

增材制造八角桁架点阵结构材料的力学行为

李鉴石, 王永刚*, 史同亚, 方嘉铨

(宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 基于激光选区熔化增材制造技术(SLM), 以 GP1 不锈钢为母材, 制备 4 种相对密度的八角桁架点阵结构试样, 开展了准静态单轴压缩和直接撞击式霍普金森压杆实验, 并结合显式有限元计算模拟, 研究了相对密度和加载速率对八角桁架点阵结构试样在力学响应、变形模式和吸能特性的影响. 结果显示: (1)相对密度是影响八角桁架点阵结构材料力学响应的关键参数, 屈服载荷随着相对密度基本呈线性增长, 并且表现出明显的应变率强化效应; (2)在准静态压缩下, 随着相对密度增大, 八角桁架点阵结构的变形模式由弯扭屈曲模式逐渐向稳定屈服模式转变; 而在冲击压缩下, 八角桁架点阵结构的变形模式随着冲击速度由对称稳定变形模式向非对称逐渐压垮模式转变; (3)八角桁架点阵结构总吸能随着相对密度线性增大, 而比吸能随着相对密度呈现双线性变化, 在相对密度 30%处出现拐折, 当相对密度高于 30%后, 比吸能增大缓慢; (4)与准静态加载相比, 冲击加载下八角桁架点阵结构的总吸能和比吸能都显著提升.

关键词: 点阵结构; 金属增材制造技术; 变形模式; 数值模拟; 能量吸收

中图分类号: O347.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2022) 01-0082-08

三维点阵结构凭借其优秀的吸能特性、高孔隙率、轻量化、可设计性已被广泛应用于航空航天、高速列车、舰艇轮船、汽车等交通运输工具的碰撞安全防护领域, 常见的三维点阵结构有金字塔型、四面体型、Kagome 型等^[1], 制备方法常采用铸造法、冲压-焊接法、三维编织法等^[2]. 人们已对金字塔型、四面体型等三维点阵结构力学性能和吸能特性开展了较多研究. 钱海峰等^[3]、张蒙^[4]制备了单层金字塔及改进型金字塔点阵夹芯结构, 对其抗压性能、剪切性能、三点弯性能进行了研究. Feng 等^[5]使用连锁装配方法制备了一种类似金字塔结构的沙漏桁架结构, 通过剪切实验和三点弯曲实验, 发现其比剪切强度和弯曲破坏载荷均优于金字塔桁架结构. 增材制造技术的快速发展, 为制备结构复杂的多孔点阵结构材料提供了更好的加工手段, 促进了三维点阵结构材料的发展^[6]. Gümrük 等^[7]通过激光选区熔融技术(SLM)制备 BCC、BCCZ、F2BCC 点阵结构, 研究了它们在压缩、剪

切、拉伸等载荷下的力学行为, 结果表明相对密度和拓扑结构是决定点阵材料力学行为的两个主要参数. 郑权等^[8]利用 SLM 制备多层金字塔点阵夹层板, 通过准静态单轴压缩实验, 得到金字塔点阵结构的抗压缩强度, 发现制备的金字塔点阵结构抗压缩性能的稳定性非常好. Bai 等^[9]采用 SLM 制备梯度 F2BCC 点阵结构, 通过单轴压缩实验和有限元模拟, 发现梯度点阵结构比均匀点阵结构具有更高的比吸能(SEA).

近年来, 很多研究人员开始关注八角桁架点阵结构(Octet-truss Lattice), 其满足拉伸主导几何构型, 具有良好的吸能特性及各向同性等优点, 被证明是一种有潜力替代泡沫或蜂窝结构的点阵结构材料^[10]. Dong 等^[11]采用真空钎焊法制备 Ti-6Al-4V 八角桁架点阵结构, 通过单轴压缩和平面剪切实验, 获得了结构的刚度、抗压强度和剪切模量. Gangireddy 等^[12]使用 SLM 制备一系列不同杆径的八角桁架单胞, 通过分离式霍普金森压杆(SHPB)

收稿日期: 2021-05-13.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11972202).

第一作者: 李鉴石(1995-), 男, 四川遂宁人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: 1037306819@qq.com

*通信作者: 王永刚(1976-), 男, 江苏涟水人, 博士/教授, 主要研究方向: 冲击动力学. E-mail: wangyonggang@nbu.edu.cn

实验得到单胞 10% 应变内的载荷—位移曲线, 发现在 10% 应变内, 抗压强度随相对密度增大而增大, 比吸能变化趋势相反. Tancogne 等^[13]使用 SLM 制备八角桁架点阵结构, 通过准静态压缩试验和有限元模拟, 发现八角桁架点阵结构比吸能是相对密度的单调递增函数.

目前, 人们对八角桁架点阵结构力学性能的研究大多集中在准静态载荷下, 但在实际应用中, 其却常常需承受冲击载荷, 因此, 本文将关注八角桁架点阵结构在冲击加载下的力学响应与缓冲吸能性能. 利用 SLM 技术制备多组不同相对密度的八角桁架点阵结构, 通过准静态压缩实验、直接撞击式霍普金森压杆实验和瞬态有限元数值仿真, 研究八角桁架点阵结构在准静态载荷、动态载荷下的力学响应、变形模式和吸能性能.

