

# 多孔结构对 Vero White 型光敏树脂力学性能的影响

于天彪<sup>1</sup>, 赵雨<sup>1</sup>, 毕晓夕<sup>1</sup>, 陈亚东<sup>2</sup>  
(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 中荷生物医学与信息工程学院, 辽宁 沈阳 110169)

**摘 要:** 多孔结构设计是影响使用性能的主要因素之一, 优化多孔结构是减少质量的重要途径. 利用静力学仿真分析不同板材内部结构力学性能的变化规律及特点. 采用以色列 Objet Eden250 光固化设备, 对 Vero White 型光敏树脂进行不同结构光固化成型, 利用 AG-Xplus 电子万能试验机测试了试样抗压性能, 并与仿真结果对比. 研究表明, 多孔结构的抗压强度随着孔隙率的升高而降低, 不同结构的多孔结构的抗压强度的变化范围在 15 ~ 70 MPa. 蜂窝状结构的性能优于六面体结构, 六面体结构优于八面体结构. 研究结果与理论结果基本一致, 为多孔结构在增材制造的成功应用提供了理论依据和实验依据.

**关 键 词:** 光固化快速成型; 增材制造; 光敏树脂; 多孔结构; 力学性能

中图分类号: TN 249; TB 332      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2019)06-0852-05

## Effect of Porous Structure on Mechanical Properties of Vero White Photosensitive Resin

YU Tian-biao<sup>1</sup>, ZHAO Yu<sup>1</sup>, BI Xiao-xi<sup>1</sup>, CHEN Ya-dong<sup>2</sup>  
(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. School of Sino-Dutch Biomedical & Information Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: YU Tian-biao, E-mail: tbyu@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** The design of porous structure is one of the main factors that affect performance. It is an important way to reduce the material mass by optimizing porous structure. Static mechanics simulation is used to analyze the change rules of different plate inner structures. Israel Objet Eden250 stereo lithography apparatus is used to solidify different structures of Vero White photosensitive resin, AG-Xplus electronic universal testing machine is used to test the compressive properties of samples, and the simulation results are compared as well. The results show that the compressive strength of porous structure reduces with the increase of porosity, and the value of different structures is in the range of 15 ~ 70 MPa. The honeycomb structure has a better performance than the hexahedron structure, and the hexahedron structure has a better than the octahedron structure. The results are basically consistent with the theoretical results, which provide a theoretical and experimental basis for the successful application of porous structure in the additive manufacturing.

**Key words:** stereo lithography apparatus; additive manufacturing; photosensitive resin; porous structure; mechanical property

多孔结构材料具有质量轻、透流、比强度高、密度低、阻尼减震、降噪等优良性能, 特殊的孔隙结构使其产生了不同于一般实体材料的特殊性能, 被广泛地应用于航空与防护结构中. 据测算, 如果将飞机的机构改为多孔结构, 在同等性能条件的制约下, 飞机自身质量将减小到原来的一半<sup>[1-3]</sup>.

多孔结构材料的力学性能主要依赖于基本力学性能、相对密度及表征材料的内部几何结构的参数等. 国内外许多研究者从这些方面入手, 以理

论、实验或数值模拟的方法研究了多孔结构材料的力学性能. Gibson 等<sup>[4]</sup>利用正方体交错模型对多孔结构的压缩变形机制进行了简单解释,并给出了用于计算多孔结构理论弹性模量的公式. 李长青等<sup>[5]</sup>采用 Nd: YAG 激光器对碳纤维/环氧树脂复合材料进行表面处理,研究表面选区预处理工艺参数对黏结强度影响. 研究结果表明在一定激光系数范围内拉剪强度与其呈正相关,激光消融试件表面活性增强. Tam 等<sup>[6]</sup>综合考虑了 FDM 零件设计与优化,探索沿着应力线制造这种新方法,提出了一种新的 Additive Manufacturing (AM) 方法. 孙岩等<sup>[7]</sup>通过气动弹性计算对光敏树脂模型的弹性变形进行预测和修正,保证修正后的模型在气动力作用下可以保证原始外形不变. Habib 等<sup>[8]</sup>研究了不同单元结构的 PLA 材料支架的性能,建立了每种类型支架的设计参数、孔隙度计算公式、孔隙度 – 表面 – 体积间的关系,提出了一种简易的设计方法. 在保证使用性能的前提下,多孔结构可以实现轻量化设计. 因此本文通过设计不同孔隙结构和孔隙率的多孔结构,研究多孔结构对性能的影响.

