



多层属性复合材料综合力学性能 虚拟仿真研究

周 辉¹, 汪 浩^{2*}, 谢素超²

(1. 中南林业科技大学 物流与交通学院, 长沙 410004; 2. 中南大学 交通运输工程学院, 长沙 410075)

摘要: 针对复合材料蓬勃发展的趋势与高等教育仿真实验教学“两性一度”的目标, 从如何在有限的实验学时内向学生全方位展现新式复合材料的综合力学性能的角度出发, 以 Nomex 蜂窝复合材料为案例, 构建了基于 Hypermesh/Dyna 平台的虚拟仿真模型, 模拟了酚醛树脂-芳纶纤维的多层属性复合材料薄壁性能。针对压缩、弯曲、冲击、剪切、拉伸、高速射击等实验的特点全面探讨了复合材料力学性能的虚拟仿真实验教学。研究成果对于虚拟仿真技术在复杂实验教学中的应用有指导意义。

关键词: 实验教学; 虚拟仿真; 复合材料; 力学性能

中图分类号: TB332

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20230544

Study on Virtual Simulation on the Comprehensive Mechanical Properties of Multilayer Property Composites

ZHOU Hui¹, WANG Hao^{2*}, XIE Suchao²

(1. School of Logistics and Transportation, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China;

2. School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: In response to the booming trend of composite materials and the goal of “two properties and one degree” in higher education simulation experimental teaching, from the perspective of how to show the comprehensive mechanical properties of new composite materials to students within limited experimental time, a virtual simulation model based on Hypermesh/Dyna platform is constructed with Nomex honeycomb composites as a case to simulate the thin-wall properties of multilayer property composites with phenolic resin-aramid matrix. The mechanical properties of composite materials for the characteristics of compression is comprehensively discussed, including bending, impact, shear, tensile, high-speed shooting and other experiments. The research results are instructive for the application of virtual simulation technology in teaching complex experiments.

Key words: experimental teaching; virtual simulation; composite materials; mechanical properties

科技的发展与材料工艺的进步带来了各式各样复合材料, 凭借突出的综合性能大放异彩, 以复合材料取代传统材料是航空航天、交通运输、土木工程等领域发展的必然趋势^[1-2]。以高校车辆工程专业教学为例, 为了使学生立足时代前沿, 培养学生的创新素质, 激发学生的学习兴趣, 在材料力学、车辆工程、车辆结构强度、专业综合性实验等专业核心课程中加强关于复合材料力学性能与应用的教学具有关键作用^[3]。

多层属性是复合材料的普遍特性之一, 大多数复合材料的构成并非单一成分, 而是由增强体材料、树脂等多组分进行耦合, 从而表现出突出的比质量力学性能^[4]。相比传统材料, 多层属性复合材料的实验更加困难, 若要向学生全面展示复合材料的机械特性, 完成以静压、弯曲、冲击、剪切、拉伸等为代表的综合力学性能测试与评估^[5-7], 需耗费大量的时间, 且实体实验受设备台套数限制, 不易做到独立操作。而高校课程的实

收稿日期: 2023-11-21

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(52202455); 湖南省教学改革研究重点项目(11230003); 湖南省自然科学基金(2023JJ31015)。

作者简介: 周辉, 博士, 高级实验师, 主要从事复合结构及材料力学性能方面的研究。E-mail: zhouhui20060601@163.com

* 通信作者: 汪浩, 博士生, 主要从事复合材料轻量化方面的研究。E-mail: 224201023@csu.edu.cn

验学时通常是有限的,在 4~6 学时之间。基于以上原因,依靠实物实验来完成全部实验教学有较大难度。

开展仿真实验可以有效补充实体实验教学的不足。当前,依托计算机虚拟技术进行实验教学已经取得了一定成果^[8-10]。文献 [11] 提出了基于云渲染的虚拟仿真实验,促进虚拟仿真实验教学在资源共享方面有更好的发展;文献 [12] 在电磁场教学改革中应用了梯度式虚拟仿真;文献 [13] 在助产专业教学中引入了虚拟仿真技术,有效提升了实践教学的质量;文献 [14] 开发了电动机拖动系统虚拟实验,实现了与实验室实验形成相辅相成的教学效果。虚拟仿真技术拥有时空灵活性和数据可视化,可以对实验环境进行真实模拟并提供可交互、利于分析的实验结果。

