

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.09.027

提高聚合物3D打印表面质量后处理技术研究进展

高唯^{1,2}, 金叶^{1,2}, 邓正东^{1,2}, 吴健^{1,2}

(1. 贵州省冶金化工研究所, 贵阳 550014; 2. 贵州森远增材制造科技有限公司, 贵阳 550014)

摘要: 3D打印具有产品高表面粗糙度的固有工艺特性导致了零部件的表面光洁度及表面质量变差, 3D打印后处理技术成为了3D打印流程中不可或缺的一环。介绍了聚合物3D打印零部件后处理技术方法, 包括机械磨削后处理、化学后处理、激光抛光后处理和涂层后处理。以表面粗糙度为指标, 对比了不同后处理技术对不同材料表面的精加工能力。最后, 针对3D打印后处理技术发展面临的问题和挑战, 对该技术未来研究趋势进行了展望。

关键词: 表面粗糙度; 表面质量; 后处理; 3D打印; 聚合物

中图分类号: TQ320.67 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)09-0183-07

Research progress on post-treatment technology to improve surface quality of polymer with 3D printing

GAO Wei^{1,2}, JIN Ye^{1,2}, DENG Zhengdong^{1,2}, WU Jian^{1,2}

(1. Guizhou Institute of Metallurgy and Chemical Industry, Guiyang 550014, China;

2. Guizhou Senyuan Additive Manufacturing Technology Co., Ltd., Guiyang 550014, China)

Abstract : The inherent process characteristics of 3D printing with product high surface roughness lead to poor surface finish and surface quality of parts, and 3D printing post-treatment technology has become an indispensable part of the 3D printing process. Therefore, the post-treatment technologies of polymer 3D printing parts were introduced, which included mechanical grinding post-treatment, chemical post-treatment, laser polishing post-treatment and coating post-treatment. Using surface roughness as index, the fine finishing abilities of different post-treatment processes on different material surfaces were compared. Finally, in view of the problems and challenges facing the development of 3D printing post-treatment technology, the future research trend of the technology was prospected.

Keywords : surface roughness ; surface quality ; post-treatment ; 3D printing ; polymer

3D打印技术(又称增材制造技术)是以激光束为热源,根据CAD模型数据逐层选择性地熔融粉末状材料,逐层叠加,最终制成三维零件的一种加工工艺。该工艺能够在短时间内,无须支撑结构和模具制造出结构复杂的零部件,实现制造的个性化和定制化^[1]。与传统的加工方式相比,3D打印技术具有生产周期短、材料利用率高以及未烧结的粉末可重复使用等优点。目前,应用最为广泛的3D打印技术包含选择性激光烧结(SLS)^[2]、光固化成形(SLA)^[3]、熔融沉积成型(FDM)^[4]、选区激光熔化(SLM)等^[5]。虽然3D打印最早主要用于制造产品原型,但随着相关市场发展,它更适用于最终用途产品的生产。然而,3D打印制造工艺具有固有缺陷,所

得聚合物3D打印产品具有高表面粗糙度,该表面粗糙度以平均表面粗糙度——轮廓的算术平均偏差(R_a)和表面算术平均高度(S_a)表示^[6-7]。由于分层制造和阶梯效应,聚合物3D打印零部件表面光洁度比传统制造方法差,尤其在加工倾斜和弯曲的表面时情况更加恶劣^[8]。高粗糙度不仅会使零件的外观恶化,还会导致此类产品的力学性能降低。此外,除了阶梯效应外,还存在部分熔化颗粒的团聚,导致表面质量进一步劣化,仅通过3D打印技术无法直接获得所需的力学性能和表面质量^[9]。因此,3D打印后处理对聚合物3D打印的发展及应用显得尤为重要。笔者基于不同3D打印方式的零部件,讨论不同3D打印后处理方式对3D打印零部件表面光

基金项目: 贵阳市科技计划项目(筑科合同[2023]8-3号),贵州省冶金化工研究所科研发展基金(黔科冶化字KF[2023]02号),贵州省科技计划项目(黔科合企[2022]006),贵州科学院青年科学基金(黔科院J字[2024]2号,黔科院J字[2024]4号,黔科院J字[2024]7号),贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2023]一般350)

通信作者: 吴健,硕士,主要从事3D打印技术工作

收稿日期: 2024-07-08

引用格式: 高唯,金叶,邓正东,等.提高聚合物3D打印表面质量后处理技术研究进展[J].工程塑料应用,2024,52(9):183-189.

GAO Wei, JIN Ye, DENG Zhengdong, et al. Research progress on post-treatment technology to improve surface quality of polymer with 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(9): 183-189.

