三角晶格马蹄形微结构褶皱形变量的载荷调控机制

徐新纪[1] 纪小刚[1,2*] 江 昊[1] 冯 浩[1]
1.江南大学机械工程学院,无锡,214122
2.江苏省食品先进制造装备技术重点实验室,无锡,214122

摘要:通过数值模拟和试验对仿生皮肤应用场景下三角晶格马蹄形微结构褶皱形变量的载荷调控机制进行了研究。以三角晶格马蹄形微结构为基体,采用试验与数值模拟相结合的方式探寻了褶皱形变量大小的变化规律;通过数值对比法验证了数值模拟与试验的可靠性,探究了外部施加载荷对三角晶格马蹄形微结构褶皱变形量的调控机制。试验结果表明,当三角晶格马蹄形微结构作为仿生皮肤表面的组成部分时,外部施加载荷对其褶皱形变量的调控分为三个阶段。当褶皱形变分力小于1.5 N时,皮肤拉伸分力为褶皱形变量主导因素;当褶皱形变分力为1.5~3.0 N时,褶皱形变分力起主导作用,皮肤拉伸分力有一定的影响;当褶皱形变分力为3.0~4.4 N时,褶皱形变分力对褶皱形变量的影响极大,皮肤拉伸分力的影响极小。

关键词:三角晶格马蹄形微结构;褶皱形变量;外部施加载荷;增材制造
中图分类号:TB391
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.11.011 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Load Regulation Mechanism of Fold Deformation for Triangular Lattice Horseshoe-shaped Microstructures

XU Xinji[1] JI Xiaogang[1,2*] JIANG Hao[1] FENG Hao[1]
1.School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu, 214122
2.Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment Technology, Wuxi, Jiangsu, 214122

Abstract: The load regulation mechanism of the fold deformation was studied for the triangular lattice horseshoe-shaped microstructures in the application scenario of bionic skin through numerical simulation and tests. Taking the triangular lattice horseshoe-shaped microstructure as the matrix, the variation law of the fold deformation size was explored by combining tests with numerical simulations. Finally, the reliability of the numerical simulation and the tests was verified through numerical comparison method, and the regulation mechanism of the external applied loads on the fold deformation of the triangular lattice horseshoe-shaped microstructures was explored. The testing results show that when the triangular lattice horseshoe-shaped microstructure is used as a component of the bionic skin surface, the regulation of the fold deformation by the external applied loads is divided into three stages. When the component force of fold deformation is below 1.5 N, the component force of skin stretching is the dominant factor of fold deformation. When the fold deformation component force is at 1.5~3.0 N, the fold deformation component force plays the dominant role, with some influence from the skin stretching component. When the fold deformation component force is at 3.0~4.4 N, the influence of fold deformation component force on fold deformation is extremely significant, wherea the skin stretching component has negligible influence.

Key words: triangular lattice horseshoe-shaped microstructure; fold deformation; external load application; additive manufacturing

0 引言

近些年来,随着工厂生产需求的不断增长,软机器人和仿生机器人得到了广泛应用。为了能使这类机器人准确有效地模仿生产人员的动作,设计人员通过人造肌肉为机器人提供动力源[1-2]。普通蒙皮在承受较大载荷时易产生一定的形变,当形变量过大时对日常工作的效率及精度会产生一定的影响。为减小这类影响,相关研究人员开发了具有仿生和超材料设计的周期性拓扑网络材料[3]。

传统单一聚合物网络的传统软材料通常表现出较低的抗断裂性,而周期性拓扑网络材料具有良好的极端力学性能,如高拉伸性、坚固性、抗断裂性和抗疲劳性[4-6]。王广阳等[7]为揭示梯度设计的优化潜力,对均匀点阵结构和梯度结构进行对

收稿日期:2025-09-09
基金项目:国家自然科学基金(52175234,51105175);江苏省"六大人才高峰"项目(JXQC-006)

比分析，利用数字光处理技术制备点阵结构，通过压缩试验对各结构的力学响应、吸能响应以及应力分布展开研究，优选出最佳的力-能协同响应结构，并通过有限元仿真验证了压缩试验的可靠性。苏义麟等[8]针对负泊松比结构管状支架在工程应用中的性能优化问题展开研究，通过结构设计与力学分析相结合的方法系统探究了管状支架的抗压性能。在软质网状结构中，马蹄形微结构具有较为突出的拉伸性能，且通过选择合适的晶格拓扑结构能够再现独特的J形应力-应变响应曲线[9-10]。

为保障三角晶格马蹄形微结构实现有效运行，需从影响因素方面进行研究，探明发生破坏的临界条件以及变化趋势。针对这项课题，MARTIKAINEN等[11]分析了结构参数、轴向力、负压、材料参数等多种因素对皮肤变形的影响，并通过理论分析预测了皮肤褶皱的临界条件以及皮肤褶皱的面积，为预防疲劳破坏提供了一定的理论支撑。但是，普通结构的人造蒙皮依然存在诸多缺陷，而马蹄形微结构可有效地减小其形变量大小，因此为适应更多的场合，对三角晶格马蹄形微结构褶皱形变进行分析是必不可少的。

在实际应用过程中，三角晶格马蹄形微结构主要承受来自人工驱动器（主要为人造肌肉）施加的载荷。由于各位置的载荷方向不同，为方便研究将该结构所受载荷按方向分化为皮肤拉伸分力和褶皱形变分力。在研究过程中，首先通过有限元数值模拟的方式观察三角晶格马蹄形微结构的褶皱形变量并分析载荷对微结构的作用机制进而总结推断；然后通过试验的方式验证了有限元分析结果的可靠性；最后，通过多指标评价体系进一步验证了推断的可靠性。

1　样品制造以及试验设计

1.1　几何参数建模

马蹄形微结构具有出色的可拉伸性能、拓扑可编程性，并具有独特的J形应力-应变曲线。根据仿生结构的特性以及应用的成熟性，本文选择了三角晶格类型[12]，该晶格结构如图1所示。

