

金属熔丝成型17-4PH制品表面粗糙度

姜世杰^{1,2}, 王菲¹, 李曙光¹, 许子沼¹

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;

2. 辽宁省机械装备动力学可靠性重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 由于逐层累加的成型特点及脱脂/烧结工艺过程的影响, 金属熔丝成型(metal fused filament fabrication, MFFF)制品的表面质量存在明显缺陷. 优化过程参数是改善表面质量的有效方法之一. 首先, 基于Box-Behnken设计原理制备了MFFF生坯/烧结样件, 并通过实验确定了各样件的表面粗糙度; 然后, 根据响应曲面法分析了过程参数的个体效应和交互效应, 对实验结果进行方差分析以确定显著因素; 最后, 通过回归分析获得统计模型和优化的过程参数组合, 并对其进行实验验证. 结果表明, 优化过程参数能够有效改善MFFF制品的表面质量; 挤出倍率对样件表面粗糙度的影响最大, 成型速度的影响最小; 适量增加挤出倍率有助于提高生坯件表面质量.

关键词: 金属熔丝成型; 过程参数优化; 表面粗糙度; 实验验证

中图分类号: TH 164 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2025)11-0082-08

Surface Roughness of 17-4PH Products by Metal Fused Filament Fabrication

JIANG Shi-jie^{1,2}, WANG Fei¹, LI Shu-guang¹, XU Zi-zhao¹

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Key Laboratory of Dynamics and Reliability of Mechanical Equipment, Shenyang 110819, China. Corresponding author: JIANG Shi-jie, E-mail: jiangsj@me.neu.edu.cn)

Abstract: Due to the layer-by-layer accumulation and the influence of the debinding/sintering process, the surface of products by metal fused filament fabrication(MFFF) has obvious defects. Optimization of processing parameters is one of the effective methods to improve the surface quality. Firstly, MFFF green/sintered samples were prepared based on the Box-Behnken design principle, and the surface roughness of different parts was experimentally determined. The individual and interaction effects of the processing parameters were then analyzed according to the response surface method, and a variance analysis was conducted on the experimental results to determine the significant factors. Finally, the statistical model and optimized combination of processing parameters were obtained by regression analysis and experimentally verified. The results show that the optimization of processing parameters can effectively improve the surface quality of MFFF products. Extrusion multiplier has the greatest effect on the surface roughness of the sample, and the printing speed has the least effect. Appropriately increasing the extrusion multiplier is helpful to improve the surface quality of green parts.

Key words: metal fused filament fabrication; processing parameter optimization; surface roughness; experimental validation

金属熔丝成型(MFFF)具有成本低廉、材料利用率高、原材料范围广等优势, 在近几年成为国内外增材制造领域研究的前沿热点之一^[1-2]. 该

技术使用金属粉末复合丝材为原料, 利用传统熔丝成型技术制备生坯件, 然后通过脱脂/烧结工艺得到致密化或半致密化金属制品^[3]. 然而, 由于逐

层累加的成型特点及脱脂/烧结工艺过程的影响, MFFF 制品极易产生气孔、层间分离甚至开裂等缺陷,严重影响其表面质量^[4].

Boschetto 等^[5]建立了过程参数(沉积角度、成型速度、熔融温度及层高)对 MFFF 316L 生坯/烧结样件表面粗糙度影响的回归模型.结果表明,不同沉积角度下过程参数对表面粗糙度的影响模式不完全一致.例如:当沉积角度为 45°时,层高越低,表面粗糙度越小;当沉积角度为 90°时,结论相反.Caminero 等^[2]研究了过程参数(成型方向、层高、成型速度)对表面粗糙度的影响,建立了基于人工神经网络的预测模型以分析 MFFF 316L 烧结样件的表面粗糙度.研究发现,平面方向成型的样件表面粗糙度最小,层高和成型速度对样件表面粗糙度无明显影响.Galati 等^[6]通过实验研究了 MFFF 立方体烧结样件的表面轮廓,其粗糙度具有与生坯样件相似的规则性和周期性.Singh 等^[7]实验分析了 MFFF 生坯/烧结样件的表面粗糙度(分别为 2.7 和 3.6 μm),结果表明,尺寸收缩和表面气孔的形成会增大烧结样件的表面粗糙度,降低表面质量.Singh 等^[8]还研究了过程参数对生坯样件密度和表面粗糙度的影响,并对过程参数进行了优化.Lavecchia 等^[9]对比了 MFFF 和原子扩散增材制造(atomic diffusion additive manufacturing, ADAM)两种工艺制成的 17-4PH 样件,发现使用 ADAM 工艺制造的样件表面质量更好.Singh 等^[10]研究了挤压温度对复合丝材表面粗糙度的影响,发现在 105 °C 下制得的复合丝材表面粗糙度最低.

综上所述,优化过程参数有助于改善 MFFF 制品的表面质量,然而上述研究普遍忽略了表面

粗糙度的各向异性特点以及过程参数对表面粗糙度的交互影响,具有明显的局限性.本文着重研究了熔融温度、成型速度、层高及挤出倍率对 MFFF 制品三维方向表面粗糙度的影响规律,并通过优化 4 个过程参数以改善制品的表面质量.

