(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 112836250 B
(45)授权公告日 2024.01.26

(21)申请号 202110003751.9
(22)申请日 2021.01.04
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112836250 A
(43)申请公布日 2021.05.25
(73)专利权人 中国科学院力学研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号
(72)发明人 刘文峰 宋宏伟 黄晨光
(74)专利代理机构 北京和信华成知识产权代理事务所(普通合伙) 11390
专利代理师 胡剑辉
(51)Int.Cl.
G06F 30/10(2020.01)
G06F 30/20(2020.01)
G06F 111/10(2020.01)
G06F 113/10(2020.01)
G06F 119/14(2020.01)

(56)对比文件
CN 103342036 A,2013.10.09
CN 110939853 A,2020.03.31
CN 110985872 A,2020.04.10
CN 111022538 A,2020.04.17
CN 111723438 A,2020.09.29
CN 112049886 A,2020.12.08
CN 112112918 A,2020.12.22
WO 2018114967 A1,2018.06.28
WO 2019238019 A1,2019.12.19
刘文峰等.一种最大限度提升熔融沉积3D打印点阵材料力学性能的方法.《中国力学大会论文集(CCTAM 2019)》.2019,3366-3373.
Shuai Kang等.Large twist angle of a novel 3D lattice structure via a tailored buckling mode.《Mechanics of Advanced Materials and Structures》.2023,1-13.

审查员 游婧

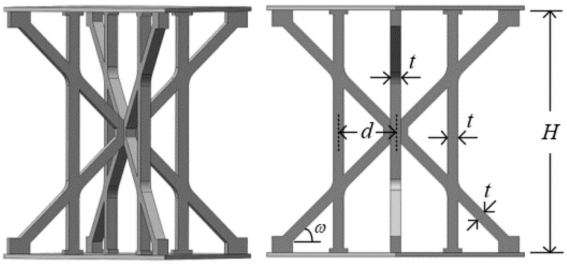
权利要求书1页 说明书4页 附图5页

(54)发明名称

一种屈曲驱动大角度扭转的点阵结构设计

(57)摘要

本发明提供一种屈曲驱动大角度扭转的点阵结构设计,点阵杆件,包括两根正交连接的斜杆构成的X形杆件,和分别垂直穿过X形杆件相交点两侧斜杆的贯穿竖杆,贯穿竖杆的高度与X形杆件的高度一致并与斜杆形成一体结构,贯穿竖杆的两端贯穿斜杆并与X形杆件的高度相同;点阵结构,由正交连接的两件点阵杆件,和对点阵杆件上下端部进行约束的面板组成。本发明利用杆件的非线性屈曲变形实现了结构瞬时的大角度扭转,单位轴向变形的最大瞬时扭转角达到了150°/%,远高于压扭手性超材料中的2°/%;因此,非线性屈曲变形所诱发的瞬时大角度扭转将进一步拓展压扭超材料的应用范围。



(a) (b)

CN 112836250 B

1.一种屈曲驱动大角度扭转的点阵结构设计,其特征在于,包括:

点阵杆件,包括两根正交连接的斜杆构成的X形杆件,和分别垂直穿过X形杆件相交点两侧斜杆的贯穿竖杆,贯穿竖杆的高度与X形杆件的高度一致并与斜杆形成一体结构,贯穿竖杆的两端贯穿斜杆并与X形杆件的高度相同;

点阵结构,由正交连接的两件点阵杆件,和对点阵杆件上下端部进行约束的面板组成;

所述贯穿竖杆与所述斜杆的连接位置需要满足如下条件:

所述贯穿竖杆位于同侧两根所述斜杆之间的长度需要小于同侧两根所述斜杆端部之间的高度,同时需要大于所述贯穿竖杆露出斜杆外的长度;

所述贯穿竖杆与所述斜杆的连接位置处于所述斜杆的中部;

在两个相交的所述点阵杆件中,其中一个所述点阵杆件的相交点处设置有开口朝向上方的内凹卡槽,另一所述点阵杆件的相交点处设置有开口朝向下方向的内凹卡槽,两个所述点阵杆件通过卡槽相互卡接后实现连接;

在所述斜杆的端部设置有方便相邻斜杆端部相互连接的延长段,且在所述斜杆和所述贯穿竖杆的两端分别设置有向垂直方向延伸的固定段,在所述面板上设置有与固定段位置对应的安装孔,所述点阵结构通过固定段插入所述面板上对应的安装孔后焊接固定;

