

CFRP 铝合金管混凝土研究现状与展望

昌 魏^{1,2*}, 高 敏³

¹ 四川文理学院建筑工程学院 四川达州

² 达州市建筑环境工程技术研究中心 四川达州

³ 达州市投资有限公司 四川达州

【摘要】本文阐述了 CFRP 铝合金管混凝土在提升结构性能、适应复杂环境及优化结构设计方面的重要意义。从国外和国内两个维度，梳理了 CFRP 铝合金管混凝土在轴压性能、偏压性能、长期性能、受弯性能、非线性徐变性能及组合结构研究等方面进展，总结了现有研究的不足并对未来研究方向进行了展望，包括材料性能优化、结构体系拓展及多场耦合作用研究等。

【关键词】CFRP 铝合金管混凝土；CFRP 铝合金管；组合结构；碳纤维

【基金项目】达州市建筑环境工程技术研究中心项目 (SDJ2025ZC-02)

【收稿日期】2025 年 4 月 15 日 **【出刊日期】**2025 年 5 月 12 日 **【DOI】**10.12208/j.ace.2025000178

Research status and prospect of CFRP aluminum alloy concrete tube concrete

Wei Chang^{1,2*}, Min Gao³

¹School of Architectural Engineering, Sichuan University of Arts and Sciences, Dazhou, Sichuan

²Dazhou Building Environment Engineering Technology Research Center, Dazhou, Sichuan

³Dazhou Investment Co., Ltd. Dazhou, Sichuan

【Abstract】This paper expounds the significance of CFRP aluminum alloy tube concrete in improving structural performance, adapting to complex environments, and optimizing structural design. From the foreign and domestic dimensions, the progress of CFRP aluminum alloy tube concrete in axial compression performance, bias pressure, long-term performance, bending performance, nonlinear creep performance and composite structure research is sorted out, and the shortcomings of existing research are summarized and the future research direction is prospected, including material performance optimization, structural system expansion and multi-field coupling research.

【Keywords】CFRP aluminum alloy tube concrete; CFRP aluminum alloy pipe; Combined structure; Carbon fiber

1 引言

在土木工程结构领域，随着对结构性能要求的不断提高以及对建筑材料耐久性、轻质高强等特性的深入探索，组合结构材料应运而生。CFRP-铝合金管混凝土作为一种新型组合结构材料，融合了碳纤维增强复合材料（CFRP）、铝合金管和混凝土三者的优势，近年来受到了广泛关注。CFRP 具有轻质高强、耐腐蚀、抗疲劳等优异性能；铝合金管具有质量轻、外观优美、可回收利用率高且在一定程度上耐腐蚀的特点；混凝土则具有良好的抗压性能和经济适用性。将这三种材料组合形成的 CFRP 铝合金管混凝土构件，有望在提

高结构承载能力的同时，显著改善结构的耐久性、抗震性能等，在海洋工程、大跨结构、桥梁等诸多领域展现出极佳的应用前景。

2 CFRP 铝合金管混凝土研究意义

2.1 提升结构性能

普通铝合金管由于弹性模量约为碳钢的 1/3，对混凝土的约束能力较差，在重载结构应用中存在局限性^[1]。而 CFRP 的加入能大幅提高铝合金管对核心混凝土的约束作用。研究表明，在 CFRP 铝合金管混凝土柱中，随着 CFRP 层数的增加，构件轴压承载力显著增大。杨虓宇^[2]等对 9 根 CFRP 铝合金管混凝土柱进行轴压试

*通讯作者：昌魏，女，四川文理学院建筑工程学院专任教师，助教。

验,结果显示 CFRP 有效地提升了铝合金管对核心混凝土的约束效果。从内部应力分布来看,CFRP 铝合金管能为核心混凝土提供较强的约束。这种约束作用不仅提高了构件的抗压强度,还增强了构件的延性。当 CFRP 在峰值荷载时发生断裂,铝合金管随即发挥约束作用,其塑性变形避免了构件的脆性破坏,使荷载-位移曲线具有较好的残余段,保证了结构在破坏过程中的安全性和稳定性。

