

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.012

防风罩结构对材料挤出式3D打印成型件力学性能的影响

王琛, 黄涵熠, 王筱纹, 王怡博然

(南京林业大学家居与工业设计学院, 南京 210037)

摘要: 为提高材料挤出式3D打印(ME-3DP)成型件的力学性能,从热力学优化角度出发,针对如丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)等高热收缩率、低热稳定性的丝材,提出了一种防风罩结构。首先,采用桌面级ME-3DP设备制备哑铃形ABS成型件。随后,研究了防风罩结构参数(高度、间距和厚度)对ABS成型件拉伸性能的影响。最后,对有防风罩和无防风罩模式下ABS成型件和尼龙6(PA6)的力学性能进行对比。结果表明,防风罩间距对ABS成型件力学性能的影响最大,其次为高度,增大防风罩高度或减小间距均能明显提升ABS成型件的力学性能,而防风罩厚度对ABS成型件力学性能的影响极小;与无防风罩的成型件相比,有防风罩的ABS成型件的拉伸强度平均值和拉伸弹性模量平均值分别提高了10.50%和10.71%,而PA6成型件分别提高了12.67%和13.44%,表明防风罩在改善ME-3DP成型件力学性能方面具有良好的普适性;热力仿真结果表明,防风罩使ABS成型件的稳态温度提升了16.98%,增强了成型件的层间黏结性能,进而提升了成型件整体力学性能。

关键词: 防风罩;结构参数;材料挤出式3D打印;丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料成型件;热力学;力学性能

中图分类号: TQ322.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0088-07

Effect of windshield structures on mechanical properties of parts fabricated by material extrusion 3D printing

WANG Chen, HUANG Hanyi, WANG Xiaowen, WANG Yiboran

(College of Furnishings and Industrial, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract : To enhance the mechanical properties of parts fabricated by material extrusion 3D printing (ME-3DP), a windshield structure was proposed from the perspective of thermodynamic optimization, targeting filaments with high thermal shrinkage and low thermal stability, such as acrylonitrile-butadiene-styrene plastic (ABS). Firstly, a dumbbell-shaped ABS part was fabricated using a desktop ME-3DP equipment. Subsequently, the effects of windshield structural parameters (height, spacing, and thickness) on the tensile properties of ABS parts were analyzed. Finally, the comparisons of mechanical properties were made between ABS parts or polyamide 6 (PA6) with and without windshields. The results show that, the spacing of the windshield has the greatest impact on the mechanical properties of ABS parts, followed by the height. When the height of the windshield increases and the spacing decreases, the tensile strength and tensile modulus of ABS parts are significantly increased, but the thickness of the windshield has little effect on the mechanical properties of ABS parts. Compared with the parts without windshields, the average tensile strength and tensile modulus of ABS parts with windshields are improved by 10.50% and 10.71% respectively, and those of PA6 parts are improved by 12.67% and 13.44% respectively, which indicates the windshield has good universality in improving the mechanical properties of ME-3DP parts. Thermal simulation results show that the windshield significantly increases the steady-state temperature of ABS parts by 16.98%, thereby enhancing the interlayer bonding properties of the parts and ultimately improving their overall mechanical properties.

Keywords : windshield ; structural parameter ; material extrusion 3D printing ; acrylonitrile-butadiene-styrene plastic part ; thermodynamics ; mechanical property

基金项目: 教育部产学研协同育人项目(240904583024847),江苏省大学生创新训练计划项目(202510298200Y)

通信作者: 王琛,实验师,主要从事3D打印技术应用、逆向工程、计算机辅助产品设计等研究开发工作

收稿日期: 2025-07-21

引用格式: 王琛,黄涵熠,王筱纹,等.防风罩结构对材料挤出式3D打印成型件力学性能的影响[J].工程塑料应用,2025,53(10):88-94.

WANG Chen, HUANG Hanyi, WANG Xiaowen, et al. Effect of windshield structures on mechanical properties of parts fabricated by material extrusion 3D printing[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 88-94.