1 实验

1.1 几何模型与试样制备

1.1.1 几何模型

八角桁架点阵结构单胞如图 1(a)所示. 描述点阵结构材料特性的一个重要参数是相对密度 ρ_r , 定义为 ρ'/ρ_{cc} , 其中, ρ' 为点阵材料表观密度, ρ_{cc} 为构成点阵材料连接杆的基体材料的密度. 八角桁架点阵结构单胞相对密度计算公式如下^[13]:

$$\rho_r = \frac{3\sqrt{2}\pi}{2} \left(\frac{D}{L} \right)^2 - 6.825 \left(\frac{D}{L} \right)^3, \quad (1)$$

式中: D 为点阵结构中连接杆的直径; L 为连接杆的杆长. 如图 1(a)所示, 这里设定杆长 $L = 5$ mm, 通过改变杆的直径 D , 当 D 取 0.66、0.97、1.23、1.46 mm 时, 可以分别得到相对密度为 10%、20%、30%、40% 的单胞. 试样的几何模型如图 1(b)所示, 单胞按 4×4 阵列, 上下设置 1 mm 厚面板, 试样表观尺寸为 $28 \text{ mm} \times 28 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$.

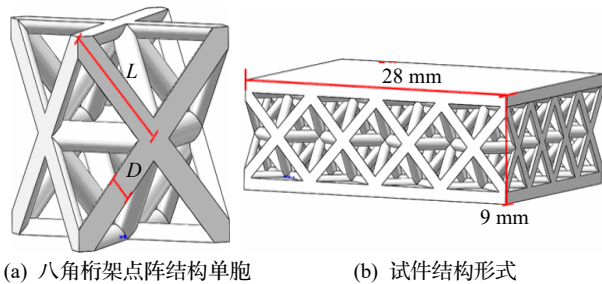


图1 试样几何模型

1.1.2 SLM 制备试样

使用 EOSM280 金属 3D 打印机, 以 GP1 不锈钢粉末为母材, 其平均粒径为 $35 \mu\text{m}$, 采用选区熔化技术制备试样. 加工工艺参数: 激光功率 195 W; 扫描速度 $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 铺粉速度 $80 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; 层厚 $20 \mu\text{m}$, 基板预热温度 80°C . 采用光学显微镜观察试样的成型质量, 如图 2(a)所示, 观察到杆件成型质量良好, 表面比较粗糙, 成型试样的尺寸与设计尺寸基本一致. 取出试样中一根杆件, 对其横截面和纵截面进行打磨抛光, 然后在光学显微镜(放大倍数 200 倍)下观察. 如图 2(b)和 2(c)所示, 结果表明杆件内部的致密度良好, 未观察到孔隙.

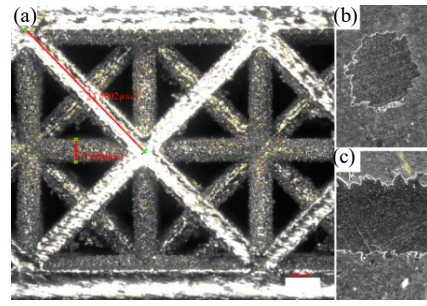


图2 杆件的制造质量

1.2 实验方案

1.2.1 准静态单轴压缩实验

采用 MTS-810 万能试验机, 并用位移控制方式对试样进行加载, 加载速率为 $0.54 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 对应试样应变率 10^{-3} s^{-1} . 每个相对密度的试样重复一次实验, 以确保数据准确性. 通过数字图像相关性分析(Digital Image Correlation, DIC)方法计算试样的准确压缩位移, 试样压缩过程的加载力由试验机的力传感器记录.

1.2.2 直接撞击式霍普金森压杆实验

采用直接撞击式霍普金森压杆技术^[14], 实验装置示意图如图 3 所示, 即摒弃传统的入射杆. 将试样安装在透射杆前端, 子弹直接撞击试样, 这样就避免了子弹长度的限制, 实现一次加载就可将试样压实. 由于试样的波阻抗远小于压杆波阻抗, 导

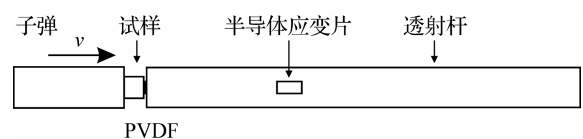


图3 直接撞击式 SHPB 实验装置示意图

致透射波信号很弱,建议使用半导体应变片来采集透射杆上应变时程数据.为提高实验测试可靠性,在试样与透射杆之间还粘贴聚偏氟乙烯(PVDF)压电式压力传感器.试样尺寸较大,这里选择直径74 mm,长3 m的透射杆,子弹长0.4 m.

