

引文格式: 林开杰, 吴立斌, 杨建凯, 等. 激光增材制造拓扑优化轻量化圆锥构件力学性能研究 [J]. 航空制造技术, 2022, 65(14): 101-109.
 LIN Kaijie, WU Libin, YANG Jiankai, et al. Mechanical properties of topologically lightweight conical components fabricated by laser additive manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65(14): 101-109.

激光增材制造拓扑优化轻量化圆锥构件力学性能研究*

林开杰^{1,2}, 吴立斌^{1,2}, 杨建凯^{1,2}, 张 晗^{1,2}, 顾冬冬^{1,2}

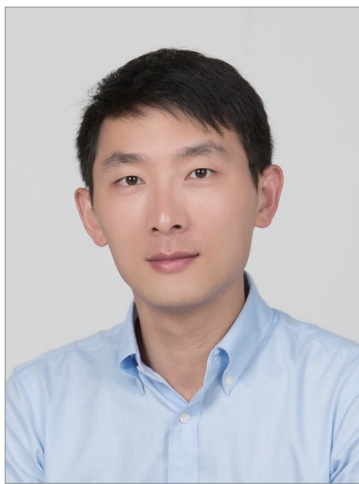
(1. 南京航空航天大学, 南京 210016;

2. 江苏省高性能金属构件激光增材制造工程实验室, 南京 210016)

[摘要] 航空航天轻量化结构通常需兼具减重、承载、减振、抗冲击等多种性能要求。但结构在减重的同时往往会伴随着承载、抗冲击性能的降低。基于变密度法对圆锥结构进行了拓扑优化设计, 并利用激光粉末床熔融技术实现了圆锥轻量化构件一体化成形, 研究了轴向压缩试验下壁厚对拓扑优化构件力学性能的影响机制。试验结果表明, 随着壁厚由 1.0 mm 增至 3.0 mm, 结构的比吸能先增后减, 壁厚 2.5 mm 的构件比吸能最大, 为 11.48 J/g。采用有限元模拟方法研究了拓扑优化圆锥结构在压缩过程中的应力分布情况, 结果表明, 构件发生屈曲变形及断裂的主要原因为较大的面内压应力, 内外壁应力水平差异导致了结构发生不同方向的屈曲变形, 且随着壁厚的增加, 圆锥顶部出现的应力集中及上层屈曲程度的降低均导致结构不能持续增加能量吸收。

关键词: 拓扑优化; 圆锥轻量化构件; 增材制造(AM); 激光粉末床熔融; 比能量吸收

DOI: 10.16080/j.issn1671-833x.2022.14.101



林开杰

副教授, 工学博士, 研究方向为高性能金属构件激光增材制造。

圆锥结构轴向压缩时具备良好的吸能、承载及阻尼特性^[1], 在导弹弹头壳体、激波锥等飞行器装置上有着广泛应用。影响圆锥结构力学性能的结构参数主要为壁厚和锥角^[2]。荆友录等^[3]通过数值模拟研究了 2°~8° 的锥角对圆锥管抗冲击性能的影响, 发现随锥角的增加, 圆锥管比能量吸收及载荷比先增加后减小, 锥角为 4.3° 时, 圆锥管比能量吸收及载荷比最大, 分别为 7.2 J/g 和 0.94。Tastan 等^[4]以最大化比能量吸收和冲击力效率为目标, 优化了圆锥管结构的壁厚及锥角, 结果表明, 当壁厚为 2.348 mm, 锥角为 15° 时, 结构具

有最优的比能量吸收和冲击力效率, 分别为 19.33 J/g 和 0.6698。对于航空航天飞行器, 足够的重量能够保证服役过程中的承载、抗冲击性能和安全可靠, 同时也意味着更高的能耗和成本。轻量化是航空航天领域永恒追求的目标, 在构件轻量化过程中能够降低制造成本, 同时也会使构件的承载、抗冲击性能以及安全系数降低^[5], 保证构件服役过程中的安全性及使用强度是轻量化设计的基本要求, 因此, 寻求轻量化和承载、抗冲击性能这一对矛盾之间的平衡至关重要。如何在满足甚至提升构件承载、抗冲击性能的前提下, 尽可能实现轻

* 基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB1715400); 国家自然科学基金(51905269); 江苏省第十五批“六大人才高峰”创新人才团队项目(TD-GDZB-001)。

量化已成为国内外研究热点。

拓扑优化作为一种结构优化方法,可在保证甚至超过原有性能要求的同时实现减重^[6-7],其本质是将合适尺寸和构型的孔洞或材料置于整体构件的适当位置,达到材料用量少、受载应力分布均匀、强度高设计目标^[8-9]。Wang等^[10]针对卫星载荷适配器进行了拓扑优化设计,在仅牺牲6.1%结构刚度的同时减重16%,依旧满足构件使用性能要求。Aage等^[11]对机翼进行了拓扑优化设计,发现在提升0.8%~0.9%性能的同时减重2%~5%。因此,拓扑优化是实现圆锥结构轻质高强的有效途径。目前圆锥结构的传统制备工艺主要集中于金属旋压^[12]和深冲压成形^[13],但传统成形方法仅适用于成形构型简单的结构,在复杂、不均匀空间结构的成形方面具有局限性^[14]。激光增材制造具有结构设计自由度高、材料浪费少、自动化程度高等优点^[15-16],为复杂拓扑优化结构的制备提供了新途径^[17]。激光粉末床熔融(Laser powder bed fusion, LPBF)作为激光增材制造的重要分支,通过金属粉末熔化/快速凝固逐层堆积原理实现金属构件的致密成形,具有成形精度高、适用性广的特点^[18-19],非常适用于复杂拓扑优化结构的成形。结合LPBF与拓扑优化方法,有望实现圆锥轻量化结构的一体化设计与成形,实现圆锥结构轻量化与力学性能的协同提升。

本研究采用变密度法对圆锥结构进行拓扑优化设计。采用LPBF工艺实现了优化后圆锥轻量化结构的成形,通过显微分析方法评估了结构的成形质量。通过准静态压缩试验研究了壁厚对轻量化结构承载性能及吸能能力的影响,并通过观察分析结构的断口形貌阐明结构的断裂形式及机理。结合有限元模拟获得结构压缩过程中的应力分布,进一步解析了结构的变形行为。

