

TC4 多孔件选区激光熔化成形及力学性能分析

李军超, 臧艳艳, 王 维

(重庆大学, 重庆 400044)

摘 要: 采用选区激光熔化成形技术制备了 2 种钛合金体心立方多孔结构 (bcc 和 bcc-z) 制件, 验证了其成形复杂孔制件的可行性; 对其进行了静态压缩试验。结果表明, 制件沿近 45° 方向断裂; 压缩试验应力-应变曲线表明, 多孔件使材料抗压强度大大减小, 且随着边/径比和孔隙率的增大而峰值应力减小。同时, 在边/径比和孔隙率相差不大的情况下, bcc-z 结构承受载荷的能力明显高于 bcc 结构; 通过有限元模拟分析了 bcc 制件在压缩过程中的应力分布情况, 针对单元体节点处的应力集中现象, 提出了节点加固方法。同时预测了多孔制件的弹性模量和屈服强度。模拟与试验结果基本吻合。

关键词: 选区激光熔化成形; 多孔结构; 力学性能

中图分类号: TG146.2⁺3; TG125.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)02-0662-05

多孔结构以其独特的优势在纺织、医药、化工、冶金、航空航天等领域得到了广泛应用。目前有关多孔金属加工制备的研究已受到各国材料科学界的广泛关注^[1,2]。然而, 利用传统的加工技术难以成形多孔件。为克服传统成形方法的不足, 出现了一些新型的成形技术^[3,4]。

选区激光熔化成形 (SLM) 技术^[5-8]是目前迅速发展起来的一项数字化实体自由成形技术。它形成于 20 世纪 80 年代, 是建立在快速原型技术思想上的一种先进制造技术, 属增材制造 (additive manufacturing, AM) 的一种^[9]。它以形成可以直接使用的承载力学载荷的金属零件为目标, 不仅关注其快速成形特性, 同时更关注其力学性能。王志阳、沈以赴等^[10]利用 SLM 成功制备出蜂窝状 316L 不锈钢多孔试样, 分析了试样的微观结构, 着重讨论了 SLM 成形多孔结构的机制及激光功率对多孔结构特征的影响规律。李鹏等^[11]利用 SLM 制备出空间网格状 316L 不锈钢多孔试样, 对多孔制件进行了组织和微观结构的分析, 讨论了 SLM 的成形机制及工艺参数对多孔结构特征的影响; P. Li 等^[12]基于不锈钢材料研究了完整的三维有限元模型的网格结构的宏观变形和晶阵的微观应力应变演化; S. V. Bael 等^[13]基于 Ti6Al4V 优化了 SLM 成形多孔件的坚固性和可控性, 减少设计与生产形态和力学性能的不匹配; S. Tsopanos 等^[14]基于不锈钢网格结构研究

了工艺参数对单轴抗压性能的影响, 发现高激光功率可以成形几乎完全致密的支柱; K. Ushijima 等^[15,16]基于不锈钢材料用数值和实验分析研究了 bcc 结构在单轴压缩和剪切载荷下的力学性能。各国对多孔件的研究大多集中在不锈钢等材料, 对钛合金多孔件的研究相对较少。目前中国华南理工大学^[17-20]、南京航空航天大学^[21-23]和华中科技大学^[6,24]等对选区激光熔化成形多孔材料的研究比较多, 研究重点大多集中在零件制备工艺。本研究基于钛合金的 bcc 和 bcc-z 2 种多孔结构, 验证了激光选区熔化技术成形复杂孔制件的可行性。利用压缩试验分析了多孔制件的断裂机制, 结合应力-应变曲线分析了多孔件承载能力与孔隙率间的关系, 并基于数值模拟方法实现了多孔制件弹性模量和屈服强度的预测。

1 实 验

实验采用德国 EOS Gmbh 公司的 TC4 (EOS Titanium Ti64) 预合金粉末, 粒度不超过 30 μm , 表 1 为 TC4 粉末的主要成分。粉末利用气雾法制备, 形状主要为球状, 形态良好。

