

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.12.028

基于 FDM 技术的连续纤维增强复合材料研究进展

牟宇松,姜沅政,李红宾,杨化林

(青岛科技大学机电工程学院,山东青岛 266061)

摘要:对基于熔融沉积成型(FDM)技术的连续纤维增强复合材料(CFRP)制备工艺和产品性能进行概括,总结了直接成型法与间接成型法的成型特点。简述了打印温度、层间厚度、纤维体积分数、打印速度等成型工艺参数对复合材料产品力学性能的影响,对基于 FDM 技术的 CFRP 界面成形机理进行了分析,复合材料良好的界面结合是提高复合材料力学性能的关键,阐述了当前主要的界面改性方式对 CFRP 材料整体性能的影响,并对基于 FDM 技术的 CFRP 产品的发展方向进行了展望。

关键词:熔融沉积成型;连续纤维增强复合材料;工艺参数;界面性能;纤维改性

中图分类号: TQ323.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)12-0153-04

Research Progress of Continuous Fiber Reinforced Composites based on FDM Technology

Mu Yusong, Jiang Yuanzheng, Li Hongbin, Yang Hualin

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

Abstract : The preparation process and product properties of continuous fiber reinforced composites (CFRP) based on fused deposition molding (FDM) technology were outlined, and the molding characteristics of direct molding method and indirect molding method were summarized. The effects of molding process parameters such as printing temperature, interlayer thickness, fiber volume fraction, and printing speed on the mechanical properties of composite products were briefly described. The interfacial forming mechanism of CFRP based on FDM technology was analyzed. The good interfacial bonding of composites is the key to improve the mechanical properties of composites. The effects of the current main interfacial modification methods on the overall properties of CFRP were described, and the development direction of CFRP products based on FDM technology is prospected.

Keywords : fused deposition molding ; continuous fiber reinforced composite ; process parameter ; interfacial property ; fiber modification

1 基于熔融沉积成型(FDM)技术的连续纤维增强复合材料(CFRP)制备工艺

CFRP 具有强度高、设计性强、模量高、环境友好等特点,被广泛应用于航空航天、医疗和交通运输等领域^[1-3]。制备 CFRP 的传统方法包括缠绕成型、注射成型、真空模压成型等^[4-5],上述方式虽具有技术成熟、适用性较广等优点,但因其工艺复杂、成本较高,使得 CFRP 制备工艺难以满足当前使用要求。

自 20 世纪 80 年代以来,由于制造业的飞速发展,人们革新了多种增材制造技术,主要包括 FDM 技术、光固化立体成型(SLA)技术、选择性激光烧结(SLS)技术及分层实体制

造(LOM)技术等^[6]。由于 FDM 技术具有高可靠性、成型材料广泛的特点,使得该工艺成为制备 CFRP 技术中的主要发展方向^[6-7]。但基于 FDM 技术制备的纯聚合物树脂材料力学性能相对较弱^[8-10],为提高树脂材料的力学性能,相关学者对打印过程中的工艺参数进行了优化,例如打印方向、打印层厚度、进给速度等^[11-13]。但是成型参数的优化对 FDM 技术中材料性能提升是有限的,近年来,以树脂材料为基体,在基体中加入颗粒、纳米材料及纤维材料等增强体来提高材料性能的技术日渐成熟^[14]。与短纤维增强复合材料相比,CFRP 的发展虽起步较晚,但在 CFRP 中连续纤维对基体材料的力学性能提升更为显著,当下对 CFRP 的研究成为热

基金项目: 国家自然科学基金项目(52101401),山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE102, ZR2020ME124)

通信作者: 李红宾,工学博士,特聘副教授,主要从事增材制造技术与装备、复合材料优化设计与先进制造等研究

收稿日期: 2021-10-22

引用格式: 牟宇松,姜沅政,李红宾,等. 基于 FDM 技术的连续纤维增强复合材料研究进展[J]. 工程塑料应用,2021,49(12): 153-156, 161.

Mu Yusong, Jiang Yuanzheng, Li Hongbin, et al. Research progress of continuous fiber reinforced composites based on FDM technology[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12): 153-156, 161.

