



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113580686 A

(43) 申请公布日 2021. 11. 02

(21) 申请号 202110854938.X

F41H 5/04 (2006.01)

(22) 申请日 2021.07.28

(71) 申请人 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 陈玉超 郭雅惊 魏延鹏

(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

代理人 焦海峰

(51) Int. Cl.

B32B 15/01 (2006.01)

B32B 15/18 (2006.01)

B32B 3/08 (2006.01)

B32B 3/22 (2006.01)

B29C 39/10 (2006.01)

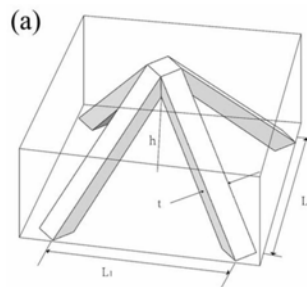
权利要求书1页 说明书6页 附图5页

(54) 发明名称

具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构及其制备方法

(57) 摘要

本发明属于冲击材料技术领域,针对现有技术中存在的高速碰撞会引起轻质夹层结构的大变形损伤的技术问题,本发明的目的在于提供具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构及其制备方法,包括面板和点阵芯层,面板与点阵芯层通过真空焊接方式进行牢固焊接,通过压塑工艺,将具有抗冲击自修复功能的EMAA材料填充于轻质夹层结构的芯材空间中,获得了具有自修复功能的自修复点阵夹层结构。利用弹道靶冲击试验进行新型自修复轻质夹层结构的自修复功能的验证。利用三点弯曲试验研究新型自修复轻质夹层结构的弯曲力学响应和吸能行为。将自修复、轻量化集合为一体的新型自修复轻质夹层结构,在许多工业领域有着重大潜在应用。



1. 具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构,其特征在于,包括面板和点阵芯层,面板与点阵芯层通过真空焊接方式进行牢固焊接,所述面板设置为中空立方体框架结构,所述点阵芯层沿着面板的底面中心向上延伸设置为点阵支撑点,沿着点阵支撑点向面板的底面各个底角依此延伸设置为点阵支撑杆。

2. 根据权利要求1所述具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构,其特征在于,所述点阵芯层填充了自修复EMAA材料,自修复EMAA材料为一种部分中和的乙烯-甲基丙烯酸聚合物,其包含有5.4mol%的甲基丙烯酸基团和,其中的30%用Na<sup>+</sup>进行中和。

3. 根据权利要求2所述具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构,其特征在于,所述自修复EMAA材料在试验使用前,将其放在75℃的真空干燥箱中48小时,排出水分。

4. 根据权利要求1所述具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构,其特征在于,其用于弹道靶试验,所述面板的厚度设置为1.05mm;所述点阵芯层设置为小点阵芯层或大点阵芯层,小点阵芯层用 $t_c=0.7\text{mm}$ 的网格线制作而成,大点阵芯层用 $t_c=1\text{mm}$ 的网格线制作而成;所述小点阵芯层和大点阵芯层的板长宽L均设置为170mm,小点阵芯层的厚度 $h_c$ 设置为6.7mm;大点阵芯层的厚度 $h_c$ 设置为12mm。

5. 根据权利要求1所述具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构,其特征在于,所述点阵夹层结构的面板和点阵芯层均采用不锈钢材料制备而成。

6. 根据权利要求1-5任意一项所述具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构的制备方法,其特征不在于,具体包括如下步骤:

(1) 将点阵夹层结构首先放置于石棉绳设置的模具之中,模具高度大于点阵夹层结构的高度;

(2) 再将模具中倒满EMAA颗粒,在模具的上下面均放置一层聚酰亚胺膜;

(3) 将压片机的上下压片均设置150℃的温度,对样品施加5kN的初始压力,继续施压直至点阵夹层结构的内部空间全部被EMAA材料充满;

(4) 然后,关掉压片机的加热功能,样品在压力保持下自然冷却至室温后取出;

(5) 通过铣削将多余材料的去除,得到样品。

7. 根据权利要求6所述具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构的制备方法,所述步骤(4)中自然冷却的时间控制在8小时以上;所述步骤(5)中样品在进行下一步试验前,在25℃的常温环境中存放28天。

## 具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构及其制备方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于冲击材料技术领域,具体涉及具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构及其制备方法。

### 背景技术

[0002] 轻质夹层结构由于质量轻、比强度高、比刚度高和耐冲击等特性,广泛应用于包装工程、飞行器蒙皮、高铁蒙皮等领域。Zhang等人利用试验和有限元模拟手段研究了轻质夹层结构在压缩和冲击载荷作用下的响应。Yungwirth,Wadley等人研究了夹层板在不同冲击速度下的弹道响应和破坏机理。Dharmasena,Wadley等人研究了轻质夹层结构在爆炸载荷下的变形和能力吸收行为,描述了面板和芯材的破坏机理。许多学者研究了将轻质夹层结构的芯材空间里填充泡沫铝材料,陶瓷材料,混凝土,聚氨酯等来增加或提高轻质夹层结构的新功能,这些工作已经被Han Bin等人整理成了综述。

