

# 柔弹性复合点阵结构面内剪切性能及交互机制研究

牛国法<sup>1</sup> 纪小刚<sup>1,2\*</sup> 王 炜<sup>1</sup> 王广阳<sup>1</sup>

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:**通过试验和数值模拟对复合点阵结构在面内剪切载荷状态下的剪切性能和交互机制进行研究。试验分析了基体体心立方(BCC)结构的损伤失效历程和失效方式;以BCC单胞结构为基体,采用结构嵌合的方式探寻嵌合结构杆径对复合结构剪切强度和剪切模量的影响规律;最后通过面心立方(FCC)结构的试验验证了有限元分析的可靠性,探究了FCC-BCC结构在面内剪切载荷下的交互机制。试验结果表明,结构之间的嵌合增强了复合点阵结构的承载能力,同时结构的嵌合会影响复合结构的应变;当结构杆径尺寸均为0.45 mm时,FCC-BCC和简单立方-体心立方(SC-BCC)的极限剪切强度相比于基体本身分别提高了159%和80%。

**关键词:**组织工程支架;点阵结构;柔弹性树脂;剪切模量;交互效应

**中图分类号:** TB34; TP391.73

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.05.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Study on In-plane Shear Behavior and Interaction Mechanism of Flexible Elastic Composite Lattice Structures

NIU Guofa<sup>1</sup> JI Xiaogang<sup>1,2\*</sup> WANG Wei<sup>1</sup> WANG Guangyang<sup>1</sup>

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 shear behavior and interaction mechanism of composite lattice structures were studied under in-plane shear loads by tests and numerical simulations. The damage failure courses and failure modes of matrix body centered cube(BCC) structures were analyzed experimentally. Using BCC cell structure as matrix, the influences of the diameter of chimeric structures on shear strength and shear modulus of composite structures were investigated by means of chimeric structure. Finally, the reliability of finite element analysis was verified by face centered cubic(FCC) structure tests, and the interaction mechanism of FCC-BCC structures was explored under in-plane shear loads. The testing results show that the mosaicism among structures enhances the bearing capacity of the composite lattice structures, and influences the strains of the composite structures. The ultimate shear strength of FCC-BCC and simple cube-body centered cube(SC-BCC) are as 159% and 80% higher than that of the matrix respectively when the diameter size of the structural rods are both 0.45 mm.

**Key words:** tissue engineering scaffold; lattice structure; flexible elastic resin; shear modulus; interaction effect

### 0 引言

数字光处理技术的快速发展使得一些具有高比强度、高孔隙率、高吸能等性能优异的三维多孔结构的打印成形成为可能。根据组成点阵结构的材料的不同,多孔点阵结构被广泛地应用于生物医疗、航空航天和机械制造业等领域<sup>[1-2]</sup>。同时,成形工艺的不同也会影响点阵结构的力学性能。韩剑等<sup>[3]</sup>对树脂材料所制备的点阵结构的优劣性能进行了总结,指出成形工艺的差异对成形点阵

结构的力学性能有显著的影响。

目前,国内外许多学者通过多种方式对点阵结构的平面压缩性能、弯曲性能、吸能性能和冲击等力学性能进行了深入研究和剖析。阎军等<sup>[4]</sup>研究了不同单胞构型填充下夹层结构的抗冲击性能,从结构的损伤机理和吸能效果两方面探讨了不同单胞构型的抗冲击性能的优劣,发现体心立方(body centered cube, BCC)结构在能量吸收方面具有良好的试验效果。徐仰立等<sup>[5]</sup>控制点阵结构的胞元尺寸和相对密度,采用拓扑优化设计了不同的点阵结构,通过对点阵的单轴压缩和有限元数值模拟发现,随着胞元尺寸的增大,点阵结构吸能效果减弱,而相对密度越高,点阵结构的抗压

收稿日期:2024-03-20

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)

性能和吸能效果越优。黄秀峰等<sup>[6]</sup>对具有负泊松比效应的点阵结构进行了弯曲试验,发现在结构表面涂有覆聚脲后点阵结构的力学性能得到提升,比未涂覆聚脲的结构吸能效率提高约 50%,这为后续点阵结构的力学性能提升方法提供了借鉴。王伟等<sup>[7]</sup>探究了点阵结构的疲劳特性,发现点阵结构的数值模拟和物理实验应力-疲劳寿命(S-N)曲线均符合幂律关系,点阵结构的疲劳性能取决于单胞形状。

在提高结构其他力学性能的同时,结构本身的剪切性能也很重要。ZHANG 等<sup>[8]</sup>利用 Timoshenko 和 Euler-Bernoulli 梁理论对 BCC 结构的剪切模量进行理论分析,并通过试验验证了理论推导的准确性。YOON 等<sup>[9]</sup>测试了水凝胶制备的点阵结构的表观剪切模量,发现所制备的点阵结构剪切模量表现出各向异性,不同单胞构型决定了点阵结构表观剪切模量的大小。辛亚军等<sup>[10]</sup>通过对蜂窝夹芯板的面外剪切性能进行研究发现,结构的失效与板面厚度和胞元尺寸有关,增大板面厚度,结构的剪切强度和吸能能力均提高,增大胞元尺寸,结构的剪切强度和吸能能力均降低。

