

一种最大限度提升熔融沉积 3D 打印点阵材料力学性能的方法

刘文峰^{1,2} 宋宏伟^{1,2*}, 黄晨光^{1,2}

1.中国科学院力学研究所, 流固耦合系统力学重点实验室, 北京, 100190

2.中国科学院大学, 工程科学学院, 北京, 100049

摘要 近年来, 熔融沉积成型 (FDM) 技术因其低廉的打印成本和简单的打印过程被用来制备拉压主导变形的点阵材料。但是, 由传统 FDM 一体化打印获得的点阵材料具有表面粗糙、缺陷敏感和力学性能较差等缺点。本文将 FDM 技术和嵌锁制备工艺相结合, 进行点阵材料的制备, 使得熔融纤维均沿杆的长度方向分布, 从理论上最大限度的提升了 FDM 技术打印的点阵材料的力学性能和表面特性。通过开展单轴拉伸和压缩实验, 和传统 FDM 一体化打印得到的点阵材料进行了对比, 实验结果表明: 相同几何参数条件下, 通过本文提出的方法制备的点阵材料拉压强度提升了约 50%, 并且点阵材料表面粗糙度得到了明显的改善。本文提出的这种方法为用低成本的 FDM 技术制备出具有较高力学性能的点阵材料提供了可能。

关键词: 熔融沉积成型 (FDM); 点阵材料; 嵌锁制备; 力学性能

*基金项目: 国家自然科学基金 (91016025)

通讯作者: 宋宏伟, 研究员, 1973, 研究方向: 轻质多孔材料与结构力学、热结构分析与轻量化设计等。E-mail address: Songhw@imech.ac.cn

1. 引言

点阵结构由于其拉压主导变形的特点,相较于弯曲主导变形的泡沫材料具有更高的比强度和比刚度。在相对密度为 0.1 的条件下,拉压主导的点阵结构的强度是泡沫材料的 3 倍,刚度是泡沫材料的 10 倍[1,2]。点阵结构其内部周期性的开放空间还具有换热、隔声和吸能等多功能应用的潜力,因此,相较于的泡沫材料,点阵结构在结构的多功能一体化上有着更广阔的应用前景。对于点阵材料的制备,传统的制备工艺主要有熔模铸造法[3]、模具热压成型法[4]、穿孔冲压成型法[5]和嵌锁粘接/焊接法[6,7]。然而,传统制备工艺由于其繁琐的制备过程和高昂的成本,限制了点阵机构的进一步应用。近些年由于增材制造技术(3D 打印)的兴起,弥补了传统制备工艺的劣势,开始越来越多的应用于点阵结构的制备上。增材制造技术主要包括选择性激光烧结技术(SLS)、选择性激光熔融技术(SLM)、光固化成型技术(SLA)、熔融沉积快速成型技术(FDM)等。

FDM 技术作为应用最为广泛的一种增材制造技术,相较于其他增材制造技术,它成型过程简单、可供选择的打印材料价格低廉、多样并且无毒,因此,打印出的模型成本更为低[8]。FDM 技术的成型原理为加热熔融热塑性丝状材料,并沿着垂直于打印床的方向逐层堆积,这种成型原理使得打印出的模型的力学性能具有明显的各向异性特点。先前的研究表明,当熔融纤维的铺层方向与受力方向一致时,结构具有最大的强度,当纤维的铺层方向与受力方向垂直时,结构具有最小的强度[9]。对于 FDM 打印的点阵结构来说,当所有纤维的铺层方向都沿着杆件的长度方向也就是受力方向时,点阵结构能达到理论上的最大强度。然而,对于三维点阵结构,传统的 FDM 一体化打印方式显然是无法达到结构的理论最大强度。为此,我们提出了嵌锁组装的 FDM 点阵制备方法,即通过引入嵌锁组装方法,将三维的点阵夹芯转化成二维试件进行打印,通过设置合理的打印壁厚,再将打印好的二维试件组装成三维点阵结构,这样就能使三维点阵结构中的纤维全部沿着杆长方向分布。除了提高结构的力学性能,这种方法由于完全不需要支撑材料,还能够极大的提高打印效率和打印试样的表面光洁度。

2. 点阵结构的制备

体心立方(BCC)点阵胞元由于其构型简单和优异的力学性能而被广泛应用于增材制造技术打印的点阵材料中。本文利用极光尔沃 A8 FDM 3D 打印机使用

两种方法分别制备了 PLA+材料的 BCC 点阵结构，如图.1 所示。图.1(a)为 BCC 点阵通常的打印方式，即由下面板到上面板逐层一体化打印，纤维的铺层方向与杆长方向夹角为 ω 。图.1(b)为本文所提出的方法，即先分别打印二维杆件单元和带槽的上下面板，然后嵌锁组装成三维的点阵结构，最后各连接点采用强力胶固定。为保证所有的挤出纤维的铺层都沿着杆长方向，需要在 3D 打印软件 Cura 中将打印试件的壁厚设置成杆宽度 t 的一半，如图 2 所示。