[0003] 自修复是生物体进化过程中出现的基本功能,这一功能可以实质性的提高生物体对自然环境的适应能力。受启发于生物体的自修复能力,许多专家学者在自修复功能材料领域进行了大量的研究,形成了大量的研究成果,部分成果已经汇编成综述或图书。自修复材料可以分为本征型自修复和外援型自修复两种。本征型自修复机理是可以利用材料内部的化学键进行反复的自修复,而不需要添加外部的修复剂,主要包括可重复的共价键,氢键,金属配位键和 $\pi$ - $\pi$ 相互作用等。外援型自修复主要包括布置微胶囊和微血管的方法,由于微胶囊和微血管的材料量的限制,外援型自修复只能修复有限的次数。尽管有着大量的研究针对微裂纹、划痕等小尺寸损伤的自修复,针对如子弹冲击破孔这种大尺寸损伤的自修复依然较少。目前针对大尺寸损伤的自修复机理主要包括离子聚合物,硫醇-烯遇氧聚合反应,和可以修复大尺寸损伤的微血管系统。

[0004] 目前看来,尽快通过引入新材料增加了轻质夹层结构许多功能,但是自修复功能仍然未见报道。然而,对于轻质夹层结构的自修复性能有着很大的潜在需求,比如在高铁、航空航天、危化品运输等领域,高速碰撞会引起轻质夹层结构的大变形损伤,而自修复可以在一定程度上避免损伤。因此,如何研发一种具有抗冲击自修复功能的轻质夹层结构,将轻质夹层结构与冲击条件下自修复的EMAA材料相结合,同时获得轻量化功能和冲击自修复功能,有助于解决高铁、航天航空中冲击损伤相关的关键科学问题。

### 发明内容

[0005] 针对现有技术中存在的高速碰撞会引起轻质夹层结构的大变形损伤的技术问题,本发明的目的在于提供具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构及其制备方法,通过注塑工艺,将具有抗冲击自修复功能的EMAA材料填充于轻质夹层结构的芯材空间中,获得了具有自修复功能的自修复点阵夹层结构。利用弹道靶冲击试验进行新型自修复轻质夹层结构的自修复功能的验证。利用三点弯曲试验研究新型自修复轻质夹层结构的弯曲力学响应和吸能行为。将自修复、轻量化集合为一体的新型自修复轻质夹层结构,在许多工业领域有

着重大潜在应用。

[0006] 本发明采取的技术方案为：

[0007] 具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构，其特征在于，包括面板和点阵芯层，面板与点阵芯层通过真空焊接方式进行牢固焊接，所述面板设置为中空立方体框架结构，所述点阵芯层沿着面板的底面中心向上延伸设置为点阵支撑点，沿着点阵支撑点向面板的底面各个底角依此延伸设置为点阵支撑杆。

[0008] 进一步的，所述点阵芯层填充了自修复EMAA材料，自修复EMAA材料为一种部分中和的乙烯-甲基丙烯酸聚合物，其包含有5.4mol%的甲基丙烯酸基团和，其中的30%用Na<sup>+</sup>进行中和。

[0009] 进一步的，所述自修复EMAA材料在试验使用前，将其放在75℃的真空干燥箱中48小时，用于排出水分。

[0010] 进一步的，所述点阵夹层结构的面板和点阵芯层均采用不锈钢材料制备而成。

[0011] 进一步的，其用于弹道靶试验，所述面板的厚度设置为1.05mm；所述点阵芯层设置为小点阵芯层或大点阵芯层，小点阵芯层用 $t_c=0.7\text{mm}$ 的网格线制作而成，大点阵芯层用 $t_c=1\text{mm}$ 的网格线制作而成；所述小点阵芯层和大点阵芯层的板长宽L均设置为170mm，小点阵芯层用60°的冲压模具冲压形成的小点阵高度 $h_c=6.7\text{mm}$ ；大点阵芯层用60°的冲压模具冲压形成的大点阵高度 $h_c=12\text{mm}$ 。

[0012] 具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构的制备方法，具体包括如下步骤：

[0013] (1) 将点阵夹层结构首先放置于石棉绳设置的模具之中，模具高度为25mm，模具高度大于点阵夹层结构的高度；

[0014] (2) 再将模具中倒满EMAA颗粒，在模具的上下面均放置一层聚酰亚胺膜，通过聚酰亚胺膜控制EMAA与压片机上下金属表面不粘合；

[0015] (3) 将压片机的上下压片均设置150℃的温度，对样品施加5kN的初始压力，继续施压直至点阵夹层结构的内部空间全部被EMAA材料填充满；

[0016] (4) 然后，关掉压片机的加热功能，样品在压力保持下自然冷却至室温后取出；

[0017] (5) 通过铣削将多余材料的去除，得到样品。

[0018] 进一步的，所述步骤(4)中自然冷却的时间控制在8小时以上；所述步骤(5)中样品在进行下一步试验前，在25℃的常温环境中存放28天，为了使EMAA材料内部达到稳定的状态。