点。

基于FDM技术的连续纤维成型工艺主要分两类:一类是M. Namiki等^[15]提出的“直接成型法”,也是目前较为常见的一种工艺,即将热塑性树脂材料与连续纤维送入FDM加热块中,熔融树脂材料与纤维材料经过浸渍,通过喷头挤出,最终按照预定程序的路径完成打印。直接打印法的优势在于能够提高打印效率,节约成型成本,可以灵活选择基体和增强体的材料类型。但也存在FDM喷头中纤维材料浸渍不完全、界面结合效果较差的缺陷。同时,FDM加热喷头内部通路结构与熔融态的复合材料流场模型尚未形成完整的拟合数学关系,这将会成为后续CFRP加热喷头系统研究的重点方向。另一类则是K. I. Moir等^[16]提出的“嵌入成型法”,即首先通过FDM喷头打印热塑性树脂材料,然后将连续纤维铺在已经打印的热塑性材料上,进而在该材料上进行下一步打印,形成目标产品,最终通过对目标产品的整体加热完成制备。

2 成型参数对CFRP性能的影响

在FDM成型过程中,工艺参数以及环境条件对CFRP性能起到关键性作用。目前学者研究的工艺参数主要包括打印温度、打印层厚度、纤维体积分数及光栅角度等^[17-18]。

首先,打印温度对CFRP力学性能产生影响的根本原因在于打印温度会影响树脂基体的熔融流动性,伴随着温度的升高,基体材料的熔融流动性会上升,在一定的压力作用下树脂材料会更容易浸渍到连续纤维材料的内部,提高树脂基体和纤维材料的界面结合能力^[19-20]。但并不是打印温度越高对复合材料力学性能的提升越显著,研究发现,在树脂基体材料为聚乳酸(PLA)材料时,温度在200~220℃范围内,熔融树脂的流动性随着温度上升而提高,纤维与PLA基体界面结合较好;但当温度为220~240℃时,随着温度的上升,PLA材料的流动性变差,复合材料中孔隙增多,甚至会出现树脂材料的分解、界面性能下降等现象^[21-24]。因此在成型过程中,应将打印温度置于树脂的玻璃化转变温度之上,热分解温度之下,使打印温度处于合理提升材料力学性能的温度范围内^[19]。

其次,层厚会影响CFRP的制造精度、打印效率及力学性能等。层厚决定了FDM喷头与已沉积层间的距离。较小的层厚有助于打印过程中材料的压实,促进熔融状态的树脂材料与连续纤维的融合,增强相邻层间界面结合性能^[25]。层厚还会影响CFRP的纤维体积分数和孔隙率,以PLA材料为基体时,打印层厚由0.8 mm上升到1.2 mm时,复合材料的纤维体积分数下降,同时孔隙率上升,致使CFRP试件的弯曲强度和拉伸强度分别下降了37.17%和33.82%^[26]。当层厚在0.4~0.6 mm时,复合材料的界面结合效果较好;在

低于0.3 mm时,FDM喷头会产生过大的压实作用,导致喷头堵塞以及纤维的压断^[25-27]。另外,打印层厚过低也会降低打印效率,因此选择打印层厚时需要在材料的力学性能、打印效率等方面做权衡处理。

连续纤维作为CFRP中的主要承载材料,其含量对于复合材料的力学性能起到至关重要的作用。在一定范围内,随着纤维含量的增加,复合材料的力学性能整体呈现出上升趋势^[28]。但在基于FDM技术的生产中,CFRP中纤维的体积分数一般都不超过50%,该参数低于传统纤维增强的制备方法^[29]。在基于FDM技术的CFRP制备工艺中,纤维体积分数的增加会带来两种不同的效果:一方面,由于纤维体积分数的增加,会延缓CFRP的损伤演变速度,提高复合材料的力学性能;另一方面,纤维体积分数的增加会使纤维与基体的结合变得困难,并在CFRP中引入更多的孔隙缺陷,对材料的力学性能产生不利的影响^[30-32]。所以基于FDM技术制备CFRP的工艺,在合理提高纤维体积分数的同时,需减少孔隙产生,提高纤维/基体层间界面的结合性能。

除此之外,打印速度对CFRP的力学性能也有一定影响。在以丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)为基体的情况下,打印速度为25 mm/s时,CFRP的拉伸性能达到最优,且随着打印速度的增大,CFRP的力学性能会逐渐下降^[26]。另外,光栅角也会影响CFRP的力学性能。当光栅角为0°时,拉伸载荷能够较好地转移到增强纤维上,使得CFRP能够拥有比光栅角为45°/-45°时更好的拉伸性能。但是光栅角为45°/-45°时,CFRP拥有更优越的综合力学性能^[26,33]。不同工艺参数对于复合材料力学性能的影响不同,同时还易受外界因素影响,难以实现各个工艺参数均达到最佳化^[12]。后续应探究用于多种工艺参数耦合的数学模型,在考虑多工艺参数的前提下,将CFRP材料的性能提升至最大化。