为保证成形效果和所有试样晶格结构构型一致，取相对密度为34%，并且使各试样单位跨度相同，保证所有试样在相同尺寸下所包含的晶格个数相同。以相对密度为34%和固定单位跨度为约束条件，调控三角晶格马蹄形微结构的受力大小，探究在相同的相对密度和单位跨度条件下微观构型的受力变化对褶皱性能的影响。在本次



图1　晶格结构示意图

Fig.1　Schematic diagram of a single lattice structure

研究中，相对密度的取值主要影响试样的成形效果，对变形效果影响较小，故相对密度的取值对本研究结果不会有决定性的影响，后续研究中不作为变量考虑。后续分析将综合考虑受力变化对褶皱性能的综合作用机制。

为使试验结果可靠，需严格控制马蹄形微观结构的各项尺寸参数。为使马蹄形微观结构成形稳定且受力均匀，其弧角θ取180°。三角晶格马蹄形微结构受力产生变形时，其壁厚d对变形有极大的影响。相关研究发现[13]，当壁厚d为1.0～1.5 mm时，三角晶格马蹄形微结构的变形效果较好且不易发生断裂，因此本文取壁厚d=1.08 mm。在三角晶格马蹄形微观结构形变过程中，归一化宽度ξ（$\xi=d/l$，l为两个相邻晶格节点间的距离）也有一定的影响。相关研究发现[14]，归一化宽度ξ为0.05～0.10时三角晶格马蹄形微结构的性能较好，且在归一化宽度ξ=0.083时效果达到最佳。在综合考量弧角和壁厚对三角晶格马蹄形微结构的影响后，本文取归一化宽度ξ=0.06。由归一化宽度可得，三角晶格马蹄形微结构的单胞圆弧半径R_0=4.5 mm。综上，三角晶格马蹄形微结构的尺寸参数见表1，各尺寸示意图见图2。

表1　三角晶格马蹄形微结构的尺寸参数

Tab. 1　Dimension parameters of the triangular horseshoe-shaped microstructure

θ/(°)	d/mm	l/mm	R_0/mm
180	1.08	18	4.5

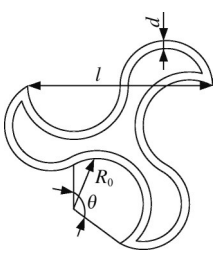


图2　单晶格各项参数示意图

Fig.2　Schematic diagram of various parameters of a single lattice

1.2　实验样品制备

首先对1.1节中所设计的晶格构建三维模

型，再根据模型的尺寸匹配设计相对应的夹具，并在Photon Ultra设备上进行打印成形。为保证成形效果和成形质量，数字光处理(DLP)加工技术的工艺参数如下：分层厚度0.2 mm，曝光时间6 s，灭灯时间1 s，底部曝光时间35 s，底部层数4，抗锯齿等级为8，厚度3 mm。所使用的是一种具有较强柔弹性的生物基光敏树脂材料，成形后使用体积分数为95%的工业酒精对打印结构进行冲刷，清洗表面树脂并确保孔隙存在，随后在紫外线光源下照射15 min使结构固化成形，打印实物如图3所示。



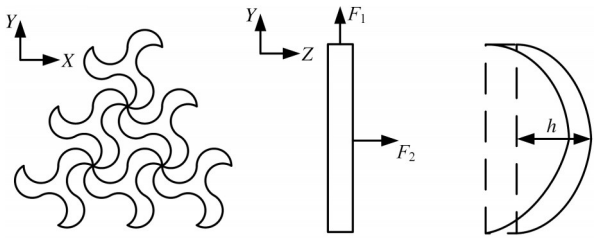
图3 打印实物

Fig.3 3D-printed objects

1.3 马蹄形微结构的褶皱形变试验方法

参考先前探究的试验方法，基于BTC-2000皮肤、软组织等弹性材料的机械性能实时测定系统原理完成试验。

三角晶格马蹄形微结构的结构简图见图4。图4a和图4b中标注了坐标系与外部载荷作用方向，两分图的平面坐标系互通，合并即为空间坐标系。本文的坐标系皆以此空间坐标系的方向为准。图4c中，虚线为马蹄形微结构的原始形态，实线为马蹄形微结构发生形变后的形态，h为褶皱形变量。



(a)主视图 (b)左视图 (c)受力变形图

图4 马蹄形微结构简图

Fig.4 Simple diagram of the horseshoe-shaped microstructure

试验过程中，将三角晶格马蹄形微结构水平放置且不可自由移动。如图5所示，三角晶格马蹄形微结构的一侧通过夹具和细绳与重物相连，以达到固定的效果；另一侧为三角晶格马蹄形微结构的受力拉伸端，通过夹具和细绳与砝码相连，砝码通过定滑轮将自身的重力转化为对夹具在水平方向上的拉力，以模拟皮肤拉伸分力F_1。因摩擦损耗较小可忽略不计，即拉力大小与砝码重力mg相等。利用CTM2500万能材料电子试验机(最大载荷为1 kN，载荷精度为±0.01%，位移精度为0.03 mm)对零件提供竖直方向上的拉力，以模拟褶皱形变分力F_2。

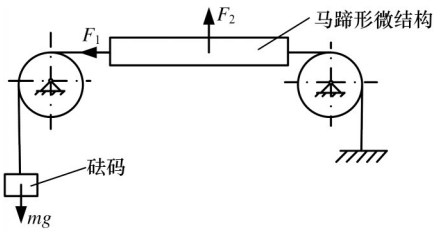
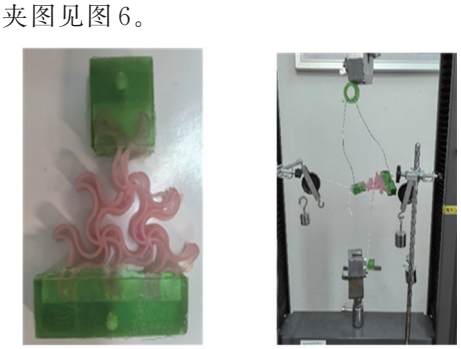