1 结构拓扑优化设计

1.1 优化方法及原理

本研究采用变密度法对圆锥结构进行优化设计,基于固体各向同性材料惩罚(Solid isotropic material with penalization, SIMP)模型^[20],建立拓扑优化数学模型:(1)通过拓扑优化软件及模拟软件计算得出,当体积分数小于40%时,所得圆锥拓扑优化结构中有很多激光粉末床熔融技术难以成形的细小杆及薄壁,当体积分数大于40%时,结构的减重效果不明显,结构构型较为简单,因此确定最终约束条件(设计空间体积分数)等于40%;(2)优化目标为圆锥结构轴向压缩下的最大化结构静力学刚度;(3)设计变量为设计空间的单元相对密度。

设计变量可表示为

$$\mathbf{X} = [x_{11} x_{12} x_{13} \cdots x_{ij}]^T, x_{ij} \in \mathbf{R},$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, m, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中, \mathbf{X} 为单元相对密度; x_{ij} 为第 i 个子域内第 j 个单元的相对密度。

优化目标可表示为

$$C(\mathbf{X}) = \mathbf{U}^T \mathbf{K} \mathbf{U} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \mathbf{u}_{ij}^T \mathbf{k}_{ij} \mathbf{u}_{ij} \quad (2)$$

式中, $C(\mathbf{X})$ 为结构轴向压缩方向下

的柔顺度,即结构轴向压缩方向下刚度的倒数; \mathbf{U} 为结构轴向压缩方向下的位移矢量; \mathbf{K} 为结构轴向压缩方向的刚度矩阵; \mathbf{u}_{ij} 为第 i 个子域内第 j 个单元的位移矢量; \mathbf{k}_{ij} 为第 i 个子域内第 j 个单元的刚度矩阵。

约束条件可表示为

$$\begin{cases} V = fV_0 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} v_{ij} \\ \mathbf{F} = \mathbf{K} \mathbf{U} \\ 0 \ll x_{\min} \ll x_{ij} \ll x_{\max} \ll 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, V 为优化后模型的总体积; f 为优化后模型保留的体积分数; v_0 为优化前模型的初始体积; v_{ij} 为第 i 个子域内第 j 个单元的体积; \mathbf{F} 为结构所受载荷矢量; x_{\min} 为单元相对密度的取值下限; x_{\max} 为单元相对密度的取值上限。

1.2 圆锥轻量化结构设计

图1为圆锥结构拓扑优化的过程,主要包括以下步骤:(1)采用Solidworks软件建模得到初始圆锥结构,高度 H 为30 mm,底面宽度 W 为30 mm,壁厚 T 为1 mm;(2)采用尺寸为0.8 mm的Tetrahedrons四面体单元对圆锥结构进行网格划分,数量为36428;(3)在圆锥结构底部施加载荷,其中固定板为非设计区域,圆锥结构为设计区域;(4)设定

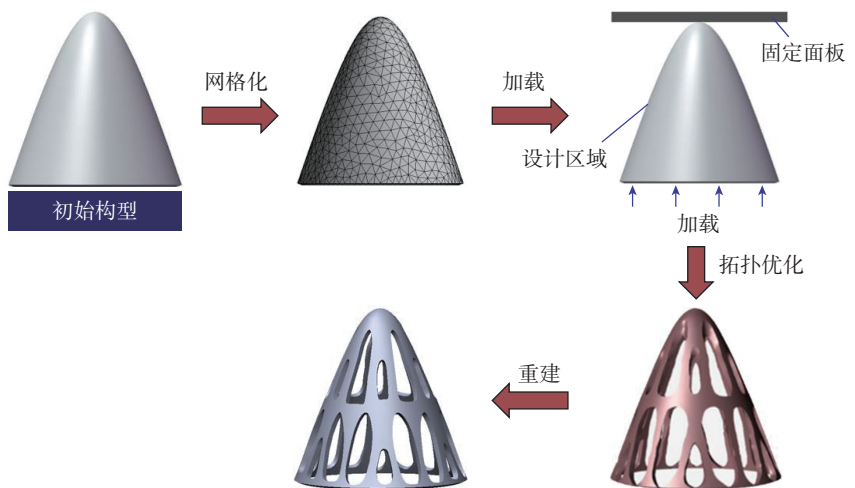


图1 圆锥轻量化结构的拓扑优化过程

Fig.1 Topology optimization process of conical lightweight (CL) structure

拓扑优化后结构体积为初始体积的40%，拓扑优化后的结果如图1所示；(5)考虑工艺约束性及成形性，采用Solidworks软件对拓扑优化结构进行模型重建(图1)。

2 试验及方法

2.1 激光粉末床熔融成形

本试验成形设备采用南京航空航天大学自研的激光粉末床熔融设备，主要由最大功率500 W、光斑直径70 μm的YLR-500光纤激光器(IPG Laser GmbH, Germany)、自动铺粉装置、氩气保护系统及计算机控制系统组成。基于前期关于LPBF成形AlSi10Mg的工艺探索^[21-22]，采用优化的激光加工参数为：激光功率400 W、层厚30 μm、扫描速度2200 mm/s、扫描间距50 μm，采用棋盘状的扫描策略，相邻层之间的激光扫描矢量方向旋转37°。

2.2 显微表征和力学试验

成形后采用电火花线切割使构件与基板分离，然后在酒精中超声清洗1 h并干燥。根据ASTM F3301—18标准对成形构件进行去应力退火，加热温度为285 ℃，保温时间为2 h，冷却方式为炉冷。基于标准金相制备方法对构件截面打磨、抛光，采用PMG3光学显微镜(Olympus Corporation, Japan)观察构件的成形性特征，利用场发射扫描电子显微镜(FE-SEM,

Hitachi, Japan)对构件的表面形貌进行观察表征。使用CMT5205万能试验机(MTS Industrial Systems, China)对构件进行了室温压缩试验，压缩速率为2 mm/min(图2(a))，为了减小误差，每种圆锥轻量化构件制备了3个相同的样品并分别进行了试验。使用摄影机(Sony, Japan)记录构件完整的压缩过程并获取变形断裂的瞬间。最后，使用FE-SEM对压缩断口进行形貌观察分析。

