

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.08.015

FDM工艺参数对CF/PETG制件尺寸精度的影响

田国强¹, 吴凯¹, 高森森¹, 许小奎¹, 陈中中²

(1. 郑州航空工业管理学院机械工程学院, 郑州 450046; 2. 郑州大学机械与动力工程学院, 郑州 450001)

摘要: 碳纤维(CF)增强聚对苯二甲酸乙二酯-1,4-环己烷二甲酯(CF/PETG)材料在护具、晶格结构、假体制造等行业得到广泛应用。熔融沉积成型(FDM)作为复杂零件成型的主要技术在增材制造生产中广泛使用,但工艺参数选择不当会导致制件成型精度较低。以商用CF/PETG线材为对象,采用FDM工艺制备了试验样件,研究了喷嘴温度、热床温度、层厚、填充率4个主要工艺参数对制件尺寸精度的影响。设计了 $L_{25}(5^4)$ 正交试验,进行了试验样件尺寸测量和误差计算,并采用极差分析确定了 X, Y, Z 每个方向上最佳工艺参数组合和四个因素的影响主次顺序。利用综合分折法对制件综合尺寸精度进行分析,得到了因素的影响顺序为:热床温度>层厚>填充率>喷嘴温度,确定了最优工艺参数组合为喷嘴温度245℃、热床温度65℃、层厚0.20 mm、填充率10%。采用优化的工艺参数进行CF/PETG塑件的3D打印制造,并通过逆向精度分析方法进行塑件实物精度评价,验证了优化的工艺参数能够为CF/PETG塑件的精度改善提供数据参考,进而指导实际应用。

关键词: 碳纤维;聚对苯二甲酸乙二酯-1,4-环己烷二甲酯;熔融沉积;精度;正交试验;逆向精度评价

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)08-0104-06

Effect of FDM process parameters on dimensional accuracy of CF/PETG parts

TIAN Guoqiang¹, WU Kai¹, GAO Sensen¹, XU Xiaokui¹, CHEN Zhongzhong²

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou 450046, China;

2. School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract : Carbon fiber(CF) reinforced polyethylene terephthalate-1,4-cyclohexanedimethanol (CF/PETG) materials have been widely used in industries such as protective gear, lattice structure, and prosthesis manufacturing. Fused deposition modeling (FDM), a primary technique for forming complex parts, is extensively employed in additive manufacturing, but improper selection of process parameters can lead to lower forming accuracy of the parts. Based on commercial CF/PETG wire as raw material, experimental samples were fabricated via FDM process to investigate the effects of four main process parameters, namely nozzle temperature, hot bed temperature, layer thickness, and filling rate, on the dimensional accuracy of samples. A $L_{25}(5^4)$ orthogonal experiment was designed, sample size measurement and error calculation were conducted, and range analysis was used to determine the optimal combination of process parameters in each direction of X, Y, Z and the order of influence of four factors. A comprehensive analysis method was employed to analyze the overall dimensional accuracy of the samples, and the order of factors was obtained as follows: hot bed temperature>layer thickness>filling rate>nozzle temperature. The optimal parameter combination was nozzle temperature 245 °C, hot bed temperature 65 °C, layer thickness 0.20 mm, and filling rate 10%. The 3D printing of CF/PETG plastic parts was performed using optimized process parameters, and the accuracy evaluation of the plastic parts was carried out through reverse accuracy analysis method. It was verified that the optimized process parameters can provide data reference for the accuracy improvement of CF/PETG parts, and guide practical applications.

Keywords : carbon fiber ; polyethylene terephthalate-1,4-cyclohexanedimethanol ; fused deposition molding ; accuracy ; orthogonal test ; reverse accuracy analysis

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(202102210080), 郑州航院研究生教育创新计划基金项目(2023CX60)

通信作者: 田国强, 博士, 讲师, 硕士生导师, 研究方向为3D打印及应用技术

收稿日期: 2024-06-08

引用格式: 田国强, 吴凯, 高森森, 等. FDM工艺参数对CF/PETG制件尺寸精度的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(8): 104-109.

