

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.03.015

## 3D 打印工艺参数对聚醚醚酮 (PEEK) 介电性能的影响

林初明, 陈柏, 王尧尧

(南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

**摘要:**为研究 3D 打印工艺对聚醚醚酮(PEEK)介电性能的影响,基于熔融沉积成型技术,选择多种工艺参数进行单因素实验,针对喷头温度、基板温度、打印速度、层厚、腔室温度等工艺进行研究。实验结果表明:在喷头温度 400 °C、基板温度 140 °C、打印速度 30 mm/s、层厚 0.1 mm、腔室温度 120 °C 时 PEEK 样件介电常数最低;1~100 MHz 频段内频率对介电常数无影响;1~40 MHz 频率内,各工艺参数测试得到的 PEEK 介电损耗角正切均大幅波动;在 40~100 MHz 频率内,PEEK 介电损耗角正切均呈现波动上升的趋势。该研究结果将为天线 PEEK 介质层的结构设计和制造提供依据。

**关键词:**3D 打印;工艺参数;聚醚醚酮;介电性能

**中图分类号:**TH164 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)03-0070-04

## Effect of 3D Printing Process Parameters on Dielectric Properties of PEEK

LIN Chuming, CHEN Bai, WANG Yaoyao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:**In order to study the influence of 3D printing process on the dielectric properties of PEEK, multiple process parameters were chosen to perform a single factor experiment by fused deposition molding technology, and the technologies of nozzle temperature, substrate temperature, printing speed, layer thickness and chamber temperature etc. were studied. The experiment results show that the dielectric constant of PEEK products is the lowest when the nozzle temperature is 400 °C, the substrate temperature is 140 °C, the printing speed 30 mm/s, the layer thickness 0.1 mm, and the chamber temperature 120 °C. The frequency in the 1—100 MHz frequency band has no effect on the dielectric constant. Within the frequency of 1—40 MHz, the dielectric loss tangent of PEEK measured by each process parameter fluctuates drastically, and within the frequency of 40—100 MHz, the fluctuation of dielectric loss tangent of PEEK goes up. The research results provide a basis for the structural design and manufacture of the PEEK dielectric layer of antenna.

**Keywords:**3D printing; process parameters; PEEK; dielectric properties

### 0 引言

随着电子设备的不断发展,各种类型共形天线的需求量越来越大,同时各种飞行器外形曲面不断变化,传统印制电路和结构机械加工的工艺精度不足,缺乏灵活度,难以满足制造需求。3D 打印技术的出现则为共形天线的制造提供了一种新的思路<sup>[1]</sup>。

共形电路 3D 打印常用的材料包含介电油墨、光敏树脂、金属纳米颗粒油墨等<sup>[2]</sup>,其中介质层材料不仅对材料的强度有一定要求,而且要求材料有低的介电性能,以减少对天线功能的影响。VESELY 等<sup>[3]</sup>对 ABS、PLA、PETG 3 种材料以 FDM 形式打印样件,并评估了打印层厚对其介电性能的影响。除 ABS 外,其余材料介电常数随层厚增加上升而降低,介电损耗无明显相关性。

GOULAS 等<sup>[4]</sup>研究了不同打印参数如线宽、层高和填充等对 Premix Oy 材料(ABS 中填入陶瓷材料)介电常数和介电损耗的影响,发现这些参数主要影响了实际打印后的材料密度,存在空气气隙会显著降低介电常数。

聚醚醚酮(PEEK)是一种特种高分子材料,具有机械强度高、耐高温、良好的绝缘性、无毒耐腐蚀等优点,常用于航空工业、汽车制造、医疗康复等领域。虽然其介电常数高于 ABS,但拥有高强度和高熔点,在航空航天电子领域有较好的应用前景。