单胞结构性能提升的同时,采用“榫卯”、嵌合和组合的方式可有效地增强结构的吸能效果。任利民等<sup>[11]</sup>通过采用参数化边界强化方法增强了节点之间的连接效果,实验结果表明,强化后的结构最大载荷得以增大,增强了结构的吸能效果。王润洲等<sup>[12]</sup>通过控制组合型点阵结构变密度体心立方嵌套体心立方(graded body centered cubic nested body centered cubic, GBCC-BCC)的相对密度,探究了压缩状态下的比吸能和强度,发现相对密度大于 0.3 时,组合式点阵结构的机械性能优于多数基本构型点阵结构的机械性能。ZHANG 等<sup>[13]</sup>利用“榫卯”的方式将两种单胞结构进行组合,并设计了两种复合单胞结构,发现相对密度相同时,复合结构具有更好的刚度和能量吸收能力。PARK 等<sup>[14]</sup>探究了不同单胞类型(如八面体型、菱形和对角线)的嵌合点阵结构压缩状态下的响应状态,发现相同密度的复合点阵结构比单胞构型结构具有更高的能量吸收能力。

基于上述研究方法和研究内容,本研究基于结构嵌合加固原理将所设计的单胞结构嵌合形成复合单胞结构。首先对基体 BCC 结构的三个失效阶段下的剪切性能进行试验分析,通过控制嵌合结构杆径的大小,分析不同结构的剪切强度和剪切模量;随后利用有限元数值模拟获取不同复合结构的剪切模量,通过等效应力分布云图进一

步探究不同杆径下交互效应对节点的影响;最后通过面心立方(face centered cubic, FCC)结构的试验来验证有限元模型的可靠性,并探究了 FCC-BCC 复合结构的交互机制。

## 1 复合单胞结构的设计及试验制备

### 1.1 复合单胞结构的嵌合设计

桁架单胞结构作为点阵结构的一种组成单元,是由空间正四面体内相交节点和支柱组成的简单桁架结构。常见的单胞结构有体心立方(BCC)、简单立方(simple cube, SC)和面心立方(FCC),其中 BCC 由正四面体内部多条体对角线相交而成,SC 由正四面体表面多个节点垂直连接而成,FCC 由正四面体表面的面对角线连接而成。三种单胞由倾斜杆、水平杆和竖直杆组成,包含了桁架单胞结构的所有杆件类型。

本文以 BCC 单胞结构为基体,以提高复合点阵结构剪切强度为目的,采用结构互相嵌合的方法探寻嵌合结构对复合单胞结构剪切强度的影响规律,进而设计一种以 BCC 结构为根基和剪切模量人为可控的抗剪性能较优的复合单胞结构。考虑在不改变 BCC 结构本身力学性能的前提下,以单胞结构外漏节点为嵌合位置,采用胞长大小和杆径均可控的 SC 和 FCC 为嵌合结构。同时,SC 结构均由竖直杆件组成,FCC 结构由角度为 45°的斜杆组成,可以形成很好的对照作用,结构嵌合方式如图 1 所示。

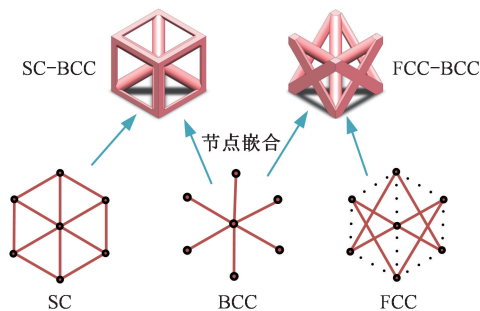


图 1 复合单胞结构

Fig.1 Composite cell structure

为使所设计的单胞结构阵列后整体结构具有光滑连接性,所设计的单胞结构均具有以下特性:①所设计单胞结构内接于边长  $L = 2.4 \text{ mm}$  的正方体之中,所有杆件均由直径  $d = 0.45 \text{ mm}$  的圆柱组成;②对结构的外接节点进行切除处理,以保证结构在阵列时单胞之间可以紧密光滑连接。

### 1.2 点阵结构的制备

首先,将 1.1 节中所设计的单胞结构进行规则阵列,得到  $10 \times 4 \times 3$  单元阵列的点阵结构,即长×宽×高为  $24 \text{ mm} \times 9.6 \text{ mm} \times 7.2 \text{ mm}$  的三维

点阵结构(图 2)。利用 Photon Ultra 设备对所得到的三维模型采用数字光处理 (digital light process, DLP) 技术打印成形, 所使用的材料为一种具有较强柔弹性的生物基光敏树脂。为方便试样黏结在夹具板上, 在点阵结构加有起固定作用的上下面板, 面板厚度为 1 mm, 采用 DLP 技术与点阵结构一体打印成形。成形后将结构置于 95% 体积分数的工业酒精中以将黏附在表面的多余树脂清洗干净, 并将该结构放置在紫外线光源下照射 30 min, 使得结构进一步固化定形, 然后在常温下静置 12 h 后进行试验。

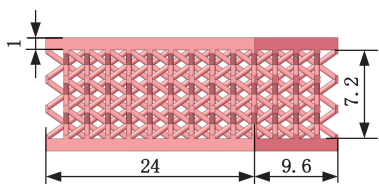
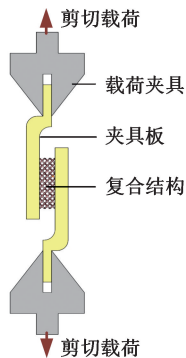


