

文章编号:1001-4888(2023)05-0595-11

# 基于三重周期极小曲面的 3D 打印 互穿相复合材料的力学性能\*

何慧怡, 梁颖晶

(广州大学 土木工程学院, 广东广州 510006)

**摘要:** 互穿相复合材料(Interpenetrating phase composites, IPCs)由于其各相的相互连接性,与用纤维、分散颗粒等作为增强相的传统复合材料相比,具有更好的力学性能。基于动物仿生构建的三重周期极小曲面(Triply periodic minimal surface, TPMS)超材料结构是一种规律且复杂的拓扑结构,呈现出如无应力集中、高比吸能、高比强度等优异的力学性能。随着增材制造的发展,使得制备可设计的、复杂拓扑的 IPCs 结构成为可能。本文通过 Polyjet 多材料 3D 打印技术制备出基于 TPMS 的 IPCs 聚合物结构,并对其力学性能进行了实验研究,该 IPCs 结构由增强相和基体相两相组成,其中增强相采用 2 种 TPMS(Gyroid 曲面和 Schwarz P 曲面,简称为 G 曲面和 P 曲面)的 2 种拓扑(外壳拓扑和立体拓扑)结构,增强相间的孔隙部分由较软的基质材料填充。研究表明,在 3 种增强相相对密度(25%、35%、50%)下,G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构相比于所研究的 G 曲面立体拓扑、P 曲面立体拓扑和外壳拓扑的 IPCs 结构具有更优的力学性能和整体稳定性;由于具有高刚度、高强度以及屈服后的平缓上升平台,G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构可在能量吸收等方面有较大的应用前景。

**关键词:** 互穿相复合材料; 三重周期极小曲面; G 曲面; P 曲面; 外壳拓扑; 立体拓扑

**中图分类号:** O34 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-22-239

## 0 引言

互穿相复合材料(Interpenetrating phase composites, IPCs)是一类由两个或多个相组成的复合材料,这些相在复合材料中是各自连续的,并通过微观结构在三维空间上相互连接<sup>[1]</sup>。这种相互连接的性质使得复合材料即使有一个相被破坏或移除,其他相仍能保持结构的完整性和承载能力。与用纤维、分散颗粒、粉末或晶须(离散增强物)作为增强材料的传统复合材料相比,IPCs 结构中各相的相互连接性使得结构整体力学性能更优<sup>[2]</sup>。

许多研究表明<sup>[3-6]</sup>,与传统的增强相不连续的复合材料相比,互穿且连续的增强相和基体相组合可提高结构的力学性能,因为拓扑结构的互连性允许每个组成相都能对复合材料的整体性做出更大的贡献。Agrawal 等<sup>[7]</sup>发现包含三氧化二铝和铝结合的 IPCs 结构表现出优于铝的刚度,和优于三氧化二铝的韧性和结构完整性。相比于传统泡沫铝不可恢复的塑性变形,泡沫铝-聚氨酯 IPCs 结构由于软弹性相的稳定作用,在循环载荷下表现出更大的可恢复变形<sup>[8]</sup>。可对纳米多孔钛为基础的金属-聚合物互穿

\* 收稿日期: 2022-09-22; 修回日期: 2022-11-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178193); 广东省自然科学基金项目(2022A1515012086); 广州市基础研究计划市校(院)联合项目(202102010491)

通信作者: 梁颖晶(1981-), 女, 博士, 副教授, 主要从事材料的力学性能研究。Email: yjliang@gzhu.edu.cn

相纳米复合材料进行设计,使得复合材料的弹性模量跟人体骨骼匹配<sup>[9]</sup>。碳化硅-铝 IPCs 结构的韧性和可加工性较碳化硅更优,同时碳化硅-铝 IPCs 结构的强度和硬度比铝更高<sup>[10]</sup>。由以上研究结果可知,IPCs 结构优异的力学性能使其在多功能结构应用中表现出巨大的潜力。然而上述研究中的 IPCs 结构绝大多数是通过如粉末冶金<sup>[11]</sup>和渗透工艺<sup>[3, 5]</sup>等传统方法制备的<sup>[7-9]</sup>,这些方法虽然可形成有效且可扩展的结构,但其形成的复合材料中硬材料是随机分布的,传统制备方法无法精确控制 IPCs 中两相的空间分布。

IPCs 结构的力学性能与 IPCs 中组成结构的空间分布<sup>[12]</sup>密切相关,通过增材制造技术可制备出复杂的且具有拓扑可控性的 IPCs<sup>[13]</sup>结构,其中 IPCs 结构中如孔隙率、拓扑几何和胞元分布等参数都可进行设计<sup>[14]</sup>。IPCs 结构可由多孔材料作为增强相,其余(孔隙)部分填充基体材料作为基体相构成,如泡沫铝-复合泡沫<sup>[15-16]</sup>等材料。三重周期极小曲面(Triply periodic minimal surface, TPMS)是一类数学定义的曲面,在三维空间中表面被分割成 2 个无限的、交织但不相交的区域,并且在给定的边界内具有最小化表面积<sup>[17]</sup>。近年来,TPMS 结构特殊的力学性能引起了学者们广泛的研究兴趣<sup>[18-20]</sup>。与基于桁架的多孔材料相比,基于 TPMS 的多孔材料具有平滑和规则的拓扑结构,导致较少的局部应力集中,从而能实现有效的载荷传递,基于 TPMS 的多孔材料具有更好的力学性能<sup>[19-20]</sup>。基于 TPMS 的多孔材料的优势同样在基于 TPMS 的 IPCs 结构中得以体现,研究表明<sup>[21]</sup>,以 TPMS 外壳拓扑和立体拓扑作为增强相的 IPCs 结构表现出优异的力学性能,如更高的刚度、强度和能量吸收密度。此外,基于 TPMS 的 IPCs 结构已经被证明具有更多的功能<sup>[17, 22]</sup>,如在电和热的同时传输方面。与此同时,由于 TPMS 的周期性特征,基于 TPMS 的 IPCs 结构更易于规模化制造。然而,TPMS 的种类众多,相对于其他形式,Gyroid 曲面(后简称为 G 曲面)和 Schwarz P 曲面(后简称为 P 曲面)的应用较广,但目前基于这 2 种 TPMS 拓扑的 IPCs 结构研究不多,基于 TPMS 不同拓扑形式的 IPCs 结构的力学性能研究更少,不能很好地指导设计和生产。本文通过多材料喷射生产技术(Polyjet 3D 打印技术)<sup>[23]</sup>制造了两类常见的 TPMS 结构形式——P 曲面和 G 曲面的 IPCs 结构,其中每种曲面采用了 2 种拓扑方式——外壳拓扑和立体拓扑,通过实验对比了不同相对密度下 4 种不同拓扑类型 IPCs 结构的力学性能。