洁度和表面质量的影响,分析了不同3D打印后处理技术的优势及劣势,并对3D打印后处理技术未来的发展趋势进行了展望。

1 3D打印后处理技术的作用

3D打印后处理技术,作为3D打印流程中不可或缺的一环,涵盖了多种技术和方法,旨在提升3D打印产品的性能、外观和实用性^[10]。根据处理方式和原理的不同,主要分为化学后处理技术^[11]和物理后处理技术^[12]。化学后处理技术利用化学反应来改变打印件表面的化学性质或生成新的物质层,如化学镀、化学浸泡^[13]、化学蒸汽平滑^[14]等。这些技术能够赋予3D打印件表面特定的功能性质,如提升耐腐蚀性、导电性、防水性^[15]等。物理后处理技术主要是通过物理机械力或物理作用来完成处理后过程,包含机械磨削后处理技术、激光抛光、涂层后处理技术等。其中,最早开始应用的机械磨削后处理技术,主要依赖物理机械力对3D打印件表面进行打磨、抛光或切削,以改善其外观和精度。例如,喷砂处理通过高速喷射砂粒来去除打印件表面的毛刺和不平整部分,降低表面粗糙度,提高表面光洁度和表面质量^[16]。激光抛光后处理主要通过激光、电子束等能量源对3D打印件表面进行改性,如激光熔覆、等离子喷涂等。这些技术能够在3D打印件表面形成致密的涂层,提高打印件的耐磨性、硬度、防水性等性能^[17]。涂层后处理技术通过在3D打印零部件表面涂覆一层或多层与3D打印零部件不发生反应的材料,使得表面涂覆材料形成一种介质或保护膜,提高3D打印零部件表面光洁度或表面质量。在3D打印领域,表面后处理技术的应用已经越来越广泛。据统计,经过表面后处理的3D打印件在性能上显著提升,尤其在工业制造和医疗器械领域。表面后处理技术更是在航空航天领域发挥着举足轻重的作用,例如3D打印零部件经过表面后处理,能够显著提高零件的耐腐蚀性和疲劳强度,从而确保飞行器的安全性和可靠性^[18]。在医疗器械领域,例如康复护具,通过表面后处理技术,可提高病人佩戴舒适度,延长使用周期,为患者的治疗提供更加安全、有效的解决方案。笔者根据后处理应用范围和应用程度——展开叙述。

2 3D打印后处理技术种类

2.1 机械磨削后处理

机械磨削是用于完成3D打印零件最常见,也是最早应用的后处理工艺之一。包括砂纸打磨、振动磨削、磁流变精加工(MRF)和磨料流精加工(AFF)^[19]。而振动磨削、砂纸抛光是FDM工艺中最常用的加工方法。Tiwary等^[20]使用砂纸抛光,将FDM制造的丙烯腈-苯乙烯-丁二烯塑料(ABS)零部件的 R_a 从14.4 μm 降低到0.407 μm 。然而,砂纸抛光会导致零部件出现高磨损率,从而导致零件尺寸大幅减小。砂纸抛光虽然可以获得良好的表面抛光效果,但过于劳动密集,无法用于复杂形状的抛光。喷砂抛光也有类似缺点,不够灵活,表面粗糙度降低幅度较小^[21]。

Mali等^[22]对磨料的浓度、精加工时间、磨料颗粒尺寸、挤

压压力等参数进行调控,采用AFF最大限度地降低FDM制造ABS零部件的 R_a 。研究发现,表面质量随着挤压压力、磨料浓度和精加工时间的增加而增加。其中,磨料尺寸为120 μm 、磨料浓度为50%、挤压压力为2 MPa、精加工时间为60 min时,FDM制件(层厚为0.1 mm)的 R_a 可由7.9 μm 降低至1.2 μm ,粗糙度下降84%。另外,磨料浓度为50%、挤压压力为1 MPa、精加工时间为40 min时,零部件(层厚为0.3 mm)的 R_a 可由22.46 μm 降低至5.3 μm ,粗糙度下降76%。

磨料喷射或磨料喷射加工也是AFF中常用的方法。采用不同磨料对3D打印零部件进行喷射处理,清除残余浮粉,以及表面、孔洞堆积较深的粉末,从而提高零部件表面质量^[23]。Leong等^[24]采用氧化铝和玻璃微珠作为磨料,对光固化SLA的珠宝或塑料制品进行后处理,研究了喷砂压力(0.2, 0.3, 0.4, 0.5 MPa)、喷砂时间(5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0 s)对喷砂效果的影响。结果表明,用氧化铝作磨料所得表面质量比玻璃微珠更好。通过对喷砂压力和喷砂时间两个影响因素进行分析发现,增加喷砂压力可使粗糙度大幅降低,从而得到更好的表面质量,然而,喷砂时间的影响并不明显,随着喷砂时间的增加,表面粗糙度变化趋于稳定,如图1所示。

