第 52 卷 第 5 期：2121-2130 高电压技术 Vol.52, No.5: 2121-2130
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20251031

仿生蜂窝超材料增强电工环氧树脂机械性能

蔡 茹[1]，徐玮蔚[1]，何 润[2]，白浩宇[1]，黄正勇[1]，李 剑[1]
（1. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学电气工程学院)，重庆 400044;
2. 国网重庆市电力公司永川供电分公司，重庆 400000）

摘 要：为提升气体绝缘金属封闭开关设备/气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated switchgear/gas-insulated transmission line, GIS/GIL)环氧绝缘材料的力学性，受自然界仿生超材料启发，首次将超材料概念引入高压绝缘结构所用电工环氧的制备，研制出具有仿生蜂窝超材料骨架结构的复合环氧树脂。首先设计构建 3 种典型蜂窝单胞构型(正六边形、正四边形、正三角形)，并进行对比优化选出最适合的蜂窝骨架结构，而后通过 3D 打印结合树脂灌注工艺实现仿生蜂窝超材料复合环氧树脂的制备。研究结果表明：六边形结构的超材料骨架可在较大变形下维持对整体结构的支撑作用，面内/面外压缩极限强度均最高，分别为约 2.77 MPa 与 7.51 MPa；采用的双固化树脂基体做作为骨架材料可以保证浇注到骨架空隙中的热固化树脂与骨架之间界面结合良好；仿生蜂窝超材料复合环氧树脂弯曲强度、拉伸强度均达最大值可分别达 99、95.5 MPa，相比于纯树脂增幅约为 57.6%、27.6%，断裂伸长率提升了 29.2%。表明仿生超材料骨架的合理引入会优化材料的应力传递路径，从而提升材料机械性能；此外，制备的超材料复合环氧树脂兼具一定的绝缘与耐热性能，为高压电力设备特别是 GIS/GIL 中环氧绝缘支撑件性能的调控提供了新的思路与方向。

关键词：环氧树脂；仿生超材料；蜂窝；骨架；机械性能；GIS/GIL

Enhancement of Mechanical Properties of Electrical Epoxy Resin by Biomimetic Honeycomb Metamaterials

CAI Ru[1], XU Weiwei[1], HE Run[2], BAI Haoyu[1], HUANG Zhengyong[1], LI Jian[1]
(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology(School of Electrical Engineering, Chongqing University), Chongqing 400044, China;
2. State Grid Chongqing Electric Power Company Yongchuan Power Supply Branch, Chongqing 400000, China)

Abstract: To enhance the mechanical properties of GIS/GIL epoxy insulating materials, we prepared a composite epoxy resin with a biomimetic honeycomb metamaterial skeleton structure, drawing inspiration from biomimetic metamaterials in nature and introducing the concept of metamaterials into the preparation of high-voltage insulating epoxy composite epoxy composites for the first time. Three typical honeycomb cell configurations (regular hexagon, regular quadrilateral, and regular triangle) were designed and comparatively optimized to identify the optimal scaffold configuration. Subsequently, biomimetic honeycomb metamaterial composite epoxy resin was prepared using a combination of 3D printing and resin infusion technology. The research results indicate that the hexagonal structure of the metamaterial can maintain its support function for the overall structure under significant deformation, with the highest in-plane/out-of-plane compressive ultimate strengths of approximately 2.77 MPa and 7.51 MPa, respectively. The dual-curing resin matrix and preparation method are used to ensure good interface bonding between the poured thermosetting resin and the skeleton. The bending strength and tensile strength of the biomimetic honeycomb metamaterial composite epoxy resin reach maximum values of up to 99 MPa and 95.5 MPa, respectively, representing increases of approximately 57.6% and 27.6% compared to pure resin, with a 29.2% improvement in elongation at break. It is demonstrated that biomimetic skeletons enable stress transfer and enhance the mechanical performance through optimized load-path design. In addition, the prepared metamaterial composite epoxy resin has a certain insulation and heat resistance properties, providing new ideas and directions for regulating the performance of high-voltage power equipment, especially GIS/GIL.

Key words: epoxy resin; biomimetic metamaterials; honeycomb; skeleton; mechanical properties; GIS/GIL

基金资助项目：三峡金沙江云川水电开发有限公司宁南白鹤滩电厂科研项目(H20240068)。
Project supported by Three Gorges Jinsha River Yunchuan Hydropower Development Co., Ltd. Ningnan Baihetan Power Plant(H20240068).

0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(gas-insulated switchgear，GIS)和气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated metal-enclosed transmission line，GIL)是采用压缩 SF_6 气体或 SF_6/N_2 混合气体作为绝缘介质的封闭型高压组合电器设备，具有占地面积小、空间利用率高、配置灵活、方便维护、受外界影响小等优点[1-3]。随着电力需求不断增大和城乡建设用地利用率的不断提高，GIS/GIL 在电力系统中的应用越来越广泛[4-5]。环氧树脂凭借其优异的力学性能、良好的热稳定性和绝缘性能，在电气绝缘领域获得了广泛应用[6-7]。环氧树脂作为一种关键的 GIS/GIL 绝缘支撑结构材料，其力学性能直接影响设备的稳定性和可靠性[8]。此外，GIL/GIS 设备在运行过程中需要承受高压、电动力和机械应力，环氧树脂的力学性能对于确保设备在复杂工况下的稳定运行至关重要[9-10]。其中盆式绝缘子作为 GIS/GIL 设备用于气室隔离和导体支撑，是 GIS/GIL 设备电绝缘和机械强度中的薄弱环节，关系到高压输电线路的安全可靠运行[11]。研究发现，盆式绝缘子机械性能不足是造成绝缘子故障的重要原因之一[12-13]。设备运行过程中产生的振动以及外部冲击会对盆式绝缘子产生动态载荷，这些动态载荷会加速材料的疲劳损伤，降低其机械强度。在高压电力设备运行时，如果盆式绝缘子力学性能不足，在持续机械应力作用下，如设备的自重、内部气体压力等，容易使材料内部产生裂纹、气隙等，在电场的进一步作用下，可能会发生电场畸变且引发放电并最终形成故障[14-15]。

