

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.04.009

聚醚醚酮增材与减材复合加工对比实验

周浩¹, 程祥¹, 闫新华², 郑光明¹, 姜秀丽³, 董瑞春¹, 李阳¹(1. 山东理工大学机械工程学院, 山东淄博 255000; 2. 诺伯特智能装备(山东)有限公司, 山东聊城 252022;
3. 山东省机械设计研究院, 济南 250031)

摘要: 为研究熔融沉积成型聚醚醚酮(PEEK)材料的竖直和水平两种层间结合强度对复合加工质量的影响,以曲面模型为研究对象展开对比实验,沿竖直和水平方向堆积打印 a_1 , a_2 和 b_1 , b_2 两组试样,对 a_1 , b_1 试样进行沿横向曲面铣削加工,对 a_2 , b_2 试样进行沿纵向曲面铣削加工,对铣削力、表面粗糙度和表面形貌进行对比分析。结果表明,不同打印方向试样的铣削表面质量有明显不同。 a_1 , a_2 试样的铣削面出现毛刺、分层等缺陷,表面粗糙度分别为 3.620, 3.546 μm 。 b_1 , b_2 试样的铣削面光滑,表面粗糙度分别为 1.220, 1.393 μm ;不同方向走刀未对打印成型试样铣削加工质量产生影响;试样层间结合强度随距底板热床高度产生变化,但对铣削加工质量的影响较小;综合来看,竖直层间结合强度过低是造成复合加工质量差的主要原因。

关键词: 聚醚醚酮; 复合加工; 熔融沉积成型; 层间结合强度; 表面粗糙度

中图分类号: TG547 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)04-0046-06

Comparative Experiment on Additive and Subtractive Combined Machining of Polyetheretherketone

Zhou Hao¹, Cheng Xiang¹, Yan Xinhua², Zheng Guangming¹, Jiang Xiuli³, Dong Ruichun¹, Li Yang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Nobot Intelligent Equipment (Shandong) Co., Ltd., Liaocheng 252022, China; 3. Shandong Institute of Mechanical Design and Research, Jinan 250031, China)

Abstract: In order to study the effects of vertical and horizontal interlayer binding strength of melt deposition formed polyether ether ketone (PEEK) material on combined machining quality, a surface model was taken as the research object to conduct a comparative experiment. Two groups of samples a_1 , a_2 , b_1 , and b_2 were stacked and printed along the vertical and horizontal directions. The samples a_1 and b_1 were milled along the transverse surface, and the samples a_2 and b_2 were milled along the longitudinal surface. The milling force, surface roughness and surface morphology were compared and analyzed. The results show that the milling surface quality of the printed samples is obviously different with different directions. The samples a_1 and a_2 milling surfaces have burrs, stratification and other defects. The surface roughnesses are 3.620 μm and 3.546 μm , respectively. The milling surfaces of samples b_1 and b_2 are smooth with surface roughnesses of 1.220 μm and 1.393 μm , respectively. The milling quality of printed samples is not affected by different cutting directions. The interlayer binding strength of the samples varies with the height from the hot bed to the bottom plate, but it has little effect on the milling quality. Generally speaking, the low vertical interlayer binding strength is the main reason for the poor quality of combined machining.

Keywords: polyetheretherketone; combined machining; fused deposition modeling; interlayer binding strength; surface roughness

聚醚醚酮(PEEK)材料具有无毒、耐高温、耐腐蚀、耐磨损、高强度、高韧性、生物相容性好等优点,已成功应用于临床,取得了良好的临床疗效和

广泛的认可^[1]。增减材复合加工技术是将传统数控(CNC)技术与增材制造(AM)技术相结,一方面规避了AM技术的尺寸偏差、台阶效应、表面质量

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME157),2020年度山东省新旧动能转换重大工程重大课题攻关项目

通信作者: 程祥,教授,博士,研究方向为超精密加工技术与装备

收稿日期: 2022-01-14

引用格式: 周浩,程祥,闫新华,等.聚醚醚酮增材与减材复合加工对比实验[J].工程塑料应用,2022,50(4):46-51.