2 实验结果分析

2.1 单轴准静态压缩实验结果分析

2.1.1 力学响应

万能试验机得到试样的载荷时程曲线,再结合DIC方法处理得到的试样位移—时程曲线,消去时间后得到不同相对密度试样在 10^{-3} s^{-1} 应变率下的载荷—位移曲线.如图4所示,从中可以观察到相对密度对八角桁架点阵结构试样的宏观力学性能和变形模式都有显著的影响.首先关注的是屈服荷载,图5给出了八角桁架点阵结构的屈服荷载随着相对密度变化的曲线,两者基本呈线性增长关系.其次关注平台荷载,相对密度为10%时,八角桁架点阵结构的平台荷载明显小于屈服荷载,表现出弱化失稳现象;当相对密度增大到20%时,观察到基本稳定的平台荷载;但随着相对密度的

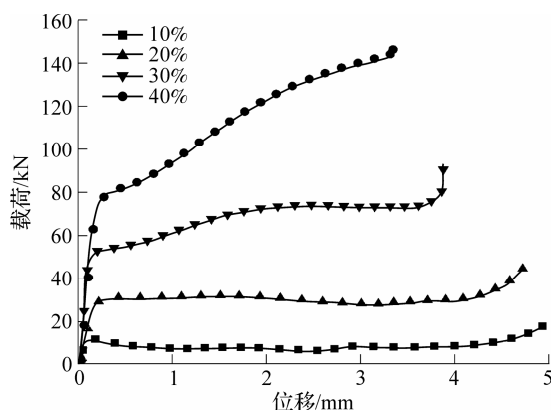


图4 不同相对密度的试样在准静态压缩下的载荷—位移曲线

进一步增大,载荷—位移曲线上出现了明显的硬化现象.最后分析相对密度对八角桁架点阵结构变形机制的影响.图6给出不同压缩量 s 时,不同相对密度试样的变形图像.对于八角桁架点阵结构中众多的连接杆来说,在垂直压缩面载荷下,这些连接杆不仅仅发生了轴向压缩变形,而且还存在明显的弯曲变形.对于10%相对密度的试样,连接杆的柔度比较大,随着载荷的增大,胞体发生扭曲,产生弯扭屈曲现象,导致点阵结构承载能力迅速减小.随着相对密度增大,点阵结构变形模式出现变化,对于20%相对密度的试样开始屈曲后,首先出现稳定变形模式,保持了一段稳定的载荷平台区,在压缩量达到2 mm后载荷有所降低,在变形图片上观察到局部扭曲现象.当相对密度增大到30%和40%,支撑杆出现稳定屈服变形,每个连接杆都产生了大范围的塑性变形区,没有观察到扭曲现象;由于连接杆之间间隙较小,压缩量超过1 mm之后,杆与杆之间产生接触,从而导致结构承载力逐渐增大.

