http://pmse.scu.edu.cn

基于拓扑优化的3D打印聚乳酸材料的轻量化结构设计

李 倩，顾佳晨，唐海原，乔海玉，王传洋
（苏州大学 机电工程学院，江苏 苏州 215000）

摘要：轻量化结构设计可以在保持性能的同时降低产品质量，对汽车高铁、航空航天等行业实现节能减排具有重要意义。聚乳酸具有可降解、易打印、良好的力学性能等优点，在3D打印领域得到广泛应用。本文中以可降解材料聚乳酸为研究对象，以拓扑优化作为轻量化结构设计的方法，采用熔融沉积3D打印技术，探究拓扑优化过程中参数（体积分数和惩罚因子）对工件在弯曲载荷下总变形的影响。对不同填充率下拓扑优化前后的工件质量进行对比，并探究了拓扑优化后不同熔融沉积3D打印速度下工件的弯曲性能。结果表明，当体积分数取40%、惩罚因子取3时，拓扑优化后模型最大变形量满足优化目标；3D打印的拓扑优化工件可以实现50%的减重且保持较高的弯曲力，但弯曲模量和变形量略有下降；降低打印速度对拓扑优化后工件的力学性能影响不大。

关键词：轻量化结构设计；拓扑优化；3D打印；聚乳酸
中图分类号：TQ320.66 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-7555（2024）07-0076-09

轻量化结构设计是一种在满足结构件预定使用性能的前提下，通过调整结构的形状和布局来减轻结构质量的优化设计方法。该方法不仅可以降低材料成本、减少制造资源的消耗，而且还可以减少生产时间、提高生产效率，因此广泛应用于航空航天[1]、汽车[2]、建筑[3]、医疗[4]等行业。如汽车每减重100 kg, 二氧化碳排放量可减少约5 g/km[5]。因此，如何制造出优化后的结构件并使其满足性能要求是轻量化结构设计在实际应用中的一大挑战。

3D打印又称增材制造技术，是一种通过逐层堆积材料的方式制造三维物体的快速成型技术，具有成型形状复杂零件的优势。因此，3D打印与轻量化结构设计领域的结合被广泛研究。通常，国内外学者通过结构优化得到优化后的产品形状，经处理后采用3D打印技术进行制造。其研究内容主要包括如何进行优化以及如何成型。结构优化目前主要的方法包括拓扑优化、形状优化、尺寸优化[6]。其中，拓扑优化是较为常用的优化方法，其核心思想是通过合理调整结构的布局，例如去除不必要的材料，来满足结构的设计要求，从而最大限度的提高零件的性能。例如，王天立等[7]对曲线纤维铺放复合材料层合板进行拓扑优化，构建了层合板单层曲线纤维铺放路径模型，实验验证发现，改变曲线纤维铺放路径可使悬臂梁和简支梁结构的刚度分别提高36.9%和22.6%，性能得到明显改善。丁华峰等[8]使用拓扑优化方法对汽车悬架下节叉进行结构优化，基于ANSYS软件进行求解计算，结果表明，优化后的下节叉在结构性能满足设计要求的前提下，质量减轻了14.58%。与此同时，不少学者研究了3D打印过程中材料、结构和工艺的组合对拓扑优化的影响。岳怀俊等[9]建立股骨-假体系统模型对假体柄进行结构优化，并采用钛合金进行3D打印，结果得到近端开孔的假体构型，进行静力和疲劳寿命分析，发现假体刚度降低、应力遮挡减小，开孔后远端最大应力降

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2024.0141
收稿日期：2023-08-28
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52075354）；中国博士后面上项目（2023M730350）；江苏省高等学校自然科学研究项目（23KJB460028）
通讯联系人：王传洋，主要从事先进制造技术理论及装备设计、高分子材料加工方法及关键技术等研究，E-mail: cywang@suda.edu.cn；
乔海玉，主要从事可降解高分子材料及其复合材料加工以及质量监测等研究, E-mail: hyqiao@suda.edu.cn

低，有利于假体疲劳性能的提高。郭西园等[10]基于有限元的拓扑优化方法对减速箱体进行优化设计，采用不锈钢对优化后的减速箱进行3D打印，结果表明，优化后减速箱体积减少21%，且最大等效应力降低10 MPa的同时受力更均匀。Vantyghem等[11]将拓扑设计与3D混凝土打印相结合，使用数字图像相关技术对打印的主梁的结构性能进行验证，对比相同总挠度的传统T形截面主梁，在节省20%材料的情况下实现了后张拉索的最佳形状。

聚乳酸作为一种生物可降解塑料，具有良好的力学性能、低收缩率、易打印、环保等特点，是目前3D打印应用最广泛的材料之一。本文以简支梁为研究对象，以聚乳酸为实验材料，采用理论和实验验证的方式研究轻量化结构优化技术在可降解材料上的应用。具体地，应用有限元拓扑优化的结构优化方法，探究拓扑优化中体积分数、惩罚因子对结构件轻量化结构的影响；其次，采用3D打印熔融沉积技术，优化打印速度及打印填充率等打印参数，探究不同减重和打印参数下结构件的性能变化。

