

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.09.018

PEEK/CCF复材增材制造多重分形谱表面形貌评定方法

刘亚彪^{1,3}, 杨净泉², 闫娟^{1,3}, 茅健^{1,3}, 杨慧斌^{1,3}, 高光亚¹

(1. 上海工程技术大学机械与汽车工程学院, 上海 201620; 2. 成都香城产业发展集团有限公司, 成都 610000;

3. 机械工业航空大型复杂薄壁件智能制造重点实验室, 上海 201620)

摘要: 随着航空事业的发展, 增材制造(AM)被用于连续碳纤维增强聚醚醚酮(PEEK/CCF)复材的成型制造中, 其中AM工艺参数对PEEK/CCF复材加工形貌有较大影响。基于此提出了一种基于多重分形谱表面形貌评定方法, 通过PEEK/CCF复合材料在AM中的成型速度(v)、成型厚度(s)、成型角度(θ)与加工表面粗糙度和表面形貌之间的关系设计了单因素试验, 研究了PEEK/CCF复合材料在AM中的 v, s, θ 与表面形貌之间的关系, 结合成型材料表面多重分形谱的方式, 评定AM中所选工艺参数对表面形貌的影响, 得到了加工表面粗糙度和表面形貌随 v, s, θ 的变化特点。结果表明, v, s 对材料表面形貌有明显影响, θ 对表面形貌影响较小, 通过试验验证了PEEK/CCF复合材料表面形貌有较好的分形特征, 多重分形谱谱差 $\Delta D(\alpha)$ 表征表面波峰波谷的占比, 其值越大, 材料表面形貌越复杂, 分形谱的宽度 $\Delta\alpha$ 表征表面起伏程度, 定性表征了形貌特征, 最终工艺参数组合为 $v=20\text{ mm/s}, s=0.2\text{ mm}, \theta=30^\circ$ 。

关键词: 连续碳纤维增强聚醚醚酮; 增材制造; 工艺参数; 多重分形谱; 表面形貌

中图分类号: TQ332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)09-0108-08

Multifractal Spectrum Surface Morphology Evaluation Method for PEEK/CCF Composite Additive Manufacturing

Liu Yabiao^{1,3}, Yang Jingquan², Yan Juan^{1,3}, Mao Jian^{1,3}, Yang Huibin^{1,3}, Gao Guangya¹

(1. College of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Chengdu Xiangcheng Industry Development Group Limited Company, Chengdu 610000, China;

3. Key Laboratory of Intelligent Manufacturing of Large Complex Thin-walled Parts in Mechanical Industry Aviation, Shanghai 201620, China)

Abstract : With the development of the aviation industry, additive manufacturing (AM) has been used in the manufacturing of continuous carbon fiber reinforced polyetheretherketone (PEEK/CCF) composites. The AM process parameters have a great influence on the processing morphology of PEEK/CCF composites. Based on this, a surface morphology evaluation method based on multifractal spectrum was proposed. A single factor experiment was designed by the relationship between the forming speed(v), forming thickness(s), forming angle (θ) of PEEK/CCF composites in AM and the surface roughness and surface morphology. The relationship between v, s, θ and surface morphology of PEEK/CCF composites in AM was studied. Combined with the multifractal spectrum of the surface of the molding material, the influence of the selected process parameters in AM on the surface morphology was evaluated. The variation characteristics of surface roughness and surface morphology with v, s, θ were obtained. The results show that v and s have a significant effect on the surface morphology of the material, and θ has little effect on the surface morphology. The surface morphology of PEEK/CCF composite material has good fractal characteristics. The multifractal spectrum difference $\Delta D(\alpha)$ characterizes the proportion of surface peaks and troughs. The larger the value, the more complex the surface morphology of the material. The width of the fractal spectrum $\Delta\alpha$ characterizes the degree of surface fluctuation and qualitatively characterizes the morphological characteristics. The final process parameter combination is $v=20\text{ mm/s}, s=0.2\text{ mm}, \theta=30^\circ$.

Keywords : continuous carbon fiber reinforced polyetheretherketone ; additive manufacturing ; process variable ; multifractal spectrum ; surface morphology

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB1105301)

通信作者: 闫娟, 副教授, 主要研究方向为复材增材制造、智能控制

收稿日期: 2023-06-30

引用格式: 刘亚彪, 杨净泉, 闫娟, 等. PEEK/CCF复材增材制造多重分形谱表面形貌评定方法[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(9): 108-115.

Liu Yabiao, Yang Jingquan, Yan Juan, et al. Multifractal spectrum surface morphology evaluation method for PEEK/CCF composite additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(9): 108-115.