[0019] 本发明的有益效果为：

[0020] 1、本发明设计了新型自修复轻质点阵夹层结构，给出了自修复轻质夹层结构的热压制备方法及工艺参数，通过在点阵夹层结构的点阵空间中填充具有自修复功能的乙烯-甲基丙烯酸共聚物(EMAA)材料，完成自修复点阵夹层结构的设计。

[0021] 2、针对新型自修复轻质夹层结构和空轻质夹层结构进行了弹道靶冲击试验及三点弯曲试验研究。分析了自修复点阵夹层结构在弹道靶冲击下的变形、破坏及自修复过程及机理；通过弹道靶冲击试验，验证了新型自修复点阵夹层结构具有抗冲击自修复的能力。

[0022] 3、三点弯曲试验结果表明，新型自修复轻质夹层结构比普通轻质夹层结构具有更加优异的载荷-位移响应，新型自修复轻质夹层结构比空轻质夹层结构的承载能力、吸能能力和比吸能能力均有很大提高，同时发现了EMAA材料与金属夹层结构的协同效应，使得新

型自修复轻质夹层结构的抗弯曲载荷及能量远大于空轻质夹层结构与EMAA板的抗弯曲载荷之和,使得新型自修复轻质夹层结构的承载能力大幅提升,抗弯曲力学性能十分优异。

[0023] 4、本文设计的新型自修复轻质夹层结构,包括自修复点阵夹层结构,有着迅速的抗冲击自修复能力和优异的抗弯曲力学性能(抗弯曲载荷-位移响应)、轻量化设计,在高铁、航空航天、危化品运输等工程领域有着很大的潜在应用。

### 附图说明

[0024] 图1为本发明中点阵胞元示意图;

[0025] 图2为本发明中自修复轻质夹层结构的制备工艺示意图;

[0026] 图3为本发明中自修复点阵夹层结构和空点阵夹层结构样品示意图;

[0027] 图4为本发明中自修复点阵夹层结构抗冲击自修复过程分析示意图;

[0028] 图5为本发明中自修复点阵夹层结构和空点阵夹层结构受弹击后的形貌对比图;

[0029] 图6为本发明中纯EMAA板、空点阵夹层结构、自修复点阵夹层结构的1mm/min速度三点弯曲力-位移曲线图;

[0030] 图7为本发明中空点阵夹层结构、自修复点阵夹层结构、纯EMAA板的1mm/min三点弯曲变形过程图;

[0031] 图8为本发明中纯EMAA板、空点阵夹层结构、自修复点阵夹层结构的1mm/min三点弯曲能量-位移曲线图;

[0032] 图9为本发明中纯EMAA板、空点阵夹层结构、自修复点阵夹层结构的1mm/min速度三点弯曲比吸能-位移曲线图;

### 具体实施方式

[0033] 本发明设计并加工了新型自修复轻质夹层结构,选取可抗冲击自修复的EMAA材料,采用热塑性树脂压塑工艺,将EMAA材料与轻质点阵夹层结构相结合,获得了不同尺寸的新型自修复点阵夹层结构。利用弹道靶子弹冲击试验验证了两种新型自修复结构的冲击自修复性能,利用三点弯曲试验进行了新型自修复夹层结构与空轻质夹层结构、纯EMAA板的抗弯曲性能对比,同时通过对比几种结构的吸能量和比吸能量,获取了新型自修复轻质夹层结构的弯曲力学性能的充分表征。下面结合附图进一步说明本发明。

[0034] 实施例1

[0035] 如图1所示,具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构,其特征在于,包括面板和点阵芯层,面板与点阵芯层通过真空焊接方式进行牢固焊接,所述面板设置为中空立方体框架结构,所述点阵芯层沿着面板的底面中心向上延伸设置为点阵支撑点,沿着点阵支撑点向面板的底面各个底角依此延伸设置为点阵支撑杆。

[0036] 点阵芯层填充了自修复EMAA材料,自修复EMAA材料选用了杜邦公司的沙林8940树脂材料,自修复EMAA材料为一种部分中和的乙烯-甲基丙烯酸聚合物,沙林8940离子聚合物包含有5.4mol%的甲基丙烯酸基团和,其中的30%用Na<sup>+</sup>进行中和。

[0037] 在试验使用前,将沙林8940颗粒材料放在75℃的真空干燥箱中48小时,用于排出水分。

[0038] 实施例2

[0039] 如图2所示,具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构的制备方法,具体包括如下步骤:

[0040] (1) 将点阵夹层结构首先放置于石棉绳设置的模具之中,模具高度为25mm,模具高度大于点阵夹层结构的高度;

[0041] (2) 再将模具中倒满EMAA颗粒,在模具的上下面均放置一层聚酰亚胺膜,通过聚酰亚胺膜控制EMAA与压片机上下金属表面不粘合;

[0042] (3) 将压片机的上下压片均设置150℃的温度,对样品施加5kN的初始压力,继续施压直至点阵夹层结构的内部空间全部被EMAA材料填满;