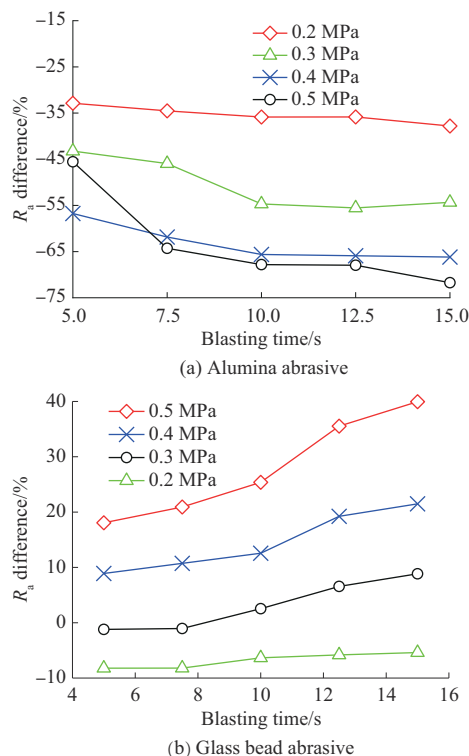


图1 不同磨料下工艺参数(喷砂压力和时间)对表面粗糙度的影响^[24]
Fig. 1 Influence of process parameters (sandblasting pressure and time) on surface roughness under different abrasives^[24]

Gajdos等^[25]将磨料喷射工艺应用于有涂层的零部件(含有纳米填料、腻子)和无涂层的零部件,以碳化硅和玻璃微珠为磨料对FDM制造的ABS零部件进行后处理。通过研究发现,与碳化硅相比,玻璃微珠的耐磨性较差。同时,纳米填料和腻子作为涂层对零部件进行后处理时, R_a 值分别从

11.41 μm 降低到6.17 μm 和4.42 μm 。然而,使用磨料喷射对具有涂层的零部件进行额外的后处理会显著恶化表面光洁度。在特定的工艺参数下,磨料喷射方法不如涂层应用有效,并且粗糙度降低幅度并不明显。磨料喷射加工的缺点之一是对复杂结构、形状的零部件难以实现精加工。因此,Boschetto等^[26]开发了一种将零件置于精加工介质中的研磨工艺。其中一种称为筒体精加工(BF)。将含有添加剂的由FDM制造的ABS零部件放入旋转筒体内,与磨料介质混合(其中,磨料的几何形状为圆柱形,直径为3 mm,高为10 mm,介质为10 L水和35 kg磨料),在转速为20.3 r/min条件下进行精加工,发现表面粗糙度降低约70%。该工艺在垂直型材和平面型材上取得了良好的改善效果。然而,当零部件为倾斜型时,即使经过16 h的精加工,表面仍旧粗糙^[27]。此外,随着加工时间的推移,表面粗糙度下降趋势较为平缓,效率不高。但其优势在于可实现多种打印方式下结构、形状复杂的零部件后处理。因此,3D打印聚合物零件可以将BF作为后处理第一步操作,然后再进行磨料喷射操作,这样不仅可以使表面粗糙度显著降低,还可以完成复杂腔体零部件的后处理,产生超光滑的表面,粗糙度接近纳米级。

2.2 化学后处理

除了机械磨削工艺外,化学后处理也可用于提高3D打印制造产品的表面光洁度及表面质量。化学后处理主要分为化学浸泡和化学蒸汽平滑,前者通过将零件浸泡在液体中实现后处理,后者通过溶液汽化组分对零部件进行后处理,从而使零部件表面达到光滑状态。

2.2.1 化学浸泡

化学浸泡通过将零部件浸泡在有机溶液中,利用化学物质的特性在零部件表面引发反应^[28]。Galantucci等^[29]通过调控FDM制造参数,打印了两组不同的ABS零部件分别放置在90%的二甲基酮水溶液中浸泡300 s。经研究发现,由于化学物质对制件表面的微溶解,零部件表面的 R_a 大幅降低,分别从11.8 μm 和17.2 μm 降低至2.2 μm 和4.8 μm ,粗糙度分别降低了81%和72%,很大程度提高了零部件的表面光洁度和表面质量。虽然零件的尺寸会减小1%,但质量的增加并不明显,可忽略不计。同时,还制作了34 mm×24 mm×62 mm的ABS艺术品,将其浸泡在上述化学浴中,其 R_a 从28.5 μm 降低至11.5 μm ,细节及精度得以保留,实现了艺术品的复刻。

Lalehpour等^[30]将FDM制造的ABS零部件浸入丙酮浴中以降低表面粗糙度。研究发现,处理次数和时间是影响ABS零部件表面粗糙度的重要因素。随着处理时间和次数的增大,表面粗糙度逐渐减小。而该工艺对具有坡度大于40°斜坡的零部件最为有效,会显著降低表面粗糙度,但同时,此种处理工艺也会增加零部件的最终尺寸。

Valerga等^[31]对FDM制造聚乳酸(PLA)零部件进行了化学后处理,研究了不同化学浸泡液下 R_a 的变化程度以及表面光滑程度。在氯仿(CHCl_3)浸泡液中, R_a 降低了97%,在二氯