# 1 多孔结构力学性能分析及试验条件

## 1.1 多孔结构力学性能分析

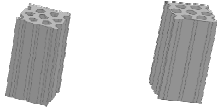
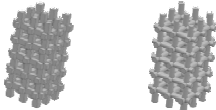

影响多孔结构压缩力学性能的因素主要有孔

隙率和孔隙的形状,因此,通过调整孔隙率和孔隙形状的参数来研究它们对多孔结构的压缩力学行为的影响. 通过对压缩过程的数值模拟所得规律进行分析和总结,得到不同的多孔结构在压缩过程中的力学行为表现. 根据 Gibson – Ashby<sup>[4]</sup>的弹性模量理论值的计算公式,推导几种不同多孔结构的弹性模量理论值.

本次研究选取了在实际的工程应用中使用最广泛的三种多孔结构为例进行仿真分析,三种多孔结构分别为蜂窝状多孔结构、正六面体多孔结构、正八面体多孔结构<sup>[9]</sup>. 三种模型具体的模型参数及仿真力学性能<sup>[10-11]</sup>结果如表 1 所示.

针对 3 种不同结构试样,试样的总体外形尺寸相同,孔径、臂径相同,不同的是试样的形状和截面的形状. 孔隙形状分别为蜂窝状、正六面体状、正八面体状,截面形状分别为正方形和圆形. 试样的静力学分析结果表明:蜂窝状圆形截面结构的力学性能明显优于方形截面;正六面体状方形截面结构的力学性能明显优于圆形截面;正八面体状方形截面结构的力学性能明显优于圆形截面. 总的来看,如图 1 所示,在试样外形尺寸相同、孔径与臂径尺寸相同的前提下,从结构力学性能的角度来看,蜂窝状结构优于六面体结构,六面体结构优于八面体结构.

表 1 不同多孔结构对应的模型参数及仿真结果  
Table 1 Model parameters and simulation results of different porous structures

多孔形状	蜂窝状		正六面体		正八面体	
孔隙率	40. 8%	36. 6%	74. 1%	72. 7%	76. 2%	80. 5%
截面形状	正方形	圆形	正方形	圆形	正方形	圆形
孔径/mm	4	4	4	4	4	4
臂径/mm	2	2	2	2	2	2
体积/mm <sup>3</sup>	5 818	6 230	2 544	2 054	2 336	1 912
模型						
最大等效应力/MPa	65. 05	63. 025	160. 97	205. 53	582. 65	768. 04
最大等效应变	0. 059	0. 057	0. 148	0. 188	0. 587	0. 793
最大等效变形/mm	0. 893 7	0. 833 8	3. 818 7	4. 879 7	11. 341	18. 924

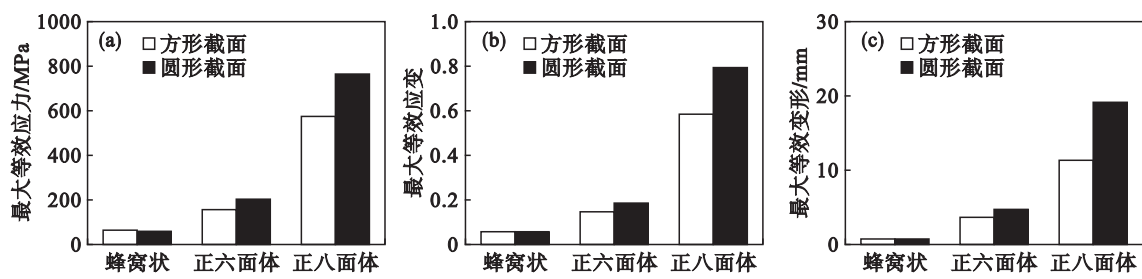


图 1 三种不同结构多孔结构的力学性能对比图  
Fig. 1 Comparison of mechanical properties of three porous structures  
(a)—最大等效应力; (b)—最大等效应变; (c)—最大等效变形.