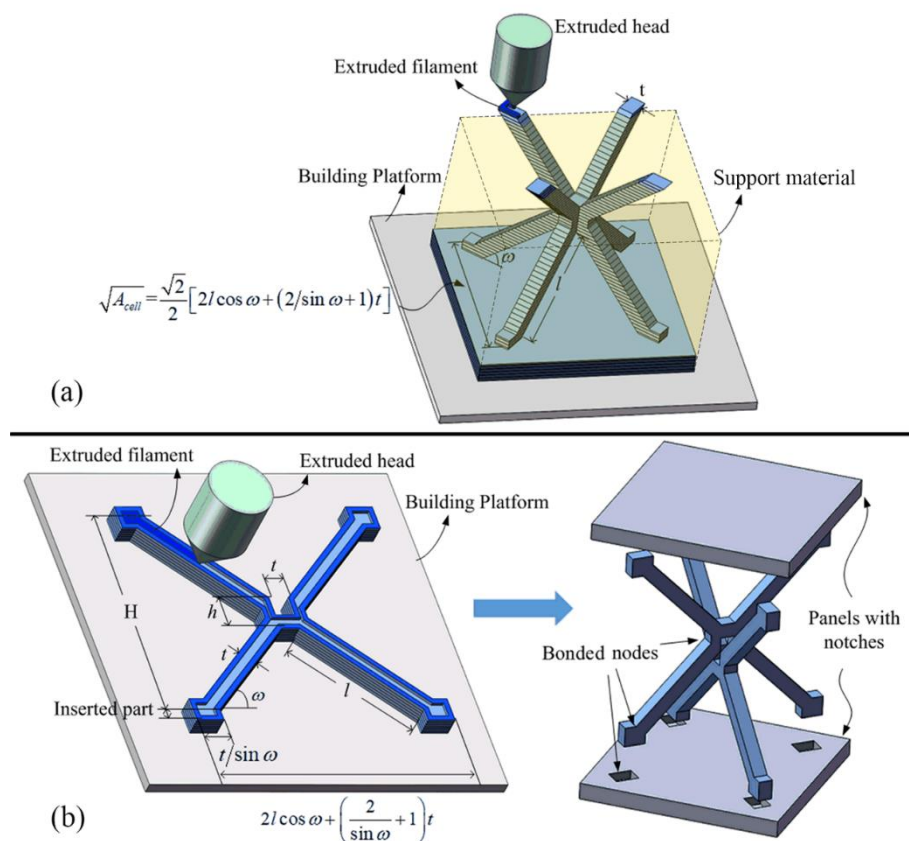


图 1. 采用 FDM 技术制备点阵结构的两种方法示意图。(a) 一体化打印法；(b) 嵌锁拼接法，即先打印二维点阵试件和带槽面板，然后采用嵌锁和胶接的方法组装成三维点阵结构。

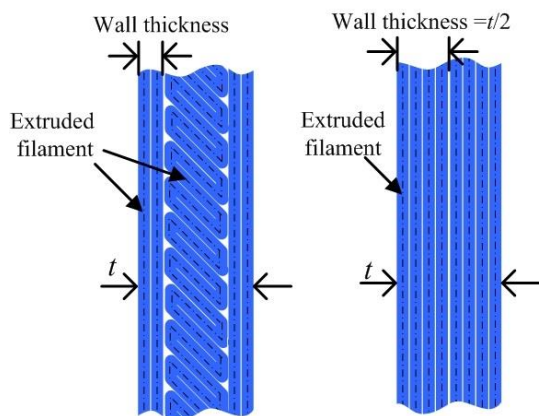


图 2 FDM 打印壁厚和点阵杆件宽度的关系

本文中打印层厚设置为 0.2mm, BCC 点阵结构的几何参数如图 1 所示, 芯层高度 $H=35\text{mm}$, 杆件倾角与面板之间的夹角 $\omega = 45^\circ$, 所有杆的截面均为正方形。分别采用上述两种方法制备的杆件厚度为 2mm 的单胞点阵结构压缩和拉伸试件以及 3×3 多胞元点阵结构分别如图 3、图 4 和图 5 所示。