材料挤出式3D打印(Material Extrusion 3D Printing,简称ME-3DP)是美国材料与试验协会定义的7种3D打印技术之一^[1]。凭借其设备成本低、技术成熟度高和材料适用性广等优势,ME-3DP已成为产业化应用最广泛、用户接受度最高的3D打印技术之一,并在全球3D打印市场中占据主导地位^[2]。本质上,ME-3DP是一种塑料热成型工艺。然而,相较于注塑、吹塑等传统塑料热成型工艺,ME-3DP热成型过程中的温度场呈现显著的空间非均匀性。这种高度不均匀的温度场导致成型件内部应力分布不均、层间黏结质量较差,从而严重削弱了成型件的力学性能^[3]。

丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)是一种常见的热塑性塑料,因其优异的综合性能(如高强度、高韧性和抗冲击性等)而被广泛应用于ME-3DP技术中^[4]。然而,相较于聚乳酸(PLA)、聚对苯二甲酸乙二醇酯-1,4-环己烷二甲醇酯(PETG)等材料,ABS在ME-3DP成型过程中表现出热收缩率较高、热稳定性较低等特点,导致其成型难度大,进而引发一系列工艺问题,如翘曲变形、层间开裂、力学性能差等^[5]。

近年来,研究人员对ME-3DP成型件力学性能的提升方法进行了探究。喻红等^[6]研究了层高、喷头温度及退火处理对ABS成型件力学性能的影响。研究表明,ABS成型件的拉伸强度和断裂伸长率随层高增大而降低,随喷头温度升高而提高。此外,退火处理显著改善了成型件的强度与韧性。杨露等^[7]通过正交试验分析了层高、填充率、打印速度和挤出温度对ME-3DP成型件力学性能的影响,研究表明,各工艺参数对ME-3DP成型件拉伸性能的影响程度为:填充率>层高>挤出温度>打印速度。最佳工艺参数组合为:填充率40%、层高0.3 mm、挤出温度210℃、打印速度80 mm/s,在此条件下制备的ME-3DP成型件拉伸性能最优。林晓健等^[8]采用苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)对ABS进行改性,制备了用于3D打印的ABS/SEBS复合丝材,探究了SEBS含量对成型件力学性能的影响。结果表明,随着SEBS含量的增加,ABS/SEBS成型件的冲击强度逐渐提高,断裂伸长率有所增加,但拉伸强度和弯曲强度均出现下降;当SEBS质量分数为15%时,ABS/SEBS成型件的综合力学性能最佳。Wang等^[9]通过在PLA丝材表面涂覆碳化硅(SiC)薄层制备了PLA/SiC复合丝材。利用微波加

热时,分布于丝材表面的SiC颗粒高效吸收辐射并迅速升温,致使由该复合丝材制备的成型件在黏结界面处发生重熔。这一过程有效促进了PLA分子链的再次扩散与缠绕。与3D打印PLA成型件相比,PLA/SiC成型件的拉伸强度提高了51%,层间黏结性能提高了18.7%。

现有研究表明,ME-3DP成型件力学性能提升方法主要集中在工艺参数优化与材料改性两方面。相比之下,从热力学角度提升ME-3DP成型件力学性能的研究较少。为此,笔者聚焦热力学优化方向,针对如ABS等高热收缩率、低热稳定性的丝材,创新性地提出了一种防风罩结构。该结构能有效减弱打印区域内的空气对流速率,从而在其内部形成一个热流密度更高、温度分布更均匀、热环境更稳定的区域。通过这种热环境调控方法,可显著提高ME-3DP成型件的稳态温度,进而增强成型件的层间黏结性能,并最终提升其整体力学性能。

1 ME-3DP热成型原理

ME-3DP设备主要由热床、送丝装置、移动装置、挤出头和冷却风扇等部件构成^[10],如图1所示。热成型过程中,送丝装置将热塑性丝材送入挤出头,挤出头将丝材加热至预设熔融温度。随后,移动装置驱动挤出头在热床上方运动,按照成型件截面轮廓选择性沉积丝材熔体,熔体随即冷却固化。完成一层的轮廓沉积后,挤出头抬升预设的分层高度,开始下一层的打印^[11]。

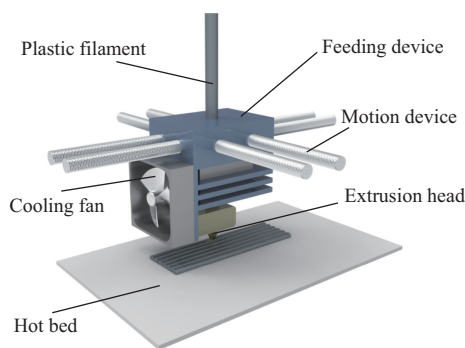


图1 ME-3DP设备结构组成

Fig. 1 Structural composition of ME-3DP equipment

从热力学角度分析,新挤出的丝材熔体与下方已凝固的沉积层接触。由于两者间存在温差,热量迅速传导,使接触界面温度通常介于丝材的熔融温度与玻璃化转变温度之间。在此温度区间内,丝材分子链处于松弛状态。在表面张力及挤出头持续热量的共同作用下,相邻层丝材接触界面处的分子