图 2 反映了蜂窝状多孔结构最大等效应力、最大等效应变以及最大等效变形量随孔隙率的变化情况 (孔隙率分别为 25%, 35%, 45%, 55%, 65%), 有限元模拟分析的结果表明: 在臂径和受力相同的前提下, 最大等效应力、最大等效应变以及最大变形量三者的变化趋势一致, 均随着孔隙率的增大而增大.

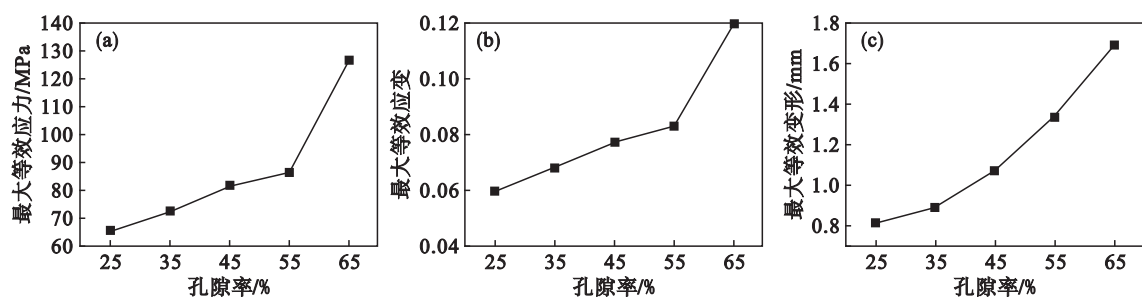


图 2 ANSYS 分析得到的力学性能参数与孔隙率的关系图  
Fig. 2 Relationship between mechanical properties and porosity by ANSYS  
(a)—最大等效应力; (b)—最大等效应变; (c)—最大等效变形.

1.2 试验条件

本试验采用的是一种名为 Vero White 的不透明白色液体光敏树脂材料, 其性能参数如表 2 所示.

表 2 Vero White 的性能参数				
Table 2 Performance parameter of Vero White				
拉伸强度	延伸率	弹性模量	弯曲强度	热变形温度
MPa	%	MPa	MPa	℃
50 ~ 60	10 ~ 25	2 000 ~ 3 000	75 ~ 110	50 ~ 60

本试验采用的树脂 3D 打印设备是以色列 Objet Eden250, 其工作原理如图 3 所示. 此设备主要由激光打印喷头、升降杆、升降台、固定工作平台等组成, 其中的关键结构是一个高功率的激光器, 在打印的过程中, 将预先构建好的三维模型转变为 STL 或者 SLC 文档格式, 激光头会根据输入到软件中的程序来规划其运行的轨迹路线, 激光头走过的路径及成型的轨迹形成一个层面后, 升降台在升降杆的带动下降低一个层厚的高度, 激光头再次进行扫描固化的过程, 形成新的层面并与旧的层面相互结合, 重复该过程, 直到零件打印

完毕.

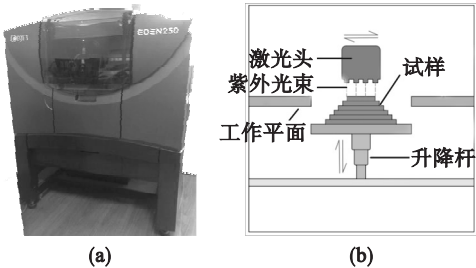


图 3 Objet Eden250 及工作原理  
Fig. 3 Objet Eden250 and working principle  
(a)—打印设备; (b)—工作原理.

利用 AG - Xplus 100kN 电子万能试验机对试样进行抗压性能测试. 测试时必须保证上下 2 个平面平行, 并且使承载垫与试样的轴向垂直. 测量时下降速度为 0.5 mm/min, 最大载荷定为 95 kN.

