

FDM 型金属 3D 打印研究现状与展望

张仕颖 夏国峰 郝向阳 陈 伟 张 怡 杜明见 左都全
(重庆三峡学院机械工程学院)

摘 要 熔融沉积成形(FDM)是目前最常用的 3D 打印技术之一,具有设备简单、成本低、操作简单等特点,广泛应用于航天航空、汽车、医疗、新能源等领域。介绍了 FDM 打印技术的原理,通过与常见金属 3D 打印技术相比较,突出了 FDM 型金属 3D 打印的优点,并介绍了 FDM 型金属 3D 打印的工艺流程。从 FDM 型金属 3D 打印材料种类展开描述,对不同金属材料进行相应的分类,重点阐述打印过程中所涉及的粘接剂的选择、打印工艺的优化、脱脂烧结方式的设计与试验等方面的研究进展。最后对 FDM 型金属 3D 打印的发展及应用前景进行了展望。

关键词 FDM;金属 3D 打印;金属材料种类;应用前景

中图分类号 TG249.9 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.02.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Status and Prospect of FDM Metal 3D Printing

Zhang Shiyong, Xia Guofeng, Hao Xiangyang, Chen Wei, Zhang Yi, Du Mingjian, Zuo Duquan
(College of Mechanical Engineering, Chongqing Three Gorges University)

Abstract: As one of the most commonly used 3D printing technologies at present, Fused deposition modeling (FDM) has the characteristics of simple equipment and operation as well as low cost, which is widely used in aerospace, automobile, medical treatment, new energy and other fields. The principle of FDM printing technology was introduced, and the advantages of FDM metal 3D printing was highlighted by comparing with common metal 3D printing technology, and the process flow was clarified. Starting from the types of FDM metal 3D printing materials, different metal materials were classified, focusing on the research progress in the adhesive selection, printing process optimization, design and experiment of degreasing sintering mode involved in the printing process. Finally, the development and application prospect of FDM metal 3D printing was prospected.

Key Words: FDM, Metal 3D Printing, Types of Metal Materials, Application Prospect

3D 打印又称为增材制造,发展于 20 世纪初 80 年代^[1]。3D 打印一般是以金属粉末、金属丝材、塑料丝材等为基材,以数字模型的文件为基础,通过逐层堆叠累积的方式构建三维模型,其可实现复杂零件的快速成形,节约了时间,在航天航空、汽车、医疗、新能源、工艺设计等领域应用越来越广泛^[2-6]。

在众多 3D 打印方式中,熔融沉积成形(Fused Deposition Modeling, FDM)是市场应用最广、成本最低的打印方式之一^[7],该打印技术是由 Scott Crump 在 1989 年发明出来的^[8]。

1 FDM 型 3D 打印种类

1.1 FDM 打印技术

FDM 工作原理见图 1。FDM 打印主要包括送料、熔融挤出、成形 3 个过程。第一阶段,丝材在齿轮和驱动电机的作用下送入喷头处;第二阶段,丝材在喷头处被加热至熔融态,经喷嘴挤出。第三阶段,喷嘴按照计算机设定的路径将熔融态的丝材沉积在打印平台上,当一层结束后,打印喷头上升到设定的高度,逐层堆积,直到零件打印成形。

收稿日期:2022-05-12;修改稿收到日期:2022-07-03
基金项目:重庆市科学技术局自然科学基金资助项目(cstc2019jcyj-msxm1239);智能制造先导技术重庆市高校工程研究中心开放基金资助项目(ZNZZXDJS202002);重庆市教委科学技术研究资助项目(KJ1601001);重庆市轻合金材料与加工工程技术研究中心开放基金资助项目(GCZX201903)
第一作者简介:张仕颖,男,1996 年出生,硕士研究生,重庆万州(404100),E-mail:981341563@qq.com
通信作者:夏国峰,男,1985 年出生,副教授,重庆万州 404100, E-mail:Xiaguofeng@sanxiao.edu.cn
引用格式:张仕颖,夏国峰,郝向阳,等. FDM 型金属 3D 打印研究现状与展望[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(2):163-169.
ZHANG S Y, XIA G F, HAO X Y, et al. Research status and prospect of FDM metal 3D printing [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2):163-169.