甲烷(CH_2Cl_2)浸泡液中降低了94%,在四氢呋喃($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}$)浸泡液降低了近80%,在乙酸乙酯($\text{C}_4\text{H}_8\text{O}_2$)浸泡液中降低了35%。可以看出,在卤化类浸泡液处理时, R_a 都急剧下降。非卤化溶剂也能降低 R_a ,尽管达不到卤化类浸泡液的效果,但可用于处理一些需控制尺寸变化的零部件后处理。浸入不同浸泡液后,零部件形状的不规则性或零部件表面的凹凸不平,使其更易与化学溶剂发生溶解,通过吸收挥发性溶剂使表面材料形成半流体^[32]。在表面张力和重力的作用下,表面凹凸不平逐渐减少,直到达到动态平衡,从而产生更光滑的表面^[33]。总的来说,在一定浸泡时间后, R_a 减小到最小值,之后表面平滑程度只会产生细小变化。如果材料暴露的时间较长,材料的软化程度将增大,以至于表面或整个零部件的形态都会受到影响,导致零部件尺寸误差增大、变形或损坏。

2.2.2 化学蒸汽平滑

化学溶剂除了作为浸泡液,还可以作为蒸汽使用。通过加热有机溶剂使其在沸点蒸发,当溶剂蒸汽与零部件表面开始接触,会使零部件表面材料发生溶解,受表面张力影响,材料回流能降低表面的“峰高”并填充“山谷”,降低表面突起高度,从而弱化3D打印零部件表面粗糙的颗粒感,实现3D打印零部件表面光洁度、表面质量的提高。溶剂以蒸汽形式全覆盖在零部件表面,使表面材料发生溶解,其原理如图2所示^[34]。化学处理前的初始表面与设计的CAD数据模型表面不同,偏差用谷和峰表示(图2a)。当化学反应促使材料溶解时,材料回流,峰形弱化,填充谷底(图2b)。这种方法能够减小零部件表面颗粒间的孔隙,降低应力集中倾向,在一定程度上提高制件力学性能。

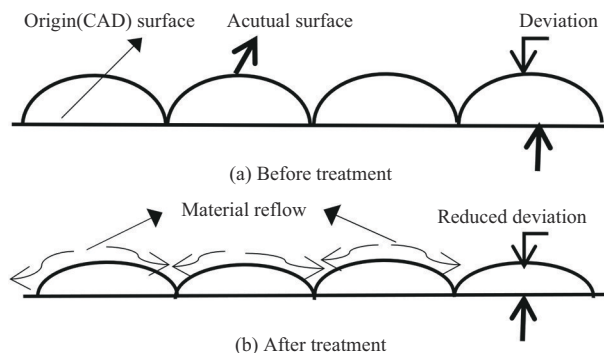


图2 化学处理技术原理^[34]

Fig. 2 Principle of chemical treatment technology^[34]

Tiwarly等^[35]使用丙酮蒸汽对FDM制造的ABS零部件处理2 min,将 R_a 值从14.4 μm 降低到0.37 μm ,大幅降低了表面粗糙度。Daljinder等^[36]使用化学蒸汽平滑技术处理了快速熔模铸造髌关节植入物所用球体的模型,通过正确选择工艺参数和使用化学汽相平滑,得到了 R_a 为1.5 μm 的最终产品。Valerga等^[31]采用二氯甲烷、氯仿、四氢呋喃和乙酸乙酯等溶剂对FDM制造的PLA材料进行处理。结果表明,将二氯甲烷和氯仿进行混合,对PLA处理1 min, R_a 小于1 μm ,而乙酸

乙酯只能将 R_a 降低 35%;PLA 经二氯甲烷和氯仿混合蒸汽处理后,台阶效应弱化,其微观表面更平滑。由 FDM 制造的透明聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)微流体器件的 R_a 约为 200 nm,Ogilvie 等^[37]使用三氯甲烷在 60 °C 条件下对 PMMA 器件进行 30 min 表面蒸汽处理,使其 R_a 从 200 nm 降低到 15 nm。同时,采用相同方法大大提高了微流体装置的光学性能^[38]。刘洪伟^[39]设计了一种 3D 打印抛光机,其抛光原理在于加热乙酸乙酯或丁酮液体至沸点以上使液体蒸发,保持 1~30 min,使乙酸乙酯或丁酮蒸汽溶解 FDM 制造 ABS 等 3D 打印件表面的粗糙突起,从而使打印件表面变得光滑。因此,采用溶剂蒸汽对聚合物类 3D 打印件进行后处理是一种较为可靠、快捷的 3D 打印后处理方法,可以通过控制溶剂蒸汽量来控制零部件表面与蒸汽的反应速度,从而得到不同表面质量的零部件^[40]。溶剂蒸汽后处理技术对聚合物 3D 打印制造零部件表面的自由曲面的精加工非常有效,可以在较短时间内显著降低零部件表面粗糙度。然而,在使用溶剂蒸汽进行后处理时需考虑因化学溶解而缩小的零部件尺寸,该部分需处于规定的尺寸误差范围内。

2.3 激光抛光后处理

目前对聚合物零件的激光抛光研究有限,主要原因是聚合物的熔化温度较低。Perez Dewey 等^[41]将激光抛光用于处理 FDM 制造的 PLA 零部件。结果表明,当采用最小能量密度(激光功率为 0.75 W 和烧结速率为 180 mm/s)时, R_a 从 34.5 μm 降低至 32.4 μm ,变化并不明显。然而,当能量密度增加到 5.54 J/cm²时, R_a 降低了 67%,当能量密度增加到 7 J/cm²时, R_a 降低了 95%,此时制件的 R_a 为 1.89 μm 。上述结果表明,工件表面粗糙度与激光能量密度有关。当熔化温度较低时,表面导电性差,功率的进一步增加可能导致零件过熔。