本文基于熔融沉积成型(FDM)3D 打印技术,采用单因素实验法,研究 3D 打印工艺参数对 PEEK 介电性能的影响,为天线结构设计和制造提供依据。

**第一作者简介:**林初明(1997—),男,浙江台州人,硕士研究生,研究方向为高性能材料增材制造,834968805@qq.com。

## 1 3D 打印 PEEK 样件制备

### 1.1 实验原料及设备

东莞某公司 PEEK 丝材:  $\phi 1.75$  mm, 由吉林某公司的 550 G 颗粒拉制成丝。

东莞某公司 3D 打印机: MAGIC-HT-PRO。

介电性能测试: Agilent 4294A, 美国某公司。

### 1.2 实验设计

在熔融沉积成型 3D 打印过程中, 许多工艺参数会对其介电性能产生影响。在本研究中, 选择了 5 种工艺参数(喷头温度、基板温度、打印速度、打印层厚、腔室温度), 采用单因素实验法, 研究打印工艺参数对介电性能的影响, 如表 1 所示。考虑天线使用工况, 介电性能测试频段为 1~100 MHz。

表 1 PEEK 3D 打印工艺参数

工艺参数	取值	其他参数
喷头温度/°C	380, 400, 420, 440	基板温度 100 °C、腔室温度 90 °C、打印速度 20 mm/s, 层厚 0.2 mm, 填充率 100%
基板温度/°C	60, 100, 140	喷头温度 380 °C、腔室温度 90 °C、打印速度 20 mm/s, 层厚 0.2 mm, 填充率 100%
打印速度/(mm/s)	10, 20, 30, 40	喷头温度 380 °C、基板温度 100 °C、腔室温度 90 °C, 层厚 0.2 mm, 填充率 100%
打印层厚/mm	0.1, 0.2, 0.3	喷头温度 380 °C、基板温度 100 °C、腔室温度 90 °C, 打印速度 20 mm/s, 填充率 100%
腔室温度/°C	60, 90, 120	喷头温度 380 °C、基板温度 100 °C、打印速度 20 mm/s, 层厚 0.2 mm, 填充率 100%

### 1.3 样件制备

样件尺寸为 20 mm × 20 mm × 1.5 mm, 使用 SolidWorks 三维建模软件设计出三维模型, 导出为 STL 格式文件。用 IEMAI 3D V1.4.7 切片软件进行参数设置并进行切片处理, 转换成 Gcode 文件导入 3D 打印机, 对测试样件进行打印。

## 2 制备工艺对样件介电性能的影响研究

### 2.1 喷头温度对介电性能的影响

喷头温度指的是 3D 打印过程中喷头的加热温度, 其与材料的熔点相关。不同喷头温度下得到的 PEEK 样件介电常数如图 1 所示, 介电损耗角正切如图 2 所示。通过实验可见, 喷头温度在

420 °C 时, 打印出的样件介电常数最高, 保持在 7.9 左右; 在 400 °C 最低, 保持在 2.0 左右。在测试频率段内, 每个参数下介电常数随频率变化均保持稳定。随着喷头温度的上升, 介电损耗角正切有一定下降的趋势。在 1~5 MHz 时介电损耗角正切随频率增加大幅度下降, 在 5 MHz 后保持稳定。