超材料是结构化材料，其物理特性由其固有结构决定，而不是由其成分决定[16-17]。蜂窝是一类由晶格堆叠而成的多胞体超材料，因蜂巢结构具有轻质、高韧性、高刚度、耐冲击等特点，蜂巢结构广泛应用于工程领域[18-20]。根据自然界中的蜂巢结构，各种各样的蜂窝结构被设计出来，并广泛应用于航空航天、爆炸防护、降噪隔热、交通运输、汽车工业、船舶等领域[21-23]。学者 Liu W 提出了一种创新的超材料设计[24]，能够实现理想的冲击吸收和减震效果，它能够根据所需的能量吸收水平，调节其吸收冲击的能力，以适应多样化的冲击条件。该超材料还可多次使用，其在承受冲击前具有较高的刚度和强度，能够作为承载结构，在承受冲击后仍能保持结构完整性从而实现多次重复使用，该研究在《Nature》杂志发表。Jie D 等人设计了具有规则六边形和方形拓扑结构的聚乳酸蜂窝样品[25]，试验结果表明，规则六边形蜂窝结构在机械性能、能量吸收能力和断裂韧性方面表现出明显的优越性，规则六边形蜂窝结构能量吸收为 0.703 1±0.029 6 MJ/m^3，远高于方形蜂窝结构，最大应力为 8.55 MPa，在弯曲载荷下表现出卓越的整体强度和耐用性；规则六边形蜂窝结构表现出最复杂的裂纹扩展路径，具有很强的抗裂性。在超材料设计方面，得益于增材制造技术的快速发展，各种具备优异性能且结构复杂的超材料结构才能成功制备。目前，增材制造技术仍然是超材料制备中的主要方法。Zhao 等人开发了一种新型光固化弹性体系统[26]，使用基于数字光固化 3D 打印技术制备设计的折纸结构，展示了该技术为具有增强的承载能力和选择性变形模式的折纸结构提供的设计灵活性和制造效率。赵峻宏利用 3D 打印技术，使用聚乳酸(polylactio acid，PLA)材料制备了 5 种蜂窝结构[27]，结果显示，利用 PLA 材料制备出的六边形蜂窝结构与手型蜂窝结构材料完全可以满足实际应用需求，且其力学性能优于传统材料与结构，表明利用 3D 打印技术可以使材料可设计性更强，在轻质量下也能满足力学性能。

受仿生超材料启发，本文提出把仿生蜂窝超材料引入环氧树脂作为骨架结构，3D 打印定向构筑力学承载网络提高复合树脂力学性能，以实现满足 GIL/GIS 应用需求的环氧复合材料。

1 骨架结构设计与选取

研究表明，天然蜂窝结构凭借其独特的周期性晶格排布，呈现出高强度、低密度的力学特性，本质上蜂窝可视为一种典型的天然超材料[28]，其结构在工程上得到广泛应用[29-30]。本文以蜂窝结构作为超材料骨架进行研究，通过对纯环氧树脂材料制备的三种不同蜂窝骨架进行准静态压缩试验，选取出力学性能最好的蜂窝结构作为后续超材料复合环氧材料的支撑骨架。准静态压缩试验采用仪器为 UTM5305SYXL 型微机控制电子万能试验机，该设备具有 300 kN 的最大载荷容量，力值测量精度达 0.5 级，可实现 0.001~250 mm/min 的位移速率控制。

1.1 骨架结构设计

选取正六边形、正四边形、正三角形这 3 种最常见形状作为骨架的单胞蜂窝形状。平面内长宽定

义为 X_1 和 X_2，平面外方向定义为 Y。3 种骨架结构如图 1 所示，其中 l_a 为胞壁的长度，t_a 为胞壁的厚度，h 为 Y 方向的骨架深度。为防止在后期压缩试验中骨架结构的整体弯曲，将 Y 方向整体高度控制在 10 mm 以上，所设计压缩试验骨架模型尺寸大小为 30 mm×30 mm×10 mm。

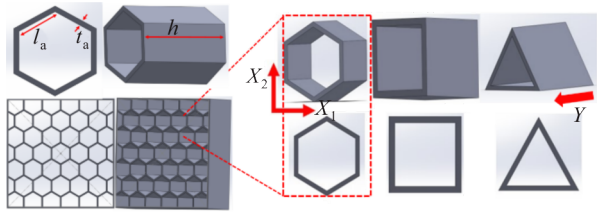
评价蜂窝承载性能时相对密度 ρ 是 1 个关键因素，为了控制变量，本文控制 3 种蜂窝单胞结构相对密度一致。具体相对密度如下所示。

$$\rho_a = \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{t_a}{l_a}\left(1-\frac{1}{2\sqrt{3}}\frac{t_a}{l_a}\right) \tag{1}$$

$$\rho_b = 2\frac{t_b}{l_b}\left(1-\frac{1}{2}\frac{t_b}{l_b}\right) \tag{2}$$

$$\rho_c = 2\frac{t_c}{l_c}\left(1-\frac{\sqrt{3}}{2}\frac{t_c}{l_c}\right) \tag{3}$$

式中：ρ_a 为六边形单胞相对密度；ρ_b 为四边形单胞相对密度；ρ_c 为三角形单胞相对密度；l_a 与 t_a 分别为正六边形蜂窝单胞壁长与单胞壁厚，mm；l_b 与 t_b 分别为正方形蜂窝单胞壁长与单胞壁厚，mm；l_c 与 t_c 分别为正三角形蜂窝单胞壁长与单胞壁厚，mm。根据相对密度计算式，保证 3 种蜂窝单胞结构相对密度一致情况下设计以下静态压缩试验骨架尺寸参数，参数如表 1 所示。



