

引文格式:邱杨,礼嵩明,蒋诗才.3D打印用PETG功能复合材料的制备及性能[J].航空制造技术,2026,69(18):25020363.

QIU Yang, LI Songming, JIANG Shicai. Preparation and properties of PETG functional composites for 3D printing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2026, 69(18): 25020363.

3D打印用PETG功能复合材料的制备及性能

邱 杨,礼嵩明,蒋诗才

(中国航空制造技术研究院复合材料技术中心,北京 101300)

[摘要] 采用溶液共混法制备羰基铁粉(CIP)/聚对苯二甲酸乙二醇-环己烷二甲醇酯(PETG)功能材料,研究不同粉体配比对材料结构与性能的影响;分别采用选择性激光烧结(SLS)技术与熔融沉积成型(FDM)技术对CIP/PETG功能粉体和线材进行3D打印成型,考察CIP质量分数及成型工艺对打印件性能的作用规律。结果表明,CIP/PETG功能粉体的流动性随CIP质量分数升高而提升,CIP质量分数为80%时,粉体休止角为44.5°,豪斯纳系数为1.27,基本满足SLS成型要求;CIP/PETG功能线材的表面粗糙度随CIP质量分数降低而减小,极限拉伸强度随CIP质量分数降低而升高。CIP/PETG 3D打印件具备一定的热传导与电磁吸收性能,其热电功能与CIP质量分数呈正相关;CIP质量分数为80%时,SLS与FDM打印件的热导率分别为0.88 W/(m·K)和0.84 W/(m·K),在8~18 GHz频段内平均反射率分别为-10.96 dB和-11.47 dB。

关键词: 聚对苯二甲酸乙二醇-环己烷二甲醇酯(PETG);羰基铁粉(CIP);热导率;反射率;选择性激光烧结(SLS);熔融沉积成型(FDM);航空电子系统

中图分类号:V25;TB33

文献标志码:A

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.25020363

Preparation and Properties of PETG Functional Composites for 3D Printing

QIU Yang, LI Songming, JIANG Shicai

(Composite Technology Center, AVIC Manufacturing Technology Institute, Beijing 101300, China)

[ABSTRACT] Functional materials of carbonyl iron powder (CIP)/poly (ethylene terephthalate-co-1, 4-cyclohexanedimethylene terephthalate) (PETG) were prepared by solution blending. The structure and properties of functional powders and filaments with different ratios were studied. The CIP/PETG functional powders and filaments were formed by selective laser sintering (SLS) and fused deposition modeling (FDM) respectively. The effects of different CIP mass fractions and forming processes on the properties of 3D printed products were investigated. The results show that: The fluidity of CIP/PETG functional powders is directly proportional to the CIP mass fraction. The angle of repose of the sample with 80% CIP mass fraction is 44.5°, and the Hausner ratio is 1.27, which basically meets the process requirements of SLS. For CIP/PETG functional filaments, the surface roughness decreases and the ultimate tensile strength increases with the decrease of CIP mass fraction. The 3D printed products of CIP/PETG functional materials possess heat conduction and electromagnetic absorption properties, and the thermoelectric effects are positively correlated with the CIP mass fraction. The thermal conductivities of the SLS-formed products and FDM-formed products with 80% CIP mass fraction are 0.88 W/(m·K) and 0.84 W/(m·K) respectively, and the average reflection loss in the frequency range of 8–18 GHz is -10.96 dB and -11.47 dB respectively.

Keywords: PETG; CIP; Thermal conductivity; Reflection loss; SLS; FDM; Avionics

收稿日期: 2025-11-12; 退修日期: 2026-01-30; 录用日期: 2026-03-11

基金项目: 重点实验室稳定支持专题项目(JCKY2020213006)

通信作者: 礼嵩明, 研究员, 研究方向为结构/功能一体化复合材料。

随着电子技术的高速发展,飞机搭载的航电系统也取得了长足的进步,其功能覆盖领域不断扩展,智能化程度越来越高,已成为体现飞机先进性的重要指标^[1-2]。新型飞机受益于先进航电设备的性能赋能,然而航电设备系统规模及复杂程度的不断提升,也衍生出一系列问题^[3-4]:首先,尖端航电设备发热量显著增大^[5-6];其次,产生电磁辐射的航电设备越来越多,导致飞机内电磁环境异常复杂^[7],如未能实现有效控制易诱发飞行安全隐患;最后,飞机内空间有限,越来越庞大的航电系统使得本就紧张的机内空间更加难堪重负^[8]。因此,兼具导热、电磁吸收特性,且空间利用率高的航电设备安装箱,是先进飞机制造领域的迫切需求^[9]。

为解决机内空间占用问题,一方面需要航电设备不断向小型化、集成化方向发展,另一方面还需要设备箱内部具有与设备配套的定制固定结构,从而实现空间的高效利用。因传统减材制造技术难以实现封闭区域内部复杂细微结构的精密加工,3D打印增材制造技术逐渐脱颖而出,成为新型机载设备箱的可选工艺方案^[10]。相较传统减材制造技术,3D打印技术在精密细微结构加工、制造周期及原材料利用率方面具有显著优势^[11-13]。目前较为成熟的3D打印技术包括选择性激光烧结(SLS)^[14]、光固化成型(VPP)^[15]、3D喷印(3DP)及熔融沉积成型(FDM)^[16],特别是近年来,高性能陶瓷光固化3D打印技术的相关研究取得了令人瞩目的成果^[17]。总体而言,SLS成型技术及FDM成型技术的应用较为普遍,已基本实现商业化^[18-19]。在已经发展成熟的增材制造工艺技术中,SLS和FDM的适用材料范围最为广泛,然而受加工条件和功能需求的制约,其应用范围有限,难以满足日益发展的制造业需求^[18]。基于此,近年来SLS和FDM的研究重点聚焦于利用功能性或增强型填料与聚合物基质的性能互补及协同效应,调节复合材料的加工性能和功能性,使其适配3D打印的加工工艺,满足用户的实际应用需求^[20-22]。

