

剪切增稠液填充碳纤维纸蜂窝的失效机理与缓冲性能*

张弘弛¹, 龙舒畅¹, 吴志斌², 马辛源³, 杨杰²

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641;

2. 中国商飞上海飞机设计研究院, 中国 上海 201210;

3. 华南理工大学轻工与工程学院先进造纸及纸基材料国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 碳纤维纸蜂窝具有轻质、高比强度和高比刚度等优势, 但其胞壁材料脆性较强, 在冲击载荷下易发生局部屈曲与突发破坏, 限制了结构缓冲吸能性能的进一步提升。针对该问题, 本文提出一种剪切增稠液填充碳纤维纸蜂窝 (STF-CFH) 复合结构, 将玉米淀粉基的剪切增稠液填充于蜂窝胞元内部, 并通过落锤冲击试验、高速摄影和耦合欧拉-拉格朗日 (Coupled Eulerian-Lagrangian, CEL) 有限元模拟, 研究其动态力学响应、失效模式及流固耦合增强机制。结果表明, STF 填充可显著改善碳纤维纸蜂窝的压溃稳定性, 使结构失效模式由局部化脆性破坏转变为更均匀的整体渐进压溃。在 40 J 冲击能量下, STF-CFH 复合结构的平均压溃力和压溃力效率分别提升至未填充蜂窝的 1.62 倍和 1.39 倍; 在 80 J 冲击能量下, 峰值力降低至未填充蜂窝的 0.76 倍, 平均压溃力和压溃力效率分别提高至 1.81 倍和 2.38 倍, 表现出吸能增效特性。数值结果进一步表明, 冲击过程中胞元内部 STF 在高剪切作用下发生黏度跃升, 并通过侧向约束和压力传递作用抑制蜂窝壁局部失稳, 促进更多胞元参与变形耗能。研究结果可为轻质自适应抗冲击蜂窝结构设计提供参考。

关键词: 剪切增稠液; 碳纤维纸蜂窝; 流固耦合; 失效模式; 能量吸收; 缓冲性能

中图分类号: V214.6

国标学科代码: 13035

文献标识码: A

Failure mechanism and cushioning performance of paper-based carbon fiber honeycombs filled with shear thickening fluid

ZHANG Hongchi¹, LONG Shuchang¹, WU Zhibin^{2*}, MA Xinyuan³, YANG Jie²

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China;

2. COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

3. School of Light Industry and Engineering, State Key Laboratory of Advanced Papermaking and Paper-based Materials, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Paper-based carbon fiber honeycombs exhibit advantages such as low density, high specific strength, and high specific stiffness. However, owing to the brittle nature of the cell-wall material, they are prone to local buckling and sudden failure under impact loading, which limits further improvement in their cushioning and energy-absorption performance. To

*收稿日期: 2026-03-16; 修回日期: 2026-09-21;

基金项目: 国家自然科学基金 (12672490);

第一作者: 张弘弛 (1998—), 男, 硕士研究生, 18851901531@163.com

通信作者: 吴志斌 (1984—), 男, 硕士, 研究员, wuzhibin@comac.cc

address this issue, a shear thickening fluid-filled paper-based carbon fiber honeycomb (STF-CFH) composite structure is proposed in this study, in which a corn starch-based shear thickening fluid is introduced into the honeycomb cells. Drop-weight impact tests, high-speed photography, and coupled Eulerian – Lagrangian (CEL) finite element simulations were conducted to investigate the dynamic mechanical response, failure mode, and fluid – structure interaction enhancement mechanism of the composite structure. The impact tests used a 7.07 kg impactor, and each loading condition was repeated at least three times. High-speed photography recorded the deformation process, while force – displacement curves were used to compare the cushioning responses. The results show that STF filling significantly improves the crushing stability of the paper-based carbon fiber honeycomb, transforming the failure mode from localized brittle failure to a more uniform global progressive crushing mode. Under an impact energy of 40 J, the mean crushing force and crushing force efficiency of the STF-CFH composite structure increase to 1.62 and 1.39 times those of the unfilled honeycomb, respectively. Under an impact energy of 80 J, the peak force decreases to 0.76 times that of the unfilled honeycomb, while the mean crushing force and crushing force efficiency increase to 1.81 and 2.38 times, respectively, demonstrating enhanced energy-absorption efficiency. Numerical results further indicate that, during impact, the STF inside the cells undergoes a sharp increase in viscosity under high shear, suppressing local instability of the honeycomb walls through lateral constraint and pressure transmission, and thereby promoting the participation of more cells in deformation and energy dissipation. The findings provide guidance for the design of lightweight adaptive honeycomb structures for impact protection.

Keywords: shear thickening fluid; paper-based carbon fiber honeycomb; fluid – structure interaction; failure mode; energy absorption; cushioning performance

1 引言

轻质多孔结构因具有高比刚度、高比强度和可设计的变形模式,被广泛用于航空航天、交通运输及冲击防护等领域^[1-5]。蜂窝、泡沫填充管、夹层结构及力学超材料等典型多孔结构在轴向压缩、冲击和复杂失效条件下可通过胞壁屈曲、塑性变形、芯层压溃及界面协同作用耗散外部能量,其力学行为与变形模式调控已受到广泛关注^[6-10]。已有研究表明,通过拓扑构型设计、梯度分布、泡沫芯材填充及夹层结构优化,可有效改善结构的载荷传递路径和能量吸收效率。然而,对于脆性薄壁多孔结构而言,冲击载荷下局部失稳、突发断裂和非均匀压溃仍会削弱其稳定耗能能力。因此,如何在保持轻质特性的同时提高结构的压溃稳定性和动态吸能效率,是轻质防护结构设计中的关键问题。

碳纤维蜂窝结构兼具低密度、高比强度和高比刚度等优势,是轻质吸能系统的重要候选结构^[11-12]。本文所研究的碳纤维纸蜂窝由碳纤维纸经叠层、拉伸和固化制备而成,在保留碳纤维优异力学性能的同时,具有较好的结构可设计性和轻量化优势。然而,受碳纤维胞壁脆性特征影响,该类蜂窝在动态冲击载荷下易发生局部屈曲、纤维断裂和突发性局部坍塌,导致变形区域集中,难以充分调动整体结构参与耗能。为改善上述问题,在蜂窝胞元内部引入功能填充介质、构建复合吸能结构,已成为调控蜂窝失效模式和提升缓冲性能的重要方法^[13-14]。

传统填充介质主要包括聚合物泡沫、弹性体和刚性填充材料等^[15-16]。软质填充材料能够为蜂窝胞壁提供一定侧向支撑,延缓局部屈曲,但其刚度和动态约束能力有限,在高载荷下难以显著提高结构承载稳定性;刚性填充材料虽可提升初始刚度和承载能力,但易引起应力集中和变形局部化,甚至诱发胞壁提前失稳。由此可见,传统软质或刚性填充策略难以同时兼顾低峰值载荷、高平台承载力和稳定渐进压溃^[17-18]。因此,亟需一种能够随加载速率自适应调节力学响应的功能填充介质,以实现冲击过程中的动态增强和失效模式调控。

剪切增稠液(shear thickening fluid, STF)是一类具有速率敏感特征的非牛顿流体^[19-21]。在低剪切速率下,STF主要表现为低黏度流体状态,有利于填充和适应蜂窝胞元变形;当受到冲击或高速

压缩时,局部剪切速率迅速升高,悬浮颗粒间相互作用增强,表观黏度发生跃升,并形成瞬时增阻效应^[22-23]。这种由“流态”向“高黏阻”状态转变的动态响应,使 STF 有望在冲击过程中同时发挥黏性耗散、压力传递和侧向约束作用,从而改善蜂窝胞壁的局部失稳行为。已有研究表明,将 STF 引入蜂窝、折纸结构及仿生夹层结构中,可显著提升多孔结构的抗冲击性能和能量吸收能力^[24-29]。

尽管 STF 填充多孔结构已显示出良好的动态增强效果,但现有研究多集中于金属蜂窝、聚合物多孔结构或柔性夹层体系。对于碳纤维纸蜂窝这类脆性复合材料薄壁多胞结构而言,其胞壁断裂、局部屈曲和多胞协同压溃行为会直接影响 STF 在受限胞元空间内的流动、增稠和压力传递过程。STF 与脆性蜂窝骨架之间的流固耦合机制、失效模式调控规律及协同耗能机理仍缺乏系统认识。因此,研究 STF 填充碳纤维纸蜂窝在冲击载荷下的动态响应,对于揭示脆性蜂窝结构的自适应增强机制和发展轻质抗冲击结构具有重要意义。

基于此,本文提出一种剪切增稠液填充碳纤维纸蜂窝(STF-CFH)复合结构,围绕其动态力学响应、失效模式和流固耦合增强机制开展研究。首先,通过流变试验、碳纤维纸拉伸试验和微观形貌观察表征 STF 及蜂窝胞壁材料的基本性能;随后,利用落锤冲击试验和高速摄影对比分析 STF 填充前后蜂窝结构的载荷响应和变形模式;进一步基于耦合欧拉-拉格朗日(CEL)方法建立流固耦合有限元模型,揭示冲击过程中 STF 局部黏度演化、压力传递与蜂窝骨架变形之间的协同耗能机制。

2 材料与试验方法

2.1 STF-CFH 复合结构制备

本研究所采用的碳纤维纸蜂窝,通过系统化的制备工艺以确保其结构一致性与性能可靠性。具体制备流程如下:首先,以碳纤维(Toray,T700 级)与间位芳纶浆(Teijin,Teijinconex®)为原料,采用湿法造纸工艺成型基体纸张,以实现纤维的均匀分布与良好成形性。随后对所得碳纤维纸在 330 °C 进行热压处理,进一步优化其致密性与力学性能。在此基础上,将多层碳纤维纸按精确交错结构粘接为未拉伸的蜂窝叠块。接着,对叠块进行树脂浸渍,并拉伸为具有规则六边形胞元的蜂窝结构,经高温固化实现树脂交联反应,从而永久定型蜂窝形态。最后,通过对蜂窝块进行精密切割,制得尺寸为 60 mm×60 mm×15 mm 的蜂窝试件(图 1a),约包含 180 个胞元。该蜂窝具备典型的六边形胞元拓扑,每一独立胞元由四条单层壁与两条粘合叠层壁构成。其几何构型由多个关键参数共同定义,包括蜂窝长度 L、宽度 W、高度 H、胞元边长 l、壁厚 t 及名义密度 ρ_{nom} 等,具体数值列于表 1。

表 1 碳纤维纸蜂窝设计参数

Table 1 Carbon Fiber Paper Honeycomb Design Parameters

名义密度 ρ_{nom} (kg/m ³)	尺寸 L/W/H(mm)	厚度 t(mm)	角度 $\theta(^{\circ})$	胞元边长 l (mm)
48	60/60/15	0.08	30	2.75

为制备 STF-CFH 复合结构,配制了 58%玉米淀粉悬浮液作为 STF(图 1b),将经干燥 4 h 的工业级玉米淀粉与蒸馏水按比例进行称量。在 25 °C 恒温环境下,先将蒸馏水置于烧杯中,于磁力搅拌器上以 300 r/min 的转速低速搅拌,同时将淀粉缓慢、均匀地加入其中,持续搅拌 20 min 以完成初步润湿与分散。随后,将搅拌速度提升至 500 r/min,进行高速剪切分散 30 min,以确保颗粒充分均匀悬浮并破坏初始团聚体。混合完成后,将悬浮液置于真空脱泡机中脱泡处理 15 min,以排除搅拌过程中卷入的气体。在获得稳定的 STF 后,开始复合结构的组装(图 1c)。首先将石蜡膜平整铺设于刚性平台表面,随后将裸 CFH 蜂窝置于石蜡膜中央区域,通过适度按压使蜂窝底面与膜材紧密贴合,形成底面有效密封。接着使用另一段石蜡膜沿蜂窝侧壁进行包覆,以形成完整的侧向密封。为避免边缘胞元在冲击过程中因密封不严导致的 STF 泄漏,并消除边界效应对核心测试区域变形行为