图5 试验原理图

Fig.5 Simplified diagram of the test process

试验过程中，考虑到三角晶格间的相互制约关系，需要保证三角晶格马蹄形微结构能作为一个整体承受载荷且不发生断裂，因此需不断增大F_1和F_2，以求得F_1和F_2的适用范围。经试验求得，当F_1=4.6 N、F_2=0时，三角晶格马蹄形微结构会发生断裂现象；当F_1=0、F_2=6.3 N时，三角晶格马蹄形微结构也会发生断裂现象。当F_1为4.2 N、F_2为4.4 N时，三角晶格马蹄形微结构发生了断裂现象，但通过减小F_1或F_2则均不会发生断裂。由此可知，F_1的适用范围为0～4.2 N，F_2的适用范围为0～4.4 N。为保证三角晶格马蹄形微结构的形变效果较好，本文中F_1和F_2的取值范围均为0～4 N。

夹具选择一种高强度的PLA生物基光敏材料进行3D打印，同时夹具光固化后的力学性能也能满足要求。夹具通过胶水与零件相连。具体实物装夹图见图6。



(a)试样装夹 (b)试验实物

图6 试验装夹图

Fig.6 Test clamping diagram

2 基于数值仿真的褶皱形变量分析

2.1 超弹性本构模型构建与材料参数标定

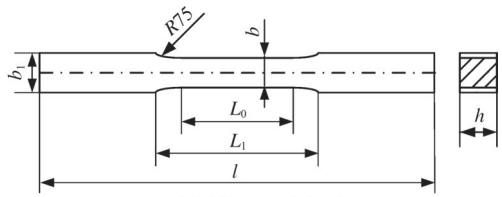
本试验使用的打印材料为广州瑞鑫通科技有限公司生产的生物基光敏树脂，该材料由7162弹

性单官聚氨酯丙烯酸树脂、3906弹性双官聚氨酯丙烯酸树脂、ACMO(丙烯酸吗啉)和IBOA(丙烯酸异冰片酯)4种成分按特定比例混合而成。在打印前材料呈现液体状态,具有较好的流动性,打印固化后具有一定的柔弹性且不具备各向异性,是性能良好的实验材料。参考国家标准GB/T25670—2021提供的测量方法获取材料的力学性能。拉伸试样的成形工艺参数与1.2节中实验样品所使用的工艺参数相同。拉伸试样的具体数据如表2所示。具体试样打印成形效果如图7所示。

表2　拉伸试样尺寸

Tab.2　Tensile specimen dimensions

参数	b	b_1	l	h	L_0	L_1
尺寸/mm	8	10	100	4	30	57.5



(a)拉伸试验尺寸标注



(b)拉伸试样尺寸实物

图7　拉伸试样尺寸以及成形效果

Fig.7　Tensile specimen dimensions and forming effects

柔弹性树脂属于典型超弹性材料,其应力与应变呈现非线性关系,力学行为相对复杂。为探明该材料的本构关系,将数据传输至仿真软件中,通过识别与解析发现Mooney-Rivlin本构模型与该材料的实验数据高度吻合。为验证Mooney-Rivlin模型的适用性,尤其是该模型表征大变形范围内材料非线性力学响应的能力,本文同步引入Neo-Hookean和Ogden(阶数n=2)两种常用的超弹性模型开展拟合对比分析。其中,Mooney-Rivlin模型的拟合系数为C_{10}=0.317,C_{01}=0.076,D_1=0.254;Neo-Hookean模型的拟合系数为C_{10}=0.39,D_1=0.21;Ogden(n=2)模型的拟合系数为α_1=1.85,μ_1=0.21,α_2=−3.5,μ_2=−0.015,D_1=0.245。利用最小二乘法对各模型参数进行优化拟合,并计算其决定系数R^2和均方根误差(RMSE)V_{RMSE}以评估拟合优度。

综上,3种模型的拟合结果对比如表3所示,可知Mooney-Rivlin模型(V_{RMSE}=0.021 MPa,R^2=0.992)和Ogden模型(V_{RMSE}=0.023 MPa,R^2=0.990)均能较好地表征该生物基树脂材料的非线性应力-应变行为,且拟合优度显著优于简化模型Neo-Hookean(V_{RMSE}=0.045 MPa,R^2=0.965)。

表3　三种模型拟合优度对比

Tab.3　Comparison of Goodness of Fit of Three Models

模型名称	RMSE/MPa	R^2
Mooney-Rivlin	0.021	0.992
Neo-Hookean	0.045	0.965
Ogden(n=2)	0.023	0.990

考虑到Mooney-Rivlin模型参数的物理意义明确(C_{10}、C_{01}可表征初始剪切模量的贡献,其中C_{10}用于表征一阶第一应变不变量剪切模量系数,适用于小应变场景;C_{01}用于表征一阶第二应变不变量剪切模量系数,适用于大应变场景),计算稳定性高,且在本文关注的应变范围内(<15%)表现优异,故后续有限元分析选用两参数Mooney-Rivlin模型。

基于上述材料本构模型的优选与参数标定,将其结果导入有限元软件中。为初步获取三角晶格马蹄形微结构的载荷-形变曲线,经过收敛性与稳定性测试对三角晶格马蹄形微结构设置尺寸为1.2 mm的网格分布,网格形状为六面体,具体网格划分如图8所示。



图8　三角晶格马蹄形微结构的网格划分

Fig.8　Meshing of triangular lattice horseshoe-shaped microstructures

三角晶格马蹄形微结构的约束条件如图9所示。在有限元软件中,空间坐标系方向与前文试验部分的空间坐标系方向完全一致。载荷施加过程中模型受力面均承受外力作用,因此F_1和F_2均采用表面载荷加载方式。F_1的方向是沿着Y轴正方向,作用于Y轴正方向一侧表面。F_2的方向是沿着Z轴正方向,作用于Z轴负方向一侧表面。微结构Y轴负方向一侧表面采用固定约束,固定约束为完全固定。将上述约束条件导入仿真软件中,并选用显式动力学板块对其进行仿真数值分析,以获取不同受力情况下三角晶格马蹄形微结构的载荷-形变曲线等力学数据。

