**DOI:** 10.11858/gywlxb.20240701

# 中等应变率下纸蜂窝结构的力学性能研究

马 昊[1], 陈美多[1], 袁良柱[1], 王鹏飞[1], 徐松林[1,2]

(1. 中国科学技术大学, 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027;
2. 中国地震局地震预测研究所高压物理与地震科技联合实验室, 北京 100036)

**摘要:** 应用新研制的中应变率实验装置结合激光干涉测速系统完成了纸蜂窝结构的动态加载实验, 研究纸蜂窝结构在中应变率下的力学性能; 结合高速摄影和数字图像相关方法, 得到纸蜂窝结构的变形过程和动态失效机制, 并采用数值方法进一步探究其动态失效机制。结果表明: 纸蜂窝结构表现出明显的应变率效应; 厚度为 2.10 mm 的纸蜂窝屈服强度明显低于其他 3 种尺寸, 表现出异常尺寸效应, 应力-应变曲线下降段也有较大差异。产生异常尺寸效应的主要原因是, 随着试样尺寸的增大, 纸蜂窝结构的破坏模式发生了变化。中应变率加载过程中, 纸蜂窝结构的失效机制为破坏模式的转变——由面外壁屈曲破坏转变为面内剪切破坏。本研究还利用数值模型分析了胞元宽度的变化对结构力学性能的影响, 该研究结果对于薄壁结构的优化设计具有很好的参考意义。

**关键词:** 中等应变率; 纸蜂窝; 失效机制; 面外屈曲; 动态响应

**中图分类号:** O341 **文献标志码:** A

研究材料或结构在不同应变率下的力学响应是近期相关科研领域关注的热点之一, 现实生活中材料的大多数应用场景都处于中应变率范围, 而目前的研究大多为高低应变率下的力学响应, 中应变率范围的研究较少。高应变率范围($10^2$～$10^4$ $s^{-1}$)的材料实验一般通过落锤、霍普金森压杆(SHPB)等手段[1–3]完成, 该范围内的实验涉及应力波的传播, 主要考虑波动效应作用; 低应变率范围($10^{-5}$～$10^{-2}$ $s^{-1}$)的材料实验一般通过万能试验机[4–5]完成, 实验的加载时间较长, 主要研究目标材料或结构在准静态下保持和维系平衡的能力。中应变率介于高应变率与低应变率之间, 是两者过渡的关键区域, 有许多值得探讨的转化机制和基础理论, 研究中应变率范围内材料的力学响应具有重要意义。

蜂窝结构因其高孔隙率、低质量密度等特点, 而具有高比刚度、高比强度等优异特性, 近些年来备受关注, 广泛应用于汽车、船舶、航空航天、卫星等领域[6–8]。蜂窝结构的种类也层出不穷[9–10], 基体材料包括纸、金属和复合材料等。相较于金属基蜂窝, 芳纶纸蜂窝具有更加优异的比强度等特性, 且考虑到纸蜂窝在冲击防护过程中大多处于中应变率范围, 并且会产生较大的变形, 因此将其选为重要研究对象。

纸蜂窝结构的变形过程与蜂窝结构的典型应力-应变曲线类似, 分为线性压缩、应力平台以及致密阶段 3 个阶段[11–12]。在纸蜂窝结构的力学性能方面: Heimbs 等[13]研究了应变率对其性能的影响, 发现应变率升高会使 Aramid 蜂窝的应力得到提高; Kaman 等[14]通过实验和数值模拟方法研究了蜂窝复合板不同芯密度和材料的临界屈曲荷载, 确定纸芯板的临界屈曲荷载高于铝芯板的临界屈曲荷载, 试件

* **收稿日期:** 2024-01-02; **修回日期:** 2024-01-13

**基金项目:** 国家自然科学基金(11672286, 11872361); 高压物理与地震科技联合实验室开放基金(2019HPPES01); 中央高校基本科研业务费专项资金(WK2480000008)

**作者简介:** 马 昊(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事冲击动力学研究. E-mail: haoma@mail.ustc.edu.cn

**通信作者:** 徐松林(1971—), 男, 博士, 研究员, 主要从事冲击作用下材料的动态响应研究. E-mail: slxu99@ustc.edu.cn

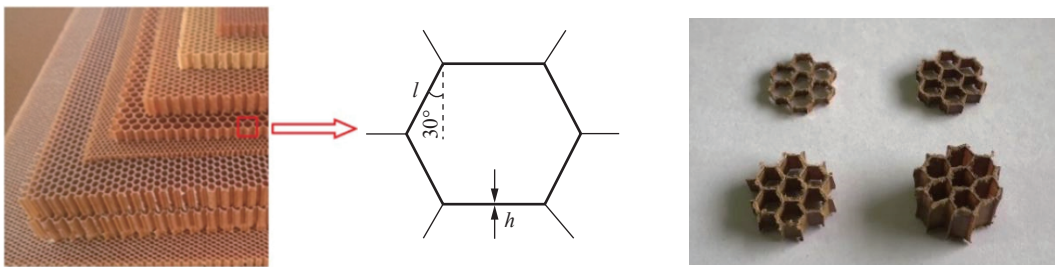
的屈曲强度随着芯部密度的增加而增大; Wang[15] 通过动态缓冲实验分析了纸蜂窝的结构因素对其在冲击载荷作用下缓冲性能的影响; Liu 等[16] 通过实验和数值方法研究了横向载荷下 Nomex 蜂窝芯的力学响应, 结果表明, 蜂窝的坍塌行为是由于酚醛树脂涂层发生了脆性断裂引起的。在蜂窝结构破坏行为方面: Yang 等[17] 对芳纶纸的剪切性能进行表征, 得到了纸蜂窝在复杂载荷下的破坏模式; Jang 等[18] 研究了膨胀蜂窝的屈曲和破碎, 发现在位移控制压缩作用下, 蜂窝板状壁面首先发生弹性屈曲。后屈曲响应最初表现为相对刚性和稳定, 但非弹性作用逐渐使其软化, 在相对较低的应力水平下, 进一步压缩将导致蜂窝壁的渐进式手风琴折叠。Shan 等[19] 采用实验和数值模拟方法, 研究了不同高度纸蜂窝在高、低应变率下的力学行为, 发现厚度为 2 mm 的纸蜂窝的屈服强度低于大尺寸试样, 表现出异常尺寸效应, 产生该效应的原因是纸蜂窝破坏模式的变化。Petras 等[20] 通过三点弯实验以及经典理论模型研究了 Nomex 蜂窝芯夹层梁的破坏模式, 发现蜂窝单元尺寸从 3 mm 增加到 13 mm, 证明了大跨度梁从表面屈服到胞内屈曲的转变。Castanié等[21] 提出了一种多层次的方法预测低速冲击下金属皮夹层结构的力学响应, 该方法采用 Mindlin 板单元进行建模, 考虑了夹层弯曲过程中芯部发生的横向剪切。Wu 等[22] 通过实验研究了 Nomex 纸蜂窝夹层结构的静力性能和抗疲劳性能, 根据实验数据进行数值模拟研究, 对其破坏模式和破坏机理进行了分析。