1 实验研究

1.1 生坯制备

为探究过程参数对 MFFF 制品表面质量的影响规律,根据 Box-Behnken 设计原理^[11]和响应曲面法^[12],选择 4 个过程参数(分别为熔融温度、成型速度、挤出倍率及层高)设计实验.利用快速成型设备(型号:FLSUN-QQ)制备了尺寸为 15 mm×15 mm×4 mm 的生坯样件,如图 1 所示,材料为 BASF 公司生产的 Ultrafuse 17-4PH 丝材,其金属质量分数约为 80%,使用聚甲醛(POM)、聚丙烯(PP)等作为黏结剂^[9].样件共制备了 29 个,设计因素水平和编码如表 1 所示.除上述 4 个过程参数,其他设置均相同,例如:喷嘴直径为 0.4 mm、重叠率为 15%、填充率为 100%、床温为 90 °C、沉积角度为 0°等.

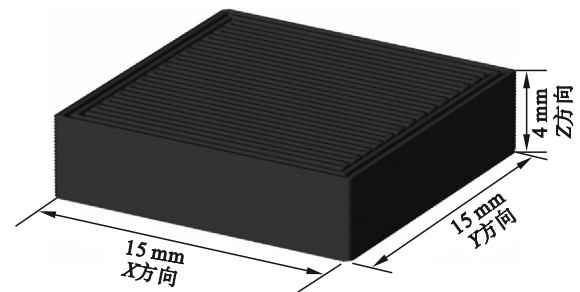


图 1 样件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample

表 1 设计因素水平及编码
Table 1 Design factor levels and coding

编码	因素			
	熔融温度 $A/^\circ\text{C}$	成型速度 $B/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	挤出倍率 $C/\%$	层高 D/mm
-1	230	15	100	0.10
0	240	20	110	0.15
1	250	25	120	0.20

在脱脂/烧结实验中发现挤出倍率大于 100% 的生坯件空隙过少,脱脂时黏结剂分解产生的气体难以及时从表面逸出,导致烧结样件产生开裂、鼓泡等严重缺陷.因此重新制备了一批挤出倍率均为 100% 的生坯样件,并完成脱脂/烧结工艺.样件共分为 9 组(每组包含 3 个重复样件),过

程参数如表 2 所示.

1.2 热脱脂和烧结

为获得致密化或半致密化的金属制品,需对生坯件进行脱脂以去除黏结剂,然后在高温下烧结脱脂样件,使金属颗粒熔合,进而完成烧结样件的成型.本文中的脱脂为操作简单、应用范围

最广的热脱脂工艺;烧结为低于材料熔点温度下进行高温处理的分段式烧结工艺.由于脱脂后样件强度低,不便于移动,故采用“一步式热脱脂+

烧结”工艺,即脱脂/烧结工艺在烧结炉(型号:ZKQF-4-16)中连续进行.

表 2 用于成型烧结样件的过程参数

Table 2 Process parameters for sintered samples

样件 ($i=1\sim 3$)	熔融温度 $A/^\circ\text{C}$	成型速度 $B/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	挤出倍率 $C/\%$	层高 D/mm	喷嘴直 径/ mm	填充率/ $\%$	床温/ $^\circ\text{C}$	沉积角度/ ($^\circ$)
A230 _i	230	20	100	0.15	0.48	100	90	0
A240 _i	240	20	100	0.15	0.48	100	90	0
A250 _i	250	20	100	0.15	0.48	100	90	0
B15 _i	230	15	100	0.15	0.48	100	90	0
B20 _i	230	20	100	0.15	0.48	100	90	0
B25 _i	230	25	100	0.15	0.48	100	90	0
D0.1 _i	230	20	100	0.10	0.48	100	90	0
D0.15 _i	230	20	100	0.15	0.48	100	90	0
D0.2 _i	230	20	100	0.20	0.48	100	90	0

热脱脂过程中,升温速率越快,黏结剂热分解产生的气体速率越快,样件表面产生裂纹的可能性越大^[13].经过多次反复实验,即脱脂及热重分析(以确保完全去除黏结剂),确定热脱脂的工艺流程如下:先以 $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 300°C 并保持1 h,再以 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升温至 500°C 并保持1 h,全程在氮气气氛下进行,氮气流速为 $4\text{ L}/\text{min}$.脱脂过程结束后对烧结炉抽真空至 -0.08 MPa ,然后通氩气至常压,以保证炉内空气尽可能少,并在此基础上进行烧结.烧结过程的工艺流程如下:1 h内升温至 600°C 并保持1 h,再以 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 1300°C 并保温2 h,然后关停烧结炉,自然冷却.热脱脂-烧结升温曲线如图2所示.