连续碳纤维增强聚醚醚酮(PEEK/CCF)是一种耐高温、抗冲击、易成型的聚合物材料,近年来受到国内外研究者的青睐。聚醚醚酮(PEEK)作为特种工程塑料,自问世以来一直被作为重要的战略性材料,在航空制造领域,对复合材料的要求越来越高,PEEK材料被视为军工关键材料之一,其研究被列入国家重点攻关技术^[1]。PEEK以碳纤维为嵌入材料通过增材制造(AM)的方式进行材料的成型,而PEEK/CCF复合材料增材制造技术能够更好地发挥碳纤维的增强能力,成型件的力学性能及成型形貌能得到改善^[2]。

Luo等^[3]首次采用熔融沉积成型技术(FDM)打印了PEEK/CCF复合材料,提出了层间分层是限制热塑性塑料挤出3D打印性能的主要因素,层间分层降低了对热塑性塑料挤出3D打印的影响,有效地实现了充分浸渍的PEEK/CCF复合材料的层间结合,PEEK/CCF复合材料的层间剪切强度可达35 MPa以上,弯曲强度可达480 MPa以上。Seong等^[4]设计了一种材料挤出成型的精细化增材制造系统,通过该装置可将PEEK材料打印成零件,为了在力学强度方面获得最大性能,对喷嘴和燃烧室温度等热过程参数进行了试验研究,证实了PEEK在耐高温强度和耐热性方面的优异性能。陈意伟等^[5]研究了连续纤维增强PEEK增材制造力学性能及成型质量优化,探究了喷头温度、打印速度和分层厚度对打印制件的表面粗糙度和弯曲性能的影响规律,但所设置的工艺参数较小,不能很好指导后续的加工需求,且打印件的粗糙度值也较大。Sun等^[6]采用FDM方法制备了PEEK/短碳纤维复合材料,推导了复合材料的翘曲变形公式,得到了复合材料的翘曲变形机理,短碳纤维具有较低的泊松比和较高的导热系数,可以改善PEEK/短碳纤维复合材料的翘曲变形。

尽管国内外学者对PEEK工程塑料的加工成型性能进行了较多的研究^[7-10],但在加工过程中容易出现一些问题,如工艺参数难以控制、表面质量差等^[11],合理地评定材料的加工表面质量,为其性能的研究提供依据,也是目前在航空及军工领域中亟须解决的问题^[12]。多重分形谱方法可以用于表面质量的评定,周鹏等^[13]基于多重分形谱对碳纤维增强塑料表面评定,描述了材料表面的局部形貌特征,Shao等^[14]基于多重分形谱对陶瓷热冲击裂纹进行

表征,热冲击后,得到氧化铝陶瓷的多重分形光谱,并提取裂纹分形特征。

综上所述,对PEEK相关研究多在提升复合材料的综合性能上,较少关注PEEK/CCF增材制造中工艺参数对工件表面质量和形貌的影响。笔者研究了PEEK/CCF复合材料在增材制造中工艺参数对表面形貌的影响,结合二维、三维形貌特点,分析了工艺参数对表面形貌影响规律,通过多重分形谱特征实现对PEEK/CCF表面形貌表征,进一步确定了工艺参数的最佳组合。

1 PEEK/CCF表面多重分形特性分析

1.1 多重分形谱

分形思想最早是由Mandelbrot提出,认为分形是一种普遍存在的现象,分形维数 D 在一定意义上是从分形基础上得出的一个描述分形体复杂程度的数值,以此来描述分形体的不规则性。事实上,基于分形维数 D 的单个分形分析除了能定量分析分形体的自相似结构以外,并不能完全表征三维形体表面的复杂纹理结构,因此对于分形几何而言,分形维数不是适合所有的经过复杂非线性演化得到的几何结构^[15-17],然而表面形貌的重要特征是表面粗糙度,因此,为了进一步分析三维形体的本质,提出了多重分形,是研究粗糙表面特性及表征的有效方法。

图1为多重分形谱的示意图,以初始层($k=0$)为分析对象,赋其质量为单位1,每次划分左侧占 a ,右侧占 $(1-a)$,从图上看,随着划分层次的不不断增加,初始层变得越来越小,在这些分层上的分布越显参差不齐,这种现象是多重分形谱的奇异值,对于每一个给定的层,所有划分区间上的质量之和都为1。此时,可用多重分形谱的曲线来刻画这种奇异性。第 s 步时,任意一个小区间 i 的质量可写成:

$$m_i = a^x (1-a)^{s-x} \quad (1)$$

式中: a^x 表示有 x 次分配到左侧, $s-x$ 次分配到右侧。

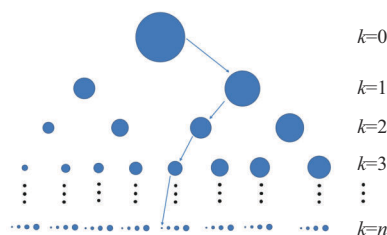


图1 多重分形示意图

1.2 PEEK/CCF 多重分形谱计算

粗糙表面形貌是具有平稳性差的随机过程,分形理论的关键是分形维数的计算,常用的方法有功率谱法、结构函数法与盒维数法^[18-19]。盒维数是分形维数中最广泛的一种,针对 PEEK/CCF 表面形貌研究,笔者采用盒计数法,图2为其确定盒子数草图^[20],以三维立方体网络覆盖粗糙表面,表面本质是三维的,只有对材料表面进行三维评定,才能真实地反映材料的表面形貌特征。