链发生相互扩散与缠结,从而实现层间黏结^[11]。最终,当界面温度降至丝材玻璃化转变温度以下时,分子链运动冻结,层间黏结过程完成。相邻层丝材的黏结过程如图2所示。

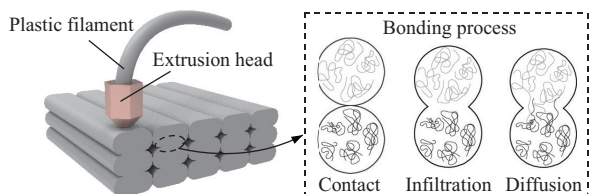


图2 相邻层丝材的黏结过程

Fig. 2 Adjacent layer filament bonding process

在ME-3DP设备的主要部件中,冷却风扇对成型件的层间黏结性能影响显著^[12]。冷却风扇通过强制对流换热,干扰了由热床和挤出头共同构建的温度场,具体作用机制如下:(1)冷却风扇的气流直接作用于挤出头中流出的丝材熔体,加速其表面冷却固化,抑制了层间分子链的扩散,降低了成型件的层间黏结强度;(2)风扇气流扩散至成型件底部区域,削弱了热床的持续加热效果,容易导致成型件边缘(尤其是ABS等高热收缩率材料)发生翘曲变形;(3)风扇气流分布不均,成型件不同区域的冷却速率存在差异,进而引发局部热应力集中,导致层间开裂等问题。

2 防风罩原理与创建方法

防风罩是一种用于提高ME-3DP成型件层间黏结性能的辅助结构,其原理是在热床上距离ME-3DP成型件侧壁一定间距处,同步打印一圈封闭的薄壁结构。该结构具有以下特征:底部与热床紧密黏接,顶部保持开放,侧面完全封闭。这种特殊结构能有效降低防风罩内空气的对流速度,从而在防风罩内部形成一个热流密度更高的均匀温度场。通过这种热环境调控,可以显著提升ME-3DP成型件的稳态温度,进而增强成型件的层间黏结性能,并最终改善成型件的力学性能。防风罩结构示意图如图3所示,其中图3a为常规打印模式(无防风罩)的示意图,图3b为有防风罩模式的示意图。

防风罩结构的创建方法主要有两种:一是在切片软件中创建,部分切片软件内置防风罩生成功能,可快速生成该结构,例如在Cura软件中,选择防风罩命令,设置好高度、间距(即防风罩与成型件侧壁的距离)和厚度参数后,软件即可在成型件四周自

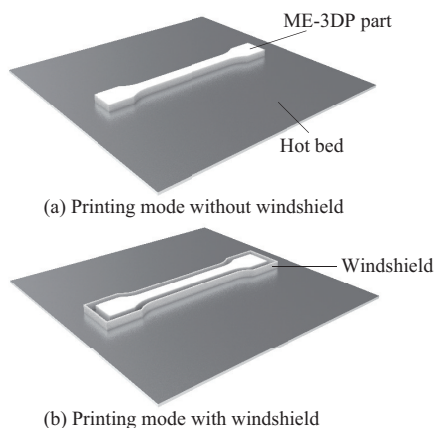


图3 防风罩结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of windshield structure

动生成防风罩结构;二是在三维建模软件中创建,以SolidWorks软件为例,在建模时选择三维模型的侧面创建等距曲面,随后对该曲面进行加厚操作(加厚厚度宜为挤出头直径的整数倍,以减少打印孔隙),使之成为实体,最后,将全部模型导出为STL格式并导入切片软件完成切片处理。这两种方法的区别在于:Cura软件生成的防风罩是通过将成型件底面轮廓等距放大并拉伸形成的薄壁结构,其各层轮廓保持一致,适用于简单几何形状的成型件;而SolidWorks软件生成的防风罩是通过模型曲面等距放大构建而成,适用于具有复杂曲面的成型件^[13]。

3 实验部分

3.1 主要原料

3D打印ABS丝材:白色,线径1.75 mm,密度1.12 g/cm³,深圳纵维立方科技有限公司;

3D打印尼龙(PA)6丝材:白色,线径1.75 mm,密度1.15 g/cm³,深圳纵维立方科技有限公司。

3.2 主要仪器及设备

ME-3DP设备:Kobra型(桌面级)3D打印机,深圳纵维立方科技有限公司;