Zhou Hao, Cheng Xiang, Yan Xinhua, et al. Comparative experiment on additive and subtractive combined machining of polyetheretherketone[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):46-51.

不佳等问题;另一方面能够充分发挥 CNC 技术高精度和高表面质量的优势^[2]。增减材复合加工技术在 PEEK 材料研究领域的应用,满足了人们对人工植入物的个性化制造需求。熔融沉积成型 (FDM) 技术成本低、操作简单,广泛应用于复合制造的增材部分。但由于 FDM 打印逐层堆积成型过程中,材料冷却快、结合面温差大,导致挤出单根材料的层间结合强度差,如图 1 所示。其中单根材料的结合层间又分为水平层间和竖直层间,竖直层间结合强度只达到水平层间的 40%~50%^[3]。因此 FDM 打印材料的整体力学性能和可加工性均小于注塑材料^[4],其竖直方向表现出最差的力学性能^[5-6]。由于 PEEK 材料的熔点比一般复合材料更高,这一问题更加显著。在复合加工时,铣削表面会出现毛刺多、层间分离和凹坑等问题^[7],阻碍了 PEEK 材料复合制造的应用。

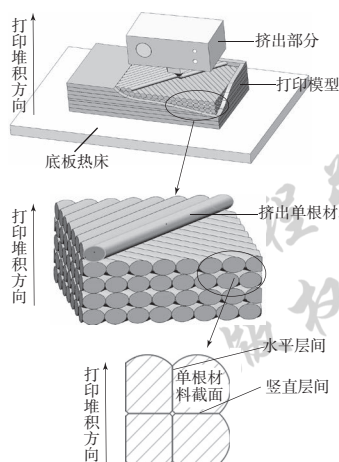


图 1 FDM 打印层间结合原理图

关于提升 PEEK 材料复合加工质量的研究,吕福顺等^[8]以尺寸误差为指标,选取层厚、打印速度和喷嘴温度三个因素展开优化实验,选取合适的铣削参数,提高了打印 PEEK 的表面精度。王鹏等^[9]以水平方向的整体拉伸强度和打印表面粗糙度为指标,优化了打印工艺参数,以铣削表面粗糙度为指标,优化了平面铣削工艺参数。刘徽等^[10-11]以打印时间、打印材料消耗量、储能模量为响应值,优化了打印工艺参数,以表面粗糙度为响应值,优化了平面和曲面铣削工艺参数。赵广宾等^[12]、於天鹏等^[13]、史长春等^[14]、李莎莎^[15]和赵峰^[16]都以水平方向的力学性能为指标,研究了 PEEK 材料 FDM 打印的工艺参数。结合目前的研究来看,减材部分的研究均以加工表面粗糙度为指标,平面和曲面铣削的研

究较为成熟;对增材部分的研究主要以打印尺寸误差、表面粗糙度、水平方向力学性能等为指标。但是对于复合制造来说,增材过程所造成的表面精度问题最后都会通过减材部分消除,所以增材部分的尺寸误差和表面粗糙度对最后的表面加工质量影响不大。以水平方向的力学性能为指标,提高了整体力学性能,但忽略了结合强度最差的竖直层间。铣削过程铣削力方向和大小分布复杂多变,必然先破坏结合最薄弱的竖直层间,即便使用优化后的铣削参数,加工后的力学性能和表面质量相比注塑材料还是有较大差距。这表明目前关于 PEEK 材料复合制造增材部分的研究还不够全面,尚缺乏针对两种层间结合部分对复合制造质量影响的研究。

鉴于此,笔者把沿不同堆积方向打印的两组模型,分别沿横、纵两个方向走刀铣削,结合 FDM 打印材料的微观结构和层间结合力分布特点,综合分析铣削力、加工表面形貌和表面粗糙度等实验结果,研究了打印 PEEK 材料的水平层间结合部分和竖直层间结合部分对铣削质量的影响。

1 实验部分

1.1 主要原料

PEEK 线材: PEEK5600G, 直径 1.75 mm, 热变形温度 $\geq 151^{\circ}\text{C}$, 江苏君华特种工程塑料制品有限公司。