羰基铁粉(CIP)是一种具有“洋葱头”层状结构特征的金属羰基化合物,相较碳纳米管、石墨烯等电损耗吸收材料,CIP凭借磁损耗机制拥有更出色的低频吸收效果。此外铁氧体等其他磁损耗吸收材料高频吸收及耐温等级不及CIP,因此CIP成为1~18 GHz频段吸收材料的首要选择,常被用作防辐射污染电磁吸收涂料及粉末冶金添加剂,且具有一定传热功能^[23-24]。聚对苯二甲酸乙二醇-环己烷二甲醇酯(PETG)是一种聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)的衍生材料,具有抗冲击性、韧性好、耐化学性优异、加工便捷、低温成型等优势,适用于挤出、吹塑、注塑及FDM等多种成型工艺,是近年来发展迅速的高性能聚合物材料^[25-26]。将CIP与PETG复合,可充

分发挥CIP的功能特性与PETG的工艺普适性,制成兼具热传导与电磁吸收能力的功能粉体或线材,分别匹配SLS成型技术与FDM成型技术,前者成型件内部质量出色,适用于内腔承力结构,后者成型件塑形精度高,适用于表面精密结构,结合两种工艺特点,能够充分发挥3D打印增材制造技术原材料利用效率高,以及三维复杂结构加工及整体成型密封性好的优势,为导热/电磁吸收多功能航电设备箱的制造提供新的可能性。

1 试验及方法

本研究选用材料如下:PETG,万华化学集团股份有限公司;CIP,江苏天一新材料科技有限公司;二甲基甲酰胺(DMF),国药集团化学试剂有限公司。

将PETG加入DMF溶剂,配制成质量分数20%的混合溶液,在80℃下搅拌2 h,使PETG完全溶解;将CIP加入PETG溶液,通过调整配比制成CIP质量分数为60%、70%及80%的试验组,编号分别为CIP-60/PETG-40、CIP-70/PETG-30及CIP-80/PETG-20。保持80℃恒温搅拌6 h后停止加热,溶液冷却至室温后进行抽滤、干燥处理,将所得产物移入万能粉碎机,以5000 r/min速率粉碎为粗粉,粗粉进一步在球磨机中以160 r/min速率研磨为细粉,将所得细粉以120目筛网筛分,得到粒径125 μm以下的CIP/PETG功能粉体。

采用上海新硕精密机械有限公司的WSJ-12型单螺杆挤出机,挤出温度控制在175~220℃,以105 r/min转速将CIP/PETG功能粉体制成理论直径1.75 mm的功能线材。

采用湖南华曙高科技有限公司的HT251P型选择性激光烧结机制备CIP/PETG功能粉体的孔隙率试样,热扩散系数/比热容及反射率测试样品,参照设备说明书推荐参数范围及工艺试验预打印效果,设置激光功率为20 W,单层打印厚度为1 mm,激光扫描速率设置为6000 mm/s。

采用闪铸科技公司AD5X型FDM 3D打印机制备CIP/PETG功能线材的孔隙率试样,热扩散系数/比热容及反射率测试样品,打印速度40~45 mm/s、喷嘴直径0.5 mm、喷嘴温度225℃、床温65℃^[26]。孔隙率样品为20 mm×20 mm×2 mm;热扩散系数/比热容样品为直径12.7 mm的圆形试样,厚度2 mm;反射率样品尺寸为180 mm×180 mm×6 mm。

采用日本日立公司的BCPCA S4800型场发射环境扫描电子显微镜观察CIP/PETG功能粉体、线材及CIP的微观形貌,根据观察需要调整放大倍数,加速电压为10 kV;采用荷兰安米德公司的EYETECH型激光粒度仪表征CIP/PETG功能粉体的粒径分布;采用美国水星

系统公司的 Revolution Powder Analyzer 型粉体流动性测试仪表征 CIP/PETG 功能粉体的休止角、表面分型指数、松装密度、振实密度及豪斯纳系数;使用数显卡尺测量 CIP/PETG 功能线材直径,每隔 100 mm 取 1 个点,测试 10 次,结果取平均值;采用浙江戴纳自动化技术有限公司的 TR100 粗糙度仪表征 CIP/PETG 功能线材的粗糙度,测试区域长度 5 mm,测试区域间隔不小于 100 mm,测试 5 次,结果取平均值;采用美国英斯特朗公司的 INSTRON 5982 型高低温静力试验机测试 CIP/PETG 功能线材的极限拉伸强度,拉伸速率 5 mm/s,测试 5 次,结果取平均值;采用德国蔡司公司的 ZEISS Smartzoom5 超景深显微镜考察 3D 打印件内部质量,样品包埋后打磨抛光制成金相试样,通过图像分析仪法表征孔隙率;采用排水法测试热扩散系数/比热容试样的密度;采用德国耐驰公司的 LFA467 型闪射法导热仪表征热扩散系数及比热容,输入密度后由设备软件自动计算热导率值;采用中国航空制造技术研究院复合材料技术中心的弓形反射率测试系统测试反射率样品的反射率,测试频段为 8~18 GHz。

2 结果与讨论

2.1 CIP 及 CIP/PETG 功能粉体微观形貌

图 1 为 CIP 与 CIP/PETG 功能粉体的 SEM 照片。从图 1(a)中可以看出,CIP 表面平整性较好,整体形状比较接近规整球形。从图 1(b)和(c)中可以发现,功能粉体的组成可以大致分为 3 类:首先是体积相对较大的 PETG 微粒,通过表面吸附的形式与 CIP 结合;其次是 CIP 的聚集体,PETG 主要起到内部粘结的作用;最后是与 PETG 结合程度较低,独立性相对较强的 CIP 微球。从 SLS 铺粉工艺角度考虑,粉体外形越接近规整球形,最终烧结件的内部紧密度越高,成品表面越光滑平整。功能粉体的 3 种主要组成形式中,PETG 微粒的表面起伏不平,粗糙度较高,整体形貌无明显规律;CIP 聚集体也具有不规则外形,但表面因 PETG 覆盖相对光滑;CIP