2.2　马蹄形微结构褶皱形变的数值模拟

根据前文提及的方案对三角晶格马蹄形微结

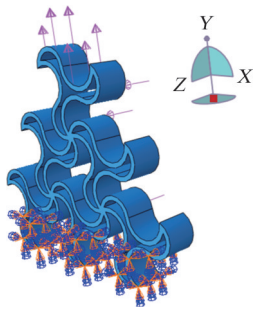


图9 三角晶格马蹄形微结构的约束条件图

Fig.9 Constraint condition diagram of the triangular lattice horseshoe-shaped microstructure

构进行有限元仿真分析。首先根据三角晶格马蹄形微结构的受力情况进行分组。在实验过程中，三角晶格马蹄形微结构同时承受F_1与F_2。设置正交对照试验，通过设置不同的受力组别对三角晶格马蹄形微结构进行有限元数值分析。F_1与F_2的范围均为0～4 N，且均以0.5 N为间隔。经过模拟仿真获取了三角晶格马蹄形微结构在不同受力情况下的载荷形变曲线，分别如图10和图11所示。

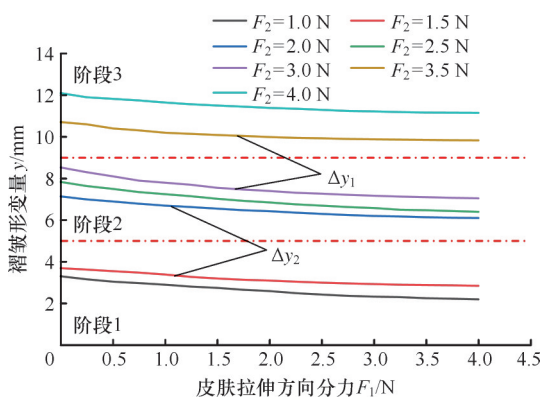


图10 三角晶格马蹄形微结构F_1-形变量曲线

（数值模拟）

Fig.10 F_1-displacement curve of the triangular lattice horseshoe-shaped microstructure（numerical simulation）

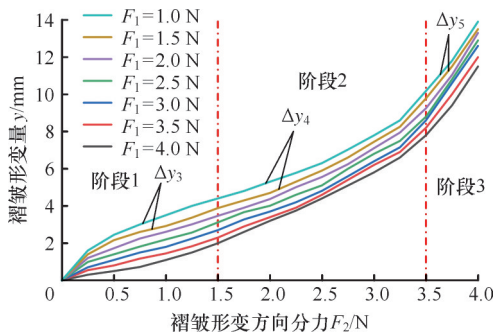


图11 三角晶格马蹄形微结构F_2-形变量曲线

（数值模拟）

Fig.11 F_2-displacement curve of the triangular lattice horseshoe-shaped microstructure（numerical simulation）

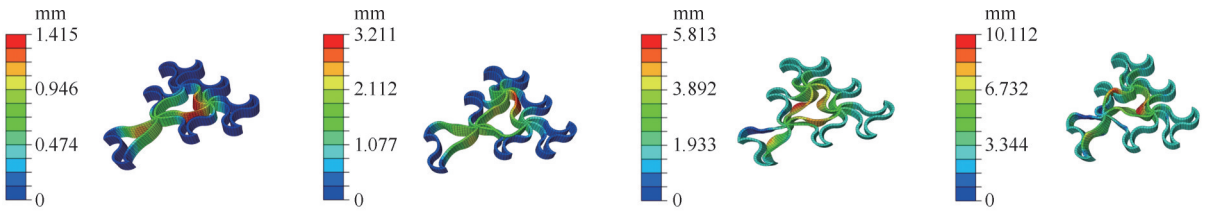
在载荷形变曲线中，当F_1或F_2相同时，设不同曲线纵坐标数值y的差值为Δy。在图10中，Δy越大，可视为F_2对褶皱形变的影响权重越大，而曲线的斜率可视为F_1对褶皱形变的影响权重。在图11中，Δy越大，可视为F_1对褶皱形变的影响权重越大，而曲线的斜率可视为F_2对褶皱形变的影响权重。

结合图10、图11并综合对比Δy与曲线斜率的大小可将形变过程分为三段。在阶段1，曲线的斜率较小，Δy值较大，在此阶段改变F_2对褶皱形变量的变化较小，与之相比改变F_1带来的褶皱形变量变化更为明显。在阶段2，曲线斜率的增长速率较大，Δy值与阶段1相比变化较小，但是有减小的趋势，在此阶段改变F_1与F_2均可为褶皱形变量带来变化且随着F_2的不断增大，F_2对褶皱形变量的影响越来越大，逐渐占据主导地位。在阶段3，曲线的斜率急剧增大，Δy接近0，在此阶段改变F_1对褶皱形变量的变化较小，与之相比改变F_2带来的褶皱形变量变化更为明显。

综合上述分析可得，三角晶格马蹄形微结构承受F_1与F_2时会发生形变，其形变过程可分为三个阶段。F_2<1.5 N时为阶段1，此阶段下F_2对三角晶格马蹄形微结构的褶皱形变量大小的影响较小，F_1占主导因素。1.5 N<F_2<3.0 N时为阶段2，此阶段下F_2对褶皱形变量的影响占主导因素，F_1的影响持续降低。3 N<F_2<4 N时为阶段3，此阶段下F_2对褶皱形变量的影响依然为主导因素，F_1的影响微乎其微。这主要源于独特的马蹄形结构，使得三角晶格马蹄形微结构承受F_1和F_2时参与面被拉长，由曲线逐渐变形为直线。三角晶格马蹄形微结构承受的F_1与F_2越大，参与面变形为直线的程度越高，进而后续产生变形所需要的力越大，产生变形的难度越大。

不同受力情况下三角晶格马蹄形微结构的褶皱形变云图见图12～图15。因受力变化不大的情况下等效应力变化不明显，故F_1和F_2均取1、2、3、4 N。通过分析褶皱形变云图可看出，三角晶格马蹄形微结构的褶皱形变较大的部位较少，即三角晶格马蹄形微结构的平均褶皱形变量远小于其极限褶皱形变量，因此分析时着重考虑其极限褶皱形变量即可。