实验平台为德国 EOS Gmbh 公司的 EOS M280 快速成型机, 成形过程在氩气保护下进行, 含氧量在 0.1% (质量分数) 以下。激光功率 170 W, 扫描速度 1250 mm/min, 扫描层厚 30 μm , 扫描间距 100 μm 。

收稿日期: 2017-02-16

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (“863” 计划) (2015AA042501)

作者简介: 李军超, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044, 电话: 023-65111493, E-mail: ljchust@163.com

表 1 Ti-6Al-4V 粉末的化学成分

Table 1 Chemical composition of Ti-6Al-4V powder (ω/%)

Al	V	O	N	C	H	Fe	Ti
5.5~6.5	3.5~4.5	<0.2	<0.05	<0.08	<0.012	<0.25	Bal.

设计了 2 种多孔结构, bcc 结构和 bcc-z 结构, 如图 1 所示。针对每种结构, 采用不同的孔隙率和边/径比等工艺参数, 分别进行 SLM 加工, 验证其成形性能。制件具体设计参数如表 2 所示。其中, 孔隙率(p)是指多孔金属中气孔所占体积与多孔金属总体积的比率, 它是表征多孔金属中气孔含量的一个重要结构参数^[25]。

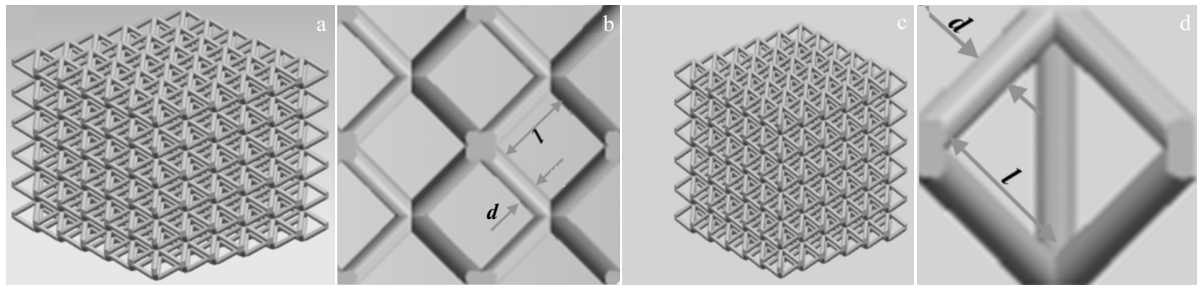


图 1 bcc 结构模型, bcc 单元结构, bcc-z 结构模型, bcc-z 单元结构

Fig.1 Structure model of bcc (a), unit cell of bcc (b), structure model of bcc-z (c), and unit cell of bcc-z (d)

表 2 样品设计参数及试验外观尺寸参数

Table 2 Design parameters and the test size parameter of the sample

Part number	Unit structure	Unit volume/ mm ³	Ratio of l/d	Porosity, p	Staff-diameter/ mm	Modeling size/ mm	Forming size/ mm
A	bcc	2.5	6.25	0.88	0.4	15×15×15	15.20×15.14×15.12
B		3	7.5	0.91	0.4	15×15×15	15.10×15.10×15.09
C		4	10	0.95	0.4	16×16×16	16.12×16.10×16.12
D		5	12.5	0.97	0.4	15×15×15	15.10×15.10×15.08
E	bcc-z	2.5	6.25	0.87	0.4	15×15×15	15.10×15.10×15.08
F		3	7.5	0.90	0.4	15×15×15	15.10×15.08×15.10
G		4	10	0.94	0.4	16×16×16	16.10×16.08×16.08
H		5	12.5	0.96	0.4	15×15×15	15.06×15.10×15.08