1　实验部分

1.1　原料与仪器

聚乳酸：密度1.25 g/cm^3，熔体流动速度5~7 g/min，线径公差为(1.75±0.02) mm，深圳市大昆三维科技有限公司。

3D打印机：Anycubic i3 Mege（切片软件为UltiMaker Cura 5.3.0），深圳市纵维立方科技有限公司；电子万能试验机：TY8000-A，江苏天源试验设备有限公司；电子分析天平：JA3003型，常州市衡正电子仪器有限公司。

1.2　工件弯曲状态下的受力分析及结构优化

1.2.1　工件弯曲状态下的受力分析：根据国标GB 9341-2008，进行三点弯曲试验，工件的受力情况如Fig.1所示，其试件尺寸（长×宽×高）为60 mm×12 mm×12 mm。为方便后续的力学实验，本文选用48 mm的跨距。基于此，为满足最大变形量不超过1.050 mm以及减轻材料50%以上质量的要求，需对其结构进行优化。拓扑优化过程中为确立工件的受力情况需对工件所受载荷进行分析以便进行优化设计，因此利用静力学的原理对工件进行受力分析。在弯曲应力作用下，杆件顶部受拉，底部受压，产生横向应力。剪切应力产生在杆件中心处，其大小和方向垂直于杆件纵轴。所以在中部位置，模型的形变最大。

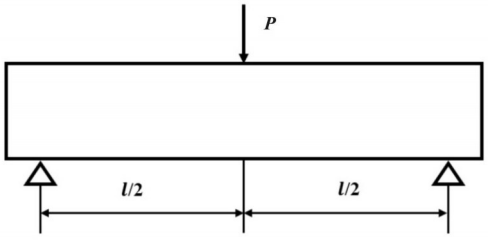


Fig. 1 Schematic diagram of the three-point bending experiment

1.2.2　工件的结构优化理论：在拓扑优化中，目标通常是刚度最大化（即柔度最小化），将其转化为力学问题则等价于最小化弹性能。所以用矩阵表示的弹性能作为目标函数。为简化难度，在数学上引入连续变化的设计变量（即密度），其值可以从0连续变化到1。将整数变量松弛为连续变量后，可以利用梯度基求解器来解决这个问题。以下是描述拓扑优化过程的方程：

Minimize:

$$C = \frac{1}{2} U^{\mathrm{T}} K U \tag{1}$$

Subject to:

$$F = KU \tag{2}$$

$$\rho_{\mathrm{i}} \in [0,1], \forall_{\mathrm{i}} \tag{3}$$

$$g = \sum i\rho_{\mathrm{i}} \leqslant V_0 \tag{4}$$

第1个方程表示的是目标函数，目标函数为弹性能C；U——每个顶点的位移矩阵；K——根据密度分布计算出来的材料刚度矩阵。第2个是静态结构方程。第3个方程是设计变量，根据引入的连续密度，保证材料密度值在0~1之间。第4个方程则代表优化后对结构体积的约束。

1.2.3　工件的拓扑优化过程：ANSYS中的拓扑优化是一种结构优化方法，工件进行拓扑优化的步骤如Fig.2所示，拓扑优化的目标是通过最小化质量来实现设计要求，并在不影响零件功能的情况下确保工件具有足够的刚度和强度。

首先使用ANSYS WORKBENCH软件建立工件的三维模型并添加PLA材料参数（Tab.1）。选择单

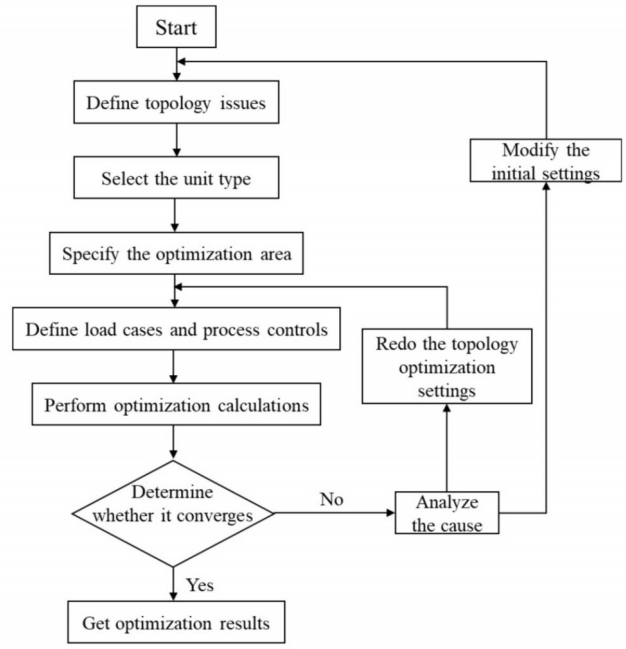


Fig. 2 Topology optimization flowchart in ANSYS



Fig. 3 Model settings: (a) meshing; (b) apply a load; (c) set up fixed supports

Tab. 1 Parameters of PLA

Density/(g·cm^3)	Coefficient of thermal expansion/°C^{-1}	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio	Tensile yield strength /MPa
1.25	75×10^{-6}	3.5	0.45	50