本研究拟从提升仿真实验课程的高阶性、创新性和挑战度的目的出发,在专业核心课的实验教学环节中,向学生完整展示先进的多层属性复合材料的综合力学性能。通过教师提前进行复合材料实验获取必要数据,构建并校验虚拟仿真模型,依托虚拟仿真平台展开课堂教学,从而大大提高实验实训教学的效率。充分调动学生学习兴趣与学习积极性,加深学生对理论知识的理解,加强学生工程创新意识的培养,为在有限的实验学时下高质量完成实验教学任务创造条件。

1 基于多层属性的虚拟仿真模型

1.1 仿真建模

以在车辆工程领域有着广阔应用前景的新式复合芯体材料 Nomex 蜂窝为例,依托 Hypermesh/Ls-Dyna 平台构建基于多层属性复合材料综合力学性能的虚拟仿真实验设计流程。Nomex 蜂窝由芳纶材料浸渍酚醛树脂并固化制成,是一种新型多层属性薄壁复合材料,不但比强度、比刚度很高,还有阻燃、绝缘、耐腐蚀、耐环境等优良特性^[15]。不同于传统金属材料,如何向学生展现复合材料的多层属性力学性能有较高的高阶性和挑战度。Nomex 蜂窝具有酚醛树脂-芳纶纤维-酚醛树脂的 3 层属性壁厚,不仅如此,酚醛树脂的力学特性一般表现为各向同性的脆性材料,而芳纶增强体则被认为是各向异性(横观各向同性)的弹塑性材料,二者复合的 Nomex 蜂窝整体是各向异

性的。当前对于这种复杂的多层属性复合材料的虚拟仿真实验,往往会进行简单化处理,如对材料进行均质化假设,认为材料是单层的,甚至进一步假设材料是各向同性的,从而大幅降低对于复合材料的虚拟仿真难度。但若是采用均质化各向同性假设,学生无法了解到复合材料的具体构成以及力学性能优势,不利于学生对于复合材料的深度认识以及创新性思维的培养。

针对上述问题,本研究在传统壳单元的基础上提出了一种多层属性壳单元模拟方法,实现 Nomex 蜂窝薄壁的多层属性模拟。首先在有限元建模中以壳单元为基础构造 Nomex 蜂窝的网格模型,为表达蜂窝的多层属性,进一步引入自定义积分集成壳单元模块,将壳单元划分为若干组并分别考虑各组对应的材料本构,如芳纶纤维考虑各向异性弹塑性本构,酚醛树脂考虑各向同性脆性本构。根据壳单元材质的分组特性定义出积分方法,并在壳剖面单元中调用所定义的积分方法,从而实现对于 Nomex 蜂窝复合材料的壳单元多层属性分层变化模拟仿真。

根据 Nomex 蜂窝的具体结构特点,在蜂窝的有限元模型中定义了单层壁、双层壁两种厚度壳单元,如图 1 所示。以工程应用中常见的中密度 Nomex 蜂窝为例(名义密度为 48 kg/m^3),通过显微测量得到其单层壁和双层壁的厚度分别为 0.051 mm 和 0.104 mm ,由此对不同朝向的蜂窝壁建立局部坐标系,并在厚度方向上根据酚醛树脂和芳纶增强体的分布特性定义出壳单元积分方法,在壁厚方向上使用 8 个积分点将蜂窝薄壁划分为了 8 个层级。

每个层级在 Nomex 蜂窝薄壁中所占的位置和对应的厚度由自定义积分的积分点坐标 S_i 和权重系数 W_i 确定。其中权重系数 W_i 是对应的层级厚度 Δt_i 与蜂窝壁总厚度 t 之比,计算公式为:

$$W_i = \frac{\Delta t_i}{t} \quad (1)$$

积分点 S_i 的坐标计算公式为:

$$S_i = -1 + \frac{z_i}{t} \quad (2)$$

式中: z_i 为蜂窝薄壁表面到积分点的距离。中密度 Nomex 蜂窝的全部积分点设置如表 1 所示,其中下标的 single 和 double 分别代表了单层壁和双层壁。