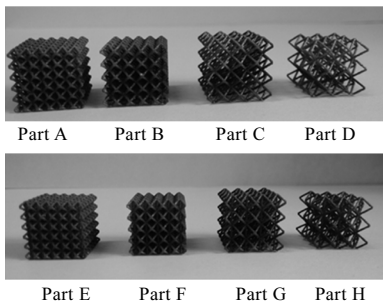


图 2 SLM 成形的多孔件

Fig.2 Porous parts manufactured by SLM

2 结果与讨论

2.1 SLM 成形可能性分析

图 2 为选区激光熔化成形制备出的多孔制件。其表面无宏观缺陷, 外形尺寸如表 2 所示。相较于三维模型, 实际制件比建模尺寸大 0.4%~0.75%。这可能是由于激光束在融化金属粉末的过程中释放出很大的热量, 熔池附近的粉末会粘附在已融化并且凝固的粉末周围, 从而使实际制件的尺寸大于建模尺寸。从图 2 看出, 选区熔化技术具有制备金属复杂件的能力。

2.2 多孔件压缩力学性能分析

金属压缩试验方法是测试金属力学性能的重要的标准测试方法之一。本研究采用电子万能材料试验机 CMT5105 对成形制件进行压缩试验, 输出载荷与位移曲线, 压缩速率 1.5 mm/min。图 3 展示了多孔件 C 从开始压缩到断裂的过程。在整个压缩过程中, 制件主要沿接近 45°切线方向发生明显剪切变形直至断裂。其余制件在压缩试验过程中也表现出同样的变形规律。

对于多孔结构单元杆, 其三向应力状态下的轴向力可以表示为^[16]:

$$N=(\sigma_x+\sigma_y+\sigma_z)\cdot l^2\cos\gamma_x\cos\gamma_y\cos\gamma_z \quad (1)$$

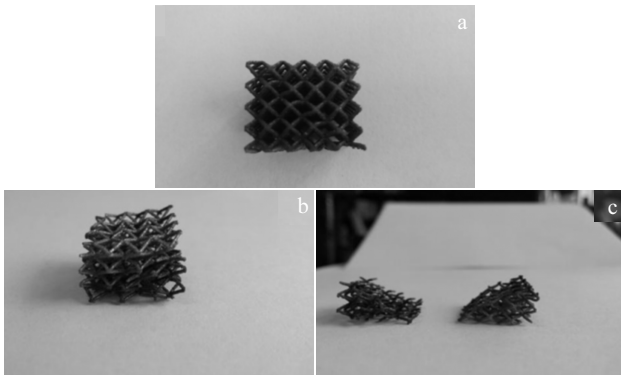


图 3 压缩试验(多孔件 C)

Fig.3 Compression test (porous part C)

式(1)中, l 为单元杆长度, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为正应力, $\gamma_x, \gamma_y, \gamma_z$ 为杆与三坐标轴间的夹角。由于采用对称结构 $\gamma_x = \gamma_y = \gamma_z$, 致使轴杆方向上的受力较大, 因此制件受压时沿近 45° 切线方向断裂, 这与 K. Ushijima 等^[16]的研究结果相符。若单元体边长不同, 则杆与三轴夹角不同, 可改善杆受力情况, 且断裂角度可能发生变化。在实际应用中, 对于采用本研究所示 bcc 结构或 bcc-z 结构的多孔件, 应选择合理边长并避免沿切向承受过大载荷。

从图 4 压缩应力-应变曲线的峰值应力可以看出, 多孔制件将会大大降低材料的抗压强度, 峰值应力大小与孔隙率及边/径比紧密关联。图 4 与图 5 分别展示了各制件压缩试验应力-应变曲线和边/径比与峰值应力间的关系。可以看出, 在相同边/径比和相近孔隙率条件下, bcc-z 结构的多孔件其峰值应力均高于 bcc 模型, 性能更优。同时, 随着边/径比和孔隙率的增大, 材料的峰值应力值减小, 且 bcc 和 bcc-z 2 种结构的峰值应力逐渐接近。因此, 在实际应用中, 在边/径比值较小的情况下应采用 bcc-z 模型制备多孔件以提高制件性能, 而在边/径比较大时采用 bcc 结构, 以减少样品制备时间并节约材料成本。