微球的外形及表面状态最符合铺粉工艺要求,但相对较小的体积可能会导致扬粉问题。上述 3 种粉体中,CIP 微球最接近球形,流动性最佳,铺粉后粉体平面度最好,但其 PETG 含量最低,难以通过激光烧结与周边材料形成稳定结合,成型过程中依赖其他区域 PETG 流动填充;CIP 聚集体外形规整度略逊于 CIP 微球,但其粒径增加幅度相对较小,因此也具有一定流动性,且其组成中 PETG 含量有所增加,因此激光烧结过程中成型结合效果相对较好;PETG 微粒外形规整度最差且粒径较大,流动性最差,但其组成中 PETG 占主体,激光烧结过程中成型结合效果最佳。

2.2 CIP/PETG 功能粉体粒径

图 2 为不同组分配比功能粉体试验组的粒径分布情况。功能粉体的粒径分布表现出一定的规律,呈现双头峰分布的特点,两个粒径集中分布区域的功能粉体合计达到总量的 80% 以上。其中,主峰位于 50~100 μm ,其含量随粉体组成变化而改变,功能粉体中 PETG 增加,在此范围分布的粉体占比增加,介于 45%~68% 之间;次峰主要分布于 1~3 μm ,其占比也随着功能粉体组成的变化而改变,且随着功能粉体中 PETG 的增加表现出减小趋势,介于 12%~31% 之间。这可归因于 PETG 大分子链缠结增强了功能粉体粒子的聚集倾向。结合功能粉体的组成及 SEM 微观形貌观察结果分析,粒径较小且分布较窄的功能粉体部分主要由随机分散的 CIP 微球组成,而粒径较大且分布较宽的功能粉体则主要由 PETG 微粒及 CIP 聚集体组成。CIP-80/PETG-20 试验组的 PETG 质量分数最小,存在较多被 PETG 包覆程度较低的 CIP 微球,因此粉体在 1~3 μm 区间内的比例达 31%,高于 CIP-70/PETG-30 及 CIP-60/PETG-40 试验组的 23.4% 与 12.3%。由于基体材料 PETG 占比越低,CIP 与其结合及包覆的程度越低,更容易形成粒径较小且相对独立的 CIP 微球。CIP-60/PETG-40 试验组的 PETG 质量分数最高,一方面可以形成一定规模的 PETG 聚集区,该区域经粉碎处理后容易产生以 PETG

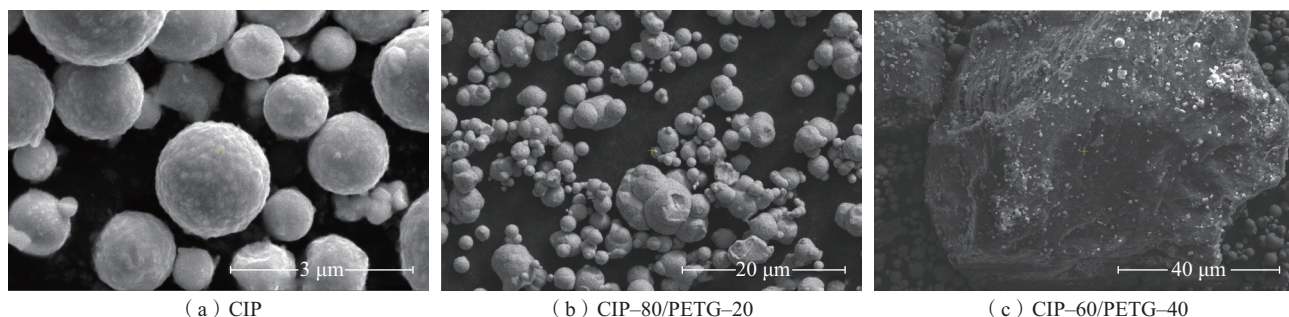


图 1 CIP 及 CIP/PETG 功能粉体的 SEM 照片

Fig.1 SEM images of CIP and CIP/PETG functional powders

为主体,CIP吸附于表面的PETG微粒;另一方面基体材料PETG与CIP微球的结合及包覆程度相对较高,容易形成以CIP为主体,PETG发挥内部结合作用的CIP聚集体结构。由于上述两种粉体组成结构的粒径相对较大,CIP-60/PETG-40试验组粉体在50~100 μm 区间内的比例达68%,而CIP-70/PETG-30及CIP-80/PETG-20试验组分别为57%与42.1%,变化规律与理论分析结论基本相符。

2.3 CIP/PETG功能粉体流动性

SLS成型技术对粉体材料的流动性有较高的要求,如粉体流动性差可能导致烧结件内部缺陷或表面质量不佳等问题^[14]。研究选取表面分型指数、休止角、振实密度、松装密度、豪斯纳系数作为粉体流动性的研究项目。

CIP/PETG功能粉体的振实密度、松装密度及豪斯纳系数数据如图3所示。CIP-80/PETG-20试验组的振实密度是0.93 g/cm^3 ,松装密度是0.73 g/cm^3 ,豪斯纳系

数则是1.27。豪斯纳系数是振实密度与松装密度的比值,较为成熟的PA12商用产品,如EOS PA2200的豪斯纳系数为1.10~1.18,一般认为豪斯纳系数1.25为粉体流动性良好与否的判断标准,1.25~1.40属于需谨慎使用但可接受范围,CIP-80/PETG-20试验组的结果已非常接近1.25,基本达到SLS成型技术的铺粉要求。形成这一现象的原因可能是CIP-80/PETG-20试验组中CIP微球含量相对较高,该组分流动性较好,振实前后变化幅度不大,振实密度与松装密度较为接近,因此豪斯纳系数相对较小。相反地,CIP-60/PETG-40试验组以PETG微粒与CIP聚集体为主要组成部分,粒径相对较大且外形均为不规则结构,因较强的交互作用与摩擦容易形成堆积粉体的内部空隙,振实后小粒径组分填充内部空隙,振实密度获得一定程度提高,因此豪斯纳系数达到1.56,粉体流动性相对较差。此外,CIP微球相对光滑且外形规整,可以在一定程度上辅助粒径较大且形状不规则的PETG微粒与CIP聚集体移动,因此CIP质量分数较高的试验组流动性更为理想。