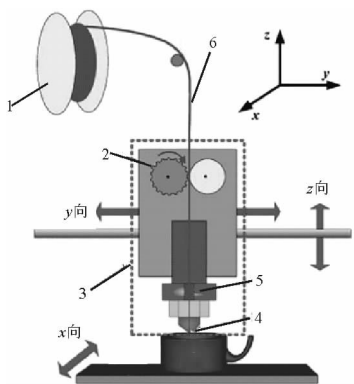


图 1 FDM 过程工作原理^[9]

Fig.1 Working principle of FDM process^[9]

1.线圈卷盘 2.驱动齿轮 3.挤压机 4.喷嘴 5.熔融浆 6.塑料丝

1.2 FDM 型金属 3D 打印

FDM 工艺常用的材料主要以 PLA^[10-11]、ABS^[12]、尼龙^[13]、聚丙烯^[14]等低熔点塑料为主,对于金属材料的 3D 打印涉及较少。目前,用于制作金属零部件的 3D 打印技术主要包括选区激光熔化 (SLM)^[15]、激光近净成形 (LENS)^[16]、电子束选区熔化 (EBSM)^[17]等,这些方式都是以激光或电子束为热源进行驱动,价格比较昂贵,并且设备的维护费用也相当高。

FDM 型金属 3D 打印的研究主要是金属丝材的熔融挤出成形和金属浆料的挤出成形。用于 FDM 打印主要是单一塑料丝材,制备相对容易。金属复合丝材经 FDM 打印成形后,成形坯还需要进行脱脂烧结等后处理过程以得到高性能的金属零件。脱脂是指打印成形的坯体粘结剂脱出的过程,主要包括热脱脂、溶剂脱脂、虹吸脱脂等方式,针对不同粘结剂可采用其中一种或几种方式实现对粘结剂的脱除^[18]。烧结是将脱脂后的坯体进行高温或高压下加热,通过原子迁移重排使得金属颗粒重新相互连接在一起的工艺,从而达到改善坯体内部组织使得致密度及强度提升的过程。坯体在脱脂后存在大量孔隙,强度很低,烧结能很好地改善脱脂后的相关力学性能。

相比之下,金属浆料的挤出成形^[19]也有一定的差异,具体流程见图2,首先进行粘结剂的配置,在制料过

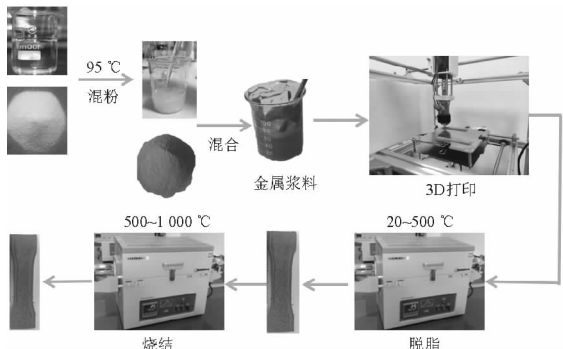


图 2 FDM 型金属 3D 打印流程

Fig.2 Flow chart of FDM type metal 3D printing

程中,金属粉末与粘结剂经搅拌制备成一定粘度的金属浆料。具有一定粘度的浆料在挤出装置作用下挤出成形;同样成形后需经过脱脂烧结等后处理过程。相对于其他金属 3D 打印方式而言,FDM 型金属打印主要具有:①设备简单,价格便宜;②成形过程绿色环保;③操作简单,利用率高等优势。

2 FDM 型金属 3D 打印的材料

尽管 FDM 打印技术在众多领域具有很大的优势,但其在金属行业的发展仅限于制造一些非结构材料。金属材料相比于塑性材料而言具有更高的硬度以及无法比拟的热学和电学性能,因而应用更加广泛。金属 3D 打印技术的快速发展,但其中 FDM 技术打印金属材料的研究较少,研究者尝试应用 FDM 技术实现对不同金属材料的打印,对不同金属材料分类进行相关阐述。

2.1 Bi-Sn 合金

Bi-Sn 合金作为常用的低熔点的合金,广泛应用于航空航天工业、汽车工业、核工业等方面,其熔点与常用于 FDM 打印的热塑性材料的熔点相差不大。邓诗贵^[20]通过对 Sn-40Bi 和 Sn-58Bi 合金进行研究,发现 Sn-40Bi 合金在 215 °C 沉积,打印速度和送丝速度比为 1 : 1.5 时,能够获得均匀连续的熔融沉积,制备出合格的合金棒材。杨东霞等^[21]以 Sn-58Bi 合金丝材为原料,在 FDM 打印基础上进一步开发了金属熔融三维直写技术,这具有高效低成本的特点;试验得出打印工艺送丝速度与直写速度的比值约为 1/2 时,成形品质较好。ANDERSEN K 等^[22]基于 3D 打印技术的熔融丝制作 (FFF) 开发具有高导电性的新功能材料,验证了低熔点 Sn-Bi 合金的适用性。