2.1.2 缓冲吸能性能

评估泡沫材料或点阵材料的缓冲吸能特性的

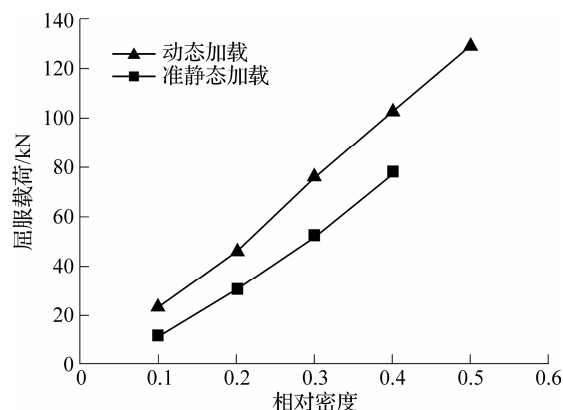


图5 准静态和动态加载下屈服荷载随相对密度的变化

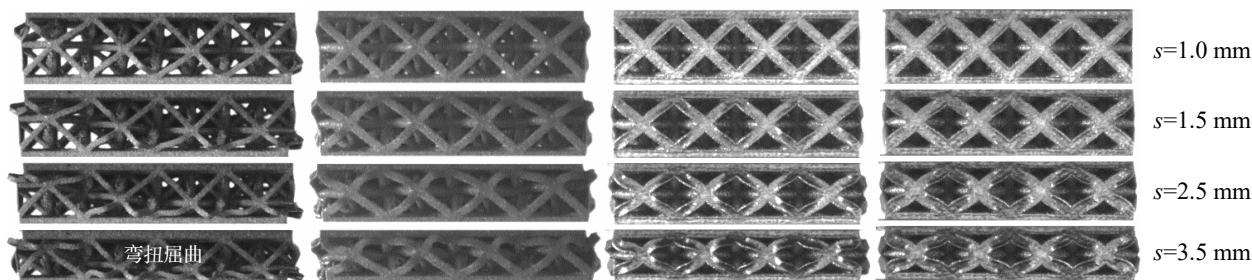


图6 不同压缩量下不同相对密度的试样变形图像

指标主要有3个: 有效压缩行程比、吸收总能量及单位质量吸收能量(也称为比吸能). 有效压缩行程比 λ 定义为有效压缩行程 S_{ef} 与试样高度 H 的比值, 吸收总能量 W 通过对有效压缩行程前的载荷—位移曲线进行积分获得, 比吸能 ω 等于吸收总能量 W 除以总质量 m . 有效压缩行程通常选择载荷急剧变化的拐点. 从图5中可以看到, 随着相对密度增大, 有效压缩行程逐渐减小. 图7给出了有效压缩行程比随着相对密度的变化曲线, 两者也基本呈线性衰减关系. 随着相对密度增大, 有效压缩行程减小, 但是平台载荷显著增大, 对于能量吸收来说存在优化空间. 图8给出了总吸能和比吸能随着相对密度的变化曲线, 从中可以看到总吸能随着相对密度线性增大, 而比吸能随着相对密度开始线性增大, 在相对密度30%处出现拐折, 表明点阵结构相对密度较大时, 结构的比吸能增长显著放缓.

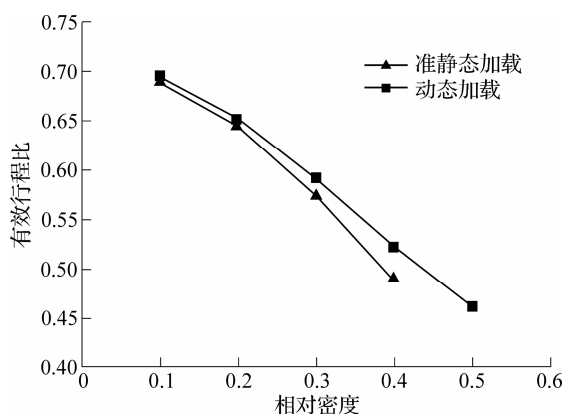


图7 准静态和动态加载下有效行程比随相对密度的变化

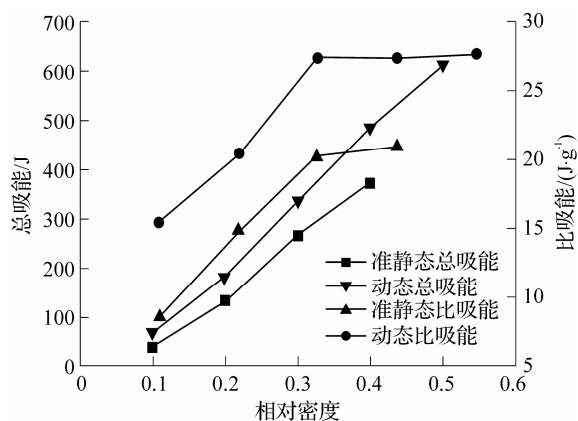


图8 准静态和动态加载下总吸能和比吸能随相对密度的变化

2.2 直接撞击式霍普金森压杆实验结果分析

采用直接撞击式霍普金森压杆技术对相对密

度20%、30%和40%的八角桁架点阵结构材料进行动态冲击压缩. 实验中, 通过控制气腔气压基本恒定(约为0.3 MPa), 得到 $10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 稳定子弹撞击速度. 图9给出了3种相对密度八角桁架点阵结构材料的载荷—时程曲线, 其中包括透射杆上半导体应变片测量的实验数据与PVDF压电式应力传感器测量的数据. 由图可见, 2种测试手段获得载荷—时程曲线整体表现出较好一致性, 但初始阶段还存在明显差别, PVDF压电式应力传感器的测量结果上升沿比较陡, 而半导体应变片测量结果则较缓,