CIP/PETG功能粉体的表面分型指数及休止角如图4所示。CIP-80/PETG-20、CIP-70/PETG-30及CIP-60/PETG-40试验组的表面分型指数分别为5.82、6.58及8.05。对比3组试验组的测试结果,CIP-80/PETG-20试验组的表面分型指数最接近2,表明该组粉体的颗粒最接近球形,整体规整性最好,CIP-60/PETG-40试验组包含大量形状不规则的PETG微粒及CIP聚集体,球形度最差,CIP-70/PETG-30组则介于两者之间。CIP-80/PETG-20、CIP-70/PETG-30及CIP-60/PETG-40试验组的休止角分别为44.5°、50.6°及58.3°,一般认为40°~45°为中等流动性范围,CIP-80/PETG-20试验组的休止角符合这一水平。CIP/PETG功能粉体休止角变化规律与表面分型指数结果类似,PETG质量分数越高,粉体越容

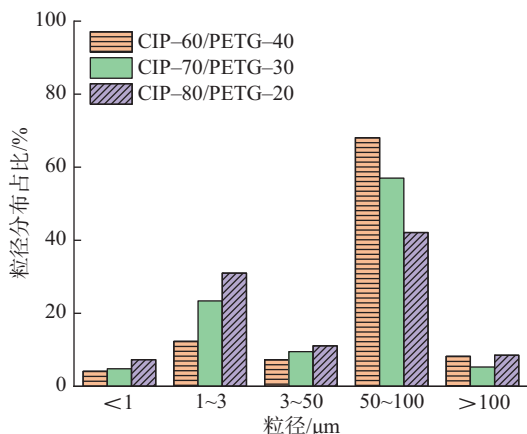


图2 CIP/PETG功能粉体的粒径分布情况

Fig.2 Particle size distribution of CIP/PETG functional powders

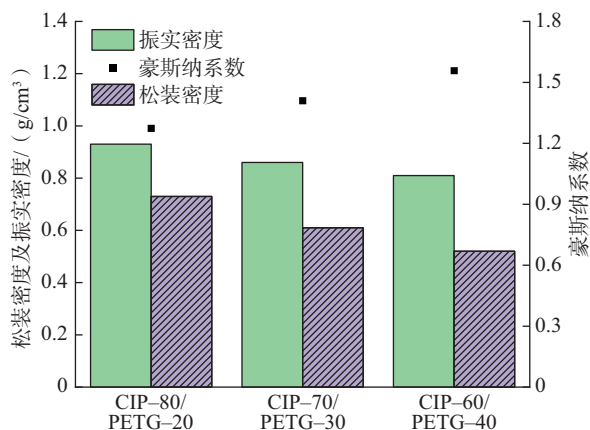


图3 CIP/PETG功能粉体的振实密度、豪斯纳系数及松装密度

Fig.3 Tap density, Hausner ratio and apparent density of CIP/PETG functional powders

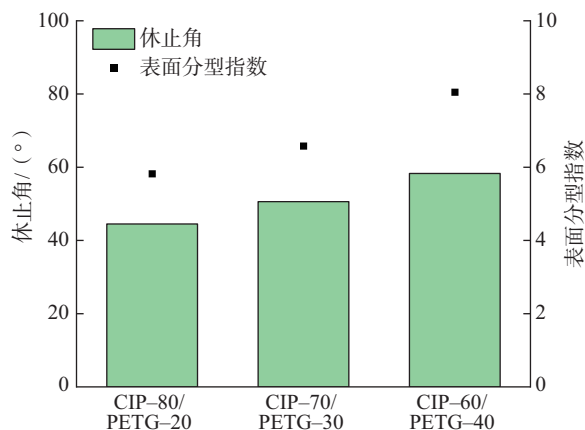


图4 CIP/PETG复合粉体的表面分型指数及休止角

Fig.4 Surface fractal dimension and angle of repose of CIP/PETG composite powders

易堆积,流动性越差。

2.4 CIP/PETG 功能线材性能

图5为不同组分配比CIP/PETG功能线材的直径测试结果。CIP-80/PETG-20、CIP-70/PETG-30及CIP-60/PETG-40试验组的平均直径分别为1.77 mm、1.63 mm及1.55 mm。分析数据可知,随着PETG质量分数的增加,功能线材的直径平均值逐渐减小,直径波动范围逐渐扩大,这可能是由于线材挤出后逐渐冷却过程中PETG发生轻微收缩,所以PETG质量分数越高的功能线材直径越小。CIP在线材挤出的热历程中热变形程度相对较小,而PETG作为一种聚合物材料热变形程度相对较大,因此PETG质量分数越高的功能线材直径波动范围越大。

图6为不同组分配比CIP/PETG功能线材的表面粗糙度测试结果。CIP-80/PETG-20、CIP-70/PETG-30及CIP-60/PETG-40试验组的 R_a 值分别为35.08 μm 、12.48 μm 及9.78 μm ,分析数据可知,随着PETG质量分数的增加,功能线材的表面粗糙度逐渐减小。在CIP/