基于 FFF 的研究,NIRUPAMA W 等^[23]以 Sn-58Bi 和 Sn-40Bi 合金为研究对象,以金属丝和浆料的形式用 FFF 3D 打印和 FFF 3D 铸造进行评估,发现针对 FFF 熔丝打印,在打印工艺挤出频率、挤出速度和打印速度之间建立关联,可以改善产品的力学性能。此项研究为 FFF 在工业中快速生产价格合理的金属原型件如纪念品和扳手等带来了优势。

2.2 316L 不锈钢合金

316L 不锈钢耐热腐蚀性强^[24],广泛应用于制作耐腐蚀性的设备,如汽车、化工、医疗等方面。316L 不锈钢零件常用 SLM 技术进行打印,考虑到成本问题,GONG H J 等^[25]比较了 SLM 与 FDM 制备的 316L 不锈钢孔隙率的差距,证明了 FDM 打印成形的 PLA、ABS 与不锈钢 316L 金属-聚合物复合材料的孔隙率约为 1.5%,而 SLM 成形 316L 不锈钢部分相对完全致

密,相差甚小,FDM 技术易操作、成本低。马李洋等^[26]研究了 FDM 与脱脂和烧结结合制备了 316L 不锈钢,在不同脱脂温度下的 SEM 形貌见图 3。可以看出,脱脂温度为 750 ℃ 时最佳,发现在 1 360 ℃ 下烧结 120

min 时有最高的密度和合理的晶粒尺寸。使用三点弯曲试验的力学评价,尽管打印的零件强度较低,也获得了类似于传统制造的不锈钢的挠度,因此,该工艺可能是一种很有前途的制造复杂形状金属零件的技术。

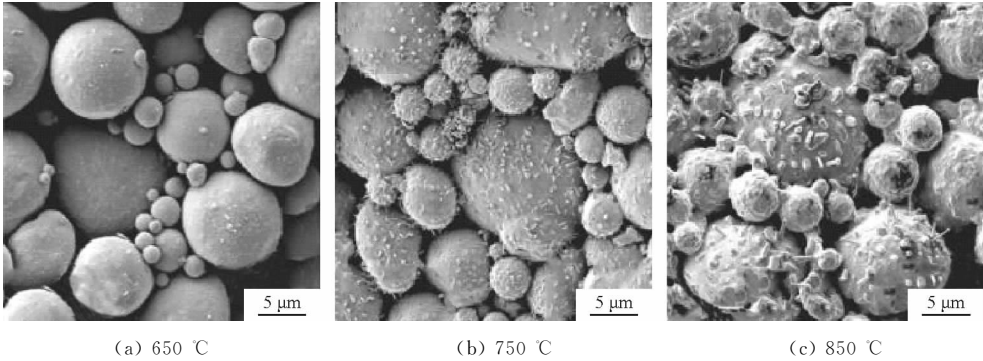


图 3 316L 不锈钢在不同温度下脱脂的 SEM 形貌^[26]
Fig.3 SEM morphologies of 316L stainless steel under degreasing at different temperatures^[26]

刘斌等^[27]选取 11% 聚甲醛(POM)作为粘结剂、1% 聚丙烯(PP)作为稳定剂、1% 氧化锌作为热稳定剂、1% 邻苯二甲酸二辛酯(DOP)和邻苯二甲酸二丁酯(DBP)作为增韧剂,与 86% 的 316L 不锈钢粉末混合挤出拉丝,研究了喷嘴温度、分层厚度、填充线宽对打印坯尺寸精度的影响,发现经 FDM 打印成形得到的 316L 不锈钢丝材的挠度高,可用于工业化。蔡国栋等^[28]继续

对 316L 不锈钢进行相应的探索,使用微米级别的 316L 不锈钢粉末和蜡基粘结剂以 8 : 2 体积比混合,制备热融性喂料,使用 FDM 打印得到成形坯,而后经过脱脂和烧结等后处理方式完成金属零件的制作。图 4 为稀土添加前后烧结试样析出物形貌。发现通过加入 0.3% 的 LaCl₃ 能很好地改善烧结后的形貌,可见边缘光滑完整、分布均匀,孔隙率得到了改善,可通过相关试验进一步提高。

