

外力压缩下 FDM 构件失效分析

王铎, 沈振辉, 杨拴强

(福建江夏学院 工程学院工业技术研究所, 福建 福州 350108)

摘要: 为探究 FDM 零件压缩作用下连续变形失效的机理, 对 125 种不同构型的零件压缩实验比较力学性能。基于正交实验设计理论, 通过多因素组合分析确定零件连续变形失效原因。正交实验结果表明, 抗压缩强度影响从大到小排序为层片厚度、材料种类、填充率、打印质量。采用仿真手段模拟了压缩变形后微观失效的变化规律。结果表明, 材料进入塑性阶段必须考虑损伤形成的影响, 塑性阶段后促进损伤扩展, 应防止构件出现塑性过程导致局部失效破坏, 验证了模拟方法的合理性。

关键词: FDM; 压缩实验; 构件; 失效分析

中图分类号: TQ323

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2021)01-0032-05

Failure analysis of FDM components under external compression

WANG Duo, SHEN Zhenhui, YANG Shuanqiang

(Institute of Industrial Technology, College of Engineering, Fujian Jiangxia University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: In order to explore the mechanism of continuous deformation failure of FDM parts under compression, the mechanical properties of 125 parts with different configurations were compared. Based on the theory of orthogonal experimental design, the causes of continuous deformation failure of parts were determined by the combination analysis of various factors. Results of the orthogonal experiment show that the thickness of laminate is the most important factor affecting the compressive strength, followed by the type of material, and then the filling rate, and finally the printing quality. The change law of micro failure after compression deformation was simulated. Simulation results show that the impact of damage formation must be considered when the material enters the plastic stage, and the damage expansion can be promoted after the plastic stage. The plastic process of the component should be avoided, which would lead to local failure. The rationality of the simulation method was verified.

Keywords: FDM; compression test; compoment; failure analysis

近年来,随着国内重大工程领域对增材制造产品需求的日益增大,对其机械性能提出了更高的要求。如何确定最佳工艺参数设置,以获得 FDM 零件所需的机械强度问题已经成为现阶段国内外学者的研究热点。刘晓军,迟百宏^[1]等研究了不同打印参数对堆叠后单丝宽度的影响。Dawoud M, Taha I^[2]等研究了光栅角度和气隙对 FDM 零件机械强度的影响。Espin^[3]等人研究了

零件取向对 FDM 技术制备聚碳酸酯零件拉伸强度的影响,并用有限元法对结果进行了验证。Huang B, Singamneni S^[4]等研究光栅角度对 FDM 零件拉伸强度、剪切模量、弹性模量和泊松比的影响。本文采用多变量法研究,在物理实验与正交实验设计的同时,结合有限元研究不同影响因素和不同水平对 FDM 制件力学性能的影响,探讨各工艺因素对零件抗压性能的影响,通过有限元分

收稿日期: 2020-12-23

基金项目: 福建江夏学院科研人才培养项目(JXZ2019014);福建省中青年教育科研项目(JAT190464)

第一作者简介: 王铎(1978—),男,吉林长春人,讲师,硕士,研究方向:工业工程及工程材料。

析 FDM 制件连续压缩失效的力学问题,对提高 FDM 制件抗压力学性能具有理论意义和工程应用价值,并采用同步物理试验验证 ABAQUS 有限元分析的合理性与有效性。

1 实验和方法

1.1 打印/测试设备

加工设备为“UP-BOX+”3D 打印机;FDM 压缩试验设备为 WDW-50 电子万能实验机。

1.2 实验样本抽样验证

实验确定研究的 4 个因素,分别为层片厚度(0.1、0.15、0.2、0.25、0.3 mm)、填充率(13%、15%、20%、65%、80%、99%)、质量(默认、较好、较快、极快)和材料(ABS、ABS+、PLA)。如果采用全面设计法分析,4 种因素组合需要进行 360 组实验,不利于研究。本实验采用正交试验设计方法,从大量的实验因素中筛选出具有代表性的因素进行实验,数据采集为均匀分布式,得到 25 组样本数据,在节省时间的同时保证实验准确性。

1.3 参数设定与实验

将 4 种因素命名并制定正交设计表,如表 1 所示。表 1 列出 25 组数据和最大压缩强度平均值。为确保实验准确性,减少误差,每组数据打印 5 个试样,共 125 个试样,如图 1(a)所示。实验按照 GB/T11997-2008 标准,压缩试验后样品如图 1(b)、图 1(c)所示。