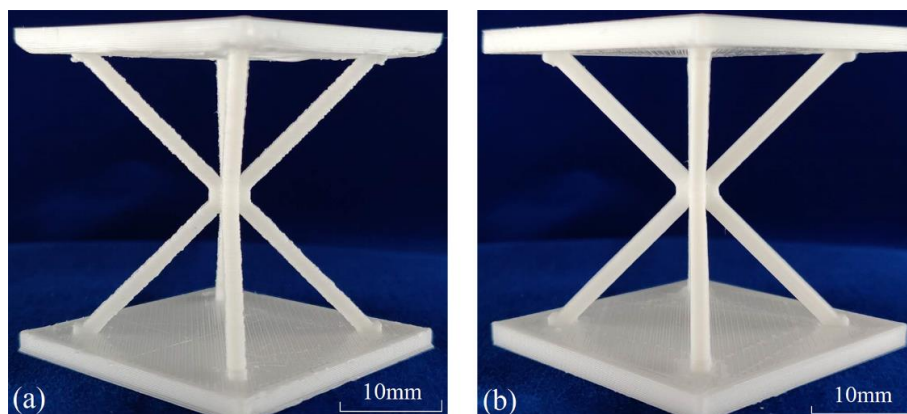


图 3 杆件厚度为 2mm 的 BCC 单胞点阵结构压缩试样 (a) 一体化 FDM 点阵结构 (b) 嵌锁组装 FDM 点阵结构

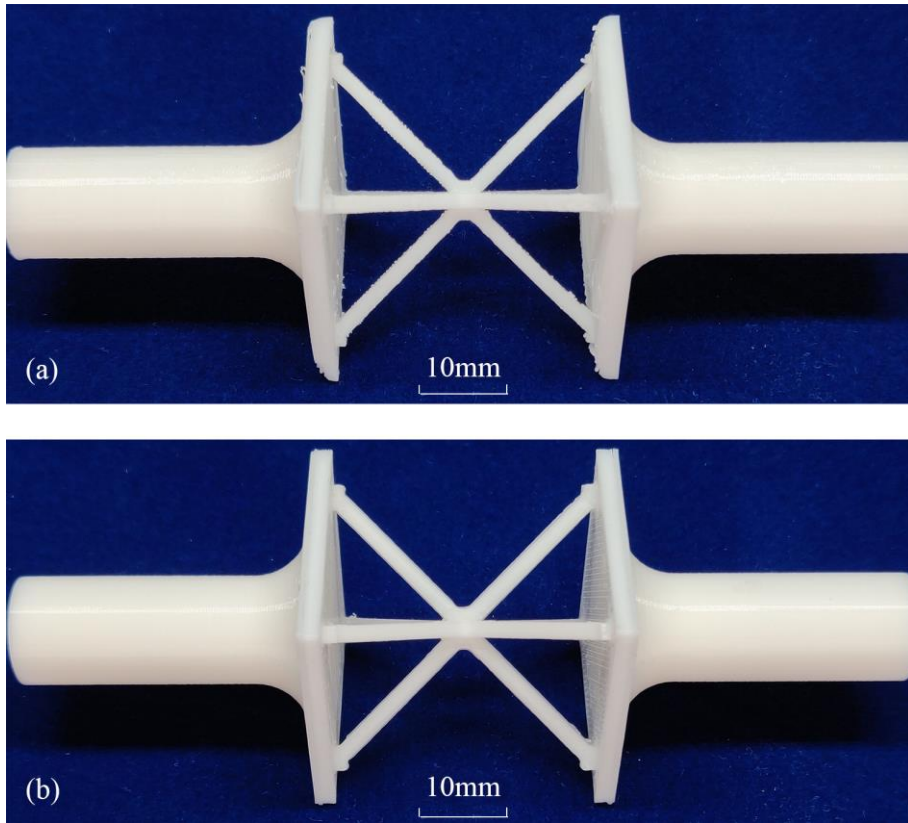


图4 杆件厚度为2mm的BCC单胞点阵结构拉伸试样 (a) 一体化FDM点阵结构 (b) 嵌锁组装FDM点阵结构

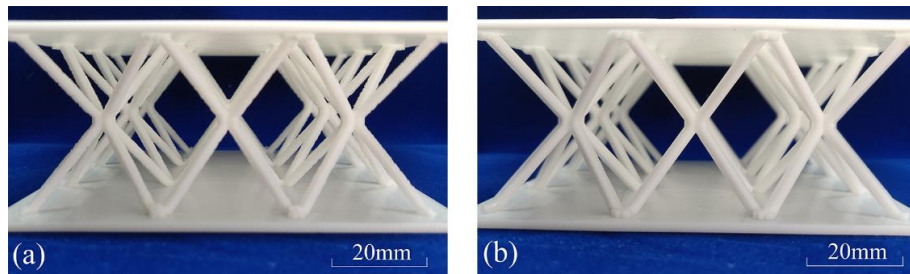


图5 杆件厚度为2mm的BCC多胞元点阵结构 (a) 一体化FDM点阵结构 (b) 嵌锁组装FDM点阵结构

3.实验与结果

由两种方法制备的单胞点阵结构分别进行面外压缩和拉伸实验,压缩和拉伸速率分别为1.82mm/min和2.5mm/min,压缩应力应变响应曲线如图6所示,压缩响应曲线表明采用本文提出的方法制备的BCC点阵结构相较于传统的FDM一体化打印的BCC点阵结构强度提高了51.3%。