1.2 主要仪器与设备

熔融增材与铣削减材复合加工机床: ASM-03 型, 增材部分的喷头温度可达 450°C , 热床温度可达 260°C , 减材部分的主轴转速可达 10 000 r/min, 山东博创机械科技有限公司;

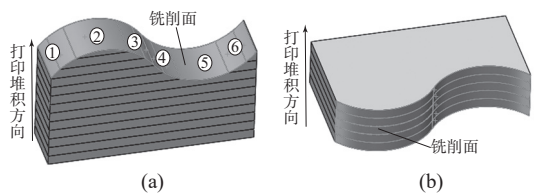
三向测力仪: Kistler9257B 型, 瑞士奇石乐公司;
粗糙度仪: TR200 型, 常州三丰仪器科技有限公司;

电子显微镜: F210 型, 深圳卓创富科技有限公司。

1.3 试样制备

(1) 增材加工试样制备。

使用三维软件 Solidworks 绘制曲面模型并以 STL 格式导入 Ultimaker Cura 软件进行切片。分别按铣削面垂直、平行于堆积方向打印两组试样, 如图 2 所示, 每组分别打印 2 个试样, 分别用 a_1 、 a_2 和 b_1 、 b_2 表示。打印工艺参数设置为: 喷头温度为 370°C , 热床温度为 230°C , 层高为 0.3 mm, 填充方式为直线, 填充角度为 $\pm 45^{\circ}$ 。

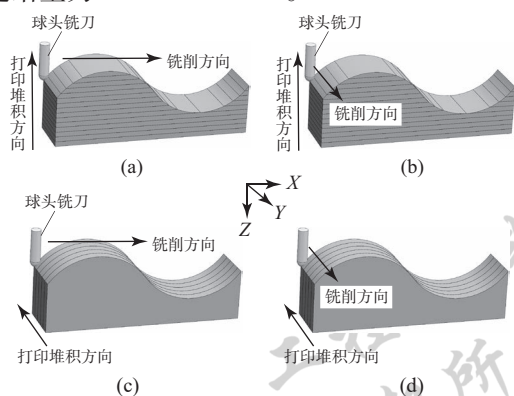


a—铣削面垂直打印堆积方向;b—铣削面平行打印堆积方向

图2 曲面模型及堆积方向

(2) 减材加工试样制备。

使用球头铣刀对曲面进行铣削加工,每组的2个试样分别沿 X 向横向走刀、沿 Y 向纵向走刀,如图3所示。减材部分采用PEEK材料最优的铣削工艺参数,使用2 mm的球头铣刀进行铣削加工,设置主轴转速为3 500 r/min、切削深度为0.2 mm、每齿进给量为0.06 mm^[10-11,17]。



a— a_1 试样;b— a_2 试样;c— b_1 试样;d— b_2 试样

图3 试样减材加工方案

1.4 性能测试

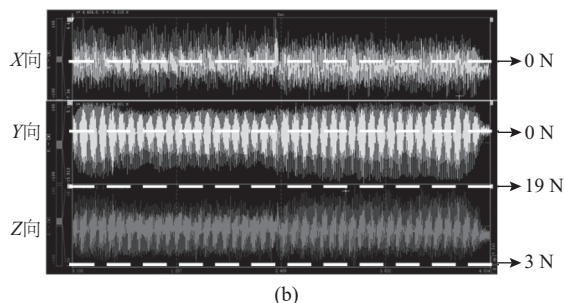
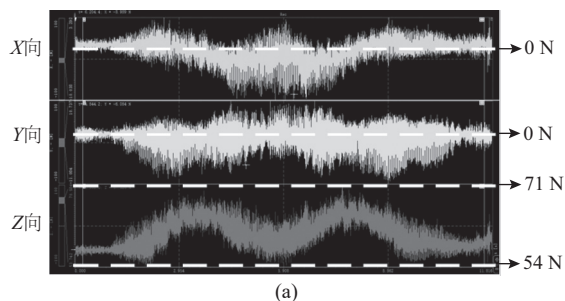
在每个试样的曲面上选取6个位置点,如图2a所示,使用三向测力仪测量这6个位置点铣削时的受力情况,使用粗糙度仪测量铣削后的表面粗糙度平均值(R_a)及表面形貌,结合材料成型结构综合分析实验结果;