表 1 正交设计表

Tab.1 Orthogonal design table

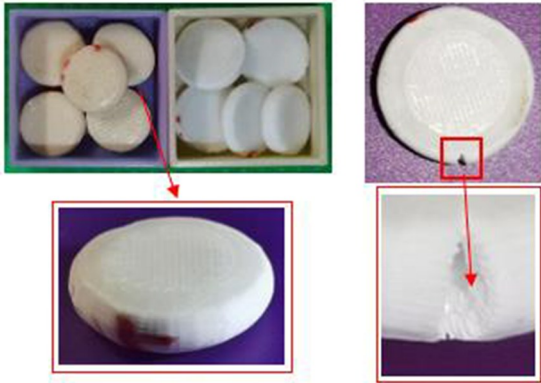
序号	层片厚度/ mm	填充率/ %	质量	材料	最大压缩强度 平均值/MPa
1	0.15	20	极快	ABS+	47.40
2	0.30	15	较好	ABS+	54.80
3	0.25	15	较快	PLA	54.60
4	0.10	20	默认	PLA	64.00
5	0.20	15	极快	ABS	52.60
6	0.15	65	较快	ABS	71.60
7	0.25	20	较好	PLA	62.60
8	0.30	20	默认	ABS	41.40
9	0.30	80	极快	PLA	77.80
10	0.25	80	默认	ABS	61.20
11	0.20	80	默认	PLA	76.40

续表 1

序号	层片厚度/ mm	填充率/ %	质量	材料	最大压缩强度 平均值/MPa
12	0.15	80	较好	ABS	92.00
13	0.15	15	默认	PLA	76.20
14	0.25	65	默认	ABS+	42.20
15	0.10	65	极快	PLA	60.40
16	0.10	15	默认	ABS	18.20
17	0.20	20	较快	ABS	72.60
18	0.30	99	较快	PLA	95.80
19	0.10	80	较快	ABS+	45.00
20	0.20	99	默认	ABS+	105.80
21	0.15	99	默认	PLA	96.80
22	0.25	99	极快	ABS	94.40
23	0.30	65	默认	ABS	37.00
24	0.10	99	较好	ABS	101.80
25	0.20	65	较好	PLA	73.60



(a) 25组125个试样



(b) 试验后FDM压缩零件 (c) 试样4压缩断裂

图 1 压缩实验零件

Fig.1 Compression test parts

2 有限元动态显示分析

2.1 建模

采用 ABAQUS 有限元软件包针对 FDM 样品进行仿真。使用 Creo3.0 CAD 建模,样品设计为多因素组合材料,并将创建的模型以 STEP 文件格式导入 ABAQUS。压缩试样尺寸满足 GB/T

11997-2008。 $d = 10\text{ mm}$, $d:h = 1:1$,尺寸和光栅布置如图 2 所示。由于重力和材料粘性等因素影响,实际沉积横截面呈现层内缩颈的椭圆截面。利用光学显微镜测量尺寸、光栅横截面和颈缩区,并用于生成更真实的 FDM 测试零件几何模型。其中 a 、 d 和 h 表示缩颈区长度、丝宽度和丝高度,如图 3 所示。

