单轴压缩下Ti-6Al-4V空心点阵结构的力学行为

任会兰, 申海艇, 栗建桥*

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

* E-mail: 6120200015@bit.edu.cn

收稿日期: 2020-12-07; 接受日期: 2021-01-12; 网络版发表日期: 2021-03-03

国家自然科学基金(批准号: 11872124)资助项目

摘要 本文设计和制备了三组不同内部加强结构分布的Ti-6Al-4V空心点阵试样, 开展了单轴压缩加载下空心点阵结构变形和破坏的实验和数值模拟研究, 分析了加强结构分布及形状参数对空心点阵结构力学行为的影响规律. 结果表明: 相比于基本空心点阵结构(试样BS), 当加强结构分布在试样节点(试样SN)时, 其比弹性模量和比极限强度分别降低了7%和12%, 试样在支柱区域发生剪切断裂; 而当加强结构分布在支柱内部(试样SW)时, 其弹性模量、极限强度和比极限强度则分别提升了20%, 49%和13%, 展现出了优越的力学性能. 加强结构的不同分布, 引起了胞元的结构薄弱区、应力分布和承载能力发生变化, 从而导致试样表现出不同的失效特征和力学性能. 试样SW的加强结构增强了基本结构的薄弱区域, 提高了胞元承载能力, 对试样SW加强结构形状参数的数值模拟研究表明: 当加强结构高度与半胞元高度的比接近0.6, 或者加强结构厚度与试样支柱内径的比接近0.1875时, 胞元内部结构更加均衡, 其应力分布更加均匀, 更有利于获得力学性能优越的轻量化结构.

关键词 空心点阵结构, 加强结构分布, 形状参数

1 引言

多孔结构由于其具有较高的比强度和比模量以及优越的能量吸收能力, 被广泛应用于航空航天、汽车工业和生物医疗等领域^[1~3]. 目前, 已有研究表明孔洞规则分布的多孔结构表现出比孔洞随机分布的多孔结构更优越的力学性能^[4,5]. 因此, 越来越多的研究者致力于规则多孔结构, 尤其是针对胞元周期性分布的点阵多孔结构的研究.

伴随着增材制造技术的出现和发展, 制备各种各

样胞元类型的点阵结构成为可能, 其中选择性激光熔融技术(selective laser melting technology)由于较短的过程循环和较宽的模具范围而获得了更为快速的发展^[6]. 因此, 许多研究者们采用选择性激光熔融技术制备了各类胞元周期性分布的点阵结构, 如立方胞元、G7胞元、菱形十二面体胞元^[7]、体心胞元和面心胞元^[8]. 大量研究已通过实验和理论的方式, 发现点阵结构的力学性能和变形行为可被许多因素影响(如胞元拓扑^[7]、体积分数^[9]和胞元尺寸^[10]). Al-Ketan等人^[11]研究了带有不同胞元拓扑的点阵结构, 结果显示, 相

引用格式: 任会兰, 申海艇, 栗建桥. 单轴压缩下Ti-6Al-4V空心点阵结构的力学行为. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 293–304

Ren H L, Shen H T, Li J Q. Uniaxial compression mechanical behavior of Ti-6Al-4V hollow lattice structures (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 293–304, doi: 10.1360/SST-2020-0485

比于弯曲主导的结构, 拉伸主导的结构呈现出更高的刚度和强度. Ashby^[12]建立了不同变形主导机制下点阵结构的相对密度与弹性模量以及极限强度之间的理论联系. Han等人^[13]制备了胞元尺寸梯度分布的点阵结构, 研究发现试样在压缩过程中呈现出典型的层层塌陷失效模式, 并且发展了梯度结构中相对密度与模量之间的理论模型.

然而, 目前的工作大多集中在研究实体支柱的点阵结构, 只有少量研究关注到: 空心支柱因其具有更大的回转半径和更强的屈曲抵抗^[14], 从而使得空心点阵结构具有更优越的力学性能和能量吸收能力. 例如, Queheillalt和Wadley^[14]对比了相对密度都是2.8%的空心和实心点阵结构的极限强度, 结果显示空心点阵结构的极限强度接近实心点阵结构极限强度的2倍. Evans等人^[15]发现, 空心点阵结构的准静态能量吸收能力高于实心点阵结构和泡沫材料, 这主要归因于空心支柱更高的惯性矩抵抗了支柱的快速塌陷. Zhao等人^[16]进一步总结出: 通过改善惯性稳定性、冲击波效应和应变硬化等因素, 可使空心点阵结构的能量吸收能力显著提升.