3 界面成形机理

在基于FDM技术的CFRP成型过程中,工艺参数的改变大多是通过影响复合材料的孔隙率和界面粘结作用来间接影响复合材料的力学性能^[15]。所以可以认为CFRP材料的性能主要由材料的孔隙率和界面粘结作用决定。在CFRP中,孔隙主要是由成型过程中产生的气泡、层间空隙和复合材料断裂界面纤维拔出产生的气孔组成^[34]。在CFRP制备过程中,纤维体积分数与孔隙的产生联系最为密切,所以在提高纤维体积分数以提升CFRP承载能力的同时,应着重考虑降低孔隙率^[29-30]。

CFRP的界面主要由树脂基体、纤维增强体和树脂/纤维界面结合部分组成,树脂基体材料在复合材料中主要起融合增强体和保持形状精度的作用;增强体主要在复合材料中起到承担载荷的作用。CFRP的结合界面属于一种非化学反

应的接触界面,作为纤维增强体和树脂基体之间传递载荷的桥梁,对复合材料的力学性能起到至关重要的作用^[5,15]。

在基于FDM技术生产CFRP的过程中,纤维伴随着基体流动的过程也会影响基体材料的流动。在喷头加热后,熔融树脂材料包裹着连续纤维从喷头中挤出,处于熔融状态下的复合材料会与已沉积冷却的复合材料接触,此时熔融态的复合材料会与已冷却的复合材料发生熔化润湿现象,接触界面上会发生材料的结合扩散。随着温度的降低,材料黏度上升,分子迁移率降低,界面的扩散和结合减缓^[15]。受温度、热导率、冷却速度等因素影响,熔融材料在流动过程中伴随着与外界环境的热量传导、再结晶等现象,均会影响基体/纤维间界面的形成质量^[28]。

纤维和树脂的粘结过程从微观角度看是两相材料界面形成的过程,而对于界面的作用机理尚未完全定义,目前广为接受的有范德华力作用机理、化学键作用机理、摩擦啮合作用机理以及浸润作用机理^[35-36]。CFRP的基体/纤维间界面通过增大树脂与连续纤维的接触面积提升界面范德华力,增大两相之间的机械啮合力,进而增强界面的结合性能。两相界面的作用机制主要与纤维和树脂界面的亲疏程度有关,两相之间的浸润性能决定了复合材料的界面性能。而浸润性主要由浸润角、树脂接触面积以及纤维丝表面的粗糙度决定,且受成型参数的影响,并最终影响CFRP的性能^[15]。

树脂/纤维界面还能够通过影响复合材料损伤积累与裂纹的扩展历程来影响CFRP的力学性能。在CFRP成型过程中,连续纤维与树脂基体材料的结合不是简单的将其力学性能相加,而是一种协同效应。该协同作用主要体现在CFRP的断裂能比其组成材料的断裂能相加要大。主要表现为CFRP受力时,在应力作用下,树脂材料首先发生裂纹,裂纹的尖端作为断裂应力集中点,促使断裂在树脂基体中发展直到遇上纤维。由于纤维的强度较高,阻碍了裂纹的继续扩展,致使裂纹沿着界面发展,从而发生界面脱落。若遇到结合较差的界面可能会导致纤维的断裂,断裂的纤维从树脂材料中拔出时需吸收大量能量来克服摩擦力,直至裂纹贯穿某个平面,CFRP才会被破坏^[37]。所以树脂/纤维界面的结合情况对CFRP的力学性能影响起到重要作用。

4 界面改性对CFRP性能的影响

连续纤维与熔融树脂材料在FDM喷头中融合时间较短,且接触有限,熔融树脂基体很难均匀地深入包裹纤维材料,导致复合材料界面出现缺陷,从而影响其力学性能。FDM的工艺参数对CFRP的影响效果有限^[19-22],所以目前对于基于FDM技术的CFRP性能的研究主要通过提高纤维与树脂的两相界面入手。根据界面化学键理论,在树脂/纤维界面存在主价键力来连接两相的官能团^[38]。连续纤维表