上述研究主要针对高应变率和低应变率下蜂窝结构的变形过程, 对于中应变率下蜂窝结构的力学性能以及变形机制的研究较少。基于此, 本研究基于实验室研制的中应变率实验系统, 通过动态实验研究纸蜂窝结构在中应变率下的力学行为, 并采用数值模拟方法进行验证。

# 1　中应变率动态实验

## 1.1　实验样品和实验系统

实验材料为芳纶纸蜂窝。它是一种由高强度、高模量且耐磨性极佳的有机合成纤维制成的仿生蜂窝芯, 具有良好的耐热性、耐磨性和耐有机溶剂性, 该蜂窝具有六边形蜂窝单元, 蜂窝芯的基体纸密度为 1 100 kg/m$^3$。本研究利用图 1 所示的蜂窝板制作了直径为 14.50 mm、由 7 个蜂窝单元胞组成的蜂窝试件。单元胞的几何形状如图 1(a) 所示, 单元胞宽 $l$=2.75 mm, 胞角 $\theta$=30°, 壁厚 $h$ = 0.1 mm。共选择 4 种不同高度的试样, 即 (2.10±0.02) mm、(3.10±0.02) mm、(5.14±0.02) mm 和 (10.11±0.02) mm, 如图 1(b) 所示。




(a) Paper honeycomb cell structure　　(b) Samples of different sizes

图 1　纸蜂窝样品

Fig. 1　Paper honeycomb samples

中等应变率下的材料实验研究难度较高, 主要原因是该应变率范围内系统的响应不同于高、低应变率, 缺乏通用性较好的实验装置[23]。递进式凸轮加载实验装置如图 2 所示。该实验装置主要由伺服电机提供动能, 通过皮带轮传递至飞轮完成能量储备, 飞轮通过离合器控制凸轮的旋转, 凸轮通过位移压缩控制杆的运动完成对样品的加载。利用该装置进行纸蜂窝结构的中应变率压缩实验, 并结合高速相机拍摄实验过程中纸蜂窝结构的破坏过程, 拍摄时间间隔为 2 ms。

递进式凸轮加载的中应变率实验系统如图 3 所示。采用应变片测试系统获得加载过程中杆上的

载荷信号，从而得到试样两端的应力-时间曲线 $\sigma(t)$；通过 VISAR 系统获得杆端的位移数据，从而得到试样的应变-时间曲线 $\varepsilon(t)$，两者结合即可获得实际的应力-应变曲线。对于同一试样，通过调节伺服电机的频率改变加载凸轮的转速，从而改变应变率。

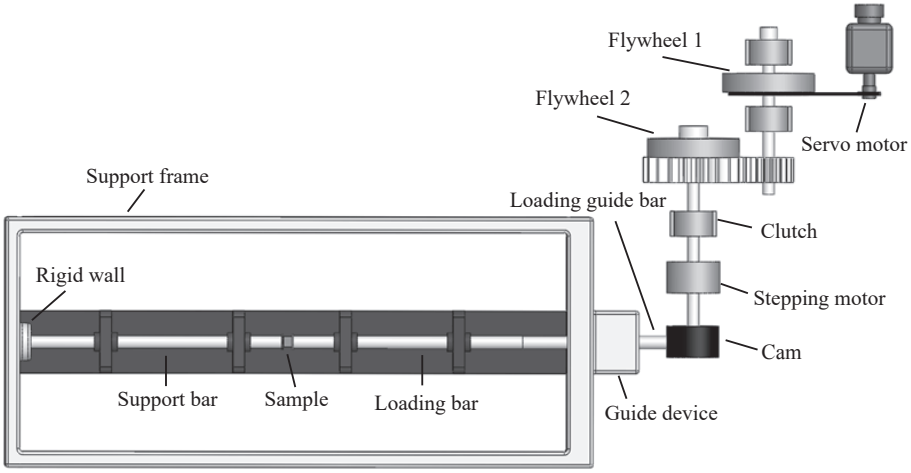
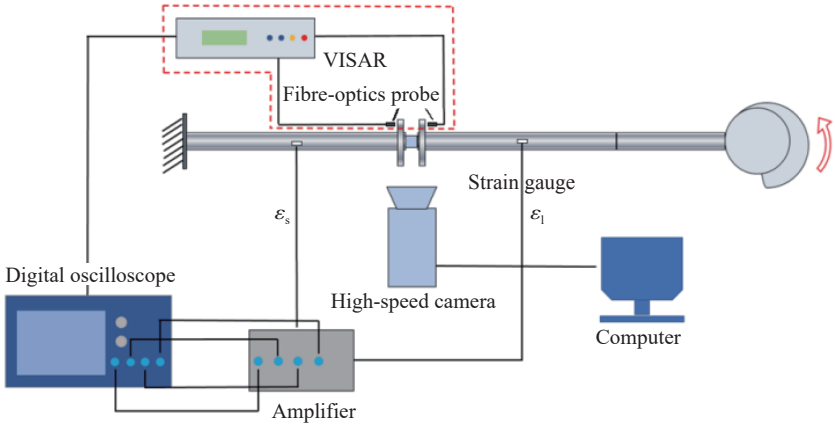
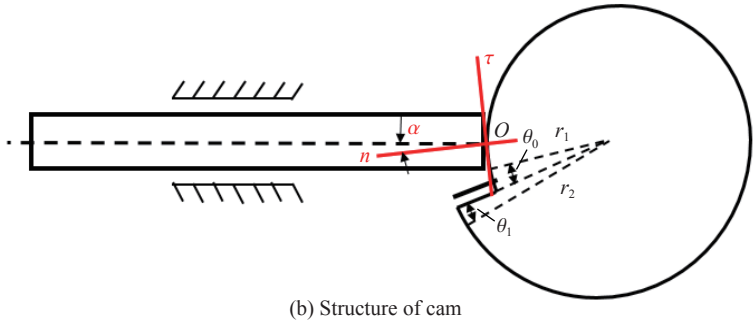



图 2　递进式凸轮加载的中应变率实验装置

Fig. 2　Mediate strain rate experimental device with progressive cam loading




(a) Experimental device




(b) Structure of cam

图 3　递进式凸轮加载的中应变率实验系统

Fig. 3　A mediate strain rate experimental system with progressive cam loading

试件两端的应力为

$$\sigma(t)=\frac{E_{\mathrm{b}}A_{\mathrm{b}}}{2A_{\mathrm{S}}}[\varepsilon_{\mathrm{I}}(t)+\varepsilon_{\mathrm{s}}(t)] \tag{1}$$