万能力学试验机:AG-X (20 kN),日本岛津株式会社。

3.3 试样制备

由于拉伸强度和拉伸弹性模量能够有效表征塑料成型件的强度和刚性,是塑料成型件力学性能评价的两个关键参数,因此笔者对3D打印ABS成型件的拉伸性能进行测试^[14]。根据GB/T 1040.2-2006要求,选用哑铃形试样进行试验。试样设计通过SolidWorks软件完成,具体几何尺寸如图4所示。采用ABS丝材和桌面级3D打印机完成试样(ABS

成型件)的制备,主要切片参数设置如下:挤出头温度 220 °C,打印速度 40 mm/s,层高 0.3 mm,填充图案直线型,填充率 15%。所有试样均在相同环境条件下(温度 23 °C±2 °C,相对湿度 50%±5%)进行打印,以消除环境因素对试验结果的影响。

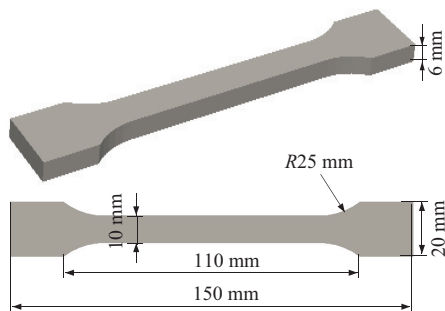


图4 拉伸试验试样

Fig. 4 Tensile experiment sample

3.4 性能测试

参考 GB/T 1040.2-2006 中规定的方法,使用万能力学试验机对 ABS 成型件进行拉伸试验。试验在准静态加载状态下进行,通过施加恒定的拉伸速度(2 mm/min),使 ABS 成型件在轴向方向上产生拉伸变形,直至断裂。通过分析成型件在拉伸过程中的应力-应变关系,可以获得拉伸强度、拉伸弹性模量等力学性能参数。其中,拉伸强度为应力-应变曲线峰值点对应的最大应力值,拉伸弹性模量通过线性回归法计算应力-应变曲线初始线性段的斜率得出^[15]。

4 防风罩参数对3D打印ABS成型件力学性能的影响

4.1 防风罩高度

设置防风罩间距为 2.0 mm,厚度为 0.8 mm。由于笔者使用的哑铃形试样厚度为 6.0 mm,为分析防风罩高度对 ABS 成型件力学性能的影响,选取 2.0, 4.0, 6.0 mm 三个高度值进行对比。对不同高度下防风罩内 ABS 成型件的拉伸强度和拉伸弹性模量进行测试,测试结果如图 5 所示。从图 5 可见,随着防风罩高度的增大,ABS 成型件的拉伸强度和拉伸弹性模量增大,力学性能得到显著提升。这一现象主要源于防风罩对挤出头风扇气流的阻挡作用:当防风罩高度增大时,其内部强制对流效应逐渐减弱,使得 ABS 成型件的散热方式由强制对流为主转变为以自然对流为主。由于自然对流的散热效率明显低于强制对流,使防风罩内空气与 ABS 成型件之间的温度梯度减小,热交换速率降低。这种热环境的变化有效减少了材料冷却过程中的热应力,避免

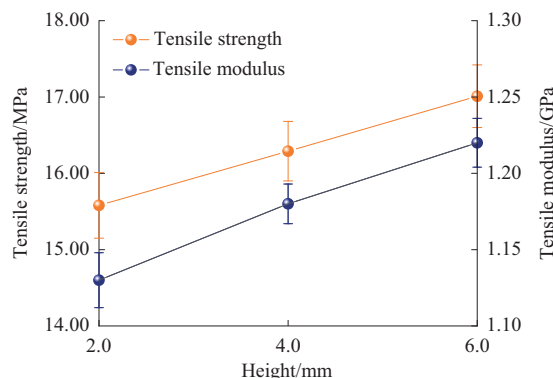


图5 防风罩高度对3D打印ABS成型件力学性能的影响

Fig. 5 Effect of windshield height on mechanical properties of 3D-printed ABS part

了层间开裂等问题。此外,随着防风罩高度的增加,ABS 成型件的整体温度升高。在较高温度环境下,成型件相邻层丝材的分子链运动能力增强,使得接触界面处的分子扩散和相互缠绕作用更加充分,进而改善了层间黏结性能^[16]。因此,ABS 成型件的拉伸强度和拉伸弹性模量增大,力学性能得到提高。