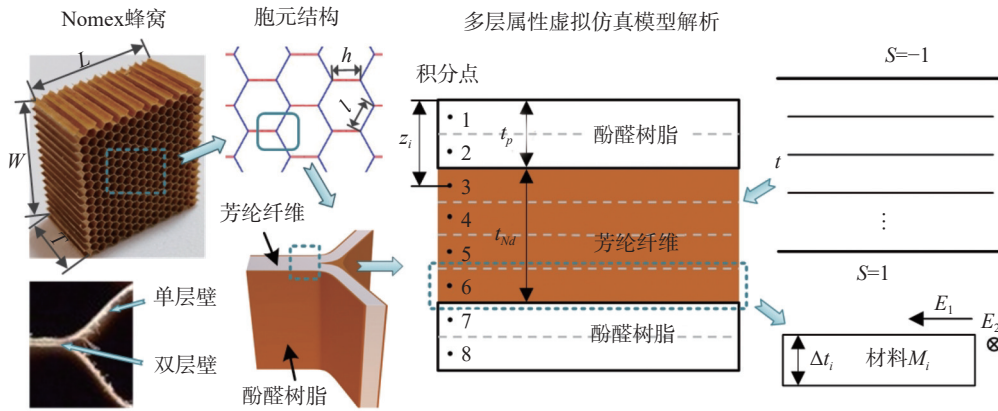


图 1 Nomex 蜂窝多层属性虚拟仿真模型构建

表 1 多层属性虚拟仿真模型积分点设置

积分点	S_{single}	W_{single}	S_{double}	W_{double}	材料
1	-0.92	0.08	-0.953 125	0.046 875	酚醛树脂
2	-0.76	0.08	-0.859 375	0.046 875	酚醛树脂
3	-0.51	0.17	-0.609 375	0.203 125	芳纶纤维
4	-0.17	0.17	-0.203 125	0.203 125	芳纶纤维
5	0.17	0.17	0.203 125	0.203 125	芳纶纤维
6	0.51	0.17	0.609 375	0.203 125	芳纶纤维
7	0.76	0.08	0.859 375	0.046 875	酚醛树脂
8	0.92	0.08	0.953 125	0.046 875	酚醛树脂

在自定义积分集成壳单元模块中进一步输入 Nomex 蜂窝各组分材料本构。基于 Ls-Dyna 仿真平台, 采用 mat22 复合损伤本构来模拟 Nomex 蜂窝的各向异性及破坏失效特点, 该本构提供了开裂、崩溃以及断裂 3 种失效模式计算, 并通过抗伸强度、抗压强度和剪切强度等参数来定义。对于 Nomex 蜂窝内部各向异性(横观各向同性)的芳纶增强体定义了各向同性面与垂直面的弹性模量 E_A 、 E_B 、 E_C , 泊松比 η_{BA} 、 η_{CA} 、 η_{CB} 和剪切模量 G_{AB} 、 G_{BC} 、 G_{CA} 。而对于主要表现为各向同性的脆性酚醛树脂表层则需要确定一组弹性模量 E_p 、泊松比 η_p 以及剪切模量 G_p , 同时设定失效体积模量 K_{fail} 、剪切强度 σ_{sc} 、纵向拉伸强度 σ_{yt} 、横向抗拉强度 σ_{xt} 以及横向抗压强度 σ_{yc} 。上述材料的具体参数如表 2 所示。对蜂窝整体定义接触类型为自动单面接触从而避免自我穿插, 设定接触的静摩擦系数为 0.3, 动摩擦系数为 0.2。

1.2 数值计算与验证

将 Nomex 蜂窝的虚拟仿真模型以不同的方向置于两平行刚性墙之间验证蜂窝的各向异性属性, 刚性墙与 Nomex 蜂窝之间的摩擦系数为 0.3,

保持下方的刚性墙固定静止不动, 对上方刚性墙施加强制位移, 从而模拟实际准静态压缩的实验过程。在虚拟仿真中为了提高计算速度对加载速度进行了加速, 但保证总动能不大于总内能的 5%。

表 2 多层属性虚拟仿真模型材料参数表

芳纶		树脂	
性能	数值	性能	数值
ρ_N	0.72 g/cm ³	ρ_p	1.34 g/cm ³
E_A	2.50 GPa	E_p	4.80 GPa
$E_B = E_C$	1.30 GPa	η_p	0.39
$\eta_{BA} = \eta_{CA}$	0.20	G_p	1.73 GPa
η_{CB}	0.30	K_{fail}	7.21 GPa
$G_{AB} = G_{BC}$	700 MPa	σ_{sc}	45 MPa
G_{CA}	600 MPa	σ_{yt}	75 MPa
		σ_{xt}	75 MPa
		σ_{yc}	135 MPa

