中国科学: 技术科学
SCIENTIA SINICA Technologica
techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS
精选文章导读

碳纤维浮力材料的力学及吸水性能研究

丛芳林[1,2], 李子寒[1,2], 于国财[1,2], 靳洋[1,2*], 朱子旭[3], 吴林志[1,2*]

1. 哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001
2. 哈尔滨工程大学先进船舶材料与力学工业和信息化部重点实验室, 哈尔滨 150001
3. 海军工程大学基础部, 武汉 430033
* E-mail: yangjin_hit2017@163.com; wulinzhi@hrbeu.edu.cn

1 研究背景

浮力材料是水下装备完成上浮下潜动作的关键材料, 其重量和体积占比较大. 减轻浮力材料重量, 能够大幅提升水下装备有效载荷、续航能力以及机动性. 空心玻璃微珠浮力材料是目前最广泛使用的浮力材料, 然而其采用的空心玻璃微珠已达微米尺度, 进一步缩小尺度、降低密度极其困难. 因此, 如何研发更轻更强的新型浮力材料, 填补行业空白, 是海洋装备领域亟需解决的关键难题.

碳纤维复合材料力学性能优异、耐腐蚀性能强, 近年来已被逐步拓展应用于海洋工程领域[1,2]. 然而, 现有轻质碳纤维复合材料结构(如蜂窝、点阵等)的面内力学性能较弱, 无法满足全周向水压载荷承载要求. 为此, 需要通过结构创新与系统优化, 研发兼具低密度与高抗压的轻质碳纤维复合材料结构, 并应用于浮力材料, 以满足深海工程的实际需求.

2 本文工作

本文将六方最密堆积排列的碳纤维圆管和高性能环氧树脂相结合, 设计并制备出一种新型碳纤维浮力材料, 如图1(a)所示. 碳纤维圆管兼顾碳纤维复合材料轻质高强和空心圆管几何构型稳定的双重特性, 具有优异的重排比, 是水下轻质耐压结构的不二之选.

碳纤维圆管两端用同直径的铝合金端盖封装, 以确保结构水密. 碳纤维圆管之间的空隙用高性能环氧树脂完全填充, 提供粘接定型功能的同时, 能够有效缓解圆管相切处的应力集中, 抑制圆管屈曲, 提高耐水压性能.

为评估碳纤维浮力材料的性能, 本文采用仿真分析与实验验证相结合的方法, 系统研究其耐水压与耐老化特性. 建立了基于三维Hashin和Yeh准则的有限元模型[3], 并进行了实验验证(图1(b)), 揭示了屈曲破坏机理. 开展了参数化研究, 实现了碳纤维浮力材料的等强度设计, 显著增强了其静水强度(图1(c)). 在耐老化测试中, 开展了12.5 MPa、60天的保压吸水测试, 给出了性能退化规律(图1(d)).

3 本文结论

本文建立的有限元模型能够准确描述碳纤维浮力材料在静水压载荷作用下的力学响应. 应力分析显示, 边缘碳纤维圆管的环向应力集中导致的屈曲破坏是碳纤维浮力材料的主要失效模式. 边缘碳纤维圆管局部加厚的等强度设计方法能够有效改善应力集中情况, 使得碳纤维浮力材料的静水压强度提高了17.5%. 耐老化性能研究表明, 在12.5 MPa静水压力下浸泡60天后, 碳纤维浮力材料的吸水率先增大后减小, 然后趋于稳定, 其最大吸水率为0.59%, 静水压强度最大降低

英文全文见: Cong F L, Li Z H, Yu G C, et al. The mechanical and water absorption properties of carbon fiber buoyancy materials under hydrostatic pressure. Sci China Tech Sci, 2025, 68: 1120202, https://doi.org/10.1007/s11431-024-2790-8