4.2 防风罩间距

设置防风罩高度为 6.0 mm,厚度为 0.8 mm,间距为 2.0, 4.0, 6.0 mm,对不同间距下防风罩内 ABS 成型件的拉伸强度和拉伸弹性模量进行测试,测试结果如图 6 所示。从图 6 可见,随着防风罩间距的减小,ABS 成型件的拉伸强度和拉伸弹性模量增大,力学性能得到显著提升。这是因为随着防风罩间距的减小,防风罩内热床与空气的接触面积减小,削弱了两者间的对流换热效应^[17]。热床产生的热量更多地通过传导方式传递给 ABS 成型件,使得 ABS 成型件的温度升高。温度的提升有利于聚合物分子链的充分扩散和层间黏合,最终表现为 ABS 成型件力学性能的提高。

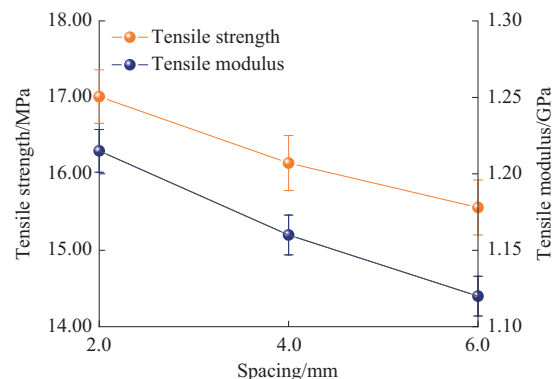


图6 防风罩间距对3D打印ABS成型件力学性能的影响

Fig. 6 Effect of windshield spacing on mechanical properties of 3D-printed ABS part

4.3 防风罩厚度

设置防风罩高度为 6.0 mm,间距为 2.0 mm,厚度为 0.8, 1.2, 1.6 mm,对不同厚度下防风罩内 ABS 成型件的拉伸强度和拉伸弹性模量进行测试,测试结果如图 7 所示。从图 7 可见,随着防风罩厚度的增大,ABS 成型件的拉伸强度和拉伸弹性模量基本保持不变,力学性能几乎不受厚度的影响。这是因为防风罩主要通过阻挡风扇气流来调控成型环境,但其厚度参数对防风罩内气流场与温度场的影响较小,使 ABS 成型件层间分子扩散行为和黏结性能未发生明显改变。因此,防风罩厚度对 ABS 成型件的力学性能几乎不产生影响。

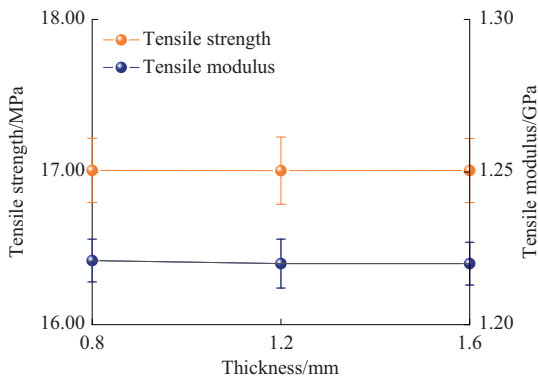


图 7 防风罩厚度对 3D 打印 ABS 成型件力学性能的影响

Fig. 7 Effect of windshield thickness on mechanical properties of 3D-printed ABS part

5 正交试验分析

5.1 正交试验设计

为分析防风罩各参数间的交互作用,优化其参数配置,选取防风罩高度(A)、间距(B)和厚度(C)作为关键因素,基于田口方法开展正交试验。各关键因素均设置了 3 个水平(见表 1),并借助 Minitab 软件构建了 $L_9(3^4)$ 型正交试验表,得到了对应的测试结果,具体见表 2。

表 1 因素水平表

Tab. 1 Factor-level table

Level	Factors		
	Height (A)/mm	Spacing (B)/mm	Thickness (C)/mm
1	2.0	2.0	0.8
2	4.0	4.0	1.2
3	6.0	6.0	1.6

5.2 信噪比分析

应用 Minitab 软件对正交试验数据(见表 2)进行分析,本研究以提高 3D 打印 ABS 成型件的力学性能为目标,故选用望大特性进行分析,其计算公式见式(1)。