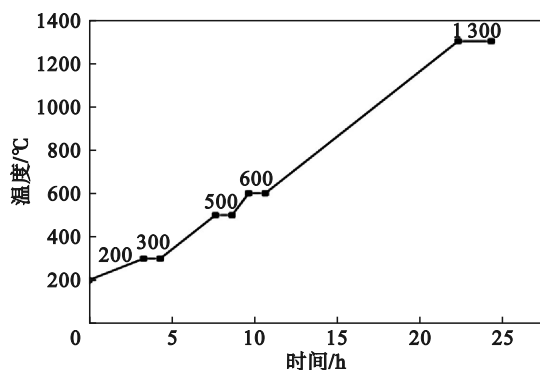


图2 热脱脂-烧结升温曲线

Fig. 2 Thermal debinding-sintering heating curve

1.3 表面粗糙度测量

使用3D测量激光显微镜(型号:LEXTOLS4100)对样件的表面粗糙度进行测试,如图3所示.分别使用5,10及20倍镜头对样件进行观察,初步获取表面粗糙度数值;根据初步观测

结果选择合适的取样长度($R_a=2\sim 10\ \mu\text{m}$,取样长度 2.5 mm ; $R_a=0.1\sim 2\ \mu\text{m}$,取样长度 0.8 mm)进一步精确测量.

每个样件随机选取5个典型区域(成型正常、无缺陷)进行测试,以保证数据的代表性和可重复性.考虑到表面粗糙度的各向异性特点,对每个区域分别进行垂直和平行于纤维长度方向的粗糙度测试.因此,每个样件完成10组实验,29个生坯样件(其中23个生坯件因过程参数选择不合理在后续烧结中失败)获得290组实验结果,27个烧结样件获得270组实验结果.为进一步保证数据的准确性,以每个样件同方向5组数据的平均值作为样件的分析结果.

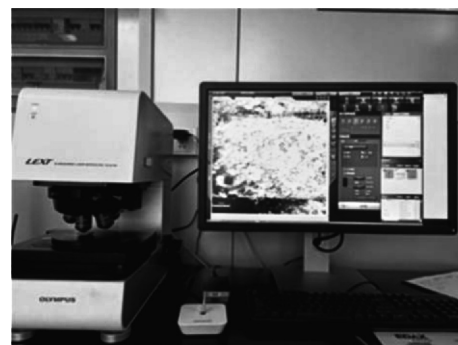


图3 表面粗糙度测试设备

Fig. 3 Surface roughness testing equipment

2 结果与讨论

2.1 样件表面形貌

图4为MFFF生坯/脱脂/烧结样件示例.可

见,生坯样品垂直/平行于纤维长度方向的表面粗糙度明显不同,具有显著的各向异性特征;脱脂样品尺寸略有收缩,烧结样品进一步收缩,表面粗糙度仍保持各向异性.使用同步热分析仪(型号:SDT Q600)对生坯/脱脂样品进行热重分析显示,生坯样品中的黏结剂在 300~400 °C 快速分解,并在 500 °C 左右质量停止减少(如图 5 所示),表明黏结剂在脱脂过程中已被完全去除.图 6 为 MFFF 样品的微观表面形貌,进一步反映了生坯/脱脂/烧结样品表面粗糙度的各向异性特征;并且烧结样品相邻的丝材彼此黏合,孔隙明显减少并致密化.

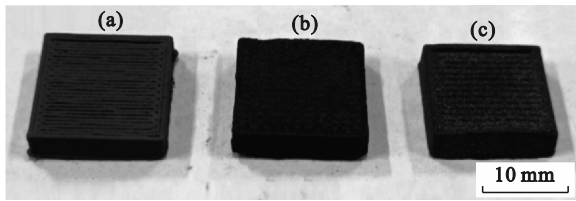


图 4 生坯/脱脂/烧结样品示例

Fig. 4 Examples of green/debinded/sintered sample
(a)一生坯样品;(b)一脱脂样品;(c)一烧结样品.

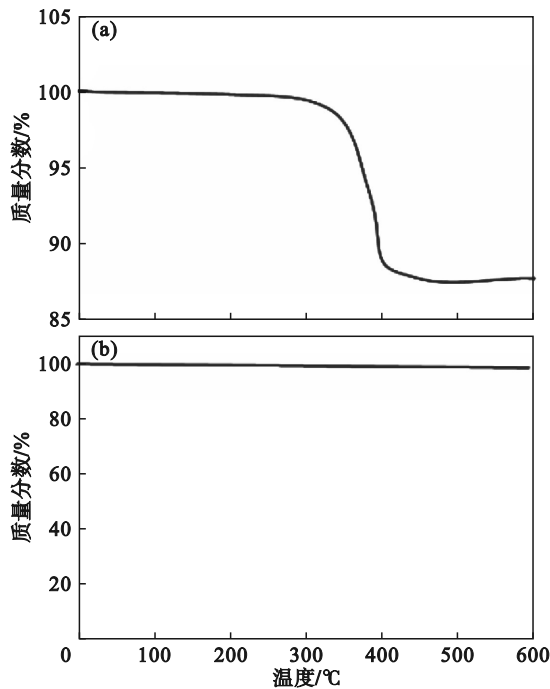


图 5 生坯/脱脂样品热重分析

Fig. 5 Thermogravimetric analysis of green/debinded sample

(a)一生坯样品;(b)一脱脂样品.

2.2 生坯样品表面粗糙度

MFFF 生坯样品表面粗糙度实验的具体数值如表 3 所示.可见,过程参数对生坯样品表面粗糙度有很大影响;生坯样品表面粗糙度具有显著的

各向异性特征,且垂直于纤维长度方向的粗糙度 (R_{aIV}) 数值及变化范围都明显大于平行于纤维长度方向上的数值 (R_{aIP}).