元尺寸为1 mm的网格对模型进行网格划分(结果如Fig.3(a)所示)。顶部施加载荷和底部设置固定支撑分别如Fig.3(b, c)所示。最后对模型的总变形进行求解。

其次将拓扑优化模块添加到静态结构模块中的求解单元，并进行相应参数调整。设定优化区域为整个几何体，排除受力区域与固定支撑区域。选择Compliance（柔度）作为设计目标即目标函数。通过最小化柔度，实现结构的轻量化。对于拓扑优化3个关键参数进行选择，即选择体积分数为0.4（保留40%的质量），惩罚因子为3，过滤半径由程序自行控制。其他参数如Tab.2所示。

Tab. 2 Topology optimization parameters

Parameters	Values
Maximum number of iterations	500
Minimum normalized density	0.001
Convergence accuracy	0.1%

参数设置完成后进行求解，多次迭代计算后结果收敛，其目标响应收敛图如Fig.4所示。由图可见，在第17次迭代后，目标响应达到组合目标收敛标

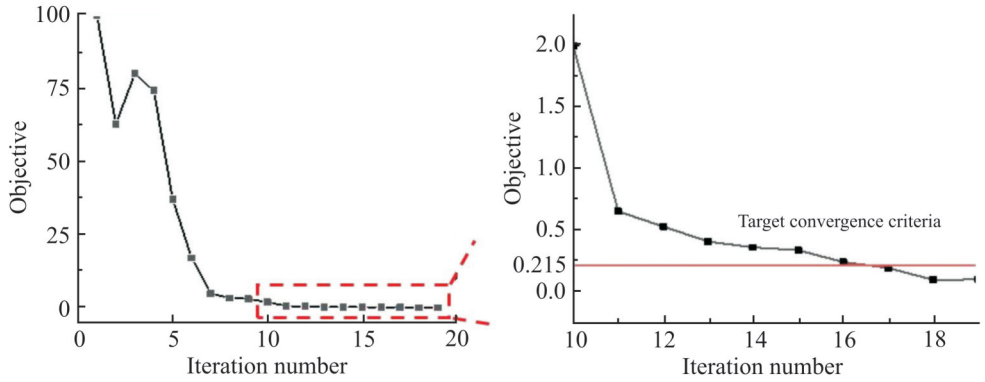


Fig. 4 (a) Target response convergence and (b) enlargement graph

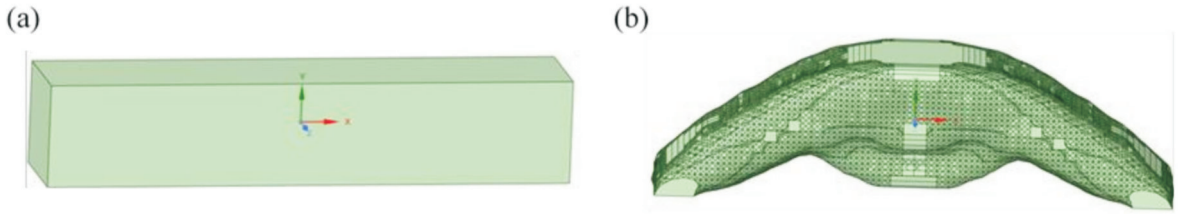


Fig. 5 Comparison before and after model optimization: (a) before; (b) after

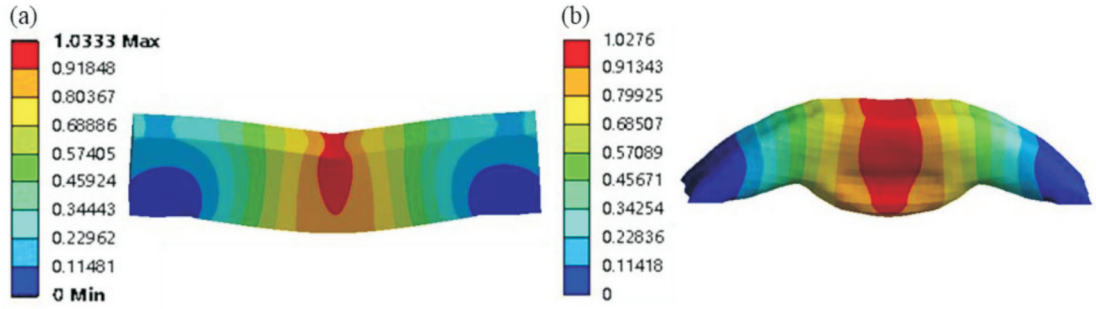


Fig. 6 Total deformation before and after model optimization: (a) before; (b) after