Chen 等^[42]对 FDM 制造的 PLA 制件进行表面激光抛光。结果表明,当激光功率为 3 W,光束直径为 175 μm 时,可将表面粗糙度从 18.46 μm 降低到 1.02 μm 。Chai 等^[43]利用非接触式激光扫描提高 FDM 型 PLA 表面质量。结果表明,在激光功率为 3 W、扫描速度为 150 mm/s、扫描延迟时间为 30 ms 和层厚为 0.025 mm 条件下, S_a 最大可以降低 68%。Lambiasi^[44]等采用激光抛光对经材料挤压(ME)得到的 PLA 表面进行后处理。研究了激光扫描速度、能量密度和舱口距离对表面形貌的影响,结果表明,在扫描速度为 200 mm/s 时,PLA 的 S_a 可以从 16.0 μm 降低至 0.3 μm ,激光精加工能显著提高表面粗糙度(10 倍以上)。研究过程中发现,当扫描速度较低时,可以通过一个较低的孵化重叠距离来平衡。类似地,较高的扫描速度应该由一个更大的舱口重叠来平衡,这样可以避免表面的过熔化,从而实现表面光洁度的提升。因此,在低能量密度下,激光抛光对聚合物的精加工是有效的,甚至可以达到纳米级的粗糙度^[45]。

在 3D 打印中,不同的聚合物材料具有多个应用场景。对于大多数应用和材料,后处理是 3D 打印零部件成为最终产品的关键步骤。不同材料的 3D 打印工艺参数策略对激光抛光后处理可以起到决定性的作用,可以更快确定材料的激光抛光工艺参数。Braun 等^[46]提出了一种 3D 打印聚合物零件激光抛光的工艺策略,分析了抛光温度和熔化时间两个主要工艺参数对 3D 打印零部件表面粗糙度的影响。研究表明,可以将聚酰胺 12 (PA12)的初始粗糙度 S_a 由 10.2 μm 降低到 0.61 μm 。随后,作者将 SLS 打印 PA12 的激光抛光参数应用于聚丙烯(PP)、热塑性聚氨酯(TPU)、FDM 打印 ABS 和 FDM 打印聚醚醚酮(PEEK),探究激光抛光处理工艺对这几 种材料制成的零部件表面粗糙度的影响,结果见表 1。

表 1 不同打印工艺下各种材料制成的零部件激光抛光处理前后表面粗糙度

Tab. 1 Surface roughness of parts made of various materials under different printing processes before and after laser polishing treatment

Material	Printing process	S_a after printing/ μm	Temperature set point for laser polishing/ $^{\circ}\text{C}$	Interaction time for laser polishing/s	S_a after laser polishing/ μm
PA12	SLS	10.2	210	200	0.61
PP	SLS	16.9	180	60	0.59
TPU	SLS	39.5	200	40	0.12
ABS	FDM	18.5	220	60	0.24
PEEK	FDM	7.7	340	1 800	0.13

由表 1 看出,激光抛光处理后,SLS 工艺打印 PP 的 S_a 可由 16.9 μm 降低至 0.59 μm ;SLS 工艺打印 TPU 的 S_a 可由 39.5 μm 降低至 0.12 μm ;FDM 工艺打印 ABS 的 S_a 可由 18.5 μm 降低至 0.24 μm ;FDM 工艺打印 PEEK 的 S_a 可由 7.7 μm 降低至 0.13 μm 。激光抛光温度通常略高于加工材料的熔化温度,达到最低粗糙度时,处理时间取决于抛光温度的设定值以及熔化状态下材料的黏度和表面张力。虽然激光抛光可以大幅降低表面形貌的粗糙度,但是在较高的温度设定下可能导致材料变色或产生气泡^[47]。激光抛光虽然对表面粗糙度也有显著改善,但它不能用于加工复杂的内腔,类似于砂纸抛光和喷砂后处理,同时能量密度控制较为严苛,因为过高的

能量密度可能会烧毁聚合物。

2.4 涂层后处理

涂层后处理技术是在零部件的外表面上覆盖涂层材料薄膜,这一过程与渗透有一定的相似之处,但其主要目的是提供一个表面层来覆盖零件,而不是填充零件内部的孔隙。最常用的涂层技术之一是浸涂,即根据预先确定的浸入和取出速度,将零件浸入到含有涂层产品的容器中,然后再取出。可通过简单的浸泡,也可通过手动刷或喷涂来沉积涂层^[48]。Garg 等^[49]在 FDM 制造的 ABS 零部件上涂蜡用作快速熔模铸造的模具。结果表明,铸件的 R_a 可降低至 1.77 μm 。此外,涂层在外壳和图案之间形成了一种介质,这种介质先熔化,减