图 2 BCC 点阵结构

Fig.2 Lattice structure of BCC

### 1.3 点阵结构的剪切试验方法

为对上述复合点阵结构在面内剪切载荷状态下的剪切强度进行对比分析研究, 利用 CTM-2500(最大载重: 5000 N, 荷重精度:  $\pm 0.01\%$ ) 万能材料试验机采用国家标准 GB/T 1455—2005 对所设计的多种不同复合点阵结构进行面内剪切试验, 试验方法如图 3 所示, 对结构施加位移  $s$ , 位移速度为 1 mm/min。



(a) 示意图



(b) 试样装夹效果图

图 3 点阵结构面内剪切试验方法

Fig.3 In-plane shear test method for lattice structures

因所设计的单胞结构较小, 为减少尺寸效应所带来的影响, 同时为减小上下板面变形所造成的试验误差, 在夹具板上刻有 24 mm $\times$ 9.6 mm $\times$ 1 mm 的凹槽, 使得上下板面均嵌入夹具板内并采用强粘胶水黏结固定在凹槽内。

## 2 点阵结构的面内剪切试验及分析

### 2.1 BCC 点阵结构面内载荷失效模式

复合单胞结构是由 BCC 为根基与其他结构

嵌合而成, 故需要对 BCC 结构本身的面内剪切性能进行测试, 同时为后续嵌合结构对复合点阵结构的剪切强度影响分析提供一定的参考。试验得到的 BCC 结构在杆径  $d = 0.45$  mm 时的剪切应力-位移曲线见图 4。

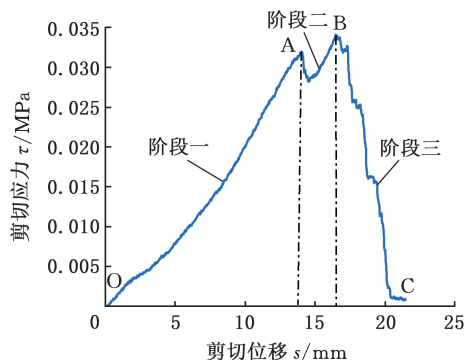


图 4 BCC 面内剪切应力-剪切位移曲线

Fig.4 BCC in-plane shear stress-shear displacement curve

由国家标准 GB/T 1455—2005 可知, 当结构试验过程中出现载荷应力数值下降或停顿现象时, 结构便开始出现断裂失效, 则此时的载荷数值可作为结构的极限剪切强度, 此时的位移值可视作该点阵结构的极限剪切位移量。为避免试验误差过大而影响后续的分析结果, 制备了三个同样尺寸的 BCC 试样, 每个试样的极限剪切强度如表 1 所示, BCC 试样的失效历程如图 5 所示。

表 1 BCC 试样双峰曲线值

Tab.1 Values of bimodal curves of BCC samples

BCC 试样	极限剪切强度 / MPa	极限剪切位移 / mm	双峰剪切强度 / MPa	双峰剪切位移 / mm
BCC-1	0.032	15.59	0.034	18.32
BCC-2	0.032	18.51	0.029	21.72
BCC-3	0.032	14.01	0.033	17.34
均值	0.032	16.04	0.032	19.13



(a) O 点



(b) A 点



(c) B 点



(d) C 点

图 5 BCC 试样损伤历程

Fig.5 Damage history of BCC samples

BCC 结构的剪切应力-剪切位移曲线表现为双峰状态, 根据剪切应力-剪切位移曲线和试样的破坏状态, BCC 结构的面内剪切的破坏过程可以大致分为三个阶段:

1) 线弹性变形阶段 O-A。在初始试验阶段, 随着位移载荷的增大, 载荷主要由杆承担, 结构受到面内剪切载荷作用而逐步被拉伸, 这个阶

段的曲线近乎成线性。随着位移载荷的进一步增大,结构发生屈曲达到极限剪切强度 A 点。

2) 结构密实阶段 A-B。在此阶段的初始,结构出现逐步断裂,因结构具有较高孔隙率,且结构均由杆件组成,前一节点破坏后载荷会沿着缝隙施加于邻近的杆件之上,故该阶段不会出现剪切应力的迅速下降。随着杆件受载屈曲加剧,各个杆件之间会相互挤压摩擦,结构的承载能力又会出现短暂的上升,故曲线呈现出双峰现象。从图 5 中可以看出结构的初步断裂出现在点阵结构的最外侧,在 A-B 阶段内,结构处于密实阶段。

3) 整体断裂失效阶段 B-C。随着位移载荷的不断增大,结构的断裂节点越来越多,该阶段结构的承载能力迅速降低,直至结构完全被剪切破坏(如图 5d 所示)。

从 BCC 试样的剪切应力-剪切位移曲线和试样的损伤历程可以看出,BCC 结构损伤失效的历程分为线弹性变形阶段、结构密实阶段、整体断裂失效三个阶段,同时出现了两个阶段性峰值。通过多个试样损伤过程和试样的试验曲线对比分析,在结构密实阶段结构的剪切应力并没有出现大幅度降低。随着结构的密实程度达到顶峰,结构便开始快速进入整体失效状态。BCC 的失效状态为节点的断裂,这是因为节点处的相对密度较大,且节点处是多个杆的连接处易出现应力集中<sup>[15]</sup>,故节点处易出现过载断裂现象。

