

基于FDM的连续纤维增强复合材料3D打印技术的优化研究

魏 胜

广东三绿科技有限公司 广东 中山 528400

摘 要：本研究聚焦于基于熔融沉积建模（FDM）的连续纤维增强复合材料3D打印技术，旨在解决当前该技术在实际应用中所面临的诸多问题，通过对打印工艺参数、纤维预处理方法、复合材料配方等方面的优化研究，显著提升连续纤维增强复合材料3D打印制品的性能，拓展其在航空航天、汽车制造、医疗器械等领域的应用范围。研究结果表明，优化后的打印工艺和材料体系能有效增强打印制品的力学性能，为3D打印技术在高性能复合材料制造领域的进一步发展提供了理论依据和实践指导。

关键词：熔融沉积建模；连续纤维增强复合材料；3D打印；工艺优化

引言

传统FDM技术打印出的制品在力学性能方面存在一定的局限性，难以满足对材料强度和刚度要求较高的应用场景。连续纤维增强复合材料具有优异的力学性能，如高强度、高模量等，将连续纤维引入FDM 3D打印技术中，能够显著提升打印制品的力学性能，使其在航空航天、汽车制造、医疗器械等领域具有巨大的应用潜力。但目前基于FDM的连续纤维增强复合材料3D打印技术仍面临一些挑战，如纤维与基体之间的界面结合强度不足、纤维在打印过程中的分布不均匀、打印工艺参数对制品性能影响复杂等。因此，对该技术进行优化研究具有重要的现实意义^[1]。

1 FDM 连续纤维增强复合材料 3D 打印技术原理

基于传统FDM技术的改进，连续纤维增强复合材料3D打印技术应运而生。在此工艺中，热塑性基材（如ABS、PLA等）与连续纤维（例如碳纤维或玻璃纤维）同步送入打印机喷嘴。随着热塑性材料在喷嘴内部加热至熔化状态，连续纤维则在一定的拉力作用下穿过喷嘴，并与融化的基体材料相融合后被挤出，逐层堆叠形成三维物体。此过程中，连续纤维作为增强成分，承担主要负荷，从而提升成品的强度和刚度；而热塑性基材则负责将这些纤维粘合起来，不仅传递应力，还为纤维提供防护，防止其受到外部环境的影响。通过这两种材料之间的协同效应，最终制造出的物品展现出了卓越的机械性能^[2]。

2 影响 FDM 连续纤维增强复合材料 3D 打印制品性能的因素

2.1 打印工艺参数

在采用FDM技术进行连续纤维增强复合材料三维打印时，工艺参数的选择对于成品性能有着决定性的影响。特别是温度控制、推进速率以及层间厚度这几个因素尤为关键。

打印过程中的温度条件对最终产品的性能具有决定性影响。喷头内部的温度水平直接影响到基础材料的物理状态及其化学特性。若打印时温度设置过高，基础材料长时间暴露于高温环境之中，可能导致一系列热降解现象的发生。如果打印温度过低，则基材不能充分熔化。例如，在使用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物（ABS）时，不完全熔化的ABS呈现出半固体状态，流动性较差，难以实现与增强纤维的良好结合。这样一来，由于纤维与基体间粘附力不足，在承受外力作用时容易出现分层现象，无法有效分散应力，进而严重影响制品的整体力学性能^[3]。

层厚也是影响制品质量的关键因素之一，对制品的表面光洁度及力学特性有着显著的作用。当层厚较大时，在打印过程中会导致制品表面变得较为粗糙。这是由于较厚材料层在堆积时难以精确控制其形态和定位，从而引起表面出现不平整的情况。因为层厚增加使得相邻两层接触面积相对减小，并且在打印过程中，层间的熔融物料难以充分扩散与融合，这直接导致了层间结合力下降。当制品承受外力作用时，容易产生分层现象，严重影响其力学性能。

2.2 纤维预处理方法

在利用FDM技术进行连续纤维增强复合材料3D打印的过程中，对纤维的预处理步骤对于改善最终产品的性能至关重要。特别是，通过优化纤维表面特性以及增强其与

基体材料间的浸润性,可以显著提高复合材料的质量。

纤维表面的处理技术可以显著增强纤维与基体材料间的界面结合性能。以碳纤维为例,由于其固有的化学稳定性及较低的表面活性,使得它与诸如ABS、PLA等热塑性基材之间的连接不够牢固。比如,通过氧化手段可以在碳纤维表面上添加羟基或羧基等含氧官能团,这些新形成的官能团能够与基体中的相应化学结构发生交互作用,形成更加坚固的化学链接,进而大幅度提升了两者间的结合强度。另一方面,等离子体处理技术则是利用高能粒子对纤维表面进行撞击,以此方式不仅增加了表面的粗糙程度还提高了活性位点的数量,同样有助于强化纤维-基体间的结合效果。