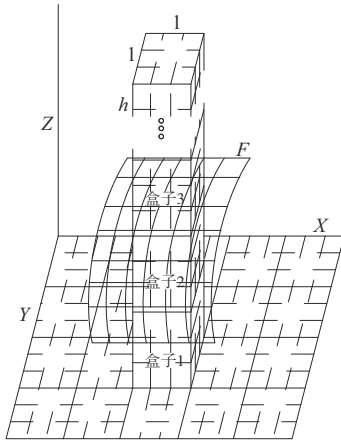


图2 盒维数法确定盒子数草图

盒维数法是基于 Hausdorff 维数,一个非空有界子集 F 被边为 l 的盒子重叠,盒子的数量为 $N_l(F)$ 。若集合 F 具有分形特征,则 $N_l(F)$ 与 l 满足:

$$N_l(F) \propto \frac{1}{l^D} \quad (2)$$

式中: D 是分形维数,可有式(3)计算:

$$D = -\frac{\log N_l(F)}{\log(l)} \quad (3)$$

通过 MATLAB 软件计算分形维数。

针对 3D 打印的 PEEK/CCF 复合材料表面形貌复杂程度,同盒维数法类似,可用多重分形谱描述打印件表面形貌不规则的奇异性分布,即用一个谱函数来描述分形不同层次的特征^[21],其处理方式是将粗糙形貌表面分割成 $(1/\eta) \times (1/\eta)$ 的网格,其中标度 $\eta < 1$,则每个网格中形貌高度的均值 $\bar{h}$ 的概率分布 $P(\eta)$ 为:

$$P(\eta) = \frac{\bar{h}}{\sum \bar{h}} \quad (4)$$

利用概率的权重 β 可将不同概率的子集区分开,其 β 的配比函数:

$$\chi_\beta(\eta) = \sum P(\eta)^\beta = \eta^{\lambda(\beta)} \quad (5)$$

其 $\chi_\beta(\eta)$ 与 η 呈负相关,并在一定的范围内 $\eta^{\lambda(\beta)}$ 不发生变化,则式(5)斜率可以表达为:

$$\lambda(\beta) = \lim_{\eta \rightarrow 0} \frac{\ln \chi_\beta(\eta)}{\ln \eta} \quad (6)$$

经勒让德变换得多重分形谱函数:

$$\alpha = \frac{d\lambda(\beta)}{d\beta} \quad (7)$$

$$D(\alpha) = \beta\alpha - \lambda(\beta) \quad (8)$$

多重分形谱即为 $D(\alpha) \sim \alpha$, α 为奇异性分布指数,分形维数 $D(\alpha)$ 是对表面形貌的整体表征,反映了增材制造表面形貌波峰与波谷的分布, $\Delta D(\alpha) > 0$,反映了加工面波谷位置多, $\Delta D(\alpha) < 0$,反映了加工面波峰位置多。其可表达为

$$|\Delta D(\alpha)| = |D(\alpha_{\max}) - D(\alpha_{\min})| \quad (9)$$

$|\Delta D(\alpha)|$ 值越大,材料表面形貌越复杂。分形谱的宽度 $\Delta\alpha$ 可以表征表面的起伏程度, $\Delta\alpha$ 越大,多重分形谱的曲线越宽,其加工表面粗糙度分布较广,表面越粗糙。

2 试验研究

2.1 试验条件

笔者使用一迈智能科技有限公司的 MAGIC-HT-MAX 型 FDM 打印机,如图3所示,该打印机可进行高性能工程材料的打印,打印温度 $410 \sim 450^\circ\text{C}$,拥有 $100 \sim 140^\circ\text{C}$ 的热床温度, 120°C 的腔体温度,可以支持打印大多数高温塑料。该设备使用 HFFS 打印头,喷头直径为 0.4 mm ,默认工艺参数为:打印温度为 420°C ,填充率 100%,底板温度 120°C 。PEEK/CCF 耗材为诺思贝瑞新材料科技有限公司生产,其中碳纤维含量为 10%,材料的直径为 1.75 mm ,打印试样的尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,如图4所示。选用太阿科技有限公司 LEXT OLS5000 型非接触式共聚焦显微镜,如图5所示,该



图3 FDM 3D打印示意图

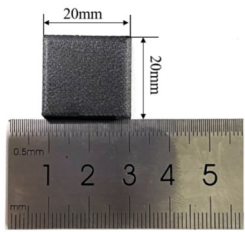


图4 PEEK/CCF 打印试样

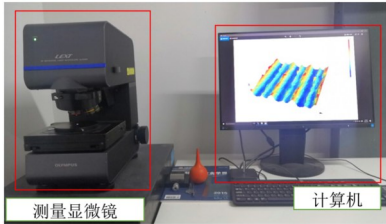


图5 非接触式共聚焦显微镜

仪器有多组检测探头,可精准测量打印试件的表面粗糙度值及捕捉材料的三维形貌图像。

2.2 试验设计

根据增材制造成型过程中影响试件成型表面形貌的因素分析,打印速度与打印单层厚度为主要影响因素,打印时铺丝的填充方向表面质量也有一定影响。故确定成型速度(v)、成型厚度(s)、成型角度(θ)作为研究的工艺参数,其它使用默认参数。

采用单因素试验法探究成型速度、成型厚度与轨迹方向对 PEEK/CCF 增材制造过程表面质量的影响,根据增材制造表面形貌可用表面粗糙度 R_a 和二维、三维形貌来表征,结合本实验 3D 打印机的运行特点,设置试验的单因素数据见表 1。

表1 单因素试验参数表

因素	试验组 1	试验组 2	试验组 3
$v/(mm \cdot s^{-1})$	20		
	40	0.2	0
	60		
s/mm		0.1	
	40	0.2	0
		0.3	
$\theta(^{\circ})$			0
	40	0.2	30
			60