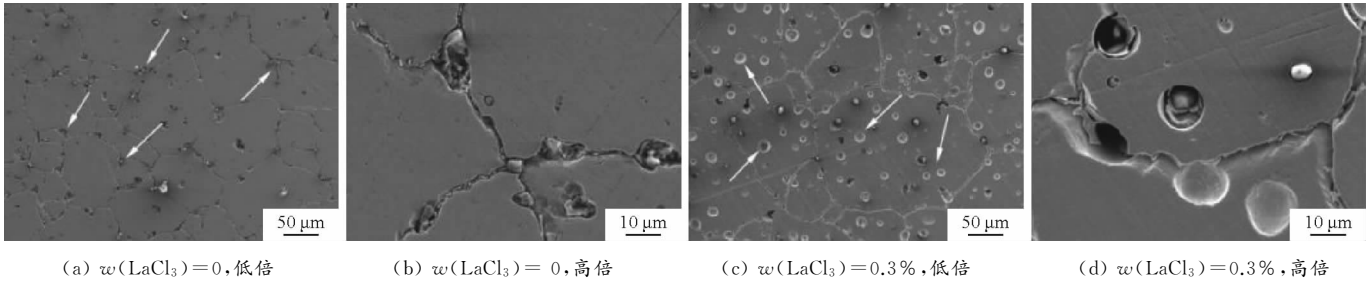


图 4 稀土添加前后烧结试样析出物形貌及分布(白箭头为析出物)^[28]
Fig.4 Morphologies and distribution of precipitates in sintered specimens before and after rare earth addition

2.3 Cu 及其金属复合材料

基于 Cu 的延展性好、导热性和导电性高的特性,在 FDM 打印中同样被研究。NIKZADM S H 等^[29]将含量高达 40% 的 Cu/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物复合材料的试样通过受控离心混合、单螺杆挤出机热复合和压塑制成,研究了切片厚度、填充模式、喷嘴直径等工艺参数的影响,成功地开发了在 ABS 中填充铜颗粒的新型金属复合材料,这种高刚度的金属复合材料能广泛应用于零件的制造。SEYEON H 等^[30]开发了用于 FDM 工艺的新型金属长丝,将 Cu、Fe 粉末与热塑性塑料 ABS 混合,经螺杆挤出机挤出 $\phi 1.75$ mm 金属丝,发现生产的 ABS-Cu 复合丝热导率更高,可以限制在打印过程中的变形,调整 ABS-Cu 复合丝可以应用于大规模 3D 打印领域。NASUHA S 等^[31]用注塑机制备了一种新型铜-丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 FDM 原料,发现

挤出过程中的熔体流变行为受出口喷嘴处的压降、速度和喷嘴尺寸的影响,并根据 Fox-Zisman 理论研究了填充 Cu 对接触角和表面张力的影响,得到了最佳填充量。NABIPOUR M 等^[32]以聚乙烯为基体,添加剂为石蜡和硬脂酸,生产了适合 FDM 工艺的 Cu 粉含量为 25%、50% 和 75% 的复合长丝,实现了打印速度、喷嘴直径等工艺参数的优化,探讨了用三维打印机制造聚乙烯基复合材料零件的可行性。经电镜分析,该金属/聚合物长丝可用于电磁屏蔽结构的应用。

除了传统的丝状物作为 FDM 打印的原料外,研究者逐渐开发了金属浆料用于 FDM 式打印机挤出打印。SEONGIK H 等^[33]对 FDM 3D 打印机进行了改进,搭建了可打印金属膏体的挤出式打印机,见图 5,选取聚乙烯醇(PVA)作为高粘度助熔剂的粘度增强剂,将聚乙烯醇羧基聚合物凝胶与 PVA 溶液按 95 : 5 的比例

混合,加入含量为 50%、55%、60%、65%的 Cu 粉,合成了 Cu 浆料,通过相应的设备和 Hagen Poiseuille 方程测量 Cu 膏体的粘度,发现 Cu 浆料粘度为 65%时最佳,而后进行 FDM 式挤出打印。GURMINDER S 等^[34]以聚乙二醇(PEG)与石蜡为粘结剂,制备可用于 FDM 式螺杆挤出的铜浆料,发现了最佳的层厚、行走速度、挤出流速、挤出温度等打印工艺参数,并确定了最佳的烧结温度为 1 050 ℃,获得相对密度为 94.5%的纯 Cu 零件,成形件可用于电加工电极及散热器。

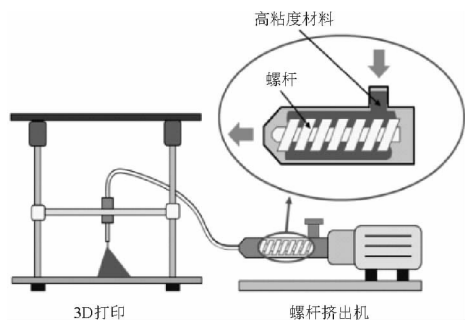


图 5 高粘度物料的 3D 打印机原理图^[33]

