



# (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 115819974 A

(43) 申请公布日 2023. 03. 21

(21) 申请号 202211426891.8

C08L 67/04 (2006.01)

(22) 申请日 2022.11.15

G06F 30/20 (2020.01)

(71) 申请人 华南理工大学

G06F 119/02 (2020.01)

地址 510640 广东省广州市天河区五山路  
381号

G06F 119/14 (2020.01)

申请人 人工智能与数字经济广东省实验室  
(广州)

G06F 113/26 (2020.01)

(72) 发明人 胡楠 李智雄 李峰 刘盼  
解兵林

(74) 专利代理机构 广州粤高专利商标代理有限  
公司 44102

专利代理师 黄月莹

(51) Int. Cl.

C08L 83/04 (2006.01)

B29C 70/36 (2006.01)

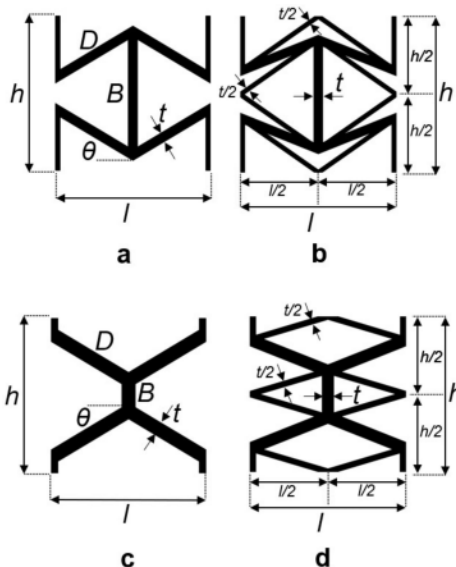
权利要求书2页 说明书7页 附图11页

## (54) 发明名称

一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系及制备方法

## (57) 摘要

本发明公开了一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系及制备方法,根据调节假设泊松比与添加桁架方式设计出不同拉胀结构,以3D打印硬质聚乳酸拉胀材料作为增强相,并填充软弹性硅胶材料作为基质,制作出拉胀复合材料,有效提升拉胀材料的刚度、强度、延性和吸能能力,为定制拉胀材料抗压刚度与抗剪刚度提供理论指引,极大拓展了拉胀材料的工程应用前景,能够应用于桥梁伸缩缝、桥梁支座、桥梁防撞墩、汽车防撞装置、精密仪器减振的设计中。



1. 一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系,其特征在于:包括拉胀复合材料,所述拉胀复合材料以硬质聚乳酸拉胀材料作为增强相,并填充软弹性硅胶材料作为基质,通过几何设计公式得到不同结构的拉胀材料单元。

2. 根据权利要求1所述的一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系,其特征在于:所述几何设计公式包括:

$$\theta = \arctan(vl/h)$$

$$B = (h - l \tan \theta) / 2$$

$$D = l / (2 \cos \theta)$$

其中h和l是拉胀材料单元高度和长度;v是假设的泊松比; $\theta$ 表示拉胀材料单元中斜杆的斜角度,B表示拉胀材料单元中竖杆长度;D表示拉胀材料单元中斜杆长度。

3. 根据权利要求2所述的一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系,其特征在于:通过修改拉胀材料的假设泊松比值,得出不同拉胀复合材料。

4. 根据权利要求2所述的一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系,其特征在于:当假设泊松比v为负数时,设计出内凹单元;当假设泊松比v为正数时,设计出蜂窝单元。

5. 根据权利要求4所述的一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系,其特征在于:在内凹单元基础上,使内凹单元外矩形轮廓中心与内凹单元节点位置连接厚度为内凹单元壁厚一半的杆系,形成内凹桁架单元。

6. 根据权利要求5所述的一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系,其特征在于:在蜂窝单元基础上,使蜂窝单元外矩形轮廓中心与蜂窝单元节点位置连接厚度为蜂窝单元壁厚一半的杆系,形成蜂窝桁架单元。

7. 根据权利要求6所述的一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系,其特征在于:在内凹单元、内凹桁架单元、蜂窝桁架单元的基础上,通过单元横向纵向阵列,形成不同长度与宽度的内凹平面几何、内凹桁架平面几何、蜂窝平面几何与蜂窝桁架平面几何。

8. 根据权利要求7所述的一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系,其特征在于:通过面外拉伸,形成不同厚度的内凹立体结构、内凹桁架立体结构、蜂窝立体结构与蜂窝桁架立体结构。

9. 根据权利要求1~8任一项所述的一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系,其特征在于:通过修改单元的壁厚调节平面几何的面积和立体结构的体积。

10. 实现权利要求1所述的一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的制备方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤一、通过3D打印机采用增材制造方式制备相同立体结构的聚乳酸拉胀材料;

步骤二、根据立体结构尺寸,设计浇筑模具,利用3D打印机采用增材制造的方式制备浇筑模具;

步骤三、将脱模蜡均匀涂抹至浇筑模具表面;

步骤四、称取相同的质量的两种胶料,将两种胶料混合在一起搅拌,获得液态硅胶;

步骤五、先将混合好的液态硅胶倒入模具中,使硅胶达到模具高度一半位置,将拉胀材料压入模具中,使液态硅胶渗入拉胀材料孔隙,之后往拉胀材料的孔隙中继续浇筑液态硅胶,待填满拉胀材料孔隙,刮平模具表面,形成拉胀复合材料;

步骤六、将浇筑完的拉胀复合材料,放置在室温环境中24小时,待表面层硅胶固化;

步骤七、撬开模具表面,取出拉胀复合材料;

步骤八、脱模后的拉胀复合材料在室温下继续放置,待拉胀材料孔隙中的硅胶完全凝固,获得最终拉胀复合材料。

## 一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系及制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种材料科学领域,具体是一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系及制备方法。

### 背景技术

[0002] 拉胀材料通过巧妙的单元几何编辑和力学指引的空间布置规则,获得材料的优越力学性能,如负泊松比、高比强度、高比刚度、能量吸收、断裂韧性、抗冲击、抗压痕性等,在汽车、航空、材料科学、军事和土木工程等领域具有广泛的应用前景。与常规材料不同,拉胀材料通过先进的几何结构设计即可获得特殊的力学属性,充分发挥材料的利用效率,为材料设计创新和功能探索开拓全新的道路,成为近年来国内外研究的热点。

[0003] 现有拉胀材料多数只单方向力学属性研究,如静态压缩、高速冲击、受拉、受弯等(正弦负泊松比多孔蜂窝梁平面内三点弯吸能性能实验研究\_郭春霞),没有关注拉胀材料在受压和受剪的综合力学属性。拉胀材料在受力过程中,由于拉胀材料的多孔特性,材料变形以旋转弯曲为主导,将不可避免地降低材料强度、刚度与能量吸收等力学性能,在压缩过程中容易压溃,发生脆性破坏(内凹三角形负泊松比材料的面内冲击动力学性能\_马芳武),不能反弹而重复使用。鉴于此,研究获得兼具良好抗压、抗剪、延性、能量吸收,可重复使用的拉胀材料,进一步为实际工程应用提供理论指引和实验依据尤为重要。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系及制备方法,以解决上述背景技术中提出的问题。

[0005] 本发明至少通过如下技术方案之一实现。

[0006] 一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系,包括拉胀复合材料,所述拉胀复合材料以硬质聚乳酸拉胀材料作为增强相,并填充软弹性硅胶材料作为基质,通过几何设计公式得到不同结构的拉胀材料单元。

[0007] 进一步地,所述几何设计公式包括:

$$[0008] \theta = \arctan(vl/h)$$

$$[0009] B = (h - l \tan\theta) / 2$$

$$[0010] D = l / (2 \cos\theta)$$

[0011] 其中h和l是拉胀材料单元高度和长度;v是假设的泊松比; $\theta$ 表示拉胀材料单元中斜杆的斜角度,B表示拉胀材料单元中竖杆长度;D表示拉胀材料单元中斜杆长度。

[0012] 进一步地,通过修改拉胀材料的假设泊松比值,得出不同拉胀复合材料。

[0013] 进一步地,当假设泊松比v为负数时,设计出内凹单元;当假设泊松比v为正数时,设计出蜂窝单元。

[0014] 进一步地,在内凹单元基础上,使内凹单元外矩形轮廓中心与内凹单元节点位置连接厚度为内凹单元壁厚一半的杆系,形成内凹桁架单元;

