

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2022.268

# 不同分级循环加卸载模式下六边形蜂窝能量演化规律

邹全乐<sup>a,b</sup>, 周小莉<sup>a,b</sup>, 王睿智<sup>c</sup>, 刘浩<sup>c</sup>, 刘莹<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 煤矿灾害动力学与控制国家重点实验; b. 资源与安全学院; c. 航空航天学院, 重庆 400044)

**摘要:**为了阐明循环加卸载路径对六边形蜂窝能量演化的影响规律,设计了3种不同分级循环加卸载试验,揭示了不同分级循环加卸载模式下外界输入总能量、弹性变形能、耗散能、塑性变形能等参数的演化特征及相互关系,研究结果表明:不同分级循环加卸载作用下,蜂窝的初始峰值强度和平台应力与卸载过程蜂窝弹性能的释放程度有关;3种不同分级循环加卸载模式下外界输入总能量、蜂窝的弹性变形能和塑性变形能随着加卸载梯级增大呈现非线性增加的趋势,耗散能在前三级循环作用下随着加载次数增加而减小,在最后一级循环中循环载荷上限较大,扰动效应强于强化效应,耗散能呈现相反趋势;提升循环载荷上限,蜂窝内部损伤增加,且越接近蜂窝初始峰值强度,蜂窝的损伤越严重;同时提升循环载荷下限,蜂窝弹性能释放较少,损伤加剧。

**关键词:**分级循环加卸载;蜂窝;耗散能;总能量;损伤

中图分类号:TD355.4

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2023)08-045-11

## Energy evolution of hexagonal honeycomb under different graded cyclic loading and unloading modes

ZOU Quanle<sup>a,b</sup>, ZHOU Xiaoli<sup>a,b</sup>, WANG Ruizhi<sup>c</sup>, LIU Hao<sup>c</sup>, LIU Ying<sup>a,b</sup>

(a. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Dynamics and Control; b. School of Resources and Safety Engineering; c. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 40044, P. R. China)

**Abstract:** In order to examine the effects of cyclic loading and unloading paths on the energy evolution of hexagonal honeycomb, three different graded cyclic loading and unloading tests were conducted. These tests aimed to reveal the evolution characteristics and interrelationships of total external input energy, elastic deformation energy, dissipation energy and plastic deformation energy under different graded cyclic loading and unloading modes. The findings show that the initial peak strength and platform stress of the honeycomb are influenced by the release of the elastic energy during the unloading process. The total external input energy, elastic deformation energy and plastic deformation energy of the honeycomb exhibit a nonlinear increase as the number of unloading levels rises. However, the dissipation energy decreases with the number of unloading levels in the first three cycles, and the upper limit of the cycle load is larger in the last stage. The disturbance effect is stronger than the enhancement effect, resulting in an inverse trend in the dissipation energy. As the upper limit of the cyclic load is elevated, the damage inside the honeycomb increases, with the severity increasing closer to the initial peak

收稿日期:2022-06-15 网络出版日期:2022-10-18

基金项目:煤矿开采水资源保护与利用国家重点实验室开放基金项目(GJNY-20-113-01)。

Supported by State Key Laboratory of Water Resources Protection and Utilization in Coal Mining (GJNY-20-113-01).

作者简介:邹全乐(1987—),男,博士,副教授,主要从事矿井瓦斯灾害防治、煤层气开发等方面的研究。

通信作者:周小莉,女,硕士,主要从事吸能结构研究,(E-mail)202020021037@cqu.edu.cn。

strength of the honeycomb. Furthermore, raising the lower limit of the cyclic load leads to a reduced release of elastic energy and amplifies the level of damage.

**Keywords:** graded cyclic loading and unloading; honeycomb; dissipation energy; total external input energy; damage

蜂窝结构相较于基体材料具有高孔隙率、压缩变形大、变形可控等优势,作为理想的吸能材料在航空航天、车辆、公路桥梁、卫星、包装等领域<sup>[1-7]</sup>得到了广泛的应用。在自然界中,蜜蜂建造由六边形单胞组成的蜂箱储存蜂蜜和花粉,如图1所示,Hales<sup>[8]</sup>研究发现这种六边形蜂箱可以消耗最少的蜂蜡而提供最大的内部空间。受此启发,人们开始探究蜂窝结构在工程实际中的应用。其中,模仿蜂箱结构制作的六边形蜂窝最早应用于工程实际,引发了大规模的应用热潮<sup>[9]</sup>;随后,人们开始研究不同构型的蜂窝结构,提出了三角形蜂窝、方形蜂窝、圆形蜂窝、Kagome蜂窝、手性蜂窝和负泊松比蜂窝等<sup>[10-16]</sup>。



图1 天然蜂窝

Fig. 1 Natural honeycomb

近二十年来,蜂窝结构在拉伸、压缩屈曲、剪切、疲劳等不同载荷条件下的力学响应特征得到了大量研究<sup>[17-22]</sup>。在蜂窝的不同拓扑构型中,六边形蜂窝的研究最为广泛。为预测六边形蜂窝的平台应力,相关学者在已有理论模型的基础上进行了半经验模型的开发<sup>[23]</sup>,且结合大量的试验数据进行了优化<sup>[24]</sup>,随后基于简化超折叠元件理论推导了六边形蜂窝的平台应力解析公式<sup>[25]</sup>,并进一步建立了平台应力和初始峰值强度的数学模型<sup>[26]</sup>。在冲击受载方面,对冲击速度和冲击角度影响下六边形蜂窝的变形模式进行了探究<sup>[27]</sup>,发现随着冲击速度的变化六边形蜂窝的变形模式可以分为准静态变形、过渡变形以及局部变形,且由于惯性作用,随着冲击速度的增加六边形蜂窝的承载能力和能量吸收能力也随之提升<sup>[28]</sup>;对比相同冲击能量下蜂窝芯层高度与芯层数量对蜂窝抗冲击性能的影响,结果显示,增加芯层高度能有效降低冲击峰值并延长冲击时长,增加芯层层数有利于增加结构阻抗进而减少蜂窝整体弯曲变形和局部凹陷,有利于提高蜂窝抗冲击性能<sup>[29]</sup>;用Abaqus有限元模拟软件评估蜂窝的吸能防冲性能,结果显示,单胞失稳的主要因素为切应力,而剪切变形前的单胞节点变形主要是拉伸应力作用的结果,整体来看对角承载六边形蜂窝失稳模式比较稳定,载荷曲线在冲击过程上升缓慢,缓冲阶段较长<sup>[30]</sup>。在疲劳受载方面,相关学者对蜂窝夹芯板进行了弯曲试验,基于等效剪切模量退化理论,建立了寿命预测和损伤演化模型<sup>[31]</sup>;随后进一步分析了蜂窝芯层的疲劳破坏模式和损伤机理<sup>[32]</sup>,并在此基础上提出了基于静力学试验和数值模拟的快速疲劳分析方法<sup>[33]</sup>。