尽管空心支柱的点阵结构已展现出优越的力学性能, 但是如何进一步提高它的力学特性、挖掘它的吸能潜力以便于获得更优越的吸能或轻量化结构, 仍然是一个挑战性的任务. Liu等人^[17]设计了空心点阵结构, 并且提出了一系列方案去改进它的能量吸收能力: (1) 设计梯度分布的空心管壁, 在压缩过程中形成从顶面至底面的塑性屈曲, 避免支柱的突然塌陷, 提高能量吸收能力; (2) 采用半径梯度变化的空心支柱, 使得塑性变形持续传播, 导致能量吸收密度提升近40%; (3) 在空心支柱内部填充水, 加强支柱的环向扩张, 抑制局部折叠, 增加单位体积的能量吸收能力.

为进一步提升空心点阵结构的力学性能, 本文提出在空心支柱内部添加不同分布特征的管状加强结构, 期待从试样内部提高胞元抵抗外部载荷的能力. 因此, 设计和制备了带有不同内部加强结构分布的空心点阵试样, 进行了准静态单轴压缩实验和相应的数值模拟, 研究了加强结构分布对空心点阵结构弹性模量、极限强度以及失效特征的影响. 同时, 针对力学性能最优的试样, 开展了一系列加强结构的参数化研究. 基于本研究, 期待合理地设计内部加强结构有助于改进空心点阵结构的力学性能.

2 实验方法

2.1 试样设计与制造

图1结合半胞元模型和试样结构显示了各组空心点阵试样的几何特征. 图1(a)为基本的空心点阵结构(basic structure, BS), 是由正交的网状空心支柱组成, 并且在相交的节点位置带有半径为 R 的倒角; 在基本结构的节点内部添加正交的管状加强结构, 获得了带有节点加强的空心点阵结构(basic structure with strengthened at nodes, SN), 如图1(b)所示; 图1(c)显示了管状加强结构分布在空心支柱内部(basic structure with strengthened on tube walls, SW). 需要指出的是, 试样SN和试样SW内部加强结构分布位置是完全互补的. 试样是由胞元沿着三个轴向坐标重复3次, 组成了完整的全尺寸试样. 单个胞元尺寸为 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ($L=W=H=5\text{ mm}$, $W_1=W/2$), 节点处的倒角半径 $R=1.3\text{ mm}$, 其他胞元尺寸见表1.

采用选择性激光熔融技术(SAS-120M)制备空心点阵试样(图1). 首先, 将三维几何模型导出成STL格式文件, 输入到切片软件ideaMaker, 转换为打印机器可识别的代码进行切片处理; 其次, 由数控成型系统利用激光束、热熔喷嘴等方式将Ti-6Al-4V粉末进行逐层堆积黏结, 叠加成型, 制造实体; 最后, 将试样从底板切割下来, 并用砂纸把试样打磨光滑. 表2给出了制备所得三组空心点阵结构试样的性能参数.

2.2 准静态加载实验

采用WDW-300材料测试机对制备的三组空心点阵试样进行单轴压缩实验, 加载应变率为 0.001 s^{-1} . 将试样放置在上下压盘中间, 且在放置过程中, 在试样的

表1 设计试样的结构参数(单位: mm)

Table 1 The structural parameters of the designed specimens (Unit: mm)

试样	参数值 ^{a)}					
BS	$D=2.40$		$d=1.60$			
SN	$D=2.40$	$d_1=1.60$	$t_1=0.40$	$h_1=2.50$	$l_1=2.50$	
SW	$D=2.40$	$d_2=0.80$	$t_2=0.40$	$h_2=2.25$	$l_2=2.25$	

a) D 和 d 分别指空心支柱的外径和内径, d_1 和 d_2 分别指加强结构的外径和内径, t_1 和 t_2 分别指不同位置加强结构的厚度, h_1 和 h_2 分别指不同位置加强结构的高度, l_1 和 l_2 分别指不同位置加强结构的长度

图 1 (网络版彩图)空心点阵结构设计. (a) 试样BS; (b) 试样SN; (c) 试样SW

Figure 1 (Color online) The designs of hollow lattice structure. (a) Specimen BS; (b) specimen SN; (c) specimen SW.