使用电子显微镜观察加工试样的表面形貌。

2 结果与讨论

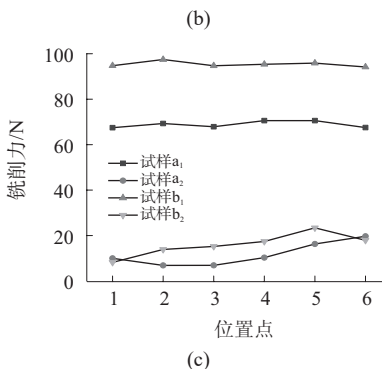
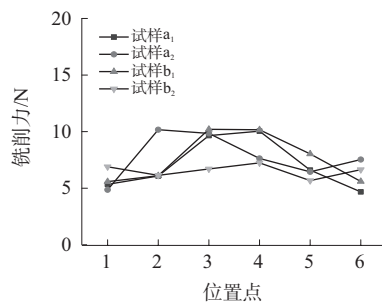
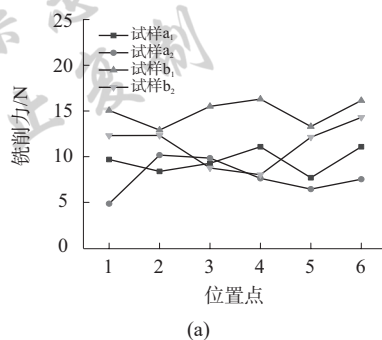
2.1 铣削力测试

三向测力仪数据记录界面如图4所示。由图4可以看出,无论哪个方向走刀铣削,在铣削过程中 X 、 Y 向的铣削力都在0 N上下正负方向交替变化, Z 向的铣削力始终在正方向范围内波动。笔者研究了铣削力对打印试样的微观破坏情况, X 、 Y 、 Z 向的铣削力只取铣刀经过测量位置点时段内的最大力数值。依照此方法,沿曲面轮廓选取试样在如图2a所示的6个位置点,对其在 X 、 Y 、 Z 三方向的铣削力数据进行对比分析,结果如图5所示。



a—横向走刀;b—纵向走刀

图4 三向测力仪数据记录界面



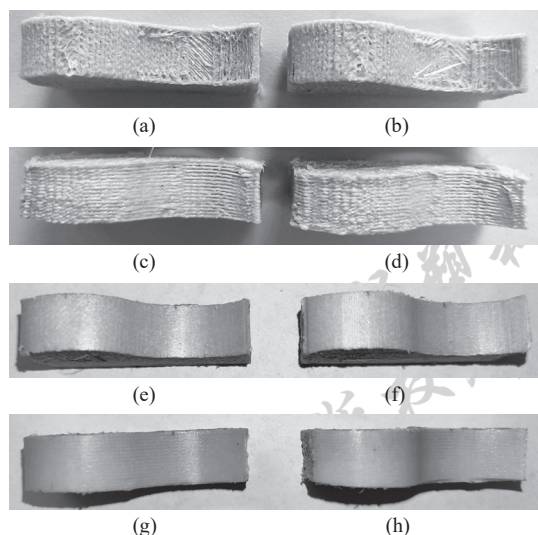
a— X 向铣削力对比;b— Y 向铣削力对比;c— Z 方向铣削力对比

图5 三向铣削力对比

从图 5 可以看出,在两种走刀方式下, X 向的铣削力大小相差不大,整体在 $5 \sim 15 \text{ N}$ 之间; Y 向的铣削力也相差不大,整体在 $5 \sim 10 \text{ N}$ 之间。但是, Z 向的铣削力相差较大,沿 X 向横向走刀时, Z 向的铣削力在 $60 \sim 100 \text{ N}$ 之间,沿 Y 向纵向走刀时, Z 向的铣削力在 $6 \sim 20 \text{ N}$ 之间。出现这种现象是因为沿 Y 向纵向走刀铣削时,铣刀的高度和铣刀与铣削面的接触角度不变化, Z 向的铣削力较小。而沿 X 向横向走刀铣削时,铣刀的高度和铣刀与铣削面的接触角度变化较大, Z 向的铣削力较大。