上述研究工作在蜂窝结构力学性能方面取得了很多有意义的成果,然而,现有研究多考虑蜂窝的静态和冲击受载,疲劳受载也多局限于蜂窝夹芯板的弯曲试验,但在矿井、地下空间等的实际应用工况中蜂窝常常会受到扰动作用的影响,这种扰动作用可近似看作循环加卸载过程,且蜂窝所受循环载荷上限值会发生变化,循环载荷下限值也会存在完全卸载至不受载,部分卸载至较稳定的载荷下限和循环载荷下限与循环载荷上限同时升高等多种循环受载状态。因此,选用了最常见的六边形蜂窝,设计了3种循环载荷下限不同的分级循环加卸载模式,探究这3种不同分级循环加卸载模式对蜂窝能量演化规律的影响,研究成果有助于揭示不同应力路径下蜂窝的损伤机制,为蜂窝在矿山、地下空间等环境中的应用奠定理论基础。

## 1 蜂窝制备与试验方案

### 1.1 试样制备

采用增材制造技术制备六边形蜂窝。蜂窝结构的材料选用荷兰皇家帝斯曼集团研发的 Somos® Taurus 材料,这种材料具有高强度、高韧性的优点,应用十分广泛。基于 SOLIDWORKS 软件建立蜂窝结构的模型,模型参数见表 1,将建立的模型导入联泰科技 AME R8000 光固化生产系统打印,制备蜂窝试件,如图 2(a)所示。

表 1 六边形蜂窝模型参数

Table 1 Parameters of hexagonal honeycomb model

名称	尺寸	单胞截面形状	单胞边长 $l/\text{mm}$	单胞壁厚 $t/\text{mm}$
六边形蜂窝	40 mm×40 mm×60 mm	正六边形	4.62	0.8

#### 1.1.2 试验设备

试验设备采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的微机控制电子万能试验机,如图 2(b)所示。该万能试验机最大试验力 300 kN,准确度等级 0.5 级,试验力测量范围 0.4%~100%,试验力示值误差在示值的  $\pm 0.5\%$  以内,位移示值误差在示值的  $\pm 0.5\%$  以内,位移控制速率范围 0.001~250 mm/min。在试验过程中用电子万能试验机自带软件编写控制程序,试验过程由软件自动控制;电子万能试验机自带的监测系统与数据采集系统获取载荷、位移数据。

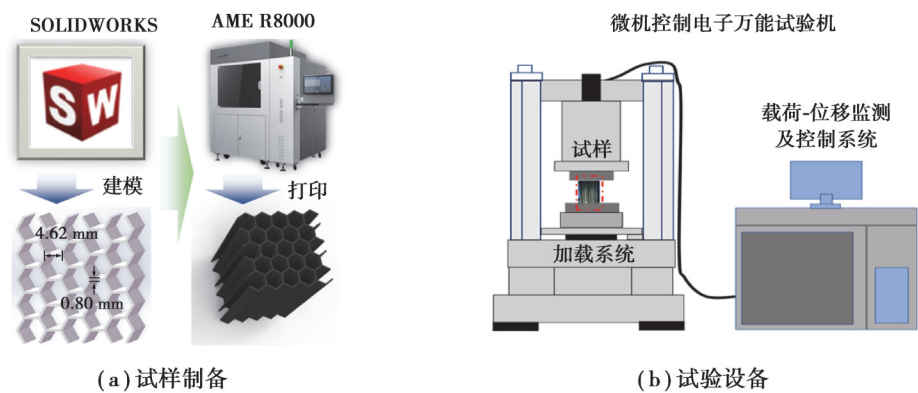


图 2 试样制备与试验设备

Fig. 2 Specimen preparation and test equipment

### 1.3 试验方案

为了确定分级循环加卸载路径的各级载荷上限,在正式试验开始之前,先进行 2 组单轴压缩试验,测试六边形蜂窝的初始峰值载荷。2 次测量的初始峰值载荷分别为 13.4 kN 和 13.6 kN,取 2 次试验平均值 13.5 kN 作为六边形蜂窝的初始峰值载荷。本试验设计以下 3 种不同分级循环加卸载模式,不同分级循环加卸载模式载荷与时间的对应曲线如图 3 所示。3 种循环加卸载模式均将加卸载过程划分为 I、II、III、IV 4 个梯级,每一级加卸载过程需要循环 5 次,4 个梯级的循环载荷上限分别为 2.7、5.4、8.1、10.8 kN。3 种加卸载模式的区别在于循环载荷下限不同:第 1 种加卸载模式为恒定循环载荷下限为 0 的加卸载试验,该模式的每一级每一次循环的循环载荷下限均为 0 kN(图 3(a));第 2 种加卸载模式为恒定循环载荷下限不为 0 的加卸载试验,该模式的每一级每一次循环的循环载荷下限均为 1.7 kN(图 3(b));第 3 种加卸载模式为升高循环载荷下限的加卸载试验,4 个梯级的循环载荷下限分别为 0、2.7、5.4、8.1 kN,同一级循环每一次循环的循环载荷下限相同(图 3(c))。3 种循环加卸载模式在循环结束后加载速率依然保持为 100 N/s,直至蜂窝压缩至 56 mm。