两端涂抹凡士林, 以减少摩擦力对实验结果的影响. 另外, 利用高速相机(FASTCAM SAS)对试样进行拍摄, 以获取试样在加载过程中的变形演化特征.

3 数值模拟

3.1 有限元模型

为直观揭示空心点阵结构压缩行为, 采用有限元程序描述试样的变形演化过程^[18]. 试样使用四面体单

元, 单元大小是0.2 mm. 如图2所示, 整个模拟系统简化为三部分: 移动的刚性壁、空心点阵结构和固定的刚性壁. 移动刚性壁施加在点阵结构顶面, 固定刚性壁分布在点阵结构底面. 移动刚性壁的速度定义为 $v = \dot{\epsilon} \times h$, 其中 $\dot{\epsilon}$ 是实验的加载应变率, h 是点阵结构的高度. 刚性壁与点阵结构之间的接触设置为“AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE”. 另外, 点阵结构的应力和应变计算为 $\sigma = F/A$, $\epsilon = \dot{\epsilon} \times t$, 其中 F 是点阵结构与移动刚性壁之间的相互作用力, A 是点阵结构相应的初始面积, t 是加载时间.

表 2 打印试样的性能参数

Table 2 The performance parameters of the printed specimens

试样	长×宽×高 (mm ³)	质量 (g)	$\rho^a)$ (g cm ⁻³)	$\bar{\rho}^a)$ (%)
BS	15.12×15.07×15.08	4.03±0.16	1.19±0.04	28.26±0.66
SN	15.10×15.18×15.06	4.85±0.23	1.43±0.07	34.07±0.81
SW	15.19×15.15×15.07	5.31±0.31	1.57±0.03	37.16±0.78

a) ρ 和 $\bar{\rho}$ 分别表示密度和相对密度

3.2 材料参数

本文采用Simplified Johnson-Cook模型描述Ti-6Al-4V材料的力学性能^[19], 其流动应力表达式为 $\sigma = (A + B\bar{\epsilon}^n)(1 + C\ln\dot{\epsilon}^*)$, 其中 A , B , C 和 n 是输入常数, $\bar{\epsilon}^n$ 是有效塑性应变, $\dot{\epsilon}^*$ 是有效应变率. 为获得精确的模拟参数, 制备实体Ti-6Al-4V圆柱试样(直径8 mm, 高度6 mm), 并且获得室温下的准静态应力应变曲线. 选取室温下参考应变率为 0.001 s^{-1} 时的实验数据拟合参数 A , B 和 n , 其拟合公式可简化为 $\sigma = A + B\bar{\epsilon}^n$, 拟合获得参数是: $A=842.7\text{ MPa}$, $B=498.4\text{ MPa}$, $n=0.4$, 应变率敏感系数 C 设为0.06, 另外, 使用最大剪应变失效准则作为Ti-6Al-4V材料准静态压缩过程的失效判据, 本文设置的最大剪切失效应变为0.2. 图3对比了模拟和实验的结果曲线, 两者吻合较好, 显示出模拟参数的有效性.

4 结果与讨论

4.1 加强结构分布对力学行为的影响

图4(a)~(c)给出了三组试样的应力应变曲线. 从图中可以看出, 试样变形特点有: 曲线在初始阶段为应力快速上升的线弹性阶段, 在该阶段, 试样发生均匀的弹性变形, 此时应力应变曲线的斜率即为试样的弹性模量 E . 线弹性阶段之后, 曲线逐渐展现出缓慢上升趋势直至达到峰值应力(峰值应力即为试样极限强度), 试样在该阶段伴随着空心支柱的塑性变形. 峰值应力之后, 试样在某一孔层塌陷, 曲线出现快速下降. 图中的模拟曲线也显示了与实验结果类似的曲线趋势和幅值. 在结构轻量化设计时, 弹性模量和极限强度是其关注的主要力学参数, 因此, 本文重点关注空心点阵结构在某一孔层塌陷之前的力学性能.

图4(d)是高速摄影记录的试样变形破坏的实验结

图 2 (网络版彩图)空心点阵结构有限元模型
Figure 2 (Color online) Finite element model of the hollow lattice structure.