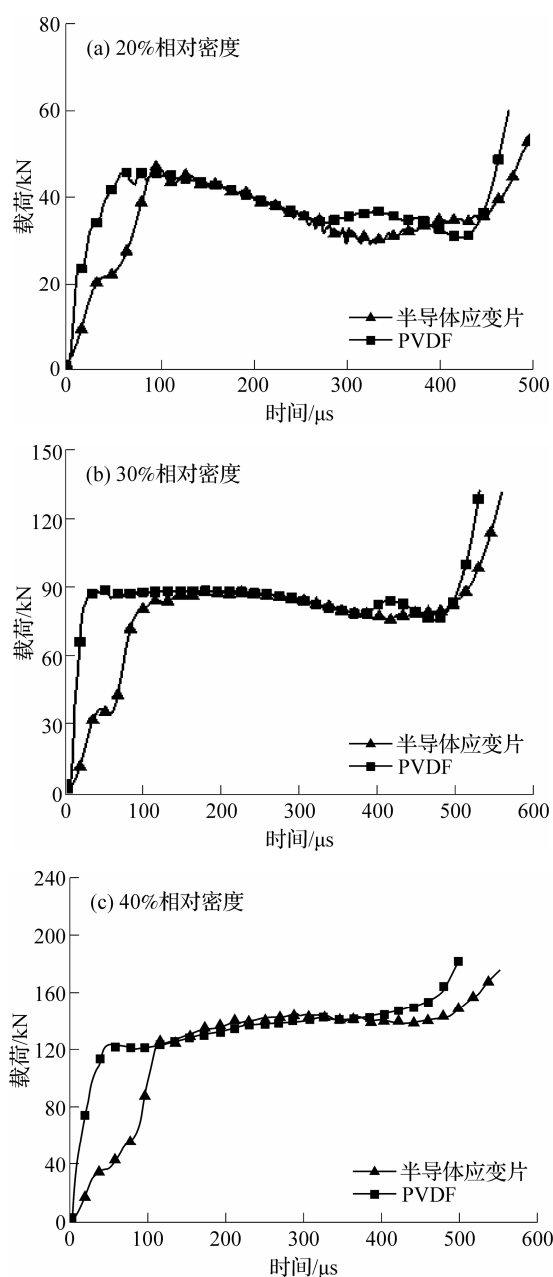


图9 冲击加载下不同相对密度试样的载荷—时程曲线

而后续平台阶段两者基本一致. 这种差异主要来自两方面: (1) 试样与透射杆界面上粘贴的 PVDF 压电式应力传感器是具有一定厚度的高分子材料薄膜, 并且使用双面胶进行粘贴, 从试样中传播过来的压缩波形经过 PVDF 薄膜后会产生弥散, 导致传播到透射杆中的波形前沿变缓, 此时 PVDF 薄膜类似于霍普金森压杆实验中的波形整形器作用; (2) 实验中透射杆直径较大, 由于横向惯性效应的影响, 应力波从杆端传播到应变片粘贴位置时也会产生弥散, 导致应变片测量的载荷上升沿变缓. 另外, 与准静态加载相比, 冲击加载时的平台载荷明显升高, 其原因主要来源于支撑杆材料不锈钢力学性能的应变率效应.

3 数值模拟

3.1 有限元模型及可靠性验证

基于实验结果, 采用数值模拟手段进一步讨论相对密度和冲击速度对八角桁架点阵结构材料变形模式和缓冲吸能特性的影响. 为对比直接撞击式霍普金森压杆实验结果, 试样、子弹和透射杆的有限元模型尺寸与实验中尺寸保持一致, 几何模型和网格划分如图 10 所示, 单元类型为六面体网格. GP1 不锈钢材料动态本构关系采用 Johnson-Cook 本构模型, 等效屈服应力表达式如下:

$$\sigma_{eq} = (A + B\varepsilon_{eq}^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_{eq}^*) (1 - T^{*m}), \quad (2)$$

式中: A 、 B 、 n 、 C 和 m 为材料常数; ε_{eq} 为等效塑性应变, $\dot{\varepsilon}_{eq}^*$ 为无量纲化等效塑性应变率, $\dot{\varepsilon}_{eq}^* = \dot{\varepsilon}_{eq} / \dot{\varepsilon}_0$, $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率; $T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0)$ 为无量纲温度, 其中 T_0 为室温, T_m 为材料的熔点. 数值模拟采用的 GP1 不锈钢材料本构参数^[15-16]: 密度 $\rho = 7830 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 弹性模量 $E = 163 \text{ GPa}$, $A = 550 \text{ MPa}$, $B = 510 \text{ MPa}$, $n = 0.26$, $C = 0.014$, $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$, $T_m = 1800 \text{ K}$, $T_0 = 300 \text{ K}$.

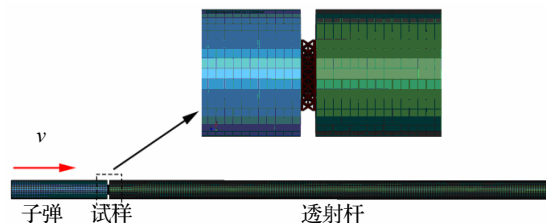


图 10 直接撞击式霍普金森压杆实验的有限元模型和局部网格放大图

为了验证有限元模型计算的可靠性, 首先对 30% 相对密度试样在冲击加载下的实验结果进行数值模拟, 计算其边界条件与实验是否保持一致. 图 11 给出了有限元计算载荷—时程曲线与实验数据的对比, 结果表明两者基本保持一致, 验证了有限元模型计算的可靠性.