2.2 适应复杂环境

在海洋环境、恶劣气候环境以及有腐蚀风险的工业环境等复杂条件下,传统的结构材料面临诸多挑战。铝合金本身具有一定的耐腐蚀性,在空气中会生成 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 氧化膜来阻隔大气腐蚀,外观保持良好。但在一些特殊环境中,其耐腐蚀性能仍显不足。CFRP 具有卓越的耐腐蚀性能,将其与铝合金管结合,能进一步提高结构在复杂环境下的耐久性。例如在海洋工程中,海水的侵蚀对结构材料危害极大,粘贴 CFRP 的铝合金复合海水混凝土柱,不仅利用 CFRP 隔绝了部分化学物质对铝合金管的腐蚀,保证了铝合金外部的美观,还提高了结构的承载能力。同时,由于 CFRP 和铝合金管的协同作用,使得该组合结构在面对冻融循环、干湿交替等恶劣气候条件时,能更好地保持结构性能的稳定,延长结构的使用寿命。

2.3 优化结构设计

CFRP 铝合金管混凝土结构的出现为结构设计提供了更多的可能性和优化空间。由于其轻质高强的特性,在大跨结构设计中,可以有效减轻结构自重,降低基础工程的难度和成本,同时提高结构的跨越能力。在高层建筑结构中,使用该组合结构可以增加建筑的使用空间,减少结构构件的尺寸,提升建筑的空间利用率。而且,CFRP 可以根据设计需求进行裁剪和加工,与铝合金管和混凝土组合形成各种复杂的结构形式,满足不同建筑造型和功能的要求,为建筑设计师提供了更广阔的创作空间,有助于实现更加创新和高效的结构设计方案。

3 国外研究现状

国外学者针对 CFRP 铝合金管混凝土的研究与钢管混凝土比相对较少。在剪切与弯曲性能领域,Elkafrawy 等^[3]在钢筋混凝土梁侧面安装填充应变硬化水泥基复合材料的铝合金管(AT)肋板,以提升梁的抗剪性能。通过 9 根梁试验,重点分析 AT 肋的方向、长度、数量等配置参数对梁剪切承载力、破坏模式及变形行为的影响,该复合体系能有效改善钢筋混凝

土梁的抗剪性能。Gkantou 等^[4]聚焦可持续复合构件开发,提出将结构铝合金与低碳地聚合物混凝土结合,形成的聚合物混凝土填充铝合金管截面构件。通过试验,对比了方形空心截面(6082-T6 铝合金制成)在裸露、填充、普通硅酸盐水泥混凝土填充三种状态下的力学性能。结果表明,短柱的平均强度较裸露截面提升 16.5%~93.3%,梁的强度提升 14.1%~53.6%,且性能与 OPC 混凝土填充构件相近;基于欧洲复合钢-混凝土构件规范,该研究将钢与混凝土的材料特性替换为铝合金与 GC,提出的构件设计方法预测精度良好,验证了该无水泥复合截面的可持续性与结构有效性。Bin Ali 等^[5,6]针对混凝土填充双壁铝合金管(CFDSAT)与单壁铝合金管(CFAT)的弯曲性能,开展了系统性研究。在 CFDSAT 构件研究中,通过 10 根不同截面形式(方形外管-方形内管、方形外管-圆形内管、圆形外管-圆形内管)的梁试件弯曲试验,结合有限元模拟,分析了内外管截面长细比、空心率、混凝土抗压强度、截面形状及组合效应对构件抗弯性能的影响,最终基于 Eurocode 4 框架提出了 CFDSAT 构件抗弯强度设计方法与截面长细比限值。在 CFAT 构件研究中,进一步对比了 10 根 CFAT 梁与 10 根裸露铝合金管(BAT)梁的弯曲性能,发现 CFAT 构件因混凝土填充,其抗弯强度、刚度与延性较 BAT 构件显著提升,且薄壁截面构件的性能改善更为突出;参数分析表明,构件抗弯强度随截面高宽比、壁厚及混凝土强度等级的提高而增大。