的影响, 本研究仅对蜂窝芯体的内部连续胞元区域进行 STF 填充, 边缘预留一周空胞元用于密封。填充区域尺寸为 $46.35\text{ mm} \times 52.04\text{ mm}$, 对应蜂窝内部完整且稳定的胞元阵列, 其具体范围如图 1c 所示。该设置可确保填充区域内的胞元在冲击过程中处于相对均匀的约束状态, 从而更准确地揭示 STF 与蜂窝骨架之间的流固耦合机理。随后, 使用注射器将预先制备的 STF 缓慢、逐格注入上述内部胞元中, 直至液面与蜂窝顶部平面齐平。最终获得可用于动态冲击性能测试的 STF-CFH 复合结构试样。

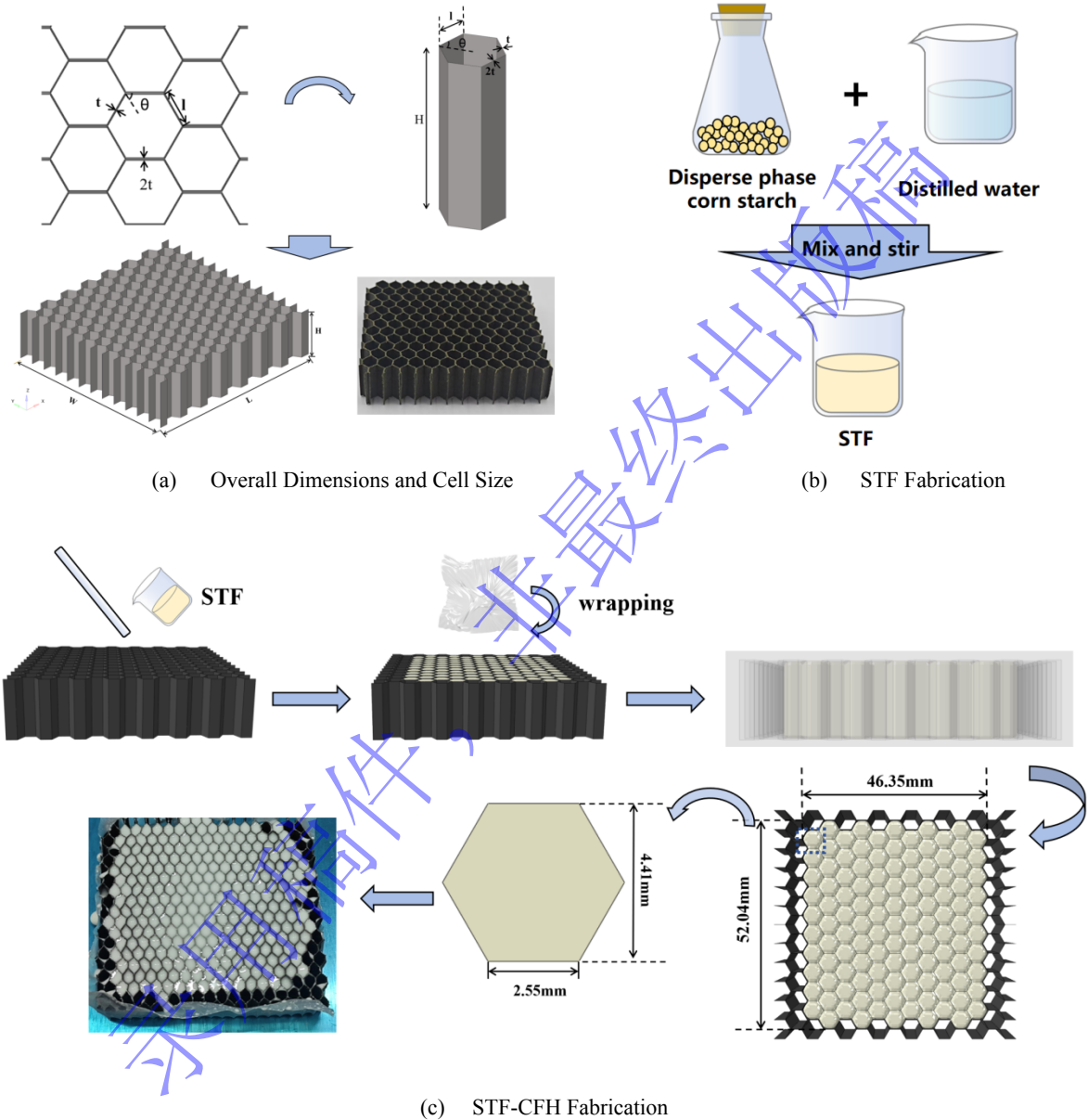


图 1 STF-CFH 复合结构制备过程

Fig. 1 Preparation Process of the Composite Structure

2.2 试验方法

2.2.1 剪切增稠液流变试验

为表征剪切增稠液的流变行为, 采用旋转流变仪 (Netzsch Kinexus, 德国) 进行测试 (图 2a)。选用直径为 40 mm 、锥角为 2.5° 的锯齿形锥板转子系统, 设定锥板间隙为 1 mm , 以适用于含微米级玉米淀粉颗粒 (约 $10\text{ }\mu\text{m}$) 悬浮液的黏度测量, 通过测试获取样品的黏度-剪切应变率曲线, 从而分析其剪切增稠特性及临界转变点。为配合 SEM 观察 (图 2b), 将少量 STF 样品迅速冷冻于液氮

中, 随后进行真空冷冻干燥处理, 以保留其微观结构形态。待样品完全干燥后, 将其固定于样品台处理后观察其颗粒分布状态与聚集形貌。

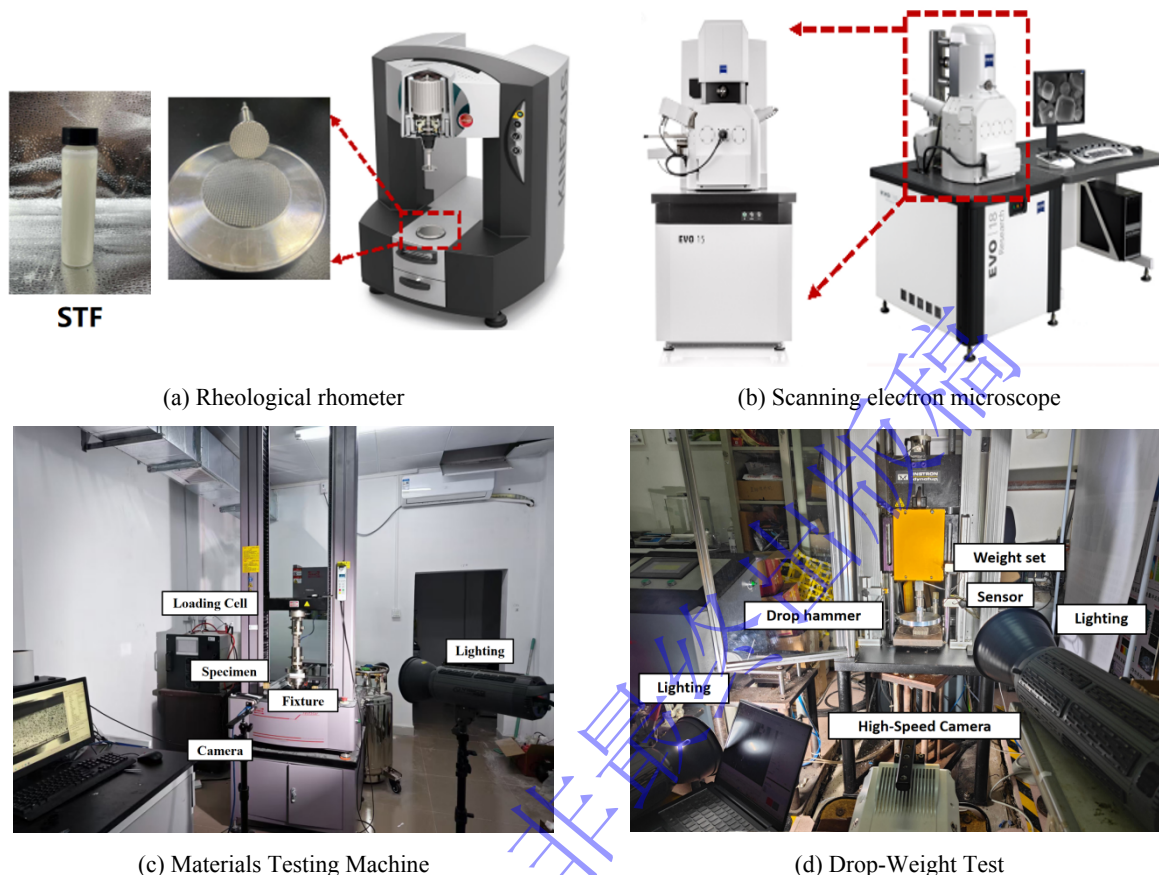


图2 实验仪器和设置

Fig. 2 Experimental apparatus and test setups

2.2.2 碳纤维纸拉伸试验

为系统表征碳纤维纸蜂窝结构的动态力学性能, 本研究对用于制备蜂窝芯体的经热压、浸胶固化后的碳纤维纸开展了多应变率下的单向拉伸实验。依据 ISO 1924-2 标准, 将试样加工为 $200\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的矩形条带, 并在万能试验机 (万测公司 TSE504C, 深圳) 上通过设置不同的加载速率, 实现 0.001 s^{-1} 、 0.002 s^{-1} 及 0.01 s^{-1} 三种应变率下的单轴拉伸加载 (图 3), 以涵盖准静态至低速动态的加载条件。实验过程中结合数字图像相关技术, 全程监测试样的全场变形演化。测得材料在准静态下的基本力学参数密度 $\rho = 300\text{ kg/m}^3$, 杨氏模量 $E_s = 0.56\text{ GPa}$, 拉伸强度 $\sigma_t = 87.9\text{ MPa}$, 失效应变 $\varepsilon = 0.018$, 泊松比 $\nu = 0.25$ 。材料未表现明显的应变率敏感性, 其拉伸强度与弹性模量均无改变。

为进一步揭示材料的微观失效机制, 本文通过电子显微镜对拉伸过程中的碳纤维纸进行了原位形貌观测。结果表明 (图 4), 碳纤维纸的破坏以纤维拉断为绝对主导。尽管在极少数区域观察到了轻微的界面脱粘现象, 但其发生范围与频率极低, 未改变材料整体由纤维断裂主导的失效本质。这种现象表明, 纤维与基体之间存在着良好的界面结合状态, 使得外部载荷能够高效传递至碳纤维增强相, 从而充分发挥其卓越的承载潜力, 在宏观上赋予了材料优异的拉伸强度。此外, 材料的断裂行为呈现出显著的脆性特征, 整体破坏过程缺乏明显的塑性屈服阶段。上述以纤维主导断裂的微观失效机制, 不仅合理地解释了材料宏观层面的高强度与高刚度特性, 也为后续数值模拟中材料本构模型及失效准则的建立提供了坚实的物理依据与参数标定基础。

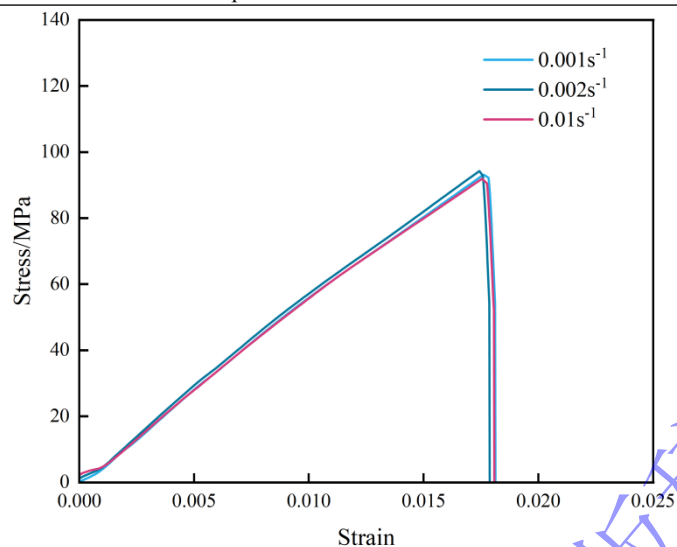


图 3 碳纤维纸应力应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of carbon fiber paper