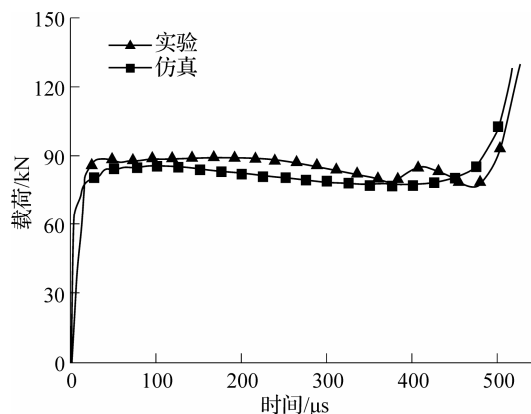


图 11 数值仿真载荷时程曲线与实验结果的对比

3.2 相对密度的影响

保持恒定的 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 子弹撞击速度, 分别对 10%、20%、30%、40%、50% 相对密度的试样进行冲击加载数值模拟. 图 12 给出了不同相对密度试样与透射杆界面处的载荷—位移曲线, 图中显示: (1) 随着相对密度增大, 屈服载荷不断增大, 有效压缩行程不断减少; (2) 相对密度 10% 和 20% 点阵结构的平台荷载出现弱化现象, 相对密度 30% 和 40% 点阵结构的平台荷载基本保持恒定, 当相对密度提高到 50% 时, 平台荷载出现硬化现象. 计算仿真结果与实验结果比较一致. 与准静态加载条件相比(图 5), 冲击加载下屈服荷载表现出一定的应变率强化效应. 根据图 12 给出的载荷—位移曲线, 分别计算冲击加载下八角桁架点阵结构的有效行程比、总吸能和比吸能. 冲击加载下试样的有效行程比随着相对密度的变化曲线如图 7 所示, 两者也呈线性衰减关系, 与准静态加载下实验结果基本保持一致. 冲击加载下试样的总吸能和比吸能随着相对密度的变化曲线如图 8 所示. 与准静态加载条件相比, 冲击加载下总吸能和比吸能都显著提升, 总吸能随着相对密度呈线性增大, 而比吸能在 30% 相对密度前随相对密度增大而增大, 大于 30% 相对密度后几乎保持稳定, 这与准静态加载实验结果得到的规律是一致的.

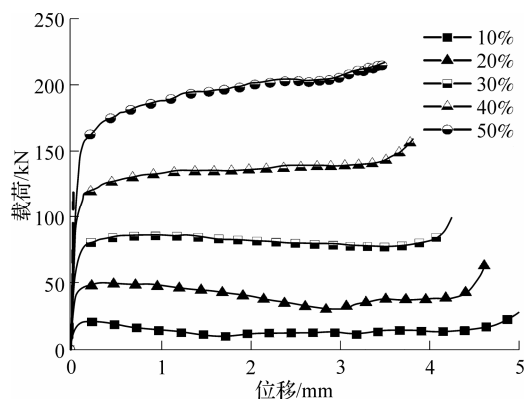


图 12 冲击加载下不同相对密度试样的载荷—位移曲线

3.3 撞击速度的影响

为讨论子弹撞击速度的影响, 这里选取 30% 相对密度的试样, 开展其在 10、50、100、200 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 撞击速度下的数值计算, 图 13(a)和(b)分别为不同撞击速度下子弹与试样界面(简称为冲击端)和试样与透射杆界面处(简称为支撑端)的载荷—位移曲线。由图可见, 随着撞击速度增大, 冲击端初始峰值载荷显著增大, 后续的平台载荷也出现明显振荡, 而支撑端载荷基本保持不变。图 14(a)~(d)分别为不同撞击速度下试样变形等效塑性应变云图。由图可见, 在 10 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 50 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 撞击下, 试样变形是上下对称的稳定变形模式, 与准静态加载条件结果是一致的; 而在 100 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 200 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 撞击下, 冲击端的杆件首先发生屈服, 而支撑端的杆件几乎没有变形, 且随着冲击端杆件压缩量增大, 支撑端杆件开始屈服, 表现出一种上下不对称的逐渐压垮变形模式。对比分析图 13 和图 14 可知, 无论是对称稳定变形模式还是非对称逐渐压垮变形模

式, 支撑端都保持了稳定的平台载荷和有效压缩行程, 充分表明八角桁架点阵结构材料在抗冲击吸能时对撞击速度是不敏感的, 对结构抗冲击防护结构的设计是有利的。

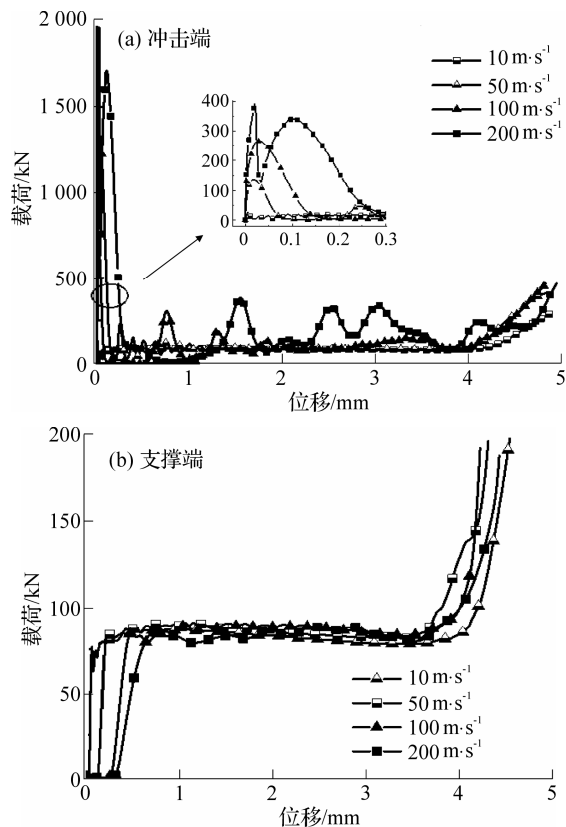
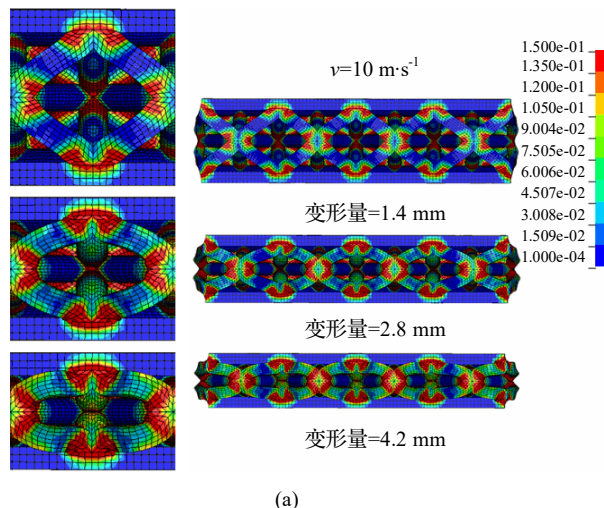