2.2 加工表面质量测试

加工试样的整体外观形貌如图 6 所示。从图 6 可以看出,复合加工后的试样整体质量相比仅增材制造试样有较大提高。

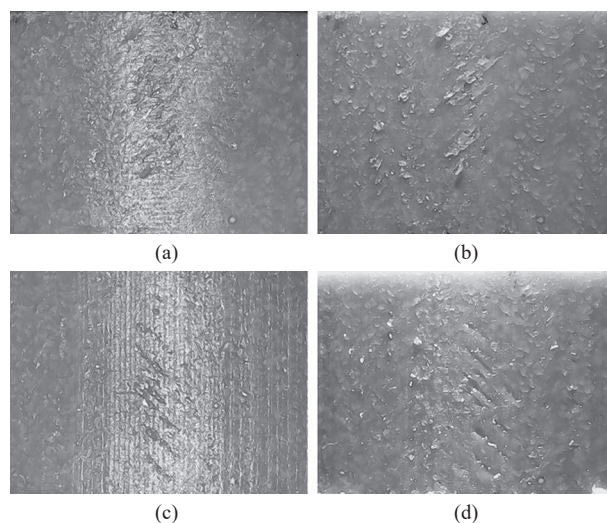


a—增材加工 a_1 试样;b—增材加工 a_2 试样;c—增材加工 b_1 试样;
d—增材加工 b_2 试样;e—减材加工 a_1 试样;f—减材加工 a_2 试样;
g—减材加工 b_1 试样;h—减材加工 b_2 试样

图 6 加工试样的整体外观形貌

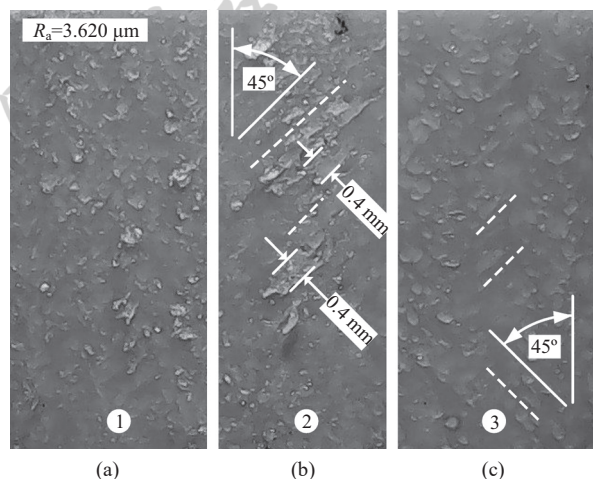
对复合加工后两组试样的表面进行观察,复合加工后 a 组试样的表面质量如图 7 所示。从图 7 可以看出, a_1 、 a_2 试样表面都有大量毛刺和白色斑点,经测量得到其 R_a 分别为 $3.620, 3.546 \mu\text{m}$,表面质量相差不大,故选取 a_1 试样进行加工表面形貌分析。

复合加工后 a_1 试样的表面形貌如图 8 所示。观察图 8 可发现,其表面缺陷类型主要分为 3 种:较小毛刺集中在位置点 1,3 区域;较大毛刺、整条材料脱落集中出现在位置点 2 区域;白色斑点较多,整个铣削曲面上都有分布。仔细观察这些毛刺(图 8 中虚线)可发现,其走向与 Y 向呈 $\pm 45^\circ$,最大宽度约为 0.4 mm 。而模型打印过程中的填充角度为