TIAN Guoqiang, WU Kai, GAO Sensen, et al. Effect of FDM process parameters on dimensional accuracy of CF/PETG parts[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(8): 104-109.

熔融沉积快速成型(FDM)工艺是将热塑性聚合物丝材在喷嘴内加热融化,喷头沿零件截面轮廓和填充轨迹运动,同时将熔融塑料挤压沉积到运动的工作台上,利用高温自黏结性逐层堆积成型^[1]。FDM是众多3D打印工艺中发展较为成熟、使用较为广泛的工艺之一,其特点是设备价格和材料成本相对较低、打印操作简单方便,因此在航空航天、医疗保健、教育、艺术等领域得到了广泛应用^[2-3]。随着我国制造业的不断发展,人们对FDM 3D打印制品要求越来越高,制品成型精度与材料、加工工艺的关系也成为了目前众多科研工作者的研究方向。

近年,学者们针对FDM工艺参数及制件成型精度作了较多研究。Garg等^[4]针对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS) P430材料,研究了不同的成型角度对打印制件的表面精度和尺寸精度的影响。Frunzaverde等^[5]针对聚乳酸(PLA)材料研究了不同的耗材丝颜色和层厚对PLA制件尺寸精度和拉伸强度的影响。Popović等^[6]通过实验研究了不同喷嘴温度和打印速度对PLA制件的尺寸精度的影响。Armillotta等^[7]就FDM 3D打印技术中翘曲变形问题展开研究,研究了不同打印参数对ABS材料翘曲变形的影响。王春香等^[8]通过修改切片处理使得打印制件错层打印,研究了不同错层高度对PLA材料表面精度的影响。冯建军等^[9]通过正交试验结合信噪比响应研究了不同层厚、打印速度、喷头温度、填充线宽对打印制件尺寸精度的影响。白鹤等^[10]通过正交试验利用了灰色关联分析研究了不同工艺参数对PLA打印制件尺寸精度的影响。

目前,针对FDM 3D打印制件尺寸精度的研究主要是围绕着传统的PLA和ABS材料开展。碳纤维(CF)增强聚对苯二甲酸乙二酯-1,4-环己烷二甲酯(CF/PETG)是一种优异的纤维增强塑料,较传统的PLA和ABS材料有更好强度和刚度表现,在运动护具、晶格结构、假体制造等领域得到广泛应用^[11-13]。但是,针对CF/PETG制件FDM打印工艺参数和尺寸精度的研究较少。笔者选取工艺参数中的喷嘴温度、热床温度、层厚和填充率四个主要因素设计正交试验,分析四个工艺参数对CF/PETG制件的尺寸精度影响,找出CF/PETG制件尺寸精度的优化参数组合。最后采用优化的工艺参数进行塑件实物的3D打印,并进行塑件实物精度分析评价,验证工

艺参数优化对CF/PETG塑件生产制造的指导作用。

1 试验部分

1.1 主要原材料

CF/PETG线材:黑色,直径1.75 mm,CF质量分数为10%左右,深圳Bambu Lab 拓竹科技公司。

1.2 主要仪器及设备

3D打印机:Bambu Lab P1S, 深圳Bambu Lab 拓竹科技公司;

数显游标卡尺:K101301,精度为0.01 mm,量程为0~100 mm,成都成量工具集团有限公司;

三维光学扫描测量仪:ATOSI,精度 $\leq \pm 0.015$ mm,德国GOM公司。

1.3 正交试验设计及试样制备

利用三维造型软件SolidWorks绘制40 mm×30 mm×10 mm的长方体试样模型,尺寸如图1所示。将模型保存为STL文档后,导入3D打印机中,逐层打印,得到试样,如图2所示。