[0043] (4) 然后,关掉压片机的加热功能,样品在压力保持下自然冷却至室温后取出(自然冷却的时间控制在8小时以上);

[0044] (5) 通过铣削将多余材料的去除,得到样品,样品在进行下一步试验前,在25℃的常温环境中存放28天,为了使EMAA材料内部达到稳定的状态。

[0045] 实施例3

[0046] 如图3所示,具有抗冲击自修复功能的轻质点阵夹层结构,自修复点阵夹层结构样品用于弹道靶试验,点阵夹层结构的面板和点阵芯层材料均为304不锈钢材料制备而成,所述面板的厚度设置为1.05mm(如图3(a)所示);所述点阵芯层设置为小点阵芯层或大点阵芯层,小点阵芯层用 $t_c=0.7\text{mm}$ 的网格线制作而成,大点阵芯层用 $t_c=1\text{mm}$ 的网格线制作而成;所述小点阵芯层和大点阵芯层的板长宽L均设置为170mm,小点阵芯层用60°的冲压模具冲压形成的小点阵高度 $h_c=6.7\text{mm}$ ;大点阵芯层用60°的冲压模具冲压形成的大点阵高度 $h_c=12\text{mm}$ 。

[0047] 如图3(a),图3(a1)所示,空点阵夹层板三点弯试验样品尺寸为200\*40\*8.84mm,质量约为150g;如图3(a2)所示,自修复点阵夹层板的外形尺寸与空点阵夹层板的尺寸相同,质量约为200g;三点弯试验中的纯EMAA板尺寸为200\*40\*6.7mm,质量约为50g。

[0048] 本发明又一实施例,如图4所示是自修复点阵夹层结构抗冲击自修复过程分析示意图。图4(1)为自修复点阵夹层结构在受冲击之前的示意图,一个具有高初始速度的子弹自左至右冲击自修复点阵夹层结构,自修复点阵夹层结构中填充有EMAA离子聚合物材料。图4(2)为初始冲击阶段,子弹侵彻破坏了前面板,开始形成花瓣状的塑性变形,在EMAA中开始形成弹性波向前传播,引起材料的弹性变形。第三个阶段如图4(3)所示,为侵彻阶段一,子弹进入结构的中部,结构的前面板的花瓣形塑性变形已经完成,子弹进入到EMAA材料内部。点阵芯层也在子弹的冲击下形成塑性破坏。EMAA材料存在弹性变形和粘弹性变形,在子弹的冲击和摩擦下,EMAA局部达到熔点发生熔化。如图4(4)所示,为侵彻阶段二,EMAA材料开始沿着白色箭头方向弹回,结构的后面板开始出现花瓣状塑性变形。由于EMAA材料有着良好的弹性,在高温下又有一定的流动性,子弹头部推着EMAA材料向前运动。如图4(5)所示,为侵彻后阶段,子弹完全穿过自修复点阵夹层结构,留下了金属材料的塑性变形,EMAA材料完全弹回并开始进行粘性的回流重塑阶段。如图4(6)所示为自修复阶段,也是整个冲击自修复过程的最后一个阶段,在此阶段EMAA材料内部通过氢键和离子键的作用迅速自修复,不留下任何残余的孔,只在材料破坏处留下一个疤痕。

[0049] 本发明又一实施例,如图5所示为自修复点阵夹层结构和空点阵夹层结构在5.56mm子弹侵彻后的形貌对比。图5(a)为子弹冲击空点阵夹层结构1(小空点阵夹层结构)

的形貌图,图5 (a1) 是结构受子弹冲击后的前面板形貌照片,图5 (a2) 是子弹冲击后空点阵夹层结构前面板形貌图,形成了一个8mm直径的圆孔,图5 (a3) 是子弹冲击后空点阵夹层结构后面板的形貌图,形成了12mm的花瓣形形貌破坏;图5 (b) 为子弹冲击自修复点阵夹层结构1 (小自修复点阵夹层结构) 的形貌图,在图5 (b3) 中可以看到,小自修复点阵夹层结构并未完全修复,在EMAA层仍然留有一个小孔残留。这是由于点阵夹层结构的面板、芯材的塑性变形对EMAA层修复的影响,导致EMAA层的厚度 ( $L=6.74\text{mm}$ ) / 子弹口径 ( $d=5.56\text{mm}$ ) 低于本结构的修复极限。在图5 (b2, b3) 中可以看到,前面板和后面板的破孔直径分别为7.5mm和14mm。图5 (c) 为子弹冲击空点阵夹层结构2 (大点阵夹层结构) 的形貌图,前后面板的花瓣破坏与图5 (a) 中的小点阵夹层结构类似。图5 (d) 为子弹冲击自修复点阵夹层结构2 (大自修复点阵夹层结构),从图5 (d2, d3) 中可以看到大自修复点阵夹层结构可以完全修复,在EMAA层无残余小孔。这一结果表明了新型自修复点阵夹层结构的抗冲击自修复的可行性。