(a) 六边形蜂窝压缩结构　(b) 3种单胞骨架结构示意图

图 1　超材料骨架结构设计示意图

Fig.1　Schematic diagram of metamaterial skeleton structure design

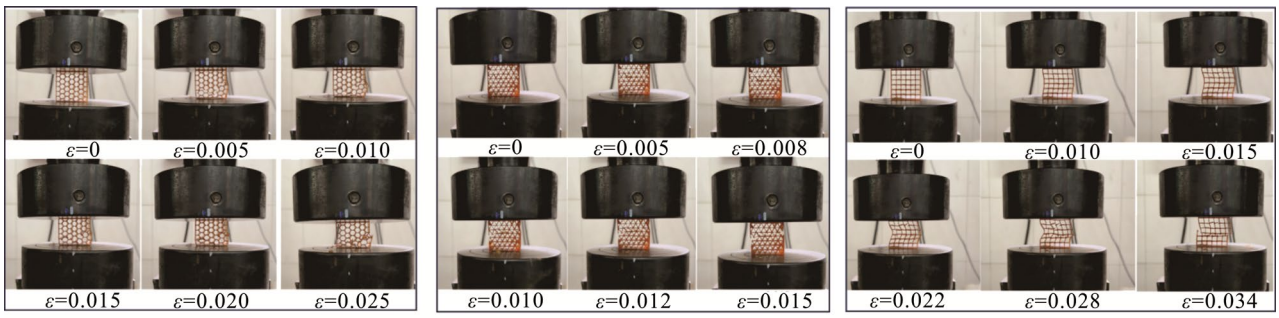
1.2　骨架结构性能分析

图 2 显示了 3 种蜂窝结构面外压缩变形图。在压缩性能测试中，ε 表示应变，通常定义为压缩位移与原始高度的比值，用于量化材料在压缩载荷下的相对形变量。从图 2(a)中可以看出，初始阶段正六边形单胞结构在压缩下逐渐转变为扁平形态，胞壁失去稳定并发生屈曲现象，单胞发生剪切变形；随着压缩进行，斜向胞壁因非均匀应力相继断裂，整层断开过程比图 2(b)的三角形蜂窝骨架变形过程持续更长，其韧性良好，可在较大变形下维持对整体结构的支撑作用。图 2(b)显示三角形单胞悬臂梁易发生屈曲失稳，同时伴随显著的弯曲变形；与载荷方向正交的单元壁会产生旋转位移，此变形模式变形自上而下扩展，使结构很快断裂分层，从而失去支撑作用，呈现较强的刚性，其韧性较差，在较小应变中完全断裂分层，在较大变形过程中无法对整体结构维持支撑作用。图 2(c)中四边形蜂窝结构整体呈现出与加载方向正交的变形带分布特征，水平壁于与载荷方向平行，沿加载方向的应力相对较小，但水平壁首先断裂，说明水平壁在阻止竖直壁弯曲起到决定作用，加载力将间接转化为由水平壁对竖直壁的拉伸力，使得四边形结构在受力过程中没有整体结构支撑性，这将可能会导致整体支撑强度欠佳。

表 1　3 种蜂窝压缩结构尺寸参数

Table 1　Dimensional parameters of three honeycomb compressing structures

结构名称	尺寸	单胞臂长/mm	单胞壁 t_a/mm
六边形蜂窝	30 mm×30 mm×10 mm	3	0.3
三角形蜂窝	30 mm×30 mm×10 mm	5.1	0.3
四边形蜂窝	30 mm×30 mm×10 mm	5.2	0.3



(a) 六边形蜂窝结构　(b) 三角形蜂窝结构　(c) 四边形蜂窝结构

图 2　蜂窝结构变形模式

Fig.2　Deformation patterns of honeycomb structure

图 3 为含不同单胞类型的超材料骨架结构的应力应变曲线。图 3(a)显示六边形超材料骨架面外压缩的应力与应变呈现出线性增长至峰值后快速下降，表明该结构能够在较大变形下有效维持对整体结构的支撑作用且韧性较好；三角形超材料骨架结构应力增长快，但短暂平缓期后骤降，说明其刚性大但韧性较差，无法在较大变形过程中对整体结构维持支撑作用；四边形骨架结构虽然应变范围大，但能够承受应力最小。图 3(b)显示了 3 种胞体结构在面内压缩阶段应力应变情况，从图中可以看出应变<5%时，3 种蜂窝结构的应力与应变均呈现出线性增长关系，当到达最大应力后，六边形骨架结构平缓期长，缓降，三角形和四边形平缓期较短，说明三角形与四边形单胞结构组成的骨架结构更为容易在压力作用下整体被压溃。

为了量化比较不同单胞组成的仿生蜂窝超材料骨架承载能力，从图 3 中提取了应力应变曲线峰值作为特征点来表示骨架结构首次发生整体断裂坍塌时的极限承载能力，承载强度如图 4 所示，从图 4 中可以看出对于面外压缩，六边形超材料骨架极限强度最高约为 2.77 MPa，三角形约为 2 MPa，四边形强度最低仅为 1.3 MPa 左右，约为六边形的 50%；相对于面外压缩，面内压缩 3 种结构骨架均有大幅增大，蜂窝六边形强度仍最高约为 7.51 MPa，四边形强度约为 7.44 MPa，三角形最低为 6.6 MPa 左右。

向不同类型单胞超材料骨架结构中浇注填充环氧树脂后得到相应的超材料复合环氧树脂，对骨架未添加填料的复合树脂进行了面外压缩试验。图 5 为不同类型单胞结构复合树脂的面外压缩应力应变曲线。从图 5 中可见浇注填充后蜂窝六边形结构的超材料复合环氧树脂具有最高的承载强度，应力为 110 MPa，且具有较长的平缓期，比无骨架结构树脂应力强度约高 10 MPa，且平缓期更长；具有三角形与四边形结构的复合树脂承载强度相对较小，三角形在达到应力峰值后迅速下降无平缓期，四边形结构复合树脂应变范围较大具有一定平缓期。说明单胞形状能够影响由超材料骨架结构浇注后的复合树脂在整体中的受力状态，宏观上表现为当蜂窝结构的单胞形状设计存在构型差异时，其力学相应将会有不同。此外与无骨架结构的树脂相比，表现为具有六边形蜂窝骨架结构的树脂材料比无骨架结构的树脂材料承载强度更大，达到应力峰值后的平

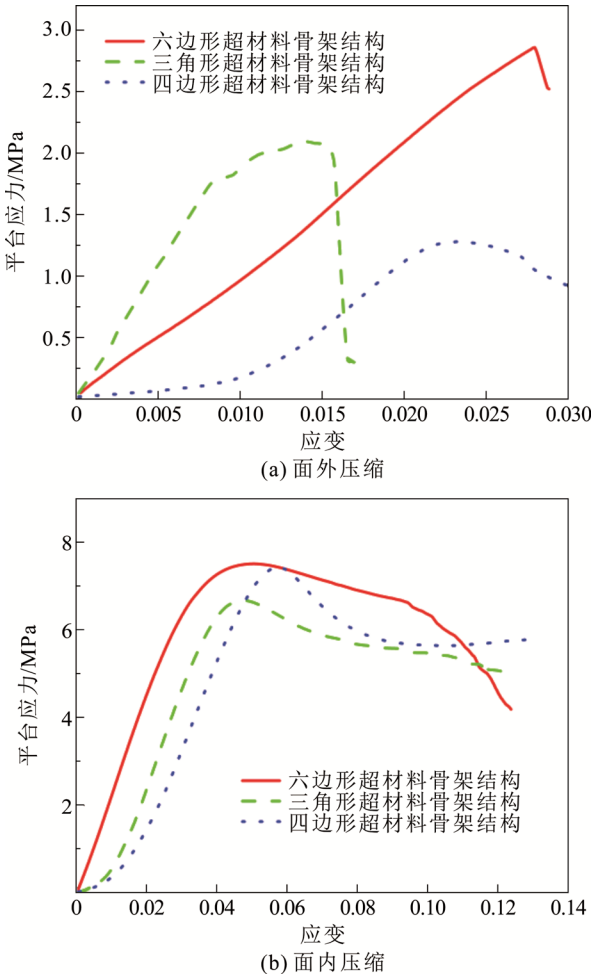


图 3 不同类型单胞结构组成的超材料骨架结构的应力应变曲线

Fig.3 Stress-strain curves of metamaterial skeleton structures with different unit cell types