所述面板上的安装孔位置与构成所述点阵结构中的所有斜杆、贯穿竖杆的延长段在顺时针或逆时针方向上统一偏移一个缺陷量,以使所述点阵结构在受到外部压力时,其内部的所述点阵杆件实现统一定向扭转。

2.根据权利要求1所述的点阵结构设计,其特征在于,

所述斜杆和所述贯穿竖杆的截面为正方形。

3.根据权利要求2所述的点阵结构设计,其特征在于,

所述斜杆和所述贯穿竖杆的直径一致。

4.根据权利要求1所述的点阵结构设计,其特征在于,

两个所述点阵杆件的连接点通过焊接固定。

5.根据权利要求1所述的点阵结构设计,其特征在于,

多个所述点阵杆件通过不锈钢板直接切割形成,然后拼接成所述点阵结构。

一种屈曲驱动大角度扭转的点阵结构设计

技术领域

[0001] 本发明涉及点阵吸能结构领域,特别是涉及一种在受到外力时呈献屈曲驱动大角度扭转的点阵结构设计。

背景技术

[0002] 压缩扭转力学超材料是当前力学超材料研究的热点,最初由卡尔斯鲁厄理工学院的Wegener团队在2017年提出,它通过超材料中的三维手性单元结构将单元杆件内的线弹性变形转化为宏观的扭转变形,打破了传统均质材料中胡克定律的约束,获得了更高的设计自由度。

[0003] 将手性结构中杆件的线性变形转化为结构的扭转变形可以获得稳定增长的扭转角度,但由杆件中线弹性变形驱动的扭转角度通常较小,在该研究中在单位轴向应变中获得的最大扭转角仅为2°/%,同时手性结构的设计和制备较为复杂。杆件的屈曲变形作为一种常见的非线性变形特征,常被用来进行多稳态力学超材料的设计,而利用单元杆件的非线性屈曲变形实现瞬时的大角度扭转的研究至今鲜有报道,相较于三维手性超材料中稳定渐进的小角度扭转,非线性屈曲变形所诱发的瞬时大角度扭转将进一步拓展压扭超材料的应用范围。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种在受到外力时呈献屈曲驱动大角度扭转的点阵结构设计。

[0005] 具体地,本发明提供一种屈曲驱动大角度扭转的点阵结构设计,包括:

[0006] 点阵杆件,包括两根正交连接的斜杆构成的X形杆件,和分别垂直穿过X 形杆件相交点两侧斜杆的贯穿竖杆,贯穿竖杆的高度与X形杆件的高度一致并与斜杆形成一体结构,贯穿竖杆的两端贯穿斜杆并与X形杆件的高度相同;

[0007] 点阵结构,由正交连接的两件点阵杆件,和对点阵杆件上下端部进行约束的面板组成。

[0008] 本发明相较于三维手性压扭超材料中将杆件内的线弹性载荷转化为宏观结构的扭转变形,公开的压扭点阵结构利用杆件的非线性屈曲变形实现了结构瞬时的大角度扭转,单位轴向变形的最大瞬时扭转角达到了150°/%,远高于压扭手性超材料中的2°/%。非线性屈曲变形所诱发的瞬时大角度扭转将进一步拓展压扭超材料的应用范围。

附图说明

[0009] 图1是本发明一个实施方式的点阵结构的结构示意图;其中(a)为点阵结构的立体图,(b)为点阵结构的正视图;

[0010] 图2是本发明一个实施方式的点阵结构扭曲状态示意图;其中,(a)为点阵结构的扭曲状态示意图,(b)为(a)的俯视图;

[0011] 图3是本发明一个实施方式的点阵杆件结构示意图；

[0012] 图4是点阵结构的扭矩受力示意图；

[0013] 图5是点阵结构的嵌锁结构示意图；

[0014] 图6为点阵结构的压缩扭转变形过程，图中示出四种扭转角度下杆件的变形情况，其中(a)是数值模拟条件下点阵扭转的俯视图和正视图，(b)是实验条件下的扭转变形过程；