© 2026《中国科学》杂志社

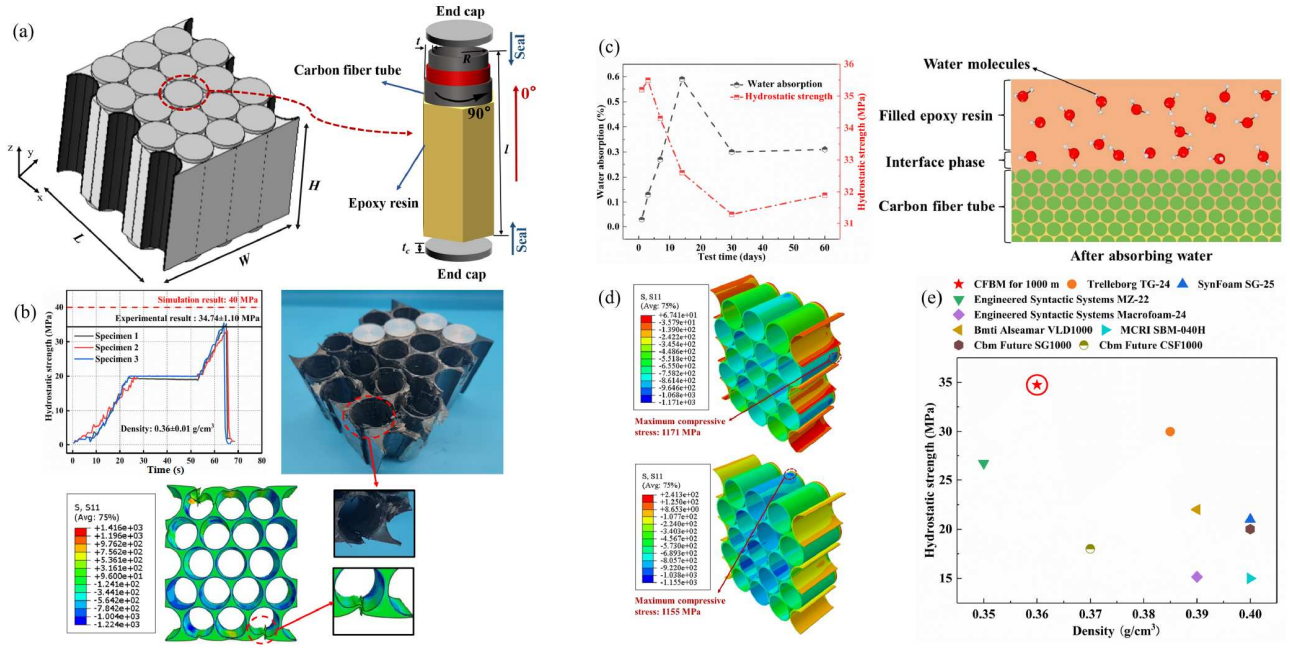


图 1 (网络版彩图) (a) 碳纤维浮力材料示意图; (b) 实验结果与仿真结果; (c) 耐老化性能及吸水机理; (d) 基于有限元方法的等强度设计; (e) 与传统浮力材料的对比

Figure 1 (Color online) (a) Schematic of carbon fiber buoyancy material; (b) experimental results and simulation results; (c) aging resistance performance and water absorption mechanism; (d) equal strength design based on the finite element method; (e) comparison with conventional buoyancy materials.

7.97%.

本文将所提出的碳纤维浮力材料与传统浮力材料相比, 发现在保证轻量化的前提下, 碳纤维浮力材料具有更高的静水压强度(图1(e)), 能够满足水下1000 m浮力材料使用要求. 研究成果突破了传统基于空心玻璃微珠的浮力材料技术路线, 拓展了基于碳纤维圆管的全新浮力材料技术方向. 设计的碳纤维浮力材料可用作水下潜器、探测设备等水下装备的潜浮和均衡系统, 提高其有效载荷和续航能力, 助力海洋工程领域高质量发展.

参考文献

1 Yuan K, Wang L, Liu C, et al. Buckling failure of winding composite cylindrical hulls under hydrostatic pressure. Ocean Eng, 2024, 303: 117855

2 Chen X, Yu G, Wang Z, et al. Enhancing out-of-plane compressive performance of carbon fiber composite honeycombs. Compos Struct, 2021, 255: 112984

3 Yu G C, Wu L Z, Ma L, et al. Low velocity impact of carbon fiber aluminum laminates. Compos Struct, 2015, 119: 757–766