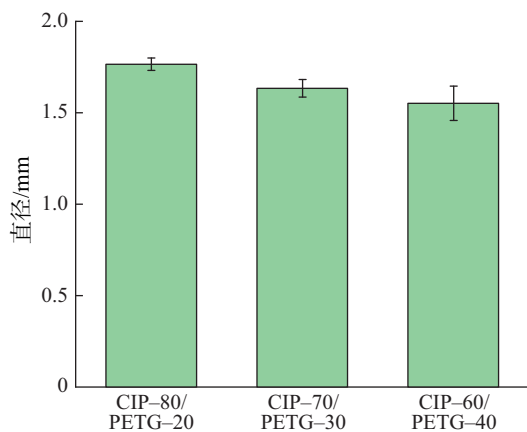


图5 CIP/PETG功能线材直径

Fig.5 Diameter of CIP/PETG functional filaments

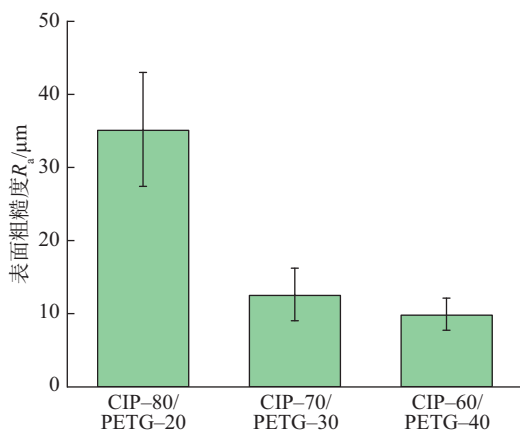


图6 CIP/PETG功能线材的表面粗糙度

Fig.6 Surface roughness of CIP/PETG functional filaments

PETG功能线材制备过程中,熔融流体若不具备较好的流动性及均匀性,挤出时有可能导致CIP再次团聚,沉降于线外层导致线材粗糙度增加,存在线材内部的CIP聚集区域也会成为内部缺陷,线材承受载荷后引发应力集中导致提前断裂。在FDM工艺条件下功能线材的挤出过程中,无定形的聚合物PETG能够受剪切应力和热作用发生形变,表现出较好的流动性;而CIP始终保持着固态微球形态,其良好的表面活性和聚合物的链缠结使得FDM挤出过程熔体流动性下降,进而导致功能线材内部空隙增大,表面粗糙度增大。随着功能线材中CIP质量分数增大,聚合物PETG相应减少,这一趋势愈加明显,功能线材的表面粗糙度增大;反之,则表现出相反的变化趋势,即随着功能粉体中PETG质量分数增大,CIP相应减少,功能线材的表面粗糙度下降。

图7为不同组分配比CIP/PETG功能线材的拉伸性能测试结果,CIP-80/PETG-20、CIP-70/PETG-30及CIP-60/PETG-40试验组的极限拉伸强度分别为4.8 MPa、8.1 MPa及11.6 MPa。图8为CIP/PETG功能线材截面的SEM的照片,能够较为清晰地观察到CIP微球及团聚结构。其中图8(a)为CIP-80/PETG-20试验组,因CIP质量分数最高,PETG包覆效果最差,能观察到十分明显的独立微球结构;图8(b)为CIP-70/PETG-30试验组,CIP质量分数有所降低,能观察到的独立微球数量较少,并存在形状不规则的团聚结构;图8(c)为CIP-60/PETG-40试验组,CIP质量分数最低,连续相基体材料的包覆较为充分,仅能在个别区域观察到的零星独立微球结构。分析数据与SEM图片可知,随着PETG质量分数的增加,功能线材的极限拉伸强度逐渐提高,这可能是由于CIP在功能线材内部存在形式以内部结合强度较差的团聚结构或独立微球为主,对功能线材极限拉伸强度的贡献较小;PETG组分在功能线材内部能够形成连续相结构,对传递应力及承载能力起主要作用,因此

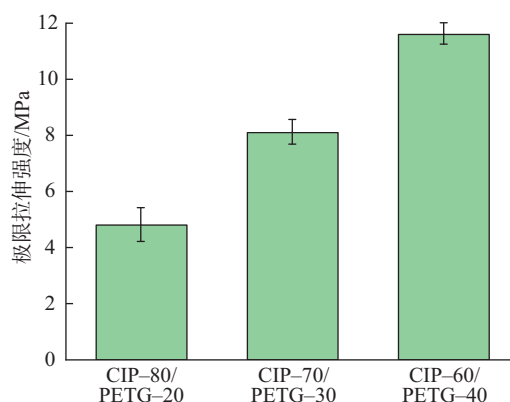


图7 CIP/PETG功能线材极限拉伸强度

Fig.7 Ultimate tensile strength of CIP/PETG functional filaments

PETG质量分数越高,功能线材的拉伸性能越好。此外,不仅CIP填料在PETG聚合物基质中的聚集形态和分散方式对复合材料构件的拉伸性能有较大的影响,而且填料与聚合物之间界面结合力也有较大影响。界面张力的作用会诱导微小裂纹形成,进而导致应力集中,也会降低复合材料的拉伸强度。图6表明,随着CIP/PETG功能粉体中CIP质量分数增大,PETG相应减少,功能线材的表面粗糙度有所增大,这与图7的结果是一致的。

2.5 CIP/PETG 功能材料3D打印制件性能

图9为不同组分配比CIP/PETG功能粉体SLS成型件与功能线材FDM成型件的孔隙率测试结果。由SLS工艺烧结成型的CIP-80/PETG-20、CIP-70/PETG-30及CIP-60/PETG-40试验组的孔隙率分别为7.1%、5.9%及4.7%;由FDM工艺熔融堆积成型的CIP-80/PETG-20、CIP-70/PETG-30及CIP-60/PETG-40试验组的孔隙率分别为17.4%、14.3%及11.8%。分析数据可知,SLS成型件与FDM成型件的孔隙率具有类似的规律,即PETG

质量分数越高,3D打印成型件的孔隙率越小。这可能是由于功能材料主要依靠PETG实现内部结合,因此PETG含量越高,3D打印成型件内部质量越好。此外,对比SLS成型件与FDM成型件的孔隙率,可以发现SLS成型件的内部质量优于FDM成型件,这可能是因为FDM熔融堆积过程中有气体混入,内部孔隙增多,而SLS成型件的密实度更好,内部孔隙相对较少,因此内部质量更佳。

CIP/PETG功能材料SLS及FDM成型件实物图如图10所示。CIP/PETG复合材料具有较好的可塑性与工艺适配性,能够以不同的材料形式灵活匹配上述两种

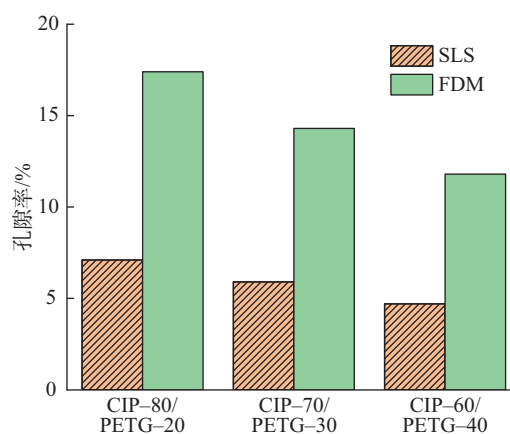
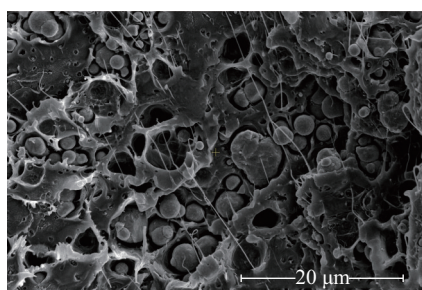
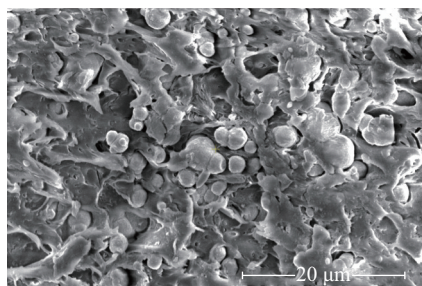