Tab. 3 Simulate part of the scheme design

Parameters	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Volume fraction	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.30	0.35	0.45	0.50
Penalty factor	1	2	3	4	5	3	3	3	3

准。最终优化后的模型如Fig.5(b)所示。

在ANSYS WORKBENCH中对结果和几何数据模块进行更新。去除原本的工件模型，获得优化完成的模型，再次对其设定相同的力与固定支撑，求解优化完成的模型的总变形，结果如Fig.6(b)所示。可知，拓扑优化后的结构在保留原模型40%质量的同时，最大总变形由1.033 mm减小至1.028 mm，符合最大总变形小于1.050 mm的要求。

1.3 实验与表征

1.3.1 实验设计：本文通过选择不同的结构优化方案和3D打印参数探究结构优化后产品的性能，以拓扑优化前后工件的质量、弯曲性能为标准进行评估。其中，结构优化方案选择体积分数和惩罚因子为变量，方案设计如Tab.3所示。3D打印参数选择

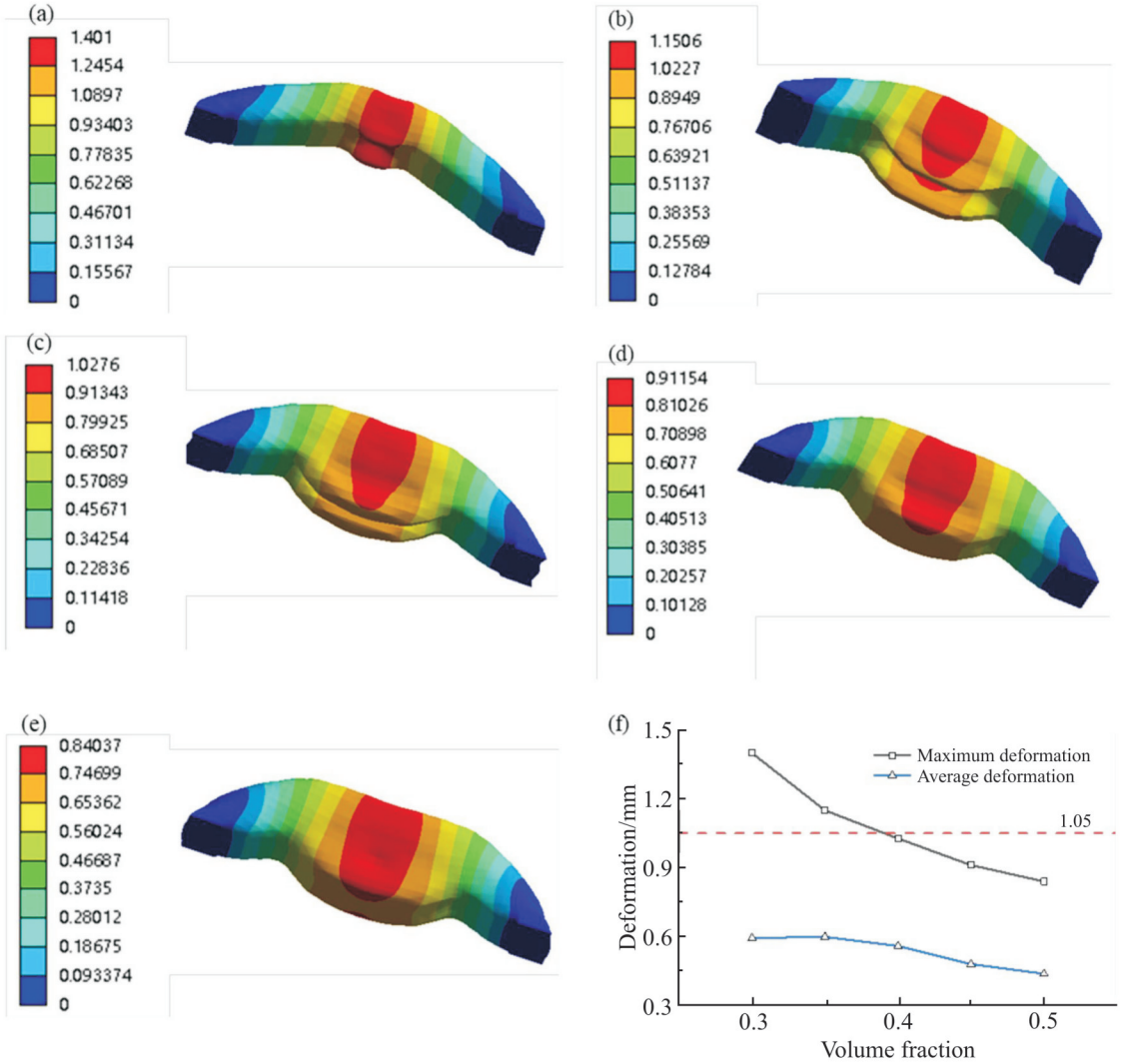


Fig. 7 Changes of model and total deformation after optimization of different volume fractions: (a) *V*= 0.30; (b) *V*= 0.35; (c) *V*= 0.40; (d) *V*=0.45; (e) *V*=0.50; (f) total deformation