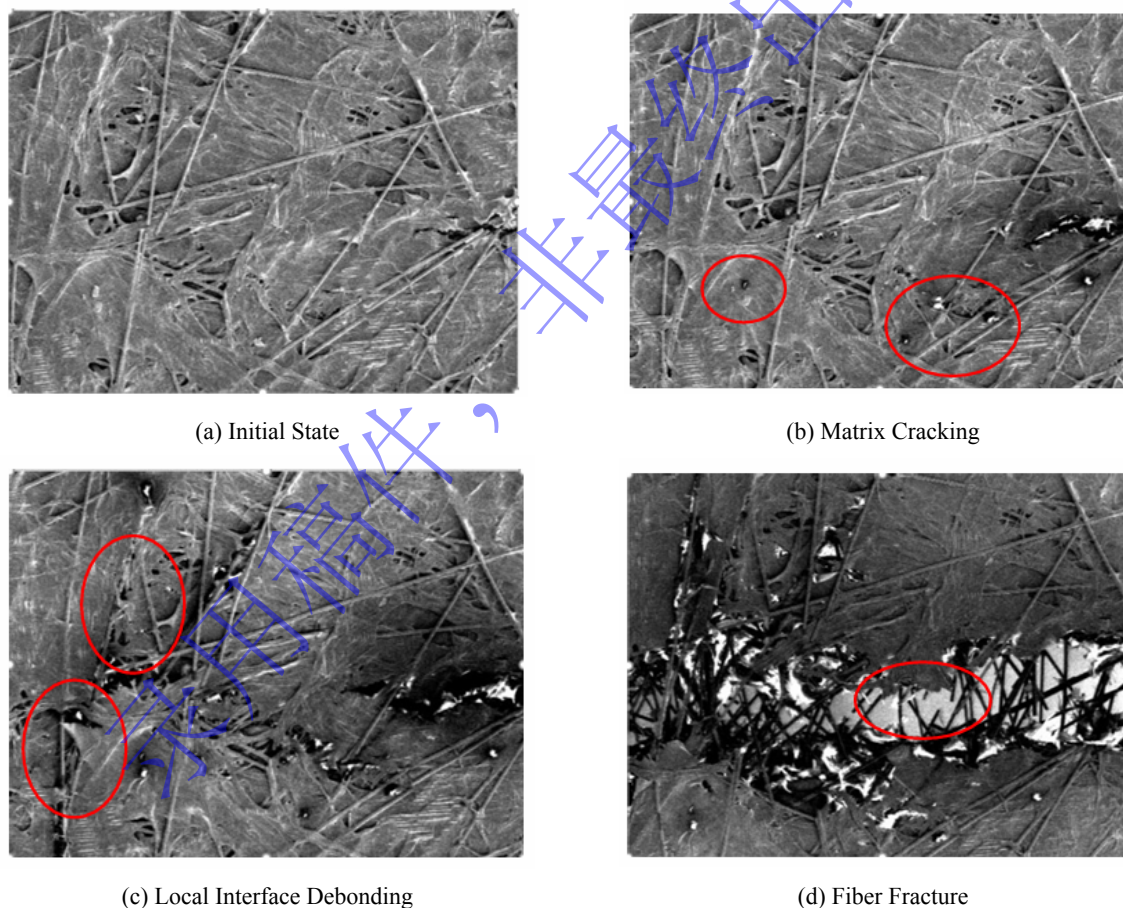


图 4 碳纤维纸张纤维断裂情况

Fig. 4 Fiber fracture in carbon fiber paper

2.2.3 碳纤维纸蜂窝压缩试验

为表征碳纤维纸蜂窝的压缩性能，进行面外压缩试验（图 2c）。试样尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ ，置于刚性水平支撑平台中心位置，由上端固定压头实施轴向压缩。实验中通过载荷传感器记录压缩载荷，横梁位移用于表征试样的整体压缩变形，并利用工业相机以 0.1 Hz 的采样频率全程记录

压缩过程中的变形演变。该系列试验旨在系统获取 CFH 蜂窝结构在不同应变率下的宏观力学响应，精确测定其压缩应力-应变曲线、平台应力及渐进失效模式，从而为后续建立相应的有限元模型提供关键的实验数据支持与验证依据。

2.2.4 碳纤维纸蜂窝及复合结构落锤冲击试验

本研究采用 Instron 9250HV 型落锤试验机 (Instron Corporation, USA) 对碳纤维蜂窝和填充 STF 后的复合结构开展低速冲击试验，以评估其动态力学行为。试验系统配置如图 2d 所示，落锤质量为 7.07 kg，冲击头底面采用圆形设计，能够完全覆盖试样表面。为精确捕捉冲击过程中的力学响应，冲击器上安装有加速度传感器以记录冲击加速度时程曲线，侧面配置速度传感器用于监测实时冲击速度。同时，置于试验装置前方的高速摄像系统以 20,000 fps 的采样频率完整记录试样的动态变形演化过程。通过调节落锤释放高度，实现冲击能量输入，具体工况参数设置见表 2。试验时，将 STF-CFH 复合结构试样置于刚性基座中心，使落锤以自由落体方式沿轴向对试样中心施加冲击。所有物理场数据采集系统同步触发，以确保冲击过程与响应记录的时序一致性。为保证试验结果的可靠性，每组冲击能量水平下均进行不少于三次重复试验。

表 2 落锤冲击试验工况参数
Table 2 Drop-weight impact test conditions

工况编号	试样类型	冲击能量	冲击速度
		E (J)	v (m/s)
#1	CFH (未填充)	40	3.36
#2	STF-CFH	40	3.36
#3	CFH (未填充)	80	4.76
#4	STF-CFH	80	4.76

3 STF-CFH 复合结构的有限元模型

3.1 剪切增稠液的流变特性

剪切增稠液作为复合结构的关键功能组分，其流变特性直接决定了结构在动态加载下的响应行为。在剪切作用下，颗粒之间产生强烈的机械互锁与摩擦接触，从而诱发显著的剪切增稠效应。为定量描述 STF 的流变行为，本文基于实验测得的黏度剪切应变率曲线（图 5），将其划分为三个特征区域，并针对每个区域分别建立分段黏度函数。该分段模型能够有效捕捉 STF 在不同剪切应变率下表现出的剪切变稀与剪切增稠行为，从而实现对复杂流变特性的精确描述。具体表达式如下所示。

$$\eta(\dot{\gamma}) = \begin{cases} \eta_I(\dot{\gamma}) = \eta_c + \frac{\eta_0 - \eta_c}{1 + \left[\left(K_I (\dot{\gamma}^2 / (\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_c)) \right) \right]^{n_I}} & \dot{\gamma} < \dot{\gamma}_c \\ \eta_{II}(\dot{\gamma}) = \eta_c + \frac{\eta_c - \eta_{\max}}{1 + \left[\left(K_{II} ((\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_c) / (\dot{\gamma}_c - \dot{\gamma}_{\max})) \right) \right]^{n_{II}}} & \dot{\gamma}_c \leq \dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_{\max} \\ \eta_{III}(\dot{\gamma}) = \frac{\eta_{\max}}{1 + \left[\left(K_{III} (\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_c) \right) \right]^{n_{III}}} & \dot{\gamma}_{\max} < \dot{\gamma} \end{cases} \quad (1)$$

其中, η_0 为零剪切应变率下的初始黏度; η_c 为剪切增稠发生前的黏度; $\eta_{\max}$ 为剪切应变率范围内达到的最大黏度; $\dot{\gamma}$ 为瞬时剪切应变率; $\dot{\gamma}_c$ 为剪切增稠起始临界剪切应变率; n 为流动行为指数, 用于调节不同流变区域的曲线斜率; K 为分段拟合参数, 用于调节各流变区间内黏度曲线的变化幅度。该分段模型的特点在于, 不再采用单一函数描述整个剪切速率范围内的黏度演化, 而是依据不同剪切区间内主导机制的差异, 分别建立对应的黏度表达关系。这样既能够表征低剪切速率下的剪切变稀行为, 也能够描述临界区间附近的黏度突跃特征, 同时还能反映高剪切速率下黏度达到峰值后的再次下降过程。因此, 该模型更适用于描述本文 STF 体系所表现出的典型非连续剪切增稠行为。

在参数拟合过程中, 本文采用非线性最小二乘法对实测流变曲线进行分段拟合, 并在各分段边界处施加连续性约束, 以保证模型在不同区间衔接过程中的平滑性和数值稳定性。最终得到的模型参数列于表 3。

表 3 用于剪切增稠液黏度模型的参数值

Table 3 Parameter values for the viscosity model of a shear thickening fluid				
η_0 (Pa·s)	η_c (Pa·s)	$\eta_{\max}$ (Pa·s)	$\dot{\gamma}_c$ (s ⁻¹)	K_I
3.81	0.68	1864	1.83	42.58
K_{II}	K_{III}	n_I	n_{II}	n_{III}
0.11	0.52	1.38	3.13	1.23

基于上述拟合参数得到的黏度-剪切速率曲线如图 5 所示, 其中黑色散点为流变试验结果, 蓝色实线为分段黏度模型的拟合结果。可以看出, 拟合曲线与实验数据整体吻合较好, 能够同时表征 STF 在低剪切速率下的剪切变稀、临界剪切速率附近的黏度跃升以及高剪切速率下的黏度回落过程。该结果表明, 所建立的分段黏度模型能够有效描述 STF 的非连续剪切增稠特征, 并可用于后续流固耦合有限元模拟中的材料参数定义。

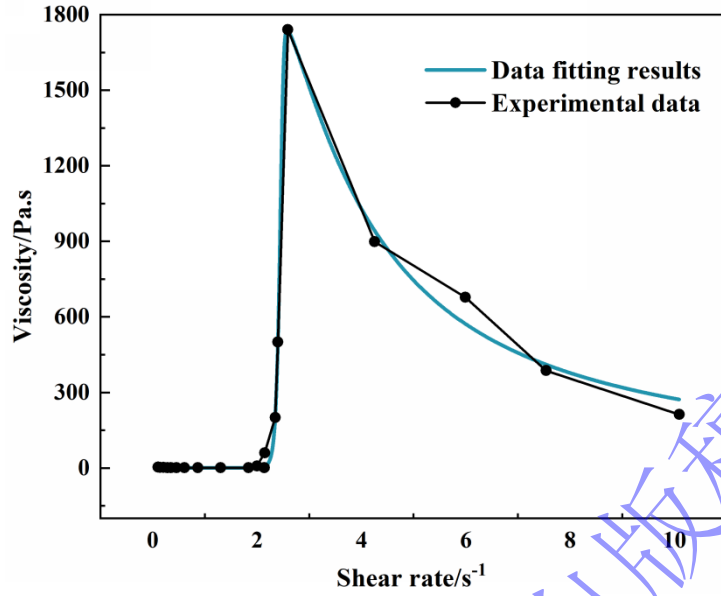


图5 剪切增稠液黏度 - 剪切速率关系的试验结果与拟合曲线对比

Fig. 5 Viscosity - shear rate curve and model fitting result of the shear thickening fluid

上述分段黏度模型能够较好地描述 STF 在不同剪切速率区间内的非线性流变行为，为表征其剪切增稠特征提供了本构基础。然而，在高速冲击条件下，STF 在蜂窝胞元内不仅会经历显著的剪切变形，还会受到瞬态压缩作用。此时，单纯采用黏度-剪切速率关系只能反映流体的剪切响应，而难以表征其在高压条件下的体积压缩行为及相应的压力传递特征。因此，为更完整地描述 STF 在流固耦合体系中的动态力学响应，除建立剪切黏度模型外，还需要进一步引入状态方程，用以刻画其压力、体积和内能之间的关系。

考虑到 STF 本质上属于以液体为连续相的高浓度悬浮体系，其在受限空间冲击压缩过程中仍具有流体介质的可压缩特征，本文采用 Mie-Grüneisen 状态方程 (Equation of State, EOS) 描述其压缩响应。该状态方程基于冲击绝热线 (Hugoniot 曲线) 建立，并结合线性 U_s-U_p 关系，将材料中的压力表示为密度和内能的函数，其表达式如下：

$$p = \frac{(\rho_0 C_0^2)x}{(1-sx)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 x}{2} \right) + \Gamma_0 u \quad (2)$$

式中 p 为压力， ρ_0 为初始密度， C_0 为通过介质的声速，参数 Γ_0 为 Grüneisen 系数，用于描述材料内能变化对压力响应的影响， u 为单位体积的内能， x 压缩变量，表征材料相对于初始状态的体积压缩程度， s 为 Hugoniot 线性关系参数，表示冲击波速度 U_s 与质点速度 U_p 的斜率系数。Mie-Grüneisen 状态方程形式较为简洁，参数物理意义明确，已被广泛应用于流体动力学和冲击压缩问题的数值模拟中。对于本文所研究的 STF 体系，该方程能够在一定程度上描述其在蜂窝胞元空间内受到瞬态高压作用时的体积压缩行为，从而为流固耦合分析提供必要的压力响应基础。