表 2 正交试验表

Tab. 2 Orthogonal test table

Number	A	B	C	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Weighted value
1	$A_1(2.0)$	$B_1(2.0)$	$C_1(0.8)$	16.32	1.18	0.96
2	$A_1(2.0)$	$B_2(4.0)$	$C_2(1.2)$	15.43	1.11	0.90
3	$A_1(2.0)$	$B_3(6.0)$	$C_3(1.6)$	15.01	1.08	0.88
4	$A_2(4.0)$	$B_1(2.0)$	$C_2(1.2)$	16.29	1.19	0.96
5	$A_2(4.0)$	$B_2(4.0)$	$C_3(1.6)$	15.33	1.10	0.90
6	$A_2(4.0)$	$B_3(6.0)$	$C_1(0.8)$	15.07	1.09	0.89
7	$A_3(6.0)$	$B_1(2.0)$	$C_3(1.6)$	17.02	1.23	1.00
8	$A_3(6.0)$	$B_2(4.0)$	$C_1(0.8)$	16.11	1.15	0.94
9	$A_3(6.0)$	$B_3(6.0)$	$C_2(1.2)$	15.56	1.12	0.91

$$S/N = -10 \lg \left(\frac{1}{n} \sum \frac{1}{M_i^2} \right) \quad (1)$$

式中: S/N 表示信噪比; n 表示试验次数; M_i 表示力学性能加权值。

对正交试验获得的 9 组拉伸强度与拉伸弹性模量数据,通过线性归一化处理后,以 0.5 的加权系数进行加权求和,得到力学性能加权值 M_i 。将 M_i 输入 Minitab 软件进行田口试验分析,最终得到 ABS 成型件力学性能的信噪比响应表(见表 3)。

表 3 S/N 信噪比响应表

Tab. 3 S/N signal-to-noise ratio response table

Level	Factors		
	A	B	C
1	0.913 3	0.973 3	0.930 0
2	0.916 7	0.913 3	0.923 3
3	0.950 0	0.893 3	0.926 7
S/N	0.036 7	0.080 0	0.006 7
Ranking	2	1	3

由表 4 可知,因素 B (防风罩间距)的 S/N 最大(0.080 0),表明其对 ABS 成型件力学性能的影响最为显著;因素 A (防风罩高度)的 S/N 为 0.036 7,影响次之;而因素 C (防风罩厚度)的 S/N 最小(0.006 7),影响最弱。综上所述,获得最优力学性能的打印参数组合为 $A_3B_1C_1$,即防风罩高度 6.0 mm、间距 2.0 mm、厚度 0.8 mm。

6 对比验证试验

根据正交试验结果,设置防风罩高度为 6.0 mm、间距为 2.0 mm、厚度为 0.8 mm,对 6 组 ABS 成型件(3 组有防风罩和 3 组无防风罩)的拉伸强度和拉伸弹性模量进行测试,测试结果如图 8 所示。从图 8 可见,有防风罩的 ABS 成型件的拉伸强度平均值为 17.15 MPa、拉伸弹性模量平均值为 1.24 GPa;而无防风罩的 ABS 成型件的拉伸强度平均值为

15.52 MPa、拉伸弹性模量平均值为1.12 GPa。有防风罩的ABS成型件的拉伸强度和拉伸弹性模量平均值比无防风罩的ABS成型件对应平均值分别提高了10.50%和10.71%。此外,图8中不同成型件力学性能指标的误差主要源于3D打印过程中工艺参数的波动以及拉伸试验中的测量误差。

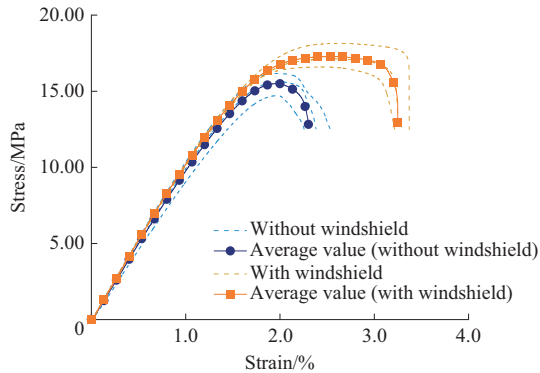


图8 拉伸试验应力-应变曲线

Fig. 8 Stress-strain curve of tensile experiment

对有防风罩和无防风罩结构的ABS成型件进行热力仿真对比分析,结果如图9所示。从图9可见,相同试验条件下,有防风罩的ABS成型件(图9a)稳态温度范围为57.26~62.32 °C,稳态平均温度为59.03 °C;而无防风罩的ABS成型件(图9b)稳态温度范围为45.52~60.71 °C,稳态平均温度为50.46 °C。有防风罩的ABS成型件稳态平均温度比无防风罩的ABS成型件提高了16.98%。热力仿真结果进一步验证了拉伸试验结果,即防风罩可显著提高ABS成型件的稳态温度,进而增强了成型件的