## 1 材料和方法

### 1.1 增强相拓扑的生成

#### 1.1.1 G 曲面

G 曲面,如图 1(a)所示,是美国宇航局科学家 Schoen<sup>[24]</sup>于 1970 年发现的一种 TPMS, G 曲面可通过以下方程进行三角近似:

$$\sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x) = 0 \quad (1)$$

式中,  $(x, y, z)$  是三维几何空间中的几何点。

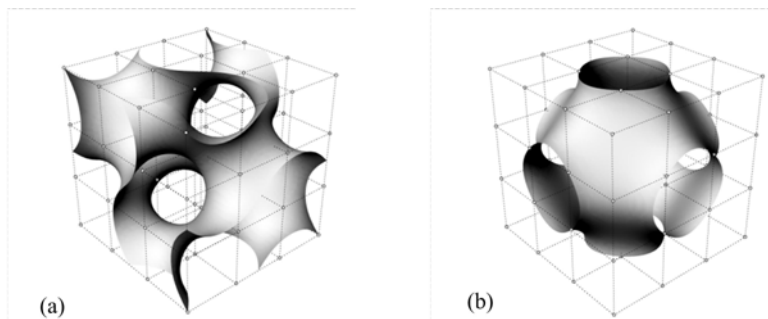


图 1 (a)G 曲面; (b)P 曲面

Fig.1 (a)G surface; (b)P surface

#### 1.1.2 P 曲面

Schoen 将 P 曲面称为“Primitive”<sup>[25]</sup>,如图 1(b)所示,标准的 P 曲面具有立方对称性。P 曲面可以通过隐式曲面近似:

$$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = 0 \tag{2}$$

1.1.3 立体拓扑和外壳拓扑

立体网格(Solid-networks)和外壳网格(Sheet-networks)都是以 TPMS 的数学函数为基础进行拓扑的,表达式如下<sup>[26]</sup>:

Solid-networks:

$$\sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x) = c \tag{3}$$

$$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = c \tag{4}$$

Sheet-networks:

$$\sin(x)\cos(y) + \sin(y)\cos(z) + \sin(z)\cos(x) = \pm c \tag{5}$$

$$\cos(x) + \cos(y) + \cos(z) = \pm c \tag{6}$$

式中:( $x, y, z$ )是三维几何空间中的几何点; $c$ 值的改变可以改变结构的相对密度,如图 2 所示。

外壳拓扑的相对密度  $\rho$ 可表示为

$$\rho = t \cdot S/V \tag{7}$$

式中: $t$ 为厚度; $S$ 为表面积; $V$ 为立方体体积。

由于立体拓扑结构的厚度不均匀,其相对密度无公式表达,可通过软件 MSLattice 进行计算。

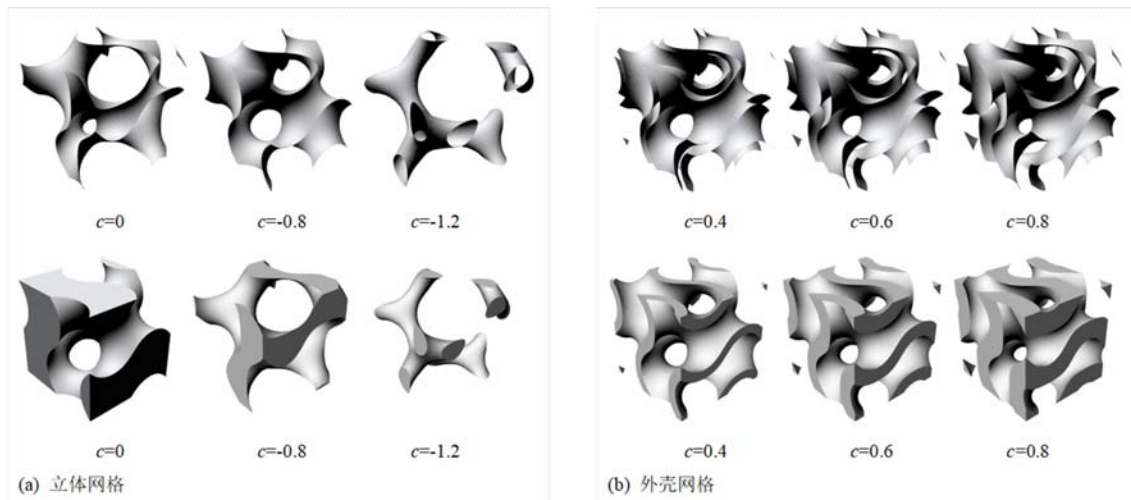


图 2 三重周期极小曲面(以 G 曲面为例):(a)立体拓扑;(b)外壳拓扑

Fig. 2 Triply periodic minimal surface(take G surface as an example): (a)solid-networks; (b)sheet-networks

1.2 IPCs 的生成

通过软件 MSLattice 生成  $4 \times 4 \times 4$  个长宽高各为 8mm 的单位晶胞模型,并保存为 stl 文件作为增强相模型,随后将该模型导入建模软件 Rhino,用布尔切割操作从相同尺寸的立方体中减去增强相模型以形成互补的基体相模型,最后,将增强相模型以及基体相模型分别保存为 stl 文件,并传输至 3D 打印机的控制软件 GrabCAD 用于打印。图 3 所示为增强相的相对密度为 25% 的模型生成过程,其中相对密度是指 TPMS 拓扑相占结构整体体积的百分数。

1.3 制造方法

本文所有的试件都由 PolyJet 3D 打印机(Objet260 Connex3,Stratasys)制备,该设备最多可同时打印 3 种不同的材料。本文 IPCs 结构中的增强相材料为玻璃状光聚合物 VeroGray,而软基体相材料为橡胶状聚合物 TangoBlack,试件在打印完成后置于室温下 7 天进行固化,所有试件的尺寸均为  $32\text{mm} \times 32\text{mm} \times 32\text{mm}$  的立方体。