因此，在后续数值建模中，本文将 STF 的剪切黏度模型与状态方程结合使用。前者用于描述流体在不同剪切速率下的黏度演化规律，后者用于表征其在冲击压缩过程中的压力-体积响应特征。两者共同构成了 STF 在 CEL 流固耦合模拟中的主要材料描述基础。本文采用的 STF 关键 EOS 参数由参考文献^[30]获得，该文献所采用的 STF 体系与本文在组成及质量分数一致，因此其参数具有较好的参考价值。具体取值见表 4。

表 4 EOS 参数设置

Table 4 EOS Parameter Settings

ρ_0 (t/mm ³)	C_0 (mm/s)	s	Γ_0
1.6E-09	2100000	3.75	0.8

3.2 碳纤维纸张材料的本构模型

碳纤维纸蜂窝由碳纤维纸经热压、浸胶固化及拉伸成型后制得，胞壁属于典型薄壁结构。由前述单轴拉伸试验及微观形貌观察可知，碳纤维纸在加载过程中主要表现为近似线弹性的脆性断裂特征，达到极限强度后未出现明显塑性屈服阶段，微观破坏以纤维断裂为主，局部界面脱粘仅作为次要破坏形式。因此，在有限元模型中将碳纤维纸蜂窝骨架简化为各向同性线弹性脆性材料，以描述其失效前的刚度响应和失效后的脆性断裂行为。

失效前材料满足广义胡克定律，其应力 - 应变关系可表示为：

$$\sigma = \mathbf{D}:\varepsilon \quad (3)$$

式中， σ 为 Cauchy 应力张量， ε 为应变张量， $\mathbf{D}$ 为四阶弹性刚度张量。对于各向同性线弹性材料， $\mathbf{D}$ 由弹性模量 E_s 和泊松比 ν 两个独立常数完全确定。在有限元建模中，考虑到蜂窝胞壁属于典型薄壁结构，本文在 Abaqus/Explicit 中采用壳单元对其进行离散。对于壳单元，其面内响应可按平面应力状态处理，相应的弹性矩阵可写为：

$$\mathbf{D} = \frac{E_s}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中， E_s 为弹性模量， ν 为泊松比。根据碳纤维纸单轴拉伸试验结果，模型中采用的材料参数为：密度 $\rho = 300 \text{ kg/m}^3$ ，杨氏模量 $E_s = 0.56 \text{ GPa}$ ，拉伸强度 $\sigma_t = 87.9 \text{ MPa}$ ，失效应变 $\varepsilon = 0.018$ ，泊松比 $\nu = 0.25$ 。此外，多应变率拉伸试验结果表明，该材料的弹性模量和拉伸强度在所考察范围内未表现出明显的应变率敏感性，因此在动态冲击数值模拟中，本文忽略其率相关效应，采用与准静态条件一致的弹性参数。

为描述碳纤维纸达到承载极限后的脆性断裂行为，本文引入基于最大主应变的失效判据。当单元积分点处的最大主应变达到失效应变 $\varepsilon = 0.018$ 时，即判定该处材料发生断裂，并通过单元删除技术将对应单元从模型中移除。该处理方式虽然对基体微裂纹、局部界面脱粘等细观损伤过程进行了适当简化，但能够在保证计算稳定性和效率的前提下，较好捕捉蜂窝壁在压溃过程中的主要脆性断裂特征。

3.3 复合结构有限元模型

为准确分析 STF-CPH 复合结构在低速冲击下的流固耦合响应，本文采用 ABAQUS/Explicit 中的耦合欧拉-拉格朗日 (CEL) 方法建立有限元模型。该方法在处理大变形、瞬态动力学及流固耦合问题上具有显著优势，尤其适用于模拟 STF 在蜂窝胞元内的受限流动行为。模型整体构成如图 6 所示，主要由上、下刚性压头、碳纤维纸蜂窝骨架以及填充于胞元内的剪切增稠液三部分组成。

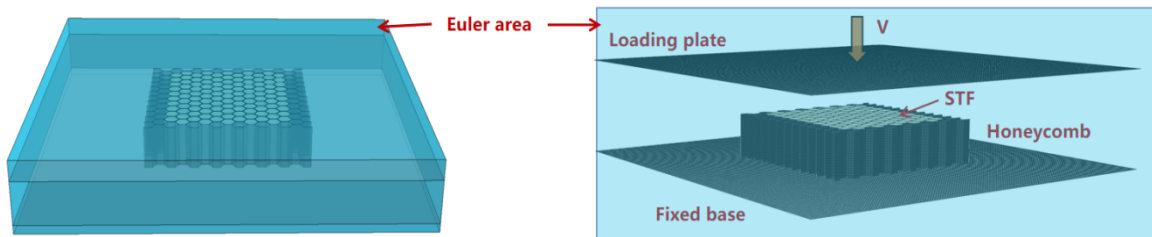


图 6 STF-CFH 有限元模型

Fig. 6 STF-CFH Finite Element Model

对于碳纤维纸蜂窝骨架，采用 3.2 节所述的弹脆性本构模型进行表征。对于剪切增稠液，采用非牛顿流体本构模型描述其流变行为。通过 ABAQUS 用户材料子程序接口 VUVISCOISITY 开发自定义 Fortran 子程序，将 3.1 节建立的分段黏度函数（式 1）嵌入求解器，实现 STF 黏度随瞬时剪切应变率的实时更新。该模型能够精确表征 STF 在不同剪切应变率下的剪切变稀与剪切增稠特性，模型参数如表 3 所示。此外，在 ABAQUS 数值实现方面，上、下压头均采用离散刚体单元进行建模，以模拟冲击加载条件。全场接触关系采用通用接触算法定义，法向行为定义为硬接触以捕捉撞击过程中的分离与碰撞，切向行为遵循库仑摩擦模型，摩擦系数取 0.3。欧拉域将整个蜂窝模型完全包裹，以确保 STF 在变形过程中始终处于欧拉材料边界之内。为在保证计算精度的同时避免流体渗透，碳纤维纸蜂窝骨架以拉格朗日单元划分，欧拉域则以欧拉单元离散。底部刚性压头设为全约束，顶部压头施加初始速度以模拟落锤冲击。

4 结果与讨论

4.1 碳纤维纸蜂窝模型验证

为验证所建立的有限元模型及参数设定的有效性，首先对碳纤维纸蜂窝在准静态压缩下的响应进行数值模拟，并与实验结果进行对比。如图 7 所示，模拟准确再现了碳纤维蜂窝在准静态压缩下特有的渐进式脆性断裂行为：在压缩位移 $\delta = 0.7 \text{ mm}$ ($\varepsilon = 0.05$) 时，冲击端胞元开始出现局部屈曲；当 $\delta = 3 \text{ mm}$ ($\varepsilon = 0.2$) 时，屈曲区域逐步向下扩展；至 $\delta = 8 \text{ mm}$ ($\varepsilon = 0.53$) 时，结构呈现逐层压溃的典型失效模式。各阶段的整体变形形态与高速摄像记录的实验结果高度一致。进一步对比力-位移曲线（图 8）可知，模拟曲线与实验曲线在全位移范围内的走势总体吻合良好，在初始峰值、平台应力段及压溃结束阶段均表现出较好的一致性。需要说明的是，实验曲线与模拟曲线在局部载荷波动和平台段数值上仍存在一定差异，这主要来源于实际试件中胞壁厚度波动、胶接层不均匀、初始几何缺陷及局部微损伤等因素，同时也与模型中对碳纤维纸均质化、细观损伤简化以及接触边界理想化处理有关。总体而言，该模型能够较好捕捉碳纤维纸蜂窝的宏观力学响应与渐进失效特征，可为后续动态冲击模拟提供可靠基础。基于已验证的模型，下一节将进一步结合落锤冲击实验，对比分析 STF 填充前后碳纤维蜂窝在动态加载下的响应特征与失效模式。

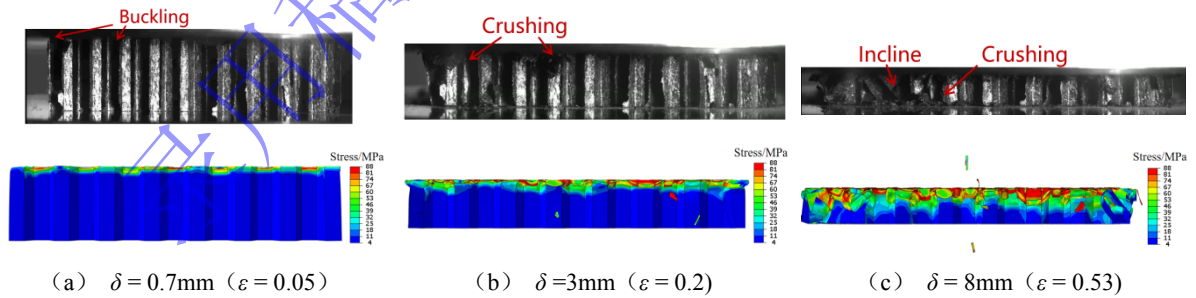


图 7 准静态压缩下有限元与实验变形

Fig. 7 Deformation in Finite Element Analysis and Experiments under Quasi-Static Compression

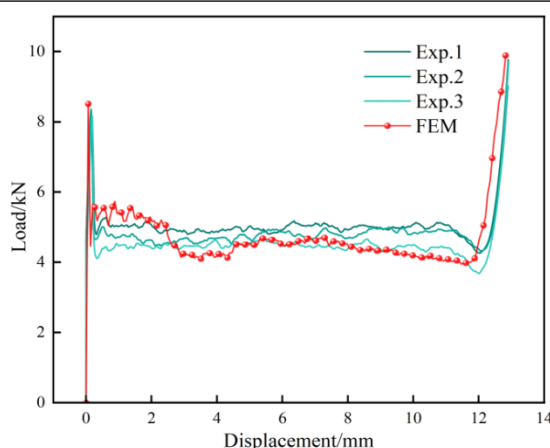


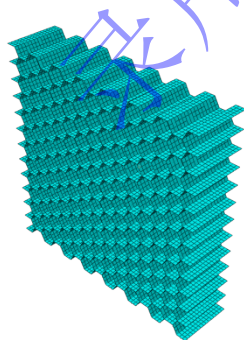
图 8 准静态压缩仿真与实验力位移曲线

Fig. 8 Force-displacement curves from simulation and experiment under quasi-static compression

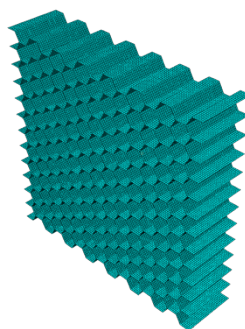
需要说明的是，本文准静态压缩分析的主要目的在于验证碳纤维纸蜂窝骨架有限元模型的有效性，为后续动态冲击模拟提供可靠的材料参数和失效描述。STF 的力学增强作用具有显著的剪切速率依赖性，在准静态加载条件下，胞元内部流体剪切速率较低，STF 主要表现为低黏度流体状态，难以充分触发剪切增稠效应，因此其对蜂窝胞壁的侧向约束和压溃模式调控作用有限。相比之下，在冲击载荷作用下，胞元内部 STF 局部剪切速率迅速升高并诱发黏度跃升，进而通过流固耦合作用显著影响蜂窝结构的动态响应。因此，本文将准静态结果用于模型有效性验证，而将 STF 填充前后的性能对比重点放在动态冲击条件下开展。

4.2 STF-CFH 复合结构动态响应与模型验证

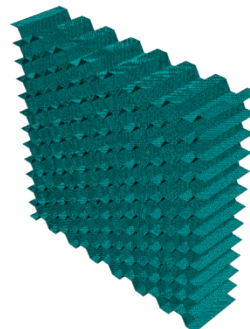
依据试验中所采用的试样尺寸，建立碳纤维纸蜂窝复合结构的几何模型，其整体尺寸为 $60\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 15\text{ mm}$ 。为考察网格密度对数值结果的影响，对蜂窝骨架进行了网格敏感性分析。如图 9 所示，选取三种网格尺寸方案，粗网格单元尺寸 1.0 mm 、中等网格 0.5 mm 和细网格 0.25 mm ，以 CFH 在准静态压缩工况下的力-位移响应为评价对象，对比三种方案的载荷-位移曲线，结果如图 10 所示。由图可见，当网格由粗网格细化至中等网格时，载荷响应出现明显变化；而由中等网格进一步细化至细网格时，两条曲线已基本重合，表明计算结果已趋于收敛。然而，细网格方案的计算时间较中等网格显著增加。综合考虑计算精度与效率，本文采用中等网格方案（单元尺寸 0.5 mm ），对应蜂窝骨架单元总数为 93690。