[0015] 图7是图6点阵结构在扭转变形过程的载荷位移曲线和扭转角位移曲线；

[0016] 图8是本发明一个实施方式中，定向扭转点阵结构中缺陷的设置示意图；

[0017] 图9是定向扭转和非定向扭转点阵结构的压缩应力和扭转角关于压缩应变的变化关系。

具体实施方式

[0018] 以下通过具体实施例和附图对本方案的具体结构和实施过程进行详细说明。

[0019] 如图1、3所示，在本发明的一个实施方式中，公开一种屈曲驱动大角度扭转的点阵结构设计，包括：点阵杆件和点阵结构。

[0020] 该点阵杆件包括两根正交连接的斜杆11构成的X形杆件1，和分别垂直穿过十字杆1相交点两侧斜杆的贯穿竖杆2，且贯穿竖杆2的高度与X形杆件 1的高度一致并与斜杆11形成一体结构。X形杆件1在安装时以两杆斜杆11 的同一端接触地面，形成45度倾斜放置的状态，贯穿竖杆2的高度与倾斜摆放的X形杆件1的高度相同并垂直于地面。本实施方式中斜杆11和贯穿竖杆 2的截面均为正方形，且斜杆11和贯穿竖杆2的直径一致，即斜杆11和贯穿竖杆2形状尺寸一致。

[0021] 该点阵结构由两个点阵杆件1通过相交点正交连接形成，两个点阵杆件1 垂直连接，使连接后的斜杆11在圆周范围内相互间隔90度。

[0022] 在使用时，点阵结构可通过各斜杆11的端部相互水平连接；连接后的点阵结构可以是一个以单点阵结构为基础在水平方向上向四周无限延展的框架。

[0023] 该面板包括覆盖并固定在点阵结构上下面上的上面板和下面板；具体连接方式可以是与斜杆11的四个端点和贯穿竖杆2的两端进行固定连接。面板可以是任意应用于点阵结构的设备所采用的材料，如金属板、塑料板等，本实施方式中采用不锈钢板。

[0024] 本实施方式中的点阵结构其中心节点在压缩过程中会发生转动，转动轴与Z轴成一定的角度。为了使点阵结构的面板所在平面在压缩过程中发生绕Z 轴的转动，则中心节点的转轴要与Z轴重合。因此，为使点阵结构在压缩过程中绕Z轴转动，则在X形杆件1上沿Z轴方向加入贯穿的贯穿竖杆12，斜杆11对贯穿竖杆12面内屈曲变形的约束能力要高于其对贯穿竖杆12面外变形的能力。因此，压缩过程中点阵结构的贯穿竖杆12均为发生面外屈曲变形，当点阵结构的贯穿竖杆12的屈曲方向一致时，点阵结构则具有最小的临界屈曲载荷，此时面板具有贯穿竖杆12提供的扭转驱动力。

[0025] 如图2所示，左侧为点阵结构在面外(Z轴)压缩载荷下的屈曲变形特征，其右侧给出了上下面板在固定端约束条件下的面外压缩数值计算结果，贯穿竖杆12在斜杆11的约束作用下，屈曲变形呈逆时针方向，与设计一致。

[0026] 本实施方式相较于三维手性压扭超材料中将杆件内的线弹性载荷转化为宏观结

构的扭转变形,本方案中提出的压扭点阵结构利用杆件的非线性屈曲变形实现了结构瞬时的大角度扭转,单位轴向变形的最大瞬时扭转角达到了 150°/%,远高于压扭手性超材料中的2°/%;因此,非线性屈曲变形所诱发的瞬时大角度扭转将进一步拓展压扭超材料的应用范围。

[0027] 在前述说明中,虽然是以点阵结构作为说明对象,但是实际应用中,都是以相互连接的点阵结构形式存在,其整体受力形式和反映与点阵结构一致。

[0028] 为提高点阵结构的牢固性,点阵杆件相互之间的连接点,及与面板之间的连接,可通过焊接进行固定。

[0029] 当贯穿竖杆12与斜杆11相交于端部时,斜杆11对贯穿竖杆12的屈曲方向起不到任何约束作用;当贯穿竖杆12距离中心连接点距离过小时,贯穿竖杆12屈曲变形后产生的扭矩太小,也无法驱动点阵结构的持续扭转,因此,为保证压缩过程中点阵结构的扭转,贯穿竖杆12与斜杆11的连接位置需要满足如下约束条件:

[0030] 贯穿竖杆12位于同侧两根斜杆11之间的长度需要小于同侧两根斜杆11 端部之间的高度,同时需要大于贯穿竖杆12露出斜杆11外的长度。

[0031] 参见图3,即为$l_2<l_1<H$。

[0032] 如图4所示,点阵结构的扭矩由贯穿竖杆12屈曲过程中的水平分量提供,扭矩大小为:$M=4dF_T$。

[0033] 为方便连接,在两个相交的点阵杆件中,其中一个点阵杆件的相交点处设置有开口朝向上方的内凹卡槽,另一点阵杆件的相交点处设置有开口朝向下方向的内凹卡槽,两个点阵杆件通过卡槽相互卡接后实现连接。在实际操作中,并不区分开口方向,只需要将连接的点阵杆件翻转后插在另一点阵杆件上即可。