面的极性基团很少,整体呈现惰性,所以可对连续纤维表面进行改性处理,以增加纤维表面的官能团^[39-40]。

在目前的CFRP生产过程中,以连续碳纤维为例,常见的纤维改性有表面电解氧化处理、低压等离子体处理、接枝、超声波干预等方式,一般在进行表面处理后,通常需要添加偶联剂或者上浆剂^[40]。碳纤维在电解氧化处理和上浆处理后,纤维的表面都会出现凹槽,将这两种方式共同应用于表面改性时,纤维表面窄槽会变宽。因为上浆剂中的环氧基团、胺基团等化学基团能与电解氧化处理过程中的活性基团以及树脂基体发生化学反应,从而使纤维表面和基体之间形成化学键^[41]。所以电解氧化处理以及上浆处理能够提高碳纤维表面的粗糙度及活化化学基团。改善纤维与树脂材料的两相界面还可采用低压等离子体方法进行表面处理,通过具有带电性的准中性气体,利用带电粒子活化纤维表面^[42-43]。基于此处理方式,后续的研究中也出现等离子体处理与热解沉积碳涂层^[44]相结合的方式,修复碳纤维在改性处理中的纤维缺陷,增大界面粗糙度,形成具有梯度模量的界面相,最终提高复合材料的力学性能^[42]。

针对连续纤维的接枝改性主要有Pamam桥接枝法、电泳接枝法和化学接枝法等^[45-46]。但是Pamama桥接枝法成本较高,电泳接枝法最终获得的复合材料界面剪切强度较差。目前效果较好的碳纤维表面接枝方法是采用共价键桥接的方法,将氨基官能化氧化石墨烯接枝到纤维表面,最终使其复合材料的界面剪切强度提高36.4%^[47],氧化石墨烯表面具有环氧化物、羟基和羰基等含氧官能团,通过共价键和胺基等含氧官能团可以很好地与树脂基体结合,同时这种共价交联可以很好地提高石墨烯与碳纤维的界面结合^[48-49]。这种纤维表面改性方式能够很好地提高碳纤维和树脂基体之间的界面强度,能够有效地提高纤维表面的极性和湿润性,同时将纤维表面损害引起的拉伸强度降低最小化。但是目前纤维表面接枝改性的工艺较为繁琐,相对于其它纤维改性方式,其生产利用率较低且成本较高。

此外,经过研究证明,功率超声也可以应用于连续纤维增强复合材料的改性^[50]。在一定的振幅范围内,超声振动通过空化作用产生局部的高温 and 高速微射流,将连续纤维丝束进行均匀分散,并在纤维表面产生沟纹,降低树脂材料的黏度和表面张力,提升两相的表面浸润效果,最终改善复合材料的界面质量^[50-51]。过大的超声振幅会使纤维表面的粗糙度进一步增加,空化效应引起的瞬间冲击会导致少量纤维在表面缺陷处发生断裂^[52]。目前超声改性大多应用于碳纤维预浸润阶段,所以在进行超声改性处理过程中,可在树脂溶液中加入偶联剂进一步增强界面结合效果;此外,超声振动能够影响CFRP的孔隙尺度和孔隙分布情况,从而影响复

合材料的层间力学性能^[53]。

对 CFRP 的界面改性主要是针对基体 / 纤维两相界面难粘结的问题,目前大多数的改性处理都伴随着上浆剂或偶联剂的使用,但依旧存在着纤维表面损伤问题,易影响复合材料的综合力学性能^[54]。同时改性主要集中于碳纤维的前处理阶段,其工艺较为复杂且商业应用较低,可广泛应用的只有表面电解氧化处理和上浆处理^[42],所以后续应对 CFRP 界面改性方式进行不断的优化改进。

5 结语

基于 FDM 技术制备 CFRP 的关键技术在于工艺参数调控、多参数耦合优化、界面增强等方面,这对于实现高性能复合材料的制备与一体化快速制造具有重要意义,对促进 CFRP 的广泛应用具有重要指导价值。