1.4 材料力学特性

分别对增强相和基体相材料进行单轴拉伸和单轴压缩实验以测得材料的力学特性。工程应力和工程应变分别以  $\sigma = F/A_0$  和  $\epsilon_0 = \delta/l_0$  计算得到,其中  $F$  和  $\delta$  分别为原始力和位移测量值; $A_0$  和  $l_0$  分别

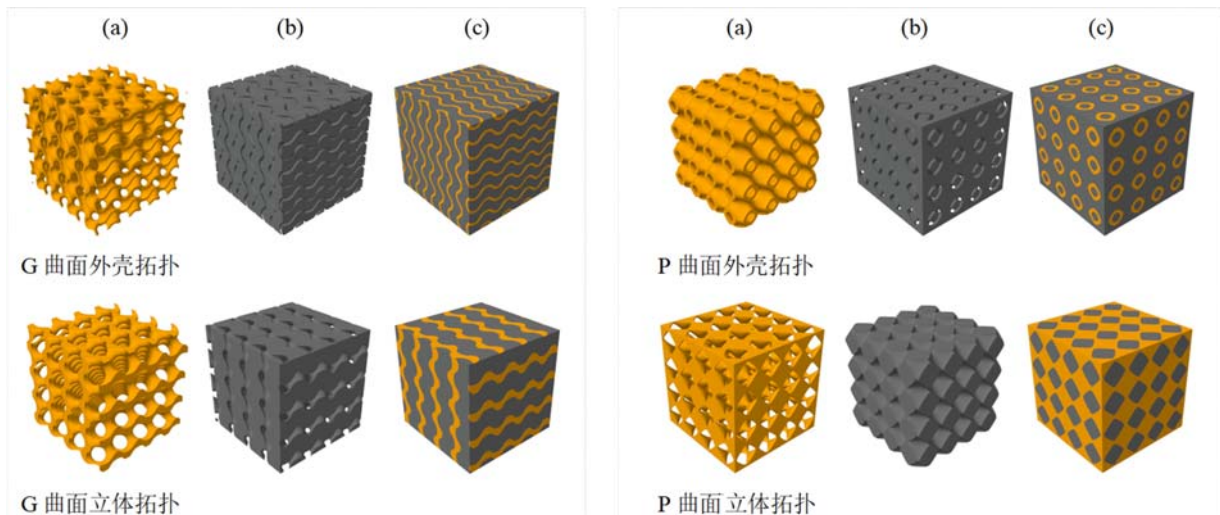


图3 基于三重周期极小曲面的 IPCs:(a)增强相;(b)基体相;(c)IPCs

Fig. 3 Interpenetrating phase composites based on triply periodic minimal surface:  
(a) enhanced phase; (b) matrix phase; (c) IPCs

为试件的原始截面面积和长度。真实应力和真实应变分别以  $\sigma_c = \sigma_0(1 + \epsilon_0)$  和  $\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_0)$  计算得到。通过应力-应变曲线(图4)可得到试件的杨氏模量、屈服强度和能量吸收密度,其中杨氏模量定义为单向应力状态下屈服应力除以该方向的应变。同时,为了最大限度地减少由3D打印逐层进行引入的各向异性的影响,压缩实验的加载方向均平行于打印方向。

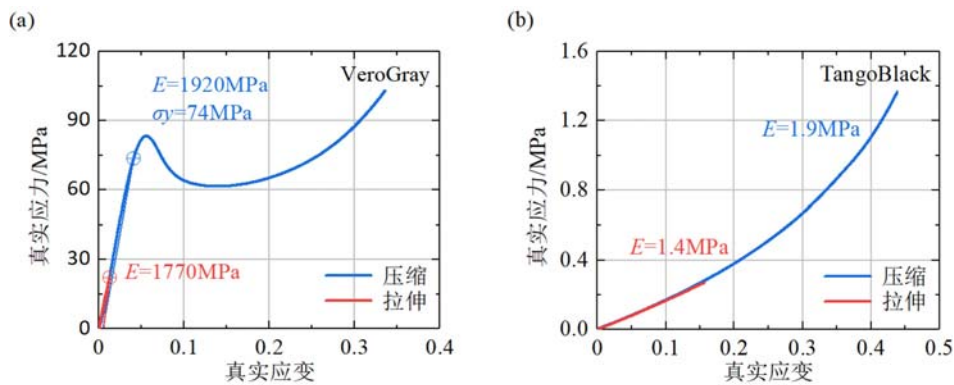


图4 拉伸和压缩下的真实应力-真实应变曲线:(a)VeroGray;(b)TangoBlack

Fig. 4 True stress-true strain curve under tension and compression; (a)VeroGray; (b)TangoBlack

2种基体材料的真实应力-应变曲线如图4所示,由图可见增强相和基体相这2种材料都表现出一定的拉伸-压缩不对称性。由于增强相材料的极限应力比基体相材料高约3个数量级,因此增强相将承担该复合材料结构中的绝大部分载荷。而基体相在整个结构中是连续的,在复合材料结构的稳定性中也起着重要作用。

## 2 结果与讨论

### 2.1 基于G曲面拓扑的 IPCs 结构:立体拓扑与外壳拓扑

根据1.4节所述的实验步骤可得不同相对密度下4种拓扑结构在单轴压缩实验下的名义应力-应变曲线,如图5所示。下面将对增强相为G曲面外壳拓扑与G曲面立体拓扑的 IPCs 结构的力学性能,其中增强相的相对密度分别为25%、35%和50%。

从图5(a)可知,在不同增强相相对密度下,G曲面外壳拓扑 IPCs 结构应力-应变曲线整体趋势基本相同,都有弹性段、平缓上升段、下降段。由1.4节的图4可知,增强相材料 VeroGray 的极限应力和弹性模量远高于基体相材料,IPCs 结构的强度和刚度几乎取决于增强相材料的相对密度,因此随着增

