

基于增材制造的仿生防护结构力学及 回复特性分析

于征磊^{1,2}, 陈立新², 徐泽洲², 信仁龙², 马 龙³, 金敬福⁴,
张志辉², 江 山⁵

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学 工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022; 3. 空军航空大学 作战勤务学院, 长春 130022; 4. 吉林大学 生物与农业工程学院, 长春 130022; 5. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要:运用结构仿生学设计原理,建立了两种具有记忆恢复特性的智能仿生防护结构,利用选择性激光熔融增材制造技术制备了仿生结构模型,通过数值模拟和试验测试方法分别对其进行了力学特性分析和变形回复特性测试。结果表明:对比试验力-位移曲线及其变形模式,仿真计算结果较为准确地模拟了仿生防护结构模型样件在静压过程中的变形特性及承载特性;仿生防护结构的压缩量可达 15%,其压缩强度为 81.4 MPa;卸载后在加热工况下其变形回复率达到 99.04%。该研究实现了利用增材制造方法对于压力载荷下仿生防护结构的制备及其回复变形的功能的验证,为开发新型智能仿生防护结构提供了理论依据。

关键词:工程仿生学;仿生防护结构;NiTi 合金;增材制造;数值模拟

中图分类号: TB17 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2021)04-1540-08

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20210304

Analysis of mechanical characteristics and recovery characteristics of bionic protective structures based on additive manufacturing

YU Zheng-lei^{1,2}, CHEN Li-xin², XU Ze-zhou², XIN Ren-long², MA Long³, JIN Jing-fu⁴,
ZHANG Zhi-hui², JIANG Shan⁵

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. Key of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. College of Combat Service, Aviation University Air Force, Changchun 130022; 4. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 5. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

收稿日期: 2021-01-12.

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB1105100);国家自然科学基金项目(51975246);吉林省科技发展计划项目(YDZJ202101ZYTS134);汽车仿真与控制国家重点实验室自由探索项目(ascl-zytsxm-202013);吉林省教育厅“十三五”科技项目(YDZJ202101ZYTS134);吉林大学博士研究生交叉学科科研计划项目(101832020DJX052).

作者简介:于征磊(1984-),男,副教授,博士.研究方向:仿生结构设计.E-mail: zlyu@jlu.edu.cn

通信作者:金敬福(1978-),男,教授,博士.研究方向:工程机械仿生设计.E-mail: jinjingfu@jlu.edu.cn

Abstract: In this paper, based on the laser melting additive manufacturing technology of NiTi alloy, two intelligent bionic protective structures with memory recovery characteristics are established by using the design principle of structure bionics. The bionic structure model is prepared by selective laser melting technology. The mechanical properties and deformation recovery properties of the bionic structure model are analyzed by numerical simulation and test. The results show that by comparing the experimental force-displacement curve and its deformation mode, the simulation calculation results more accurately simulate the deformation and load-bearing characteristics of the bionic protective structure model sample in the static pressure process; the compression of the bionic protective structure can reach 15%, its compression strength is 81.4 MPa. Its deformation recovery rate reaches 99.04% under heating conditions after unloading. This research has realized the verification of the preparation and the function of restoring deformation of bionic protective structure under pressure load by using additive manufacturing method, which provides a theoretical basis for the development of new intelligent bionic protection structure.

Key words: engineering bionics; bionic protective structure; NiTi alloy; additive manufacturing; numerical simulation

0 引言

随着世界新军事变革向纵深推进,拥有高科技装备的国家越来越重视国防工程中的防护问题,而防护结构已在航空航天、车辆船舶、军用装备等领域发挥着越来越大的作用,国内外学者已对防护结构展开了深入的研究。姚艳玲等^[1]对不同厚度的均质铝合金板进行倾角效应试验,发现随着倾角增大,防护力逐渐提高。苟瑞君等^[2]发现陶瓷/泡沫铝/铝合金复合装甲背板具有较强的抗侵彻性能。Fan等^[3]为保护桥柱免受车辆碰撞,提出了一种基于超高性能的UHPFRC的新型保护结构。随着仿生技术的发展,模仿生物优异的结构特性越来越受到人们的重视。蜂窝材料因其良好的力学性能在军事航天等方面有着广泛的应用^[4,5],王显会等^[6]基于车辆底部爆炸冲击防护需求,通过数值模拟方法研究发现双层蜂窝结构较单层蜂窝结构具有更好的抗冲击性能。侯策等^[7]研究发现,填充聚氨酯的三角孔状蜂窝板可以在保证抗弹性能的基础上实现装甲的轻量化。梅相全等^[8]提出了“以塑代钢”的思路,在满足防护性能的前提下,其整体质量下降了35.9%。通过研究发现,目前国内外学者对防护结构的研究主要集中在如何提高结构性能和结构轻量化等方面,对防护结构的可回复变形方面提及甚少。