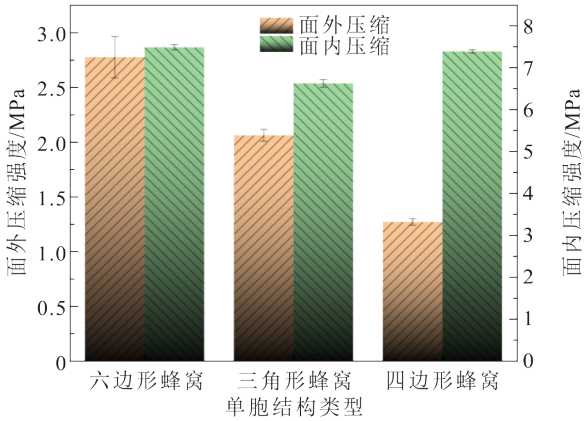


图 4 不同类型单胞结构组成的超材料骨架结构强度极限

Fig.4 Ultimate strengths of metamaterial skeleton structures with different unit cell types

缓期更长。从以上分析可以看出六边形单胞的骨架结构具有比四边形、三角形为单胞的骨架结构更强

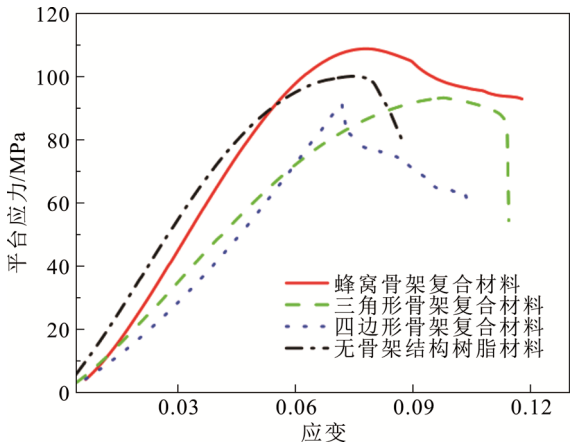


图 5　不同类型单胞结构复合树脂的面外压缩应力应变曲线

Fig.5　Stress-strain curves of composite resins with different unit cell types

的力学强度，同时具有应对范围更大的变形能力，此外有六边形蜂窝骨架结构的树脂比无骨架结构树脂的承载强度更好。试验后续研究将选取六边形蜂窝超材料骨架结构开展进一步研究。

2　试验

2.1　主要原材料

如表 2 所示，本研究中仿生蜂窝超材料树脂的制备需要先打印骨架而后在骨架空隙中浇注树脂再固化，考虑到浇注的热固化树脂与 3D 打印制备的超材料骨架结构之间存在的界面问题，本文超材料骨架树脂基体采用光热双固化树脂。此外，加入具有优异的电绝缘性能以及本征热导率高的片状六方氮化硼(hBN)作为骨架的填料，以保证材料更能满足实际应用中的电、热、力性能要求。

2.2　主要制备仪器

主要制备设备包括 3D 打印机(HALOT-ONE 型)，真空脱泡机(TMV-700TT 型)，电子分析天平(FA2004 型)，真空干燥箱(DHG-9030A 型)。

2.3　超材料骨架复合树脂的制备流程

超材料骨架复合树脂制备主要包括骨架的打印、热固化树脂的浇注与固化，如图 6 所示。首先设计待打印的三维模型，然后对模型进行分层，生成加工代码导入光固化 3D 打印机；接着将一定配比的光固化与热固化树脂混合作为骨架结构基体材料，并按比例添加氮化硼，在真空脱泡设备中搅拌均匀，倒入到料槽后开始打印骨架。打印完成后，取出骨架模型。接着对光固化 3D 打印的蜂窝骨架结构采用热固化树脂进行浇注填充，填充完成后转

表 2　试验材料

Table 2　Experimental materials

材料类型	材料名称	缩写
热固化树脂	2-乙基-4-甲基咪唑	2E4MI
	双酚 A 环氧单体	DGEBA
	脂环族环氧单体	C-EP
光固化树脂	三丙二醇二丙烯酸酯	TPGDA
	三丙烯酸三羟甲基丙酯	TMPTA
	环氧丙烯酸酯	EA
	光引发剂 819	BAPO
填料	氮化硼	hBN

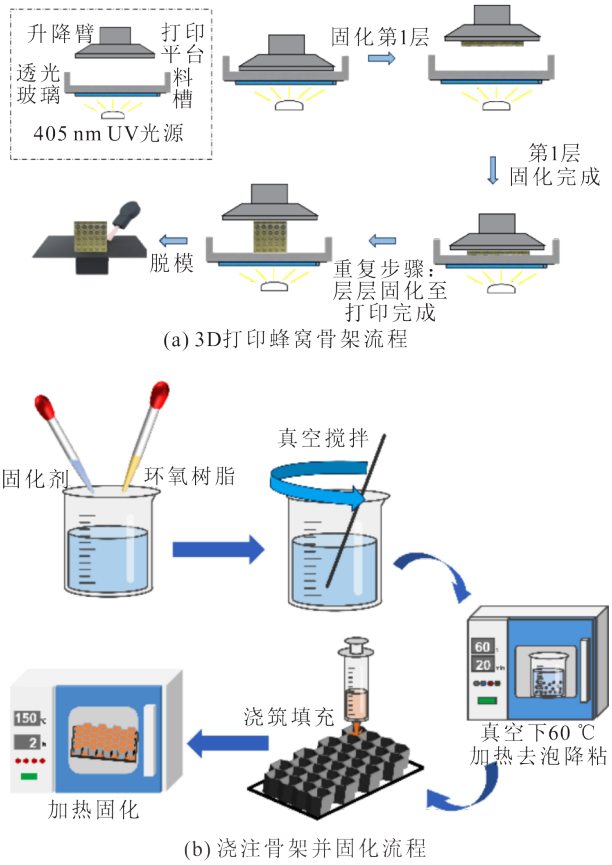


图 6　仿生蜂窝超材料骨架复合树脂的制备流程

Fig.6　Preparation process of composite epoxy resin with a biomimetic honeycomb metamaterial skeleton structure

入真空干燥箱固化处理，浇注细节如图 6(b)所示。

2.4　测试与表征

采用蔡司 METROTOM 1 小型工业 CT 测量机无损探测样品结构的三维图像。采用 Quanta 200 扫描电子显微镜检测样品微观结构。采用微机控制电子万能试验机 503B 对试样进行弯曲、拉伸性能测试。采用宽频介电谱仪 Concept 80 对试样的介电性能进行测试。采用 TGA 5500 对试样进行热重分析。

3 结果与分析

3.1 结构表征

图 7 为采用工业 CT 对仿生蜂窝超材料复合树脂的扫描图，从图 7 中可以清晰看到六边形蜂窝骨架结构，浇注填充的环氧树脂固化良好且内部未见裂纹气泡等缺陷，同时浇注的热固性树脂与打印的超材料骨架界面之间未见明显空隙，从宏观角度的 CT 扫描中可以定性看出环氧树脂与超材料骨架结合良好，未见明显界面问题。图 8 为复合材料表面微观形貌，其中图 8(a)为尺度为 1 mm 状态下材料图像，图中可以较为清晰看出骨架形状；将该图中所圈部位进行放大如 8(b)所示，从 8(b)可以看出有颜色深浅分层的现象，这是由于骨架所用材料与浇注所用材料不同所致；图 8(c)为图 8(b)中所圈部位进一步放大所得，从该图中所展现的微观形貌未见界面有空隙裂纹以及气泡等缺陷。