2.3 测试试件表面粗糙度方法及结果

使用共聚焦显微镜的专用目镜观察试样的表面形貌并测量试样侧表面粗糙度。采用的方式为:将试件表面按正位置摆放后,在平面上随机取 5 个位置,其中边界 4 个,中间 1 个^[22],如图 6 所示,为减小误差,每个位置测量 3 次,并取平均值作为该位置的表面粗糙度;取 5 个位置的表面粗糙度的平均值

作为试样的表面粗糙度 R_a ,测量数据见表 2, R_q 为空间幅度粗糙度值,表示空间形貌的重要参数,其表达式为:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_0 Z^2(x, y) dx dy} \tag{10}$$

式中: A 为测量面, Z 为空间高度的均方根值,可用来对比多重分形谱的评定结果。

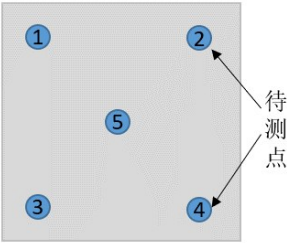


图6 待测平面测点方式

表2 表面粗糙度测量值

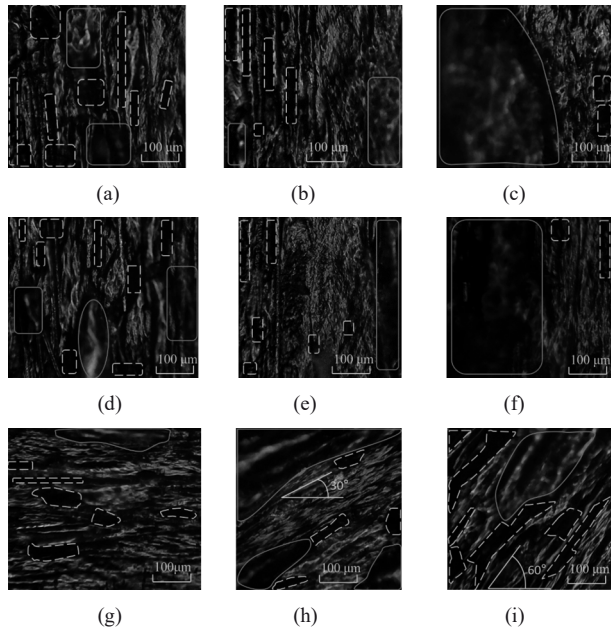
因素	$R_a/\mu\text{m}$					平均	$R_q/\mu\text{m}$	
	1	2	3	4	5	值 $R_a/\mu\text{m}$		
$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	20	6.989	7.098	7.325	7.275	7.068	7.151	9.435
	40	9.251	9.186	9.325	9.367	9.286	9.283	12.556
	60	14.658	14.234	15.102	14.542	14.564	14.620	24.918
s/mm	0.1	10.895	11.213	10.749	10.986	12.012	11.171	16.167
	0.2	9.856	10.052	10.025	10.986	11.436	10.471	13.503
	0.3	36.895	38.865	36.231	36.368	38.036	37.279	44.163
$\theta/(^{\circ})$	0	14.368	13.261	14.689	14.032	13.365	13.943	18.040
	30	11.269	13.865	12.263	13.098	13.235	12.746	17.498
	60	12.968	14.198	14.263	14.715	13.736	13.976	18.013

3 结果分析

3.1 打印参数对 PEEK/CCF 表面形貌的影响

统一取待测点⑤处的平面进行分析,图 7 是不同打印参数下 PEEK/CCF 复合材料的二维表面形貌。从图 7 可以看出,打印件的二维形貌区主要有三种区域:实线框内形貌模糊,表示此时打印件表面凸起,显微镜无法聚焦而导致,虚线框内无相貌显示呈现黑色,表示此时打印件表面有凹陷,显微镜无光抵达所致,最后一种区域便是明亮形貌区。从图 7a ~ 图 7c 可见,在 s 的变化下,其表面形貌相应改变,层厚 $s=0.3\text{ mm}$ 时表面呈现出较多的凹陷特征,形貌有了明显变化,表面的粗度程度增加。在 v

的变化下(见图7d~图7f),随着 v 的提高,打印件的表面形貌也相应变粗糙。而 θ 的变化(见图7g~图7i)对于打印件的表面形貌影响相对较小,可见,二维形貌仅能对成型件表面形貌特征定性分析。

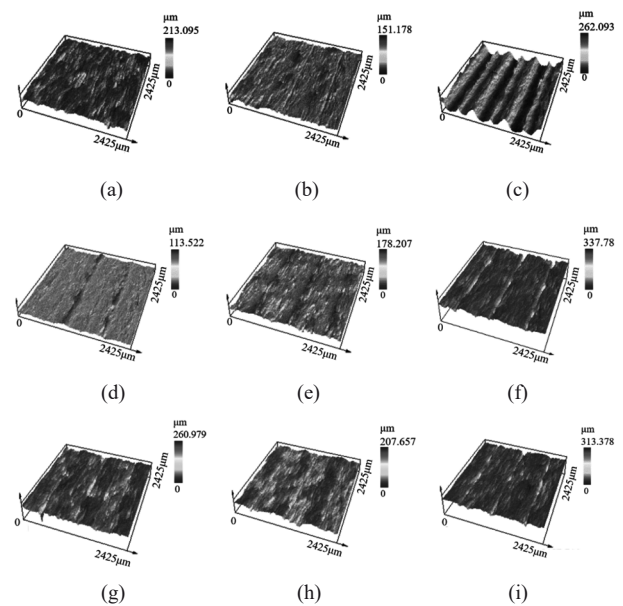


a— $s=0.1$ mm; b— $s=0.2$ mm; c— $s=0.3$ mm; d— $v=20$ mm/s;
e— $v=40$ mm/s; f— $v=60$ mm/s; g— $\theta=0^\circ$; h— $\theta=30^\circ$; i— $\theta=60^\circ$