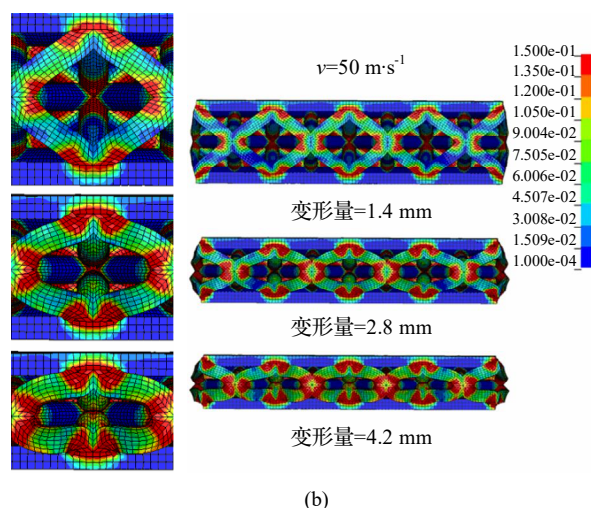
图 13 冲击端和支撑端的载荷—位移曲线

4 结论

以八角桁架点阵结构为研究对象, 采用激光增材制造技术制备不同相对密度单层多胞试样。



(a)



(b)

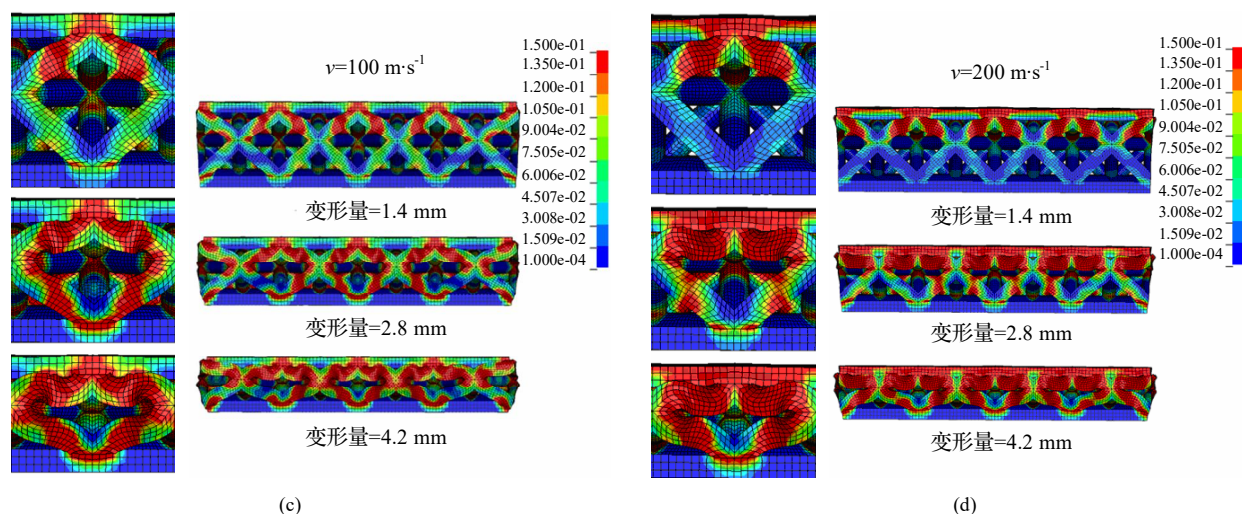


图 14 不同撞击速度下试样变形的等效塑性应变云图

开展了准静态单轴压缩实验和直接撞击式霍普金森压杆实验,讨论了相对密度和加载速度对八角桁架点阵结构的力学响应和变形模式及吸能性能的影响。基于直接撞击式霍普金森压杆实验结果,开展了相关数值模拟研究,并重点讨论了相对密度和加载速度对八角桁架点阵结构抗冲击响应特性的影响。取得以下主要结论:

(1)准静态压缩实验结果显示,随着相对密度增大,八角桁架点阵结构的屈服载荷和总吸能呈线性增大,比吸能在相对密度高于 30%后增长缓慢,结构变形则呈现弯扭屈曲和稳定屈服两种变形模式。