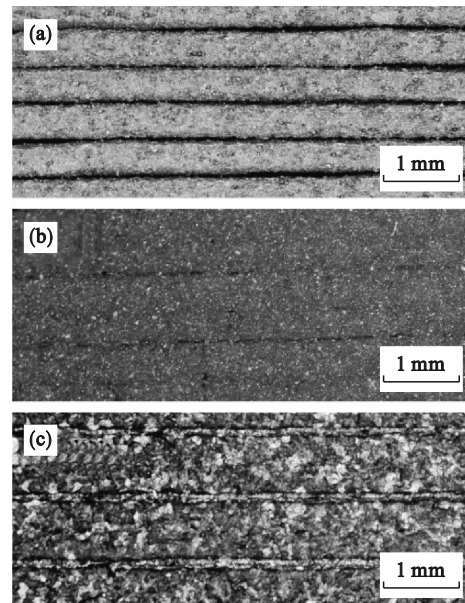


图 6 生坯/脱脂/烧结样品微观表面形貌

Fig. 6 Microstructure of green/debinded/sintered sample

(a)一生坯样品;(b)一脱脂样品;(c)一烧结样品.

利用 Design Expert 软件对数据进行响应曲面分析,通过数据拟合得到 4 个过程参数对垂直于纤维长度方向的表面粗糙度 (R_{aIV}) 影响的二次多项式回归方程(编码制)^[14]为

$$R_{aIV} = 5.61 + 0.472 9A - 0.601 3B - 3.52C + 0.846 2D - 0.676 3AB + 0.740 7AC + 0.071 3AD - 1.83BC - 0.004 7BD - 0.336 2CD - 0.135 3A^2 + 0.648 4B^2 + 1.15C^2 + 0.522 7D^2. \quad (1)$$

为检验二次多项式回归模型的显著性,对模型进行方差分析及显著性检验,结果如表 4 所示.

该回归模型的检验值 $F=10.61$, 显著性概率 $p < 0.000 1$, 说明该模型极显著 ($p < 0.01$); 失拟项的 $F=0.893 3$, $p=0.599 7 > 0.05$ 说明所建立的回归模型有效 ($p > 0.05$); 模型的决定系数 $R^2=0.91$ (反映了该模型的预测能力,其值越接近 1,模型的预测能力越好),说明该模型拟合度良好^[15].

同时从表中可以看出,挤出倍率的一次效应、成型速度和挤出倍率的交互作用对 R_{aIV} 影响极显著 ($p < 0.01$); 层高的一次效应、挤出倍率的二次效应对 R_{aIV} 影响显著 ($p < 0.05$); 其他效应对 R_{aIV} 影响显著性较小 ($p > 0.05$). 4 个因素对 R_{aIV} 影响的大小顺序为: $C > D > B > A$; 交互作用对 R_{aIV} 影响的大小顺序为: $BC > AC > AB > CD > AD > BD$.

表3 生坯样品表面粗糙度
Table 3 Surface roughness of green samples

组别	因素				垂直纤维	平行纤维
	熔融温度	成型速度	挤出倍率	层高	长度方向表面粗糙度	长度方向表面粗糙度
	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$C/\%$	D/mm	$R_{a1V}/\mu\text{m}$	$R_{a1P}/\mu\text{m}$
1	0	0	0	0	3.71	2.43
2	0	1	-1	0	12.42	6.34
3	0	1	0	-1	5.91	4.95
4	0	0	0	0	5.29	2.49
5	0	0	1	-1	2.09	1.54
6	0	1	1	0	1.71	1.32
7	1	1	0	0	3.92	1.75
8	-1	0	-1	0	10.07	3.84
9	-1	0	0	1	6.01	2.17
10	0	-1	0	1	8.57	1.56
11	-1	0	1	0	2.46	1.42
12	1	0	0	1	6.64	3.25
13	0	-1	-1	0	9.65	6.34
14	-1	0	0	-1	5.71	4.18
15	0	0	1	1	3.44	1.34
16	0	1	0	1	8.52	3.55
17	-1	1	0	0	4.56	2.69
18	-1	-1	0	0	5.88	3.70
19	0	-1	1	0	6.27	1.45
20	0	0	0	0	6.78	2.24
21	0	0	0	0	6.09	2.22
22	1	-1	0	0	7.95	1.48
23	0	0	-1	1	12.06	6.45
24	0	-1	0	-1	5.94	1.50
25	0	0	-1	-1	9.36	5.06
26	1	0	1	0	5.57	2.45
27	0	0	0	0	6.20	1.23
28	1	0	0	-1	6.05	1.53
29	1	0	-1	0	10.22	2.53

成型速度与挤出倍率的交互作用对 R_{a1V} 影响极显著,由图 7d 可知,其交互响应曲面呈明显倾斜趋势,挤出倍率为影响表面粗糙度 R_{a1V} 的敏感方向,控制其在 115%~120% 有利于减小表面粗糙度 R_{a1V} . 由图 7e 可知,表面粗糙度 R_{a1V} 随成型速度的增加呈先降后升趋势,控制其在 18~21 mm/s 时有利于减小表面粗糙度 R_{a1V} . 但曲面趋势变化较均匀,成型速度和层高的交互作用不明显. 如图 7a 和图 7b 所示,熔融温度对 R_{a1V} 影响最小,且均为交互作用下的非敏感方向. 由图 7c 和图 7f 可知, R_{a1V} 随层高的增加呈先减小后增加趋势,其优化参数集中在表面粗糙度为 0.12~0.14 mm 的区域.