图9 CIP/PETG功能材料3D成型件的孔隙率

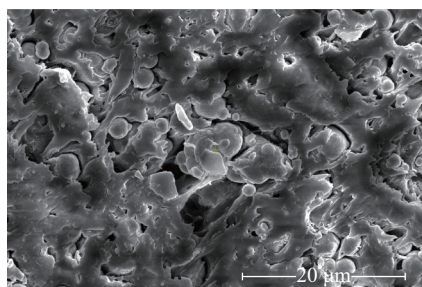
Fig.9 Porosity of CIP/PETG functional materials molded by 3D printing



(a) CIP-80/PETG-20



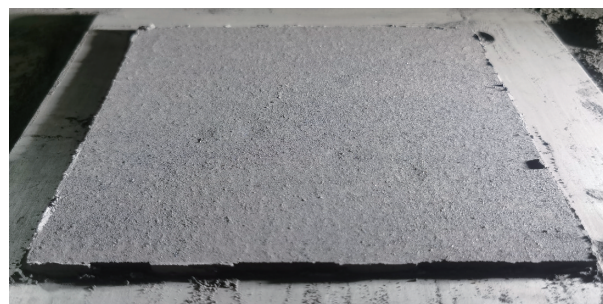
(b) CIP-70/PETG-30



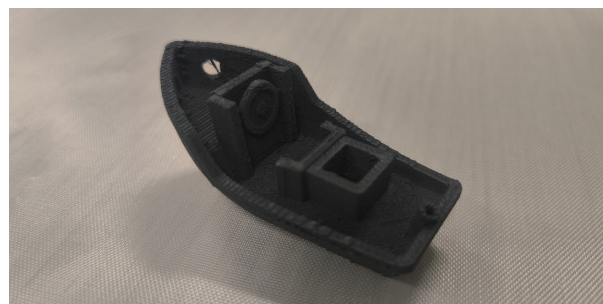
(c) CIP-60/PETG-40

图8 CIP/PETG功能线材截面的SEM照片

Fig.8 SEM images of cross-section of CIP/PETG functional filaments



(a) SLS成型件



(b) FDM成型件

图10 CIP/PETG功能材料3D打印成型件

Fig.10 3D printing work of CIP/PETG functional materials

主流3D打印技术。对比CIP/PETG复合材料以SLS和FDM两种成型方式的差异,前者的紧密度较高,内部质量更为理想,但表面相对粗糙且成型复杂结构难度较大;后者则在表面质量及塑形方面更具优势。

图11为不同组分分配比CIP/PETG功能粉体SLS成型件与功能线材FDM成型件的热导率测试结果。由SLS工艺烧结成型的CIP-80/PETG-20、CIP-70/PETG-30及CIP-60/PETG-40试验组的热导率分别为 $0.88 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $0.71 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 及 $0.59 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;由FDM工艺熔融堆积成型的CIP-80/PETG-20、CIP-70/PETG-30及CIP-60/PETG-40试验组的热导率分别为 $0.84 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 、 $0.68 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 及 $0.53 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。分析数据可知,SLS成型件与FDM成型件的热导率具有类似的规律,即PETG质量分数越高,3D打印成型件的热导率越小。这可能是由于CIP传热能力更强,是3D打印成型件热导率变化的主要影响因素,CIP质量分数越高,3D打印成型件的传热能力越强。此外,PETG是一种高分子材料,在3D打印成型件内部起到了一定的隔热效果,使PETG的质量分数与3D打印成型件热导率成反比。对比SLS成型件与FDM成型件的热导率,可以发现前者的导热能力优于后者,这是因为FDM成型件内部质量相对较差,孔隙内封存的气体影响整体导热效果,而SLS成型件的内部质量更好,因此导热效果更为理想。对于传导型填料/聚合物复合体系,功能填料对复合材料传导性能的提升作用,在一定程度上可以归因于分散在聚合物基体中的填料粒子发生聚集连接,形成渗滤网络与传导通路,从而改善复合体系的传导性能,关于这一点已有报道^[27]。在CIP/PETG功能材料3D打印成型件传热过程中,一般情况下热量需多次经历基体材料、功能填料及界面构成的传导路径,使界面热阻成为制约材料传热能力的主控因素。CIP/PETG功能材料中CIP含量越

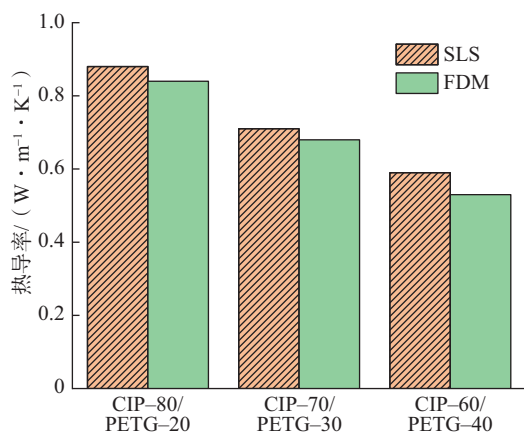
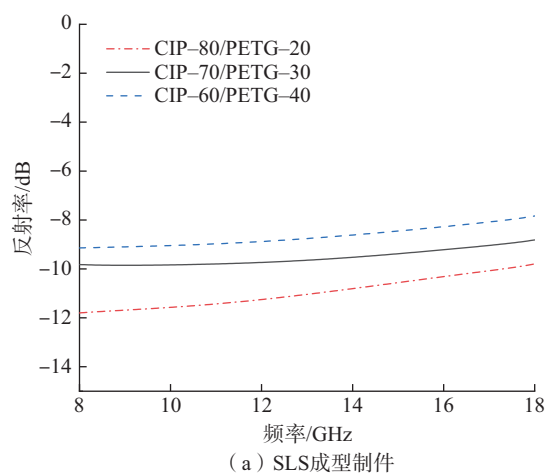