(a) Mesh size 1 mm



(b) Mesh size 0.5 mm



(c) Mesh size 0.25 mm

图9 蜂窝模型图

Fig. 9 Finite Element Model of the Honeycomb Structure

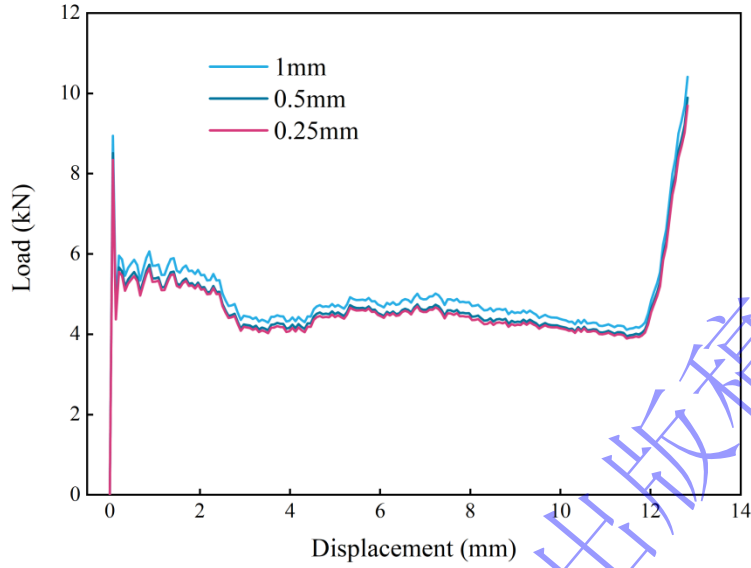
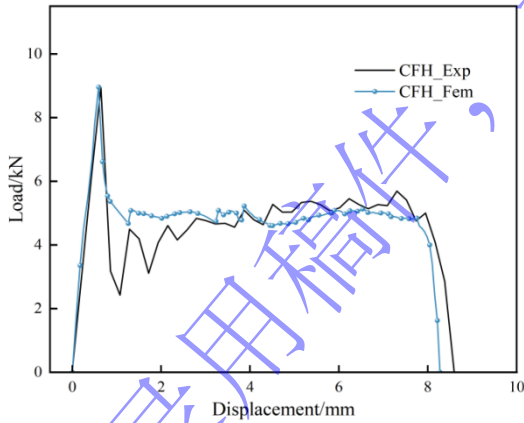


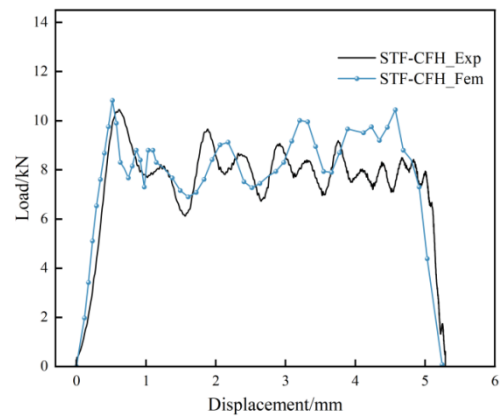
图10 网格敏感性分析

Fig. 10 Mesh Sensitivity Analysis

为验证所建立的耦合欧拉-拉格朗日有限元模型在动态冲击条件下的有效性与准确性，本节以 40 J 冲击能量为例，对比分析了未填充 STF 与填充 STF 的碳纤维纸蜂窝的实验与数值模拟力-位移曲线，如图 11 所示。在此基础上，结合高速摄影与仿真变形图，进一步分析 STF 填充对蜂窝结构变形模式的影响，为后续定量评价与机理分析奠定基础。



(a) Comparison of experimental and finite element force-displacement curves under E=40 J



(b) Comparison of experimental and finite element force-displacement curves under E=40 J

图11 实验与有限元力位移曲线对比

Fig. 11 Comparison of experimental and finite element force-displacement curves

在 40 J 冲击能量下（图 11a），未填充 CFH 的力-位移曲线呈现典型特征：载荷在初始阶段迅速上升至一个较为突出的峰值后，随即进入载荷波动区，波动幅度随位移增加逐渐衰减，最终在压溃末期载荷再次升高。相比之下，STF-CFH 复合结构的曲线形态呈现出明显差异：初始峰值的幅值有所提升，但曲线在峰值后的下降更为平缓，随后进入的波动区中载荷整体维持在较高水平，波动幅度也更为均匀，曲线下的包围面积显著增大。仿真曲线准确复现了上述差异：对于未填充 CFH，模型成功捕捉了初始峰值的陡峭特征及后续的衰减波动；对于 STF-CFH，仿真同样再现了提升后的初

始峰值、更平缓的下降段以及更高且更均匀的后续载荷水平，与实验曲线在全位移范围内高度吻合。这表明所建立的 CEL 模型能够有效描述 STF 与 CFH 骨架在动态加载下的流固耦合响应。

变形模式的对比分析进一步验证了模型的有效性。在冲击下，未填充 CFH 结构呈现出典型的逐层渐进压溃特征（图 12）。失效始于冲击端面，随冲头位移增加逐步向固定端传播，通过纤维壁板的持续屈曲与断裂实现能量耗散。由于碳纤维基体的脆性，该压溃过程极不稳定，极易引发突发性的局部坍塌，致使失效区域高度集中，未能充分动员下部结构参与能量耗散。与之形成对比的是，STF-CFH 复合结构的失效机制发生根本性转变（图 13）。在冲击瞬间，STF 因高应变率作用触发显著的剪切阻塞效应，表观黏度急剧升高，实现由流态至类固态的动力学相变。该转变使 STF 能够为蜂窝壁提供瞬时的多向力学支撑：在纵向有效传递压应力，同时 STF 在受限压缩和压力传递作用下对胞壁产生侧向约束。冲击端胞元出现轻微外扩变形，正是 STF 受限压缩中所诱发横向应力的直观体现。该侧向约束显著延缓了蜂窝壁的早期脆性屈曲与剪切破坏，促使载荷在更大范围内重新分布，从而诱发结构整体性、均匀化的压缩变形。上述实验观测与数值模拟所呈现的变形模式、载荷传递路径及 STF 动态响应行为高度一致，进一步验证了所建立的 STF-CFH 耦合模型的准确性与可靠性。

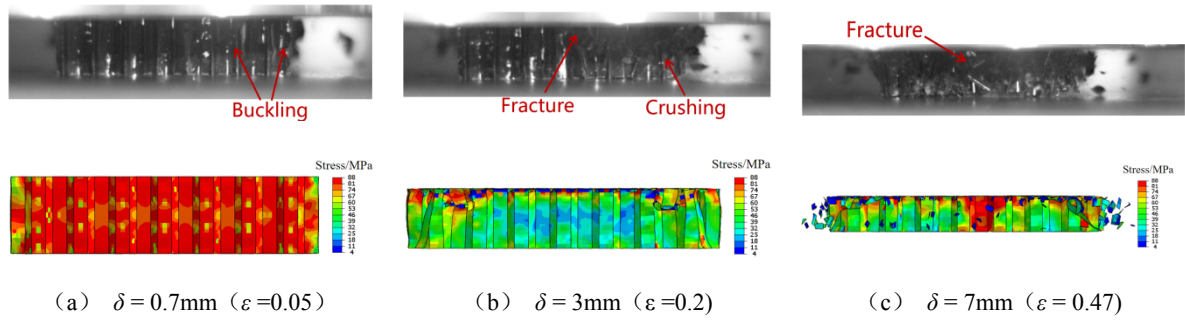


图 12 在 E=40 J 冲击下 CFH 变形模式

Fig. 12 Deformation mode of CFH under E=40 J impact

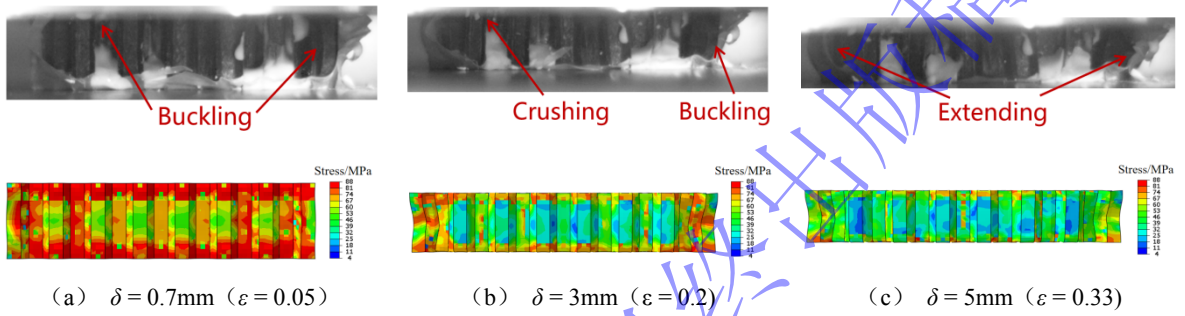


图 13 在 E = 40 J 冲击下 STF-CFH 变形模式

Fig. 13 Deformation mode of STF-CFH under E = 40 J impact

综上所述，基于 40 J 冲击实验与仿真结果的良好一致性，本文所建立的 CEL 模型能够准确描述 STF-CFH 复合结构在动态冲击下的流固耦合响应及失效行为。基于此验证模型，下一节将进一步结合 40 J 与 80 J 冲击实验数据，定量评价 STF 填充对碳纤维蜂窝结构缓冲性能的影响，并揭示其能级依赖性特征。

4.3 缓冲性能对比

本研究为探究剪切增稠液填充对碳纤维纸蜂窝动态响应行为的影响，对比了未填充 CFH 与 STF-CFH 复合结构在 40 J (3.36 m/s) 与 80 J (4.76 m/s) 冲击能量下的变形模式。填充 STF 显著改变了结构的失效机制与能量耗散路径。通过提取动态载荷-位移曲线，计算峰值力 (Peak Crushing Force, PCF)、比吸能 (Specific Energy Absorption, SEA)、平均压溃力 (Mean Crushing Force, MCF) 及压溃力效率 (Crushing Force Efficiency, CFE) 四项关键评价指标，对比分析两种结构在 40 J 与 80 J 冲击能量下的性能差异，揭示 STF-CFH 复合结构的能级依赖性响应特征。其中，PCF、SEA、MCF 和 CFE 为指标名称缩略语，计算时分别用 F_p 、 e 、 F_m 和 φ 表示； F 为压溃力， δ 为压缩位移， δ_d 为相应力-位移曲线的积分终止位移， m_0 为试样初始总质量 (包含填充介质)。不同结构的指标采用一致的积分区间选取原则。各项指标的计算公式如下：

$$e = \frac{\int_0^{\delta_d} F(\delta) d\delta}{m_0} \quad \#(5)$$

$$F_m = \frac{\int_0^{\delta_d} F(\delta) d\delta}{\delta_d} \quad \#(6)$$

$$\varphi = \frac{F_m}{F_p} \quad \#(7)$$

对不同冲击能量水平下的力-位移曲线进一步分析（图 14a），STF 填充对碳纤维纸蜂窝结构动态响应的影响呈现出显著的能级依赖性特征。在 40 J 冲击条件下，尽管 STF 填充导致峰值载荷提升至未填充状态的 1.16 倍（图 14b），但其平均压溃力提升至 1.62 倍，压溃力效率达到 1.39 倍，表明 STF 通过引导结构实现更均匀的渐进变形，有效提升了整体能量耗散效率。而在 80 J 较高冲击能量下（图 14c），STF 填充结构则展现出更为理想的降峰增效特性：峰值力显著降低至未填充状态的 0.76 倍，这源于高能冲击下 STF 更快速、更充分的剪切增稠响应，通过更均匀的应力分布有效避免了传统蜂窝结构在冲击端因应力集中导致的脆性峰值力尖峰；与此同时，平均压溃力进一步提升至 1.81 倍，压溃力效率更显著提高至 2.38 倍，表明 STF 通过更充分的流固耦合作用，在降低初始冲击载荷的同时大幅提升了能量吸收总量与吸能平稳性。这一能级相关的响应特性充分体现了 STF-CFH 复合结构在不同冲击场景下的自适应缓冲优势。