2.3 有限元分析

采用ANSYS LS-DYNA软件对结构进行准静态压缩模拟，研究压缩过程中结构的变形行为。如图2(b)所示，圆锥轻量化结构位于两刚性板之间，对上面板施以垂直向下的位移，对下面板施加固定约束。结构自身的接触采用自动单面接触算法，而圆锥轻量化结构与上下面板之间的接触采用自动面面接触算法，静摩擦系数和动摩擦系数均为0.2^[21]。赋予轻量化结构模型AlSi10Mg材料特性：密度 $\rho=2.67 \text{ g/cm}^3$ ，弹性模量 $E=64.8 \text{ GPa}$ ，屈服应力 $\sigma_y=250 \text{ MPa}$ ，极限应力 $\sigma_u=343 \text{ MPa}$ ，泊松比 $\nu=0.33$ ，其中弹性模量、屈服应力及极限应力均由拉伸试验获得(图2(c))，拉伸试样与拓扑优化构件采用相同工艺参数成形并依据GB/T 228.1—2010^[23]标准进行加工，最终的失效行为采用Johnson-Cook模型作为评判标准。

2.4 压缩性能指标

为了定量比较结构的压缩性能，根据载荷位移曲线得到衡量结构承载、吸能能力的3个关键指标，即吸能(Energy absorption, EA)、平均压溃载荷(Mean crush force, MCF)和比吸能(Specific energy absorption, SEA)^[24-25]。

吸能代表压缩过程中结构所吸收的能量，由载荷-位移曲线的积分面积决定，即

$$EA(d) = \int_0^d F(x) dx \quad (4)$$

式中， $F(x)$ 是瞬间压缩载荷； d 为压缩的全部位移量。

平均压溃载荷即压缩过程中载荷的平均值，表征着承载力水平，即

$$MCF = \frac{EA}{d} \quad (5)$$

式中，EA为结构所吸收的能量。

比吸能是指结构单位质量或体积所吸收的能量，是衡量结构吸能能力的重要指标。数值越大，结构的吸能能力越好，即

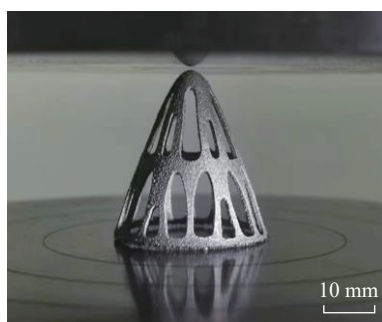
$$SEA(d) = \frac{EA(d)}{m} \quad (6)$$

式中， m 为结构的总质量。

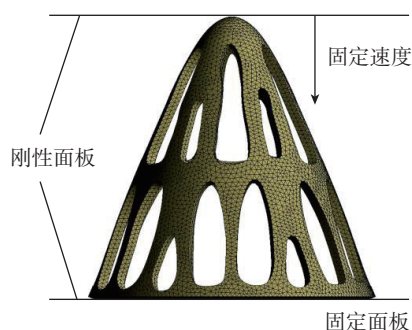
3 结果与讨论

3.1 圆锥轻量化结构的LPBF成形质量

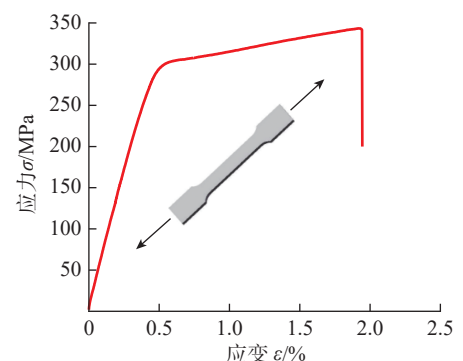
图3(a)为LPBF成形的不同



(a) 准静态压缩试验的圆锥轻量化结构实体



(b) 圆锥轻量化结构准静态压缩有限元模型



(c) 沉积态AlSi10Mg合金的拉伸应力-应变曲线

图2 不同圆锥轻量化结构的压缩试验及有限元模拟

Fig.2 Compression test setting and finite element simulation of CL structure

壁厚圆锥轻量化构件的实物图,构件表面未观察到宏观裂纹和孔隙。图3(b)为构件随壁厚变化的致密度演化行为,可知,不同壁厚的圆锥轻量化构件致密度变化不大,当壁厚 T 由 1.0 mm 增至 3.0 mm,构件的致密度由 99.12% 逐步降至 98.44%。其中,壁厚为 1.0 mm 的构件具有最高的致密度(99.12%),这主要是因为壁厚较大的构件每层成形过程中激光束扫过的次数更多且时间更久,使熔池温度更高。而熔池温度高会使气体在熔池中的溶解度提高,当熔池冷却时气体残留在内部形成孔洞,最终导致致密度下降。为进一步研究致密度的影响因素,选取致密度最高的 $T=1.0$ mm 构件进行成形性分析,图3(c)为构件横截面的 OM 图,可知,构件几乎完全致密,只在边界存在少量孔洞。为进一步分析该构件的成形质量,使用 SEM 观察了构件特定位置的表面形貌(图3(d)),结构轮廓明显,表面仅黏结部分未熔粉末,这主要是因为熔化的熔池边界吸附周围的未熔粉末^[26],这在激光粉末床熔融中是很普遍的现象。根据以上结果可知,LPBF 制备的构件具有致密的微观结构及良好的成形质量。

3.2 圆锥轻量化结构的力学性能及变形行为

对于圆锥轻量化构件,开孔的存在可引导结构在压溃变形时产生合理的变形,改善结构的吸能特性,同时开孔处壁厚急剧变化,破坏了构件的连续性,改变了结构上的应力分布。因此,构件的屈曲变形主要发生于开孔附近区域,同时沿着开孔向左右两侧扩展^[27]。图4为不同壁厚圆锥轻量化构件的载荷-位移曲线(I~III对应 $T=2.0$ mm 构件压缩典型阶段,IV和V对应 $T=3.0$ mm 构件压缩典型阶段),可知,当壁厚增至 3.0 mm 时,结构的载荷-位移曲线趋势发生变化。因此以 $T=2.0$ mm 及 $T=3.0$ mm 构件为例分析压缩变形过