2 试验结果与讨论

2.1 试样成型与抗压性能测试

通过光固化快速成型试验得到的不同多孔结

构试样在冷却室温后手工除掉外部的冻状支撑, 剩余不易去除的支撑部分用 2% NaOH 溶液浸泡, 然后风干, 得到的多孔结构模型如图 4 所示。

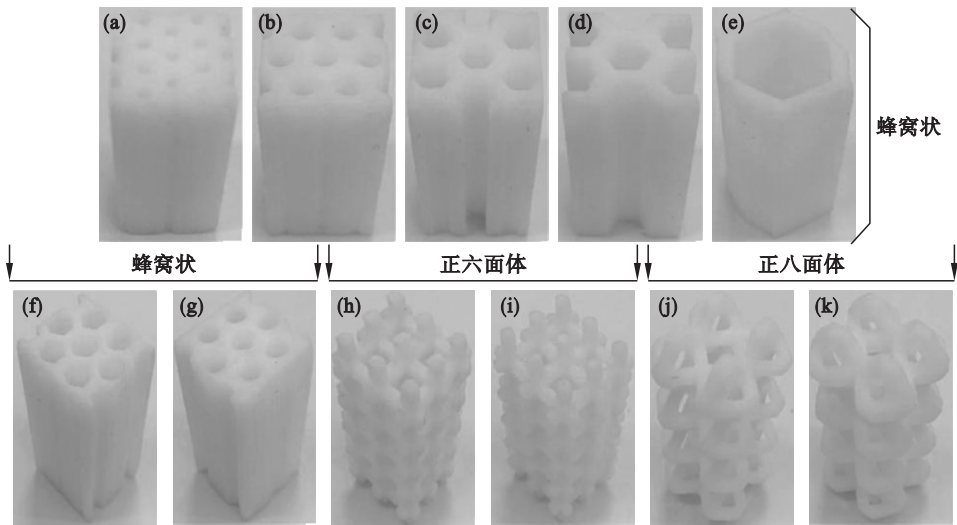


图 4 光固化成型样件  
Fig. 4 Specimens of stereo lithography apparatus  
(a)—孔隙率 25% ; (b)—孔隙率 35% ; (c)—孔隙率 45% ; (d)—孔隙率 55% ; (e)—孔隙率 65% ; (f)—正六边形孔 ; (g)—圆形孔 ; (h)—方形截面 ; (i)—圆形截面 ; (j)—方形截面 ; (k)—圆形截面。

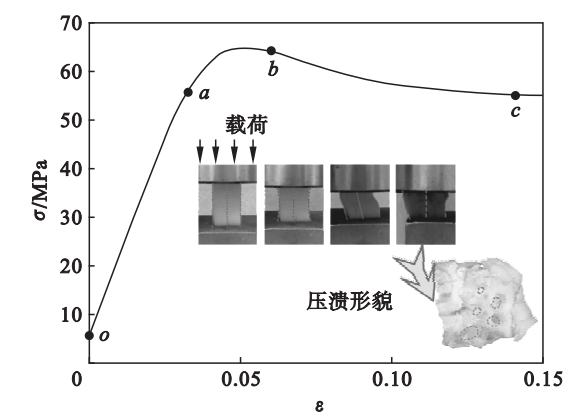


图 5 25% 孔隙率蜂窝结构试样应力 - 应变曲线  
Fig. 5 Stress-strain curve of the alveolate specimen with 25% porosity

对于  $oa$  段, 当上压盘刚开始接触试样时, 试样开始产生压力, 由于加载过程刚刚开始, 所以产生的压缩载荷也很小, 随着上压盘与试样的上表面的接触载荷逐渐增大, 应力急剧线性增长. 这一阶段比较短, 应变只有 5% 左右, 这一过程在曲线的  $a$  点处即将结束, 此后曲线斜率开始急剧变化, 表明试验进入下一阶段。

