模量分别达到 1325.14MPa 和 100.28GPa, 弯曲强度及弯曲模量分别为 1078.03MPa 和 80.01GPa, 层间剪切强度为 58.89MPa, 大幅提高了纤维增强树脂基复合材料 3D 打印成型构件的性能上限, 具有极大的经济价值和发展潜力。

参考文献

[1] 李小丽, 马剑雄, 李萍, 等. 3D 打印技术及应用趋势[J]. 自动化仪表, 2014, 35(1): 1-5.
 LI Xiaoli, MA Jianxiong, LI Ping, et al. 3D printing technology and its application trend[J]. Process Automation Instrumentation, 2014, 35(1): 1-5.
 [2] 张云波, 乔雯钰, 张鑫鑫, 等. 3D 打印用高分子材料的研究与应用进展[J]. 上海塑料, 2015(1): 1-5.
 ZHANG Yunbo, QIAO Wenyu, ZHANG Xinxin, et al. Research and application progress of polymer materials used in 3D printing[J]. Shanghai Plastics, 2015(1): 1-5.
 [3] 李梦倩, 王成成, 包玉衡, 等. 3D 打印复合材料的研究进展[J]. 高分子通报, 2016(10): 41-46.
 LI Mengqian, WANG Chengcheng, BAO Yuheng, et al. Research progress of 3D printing composites[J]. Polymer Bulletin, 2016(10): 41-46.
 [4] 李新, 孙良双, 杨亮, 等. FDM 3D 打印高分子材料改性及应用进展[J]. 胶体与聚合物, 2017(3): 139-141.

LI Xin, SUN Liangshuang, YANG Liang, et al. FDM 3D printing polymer modification progress and application[J]. Chinese Journal of Colloid & Polymer, 2017(3): 139-141.

[5] 郭华清, 徐冬梅. 3D 打印用高分子材料的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(11): 118-121.

GUO Huaqing, XU Dongmei. Research progress of polymer materials for 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(11): 118-121.

[6] 于晓东, 陈涛, 贾茹. 聚乳酸 3D 打印件材料性能表征[J]. 现代塑料加工应用, 2016, 28(2): 51-53.

YU Xiaodong, CHEN Tao, JIA Ru. Property Characterization of polylactic acid product formed by 3D printing[J]. Modern Plastics Processing & Applications, 2016, 28(2): 51-53.

[7] 乔雯钰, 徐欢, 马超, 等. 3D 打印用 ABS 丝材性能研究[J]. 工程塑料应用, 2016, 44(3): 18-23.

QIAO Wenyu, XU Huan, MA Chao, et al. Research on properties of ABS filament used in 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(3): 18-23.

[8] BLOK L G, LONGANA M L, YU H, et al. An investigation into 3D printing of fibre reinforced thermoplastic composites[J]. Additive Manufacturing, 2018, 22: 176-186.

[9] NAMIKI M, UEDA M, TODOROKI A, et al. 3D printing of continuous fiber reinforced plastic[J]. Materials Science Forum, 2014, 914: 558-563.

[10] WANG X, JIANG M, ZHOU Z, et al. 3D printing of polymer matrix composites: A review and perspective[J]. Composites Part B, 2016, 110: 442-458.

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

[12] TEKINALP H L, KUNC V, VELEZ-GARCIA G M, et al. Highly oriented carbon fiber-polymer composites via additive manufacturing[J]. Composites Science & Technology, 2014, 105: 144-150.

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

[14] COMPTON B G, LEWIS J
 (下转第 46 页)

[ABSTRACT] Wing spar is the major load-carrying structure with large dimension and complex stress. Composite wing spar features weight reduction, load-carrying increase and long service life. To achieve the effective load carrying and transfer, and satisfy process coordination, composite wing spars are required to have accurate lay-up position and angle, and strictly controlled profile tolerance. However, due to complex lay-up and various sections of large composite wing spar, the traditional manual process of large composite components frequently brings about quality issues in the internal and unstable quality, which requires higher level of manufacturing process so as to satisfy engineering requirements. The digital technology adopted from design to manufacturing, and the automatic lay-up, cutting and forming of materials will contribute to the high quality forming of composite wing spar so as to satisfy all engineering requirements.