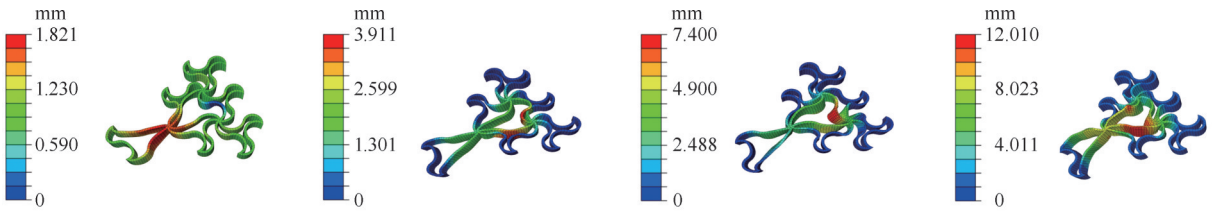
F_1较小（F_1≤2 N）时，极限褶皱形变量通常位于靠近F_1受力面的晶格节点及其附近处；F_1>2 N时，极限褶皱形变量通常位于靠近F_2作用点所在的薄壁上。F_2>2 N时，相比于增大F_1，增大F_2时褶皱形变量的增量更大。但是当F_1和F_2均大于3 N时，褶皱形变量的增量较小，二者的影响均很小。



(a) F_1=1 N, F_2=1 N　(b) F_1=1 N, F_2=2 N　(c) F_1=1 N, F_2=3 N　(d) F_1=1 N, F_2=4 N

图 12　F_1恒定为 1 N 的马蹄形微结构的褶皱形变云图

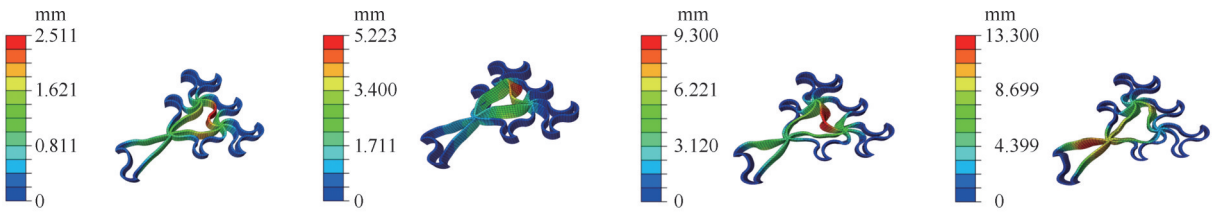
Fig.12　Fold deformation cloud diagram of the horseshoe-shaped microstructure with F_1 constant at 1 N



(a) F_1=2 N, F_2=1 N　(b) F_1=2 N, F_2=2 N　(c) F_1=2 N, F_2=3 N　(d) F_1=2 N, F_2=4 N

图 13　F_1恒定为 2 N 的马蹄形微结构的褶皱形变云图

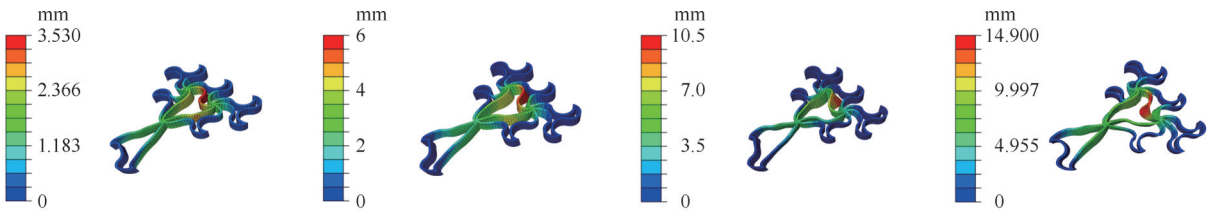
Fig.13　Fold deformation cloud diagram of the horseshoe-shaped microstructure with F_1 constant at 2 N



(a) F_1=3 N, F_2=1 N　(b) F_1=3 N, F_2=2 N　(c) F_1=3 N, F_2=3 N　(d) F_1=3 N, F_2=4 N

图 14　F_1恒定为 3 N 的马蹄形微结构的褶皱形变云图

Fig.14　Fold deformation cloud diagram of the horseshoe-shaped microstructure with F_1 constant at 3 N



(a) F_1=4 N, F_2=1 N　(b) F_1=4 N, F_2=2 N　(c) F_1=4 N, F_2=3 N　(d) F_1=4 N, F_2=4 N

图 15　F_1恒定为 4 N 的马蹄形微结构的褶皱形变云图

Fig.15　Fold deformation cloud diagram of the horseshoe-shaped microstructure with F_1 constant at 4 N

结合载荷曲线图分析可得，当F_1和F_2均小于1.5 N时，F_1对褶皱形变量的影响权重更高；当F_1和F_2均大于3 N时，F_2对褶皱形变量的影响权重较F_1略高，但二者影响均较小；当F_1和F_2均位于1.5～3.0 N时，F_2的影响权重更高且远大于第一阶段下F_1的影响权重。

3　基于试验的褶皱形变量分析

3.1　马蹄形微结构褶皱形变量的数据分析

本试验主要为了探究不同受力情况下三角晶格马蹄形微结构的褶皱形变量，所以在受力达到方案要求后便停止试验。为保证试验的准确性，每种受力情况下开展3次试验，取平均值来确定最终的褶皱形变量。不同受力情况下三角晶格马蹄形微结构的载荷-形变曲线见图16和图17。分析图16和图17可发现，随着F_1和F_2的变化，载荷-形变曲线呈现出一定的“抱团趋势”。在阶段