表4 方差分析及显著性检验(R_{a1V})
Table 4 Analysis of variance and significance test (R_{a1V})

数据来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值
模型 R_{a1V}	193.93	14	13.85	10.61	<0.000 1
A-熔融温度	2.68	1	2.68	2.05	0.173 7
B-成型速度	4.34	1	4.34	3.32	0.089 8
C-挤出倍率	148.72	1	148.72	113.86	<0.000 1
D-层高	8.59	1	8.59	6.58	0.022 5
AB	1.83	1	1.83	1.40	0.256 3
AC	2.19	1	2.19	1.68	0.215 8
AD	0.02	1	0.02	0.02	0.902 5
BC	13.42	1	13.42	10.28	0.006 4
BD	0.000 1	1	0.000 1	0.000 1	0.993 5
CD	0.45	1	0.45	0.35	0.565 6
A^2	0.12	1	0.12	0.09	0.767 4
B^2	2.73	1	2.73	2.09	0.170 5
C^2	8.59	1	8.59	6.58	0.022 5
D^2	1.77	1	1.77	1.36	0.263 6
残差	18.29	14	1.31		
失拟项	12.63	10	1.26	0.89	0.599 7
纯误差	5.66	4	1.41		
$R^2=0.91$					

同理,通过数据拟合可得 4 个过程参数对平行于丝材方向的表面粗糙度 (R_{a1P}) 影响的二次多项式回归方程(编码制)为

$$R_{a1P} = 2.12 - 0.765 9A - 0.035 3B - 2.1C + 0.381D + 0.321 3AB + 1.63AC + 0.933 5AD - 0.034BC - 1.61BD - 0.398 7CD - 0.064 7A^2 + 0.743 9B^2 + 1.07C^2 + 0.800 7D^2. \quad (2)$$

对模型进行方差分析及显著性检验,如表 5 所示.

该回归模型的检验值 $F=11.5$, 显著性概率值 $p<0.000 1$, 说明该模型极显著 ($p<0.01$); 失拟项的 $F=2.93$, $p=0.155 8>0.05$, 说明所建立的回归模型有效 ($p>0.05$); 模型的决定系数 $R^2=0.92$, 说明该模型拟合度良好.

由表 5 可知,熔融温度的一次效应、挤出倍率的一次效应、熔融温度和挤出倍率的交互作用、成型速度和层高的交互作用、挤出倍率的二次效应对 R_{a1P} 影响极显著 ($p<0.01$); 熔融温度和层高的交互作用、成型速度的二次效应、层高的二次效应对 R_{a1P} 影响显著 ($p<0.05$); 其他效应对 R_{a1P} 影响显著性较小 ($p>0.05$). 4 个因素对 R_{a1P} 影响的大小顺序为: $C>A>$

$D > B$;交互作用对 R_{a1P} 影响的大小顺序为: $AC > BD > AD > CD > AB > BC$.