Keywords: Structure design; Design/manufacture data transfer; Digital manufacture; Composite; Wing Spar

(责编 大漠)

(上接第38页)

A. 3D-printing of lightweight cellular composites[J]. *Advanced Materials*, 2015, 26(34): 5930–5935.

[15] GRIFFINI G, INVERNIZZI M, LEVI M, et al. 3D-printable CFR polymer composites with dual-cure sequential IPNs[J]. *Polymer*, 2016, 91: 174–179.

[16] YAN C, ZHU W, SHI Y, et al. Method for manufacturing composite product from chopped fiber reinforced thermosetting resin by 3D printing: US20170266882[P]. 2017-09-21.

[17] SAARI M, COX B, RICHER E, et al. Fiber encapsulation additive manufacturing: an enabling technology for 3D printing of electromechanical devices and robotic

components[J]. *3D Printing & Additive Manufacturing*, 2016, 2(1): 32–39.

[18] MATSUZAKI R, UEDAM M, NAMIKI M, et al. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23058.

[19] 田小永, 杨春成, 李涤尘, 等. 一种连续纤维增强智能复合材料 3D 打印头及其使用方法: CN104441658A[P]. 2015-03-25.

TIAN Xiaoyong, YANG Chuncheng, LI Dichen, et al. A continuous fiber reinforced intelligent composite 3D printing head and its usage method: CN104441658A[P]. 2015-03-25.

[20] TIAN X, LIU T, YANG C, et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA

composites[J]. *Composites Part A*, 2016, 88: 198–205.

[21] RONALD S, BAUER R S. Epoxy resin chemistry[M]. Washington: American Chemical Society, 1979.

[22] 谷晓昱, 张军营. 用 FT-IR 研究双氰胺固化环氧树脂的反应机理[J]. *高分子材料科学与工程*, 2006, 22(5): 182–184.

GU Xiaoyu, ZHANG Junying. Study on the curing mechanism of Epoxy/DICY system by FT-IR[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2006, 22(5): 182–184.

通讯作者: 段玉岗, 博士、教授, 研究方向为复合材料成型、3D 打印, E-mail: ygduan@mail.xjtu.edu.cn。

3D Printing for High Performance Fiber Reinforced Polymer Composites

MING Yueke, DUAN Yugang, WANG Ben, XIAO Hong, ZHANG Xiaohui

(State Key Lab for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

[ABSTRACT] 3D printing is a layer-by-layer forming additive manufacturing technology. Fiber reinforced polymer composites are advanced structural materials with excellent mechanical performance. Combining 3D printing technology and fiber reinforced polymer composites, this paper proposes a novel composite preparation process which will certainly promote their development and applications. This paper reviews and analyzes the current research progress and difficulties of 3D printing for fiber reinforced polymer composites, and meanwhile, presents a new 3D printing process for continuous fiber reinforced thermosetting polymer composites. This process separated the whole preparation into three independent modules, including fiber impregnating, 3D printing and pre-formed sample curing. Relevant experimental equipments were designed and built independently, and the 3D printed samples were successfully fabricated. The mechanical test results showed that the tensile strength and tensile modulus of these (52% fiber content) specimens were 1325.14MPa and 100.28GPa, respectively. The flexural strength and flexural modulus were 1078.03MPa and 80.01GPa, respectively. The interlaminar shear strength was 58.89MPa. The mechanical performance had been greatly improved.

Keywords: 3D printing; Fiber reinforcement; Thermoplastic composites; Thermosetting composites; Mechanical performance

(责编 大漠)