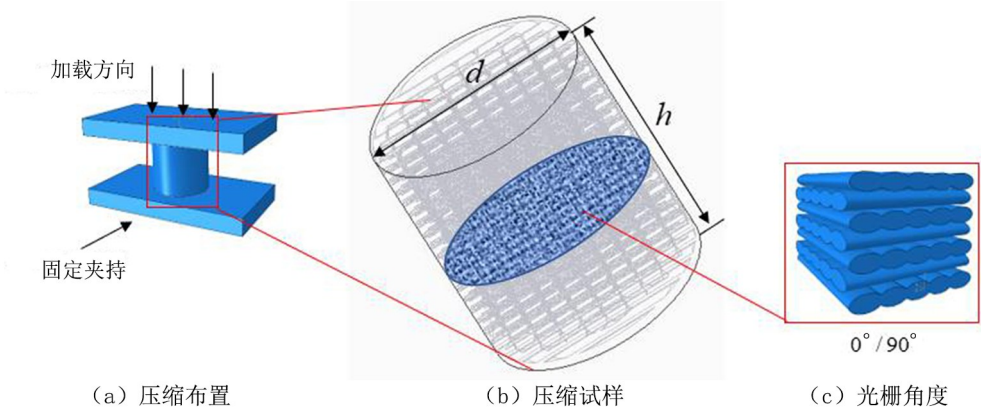


图 2 尺寸和光栅布置
Fig.2 Size and grating arrangement

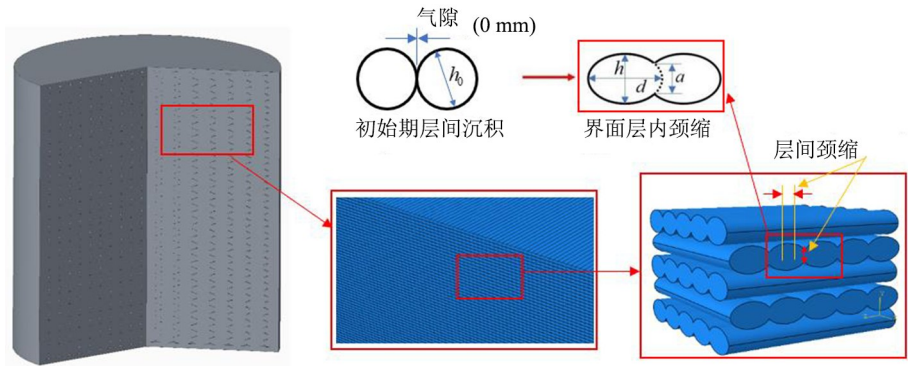


图 3 相邻光栅层间缩颈
Fig.3 Interlaminar necking of adjacent gratings

利用文献[5]中固体 ABS 样品的应力应变数据,分析其他材料的特性,对单轴压缩载荷下的弹性变形进行有限元模拟。采用 ABAQUS/Explicit 分析,材料杨氏模量 2.2 GPa ,泊松比 0.35 ,密度 $1.04\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,质量缩放因素取 $10\ 000$ 。在显式分析中,为防止出现结果偏离实际值和存在连续稳定性问题^[6]。模型采用连续三维 10 节点二次四面体单元 C3D10 进行网格化,提高计算精度。模拟单轴压缩试验时,模型一端固定,另一端施加荷载/位移。模型固定端的边界条件为 $U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ 。另一端

施加沿纵轴的位移/转角条件,即 $U_1 = U_2 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0, U_3 = 6$ 。

2.2 有限元验证分析

实验压缩试件最大强度值如表 1 所示,第 20 组样品的最大压缩强度值为 105.8 MPa ,第 16 组样品的最大压缩强度值为 18.2 MPa 。对模拟实验进行分析,沿特定方向连接节点创建路径提取结果,5 种不同层厚 $0^\circ/90^\circ$ 光栅角样品中产生的峰值应力约为 104.1 MPa 。实验压缩和模拟分析中试件变形情况一致,压缩超过弹性阶段后都出现扁鼓形状。观察到 0.2 mm 样品 (105.8 MPa) 的

峰值压力较高,该峰值压力先随着层厚的增加而减小(层厚 0.3 mm 为 37 MPa),然后增大(层厚 0.3 mm 为 77.8 MPa)。然而,压缩区域及其周围的平均应力为 57.4 MPa。此行为表明,加载方向上细层数较少,压缩过程中变形明显。对于厚度为 0.1mm 的试件,加载方向上的细层数量更多,载荷由每一层承担,无明显的压缩变形量,因此更接近于固态金属。

图 4 显示了不同层厚的试样沿试样长度的应力变化。应力变化是沿着连接节点的试样顶部、中间和底部表面上的 1、2 两条路径捕捉。对于分层厚度为 0.1、0.15 或 0.2 mm 的样品,最大应力和

扁鼓现象如图 4(a) 所示。20 组-3 和 21 组-4 样品,应力值始终保持上升,最大应力出现在试样压缩过程后部阶段。16 组-2 和 17 组-1,观察到最大应力幅度降低,16 组-2 试样的应力先增加后降低是由于填充区域的减少,以及相邻光栅之间在较低层厚下的粘合强度小。此外,随着填充率的降低,制备试样所需的材料减少,进一步增加了填隙处形成的气孔数量,从而降低了试样的承载能力。这种气孔是裂纹在试样中萌生和扩展的主要来源,因此,需要减少气孔。17 组-1 样品的屈服开始时间晚于 16 组-2 样品的屈服开始时间,这与 17 组-1 的填充比率较大有关,如图 4(b) 所示。