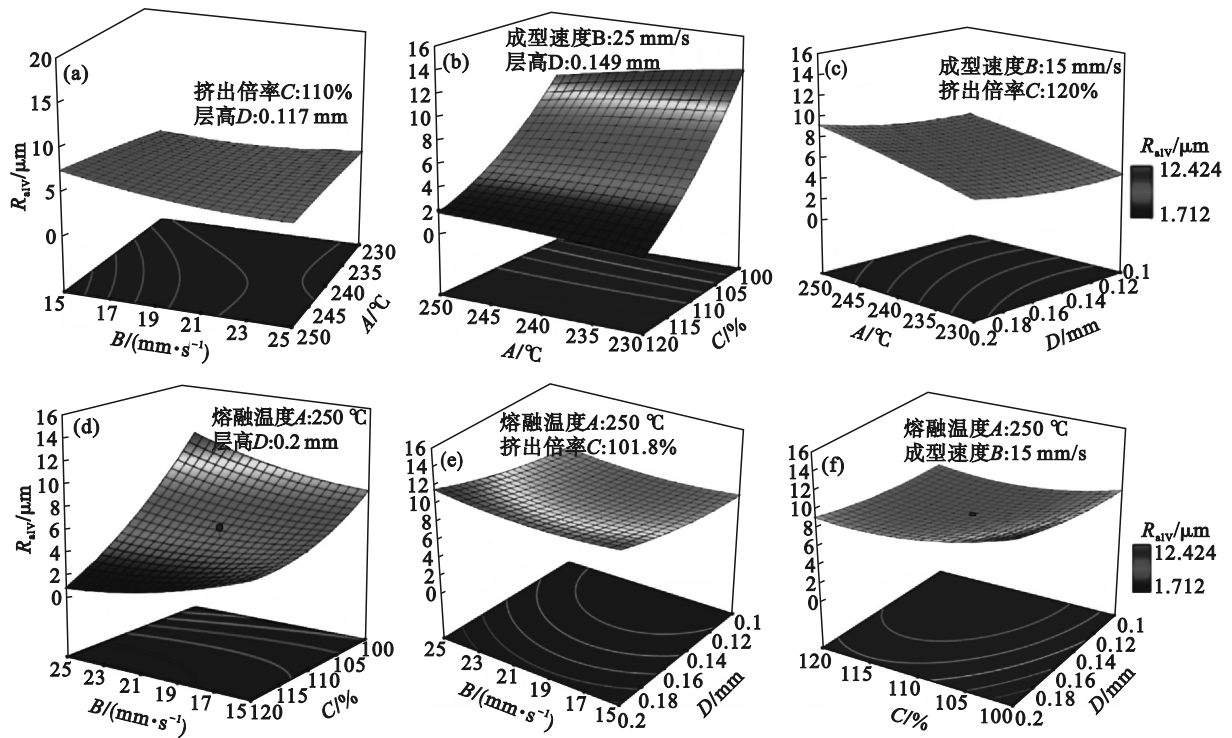


图 7 因素间交互作用对 R_{aIV} 的影响

Fig. 7 Influence of interaction between factors on R_{aIV}

(a)—AB 交互作用; (b)—AC 交互作用; (c)—AD 交互作用; (d)—BC 交互作用; (e)—BD 交互作用; (f)—CD 交互作用.

表 5 方差分析及显著性检验 (R_{a1P})

Table 5 Analysis of variance and significance test (R_{a1P})

数据来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值
模型 R_{a1P}	99.91	14	7.14	11.50	<0.000 1
A-熔融温度	7.04	1	7.04	11.34	0.004 6
B-成型速度	0.02	1	0.02	0.02	0.878 8
C-挤出倍率	53.03	1	53.05	845.42	<0.000 1
D-层高	1.74	1	1.74	2.81	0.116 1
AB	0.41	1	0.41	0.67	0.428 5
AC	10.61	1	10.61	17.09	0.001 0
AD	3.49	1	3.49	5.62	0.032 7
BC	0.01	1	0.01	0.01	0.932 4
BD	10.43	1	10.43	16.80	0.001 1
CD	0.64	1	0.64	1.02	0.328 6
A^2	0.03	1	0.03	0.04	0.837 3
B^2	3.59	1	3.59	5.78	0.030 6
C^2	7.47	1	7.47	12.03	0.003 8
D^2	4.16	1	4.16	6.70	0.021 5
残差	8.69	14	0.62		
失拟项	7.65	10	0.76	2.93	0.155 8
纯误差	1.04	4	0.26		
$R^2=0.92$					

由图 8b 可知, AC 的交互响应面明显倾斜, R_{a1P} 随挤出倍率的增加而呈下降趋势, 挤出倍率应控制在 115%~120% 之间. 在挤出倍率为 100% 时, 增加熔融温度可使熔融丝材流动性更好, 从而使表面平整度更好, R_{a1P} 随熔融温度的升高呈下降趋势. 但在挤出倍率增加时, 这种趋势逐渐减弱. 由图 8e 可知, BD 的交互响应面中表面粗糙度 R_{a1P} 随层高与打印速度的增加呈先小幅度减小后增加的趋势, 二者交互的优化参数集中在层高为 0.1~0.14 mm、打印速度为 15~19 mm/s, 此时的表面粗糙度 R_{a1P} 较小. 由图 8c 可知, AD 的交互作用和 AC 相似, 而其他交互作用对 R_{a1P} 的影响很小, 如图 8a, 图 8d, 图 8f 所示.

综合考虑 Design Expert 软件运行结果和 FFF 成型设备限制, 并根据实验结果 (R_{aIV} 通常大于 R_{a1P}) 将缩小 R_{aIV} 设为优先级, 最终选定最佳打印参数组合如下: 熔融温度为 232 °C、成型速度为 22 mm/s、挤出倍率为 119%、层高为 0.125 mm. 回归模型预测的 R_{aIV} 为 1.546 μm , R_{a1P} 为 1.313 μm . 并对使用优化过程参数成型的生坯件进行粗糙度验证实验, 结果如表 6 所示, 实验值与预测值基本吻合, 此回归模型优化的打印参数组合可获得最小的生坯件表面粗糙度. R_{aIV} 误差范围为

4.32%~8.28%, R_{a1P} 误差范围为 3.68%~7.09%, 可见回归模型能够准确预测生坯样件表面粗糙度.