[0015] 进一步地,在蜂窝单元基础上,使蜂窝单元外矩形轮廓中心与蜂窝单元节点位置连接厚度为蜂窝单元壁厚一半的杆系,形成蜂窝桁架单元。

[0016] 进一步地,在内凹单元、内凹桁架单元、蜂窝桁架单元的基础上,通过单元横向纵向阵列,形成不同长度与宽度的内凹平面几何、内凹桁架平面几何、蜂窝平面几何与蜂窝桁架平面几何。

[0017] 进一步地,通过面外拉伸,形成不同厚度的内凹立体结构、内凹桁架立体结构、蜂窝立体结构与蜂窝桁架立体结构。

[0018] 进一步地,通过修改单元的壁厚调节平面几何的面积和立体结构的体积。

[0019] 实现所述的一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的制备方法,包括以下步骤:

[0020] 步骤一、通过3D打印机采用增材制造方式制备相同立体结构的聚乳酸拉胀材料;

[0021] 步骤二、根据立体结构尺寸,设计浇筑模具,利用3D打印机采用增材制造的方式制备浇筑模具;

[0022] 步骤三、将脱模蜡均匀涂抹至浇筑模具表面;

[0023] 步骤四、称取相同的质量的两种胶料,将两种胶料混合在一起搅拌,获得液态硅胶;

[0024] 步骤五、先将混合好的液态硅胶倒入模具中,使硅胶达到模具高度一半位置,将拉胀材料压入模具中,使液态硅胶渗入拉胀材料孔隙,之后往拉胀材料的孔隙中继续浇筑液态硅胶,待填充满拉胀材料孔隙,刮平模具表面,形成拉胀复合材料;

[0025] 步骤六、将浇筑完的拉胀复合材料,放置在室温环境中24小时,待表面层硅胶固化;

[0026] 步骤七、撬开模具表面,取出拉胀复合材料;

[0027] 步骤八、脱模后的拉胀复合材料在室温下继续放置,待拉胀材料孔隙中的硅胶完全凝固,获得最终拉胀复合材料。

[0028] 与现有技术相比,本发明的有益效果为:

[0029] 1、本发明巧妙地利用硬质聚乳酸拉胀材料作为增强相,填充不可压缩弹性硅胶基质,形成拉胀复合材料,克服传统拉胀材料由于多孔特性与弯曲变形引起的力学性能降低。

[0030] 2、本发明通过拉胀材料的假设泊松比设计,定制复合材料的抗压刚度、抗剪刚度、能量吸收等力学属性,为制作适用于复杂力学环境的工程材料提供指引。

[0031] 3、本发明在常规内凹结构和蜂窝结构的基础上,通过内部添加厚度为基础几何一半的桁架,克服常规拉胀材料在受压、受剪状态下的弯曲失稳和应力集中问题,使拉胀材料的受力更加协调,有效提升了拉胀材料的抗压刚度、抗压强度、抗剪刚度、抗剪强度、能量吸收等力学性能,极大拓展了拉胀材料的工程应用前景。

[0032] 4、本发明巧妙地将软硬两相材料相结合,即使较硬的拉胀材料发生破坏,由于外部软弹性硅胶包裹,使得拉胀材料能够继续发挥力学增强效果,展现出优越的延性和重复利用性,能够应用于桥梁伸缩缝、桥梁支座、桥梁防撞墩、汽车防撞装置、精密仪器减振的设计中。

## 附图说明

[0033] 图1为实施例一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的内凹单元、内凹桁架单元、蜂窝单元、蜂窝桁架单元的设计；

[0034] 图2为实施例一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的不同拉胀结构

[0035] 图3为实施例一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的不同拉胀复合材料示意图；

[0036] 图4为实施例一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的制作流程图；

[0037] 图5为实施例一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的剪切有限元模拟变形图；

[0038] 图6为实施例一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的压缩有限元模拟变形图；

[0039] 图7为实施例一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的假设泊松比值从1到-0.8的单元设计形式；

[0040] 图8为实施例一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的不同拉胀复合材料的剪切有限元模拟无量纲化力位移图；

[0041] 图9为实施例一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的不同拉胀复合材料的压缩试验无量纲化力位移图；

[0042] 图10为实施例一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的不同拉胀复合材料的压缩能量吸收值与剪切能量吸收值；

[0043] 图11为实施例一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的蜂窝桁架逐级循环压缩无量纲化力位移图。

## 具体实施方式

[0044] 下面将结合本发明实施例中的附图，对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述，显然，所描述的实施例仅是本发明一部分实施例，而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例，本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例，都属于本发明保护的范围。

[0045] 实施例1

[0046] 如图1~图11所示，本实施例中的一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系，包括拉胀复合材料，所述拉胀复合材料以硬质聚乳酸拉胀材料作为增强相，以填充软弹性硅胶作为基质，基于蜂巢由硬质蜂窝结构和软弹性蜂蜜组合的仿生思想，通过拉胀材料的几何设计得到不同结构的拉胀材料单元，实现复合材料力学性能的调节与增强。

[0047] 如图1所示，所述拉胀材料单元几何设计公式为：

$$[0048] \quad \theta = \arctan(vl/h)$$

$$[0049] \quad B = (h - l \tan\theta) / 2$$

$$[0050] \quad D = l / (2 \cos\theta)$$

[0051] 其中h和l是拉胀材料单元高度和长度；v是假设泊松比，其代表拉胀材料单元结构的泊松比大小趋势，并非真实材料的泊松比；B表示拉胀材料单元中竖杆长度；D表示拉胀材料单元中斜杆长度； $\theta$ 示拉胀材料单元中斜杆的斜角度，其中内凹蜂窝倾角为负，常规蜂窝

倾角为正。当假设泊松比 $\nu$ 为负数时,可以设计出内凹单元。当假设泊松比 $\nu$ 为正数时,可以设计出蜂窝单元。通过修改拉胀材料单元壁厚 $t$ ,既可以调节拉胀材料单元的面积。

[0052] 在设计出内凹单元基础上,在内凹单元外矩形轮廓中心与内凹单元节点位置连接厚度为内凹单元壁厚一半的杆系,形成内凹桁架单元。在设计出蜂窝单元基础上,在蜂窝单元外矩形轮廓中心与蜂窝单元节点位置连接厚度为蜂窝单元壁厚一半的杆系,形成蜂窝桁架单元。

[0053] 在设计出内凹单元、内凹桁架单元、蜂窝单元、蜂窝桁架单元,通过单元横向纵向阵列,可以形成不同长度与宽度的内凹平面几何、内凹桁架平面几何、蜂窝平面几何与蜂窝桁架平面几何。

[0054] 通过面外拉伸,即可形成不同厚度的内凹立体结构、内凹桁架立体结构、蜂窝立体结构与蜂窝桁架立体结构。利用3D打印机制作聚乳酸拉胀材料作为增强相,填充软弹性硅胶作为基质,即可形成不同结构的拉胀复合材料。

[0055] 作为其中一个具体的实施例,取拉胀材料单元高度 $h$ 为20mm,长度 $l$ 为20mm,假设泊松比 $\nu = -0.4$ ,设计出内凹单元,如图1的a所示;通过横向阵列4个单元,竖向阵列2个单元,形成长度80mm,高度40mm的内凹平面几何,将内凹平面几何进行面外拉伸,形成厚度70mm的内凹立体结构,并调节内凹单元的壁厚 $t$ ,最终形成填充率为30%,长度 $L$ 为80mm,高度 $H$ 为40mm,深度 $T$ 为70mm的内凹结构,如图2的a所示。

[0056] 取拉胀材料单元高度 $h$ 为20mm,长度 $l$ 为20mm,假设泊松比 $\nu = 0$ ,设计出长方形单元;通过横向阵列4个单元,竖向阵列2个单元,形成长度80mm,高度40mm的长方形平面几何,将长方形平面几何进行面外拉伸,形成厚度70mm的长方形立体结构,并调节长方形单元的壁厚 $t$ ,最终形成填充率为30%,长度 $L$ 为80mm,高度 $H$ 为40mm,深度 $T$ 为70mm的长方形结构,如图2的b所示。