a— a_1 试样正光拍摄;b— a_1 试样侧光拍摄;
c— a_2 试样正光拍摄;d— a_2 试样侧光拍摄

图 7 复合加工后 a 组试样的表面质量



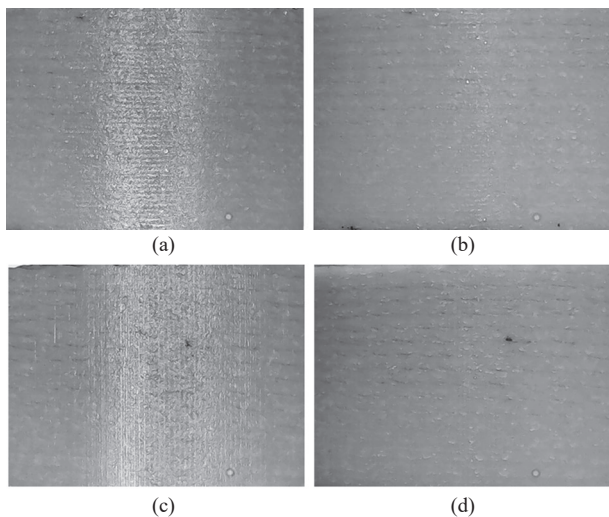
a—位置点 1 区域;b—位置点 2 区域;c—位置点 3 区域

图 8 复合加工后 a_1 试样的表面形貌

$\pm 45^\circ$,喷头直径为 0.4 mm ,与毛刺尺寸和走向对应。说明毛刺和材料脱落,实际上是喷头挤出的单根材料层间结合强度不足,受铣削力作用造成的,白色斑点则是竖直层间已经分离,但还未翘起的毛刺。

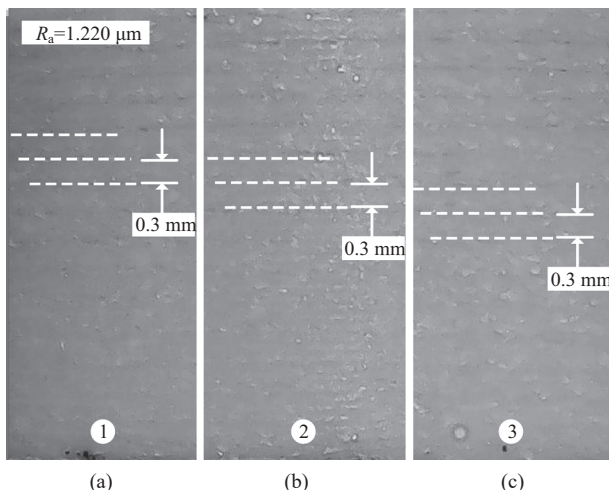
复合加工后 b 组试样的表面质量如图 9 所示。从图 9 可以看出, b_1 、 b_2 试样表面几乎无毛刺和白色斑点,经测量得到其 R_a 分别为 $1.220, 1.393 \mu\text{m}$,表面质量相差不大,故选取 b_1 试样进行加工表面形貌分析。

复合加工后 b_1 试样的表面形貌如图 10 所示。从图 10 可以看出, b_1 试样表面光滑,加工质量明显优于 a_1 试样,加工表面从下往上出现了越来越明显的横线(图 10 中虚线)。这些横线在半透明的 PEEK 表层之下,没有影响到 R_a 和光泽度,可见并



a—b₁ 试样正光拍摄; b—b₁ 试样侧光拍摄;
c—b₂ 试样正光拍摄; d—b₂ 试样侧光拍摄

图 9 复合加工后 b 组试样的表面质量



a—位置点 1 区域; b—位置点 2 区域; c—位置点 3 区域

图 10 复合加工后 b₁ 试样的表面形貌分析示意图

不是铣削加工造成的。这些横线沿堆积打印方向呈平行分布,两线间距为 0.3 mm,与打印层高相同,说明这些线即为竖直层间结合线。图 10 中向下为热床底板的方向,随着打印高度的增加,热量传递越来越差,上下两层温差变大,竖直层间结合强度下降,所以出现了横线纹路越来越明显的现象。

通过对比以上表面形貌和粗糙度可以看出,相同堆积方向打印的 a₁, a₂ 试样铣削表面质量相似, b₁, b₂ 试样铣削表面质量相似。不同堆积方向打印的 a, b 两组试样铣削表面质量出现了较大差异, b 组表面质量明显优于 a 组。