Fig.5 Mechanism of 3D printer for high viscosity materials^[33]

由于 Cu 浆料的化学性质相对稳定,常温下不易变质。侯同伟等^[35]综合 FDM 技术和金属粉末注射成形技术搭建了 FDM 式金属打印机,选取石蜡作为 Cu 的粘接剂配置 Cu 浆料,打印成品不同烧结温度下的 SEM 形貌见图 6。综合分析成形件的力学性能和密度,确定

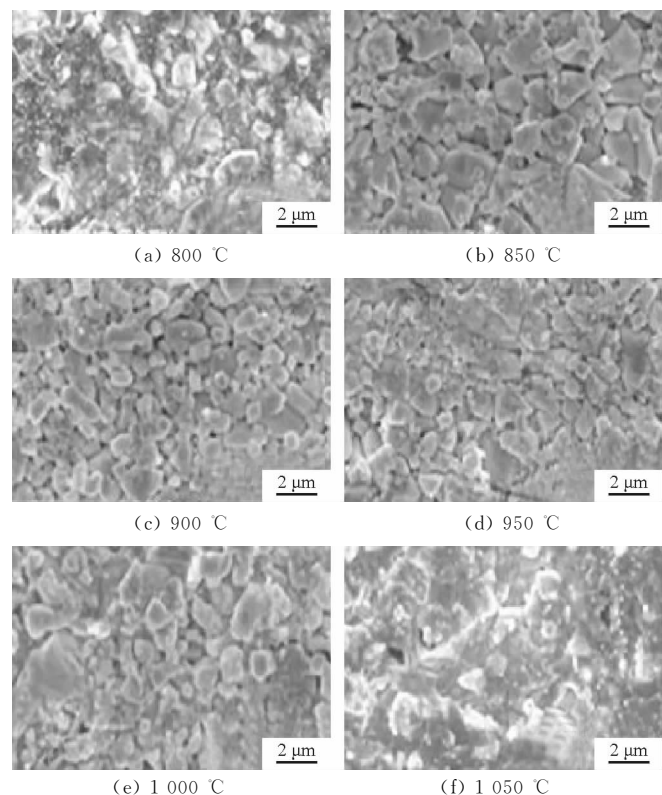


图 6 不同烧结温度下 Cu 的 SEM 形貌^[35]

Fig.6 SEM morphologies of copper at different sintering temperatures^[35]

最佳烧结温度为 950 ℃,最终的致密度可达到 90%。苗剑飞等^[36]基于 FDM 打印机搭建了气动式挤出直写 3D 打印机,同样实现了对 Cu/PVA 的打印,具体研究了分层高度、喷嘴直径、挤出压力和打印速度等工艺参数对坯体的影响,确定了最佳工艺参数,最后的成形件作为催化剂用于多孔 Cu 电极片,具有很广泛的应用前景。成形件诸如电加工电极、高压开关可用于三峡水库地质环境监测与灾害预警的装置器件。

2.4 Fe 及其金属复合材料

Fe 及其金属复合材料因其具有良好的延展性、导热性,日益受到重视。MASOOD S H 等^[37]研究了一种由 60%尼龙型基体和 40%铁粒子组成的用于熔融沉积建模(FDM)的新型金属/聚合物复合材料。同样基于铁尼龙 6 混合丝的研究,GAR G 等^[38]使用单螺杆挤出机制备了不同成分的铁尼龙 6 混合丝用于 FDM 打印,发现新开发的含 60%的 Fe 和 40%尼龙 6 的复合材料,是一种良好的应用于工业的耐磨复合材料,并且验证磨损率随着 Fe 含量的增加而降低,进一步增加 Fe 含量是值得探索的方向。针对铁尼龙 6 复合材料,HARISH G 等^[39]采用田口模型,以挤出温度和挤出质量等其他可控变量的方法,研究了尼龙 6-铁复合材料的熔体流动指数,发现温度和挤压载荷与 MFI 成正比,并确定了最佳挤出温度(230 ℃)和挤压载荷(50 N)。由于 Fe 在复合材料中的比例很大,所开发的材料将具有铁磁性,可以通过快速加工广泛应用于工业中。