综上所述，采用工业 CT 扫描以及扫描电子显微镜(scanning electron microscope，SEM)这 2 种技术均未发现复合树脂材料中的空隙气泡等界面问题，说明本文采用的材料及制备方法能保证 3D 打印仿生超材料骨架与浇注的环氧树脂具有良好的结合性。

3.2 力学性能

制备的弯曲强度测试样条与哑铃型拉伸强度测试试样如图 9 所示，ω(hBN) 为 hBN 的质量分数。试样弯曲强度测试采用三点弯曲试验，荷载向下的速率为 2 mm/min，弯曲强度如式(4)进行计算。每组样品分别测试 5 次，取 5 次测试结果的平均值作为该组样品的弯曲强度。

$$\sigma_{\mathrm{b}}=\frac{3FL}{2bh^2} \tag{4}$$

式中：σ_b 为弯曲强度，MPa；F 为施加压力，N；L 为跨距，mm；b 为试样宽度，mm；h 为试样厚度，mm。经过弯曲强度测试后得到的超材料复合环氧树脂的弯曲强度见图 10(a)，所有超材料复合环氧树脂的弯曲性能均高于无骨架结构的纯环氧树脂样品，纯树脂的弯曲强度为 62.8 MPa，在 hBN 质量分数 ω(hBN)=15%时超材料复合环氧树脂弯曲强度达到最大值，为 99 MPa，相比于纯树脂增幅约 57.6%；超材料复合环氧树脂样品即使在弯曲强度最低为 71.5 MPa 时也可较纯树脂弯曲性能提升约 14%。

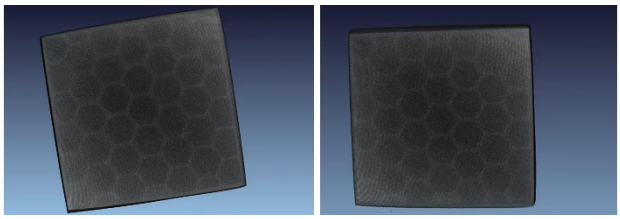


图 7 蜂窝骨架复合材料工业 CT 扫描图

Fig.7 Industrial CT scan of honeycomb skeleton composite material

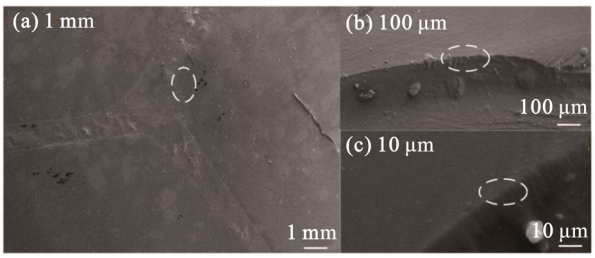


图 8 复合材料表面微观形貌

Fig.8 Surfaces microstructure of composite material

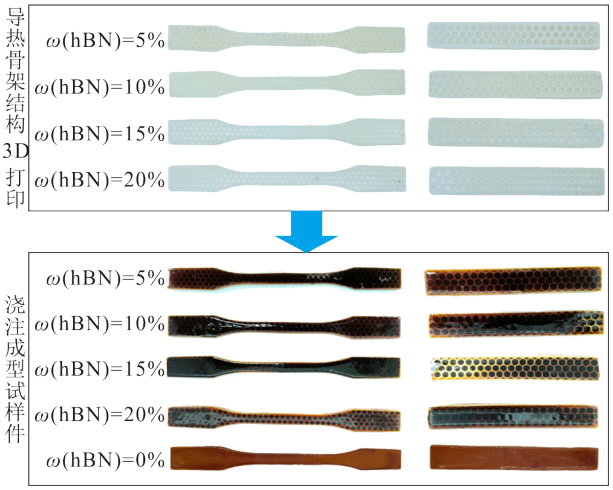


图 9 超材料复合环氧树脂力学测试样条

Fig.9 Mechanical test specimen of metamaterial composite resin

拉伸强度测试过程中拉伸速率设定为 2 mm/min，计算式如式(5)所示。

$$\sigma_{\mathrm{t}}=\frac{F}{bh} \tag{5}$$

式中：σ_{t} 为拉伸强度，MPa。同样每组样品分别测试 5 次，取 5 次测试结果的平均值作为该组样品的拉伸强度。图 10(b)绘制了超材料复合环氧树脂的拉伸强度随断裂伸长率变化曲线，随着填料含量增加，复合树脂的拉伸强度先上升后降低，在 ω(hBN)=15%时达到最大，拉伸强度约为 95.5 MPa，

断裂伸长率最高约为 5.3%，较纯环氧树脂拉伸强度 74.8 MPa 提升了 27.6%，断裂伸长率提升了 29.2%；在 ω(hBN)=20%时断裂伸长率与纯树脂大致相同，而拉伸强度为 80.1 MPa，可较纯树脂增幅约 7.1%。

从以上研究结果可以发现，弯曲强度与拉伸强度均随着片状 hBN 含量的增加呈现先上升后降低的趋势，在 ω(hBN)=15%时均为最大。通过 SEM 对骨架含质量分数为 15%填料的超材料复合环氧树脂断面形貌进行表征分析，结果如图 11 所示。从图 11 中可以看出氮化硼片层层堆叠，在三维空间上形成具有一定朝向的层层有序分布，从而在骨架中形成连续且刚性较强的网络链条，可以起到阻止裂纹扩展或使扩展反向偏移的作用，进一步提升强度和断裂韧性。此外，在环氧树脂中引入蜂窝仿生超材料作为内部的骨架支撑结构，其周期性的拓扑结构通过单元壁的均匀承载和应力分散能够有效抑制裂纹扩展路径，也可以提升整体抗弯与抗拉性能，起到宏观力学增强效果。然而 hBN 片含量过高时将直接增加复合树脂基体黏度，高黏度可能引发在 3D 打印过程中形成孔隙及分层等缺陷，同时高含量下填料易发生团聚效应，占比进一步减少的树脂基体与团聚区域结合下降，无法有效传递应力，引发界面脱黏，所以在 ω(hBN)=20%时超材料复合环氧树脂力学性能呈现下降。