图 3 (网络版彩图)实验曲线和模拟曲线对比
Figure 3 (Color online) Comparison of experimental and simulated curves.

果和数值模拟结果的对比. 数值模拟结果显示: 三组试样在弹塑性变形过程中, 其主要承载结构是平行于加载方向的支柱. 此外, 当压缩应力达到试样的极限强度, 三组试样均呈现出某一孔层塌陷失效的特点, 且具有随机性; 局部失效特征可知: 试样BS和SN为支柱

图4 (网络版彩图)模拟和实验结果对比。(a)~(c) 试样BS, SN和SW的应力应变曲线; (d) 试样整体和局部变形

Figure 4 (Color online) Comparison of simulated and experimental results. (a)~(c) The stress-strain curves of the specimen BS, SN and SW; (d) overall and local deformation of the specimens.

呈一定倾角的剪切断裂, 试样SW则是支柱插入节点内部导致试样断裂。

从应力应变曲线和变形过程的对比结果可知, 模拟结果与实验结果吻合较好, 因此认为模拟结果具有可靠性, 能够对实验结果进行有效的预测。

图5展示了各组试样实验结果的力学参数(σ/ρ 和 E/ρ 分别表示比极限强度和比弹性模量, 其中 ρ 是试样密度), 对比结果显示加强结构分布对准静态力学特性具有明显的影响。例如, 相比于试样BS, 试样SN和SW的弹性模量分别提升了12.6%和20%, 然而, 比弹性模量则分别降低了6.8%和8.3%。另外, 试样SN的极限强度仅提升了5.6%, 然而试样SW的极限强度则显著提

升了49%。同时, 试样SN的比极限强度出现降低, 而试样SW的比极限强度则提升了13%。

数据分析结果表明, 加强结构对力学性能, 尤其是极限强度有着显著影响。并且, 当加强结构分布在空心支柱内部时, 展现出对极限强度更为显著的提升作用, 而当加强结构分布在试样的节点处, 极限强度提升并不明显甚至出现比极限强度的降低。

图6(a)呈现了三组试样胞元的应力应变曲线, 相比于试样BS胞元, 试样SN和SW胞元的承载能力均有所提升, 试样SW胞元的承载能力提高了接近50%(应变0.07)。图6(b)显示出试样BS和SN的应力主要集中在胞元上下两端的支柱, 而试样SW胞元的应力集中在节

图5 (网络版彩图)对比不同空心点阵结构力学参数. (a) 弹性模量和比弹性模量; (b) 极限强度和比极限强度
Figure 5 (Color online) Comparison of mechanical parameters of the different hollow lattice structures. (a) Elastic modulus and specific elastic modulus; (b) ultimate strength and specific ultimate strength.

图6 (网络版彩图)不同试样胞元的压缩特征. (a) 胞元应力应变曲线; (b) 胞元应力分布; (c) 胞元局部截面应力分布
Figure 6 (Color online) Compressive characteristics of the cells of the different specimens. (a) The stress-strain curves of the cells; (b) stress distribution of the cells; (c) stress distribution of local cross section of the cells.

点区域. 从胞元1/4截面的应力分布可以清楚地看出试样BS的主要承载区域为加载方向的支柱, 该区域刚好是胞元的结构薄弱区域, 见图6(c); 试样SN的应力同样主要集中在支柱, 在节点位置加强的结构并未改变胞元结构薄弱的空心支柱区域, 因此对试样强度的提升有限; 而加强结构带来的质量增加, 使得试样SN的比极限强度降低; 与前面两种试样不同的是, 试样SW的应力主要集中在节点位置, 其加强结构增强了基本胞元的空心支柱管壁, 使得胞元的节点区域成为了结构的薄弱区域, 因此, 试样SW塌陷位置发生在节点区域(应变为0.09时, SW胞元节点断裂). 同时, 加强结构分布在空心支柱的管壁, 使得支柱的有效承载结构加强,

提升了胞元的承载能力, 因此试样SW的极限强度和比极限强度都得以提高. 实际上, 胞元的结构薄弱区域常伴随着明显的应力集中, 导致胞元在应力集中区出现断裂失效: 应力集中在支柱的试样BS和SN塌陷位置发生在支柱位置, 应力集中在节点的试样SW塌陷在节点位置.