面外压缩实验过程中两个应变时刻的变形图像如图7所示。从图中可以看出,传统FDM一体化打印的点阵结构在小变形时杆件上便出现了层间裂纹,随着变形的增大,杆件便沿裂纹出现的位置

发生了断裂。而采用本文提出的方法制备的点阵结构在整个加载过程中杆件都没有肉眼可见的裂纹产生。

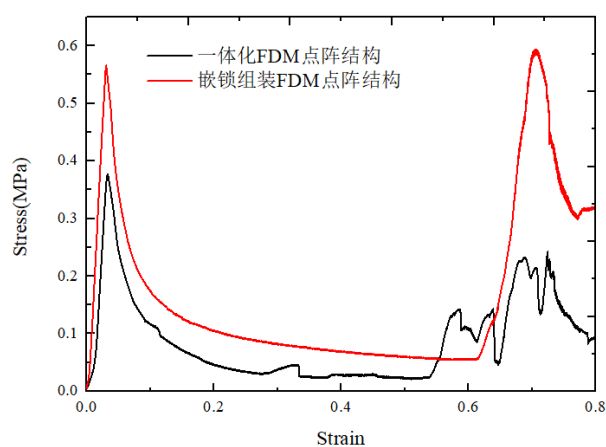


图 6 一体化打印与嵌锁组装 BCC 点阵结构面外压缩应力应变曲线

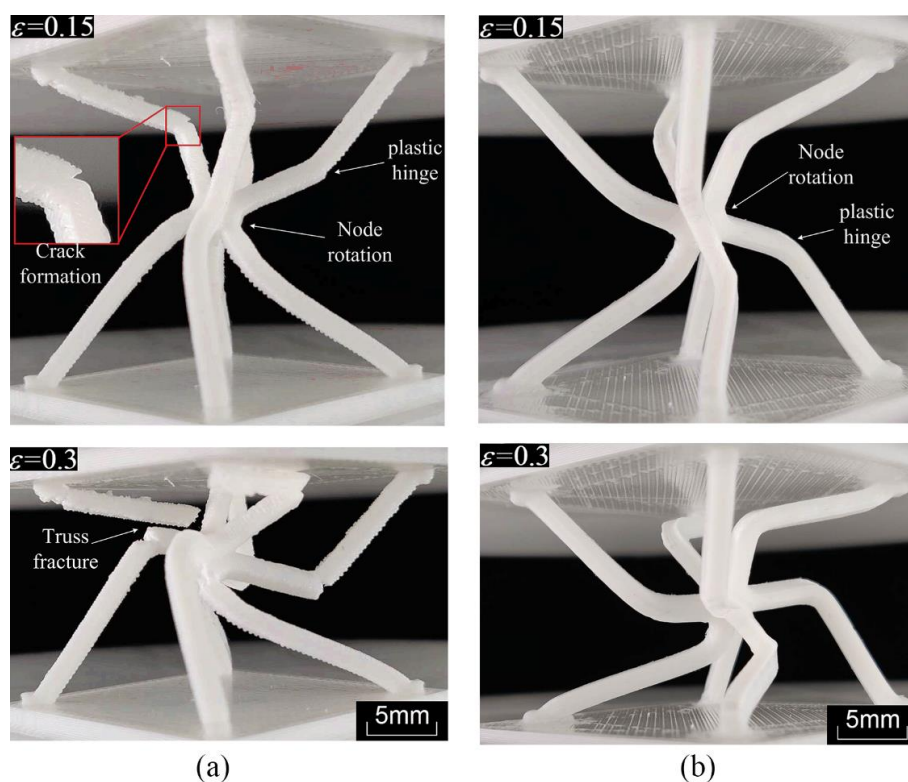


图 7 面外压缩实验变形对比 (a) 一体化 FDM 点阵结构 (b) 嵌锁组装 FDM 点阵结构
 单胞 BCC 点阵结构的单轴拉伸应力应变曲线如图 8 所示, 拉伸响应曲线表明, 采用本文所提出的方法制备的点阵结构相较于传统的一体化打印的点阵结构的拉伸强度提升了 50%, 杆件拉伸断裂的位置主要发生在中间结点处, 一体化打印的点阵结构的断裂位置则主要出现在面板连接处以及杆件中部, 如图 9 所示。