激光熔融增材制造技术是一种利用激光快速成型的3D打印技术,可以制备出传统方法难以加工的复杂结构,已在航天航空、医疗、电子等领域有着广泛的应用^[9-12]。在金属蜂窝和桁架结构方

面,可以通过3D打印来制作出很多的轻质吸能产品^[13,14]。形状记忆合金是一种智能材料,有着形状记忆效应以及超弹性等优良的性能^[15-18]。Zhang等^[19]基于形状记忆合金熔融沉积法,研究了管壁厚度、形状恢复温度等因素对复合材料形状记忆行为的影响。孙凡越等^[20]通过数值模拟的方法分析了形状记忆合金蜂窝材料的动力学响应特性。Kim等^[21]提出了一种由NiTi记忆合金螺旋弹簧制成的微型肌肉纤维,可实现自身的变形和运动。王琳^[22]对镍钛合金复合材料保险杠结构进行优化设计,验证了镍钛合金复合材料具有更好的力学特性和抗冲击性能。多孔结构由于孔隙率高,密度低,重量轻,高强度、耐冲击等诸多优点一直受到广大学者的青睐。Smith等^[23]用SLM技术制备体心立方和面心立方多孔结构并进行压缩试验。张凯雯^[24]通过3D打印技术制备膝关节假体多孔结构,通过试验模拟发现最大von Mises应力减小了约66.7%。Ali等^[25]利用熔融沉积法制备蜂窝多孔混合结构,新设计的混合结构比原始结构有更好的力学性能。由此可知,多孔金属、NiTi合金形状记忆特性和增材制造技术三者相结合,实现防护结构的制备以及高承载、抗冲击及形状回复功能是可行的。

本文从航空航天、车辆船舶防护等领域对可恢复的防护结构需求出发,运用仿生学设计原理,借鉴自然界中的具有优异承载特性和变形特性的蜂窝结构,利用三维建模软件CATIA设计并建立了相同胞元不同排列组合的两种仿生防护结

构,采用 NiTi 合金和激光熔融增材制造技术分别对其进行制备,最后通过数值模拟方法和试验测试,分别对其力学特性和回复变形特性进行分析,为寻求可回复变形仿生防护结构的设计方案提供了理论依据。

1 仿生防护结构模型建立

1.1 模型建立及边界条件

蜂窝结构有着比强度和比刚度高、重量轻等优点,作为承重和防护结构在航空航天、海洋工程等领域得到广泛应用,本文以蜂窝六边形结构为

基本单元,通过不同方式的排列组合,设计并建立了两种不同的仿生防护蜂窝拓扑结构模型,将图 1(a)中平面结构拉伸得到图 1(b),以图 1(b)中左侧点 1 为中心点进行三次圆形阵列得到结构(见图 1(c))的单元结构,以图 1(b)中右侧点 2 为中心进行一次圆形阵列得到结构(见图 1(d))的单元结构,图 1(c)(d)单元结构分别进行矩形阵列得到两种蜂窝拓扑结构,旨在对比研究其承载特性及抗冲击性能。该两种模型的轮廓尺寸相同,均为 $16\text{ mm} \times 16\text{ mm} \times 25\text{ mm}$,壁厚取 0.3 mm ,如图 1 所示。