式中：$E_{\mathrm{b}}$ 和 $A_{\mathrm{b}}$ 分别为杆件的弹性模量和横截面积，$A_{\mathrm{S}}$ 为纸蜂窝样品的面积，$\varepsilon_{\mathrm{I}}$ 为加载杆的应变，$\varepsilon_{\mathrm{s}}$ 为支

撑杆的应变。

根据试样两个端面的运动速度(激光干涉测速系统的结果)计算试件的应变率

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}t} = [v_1(t) - v_s(t)]/L_S \tag{2}$$

式中：$v_1$ 和 $v_s$ 分别为加载杆和支撑杆夹持试样端头的运动速度，$L_S$ 为试样的轴向长度。由此得到试样的轴向应变

$$\varepsilon = \int_0^t \dot{\varepsilon}\mathrm{d}t \tag{3}$$

## 1.2　实验结果

图 4 给出了 4 种尺寸纸蜂窝试样通过中等应变率实验得到的应力-应变曲线。可以看出，应力-应变曲线可以分为 3 个阶段：拟线弹性压缩阶段(*OB*)、应力降阶段(*BC*)和后续体现残余强度的应力平台阶段(*CD*)。从图 4 中也可以清晰看到 2.10 mm 尺寸试样的下降段与其他 3 种尺寸不同，即应力随着应变的增加平缓下降，没有发生应力坍塌，后续也没有明显的平台段。表 1 为曲线的峰值状态和应力降等信息，可以看出：随着应变率的升高，峰值应力逐渐增大，对应的应变逐渐减小，应力下降幅值也逐渐增大。

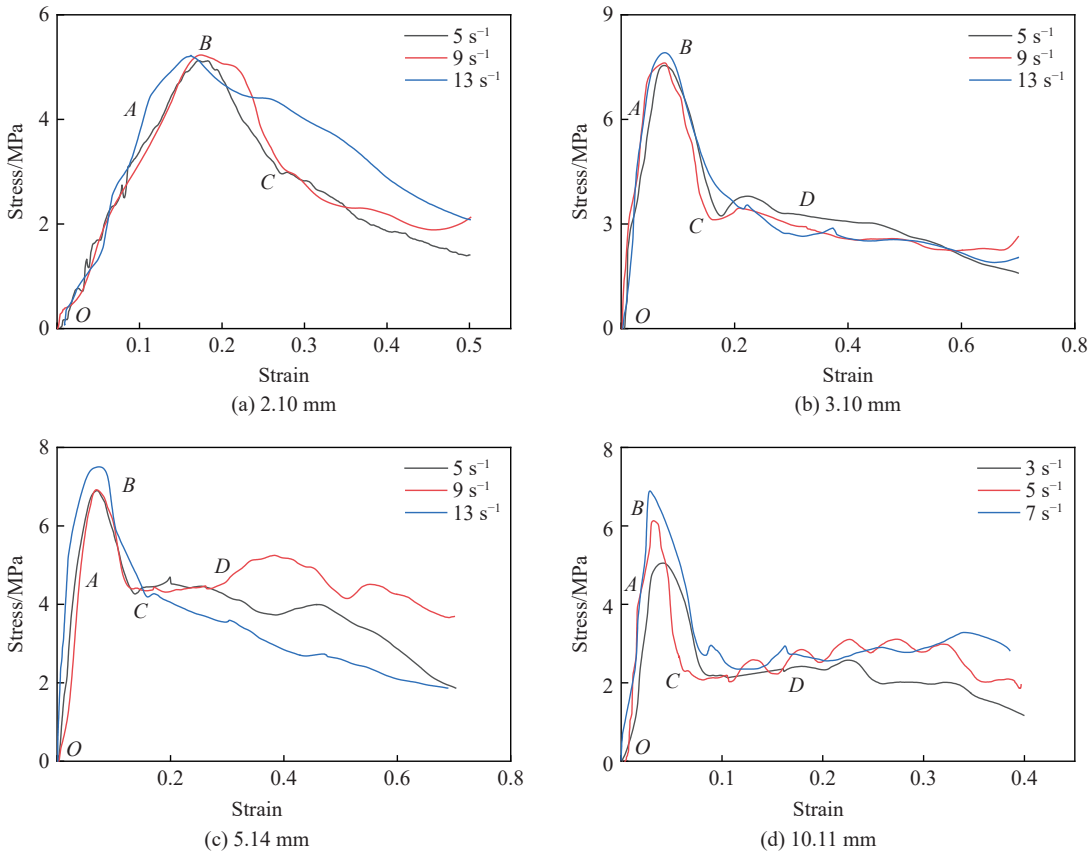



图 4　中应变率下不同厚度样品的应力-应变曲线

Fig. 4　Stress-strain curves of samples with different thicknesses at medium strain rate

图 5 所示为 4 种尺寸试样在应变率 5 $s^{-1}$ 下的应力-应变曲线对比，可以发现：在中应变率下，当纸蜂窝试样尺寸大于 3.10 mm 时，峰值应力随着试样高度的增大而减小，而 2.10 mm 试样的峰值应力均低于大尺寸试样。纸蜂窝结构表现出明显的异常尺寸效应，与 Shan 等[19] 在高、低应变率下得到的结论相同。由此认为，在中等应变率范围内，2.10 mm 试样表现出与其他尺寸试样不同的失效模式。

表 1　纸蜂窝结构的实验结果

Table 1　Experimental results of paper honeycomb structure

| Sample size/mm | Strain rate/$s^{-1}$ | The peak state | | Stress-drop/MPa |
|---|---|---|---|---|
| | | Stress/MPa | Strain | |
| 2.10 | 5 | 5.11 | 0.174 | |
| | 9 | 5.21 | 0.173 | |
| | 13 | 5.22 | 0.162 | |
| 3.10 | 5 | 7.54 | 0.077 | 4.30 |
| | 9 | 7.60 | 0.076 | 4.48 |
| | 13 | 7.92 | 0.076 | 4.49 |
| 5.14 | 5 | 6.90 | 0.070 | 2.53 |
| | 9 | 6.92 | 0.069 | 2.54 |
| | 13 | 7.49 | 0.069 | 3.29 |
| 10.11 | 3 | 5.04 | 0.040 | 2.84 |
| | 5 | 6.13 | 0.039 | 3.83 |
| | 7 | 6.88 | 0.028 | 4.18 |