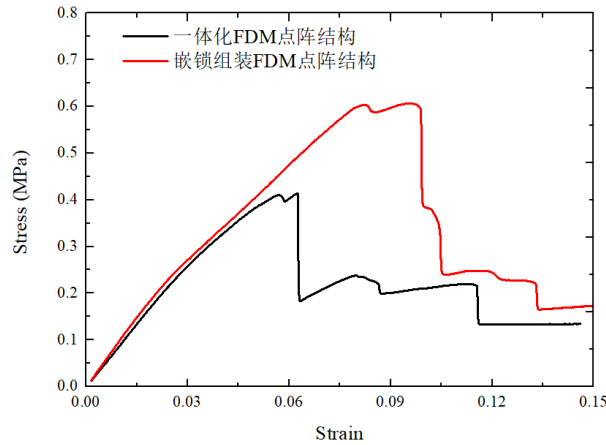


图 8 一体化打印与嵌锁组装 BCC 点阵结构单轴拉伸应力应变曲线

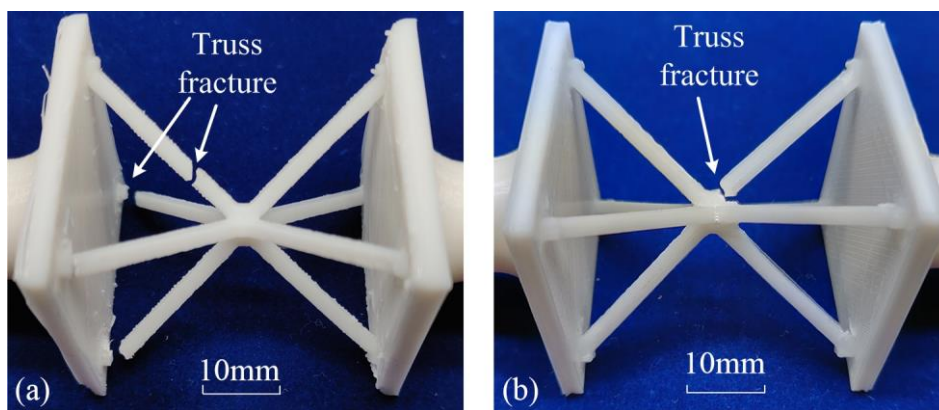


图 9 单轴拉伸实验破坏示意图 (a) 一体化 FDM 点阵结构 (b) 嵌锁组装 FDM 点阵结构

4.结论

本文通过将嵌锁组装法引入 FDM 技术制备了 BCC 点阵结构, 通过将 FDM 的打印壁厚设置成杆件宽度的一半, 使得熔融纤维的铺层方向全沿着杆件的长度方向。与传统的 FDM 一体化打印的点阵结构相比, 本文提出的方法制备的点阵结构面外压缩强度提升了 51.3%, 拉伸强度提升了 50%。

参考文献:

- [1] Wadley HN. Multifunctional periodic cellular metals. Philosophical transactions Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences. 2006;364:31-68.
- [2] V.S. Deshpande NAF, M.F. Ashby. effective properties of the octet-truss lattice material. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 2001.
- [3] Wang J, Evans AG, Dharmasena K, Wadley HNG. On the performance of truss panels with Kagomé cores. International Journal of Solids and Structures. 2003;40:6981-8.
- [4] Zhang G, Ma L, Wang B, Wu L. Mechanical behaviour of CFRP sandwich structures with tetrahedral lattice truss cores. Composites Part B: Engineering. 2012;43:471-6.
- [5] Syceck DJ WH. cellular metal truss core sandwich structures. Advanced Engineering Materials. 2002.
- [6] K. Finnegan GK, H. N. G. Wadley, V. S. Deshpande. The compressive response of carbon fiber

- composite pyramidal truss sandwich cores. *International Journal of Materials Research*. 2007.
- [7] Dong L, Deshpande V, Wadley H. Mechanical response of Ti-6Al-4V octet-truss lattice structures. *International Journal of Solids and Structures*. 2015;60-61:107-24.
- [8] Bikas H, Stavropoulos P, Chryssolouris G. Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;83:389-405.
- [9] Ahn SH, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*. 2002;8:248-57.