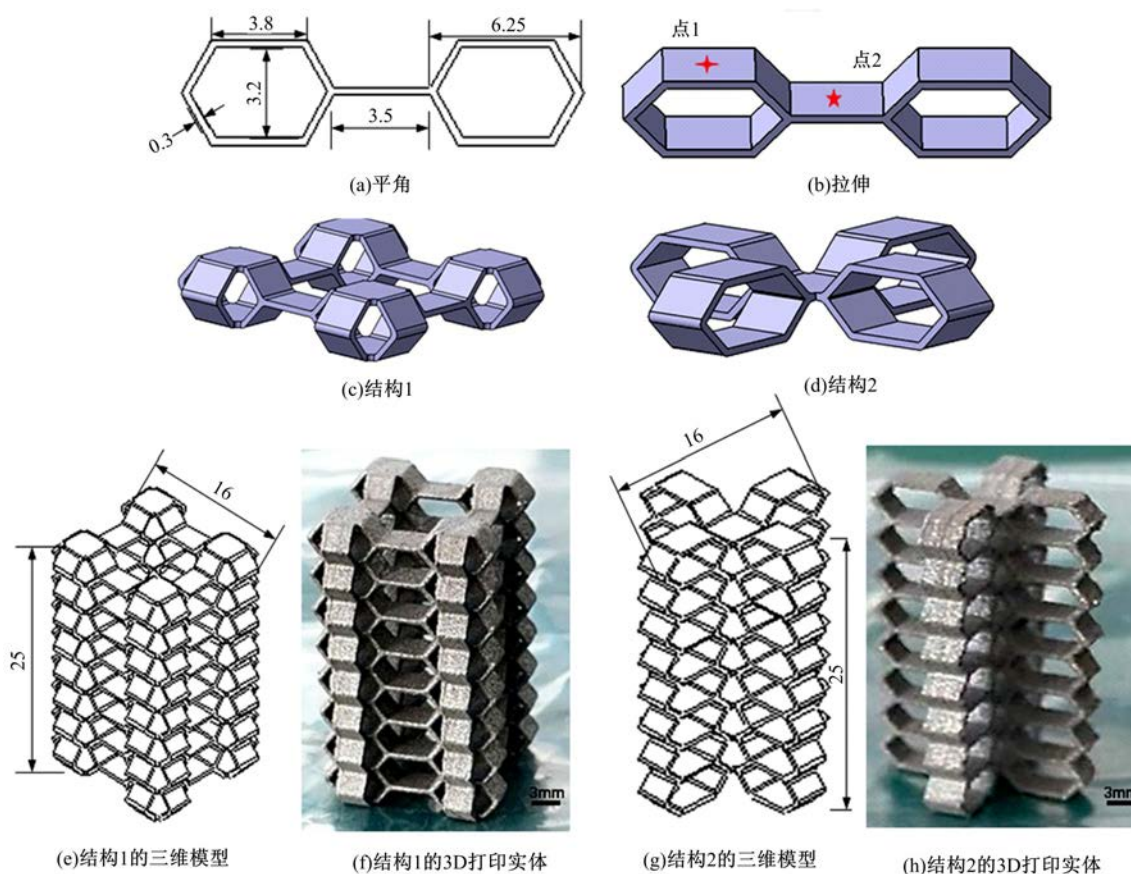


图 1 防护结构的设计样件

Fig. 1 Design sample of protective structure

采用 HyperMesh 和 LS-DYNA 进行有限元数值模拟。网格采用六面体网格,为了同时兼顾模型的计算精度以及运算效率,将模型网格尺寸设定为 0.6 mm ,仿生防护结构 1 和 2 的网格单元数分别为 38 977 和 21 377。结构样件的自接触采用单面接触,刚性墙与结构样件的接触为面面接触,静动摩擦因数均设为 0.3,两种防护结构模型的材料属性设置为 NiTi 合金,具体的材料属性通过拉伸试验得到。为了提高防护结构的稳定性,

对模型底部所有自由度均添加约束,顶端的刚性墙下压速率设置为 $V=0.03\text{ mm/s}$,压缩量设置为原始尺寸的 10% 至 15%,边界条件如图 2 所示。利用动力学求解器 LS-DYNA 进行求解,分析刚性墙加载的变形历程,并输出对应的力-位移曲线。

1.2 模型样件制备

为了实现仿生防护结构的自回复特性,选用具有形状记忆特性的 $\text{Ni}_{50.8}\text{Ti}_{49.2}$ 合金粉末作为仿

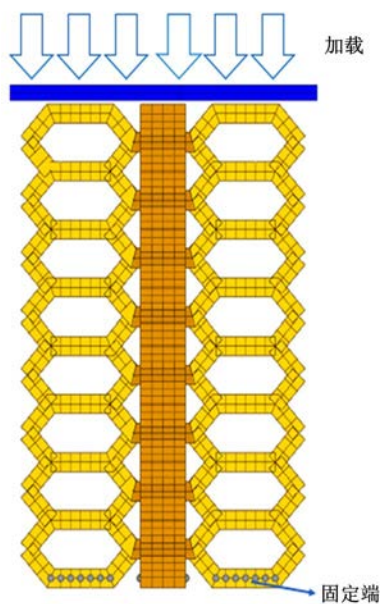


图2 仿生防护结构的网格划分及载荷边界条件

Fig. 2 Mesh division and load boundary conditions of bionic protective structures