在  $a$  点曲线开始发生转折, 进入  $ab$  段, 即试样的压溃阶段. 在该阶段, 应力增长速度减慢, 并且达到了整个过程中的最大值, 应力应变不再呈线性关系. 试样开始被压溃, 孔隙开始垮塌. 从整个试件的孔洞失效来看, 首先是某个层面上的个

图 5 为图 4a 试样压溃后形貌. 整个压缩过程分为 3 个过程,  $oa$  段为试样弹性变形阶段,  $ab$  段为试样压溃阶段,  $bc$  段为试样密实阶段。

别孔隙被压垮, 然后这个孔隙所在层上的其余材料产生应力集中, 导致整层失效。

最后阶段是图像的  $bc$  段, 此段是试样的密实阶段. 处在这一阶段的试样中的大量孔隙格子开始急剧屈曲变形, 高度明显变小, 试样也出现了密实化现象, 压缩载荷表现为急剧下降的趋势. 基于树脂材料的多孔结构的应力应变曲线具有基本相似的变化趋势。

## 2.2 试样抗压强度分析

取每种试样在电子万能试验机上进行压缩测试, 根据输出的载荷随位移变化的曲线, 得到其最大压力. 则试件的抗压强度为

$$\sigma_b = \frac{F_m}{S} \quad (1)$$

对于六边形蜂窝状结构, 当其孔隙率为 25% 时, 对应的抗压强度为 66.68 MPa; 当孔隙率为 65% 时, 对应的抗压强度仅为 58.24 MPa. 从试样的试验数据可以看出, 对于同一种孔隙形状的多孔结构, 在其外形尺寸相同的前提下, 多孔结构的抗压强度随着孔隙率的升高而降低, 如图 6 所示。

图 7 为 3 种不同多孔结构抗压强度. 试样的总体外形尺寸相同, 孔径、臂径相同, 试样的形状和截面的形状不同. 试样孔隙形状为蜂窝状, 孔径为 4 mm, 臂径为 2 mm, 六边形蜂窝状的抗压强度为 45.35 MPa, 圆形蜂窝状的抗压强度为 60.17 MPa, 圆形截面的性能明显优于六边形截



面,但圆形截面的质量大于六边形截面的;试样单元形状为六面体,孔径为 4 mm,臂径为 2 mm,方形截面的抗压强度为 34.17 MPa,圆形截面的抗压强度为 25.94 MPa,方形截面的性能明显优于圆形截面,但是方形截面的质量大于圆形截面的;试样单元形状为八面体,孔径为 4 mm,臂径为 2 mm,方形截面的抗压强度为 19.08 MPa,圆形截面的抗压强度为 15.09 MPa,方形截面的性能明显优于圆形截面,但是方形截面的质量大于圆形截面的。

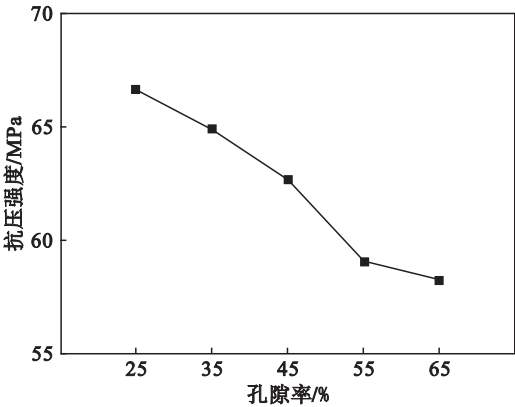


图 6 蜂窝状多孔结构抗压强度随孔隙率的变化趋势

Fig. 6 Compressive strength-porosity curve of honeycomb porous structures

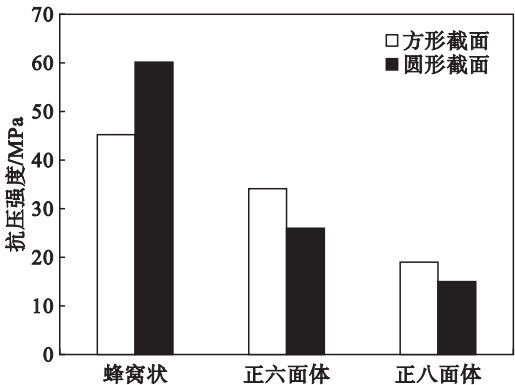


图 7 三种不同结构多孔结构的抗压强度对比图

Fig. 7 Compressive strength of three different porous structures

3 结 论

1) 多孔试样的压缩过程经历了弹性变形 – 压溃 – 密实阶段,所得到的应力应变曲线符合塑料应力应变曲线的特点. 最大应力、应变随着孔隙率增加而增加,抗压强度随着孔隙率增加而减小.