少了在烧制过程中外壳开裂的可能性。Zhou等^[50]对SLA制造的树脂航空涡轮零部件额外覆盖了一层光聚合物涂层,使得3D打印制件的外表面 R_a 从20 μm 降低至7.5 μm 。Roach等^[51]对FDM制造的零件进行表面涂层以提高表面质量,在聚酰亚胺(PAA)塑料上以喷涂的形式应用聚醚酰亚胺(PEI)涂层作为内层,然后将聚乙二醇二丙烯酸酯(PEGDA)涂层作为外层。中间涂层(PEI)用于隔绝PEGDA层和PAA塑料的反应,最终实现RC电路的生产。Zhu等^[52]通过计算机控制涂覆的速度和厚度,在FDM制造的ABS零部件上涂覆了水性涂层,以此降低表面粗糙度和密封表面间隙,进而改善零件本身的表面质量。他们对FDM制造的ABS零部件顶部进行了不同程度的涂覆,结果表明,以2 mm/s的涂覆速度涂覆一层,零部件的 R_a 由61 μm 降低至50 μm ;继续将涂覆速度提升至10 mm/s和20 mm/s,发现随着涂覆速度的增加, R_a 几乎不变或者变化不大,分别为50 μm 和47 μm 。然而,降低涂覆速度增加涂覆层数,将涂覆速度改为2 mm/s和10 mm/s,分别涂覆两层,发现随着涂覆层数的增加, R_a 可由61 μm 分别降至43 μm 和40 μm 。另外以10 mm/s的塑速度涂覆3层, R_a 可降低至34 μm 。以上结果表明,适当的涂覆速度和涂覆厚度可以降低零部件表面粗糙度,改善零部件的表面质量。涂层后处理技术在处理有限数量的零件时,手动方法可以有效地节省处理时间和成本,然而,得到的涂层不均匀,并且难以实现可重复性,涂层厚度不能通过设定参数来精确控制,而主要取决于操作人员的技能^[53]。另外,涂层厚度和表面轮廓受涂层材料性能的影响很大,如黏度和表面张力。

3 不同3D打印后处理技术优缺点

综上所述,机械磨削后处理技术适用于尺寸较小,存在较大表面的3D打印零部件,可将大面积的突起通过振动磨削、砂纸抛光、精加工等方式除去,缺点是费力耗时,劳动密集,无法实现复杂结构表面质量的提升。激光抛光后处理方法与机械磨削相类似,可以大幅降低表面形貌的粗糙度,适用打印方式及材料较为广泛,但是对于复杂内腔表面粗糙度的降低并不明显,由于激光抛光后处理过程中的温度高于材料本身融化温度,易导致材料变色或产生气泡,甚至烧毁聚合物零部件。涂层后处理技术适用于需要额外介质或对尺寸变化要求不严格的3D打印零部件,优势在于涂层后处理的零部件可直接作为终端产品,缺点在于涂层常出现不均匀情况,难以实现重复性。化学后处理是现在适用范围最广的一种后处理技术方法,它不局限于打印方式或材料,也不受限于零部件的结构,其中化学蒸汽平滑后处理效果最为显著,但需要考虑因化学溶解而缩小的尺寸。因此,需根据3D打印零部件结构的复杂程度,选择相对应的后处理技术方法。3D打印零部件存在的结构主要包括大表面、复杂内腔、精细结构、镂空结构等。在批量后处理过程中,可根据材料和几何形状特点,选择合适的单个后处理方法或结合多个后处理方法来实现聚合物零部件表面质量的提升。当3D打印零部件存在较多表面时,可以采用机械磨削后处理或激光抛

光后处理,若对表面质量要求较高时,可采用化学后处理方法进行后处理或二次后处理;存在复杂内腔、精细结构或镂空结构时,AFF和化学后处理方法最为适用,其中化学蒸汽平滑后处理效果更为突出,可在较短时间内实现零部件表面质量的提升;对于以上所有结构,在对尺寸没有严格要求的情况,可采用涂层后处理,直接用于终端应用。

4 结语与展望

3D打印可用于设计和生产具有独特外观和性能的部件,然而,相比传统制造工艺,3D打印零部件表面存在更为明显的表面质量较差的问题,因此3D打印后处理技术是提高打印聚合物零部件表面质量和力学性能等方面的重要途径。不同的后处理技术对表面粗糙的改善程度不同,产生的副作用也不尽相同。为考虑整体有效性,需要结合两种或多种后处理技术以实现更高的表面质量及性能,但这无疑会增加后处理时间和成本,不利于3D打印未来的发展。因此,对于3D打印后处理技术,仍需要解决以下关键问题。

(1)力学性能。目前,较少有研究提及后处理对聚合物3D打印零部件疲劳行为的影响,而3D打印在关键零部件方面的应用越来越多,零部件需要承受较大的循环载荷,因此需要零部件在进行3D打印后处理后具有较长的使用周期及良好的耐疲劳性能,最终得以稳定运行。