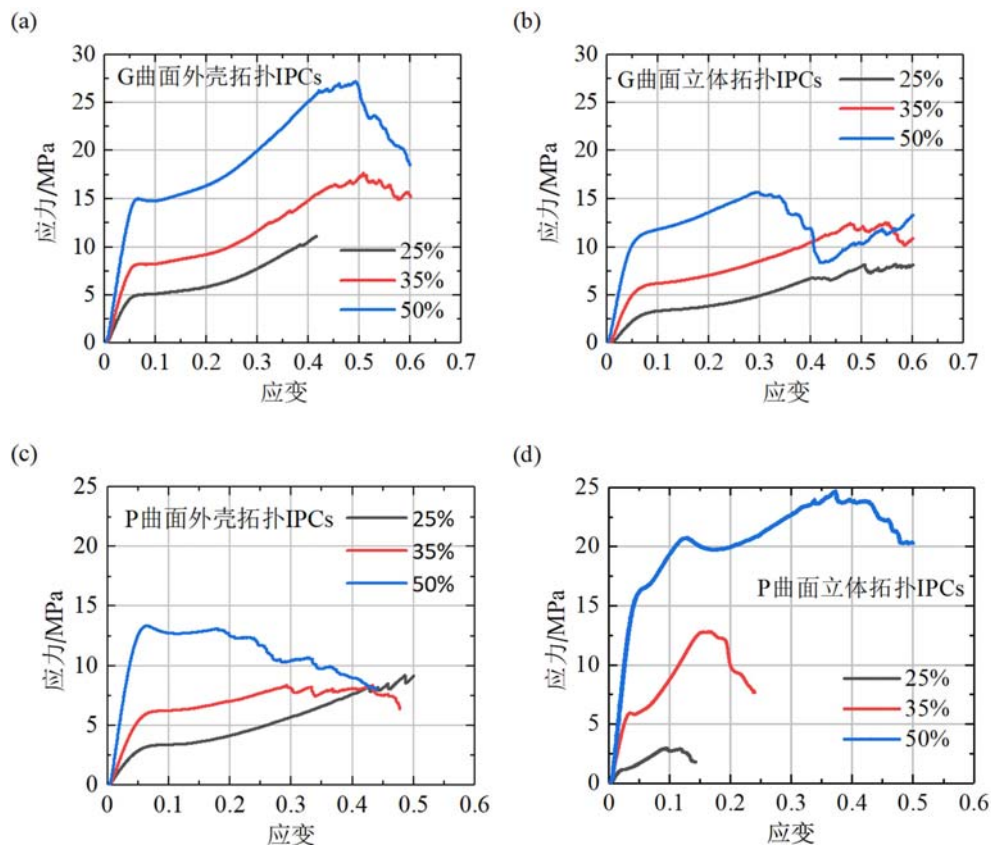


图5 基于三重周期极小曲面的 IPCs 结构应力-应变曲线:(a)G 曲面外壳拓扑 IPCs;(b)G 曲面立体拓扑 IPCs;(c)P 曲面外壳拓扑 IPCs;(d)P 曲面立体拓扑 IPCs

Fig. 5 IPCs stress-strain curve based on triple-periodic very small surfaces:

- (a) G surface sheet-networks IPCs; (b) G surface solid-networks IPCs;  
(c) P curved sheet-networks IPCs; (d) P surface solid-networks IPCs

强相对密度的增加, IPCs 结构的极限强度和弹性模量增大。从破坏形态(图 6(a))可知,当应力超过弹性极限后,随着加载的继续,基体相由于不可压缩性出现了挤出甚至破碎的现象,同时, IPCs 结构的 G 曲面外壳拓扑增强相出现多处的受拉脆性断裂,导致应力-应变曲线出现下降段,使结构整体承载能力减小。当增强相相对密度较大时,增强相的胞元厚度增加且更均匀,应力分布亦更均匀,仅在个别随机的局部位置出现应力集中,所以相对密度越大,应力-应变曲线在弹性段后的上升平台可达到的应力水平越高,结构整体的极限应力越大。

从图 5(b)可知, G 曲面立体拓扑 IPCs 结构的应力-应变曲线先是弹性段,随后出现平缓上升段。相对密度为 25% 和 35% 的 G 曲面立体拓扑 IPCs 结构的应力-应变曲线与 G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的应力-应变曲线相比,没有明显的下降段,这是因为 G 曲面立体拓扑 IPCs 结构胞元的厚度不均匀导致的,如图 6(b)的变形图所示,胞元间连接部位较弱,胞元间的连接处会出现局部应力集中,该处先发生断裂。当连接处断裂后,胞元间会互相折叠起来,对整体结构继续提供承载力,因此应力-应变曲线没有出现应力下降段而出现应力波动段,应力整体仍呈上升趋势。而增强相相对密度为 50% 的 G 曲面立体拓扑 IPCs 结构的应力-应变曲线在 0.3 应变处出现突然的应力急剧下降,到达 0.4 应变后,应力又呈平缓上升趋势,斜率与第一段平缓上升区几乎一致,随后应力一直上升。由此可知,增强相相对密度为 50% 的 IPCs 结构在应变为 0.3 时,结构内部出现突然的破坏,这是由于该结构增强相相对密度越大胞元厚度越不均匀,越容易在薄弱处出现局部应力集中,当多处薄弱处的断裂汇聚引发内部破坏时应力-应变曲线出现突然下降,随后胞元层互相重叠支撑整体结构承载,应力又呈持续上升趋势。