[0057] 作为其中另一个实施例,取拉胀材料单元高度 $h$ 为20mm,长度 $l$ 为20mm,假设泊松比 $\nu = 0.4$ ,设计出蜂窝单元,如图1的c所示;通过横向阵列4个单元,竖向阵列2个单元,形成长度80mm,高度40mm的蜂窝平面几何,将蜂窝平面几何进行面外拉伸,形成厚度70mm的蜂窝立体结构,并调节蜂窝单元的壁厚 $t$ ,最终形成填充率为30%,长度 $L$ 为80mm,高度 $H$ 为40mm,深度 $T$ 为70mm的蜂窝结构,如图2的c所示。

[0058] 如图2所示,取拉胀材料单元高度 $h$ 为20mm,长度 $l$ 为20mm,假设泊松比 $\nu = -0.4$ ,设计出内凹单元,在内凹单元外矩形轮廓中心与内凹单元节点位置连接厚度为内凹单元壁厚一半的杆系,形成内凹桁架单元,如图1的b所示;通过横向阵列4个单元,竖向阵列2个单元,形成长度80mm,高度40mm的内凹桁架平面几何,将内凹桁架平面几何进行面外拉伸,形成厚度70mm的内凹桁架立体结构,并调节内凹桁架单元的壁厚 $t$ ,最终形成填充率为30%,长度 $L$ 为80mm,高度 $H$ 为40mm,深度 $T$ 为70mm的内凹-桁架结构,如图2的d所示。

[0059] 如图2所示,取拉胀材料单元高度 $h$ 为20mm,长度 $l$ 为20mm,假设泊松比 $\nu = 0.4$ ,设计出蜂窝单元,在蜂窝单元外矩形轮廓中心与蜂窝单元节点位置连接厚度为蜂窝单元壁厚一半的杆系,形成蜂窝桁架单元,如图1d所示;通过横向阵列4个单元,竖向阵列2个单元,形成长度80mm,高度40mm的蜂窝桁架平面几何,将蜂窝桁架平面几何进行面外拉伸,形成厚度70mm的蜂窝桁架立体结构,并调节长方形单元的壁厚 $t$ ,最终形成填充率为30%,长度 $L$ 为80mm,高度 $H$ 为40mm,深度 $T$ 为70mm的蜂窝-桁架结构,如图2e所示。

[0060] 上述五种拉胀材料单元的详细设计参数见表1

[0061] 表1拉胀材料单元设计参数

样品	填充率	$l$ (mm)	$h$ (mm)	假设泊松比 $\nu$	$B$ (mm)	$D$ (mm)	$\theta$ (rad)	$t$ (mm)	桁架厚度 (mm)
[0062] 内凹	30%	20	20	-0.4	14.00	10.77	-0.38	1.81	无
长方形	30%	20	20	0	10.00	10.00	0.00	2.16	无
蜂窝	30%	20	20	0.4	6.00	10.77	0.38	2.35	无
内凹-桁架	30%	20	20	-0.4	14.00	10.77	-0.38	1.13	0.565
蜂窝-桁架	30%	20	20	0.4	6.00	10.77	0.38	1.35	0.675

[0063] 如图4所示,一种具有可定制力学属性的复合材料结构体系的制备方法,包括以下步骤:

[0064] 步骤一、拉胀材料制造,根据所设计的立体结构,利用3D打印机采用增材制造方式制备相同立体结构的聚乳酸拉胀材料。

[0065] 步骤二、模具制造,根据所设计的立体结构尺寸,设计浇筑模具,利用3D打印机采用增材制造的方式制备浇筑模具。

[0066] 步骤三、涂抹脱模蜡,将脱模蜡均匀涂抹至浇筑模具表面,方便后期复合材料脱模。

[0067] 步骤四、液态硅胶制备,称取相同的质量的硅胶A、B胶料,将两种胶料混合在一起,充分搅拌使其具有良好流动性,获得液态硅胶。

[0068] 步骤五、硅胶浇筑,先将混合好的液态硅胶倒入模具中,使硅胶达到模具高度一半位置,将拉胀材料缓慢压入模具中,使硅胶溶液渗入拉胀材料孔隙,之后往拉胀材料的孔隙中继续浇筑液态硅胶,待填充满拉胀材料孔隙,刮平模具表面,形成拉胀复合材料。

[0069] 步骤六、初步固化,将浇筑完的拉胀复合材料,放置在室温环境中24小时,待表面层硅胶固化。

[0070] 步骤七、脱模,撬开模具表面,取出拉胀复合材料。

[0071] 步骤八、最终固化,脱模后的拉胀复合材料在室温下继续放置,待拉胀材料孔隙中的硅胶完全凝固,获得最终拉胀复合材料。

[0072] 需要说明的是,拉胀复合材料的拉胀材料与基质是两种不同材质,拉胀材料采用较硬材质作为增强相,基质采用软弹性材质。

[0073] 需要说明的是,拉胀材料的单元尺寸可以通过设计公式放大或缩小,且通过修改单元阵列的个数,单元壁厚 $t$ ,就可以制作出不同尺寸,不同体积率的拉胀材料。

[0074] 需要说明的是,在拉胀复合材料设计中,采用相同材质的拉胀材料,相同材质的基质,拉胀材料的填充率相同,且单元长度与宽度相同,阵列个数相同,即复合材料长度、高度、深度一致,通过修改拉胀材料假设泊松比值,设计出不同拉胀复合材料,都可获得以下属性。

[0075] 模拟部分,采用ABAQUS/Standard进行有限元模拟分析。其中拉胀材料使用弹塑性模型,采用八节点线性六面体单元;硅胶使用超弹性材料模型,采用八节点线性六面体杂交单元;单元大小通过网格收敛性分析。

[0076] 水平剪切模拟中,将复合材料下表面固定,对上表面施加正负4mm循环荷载,一共



三次循环。竖向压缩模拟中,将复合材料下表面固定,对上表面施加竖向4mm压缩位移。

[0077] 如图5的a、b、c、d、e所示,是不同复合材料下表面固定,上表面水平剪切4mm的变形图。在水平剪切作用下,桁架结构起辅助受力作用,带有桁架的内凹桁架复合材料与蜂窝桁架复合材料受力比内凹复合材料和蜂窝复合材料更加协调。

[0078] 如图6的a、b、c、d、e所示,是不同复合材料下表面固定,上表面竖向压缩4mm的变形图。在竖向压缩作用下,桁架结构起辅助受力作用,带有桁架的内凹桁架复合材料与蜂窝桁架复合材料受力比内凹复合材料和蜂窝复合材料更加协调。

[0079] 如图8所示,为不同复合材料模拟得到无量纲化剪切力位移曲线图,无量纲化力位移数据处理过程如下,其中横坐标 $\delta_2$ 表示剪切位移,H表示复合材料的高度40mm,纵坐标 $F_2$ 表示剪切力,E表示聚乳酸拉胀材料的弹性模量2281Mpa,L表示复合材料长度80mm,T表示复合材料厚度70mm,LT即复合材料上表面面积。

[0080] 根据模拟结果,在相同拉胀材料填充率的情况下,剪切刚度随假设泊松比增大而增加,即内凹复合材料、长方形复合材料、蜂窝复合材料抗剪刚度逐渐增加,通过修改拉胀材料的假设泊松比即可调节复合材料的抗剪刚度。

[0081] 添加桁架后的拉胀复合材料受力更加均匀,抗剪刚度明显提升,其中蜂窝-桁架复合材料表现出最优的抗剪刚度。

[0082] 竖向压缩试验部分,采用GRANDTRY材料测试系统进行压缩试验,压缩应变率为0.001,对应压缩速率为2.4mm/min,竖向压缩位移9mm。

[0083] 如图9所示,为不同复合材料试验得到无量纲化压缩力位移曲线图,无量纲化力位移数据处理过程如下,其中横坐标 $\delta_1$ 表示压缩位移,H表示复合材料的高度40mm,纵坐标 $F_1$ 表示压缩力,E表示聚乳酸拉胀材料的弹性模量2281Mpa,L表示复合材料长度80mm,T表示复合材料厚度70mm,LT即复合材料上表面面积。