Nomex 蜂窝压缩虚拟仿真与实验的对比如图 2 所示, 蜂窝的胞元边长分别为 2.75 mm 与 1.83 mm, 加载的方向分别为面外(T方向)与面内(L方向)。可以观察到仿真与实验有着比较好的比对。在受到面外加载后, Nomex 蜂窝首先发生了极为短暂的弹性变形, 之后胞壁呈现出了渐进式的塑性折叠并持续非常长的时间, 在这期间酚醛树脂表层发生脆裂与失效, 最终蜂窝被完全压溃和致密化。面外方向加载时 Nomex 蜂窝主要发生的是拉伸还原过程, 蜂窝的孔格产生畸变, 主要的吸能表现为酚醛树脂的脆裂失效。分析实验与虚拟仿真的应力-应变曲线数据, 获得峰值应力、平台应力、吸能量等力学性能指标, 仿真指标均与实验有较为良好的拟合对比, 相对误差均在 5% 以内, 这表明了所建立的 Nomex 蜂窝有限元模型具有较好的仿真效果。

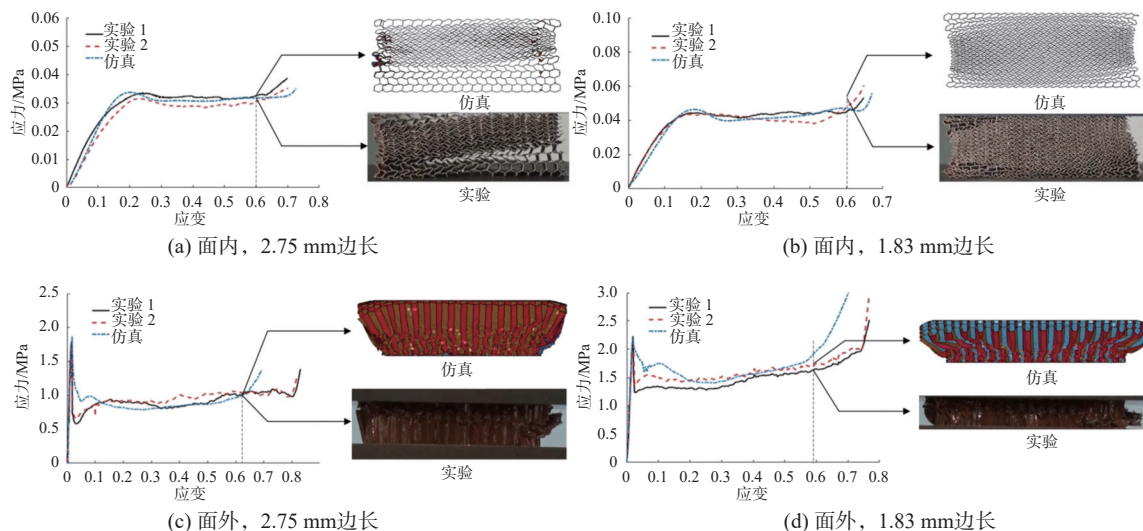


图 2 Nomex 蜂窝虚拟仿真数值计算与验证

2 虚拟仿真实验

2.1 静压实验

立足于复合材料的工程应用场景,设计多层属性复合材料的虚拟仿真教学实验,提升学生的工程创新意识。在实际应用中, Nomex 蜂窝常常作为芯体填料通过面外压溃起到能力吸收的功能,蜂窝芯层的渐进式的塑性塌陷损伤可以耗散大部分的冲击动能。准静态压缩实验是研究 Nomex 蜂窝吸能性能最为常见的实验方式之一,准静态实验可以非常容易观察到蜂窝压溃的详细变形历史,便于连续监视与记录蜂窝特定位置的载荷、位移和应变,测试所获得的力-位移曲线或应力-应变曲线可以非常直观评价吸能量大小与吸能平稳性情况,并可以将力学性能数据换算为比吸能等关于单位质量材料性能的指标。

单层 Nomex 蜂窝准静态压缩以及多层蜂窝叠加组合结构的叠加压缩实验与虚拟仿真情况如图 3 所示。将虚拟仿真立体展示效果与实际实验的动画视频结合教学,学生可以很好把握实际实验的屈曲、折叠、致密及阶段变形等特点。对于单块蜂窝来说,其面外方向的压缩带来了薄壁的渐进式折叠,耗散大量能量;而面内方向的压缩则是低效的树脂脆裂与拉伸还原过程,能量吸收远低于面外方向。对于叠加组合结构来说,蜂窝随着屈服强度依次发生变形,形成可控的多能级相应和阶梯吸能效果。在此基础上引入传统铝蜂窝的压缩试验/仿真结果,并将 Nomex 蜂窝与铝蜂