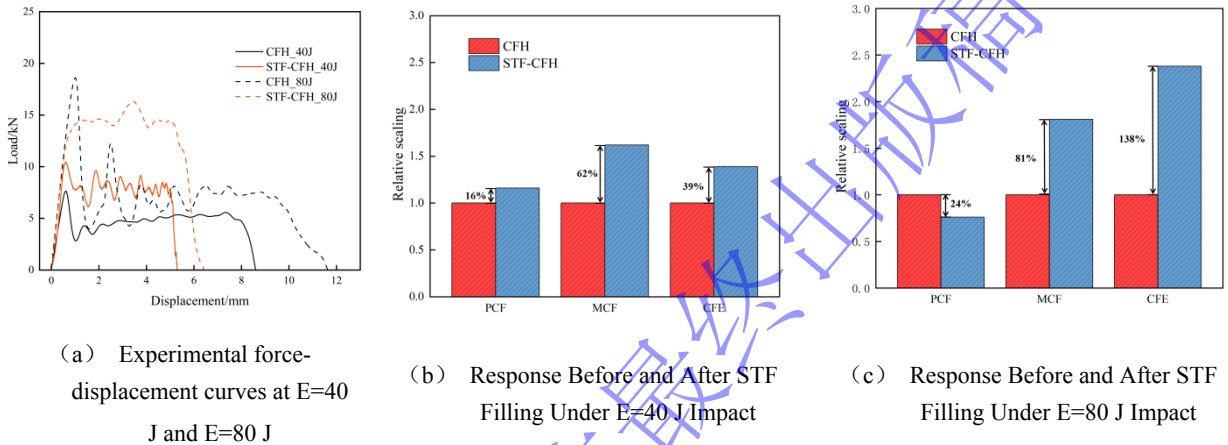


图 14 在 $E = 40 \text{ J}$ 和 $E = 80 \text{ J}$ 下 STF-CFH 缓冲性能分析

Fig. 14 Analysis of the Cushioning Performance of STF-CFH under $E = 40 \text{ J}$ and $E = 80 \text{ J}$ Impact

4.4 冲击速度对 STF-CFH 复合结构动态力学行为的影响

为系统探究剪切增稠液（STF）对碳纤维纸蜂窝（CFH）动态力学响应的作用，本节基于数值模拟方法，重点针对 80 J、120 J 与 160 J 三种冲击工况（初始速度分别为 4.76 m/s、5.83 m/s 及 6.73 m/s）开展对比研究。通过解构未填充 CFH 与 STF-CFH 复合结构在不同能级下的力-位移演化特征，深入剖析了流固耦合效应对结构动态特征的影响，并结合峰值力、平均压溃力及能量吸收效率等关键指标，定量评价了复合结构在高应变率载荷下的缓冲保护潜能。

在冲击载荷作用初期，结构的初始峰值力直接决定了传递给被保护基底的最大瞬态过载。从图 15(a) 的模拟力-位移曲线估读可得，未填充 CFH 在 80 J 冲击下的初始峰值力约为 17 kN；相比之下，STF-CFH 复合结构的初始峰值力约为 14.5 kN。填充结构随后平台阶段的局部最大载荷约为 16 kN。证实了 STF 的液相流动属性在冲击初期发挥了优异的应力均化作用，有效缓解了蜂窝端面的局部应力集中，在极端冲击下依然保持了显著的降低峰值力保护效应。

跨越初始弹性屈曲阶段后，结构进入主要依靠大变形吸能的平台压溃区，其平均压溃力

（MCF）是衡量能量耗散效率的核心指标。通过横向对比各能级下的 MCF 可以发现，STF 填充带来的承载力增益呈现出强烈的冲击能量依赖性。据图 16(a)，随着冲击能量从 80 J 增至 160 J，未填充 CFH 的 MCF 由约 6.8 kN 小幅增至约 7.0 kN；而 STF-CFH 复合结构则展现出极强的动态自适应强化能力，其 MCF 从 80 J 下的约 12.1 kN 升至 160 J 下的约 19.0 kN。两者之间绝对承载力的差距随冲击能量的提高而不断拉大，这表明冲击速度越快，复合结构内部流体的剪切增稠相变被激发得越彻底，流固耦合作用成倍放大了结构的平台吸能效率。

从比吸能来看，由于充入 STF 不可避免地增加了系统的初始总质量，在 80 J 冲击工况下，流固耦合所增加的耗散能被附加质量效应所稀释，导致复合结构的 SEA 绝对数值与未填充结构相近。然

而,当冲击能级提高至 120 J 与 160 J 时,未填充 CFH 的 SEA 几乎没有增长,表明其骨架的变形吸能潜力已达到极限。相比之下,STF-CFH 复合结构的比吸能(SEA)表现出显著的应变率强化特征,随冲击速度的增大呈递增趋势。可以推断的是在更高剪切率环境下,STF 剪切增稠引发的黏性耗散与流固耦合产生的骨架吸能增量,远超因流体填充导致结构总质量增加带来的不利影响,使得复合结构在冲击下展现出更为优越的轻量化耗散特性。

在 120 J 与 160 J 高能冲击工况下,填充 STF 前后的两类结构的宏观变形演化与失效模式呈现出差异。由于平台区耗能能力不足,未填充 CFH 在 120 J 冲击下的压缩位移达 13 mm,已进入致密化阶段;在 160 J 工况下,其压溃位移进一步增至 14 mm,胞壁完全接触叠实,触发了严重的致密化效应。此时力-位移曲线末端急剧攀升,产生高达 77.5 kN 的刚性撞击尖峰,结构因变形潜能耗尽而发生致密化失效。相比之下,STF-CFH 复合结构凭借应变率敏感的高位平台承载力,能够在极短的压缩行程内高效吸收等量动能。即使在 160 J 的极端冲击下,复合结构仅产生 8.5 mm 的位移便成功耗散了全部冲击动能,力-位移曲线末端平稳,远未触及致密化临界点。这一对比充分证明,在极端高能动载下,STF 的剪切增稠有效避免了结构的致密化失效,赋予了复合结构优异稳定的抗冲击缓冲能力。

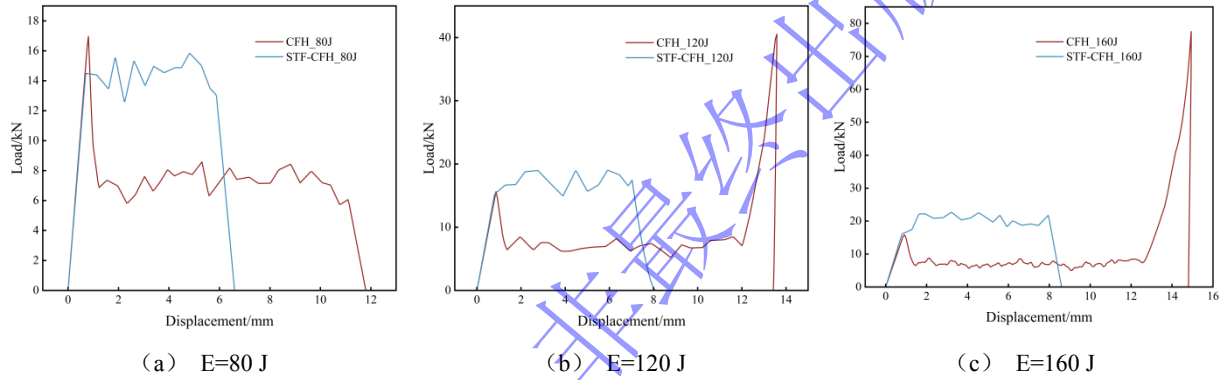
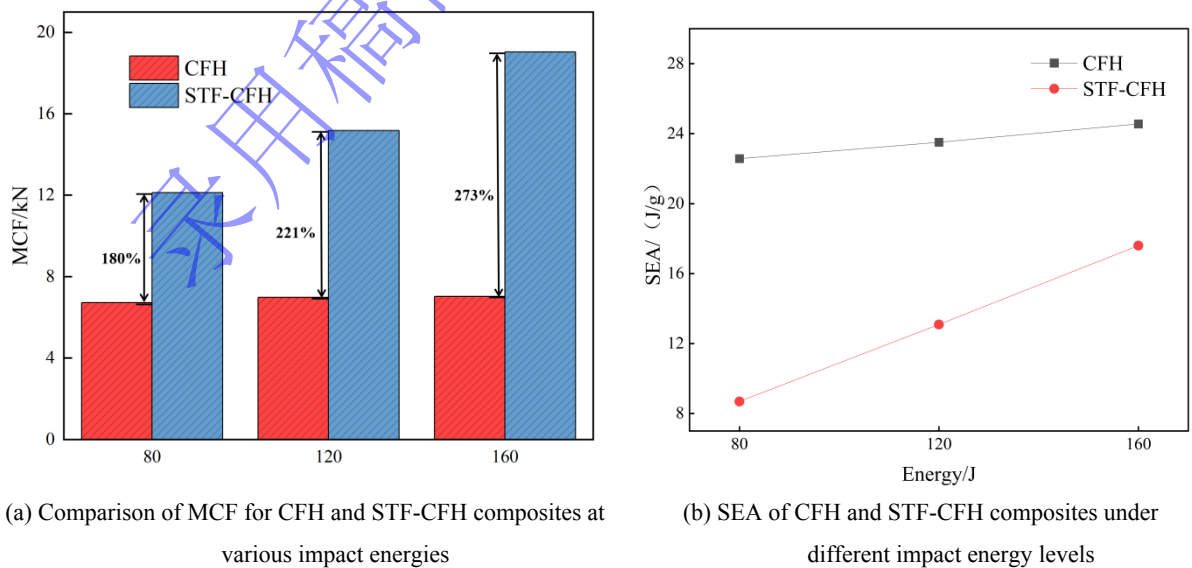


图 15 不同冲击能量 (80 J、120 J、160 J) 对 CFH 及 STF-CFH 力-位移特征的影响

Fig. 15 Effect of initial impact energy (80 J,120 J,160 J) on the force-displacement characteristics of CFH and STF-CFH composites



(a) Comparison of MCF for CFH and STF-CFH composites at various impact energies

(b) SEA of CFH and STF-CFH composites under different impact energy levels

图 16 不同冲击能量下 CFH 与 STF-CFH 复合结构的缓冲性能对比

Fig. 16 Comparison of cushioning performance for CFH and STF-CFH composites under different impact energies

4.5 STF-CFH 蜂窝协同耗能流固耦合机理

4.5.1 冲击荷载下能量耗散途径分析

基于 80 J、120 J 与 160 J 三种典型冲击能量下的数值仿真结果(图 17)结合能量解耦分析,本节系统揭示了 STF-CFH 复合结构在动态冲击下的能量分配机制。STF 作为非牛顿流体,其耗能主要体现为黏性耗散能,源于受压流动时的颗粒摩擦、碰撞及流体黏滞阻力;碳纤维纸蜂窝骨架作为脆性材料,其吸收的能量由弹性应变能与材料破坏耗散能构成。鉴于碳纸的高刚度与脆性特征,弹性变形极小,骨架吸能绝大部分源于不可逆的破坏耗散。在有限元能量解耦分析中,骨架的吸收能量即指上述两种能量的总和。在 80 J 的初始高能冲击工况下,STF 的剪切增稠效应已被激活(图 18),复合结构的整体能量吸收初步显现出协同优势。此时,受限 STF 在胞元内部形成的动态围压开始发挥横向支撑作用,使得填充结构中 CFH 骨架所承担的吸能份额已显著超越同等条件下的未填充基准结构。而随着冲击能量进一步跃升至 120 J 与 160 J,极高的瞬态冲击应变率触发了复合结构更为深刻的力学响应演化,具体表现为两个关键特征:

第 1, STF 填充实现了对 CFH 骨架自身吸能潜能的深度激发。有限元能量解耦分析表明,在填充 STF 的试件中,CFH 骨架所贡献的总吸能随冲击能量提升而大幅激增且大于未填充的骨架材料吸能。这主要源于 STF 在高速冲击下迅速相变为致密的类固态支撑网络,为脆性蜂窝壁板提供了强有力的约束。该流固耦合作用极大延缓了壁板的局部屈曲失稳与过早断裂,迫使骨架在更长行程与更高应力水平下发生均匀压溃,从而间接提升了骨架的材料利用率与破坏耗散能。