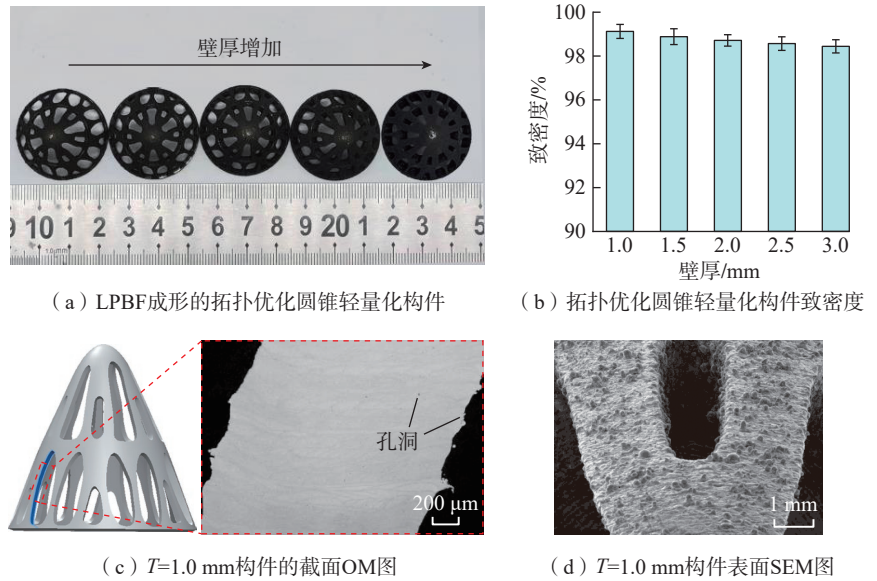


图3 LPBF 成形圆锥轻量化构件的成形质量
Fig.3 Forming quality of LPBF-processed CL components structures

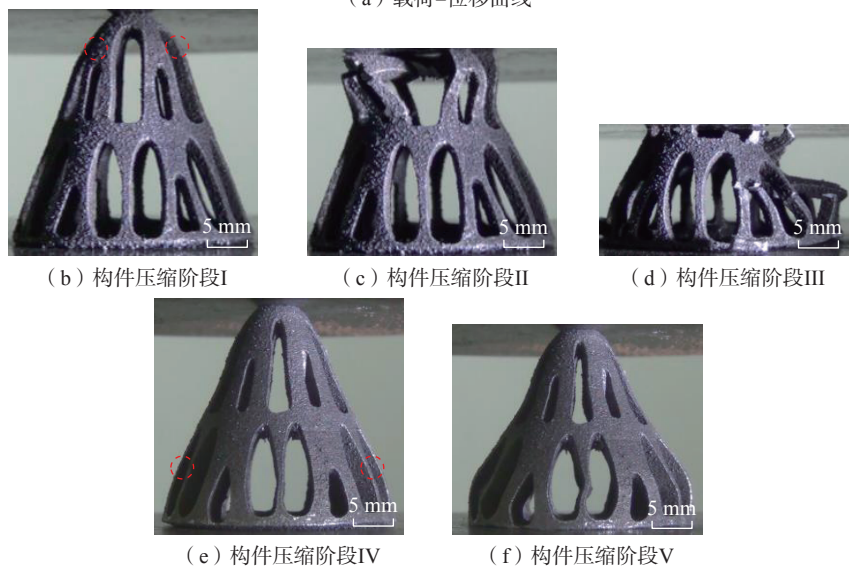
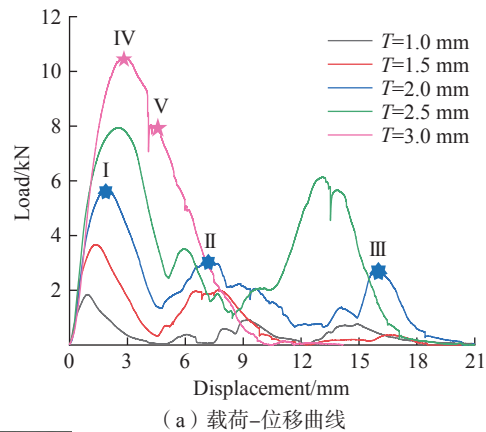


图4 LPBF 制备圆锥轻量化构件的载荷-位移曲线和构件压缩典型阶段

Fig.4 Load-displacement curves of LPBF-processed CL components and typical stage of component compression

程。对于 $T=2.0\text{ mm}$ 构件, 构件从顶端(直径较小端)开始发生初始屈曲。载荷-位移曲线在初始阶段快速上升, 在位移 1.9 mm 处出现初始峰值载荷 (5.7 kN); 此时构件于上部大孔洞处开始形成外凸屈曲(图 4 (b) 红色圆圈中所示), 随即载荷快速减小, 外凸屈曲发展至最终状态(屈曲断裂), 对应曲线中的第 1 个谷值载荷; 当位移为 7.1 mm 时出现 3.1 kN 的峰值载荷, 此时构件于上部小孔洞处开始产生内凹屈曲(图 4 (c)), 当内凹屈曲完全形成时, 则曲线第 2 次出现谷值载荷; 位移为 16 mm 时出现 2.66 kN 的峰值载荷, 构件发生第 3 次屈曲变形及断裂(图 4 (d))。对于 $T=3.0\text{ mm}$ 构件, 压缩载荷在初始阶段快速上升, 在位移为 2.9 mm 处出现初始峰值载荷 (10.5 kN), 此时构件于下部孔洞中部开始形成外凸屈曲(图 4 (e)), 随后载荷快速减小, 在位移 4.4 mm 处形成第 2 个小波峰, 载荷为 8.1 kN , 此时对应的变形行为如图 4 (f) 所示, 构件发生明显的外凸屈曲, 最终结构在位移 14.1 mm 处完全失去承载能力, 相比 $T=2.0\text{ mm}$ 构件, $T=3.0\text{ mm}$ 构件从下部孔洞开始形成屈曲变形, 且整个压缩过程只发生 1 次完整的屈曲变形。由压缩曲线及变形过程可知, 对于壁厚为 $1.0\sim 2.5\text{ mm}$ 的构件, 载荷曲线呈现有

规律的波动, 这些波动表示结构以稳定的渐近压缩变形模式产生局部屈曲变形, 构件均呈现出外凸屈曲与内凹屈曲组合且相继发生的渐近压缩变形模式, 为局部屈曲, 而当壁厚为 3.0 mm 时, 构件更倾向于发生整体-局部相关屈曲变形, 即结构部分发生整体屈曲, 部分发生局部屈曲。