[0034] 此外,在斜杆11的端部设置有方便水平方向连接的延长段,延长段在点阵杆件的状态下水平向外延长,以方便相邻的点阵杆件相互连接,此外,延长段还可以起到增加与面板之间固定强度的效果。

[0035] 在本发明的一个实施方式中,为方便制作点阵杆件,多个点阵杆件可通过不锈钢板直接切割形成,即直接切割出一排由多个点阵杆件通过斜杆11端部相互连接的结构,然后拼接成具备一定面积的点阵结构。该方式可以降低点阵杆件的制作难度,提高安装效率,同时在强度上更有保证。

[0036] 以下结合具体的测试例子说明点阵结构设计效果。

[0037] 实现压扭点阵结构压缩过程中扭转的观察,需要将面板转动的约束释放,在数值模拟中释放一次面板的转动约束比较简单。而在实验中,为保证点阵结构自由转动,借助推力轴承设计了一套加载装置,可以使点阵结构固定在加载装置上后,通过转动实现上下两个面板的相对转动,进而使中间的点阵结构表现出扭曲的状态。

[0038] 如图5所示,采用利用PolyJet3D打印技术打印出点阵结构中的点阵杆件,再利用嵌锁组装方式将点阵杆件组装成点阵结构,可保证加载过程中点阵杆件不因大变形而发生断裂,其中,点阵结构高度H=35mm,所有点阵杆件中的斜杆和贯穿竖杆均为正方形截面,厚度为t=1.75mm,斜杆倾角ω=45°,贯穿竖杆距中心节点距离d=5.5mm。

[0039] 图6给出了一侧边界自由转动条件下压扭点阵结构的面外压缩加载实验和数值模拟结果。数值模拟为准静态加载,单元选择为四面体单元,实验采用位移加载,加载速度为

1.5mm/min。图6(a)是数值模拟得到的压扭点阵结构在0°,30°,60°和90°扭转角状态杆件变形的俯视图和正视图;图6(b) 是四种扭转角状态下点阵杆件变形的实验结果。从图中可以看出实验和数值模拟得到的变形扭转结果一致。

[0040] 图7为压扭点阵结构的压缩应力-应变曲线和扭转角-应变曲线,从图中可以看出应力在达到峰值1.13MPa后由于点阵杆件的屈曲变形迅速发生了峰后弱化现象,而点阵结构的扭转角在应力到达峰值之前呈线性缓慢增长,当载荷达到峰值时扭转角仅为4°,伴随着点阵杆件的屈曲变形,点阵结构的扭转角迅速增大,在应变增加0.14%的前提下,扭转角增加了21°,瞬时单位轴向应变的扭转角达到了150°/%,远高于压扭变性超材料中的2°/%,在这一过程中,应力值下降为峰值应力的71%。随后扭转角速度开始逐渐变小,当压缩位移达到0.145时,扭转角度已经达到了100°,此时的应力值仅为峰值应力的32%。

[0041] 在本发明的一个实施方式中,在斜杆和贯穿竖杆的两端分别设置有向垂直方向延伸的固定段,即向上面板和下面板方向延伸;在上面板和下面板上分别设置有与固定段位置对应的安装孔,点阵结构通过固定段插入面板上对应的安装孔后焊接固定。