G 曲面 2 种拓扑 IPCs 结构的屈服应力、杨氏模量、能量吸收密度情况如图 7(a)(b)(c)所示,各向

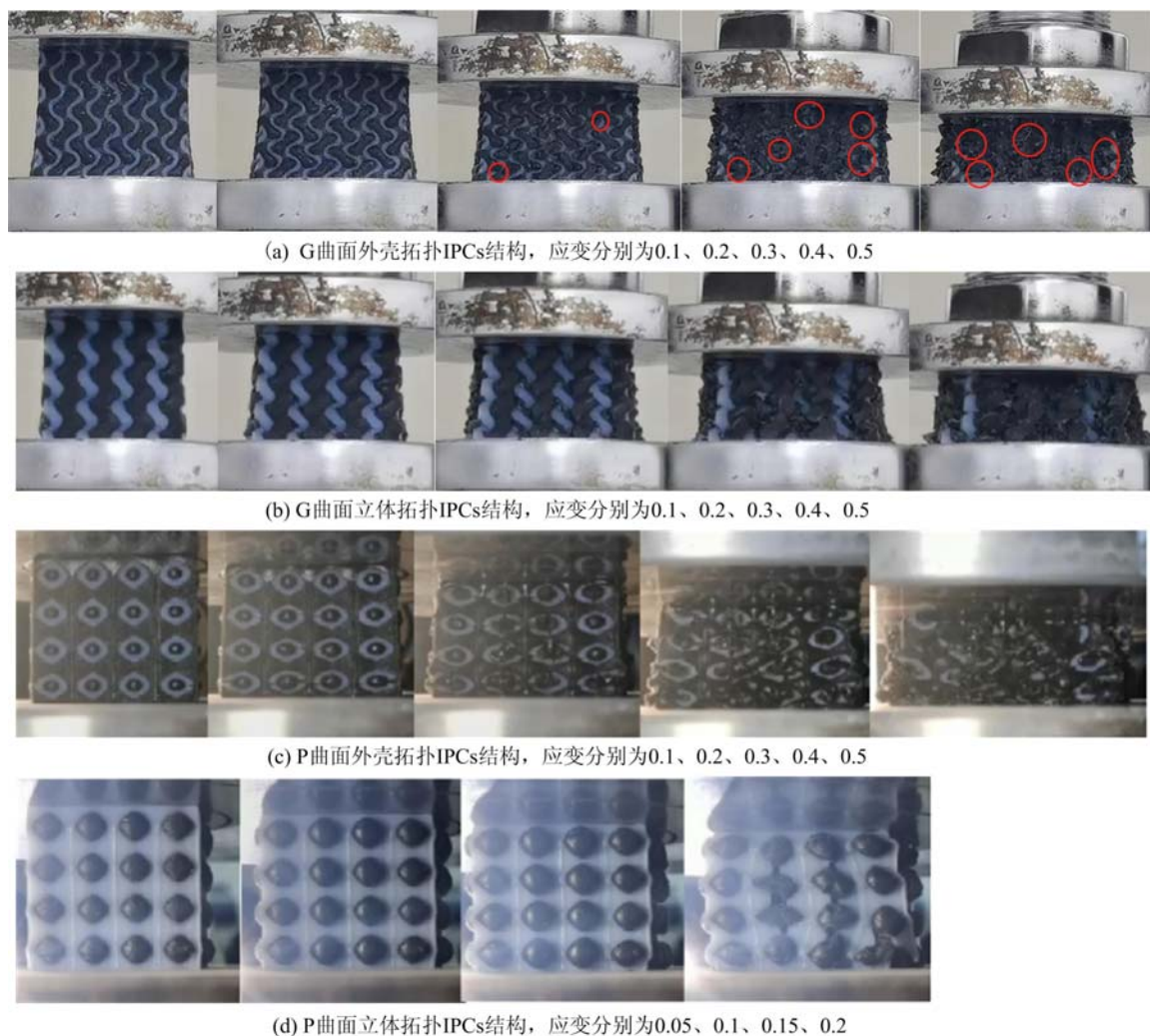


图6 IPCs 结构压缩变形及破坏情况(以相对密度为 35% 为例)

Fig. 6 Deformation and failure of IPCs structures (relative density of 35% as an example)

力学指标都随着增强相相对密度的增加而增加,在相同的增强相相对密度下,G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的屈服应力、杨氏模量、能量吸收密度均大于 G 曲面立体拓扑 IPCs 结构。随着增强相相对密度的增大,G 曲面 2 种拓扑 IPCs 结构的屈服应力和能量吸收的相差值逐渐变大,而两者之间杨氏模量的差值几乎相同,这是因为基体相材料和增强相材料力学性能相差较大,结构整体的力学性能主要受增强相材料性质的影响所致。从图 5(a)(b)的应力-应变曲线可知,G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构出现应力下降段,而 G 曲面立体拓扑 IPCs 在平缓上升段后直接进入致密区。

总的来说,G 曲面外壳拓扑的 IPCs 结构在屈服应力、杨氏模量、能量吸收密度的指标上较 G 曲面立体拓扑结构更优,这种优势在增强相相对密度较高时更为明显,因为 G 曲面外壳拓扑的增强相为具有接近零平均曲率的壳体,其变形以拉伸为主,相对于立体拓扑的增强相变形更均匀,应力集中较少。

## 2.2 基于 P 曲面拓扑的 IPCs 结构:立体拓扑与外壳拓扑

本节将比较增强相为 P 曲面外壳拓扑与 P 曲面立体拓扑结构的 IPCs 结构的力学性能,增强相的相对密度同样分别取 25%、35% 和 50%。如图 5(c)所示,在不同相对密度下,P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构应力-应变曲线中的应力平台表现出不同的趋势,当增强相相对密度为 25% 时,应力平台的上升趋势明显,随着增强相相对密度增大到 35% 时,应力平台的上升趋势逐渐变得平坦,而当增强相相对密度为 50% 时,应力-应变曲线在达到屈服应力并经历短暂的应力平台区后应力急剧下降。而从压缩实验变形图(图 6(c))可观察到,随着载荷的增加,结构中增强相胞元出现脆性断裂,而基体相因其不可压缩性可