## 2.2 嵌合结构对面内剪切性能的影响

通过控制嵌合结构的杆径大小,探究分析比较不同杆径的嵌合结构对复合点阵结构的剪切模量的影响规律。为获取复合点阵结构的剪切载荷-剪切应变曲线,首先预制备相应的复合单胞结构的点阵结构,经过预先打印 0.3~0.5 mm 垂直杆径,同时观察不同杆径的成形效果及精度,最终选取成形较好的 0.35 mm、0.40 mm 和 0.45 mm 作为试验试样的杆径尺寸。表 2 所示为所制备的试样编号及参数。

表 2 试样尺寸参数

Tab.2 Sample size parameters

试样编号	嵌合结构杆径/mm	基体 BCC 杆径/mm	复合结构长度/mm
SC-BCC-1	0.35	0.45	2.4
SC-BCC-2	0.40	0.45	2.4
SC-BCC-3	0.45	0.45	2.4
FCC-BCC-1	0.35	0.45	2.4
FCC-BCC-2	0.40	0.45	2.4
FCC-BCC-3	0.45	0.45	2.4

通过对比不同嵌合结构杆径下的复合点阵结构剪切应力-剪切应变曲线(图 6、图 7)发现,结构

从开始受力直至初步破坏均呈现出一定的线性,通过下式对不同结构的表观剪切模量进行计算:

$$G_c = \tau / \gamma \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为结构所受到的剪切应力; $\gamma$ 为结构的剪切应变。

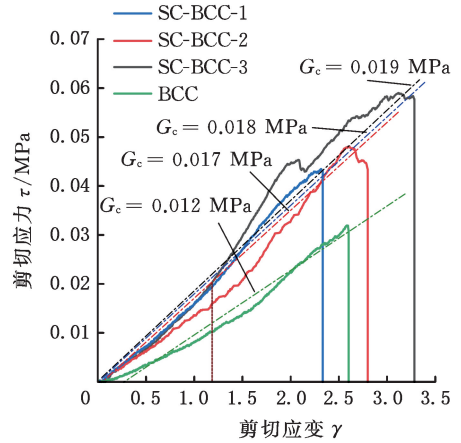


图 6 SC-BCC 结构剪切应力-剪切应变曲线

Fig.6 Shear stress-strain curve of SC-BCC structure

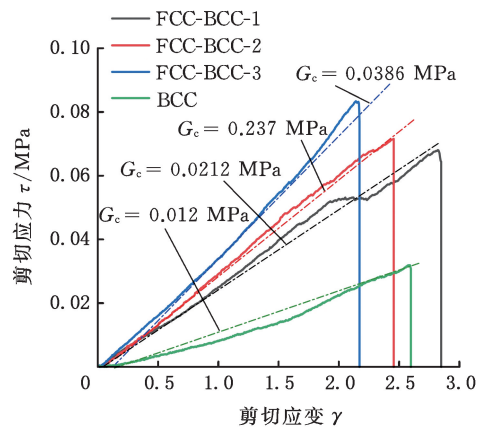


图 7 FCC-BCC 结构剪切应力-剪切应变曲线

Fig.7 Shear stress-strain curve of FCC-BCC structure

从图 6 中可以看出,SC-BCC 结构随着嵌合结构杆径的增大,SC-BCC 结构极限剪切强度也随之增大。嵌合结构杆径从 0.35 mm 增大到 0.40 mm 和 0.45 mm 时,极限剪切强度提高了 11.63% 和 37.21%,但 SC-BCC 结构表观剪切模量并没有呈现出明显的递增状态。SC-BCC-1 因为嵌合结构杆径( $d=0.35$  mm)较小的原因,其最外侧的 SC 结构较弱,故还未达到 BCC 基体本身的最大剪切应变时便出现了断裂破坏。当杆径大于 0.40 mm 时应变得到了一定的提高,这是因为嵌合 SC 结构主要由直杆组成,在受到面内载荷时,嵌合 SC 结构主要受到弯曲和受拉延伸,能够更好地分担基体 BCC 所受的载荷。

从图 7 中可以看出,FCC-BCC 结构随着嵌合结构 FCC 杆径的增大,当杆径从 0.35 mm 增大到 0.40 mm 和 0.45 mm 时,极限剪切强度提高了 5.13% 和 22.23%,同时 FCC-BCC 结构表观剪切

模量得到了一定的提高。但嵌合结构 FCC 对结构整体所能承受的最大剪切应变并没有起到明显的提升效果,故推测可能是由于基体 BCC 结构和嵌合结构 FCC 本身的最大剪切强度所制约。

综上所述,SC 结构相比于 FCC 结构能够对复合点阵结构的极限剪切应变起到一定的提升作用,但在相同嵌合杆径状态下,FCC 结构可对基体起到更好的强度提升效果。当杆径  $d=0.45\text{ mm}$  时,FCC-BCC-3 和 SC-BCC-3 结构相对于基体 BCC 结构其剪切强度分别提高了 150% 和 80%。