4.2 加强结构形状参数对力学行为的影响

4.1节的分析表明, 加强结构分布在空心支柱管壁内部(试样SW)时更有利于提升空心点阵结构的弹性模量和极限强度. 为进一步优化加强结构设计, 我们研究了加强结构高度 h 和厚度 t 对压缩性能的影响. 图7展

图 7 (网络版彩图)试样SW结构设计示意图. (a) 试样SW; (b) 双胞元半截面体; (c) 截面ABCD

Figure 7 (Color online) Structural design of the specimen SW. (a) Specimen SW; (b) structural characteristic of local cells; (c) cross section ABCD.

表 3 试样SW加强结构形状的参数设置

Table 3 Parameter setting of the strengthening structure for specimen SW

参数	设置数值													
h (mm)	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75	2	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	
t (mm)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1	0.2	0.3	0.6	0.8	
h/H^*	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
t/d	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.0625	0.125	0.1875	0.375	0.5	
ρ (g cm $^{-3}$)	1.115	1.194	1.273	1.352	1.43	1.509	1.587	1.64	1.139	1.266	1.356	1.529	1.562	
$\bar{\rho}$ (%)	25.64	27.45	29.26	31.07	32.88	34.69	36.49	37.70	26.19	29.11	31.18	35.14	35.90	

示了试样SW加强结构参数化研究的示意图, 表3列举了试样SW加强结构的具体优化参数(ρ 和 $\bar{\rho}$ 分别表示设计试样的密度和相对密度). 使用 h/H^* 和 t/d ($H^*=H/2$, H 和 d 见图1)去表征结构特征.

图8给出带有不同加强结构形状参数的试样SW准静态压缩行为. 图8(a)展示了试样SW在不同加强结构高度 h 时, 其应力应变曲线的变化特征. 从图中可知, 随着加强结构高度的增加, 试样的流动应力逐渐增大. 图8(b)给出了加强结构高度 h 分别为0.25, 0.75和1.25 mm时试样的破坏特征. $h=0.25$ mm时, 试样的塌陷位置主要发生在空心支柱, 相应的局部应力截面图显示, 当应变为0.08时, 应力主要集中在支柱(应力集中的区域对应胞元的结构弱点), 当应变增大至0.15, 支柱断裂失效; 当 $h=0.75$ mm时, 试样在支柱和节点处都出现失效, 相应的局部应力截面图也显示支柱和节点都存在结构薄弱区域, 应力集中导致支柱和节点断裂; 当 $h=1.25$ mm时, 胞元的节点处成为结构弱点, 应力集中在节点, 随后试样塌陷在节点区域.

管状加强结构不同厚度 t 变化时, 试样的变形曲线

如图8(c)所示. 随着加强结构厚度的增加, 试样的屈服应力逐渐增大. 图8(d)展示当厚度 t 在0.1 mm时, 试样的塌陷发生在支柱, 相应的局部应力截面图显示, 应力主要集中在支柱(结构薄弱区域), 随后在应变等于0.15时支柱发生断裂; 当 $t=0.3$ mm时, 试样同时在支柱和节点处断裂; 当支柱厚度为0.8 mm时, 节点处是其结构弱点和应力集中区域, 此时试样的断裂位置主要分布在节点区域. 综上所述: 当管状加强结构高度或者厚度发生变化时, 胞元内部的结构薄弱区域和应力集中区域随之改变, 导致试样的塌陷位置发生变化.

图9(a)和(b)展示了加强结构高度改变时, 试样的弹性模量、比弹性模量、极限强度和比极限强度的变化特征. 随着加强结构高度增大, 弹性模量、比弹性模量和极限强度都呈现出上升的趋势. 这主要源于当加强结构高度增加时, 空心支柱的有效承载结构加强, 使得试样整体的承载能力提高. 当加强结构高度小于1.50 mm时, 胞元内部结构不够均衡, 但随着加强结构高度增大, 胞元应力分布趋于均匀, 并且承载能力逐渐提升; 当加强结构高度等于1.50 mm时($h/H^*=0.60$), 试

图8 (网络版彩图) 试样SW加强结构形状参数对压缩行为影响. (a), (c) 应力应变曲线; (b), (d) 变形失效特征

Figure 8 (Color online) The effect of the shape parameters of the strengthening structure on compressive behavior of the specimen SW. (a), (c) The stress-strain curves; (b), (d) deformation failure characteristics.