纤维的预处理,特别是通过浸润处理,对于确保其能够有效地被基体材料包裹至关重要。在打印过程中,为了使纤维均匀分布并牢固地结合于基体材料中,从而最大化发挥其增强效果,使用适当的浸润剂来预处理纤维显得尤为关键。这种方法能显著减少纤维与基体间存在的界面张力。比如,某些具备特定官能团的有机化合物作为浸润剂时,能够在纤维表面生成一层薄保护层,此层不仅有助于缩小纤维与基体之间表面能量的差异,还促进了两者之间的相互渗透。当经过预处理的纤维遇到熔融状态下的基体材料时,由于界面张力减小,基体可以更快且更均匀地覆盖纤维,增强了纤维在基体内的分散度和亲和力。这种良好的结合状态意味着,在外力作用下,应力能够更加高效地从基体转移到纤维上,进而极大地提升了最终产品的机械性能,如抗拉强度、抗弯强度及冲击韧性等方面均有明显改善。

2.3 复合材料配方

在采用FDM技术进行连续纤维增强复合材料3D打印的过程中,材料配方对于最终产品性能有着决定性的影响。特别是在基体材料的选择及纤维比例的设定上,这两个方面的重要性尤为突出。

选择合适的基体材料对于确保制品性能至关重要,不同类型的热塑性基体材料具备各自独特的机械、热学以及加工特性。例如,ABS作为一种广泛应用的工程塑料,以其优异的抗冲击性能著称。这种性质使得基于ABS作为基体的连续纤维增强复合材料,在面对冲击负荷时能够吸收大量能量而不易发生脆性断裂。在3D打印汽车内饰件的应用中,通过将ABS与连续纤维结合使用,可以生产出既拥有足够强度又能有效缓冲碰撞力的部件,从而提升了车辆内部的安全性和耐用度。另一方面,PLA材料因其良好的生物相容性和可降解性而受到青睐。这使得以PLA为基体制成的连续纤维增强复合材料特

别适合应用于医疗设备及生物医学领域^[5]。

纤维成分的比例直接影响到制品的力学特性。通常,在一定区间内,随着纤维比例的提升,制品的强度与刚度亦随之增强。这主要是因为连续型纤维具备较高的强度及模量,在复合材料体系中能够承担主要负载,发挥强化效果。例如,在玻璃纤维强化热塑性复合材料中,当玻璃纤维含量从较低水平逐步增加时,制品的拉伸强度和弯曲强度将显著提高。然而,一旦纤维含量超出某一临界点,问题便会显现。过量的纤维难以在基体中均匀分布,易形成团聚现象。这些团聚区域成为材料内部缺陷,在承受外力作用下,缺陷部位会产生应力集中,导致材料提前破坏。因此,通过实验研究与理论分析确定最优纤维含量,对于优化复合材料配方、提高产品性能至关重要。

3 FDM 连续纤维增强复合材料 3D 打印技术的优化策略

3.1 优化打印工艺参数

在打印工艺参数的优化过程中,温度控制占据着极其重要的地位。对于不同的热塑性材料而言,确定一个精确的温度区间是至关重要的。比如,在处理ABS这类材料时,经过一系列实验对比后发现,将喷嘴的加热温度维持在230至250摄氏度之间,不仅能够确保材料得到充分熔融,同时也能有效防止因温度过高而导致的材料降解问题。此外,采用高精度的温度传感器对喷嘴的实际温度进行实时监控,并与智能温控系统相结合,根据打印过程中的具体需求动态调整加热功率,以此来保证整个打印过程中温度的稳定性^[4]。

推进速度的合理优化至关重要。若推进速度过快,可能会导致材料挤出不均,从而影响纤维与基体之间的充分结合;反之,如果推进速度过于缓慢,则会降低生产效率。为此,建议采用一种基于速度控制的算法,该算法能够依据模型结构的复杂程度及所用材料的特点来动态调整推进速度。具体来说,在处理较为简单的几何形状时,可以适当增加推进速度以提高工作效率;而在面对复杂的曲面设计或需要精细加工的部分时,则应减慢推进速度,以确保材料被均匀挤出且纤维分布稳定可靠。