### 3 复合结构面内剪切数值模拟

#### 3.1 复合点阵结构的有限元模型建立

对上述所涉及复合点阵结构的剪切性能进行有限元分析,为保证能观察到一个单胞节点均处于连接的完整单胞的应力分布云图中,采用了  $2 \times 2 \times 2$  单胞阵列形式。经网格收敛性分析后确定单元网格为  $0.1\text{ mm}$ ,对所添加的三维模型划分网格(图 8),采用 ANSYS workbench 中显式动力学模块进行计算,同时将课题组已获取的材料属性赋予到模型之中<sup>[16]</sup>(表 3),以获取不同结构在相同位移载荷状态下的等效应力分布云图以及表观剪切模量。

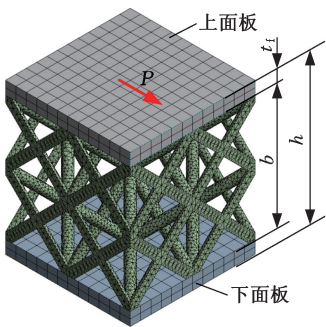


图 8 FCC-BCC 结构有限元模型

Fig.8 FCC-BCC structure finite element model

表 3 光敏树脂材料参数

Tab.3 Material parameters of photosensitive resin

密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	泊松比	拉伸强度 /MPa
1.13	1.01	0.45	1.79

根据上述分析和 1.3 节所采用的试验方法,对结构施加以下载荷和约束条件:①将点阵结构的上下面板均视为刚性板,与点阵结构的连接视为绑定连接;②对上面板施加  $0.05\text{ mm/s}$  剪切位移载荷,对下面板施加固定约束;③耦合上面板所有节点向载荷水平方向位移。FCC-BCC 结构的有限元模型如图 8 所示,该复合结构的表观剪切模量  $G_{\text{FCC-BCC}}$  可表示为

$$G_{\text{FCC-BCC}} = \frac{(h - 2t_f - \Delta h)P}{b^2 \Delta l} \quad (2)$$

式中: $t_f$  为上 / 下面板的厚度; $b$  为点阵结构的边长; $h$  为结构的整体高度; $\Delta l$  为上板的水平位移; $\Delta h$  为上面板与下面板之间的相对垂向位移; $P$  为上面板的剪切载荷力。

#### 3.2 复合结构剪切模量的试验与数值模拟对比分析

通过控制嵌合结构杆径,进一步探索嵌合结构杆径对复合结构表观剪切模量的影响关系,对 SC-BCC 和 FCC-BCC 不同嵌合杆径的点阵结构进行数值模拟,将所得数据通过式(2)进行求解,如图 9 所示。

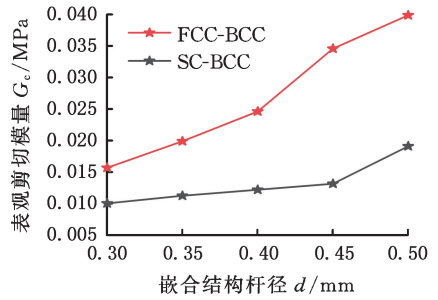


图 9 表观剪切模量-结构杆径曲线

Fig.9 Apparent shear modulus-diameter curve of structural rod

从不同嵌合杆径的复合点阵结构表征的表观剪切模量曲线图中可以发现,SC-BCC 单胞中结构 SC 的杆径在  $0.30 \sim 0.45\text{ mm}$  之间时,SC-BCC 结构的表观剪切模量没有明显地随着 SC 结构杆径的递增而增大。而 FCC-BCC 结构随着嵌合结构杆径的增大其表观剪切模量表现出良好的提升效果。在不考虑结构相对密度的情况下,增大嵌合结构的杆径能够有效地提高结构的抗剪强度。

将数值模拟出的结果与 2.2 节试验所得点阵结构的表观剪切模量进行比较,如图 10 所示,两种方式得到的结果差异吻合性较好,通过数值模拟结构的表观剪切模量来类比分析点阵结构在线弹性变化阶段所承受的剪切载荷具有一定的可靠性,同时能够降低试验成本。

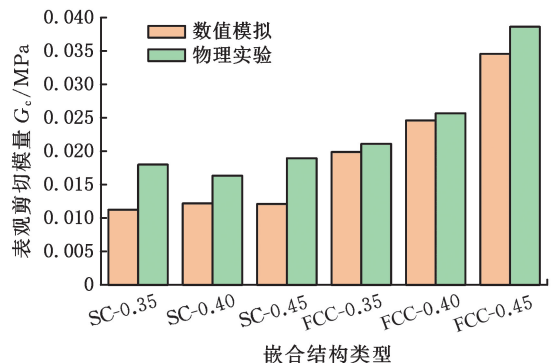


图 10 表观剪切模量对比

Fig.10 Comparison of apparent shear modulus

#### 3.3 变杆径嵌合结构下复合结构节点应力分析

由上述可知,嵌合结构杆径的增大对复合点

阵结构的剪切强度具有一定的提升作用。通过控制嵌合结构的杆径,采用数值模拟的方式来进一步探究 FCC-BCC 复合点阵结构的交互机制。分别对嵌合结构杆径为 0.35 mm、0.40 mm 和 0.45 mm 时的 FCC-BCC 结构进行有限元模拟。为保证可以清楚地看到中间单胞节点的应力分布云图,在载荷方向上截取位移载荷均为 1 mm 的等效应力截面分布云图(图 11)。同时,获取剪切位移在 20 s 内的剪切载荷-位移曲线(图 12)。