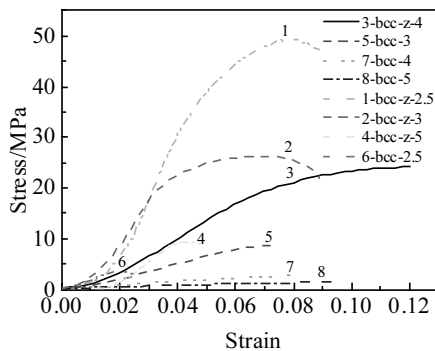


图 4 压缩应力-应变曲线

Fig.4 Stress-strain curves of the composites

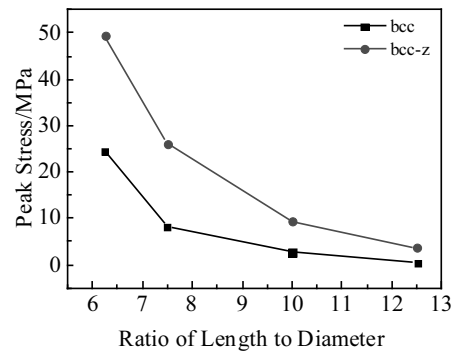


图 5 边径比与峰值应力关系

Fig.5 Relationship between the ratio of length to diameter and the peak stress

2.3 多孔结构力学性能预测

为分析多孔制件内部应力分布并降低运算成本, 截取 bcc 结构单元进行压缩模拟分析。图 6a 为 bcc 结构单元体内部应力分布图, 其压缩量为高度的 50%。可以看出, 在制件节点处出现应力集中的现象, 而在杆件的中间部位应力较小(图 6a), 因此, 可采用如图 6b 的方法对制件节点部位进行加固, 以提高制件力学性能。

弹性模量是一个重要的力学性质, 是物体弹性变形难易程度的表征和工程材料重要的性能参数; 屈服强度则反映了材料对力的作用的承受能力。本研究结合数值模拟和理论分析对多孔制件的弹性模量和屈服强度进行分析。

1) 对于 bcc 结构多孔件来说, 其弹性模量可由下式计算^[24]:

$$E^*_{bcc} = \sqrt{3}\pi E \cdot \frac{(d/L)^2}{1 + 2(L/d)^2} \tag{2}$$

式中, E^*_{bcc} 为多孔钛的弹性模量, E 为致密钛的弹性模量(110 GPa), d 为多孔件中支杆的直径, L 为单元体边长。

2) 对于 bcc 结构多孔件来说, 其屈服强度可表示为^[24]:

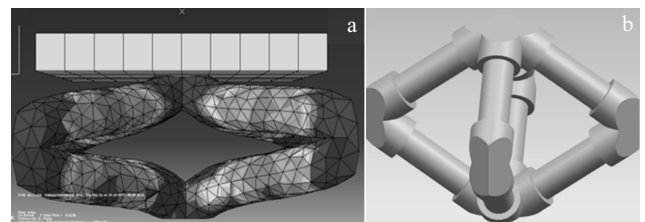


图 6 单元体应力分布, 单元节点加固模型

Fig.6 Stress distribution of the unit cell (a) and model of joint reinforcement (b)

$$\sigma_{pl, bcc} = \frac{4\sqrt{2}d^3\sigma_0}{3L^3} \quad (3)$$

其中, 屈服强度 σ_0 为 860 MPa。由式(2)和式(3), 结合多孔件设计模型参数, 可得到表 3 bcc 结构的屈服强度和弹性模量理论计算值。从表 3 可以看出, 多孔件大大降低了材料的弹性模量和屈服强度。

图 7 比较了理论计算和数值模拟预测的弹性模量

和屈服强度, 两者大体相当。可以看出, 随着孔隙率的不断增大, 制件的弹性模量值与屈服强度值不断降低; 数值模拟结果与试验结果相比, 各制件峰值应力接近, 验证了有限元方法预测屈服强度等力学参数的有效性。本研究模拟分析时, 只截取了一个单元, 这可能造成一定的分析误差, 若对整个制件进行分析将进一步提高模拟的准确度。