2.3 试样对比分析

结合铣削力和表面质量,对比分析 a₁, a₂ 试样可知, X, Y 向铣削力大小大致相同, Z 向的铣削力

大小有明显差异,但最后的表面加工质量差别不大。说明 Z 向铣削力对 FDM 打印试样的铣削质量影响作用不明显。对比分析 a₁, b₁ 试样可知,铣削方式相同,所受铣削力情况类似,但最后的铣削加工质量却出现了明显差异。说明对于 PEEK 材料来说,增材加工过程形成的材料自身特性对复合加工质量产生的影响大于减材加工对复合加工质量产生的影响。增材加工材料的自身特性为主要影响因素,而 a, b 两组铣削试样增材加工过程形成的特性主要存在两点不同:

(1) 热床底板对试样的影响不同。热床底板距铣削面距离不同导致层间结合强度不同。a 组模型的铣削面距离热床底板的最远距离为 20 mm,其 $R_a=3.583 \mu\text{m}$;最近距离为 10 mm,其 $R_a=3.362 \mu\text{m}$ 。b 组试样的铣削面距热床底板的距离为 0~10 mm,但其 R_a 沿高度的变化并不明显,其 $R_a=1.2743 \mu\text{m}$ 。a, b 两组试样中,距离热床底板高度都为 10 mm 的铣削面,其 R_a 却相差较大,可见热床底板距铣削面高度不同所产生的影响不是造成 a, b 组试样铣削质量产生差异的主要原因。

(2) 堆积方向不同,挤出单根材料所受主要影响铣削力的部分不同。a₁, a₂ 试样的对比已经证明 Z 向的铣削力对最后加工质量的影响很小,影响最后铣削质量的是水平剪切力(即 X, Y 向的铣削力合力)和试样自身受力结构。a 组试样堆积方向垂直铣削面向上, b 组试样是沿铣削模型的侧面堆积打印,堆积方向平行于铣削面。a 组试样铣削时竖直层间结合面与水平方向的剪切力相平行,剪切力正好作用在挤出单根材料结合强度最弱的竖直层间结合部分。而 b 组试样铣削时,水平方向铣削力主要作用在单根材料的水平层间结合部分。因为材料的竖直层间的结合强度要远小于水平层间的结合强度,所以才会出现相比于 b 组试样, a 组试样表面质量明显较差的现象,可以说明竖直层间结合强度较差是影响复合加工质量的主要因素。

3 结论

对沿不同堆积方向打印的两组曲面模型进行铣削对比实验。通过对材料结构、铣削力和加工表面质量的分析,得出如下结论:

(1) 在实验确定的铣削工艺参数下,横向走刀和纵向走刀对 FDM 打印试样铣削加工质量的影响不大。

(2) 打印试样的层间结合强度随试样距底板热

床的高度增加而减小,但不是影响实验结果的主要因素。

(3) 挤出单根材料的层间结合强度不足会大大降低铣削质量,其中竖直层间结合强度过低是主要影响因素。需进一步提高打印材料的竖直层间结合强度,以提高 PEEK 材料复合加工的质量。