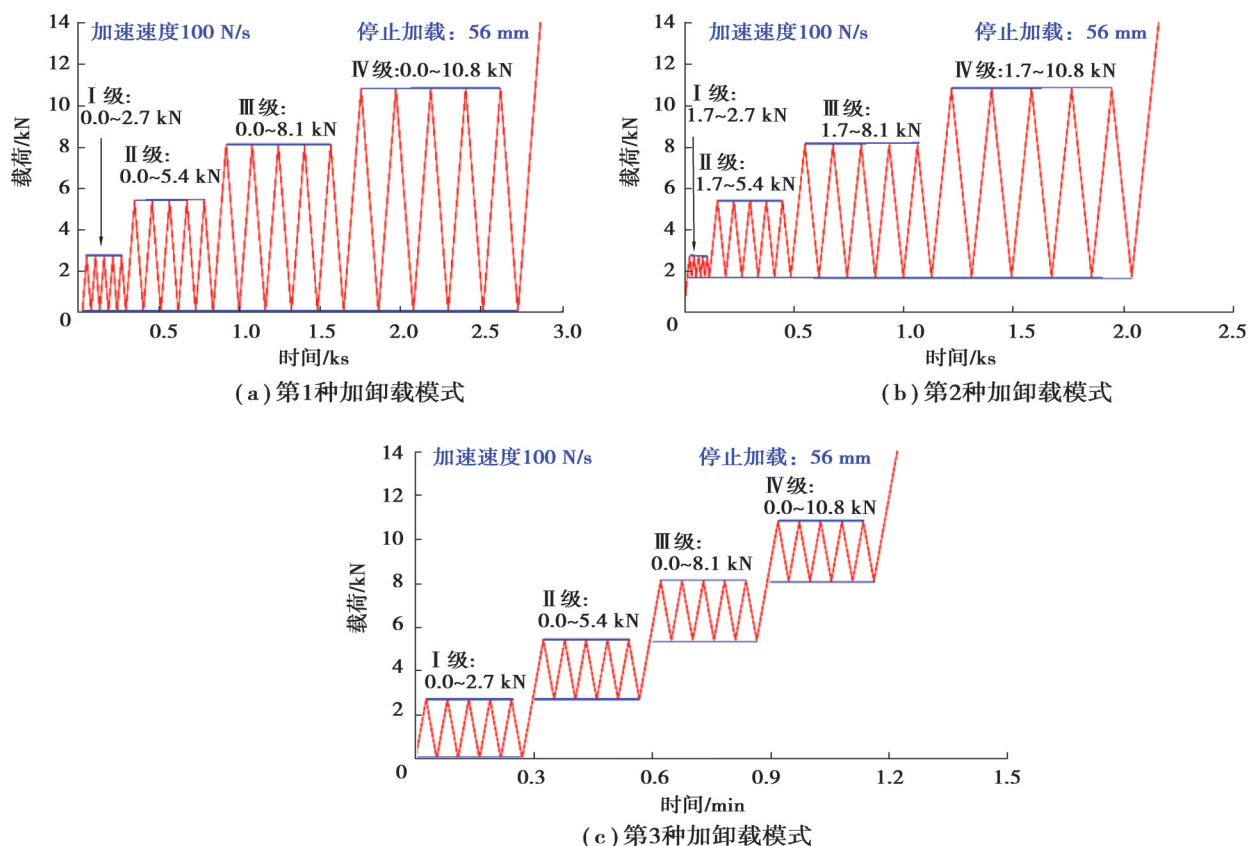


图3 不同分级循环加卸载模式载荷与时间的对应曲线

Fig. 3 Time-load curves for different graded cycle modes

## 2 试验结果

不同分级循环加卸载模式下蜂窝应力-应变曲线如图4所示,3种不同加卸载模式下蜂窝的应力-应变曲线均存在“滞回环”现象。对比初始峰值强度发现,第3种加卸载模式下蜂窝的初始峰值强度最低,仅为8.0 MPa,这可能是由于第3种加卸载路径的循环载荷下限随着加卸载梯级增大而增加,致使蜂窝一直处于受压环境中,其内部积聚的弹性能无法得到有效释放,进而加剧了蜂窝内部损伤的累积产生疲劳损坏。第1种和第2种加卸载路径下蜂窝发生破坏时的初始峰值强度为9.7 MP和8.3 MPa,考虑到这2种加卸载模式为恒定循环载荷下限的加卸载试验,相较于第3种升高循环载荷下限的加卸载试验,蜂窝内部积聚的弹性能得到有效释放,第1种加卸载模式更是卸载到0 kN,蜂窝内部积聚的弹性能得到了充分释放,使得蜂窝的初始峰值强度维持在一个较高的水平。

除初始峰值强度外,对比蜂窝平台应力发现,蜂窝的平台应力与初始峰值强度呈现相同的变化规律,第1种加卸载模式下的平台应力最大,第2种和第3种加卸载模式下的平台应力次之。这依然与卸载过程中蜂窝内部弹性能的释放程度有关,蜂窝内部弹性能释放越充分,表现出的初始峰值强度和平台应力也相应增大。

对比蜂窝应变发现,分级循环加卸载的循环载荷上限随着加卸载梯级增大有所上升,每一个加卸载梯级载荷均会对蜂窝内部造成新的损伤,且造成的损伤逐步累积,表现为轴向应变随着加卸载梯级增大逐步增加;且蜂窝的不可逆变形呈非线性增大的趋势,损伤也逐渐增大,这一规律在第3种加卸载模式下尤为突出。

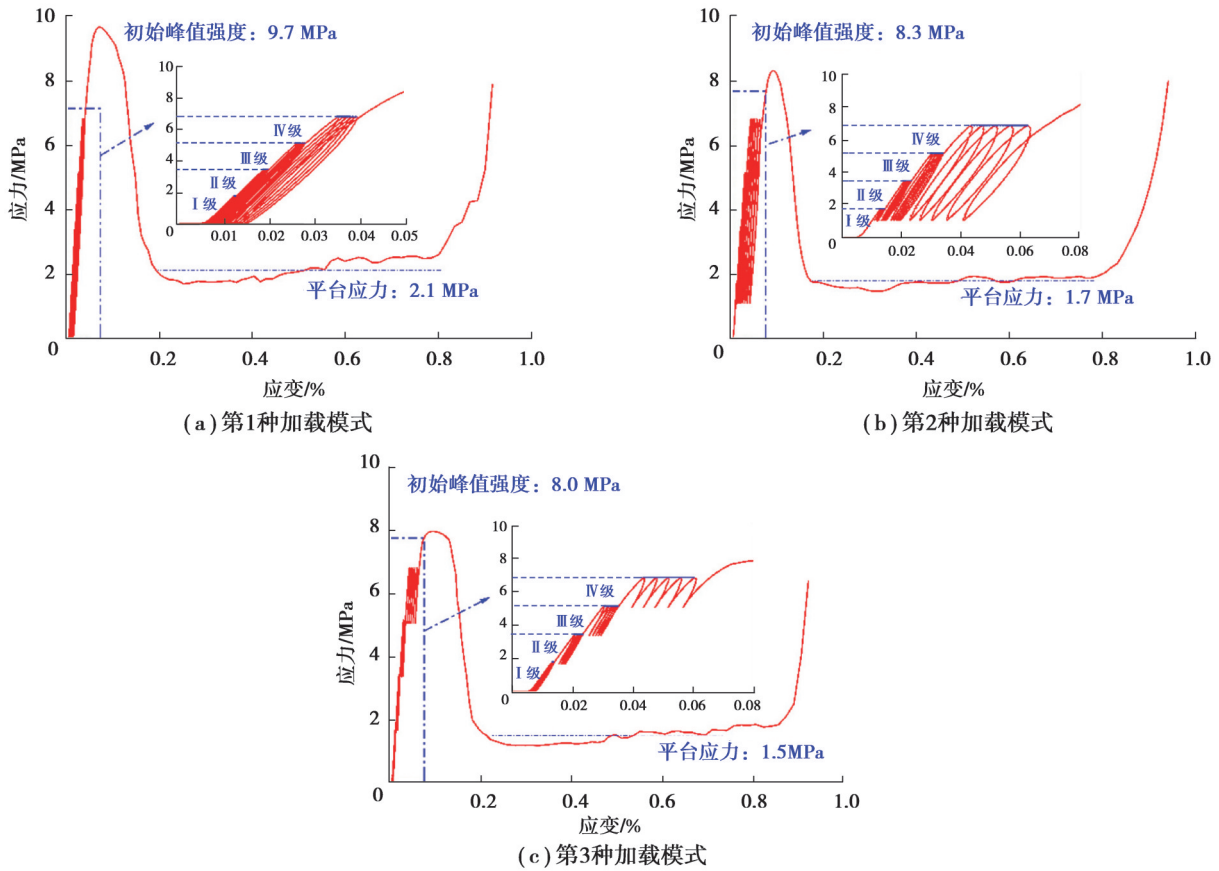


图 4 不同分级循环加卸载模式的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves for different graded cyclic modes