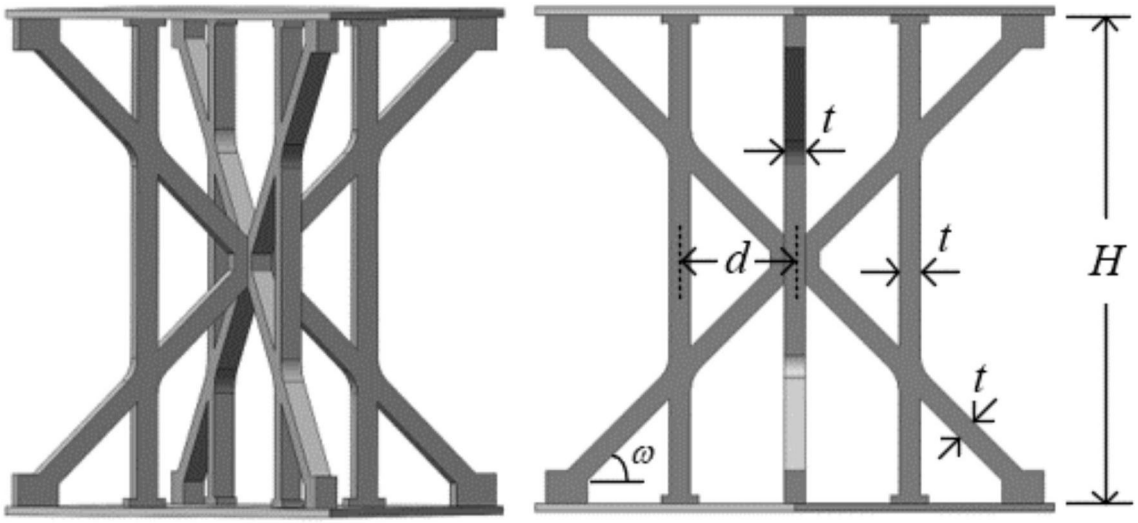
[0042] 进一步的,该安装孔与构成点阵结构中的所有斜杆、贯穿竖杆的固定段在顺时针或逆时针方向上统一偏移一个缺陷量,以使点阵结构在受到外部压力时,其内部的点阵杆件实现统一的定向扭转。

[0043] 由于上述点阵杆件构成的屈曲点阵结构的扭转方向并不具有确定性,为实现屈曲点阵结构的定向扭转,可对上述屈曲点阵结构设置响应的缺陷来诱发点阵结构的定向转动。对于嵌锁组装点阵结构,图8给出了一种初始扭转缺陷的设置方案,即将一侧面板上内部四个孔洞以逆时针(或顺时针)偏移一个微小量,形成一个逆时针转动的缺陷。将点阵杆件插入面板后,点阵杆件上便形成了相应的装配缺陷,诱导点阵结构在压缩载荷作用下逆时针转动。本方案中,偏移量设置为t/2。

[0044] 图9给出了逆时针定向转动的压扭点阵结构的压缩变形过程,从图中可以看出,图9为定向转动和非定向转动点阵结构压缩应力-应变曲线和扭转角 -应变曲线的对比。从图中可以看出,点阵结构实际的扭转方向与缺陷设置的转动方向一致,四种扭转角状态下的杆件变形模式也于非定向压扭点阵结构中对应的变形模式基本一致。含缺陷的定向扭转点阵结构的峰值应力要明显低于非定向扭转的点阵结构的峰值应力,并且定向扭转点阵结构在到达峰值载荷后并没有出现明显的峰后弱化现象,杆件呈现稳定后屈曲状态。

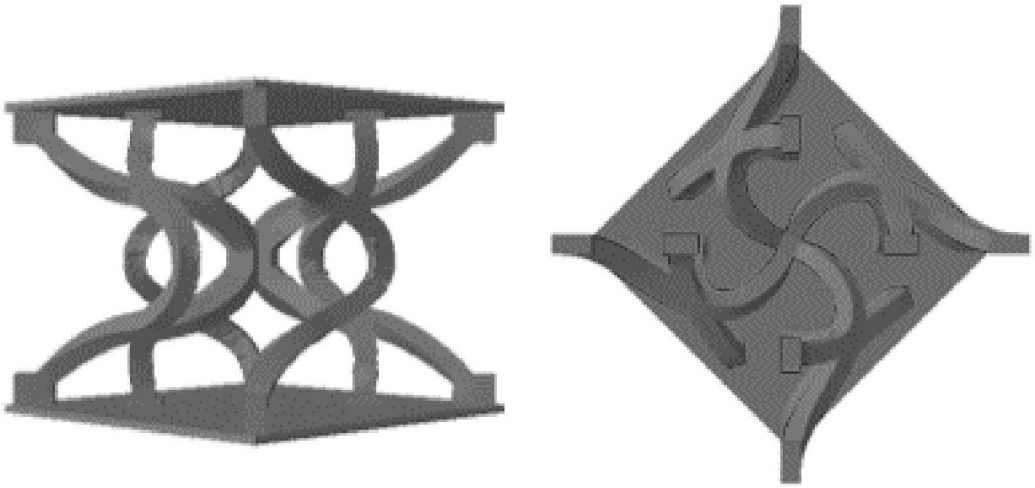
[0045] 与非定向压扭点阵结构屈曲失稳时瞬间大幅增加的扭转角不同,定向压扭点阵结构的扭转角与压缩应变近似线性变化。在非定向扭转点阵结构发生屈曲失稳之前,结构的扭转角度要明显小于同等应变状态下定向扭转点阵结构的扭转角,在杆件后屈曲变形后,非定向扭转点阵结构的扭转角开始逐渐大于定向扭转点阵结构的扭转角,在压缩应变达到0.08后,二者的扭转角差距基本维持不变。