(2)几何尺寸以及稳定性。3D打印工艺主要集中于生产一些实体零部件和模型,其中组装类的零部件会限制后处理的范围和适用性,例如涂层后处理,需要在零部件表面覆盖一层或多层涂层材料,这会增加零部件的尺寸,导致最终形成的零部件不适配。而采用AFF需要削减材料,有过度改变零部件原始形状的风险。因此,需要注重零部件的尺寸、所采用的辅助工具的分辨率及所使用的化学药剂的性质和黏度等方面。目前,对这一方面的研究还很缺乏,未来还需要进一步研究。

(3)材料处理范围扩大。目前,后处理技术相关研究主要集中于有限数量的材料(主要是ABS,PLA或PA)。其他类似橡胶的材料,如热塑性弹性体(TPEs)后处理相关研究较少,由于TPEs本身具有较低的硬度和较高的变形等特征,在后处理时更易出现不可控的问题,削弱后处理的有效性。

(4)新型后处理技术开发。现有的研究中很少提及一些复杂结构如同时具有网状或多孔结构的后处理方法。网状结构在隔振、轻量化设计、散热和传动机制方面,具有较大的应用前景,表面质量差会极大地影响它们的力学性能,而后处理可以极大地改善表面质量。特别是具有薄壁特征作为基本元件(支柱)组成的格子结构,不均匀性、缺陷、分层等将导致网状结构出现脆性断裂以及产生低强度、低延展性和低韧性等问题,极大影响其力学性能。因此,修复外表面并提高其质量的后处理对于增强网状结构和扩大其工业应用范围至关重要。未来研究工作应该针对复杂的几何形状、镂空状内部、大梯度、薄壁和细节零部件,开发具有更高灵活性的后处理技术方法。

(5)自动化。后处理时间及操作灵活性成为了3D打印后处理技术在工业领域应用的关键瓶颈。从实验室验证到产业化的过渡应该需要高度的重复性和再现性,以及能快速适应不同几何形状及材料。未来3D打印后处理技术研究方向也应包含自动化,消消费力的手工工作流程,减少3D打印零部件处理的成本和交货时间,以及减少在处理零部件之间和不同人员手工操作之间的误差。

参考文献

- [1] KARAŞ B, et al. Additive Manufacturing, 2022, 58. DOI:10.1016/j.addma.2022.103044.
- [2] 陈旭. 制造技术与机床, 2022(12):11–14.
CHEN Xu. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2022(12): 11–14.
- [3] 彭小晋, 等. 陶瓷, 2024(5):54–58, 84.
PENG Xiaojin, et al. Ceramics, 2024(5):54–58, 84.
- [4] 杨钦杰, 等. 中国塑料, 2022, 36(2):157–171.
YANG Qinjie, et al. China Plastics, 2022, 36(2):157–171.
- [5] 周安, 等. 中国表面工程, 2023, 36(4):36–50.
ZHOU An, China Surface Engineering, 2023, 36(4):36–50.
- [6] FISCHER M, et al. Some investigations regarding the surface treatment of Ultem* 9085 parts manufactured with fused deposition modeling[C]//2013 International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin:University of Texas at Austin, 2013:12–14.
- [7] KUMBHAR N N, et al. Journal of The Institution of Engineers (India):Series C, 2018, 99(4):481–487.
- [8] HAMBALI R H, et al. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 210(1). DOI: 10.1088/1757-899X/210/1/012063.
- [9] KARAKURT L, et al. Current Opinion in Chemical Engineering, 2020, 28:134–143.
- [10] KHOSRAVANI M R, et al. Polymers, 2021, 13(10). DOI:10.3390/polym13101559.
- [11] KANTAROS A, et al. Processes, 2024, 12(3). DOI: 10.3390/pr12030595.
- [12] WU S Y, et al. Microsystems Nanoengineering, 2015, 1(1):1–9.
- [13] 陈福德, 等. 汽车实用技术, 2021, 46(13):125–127.
CHEN Fude, et al. Automobile Applied Technology, 2021, 46(13): 125–127.
- [14] 李彬, 等. 机械科学与技术, 2020, 39(1):144–149.
LI Bin, et al. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2020, 39(1):144–149.
- [15] 侯高雁, 等. 信息记录材料, 2017, 18(7):19–21.
HOU Gaoyan, et al. Information Recording Materials, 2017, 18 (7):19–21.
- [16] LANZOTTI A, et al. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21 (5):604–617.
- [17] DIZON J R C, et al. Technologies, 2021, 9(3). DOI:10.3390/technologies9030061.
- [18] 蔡启茂, 等. 3D打印后处理技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019.
- CAI Qimao, et al. 3D printing post-processing technology[M]. Beijing:Higher Education Press, 2019.
- [19] BUAL G S, et al. Manufacturing Science & Technology, 2014, 2 (3):51–55.
- [20] TIWARY V, et al. International Journal of Rapid Manufacturing, 2015, 5(3-4):276–288.
- [21] PENG X, et al. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2021, 5(2). DOI:10.3390/jmmp5020038.
- [22] MALI H S, et al. Rapid Prototyping Journal, 2018, 24(3):593–606.
- [23] KUMAR A, et al. Materials and Manufacturing Processes, 2019, 34(2):232–242.
- [24] LEONG K F, et al. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 83(1–3):36–47.
- [25] GAJDOS I, et al. Materials Science Forum, 2015, 3 968(818): 45–48.
- [26] BOSCHETTO A, et al. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 219:181–192.
- [27] BOSCHETTO A, et al. Rapid Prototyping Journal, 2015, 21(6): 686–696.
- [28] WIESLAW K, et al. Advances in Science and Technology Research Journal, 2017, 11(2):172–179.
- [29] GALANTUCCI L M, et al. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2009, 58(1):189–192.
- [30] LALEHPOUR A, et al. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(31):42–48.
- [31] VALERGA A, et al. Polymers, 2019, 11(3). DOI: 10.3390/polym11030566.
- [32] 王琛, 等. 工程塑料应用, 2022, 50(6):88–91, 98.
WANG Chen, et al. Engineering Plastics Application, 2022, 50(6): 88–91, 98.
- [33] JIN Y, et al. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240:233–239.
- [34] CHOCHAN J S, et al. Composites Part B:Engineering, 2017, 117: 138–149.
- [35] TIWARY K V, et al. Rapid Prototyping Journal, 2019, 25(5): 904–914.
- [36] DALJINDER S, et al. Advances in Materials and Processing Technologies, 2022, 8(1):843–862.
- [37] OGILVIE G R I, et al. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2010, 20(6). DOI:10.1088/0960-1317/20/6/065016.
- [38] 肖建华, 等. 高分子材料科学与工程, 2017, 33(4):160–167.
XIAO Jianhua, et al. Polymer Materials Science and Engineering, 2017, 33(4):160–167.
- [39] 刘洪伟. CN104098784B[P]. 2017-12-26.
LIU Hongwei. CN104098784B[P]. 2017-12-26.
- [40] 肖博文. 桌面级FDM-3D打印零件表面抛光机改良设计与研究 [D]. 武汉: 湖北工业大学, 2019.
XIAO Bowen. Improve design and research of surface polisher for desktop level FDM-3D printing parts[D]. Wuhan: Hubei