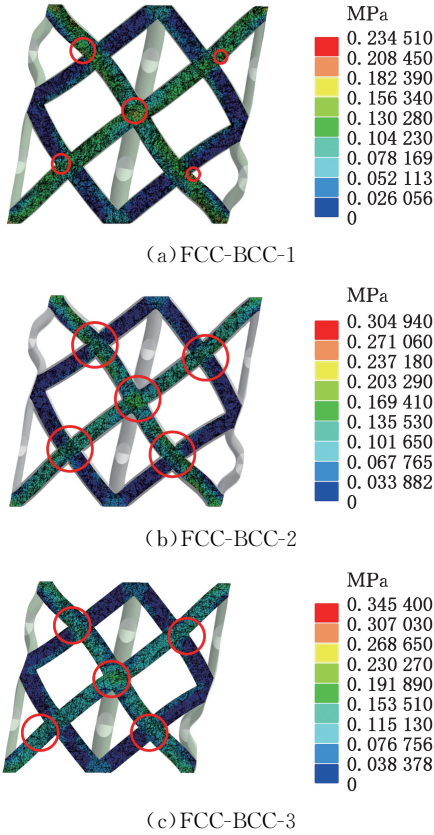


图 11 FCC-BCC 结构等效应力截面分布云图

Fig.11 Cloud map of equivalent stress cross section distribution of FCC-BCC structure

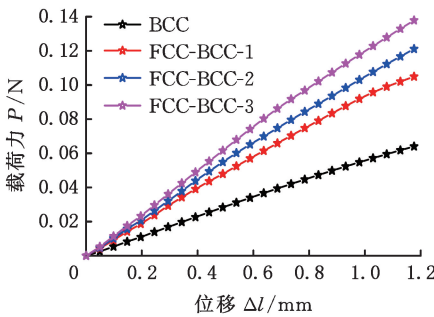


图 12 FCC-BCC 数值模拟载荷-位移曲线

Fig.12 Load-displacement curve of FCC-BCC numerical simulation

从不同嵌合杆径状态下的截面应力云图(图 11)中不难看出,单胞结构的应力集中均出现在节点附近,且嵌合结构杆径越大时节点处的应力集

中效应越明显。由此不难判断,当载荷进一步增大时,结构的节点处会首先因为过载而损伤失效且节点处的相对密度越大应力集中效应越明显,结构会先一步损伤断裂。

从 FCC-BCC 结构数值模拟载荷-位移曲线(图 12)中不难发现,在相同位移下 FCC 结构的杆径越大,相应的 FCC-BCC 结构所能承受的力就越大,这与 2.2 节中试验结果相符。

综上所述,在 FCC-BCC 结构的交互效应下,随着 FCC 结构杆径的增大,节点处的相对密度增大,提高了复合结构的承载能力,使得结构能够承受更大的载荷,同时也因为节点处的密度增大,更易产生应力集中,使得结构的最大应变受到限制。

#### 4 FCC-BCC 结构面内剪切下的交互机制

##### 4.1 FCC 结构杆径对复合结构剪切应变的影响

为探究 FCC 嵌合结构对复合结构剪切强度的作用机制以及验证上述有限元分析的可靠性,制备不同杆径大小的 FCC 点阵结构,以获取不同构型线弹性阶段的剪切载荷-剪切应变曲线(图 13)。所制备的试样的尺寸参数如表 4 所示。

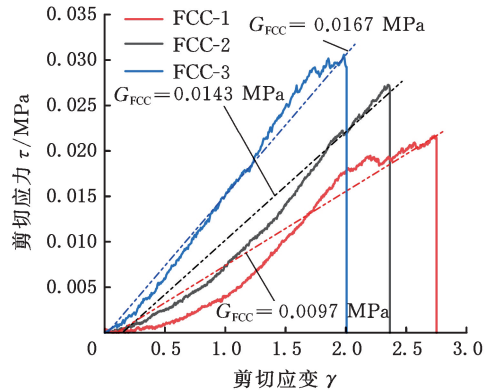


图 13 FCC 结构剪切应力-剪切应变曲线

Fig.13 Shear stress-strain curve of FCC structure

表 4 试样尺寸参数

Tab.4 Sample size parameters

试样编号	FCC 杆径 $d/\text{mm}$	FCC 胞长 $L/\text{mm}$
FCC-1	0.35	2.4
FCC-2	0.40	2.4
FCC-3	0.45	2.4

从图 13 中可以看出,FCC 结构随着杆径的增大其极限剪切强度也随之增大,但所能承受的最大剪切应变有所减小。这是因为随着杆径的增大,节点处所占有的体积分数增大,导致节点处相对密度增大,节点处更易引起应力集中,随着载荷的不断增大,节点处更容易产生破坏,这与 3.3 节中所得有限元分析结果相符。同时,当杆径为 0.45 mm 时,FCC 结构的最大应变为 2.0,这对复合点阵结构的应变起到了一定的制约作用,与 2.2