以上结果表明，引入超材料骨架作为机械增强结构可有效改善复合材料的力学性能，同时选择添加合适的填料含量能够有进一步增强超材料复合环氧树脂的机械性能。

3.3　介电性能与热稳定性

由于实际运行过程中环氧绝缘支撑材料要受力、热、电的综合影响，因此在改善环氧树脂力学性能的同时需要考虑绝缘与热稳定性。电介质材料在外界电场作用下会发生极化现象，强电场下可能导致材料被破坏。介电性能是衡量电介质在电场作用下极化和能量损耗的物理量，是影响绝缘性能的关键参数。图 12(a)展示了超材料复合环氧树脂的介电常数随频率变化的趋势图，从图中可以看出在 10^{-1}~10^{6} Hz 频率范围内，所有样品的相对介电常数均随频率的升高而降低，原因是频率越高，偶极子越不容易在电场中发生偏转。复合材料的介电常数随着 hBN 含量的增加而增加，相比纯环氧树脂都有所增大。主要原因可能是添加片状 hBN 以后骨架中的 hBN 与环氧树脂间引入更多的填料/树脂界面，

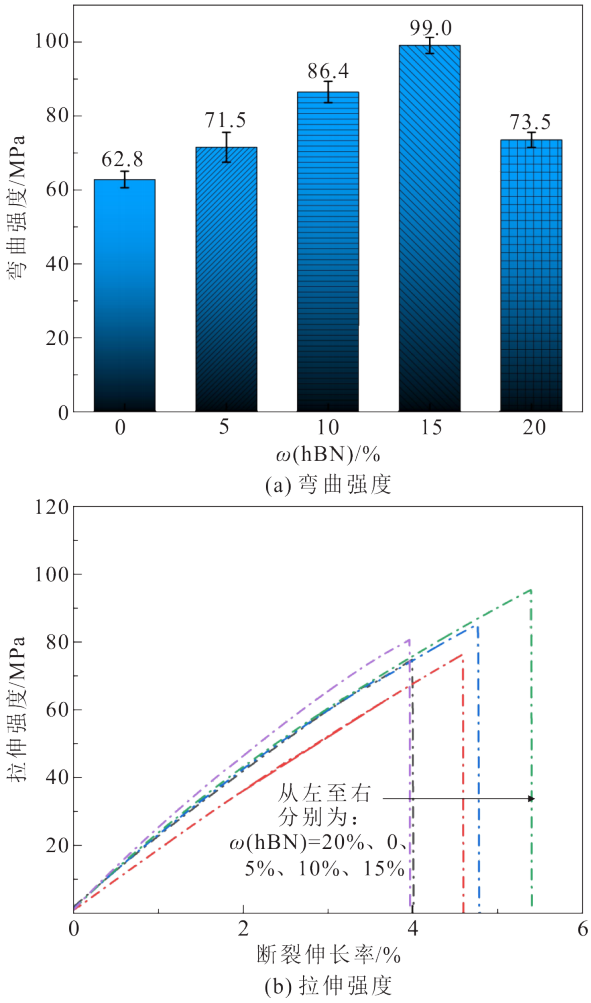


图 10　不同填料含量下超材料复合环氧树脂的力学性能

Fig.10　Mechanical properties of metamaterial composite epoxy resins with different filler contents

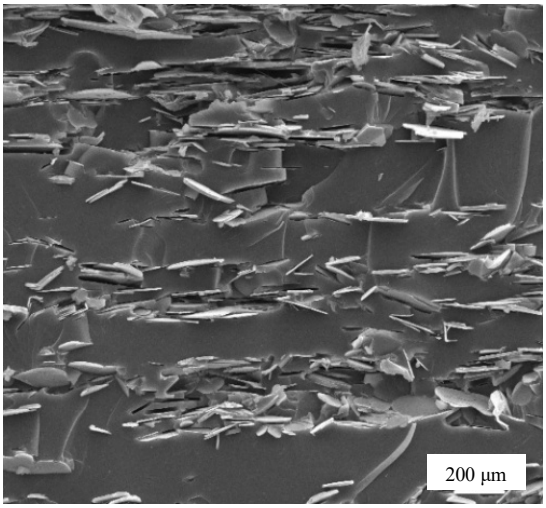
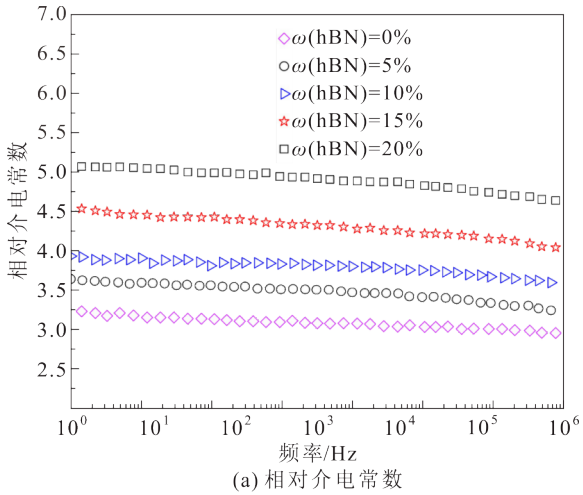
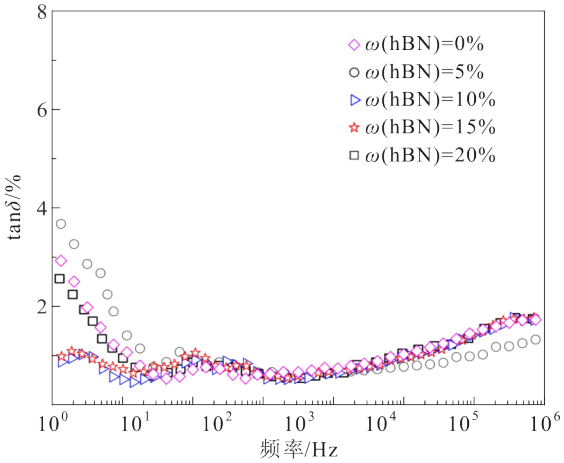


图 11　ω(hBN)=15%时的超材料复合环氧树脂断面形貌

Fig.11　Sectional morphology of metamaterial composite epoxy resin when ω(hBN)=15%