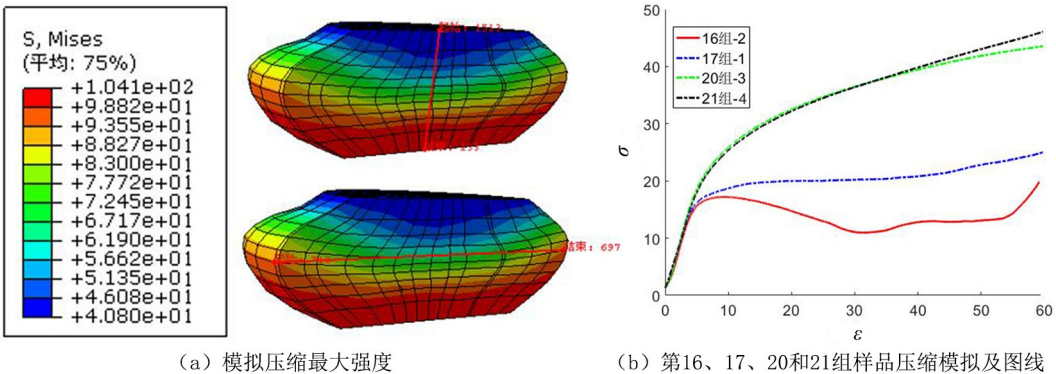


图 4 模拟压缩最大压强和样品压缩曲线

Fig.4 Simulated maximum compression pressure and sample compression curve

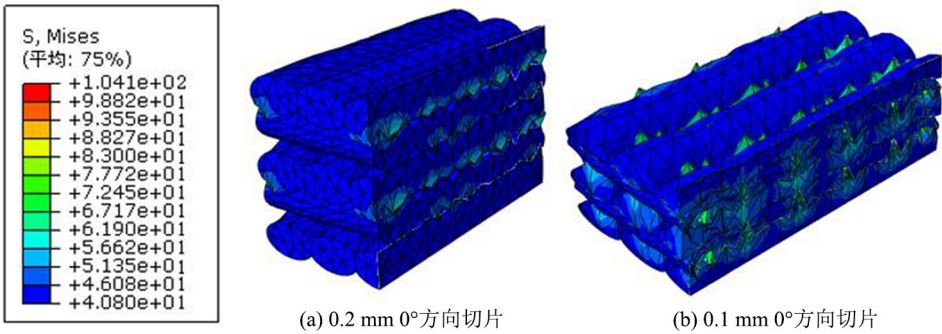


图 5 层高 0.1 和 0.2 mm 样品压缩模拟切片对比图

Fig.5 Comparison of simulated slices of samples with the layer height of 0.1 and 0.2 mm

在 0°/90°光栅中,显示 0°光栅角和 90°光栅角层的不同行为。整体应力产生在 0°和 90°光栅样品之间,因为 90°光栅层粘结过早分离,导致 0°光栅层的早期失效。由于相邻层间重叠区域的增加,样品承载能力随着层厚的增加而减弱。从图 5 中也可以注意到,0.1 mm 层厚试样中的平均应力变化与固体试样的变化相同,唯一不同的是在两个试样上观察到的固体试样膨胀变形程度。因

此,应力变化和分布表明,在失效过程中,90°光栅层内结合区紧密结合,但 0°光栅被压缩并经历扩散膨胀,变形从这些区域开始,在产生压缩畸变的短暂时间后,单个小光栅产生剧烈变形,由于 ABS 材料的塑性区域较低,应变硬化能够补偿横截面积的增加。对于 90°光栅,观察到不同层厚的所有样品行为几乎相似。屈服区后,发现 0.3 mm 层厚的 0°光栅单元应力快速下降,表明在该光栅处

开始出现破坏。但是,由于层内粘合更厚,0.25 mm 层厚样品有相同情况延迟。观察到所有试样的变形和随后导致失效的畸变均匀性损失,0.1 与 0.3 mm 层厚试样的失效时间相比更晚,最终 0°光栅引线发生脆性失效。