### 3 讨论

#### 3.1 能量演化过程及特征

在分级循环加卸载过程中,以弹性变形能储存在蜂窝内部的外界输入能量在卸载时会释放出来,这部分能量是可逆的;转化为声能、热能耗散掉的外界输入能量为耗散能,因蜂窝塑性变形、断裂耗散掉的外界输入能量称为塑性变形能,这两部分能量的损失是不可逆的。外界输入蜂窝的总能量、弹性变形能、塑性变形能、耗散能的计算方法如图 5 所示。图 5 中  $U_i$  为第  $i$  次加载外界输入蜂窝的总能量,其值为加载曲线  $OAB$  下的面积;  $U_{di}$  为蜂窝第  $i$  次的弹性变形能,其值为卸载曲线  $DEB$  下的面积;  $U_{ei}$  为蜂窝第  $i$  次的塑性变形能,其值为曲线  $OABCD$  形成的面积;  $U_{sei}$  为蜂窝第  $i$  次的耗散能,其值为滞回曲线  $DCBED$  包络形成的面积。

蜂窝在循环加卸载时,会经历外界能量输入、蜂窝内部能量累积、能量耗散以及释放的能量转化过程,在这一过程中每一个应力状态都会对应一个特定的能量状态。根据蜂窝的应力-应变曲线计算得到不同分级循环加卸载模式下每一次循环加卸载过程的部分能量,并采用多项式拟合画出拟合曲线(图 6(a)~(c)),在第 1 种和第 2 种加卸载模式下,蜂窝的各部分能量随着加卸载梯级增大呈现非线性增加的趋势,这表明,在恒定循环载荷下限的加卸载条件下,随着蜂窝内部损伤的累积,所需的能量呈现非线性增加的趋势。但第 3 种加卸载模式呈现的规律略有不同,外界输入蜂窝

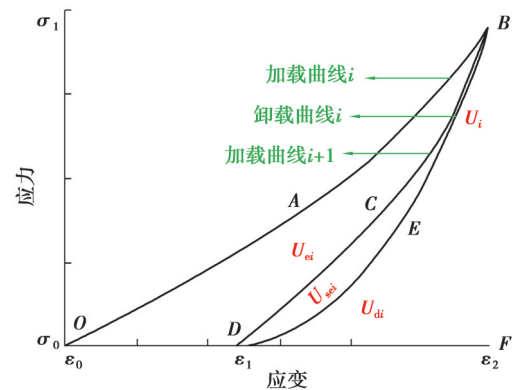


图 5 不同分级循环加载模式下各部分能量计算示意图

Fig. 5 Schematic diagram of energy calculation of each part under different graded cyclic modes

的总能量、蜂窝的弹性变形能和塑性变形能均呈现上升的趋势,但蜂窝的弹性变形能的增速逐渐变缓,蜂窝的耗散能更是呈现出非线性下降的趋势。

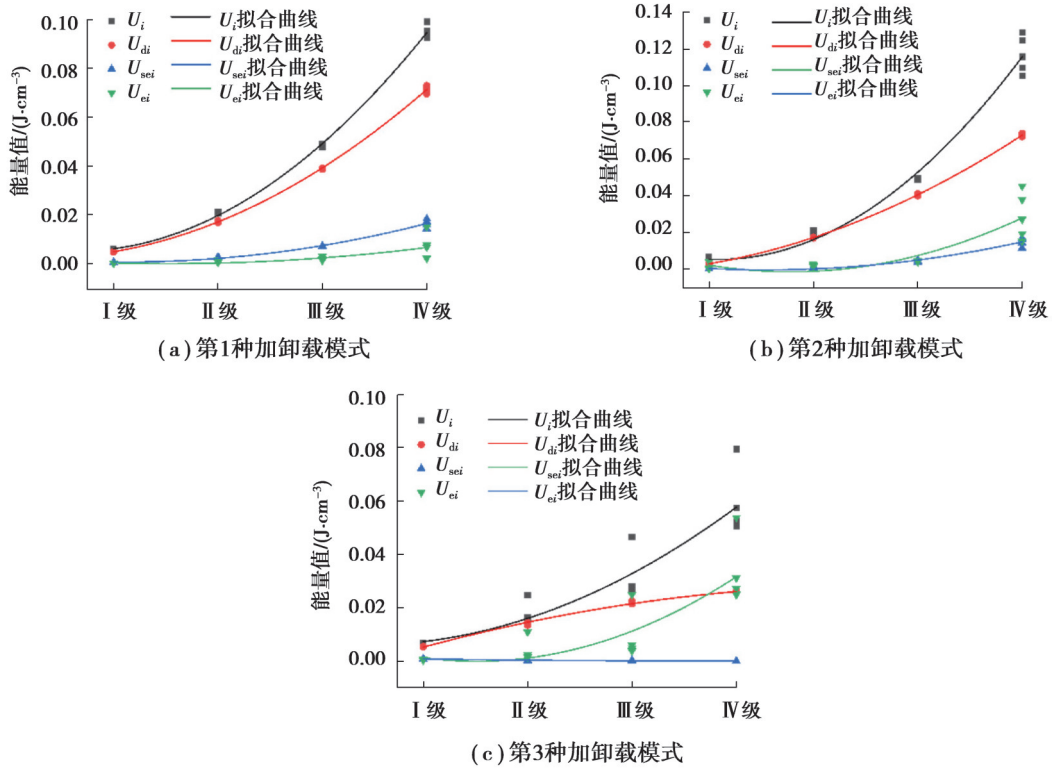
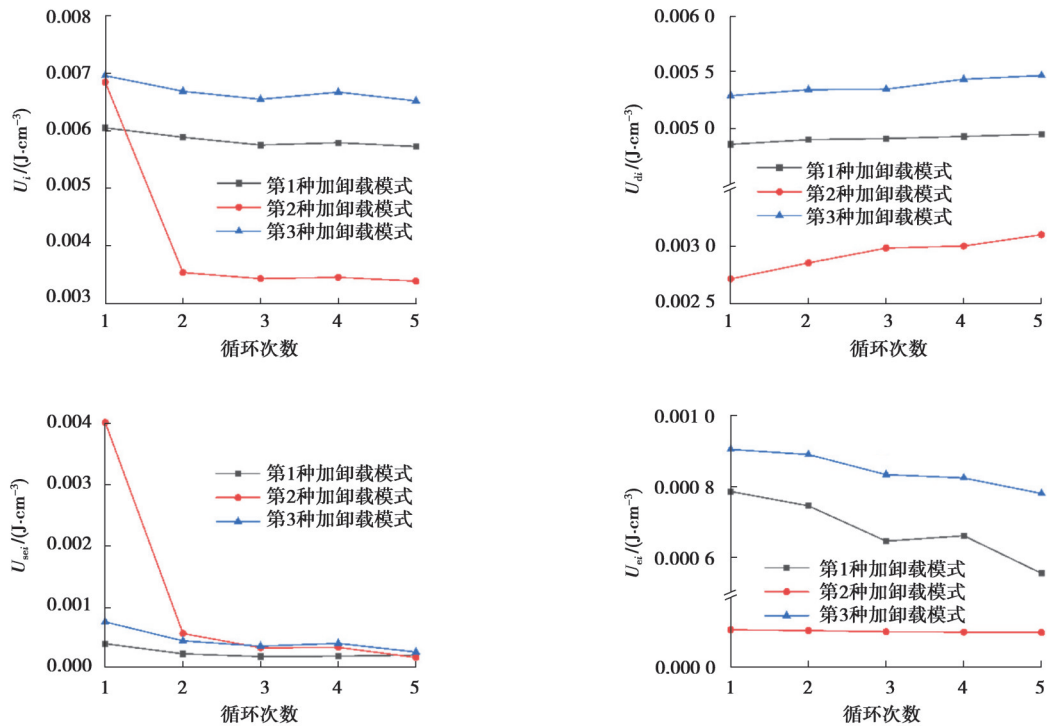