样的比极限强度出现极值, 此时, 胞元内部结构相对均衡, 应力分布比较均匀, 试样单位质量的承载能力最强; 当加强结构高度大于1.5 mm时, 超出1.5 mm的加强结构并未提供有效的承载能力, 反而增加了整个试样的质量, 导致试样的比极限强度降低.

图9(c)和(d)呈现了加强结构厚度增大时试样力学性能的变化规律. 当管状加强结构的厚度增加, 试样的弹性模量、比弹性模量以及极限强度都呈现出单调上升的趋势. 这同样是由于增加管状加强结构的厚度, 使得空心支柱的有效承载结构加强, 进而使得这些力学指标获得提升. 另外, 需要指出的是, 试样的比极限强度随着管状加强结构的厚度增加呈现出先增大、后减小的变化特征, 并且在厚度为0.3 mm时($t/d=0.1875$), 其比极限强度最高. 这归因于当胞元结构特征为 $t/d=0.1875$ 时, 胞元内部结构更加均衡, 承载过程中其应力分布更加均匀(图8(d), $t=0.3$ mm时), 使得试样承

受载荷的时间和失效发生时的应变更大, 提高了胞元的比极限强度. 综上所述: 合理的设计加强结构高度和厚度, 可使胞元的结构和受力更加均衡, 有利于获得更优的轻量化结构.

图10对比了同类点阵结构的比弹性模量和比极限强度^[7,15,17,20~24]. 优化之后空心点阵结构(试样SW)的比弹性模量和比极限强度分别接近 $3 \text{ GPa g}^{-1} \text{ cm}^3$ 和 $160 \text{ MPa g}^{-1} \text{ cm}^3$, 这明显大于其他空心点阵结构(椎体点阵结构(pyramidal lattice structure)^[7], 空心立方点阵(hollow cubic lattice), 空心金刚石点阵(hollow diamond lattice)^[24])的相应参数, 反映了优化空心点阵结构内部设计的有效性. 主要机制是试样SW加强了空心点阵内部的结构薄弱区域, 使得试样支柱的有效承载结构加强, 改进了其比弹性模量和比极限强度. 另外, 试样BS比相同相对密度实心点阵结构(菱形结构(rhombic structures), 实体点阵结构(solid lattice structure)^[21])的

图 9 (网络版彩图) 试样 SW 加强结构形状参数对力学性能影响. (a), (b) 加强结构高度 h 的变化; (c), (d) 加强结构厚度 t 的变化
Figure 9 (Color online) The effect of the shape parameter of strengthening structure on mechanical property. (a), (b) h variation; (c), (d) t variation.

图 10 (网络版彩图) 不同多孔金属结构力学参数对比. (a) 比弹性模量; (b) 比极限强度

Figure 10 (Color online) Comparison of mechanical parameters of the different porous metals. (a) Specific elastic modulus; (b) specific ultimate strength.

比极限强度高. 事实上, 点阵结构的极限压缩强度可用支柱的非弹性屈曲强度预测, 空心点阵结构因其具有更大的惯性矩而表现出更高的极限强度, 这也体现了空心点阵结构力学性能的优势.

对比变形机制是拉伸主导点阵结构(立方点阵结构(cubic lattice structure), 实体立方点阵(solid cubic lattice), 空心立方点阵(hollow cubic lattice)^[22]以及本文中试样 BS, SN, SW)和弯曲主导点阵结构(G7 点阵结构

(G7 lattice structure), 菱形结构(rhombic structure), 椎体点阵结构(pyramidal lattice structure)^[20], 实体金刚石结构(solid diamond structure), 空心金刚石结构(hollow diamond structure), 椎体空心结构(pyramidal hollow)^[14]的比参数, 拉伸主导结构因其承载方向平行于加载方向而具有更高的比模量和比强度。例如, 本文中空心点阵结构(试样SW)的比极限强度接近实体金刚石点阵结构(solid diamond lattice)的2倍。另外, 对比点阵结构与目前商用铝合金泡沫(aluminum foam)的比极限强度可知: 当相对密度较低时, 他们的比极限强度相差较小; 而当相对密度较高时, 点阵结构呈现出明显的比极限强度优势。