填充率和打印速度为变量。对于填充率，设置3组对比实验，在填充率100%的前提下将是否进行拓扑优化作为对比打印A，C组工件，同时打印填充率为50%且未进行拓扑优化的工件作为直接减重的对照组，此时打印速度固定为50 mm/s。对于打印速度，分别选取30 mm/s，50 mm/s和70 mm/s打印工件进行实验。3D打印过程设置打印温度为190~230 ℃，打印热床温度为0~60 ℃。

1.3.2 测试与表征

（1）弯曲性能测试：对3D打印制备的工件进行三点弯曲测试，跨度选择48 mm，设定预紧速度为3 mm/min，力的变化速度为3 N/s。

（2）质量检测：采用电子天平对3D打印的拓扑优化前后的工件质量进行称量。

2 结果与讨论

2.1 仿真实验结果分析

2.1.1 体积分数对总变形的影响：拓扑优化中的体积分数（*V*）指固体材料的体积占整个设计域的比例，其影响模型的形状和性能等。对材料的体积分数进行调整，可以使结构在满足强度和刚度等要求的前提下尽量减小结构的质量和体积，实现轻量化结构优化的目标。Fig.7(a~e)是保留不同体积分数下的优化结果。需要说明的是，此时仿真方案中惩罚因子固定为3。改变体积分数取值为0.3~0.50。可以看出，(1) 随着体积分数的增大，模型的总变形不断减小。图中中心红色区域即最大变形区域增大，逐渐从上至下延伸至底部，但最大总变形区域数值逐渐减小，由1.401 mm逐渐减小到0.840 mm。(2) 随着