2.5 其他金属及金属复合材料

基于不同金属材料所展现的功能特点,一些有独特应用的金属复合材料也展现出了优势。SINGH G 等^[40]开发了一种基于 FDM 螺杆挤出式金属打印,具体打印流程见图 7。用 17-4 PH 合金为原料,以聚乙二醇(PEG)和石蜡为粘结剂,通过螺杆旋转挤出成形,成形坯经过 500 ℃脱脂及 1 360 ℃烧结后得到了致密度为 95.6%的金属样件,为低成本制造复杂形状金属零件开辟了新道路,通过应用其他创新技术来缩短脱脂和烧结的时间是未来的发展方向。基于钛合金的研究,EL-SAYED H 等^[41]对 FDM 打印机进行了相关改进,通过配有一个加压容器和一个环形螺杆的打印机,将 Ti-6Al-4V 粉末、聚乙烯醇(PVA)和聚乙二醇(PEG)制成的粘结液用于打印,发现在 1 400 ℃高真空中烧结 3 h,可制备出不同形状的多孔钛支架,广泛应用于生物医学。WALTER L 等^[42]用 TPE 作为粘结剂与 WC-Co 金属陶瓷混合,挤出拉丝,采用 SDS(成形-脱脂-烧结)工艺与 FDM 打印机配合实现了硬质合金的打印,通过优化打印工艺可尽可能地减少孔洞,有望获得其他技术

无法获得的复杂几何形状和新性能的硬质合金零件。ZHANG X Y 等^[43]同样对 TiC 高锰陶瓷的打印成形展开了研究,组成为 14Mn-3Ni-2Mo-1.5C-79.5Fe 的基体材料粉末通过球磨分别与不同量的 TiC 粉末(20%、30%和 40%)混合 20 h,以甲苯为体系,加入相应的化学剂配成水凝胶,通过沉积成形得到高硬度的金属复合材料,可用于制作各种刀具。冯建等^[44]以工业 W 粉、Ni 粉、Cu 粉及 ABS 粉为原料制备了直径约 1.70 mm 的 93W-Ni-Cu/ABS 复合丝材。采用 FDM 技术打印该丝材,得到了具有复杂结构的成形坯。结果表明,当固相含量为 40% 时,成形坯的尺寸精度高、表面品质好、成形度高,可用于对材料刚度要求高而对材料韧性要求低的场合。

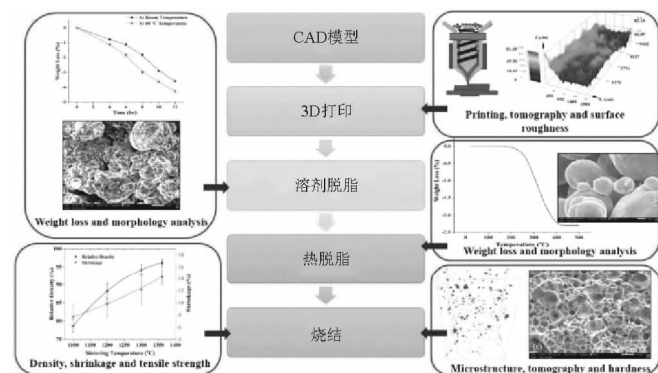


图7 17-4 PH 钢添加剂制造工艺流程图^[40]

Fig.7 Flow chart of additive manufacturing process of 17-4 pH steel^[40]

综上,FDM 型金属 3D 打印初步取得了一定的成果,打印出的成形件的各项性能指标满足工业需求。通过相关探索以及试验研究,运用于 FDM 打印的金属类复合材料日益增加,不仅是低熔点的金属能实现 FDM 型打印,一些熔点较高的金属或复合材料也能通过与粘合剂混合挤出拉丝或者配成浆料实现 FDM 型打印。

3 结 语

从 FDM 打印金属材料的种类出发,简述了近年来 FDM 型技术对不同金属材料的打印,其中重点阐述了粘接剂选择、打印工艺、后处理等方面的研究进展。针对以上存在的部分缺陷以及挑战,可以从 3 个方面研究,以丰富市场需求。

(1)成形工艺优化 影响 FDM 成形的工艺参数很多,对于成形参数的优化尤为重要。通过优化 FDM 设备的相应参数、将传统的切削加工应用于成形过程中、提高 FDM 打印的系统智能化水平、加入多组正交试验获得最佳工艺参数是 FDM 金属成形工艺优化的解决方式。

(2)材料应用的多元化 一方面,对适合于 FDM

金属打印的材料进行梳理和整合,做好相应的归纳。另一方面,探寻更多的适合 FDM 打印的金属粉末及金属复合材料。理论上所有金属粉末都可以实现 FDM 型 3D 打印,因此,对许多不同的金属及其化合物进行研究具有重要意义,以应用于航空、汽车、医学等更多领域中。