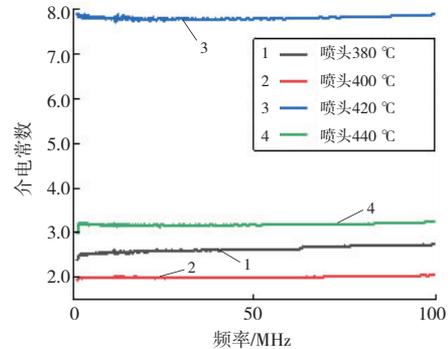


图 1 喷头温度对 PEEK 介电常数的影响

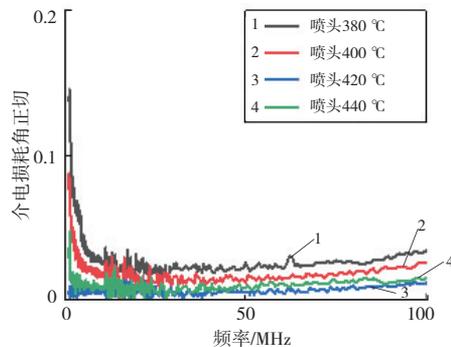


图 2 喷头温度对 PEEK 介电损耗的影响

### 2.2 基板温度对介电性能的影响

基板温度指的是 3D 打印过程中材料沉积基板的加热温度。不同基板温度下得到的 PEEK 样件介电常数如图 3 所示, 介电损耗角正切如图 4 所示。通过实验可见, 介电常数随基板温度的提高而下降, 在基板温度 140 °C 时最低, 稳定在 3.5 左右; 在基板温度 60 °C 时最高, 稳定在 6.9 左右。在测试频率段内, 每个参数下介电常数随频率变化均保持稳定。介电损耗在基板温度 140 °C 时最高, 100 °C 和 60 °C 时较为接近, 随频率增加则呈现出先降后升的趋势; 在 5~25 MHz 内介电损耗存在大幅度的波动, 在 25~100 MHz 时呈现波动上升的趋势。

### 2.3 打印速度对介电性能的影响

打印速度指 3D 打印过程中喷头扫描界面轮廓的速度, 主要影响样件的打印效率和精度。不同打印速度下得到的 PEEK 样件的介电常数如

图5所示,介电损耗角正切如图6所示。通过实验可见,介电常数随打印速度的提高呈现先降后升的趋势,在打印速度 10 mm/s 时最高,稳定在 6.0 左右;在打印速度 30 mm/s 时最低,稳定在 2.1 左右。在测试频率段内,每个参数下介电常数随频率变化均保持稳定。介电损耗角正切在 1~30 MHz 的频率范围内各工艺参数测试结果接近且均大幅度波动,在 30~100 MHz 时,呈现波动上升的趋势。