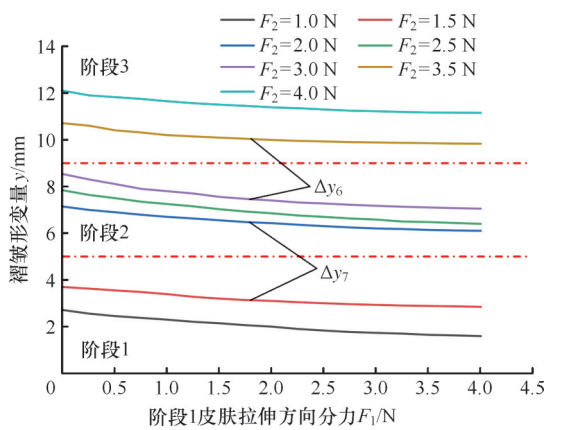


图 16　三角晶格马蹄形微结构F_1-形变量图（试验）

Fig.16　F_1-displacement curve of the triangular lattice horseshoe-shaped microstructure（test）

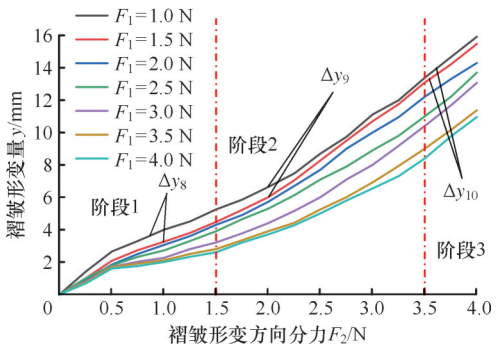


图17 三角晶格马蹄形微结构F_2-形变量图(试验)

Fig.17 F_2-displacement curve of the triangular lattice horseshoe-shaped microstructure(test)

1,与其他组别相比,F_1为1 N时的褶皱形变量明显更大,F_1为3、3.5、4 N时的褶皱形变量明显更小。在阶段2,F_2为1.5 N时的褶皱形变量急剧增大,与F_2为1 N时的褶皱形变量接近。F_2为3 N时的褶皱形变量急剧增大,与F_2为2、2.5 N时的皱形变量接近,且该趋势延续到阶段3。

在阶段3,与数值模拟阶段相比,试验阶段F_1的影响权重有一定的增加。发生该现象的原因为:在实际受力过程中由于各种误差的存在,使得三角晶格马蹄形微结构的受力相比于数值模拟阶段会有一定的偏差,进而导致该结构的变形也会存在一定的偏差,间接影响了褶皱形变量的大小。虽然存在一定的误差,但试验阶段载荷-形变量曲线整体的趋势与数值模拟阶段下的趋势相接近。

1.3节已提及,为保证试验效果,F_1与F_2的取值范围均选择为0~4 N。为了进一步探究三角晶格马蹄形微结构在发生断裂前外部施加载荷对其调控机制,本文通过试验来探究F_1为4.0~4.2 N且F_2为4.0~4.4 N时F_1和F_2的影响权重。当4.0 N<F_2<4.4 N时,F_1与F_2的影响权重与3 N<F_2<4 N时F_1与F_2的影响权重相同,故阶段3可拓展为3.0 N<F_2<4.4 N。

通过分析不同受力情况下三角晶格马蹄形微结构的载荷-形变量曲线和性能参数可以看出,在保证三角晶格马蹄形微结构尺寸大小和使用材料相同的前提下,通过对比影响幅度可发现承受不同F_1和F_2的三角晶格马蹄形微结构均表现出一致规律:在受力过程中,F_1对褶皱最大形变量的影响较大,而F_2则对褶皱平均形变量的影响较大。由此可知,需根据实际受力情况对三角晶格马蹄形微结构的褶皱变形进行合理预估。

3.2 马蹄形微结构褶皱形变量的影响权重分析

通过分析不同受力情况下的三角晶格马蹄形微结构的载荷-形变曲线,从中获取所需要的性能参数,如F_1方向伸长率、F_2方向伸长率等。为更好地观察各个性能指标随着受力情况改变的变化趋势,将不同受力情况下所获取的试验数据绘制于图18和图19。

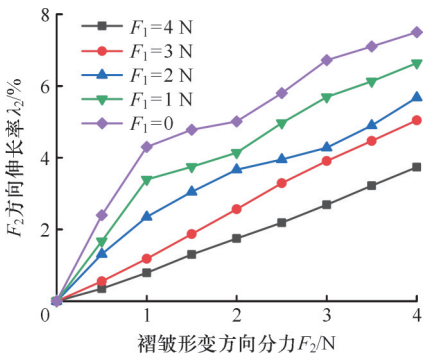


图18 不同F_1下的F_2方向伸长率对比图

Fig.18 Comparison chart of elongation at F_2 direction under different F_1

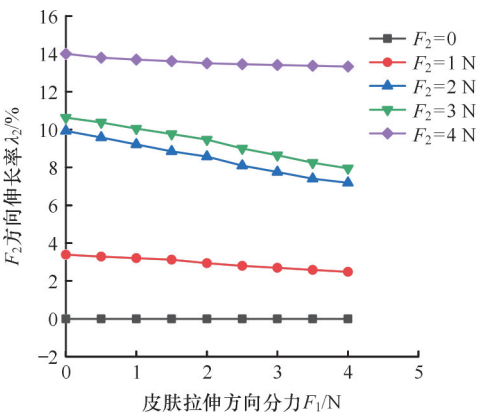


图19 不同F_2下的F_2方向伸长率对比图

Fig.19 Comparison chart of elongation at F_2 direction under different F_2

由图18和图19可以看出,F_2方向伸长率随着F_2的增大而增大,随着F_1的增大而减小。在力作用过程中,F_2方向伸长率的变化并非是线性的。当F_2<小于2 N时,F_2方向伸长率的增长速度较大。这是因为马蹄形体因其独特的结构致使此阶段作用于三角晶格马蹄形微结构的大部分F_1均用来拉伸三角晶格马蹄形微结构,三角晶格马蹄形微结构内部的反作用力较小,因此该阶段下三角晶格马蹄形微结构的形变量较大,其伸长率的增长速度较大。当F_2为2~3 N时,F_2方向伸长率的增长速度较为缓慢。这是因为此阶段下的三角晶格马蹄形微结构已接近形变最大,此时三角晶格马蹄形微结构内部的反作用力较大,它产生形变的难度急剧增大,致使该阶段下三角晶格马蹄形微结构的径向伸长率的增长速度较小。当F_2>3 N时,三角晶格马蹄形微结构的部分区域产生细微断裂,且断裂的区域也随着F_2的增大不断扩展,因此,此阶段下的三角晶格马蹄形微结构更