[0050] 如图6所示,为纯EMAA板、空点阵夹层结构、自修复点阵夹层结构在1mm/min压缩速度下的三点弯曲力-位移曲线。自修复点阵夹层结构的力-位移响应比空点阵夹层结构明显大许多,二者的载荷峰值分别为3.73kN和1.03kN。纯EMAA板表现出了低刚度的弹性响应,力-位移曲线表现出了单调上升的趋势,在32mm压头位移时,载荷仅有0.15kN。将空点阵夹层结构和纯EMAA板的力-位移曲线进行相加,成为(d)曲线,然而二者之和的载荷峰值仅有1.07kN,比自修复点阵夹层结构的载荷仍然低许多,表现出了EMAA材料和点阵结构金属材料的协同效应。这一协同效应中包含着EMAA材料与金属之间的粘接载荷,摩擦载荷和EMAA材料本身的受压膨胀载荷。图6中的每个点和图7中的每个点是一一对应的,图7为1mm/min速度下的几种样品三点弯曲过程图片。点(2)是空点阵夹层结构的载荷峰值点,在此点处空点阵夹层结构开始屈曲,在图7(2-a)中也可以看出。点(6)是自修复点阵夹层结构的载荷峰值点,在图7(6-b)中也可以看到,EMAA材料和金属上面板开始脱离,并在后续的过程中脱离更加明显。在图7(10-a)和图7(10-b)中可以对比看到,图7(10-a)中空点阵夹层结构的前面板和后面板已经被压实,挤压在一起,然而对于图7(10-b)中的自修复点阵夹层结构,由于EMAA材料的弹性响应,结构的前后面板之间并未压实,而是夹着一定厚度的EMAA材料。因此,EMAA材料的弹性响应对于协同效应的贡献很大,导致了自修复点阵夹层结构具有优良的弯曲力-位移响应。

[0051] 如图8所示,是纯EMAA板、空点阵夹层结构、自修复点阵夹层结构的1mm/min三点弯曲能量-位移曲线。图8中的能量-位移曲线是图7中的力-位移曲线在位移轴上的积分。如图8所示,空点阵夹层板和纯EMAA板在32mm的吸能量之和为25J,而自修复点阵夹层结构在32mm处的吸能量为92J,远远大于二者之和的25J。因此,在吸能量方面,EMAA材料与点阵夹层结构之间的协同效应更加明显,自修复点阵夹层结构的吸能量相比空点阵夹层结构具有明显优势。

[0052] 图9为纯EMAA板、空点阵夹层结构、自修复点阵夹层结构的1mm/min速度三点弯曲比吸能-位移曲线,图9为图8中各条曲线除以各部分的质量获得,获得的参数为各样品在1mm/min三点弯曲下的比吸能量,可以看到对于自修复点阵夹层结构,在32mm处的比吸能量为0.45J/g,比纯EMAA板、空点阵夹层板以及二者之和的比吸能量都明显高许多。

[0053] 因此,自修复点阵夹层结构的弯曲力学响应由于EMAA材料和点阵夹层结构的金属材料的协同效应,达到了 $1+1>2$ 的效果,使新型自修复点阵夹层结构具有良好的力学响应,

同时考虑到其具有先进的抗冲击自修复效果,这种新型复合结构在高铁、航空航天、危化品运输等许多工业领域都有着潜在的应用价值。

[0054] 以上所述并非是对本发明的限制,应当指出:对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明实质范围的前提下,还可以做出若干变化、改型、添加或替换,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。