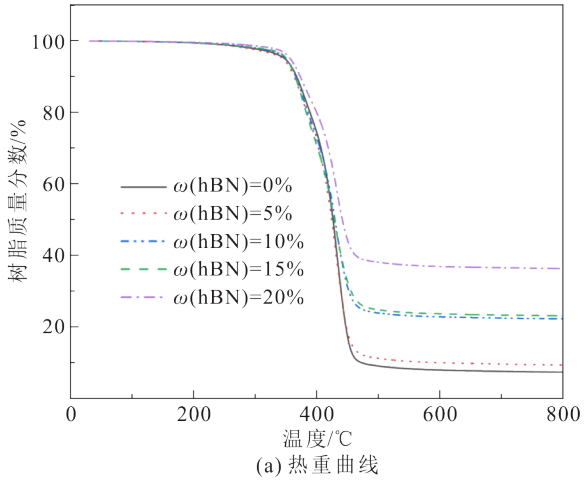
(a) 相对介电常数



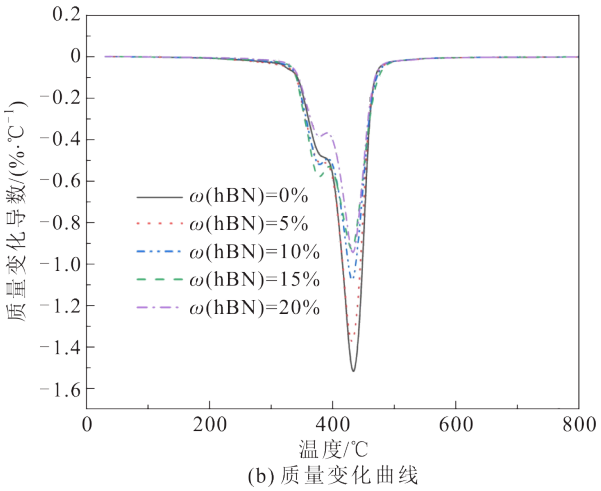
(b) 介电损耗

图 12 超材料复合环氧树脂的介电性能

Fig.12 Dielectric properties of metamaterial composite epoxy resins



(a) 热重曲线



(b) 质量变化曲线

图 13 超材料复合环氧树脂热重曲线和质量变化导数

Fig.13 Thermal decomposition behavior of metamaterial composite epoxy resins via TG/DTG analysis

加剧了界面极化的现象，从而提高复合材料介电常数[31]。图 12(b)为超材料复合环氧树脂的介质损耗因数随频率变化关系，在 10^{-1}~10^{6} Hz 的频率范围内，样品整体的介电损耗均呈现先下降后轻微上升的趋势。ω(hBN)=15%的超材料复合环氧树脂的介电损耗在 2.0%以内，相比于纯树脂的介电损耗下降了 33。结果表明，仿生蜂窝超材料骨架的引入在提升材料力学性能的同时也能够增强超材料复合环氧树脂的介电性能，在合适填料时超材料复合环氧树脂在 10^{-1}~10^{6} Hz 频率范围内能将介电损耗控制在 3.0%以内。

耐热性能是衡量树脂材料是否符合工程应用的一个重要评判标准，本文采用热重分析法(thermogravimetric analysis，TGA)表征了超材料复合环氧树脂的热稳定性，结果如图 13 所示。如图 13(a)所示，纯环氧树脂与超材料复合环氧树脂的热失重曲线具有相同的变化规律，验证了在环氧复合材料中引入超材料导热骨架结构不会对环氧树脂的热分解造成变化。失重温度通常分布在 300~450 ℃之间，主要原因在于该温度区间内环氧树脂的交联结构发生断裂。随着骨架结构中掺入氮化硼片含量的提升，热分解温度与纯环氧树脂相比将不断提高，其中 ω(hBN)=20%时尤为明显，这是由于氮化硼片材自身具有较高的本征热容，且其尺寸较大、刚性较强的片状结构能够在复合材料中形成有效的热屏障，从而在一定程度上延缓材料的热分解进程，提升其整体热稳定性。从图 13(b)样品的热重微分(derivative thermogravimetry，DTG)曲线中可观察到，树脂的最大热分解速度会随着片状氮化硼填料的增加先出现快速的降低，随后呈现出缓慢下降的趋势。这一变化主要归因于 hBN 具备良好的热稳定性。试验现象表明，所制备的超材料复合环氧树脂

在提升力学性能的同时也保证了可靠的热稳定性。

4　结论

本文研究首次将超材料概念引入高压绝缘电工环氧材料的制备，采用仿生蜂窝结构通过拓扑协同设计而成的超材料作为环氧材料内部的骨架支撑结构，超材料骨架通过调控结构实现优化材料的应力传递路径，使环氧复合材料性能力学能提升，同时制备的复合材料也保证一定的绝缘与热稳定性。主要结论如下所述。

1）六边形胞元较三角形、四边形胞元更适合作为蜂窝超材料的单胞形状：六边形蜂窝结构整体在形变过程中表现出最佳的韧性与支撑性，面外/面内压缩极限强度均最高，分别为约 2.77 MPa 与 7.51 MPa。

2）制备仿生蜂窝超材料复合环氧树脂具备可行，采用工业 CT 扫描以及 SEM 这 2 种技术均未发现复合树脂材料中的空隙气泡等界面问题，表明使用双固化树脂基体及制备方法可以保证浇注热固化树脂与骨架之间界面结合良好。

3）在环氧树脂引入超材料骨架作为机械增强结构可有效改善复合材料力学性能，拉升强度均高于无骨架结构的纯环氧树脂：在 ω(hBN)=15%时超材料复合环氧树脂弯曲强度、拉升强度均达到最大值，弯曲强度为 99 MPa，相比于纯树脂增幅约 57.6%，拉伸强度约为 95.5 MPa，断裂伸长率最高约为 5.3%，较纯环氧树脂拉伸强度 74.8 MPa 提升了 27.6%，断裂伸长率提升了 29.2%。

参考文献　References

[1] 江秀臣，许永鹏，李曜丞，等. 新型电力系统背景下的输变电数字化转型[J]. 高电压技术，2022，48(1)：1-10.
JIANG Xiuchen, XU Yongpeng, LI Yaocheng, et al. Digitalization transformation of power transmission and transformation under the back-ground of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 1-10.

[2] 肖登明，阎究敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 高电压技术，2017，43(3)：699-707.
XIAO Dengming, YAN Jiudun. Application and development of gas insulated transmission line (GIL)[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 699-707.

[3] NAKANE R, HAYAKAWA N, OKUBO H. Time and space transition of DC electric field distribution based on emerging field by accumulated charge in gas-solid composite insulation structure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(2): 440-447.

[4] 李立涅，罗　兵，董旭柱，等. 高电压技术发展现状及展望[J]. 高电压技术，2025，51(8)：3682-3720.
LI Licheng, LUO Bing, DONG Xuzhu, et al. Advances and prospects of high voltage technology[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 3682-3720.

[5] TAKINAMI N, KOBAYASHI S, MIYAZAKI A. Application of the world's longest gas insulated transmission line in Japan[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Nagoya, Japan: IEEE, 2003: 19-22.

[6] 李文文，张　婷，易正明，等. 适用于特高压电气用改性环氧树脂的合成及性能研究[J]. 山东化工，2024，53(7)：9-11，19.
LI Wenwen, ZHANG Ting, YI Zhengming, et al. Synthesis and properties of modified epoxy resins for ultra-high voltage electrical applications[J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(7): 9-11, 19.

[7] 丁嘉乐，贾倩倩，李　峰，等. 高压绝缘用环氧树脂配方体系研究进展[J]. 绝缘材料，2024，57(12)：9-19.
DING Jiale, JIA Qianqian, LI Feng, et al. Research progress on epoxy resin formulation system for high-voltage insulation[J]. Insulating Materials, 2024, 57(12): 9-19.