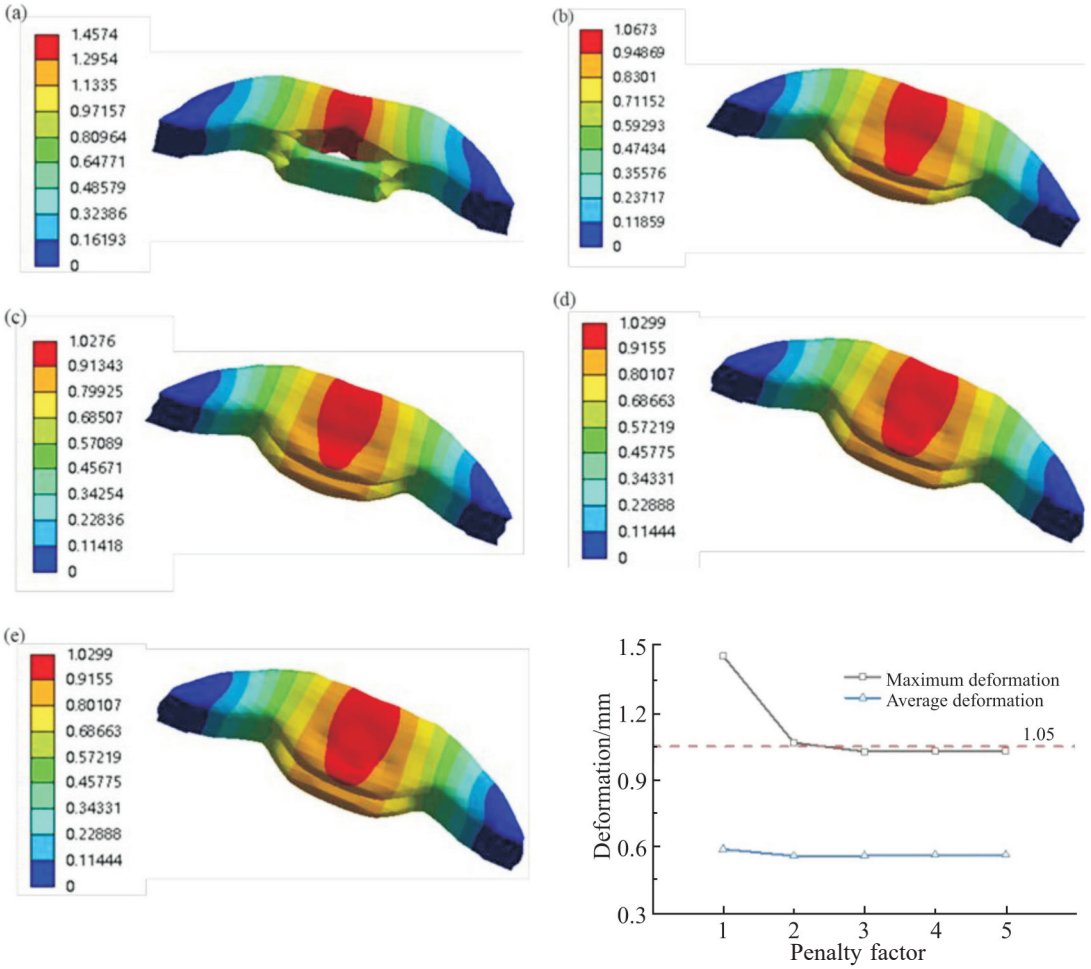


Fig. 8　Changes of model and total deformation after optimization of different penalty factors: (a) *P*=1; (b) *P*=2; (c) *P*=3; (d) *P*=4; (e) *P*=5; (f) total deformation

体积分数的增大，模型形状发生较大改变，底部凸出部分逐渐变大，且当体积分数≥0.45后，由两侧凸出部分延伸至中心包裹完全，这主要是因为随着体积分数保留的越多，模型越完整，变形区域也增多。进一步，对Fig.7(a~e)的结果进行定量分析，得到Fig.7(f)。红色虚线表示目标变形量小于1.05 mm。可以看出，(1) 最大总变形量随体积分数的增大而减小，当体积分数取值≥0.4时，最大变形量达到优化目标。此时最大变形量为1.028 mm，小于初始模型在同等载荷和固定支撑下的最大变形量1.033 mm。(2) 平均变形量随体积分数增大先保持后减小，整体变化呈减小趋势但变化不大。

2.1.2　惩罚因子对总变形的影响：惩罚因子(*P*)是拓扑优化中使所有元素都在设计域内，且使每个保留的单元呈连续结构，将离散变量优化问题放松为连续体变量优化问题的参数。Fig.8(a~e)为不同惩罚因子下模型优化结果。此时体积分数为0.4。惩罚因子选择1，2，3，4和5。结果表明，(1) 随着惩罚因子增大，模型的最大总变形量先减小后稍有增大并保持不变。图中中心红色区域即最大变形区域增大。(2)模型形状发生改变，由中心镂空底部包裹变成中心镂空但两侧实心凸出的形状，且惩罚因子大于1后模型形状基本保持不变。进一步的，对Fig.8(a~e)的结果进行定量分析，结果如Fig.8(f)所示。可以发现，(1) 模型最大总变形量随惩罚因子的增大先减小后稍有增大并保持稳定。平均变形量也稍有减小并逐渐趋于稳定。(2) 当惩罚因子*P*=3时，模型的最大总变形量最小，即为1.028 mm，模型的平均变形量也较小即0.558 mm，此时达到优化目标。与此同时，最大变形量小于初始模型在同等载荷和固定支撑下的形变1.033 mm。(3) *P*＞3时，模型最大总变形量保持1.030 mm不变，且与*P*=3时的总变形量

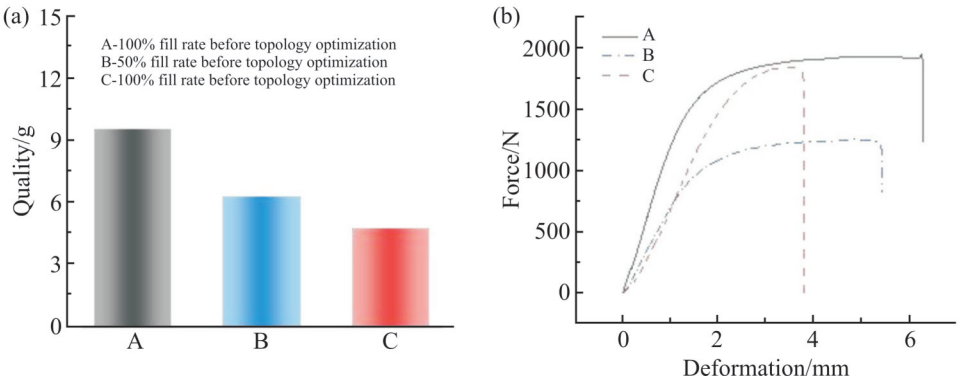


Fig. 9 Comparison before and after topology optimization: (a) quality comparison; (b) bending properties

1.028 mm相差不大，但随着惩罚因子的增大，模型的迭代次数增多。

综上，惩罚因子取3，模型的拓扑优化结果最好。这是因为惩罚因子取值过大时，拓扑优化算法容易过度减少非设计区域的材料，甚至出现不合理的孔洞，导致结构不稳定或无法承受实际负载[12,13]。除此以外，非设计区域的材料减少可能会影响结构边缘处的力学性能，导致结构边缘处产生应力集中现象，从而影响结构的稳定性，所以惩罚因子取3可以兼顾结果的精度和光滑性。