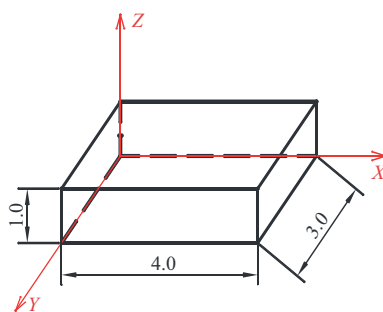


图1 打印样件尺寸图

Fig. 1 Dimensional drawing of sample

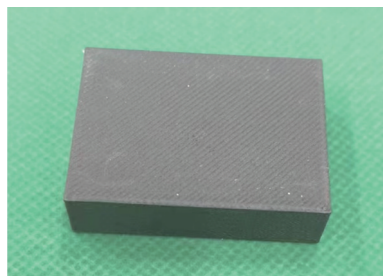


图2 FDM打印制备的试样

Fig. 2 Sample prepared by FDM

对CF/PETG制件的成型精度研究,主要考虑喷嘴温度(A)、热床温度(B)、层厚(C)、填充率(D)4个因素,选取5水平,因素水平的划分见表1,设计正交试验 $L_{25}(5^4)$,共25组实验。

1.4 尺寸精度测试与评价

采用图1所示试样的尺寸误差来评价其尺寸精度,误差越小代表尺寸精度越高。采用数显游标卡

表 1 试验因素水平表
Tab. 1 Test factor level table

Level	Factor			
	A/°C	B/°C	C/mm	D/%
1	245	60	0.12	10
2	250	65	0.16	30
3	255	70	0.2	50
4	260	75	0.24	70
5	265	80	0.28	90

尺分别对 X, Y, Z 三个方向尺寸值进行测量,每个方向均测量三次,求其平均值后计算该平均值与对应方向理论值之差的绝对值,并算得相对误差,以此值代表三个方向的尺寸误差,见公式(1)。

$$\% \Delta X = \frac{|X - X_0|}{X} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\% \Delta X$ 为打印试样的相对尺寸误差; X 为打印试样的设计尺寸; X_0 为打印试样的实际测量尺寸。

确定影响试样精度的优化工艺参数后,采用该参数进行具体的CF/PETG塑料件实例(医疗康复用颈部护具)打印,并通过三维光学扫描测量仪采集塑料件点云数据。然后采用逆向精度分析法评价塑料件的尺寸精度,以检验优化的FDM工艺参数对CF/PETG塑料件生产制造的指导作用。

2 结果与讨论

2.1 正交实验结果

测量 X, Y, Z 三个方向的尺寸相对误差,由 $\% X, \% Y, \% Z$ 表示,测量结果见表2。

2.2 极差分析

极差分析被用来评估实验结果在不同处理条

表 2 正交试验结果
Tab. 2 Orthogonal test results

No.	A /°C	B /°C	C /mm	D /%	%ΔX/%	%ΔY/%	%ΔZ/%
1 [#]	245	60	0.12	10	0.42	0.36	0.09
2 [#]	245	65	0.16	30	0.30	0.39	0.04
3 [#]	245	70	0.2	50	0.37	0.49	0.24
4 [#]	245	75	0.24	70	0.55	0.67	0.31
5 [#]	245	80	0.28	90	0.62	0.79	0.14
6 [#]	250	60	0.16	50	0.36	0.43	0.24
7 [#]	250	65	0.2	70	0.40	0.54	0.13
8 [#]	250	70	0.24	90	0.54	0.69	0.02
9 [#]	250	75	0.28	10	0.48	0.50	0.48
10 [#]	250	80	0.12	30	0.41	0.58	0.91
11 [#]	255	60	0.2	90	0.45	0.60	0.21
12 [#]	255	65	0.24	10	0.37	0.33	0.39
13 [#]	255	70	0.28	30	0.43	0.43	0.39
14 [#]	255	75	0.12	50	0.38	0.54	0.42
15 [#]	255	80	0.16	70	0.52	0.81	0.24
16 [#]	260	60	0.24	30	0.38	0.34	0.36
17 [#]	260	65	0.28	50	0.44	0.47	0.39
18 [#]	260	70	0.12	70	0.35	0.55	0.02
19 [#]	260	75	0.16	90	0.55	0.83	0.15
20 [#]	260	80	0.2	10	0.45	0.53	0.17
21 [#]	265	60	0.28	70	0.48	0.58	0.60
22 [#]	265	65	0.12	90	0.37	0.53	0.12
23 [#]	265	70	0.16	10	0.43	0.44	0.07
24 [#]	265	75	0.2	30	0.40	0.47	0.23
25 [#]	265	80	0.24	50	0.52	0.63	0.21