[0046] 至此,本领域技术人员应认识到,虽然本文已详尽示出和描述了本发明的多个示例性实施例,但是,在不脱离本发明精神和范围的情况下,仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此,本发明的范围应被理解和认定为覆盖了所有这些其他变型或修改。



（a） （b）

图1



（a） （b）

图2

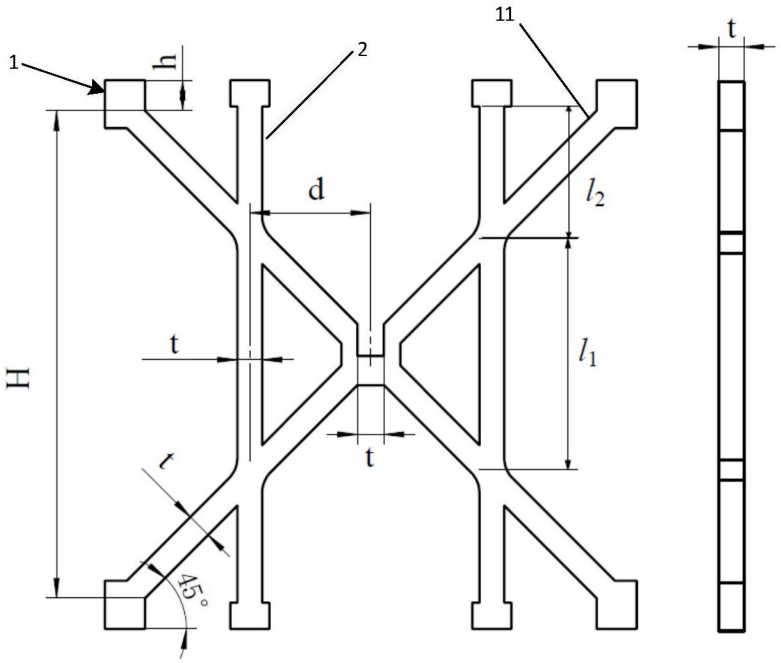


图3

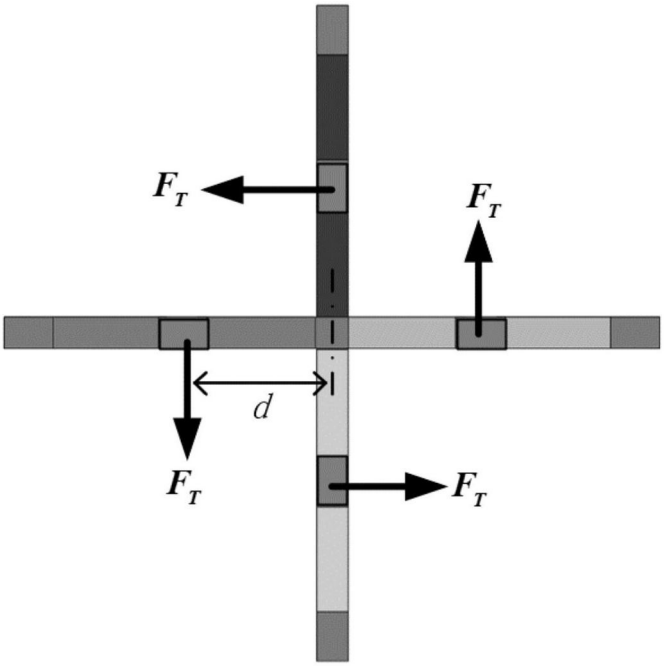


图4

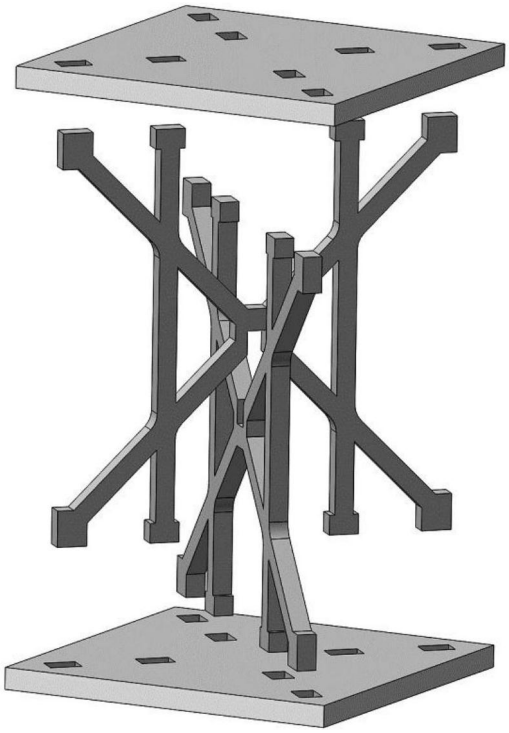