窝进行性能对比,使学生切身体会复合属性所带来的性能特点与优势,最后将 Nomex 蜂窝的面外高耗能特性应用于交通运输领域的吸能结构中,向学生展示整车的虚拟碰撞仿真实验,表明了复合材料蜂窝结构的引入对车辆的被动安全防护性能带来了有效提升,给学生留下深刻印象。

2.2 弯曲实验

在 Nomex 蜂窝的上下表面粘接强而轻质的面板,就构成了工程应用中经典的三明治夹芯板。通过表层面板和中间蜂窝芯的耦合作用,使夹芯板整体结构的力学性能大大增强。一般来说, Nomex 蜂窝夹芯板结构中的蒙皮面板可以提供拉伸、压缩和弯曲强度并提升结构整体的表面刚度,中间的 Nomex 蜂窝则提供了夹芯板的刚性、承受剪切载荷,并有助于将施加的载荷分散到较大的区域上。由冲击引起的破坏仅停留在局部,龟裂难以扩展,提高了 Nomex 蜂窝工作可靠性。弯曲性能是夹芯板的重要机械性能指标,在弯曲变形时,夹芯板沿板厚方向既承受压力又承受拉力,受力情况复杂。不仅如此, Nomex 蜂窝的多层属性为夹芯板带来了更为复杂的失效模式,因此开展 Nomex 蜂窝夹芯板的弯曲性能实验是十分必要的。

Nomex 蜂窝夹芯板的三点弯曲实验以及对应的虚拟仿真如图 4 所示。学生可以由此了解到在三点弯曲时 Nomex 蜂窝表现出了对称与非对称两种主要失效模式。作为一种各向异性材料, Nomex 蜂窝夹芯板在 L 方向和 W 方向弯曲时表达了不同的机械性能。Nomex 蜂窝芯的不同密度和孔格规

格直接影响了夹芯板的最大压溃力和吸能量, 蒙皮厚度与蜂窝芯厚度对夹层板的弹性系数、最大压溃力、结构吸能量等弯曲性能有着明显影响。虚拟仿真对上述 Nomex 蜂窝夹芯板的弹性系数、