生防护结构制备原料,粉末粒径为15~53 μm ,利用预置铺粉的激光选区熔化增材制造技术(SLM)实现模型样件的制备,该技术利用激光熔化粉末固化出所需的几何形状,在加工较高表面光洁度和几何精度的复杂结构方面有着突出的优势。

SLM技术中参数的选取往往对材料的性能起着关键的影响,同时也会改变NiTi合金的相变温度^[26,27]。作者前期通过正交试验的设计手段,对比了在不同打印工艺下NiTi合金的力学性能、形状记忆效应以及超弹性,综合对比了材料的微观结构和孔隙率等,最终确定了SLM最优的工艺参数如下:激光功率为100 W,扫描速度为600 mm/s,扫描间距为80 μm ,层厚为30 μm ^[28]。制备的拉伸样件具有典型常温马氏体平台(约200 MPa),使其常温下具有形状记忆效应(见图3)。同时,当外力或温度改变时,所制备的仿生防护结构样件会存在马氏体和奥氏体两种晶体相的相互转变,从而实现材料的自变形恢复。使用WDW-300微控电子万能试验机进行准静态拉伸试验,速度为0.03 mm/s,试验的应力-应变曲线如图3所示,其力学性能如下:弹性模量 $E=20\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.27$,屈服强度 $\sigma=210\text{ MPa}$,密度 $\rho=0.27\text{ g/cm}^3$,最大残余应变 $\epsilon=0.2$ 。打印后的仿生防护结构模型样件如图1(f)和(h)所示。

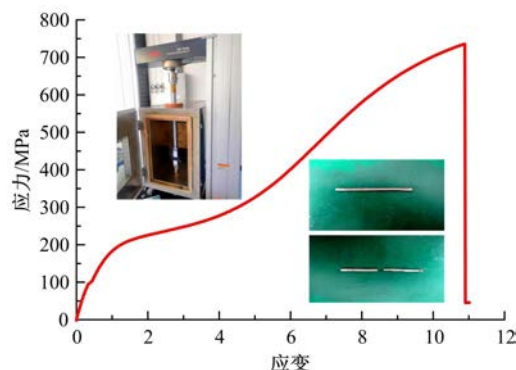


图3 材料的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of the materials

1.3 模型样件力学试验方法

本文利用WDW-300微控电子万能试验机分别对两种仿生结构模型样件进行准静态压缩试验,通过加载-卸载以及水浴加热的方法,研究两种模型样件的力学性能及其形状回复特性,试样位于支架和冲头之间,如图4(c)所示。液压系统以0.03 mm/s的速度向下驱动冲头,压缩量设置为10%,载荷-位移数据通过机器内置的传感器实时传输到计算机上,通过Origin软件处理得到两种结构模型的载荷-位移关系曲线,从而分析出两种结构模型样件的力学性能。加载结束后,将100 $^{\circ}\text{C}$ 的热水对两种模型样件进行加热,用摄像机记录样件的恢复过程,同时测量样件恢复情况,由此来测定仿生防护结构模型的形状回复特性。

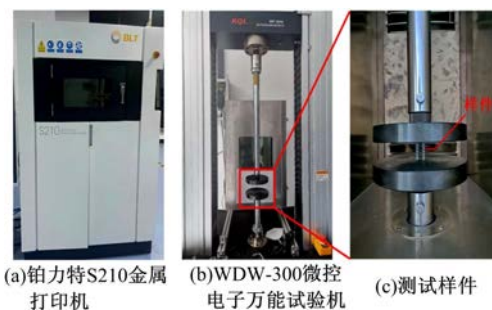


图4 增材制造装置和试验装置

Fig. 4 Additive manufacturing device and test device

1.4 模型样件力学性能评价指标

吸能缓冲结构的力学性能的评价指标可从试验测量的力-位移曲线中获得。根据力-位移曲线下的面积,计算EA如下:

$$EA = \int_0^x F dx \quad (1)$$

式中: x 为压缩位移; F 为施加载荷。

对于脆性材料,压缩强度是样件在压缩过程中产生破裂之前所能承受的最大压缩应力,计算

公式如下:

$$\sigma = \frac{f(x)}{S} \quad (2)$$

式中: $f(x)$ 为样件出现破裂之前承受的最大压力; S 为样件原始有效的横截面积。

2 仿生防护结构样件试验结果分析

2.1 力学性能试验与数值模拟结果分析比较

为了验证仿生防护结构准静态压缩数值模拟结果的有效性和正确性,图5给出了在相同压缩量下两种仿生防护结构模型数值模拟与试验测试的结果对比图。从图中可以看出,在相同的压缩时间内,两种仿生防护结构模型的试验过程与模拟结果的变形程度相似,整个压缩过程都未产生明显的变形带,当压缩位移 $s_1=s_2=1.2$ mm 时,两结构样件发生整体变形;当 $s_2=2.0$ mm、 $s_1=2.5$ mm 时可以发现,样件的加载端和固定端出现明显的变形,力从两端向中间一层一层地传递,两模型的试验与模拟的变形状态吻合度较好。图5给出了准静态试验和模拟获得的力-位移的曲线的对比图,从图中可以看出,结构2的力学性能要低于结构1,在整个变形时间段内,两结构的仿真与试验具有相同的起伏趋势,结构1试验与模拟的力最大值分别为 1660.34 N 和 1654.12 N,结构2试验与模拟的力最大值分别为 896.87 N 和 892.59 N,验证了本研究有限元模型的准确性,数值模拟的充分置信度可扩展到后续分析。

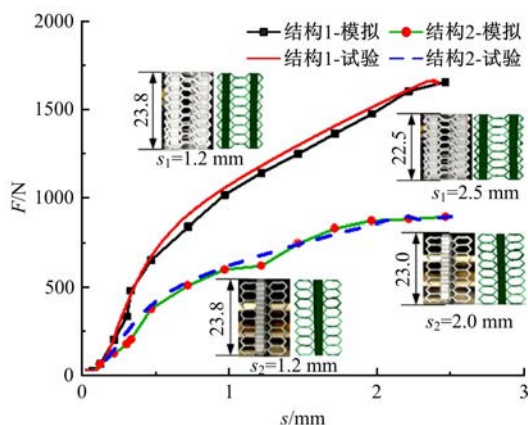


图5 两种结构试验与模拟的力-位移曲线对比图

Fig. 5 Comparison of force-displacement curves of the two structures tested and simulate

2.2 仿生防护结构回复特性分析

图5为两种仿生防护结构模型样件准静态压缩载荷-位移曲线图。由图中可知,整个压缩过程

可以分为两个不同的阶段,在压缩初始时期,样件主要位于线弹性阶段,力随着压缩位移的增大而增大,曲线斜率基本保持不变;随后由于外力作用,内部马氏体产生相变,由晶格的位错滑移使得应力随着应变的增大继续增大,当达到压缩位移时,两样件的力最大值分别达到了 1660.34 N 和 896.87 N。仿生防护结构模型2在压缩量 $s=2.2$ mm 处有明显的下降,这是因为模型2在压缩量为 10% 时结构发生了断裂,继续对结构1进行压缩直至位移至 15% 时发生断裂,两结构吸能量与压缩强度如图6所示,当压缩量均为 10% 时,结构1吸能量高于结构2,当都发生断裂时,结构1的压缩强度为 81.4 MPa,而结构2的压缩强度仅为 32.7 MPa,由此可知模型样件2的吸能量与抗压性能相对较差,在后续研究中将对此种结构进行改进。