图11 CIP/PETG功能材料3D成型件的热导率

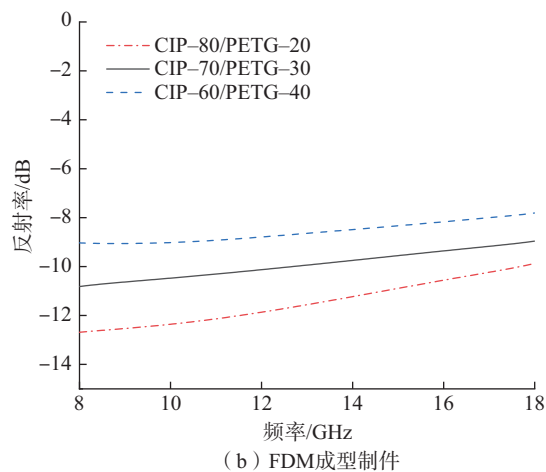
Fig.11 Thermal conductivity of CIP/PETG functional materials molded by 3D printing

高,其内部CIP就越有可能相互接触形成导热通路,整体结构中渗流网络的规模及覆盖范围也越大,因此CIP-80/PETG-20试验组具有更强的导热能力。

图12为CIP/PETG功能粉体SLS成型件与功能线材FDM成型件在8~18 GHz频段范围内的反射率曲线。分析结果可知,SLS成型件与FDM成型件在该频段范围内均有一定电磁吸收能力,且随着CIP质量分数的提升,SLS成型件与FDM成型件的反射率均有所降低,但组间差异相对较小。电磁吸收材料的功能作用机制源于衰减损耗与阻抗匹配的协同效果,从SLS成型件角度分析,在8~18 GHz频段范围内CIP的电磁波吸收能力以动态磁化共振机制主导,涡流损耗随频率增加逐渐发挥一定作用,CIP质量分数越高,磁偶极子相对数量越多,3D打印成型件的电磁吸收能力也越强;从FDM成型件角度分析,CIP质量分数越高,材料内部越容易形成一定规模的导电网络,影响阻抗匹配效果,使表层反射电磁波比例提升,电磁波未能进入材料内部,自然也就无法被损耗吸收。在衰减损耗与阻抗匹配的综合作用下,不同试验组间反射率差异较小。从频率变化角度



(a) SLS成型件



(b) FDM成型件

图12 CIP/PETG功能材料3D打印件反射率

Fig.12 Reflectivity of 3D-printed CIP/PETG functional parts

分析,各试验组反射率数据曲线呈小幅上升趋势,这是因为随着频率增加,外部交变磁场的变化速率越来越快,CIP作为一种磁损耗介质,磁矩响应能力逐渐无法匹配,发生频散现象导致各试验组高频反射率小幅上升。对比SLS成型件与FDM成型件的反射率,可以发现在组成配比相近的条件下,两者的反射率相差较小,其中FDM成型件的反射率略低于SLS成型件。例如,CIP-80/PETG-20试验组8~18 GHz频段范围内平均反射率分别为-10.96 dB及-11.47 dB。这是由于两者中功能有效成分均为CIP,因此在CIP质量分数及分布方式大体一致的情况下,反射率也不会出现明显差异。此外,与热导率结果分析类似,由于FDM成型件内部质量相对较差,其内部存在更多类似气泡的缺陷,电磁波在FDM成型件内部会接触更多、更复杂的不同相界面,影响电磁波的反射及衍射,这可能是FDM成型件反射率略低于SLS成型件的原因。

3 结论

(1)通过溶液共混的方式制备了匹配选择性激光烧结(SLS)工艺的羰基铁粉(CIP)/聚对苯二甲酸乙二醇-环己烷二甲醇酯(PETG)功能粉体与匹配熔融堆积成型(FDM)工艺的CIP/PETG功能线材。

(2)CIP/PETG功能粉体的性能基本满足SLS工艺要求,CIP-80/PETG-20功能粉体表面分型指数5.82、休止角44.5°、豪斯纳系数1.27;CIP/PETG功能线材的性能基本满足FDM工艺要求,CIP-60/PETG-40功能线材直径1.55 mm、表面粗糙度9.78 μm 、极限拉伸强度11.6 MPa。

(3)CIP/PETG功能材料的3D打印成型件具有导热功能,其热导率与PETG质量分数成反比,CIP-80/PETG-20试验组SLS工艺与FDM工艺成型件的热导率分别为0.88 W/(m·K)及0.84 W/(m·K)。

(4)CIP/PETG功能材料的3D打印成型件具有电磁吸收功能,在8~18 GHz频段范围内,其反射率与CIP质量分数成正比。

参考文献

- [1] 周庆,王金岩.先进航空电子系统架构及研发模式研究[J].航空电子技术,2025,56(1): 1-7.
- [2] ZHOU Qing, WANG Jinyan. Research on advanced avionics system architecture and development mode[J]. Avionics Technology, 2025, 56(1): 1-7.
- [3] 朱志强,王世奎,李成文,等.综合化航电系统中统一网络技术分析[J].航空计算技术,2022,52(3): 125-129.
- [4] ZHU Zhiqiang, WANG Shikui, LI Chengwen, et al. Unified network technology analysis in integrated avionics system[J]. Aeronautical Computing Technique, 2022, 52(3): 125-129.

- [5] 张卫红,唐长红.航空航天装备的轻量化:挑战与未来[J].航空学报,2024,45(5): 1-7.

- [6] ZHANG Weihong, TANG Changhong. Lightweighting of aerospace and aeronautical equipment: Challenges and perspectives[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(5): 1-7.

- [7] 邢丽英,李亚锋,陈祥宝.先进复合材料在航空装备发展中的地位与作用[J].复合材料学报,2022,39(9): 4179-4186.