最大压溃力、平均压溃应力及变形特性均有很好的模拟, Nomex 夹芯板的虚拟仿真实验对提高学生关于轻量化多层属性复合材料夹芯板的认识有很大帮助。

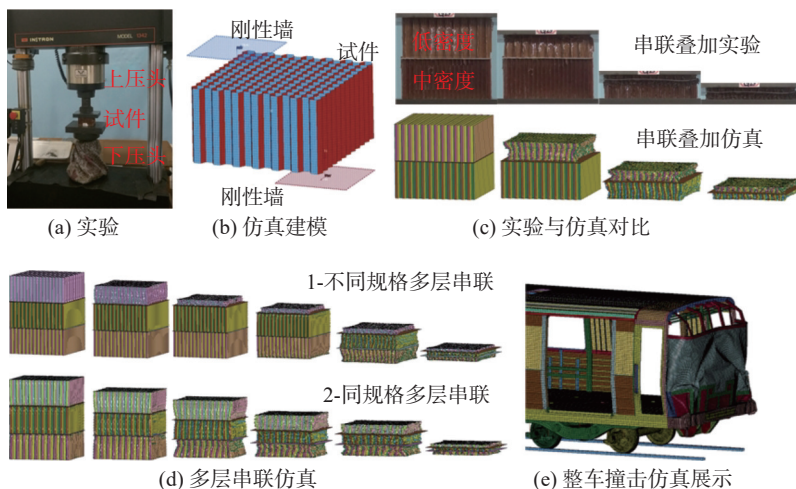


图 3 多层属性 Nomex 蜂窝的静态压缩

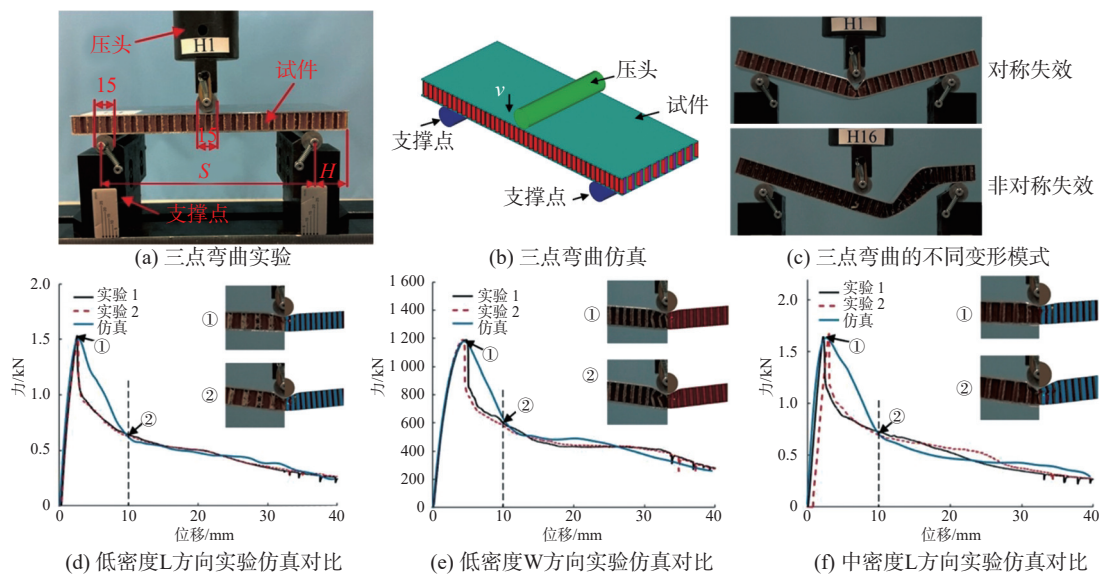


图 4 多层属性 Nomex 蜂窝夹芯板的三点弯曲实验及对应虚拟仿真图

2.3 冲击实验

冲击损伤分析是夹芯结构设计的重要环节, 对于 Nomex 夹芯板而言, 冲击损伤不仅会导致承载能力上的衰退, 还会导致本身基体开裂、分层、界面胶脱落和纤维层纤维断裂等, 在实际工程应用中如果这些损伤未得到及时发现和修复, 可能会导致比较严重的事故, 造成生命与财产的损失。

Nomex 蜂窝夹芯板的落锤动态冲击损伤研究

过程如图 5 所示, 通过动态冲击虚拟仿真, 学生将会了解到冲击中蜂窝密度、蒙皮厚度、冲头直径、冲击能量等参数对冲击载荷和失效模式的影响。如当夹芯板抗冲击能力较强时, 蒙皮塑性屈曲和芯材折叠是主要的失效形式; 抗冲击能力较弱时, 蒙皮会产生较为严重的塑性变形, 随着压痕和弯曲的进一步加剧, 主要失效形式为芯层塑性屈曲或断裂, 在蜂窝芯层压溃过程中的软化效应会使冲击载荷上升变慢或快速下降, 直至蜂窝芯