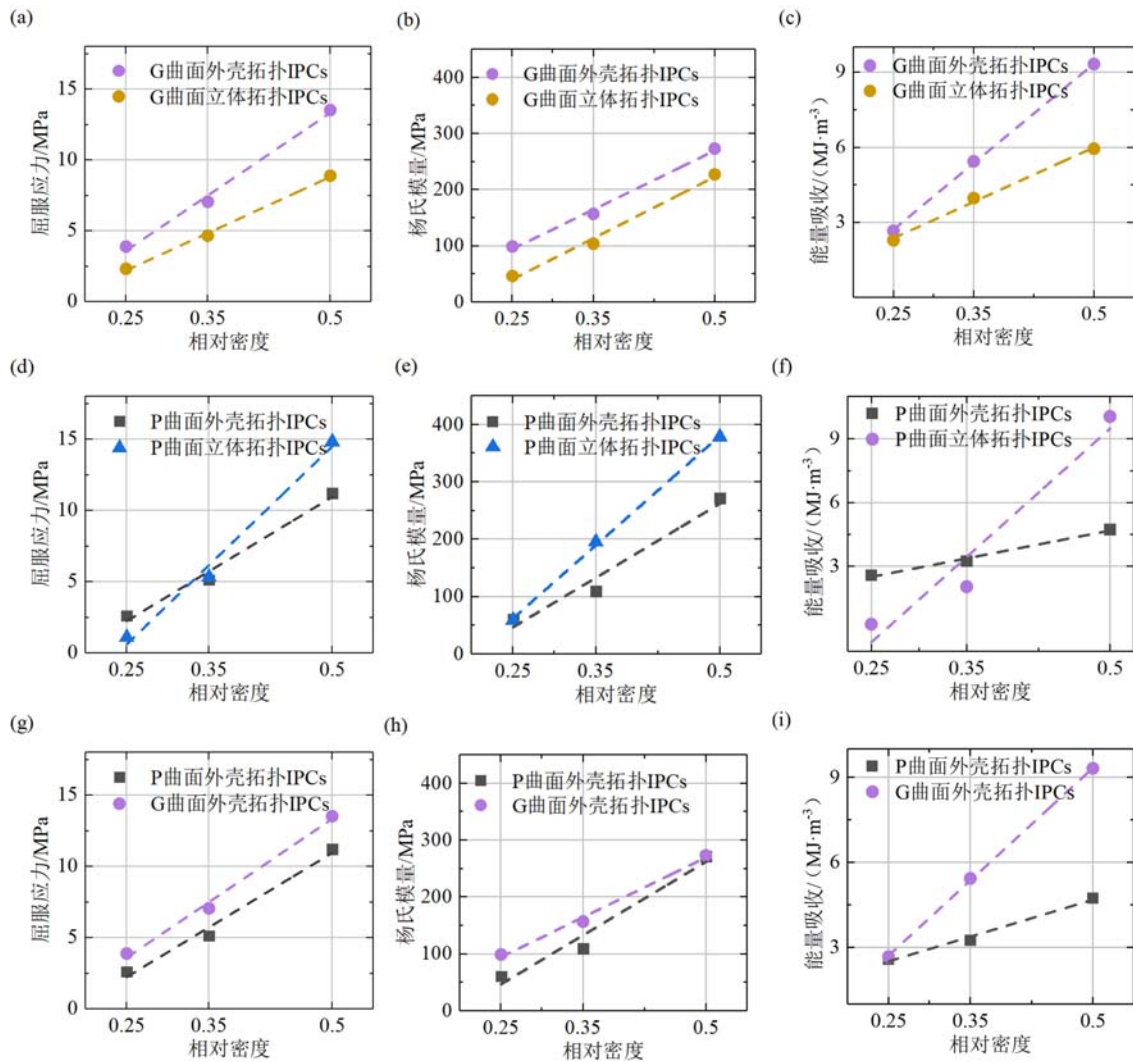


图 7 各 IPCs 之间力学指标的对比：(a)(b)(c) 分别为 G 曲面外壳拓扑和立体拓扑 IPCs 屈服应力、杨氏模量、能量吸收的对比；(d)(e)(f) 分别为 P 曲面外壳拓扑和立体拓扑 IPCs 屈服应力、杨氏模量、能量吸收的对比；(g)(h)(i) 分别为 P 曲面外壳拓扑和 G 曲面外壳拓扑 IPCs 屈服应力、杨氏模量、能量吸收的对比

Fig. 7 Comparison of mechanical properties among IPCs: (a)(b)(c) comparison of yield stress, Young's modulus, and energy absorption for G surface sheet-network and solid-network IPCs, respectively; (d) (e) (f) comparison of yield stress, Young's modulus, and energy absorption for P surface sheet-network and solid-network IPCs, respectively; (g) (h) (i) Comparison of yield stress, Young's modulus, and energy absorption for P surface sheet-network and G surface sheet-network IPCs, respectively

起到阻止裂缝扩展的作用,从而延缓增强相断裂的发生。当增强相相对密度较低时,基体相在结构中的体积占比较高,更能有效阻止增强相裂缝的扩展,从而导致 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的应力-应变曲线不会出现下降段。而随着增强相相对密度增大,增强相所占体积比增大,此时结构整体脆性材料含量的增多和基体相的减少导致不能有效阻止增强相裂缝的扩展,因此应力-应变曲线在达到极限应力后出现下降段,从破坏形态(图 6(c))上看,当 IPCs 结构的大部分增强相胞元出现不同程度断裂时,最底层胞元与沿 45°的胞元出现断裂层,从而导致结构承载能力的损失。

从图 5(d)可知,在不同增强相相对密度下,P 曲面立体拓扑 IPCs 结构的应力-应变曲线趋势基本相同,但极限应力出现的位置相差较大。IPCs 结构的应力-应变曲线趋势表现为应力在超过弹性段极限后由于硬化现象持续上升至极限应力点,并在达到极限应力后应力突然急剧下降,结构出现突然垮塌破坏。在增强相相对密度为 25%和 35%时,极限应力分别出现在应变为 0.1 和 0.15 时,极限应力点和应

力下降段都出现得较早,而当增强相相对密度为 50% 时,极限应力出现在应变为 0.37 时,与低相对密度的结构相比,极限应力和应力下降段出现得相对较晚,且弹性段后的应力平台由于胞元不断垮塌,应力波动上升。从模型图(图 3)和变形图(图 6(d))可知,在增强相相对密度较小时,各胞元间连接部位接触面积较小,胞元连接部位出现明显的局部应力集中,这也是结构较早达到极限应力点和出现突然的垮塌破坏的原因。随着增强相相对密度增大,胞元之间连接部位接触面积增大,局部集中应力减小,在增强相相对密度为 50% 时,结构稳定性增加,基体相能更好地发挥载荷传递的作用,所以结构的应力上升平台较低相对密度的 IPCs 结构长,同时结构较晚达到极限应力点。