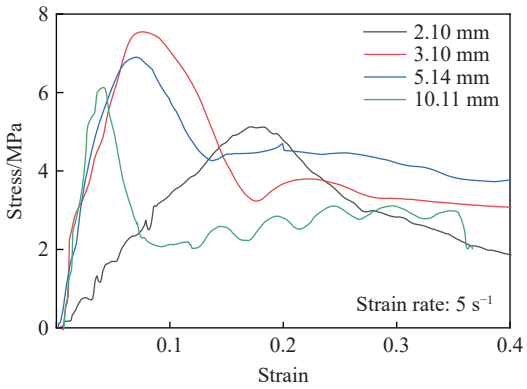



图 5　不同尺寸纸蜂窝试样的应力-应变曲线对比

Fig. 5　Comparison of stress-strain curves of paper honeycomb samples of different sizes

## 2　中应变率下纸蜂窝结构的失效机制

数字图像相关法(digital image correlation, DIC)是一种较为成熟的应变测量方法，不但可以得到视图全场变形的分布，还可以用于局部变形分析，在追踪变形和破碎方面具有明显的优势。目前，DIC 方法已广泛应用于材料的静态和动态全场变形测量中。DIC 方法是对实验过程中获得的高速摄影图片进行计算，通过变形前后试样表面散斑点的位置变化获得试样整场的变形分布。

在蜂窝试样的破坏过程中，有 2 种局部破坏模式，即面内剪切皱折和面外壁屈曲[18, 24]。从图 4 所示的结果可知：中应变率下 2.10 mm 试样的应力-应变曲线中，应力降低表现出与大尺寸试样[19]明显不同的结果。由此可以认为，不同高度的纸蜂窝结构在中应变率下表现出不同的失效变形模式。如图 6 所示，针对纸蜂窝结构的中应变率加载过程拍摄了高速摄影图片并给出了对应的应力-应变曲线。考虑到中应变率下各种尺寸试样的加载时间，设置拍摄帧率为 500 $s^{-1}$ 能够满足需求，选取其中 6 帧说明纸蜂窝试样的破坏过程。以图 6(d) 所示的 10.11 mm 试样的加载变形过程为例，试样表面发生了上述 2 种局部破坏模式，即面内剪切皱折(红色椭圆标记)和面外壁屈曲(红色矩形标记)。为了区分 2 种模式且定量描述试样的局部破坏过程，考虑面内剪切皱折以及面外壁屈曲引起的局部位移，利用 DIC 方法计算图 6 中标记区域的局部位移(紫蓝两条线)，从而对破坏过程进行评估。