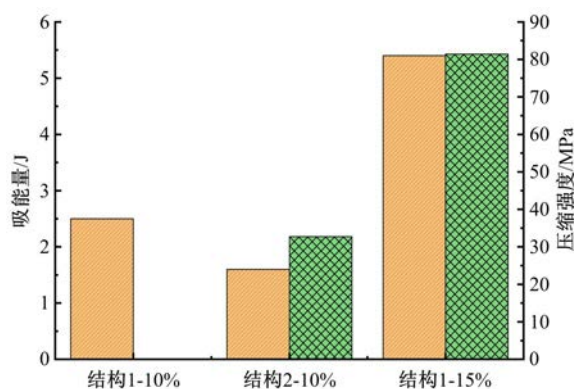


图6 仿生防护结构模型吸能量和压缩强度

Fig. 6 Bionic protective structure model absorbs energy and compressive strength

对仿生防护结构模型1卸载,水浴加热待其冷却后,测量发现其回复率为 100%。当第二次继续对模型1进行准静态压缩时,压缩位移为原样件的 15%。图7中插图加热前、后仿生防护结构的尺寸测量,卸载后加热发现仿生防护结构模型1回复率为 99.04%,这是由于常温中的结构样件处于单斜晶排布的马氏体状态,当样件结构受到外力时形成了马氏体单晶,产生了宏观的形变,由于马氏体的稳定性,卸载后不会产生形状改变,当温度达到奥氏体的相变温度点时,马氏体发生逆相变,转化为立方晶体排布,即单一取向的奥氏体,从而展现出 NiTi 合金的形状记忆恢复特性。

NiTi 形状记忆合金在应用过程中,循环变形行为会引起合金疲劳甚至失效,为进一步验证仿

生防护结构1的力学及其形状记忆回复特性,继续对结构1进行10次受载-卸载试验,当样件加载到指定压缩量时,卸载到零载荷并开始下一个加载过程,循环10次,压缩量为原始样件高度的10%,即压缩量为2.5 mm。图8为10次循环受载-卸载的力-位移曲线。从图中可以看出,力最大值为1774.26 N,卸载后其形状有一定的回复,这主要是基于NiTi合金的超弹性,超弹性是指在一定温度范围内,当外力远大于线弹性的变形量时,卸载后可以回复原状的特性。由其卸载后加热测其尺寸可知,其变形回复率为96%,实现了仿生防护结构的高强、抗疲劳和受激回复特性。

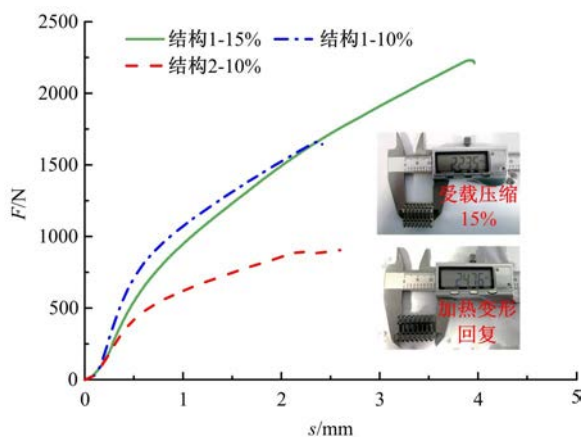


图7 仿生防护结构模型准静态压缩试验的力-位移曲线和模型1热诱导形状恢复行为测试

Fig. 7 Force-displacement curves and thermally induced shape recovery behavior of model 1 in quasi-static compression test of bionic protective structure model

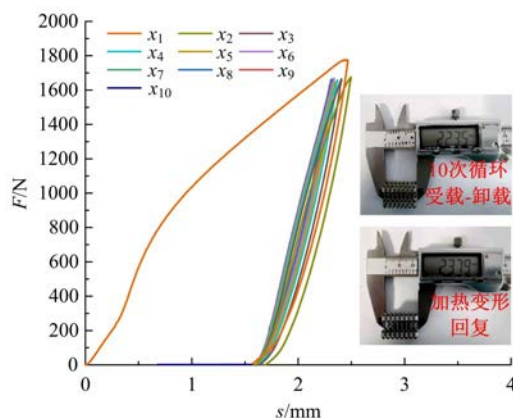


图8 仿生防护结构模型10次受载-卸载的力-位移曲线和热诱导形状恢复行为测试

Fig. 8 Force-displacement curve and thermally induced shape recovery behavior of the bionic protective structure model were tested for ten times under load-unloading

3 结 论

(1)借鉴蜂窝结构建立了两种仿生防护结构的有限元模型,并利用增材制造技术制备试验样件,通过对比仿生防护结构力学特性试验和数值模拟结果发现,有限元模型计算结果与试验结果吻合度良好,验证了数值模拟的准确性。

(2)通过对两种仿生结构模型进行力学特性测试发现,模型1压缩量在15%以上,其所受最大载荷达到了2200 N,压缩强度可达到81.4 MPa;而模型2压缩量不到10%时发生断裂,其所受最大载荷为890.87 N,压缩强度为32.7 MPa。模型1的压缩量比模型2高出50%,其所受最大载荷是模型2的2.5倍,因此模型1具有较好的力学特性。