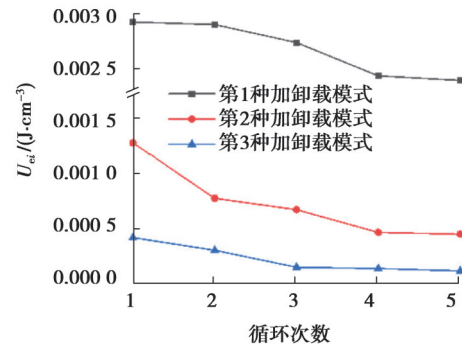
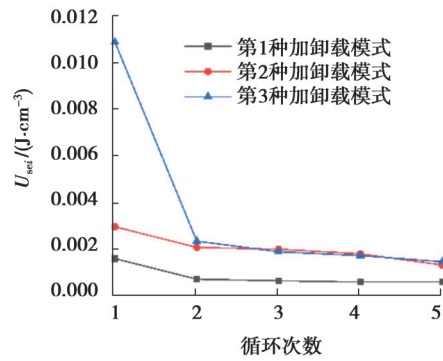
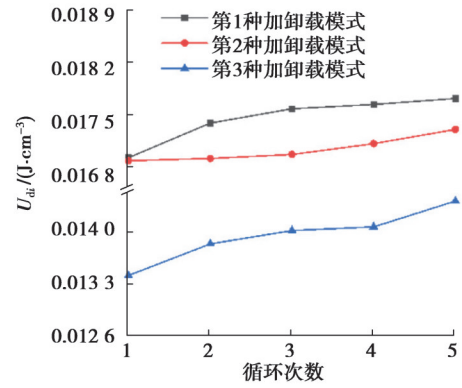
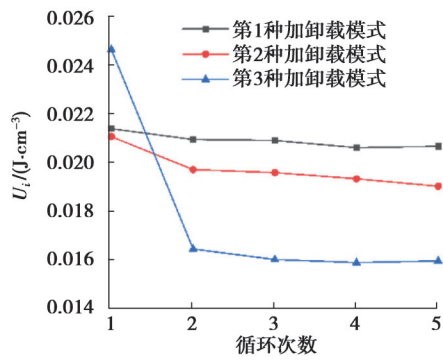
图 6 不同加卸载模式下的能量演化过程

Fig. 6 Energy evolution process under different graded cyclic modes

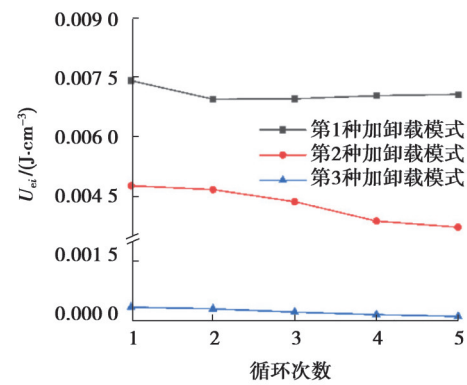
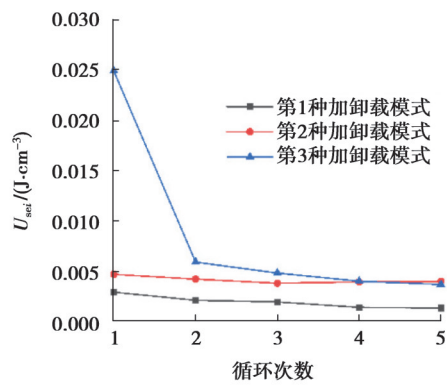
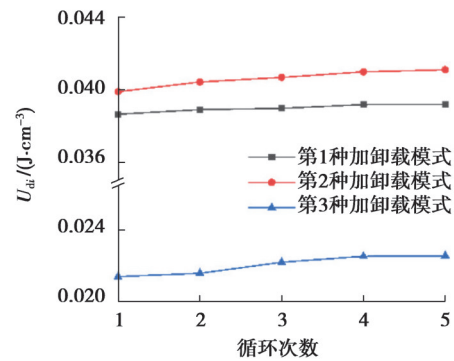
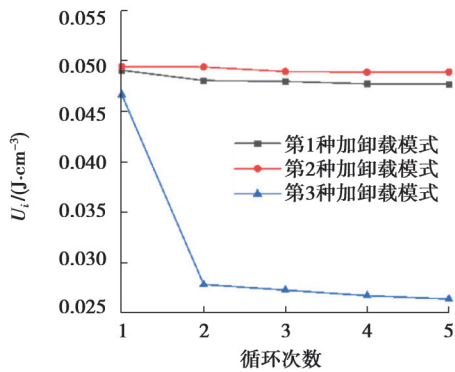
为了进一步分析,绘制蜂窝每一级每一次循环的各部分能量,获取不同分级循环加卸载模式下不同加载等级循环加卸载次数与能量演化的关系,由图 7 可知:



(a) I 级循环加卸载能量演化



(b) II级循环加卸载能量演化



(c) III级循环加卸载能量演化

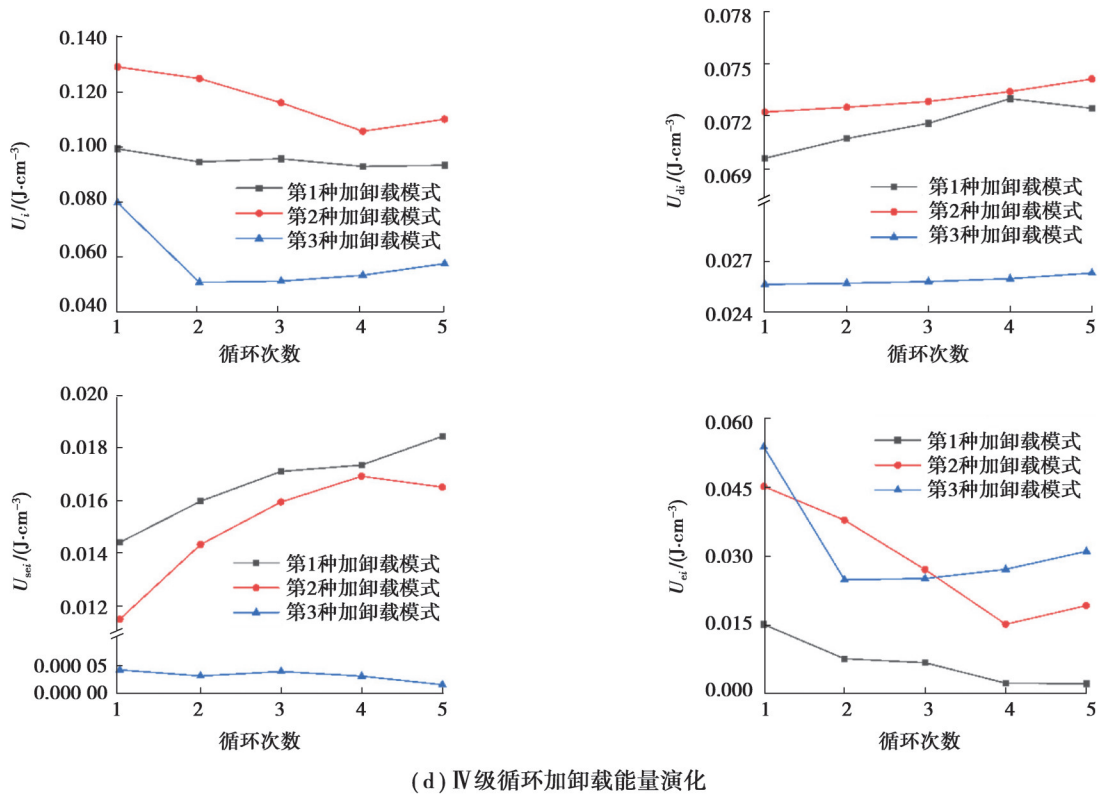


图7 不同加载模式下的能量演化过程

Fig. 7 Energy evolution under different graded cyclic modes

1) 虽然3种加卸载模式有所不同,但蜂窝在每一级循环加卸载作用时均会从外界吸收能量,且在同一梯级循环加卸载下蜂窝从外界吸收的总能量会随着加载次数的增加逐步减小,整体来看第1次循环到第2次循环总能量的降幅最大,第2次循环后降幅开始减小且逐步稳定式。从外界吸收的总能量分析,蜂窝在第I级循环中总能量降幅最大的是第2种加卸载模式,而第II、III、IV级循环中都是第3种加卸载模式降幅最大,这是由于第I级循环中,第1种和第3种加卸载模式每一次循环的载荷下限均为0 kN,但第2种加卸载模式为1.7 kN,使得在后4次循环过程中,第2种加卸载模式下外界输入蜂窝的总能量较第1种和第3种加卸载模式更低;而第II、III、IV级循环中,第3种加卸载模式每一次循环的载荷下限最大,这就使得在后4次循环过程中,第3种加卸载模式下外界输入蜂窝的总能量较第1种和第2种加卸载模式更低。

2) 蜂窝在3种不同加卸载模式均表现出同一梯级循环加卸载的弹性变形能随着循环次数的增加呈现增加的趋势,表明增加循环次数,蜂窝内部积聚的可释放能量有所增加,表现为蜂窝随着加载次数的增加逐渐硬化,循环载荷对蜂窝起到一定的强化效应。

3) 3种不同循环加卸载下,同一梯级循环加卸载过程蜂窝随着循环次数的增加,耗散能呈现减小的趋势,表明随着循环次数的增加蜂窝内部微小孔隙逐渐闭合,耗散能减小。但在第IV级循环过程中,第1种和第2种加卸载模式蜂窝的耗散能开始呈现增加的趋势,这是由于随着循环加卸载梯级增大,循环载荷上限逐步增加,第IV级循环的循环载荷上限在前几个梯级蜂窝累积损伤影响下开始接近初始峰值强度,循环加卸载对蜂窝造成的循环扰动作用逐步加强,扰动效应开始强于强化效应;而在第3种加卸载模式下,蜂窝在升高循环载荷下限的影响下损伤加快,弹性减弱,蜂窝的耗散能几乎可以忽略不计。

4) 3种不同循环加卸载模式的每一级循环加载过程均呈现蜂窝的塑性变形能随着循环次数的增加而减小,且逐渐稳定。这是由于每一级循环第1次加卸载过程蜂窝从外界吸收能量再释放耗散的过程均会造成蜂窝内部产生新的损伤,随后循环次数的增加仅轻微加剧已有的损伤,塑性变形能的消耗较产生新的损伤有所减少。



### 3.2 总能量对比分析

蜂窝循环加卸载过程的应力-应变曲线出现“滞回环”说明蜂窝在循环加卸载作用下既发生了可逆的弹性变形,又发生了不可逆的塑性变形,而正是不可逆塑性变形的累积造成了蜂窝胞壁的坍塌,由此可见,对比分析不同分级循环加卸载作用下蜂窝各部分能量具有重要的意义。