易发生形变且形变量较大，进而此阶段下的伸长率较大且F_1的大小对伸长率影响较小。

3.3　试验与数值模拟结果一致性验证

为全面评估有限元模型对三角晶格马蹄形微结构褶皱性能预测的可靠性，通过2.2节中的数值模拟方法可以计算出不同受力情况下三角晶格马蹄形微结构的褶皱形变量，试验与仿真的数据对比如图20所示。可以看出，部分样本存在稍大偏差，可能源于试验中边界条件微小差异以及仿真中对实际打印缺陷（微小孔隙或实际成形效果）进行理想化处理。总体而言，有限元模型能够较为可靠地预测不同受力情况下三角晶格马蹄形微结构的多项核心褶皱性能指标，为后续参数影响机制分析和优化设计提供了有效的数值工具支撑。

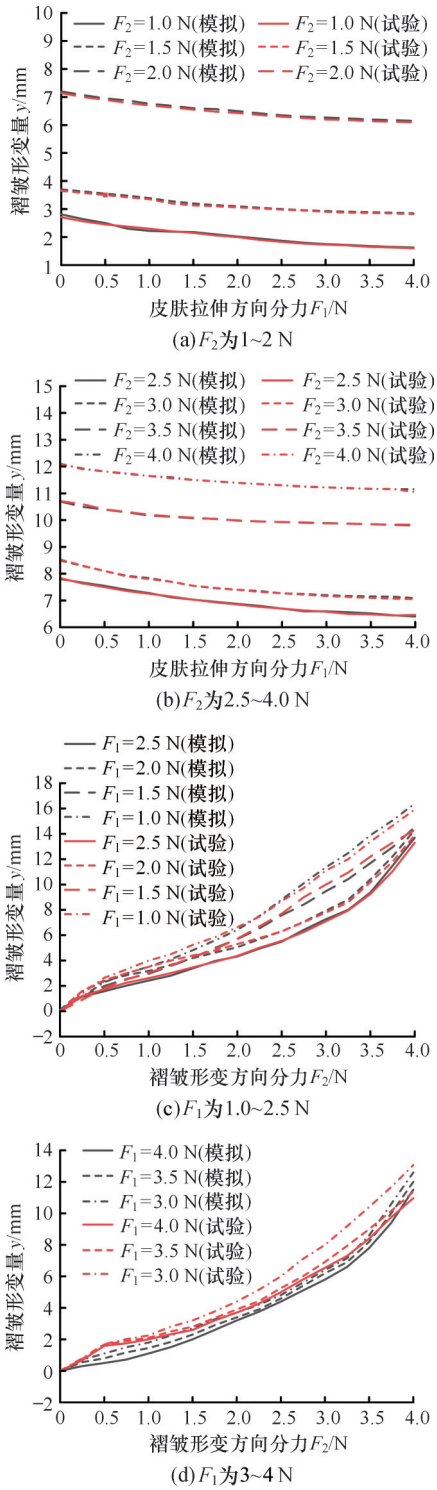


图20　试验数据与模拟数据对比

Fig.20　Comparison of test and simulation data

4　基于数值对比法的褶皱形变量分析

4.1　基于数值对比法的性能评价指标

三角晶格马蹄形微结构的应力变化对褶皱的产生起着决定性作用。当任何一个主应力小于0时即成为压应力，由于所使用材料的结构特性和不可压缩特性，褶皱将沿该应力方向发生，因此，为使三角晶格马蹄形微结构的褶皱形变尽可能小，应使其F_2方向所受应力尽可能小。记F_2方向所受应力为S_c，其计算表达式为[14]

$$S_c=\frac{\partial\omega}{\partial\lambda_2}=\mu\left(\lambda_2-\frac{1}{\lambda_2^3\lambda_1^2}\right) \tag{1}$$

式中：μ为剪切模量，在本文中可视为常量；ω为自由能量密度；λ_2为F_2方向伸长率；λ_1为F_1方向伸长率。

通过式(1)可得，欲使F_2方向所受应力尽可能小，应尽可能使F_2方向伸长率λ_2值小，且使F_1方向伸长率λ_1值大。

4.2　基于数值对比法的皱形变量影响权重分析

基于前文的褶皱性能评价指标，结合本文改变尺寸参数对性能参数的影响，获取了更多样本的褶皱性能参数。由式(1)可得，比较F_2方向所受应力S_c大小即可简化为比较$V=\lambda_2-[1/(\lambda_2^3\lambda_1^2)]$的大小。将试验所得数据代入简化公式$V$中，比较不同受力情况下$F_2$方向所受应力$S_c$的大小。计算各项数据并绘制于图21。

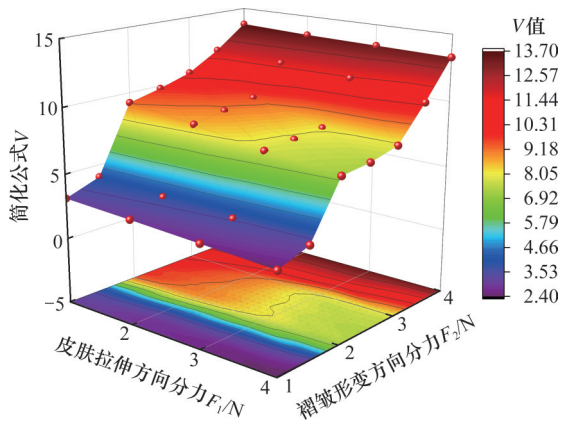


图21　S_c简化公式数值分布图

Fig.21　Numerical distribution map of the S_c simplified formula

分析图21可得，当$F_2<1.5$ N时，增大F_1为S_c带来的增长量大于增大F_2为S_c带来的增长量；当1.5 N$<F_2<$3.0 N时，增大F_1和F_2均可为S_c带来