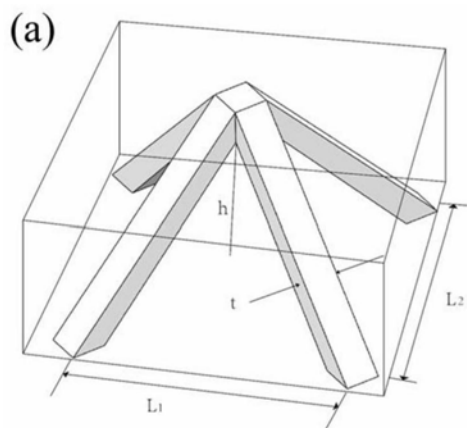


图1

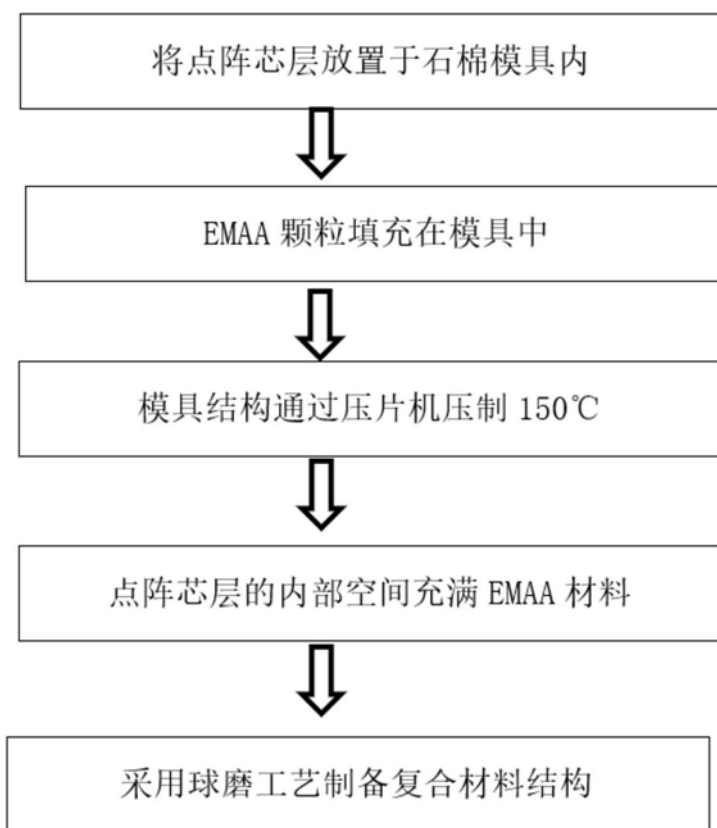


图2

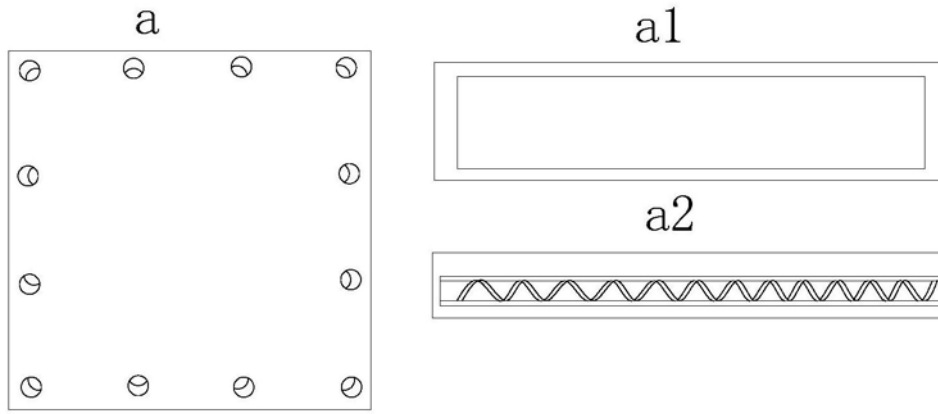


图3