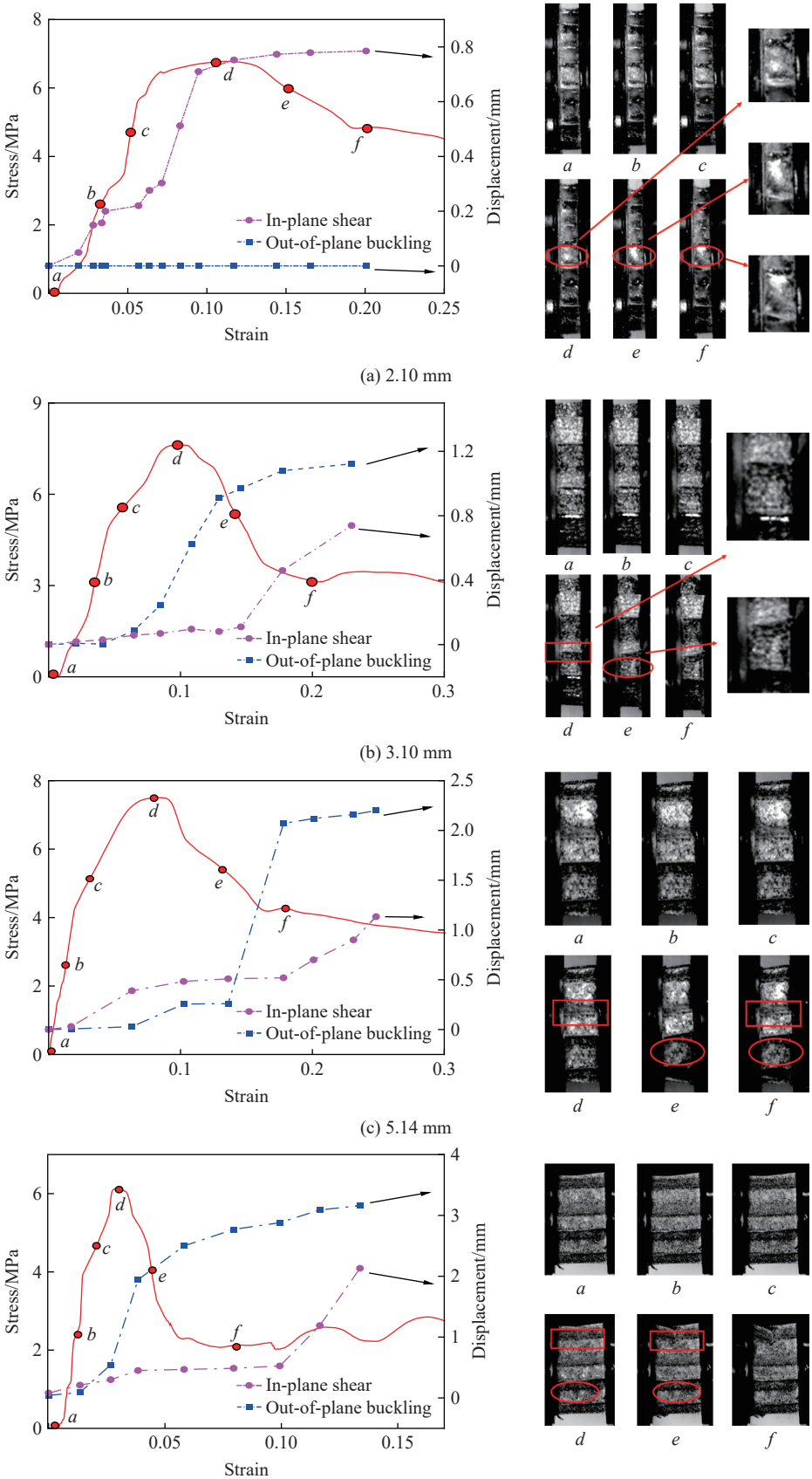



图 6　中应变率下纸蜂窝的变形过程

Fig. 6　Deformation process of paper honeycomb at medium strain rate

在弹性变形阶段（*a* 点～*b* 点），这 2 种模式下的位移均很小，并且随着外加载荷的增加而略有增大。面外壁屈曲引起的局部位移（蓝色虚线）在弹性变形末段开始增大，在应力下降阶段（*c* 点～*d* 点）持续增大，在平台阶段（*e* 点～*f* 点）趋于平缓；而面内局部剪切位移（紫色虚线）在弹性变形末段和应力下降阶段增长缓慢，在平台阶段明显增大。在中应变率加载过程中，纸蜂窝结构的这 2 种失效模式以不同的趋势发展。应力-应变曲线明显偏离弹性曲线 *OA* 是由于面内局部剪切位移和面外壁局部屈曲位移开始发展造成的，应力突然减小主要是由于面外局部位移的发展造成的，而应力下降后平台阶段的破坏模式主要是面内剪切。3.10 和 5.14 mm 试样的加载破坏过程分别如图 6(b) 和图 6(c) 所示，与 10.11 mm 尺寸试样的破坏过程结果一致，中应变率下纸蜂窝结构的失效破坏机制是由面外壁屈曲转换为面内剪切破坏。这 3 种样品在峰值状态上表现出正常的尺寸效应。然而，对于图 6(a) 所示的 2.10 mm 试样，面外壁屈曲引起的局部位移（蓝色虚线）基本上没有发生较大增长，而面内局部剪切位移（紫色虚线）则随着外加载荷的增加而明显增大；试样的破坏阶段相对较长，应力在下降阶段逐渐减小，主要破坏模式为面内局部剪切，原因可能是 2.10 mm 试样的壁面高宽比小于 1，加载过程中壁面的“长边”垂直于压缩方向，面内承受的载荷占比大，导致先发生面内剪切破坏，同时壁面高度较低也限制了屈曲的发展。破坏模式发展变化的不同即是产生异常尺寸效应的主要原因。

上述结果表明，在中等应变率下，随着试样尺寸的增大，纸蜂窝试样的破坏模式由面内局部剪切破坏向 2 种破坏模式兼具转变，即由面外壁屈曲破坏转变为面内剪切破坏，与高、低应变率下纸蜂窝的失效机制明显不同，低应变率下 2 种局部破坏模式共同发展，高应变率下 2 种局部破坏模式形成了相互竞争关系[19]。

## 3　中应变率下纸蜂窝结构失效的数值分析

### 3.1　数值模型

通过数值模拟方法研究中等应变率下纸蜂窝结构的力学性能，在 ABAQUS 软件中建立数值计算模型，利用显式动力学方法进行求解。纸蜂窝的建模方法：一种是等效成与蜂窝板长宽高相同的长方体实体模型，需要获取纸蜂窝非各向同性材料的材性参数；另一种是建立与实验相同的多孔蜂窝结构，需要获取纸蜂窝基体的材料参数[25]。

考虑到需要观察纸蜂窝结构的变形失效过程，这里选择第 2 种模型。根据基体芳纶纸材料的应力-应变行为，将其作为各向同性材料进行数值计算，在 ABAQUS 中使用各向同性硬化部分描述材料的塑性[26–27]。

模型装配体及网格划分如图 7 所示。模型包含 2 根杆和纸蜂窝试样，蜂窝试样被 2 根杆夹在中间，2 根杆的材料为钢材，材料参数：密度为 7 800 kg/m$^3$，弹性模量 $E$=210 GPa，泊松比为 0.3。单个蜂窝试样有 7 个单胞，基体芳纶纸的材料性能参数见表 2。在该模型中，杆和蜂窝试样均采用减缩积分的 8 节点三维线性实体单元建模，纸蜂窝结构模型的网格尺寸均为 0.1 mm，相互作用部分采用一般通用接触，摩擦系数为 0.1。边界条件为支撑杆的末端固定，给加载杆一个恒定的速度。

**表 2　纸蜂窝基体的材料参数**

**Table 2　Paper honeycomb matrix’s material parameters**

| Poisson’s ratio | Elastic modulus/GPa | Compression strength/MPa | Density/(kg·m$^{-3}$) |
|---|---|---|---|
| 0.2 | 4 | 180 | 1 100 |

然后，对数值模型的可靠性进行验证。图 8 为 10.11 mm 试样的计算结果与实验结果的对比，可以清晰地看到：数值计算与实验所得的应力-应变曲线的变化趋势基本一致，吻合度很高；数值模型得到的应力高于实验结果可能是由于数值模型没有考虑纸蜂窝的缺陷和不规则性，应力的误差为 7%。