图7 不同打印参数下的成型件二维形貌图

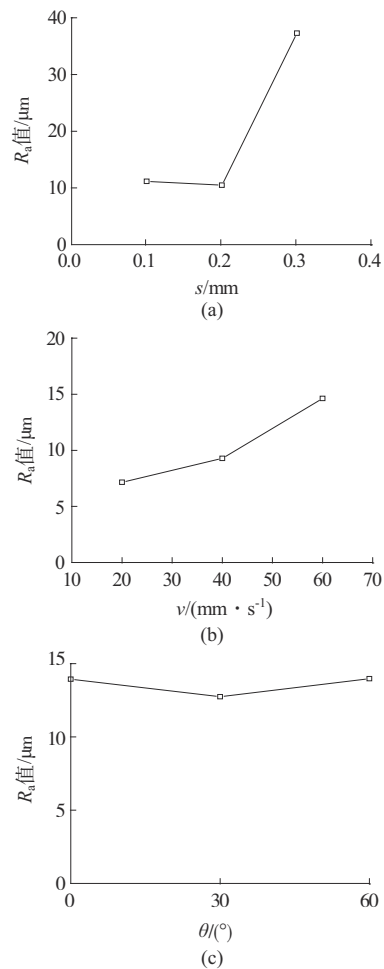
据此设计单因素实验,进一步测量打印件表面的三维形貌如图8所示,其 R_a 值和 R_q 值见表2。通过观察图8发现,成型件表面存在着不同大小的打印痕迹,如图8c~图8g,图8i,这是由于打印成型过程中所用丝材之间黏连性变差所致,通过进一步的比较,打印参数对成型件表面形貌有着重要影响。

当 s 变化时,如图8a~图8c所示其表面形貌随着 s 的增加,留下了明显的打印痕迹,图9为不同打印参数下试件的 R_a 值。由图9a可知,成型件 R_a 值先缓慢减小后又增大,相对于 v 与 θ 相比, s 的变化对成型件的表面粗糙度影响较大,其成型质量在 $s=0.2$ mm时较好,对应的空间幅度粗糙度参数 $R_q=13.503$ μm 也是最小的,表明形貌在空间上波动较小, s 对表面形貌的影响为: 0.2 mm >0.1 mm >0.3 mm,增材制造时 s 应为优先考虑的参数。当 v 变化时,如图8d~图8f,可见 $v=20$ mm/s时,其表面粗糙度较小, $R_a=7.151$ μm ,结合图9b, R_a 值在7~15 μm 内变化,且随着 v 的增加其表面质量在下降,这是由于 v 的增大,即打印喷头移动速度提高,机器的整体振动稳定性下降,导致喷头的定位精度降低,进而导致成型件表面质量变差。当 θ 变化时,对表面形貌的



a— $s=0.1$ mm; b— $s=0.2$ mm; c— $s=0.3$ mm; d— $v=20$ mm/s;
e— $v=40$ mm/s; f— $v=60$ mm/s; g— $\theta=0^\circ$; h— $\theta=30^\circ$; i— $\theta=60^\circ$

图8 不同打印参数下的成型件三维形貌图



打印参数变化:a— s ; b— v ; c— θ

图9 不同打印参数下试件的 R_a 值

影响如图8g~图8i,相对于 s 和 v , θ 产生的影响是最小的, R_a 值在 $\theta=30^\circ$ 时达到最佳, R_a 只有 $0.542\text{ }\mu\text{m}$ 的变化,这是由于在其他参数一定情况下,改变打印路径的方向,相当于改变了铺丝的方向,因此有相近的表面质量,形貌特征变化较小。

经对所研究的打印参数分析可知,初步可以确定当 $s=0.2\text{ mm}$ 、 $v=20\text{ mm/s}$ 、 $\theta=30^\circ$ 时能获得较好的表面形貌,在该组成型参数下,保证了丝材结合的能力,而且提升了机器的振动稳定性,可得到较高的表面质量。

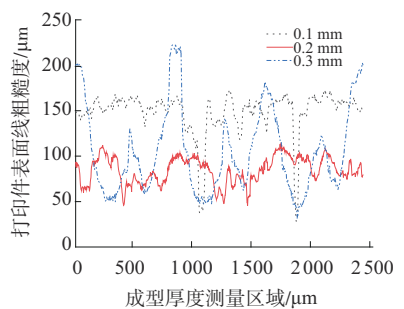
为了更加直观观测成型件的表面质量,取成型件的同一位置测量线粗糙度并可视化如图10所示。图10a表示不同成型厚度线粗糙度的变化,可见,当 s 为 0.2 mm 时线粗糙度波动较小,表明该表面较平滑。 s 为 0.1 mm 和 0.2 mm 时,线粗糙度都出现了较大的波峰与波谷的突变,表明该处有较多的凹陷和