[0084] 根据压缩试验结果,在相同拉胀材料填充率的情况下,抗压刚度随假设泊松比减小而增加,即蜂窝复合材料、长方形复合材料、内凹复合材料的抗压刚度逐渐增加,这与剪切模拟趋势完全相反,通过修改拉胀材料的假设泊松比即可调节复合材料的抗压刚度。

[0085] 添加桁架后的拉胀复合材料受力更加均匀,抗压刚度明显提升,其中内凹-桁架复合材料表现出最优的抗压刚度。

[0086] 如图10所示,为计算图8不同复合材料无量纲化剪切力位移曲线包裹面积,即无量纲化剪切能量吸收值,和计算图9不同复合材料无量纲化压缩力位移曲线包裹面积,即无量纲化压缩能量吸收值。

[0087] 在相同拉胀材料填充率的剪切能量吸收值比较中,剪切能量吸收值随假设泊松比增大而增加,即内凹复合材料、长方形复合材料、蜂窝复合材料剪切能量吸收值逐渐增加,通过修改拉胀材料的假设泊松比即可调节复合材料的剪切能量吸收值。

[0088] 添加桁架后的拉胀复合材料受力更加均匀,剪切能量吸收值明显提升,其中蜂窝-桁架复合材料表现出最优的剪切能量吸收值。

[0089] 在相同拉胀材料填充率的压缩能量吸收值比较中,压缩能量吸收值随假设泊松比减小而增加,即蜂窝复合材料、长方形复合材料、内凹复合材料的压缩能量吸收值逐渐增加,这与剪切能量吸收值趋势完全相反,通过修改拉胀材料的假设泊松比即可调节复合材料的压缩能量吸收值。

[0090] 添加桁架后的拉胀复合材料受力更加均匀,压缩能量吸收值明显提升,其中内凹-桁架复合材料表现出最优的压缩能量吸收值。

[0091] 如图11所示,为蜂窝桁架复合材料逐级循环压缩无量纲化力位移曲线,每级1mm递增,共九级,第一圈加载到1mm,最后一圈加载到9mm,无量纲化力位移数据处理过程如下,其中横坐标 $\delta_1$ 表示压缩位移,H表示复合材料的高度40mm,纵坐标 $F_1$ 表示压缩力,E表示聚乳酸拉胀材料的弹性模量2281Mpa,L表示复合材料长度80mm,T表示复合材料厚度70mm,LT即复合材料上表面面积。此处仅列举一种复合材料逐级循环压缩无量纲化力位移曲线,其他复合材料具有相似的力位移曲线和力学属性。

[0092] 根据循环压缩试验结果,拉胀复合材料在内填拉胀材料未发生破坏时候,处于弹性状态,在内填拉胀材料压缩密实,发生断裂破坏后,虽然刚度值发生下降,但力位移曲线包裹面积饱满,具有很好的强度、延性、能量吸收,拉胀材料仍发挥力学性能增强效果,且在力卸载后,拉胀复合材料能够反弹,能够重复加载,具有循环利用性。

[0093] 总的来说,通过改变拉胀材料的假设泊松比,可以定制出不同抗压刚度与抗剪刚度的拉胀复合材料,其中内凹复合材料抗压刚度较好,蜂窝复合材料抗剪刚度较好。

[0094] 通过添加桁架的方式,蜂窝-桁架复合材料与蜂窝-内凹复合材料的受力更加均匀,抗压刚度、抗剪刚度、强度、能量吸收明显提升。总体来说,对不同拉胀复合材料进行竖向压缩,水平剪切模拟和模拟,以验证拉胀复合材料的压缩性能,验证相同填充率的拉胀复合材料随拉胀单元设计的假设泊松比值增大,拉胀复合材料的抗压刚度逐渐减少,抗剪刚度逐渐增大,并且带有桁架的拉胀复合材料的抗压刚度、抗剪刚度都有提升。

[0095] 通过软硬两相材料相结合,即使较硬的拉胀材料发生破坏,由于外部软弹性硅胶包裹,使得拉胀材料能够继续发挥力学增强效果,展现出优越的延性和重复利用性,能够应用于桥梁伸缩缝、桥梁支座、桥梁防撞墩、汽车防撞装置、精密仪器减振的设计中。

[0096] 上述实施例只为说明本发明的技术构思及特点,其目的在于让熟悉此项技术的人士能够了解本发明的内容并据以实施,并不能以此限制本发明的保护范围。凡根据本发明精神实质所作的等效变化或修饰,都应涵盖在本发明的保护范围。

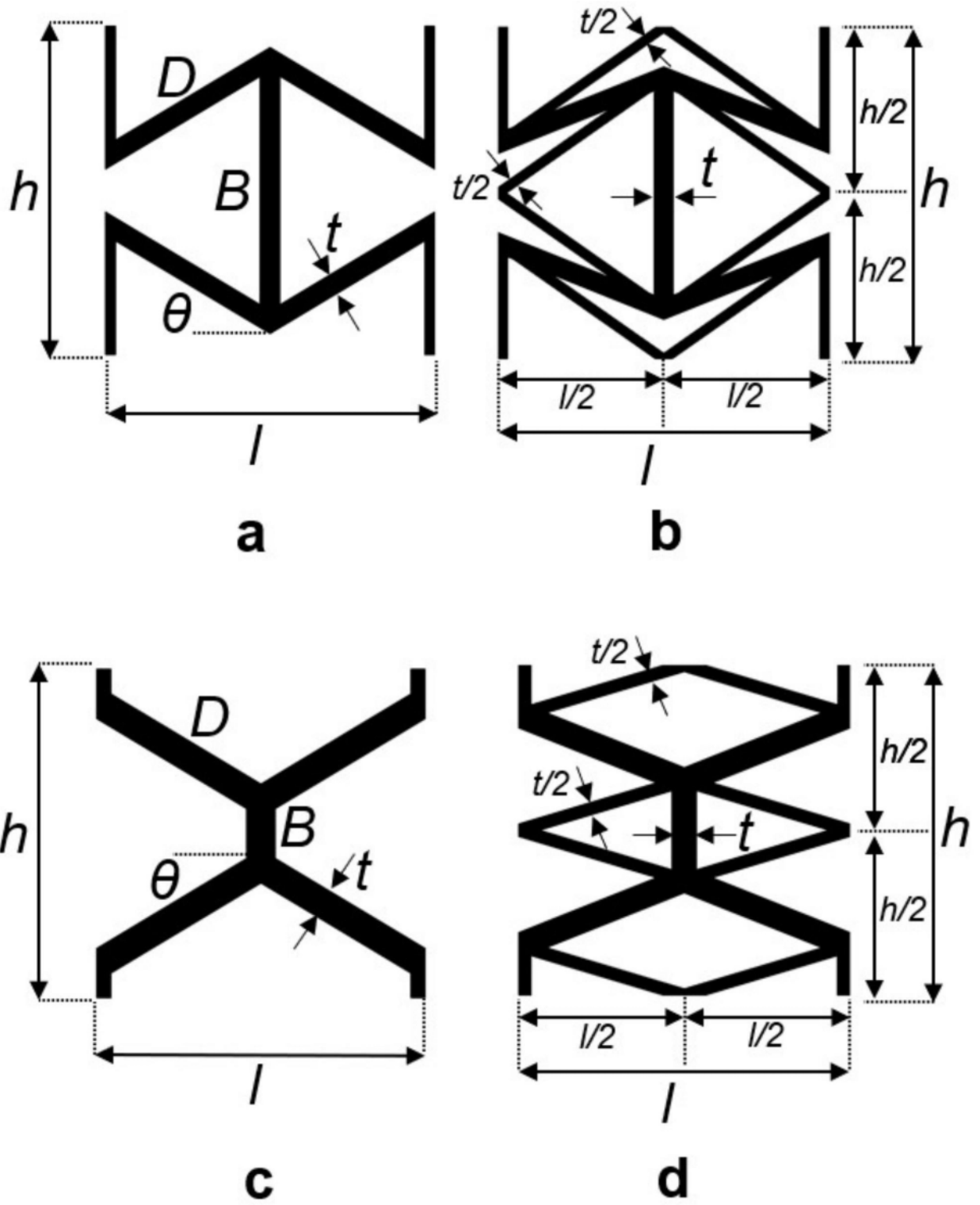
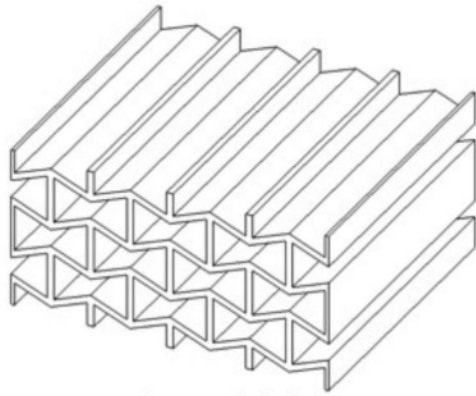
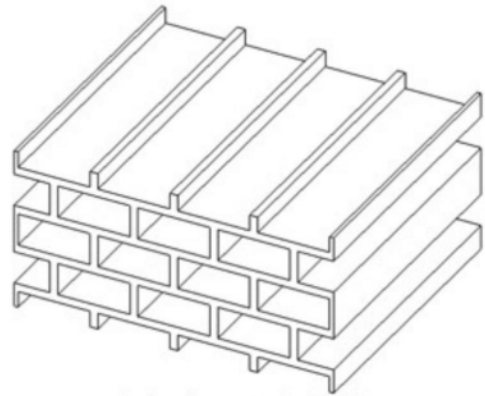