(2)冲击加载下八角桁架点阵结构屈服载荷、总吸能和比吸能随着相对密度的变化趋势与准静态加载下的结果保持一致,但表现出一定的应变率强化效应。

(3)在低速撞击下,相对密度 30%八角桁架点阵结构变形呈现上下对称的稳定变形模式,与准静态加载条件结果是一致的;而在高速撞击下,则呈现上下不对称的逐渐压垮变形模式,变形模式的改变对支撑端载荷几乎没有影响,使其在抗冲击防护结构的设计上具有显著的优势。

参考文献:

- [1] 易长炎, 柏龙, 陈晓红, 等. 金属三维点阵结构拓扑构型研究及应用现状综述[J]. 功能材料, 2017, 48(10): 10055-10065.
- [2] 张钱城, 卢天健, 闻婷. 轻质高强点阵金属材料的制备

及其力学性能强化的研究进展[J]. 力学进展, 2010, 40(2):157-169.

- [3] 钱海峰, 张振华, 牟金磊, 等. 金字塔点阵夹芯板单元结构准静态压缩性能研究[J]. 中国舰船研究, 2013, 8(5):46-51.
- [4] 张蒙. 金字塔金属点阵夹芯结构的制备及力学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [5] Feng L J, Xiong J, Yang L H, et al. Shear and bending performance of new type enhanced lattice truss structures [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2017, 134:589-598.
- [6] Maconachie T, Leary M, Lozanovski B, et al. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges[J]. Materials & Design, 2019, 183:108137.
- [7] Gümrük R, Mines R A W, Karadeniz S. Static mechanical behaviours of stainless steel micro-lattice structures under different loading conditions[J]. Materials Science and Engineering A, 2013, 586:392-406.
- [8] 郑权, 冀宾, 李昊, 等. 基于增材制造的多层金字塔点阵夹芯板抗压性能[J]. 航空材料学报, 2018, 38(3): 77-82.
- [9] Bai L, Gong C, Chen X H, et al. Mechanical properties and energy absorption capabilities of functionally graded lattice structures: Experiments and simulations[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2020, 182: 105735.
- [10] Deshpande V S, Fleck N A, Ashby M F. Effective properties of the octet-truss lattice material[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2001, 49(8):1747-1769.
- [11] Dong L, Deshpande V, Wadley H. Mechanical response

- of Ti-6Al-4V octet-truss lattice structures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2015, 60/61:107-124.
- [12] Gangireddy S, Komarasamy M, Faierson E J, et al. High strain rate mechanical behavior of Ti-6Al-4V octet lattice structures additively manufactured by selective laser melting (SLM)[J]. Materials Science and Engineering A, 2019, 745:231-239.
- [13] Tancogne-Dejean T, Spierings A B, Mohr D. Additively-manufactured metallic micro-lattice materials for high specific energy absorption under static and dynamic loading[J]. Acta Materialia, 2016, 116:14-28.
- [14] 陈浩, 郭鑫, 宋力. 直接撞击式大变形霍普金森压杆实验技术[J]. 宁波大学学报(理工版), 2018, 31(4):70-73.
- [15] 陈子博, 谢普初, 刘东升, 等. 基于广义波阻抗梯度飞片的准等熵压缩技术[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(4):52-60.
- [16] 史同亚, 刘东升, 陈伟, 等. 激光选区熔化增材制造 GP1 不锈钢动态拉伸力学响应与层裂破坏[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(7):52-63.

Mechanical behavior of the additively manufactured metallic octet-truss lattice materials

LI Jianshi, WANG Yonggang*, SHI Tongya, FANG Jiacheng

(Key Laboratory of Impact and Safety Engineering of Ministry of Education, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Based on selective laser melting (SLM) additive manufacturing technology, octet-truss lattice material with different relative densities were prepared with GP1 stainless steel as the base material. Quasi-static uniaxial compression experiments and direct impact Hopkinson bar experiments as well as finite element simulations were carried out to study the influence of relative density and loading rate on the mechanical response, deformation mode and energy absorption for octet-truss lattice material. Results show that relative density is a key parameter that affects the mechanical response of the octet-truss lattice structure. The critical yield loads increase linearly with the relative density, and it exhibits an obvious strain rate strengthening effect. Under quasi-static compression loading condition, with the increase of relative density, the deformation mode of the octet-truss lattice material changes from an unstable twist mode to a stable buckling mode. But under the impact compression loading condition, with the increase of the impact velocity, the deformation mode of the octet-truss lattice material changes from a symmetrical stable buckling mode to asymmetrical gradually collapsed mode. The total energy absorption of the octet-truss lattice material is a monotonically increasing function of the relative density, but lattice material of relative densities around 0.3 features high specific energy absorption capability. Compared with the results under quasi-static compression loading, the total energy absorption and specific energy absorption of the octet-truss lattice materials are significantly improved under impact compression loading.

Key words: lattice structure; additive manufacturing technology; deformation mode; numerical simulation; energy absorption

(责任编辑 章践立)