表 3 不同参数 bcc 模型的理论弹性模量值

Table 3 Theoretical elastic modulus values of different parameters bcc models

Part number	Unit structure	Unit volume/ mm ³	Porosity, <i>p</i>	Length of unit, <i>l</i> / mm	Staff diameter, <i>d</i> / mm	$\sigma_{pl, bcc}$ / MPa	E_{bcc}^* / GPa
A	bcc	2.5	0.88	2.5	0.4	6.64	0.19
B	bcc	3	0.91	3	0.4	3.88	0.09
C	bcc	4	0.95	4	0.4	1.64	0.03
D	bcc	5	0.97	5	0.4	0.83	0.012

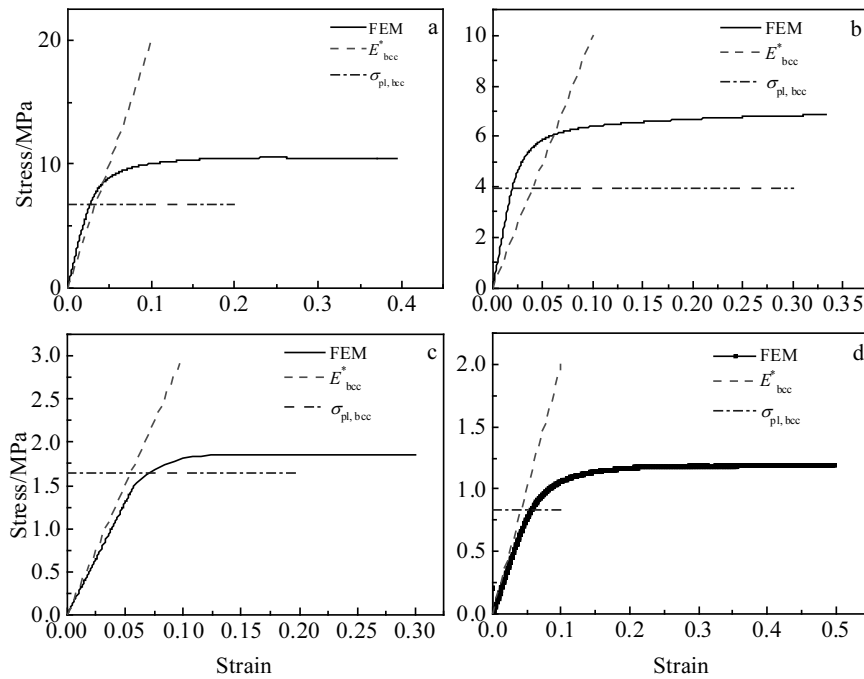


图 7 FEM 模拟与理论值比较

Fig.7 Comparison between FEM and theoretical value with different porosity: (a) $p=0.88$, (b) $p=0.91$, (c) $p=0.95$, and (d) $p=0.97$

3 结论

- 1) 基于 bcc 与 bcc-z 2 种多孔结构, 试验验证了激光选区熔化成形技术成形复杂孔制件的可行性。
- 2) 压缩试验中多孔件沿近 45° 方向发生变形直至断裂。在相同边/径比和相近孔隙率条件下, bcc-z 结构的多孔件其峰值应力均高于 bcc 模型, 性能更优。同时, 随着边径比和孔隙率的增大, 材料的峰值应力值减小, 且 bcc 和 bcc-z 2 种结构的峰值应力逐渐接近。
- 3) 模拟分析了 bcc 结构多孔制件的压缩过程, 提出

了节点加固方案以改善节点处的应力集中; 同时预测了制件的弹性模量及屈服强度, 模拟值与试验值基本吻合。

参考文献 References

[1] Tan Ping(谈萍), Tang Huiping(汤慧萍), Wang Jianyong(王永) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程) [J], 2006, 35(S2): 433