层密实化后再次上升；当夹芯板无法承受冲击载荷时，蒙皮穿透和蜂窝芯的塑性破碎为主要的失

效形式。复合材料的冲击虚拟仿真实验对于提升学生的工程创新意识和安全意识有着很大帮助。

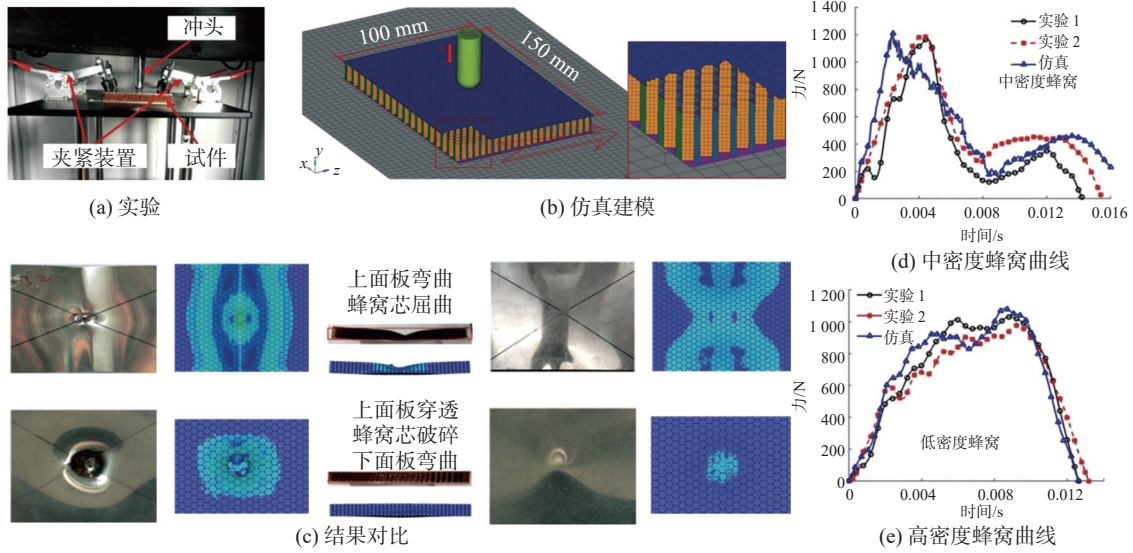


图 5 多层属性 Nomex 蜂窝夹芯板的冲击损伤

2.4 拉伸、剪切与高速射击实验

除了压缩、弯曲和冲击外，Nomex 蜂窝的虚拟仿真也可以应用于模拟拉伸、剪切等广泛力学测试^[16]以及空气炮射击等极端力学环境试验，对

于获得蜂窝更为广泛或特定的机械性能有着重要作用，能帮助学生全方位了解多层属性复合材料的综合力学实验。Nomex 蜂窝对于拉伸、剪切等实验的虚拟仿真如图 6 所示。

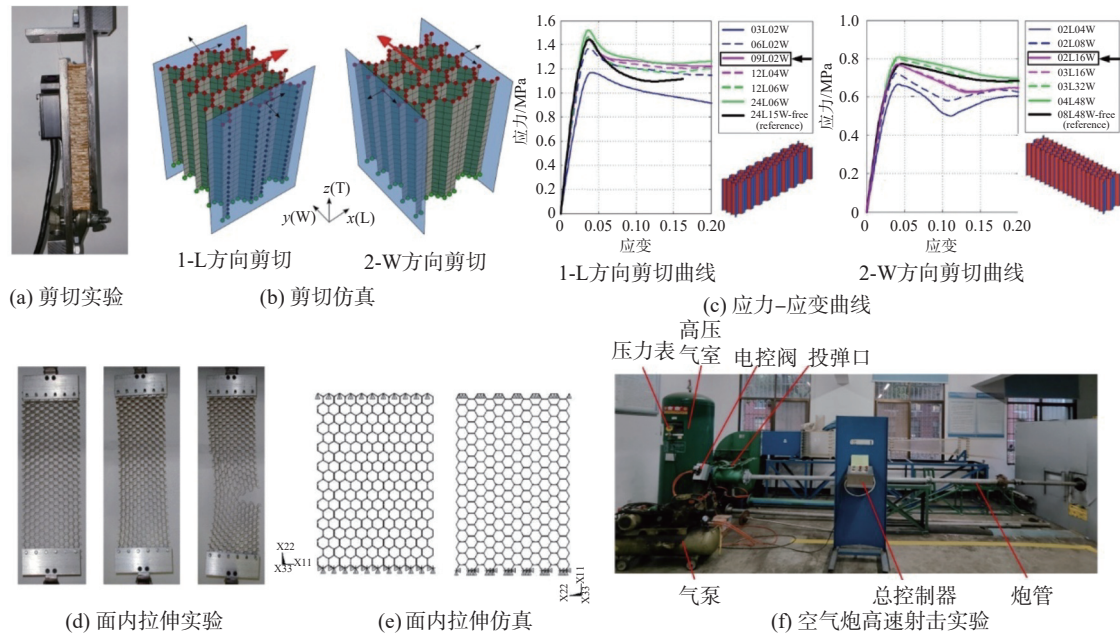


图 6 更多多层属性复合材料性能实验及虚拟仿真图

拉伸实验是最为基础和广泛的力学实验之一，通过 Nomex 蜂窝的面内拉伸，学生可以学习到多层属性复合材料杨氏模量的测试实验及虚拟仿真方法；剪切实验用于测试 Nomex 蜂窝的面内强度与模量，这些数据是驱动虚拟仿真的关键数

据，也反过来用于再现实验的情况。不仅如此，通过拉伸、剪切实验与压缩实验的对比，使学生深刻了解到 Nomex 蜂窝多层属性复合材料各向异性的机械性能，体会到蜂窝状结构的面内机械性能相比面外非常薄弱，这对于学生切身理解

蜂窝的实际工程应用场景起到了关键作用。而通过空气炮射击实验与虚拟仿真实验,并将 Nomex 蜂窝夹层板与传统铝蜂窝夹层板进行对比,使学生可以全面了解复合材料相比于传统材料对于抵抗高速冲击损伤的优势。

2.5 教学效果分析

虚拟仿真技术在复合材料力学性能实验教学中的应用显著提升了教学效果,表现在以下 5 个方面:

1) 静压虚拟仿真使学生能够详细观察复合属性蜂窝的压溃大变形,理解其能量吸收特性,掌握复合材料在工程应用中的实际表现与优势;

2) 三点弯曲虚拟仿真展示了复合材料夹层的失效模式,使学生深入理解夹芯板结构在实际应用中的力学表现;

3) 通过冲击损伤虚拟仿真,学生可以了解复合材料在高冲击环境下的失效模式,不仅提高了工程创新意识,也增强了安全意识;

4) 拉伸、剪切与高速射击仿真丰富了学生对于多层属性复合材料力学特性的认识;

5) 在教学中引入多层属性复合材料与传统金属材料的对比,使得学生更能体会到复合材料的性能特点与优势。

学生不仅掌握了复合材料的理论知识,还提高了其实践操作能力和创新思维能力。虚拟仿真技术提供了一个灵活、高效、直观的学习平台,使学生能够在有限的学时内高质量完成实验任务,为其未来的工程实践打下坚实基础。

3 结束语

在复合材料蓬勃发展的背景下,为培养学生的创新意识,激发学习兴趣,以新型多层属性 Nomex 复合材料蜂窝为例,针对有限实验课学时内难以全面展示复合材料综合力学性能及实验设备相对不足的问题,开发并探讨了复合材料综合力学性能的虚拟仿真实验方法。通过在传统壳单元基础上提出一种多层属性壳单元模拟方法,实现了对 Nomex 蜂窝薄壁的多层属性模拟。实验分析了 Nomex 蜂窝结构在压缩、弯曲、冲击、剪切、拉伸、高速射击等方面的力学行为。本实验课程使学生掌握了多层属性复合材料建模的方法,加深了对复合材料力学性能的理解,切身体会到复合材料的多层属性相较于单一属性传统材料所带来的结构特性与优势。本实验教学方案为今后开展相关复合材料结构设计奠定了基础,并

为其他实验教学项目提供了参考与借鉴,将对高校工程教育质量的提升起到积极作用。

参考文献

- [1] 熊天楚,梅名苏,王旭鹏. 轻型复合材料地铁车头模态分析[J]. 合成纤维, 2023, 52(1): 58-61.
- [2] 车士俊,张明睿. 复合材料在轨道交通中的应用综述[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(2): 100-104.
- [3] 叶昉,张青,刘永胜,等. 关于“复合材料工艺学”教学内容改革与探索的思考[J]. 教育教学论坛, 2022(44): 70-73.
- [4] HEGDE S, SATISH SHENOY B, CHETHAN K N. Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 19: 658-662.
- [5] KARAKOÇ A, FREUND J. Experimental studies on mechanical properties of cellular structures using Nomex® honeycomb cores[J]. *Composite Structures*, 2012, 94(6): 2017-2024.
- [6] ROY R, PARK S J, KWEON J H, et al. Characterization of Nomex honeycomb core constituent material mechanical properties[J]. *Composite Structures*, 2014, 117: 255-266.
- [7] 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.
- [8] 肖旭东,侯晓莉,乔丹,等. 模拟仿真在现代加工技术课程中的应用[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(3): 108-112.
- [9] 杨勇,张敏思,吴波,等. 岩体结构面网络仿真系统设计及其教学应用[J]. 计算机仿真, 2022, 39(9): 268-272.
- [10] 尉小荣,徐建,李洋洋. 高校国家级示范性虚拟仿真实验教学课程建设与应用现状分析[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(3): 26-30.
- [11] 孙振明,侯运炳,王雷. 基于云渲染的虚拟仿真实验教学实践分析[J]. 实验科学与技术, 2022, 20(6): 38-42.
- [12] 李慧,李小兵,马晓瑞,等. 梯度式虚拟仿真在电磁场教学改革中的应用[J]. 实验科学与技术, 2023, 21(2): 55-59.
- [13] 周倩倩,朱爱勇,曹文婷,等. 虚拟仿真技术在助产专业教学中应用[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(7): 237-240.
- [14] 金文,陈曦,韩洪洪. 电动机拖动虚拟实验设计及在教学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2020, 39(3): 211-214.
- [15] 李居影,李莹,魏化震,等. Nomex 纸蜂窝增强酚醛泡沫的制备及性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015(2): 64-67.
- [16] SEEMANN R, KRAUSE D. Numerical modelling of Nomex honeycomb sandwich cores at meso-scale level[J]. *Composite Structures*, 2017, 159: 702-718.