参考文献

- [1] Ma Hongyun, Suonan Angxiu, Zhou Jingyuan, et al. PEEK (polyether-ether-ketone) and its composite materials in orthopedic implantation[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2021, 14(3). DOI:10.1016/j.arabjc.2020.102977.
- [2] 李永超. 增减材复合制造技术的研究现状与关键问题[J]. 冶金管理, 2021(5):109-110.
Li Yongchao. Research status and key problems of composite manufacture of adding and decreasing material technology[J]. China Steel Focus, 2021(5):109-110.
- [3] Goh G D, Yap Y L, Tan H K J, et al. Process-structure-properties in polymer additive manufacturing via material extrusion: A review[J]. Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 2020, 45(2): 113-133.
- [4] Gao Xia, Qi Shunxin, Kuang Xiao, et al. Fused filament fabrication of polymer materials: A review of interlayer bond[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37. DIO:10.1016/j.addma.2020.101658.
- [5] Zheng Jibao, Kang Jianfeng, Sun Changning, et al. Effects of printing path and material components on mechanical properties of 3D-printed polyether-ether-ketone/hydroxyapatite composites[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2021, 118. DOI:10.1016/j.jmbbm.2021.104475.
- [6] Liaw Chya-Yan, Tolbert J W, Chow L W, et al. Interlayer bonding strength of 3D printed PEEK specimens[J]. Soft Matter, 2021, 17(18):4 775-4 789.
- [7] Guo Cheng, Liu Xiaohua, Liu Guang, et al. Surface finishing of FDM-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling[J]. Polymers, 2021, 13(13). DOI:10.3390/polym13132175.
- [8] 吕福顺,程祥,刘肖肖,等. PEEK 的 3D 打印参数优化及铣削试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(3):38-40, 44.
Lyu Fushun, Cheng Xiang, Liu Xiaoxiao, et al. Parameter optimization of 3D printing and milling experiment study for PEEK[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(3):38-40, 44.
- [9] 王鹏. 耐热性聚醚醚酮树脂的增材与减材复合制造关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2018.
Wang Peng. Study on key technologies of integrated additive and subtractive manufacturing of heat-resistance poly-ether-ether-ketone resin[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [10] 刘徽,杨先海,程祥,等. 人工骨 3D 打印与铣削复合加工研究[J]. 制造技术与机床, 2018(4):22-28.
Liu Hui, Yang Xianhai, Cheng Xiang, et al. Study on combined machining of artificial bone by 3D printing and milling[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2018(4):22-28.
- [11] 刘徽,程祥,刘肖肖,等. 聚醚醚酮材料 3D 打印试件的铣削参数试验研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(3):56-59.
Liu Hui, Cheng Xiang, Liu Xiaoxiao, et al. Experimental research on milling parameters of 3D printed specimens of polyetheretherketone materials[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019(3):56-59.
- [12] 赵广宾,秦勉,刘雨,等. 聚醚醚酮熔融沉积成形强度工艺参数的优化[J]. 机械工程学报, 2020, 56(3):216-222.
Zhao Guangbin, Qin Mian, Liu Yu, et al. Optimizing fused deposition molding process parameters for improving forming strength of polyetheretherketone[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(3):216-222.
- [13] 於天鹏,江晓泽. 聚醚醚酮的 FDM 工艺参数与结晶行为研究[J]. 现代塑料加工应用, 2020, 32(3):23-25.
Yu Tianpeng, Jiang Xiaoze. Study on process parameters and crystallization behavior of polyetheretherketone in FDM printing[J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2020, 32(3):23-25.
- [14] 史长春,胡镔,陈定方,等. 聚醚醚酮 3D 打印成形工艺的仿真和实验研究[J]. 中国机械工程, 2018, 29(17):2 119-2 124, 2 130.
Shi Changchun, Hu Bin, Chen Dingfang, et al. Process simulation and experiments for PEEK 3D printing technology[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(17):2 119-2 124, 2 130.
- [15] 李莎莎. 耐热性树脂 FDM-3D 打印机研制及制备工艺与材料性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
Li Shasha. Study on the development and preparing process of FDM-3D printer heat-resistant resin and material properties[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [16] 赵峰,李涤尘,靳忠民,等. PEEK 熔融沉积成形温度对零件拉伸性能的影响[J]. 电加工与模具, 2015(5):43-47.
Zhao Feng, Li Dichen, Jin Zhongmin, et al. Effect of PEEK fused deposition modeling temperature on tensile properties of parts[J]. Electromachining & Mould, 2015(5):43-47.
- [17] 李阳,程祥,段升富,等. 聚醚醚酮材料铣削试验[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(5):84-88.
Li Yang, Cheng Xiang, Duan Shengfu, et al. Experimental on milling of PEEK material[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(5):84-88.
- [18] 洪贤涛. 球头铣刀铣削力建模与仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
Hong Xiantao. The researchment of ball-end milling force modeling and semulation[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.