[2] Banhart J. *Progress in Materials Science*[J], 2001, 46(6): 559

[3] Leong K F, Cheah C M, Chua C K. *Biomaterials*[J], 2003, 24(13): 2363

- [4] Hutmacher D W, Sittinger M, Risbud M V. *Trends in Biotechnology*[J], 2004, 22(7): 354
- [5] Merkt S, Hinke C, Schleifenbaum H *et al. South African Journal of Industrial Engineering*[J], 2012, 23(2): 97
- [6] Fu Liding(付立定), Shi Yusheng(史玉升), Zhang Wenxian(章文献) *et al. Applied Laser(应用激光)*[J], 2008(2): 108
- [7] Yadroitsev I, Shishkovsky I, Bertrand P *et al. Applied Surface Science*[J], 2009, 255(10): 5523
- [8] Lewis M, Robin C S, Wesley K B *et al. Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*[J], 2009, 89B(2): 325
- [9] Kruth J P, Froyen L, Van Vaerenbergh J *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 149(1): 616
- [10] Wang Zhiyang(王志阳), Shen Yifu(沈以赴). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2011, 40(1): 161
- [11] Li Peng(李鹏), Liu Bin(刘斌). *Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2013, 42(8): 50
- [12] Li P, Wang Z, Petrinic N *et al. Materials Science & Engineering A* [J], 2014, 614(5): 116
- [13] Bael S V, Kerckhofs G, Moesen M *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2011, 528(24): 7423
- [14] Tsoupanos S, Mines R A W, Mckown S *et al. Journal of Manufacturing Science & Engineering*[J], 2010, 132(4): 575
- [15] Ushijima K, Cantwell W J, Chen D H. *International Journal of Mechanical Sciences*[J], 2013, 68(3): 47
- [16] Ushijima K, Cantwell W J, Mines R A W *et al. Journal of Sandwich Structures and Materials*[J], 2010, 12(2): 3907
- [17] Mai Shuzhen(麦淑珍), Yang Yongqiang(杨永强), Wang Di(王迪). *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2015(12): 88
- [18] McKown S, Shen Y, Brookes W K *et al. International Journal of Impact Engineering*[J], 2008, 35(8): 795
- [19] Song Changhui(宋长辉), Yang Yongqiang(杨永强), Wang Zanda(王贇达) *et al. Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2014(6): 52
- [20] Wu Peng(吴鹏), Shen Yifu(沈以赴). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2007, 36(6): 1070
- [21] Speir M, Humbeeck J V, Schrooten J *et al. Procedia CIRP*[J], 2013, 5: 79
- [22] Chen Hongyu(陈洪宇), Gu Dongdong(顾冬冬), Gu Ronghai(顾荣海) *et al. Chinese Journal of Lasers(中国激光)*[J], 2016(2): 60
- [23] Zhang Guoquan(张国全), Gu Dongdong(顾冬冬). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2015, 44(4): 1017
- [24] Yuan Xuebing(袁学兵), Wei Qingsong(魏青松), Wen Shifeng(文世峰) *et al. Hot Working Technology(热加工工艺)*[J], 2014, 43(4): 91
- [25] Liu Peisheng(刘培生), Ma Xiaoming(马晓明). *Detection Method of Porous Body(多孔材料检测方法)*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006

Formation and Mechanical Properties of the TC4 Porous Structures by Selective Laser Melting

Li Junchao, Zang Yanyan, Wang Wei
(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Two kinds of bcc and bcc-z titanium alloy porous structures were prepared by selective laser melting, and its feasibility of forming complex porous structures was verified. Then, static compression tests were carried out. The results show that the products always fracture around 45°. The stress strain curve reveals that the compressive strength of the porous structures greatly declines, and the peak stress decreases with the increase of the ratio of length/diameter and porosity. In addition, in the case of similar ratios of length/diameter and porosity, the ability to bear loads of bcc-z is significantly higher than that of bcc. Finally, the stress distribution of bcc parts in the process of compression was analyzed by finite element simulation. In view of the stress concentration at the nodes of the unit, the method of node reinforcement was put forward. And the elastic modulus and the yield strength of the porous products were predicted. The simulation fits the experiment results.

Key words: selective laser melting (SLM); porous structures; mechanical properties

Corresponding author: Li Junchao, Ph. D., Associate Professor, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China, Tel: 0086-23-65111493, E-mail: ljchust@163.com