(3)通过加热的方式对变形后的仿生防护结构样件进行形状恢复测试,发现样件1压缩量为10%时,其变形恢复为100%;当压缩量为15%时,其变形恢复率达到99.04%;继续对样件1进行10次的受载-卸载试验,发现其变形回复率为96%,从而验证了基于镍钛形状记忆合金材料的激光熔融增材制造技术制备出的仿生防护结构在外界条件激励下具有良好的自回复特性。

参考文献:

- [1] 姚艳玲, 赵宝荣, 钟涛, 等. 铝合金板抗枪弹倾角效应试验研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2005, 28(3): 33-36.
Yao Yan-lin, Zhao Bao-rong, Zhong Tao, et al. Study on obliquity effect of aluminum alloy plates against bullet[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2005, 28(3): 33-36.
- [2] 苟瑞君, 孙丹, 张博. 陶瓷/泡沫铝/铝合金复合装甲抗射流侵彻性能[J]. 含能材料, 2017, 25(6): 451-458.
Gou Rui-jun, Sun Dan, Zhang Bo. Anti-jet penetration performances of the Ceramic/Aluminum Foam/Aluminum alloy composite armor[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2017, 25(6): 451-458.
- [3] Fan Wei, Shen Dong-jie, Zhang Zhi-yong, et al. A novel UHPFRC-based protective structure for bridge columns against vehicle collisions: experiment, simulation, and optimization[J]. Engineering Structures, 2020, 207: 110247.
- [4] 张媛, 郑白哲, 李妮. 蜂窝夹心板的理论研究[J]. 北京工商大学学报:自然科学版, 2001, 19(4): 47-50.