凸起,粗糙度也就越大。图10b表示成型速度的影响,对于成型速度,线粗糙度波动都较小,没有明显突变,表明表面相对光滑,但在 v 为 20 mm/s 时线粗糙度的波动值在 $20\sim 95\text{ }\mu\text{m}$ 范围内,相比于 40 mm/s 、 60 mm/s 较小,具有更加平滑的表面质量。对于图10c成型角度的影响,线粗糙度的波动范围相近,但当 θ 为 30° 时,表面形貌相对较好。通过对各个面的线粗糙度的分析结果可知与上述形貌分析结论保持一致。

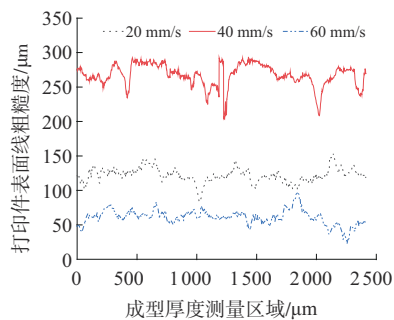
3.2 PEEK/CCF表面形貌的多重分形谱分析评定

为进一步评定PEEK/CCF的表面形貌,根据图8所示的三维表面形貌的点云数据,按照上述1.2节介绍的多重分形谱方法,得到不同成型参数的多重分形谱图如图11所示,并计算得到的多重分形谱参数 α 、 $D(\alpha)$ 列于表3中。

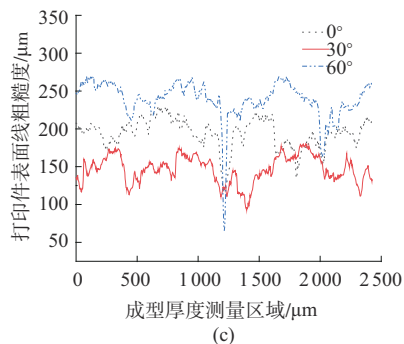
多重分形谱是用来反映表面几何高度的概率



(a)



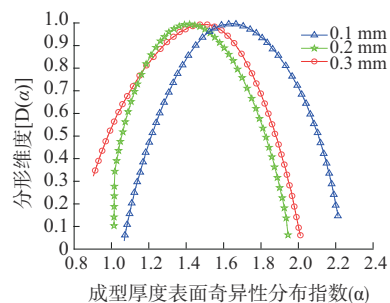
(b)



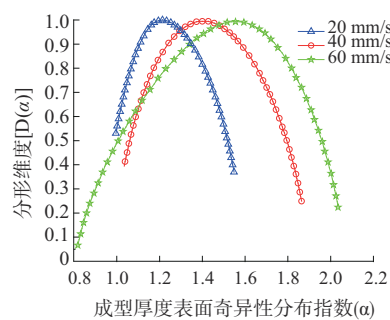
(c)

打印参数变化:a— s ;b— v ;c— θ

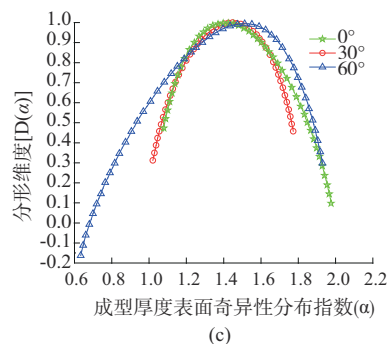
图10 不同打印参数下的线粗糙度



(a)



(b)



(c)

打印参数变化:a— s ;b— v ;c— θ

图11 不同打印参数时多重分形谱 α - $D(\alpha)$ 关系曲线

分布,分形谱的宽度 $\Delta\alpha$ 表征表面的起伏程度, $\Delta\alpha$ 值越大表面越粗糙。根据1.2节的分析,可知对应的谱差 ΔD ,其反映了加工表面的波峰和波谷的概率分布, $\Delta D(\alpha) < 0$ 成型表面区域出现的波峰占比大,表面较尖锐,表明PEEK/CCF复合材料在增材制造加工时,表面会出现纤维断裂、纤维撕裂等纤维突出基体的现象。 $\Delta D(\alpha) > 0$ 成型表面区域出现的波谷占比大,表明PEEK/CCF复合材料在增材制造加工时,表面经常出现孔隙、基体开裂,层间分层。从表3可以看出,对于成型厚度,当 $s=0.2\text{ mm}$ 时, $\Delta\alpha = 0.982$ 是最小的,说明其表面最光滑,形貌特征最好,对应的谱差 $\Delta D(\alpha)$ 为 -0.054 ,绝对值量最小表明其成型表面的几何高度分布趋于平稳,即表面存在的波峰与波谷的概率趋于相等,表面质量较好。最大的 $\Delta\alpha$ 是1.167,在 $s=0.3\text{ mm}$ 时,说明其表面最粗糙;对于成型速度和成型角度,当 $v=20\text{ mm/s}$, $\theta=30^\circ$ 时分形谱的宽度 $\Delta\alpha$ 和谱差 $\Delta D(\alpha)$ 都是较小的,故其表面形貌相对较好。