节所推测的结果相互印证。

### 4.2 FCC 结构对复合结构剪切强度的影响机制

为更好地分析单胞之间的嵌合所引起的相互作用,可将 FCC-BCC 复合点阵结构的极限剪切强度分为基体 BCC 结构本身的剪切强度、嵌合结构 FCC 的剪切强度和交互效应<sup>[17]</sup>引起的剪切强度三个分量。图 14 中阴影面积越大,表明 FCC-BCC 复合点阵结构的交互作用所引起的效应在受载过程中吸收的能量越多。复合点阵结构的剪切强度与其剪切应力  $\tau_c$  有关,剪切应力  $\tau_c$  的计算表达式如下:

$$\tau_c = \tau_{FCC} + \tau_{BCC} + \tau_x \quad (3)$$

式中: $\tau_{BCC}$  为基体 BCC 的剪切应力; $\tau_{FCC}$  为 FCC 结构的剪切应力; $\tau_x$  为由 BCC 和 FCC 结构嵌合后的相互作用所增强的剪切应力。

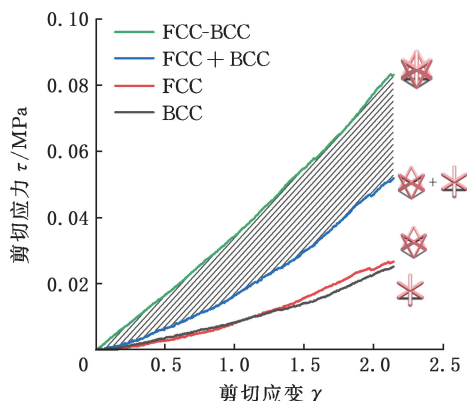


图 14 复合点阵结构的交互效应 ( $d = 0.45 \text{ mm}$ )

Fig.14 Interaction effect of composite lattice structure

( $d = 0.45 \text{ mm}$ )

由 2.2 节可知点阵结构在第一阶段近乎于线性,则式(3)还可表示为

$$\tau_x = (G_c - G_{FCC} - G_{BCC})\gamma \quad (4)$$

式中: $G_{FCC}$  为 FCC 结构的表观剪切模量; $G_{BCC}$  为 BCC 结构的表观剪切模量。

通过了解复合点阵结构线弹性变化阶段内不同时刻下的应变状态,可以利用式(4)对交互效应所引起的剪切强度进行预测。

根据式(3)可得到复合点阵结构在 FCC 结构杆径 0.35~0.45 mm 之间所引起的交互效应剪切强度,如图 15 所示,可以看出,随着 FCC 结构杆径的增大,FCC-BCC 复合点阵结构和 FCC 结构的极限剪切强度也随之增大,同时交互效应所产生的剪切强度也在不断增大,杆径越大交互效应越不容忽视,必须加以考虑。但是,基体 BCC 结构本身的剪切强度仍然起着关键作用。

## 5 结论

1)基体体心立方(BCC)结构的面内剪切失效

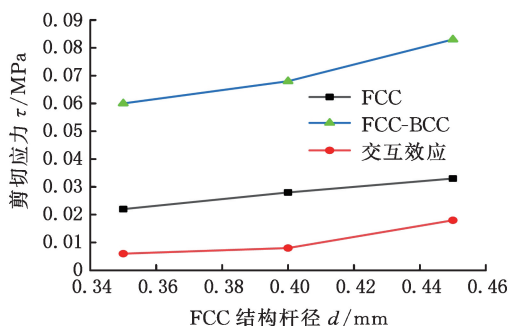


图 15 剪切强度随嵌合杆径的变化曲线

Fig.15 Curve of shear strength with diameter of chimeric rod

历程可分为线弹性变形阶段、结构密实阶段、整体断裂失效三个阶段,剪切应力-位移曲线呈现出双峰状态。

2)复合结构剪切强度的增强主要由嵌合结构和基体结构之间的交互作用引起,且面心立方(FCC)结构的最大剪切应变对 FCC-BCC 结构的最大剪切应变呈现出一定的抑制作用。

3)复合点阵结构随着嵌合结构杆径的增大其极限剪切强度也随之提高,同时随着嵌合结构杆径的增大,复合结构表观剪切模量也随之提高,与有限元数值模拟结果基本吻合。

4)FCC 结构杆径越大,FCC 结构交互效应所引起的增强效应越强,但基体本身的剪切强度仍起着关键作用。

### 参考文献:

[1] 任泽宇,姜宏,石永芳. 3D 打印 PLLA/HA 复合组织工程骨支架及性能表征[J]. 燕山大学学报, 2022, 46(2):116-122.  
REN Zeyu, JIANG Hong, SHI Yongfang. 3D Printing PLLA/HA Composite Tissue Engineering Bone Scaffold and Its Characterization[J]. Journal of Yanshan University, 2022, 46(2):116-122.

[2] CAO Jing ,WANG Pan ,LIU Yanan, et al. Double Crosslinked HLC-CCS Hydrogel Tissue Engineering Scaffold for Skin Wound Healing[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 625-635.

[3] 韩剑,孙士勇,牛斌,等. 树脂基复合材料点阵结构的制造技术研究进展[J]. 航空学报, 2023, 44(9): 47-67.  
HAN Jian, SUN Shiyong, NIU Bin, et al. Research Progress in Manufacturing Technology of Resin Matrix Composite Lattice Structure[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(9):47-67.