增量，此阶段下增大F_2带来的S_c增量更为明显；当$F_2>3$ N时，增大F_1对S_c的增量影响较小，S_c的增量完全由F_2主导。

5 结论

1)三角晶格马蹄形微结构具有独特的J形应力-应变曲线。在严格控制相对密度和单胞跨度的约束条件下，改变受力情况会导致三角晶格马蹄形微结构的褶皱形变量发生不同程度的变化。本文系统研究了当三角晶格马蹄形微结构作为仿生皮肤表面的组成部分时，皮肤拉伸分力F_1和褶皱形变分力F_2对三角晶格马蹄形微结构褶皱位移量的影响。

2)依据国家标准的试验方法获取生物基树脂材料的力学性能，通过仿真软件识别分析本构关系，经对比3种本构模型发现与Mooney-Rivlin本构模型高度吻合。

3)结合有限元分析与试验数据，在保证相对密度和单位跨度相同的前提下，当三角晶格马蹄形微结构作为仿生皮肤表面的组成部分时，外部施加载荷对其褶皱形变量的调控分为三个阶段。$F_2<1.5$ N时，褶皱形变量的大小由F_1占主导因素；1.5 N$<F_2<$3.0 N时，褶皱形变量的影响权重逐渐由F_1向F_2偏移；3.0 N$<F_2<$4.4 N时，褶皱形变量的大小由F_2占主导因素，F_1的影响微乎其微。

4)通过计算获取不同受力情况下三角晶格马蹄形微结构的关键性能指标，并通过褶皱形变方向所受应力的计算公式确立了褶皱性能的综合评价指标，最终通过计算验证了结论3的可靠性。

参考文献：

[1] HU Lixuan, CHEE Pei lin, SUGIARTO S, et al. Hydrogel-based Flexible Electronics[J]. Advanced Materials, 2023, 35(14): 2205326.

[2] SONG Jiang, ZHANG Yanni, CHAN S Y, et al. Hydrogel-based Flexible Materials for Diabetes Diagnosis, Treatment, and Management[J]. npj Flexible Electronics, 2021, 5: 26.

[3] CHOCKALINGAM S, COHEN T. Shear Shock Evolution in Incompressible Soft Solids[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2020, 134: 103746.

[4] BERJAMIN H, CHOCKALINGAM S. Shear Shock Formation in Incompressible Viscoelastic Solids[J]. Wave Motion, 2022, 110: 102899.

[5] ARORA N, XIANG Y, RUDYKH S. Multiscale Analysis of Elastic Waves in Soft Materials: from Molecular Chain Networks to Fiber Composites[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2021, 200: 106433.

[6] 唐玉玲，韩露，张峻霞，等. 曲面碳纤维增强树脂复合材料点阵夹芯结构的弯曲和振动特性[J]. 复合材料学报，2023，40(6)：3651-3661.
TANG Yuling, HAN Lu, ZHANG Junxia, et al. Bending and Vibration Performance of Curved Carbon Fiber Reinforced Polymer Pyramidal Sandwich Structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(6): 3651-3661.

[7] 王广阳，纪小刚，牛国法，等. 密度梯度的IWP点阵结构力-能协同响应[J]. 中国机械工程，2026，37(1)：192-200.
WANG Guangyang, JI Xiaogang, NIU Guofa, et al. Density Gradient IWP Lattice Structural Force-energy Synergistic Response[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(1): 192-200.

[8] 苏义麟，纪小刚，辛嘉铭，等. 负泊松比管状支架结构的压缩刚度特性分析[J]. 中国机械工程，2026，37(3)：538-545.
SU Yilin, JI Xiaogang, XIN Jiaming, et al. Analysis of Compressive Stiffness Characteristics of Tubular Support Structures with Negative Poisson's Ratio[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(3): 538-545.

[9] CHANDRASEKARAN S, SANTIBANEZ F, TRIPATHI B B, et al. In Situ Ultrasound Imaging of Shear Shock Waves in the Porcine Brain[J]. Journal of Biomechanics, 2022, 134: 110913.

[10] CONROY BRODERICK H, DORFMANN L, DESTRADE M. Electro-elastic Lamb Waves in Dielectric Plates[J]. Extreme Mechanics Letters, 2020, 39: 100782.

[11] MARTIKAINEN L, BERTULA K, TURUNEN M, et al. Strain Stiffening and Negative Normal Force of Agarose Hydrogels[J]. Macromolecules, 2020, 53(22): 9983-9992.

[12] CONROY BRODERICK H, RUDYKH S. Analysis of Shear Shock Waves in Soft Materials: from Periodic Elastic Laminates and Fibre-reinforced Composites to Molecular Chain Networks[J]. International Journal of Solids and Structures, 2024, 295: 112790.

[13] LIU Jianxing, YAN Dongjia, ZHANG Yihui. Mechanics of Unusual Soft Network Materials with Rotatable Structural Nodes[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2021, 146: 104210.

[14] WANG Tao, WANG Xi, FU Guoqiang, et al. Theoretical Study of Vacuum-powered Artificial Muscles with Inner Support and Flexible Skin[J]. Engineering Research Express, 2024, 6(2): 025201.

（编辑 胡佳慧）

作者简介：徐新纪，男，2000年生，硕士研究生。研究方向为CAD/CAM、马蹄形微结构等。E-mail：1585627419@foxmail.com。**纪小刚***（通信作者），男，1977年生，教授。研究方向为逆向工程、计算机辅助设计技术、柔弹性材料增材制造。发表论文50余篇。E-mail：bhearts@jiangnan.edu.cn。

本文引用格式：

徐新纪，纪小刚，江昊，等. 三角晶格马蹄形微结构褶皱形变量的载荷调控机制[J]. 中国机械工程，2026，37(11)：2786-2794.

XU Xinji, JI Xiaogang, JIANG Hao, et al. Load Regulation Mechanism of Fold Deformation for Triangular Lattice Horseshoe-shaped Microstructures[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(11): 2786-2794.