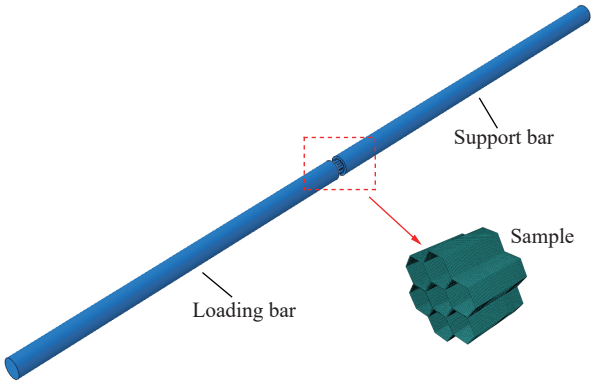



图 7　中应变率下的有限元模型

Fig. 7　Finite element model with medium strain rate

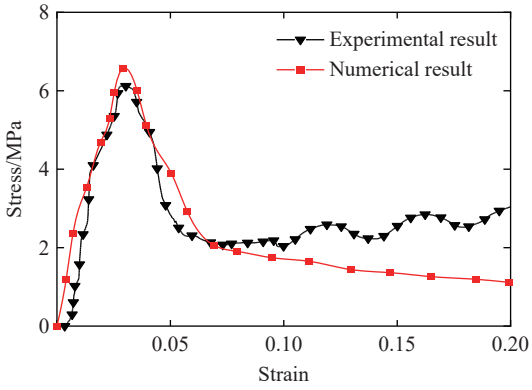


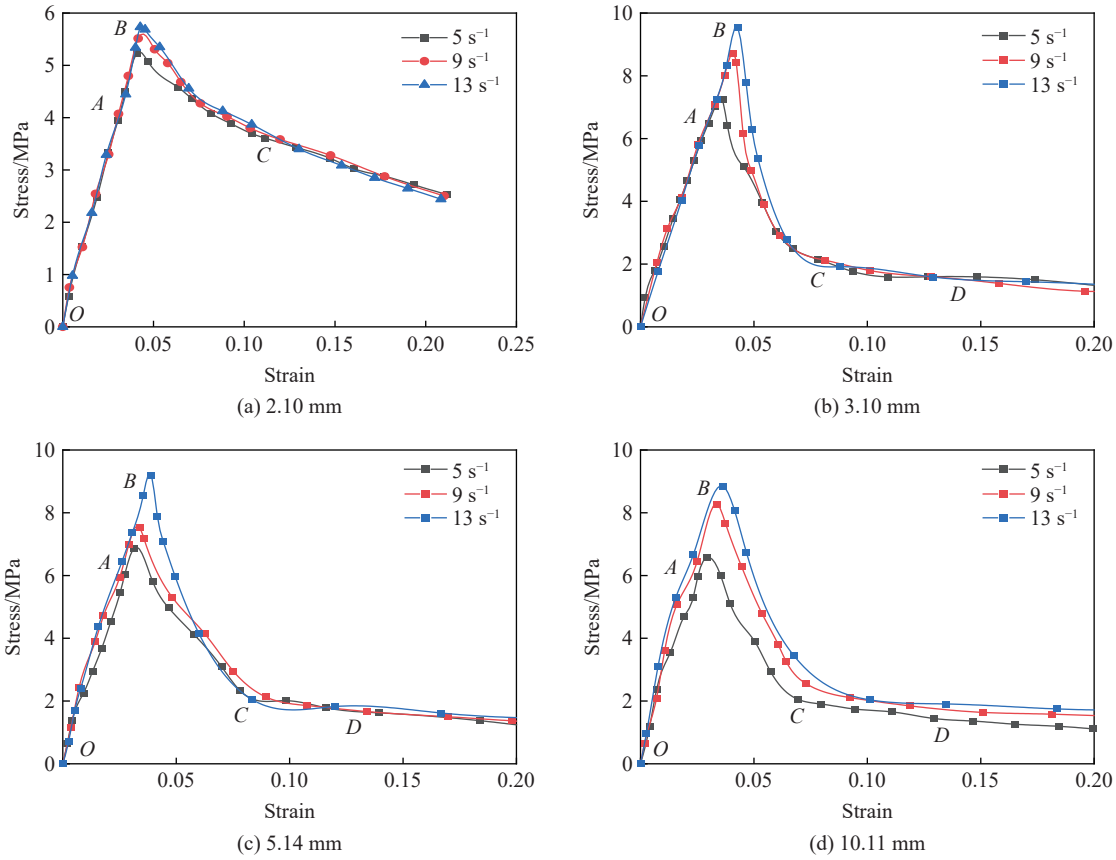

图 8　模型可靠性验证

Fig. 8　Model reliability verification

## 3.2　数值模拟结果

### 3.2.1　应变率效应

图 9 给出了 4 种尺寸纸蜂窝在中等应变率下的数值计算初步结果。可以看出，曲线大致分为 3 个阶段：线弹性压缩阶段、应力降阶段和平台阶段。该过程与纸蜂窝材料的典型压缩过程基本一致。线弹性阶段 *OB* 为纸蜂窝结构的弹性压缩阶段；*BC* 段为纸蜂窝结构的破坏变形阶段，应力发生明显下降；后续的 *CD* 平台段表明，在蜂窝结构破坏变形后仍有一定的残余强度。从图 9 中还可以看出：随着应变率升高，峰值应力和应变逐渐增大，应力的降幅也增大，与实验结果的变化规律相同。




(a) 2.10 mm　(b) 3.10 mm

(c) 5.14 mm　(d) 10.11 mm

图 9　数值模拟结果

Fig. 9　Numerical simulation result

### 3.2.2　异常尺寸效应

从图 9 中可以清晰地看到，2.10 mm 试样的应力-应变曲线的应力下降阶段与其他尺寸试样不同，与实验结果一致。分析图 10 所示的 4 种试样在中应变率下的应力-应变曲线可得：当试样尺寸大于 3.10 mm 时，随着试样的增高，纸蜂窝结构的峰值应力逐渐减小，2.10 mm 试样的峰值应力均低于大尺寸试样，与实验结果相同。在中应变率下，不同尺寸试样纸蜂窝结构的峰值应力表现出明显的异常尺寸效应。

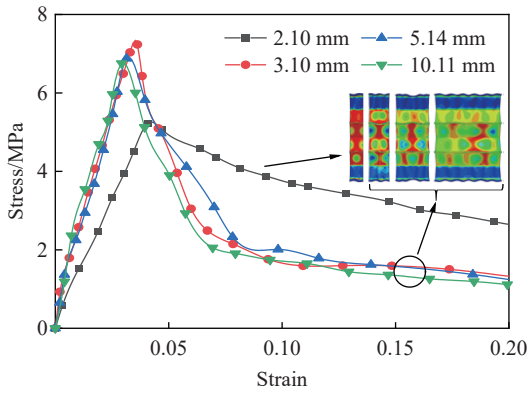



图 10　不同尺寸纸蜂窝试样的应力-应变曲线对比

Fig. 10　Comparison of stress-strain curves of paper honeycomb samples of different sizes

### 3.2.3　失效过程

数值模拟的计算总时间为 40 ms，选取中应变率加载过程中能够体现不同高度纸蜂窝结构变形特征的结果云图，如图 11 所示。可以看到：3.10 mm 以上尺寸试样均为先被加载杆压紧达到应力峰值，之后应力快速下降，主要是因为结构的单元胞壁发生了屈曲；在应力平台阶段，单元胞壁已经无法起到主要承载作用，单胞壁内的剪切破坏为主要变形模式；而 2.10 mm 试样的变形过程主要是发生了面内剪切破坏，没有明显的细胞壁屈曲，与 DIC 方法计算所得的结果基本一致，进一步说明了中应变率下纸蜂窝结构的失效机制。