通过对多重分形谱的分析,其结论与前述保持一致,对于所分析的工艺参数的优化组合为 $s=0.2\text{ mm}$, $v=20\text{ mm/s}$, $\theta=30^\circ$,故多重分形谱可用于PEEK/CCF复合材料的表面质量分析中,并进一步评定了复合材料的形貌特征。

表3 不同成型参数的多重分形谱参数

因素	$\alpha_{\min}$	$\alpha_{\max}$	$D(\alpha_{\min})$	$D(\alpha_{\max})$	$\Delta\alpha$	$\Delta D(\alpha)$
$v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	20	0.995	1.549	0.521	0.369	0.554
	40	1.030	1.861	0.390	0.229	0.831
	60	0.817	2.033	0.058	0.226	1.216
s/mm	0.1	1.065	2.209	0.029	0.151	1.144
	0.2	1.016	1.944	0.103	0.049	0.928
	0.3	0.839	2.006	0.349	0.095	1.167
$\theta/^\circ$	0	1.075	1.975	0.460	0.102	0.900
	30	1.020	1.772	0.313	0.460	0.752
	60	0.633	1.927	-0.159	0.301	1.294

4 结论

(1) PEEK/CCF增材制造过程中,由于工艺参数选择的不同,加工的材料表面质量有所差异,根据试验表明,结合二维、三维形貌分析, θ 对试件形貌影响相似,当 θ 为 30° 时,可以减少表面形貌缺陷的产生。对于 v 的影响,随着 v 的增加,表面形貌也发生了较大变化,其表面形貌质量为 $20\text{ mm/s} > 40\text{ mm/s} > 60\text{ mm/s}$,当 s 为 0.2 mm 时,对复合材料形貌的影响较小,试件表面较平整,对形貌质量的大小为 $0.2\text{ mm} > 0.1\text{ mm} > 0.3\text{ mm}$,成型工艺参数的优化组合为 $s=0.2\text{ mm}$, $v=20\text{ mm/s}$, $\theta=30^\circ$ 。

(2) 多重分形谱较好地应用在PEEK/CCF形貌表征的问题,拓展了PEEK/CCF表征方法。根据试验结果分析, $\Delta\alpha$ 用以表征形貌的粗糙程度, $\Delta D(\alpha)$ 的大小反映了材料表面波峰与波谷的占比,都与成型件表面形貌有着联系,进一步评定了PEEK/CCF复合材料的表面形貌。对于多重分形谱谱差的数值分析,后续可探究成型件内的缺陷形成,为该材料缺陷检测提供了基础。

参考文献

- [1] 张辉,方良超,陈奇海,等. 聚醚醚酮在航空航天领域的应用[J]. 新技术新工艺,2018(10):5-8.
Zhang Hui, Fang Liangchao, Chen Qihai, et al. Application of poly-ether-ether-ketone in aerospace field[J]. New Technology and Process, 2018(10):5-8.
- [2] 罗盟,田小永,尚俊凡,等. 高性能纤维增强聚醚醚酮复合材料挤出成型增材制造现状与挑战[J]. 航空制造技术, 2020, 63(15): 39-47.
Lou Meng, Tian Xiaoyong, Shang Junfan, et al. Current status and challenges of extrusion additive manufacturing of high performance fiber reinforced poly-ether-ether-ketone composites[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2020, 63(15):39-47.
- [3] Luo M, Tian X Y, Zhu W J, et al. Impregnation and interlayer bonding behaviours of 3D-printed continuous carbon-fiber-reinforced poly-ether-ether-ketone composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2019, 121:130-138.
- [4] Seong J P, Ji E L, Jiyong P, et al. High-temperature 3D printing of polyetheretherketone products: perspective on industrial manufacturing applications of super engineering plastics[J]. Materials & Design, 2021, 211. DOI:10.1016/j.matdes.2021.110163.
- [5] 陈意伟,单忠德,杨旭静,等. 连续纤维增强PEEK增材制造力学性能与成型质量优化[J]. 工程塑料应用, 2022, 50(05):61-67.
Chen Yiwei, Shan Zhongde, Yang Xujing, et al. Parameter optimization of mechanical properties and forming accuracy for continuous fiber reinforced PEEK additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5):61-67.
- [6] Sun Q L, Shan Z D, Li Z, et al. Warp deformation model of poly-etheretherketone composites reinforced with carbon fibers in additive manufacturing[J]. Materials Research Express, 2021, 8(12). DOI:10.1088/2053-1591/abeec8.
- [7] Zhu K L, Tan H S, Wang Y J, et al. Crystallization and mechanical properties of continuous carbon fiber reinforced poly-ether-ether-ketone composites[J]. Fibers and Polymers, 2019, 20:839-846.
- [8] Ovaert T C, Cheng H. Counterface topographical effects on the wear of polyetheretherketone and a polyetheretherketone-carbon fiber composite[J]. 1991, 150(1-2):275-287.
- [9] Werken N V D, Pratik K, Jafar G, et al. Investigating the hot isostatic pressing of an additively manufactured continuous carbon fiber reinforced PEEK composite[J]. Additive Manufacturing, 2021, 37. DOI:10.1016/j.addma.2020.101634.
- [10] Li Q S, Zhao W, Li Y X, et al. Flexural properties and fracture