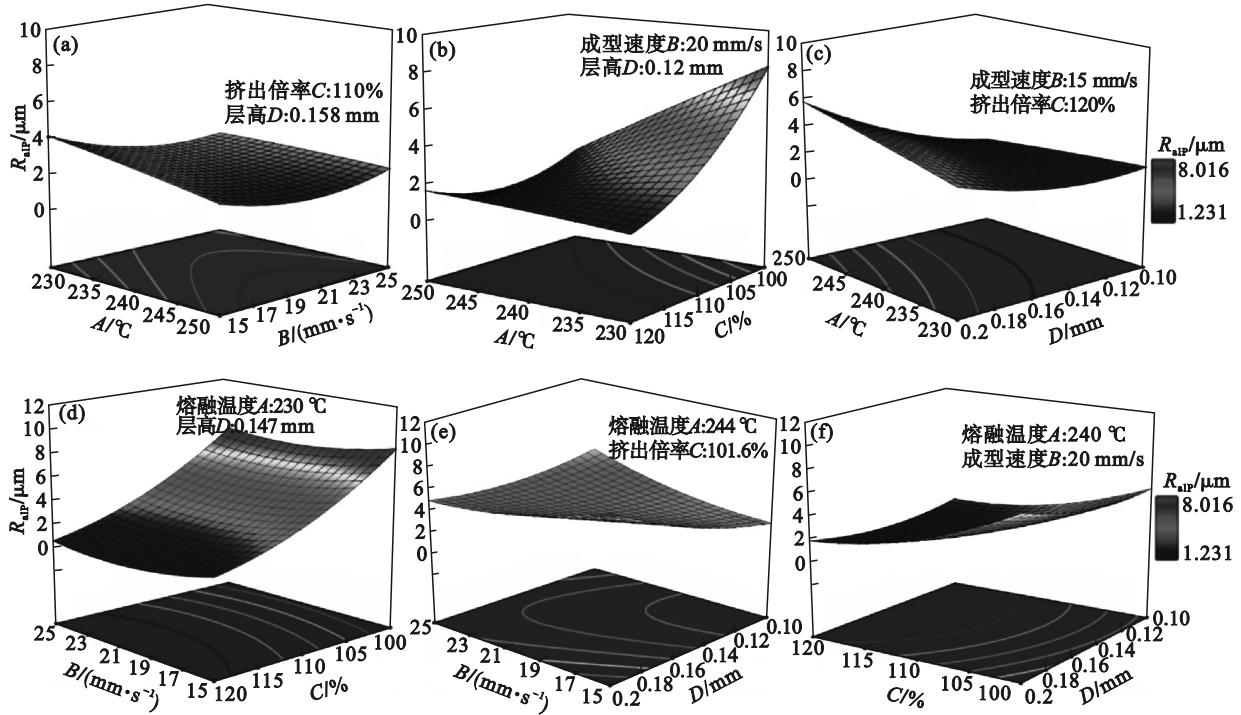


图 8 因素间交互作用对 R_{a1P} 的影响

Fig. 8 Influence of interaction between factors on R_{a1P}

(a)—AB交互作用; (b)—AC交互作用; (c)—AD交互作用; (d)—BC交互作用; (e)—BD交互作用; (f)—CD交互作用.

表 6 粗糙度验证实验结果

Table 6 Results of roughness verification experiment

参数	样件 1	样件 2	样件 3
R_{a1V} 实验结果/ μm	1.62	1.64	1.69
R_{a1V} 理论结果/ μm	1.55	1.55	1.55
R_{a1V} 误差/%	4.32	5.49	8.28
R_{a1P} 实验结果/ μm	1.36	1.41	1.39
R_{a1P} 理论结果/ μm	1.31	1.31	1.31
R_{a1P} 误差/%	3.68	7.09	5.76

2.3 烧结样件表面粗糙度

烧结样件的表面粗糙度实验结果如图 9 所示, 同样可见垂直于纤维长度方向的表面粗糙度 (R_{a2V}) 明显大于平行于纤维长度方向的数值 (R_{a2P}); 由于脱脂/烧结过程引发的黏结剂分解、表面孔隙、尺寸收缩不完全等因素^[7], 烧结样件的表面粗糙度相较于生坯样件显著增加.

样件 A230 垂直/平行于纤维长度方向的平均表面粗糙度分别为 21.06 和 5.32 μm . 当熔融温度升至 250 $^{\circ}\text{C}$ 时, 样件 A250 垂直/平行于纤维长度方向的平均表面粗糙度分别减小至 19.42 和 4.99 μm . 即在一定范围内, 烧结样件表面粗糙度随熔融温度的升高而减小, 且这种趋势在垂直于纤维长度

方向上尤为明显. 其原因是, 在实验范围内, 增加熔融温度可以提高丝材的流动性, 使生坯件表面更平整, 从而有利于在后续脱脂烧结过程中保持良好的表面粗糙度.

由图 9 可知, 样件 B15 垂直/平行于纤维长度方向的平均表面粗糙度分别为 20.32 和 4.47 μm . 当成型速度增至 25 mm/s 时, 样件 B25 垂直/平行于纤维长度方向的平均表面粗糙度分别增至 22.32 和 4.72 μm . 可见, 在一定范围内, 烧结样件表面粗糙度随成型速度的提高而增加. 这是因为提高成型速度使材料的挤出成型稳定性下降, 进而导致表面粗糙度增加.

D0.1_i 垂直/平行于纤维长度方向的平均表面粗糙度分别为 21.82 和 4.24 μm , 当层高增至 0.2 mm 时, 样件 D0.2 垂直/平行于纤维长度方向的平均表面粗糙度分别增至 22.92 和 4.57 μm . 在一定范围内, 烧结样件的表面粗糙度随层高的增加而增大. 这是因为增加层高使生坯件的孔隙增多, 烧结后孔隙缩小导致表面粗糙度增大. 但总体上, 烧结样件的表面粗糙度数值变化不大, 这可能由于烧结改变了样件的表面, 降低了过程参数对烧结样件表面粗糙度的影响.