将蜂窝不同加载模式下每一级 5 次循环的各部分能量之和进行统计,得到不同分级循环加卸载模式下各级循环的能量演化,如图 8 所示,整体来看,除第 3 种加卸载模式蜂窝的耗散能几乎为 0、变化忽略不计外,外界输入蜂窝的总能量、弹性变形能、耗散能以及塑性变形能在 3 种不同分级循环加卸载模式下均呈现出随着载荷上限等级的增加非线性升高的趋势,但加卸载模式的不同,能量演化规律也存在一定的差异性。总体上看第 1 种加卸载模式与第 2 种加卸载模式在不同加载等级下外界输入蜂窝的总能量均大于第 3 种加卸载模式,且在加载过程中以弹性变形释放的弹性变形能以及以声能等形式耗散的耗散能也大于第 3 种加卸载模式,这表明在恒定循环载荷下限的加卸载方式下蜂窝受到的扰动作用更为显著;而在第 3 种加卸载模式下,外界输入蜂窝的总能量较少,这是由于在升高循环载荷下限的加卸载条件影响下,其内部产生了疲劳损坏,使得蜂窝承载下降,同样地,蜂窝的弹性变形能也明显低于前两种加卸载模式。塑性变形能呈现出相反的趋势,第 3 种加卸载模式下蜂窝的塑性变形能大于前两种加卸载模式;但在 3 种不同加卸载模式下,蜂窝的塑性变形能均在 IV 级循环中有了较大地增长,表明循环载荷上限升高蜂窝内部更容易产生损伤,且越接近峰值强度蜂窝内部更容易产生损伤,同时,升高循环载荷下限能达到类似的效果。

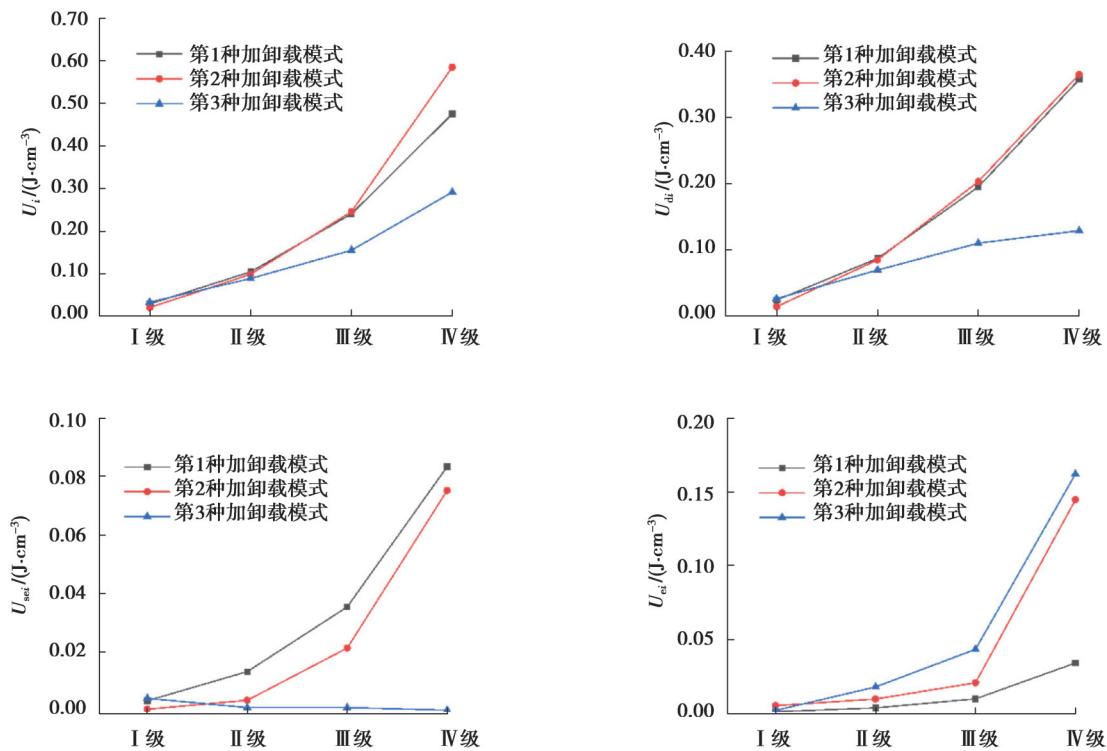


图 8 不同分级循环加卸载模式下各级循环加卸载的能量演化过程

Fig. 8 Energy evolution of cyclic loading and unloading at different levels with different graded cyclic modes

将不同分级循环加卸载各级的外界输入蜂窝总能量、弹性变形能、耗散能、塑性变形能进行加和,获取不同分级循环加卸载模式下各部分总能量,如图 9 所示,在第 1 种和第 2 种加卸载路径下外界输入蜂窝的总能量、弹性变形能、耗散能相差不大且明显大于第 3 种加卸载路径;但第 3 种加卸载模式下蜂窝塑性变形能大于前 2 种加卸载模式。这表明恒定循环载荷下限值且下限应力值较低时,蜂窝在卸载时内部积聚的能量得到了有效的释放,循环载荷对蜂窝造成的损伤较小;蜂窝循环载荷下限升高,蜂窝内部的能量积聚,对蜂窝造成的损伤较大,致使蜂窝的峰值强度以及平台应力有所减小。

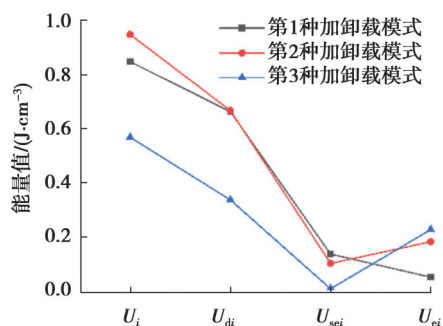


图9 不同分级循环加载模式下各部分总能量

Fig. 9 Total energy of each part in different graded cycle modes

## 4 结论

设计了3种不同分级循环加卸载试验,详细分析了不同分级循环加卸载模式下六边形蜂窝的能量演化特征,得到的主要结论如下:

1)不同分级循环加卸载作用下,蜂窝的初始峰值强度和平台应力与卸载过程中蜂窝内部弹性能的释放程度有关。在循环载荷上限一致的情况下,循环载荷下限越小,蜂窝内部弹性能释放越充分,表现出的峰值强度和平台应力也更大。

2)3种不同分级循环加卸载模式下外界输入蜂窝的总能量、蜂窝的弹性变形能和塑性变形能随着加卸载梯级增大呈现非线性增加的趋势,但耗散能的演化规律有所不同,2种恒定循环载荷下限的加卸载模式下蜂窝耗散能随着加载级数的增加呈现非线性增加的趋势,升高循环载荷下限条件下呈现非线性减小的趋势。

3)在前3级循环作用下,同一梯级循环加卸载过程中,耗散能随着加载次数的增加逐步减小,表明蜂窝胞壁微小孔隙逐渐闭合;在第IV级循环作用下,循环载荷上限接近初始峰值载荷,扰动效应强于强化效应,恒定循环载荷下限的2种加卸载模式耗散能随着加载次数的增加呈上升的趋势,升高循环载荷下限加载模式下,蜂窝损伤加剧,几乎失去弹性,耗散能忽略不计。