- University of Technology, 2019.
- [41] PEREZ DEWEY M, et al. Development of laser polishing as an auxiliary post-process to improve surface quality in fused deposition modeling parts[C]//Proceedings of the ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing. Volume 2: Additive Manufacturing; Materials. New York: The American Society of Mechanical Engineers, 2017. DOI:10.1115/MSEC2017-3024.
- [42] CHEN L, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 137. DOI:10.1002/app.48288.
- [43] CHAI Y, et al. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96:4 295–4 302.
- [44] LAMBIASE F, et al. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 124. DOI:10.1016/j.optlaseng.2019.105801.
- [45] TAUFIK M, et al. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 30:161–177.
- [46] BRAUN K, et al. Procedia CIRP, 2020, 94:134–138.
- [47] 吴开明,等.科技与创新, 2023(3):176–178.
WU Kaiming, et al. Science and Technology & Innovation, 2023 (3):176–178.
- [48] 郭亮,等.中国塑料, 2017, 31(9):91–96.
GUO Liang, et al. China Plastics, 2017, 31(9):91–96.
- [49] GARG K P, et al. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23(5): 845–857.
- [50] ZHOU J P, et al. Propulsion and Power Research, 2015, 4(2): 63–71.
- [51] ROACH D J, et al. Additive Manufacturing, 2020, 36. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101544.
- [52] ZHU J Y, et al. Journal of Coatings Technology and Research, 2015, 12(5):889–897.
- [53] 李青云,等.数字农业与智能农机, 2019(20):69–70.
LI Qingyun, et al. Digital Agriculture and Intelligent Agricultural Machinery, 2019(20):69–70.
-
- (上接第 177 页)
- [74] RAFAEL H R, et al. Biofabrication, 2021, 13(4). DOI:10.1088/1758-5090/ac25cb.
- [75] SEDUSH N, et al. Macromolecular Symposia, 2022, 404(1). DOI: 10.1002/masy.202100380.
- [76] STEVEN C G, et al. Advanced Materials, 2023, 36(3). DOI: 10.1002/adma.202306468.
- [77] ZHENG Zizhuo, et al. Engineering, 2021, 7(7):966–978.
- [78] 吴卫东,等.机械工程师, 2020(1):15–19.
Wu Weidong, et al. Mechanical Engineer, 2020(1):15–19.
- [79] SHAN Yan, et al. Some thoughts on the application of 3D printing technology in the field of maintenance and support of large construction machinery and equipment[C]//2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA). New York:IEEE, 2022:1 141–1 145.
- [80] SEFIU A R, et al. Journal of Advanced Ceramics, 2021, 10(3): 442–471.
- [81] ZHU Guangda, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(29):34 954–34 961.
- [82] LAKSHMI P N, et al. Current Trends in Pharmacy and Pharmaceutical Chemistry, 2022, 4(3):98–108.
- [83] MANUELA G B, et al. Trends in Food Science and Technology, 2022, 128:38–52.