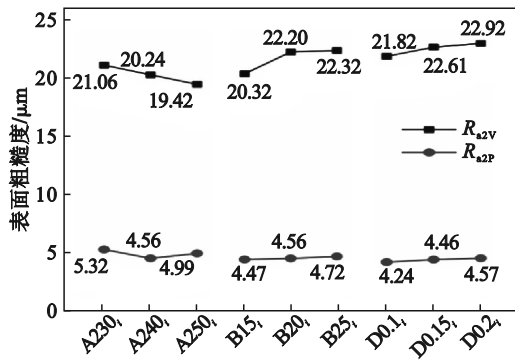


图 9 烧结样件的表面粗糙度实验结果

Fig. 9 Surface roughness experiment results of sintered samples

3 结 论

1) 考虑各向异性特征,针对熔融温度、成型速度、挤出倍率及层高 4 个过程参数,建立了 MFFF 生坯样件表面粗糙度的回归模型并对其进行了优化.经实验验证,回归模型预测值与实验值基本吻合,使用优化的过程参数可获得表面粗糙度最小的生坯件,验证了回归模型的准确性.

2) 研究了熔融温度、成型速度及层高 3 个过程参数对 MFFF 烧结样件表面粗糙度的影响.在一定范围内,烧结样件表面粗糙度随熔融温度的升高及成型速度和层高的降低而减小.

3) 挤出倍率对生坯件的表面粗糙度影响最大,控制其在 120% 左右可明显改善生坯件的表面质量.但增加挤出倍率不利于生坯件后续的脱脂/烧结质量,样件易出现表面开裂和鼓泡等缺陷,应控制其在 100% 以内.

4) 生坯/烧结样件在垂直于纤维长度方向的表面粗糙度明显大于平行于纤维长度方向的数值;且由于脱脂/烧结过程引发的黏结剂分解、收缩不完全、表面孔隙等因素,使烧结样件的表面粗糙度相比于生坯样件显著增加.

参考文献:

[1] Léonard F, Tammam-Williams S. Metal FFF sintering shrinkage rate measurements by X-ray computed tomography [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2022, 37(5): 631-644.

[2] Caminero M Á, Romero Gutiérrez A, Chacón J M, et al. Effects of fused filament fabrication parameters on the manufacturing of 316L stainless-steel components: geometric and mechanical properties [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2022, 28(10): 2004-2026.

[3] Galantucci L M, Pellegrini A, Guerra M G, et al. 3D

printing of parts using metal extrusion: an overview of shaping debinding and sintering technology [J]. *Advanced Technologies and Materials*, 2022, 47(1): 25-32.

- [4] Thompson Y, Gonzalez-Gutierrez J, Kukla C, et al. Fused filament fabrication, debinding and sintering as a low cost additive manufacturing method of 316L stainless steel [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 30: 100861.
- [5] Boschetto A, Bottini L, Miani F, et al. Roughness investigation of steel 316L parts fabricated by metal fused filament fabrication [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 81: 261-280.
- [6] Galati M, Minetola P. Analysis of density, roughness, and accuracy of the atomic diffusion additive manufacturing (ADAM) process for metal parts [J]. *Materials*, 2019, 12(24): 4122.
- [7] Singh G, Missiaen J M, 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: 102287.
- [8] Singh G, Missiaen J M, Bouvard D, et al. Copper extrusion 3D printing using metal injection moulding feedstock: analysis of process parameters for green density and surface roughness optimization [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 38: 101778.
- [9] Lavecchia F, Pellegrini A, Galantucci L M. Comparative study on the properties of 17-4 PH stainless steel parts made by metal fused filament fabrication process and atomic diffusion additive manufacturing [J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2023, 29(2): 393-407.
- [10] Singh P, Balla V K, Atre S V, et al. Factors affecting properties of Ti-6Al-4V alloy additive manufactured by metal fused filament fabrication [J]. *Powder Technology*, 2021, 386: 9-19.
- [11] Ferreira S L C, Bruns R E, Ferreira H S, et al. Box-Behnken design: an alternative for the optimization of analytical methods [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2007, 597(2): 179-186.
- [12] 吴昂, 吴莹, 李国俊, 等. 基于响应曲面法的大型锥形件缩口成形工艺设计及多几何参数优化 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(24): 83-92.
(Wu Ang, Wu Ying, Li Guo-jun, et al. Process design and multi-geometric parameter optimization of large cones based on response surface methodology [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(24): 83-92.)
- [13] Supriadi S, Suharno B, Hidayatullah R, et al. Thermal debinding process of SS 17-4 PH in metal injection molding process with variation of heating rates, temperatures, and holding times [J]. *Solid State Phenomena*, 2017, 266: 238-244.
- [14] 张烘州, 明伟伟, 安庆龙, 等. 响应曲面法在表面粗糙度预测模型及参数优化中的应用 [J]. *上海交通大学学报*, 2010, 44(4): 447-451.
(Zhang Hong-zhou, Ming Wei-wei, An Qing-long, et al. Application of response surface methodology in surface roughness prediction model and parameter optimization [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2010, 44(4): 447-451.)
- [15] 胡雅琴. 响应曲面二阶设计方法比较研究 [D]. 天津: 天津大学, 2005.
(Hu Ya-qin. A comparative study on the second-order designs in response surface methodology [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.)