件下的变异性,可以反映数据的离散程度,用于研究因素对实验结果的变化范围(极差)的影响。在试验中,尺寸相对误差为研究对象,因此,相对误差越小越好。

2.2.1 各因素对 X 方向尺寸精度的影响

各因素与 X 方向尺寸精度的关系如图3所示,喷嘴温度对 X 方向尺寸精度的影响,相对误差呈先下降再升高的趋势,但整体趋势较为平缓,说明喷

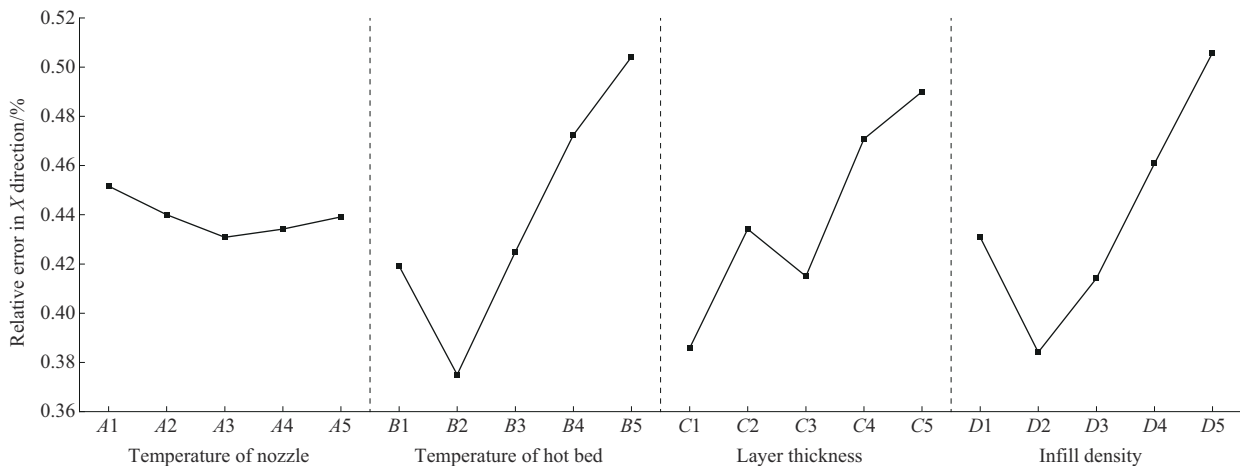


图3 X 方向相对误差

Fig. 3 Relative error in X direction

嘴温度在245~265 °C范围内对 X 方向的尺寸精度影响较小;热床温度整体为上升趋势,这是因为CF/PETG材料热胀冷缩的原因,打印样件打印完成后,立即取出后放置室温下冷却,这导致温度越高,温差越大,冷却速度越快,收缩尺寸就越大;层厚越小,丝材被挤压的越宽,在相同收缩率下,层厚越小,丝材越宽,尺寸误差越小;填充率对 X 方向尺寸精度的影响,整体随填充率增大,尺寸相对误差也增大,原因是填充率越高,内部结构支撑越多,内部温度越高,在打印件完成后,自然冷却中,内部作用力越大,收缩率越高,因此尺寸相对误差越大。从图3中还能得出 X 方向尺寸精度的最佳工艺参数组合为A3B2C1D2,其中,4个因素的极差值分别为0.021,0.129,0.104,0.122,主次顺序为 $B>D>C>A$ 。