图1



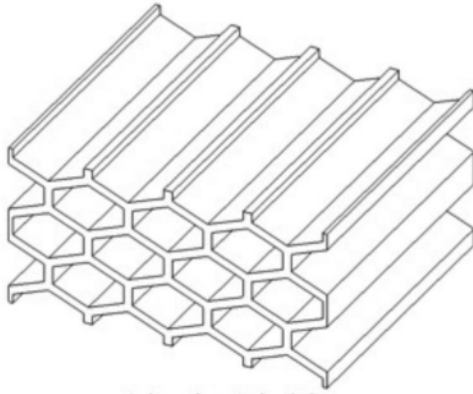
内凹结构  
假设的泊松比 $\nu=0.4$

**a**



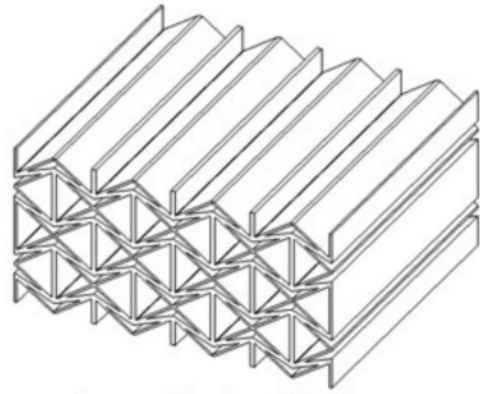
长方形结构  
假设的泊松比 $\nu=0$

**b**



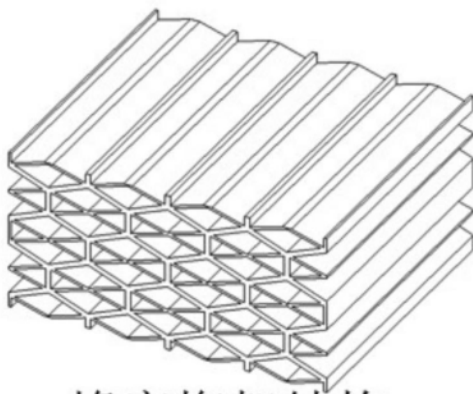
蜂窝结构  
假设的泊松比 $\nu=0$

**c**



内凹桁架结构

**d**



蜂窝桁架结构

**e**

图2

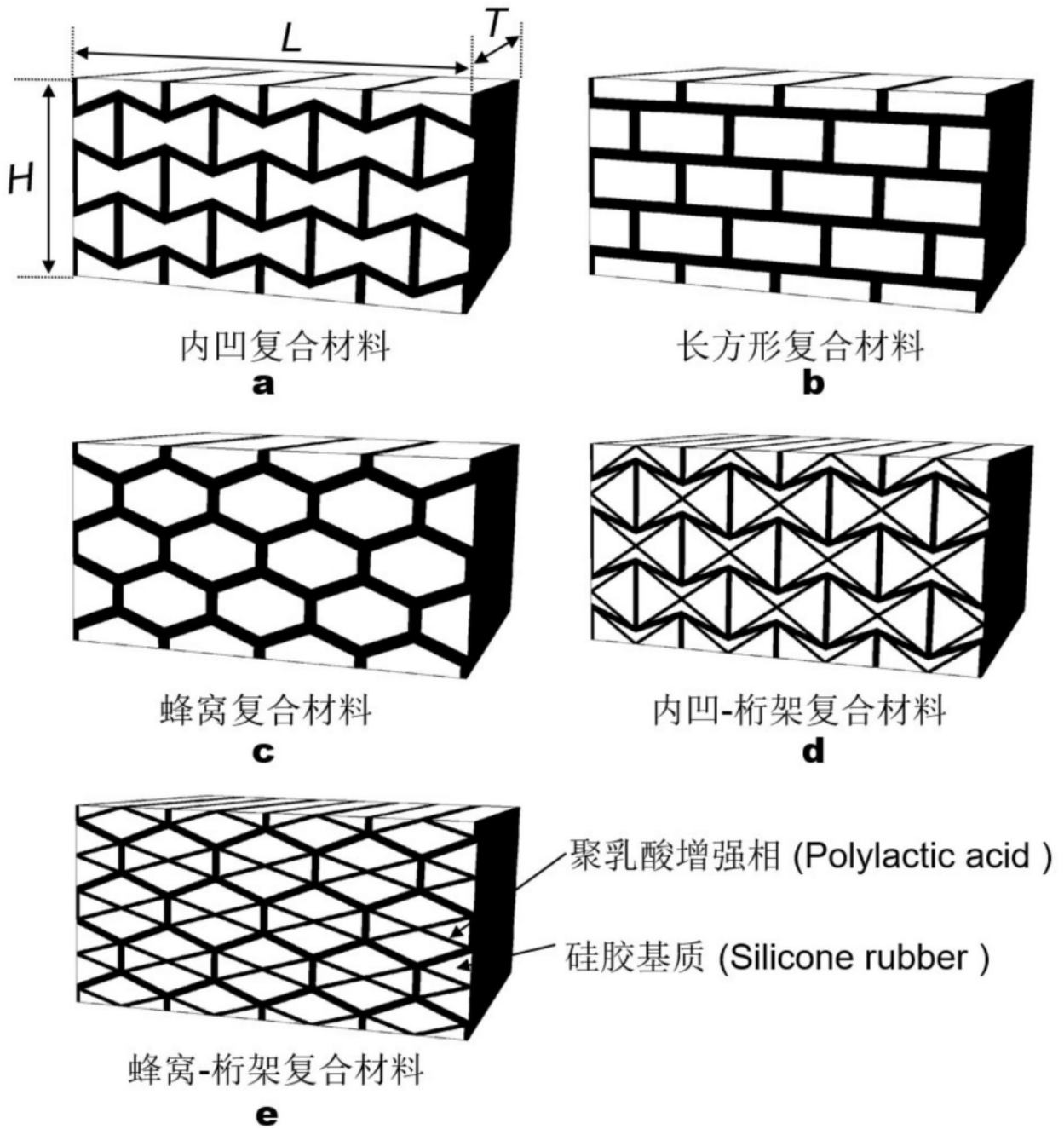


图3

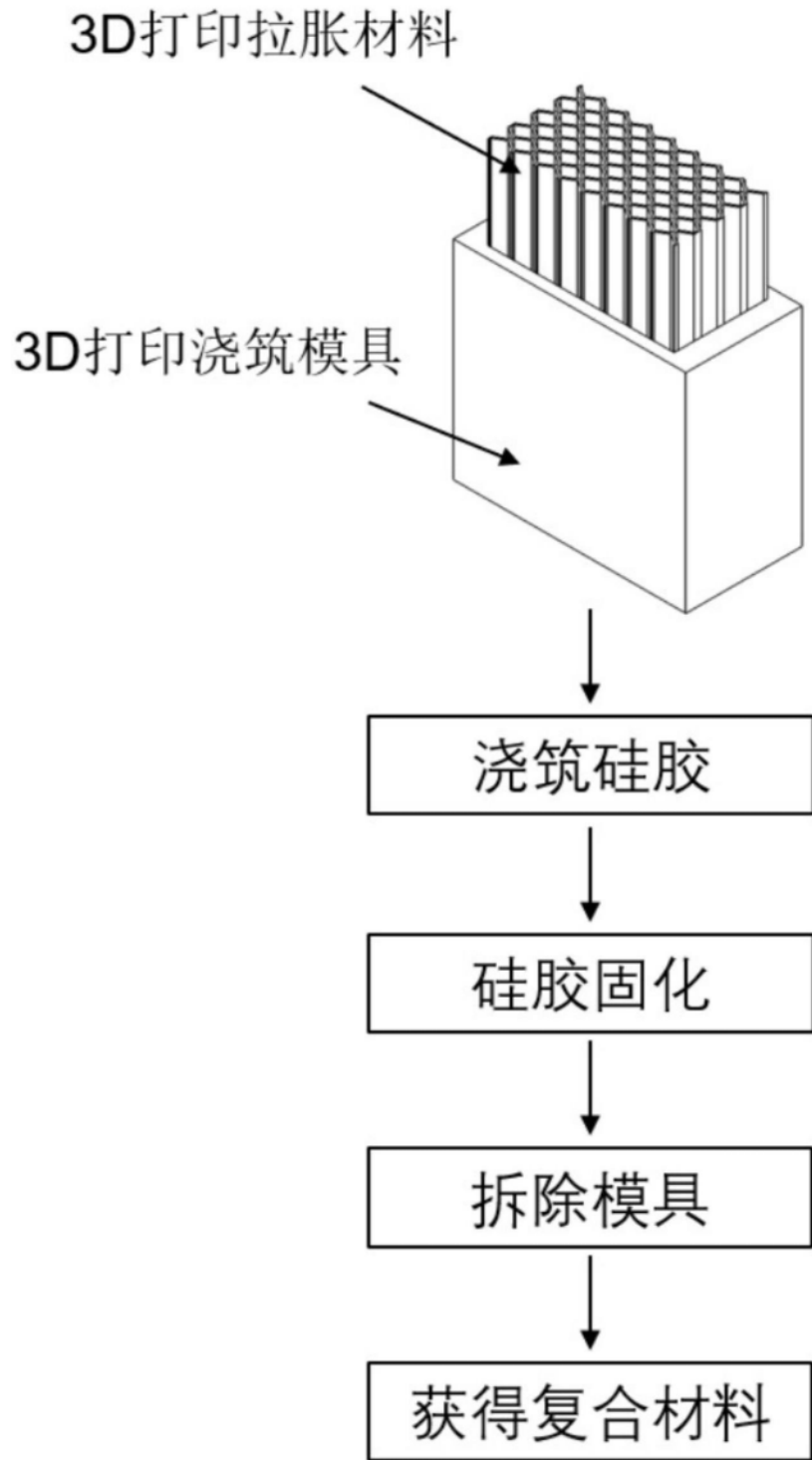
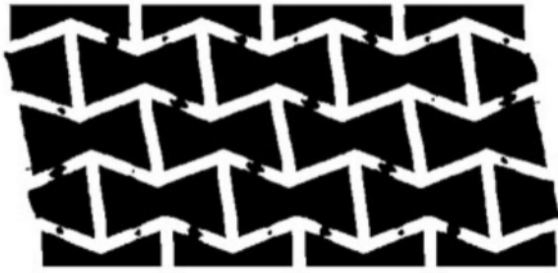
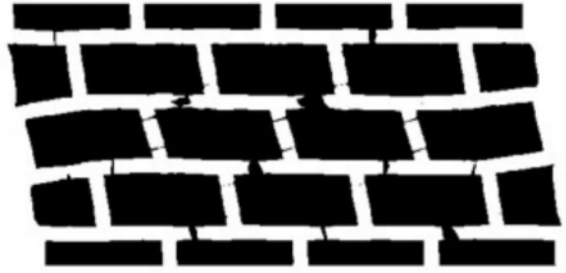