5 结论

采用选择性激光熔融技术制备了带有不同内部加强结构分布特征的Ti-6Al-4V空心点阵试样, 进行准静态压缩实验和相应的数值模拟, 研究加强结构分布对空心

点阵结构压缩行为的影响。同时, 分析加强结构形状参数对试样SW力学性能的影响, 研究结论总结如下。

(1) 当加强结构分布在试样节点内部时, 其比弹性模量和比极限强度分别降低了7%和12%, 试样塌陷在支柱区域; 当加强结构分布在试样空心支柱管壁内部时, 其弹性模量、极限强度和比极限强度分别提升了20%, 49%和13%, 试样在节点位置发生塌陷。

(2) 不同的加强结构分布, 导致胞元的结构弱点、应力分布、承载能力等发生变化, 从而使得试样表现出不同的失效特征和力学性能。

(3) 对于加强结构分布在支柱的空心点阵结构, 当加强结构高度与半胞元高度比接近0.6, 或者加强结构厚度与试样支柱内径的比接近0.1875时, 胞元内部结构更加均衡, 承载时应力分布更加均匀, 更有利于获得理想的轻量化结构。

(4) 合理地设计空心点阵结构, 如添加加强结构和优化加强结构形状参数, 有利于获得更加理想的轻量化结构。

参考文献

- 1 Zhang Q C, Chen A P, Chen C Q, et al. X-shaped ultralight weight lattice structured core: Mechanical model and structural analysis. *Sci Sin Tech*, 2009, 39: 1216–1227 [张钱城, 陈爱萍, 陈常青, 等. X型超轻点阵结构芯体(II): 细观力学建模与结构分析. 中国科学E辑: 技术科学, 2009, 39: 1216–1227]
- 2 Zhu Y, Zhang J X, Qin Q H. Dynamic compressive response of metal orthogonal corrugated sandwich structure (in Chinese). *Explosion Shock Waves*, 2020, 40: 013101 [朱源, 张建勋, 秦庆华. 金属正交波纹夹芯结构的动态压缩响应. 爆炸与冲击, 2020, 40: 013101]
- 3 Soro N, Attar H, Wu X, et al. Investigation of the structure and mechanical properties of additively manufactured Ti-6Al-4V biomedical scaffolds designed with a Schwartz primitive unit-cell. *Mater Sci Eng-A*, 2019, 745: 195–202
- 4 Vesnjak M, Kovačič A, Tane M, et al. Compressive properties of lotus-type porous iron. *Comput Mater Sci*, 2012, 65: 37–43
- 5 Kramberger J, Sterkuš K, Glodež S. Damage and failure modeling of lotus-type porous material subjected to low-cycle fatigue. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2016, 10: 142–151
- 6 Li P, Wang Z, Petrinic N, et al. Deformation behaviour of stainless steel microlattice structures by selective laser melting. *Mater Sci Eng-A*, 2014, 614: 116–121
- 7 Li S J, Xu Q S, Wang Z, et al. Influence of cell shape on mechanical properties of Ti-6Al-4V meshes fabricated by electron beam melting method. *Acta Biomater*, 2014, 10: 4537–4547
- 8 Cuadrado A, Yáñez A, Martel O, et al. Influence of load orientation and of types of loads on the mechanical properties of porous Ti6Al4V biomaterials. *Mater Des*, 2017, 135: 309–318
- 9 Epasto G, Palomba G, Andrea D D, et al. Ti-6Al-4V ELI microlattice structures manufactured by electron beam melting: Effect of unit cell dimensions and morphology on mechanical behavior. *Mater Sci Eng-A*, 2019, 753: 31–41
- 10 Yang L, Yan C, Han C, et al. Mechanical response of a triply periodic minimal surface cellular structures manufactured by selective laser melting. *Int J Mech Sci*, 2018, 148: 149–157
- 11 Yan C, Hao L, Hussein A, et al. Evaluations of cellular lattice structures manufactured using selective laser melting. *Int J Mach Tools Manuf*, 2012, 62: 32–38