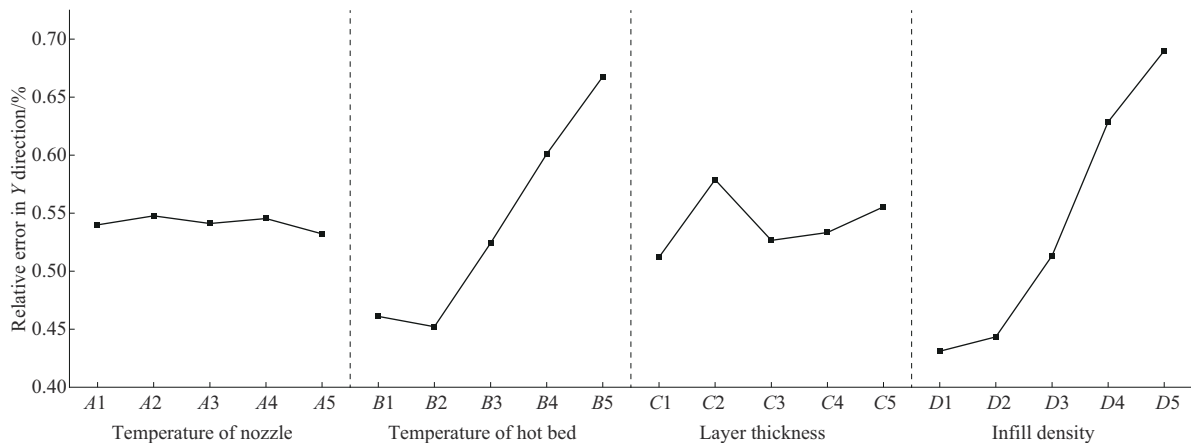


图4 Y方向相对误差

Fig. 4 Relative error in Y direction

2.2.3 各因素对Z方向尺寸精度的影响

各因素与 Z 方向尺寸精度的关系如图5所示,与 X , Y 方向不同,四个因素对 Z 方向尺寸精度的影响并没有呈现出整体上升或下降趋势。尤其是在喷嘴温度中, Z 方向相对尺寸误差在245~250 °C之间上升,在250~260 °C之间下降,随之又上升,这是因为另外3个因素对 Z 方向尺寸精度的影响因子接近;热床温度对 Z 方向尺寸精度的影响为先下降再升高,热床温度在70 °C左右时, Z 方向尺寸精度表现最优;与其趋势相似的因素有层厚,层厚在0.16 mm时, Z 方向尺寸精度表现最优;填充率的相对误差值从10%先上升,到30%呈下降趋势,这是由于 Z 方向在成型过程本身会有 Z 方向上热膨胀,在打印件自然冷却收缩的过程中,随着填充率越来越大,

2.2.2 各因素对Y方向尺寸精度的影响

各因素与 Y 方向尺寸精度的关系如图4所示,喷嘴温度对 Y 方向尺寸精度影响,在极差分析图中趋势较为平缓,与 X 方向尺寸精度相似,喷嘴温度在245~265 °C范围内对 Y 方向的尺寸精度影响较小;热床温度整体呈上升趋势,其原因与 X 方向上原因相同,都是由于材料本身热胀冷缩导致的;在层厚方面,整体趋势较为平缓,但上升走势和下降走势与 X 方向一致,且同 X 相同,层厚为0.12 mm时,尺寸相对误差均为最小;填充率对 Y 方向的尺寸精度影响,其相对误差呈成上升趋势,和 X 方向趋势和成因基本一致。此外,对 Y 方向尺寸精度来说,最佳工艺参数组合为A5B2C1D1,四个因素的极差值分别为0.016,0.316,0.067,0.259,其中各因素对 Y 方向尺寸精度影响主次相同,即 $B>D>C>A$ 。