相对于传统的 CFRP 成型技术,基于 FDM 工艺的 CFRP 成型技术具有生产成本低、工艺简单、成型时间短等优势,是复合材料制备、柔性制造领域的交叉研究方向,是一种前沿的应用技术。总结了目前国内外基于 FDM 技术的 CFRP 制备工艺以及在打印过程中工艺参数对于复合材料力学性能的影响。通过对 CFRP 界面成形机理进行分析,认为增强两相界面粘结效果是提高 CFRP 材料性能的关键,并总结了目前主要的界面改性方式及其对 CFRP 整体性能的影响。并对研究中发现的问题进行展望:在基于 FDM 工艺的 CFRP 直接成型法中,应继续探究加热块内部通路与界面浸润完整性等因素间的关系,并对纤维与树脂材料的熔融过程进行温度场的模拟,从而为 FDM 加热系统的设计提供理论指导;在打印过程中,虽然多种工艺参数已进行了不同程度的优化,但尚未出现完整的数学模型能够对多种工艺参数进行耦合优化,在综合多种工艺参数的前提下将 CFRP 的综合性能最大化;针对基体树脂 / 纤维的界面研究与改性,目前主要是通过增大纤维表面凹槽粗糙度来实现,但是这类改性通常伴随着纤维强度下降,应探究新的改性方法以规避此类问题,且目前可用于 CFRP 改性的工艺过程较为繁琐复杂,表面改性主要集中于前期处理阶段,后续研究应结合 FDM 便捷的特点,实现改性和打印制备同时进行。

参考文献

- [1] 陈为平,等. 工具技术,2019,53(8):10-14.
Chen Weiping, et al. Tool Engineering, 2019, 53(8):10-14.
- [2] 田振生,等. 玻璃钢 / 复合材料,2013(7):53-58.
Tian Zhensheng, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2013(7):53-58.
- [3] Giordano R A, et al. Journal of Biomaterials Science. Polymer Edition, 1996, 8(1):63-75.
- [4] Al-Mosawe A, et al. Composite Structures, 2017, 180:9-15.
- [5] 于天淼,等. 工程塑料应用,2018,46(4):139-144.
- [6] 梁晓静,等. 高分子通报,2018(4):27-35.
Liang Xiaojing, et al. Chinese Polymer Bulletin, 2018(4):27-35.
- [7] Goh G D, et al. Aerospace Science and Technology, 2017, 63:140-151.
- [8] Dickson A N, et al. Additive Manufacturing, 2017, 16:146-152.
- [9] Nakagawa Y, et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91:2811-2817.
- [10] Justo J, et al. Composite Structures, 2018, 185:537-548.
- [11] Caminero M A, et al. Composites Part B:Engineering, 2018, 148:93-103.
- [12] Aliheidari N, et al. Polymer Testing, 2017, 60:94-101.
- [13] Song Y, et al. Materials & Design, 2017, 123:154-164.
- [14] Hofstätter Thomas, et al. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2017, 36(15).doi:10.1177/0731684417695648.
- [15] Namiki M, et al. 3D printing of continuous fiber reinforced plastic[C]//SAMPE Seattle 2014 International Conference and Exhibition. Seattle, United States:Soc. for the Advancement of Material and Process Engineering, 2014.
- [16] Mori K I, et al. Procedia Engineering, 2014, 81:1595-1600.
- [17] Tian Xiaoyong, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2016, 88:198-205.
- [18] Kousiatza C, et al. Composites Science & Technology, 2019, 174:134-141.
- [19] 陈向明,等. 航空学报,2021,42(10):167-191.
Chen Xiangming, et al. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2021, 42(10):167-191.
- [20] Sun Q, et al. Rapid Prototyping Journal, 2008, 14(2):72-80.
- [21] Tian Xiaoyong, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2016, 88:198-205.
- [22] Liu Tengfei, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2018, 114:368-376.
- [23] Young D, et al. Additive Manufacturing, 2018, 22:508-515.
- [24] Aliheidari N, et al. Polymer Testing, 2017, 60:94-101.
- [25] 张肖男,等. 工程塑料应用,2019,47(8):91-95.
Zhang Xiaonan, et al. Engineering Plastics Application, 2019, 47(8):91-95.
- [26] Ning Fuda, et al. Journal of Composite Materials, 2017, 51(4):451-462.
- [27] Ming Yueke, et al. Additive Manufacturing, 2020, 33.doi:10.1016/j.addma.2020.101184.
- [28] Chacon J M, et al. Composites Science and Technology, 2019, 181.doi:10.1016/j.compscitech.2019.107688.
- [29] Mei Hui, et al. Additive Manufacturing, 2019, 27:150-158.
- [30] Al Abadi H, et al. Composite Structures, 2018, 193:8-18.
- [31] Dickson A N, et al. Additive Manufacturing, 2017, 16:146-152.