图 5 (a) 为构件的初始峰值载荷 F_{fst} 和平均载荷 F_{avg} 。可知, 当壁厚由 1.0 mm 增至 3.0 mm , 初始峰值载荷由 1.8 kN 增至 10.5 kN , 平均载荷力由 0.41 kN 增至 3.7 kN , 结构的初始峰值载荷和平均载荷随壁厚增加而增加, 主要是因为壁厚的增加提高了结构的压缩强度, 进一步提升了结构的承载能力。图 5 (b) 为构件的能量吸收-位移图, 当位移小于 1.5 mm 时, 不同壁厚构件间的吸能很接近, 之后吸能的差距不断扩大。整体上, 壁厚 1.0 mm 和 1.5 mm 的构件由于平均载荷力较小, 吸能增长的速度较平缓、值较小, 最终壁厚 1.0 mm 的构件吸能值达到 8.76 J , 壁厚 1.5 mm 的构件的吸能值则为 17.9 J 。对于壁厚为 2.0 mm 的构件, 当位移在 $0\sim 1.9\text{ mm}$ 、 $4.7\sim 7.1\text{ mm}$ 及 $15\sim 16\text{ mm}$ 区间(屈曲阶段), 吸能增长的速度较快, 其余阶段相对平缓, 最终吸能值为 40.5 J 。对于壁厚为 2.5 mm 的构件, 当位移在 $0\sim 3.1\text{ mm}$ 及 $10.5\sim 14.8\text{ mm}$ 区间

(屈曲阶段), 构件吸能增长的速度较快, 其余阶段增长平缓, 最终吸能值为 64.2 J 。对于壁厚为 3.0 mm 的构件, 当位移在 $0\sim 2.8\text{ mm}$ 区间(屈曲阶段), 构件吸能增长的速度较快, 最终吸能值为 52.39 J 。构件的比吸能如图 5 (c) 所示, 壁厚为 2.5 mm 的构件比吸能最大, 为 11.48 J/g , 其次是壁厚为 2.0 mm 的构件 (7.44 J/g), 壁厚为 1.5 mm 的构件 (5.15 J/g) 及壁厚为 1.0 mm 的构件 (3.9 J/g)。对于壁厚 3.0 mm 的构件, 壁厚的增加会提升结构的压缩强度, 使得构件在轴向压缩下不易发生变形, 受载端不易发生局部屈服, 同时整体屈曲变形是一种能量吸收效率很低的变形模式。因此, 当壁厚为 2.5 mm 时, 构件具有最佳的吸能特性。

3.3 圆锥轻量化结构的有限元分析

图 6 (a)~(e) 为不同壁厚圆锥轻量化结构首次发生屈曲变形时的应力分布图, 图 6 (f) 为图 6 (a)~(e) 中圆圈标记区域的应力值。如图 6 (a)~(d) 所示, 圆锥结构中的标记区域存在应力集中现象, 且存在较大面内应力, 导致该区域发生屈曲变形, 同时内壁应力高于外壁, 内壁先于外壁发生断裂, 因此标记区域发生外凸屈曲变形及断裂。由图 6 (f) 可知, 随着壁厚由 1.0 mm 增至 3.0 mm , 圆圈内的应力值逐渐降