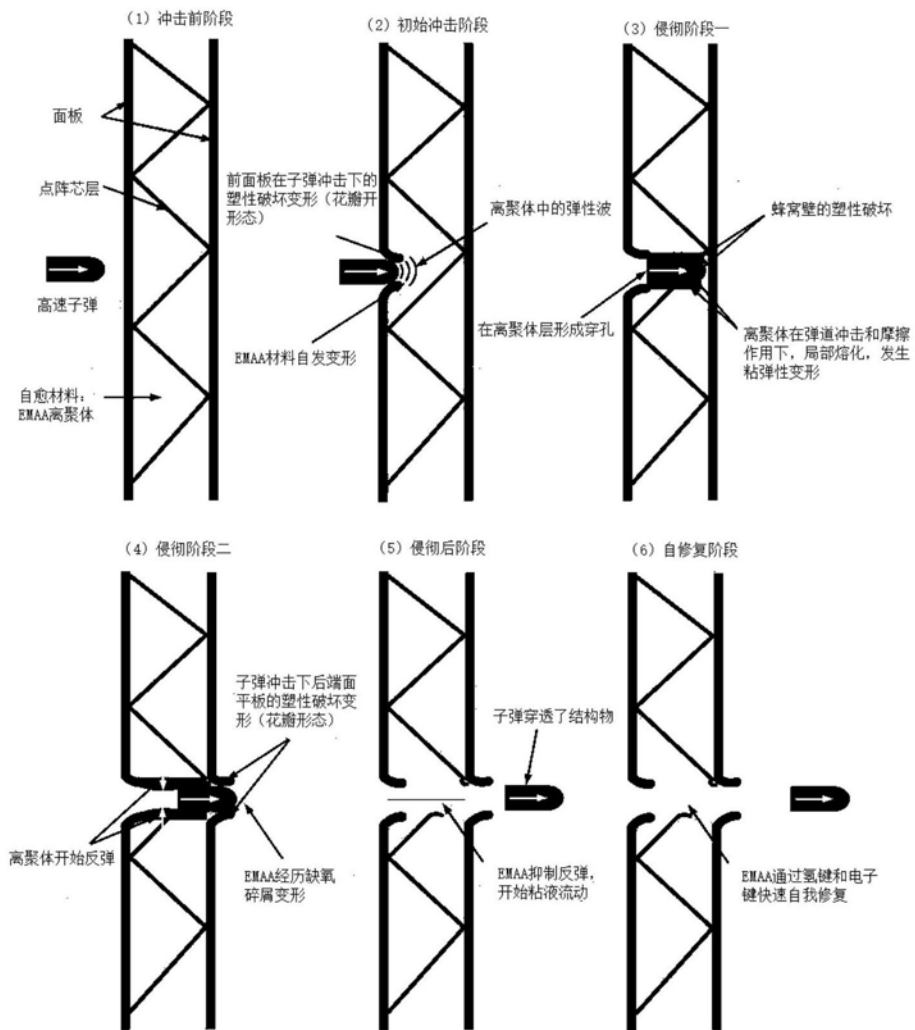


图4

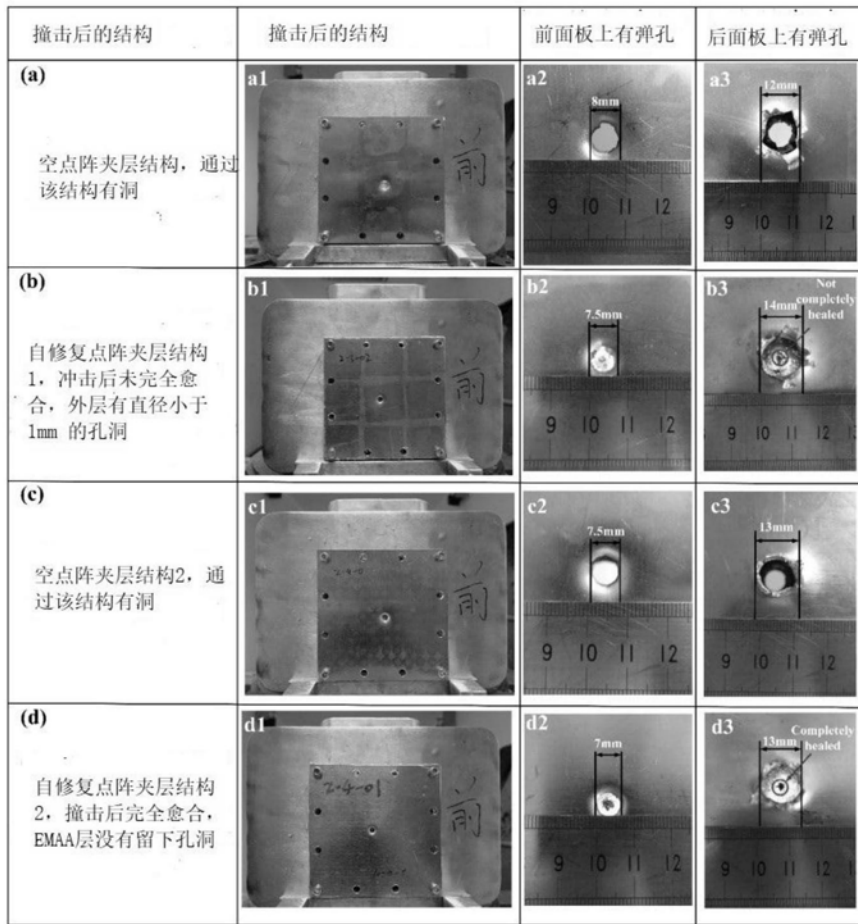


图5

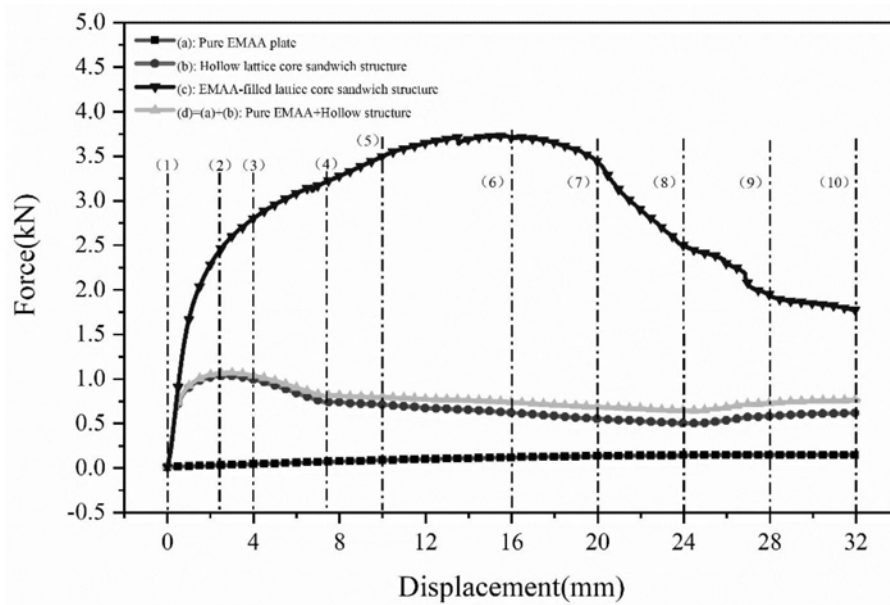


图6