(3)粘结剂的选择与配比 粘结剂的选择至关重要,是保证金属粉末能够挤出拉丝或者配置成浆料实现 3D 打印的前提。对于粘结剂的选择以及配比需进行相关的试验验证,既要保证能有较好的溶解效果,也要保证其在后续处理过程中容易被去除,因为有机介质中的碳残留物会影响金属烧结过程,并使最终产品的性能恶化,这使得识别合适的粘结剂变得不可或缺。

参 考 文 献

- [1] 卢秉恒,侯颖,张建勋.增材制造国家标准体系建设与发展规划[J].金属加工(冷加工),2022(4):1-4.
- [2] 卢秉恒.增材制造技术——现状与未来[J].中国机械工程,2020,31(1):19-23.
- [3] MCMENAMIN P G, QUAYLE M R, MCHENRY C R, et al. The production of anatomical teaching resources using three-dimensional (3D) printing technology[J]. Anatomical Sciences Education, 2014, 7(6): 479-486.
- [4] GOYANES A, WANG J, BUANZ A, et al. 3D printing of medicines: engineering novel oral devices with unique design and drug release characteristics [J]. Molecular Pharmaceutics, 2015, 12(11): 4 077-4 082.
- [5] DANIEL G, BASTIAN H, JOHANNES F G, et al. Continuous 3D-printing for additive manufacturing[J]. Rapid Prototyping Journal, 2014, 20(4): 320-327.
- [6] PAULSEN S J, MILLER J S. Tissue vascularization through 3D printing: Will technology bring us flow? [J]. Developmental Dynamics, 2015, 244(5): 629-640.
- [7] 唐通鸣,张政,邓佳文,等.基于 FDM 的 3D 打印技术研究现状与发展趋势[J].化工新型材料,2015,43(6):228-230.
- [8] CHEE K C, KAH F L, CHU S L. Rapid Prototyping: Principles and Applications (3rd Edition) (With Companion Cd-rom) [M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2010.
- [9] JIN Y, LI H, HE Y, et al. Quantitative analysis of surface profile in fused deposition modelling[J]. Additive Manufacturing, 2015(8): 142-148.
- [10] SONG Y, LI Y, SONG W, et al. Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA[J]. Materials & Design, 2017, 123: 154-164.
- [11] SPOERK M, ARBEITER F, CAJNER H, et al. Parametric optimization of intra- and inter-layer strengths in parts produced by extrusion-based additive manufacturing of poly (lactic acid) [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(41): 4 540-4 555.
- [12] MONTERO M, ROUNDY S, DAN O, et al. Material characterization of fused deposition modeling (FDM) ABS by designed experiments[J]. Rapid Prototyping & Manufacturing Conference, 2001,