- ogy, 2017, 30:181–185.
- [11] Komine T, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2018, 31:625–628.
- [12] Tanimoto A, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2017, 30:231–233.
- [13] Tomikawa M, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2015, 28:73–77.
- [14] Masuda Y, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2018, 31:629–632.
- [15] Sasaki T. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2016, 29(3):379–382.
- [16] Inoue H, et al. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 60:123–131.
- [17] Kuznetsov A. High Performance Polymers, 2000, 12:445–460.
- [18] Jin Liang, et al. European Polymer Journal, 2009, 45:2 805–2 811.
- [19] Leu T S, et al. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 2001, 39:4 139–4 151.
- [20] Shoji Y, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2016, 29:277–282.
- [21] Takahashi H, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2015, 28:215–218.
- [22] Onishi H, et al. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2012, 25:341–344.
- [23] Keisuke K, et al. Macromolecules, 1995, 28(6):1 801–1 806.
- [24] Mochizuki A, et al. Polymer, 1995, 36(11):2 153–2 158.
- [25] Seino H, et al. Polymer, 1999, 40:551–558.
- [26] Yoo D K, et al. Journal of Chemical Engineering of Japan, 2005, 38:615–622.
- [27] Zhou Heng, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 122: 3 493–3 503.
- [28] Oba M. Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, 1996, 34:651–658.
- [29] Xu Yong, et al. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2016, 31:1 137–1 143.
- [30] Fukukawa K I, et al. Polymer for Advanced Technologies, 2006, 17:131–136.
- [31] Huang Chao, et al. Macromolecular Materials and Engineering, 2019, 304(12).doi:10.1002 / mame.201900505.
- [32] Yeh Y M, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2020, 32(2):663–669.
- [33] Tseng L Y, et al. Reactive and Functional Polymers, 2020, 157.doi: 10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104760.
- =====
- (上接第 156 页)**
- [32] Caminero M A, et al. Composites Part B: Engineering, 2018, 148:93–103.
- [33] Sanatgar R H, et al. Applied Surface Science, 2017, 403:551–563.
- [34] Melenka G W, et al. Composite Structures, 2016, 153:866–875.
- [35] Mäder E, et al. Composites Science and Technology, 2007, 67(15–16):3 140–3 150.
- [36] Hung K-B, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(7):1 133–1 140.
- [37] 应淑妮. 玄武岩纤维的性能及其增强热塑性复合材料的界面改性 [D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
- Ying Shuni. Mechanical performance and interfacial modification of long basalt fiber reinforced thermal plastics composites[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.
- [38] 夏正付. 纤维增强复合材料增材制造技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- Xia Zhengfu. Study on additive manufacturing of fiber reinforced thermo-plastic composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [39] Guo H, et al. Materials Letters, 2009, 63(17):1 531–1 534.
- [40] Ezekiel H B, et al. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2008, 69(11):2 932–2 935.
- [41] Ma Quansheng, et al. Applied Surface Science, 2016, 379:199–205.
- [42] Sun Jingfeng, et al. Applied Surface Science, 2017, 412:424–435.
- [43] Lee H, et al. Applied Surface Science, 2015, 328:241–246.
- [44] Wang Y, et al. Surface Engineering, 2016, 32(3):218–222.
- [45] John K, et al. Frontiers in Materials, 2019, 6.doi:10.3389/fmats.2019.00224.
- [46] Papageorgiou D G, et al. Progress in Materials Science, 2017, 90:75–127.
- [47] Zhang R L, et al. Elsevier, 2016, 93:364–369.
- [48] Li Yibin, et al. J Mater Chem, 2012, 22:18 748–18 752.
- [49] 刘秀影, 等. 无机化学学报, 2011, 27(11):2 128–2 132.
- Liu Xiuying, et al. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2012, 27(11):2 128–2 132.
- [50] 李英睿. 纤维增强复合材料超声辅助增材制造技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- Li Yingrui. Study on additive manufacturing of fiber reinforced composites by using ultrasound assisted technique[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [51] Liu Bing, et al. Research on Chemical Intermediates, 2016, 42(8):6 745–6 755.
- [52] Qiao Jing, et al. Additive Manufacturing, 2019, 30.doi:10.1016/j.addma.2019.100926.
- [53] 马克明. RTM 成型碳 / 环氧复合材料非平衡浸润过程与界面性能调控 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
- Ma Keming. Nonequilibrium wetting process and interface properties regulation of carbon / epoxy RTM composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [54] Yamawaki M, et al. Advanced Composite Materials, 2018, 27(2): 209–219.