- behavior of CF/PEEK in orthogonal building orientation by FDM: microstructure and mechanism[J]. *Polymers*, 2019, 11(4). DOI: 10.3390/polym11040656.
- [11] 李锋,李涌泉,李文科,等.碳纤维/树脂基复合材料铣削表面粗糙度及表面形貌研究[J].*表面技术*,2017,46(9):264-269.
Li Feng, Li Yongquan, Li Wenke, et al. Study on milling surface roughness and surface morphology of carbon fiber/resin matrix composites[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(9):264-269.
- [12] Sikder P, Challa B T, Gummedi S K. A comprehensive analysis on the processing-structure-property relationships of FDM-based 3-D printed polyetheretherketone (PEEK) structures[J]. *Materials*, 2022, 22. DOI:10.1016/j.mtl.2022.101427.
- [13] 周鹏,赵福令,吕奇超,等.基于多重分形谱的碳纤维复合材料表面评定方法[J].*大连理工大学学报*,2011,51(4):535-539.
Zhou Peng, Zhao Fuling, Lyu Qichao, et al. Surface evaluation method of carbon fiber composites based on multifractal spectrum [J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2011, 51(4): 535-539.
- [14] Shao C, Guo H, Meng S, et al. Characterization of ceramic thermal shock cracks based on the multifractal spectrum[J]. *Fractal and Fractional*, 2022, 6(10). DOI: 10.3390/fractal-fract6100539.
- [15] Chao X, Jiang D, Wei X, et al. Fractal-based model for evaluating the filtration efficiency of the non-woven fibrous composites[J]. *Fractals*, 2022, 30(3). DOI:10.1142/s0218348x22500633.
- [16] Mijovic V, Olsen L. Multifractal spectra and multifractal zeta-functions[J]. *Aequationes Mathematicae*, 2017, 91(1):21-82.
- [17] Xi C, Zhang S, Xiong G, et al. A comparative study of two-dimensional multifractal detrended fluctuation analysis and two-dimensional multifractal detrended moving average algorithm to estimate the multifractal spectrum[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2016, 454:34-50.
- [18] Niu Z, Jiao L, Chen S, et al. Surface quality evaluation in orthogonal turn-milling based on box-counting method for image fractal dimension estimation[J]. *Nanomanufacturing and Metrology*, 2018 (1):125-130.
- [19] Paningrahy C, Seal A, Mahato N K, et al. Differential box counting methods for estimating fractal dimension of gray-scale images: A survey[J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2019, 126: 178-202.
- [20] Li J, Du Q, Sun C X, et al. An improved box-counting method for image fractal dimension estimation[J]. *Pattern Recognition*, 2009, 42(11):2 460-2 469.
- [21] 徐善华,夏敏.锈蚀钢材表面的分形维数与多重分形谱[J].*材料导报*,2020,34(16):16 140-16 143.
Xu Shanhua, Xia Min. Fractal dimension and multifractal spectrum of corroded steel surface[J]. *Material Guide*, 2020, 34(16): 16 140-16 143.
- [22] Wang P, Zou B, Xiao H, et al. Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 271:62-74.

(上接第 101 页)

- [10] 杨安,董扬德,胡宏伟,等.法兰盖滑块脱模机构及注塑模具设计[J].*工程塑料应用*,2017,45(10):82-86.
Yang An, Dong Yangde, Hu Hongwei, et al. Design of slider demoulding mechanism and injection mold for flange cover[J]. *Engineering Plastics Applications*, 2017, 45(10):82-86.
- [11] 冯振礼,肖国华.手机套复合浇注系统内外抽芯三板模设计[J].*工程塑料应用*,2021,49(7):102-107.
Feng Zhenli, Xiao Guohua. Design of three-plate injection mold with inside and outside core-pulling and compound gating system for mobile phone sleeve[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(7):102-107.
- [12] 沈忠良,肖国华,王伟伟,等.电器罩主型芯先抽芯三板四次开模注塑模设计[J].*工程塑料应用*,2022,50(1):92-97.
Shen Zhongliang, Xiao Guohua, Wang Weiwei, et al. Design of three-plate injection mould with main core first pulling and four times opening for electric appliance cover[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(1):92-97.
- [13] 徐文庆,熊建武,刘少华,等.自底向上的电熨斗倒置式布局三板点浇口模具设计[J].*工程塑料应用*,2020,48(7):85-90.
Xu Wenqing, Xiong Jianwu, Liu Shaohua, et al. Design of three plate point gate mould with inverted layout of electric iron from bottom to top[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(7): 85-90.
- [14] 雷小叶,杨幸雨,梅益.MP3089 车载导航后盖壳体卡扣薄壁件多向侧抽芯注塑模具设计[J].*合成树脂及塑料*,2019,36(2): 77-81.
Lei Xiaoye, Yang Xingyu, Mei Yi. Design of multi side core pulling injection mold for buckle thin wall plastic parts of MP3089 vehicle navigation rear cover shell[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2019, 36(2):77-81.
- [15] 周大路.加湿器外壳注塑模四向自动脱模机构及控制机构设计[J].*塑料工业*,2022,50(4):108-111.
Zhou Dalu. Design of four-way automatic demoulding mechanisms and control mechanisms for injection molds of humidifier shell[J]. *China Plastics Industry*, 2022, 50(4):108-111.