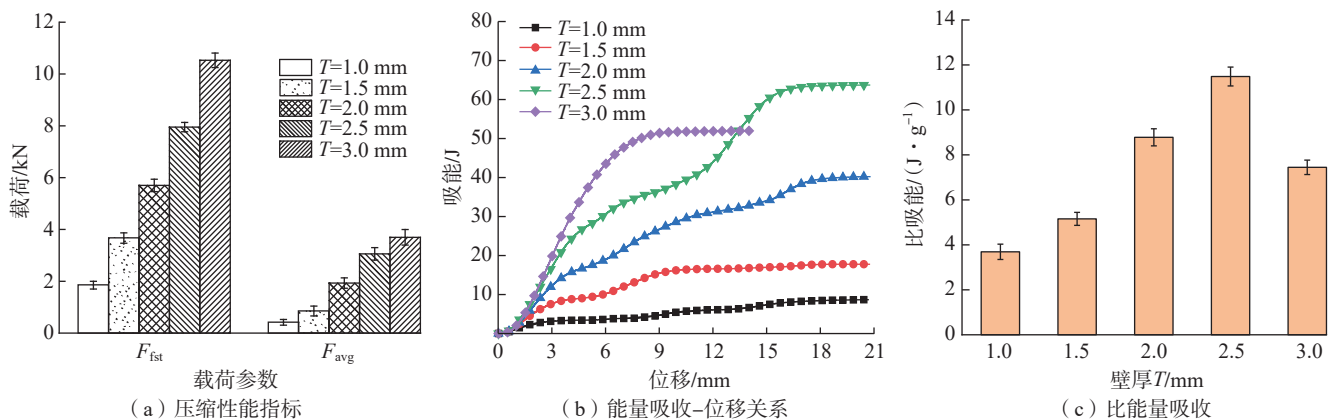


图 5 LPBF 成形圆锥轻量化构件的压缩性能

Fig.5 Compressive properties of LPBF-processed CL structures

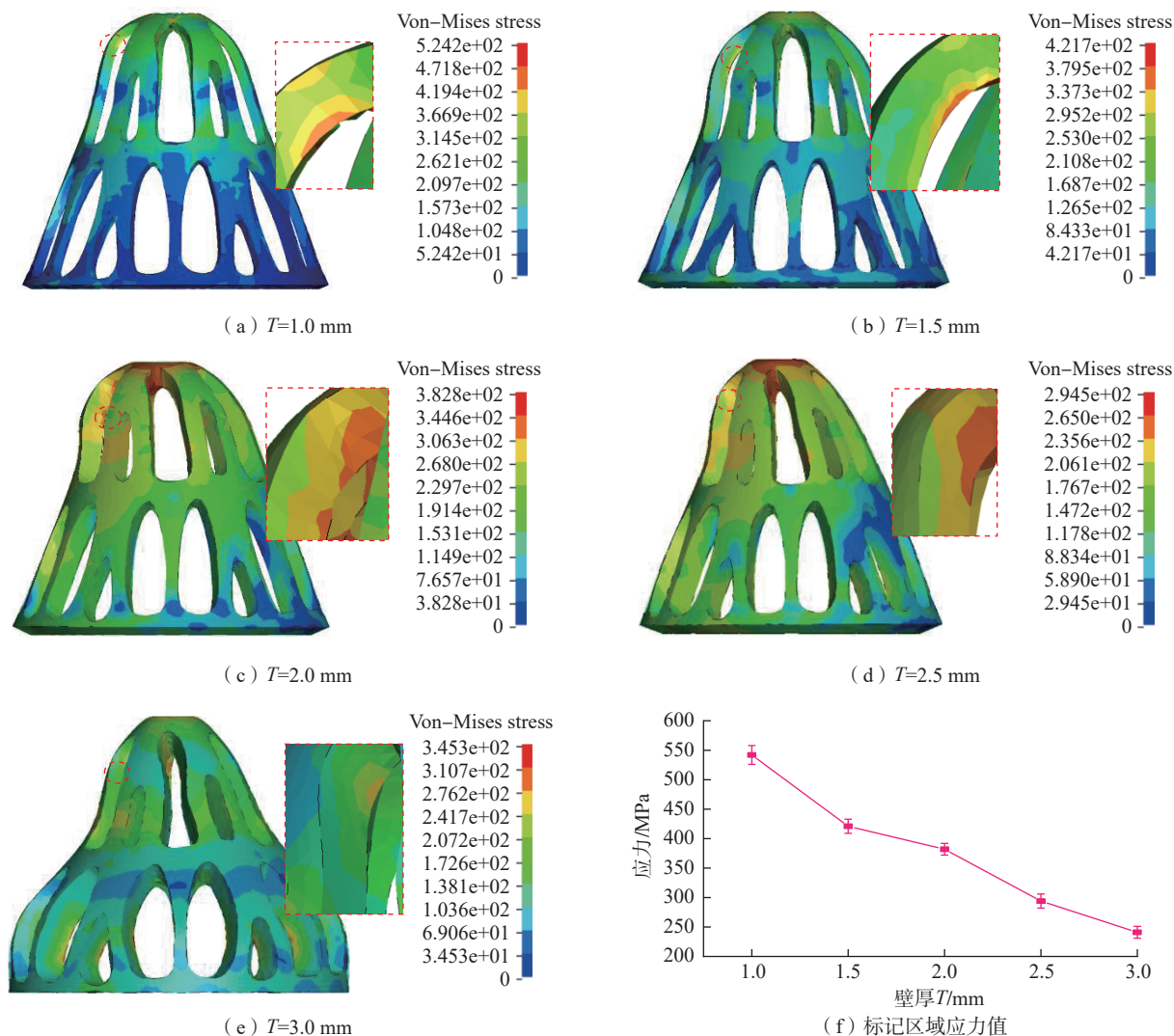


图6 圆锥轻量化结构的应力分布
Fig.6 Stress distribution of CL structures

低(由 $T=1.0\text{ mm}$ 构件的 524.2 MPa 至 $T=3.0\text{ mm}$ 构件的 241.7 MPa), 导致更均匀的内应力分布, 一定程度上会提升结构的吸能。由图 6 (e) 可知, $T=3.0\text{ mm}$ 结构中标记区域并不是变形区域, 不存在应力集中, 因此 $T=3.0\text{ mm}$ 结构标记区域的应力值相对较低。对于圆锥轻量化结构, 压缩过程的吸能行为主要发生于屈曲变形阶段, 随着壁厚的增加, 结构上层屈曲的程度逐渐减小, 甚至不发生屈曲变形(图 6 (e)), 锥顶与外凸屈曲处先后出现应力集中, 阻碍了力的扩散与传递, 导致结构不能持续增加能量吸收, 同时不同于其他结构发生的

渐近局部屈曲, $T=3.0\text{ mm}$ 构件屈曲行为主要发生于下层孔洞, 上层孔洞不发生屈曲变形。因此, $T=2.5\text{ mm}$ 结构具有最佳的吸能特性。

图 7 呈现了圆锥轻量化结构在有限元模拟中的变形过程, 以壁厚 1.0 mm 、 2.0 mm 及 3.0 mm 的圆锥轻量化结构为例, 揭示了壁厚对结构变形模式的影响。 $T=1.0\text{ mm}$ 结构整个压缩过程的变形行为如图 7 (a) 所示, 应力集中首先出现于锥顶及上层孔洞附近, 并逐渐达到初始峰值载荷, 随着位移增加, 结构发生屈曲变形, 锥顶向下移动, 屈曲变形处向外移动, 至此首次屈曲变形完成, 依次共发生

3 次屈曲变形, 属于轴向渐进局部屈曲变形模式, 是一种很好的吸能结构变形模式。对于 $T=3.0\text{ mm}$ 结构(图 7 (c)), 应力集中出现在锥顶及下层孔洞附近, 随着位移增加, 结构上层发生整体屈曲, 下层发生局部屈曲, 整个过程仅发生一次局部屈曲变形, 导致结构瞬时破坏和结构膨胀效应, 属于整体-局部屈曲相关变形模式, 这种变形模式相对不稳定, 可导致结构吸能性能下降。对于 $T=2.0\text{ mm}$ 结构, 整个过程发生 3 次屈曲变形, 属于轴向渐进局部屈曲变形, 但是更像是 $T=1.0\text{ mm}$ 结构与 $T=3.0\text{ mm}$ 结构之间的过渡模式。因此, 随着壁

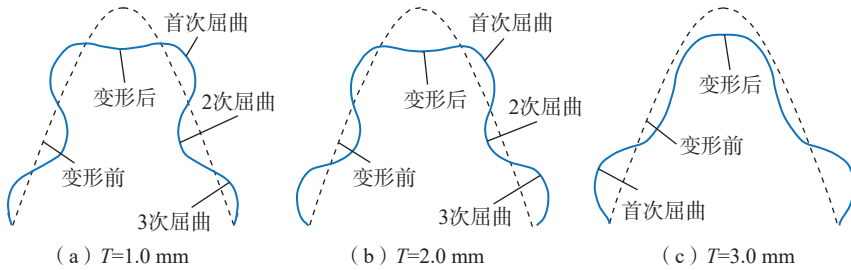


图7 LPBF 成形圆锥轻量化结构的变形模式

Fig.7 Deformation modes of LPBF-processed CL structures

厚的增加,结构的变形模式由轴向渐进局部屈曲转变为局部-整体屈曲变形,结构吸能效率逐渐降低。

3.4 断口形貌

为进一步研究结构的断裂模式,选取壁厚 1.0 mm 和 2.5 mm 的构件进行断口形貌分析,如图 8 所示。图 8 (a) 和 (e) 分别为壁厚 1.0 mm 和 2.5 mm 构件的宏观断口,可知,大部分断口形貌为韧窝形貌特征,还有小部分为平坦断口面,且具有河流花样特征。其中,韧窝为韧性断裂的典型特征,河流花样则为脆性断裂的典型特征,这与构件轴向压缩时呈现塑性变形相符。从图 8 (c) 和 (g) 中还观察到了 3~5 μm 的开孔,根据 Maskery^[28]

和 Laursen^[29] 等的研究,这些开孔可能是裂纹的萌生源,当结构发生断裂时,裂纹从微孔开始扩展并从微孔中的缺陷向外扩展直至表面,从而形成韧性断裂。因此两者呈韧性断裂和脆性断裂相结合,以韧性断裂为主的断裂模式。与 1.0 mm 壁厚构件的断口相比,2.5 mm 壁厚构件的断口中韧窝区域所占比重更大,韧性更好,变形过程吸能更多。