内部支撑越强,受到的收缩的作用力越大。在 Z 方向上,各因素保证尺寸精度的最佳工艺参数组合为A1B3C2D5,极差值分别为0.193,0.184,0.254,0.258, Z 方向因素的影响主次顺序为 $D>C>A>B$ 。

2.2.4 各因素对综合尺寸精度的影响

综合评分法是一种用于评估多指标的方法。本试验中综合尺寸精度衡量结果的指标应为 X , Y , Z 这3个方向的相对尺寸误差,为多指标正交试验,因此采用综合评分法对试验指标加权处理。三项指标对尺寸精度的重要程度相同,将 X , Y , Z 三方向尺寸相对误差权数设为0.333,并合并处理。得到综合方向尺寸相对误差的极差分析图,见图6。4个因素极差值为0.063,0.153,0.102,0.083,影响 Z 方向尺寸精度因素的主次顺序为 $B>C>D>A$ 。综合尺寸精度

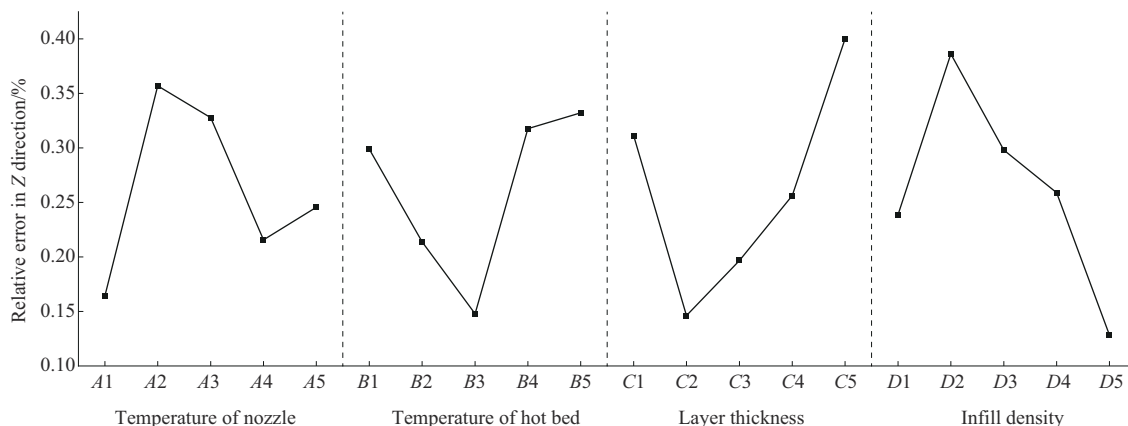


图5 Z方向相对误差

Fig. 5 Relative error in Z direction

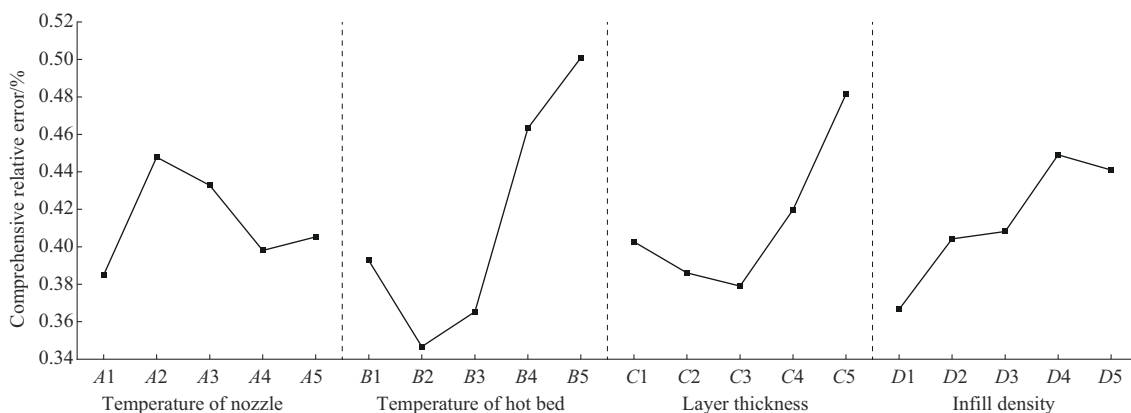


图6 综合相对误差

Fig. 6 Comprehensive relative error

的最佳工艺参数组合为A1B2C3D1,即喷嘴温度为245℃,热床温度为65℃,层厚为0.20 mm,填充率为10%。

采用优化的工艺参数组合,对打印样件进行制样,最后测得X,Y,Z方向相对误差分别为0.26%,0.25%,0.06%,综合尺寸相对误差为0.19%,优于正交试验中综合尺寸精度最优的第2组(0.29%)。

3 CF/PETG 塑件3D打印实例及逆向精度分析

3D打印在医疗康复和体育运动用护具制造方面得到广泛应用。以医疗康复用颈部护具为实例对象,进行3D打印和精度分析。