[8] ZHANG W J, DU B X, LIANG H C. Mechanical stress affecting dielectric properties of epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(4): 2255-2258.

[9] 尹桂来，李建英，王诗航，等. GIS 用氧化铝改性环氧浇注材料的热学与力学性能研究[J]. 绝缘材料，2014，47(5)：50-54.
YIN Guilai, LI Jianying, WANG Shihang, et al. Thermal and mechanical properties of epoxy casting materials modified by Al_2O_3 for GIS[J]. Insulating Materials, 2014, 47(5): 50-54.

[10] 吴德贯. GIL 三支柱绝缘子绝缘特性研究及工程应用[D]. 昆明：昆明理工大学，2020.
WU Deguan. Insulation characteristics and engineering application of GIL tri-post insulators[D]. Kunming, China: Kunming University of Science and Technology, 2020.

[11] 杨庆生，粘向川，张　婧，等. 智柔超材料及其力学性能的研究进展[J]. 固体力学学报，2024，45(2)：145-169.
YANG Qingsheng, NIAN Xiangchuan, ZHANG Jing, et al. Recent research progress on intelligent flexible mechanical metamaterials and their properties[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2024, 45(2): 145-169.

[12] 代铁琳，金刘超，尚　宸，等. 超材料的智能设计研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报，2025，37(1)：1-27.
DAI Tielin, JIN Liuchao, SHANG Chen, et al. Advances in intelligent design of metamaterials[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2025, 37(1): 1-27.

[13] 邓锦郅. 分层功能梯度蜂窝结构冲击动力学响应的研究[D]. 西安：长安大学，2019.
DENG Jinzhi. A research on impact dynamic response of layered functionally gradient honeycomb[D]. Xi'an, China: Chang'an University, 2019.

[14] DUAN S Y, TAO Y, LEI H S, et al. Enhanced out-of-plane compressive strength and energy absorption of 3D printed square and hexagonal honeycombs with variable-thickness cell edges[J]. Extreme Mechanics Letters, 2018, 18: 9-18.

[15] AJDARI A, NAYEB-HASHEMI H, VAZIRI A. Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(3/4): 506-516.

[16] 周津扬，李　明. 城市轨道交通车辆轻量化材料及应用[J]. 铁道车辆，2023，61(3)：109-113.
ZHOU Jinyang, LI Ming. Lightweight materials and applications for urban rail transit vehicles[J]. Rolling Stock, 2023, 61(3): 109-113.

[17] 程文礼，袁　超，邱启艳，等. 航空用蜂窝夹层结构及制造工艺[J]. 航空制造技术，2015(7)：94-98.
CHENG Wenli, YUAN Chao, QIU Qiyan, et al. Honeycomb sandwich structure and manufacturing process in aviation industy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(7): 94-98.

[18] 王惠添，王铖玉，陈　卓，等. 可变形超材料技术发展现状及应用综述[J]. 中国科学：物理学、力学、天文学，2025，55(3)：234601.
WANG Huitian, WANG Chengyu, CHEN Zhuo, et al. Development and applications of morphing metamaterial technology: a review[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2025, 55(3): 234601.

[19] LIU W F, JANBAZ S, DYKSTRA D, et al. Harnessing plasticity in sequential metamaterials for ideal shock absorption[J]. Nature, 2024, 634(8035): 842-847.

[20] JIE D H, BAI J, RAN M H, et al. Bending performance and crack propagation in biomimetic honeycomb structures for sustainable lightweight design[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2025, 112: 105640.

[21] ZHAO Z A, KUANG X, WU J T, et al. 3D printing of complex origami assemblages for reconfigurable structures[J]. Soft Matter, 2018, 14(39): 8051-8059.

[22] 赵峻宏，朱世范. 3D 打印蜂窝结构在临时性建筑中的力学性能分析[J]. 哈尔滨工业大学学报，2020，52(12)：98-104.
ZHAO Junhong, ZHU Shifan. Analysis of mechanical properties of 3D-printing honeycomb in temporary construction[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(12): 98-104.

[23] ZHANG Q C, YANG X H, LI P, et al. Bioinspired engineering of honeycomb structure-using nature to inspire human innovation[J]. Progress in Materials Science, 2015, 74: 332-400.

[24] KANYOLO G M, MASESE T, MATSUBARA N, et al. Honeycomb layered oxides: structure, energy storage, transport, topology and relevant insights[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(6): 3990-4030.

[25] KARIHALOO B L, ZHANG K, WANG J. Honeybee combs: how the circular cells transform into rounded hexagons[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2013, 10(86): 20130299.

[26] 刘　通，李洪涛，刘建军，等. 一起 GIS 盆式绝缘子应力开裂导致绝缘击穿故障[J]. 高压电器，2020，56(2)：240-245.
LIU Tong, LI Hongtao, LIU Jianjun, et al. Insulation breakdown fault caused by stress crack of GIS basin-type insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 240-245.

[27] 张国宝，杨　为，赵恒阳，等. 基于 X 射线三维成像技术的在役 GIS 盆式绝缘子缺陷检测[J]. 高压电器，2022，58(10)：230-236.
ZHANG Guobao, YANG Wei, ZHAO Hengyang, et al. Defect detection on operating insulation spacer of GIS based on 3D X-ray digital imaging technology[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 230-236.

[28] XING Y Q, WANG Z W, LIU L, et al. Defects and failure types of solid insulation in gas-insulated switchgear: in situ study and case analysis[J]. High Voltage, 2022, 7(1): 158-164.

[29] WANG S, CHEN Y, JIA F, et al. The multifactor aging characteristics and aging state assessment of epoxy composites for GIS[J]. IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 2024, 31(6): 3159-3168.

[30] XU H S, XIE C Z, GOU B, et al. Synergetic optimization of charge transport and breakdown strength of epoxy nanocomposites: Realizing sandwich topological structure through constructing a SiC@SiO_2/EP surface layer and m-BNNS/EP insert layer[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2022, 141: 106430.

[31] 刘智鹏，魏　来，李庆民，等. GIL 支柱绝缘子嵌件-环氧界面缺陷演化过程与放电脆裂机制[J]. 高电压技术，2024，50(1)：359-369.
LIU Zhipeng, WEI Lai, LI Qingmin, et al. Defects evolution process and mechanism of discharge embrittlement of GIL post insulator inserts and epoxy interface[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 359-369.



蔡　茹
1999—，女，硕士
主要从事高电压试验技术、绝缘材料的 3D 打印等研究工作
E-mail: 202311131313@stu.cqu.edu.cn

CAI Ru



黄正勇(通信作者)
1988—，男，博士，研究员，博导
主要从事高电压试验技术、功能绝缘材料制备及性能评价等方面的研究工作
E-mail: huangzhengyong@cqu.edu.cn

HUANG Zhengyong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-07-08　在线出版日期　2025-11-10　　编辑　曾文君