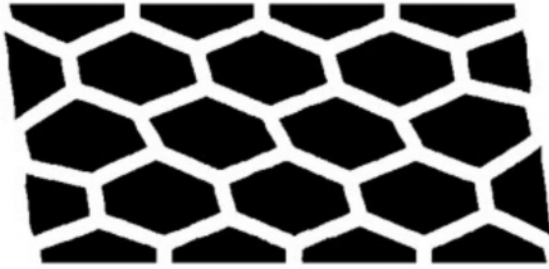
图4



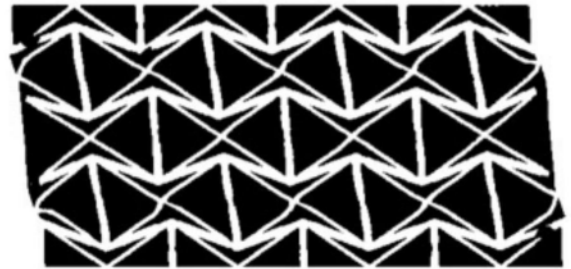
内凹复合材料  
**a**



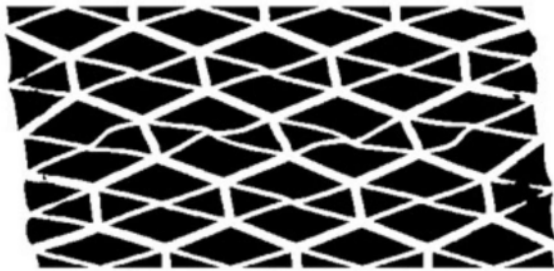
长方形复合材料  
**b**



蜂窝复合材料  
**c**



内凹-桁架复合材料  
**d**



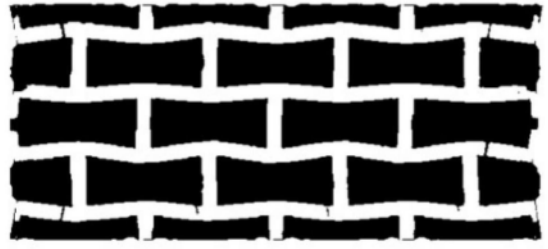