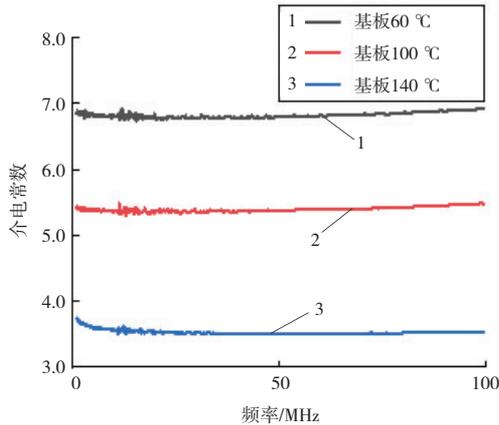


图3 基板温度对 PEEK 介电常数的影响

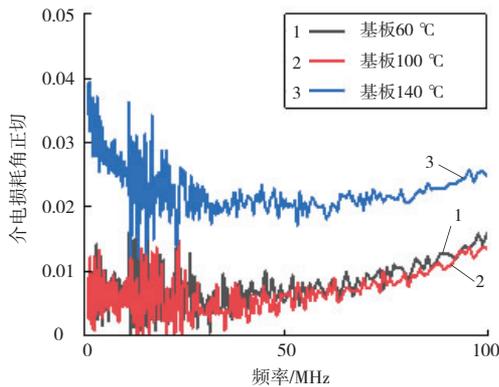


图4 基板温度对 PEEK 介电损耗的影响

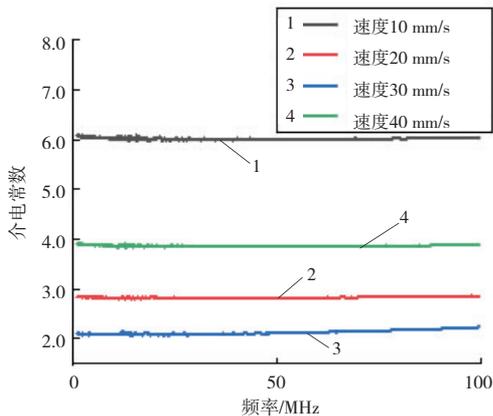


图5 打印速度对 PEEK 介电常数的影响

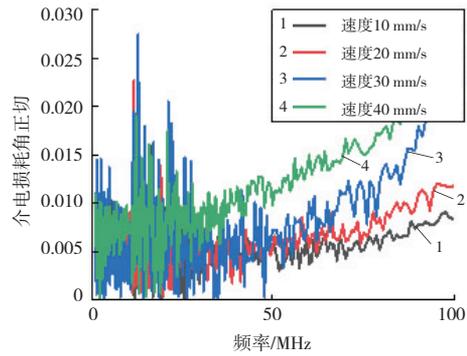


图6 打印速度对 PEEK 介电损耗的影响

### 2.4 打印层厚对介电性能的影响

打印层厚指的是材料切片时的分层厚度,主要影响表面精度和打印效率。不同打印层厚下得到的 PEEK 样件介电常数如图 7 所示,介电损耗角正切如图 8 所示。

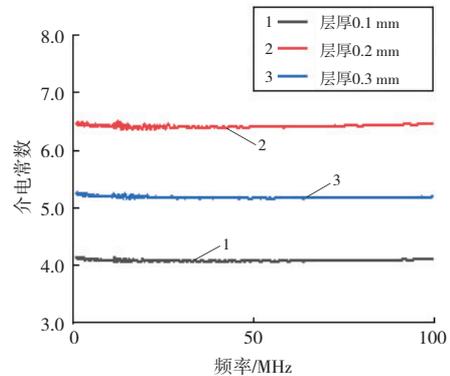


图7 打印层厚对 PEEK 介电常数的影响

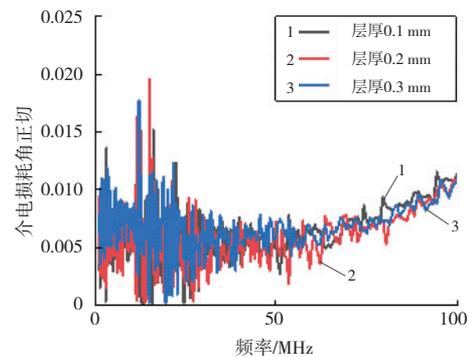


图8 打印层厚对 PEEK 介电损耗的影响

通过实验可见,介电常数随打印层厚的提高呈现先升后降的趋势,在打印层厚 0.1 mm 时最低,稳定在 4.1 左右;在打印层厚 0.2 mm 时最高,稳定在 6.5。在测试频率段内,每个参数下介电常数随频率变化均保持稳定。介电损耗角正切在 1~35 MHz 的频率范围内各工艺参数测试结果接近且均大幅度波动,在 35~100 MHz 时,呈现缓慢波动上升的趋势。

## 2.5 腔室温度对介电性能的影响

腔室温度指的是打印过程中腔室内的环境温度,腔室温度升高可以有效降低 PEEK 的翘曲形变。不同腔室温度下得到的 PEEK 样件介电常数如图 9 所示,介电损耗角正切如图 10 所示。通过实验可见,介电常数随腔室温度的升高而降低,在 60℃ 时最高,稳定在 5.5 左右;在 120℃ 时最低,稳定在 4.3 左右。在测试频率段内,每个参数下介电常数随频率变化均保持稳定。介电损耗角正切在 1~50 MHz 的频率范围内各工艺参数测试结果接近且均大幅度波动;在 50~100 MHz 时,呈现缓慢波动上升的趋势。