4 结论

(1) 基于变密度法,采用固体各向同性材料惩罚模型对圆锥结构进行了拓扑优化设计,利用 LPBF 制备的轻量化构件表面无明显裂纹和孔

隙,致密度最高达 99.12%,成形质量良好。

(2) 圆锥拓扑结构的壁厚对结构自身的力学性能有着显著影响。随着壁厚的增加,结构的变形模式由轴向渐进屈曲变形转变为整体-局部相关屈曲变形,因此,壁厚为 2.5 mm 的圆锥轻量化结构具有最佳的比吸能 (11.48 J/g)。同时,结构呈现韧断和脆断相结合,韧断占主要的断裂模式。

(3) 有限元模拟结果显示,圆锥拓扑结构的屈曲变形通常由较大的面内压应力引起,结构屈曲变形处内外壁应力水平的差异导致了不同方向的屈曲变形(外凸及内凹屈曲变形),且随着壁厚的增加,结构上层屈曲程度的逐渐减小及锥顶出现的应力集中导致结构不能持续增加能量吸收。

参考文献

- [1] BAROUTAJI A, SAJJIA M, OLABI A G. On the crashworthiness performance of thin-walled energy absorbers: Recent advances and future developments[J]. Thin-Walled

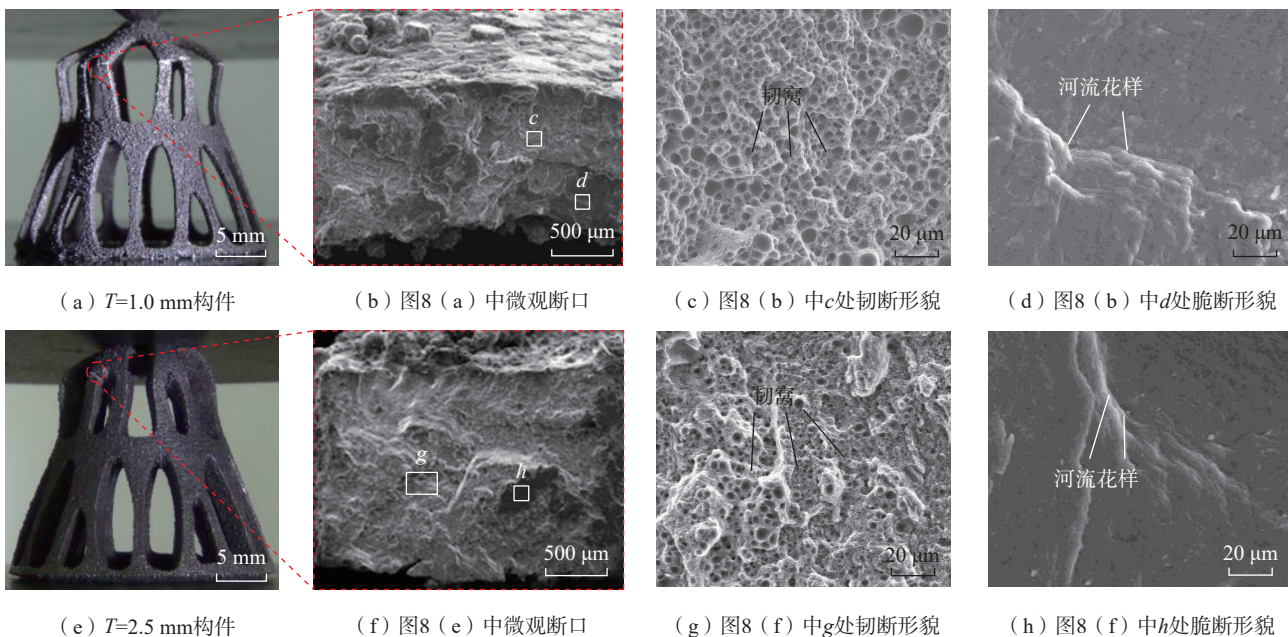


图8 LPBF 制备的圆锥拓扑优化构件的 SEM 压缩断口形貌

Fig.8 SEM morphology of compressive fracture of the LPBF-processed topological components

Structures, 2017, 118: 137–163.

[2] KAZEMI M E, KOUCHAKZADEH M A, SHAKOURI M. Stability analysis of generally laminated conical shells with variable thickness under axial compression[J]. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2020, 27(16): 1373–1386.

[3] 荆友录, 温卫东, 魏民祥. 不同截面结构薄壁直梁的轴向耐撞性研究[J]. *机械科学与技术*, 2009, 28(4): 455–459.

JING Youlu, WEN Weidong, WEI Minxiang. A study of the axial crashworthiness of thin-walled straight beams with different shapes[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2009, 28(4): 455–459.

[4] TASTAN A, ACAR E, GÜLER M A, et al. Optimum crashworthiness design of tapered thin-walled tubes with lateral circular cutouts[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 107: 543–553.

[5] KLEINER M, GEIGER M, KLAUS A. Manufacturing of lightweight components by metal forming[J]. *CIRP Annals*, 2003, 52(2): 521–542.

[6] REMOUCHAMPS A, BRUYNEEL M, FLEURY C, et al. Application of a bi-level scheme including topology optimization to the design of an aircraft pylon[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2011, 44(6): 739–750.

[7] SIGMUND O, MAUTE K. Topology optimization approaches[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, 48(6): 1031–1055.

[8] GU D D, SHI X Y, POPRAWA R, et al. Material-structure-performance integrated laser-metal additive manufacturing[J]. *Science*, 2021, 372(6545): eabg1487.

[9] 刘书田, 李取浩, 陈文炯, 等. 拓扑优化与增材制造结合: 一种设计与制造一体化方法[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(10): 26–31.

LIU Shutian, LI Quhao, CHEN Wenjiong, et al. Combination of topology optimization and additive manufacturing: An integration method of structural design and manufacturing[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(10): 26–31.

[10] WANG C, ZHU J H, WU M Q, et al. Multi-scale design and optimization for solid-lattice hybrid structures and their application to aerospace vehicle components[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(5): 386–398.

[11] AAGE N, ANDREASSEN E, LAZAROV B S, et al. Giga-voxel computational morphogenesis for structural design[J]. *Nature*, 2017, 550 (7674): 84–86.

[12] YANG M, HAN B, SU P B, et al. Axial crushing of ultralight all-metallic truncated conical sandwich shells with corrugated cores[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 140: 318–330.