第 2, STF 自身的黏性耗散占比随冲击能量的增加急剧扩增,逐渐成为主导总吸能的核心机制。在 160 J 的极端工况下,冲击动能主要通过 STF 内部颗粒重组、机械互锁进行耗能。有限元分析结果进一步揭示,随着冲击速度与能量的增加,STF 局部剪切应变率急剧升高诱发黏度跃升,其由流体向类固态的动态相变不仅直接主导了能量的吸收,更与骨架的强化变形相互促进,形成“1+1>2”的叠加增益效应。相比之下未填充 CFH 结构,其吸能增益在面临高能冲击时迅速遭遇瓶颈。由于缺乏侧向约束,未填充骨架始终受限于高度局部化的脆性破碎,在 120 J 冲击时即因变形潜能耗尽而被迫进入致密化阶段。这一鲜明对比充分证实,在极端冲击载荷下,STF 的引入有效规避了结构的致密化失效,赋予了复合结构显著且稳定的缓冲吸能能力。

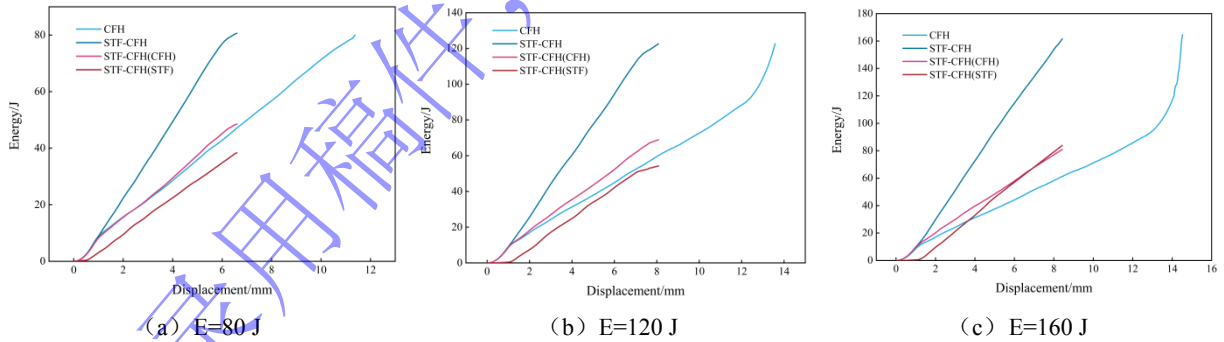


图 17 不同冲击能量下结构的能量吸收曲线

Fig. 17 Energy absorption curves of the structures under different impact energies

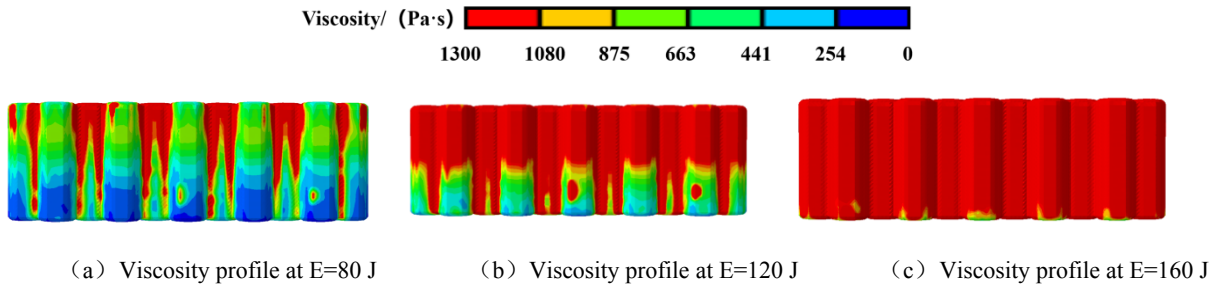


图 18 应变为 0.1 时不同速度下黏度情况

Fig. 18 Viscosity at a strain of 0.1 under different impact velocities

4.5.2 流固耦合作用下的胞元变形机制

填充剪切增稠液后, 碳纤维蜂窝结构的破坏模式由经典的局部脆性断裂转变为整体稳定的渐进压溃, 其能量耗散机制亦由单一的骨架破坏耗能演化为 STF 黏性耗散与骨架破坏耗能协同作用的分布式耗能模式。这一转变的核心机理源于 STF 与 CFH 骨架之间复杂的流固耦合相互作用。

对比分析表明, 未填充的基准蜂窝结构在动态冲击下, 主要表现为由冲击端面引发的胞壁渐进式脆性破碎, 破坏过程具有高度的局部化特征(图 19a)。初始裂纹通常萌生于与压头接触的少数几个胞元角点处, 并迅速沿胞壁纵向扩展, 导致结构的有效压溃行程短、能量吸收区域有限, 整体力学性能未能充分发挥。

而 STF-CFH 结构展现出整体性、协同化的力学响应与破坏模式。在 STF 的介入下, 结构的能量吸收不再局限于局部区域, 而是扩展至整个填充区域, 实现了材料利用效率的显著提升。尤为显著的是, 在高速冲击过程中, 蜂窝单胞壁表现出明显的拟三维外扩变形(图 19b), 其本质是 STF 与 CFH 骨架之间动态耦合作用的结果。

该变形模式的转变可归因于 STF 对 CFH 骨架力学行为的调控作用。在冲击过程中, 被密封于蜂窝胞元内的 STF 因胞壁变形而被挤压流动, 在胞元内部形成动态压力场, 对蜂窝壁产生有效围压。随着胞壁屈曲变形的发展, STF 被迫流经逐渐收窄的流动通道, 局部剪切应变率急剧升高, 从而触发强烈的剪切增稠效应。STF 表观黏度的急剧升高使其在微观尺度上表现出类固态行为, 对蜂窝壁面施加持续的法向应力。该应力等效于为原本面外承载能力较弱的蜂窝壁提供了主动的横向支撑, 显著增强了壁板的屈曲抗力和稳定性。

同时, STF 的耦合响应改变了 CFH 骨架的应力传播路径与破坏起始机制。在未填充结构中, 应力波集中于冲击端附近的少数承载路径, 导致应力集中与早期破坏。而在 STF 填充结构中, 液态 STF 能够近乎瞬时地将局部冲击载荷以压力形式传递至整个胞元的内表面, 实现应力的快速重分布。这不仅有效避免了角点区域的应力集中, 延缓了初始裂纹的萌生, 更促使多个胞元近乎同步进入屈曲变形阶段, 从而将结构的破坏模式从脆性破碎转变为稳定的破坏。

最后, STF 与蜂窝壁的界面相互作用引导了骨架的宏观变形形态。蜂窝壁的初始微小弯曲或变形, 会挤压其相邻胞元内的 STF, 导致局部压力升高。而 STF 作为不可压缩流体, 其压力响应会反向作用于相邻胞壁, 抑制其进一步向内屈曲, 从而引导变形向外发展, 宏观上即表现为独特的外扩变形模式。有限元模拟结果进一步证实, 该流固耦合机制显著延长了结构的有效载荷传递路径, 将原本独立的蜂窝壁通过 STF 的力学响应联结为一个整体性更强的复合系统, 从而在极端动态载荷下实现了变形模式的可控与力学性能的优化。

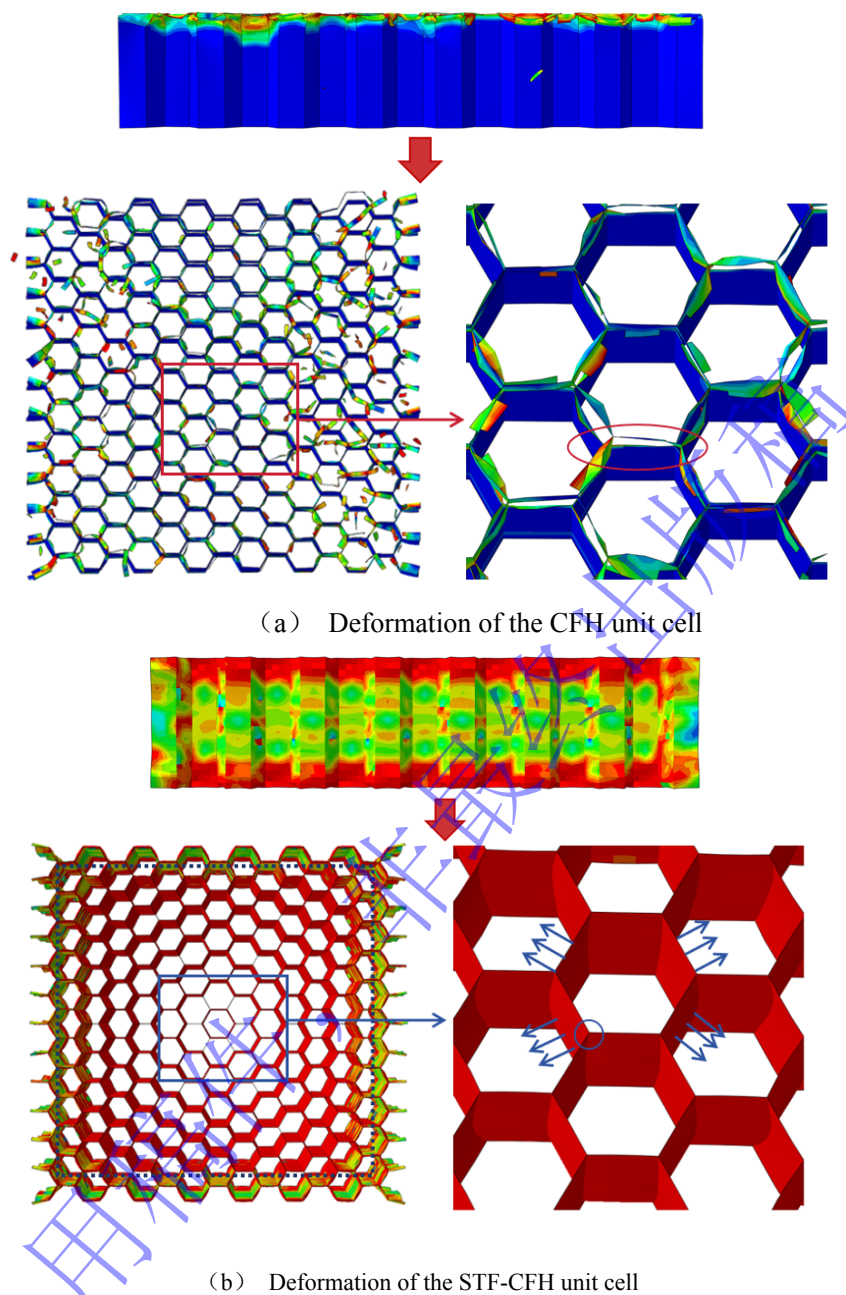
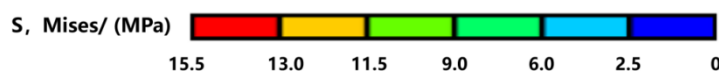