2.2 熔融沉积3D打印实验

2.2.1 *拓扑优化前后结构件的质量与弯曲性能对比*：Fig.9(a)为不同拓扑优化前后工件的质量对比图。实验过程打印速度为50 mm/s。其中，A，C分别是拓扑优化前后填充率设为100%的工件，而B则代表拓扑优化前填充率为50%的工件。从工件A，B，C的结果对比可以看出，(1) 拓扑优化后工件C（4.74 g）相比于原始工件A（9.49 g），完成了去除50%质量的目标。(2) 未进行拓扑优化直接减重的工件B（6.29 g）质量大于原始工件A的1/2，这是因为填充率为50%时，打印件内部空间占50%后，外壳仍然需要消耗一定的材料，所以相较于直接减重的工件，进行拓扑优化的工件减重更多。其次，对拓扑优化前后的工件进行弯曲实验，设定预紧速度为3 mm/min，力的变化速度为3 N/s，得到不同工件的力与变形的关系。由Fig.9(b)可知，(1) 工件对应弯曲力大小为1956.32 N>1848.72 N>1256.72 N，即A>C>B，表明拓扑优化前填充率为100%的工件弯曲力略大于拓扑优化后填充率为100%的工件，而远大于未进行拓扑优化填充率为50%的工件。相比于A，采用拓扑优化后的工件C受压时最大弯曲力变化不大。(2) 工件对应变形量大小为6.317 mm>5.469 mm >3.823 mm，即弯曲变形量的顺序为A>B>C，表明拓扑优化后，工件的变形量增加。(3) 变形量小于2 mm时，相比于原始工件A，拓扑优化的工件C的弯曲模量下降37.53%，与直接减重的工件B接近。综上，拓扑优化去除50%质量的工件可以更好地实现轻量化和保持较高的弯曲力。

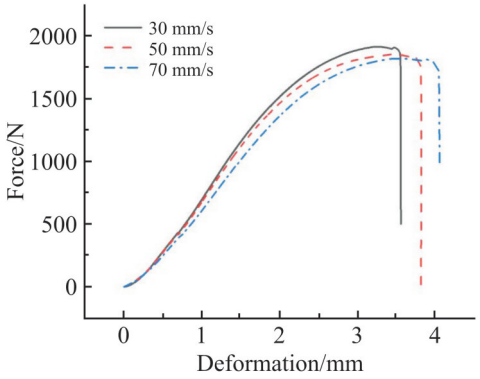


Fig. 10 Force and deformation diagram of the workpiece at different printing speeds

2.2.2 *不同打印工艺参数下拓扑优化结构件弯曲性能对比*：影响3D打印效果的参数众多，例如打印速度、填充率、层高等。有文献研究发现，低速打印能降低工件内部的残余应力和缺陷[14]，并在一定程度上提高层间黏结强度[15]。此外，低速打印可以提高打印精度，减少工件表面的不良瑕疵，从而提高其力学性能。因此，本文以打印速度作为研究对象，选择30 mm/s，50 mm/s和70 mm/s不同打印速度进行打印。对相应打印工件进行弯曲实验，得到不同工件

的力-变形图如Fig.10所示，结果发现，(1) 随着打印速度的增加，工件的弯曲力稍有下降，变形量稍有增加但整体变化不大。(2) 最大弯曲力由1909.96 N（30 mm/s打印）降低到1848.72 N（50 mm/s打印）和1816.6 N（70 mm/s打印）。最大变形量由3.553 mm增加至3.823 mm（50 mm/s打印）和4.048 mm（70 mm/s打印）。弯曲模量整体变化不大，由(717.554±1.549) MPa（30 mm/s打印）降低到(687.367±1.558) MPa（50 mm/s打印）和(647.828±1.577) MPa（70 mm/s打印）。以上结果表明，打印速度对工件拓扑优化前后弯曲性能的影响不大。

3　结论

本文针对可降解材料聚乳酸3D打印轻量化结构进行研究，得到如下结论。

（1）对工件进行受力分析后，确定优化目标为减重50%且最大变形量小于1.05 mm。基于此，成功建立了拓扑优化方程，以最大化刚度为优化目标，设计变量是密度，约束为体积分数。

（2）分析了体积分数与惩罚因子2个重要参数对优化结果的影响，确定了体积分数取40%，惩罚因子取3时可以获得最佳优化结构。

（3）选取熔融沉积方法作为3D打印技术，打印拓扑优化前后的工件，弯曲性能结果表明，拓扑优化后的3D打印件在保持较大弯曲力的同时实减重50%。

本文的研究工作为3D打印可降解材料轻量化结构设计提供了新的思路，探究了拓扑优化工艺参数、打印工艺参数等对打印后工件弯曲性能的影响，可为实现可降解、高性能结构件的轻量化提供理论参考。

参考文献：

[1] Mekki B S, Langer J, Lynch S. Genetic algorithm based topology optimization of heat exchanger fins used in aerospace applications [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 170: 121002.