在层厚的选择上,应当综合考虑制品的功能需求及其表面质量的标准。对于那些对光滑度有较高要求的产品,建议采用0.1至0.2毫米的薄层设置;而对于需要更强机械性能的部件,则可以在不影响外观品质的情况下,将层厚度调整至0.3至0.4毫米。此外,在制造过程中引入振动辅助技术能够有效促进各层材料之间的扩散与融合,从而加强相邻层间的粘结强度^[5]。

3.2 改进纤维预处理方法

在纤维表面处理过程中,采用多种技术协同作业的方式显得尤为重要。以碳纤维为例,首先通过氧化处理引入含氧官能团,随后利用等离子体处理进一步增强其表面的粗糙度及活性位点数量。这种组合式处理方法有效提升了碳纤维与基体材料之间的界面结合强度。经过处理后的测试表明,相较于单一技术的应用,复合处理方案可使界面结合强度增加30%至50%。

在进行浸润处理的过程中,专门开发了适用于特定条件下的浸润剂配方。根据纤维和基体材料的不同组合,设计了具备特定定位点功能团的浸润剂。以碳纤维增强聚乳酸(PLA)复合材料为例,研究并应用了一种含有羧基与羟基官能团的浸润剂,旨在纤维表面构建一层稳定的保护层,有效降低界面张力。通过采用微滴喷射装置来精确调控浸润剂的施加量及其分布均匀性,保证每一根纤维都能得到充分的浸渍,从而提升了纤维在基质中分布的均匀性和结合强度。

3.3 优化复合材料配方

选择基体材料时,需要全面考量多种因素。在航空航天领域,由于对材料的强度、刚度及耐高温性能有极高的要求,因此可选用高性能聚醚醚酮(PEEK)作为基体材料。对于汽车轻量化应用而言,则需在保证一定强度的前提下,同时兼顾成本效益,此时性价比优异的聚丙烯(PP)与连续纤维复合材料成为优选方案之一。通过对材料性能进行测试并结合成本效益分析,能够为不同的应用场景挑选出最适合的基体材料。

为了确定纤维的最佳配比,通常需要通过广泛的实验和数值模拟来完成。以玻璃纤维增强的热塑性复合材料为例,研究者可以采用专门的材料仿真软件来预测不同纤维含量条件下材料力学特性的变化趋势,并通过实际打印测试加以验证。经过多次迭代实验后发现,在某一特定类型的热塑性基体中,当玻璃纤维的比例控制在30%至40%之间时,可以获得最佳的整体性能表现,这样

既能够确保足够的强度与刚度,同时也能有效避免因纤维聚集或流动性降低所导致的问题。

结束语

综上所述,本研究针对基于FDM的连续纤维增强复合材料3D打印技术存在的问题,从打印工艺参数、纤维预处理方法和复合材料配方等方面进行了优化研究。通过优化,显著提升了连续纤维增强复合材料3D打印制品的力学性能,改善了制品的微观结构。优化后的打印工艺参数、纤维预处理方法和复合材料配方为该技术的实际应用提供了重要的参考依据。未来,随着研究的不断深入,基于FDM的连续纤维增强复合材料3D打印技术有望在更多领域得到广泛应用,为制造业的发展带来新的机遇。

参考文献

- [1]关博文,张代军,王成博,杨方鸿,叶璐,陈祥宝.基于FDM的连续纤维增强复合材料3D打印技术研究进展[J].复合材料科学与工程,1-10.
- [2]曹丰,曾志勇,黄建,张风华,钱坤,李文兵.连续纤维增强复合材料的3D打印工艺及应用进展[J].中国科学:技术科学,2023,53(11):1815-1833.
- [3]张聘,王奉晨,李玥莹,庄悦希,丁守岭,邹斌.连续纤维增强复合材料3D打印技术现状及展望[J].航空制造技术,2023,66(16):76-87.
- [4]Wanying Zhu,Shixian Li,Hongmei Long,Shaoqi Dong,Kui Wang,Yong Peng.Simulation analysis and optimization of 3D printed continuous carbon fiber reinforced composites[J].Composite Structures,2025,355118840-118840.
- [5]Jiale Yi,Ben Deng,Fangyu Peng,Aodi Yan,Zhijie Li,Jinguo Shen,Rong Yan,Xiaopeng Xie.Study on the parameters optimization of 3D printing continuous carbon fiber-reinforced composites based on CNN and NSGA-II[J].Composites Part A,2025,190108657-108657.