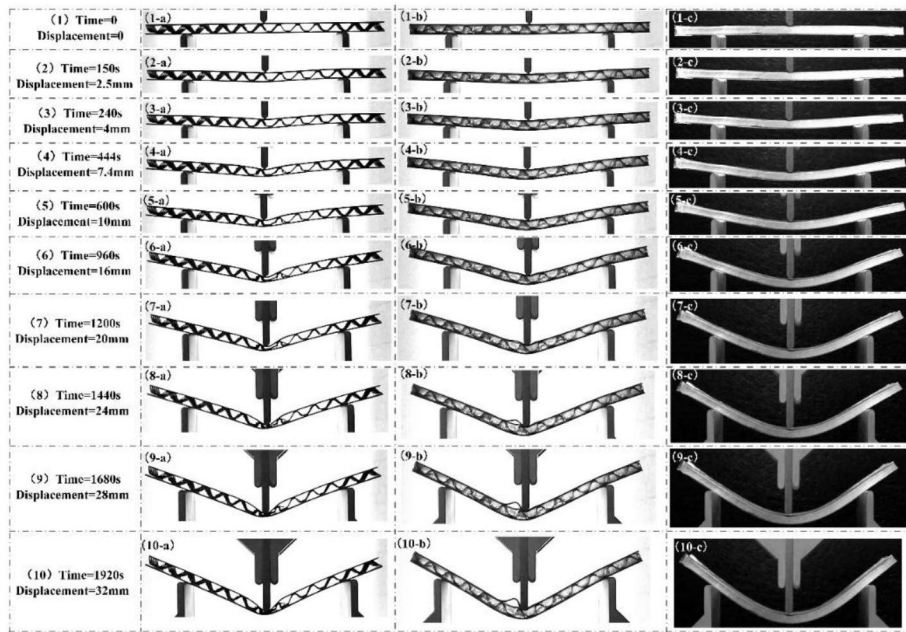


图7

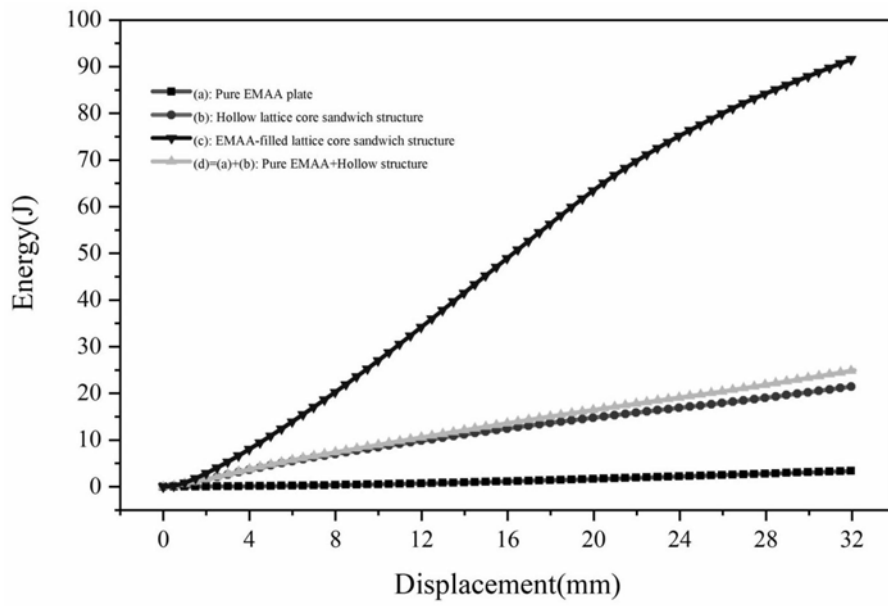


图8

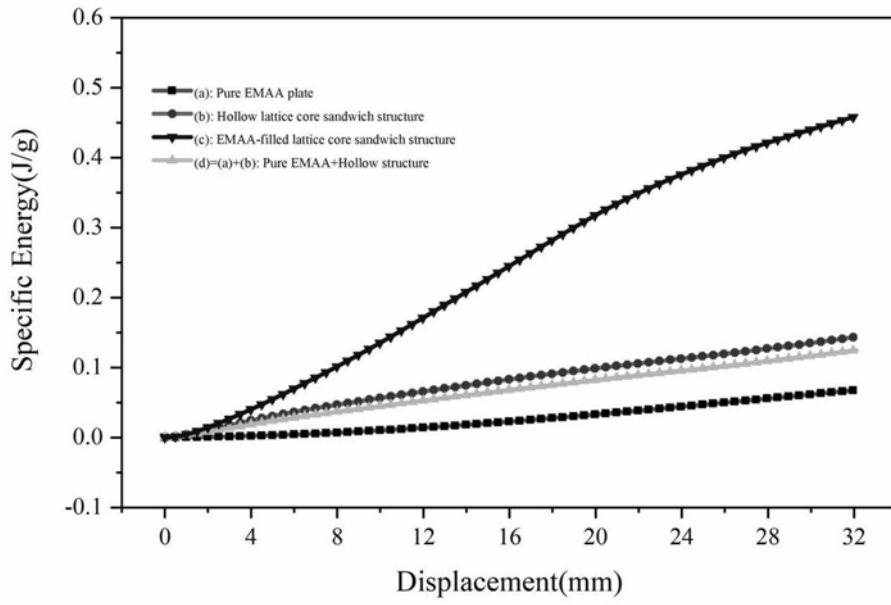


图9