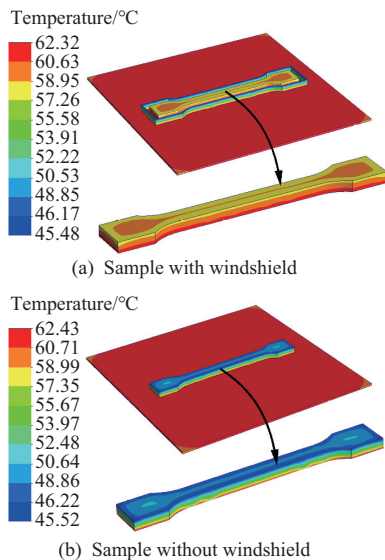


图9 ABS成型件热力仿真对比

Fig. 9 Comparison of thermal simulation of ABS part

层间黏结性能,并最终提升其整体力学性能。

为进一步拓展防风罩的应用范围,选用同样具有高热收缩率的PA6丝材开展验证试验。对3组带防风罩及3组无防风罩的PA6成型件的拉伸强度和拉伸弹性模量进行了测试,具体结果见表4。从表4可知,有防风罩的PA6成型件的拉伸强度平均值为38.16 MPa、拉伸弹性模量平均值为2.87 GPa;而无防风罩的PA6成型件的拉伸强度平均值为33.87 MPa、拉伸弹性模量平均值为2.53 GPa。对比表明,有防风罩的PA6成型件相比无防风罩的PA6成型件在拉伸强度和拉伸弹性模量上分别提高了12.67%和13.44%。该结果验证了防风罩在改善ME-3DP成型件力学性能方面具有良好的普适性,尤其针对如ABS和PA等高热收缩率、低热稳定性的丝材,表现出显著的增强效果。

表4 有无防风罩的PA6成型件力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of PA6 parts with or without windshield

Mechanical properties	With windshield	Without windshield
Tensile strength/MPa	38.16±0.21	33.87±0.26
Tensile modulus/GPa	2.87±0.02	2.53±0.03

7 结论

(1)从热力学优化角度出发,针对如ABS等高热收缩率、低热稳定性丝材,创新性地提出了一种防风罩结构。该结构能有效减弱打印区域内的空气对流速率,从而在其内部形成一个热流密度更高、温度分布更均匀、热环境更稳定的区域。

(2)探究了防风罩结构参数(高度、间距和厚度)对ABS成型件拉伸性能的影响,结果表明,随着防风罩高度的增大和间距的减小,ABS成型件的拉伸强度和拉伸弹性模量增大,力学性能得到显著提升;防风罩厚度对ABS成型件的力学性能几乎不产生影响;在各结构参数中,防风罩间距对成型件力学性能的影响最大,其次为高度,而厚度的影响最小。

(3)对有防风罩和无防风罩模式下ABS成型件的力学性能进行对比,结果表明,有防风罩的ABS成型件的拉伸强度平均值为17.15 MPa、拉伸弹性模量平均值为1.24 GPa,比无防风罩的ABS成型件对应平均值分别提高了10.50%和10.71%。热力仿真结果进一步验证了拉伸试验结果,即防风罩显著提高了ABS成型件的稳态温度(提升率为16.98%),进而增强了成型件的层间黏结性能,并最终提升其

整体力学性能。同时对比了有无防风罩模式下PA6成型件的力学性能,发现与无防风罩的PA6成型件相比,有防风罩时的拉伸强度和拉伸弹性模量分别提高了12.67%和13.44%,证明防风罩在改善ME-3DP成型件力学性能方面具有良好的普适性。