- [8] XING Liying, LI Yafeng, CHEN Xiangbao. Status and role of the advanced composite materials in the development of aviation equipment[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4179-4186.

- [9] 赵三军,曹平,朱建龙,等.综合模块化航空电子设备液冷散热研究进展[J].低温与超导,2022,50(11): 93-98.

- [10] ZHAO Sanjun, CAO Ping, ZHU Jianlong, et al. Progress of liquid cooling heat dissipation for integrated modular avionics[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2022, 50(11): 93-98.

- [11] 阿嵘,庞丽萍,杨东升,等.高速飞行器机载综合热管理系统设计与优化[J].化工学报,2020,71(S1): 315-321.

- [12] E Rong, PANG Liping, YANG Dongsheng, et al. Design and optimization of integrated thermal management system for high-speed aircraft[J]. CIESC Journal, 2020, 71(S1): 315-321.

- [13] 杜浩宇.电磁环境仿真系统研究及应用[J].中国高新科技,2022(5): 37-38.

- [14] DU Haoyu. Research and application of electromagnetic environment simulation system[J]. China High-Tech, 2022(5): 37-38.

- [15] 周焯斐,刘艳涛.民用飞机综合模块化航电系统分区和资源分配的研究[J].民用飞机设计与研究,2014(3): 88-91.

- [16] ZHOU Yefei, LIU Yantao. Research on IMA system partition and resource allocation for civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2014(3): 88-91.

- [17] 景致,张健.航空电磁超材料研究进展及发展建议[J].航空材料学报,2023,43(6): 44-51.

- [18] JING Zhi, ZHANG Jian. Research progress and development suggestions on aeronautical electromagnetic metamaterial[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2023, 43(6): 44-51.

- [19] 何佳珏,熊威.先进复材在航空飞行器上的应用及加工成形技术探究[J].粘接,2025,52(6): 92-96.

- [20] HE Jiajue, XIONG Wei. Application and processing forming technology of advanced composite materials in aviation aircraft[J]. Adhesion, 2025, 52(6): 92-96.

- [21] GAJBHIYE T S, WAGHMARE S, DHANDE M, et al. Polymer composite additive manufacturing: Applications, challenges and opportunities[J]. Materials Today: Proceedings, 2024, 47: 1860-1864.

- [22] FIJUL KABIR S M, MATHUR K, SEYAM A M. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties[J]. Composite Structures, 2020, 232: 111476.

- [23] YUAN S Q, SHEN F, CHUA C K, et al. Polymeric composites for powder-based additive manufacturing: Materials and applications[J]. Progress in Polymer Science, 2019, 91: 141-168.

- [24] DAMINABO S C, GOEL S, GRAMMATIKOS S A, et al. Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing):

Techniques for polymer material systems[J]. *Materials Today Chemistry*, 2020, 16: 100248.

[15] 闫春泽, 史玉升, 杨劲松, 等. 高分子材料在选择性激光烧结中的应用——(II)材料特性对成形的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2010, 26(8): 145–149.

YAN Chunze, SHI Yusheng, YANG Jinsong, et al. Application of polymeric materials in selective laser sintering—(II) effects of polymer characteristics on forming[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2010, 26(8): 145–149.

[16] LI X, SU H J, DONG D, et al. New approach to preparing near zero shrinkage alumina ceramic cores with excellent properties by vat photopolymerization[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2024, 193: 61–72.

[17] HAO S Q, SU H J, ZHAO D, et al. Complex shaped $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{YAG}/\text{ZrO}_2$ eutectic ceramics with excellent high temperature mechanical properties printed by vat photopolymerization[J]. *Additive Manufacturing*, 2025, 101: 104703.

[18] GUPTA A, SAHU S, UKEY P, et al. Additive manufacturing for space applications: A review of processes, properties, and prospects[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 236: 1037–1062.

[19] NANDHAKUMAR R, VENKATESAN K. A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: Microstructure, physical properties, tribological, and surface roughness[J]. *Materials Today Communications*, 2023, 35: 105538.

[20] WU H, FAHY W P, KIM S, et al. Recent developments in polymers/polymer nanocomposites for additive manufacturing[J]. *Progress in Materials Science*, 2020, 111: 100638.

[21] LUPONE F, PADOVANO E, CASAMENTO F, et al. Process phenomena and material properties in selective laser sintering of polymers: A review[J]. *Materials*, 2022, 15(1): 183.

[22] SIVADAS B O, ASHCROFT I, KHLOBYSTOV A N, et al. Laser sintering of polymer nanocomposites[J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2021, 4(4): 277–300.

[23] 王才良, 程明, 罗振涛, 等. 碳基铁粉基电磁屏蔽材料的研究现状与进展[J]. *航空科学技术*, 2022, 33(9): 1–6.

WANG Cailiang, CHENG Ming, LUO Zhentao, et al. Research status and progress of carbonyl iron powders based electromagnetic shielding materials[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2022, 33(9): 1–6.

[24] 汪旭文, 覃维, 王鲜, 等. 片状碳基铁粉/ZnO晶须填充聚合物基复合材料导热与吸波性能[J]. *磁性材料及器件*, 2022, 53(4): 11–16.

WANG Xuwen, QIN Wei, WANG Xian, et al. Heat conducting and wave-absorbing properties of polymer based composites filled with flake carbonyl-iron/ZnO-whisker[J]. *Journal of Magnetic Materials and Devices*, 2022, 53(4): 11–16.

[25] MERCADO-COLMENERO J M, LA RUBIA M D, MATA-GARCIA E, et al. Experimental and numerical analysis for the mechanical characterization of PETG polymers manufactured with FDM technology under pure uniaxial compression stress states for architectural applications[J]. *Polymers*, 2020, 12(10): 2202.

[26] AHER Y, MAHESH V, JOSEPH A, et al. Machine learning enhanced multi-scale dynamic viscoelastic analysis of 3-D printable PETG nanocomposite filaments: Leveraging FFT-based mesh-free computational homogenization for complex microstructures[J]. *Physica B: Condensed Matter*, 2025, 701: 416965.

[27] ZHOU X, WU L X, WANG J L. Recent developments in conductive polymer composites for fused deposition modeling[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 174: 107739.

(责编 七七)