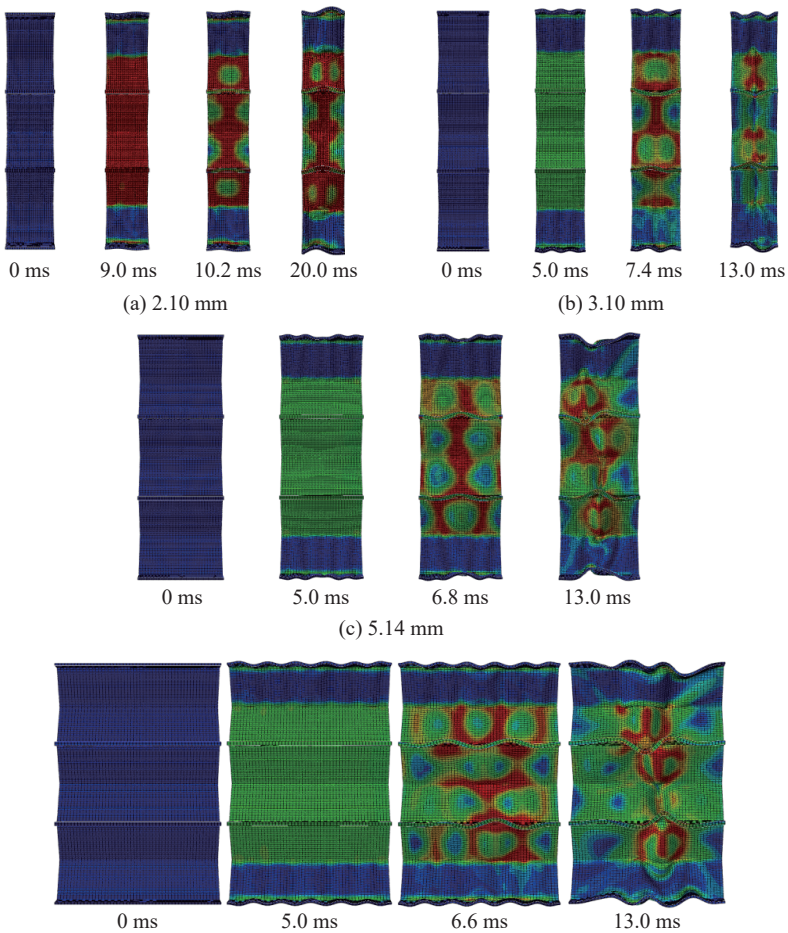



图 11　纸蜂窝的变形过程

Fig. 11　Paper honeycomb deformation process

### 3.2.4　单元胞宽的影响

结合相对密度衡量胞宽的影响，讨论蜂窝结构单元胞宽 $l$ 对结构本身力学性能的影响，相对密度[28]为

$$\rho = \frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2h}{l(1+\sin\theta)\cos\theta} \tag{4}$$

式中：$\rho^*$和 $\rho_s$ 分别为蜂窝结构所用材料的总密度和固体材料密度，正六边形胞角 $\theta$ 为 30°。

利用 3.1 节中的数值模型进行计算，胞宽 $l$ 选取 1.83、2.10、2.40 和 2.75 mm，结果如图 12 所示，每条曲线对应的应变率均为 5 $s^{-1}$。从图 12 中可以得到：4 种尺寸试样的计算结果均表明，随着单元胞宽的减小，结构表现出的弹性模量增大，峰值应力和峰值应变也逐渐增大，说明单元胞宽的减小对蜂窝结构的强度具有积极的影响。需要注意的是，随着胞宽减小，蜂窝结构的相对密度增大。且可以观察到，对于不同尺寸的蜂窝结构，改变胞宽后的应力-应变曲线变化趋势几乎没有变化。由此认为，胞宽不会对结构的失效模式产生显著影响。

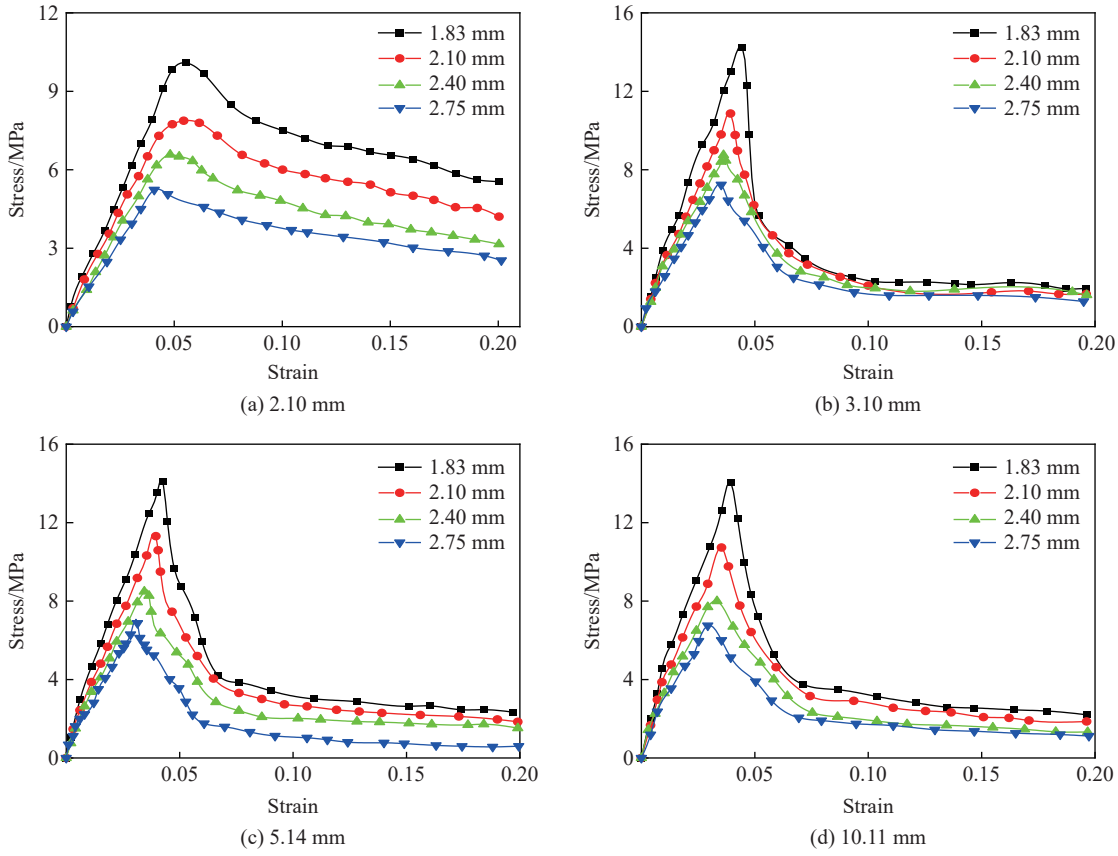



图 12　胞宽对蜂窝结构的影响

Fig. 12　Effect of cell width on cellular structure

## 4　结　论

通过动态压缩实验研究了纸蜂窝结构在中应变率下的力学行为，结合高速相机和 DIC 方法分析其失效机制，利用 ABAQUS 软件结合数值模拟方法进行验证，分析了单胞宽度对蜂窝结构力学性能的影响，具体结论如下。

(1) 随着应变率的增大，纸蜂窝结构的峰值应力以及应力降幅逐渐增大，表现出明显的应变率效应，数值计算结果也验证了这一点。

(2) 2.10 mm 试样的屈服强度低于大尺寸试样，表现出异常尺寸效应，应力-应变曲线的应力下降阶段也不相同。主要原因是，随着试样尺寸的增大，结构的破坏模式发生了变化。2.10 mm 试样的主要破

坏模式为面内局部剪切破坏，大尺寸试样为面外壁屈曲破坏转变为面内剪切破坏。

(3) 随着蜂窝结构胞宽的减小，纸蜂窝结构的弹性模量、峰值状态的应力和应变都逐渐增大，说明胞宽的减小对蜂窝结构的强度有积极的影响。胞宽的改变不会对蜂窝结构的失效模式产生显著影响。

## 参考文献：


[1] MIAO C H, XU S L, SONG Y P, et al. Influence of stress state on dynamic breakage of quartz glass spheres subjected to lower velocity impacting [J]. Powder Technology, 2022, 397: 117081.