[13] TASDEMIRCI A, AKBULUT E F, GUZEL E, et al. Crushing behavior and energy absorption performance of a bio-inspired metallic structure: Experimental and numerical study[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 131: 547–555.

[14] ZHANG L, SONG B, FU J J, et al. Topology-optimized lattice structures with simultaneously high stiffness and light weight fabricated by selective laser melting: Design, manufacturing and characterization[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56: 1166–1177.

[15] SUGAVANESWARAN M, ARUMAIAKKANNU G. Modelling for randomly oriented multi material additive manufacturing component and its fabrication[J]. *Materials & Design (1980–2015)*, 2014, 54: 779–785.

[16] LIU Y J, LI X P, ZHANG L C, et al. Processing and properties of topologically optimised biomedical Ti–24Nb–4Zr–8Sn scaffolds manufactured by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2015, 642: 268–278.

[17] ZEGARD T, PAULINO G H. Bridging topology optimization and additive manufacturing[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, 53(1): 175–192.

[18] 顾冬冬, 张红梅, 陈洪宇, 等. 航空航天高性能金属材料构件激光增材制造[J]. *中国激光*, 2020, 47(5): 32–55.

GU Dongdong, ZHANG Hongmei, CHEN Hongyu, et al. Laser additive manufacturing of high-performance metallic aerospace components[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(5): 32–55.

[19] XI L X, DING K, ZHANG H, et al. In-situ synthesis of aluminum matrix nanocomposites by selective laser melting of carbon nanotubes modified Al–Mg–Sc–Zr alloys[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2022, 891: 162047.

[20] LAZAROV B S, WANG F W, SIGMUND O. Length scale and manufacturability in density-based topology optimization[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2016, 86(1–2): 189–218.

[21] YANG J K, GU D D, LIN K J, et

al. Optimization of bio-inspired bi-directionally corrugated panel impact-resistance structures: Numerical simulation and selective laser melting process[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2019, 91: 59–67.

[22] WANG H R, GU D D, LIN K J, et al. Compressive properties of bio-inspired reticulated shell structures processed by selective laser melting[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21(4): 1801168.

[23] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T 228.1—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, China National Standardization Administration Commission. *Metallic materials tensile test Part 1: Room temperature test method: GB/T 228.1—2010[S]*. Beijing: Standards Press of China, 2011.

[24] HU D Y, WANG Y Z, SONG B, et al. Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 162: 21–32.

[25] LIU Q, XU X Y, MA J B, et al. Lateral crushing and bending responses of CFRP square tube filled with aluminum honeycomb[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 118: 104–115.

[26] CHEN H Y, GU D D, XIONG J P, et al. Improving additive manufacturing processability of hard-to-process overhanging structure by selective laser melting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 250: 99–108.

[27] KATHIRESAN M. Influence of shape, size and location of cutouts on crashworthiness performance of aluminium conical frusta under quasi-static axial compression[J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 154: 106793.

[28] MASKERY I, ABOULKHAIR N T, AREMU A O, et al. A mechanical property evaluation of graded density Al–Si10–Mg lattice structures manufactured by selective laser melting[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2016, 670: 264–274.

[29] LAURSEN C M, DEJONG S A, DICKENS S M, et al. Relationship between ductility and the porosity of additively manufactured AlSi10Mg[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 795: 139922.

Mechanical Properties of Topologically Lightweight Conical Components Fabricated by Laser Additive Manufacturing

LIN Kaijie^{1,2}, WU Libin^{1,2}, YANG Jiankai^{1,2}, ZHANG Han^{1,2}, GU Dongdong^{1,2}

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Jiangsu Provincial Engineering Laboratory for Laser Additive Manufacturing of High-Performance Metallic Components, Nanjing 210016, China)

[ABSTRACT] Aerospace lightweight structures usually need to meet various performance requirements, such as weight reduction, load-bearing, shock absorption and impact resistance. However, the weight reduction of structures is often accompanied by the reduction of load-bearing and impact resistance. In this paper, the topology optimization design of conical structures was carried out based on variable density method. And the integrated forming of conical lightweight components was realized by laser powder bed melting technology. The influence mechanism of wall thickness on the mechanical properties of topologically optimized components under axial compression were studied. As the wall thickness increased from 1.0 mm to 3.0 mm, the specific energy absorption increased firstly and then decreased. The component with wall thickness of 2.5 mm exhibited the highest specific energy absorption, which was 11.48 J/g. The stress distribution during compression was studied by finite element simulation, which showed that the main reason for the buckling and fracture of structures was the large in-plane compressive stress. The difference of stress levels between the inner and outer walls led to the buckling deformation of the structure in different directions. And with the increase of wall thickness, the stress concentration at the top of the cone and the reduction of the upper buckling degree terminated the continuous increase of energy absorption.

Keywords: Topology optimization; Conical lightweight components; Additive manufacturing (AM); Laser powder bed fusion; Specific energy absorption

(责编 阳光)

(上接第 100 页)

Study on Mechanical Response of Selective Laser Melted Nickel-Titanium Based Pentamode Metamaterials

ZHANG Lei¹, WEI Shuaishuai¹, SONG Bo¹, LI Jingyang², ZHANG Jianchao², QI Junfeng², SHI Yusheng¹

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Beijing Satellite Manufacturing Factory Co., Ltd., Beijing 100094, China)

[ABSTRACT] Pentamode metamaterials (PMs) have uncoupled relative density and mechanical properties, which have potential applications in the field of special acoustic equipments and biological implants. Selective laser melting (SLM) technology has the ability to form complex and fine lattice metamaterials, which can achieve customized stiffness, controllable cell topology, cell size and porosity. In this work, nickel-titanium shape memory alloy (NiTi SMA) powder was used to fabricate pentamode metamaterials with different topological shapes by selective laser melting. The observation results of micro-morphology show that the nickel-titanium based pentamode metamaterials formed by SLM has good manufacturing fidelity. The finite element simulation is used to predict the stress distribution in the compression process of the pentamode metamaterial, and it is found that the stress is concentrated in the joint of the struts. The experimental results of compression mechanics show that the strength of NiTi based pentamode metamaterial increases with the increase of relative density. By establishing the mathematical models of relative density, relative modulus and strength, the mechanical properties of pentamode metamaterials with different relative densities can be well predicted.

Keywords: Pentamode metamaterials (PMs); Selective laser melting (SLM); Shape memory alloy; Mechanical properties; Finite element simulation

(责编 阳光)