[2] Li C, Kim I Y. Multi- material topology optimization for automotive design problems[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2017, 21:120-127.

[3] Osanov M, Guest J K. Topology optimization for architected materials design[J]. Annual Review of Materials Research, 2016, 46: 211-233

[4] Xu J, Huang H, Ka J, *et al*. Topological optimization of lung wireless nanosensor network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8: 11450-11462.

[5] 谢贵山, 黄宗斌, 赵肖斌, 等. 汽车车身的轻量化设计探讨[J]. 汽车零部件,2023(2):80-84.
Xie G S, Huang Z B, Zhao X B, *et al*. Discussion on lightweight design of automobile body[J]. Auto Parts, 2023(2):80-84.

[6] Peter W C, Anders K. An introduction to structural optimization [M]. Gladwell, Waterloo: Civil Engineering University of Waterloo, 2009.

[7] 王天立, 闫超, 同新星, 等. 曲线纤维铺放复合材料层合板结构拓扑优化方法研究[J]. 复合材料科学与工程, 2023(6):52-58.
Wang T L, Yan C, Tong X X, *et al.* Research on topology optimization method of composite laminated plates with curvilinear fiber laying paths[J]. Composite Science and Engineering, 2023(6):52-58.

[8] 丁华锋, 李红兵, 陈朝鹰, 等. 汽车悬架下节叉多工况结构拓扑优化设计[J]. 机械科学与技术, 2023(6):1-9.
Ding H F, Li H B, Chen C Y, *et al*. Structure topology optimization design of automotive suspension lower knuckle fork under multiple conditions[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2023(6):1-9.

[9] 岳怀俊, 蒋文涛, 徐凯仁. 3D打印髋关节植入体疲劳性能的拓扑优化[J]. 医用生物力学, 2019, 34(S1): 70.
Qiu H J, Jiang W T, Xu K R. Topology optimization of fatigue performance of 3D printed hip implants[J]. Journal of Medical Biomechanics, 2019, 34(S1): 70.

[10] 郭西园, 卫钟可, 杜建国, 等. 基于3D打印的减速箱体拓扑优化及应用[J]. 航天制造技术, 2022(5): 59-61.
Guo X Y, Wei Z K, Du J G, *et al*. Topology optimization and application of gearbox based on 3D printing[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2022(5): 59-61.

[11] Vantyghem G, de Corte W, Ooms T, *et al*. 3D-printed concrete bridge designed by topology optimization[C]. The Netherlands: 2nd RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, 2020.

[12] 解佳琳, 叶红玲, 杨佳禧. 考虑惩罚因子梯度演化的纤维增强

复合材料拓扑优化[C]//北京力学会第二十九届学术年会论文集. 北京: 北京力学会, 2023.

[13] Zhuo C, Kai L, Pin W, *et al*. Fatigue- resistance topology optimization of continuum structure by penalizing the cumulative fatigue damage[J]. Advances in Engineering Software, 2020, 150: -13.

[14] 方伟. 热塑性复合材料模具 3D 打印成型技术及性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.

Fang W. Research on 3D printing molding technology and performance of thermoplastic composite mold[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.

[15] Liaw C Y, Tolbert J W, Chow L W, *et al.* Interlayer bonding strength of 3D printed PEEK specimens[J]. Soft Matter, 2021, 17: 4775-4789.

Lightweight Structure Design of 3D Printed Polylactic Acid Materials Based on Topology Optimization

Qian Li, Jiachen Gu, Haiyuan Tang, Haiyu Qiao, Chuanyang Wang

(*School of Mechanical and Electrical Engineering, Soochow University, Suzhou 215000, China*)

ABSTRACT: Lightweight structural design could reduce product mass while maintaining mechanical performance, which is of great significance for energy conservation and emission reduction in automobile, high-speed rail, aerospace, and other industries. Polylactic acid (PLA) is widely used in the field of 3D printing due to the advantages of degradability, easy printing, and good mechanical properties. Therefore, in this paper, the degradable material polylactic acid was taken as research object, topology optimization was used as method of lightweight structure design, and fused deposition 3D printing technology was used to explore the influence of parameters (volume fraction and penalty factor) on the total deformation of the workpiece under bending load in the process of topology optimization. The quality of the workpiece before and after topology optimization at different filling rates was compared, and the bending performance of the workpiece at different fused deposition 3D printing speeds after topology optimization was explored. The results show that: (1) when the volume fraction is 40% and penalty factor is 3, the maximum deformation of the model after topology optimization meets the optimization goal; (2) the topology optimization workpiece of 3D printing can achieve 50% mass reduction and maintain high bending force, but the flexural modulus and deformation amount decrease slightly; (3) reduce printing speed has little effect on the mechanical properties of the workpiece with the optimized structure.

Keywords: lightweight structural design; topology optimization; 3D printing; polylactic acid