4)提升循环载荷上限,蜂窝内部损伤增加,且越接近蜂窝初始峰值强度蜂窝的损伤越严重;同时提升循环载荷下限,蜂窝弹性能释放较少,损伤加剧。

## 参考文献

- [ 1 ] Zhang Y W, Yan L L, Zhang W B, et al. Metallic tube-reinforced aluminum honeycombs: Compressive and bending performances[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 171: 192-203.
- [ 2 ] Zhang G Y, Gao X L. Band gaps for wave propagation in 2-D periodic three-phase composites with coated star-shaped inclusions and an orthotropic matrix[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 182: 107319.
- [ 3 ] Baggetto L, Danilov D, Notten P H L. Honeycomb-structured silicon: remarkable morphological changes induced by electrochemical (de)lithiation[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(13): 1563-1566.
- [ 4 ] Bai J B, Chen D, Xiong J J, et al. Folding analysis for thin-walled deployable composite boom[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 159: 622-636.
- [ 5 ] Li B H, Lu Z J, Yan K B, et al. Experimental study of a honeycomb energy-absorbing device for high-speed trains[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, 2019, 234(10): 095440971988256.
- [ 6 ] Xu Y D, Schlangen E, Luković M, et al. Tunable mechanical behavior of auxetic cementitious cellular composites (CCCs): experiments and simulations[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 266: 121388.
- [ 7 ] Xiao R, Feng X B, Fan R, et al. 3D printing of titanium-coated gradient composite lattices for lightweight mandibular prosthesis[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 193: 108057.
- [ 8 ] Hales T C. The honeycomb conjecture [J]. *Discrete and Computational Geometry*, 2001, 25: 1-22.
- [ 9 ] Bitzer T. Honeycomb technology: materials, design, manufacturing, applications and testing[M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [ 10 ] Smeets B J R, Fagan E M, Matthews K, et al. Structural testing of a shear web attachment point on a composite lattice cylinder for aerospace applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 212: 108691.
- [ 11 ] Sun G Y, Huo X T, Wang H X, et al. On the structural parameters of honeycomb-core sandwich panels against low-velocity

- impact[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 216: 108881.
- [12] Ghimire A, Tsai Y Y, Chen P Y, et al. Tunable interface hardening: designing tough bio-inspired composites through 3D printing, testing, and computational validation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 215: 108754.
- [13] Li T T, Liu F, Wang L F. Enhancing indentation and impact resistance in auxetic composite materials[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 198: 108229.
- [14] Yang X F, Sun Y X, Yang J L, et al. Out-of-plane crashworthiness analysis of bio-inspired aluminum honeycomb patterned with horseshoe mesostructure[J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 125: 1-11.
- [15] 张政, 苏继龙. 六韧带手性蜂窝材料韧带的冲击动荷系数及稳定性分析[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(5): 1313-1318.  
Zhang Z, Su J L. Impact dynamic load coefficient and stability analysis of ligament of hexachiral honeycomb[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(5): 1313-1318.(in Chinese)
- [16] 虞科炯, 徐峰祥, 华林. 正弦曲边负泊松比蜂窝结构面内冲击性能研究[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(13): 51-59.  
Yu K J, Xu F X, Hua L. In plane impact performance of honeycomb structure with sinusoidal curved edge and negative Poisson's ratio[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(13): 51-59.(in Chinese)
- [17] Liu Y, Zhang X C. The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(1): 98-109.
- [18] Sun D Q, Zhang W H, Zhao Y C, et al. In-plane crushing and energy absorption performance of multi-layer regularly arranged circular honeycombs[J]. *Composite Structures*, 2013, 96: 726-735.
- [19] Xing Y D, Yang S Y, Lu S Q, et al. Energy absorption and optimization of Bi-directional corrugated honeycomb aluminum[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 219: 108914.
- [20] Wang H, Xiu X, Wang Y, et al. Paper-based composites as a dual-functional material for ultralight broadband radar absorbing honeycombs[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 202: 108378.
- [21] Peng C X, Tran P. Bioinspired functionally graded gyroid sandwich panel subjected to impulsive loadings[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 188: 107773.
- [22] Huang Z X, Zhang X, Yang C Y. Experimental and numerical studies on the bending collapse of multi-cell Aluminum/CFRP hybrid tubes[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 181: 107527.
- [23] McFARLAND R K. Hexagonal cell structures under post-buckling axial load[J]. *AIAA Journal*, 1963, 1(6): 1380-1385.
- [24] Bai Z H, Guo H R, Jiang B H, et al. A study on the mean crushing strength of hexagonal multi-cell thin-walled structures[J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 80: 38-45.
- [25] Qiu N, Gao Y K, Fang J G, et al. Theoretical prediction and optimization of multi-cell hexagonal tubes under axial crushing[J]. *Thin-Walled Structures*, 2016, 102: 111-121.
- [26] Yamashita M, Gotoh M. Impact behavior of honeycomb structures with various cell specifications: numerical simulation and experiment[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2005, 32(1/2/3/4): 618-630.
- [27] Wang Z G, Lu Z J, Yao S, et al. Deformation mode evolutionary mechanism of honeycomb structure when undergoing a shallow inclined load[J]. *Composite Structures*, 2016, 147: 211-219.
- [28] Li P, Yue J X, Li X B, et al. Axial compression and collapse properties of 3D re-entrant hexagonal auxetic structures[C]// *Proceedings of ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, August 3 - 7, 2020, Virtual, Online. 2020.
- [29] 彭世伟, 陈立明, 刘后常, 等. 热塑性复合材料蜂窝夹芯板的低速冲击失效行为[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(2): 82-90.  
Peng S W, Chen L M, Liu H C, et al. Low-velocity impact failure behavior of thermoplastic composite honeycomb sandwich panel[J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(2): 82-90.(in Chinese)
- [30] 张永祥, 王睿智, 刘浩等. 不同单胞形貌和承载方向下蜂窝结构吸能特性及防冲能力评估[J/OL]. *重庆大学学报*(2022-04-11)[2022-06-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20220410.2159.002.html>.  
Zhang Y X, Wang R Z, Liu H, et al. Energy absorption characteristics and impact resistance evaluation of honeycomb structures under different unit cell morphologies and bearing directions[J/OL]. *Journal of Chongqing University*(2022-04-11)[2022-06-05]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20220410.2159.002.html>.(in Chinese)
- [31] Bianchi G, Aglietti G S, Richardson G. Static and fatigue behaviour of hexagonal honeycomb cores under in-plane shear loads[J]. *Applied Composite Materials*, 2012, 19(2): 97-115.
- [32] Wu X R, Yu H J, Guo L C, et al. Experimental and numerical investigation of static and fatigue behaviors of composites honeycomb sandwich structure[J]. *Composite Structures*, 2019, 213: 165-172.
- [33] Zhao Q, Ge M, Zhang S J. A rapid fatigue analysis method of aluminum honeycomb structure with defects based on static test and numerical simulation[J]. *Science Discovery*, 2019, 7(5): 365.

(编辑 郑洁)