图 19 填充前后胞元变形模式

Fig. 19 Deformation modes of the unit cell pre- and post-STF filling

为深入理解上述变形模式转变的力学根源，图 20 给出了 STF 在蜂窝胞元内不同应变时刻的 Mises 等效应力分布云图。



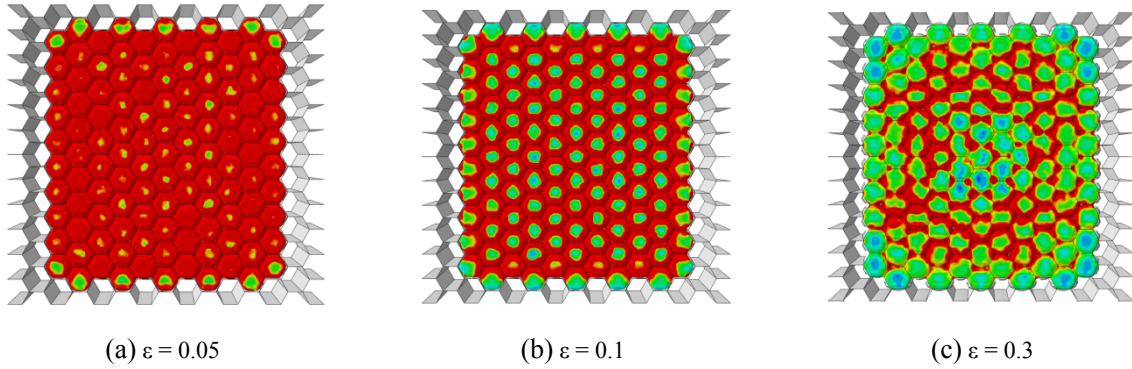


图 20 STF 的 Mises 等效应力分布

Fig. 20 Mises equivalent stress distributions of the STF

图 20 显示, 随着压缩变形发展, STF 内部的 Mises 等效应力分布由较大范围的高值区逐步转变为非均匀分布, 胞壁及胞壁交点附近仍存在局部高值区, 表明胞元内部的偏应力状态随变形发生调整。该图展示的是 Mises 等效应力, 而非流体压力, 因而不能直接据此判定压力由 STF 表面向胞壁节点迁移的路径。图示局部应力分布可用于分析 STF 与胞壁的相互作用; 关于法向支撑与压力传递的解释, 还需与相应压力输出加以区分。

与此同时, STF 的存在也改变了冲击载荷在蜂窝胞元内的传播与分配方式。对于 CFH, 外部载荷主要通过冲击端附近少数胞元传递, 容易在局部区域形成应力集中, 并诱发早期断裂。而在 STF 填充条件下, 流体介质能够在胞元内部参与压力传递, 使局部载荷向周围胞壁和相邻胞元更大范围扩散, 从而减弱局部路径上的应力集中效应。由此, 多个胞元能够在更接近的时间尺度内共同参与变形与承载, 使结构整体压溃过程更加均匀。

此外, STF 与蜂窝胞壁之间的界面相互作用还会进一步影响骨架的宏观变形形态。当胞壁发生初始弯曲或局部内凹时, 相邻胞元内 STF 受挤压后局部压力增大, 并对周围壁板施加反向作用力。这种作用会在一定程度上抑制胞壁进一步向内塌陷, 并促使其变形向外扩展, 宏观上表现为如图 19 所示的外扩特征。数值模拟结果表明, 在这种流固耦合作用下, 原本相对独立的蜂窝胞壁通过流体介质形成了更强的相互关联, 使整个复合结构在冲击载荷作用下表现出更为整体的协同响应。

总体来看, STF 对 CFH 骨架的增强作用主要体现在三个方面: 其一, STF 通过压力由表面向胞壁节点的迁移, 对脆性胞壁的薄弱连接处提供针对性约束, 延缓局部失稳和快速断裂; 其二, STF 参与了胞元内部的压力传递, 使结构载荷分布趋于更加均匀, 促使更多胞元共同参与变形与耗能; 其三, STF 对胞壁的侧向支撑作用促成了外扩变形模式, 避免了胞壁内塌导致的局部应力集中。正是在上述流固耦合作用的共同影响下, STF-CFH 复合结构在动态冲击下由局部脆性压溃逐步转变为整体协同变形主导的渐进压溃过程, 从而表现出更好的缓冲与吸能性能。

5 结论

基于动态冲击实验与流固耦合数值模拟, 本文研究了剪切增稠液填充碳纤维纸蜂窝 (STF-CFH) 复合结构的动态力学响应、失效模式及协同耗能机制, 主要结论如下:

(1) STF 填充能够有效改善碳纤维纸蜂窝的压溃稳定性, 诱导结构失效模式由局部化脆性破坏转变为更均匀的整体渐进压溃。在冲击过程中, STF 在高剪切作用下发生黏度跃升, 并通过侧向约束和压力传递作用抑制蜂窝胞壁的局部屈曲与过早断裂, 使更多胞元参与变形耗能。实验结果表明, 在 40 J 冲击能量下, STF-CFH 复合结构的平均压溃力和压溃力效率分别提升至未填充蜂窝的 1.62 倍和 1.39 倍, 说明 STF 填充能够显著提高结构的平台承载能力和压溃稳定性。

(2) STF-CFH 复合结构表现出明显的能级依赖性和动态自适应增强特征。在 80 J 冲击能量下,

STF-CFH 复合结构的峰值力降低至未填充蜂窝的 0.76 倍, 而平均压溃力和压溃力效率分别提高至 1.81 倍和 2.38 倍, 表现出降低峰值力、提高平均压溃力和压溃力效率的缓冲特性。该结果表明, 在较高冲击能量下, STF 的剪切增稠响应被更充分激发, 能够在降低初始冲击峰值的同时提高平台载荷水平和能量吸收效率, 从而改善结构的冲击防护性能。

(3) 数值模拟进一步揭示了 STF 与碳纤维纸蜂窝之间的流固耦合协同耗能机制。冲击过程中, 蜂窝胞元内 STF 局部剪切速率迅速升高, 诱发表观黏度增加; 增稠后的 STF 对胞壁产生附加侧向约束并参与胞元内部压力传递, 使载荷分布更加均匀, 延缓局部失稳和脆性断裂。与此同时, 蜂窝骨架的持续变形又为 STF 提供高剪切环境, 促进其维持高黏阻状态, 从而形成 STF 黏性耗散与蜂窝骨架压溃耗能相互促进的协同增强机制。

(4) 在高速冲击条件下, STF 填充能够有效延缓碳纤维纸蜂窝的致密化失效。数值结果表明, 在 160 J 冲击能量下, 未填充 CFH 压缩位移增至约 14 mm 后进入严重致密化阶段, 并产生约 77.5 kN 的末端载荷尖峰; 相比之下, STF-CFH 复合结构在约 8.5 mm 压缩位移下即可完成冲击能量耗散, 且力-位移曲线末端未出现明显刚性撞击尖峰。该结果说明 STF 填充可显著提升结构在高速冲击下的抗致密化能力和缓冲稳定性, 为轻质自适应抗冲击蜂窝结构设计提供了参考。

参考文献:

- [1] ZHAO H, GARY G. Crushing behaviour of aluminium honeycombs under impact loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1998, 21(10): 827-836. DOI: 10.1016/S0734-743X(98)00034-7.
- [2] JU J, SUMMERS J D. Compliant hexagonal periodic lattice structures having both high shear strength and high shear strain [J]. *Materials & Design*, 2011, 32(2): 512-524. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.08.029.
- [3] 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. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2008.03.001.
- [4] ZHANG Y Q, LIU Q, HE Z, et al. Dynamic impact response of aluminum honeycombs filled with expanded polypropylene foam [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 156: 17-27. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.08.043.
- [5] YANG B, ZHOU Q, LEE J, et al. Experimental and numerical study of low-velocity impact damage in sandwich panel with UHMWPE composite facings [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2023, 284: 112519. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2023.112519.
- [6] Guo H Y, Zhang J X. Performance-oriented and deformation-constrained dual-topology metamaterial with high-stress uniformity and extraordinary plastic property [J]. *Advanced Materials*, 2025, 37(7): 2412064. DOI: 10.1002/adma.202412064.
- [7] Wu X W, Guo H Y, Zhang J X. Bi-surface induction in biomimetic multi-gradient foam-filled tubes with enhanced energy absorption: Theory, experiment, and simulation [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2025, 92(5): 051010. DOI: 10.1115/1.4068061.
- [8] Yuan H, Wu X W, Zhang J X. Cutting failure behavior of foam core sandwich plates [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2024, 303: 113009. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2024.113009.
- [9] Guo H Y, Zhang J X. Expansion of sandwich tubes with metal foam core under axial compression [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2025, 92(5): 051010. DOI: 10.1115/1.4068061.

Journal of Applied Mechanics, 2023, 90(5): 051008. DOI: 10.1115/1.4056686.

- [10] Guo H Y, Yuan H, Zhang J X, Ruan D. Review of sandwich structures under impact loadings: Experimental, numerical and theoretical analysis [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 196: 111541. DOI: 10.1016/j.tws.2023.111541.
- [11] ALONSO L, SOLIS A, GARCÍA-CASTILLO S K. A numerical - analytical study to determine a suitable distribution of plies in sandwich structures subjected to high-velocity impact [J]. Composite Structures, 2023, 307: 116645. DOI: 10.1016/j.compstruct.2022.116645.
- [12] GAO Y, LI Z, WEI X, et al. Advanced lightweight composite shells: Manufacturing, mechanical characterizations and applications [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 204: 112286. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112286.
- [13] MOZAFARI H, MOLATEFI H, CRUPI V, et al. In plane compressive response and crushing of foam filled aluminum honeycombs [J]. Journal of Composite Materials, 2015, 49(26): 3215-3228. DOI: 10.1177/0021998314561069.
- [14] KAZEMI M. Experimental investigation on the energy absorption characteristics of sandwich panels with layering of foam core under quasi-static punch loading [J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2022, 29(21): 3067-3075. DOI: 10.1080/15376494.2021.1885770.
- [15] HUSSEIN R D, RUAN D, LU G, et al. Crushing response of square aluminium tubes filled with polyurethane foam and aluminium honeycomb [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 110: 140-154. DOI: 10.1016/j.tws.2016.10.023.
- [16] PAN Y C, SANG M, ZHANG J S, et al. An integrative warning-protection shear thickened composite sponge towards sensing performance and impact resistance with excellent flame retardant [J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 279: 111466. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111466.
- [17] HU Q, ZHANG X, ZHANG J, et al. A review on energy absorption performance of auxetic composites with fillings [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 205: 112348. DOI: 10.1016/j.tws.2024.112348.
- [18] BROWN E, JAEGER H M. Shear thickening in concentrated suspensions: Phenomenology, mechanisms and relations to jamming [J]. Reports on Progress in Physics, 2014, 77(4): 046602. DOI: 10.1088/0034-4885/77/4/046602.
- [19] WYART M, CATES M E. Discontinuous shear thickening without inertia in dense non-Brownian suspensions [J]. Physical Review Letters, 2014, 112(9): 098302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.098302.
- [20] XIE Z, LIU Y, LIU L, et al. Research on the adaptability of STF-Kevlar to ambient temperature under low-velocity impact conditions [J]. Polymer Testing, 2024, 133: 108416. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2024.108416.
- [21] 陆振乾, 许玥, 孙宝忠. 剪切增稠液及其在抗冲击缓冲方面研究进展 [J]. 振动与冲击, 2019, 38(17): 128-136. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.17.017.
- LU Z Q, XU Y, SUN B Z. Progress in shear thickening fluid study and its application in anti-impact and cushioning areas [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(17): 128-136. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.17.017.
- [22] HOFFMAN R L. Discontinuous and dilatant viscosity behavior in concentrated suspensions III. Necessary conditions for their occurrence in viscometric flows [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 1982, 17: 161-184. DOI: 10.1016/0001-8686(82)80017-1.
- [23] BROWN E, JAEGER H M. A dynamic jamming point for shear thickening suspensions [J]. Physical Review Letters, 2009, 103(8): 086001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.103.086001.
- [24] GÜRGEN S, KUŞHAN M C, LI W. Shear thickening fluids in protective applications: A review [J]. Progress in Polymer Science, 2017, 75: 48-72. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2017.07.003.
- [25] RICHARDS J A, HODGSON D J M, O'NEILL R E, et al. Optimizing non-Newtonian fluids for impact protection of laminates [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2024, 121(10): e2317832121. DOI: 10.1073/pnas.2317832121.

- [26] WU X, XIAO K, YIN Q, et al. Experimental study on dynamic compressive behaviour of sandwich panel with shear thickening fluid filled pyramidal lattice truss core [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2018, 138: 467-475. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2018.02.029.
- [27] HU Q, LU G, HAMEED N, et al. Dynamic compressive behaviour of shear thickening fluid-filled honeycomb [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 229: 107493. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2022.107493.
- [28] LAM L, CHEN W, HAO H, et al. Dynamic crushing and energy absorption of bio-inspired shear thickening fluid-filled origami metastructure [J]. Engineering Structures, 2024, 299: 117122. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117122.
- [29] ZHAO Y, WANG Y, ZHANG J. Bioinspired fluid-structure coupling system for energy absorption [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025, 304: 110720. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2025.110720.
- [30] Chen Z, Jing Y, Wang H, et al. Fluid-structure interaction mechanism in shear thickening fluid/Foam composite for advanced protective structures[J]. Materials Today Communications, 2024, 41: 110662.