2) 从多孔试样的应力应变曲线中得到了试样的抗压强度,不同结构的多孔结构的抗压强度的变化范围在 15 ~ 70 MPa. 蜂窝状结构的性能优于六面体结构,六面体结构优于八面体结构.

3) 在试样外形尺寸相同、孔径臂径尺寸相同的前提下,最大等效应力、最大等效应变、最大等效形变量、抗压强度、弹性模量变化规律一致;蜂窝状结构圆形截面的性能优于方形截面,六面体结构方形截面的性能优于圆形截面,八面体结构方形截面的性能优于圆形截面.

参考文献:

[ 1 ] Zhang R, Liu L, Xiong Z, et al. Novel rapid prototyping method to fabricate poly( lactide-co-glycolide ) scaffold with high porosity[ J ]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46( 5 ): 105 – 109.

[ 2 ] Brandt M, Sun S J, Leary M, et al. High-value SLM aerospace components: from design to manufacture [ J ]. *Advanced Materials Research*, 2013, 633: 135 – 147.

[ 3 ] Hopkinson N, Hague R, Dickens P. Rapid manufacturing: an industrial revolution for the digital age[ M ]. New York: John Wiley, 2005.

[ 4 ] Gibson L J, Ashby M F. The mechanics of three-dimensional cellular materials [ J ]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 1982, 382: 43 – 59.

[ 5 ] 李长青, 许艺, 任攀, 等. 碳纤维/环氧树脂复合材料表面激光选择性消融预处理[ J ]. *中国表面工程*, 2016, 29( 1 ): 118 – 124.

( Li Chang-qing, Xu Yi, Ren Pan, et al. Pretreatment of carbon fiber reinforced epoxy resin composites by laser selective ablation [ J ]. *China Surface Engineering*, 2016, 29( 1 ): 118 – 124. )

[ 6 ] Tam K M M, Mueller C T. Additive manufacturing along principal stress lines [ J ]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2017, 4( 2 ): 63 – 81.

[ 7 ] 孙岩, 张征宇, 朱伟军, 等. 考虑弹性变形的光敏树脂风洞模型设计方法[ J ]. *机械工程学报*, 2011, 47( 8 ): 169 – 174.

( Sun Yan, Zhang Zheng-yu, Zhu Wei-jun, et al. Design method for photosensitive resin wind tunnel model considering elastic deformation [ J ]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47( 8 ): 169 – 174. )

[ 8 ] Habib F N, Nikzad M, Masood S H, et al. Design and development of scaffolds for tissue engineering using three-dimensional printing for bio-based applications [ J ]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2016, 3( 2 ): 119 – 127.

[ 9 ] Albrecht L D, Sawyer S W, Soman P. Developing 3D scaffolds in the field of tissue engineering to treat complex bone defects[ J ]. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2016, 3( 2 ): 106 – 112.

[ 10 ] D’Amico A A, Debaie A, Peterson A M. Effect of layer thickness on irreversible thermal expansion and interlayer strength in fused deposition modeling[ J ]. *Rapid Prototyping Journal*, 2017, 23( 5 ): 943 – 953.

[ 11 ] 王超, 张征宇, 殷国富, 等. 一种基于光固化快速成型的飞机静弹性风洞试验模型设计方法[ J ]. *航空学报*, 2014, 35( 5 ): 1193 – 1199.

( Wang Chao, Zhang Zheng-yu, Yin Guo-fu, et al. A design method of the static aeroelastic aircraft model based on stereolithography for wind tunnel test[ J ]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35( 5 ): 1193 – 1199. )