[2] CHEN M D, XU S L, YUAN L Z, et al. Influence of stress state on dynamic behaviors of concrete under true triaxial confinements [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 253: 108399.

[3] 卜乐虎, 王鹏飞, 武杨帆, 等. 基于卷积神经网络的两相复合结构动态力学性能研究 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(3): 034201.
BU L H, WANG P F, WU Y F, et al. Research on dynamic mechanical properties of two-phase composites based on convolutional neural network [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(3): 034201.

[4] 薛晓, 乔禹, 王鹏飞, 等. 碳纳米管纤维的动态拉伸力学性能研究 [J]. 实验力学, 2020, 35(5): 811–819.
XUE X, QIAO Y, WANG P F, et al. Dynamic tensile mechanical properties of carbon nanotube fiber [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(5): 811–819.

[5] HUANG J, XU S, YI H, et al. Size effect on the compression breakage strengths of glass particles [J]. Powder Technology, 2014, 268: 86–94.

[6] SUN J B, FANG H. The analysis of crashworthiness and dissipation mechanism of novel floating composite honeycomb structure against ship-OWT collision [J]. Ocean Engineering, 2023, 287: 115819.

[7] HOU W B, SHEN Y X, JIANG K, et al. Study on mechanical properties of carbon fiber honeycomb curved sandwich structure and its application in engine hood [J]. Composite Structures, 2022, 286: 115302.

[8] WANG J F, SHI C Y, YANG N, et al. Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body [J]. Composite Structures, 2018, 184: 1189–1196.

[9] CLARKE D J, IMEDIEGWU C, MOAT R, et al. A systematic numerical and experimental study into the mechanical properties of five honeycombs [J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 264: 110895.

[10] XU M C, ZHAO Z A, WANG P D, et al. Mechanical performance of bio-inspired hierarchical honeycomb metamaterials [J]. International Journal of Solids and Structures, 2022, 254/255: 111866.

[11] WANG Z G, LI Z D, XIONG W. Numerical study on three-point bending behavior of honeycomb sandwich with ceramic tile [J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 167: 63–70.

[12] ZHOU H, XU P, XIE S C, et al. Mechanical performance and energy absorption properties of structures combining two Nomex honeycombs [J]. Composite Structures, 2018, 185: 524–536.

[13] HEIMBS S, SCHMEER S, MIDDENDORF P, et al. Strain rate effects in phenolic composites and phenolic-impregnated honeycomb structures [J]. Composites Science and Technology, 2007, 67(13): 2827–2837.

[14] KAMAN M O, SOLMAZ M Y, TURAN K. Experimental and numerical analysis of critical buckling load of honeycomb sandwich panels [J]. Journal of Composite Materials, 2010, 44(24): 2819–2831.

[15] WANG D M. Impact behavior and energy absorption of paper honeycomb sandwich panels [J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(1): 110–114.

[16] LIU L Q, WANG H, GUAN Z W. Experimental and numerical study on the mechanical response of Nomex honeycomb core under transverse loading [J]. Composite Structures, 2015, 121: 304–314.

[17] YANG W C, ZHANG X F, YANG K J, et al. Shear property characterization of aramid paper and its application to the prediction of honeycomb behaviors [J]. Composite Structures, 2020, 254: 112800.

[18] JANG W Y, KYRIAKIDES S. On the buckling and crushing of expanded honeycomb [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2015, 91: 81–90.

[19] SHAN J F, XU S L, ZHOU L J, et al. Dynamic fracture of aramid paper honeycomb subjected to impact loading [J]. Composite Structures, 2019, 223: 110962.

[20] PETRAS A, SUTCLIFFE M P F. Failure mode maps for honeycomb sandwich panels [J]. Composite Structures, 1999, 44(4): 237–252.

[21] CASTANIÉ B, BOUVET C, AMINANDA Y, et al. Modelling of low-energy/low-velocity impact on Nomex honeycomb

sandwich structures with metallic skins [J]. International Journal of Impact Engineering, 2008, 35(7): 620–634.
[22] 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.
[23] 苗春贺, 徐松林, 马昊, 等. 递进式凸轮加载的中等应变率实验技术 [J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(3): 034101.
MIAO C H, XU S L, MA H, et al. An experimental technique for medium strain-rate loading by a progressive cam [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(3): 034101.
[24] KESHAVANARAYANA S, THOTAKURI M V. Off-axis compression behaviour of honeycomb core in WT-plane [J]. International Journal of Crashworthiness, 2009, 14(2): 173–181.
[25] 徐小村. GFRP/纸蜂窝复合材料的制备及力学性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
XU X C. Preparation and mechanical properties of GFRP/paper honeycomb composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.
[26] KADIR N A, AMINANDA Y, DAWOOD M S I S, et al. Numerical analysis of kraft paper honeycomb subjected to uniform compression loading [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 914: 012004.
[27] KILCHERT S V. Nonlinear finite element modelling of degradation and failure in folded core composite sandwich structures [D]. Stuttgart: University of Stuttgart, 2013.
[28] ZHANG J, ASHBY M F. The out-of-plane properties of honeycombs [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 1992, 34(6): 475–489.

# Study on Mechanical Properties of Paper Honeycomb Structure at Medium Strain Rates

MA Hao[1], CHEN Meiduo[1], YUAN Liangzhu[1], WANG Pengfei[1], XU Songlin[1,2]

（1. *CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials*, *University of Science and Technology of China*, *Hefei* 230027, *Anhui*, *China*;
2. *The United Laboratory of High-Pressure Physics and Earthquake Science*, *Institute of Earthquake Science*, *China Earthquake Administration*, *Beijing* 100036, *China*）

**Abstract:** Combining the laser interferometry system, using the newly developed experimental device at medium strain rates to conduct the dynamic loading experiment of paper honeycomb structure. The purpose is to study the mechanical properties of paper honeycomb structure at medium strain rates. The deformation process and dynamic failure mechanism of paper honeycomb structure were obtained by high-speed photography and digital image correlation method. Numerical methods were used to further explore the dynamic failure mechanism. The results show that the paper honeycomb structure exhibits obvious strain rate effect. The yield strength of 2.10 mm thick paper honeycomb is obviously lower than the other three sizes, showing abnormal size effect. The descending section of stress-strain curve of 2.10 mm thick paper honeycomb is also different. The main reason for it is that the failure mode of paper honeycomb structure changes with the increase of sample size. The failure mechanism of paper honeycomb structure during the loading process at medium strain rates is the change of two failure modes, namely from out-of-plane buckling to in-plane shear. The effect of cell width on mechanical properties of the structure was analyzed by numerical model. This study is a good reference significance for the optimal design of thin-walled structures.

**Keywords:** medium strain rate; paper honeycomb; failure mechanism; out-of-plane buckling; dynamic response