[4] 阎军,张晨光,赛音夫,等. 点阵构型对夹层结构抗鸟撞性能的影响[J]. 振动与冲击, 2024, 43(1):

- 212-217.  
YAN Jun, ZHANG Chenguang, SAI Yinfu, et al. Effect of Lattice Configuration on Bird Impact Resistance of Sandwich Structures[J]. *Vibration and Shock*, 2024, 43(1):212-217.
- [5] 徐仰立, 曹玄扬, 李婷婷, 等. 激光增材制造 Ti6Al4V 点阵结构的抗压吸能特性[J]. *稀有金属材料与工程*, 2022, 51(7):2536-2544.  
XU Yangli, CAO Xuanyang, LI Tingting, et al. Compression and Energy Absorption Properties of Ti6Al4V Lattice Structures Manufactured by Laser Additive[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2022, 51(7):2536-2544.
- [6] 黄秀峰, 张振华. 聚脲涂覆三维负泊松比点阵结构的静态力学性能研究[J]. *中国科学:物理学·力学·天文学*, 2021, 51(5):116-134.  
HUANG Xiufeng, ZHANG Zhenhua. Study on Static Mechanical Properties of Polyurea Coated Three-dimensional Negative Poisson Ratio Lattice Structures[J]. *Science in China: Physics, Mechanics, Astronomy*, 2021, 51(5):116-134.
- [7] 王炜, 纪小刚, 方创, 等. DLP 成形工艺制备的柔性点阵结构疲劳寿命预测[J]. *中国机械工程*, 2023, 34(21):2637-2645.  
WANG Wei, JI Xiaogang, FANG Chuang, et al. Fatigue Life Prediction of Flexible Lattice Structures Prepared by Digital Light Process[J]. *China Mechanical Engineering*, 2023, 34(21):2637-2645.
- [8] ZHANG Wukun, ZHAO Jian, TAN Yonghua, et al. Study on the Shear Modulus Based Equivalent Homogenization Methods of Multi-layer BCC Lattice Sandwich[J]. *Materials*, 2022, 15(4):1341.
- [9] YOON D, RUDING M, GUERLOTTE C A, et al. Design and Characterization of 3-D Printed Hydrogel Lattices with Anisotropic Mechanical Properties [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023, 138:105652.
- [10] 辛亚军, 孙帅, 杨硕, 等. 铝蜂窝夹芯板面外剪切性能试验研究与数值模拟[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(12):6119-6129.  
XIN Yajun, SUN Shuai, YANG Shuo, et al. Experiment and Numerical Simulation of Out-plane Shear Performance of Aluminum Honeycomb Sandwich Panel [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(12):6119-6129.
- [11] 任利民, 戴宁, 程筱胜, 等. 点阵结构填充模型的边界强化设计方法[J]. *中国机械工程*, 2021, 32(5):594-599.  
REN Limin, DAI Ning, CHENG Xiaosheng, et al. Method of Boundary Strengthening Design for Lattice Structure Filling Model[J]. *China Mechanical Engineering*, 2021, 32(5):594-599.
- [12] 王润洲, 张越, 李世强. 组合点阵材料 GBCC-BCC 变形机制及力学性能分析[J]. *中国科学:物理学·力学·天文学*, 2023, 53(4):47-57.  
WANG Runzhou, ZHANG Yue, LI Shiqiang. Deformation Mechanism and Mechanical Properties Analysis of Composite Lattice Materials GBCC-BCC[J]. *Science in China: Physics, Mechanics and Astronomy*, 2023, 53(4):47-57.
- [13] ZHANG Junhui, HUANG Hsinpu, LIU Gan, et al. Stiffness and Energy Absorption of Additive Manufactured Hybrid Lattice Structures[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2021, 16(4):428-443.
- [14] PARK S J, LEE J H, YANG J, et al. Enhanced Energy Absorption of Additive-manufactured Ti-6Al-4V Parts via Hybrid Lattice Structures [J]. *Micromachines*, 2023, 14(11):1982.
- [15] 杨磊, 郑浩, 张聪, 等. 梯度极小曲面点阵结构力学特性研究[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(12):64-69.  
YANG Lei, ZHENG Hao, ZHANG Cong, et al. Research on Mechanical Properties of Lattice Structures with Minimal Gradient Surface [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(12):64-69.
- [16] 纪小刚, 张建安, 栾宇豪, 等. 仿皮肤三维多孔点阵结构压缩吸能性能研究[J]. *机械工程学报*, 2021, 57(15):222-230.  
JI Xiaogang, ZHANG Jianan, LUAN Yuhao, et al. Research on Compression Energy Absorption Performance of Skin-like 3D Porous Lattice Structure[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(15):222-230.
- [17] YANG Peixin, YUAN Wu, SONG Hongwei, et al. Reinforcement Mechanisms of Low-strength Fragile material Under In-plane Shear Loading by Composite Lattice Structures[J]. *Composite Structures*, 2023, 306:116562.

(编辑 胡佳慧)

**作者简介:** 牛国法, 男, 1999 年生, 硕士研究生。研究方向为 CAD/CAM、点阵结构等。发表论文 2 篇。E-mail: niu1999tt@163.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:**

牛国法, 纪小刚, 王炜, 等. 柔弹性复合点阵结构面内剪切性能及交互机制研究[J]. *中国机械工程*, 2025, 36(5):1103-1110.  
NIU Guofa, JI Xiaogang, WANG Wei, et al. Study on In-plane Shear Behavior and Interaction Mechanism of Flexible and Elastic Composite Lattice Structures[J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(5):1103-1110.