首先利用护具STL三维模型进行3D打印制造(见图7),打印工艺参数为A1B2C3D1,即喷嘴温度为245℃,热床温度为65℃,层厚为0.20 mm,填充率为10%。其中图7a为护具三维STL模型,其整体包容尺寸约为126 mm×89 mm×101 mm,其厚度尺寸为3 mm。图7b为通过FDM打印方法制造出的CF/PETG颈部护具塑件实物。



(a) STL 3D model

(b) Plastic part of neck protector

图7 颈部护具FDM打印

Fig. 7 FDM printing of neck protector

逆向精度评价法是评价3D打印复杂结构零件成型精度的一种常用方法^[14-15],采用该方法评价护具的尺寸误差,如图8所示。

首先,使用ATOSI型光学扫描仪对护具与人体贴合的内表面进行光学扫描,得到护具内表面数字模型(见图8a)。之后,将图8a所示数字模型导入专用精度分析软件Geomagic Control中,作为测试数据。将图7a所示护具三维STL模型同样导入该软件中,并通过点云处理得到护具STL模型内表面(见

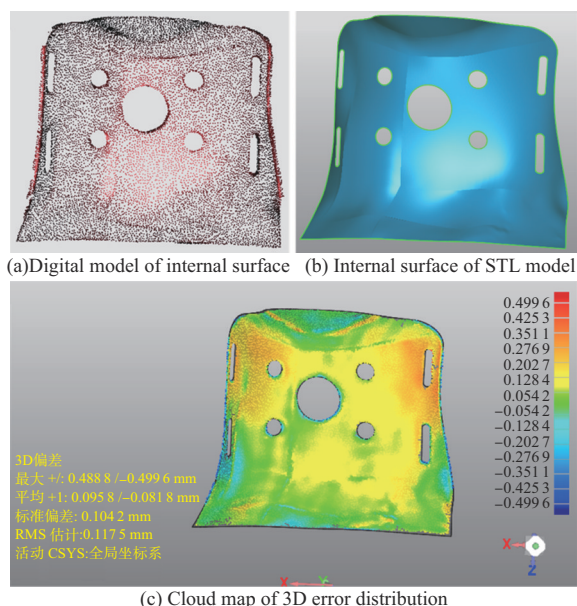


图8 颈部护具精度分析

Fig. 8 Accuracy analysis of neck protector

图8b),作为参考数据。最后通过对齐测试数据和参考数据,并进行精度分析,得到3D误差分布云图(见图8c)。误差分析结果表明,3D打印护具实物的最大正负偏差为+0.488 8 mm/-0.499 6 mm,平均正负偏差为+0.095 8 mm/-0.081 8 mm,说明护具总体成型精度较高。护具制造及精度分析结果表明,本研究得到的3D打印工艺参数可为CF/PETG塑件成型精度提升提供数据参考。