- 12 Al-Ketan O, Rowshan R, Abu Al-Rub R K. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials. [Addit Manuf](#), 2018, 19: 167–183
- 13 Ashby M F. The properties of foams and lattices. [Phil Trans R Soc A](#), 2006, 364: 15–30
- 14 Han C, Li Y, Wang Q, et al. Continuous functionally graded porous titanium scaffolds manufactured by selective laser melting for bone implants. [J Mech Behav Biomed Mater](#), 2018, 80: 119–127
- 15 Queheillalt D T, Wadley H N G. Pyramidal lattice truss structures with hollow trusses. [Mater Sci Eng-A](#), 2005, 397: 132–137
- 16 Evans A G, He M Y, Deshpande V S, et al. Concepts for enhanced energy absorption using hollow micro-lattices. [Int J Impact Eng](#), 2010, 37: 947–959
- 17 Zhao H, Elnasri I, Li H J. The mechanism of strength enhancement under impact loading of cellular materials. [Adv Eng Mater](#), 2006, 8: 877–883
- 18 Liu Y, Schaedler T A, Jacobsen A J, et al. Quasi-static energy absorption of hollow microlattice structures. [Compos Part B-Eng](#), 2014, 67: 39–49
- 19 Ning J, Song W, Yang G. Failure analysis of plastic spherical shells impacted by a projectile. [Int J Impact Eng](#), 2006, 32: 1464–1484
- 20 Biswas N, Ding J L. Numerical study of the deformation and fracture behavior of porous Ti6Al4V alloy under static and dynamic loading. [Int J Impact Eng](#), 2015, 82: 89–102
- 21 Yin S, Wu L, Ma L, et al. Pyramidal lattice sandwich structures with hollow composite trusses. [Compos Struct](#), 2011, 93: 3104–3111
- 22 Kadkhodapour J, Montazerian H, Darabi A C, et al. Failure mechanisms of additively manufactured porous biomaterials: Effects of porosity and type of unit cell. [J Mech Behav Biomed Mater](#), 2015, 50: 180–191
- 23 Queheillalt D T, Wadley H N G. Cellular metal lattices with hollow trusses. [Acta Mater](#), 2005, 53: 303–313
- 24 Queheillalt D T, Wadley H N G. Titanium alloy lattice truss structures. [Mater Des](#), 2009, 30: 1966–1975
- 25 Raj R E, Parameswaran V, Daniel B S S. Comparison of quasi-static and dynamic compression behavior of closed-cell aluminum foam. [Mater Sci Eng-A](#), 2009, 526: 11–15

Uniaxial compression mechanical behavior of Ti-6Al-4V hollow lattice structures

REN HuiLan, SHEN HaiTing & LI JianQiao

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

This study has designed and manufactured Ti-6Al-4V hollow lattice specimens with different strengthening-structure distributions, namely, basic hollow lattice structure (specimen BS), hollow lattice structure strengthened at the nodes (specimen SN), and hollow lattice structure strengthened at the tube walls (specimen SW). The effects of the strengthening-structure distribution and shape parameter on the quasi-static mechanical behavior of the hollow lattice structures were investigated using experimental test and numerical simulation. The experimental results showed that compared with specimen BS, the specific elastic modulus and specific ultimate strength of specimen SN were reduced by 7% and 12%, respectively. Meanwhile, the elastic modulus, ultimate strength, and specific ultimate strength of specimen SW increased by 20%, 49%, and 13%, respectively. The collapse position of specimen SN occurred at the struts, whereas that in specimen SW was at the nodes. The different distributions of the strengthening structure induced changes in the structural weakness, stress distribution, and load-bearing capacity of the cells. Therefore, these three specimen types exhibited different failure characteristics and mechanical properties. Among the three specimens, only the strengthening structures of specimen SW reinforced the structural weaknesses and improved the load-bearing capacity of the cells. Hence, specimen SW demonstrated a significant advantage in terms of mechanical property. In addition, the numerical simulation studied the effect of the shape parameters of the strengthening structure on the mechanical property of specimen SW. The simulation results indicated that when the ratio of the strengthening-structure height to the hemi-cell height was 0.6 or that of the strengthening-structure thickness to the internal diameter of the hollow strut was 0.1875, the strengthening structure of the cells became more balanced and the load-bearing capacity became stronger than those in the other types. Therefore, based on our work, we can conclude that a reasonable structural design is conducive in obtaining a lightweight structure with superior mechanical properties.

hollow lattice structure, strengthening structure distribution, shape parameter

doi: [10.1360/SST-2020-0485](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0485)