图5

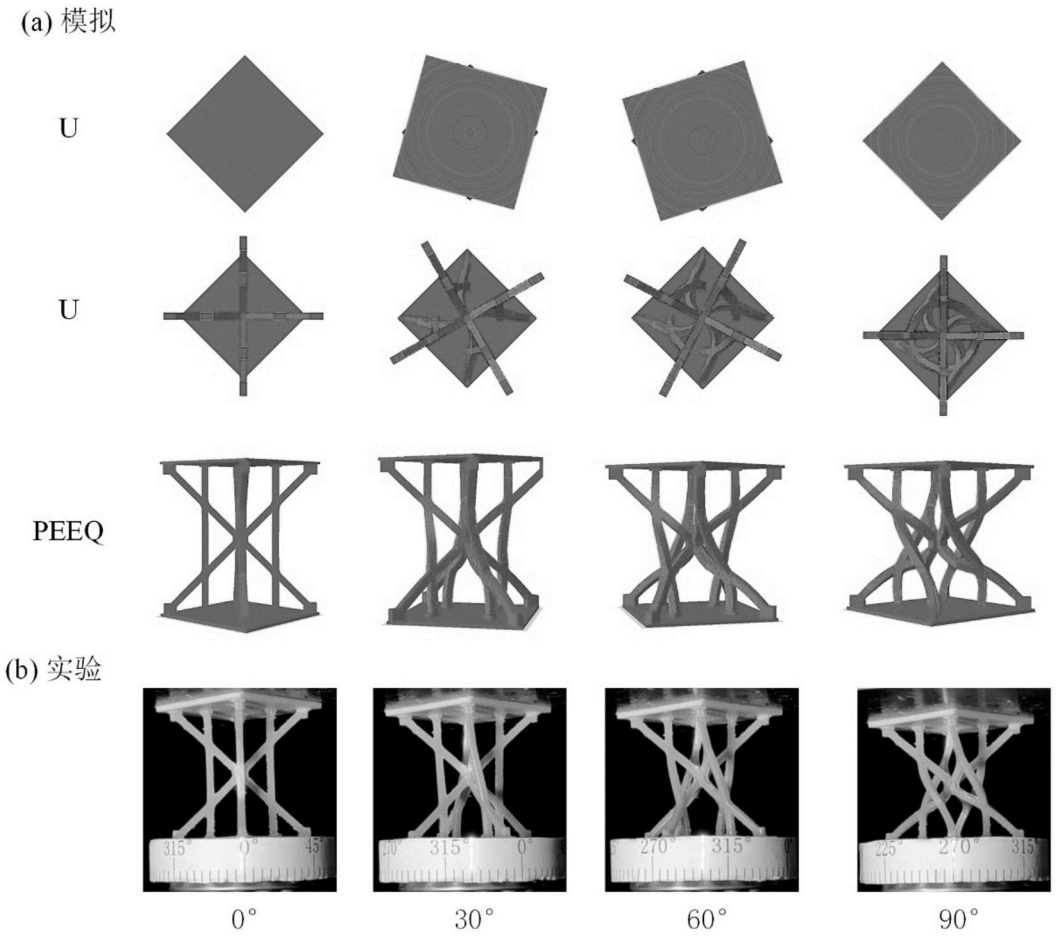

(a) 模拟
U
U
PEEQ
(b) 实验
0°
30°
60°
90°

图6

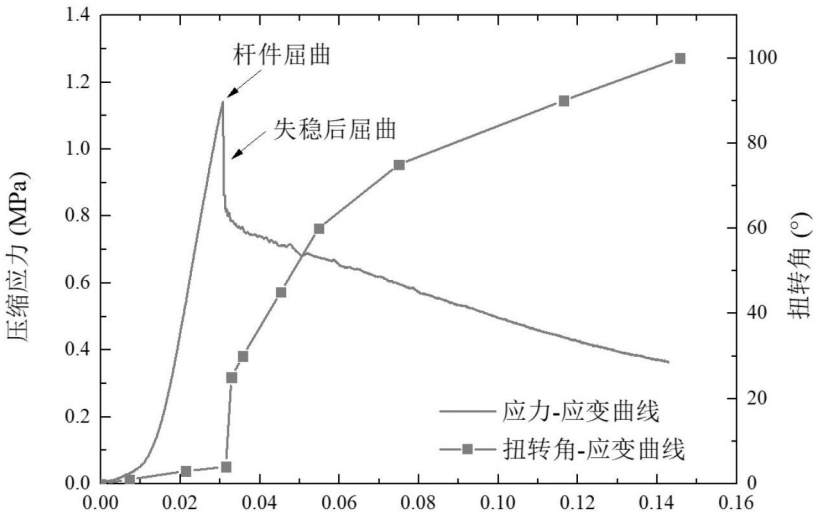

杆件屈曲
失稳后屈曲
压缩应力 (MPa)
扭转角 (°)
应力-应变曲线
扭转角-应变曲线
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
0
20
40
60
80
100
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10