蜂窝-桁架复合材料  
**e**

图5



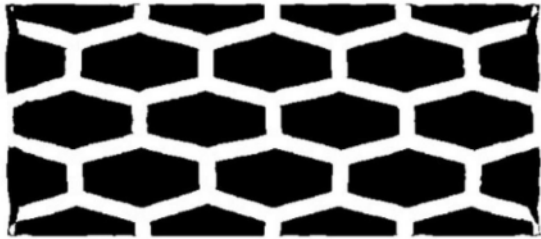
内凹复合材料

**a**



长方形复合材料

**b**



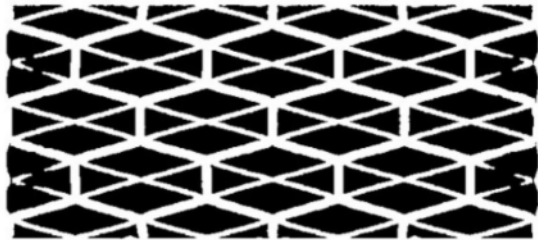
蜂窝复合材料

**c**



内凹-桁架复合材料

**d**



蜂窝-桁架复合材料

**e**

图6



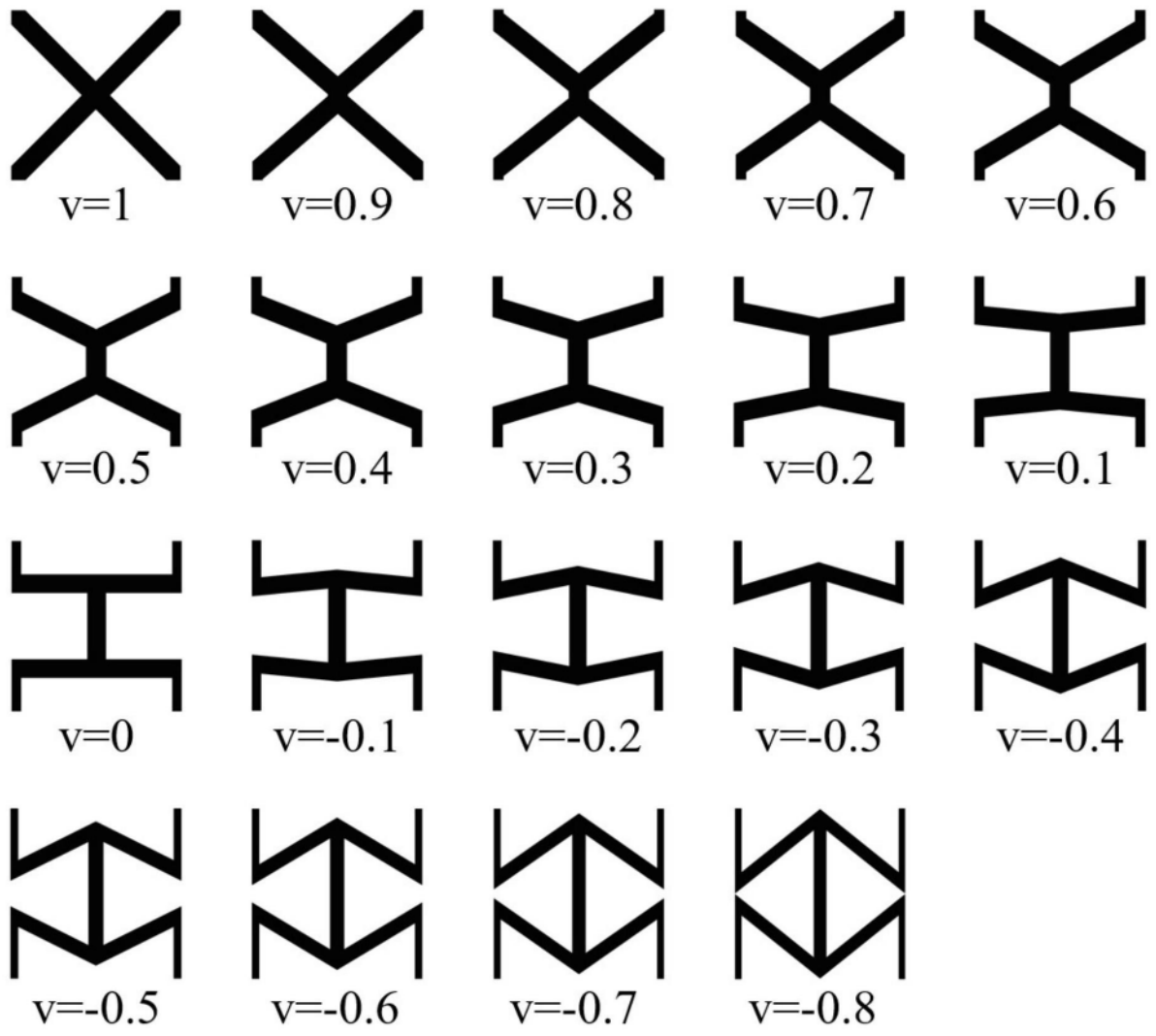


图7

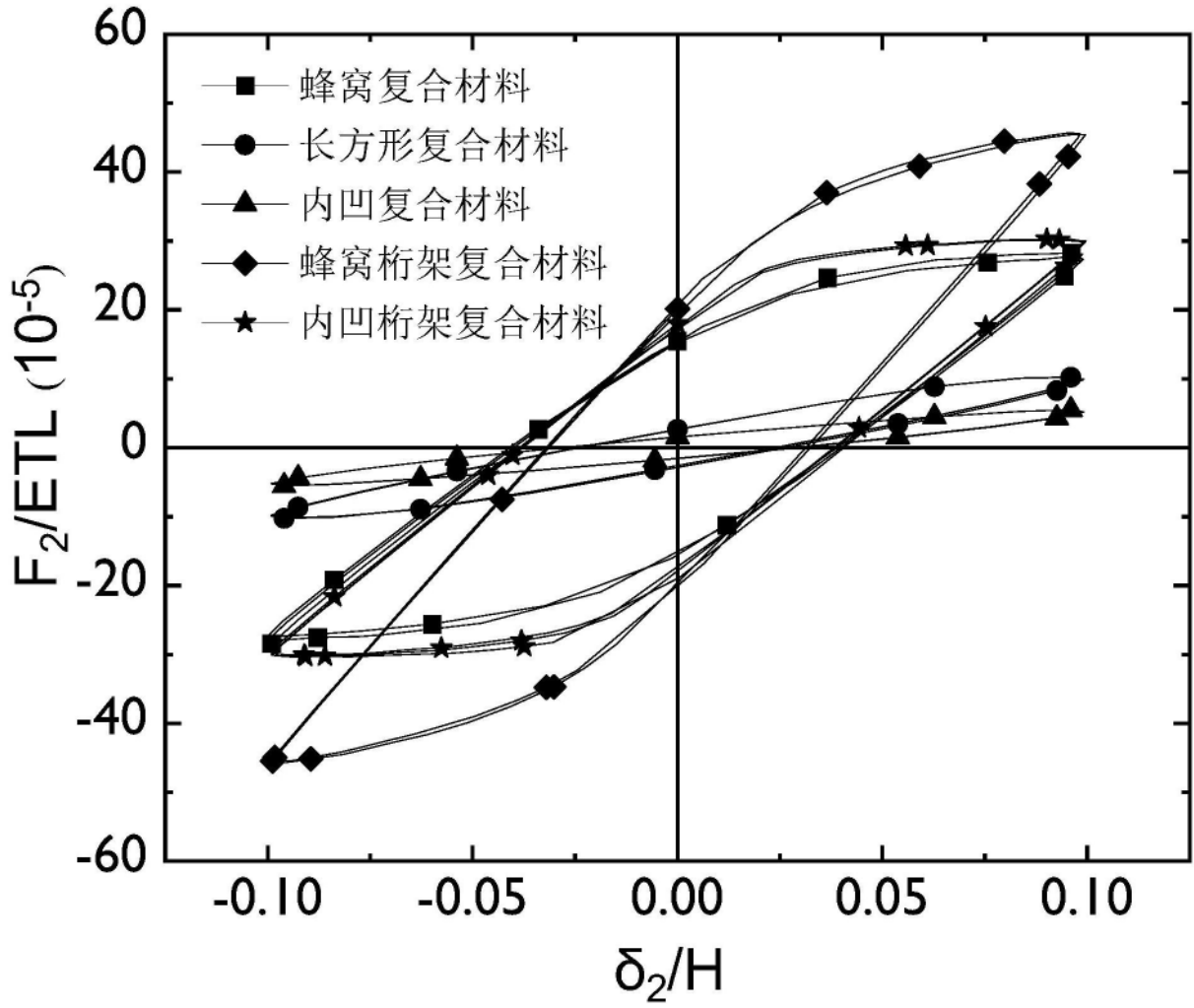


图8

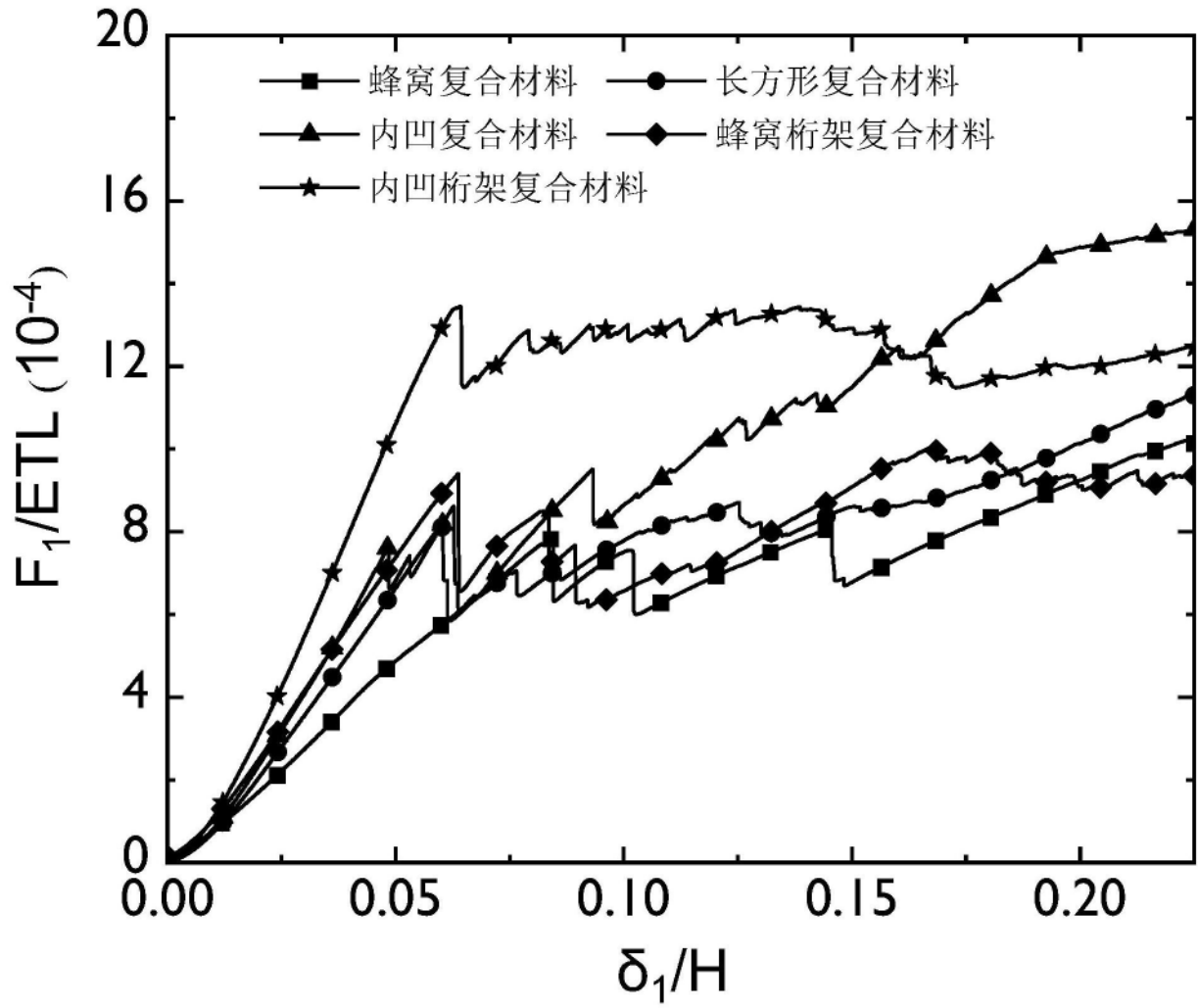


图9

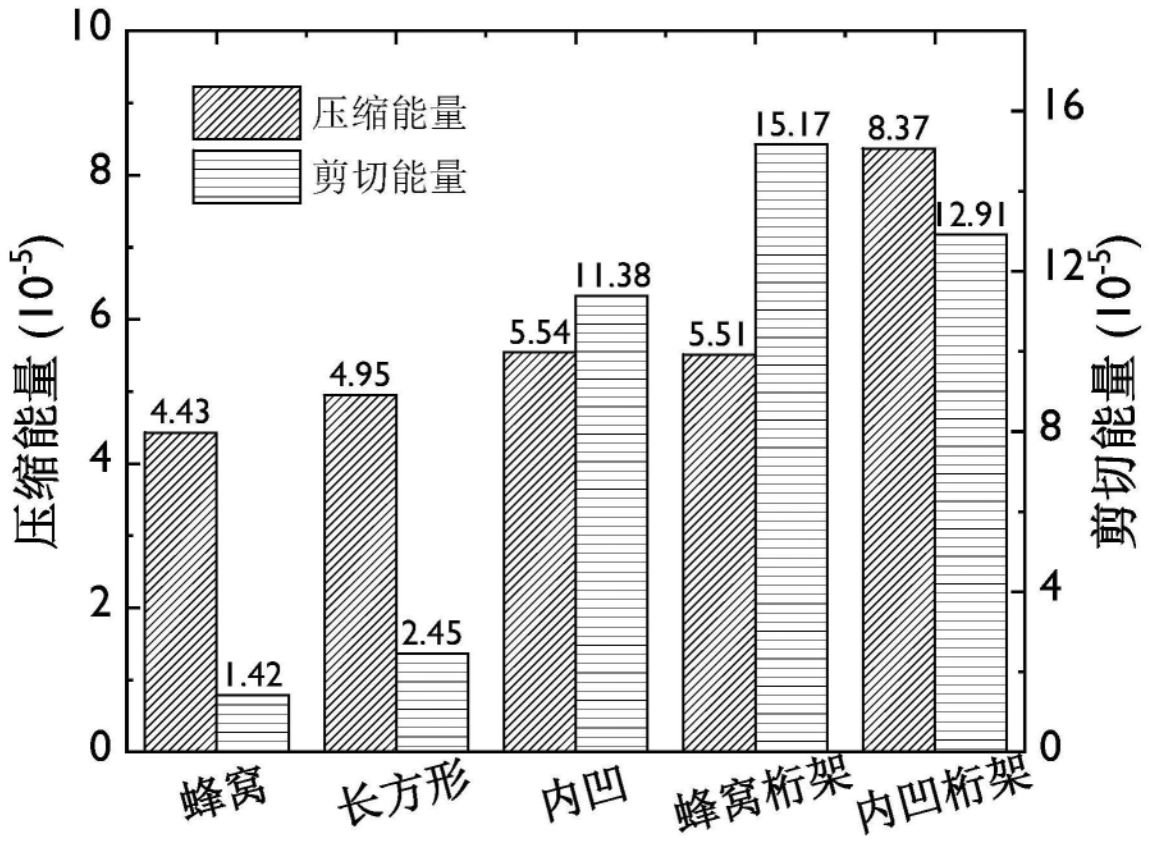


图10

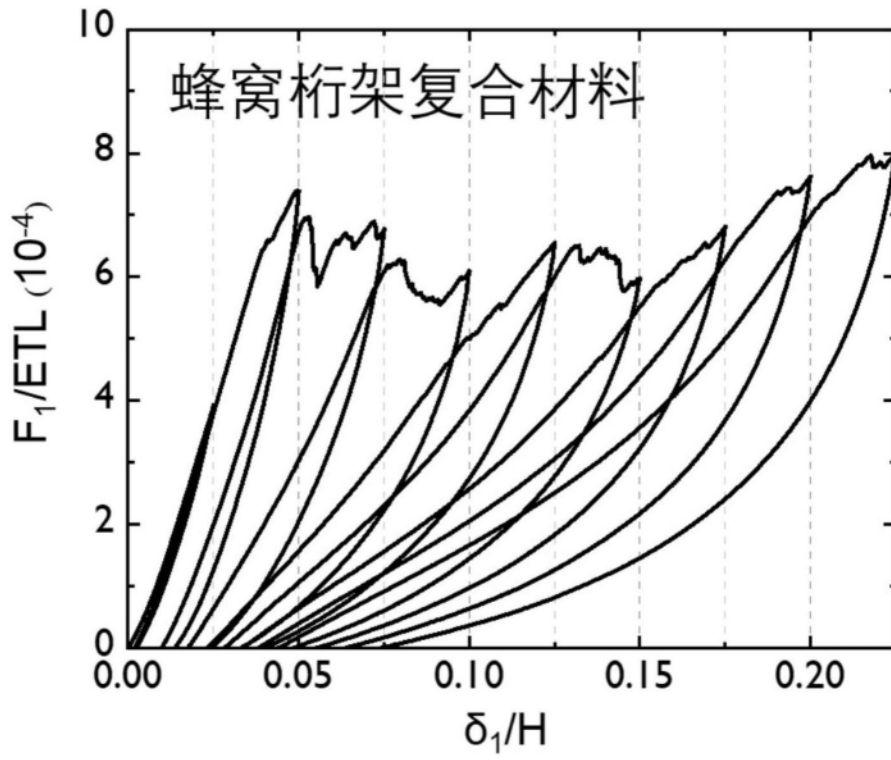


图11