- Zhang Yuan, Zheng Bai-zhe, Li Ni. Theoretical research of honeycomb sandwich panel[J]. Journal of Beijing Technology and Business University(Natural Science Edition), 2001, 19(4): 47-50.
- [5] Liu Ping, Liu Yan, Zhang Xiong. Internal-structure model based simulation research of shielding properties of honeycomb sandwich panel subjected to high-velocity impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 77: 120-133.
- [6] 王显会, 师晨光, 周云波, 等. 车辆底部防护蜂窝夹层结构抗冲击性能分析[J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(11): 1122-1126.
- Wang Xian-hui, Shi Chen-guang, Zhou Yun-bo, et al. Impact resistance analysis of honeycomb sandwich structure for the vehicle bottom protection[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(11): 1122-1126.
- [7] 侯策, 刘天生, 王凤英, 等. 不同填充物三角孔蜂窝板抗弹性能数值模拟研究[J]. 科技通报, 2017, 33(4): 1-5.
- Hou Ce, Liu Tian-sheng, Wang Feng-ying, et al. Numerical simulation research on ballistic performance of triangle hole honeycomb panel with different substances[J]. Bulletin of Science and Technology, 2017, 33(4): 1-5.
- [8] 梅相全, 宋小宁, 董野峰. 轻量化前下防护的设计研究[J]. 汽车零部件, 2020(12): 39-44.
- Mei Xiang-quan, Song Xiao-ning, Dong Ye-feng. Design and research of lightweight front underrun protection[J]. Automobile Parts, 2020(12): 39-44.
- [9] Kumar Rakesh, Kumar Manoj, Chohan Jasgurpreet Singh. The role of additive manufacturing for biomedical applications: a critical review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64: 828-850.
- [10] Oztan Cagri, Coverstone Victoria. Utilization of additive manufacturing in hybrid rocket technology: a review[J]. Acta Astronautica, 2021, 180: 130-140.
- [11] Cámara Torres Maria, Duarte Stacy, Sinha Ravi, et al. 3D additive manufactured composite scaffolds with antibiotic-loaded lamellar fillers for bone infection prevention and tissue regeneration[J]. Bioactive Materials, 2021, 6(4): 157-168.
- [12] Zhang Lei, Feih Stefanie, Daynes Stephen, et al. Energy absorption characteristics of metallic triply periodic minimal surface sheet structures under compressive loading[J]. Additive Manufacturing, 2018, 23: 505-515.
- [13] Baranowski Pawel, Płatek Pawel, Antolak-Dudka Anna, et al. Deformation of honeycomb cellular structures manufactured with laser engineered net shaping (LENS) technology under quasi-static loading: experimental testing and simulation[J]. Additive Manufacturing, 2019, 25: 307-316.
- [14] Zhang Xin, Ma Jun. Photothermal effect of 3D printed hydroxyapatite composite scaffolds incorporated with graphene nanoplatelets[J]. Ceramics International, 2021, 47(5): 46-53.
- [15] 朱雪洁, 钟诗江, 杨晓霞, 等. NiTi基形状记忆合金弹热效应及其应用研究进展[J]. 材料工程, 2021(3): 1-13.
- Zhu Xue-jie, Zhong Shi-jiang, Yang Xiao-xia, et al. Research progress in electrocaloric effect and its application of NiTi-based shape memory alloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2021(3): 1-13.
- [16] 郭良, 张修庆. 金属基形状记忆合金研究进展[J]. 功能材料与器件学报, 2020, 26(5): 323-330.
- Guo Liang, Zhang Xiu-qing. Research progress of metal-based shape memory alloys[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2020, 26(5): 323-330.
- [17] 王硕, 王元昊. 形状记忆合金及其研究进展综述[J]. 科学技术创新, 2020(21): 39-40.
- Wang Shuo, Wang Yuan-hao. Scientific and Technological Innovation[J], 2020(21): 39-40.
- [18] 廖赞, 汤京龙, 袁志山, 等. 钛镍形状记忆合金医疗器械评价方法研究进展[J]. 金属功能材料, 2020, 27(4): 55-60.
- Liao Zan, Tang Jing-long, Yuan Zhi-shan, et al. Research progress of assessment method for performance tests of NiTi shape memory alloy medical devices[J]. Metallic Functional Materials, 2020, 27(4): 55-60.
- [19] Zhang Wei, Zhang Feng-hua, Lan Xin, et al. Shape memory behavior and recovery force of 4D printed textile functional composites[J]. Composites Science and Technology, 2018, 160: 224-230.
- [20] 孙凡越, 赵梓裕, 王文健, 等. 温度对形状记忆合金蜂窝材料动力学响应的影响[J]. 山西建筑, 2021, 47(2): 91-92.
- Sun Fan-yue, Zhao Zi-yu, Wang Wen-jian, et al. The influence of temperature on the dynamic performance of shape memory alloy honeycombs[J]. Shanxi Architecture, 2021, 47(2): 91-92.
- [21] Kim Sangbae, Hawkes Elliot, Choy Kyujin, et al. Micro artificial muscle fiber using NiTi spring for soft robotics[C]//IROS, St. Louis, USA, 2009: 2228-2234.

- [22] 王琳. 镍钛合金复合结构保险杠性能的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学汽车工程学院, 2005.
Wang Lin. Study on the properties of Ni-Ti alloy composite structure bumper[D]. Harbin: School of Automotive Engineering, Harbin Institute of Technology, 2005.
- [23] Smith M, Guan Z, Cantwell W J. Finite element modelling of the compressive response of lattice structures manufactured using the selective laser melting technique[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2013, 67:28-41.
- [24] 张凯雯. 3D打印膝关节假体多孔结构对骨组织应力遮挡影响的数值仿真研究[D]. 长春:吉林大学机械与航空航天工程学院, 2019.
Zhang Kai-wen. Numerical simulation on the effect of 3D printed knee joint prosthesis on stress shielding of bone tissue[D]. Changchun: School of Mechanical and Aerospace, Jilin University, 2019.
- [25] Ali M H, Sagidolla B, Dulat K. Material minimization in 3D printing with novel hybrid cellular structures [J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 42(5): 1800-1809.
- [26] Wang Xie-bin, Yu Jing-ya, Liu Jiang-wei, et al. Effect of process parameters on the phase transformation behavior and tensile properties of NiTi shape memory alloys fabricated by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: No. 101545.
- [27] Sa Edi S, Moghaddam N S, Amerinatanzi A, et al. On the effects of selective laser melting process parameters on microstructure and thermomechanical response of Ni-rich NiTi[J]. Acta Materialia, 2018, 144: 552-560.
- [28] Yu Zheng-lei, Xu Ze-zhou, Guo Yun-ting, et al. Study on properties of SLM-NiTi shape memory alloy under the same energy density[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 13: 241-250.