4 结论

(1)通过CF/PETG制件尺寸精度正交试验的极差分析,发现四个因素对 X 、 Y 方向的影响次序基本一致,即热床温度 B >填充率 D >层厚 C >喷嘴温度 A ,但最佳工艺参数组合有些许不同, X 方向上的最佳工艺参数组合为 $A3B2C1D2$, Y 方向上最佳工艺参数组合为 $A5B2C1D1$ 。与 X 、 Y 方向影响规律不同,四个因素对 Z 方向次序为 D > C > A > B , Z 方向上最佳工艺参数组合为 $A1B3C2D5$ 。

(2)通过极差分析综合评分法得到影响CF/PETG制件综合尺寸精度的因素主次顺序为热床温度 B > C > D > A ,最佳工艺参数组合为 $A1B2C3D1$,即喷嘴温度为245℃,热床温度为65℃,层厚为0.20 mm,填充率为10%。

(3)得到的优化工艺参数能够为后续CF/PETG塑件的成型精度提升提供数据参考,进而对该材料塑件的生产制造具有较好指导作用。

参考文献

- [1] 翟翠红,汪建均,马义中,等.考虑熔沉沉积成型工艺稳定性的参数优化设计[J].机械工程学报,2023,59(23):331-342.
ZHAI Cuihong, WANG Jianjun, MA Yizhong, et al. Parameter optimization design considering the stability of the fused deposition modeling process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(23):331-342.
- [2] 唐锋,熊建武,夏凯,等.FDM工艺参数对轴类PLA制件扭转性能影响[J].工程塑料应用,2022,50(8):66-71.
TANG Feng, XIONG Jianwu, XIA Kai, et al. Effect of FDM process parameters on torsional performance of axial PLA parts[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(8):66-71.
- [3] WICKRAMASINGHE S, DO T, TRAN P. FDM-based 3D printing of polymer and associated composite: A review on mechanical properties, defects and treatments[J]. Polymers, 2020, 12(7). DOI: 10.3390/polym12071529.
- [4] GARG A, BHATTACHARYA A, BATISH A. On surface finish and dimensional accuracy of FDM parts after cold vapor treatment[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(4): 522-529.
- [5] FRUNZAVARDE D, COJOCARU V, BACESCU N, et al. The influence of the layer height and the filament color on the dimensional accuracy and the tensile strength of FDM-printed PLA specimens[J]. Polymers, 2023, 15(10). DOI:10.3390/polym15102377.
- [6] POPOVIĆ M, PJEVIĆ M, Milovanović A, et al. Printing parameter optimization of PLA material concerning geometrical accuracy and tensile properties relative to FDM process productivity[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(2): 697-706.
- [7] ARMILLOTTA A, BELLOTTI M, CAVALLARO M. Warpage of FDM parts: Experimental tests and analytic model[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2018, 50: 140-152.
- [8] 王春香,王齐超,翟飞龙,等.错层切片对FDM制件层间黏结强度及表面精度的影响[J].塑料工业,2023,51(6): 82-86,98.
WANG Chunxiang, WANG Qichao, ZHAI Feilong, et al. Effect of split-layer sectioning on interlayer bonding strength and surface accuracy of FDM parts[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 51(6):82-86,98.
- [9] 冯建军,梁宏斌,于阳.FDM快速成型工艺参数的分析与优化研究[J].机械科学与技术,2019,38(5):742-748.
FENG Jianjun, LIANG Hongbin, YU Yang, et al. Analysis and optimization of processing parameters in FDM rapid prototyping[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(5):742-748.
- [10] 白鹤,张章,刘亚明,等.基于灰色关联分析的FDM工艺参数与制件精度关系研究[J].工程塑料应用,2020,48(11): 80-84,94.
BAI He, ZHANG Zhang, LIU Yaming, et al. Research on the relationship between FDM process parameters and part accuracy based on grey relational analysis[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(11):80-84,94.
- [11] ALARIFI M I, ALARIFI I M. Comprehensive structural evaluation of composite materials in 3D-printed shin guards[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27:6 912-6 923.

(下转第116页)