- 1(1): 1-21.
- [13] LI H, ZHANG S, YI Z, et al. Bonding quality and fracture analysis of polyamide 12 parts fabricated by fused deposition modeling[J]. Rapid Prototyping Journal, 2017, 23(6): 973-982.
- [14] CARNEIRO O, SILVA A, GOMES R. Fused deposition modeling with polypropylene[J]. Materials & Design, 2015, 83: 768-776.
- [15] 王雅先.激光选区快速成型技术在铸造行业的应用[J].铸造技术, 2010, 31(9): 1 259-1 260.
- [16] BEN V, JEAN-PIERRE K. Selective laser melting of biocompatible metals for rapid manufacturing of medical parts[J]. Rapid Prototyping Journal, 2007, 13(4): 196-203.
- [17] 费群星, 张雁, 谭永生, 等. 激光近净成形 Ni-Cu-Sn 合金[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(11): 2 052-2 056.
- [18] 刘长洋, 季根顺, 孟军虎. 超细 316L 不锈钢粉末注射成形的脱脂工艺[J]. 材料科学与工程学报, 2013, 31(3): 451-455.
- [19] LUQ R, XUE L Z, ZHENG Y S, et al. Process parameter optimization of extrusion-based 3d metal printing utilizing PW-LDPE-SA binder system[J]. Materials, 2017, 10(3): 35-45.
- [20] 邓诗贵. 锡铋低熔点金属 3D 打印材料及工艺的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2016.
- [21] 杨东霞, 单忠德, 王永威, 等. 金属熔融三维直写工艺研究[J]. 铸造技术, 2016, 37(10): 2 165-2168.
- [22] ANDERSEN K, DONG Y, KIM W S. Highly conductive three-dimensional printing with low-melting metal alloy filament[J]. Advanced Engineering Materials, 2017, 19(11): 301-307.
- [23] NIRUPAMA W, KUNAL H. KATE. Fused filament fabrication 3D printing with low-melt alloys[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2018, 3(1-2): 51-63.
- [24] 马李洋, 丁毅, 马立群, 等. 316L 不锈钢柠檬酸钝化工艺及其耐点蚀性能研究[J]. 表面技术, 2007, 36(2): 39-41.
- [25] GONG H J, DEAN S, KAMRAN K, et al. Comparison of stainless steel 316L parts made by FDM- and SLM-based additive manufacturing processes[J]. JOM, 2019, 71(3): 880-885.
- [26] YT A, GG B, CK C, et al. Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel-Science direct[J]. Additive Manufacturing, 2019, 30(C): 100 861.
- [27] 刘斌, 王玉香, 林梓威, 等. 316L/POM 复合材料 FDM 成型件成型质量的研究[J]. 塑料科技, 2020, 48(4): 32-35.
- [28] 蔡国栋, 程西云, 王典. FDM 型 3D 打印 316L 不锈钢试样和 La 对析出物形貌和分布的影响[J]. 材料研究学报, 2020, 34(8): 635-640.
- [29] NIKZADM S H, MASOOD I, SBARSK I. Thermo-mechanical properties of a highly filled polymeric composites for Fused Deposition Modeling[J]. Materials and Design, 2011, 32(6): 3 448-3 456.
- [30] SEYEON H, EDGAR I, REYES K M, et al. Thermo-mechanical characterization of metal/polymer composite filaments and printing parameter study for fused deposition modeling in the 3D printing process[J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(3): 771-777.
- [31] NASUHA S, MUSTAFFA I, MOHD H I I. Melt flow behavior of metal filled in polymer matrix for fused deposition modeling(FDM) filament[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 3 532: 84-88.
- [32] NABIPOUR M, AKHOUNDI B, SAED A B. Manufacturing of polymer/metal composites by fused deposition modeling process with polyethylene[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 137(21): 1 421-1 429.
- [33] SEONGIK H, CESAR S, HANUEL D, et al. Fabrication of 3D printed metal structures by use of high-viscosity Cu paste and a screw extruder[J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(3): 836-841.
- [34] GURMINDER S, JEAN-MICHEL M, DIDIER B, et al. Copper additive manufacturing using MIM feedstock: Adjustment of printing, debinding, and sintering parameters for processing dense and defectless parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(1): 449-462.
- [35] 侯同伟, 刘斌, 郝亮, 等. 基于注射 3D 打印成型的铜浆料烧结工艺研究[J]. 铸造技术, 2016, 37(4): 714-717.
- [36] 苗剑飞, 李飞, 何雪涛, 等. 3D 打印金属粉末/PVA 复合浆料的成型质量分析[J]. 塑料, 2019, 48(2): 119-122.
- [37] MASOOD S H, SONG W Q. Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling[J]. Materials & Design, 2004, 25(7): 587-594.
- [38] GAR G, HARIS H, SING H, et al. Tribological properties of fenylon6 composite parts prepared using fused deposition modelling[J]. Transactions of the Indian Institute of Metals, 2017, 70(5): 1 241-1 244.
- [39] HARISH G, RUPINDER S. Investigations for melt flow index of Nylon6-Fe composite based hybrid FDM filament[J]. Rapid Prototyping Journal, 2016, 22(2): 338-343.
- [40] SINGH G, MISSIAEN J, BOUVARD D, et al. Additive manufacturing of 17-4 PH steel using metal injection molding feedstock: Analysis of 3D extrusion printing, debinding and sintering[J]. Additive Manufacturing, 2021, 47(10): 2 287-2 299.
- [41] ELSAYED H, REBESAN P, GIACOMELLO G, et al. Direct ink writing of porous titanium(Ti-6Al-4V) lattice structures[J]. Materials Science & Engineering, 2019, C103.
- [42] WALTER L, IVICA D, MARKUS F, et al. Fabrication and properties of extrusion-based 3D-printed hardmetal and cermet components[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019, 82: 141-149.
- [43] ZHANG X Y, GUO L C, YANG F, et al. 3D gel printing of graded TiC-high manganese steel cermet[J]. Journal of Materials Science, 2019, 54(3): 2 122-2 132.
- [44] 冯建, 张静, 李邦桦, 等. FDM 用 93W-Ni-Cu/ABS 复合丝材的制备及表征[J]. 稀有金属与硬质合金, 2019, 47(5): 19-28.

(编辑: 刘卫)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com