2.3 压缩试验数据对比

图 6 中第 16 组和第 17 组样品应力-应变曲线

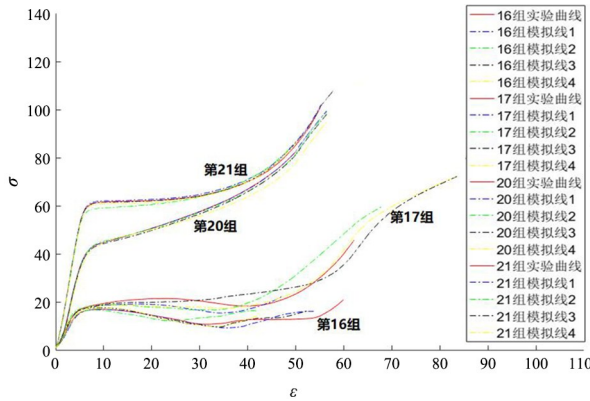


图 6 第 16、17、20 和 21 组压缩实验与模拟实验曲线对比
Fig.6 Comparison of compression experiments and simulation experiment curves in groups 16, 17, 20 and 21

有明显的直线等比例阶段,曲线进一步上升出现屈服阶段;由于试样内部存在空隙,屈服阶段后压缩仅需较小的外力就产生较大形变,材料向内部塌缩引起曲线明显下行;当内部材料压缩密实后产生较大形变需要进一步提高外力,所以强度曲线出现上升阶段,直至材料出现破坏。图 6 中第 20 组和第 21 组样品应力-应变曲线有明显的直线等比例阶段,曲线进一步上升出现屈服阶段;试样层片厚度分别为 0.2 和 0.15 mm,填充率 99%,

打印质量默认,试样内部空隙很少,屈服阶段后压缩材料内部已经密实,当试样出现较大变形时需要增大外力,所以强度曲线出现上升阶段,直至材料出现破坏。沿加载方向对齐的层数相对更多。因此,在压缩试验过程中压缩载荷下抗畸变能力更强。随着层厚的增加,屈服位移和破坏应变也减弱。随着层数的增加,由于相邻层之间重叠区域的增加,层与层之间的结合更加紧密,试样抵抗能力增强,需要更大外力导致试样失效,从而提高 FDM 零件机械强度的目标。

3 结论

1)采用正交实验分析 FMD 零件加工的 4 种参数,抗压缩强度影响最大的是层片厚度,其次是材料种类,第三是填充率,最后是打印质量。层片厚度方面,抗压缩性能从优到差依次排序为:0.1、0.15、0.25、0.3、0.2;材料方面,抗压缩性能从优到差排列为:ABS+、PLA、ABS;填充率方面,抗压缩性能从优到差排列为:99%、15%、80%、65%、20%;打印质量方面,抗压缩性能从优到差排列为:默认、较快、极快、较好。

2)有限元分析表明,0°光栅中存在压缩畸变现象,畸变应变和膨胀率随着层厚的增加而增加,而压缩应力先随着层厚的增加而减小,然后增加。加载方向上的层数越多,尤其是当层厚较小时,有助于承载和产生更多的应力;而层厚越大,层内结合区域的数量减小,从而降低压缩强度,失效首先发生在层内分离。光栅的压缩和畸变以及层间(在 0°~ 90°光栅之间)键分离。失效分析表明,光栅层在脆性断裂下失效,个别层出现压缩断裂。

参考文献:

[1] 刘晓军,迟百宏,焦志伟,等. FDM 大型 3D 打印机的制作与工艺分析[J]. 机械设计与制造, 2018(11): 212-215.
[2] DAWOUD M, TAHA I, EBEID S. Mechanical behaviour of ABS: an experimental study using FDM and injection moulding techniques[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2016, 21: 39-45.
[3] DOMINGO-ESPIN M, PUIGORIOL-FORCADA J, GARCIA-GRANADA A, et al. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts[J]. Materials & Design, 2015, 83: 670-677.
[4] HUANG B, SINGAMNENI S. Raster angle mechanics in fused deposition modelling[J]. Journal of Composite Materials, 2015, 49(3): 363-383.
[5] LEE W, SHEN H. Comparisons of deformation and fracture behaviour of PC/ABS blend and ABS copolymer under dynamic shear loading[J]. Materials Science and Technology, 2004; 20(1): 8-15.
[6] 丁源. ABAQUS 2018 有限元分析从入门到精通[M]. 北京:清华大学出版社, 2019.

(责任编辑:陈雯)