0.12
0.14
0.16

图7

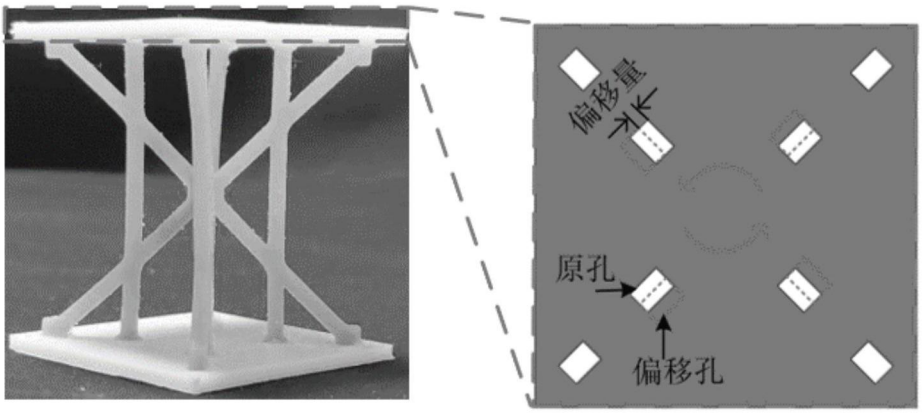

偏移量
原孔
偏移孔

图8

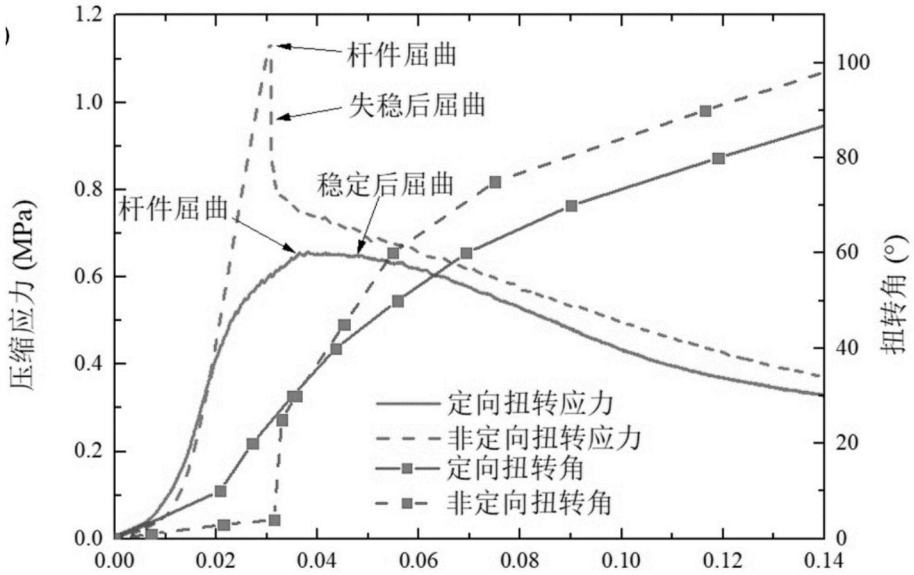

杆件屈曲
失稳后屈曲
稳定后屈曲
杆件屈曲
压缩应力 (MPa)
扭转角 (°)
定向扭转应力
非定向扭转应力
定向扭转角
非定向扭转角
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
0
20
40
60
80
100
0.00
0.02
0.04
0.06
0.08
0.10
0.12
0.14

图9