参考文献

- [1] 李华雄,王晖,刘璇.响应面法优化PLA材料3D打印试件力学性能[J].塑料科技,2024,52(10):130-135.
LI Huaxiong, WANG Hui, LIU Xuan. Response surface methodology to optimize mechanical properties of 3D printed specimens made of PLA materials[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(10):130-135.
- [2] 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):104-109,116.
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, 116.
- [3] 余兆函,周子康,王云明.聚合物管载胶熔融沉积3D打印增强层间结合强度[J].精密成形工程,2021,13(2):87-90.
YU Zhaohan, ZHOU Zikang, WANG Yunming. Fuse deposition 3D printing using glue within polymer tube to enhance interlayer bonding strength[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2021, 13(2):87-90.
- [4] 唐鹿,薛飞,李旺.熔融沉积成型3D打印ABS材料的改性与应用研究[J].化工新型材料,2017,45(12):13-15,20.
TANG Lu, XUE Fei, LI Wang. Study on the modification and application of fused deposition molding 3D printing ABS material[J]. *New Chemical Materials*, 2017, 45(12):13-15, 20.
- [5] 白鹤,赵明侠,王核心,等.FDM 3D打印翘曲变形成因分析及解决对策[J].塑料工业,2019,47(1):60-63,68.
BAI He, ZHAO Mingxia, WANG Hexin, et al. Analysis and countermeasures of warpage deformation in FDM 3D printing process[J]. *China Plastics Industry*, 2019, 47(1):60-63, 68.
- [6] 喻红,杨孟茹,吴悠,等.3D打印参数对制品层间黏结性能的影响[J].中国塑料,2018,32(6):92-97.
YU Hong, YANG Mengru, WU You, et al. Effect of 3D printing parameters on interlayer adhesive properties of printed parts[J]. *China Plastics*, 2018, 32(6):92-97.
- [7] 杨露,孟家光,薛涛.3D打印工艺参数对PLA试件拉伸强度的影响[J].塑料工业,2021,49(5):73-77,142.
YANG Lu, MENG Jiaguang, XUE Tao. Effect of 3D printing parameters on tensile properties of PLA[J]. *China Plastics Industry*, 2021, 49(5):73-77, 142.
- [8] 林晓健,夏英,高媛美,等.适用于3D打印技术的ABS/SEBS复合材料制备[J].工程塑料应用,2021,49(5):39-43.
LIN Xiaojian, XIA Ying, GAO Yuanmei, et al. Preparation of ABS/SEBS composite materials suitable for 3D printing technology[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(5):39-43.
- [9] WANG Yanqing, LIU Zengguang, GU Huwei, et al. Improved mechanical properties of 3D-printed SiC/PLA composite parts by microwave heating[J]. *Journal of Materials Research*, 2019, 34(20): 3 412-3 419.
- [10] 王林.填充路径对FDM制造ABS力学性能的影响[J].塑料,2022,51(5):108-113.
WANG Lin. Effect of raster angle on the mechanical properties of FDM fabricated ABS[J]. *Plastics*, 2022, 51(5):108-113.
- [11] 徐子又,胡镔,邢泽华,等.层间预熔温度对熔融沉积成型打印件力学性能的影响[J].塑料科技,2019,47(5):37-43.
XU Ziyu, HU Bin, XING Zehua, et al. Effect of interlayer premelting temperature on mechanical properties of fused deposition molded printed parts[J]. *Plastics Science and Technology*, 2019, 47(5):37-43.
- [12] LI Shixian, CORREIA J P M, WANG Kui, et al. Analysis of thermal behavior in 3D printing of continuous fiber reinforced polymer composites[J]. *Materials Research Proceedings*, 2024, 41: 2 573-2 583.
- [13] 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]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(6): 82-86, 98.
- [14] 朱小明,章盼梅,江丽珍,等.聚合物3D打印工艺及打印材料的研究进展[J].合成树脂及塑料,2023,40(4):65-71.
ZHU Xiaoming, ZHANG Panmei, JIANG Lizhen, et al. Research progress of polymer 3D printing process and materials[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2023, 40(4):65-71.
- [15] 吕冰倩,陆佳琪,刘威,等.石墨烯/ABS 3D打印复合材料的制备与性能研究[J].化工新型材料,2023,51(1):254-258,263.
LV Bingqian, LU Jiaqi, LIU Wei, et al. Preparation of graphene/ABS 3D printing composite materials and its performance[J]. *New Chemical Materials*, 2023, 51(1):254-258, 263.
- [16] 董其缘,尤晓萍,于仙,等.重熔工艺对PLA 3D打印制件力学性能及表面质量的影响[J].合成树脂及塑料,2023,40(6):43-47.
DONG Qiyuan, YOU Xiaoping, YU Xian, et al. Effect of remelting process on mechanical properties and surface quality of PLA 3D printing parts[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2023, 40(6):43-47.
- [17] ZHANG Run, YU Liguang, CHEN Ke, et al. Amelioration of interfacial properties for CGF/PA6 composites fabricated by ultrasound-assisted FDM 3D printing[J]. *Composites Communications*, 2023, 39. DOI:10.1016/j.coco.2023.101551.