P 曲面 2 种拓扑 IPCs 结构的屈服应力、杨氏模量、能量吸收密度情况如图 7(d)(e)(f)所示,屈服应力、杨氏模量、能量吸收密度都随着增强相相对密度增加而增加,P 曲面立体拓扑 IPCs 结构的杨氏模量均大于 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构,但屈服应力则不然。当相对密度为 25% 时,P 曲面立体拓扑 IPCs 结构的屈服应力小于 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构,随着增强相相对密度增大,P 曲面立体拓扑 IPCs 结构的屈服应力逐渐大于 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构,出现这个情况的原因是由 2 种结构的拓扑形式特征引起的:P 曲面立体拓扑 IPCs 结构的增强相是不均匀的,其增强相胞元连接部位在低密度和高密度时的厚度相差较大,而 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的增强相是均匀的,其胞元厚度是一致的,连接处不存在薄弱问题,当增强相相对密度低时,立体拓扑结构的增强相胞元连接部位较外壳拓扑结构的连接部位弱,所以更早发生破坏,此时非连接部位的材料尚未屈服,而随着增强相相对密度增加,立体拓扑结构的连接部位增强,结构整体更稳定,整体结构不会因连接部位突然断裂而垮塌,可承受更大的载荷,所以当增强相相对密度较高时,P 曲面立体拓扑 IPCs 结构的屈服应力大于 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构。

综上,当增强相相对密度较低时,P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构相比于 P 曲面立体拓扑 IPCs 结构具有更优的结构稳定性,结构不会出现显著的突发垮塌性破坏,所以应力-应变曲线没有出现明显的下降段,这个是由增强相的拓扑形式决定的,研究表明,在特定的相对密度下,TPMS 的外壳拓扑被证明比 TPMS 的立体拓扑具有更优的力学性能<sup>[21, 26-28]</sup>。当增强相相对密度较高时,P 曲面立体拓扑 IPCs 结构随着胞元连接处的厚度加强,结构稳定性增加,性能更优于 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构,同时能量吸收能力也优于 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构。

### 2.3 基于 G 曲面外壳拓扑结构的 IPCs 与基于 P 曲面外壳拓扑结构的 IPCs

鉴于 G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构比 G 曲面立体拓扑结构的力学性能更优,P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的力学性能在不同相对密度下表现出比 P 曲面立体拓扑 IPCs 更好的稳定性,所以下面将对 G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构与 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构进行比较。

根据 2.1 节和 2.2 节对 IPCs 结构应力-应变曲线的分析可知,P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的应力-应变曲线在不同相对密度下表现出不同的趋势(图 5(c)),而 G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构不同相对密度的应力-应变曲线(图 5(a))整体趋势基本一致。究其原因可从模型上(图 3)观察得到,G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构增强相的薄壳壁比 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构更加均匀,且厚度更小,根据 1.1.3 节所描述的相对密度定义,G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的增强相表面积更大,也就是说基体相与增强相之间的接触面积更大,这使得基体相能更好地发挥传递载荷的作用,使结构整体的应力分布更均匀,且由于接触面积的增大,基体相被挤出并破裂的现象减少,有助于提高结构的整体稳定性。从压缩实验变形图(图 6(a))可观察到 G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的增强相胞元在变形中会互相接触,形成相互支撑,从而提升结构整体承载力。而对于 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构(图 6(c)),随着应变增加,结构中出现明显的断裂层,导致微结构的突然性垮塌破坏。

由图 7(g)(h)(i)可知,G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构在屈服应力、杨氏模量、能量吸收密度的指标上较 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构更优。屈服应力和能量吸收的优势在增强相相对密度较高时更为显著,而杨氏模量的优势随着增强相相对密度的增大,逐渐减小。与此同时,不同于 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构应力-应变曲线随着相对密度的增加上升平台逐渐变缓,G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的应力-应变曲线在各相对密度下均存在明显的平缓上升区,并且 G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的应力下降段的出现要晚于 P 曲面外壳拓扑结构。



综上所述,G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构在屈服应力、杨氏模量、能量吸收密度上较 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构更优,这种优势在增强相相对密度较高时更为显著。这是因为外壳拓扑具有接近零的平均曲率,壳体变形以拉伸为主,G 曲面比 P 曲面的表面积更大,所以 G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的变形比 P 曲面外壳拓扑 IPCs 结构更均匀,不会出现明显的断裂层,应力集中较少。随着相对密度的增加,2 种 IPCs 结构在屈服应力、能量吸收密度上的差异逐渐增大。

### 3 结论

本文通过 Polyjet 多材料 3D 打印机制备了 4 种增强相为 TPMS 拓扑的 IPCs 结构,并通过对这 4 种 IPCs 结构的实验研究,对比了不同相对密度下 IPCs 结构的应力-应变曲线、屈服应力、杨氏模量、能量吸收密度等力学性能。研究表明,增强相相对密度为 25%、35%、50% 时,增强相为 G 曲面外壳拓扑的 IPCs 结构比其他 3 种类型的 IPCs 结构表现出更优的力学性能和整体稳定性,究其原因主要有以下几点:

(1)G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构的应力和应变相对其他拓扑结构形式分布更为均匀。

(2)G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构在给定的增强相相对密度下具有更大的表面积,使得在承载上增强相获得更多的基体相支撑。

(3)G 曲面外壳拓扑的复杂形状不仅能阻碍裂缝的发生和局部抑制裂缝的扩展,还在胞元局部发生断裂后仍能继续提供承载能力。

综上所述,G 曲面外壳拓扑 IPCs 结构良好的承载能力以及周期可扩展的易制备性使其在多功能复合材料应用中有较大的潜力。

#### 参考文献:

- [1] Clarke D R. Interpenetrating phase composites[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1992, 75(4):739-758.
- [2] Liu W, Köster U. Microstructures and properties of interpenetrating alumina/aluminium composites made by reaction of SiO<sub>2</sub> glass preforms with molten aluminium[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 1996, 210(1-2):1-7.
- [3] Jhaver R, Tippur H. Processing, compression response and finite element modeling of syntactic foam based interpenetrating phase composite (IPC)[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2009, 499(1):507-517.
- [4] Abueidda D W, Dalaq A S, Abu Al-Rub R K, et al. Micromechanical finite element predictions of a reduced coefficient of thermal expansion for 3D periodic architected interpenetrating phase composites[J]. *Composite Structures*, 2015, 133:85-97.
- [5] Qi Y, Chen G, Li Z W, et al. A novel approach to fabricate ceramic/metal interpenetrating phase composites by ultrasonic-assisted spontaneous infiltration[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(2):2903-2907.
- [6] Okulov I V, Geslin P A, Soldatov I V, et al. Anomalously low modulus of the interpenetrating-phase composite of Fe and Mg obtained by liquid metal dealloying[J]. *Scripta Materialia*, 2019, 163:133-136.
- [7] Agrawal P, Sun C T. Fracture in metal-ceramic composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2004, 64(9):1167-1178.
- [8] Liu S B, Li A Q, He S Y, et al. Cyclic compression behavior and energy dissipation of aluminum foam-polyurethane interpenetrating phase composites[J]. *Composites, Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2015, 78:35-41.
- [9] Okulov A V, Volegov A S, Weissmüller J, et al. Dealloying-based metal-polymer composites for biomedical applications[J]. *Scripta Materialia*, 2018, 146:290-294.
- [10] Xie L, Sun T W, He C W, et al. Enhancement of toughness of SiC through compositing SiC-Al interpenetrating phase composites[J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(13):135706.
- [11] Chen Y, Wang A, Fu H, et al. Preparation, microstructure and deformation behavior of Zr-based metallic glass/porous SiC interpenetrating phase composites[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 530:15-20.