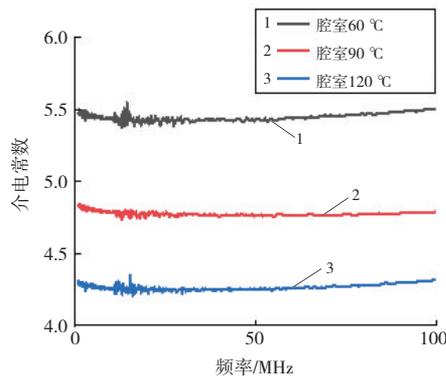


图 9 腔室温度对 PEEK 介电常数的影响

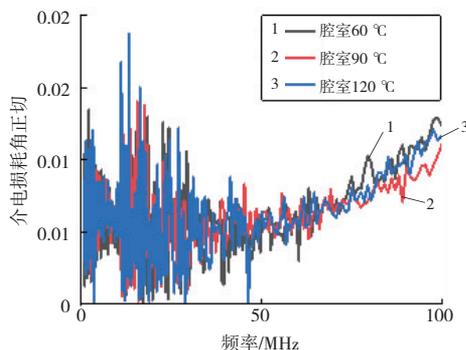


图 10 腔室温度对 PEEK 介电损耗的影响

## 2.6 结果讨论与分析

对于 3D 打印工艺来说,在材料没有进行改性情况下,3D 打印工艺对其的影响主要是分子结构上影响结晶度,宏观层面影响孔隙率,从而影响介电常数。温度参数主要影响材料熔融状态和挤出后的结晶状态。此外腔室温度在一定程度上影响了样件中孔隙的空气密度,从而最终影响了材料的介电性能。打印速度、层厚主要影响材料挤

出时的气泡数和打印后的孔隙率,打印速度过快,材料挤出后易产生气泡,同时还存在拉丝等现象;而打印速度过慢,会影响层间的黏合性,同时还会导致严重的翘曲现象。

对于介电损耗来说,测试频率对其的影响要大于工艺参数的影响。在低频段下,PEEK 材料的介电损耗角正切随频率增加出现大幅度波动的情况;在高频段时,随着频率升高,开始呈现波动上升的趋势。

## 3 结语

1) 3D 打印工艺参数对介电常数的影响较大,在喷头温度 400℃、基板温度 140℃、打印速度 30 mm/s、层厚 0.1 mm、腔室温度 120℃ 时 PEEK 样件介电常数最低,合理选择工艺参数可以有效降低对天线传输的干扰。

2) 在所选的 1~100 MHz 内,各工艺参数下 PEEK 样件介电常数随频率变化均保持稳定,仅在 10~20 MHz 段内均有微小波动,说明该范围内频率对介电常数无影响。

3) 在 1~40 MHz 频率内,各工艺参数测试得到的 PEEK 介电损耗角正切均在大幅度波动;在 40~100 MHz 频率内,各工艺参数测试得到的 PEEK 介电损耗角正切均呈现波动上升的趋势。在 1~40 MHz 内,PEEK 介电损耗角正切受频率的影响更大,此频率段内的天线使用 PEEK 材料应更着重考虑介电损耗的影响情况。

## 参考文献:

- [1] 杜睿,严厚伟,张晓庆. 3D 打印技术在天线及天线罩制作方面的应用[J]. 舰船电子对抗, 2020, 43(5): 82-87, 107.
- [2] 刘秀丽,苑博,孙凤林. 3D 打印在智能蒙皮天线中的应用发展[J]. 电子工艺技术, 2020, 41(6): 311-313, 332.
- [3] VESELÝ P, TICHÝ T, ŠEFL O, et al. Evaluation of dielectric properties of 3D printed objects based on printing resolution[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2018, 461: 012091.
- [4] GOULAS A, ZHANG S Y, CADMAN D, et al. The impact of 3D printing process parameters on the dielectric properties of high permittivity composites[J]. Designs, 2019, 3(4): 50.

收稿日期:2022-12-06