- [12] Poniznik Z, Salit V, Basista M, et al. Effective elastic properties of interpenetrating phase composites[J]. *Computational Materials Science*, 2008, 44(2):813–820.
- [13] 刘帅, 郭广平, 郝文峰, 等. 基于工业 CT 和 DVC 方法的增材制造铝合金结构内部变形测量[J]. *实验力学*, 2020, 35(5):781–789 (LIU Shuai, GUO Guangping, HAO Wenfeng, et al. Internal deformation measurement of additive manufacturing aluminum alloy structure based on industrial CT and DVC methods[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2020, 35(5):781–789 (in Chinese))
- [14] Marchi C S, Kouzeli M, Rao R, et al. Alumina-aluminum interpenetrating-phase composites with three-dimensional periodic architecture[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 49(9):861–866.
- [15] 孟进军, 王美芬, 李东杰, 等. 泡沫铝-复合泡沫冲击韧度及黏弹性分析[J]. *实验力学*, 2013, 28(6):716–722 (MENG Jinjun, WANG Meifen, LI Dongjie, et al. Impact toughness and viscoelasticity analysis of foam Al-syntactic foam[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2013, 28(6):716–722 (in Chinese))
- [16] 辛亚军, 李慧剑, 赵旭亚, 等. 环氧树脂/泡沫铝一体型复合夹层板压缩及弯曲试验研究[J]. *实验力学*, 2015, 30(4):421–428 (XIN Yajun, LI Huijian, ZHAO Xuya, et al. Compression and bending experimental study of integrated composite sandwich panel made of epoxy resin/aluminum foam[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2015, 30(4):421–428 (in Chinese))
- [17] Torquato S, Donev A. Minimal surfaces and multifunctionality[J]. *Proceedings of the Royal Society A*, 2004, 460(2047):1849–1856.
- [18] Liang Y J, Zhou W, Liu Y J, et al. Energy absorption and deformation behavior of 3D printed triply periodic minimal surface stainless steel cellular structures under compression[J]. *Steel Research International*, 2021, 92(3):2000411.
- [19] Rajagopalan S, Robb R A. Schwarz meets schwann: design and fabrication of biomorphic and durataxic tissue engineering scaffolds[J]. *Medical Image Analysis*, 2006, 10(5):693–712.
- [20] Bonatti C, Mohr D. Mechanical performance of additively-manufactured anisotropic and isotropic smooth shell-lattice materials: Simulations & experiments[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2018, 122:1–26.
- [21] Al-Ketan O, Al-Rub R K A, Rowshan R. Mechanical properties of a new type of architected interpenetrating phase composite materials[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, 2(2):1600235.
- [22] Torquato S, Hyun S, Donev A. Multifunctional composites: optimizing microstructures for simultaneous transport of heat and electricity[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(26):266601.
- [23] Hardin J O, Ober T J, Valentine A D, et al. Microfluidic printheads for multimaterial 3D printing of viscoelastic inks[J]. *Advanced Materials*, 2015, 27(21):3279–3284.
- [24] Schoen A H. Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections[R]. *National Aeronautics and Space Administration*, 1970:92.
- [25] Rossman W. Infinite periodic discrete minimal surfaces without self-intersections[J]. *Balkan Journal of Geometry and Its Applications*, 2005, 10(2):106–128.
- [26] Kapfer S C, Hyde S T, Mecke K, et al. Minimal surface scaffold designs for tissue engineering[J]. *Biomaterials*, 2011, 32(29):6875–6882.
- [27] Al-Ketan O, Rowshan R, Al-Rub R A. Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials[J]. *Additive Manufacturing*, 2018, 19:167–183.
- [28] Al-Ketan O, Rezgui R, Rowshan R, et al. Microarchitected stretching-dominated mechanical metamaterials with minimal surface topologies[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2018, 20(9):1800029.

## Mechanical properties of 3D printed interpenetrating phase composites based on triply periodic minimal surface

HE Huiyi, LIANG Yingjing

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, Guangdong, China)

**Abstract:** Compared with conventional composites using fibers and dispersed particulates as reinforcement phase, Interpenetrating phase composites (IPCs) exhibit better mechanical properties because they are topologically interconnected. The triply periodic minimal surface (TPMS) metamaterial structure based on animal bionic construction is a regular and complex topological structure, showing excellent mechanical properties such as no stress concentration, high energy absorption capacity and high strength. With the development of additive manufacturing, it is possible to prepare designable and complex topological IPCs. In this paper, TPMS-based IPCs polymer structures were made by multi-material 3D printing with Polyjet technology, and their mechanical properties were investigated experimentally. The IPCs structure consists of two phases: reinforcing phase and matrix phase, and the reinforcing phases were structured with two TPMS(Gyroid(G) and Schwarz P(P)) under two topologies(sheet-networks topology and solid-networks topology), while the pores between the reinforcing phases were filled by softer matrix materials. This study shows that the sheet-networks G IPCs have better mechanical properties and overall stability than solid-networks G IPCs, sheet-networks P IPCs and solid-networks P IPCs at the relative density of three reinforcements(25%, 35%, 50%). The sheet-networks G IPCs can be applied for energy absorption due to its high stiffness, strength, and gentle rising plateau after yielding.

**Keywords:** interpenetrating phase composites; triply periodic minimal surface; G-surface; P-surface; sheet-networks; solid-networks