4 国内研究现状

4.1 轴压性能研究

Cheng 等^[7](2024)提出 CFRP 条带加固圆端铝合金管混凝土柱(CREAC 柱),通过 8 个试件轴压试验发现,CFRP 条带使构件极限承载能力最大增 15.3%,条带数量减少会恶化承载能力与延性,增加宽度和厚度则改善延性,还提出轴压承载力计算方法,误差小于 1%。

刘玉强^[8]通过试验研究了铝合金管(圆)混凝土轴压短柱的力学性能,发现铝合金管对混凝土具有显著的约束作用,能够提高构件的承载力和延性。在此基础上,王兰^[9]研究了 CFRP 层数对铝合金管高强混凝土短柱轴压性能的影响,提出了考虑 CFRP 层数的轴压承载力计算公式,为工程设计提供了重要参考。杨长森^[10]等通过圆端形 CFRP-铝管约束混凝土柱的轴压试验发现,CFRP 的存在显著延缓了铝合金管平表面的鼓曲,破坏模式由斜剪切屈曲转变为 CFRP 断裂破坏。研究

表明, CFRP 的包裹层数和截面长宽比对构件性能有显著影响。随着 CFRP 层数增加, 构件的极限承载力和延性均有所提高, 截面长宽比大于 4 时易发生失稳破坏。赵鹏^[11]研究了 CFRP 条带加固铝合金管柱的轴压性能, 比较了全包与分段包裹的效果。分段包裹在相同 CFRP 用量下比全包更能提高极限荷载和位移, 尤其对长管和薄壁管效果更佳。有限元分析进一步验证了分段包裹能有效将长管受力分解为多个“竹节”状短管, 减少柔度影响。

4.2 长期性能研究

长期性能是评估 CFRP 铝合金管混凝土构件耐久性的重要指标。张皓勃^[12]研究了方形铝合金管混凝土短柱的长期性能, 发现含铝率、核心混凝土强度、加载龄期和持荷时间等因素对构件的长期变形有显著影响。与普通钢管混凝土相比, 方形铝合金管混凝土在长期持荷过程中表现出更小的变形增幅, 表明其具有更好的长期性能。这一发现为 CFRP 铝合金管混凝土在长期荷载作用下的应用提供了理论依据。丁杰和黎明^[13]等对高温后带肋铝合金管混凝土短柱的轴压性能进行了试验与模拟研究。结果表明, 温度超过 400℃ 后, 铝合金和混凝土的力学性能显著下降; 带肋设计能有效提高高温后的承载力和延性。此外, 混凝土强度越高, 高温后性能衰减越明显。

4.3 受弯性能研究

除了轴压性能外, 国内学者还研究了 CFRP 铝合金管混凝土的受弯性能。龚文志通过试验和理论分析, 研究了铝合金管(混凝土)受弯构件的静力性能, 发现铝合金管对混凝土具有显著的约束作用, 能够提高构件的受弯承载力和延性。在此基础上, 宁春珍^[14]等研究了圆中空夹层铝合金管-混凝土-钢管组合构件的受弯性能, 提出了受弯承载力的计算方法, 为该类构件在受弯荷载作用下的设计提供了依据。对圆中空夹层铝合金管-混凝土-钢管组合构件的受弯性能进行了系统研究。通过四点弯曲试验和有限元分析, 提出了基于塑性应力分布法的受弯承载力计算公式, 并验证了规范在抗弯刚度计算中的适用性。

4.4 非线性徐变性能研究

非线性徐变是混凝土材料在长期荷载作用下的一种重要力学行为。马明凤^[15]研究了方钢/铝合金管混凝土的非线性徐变性能, 发现方铝合金管混凝土徐变的非线性与截面应力重分布不显著, 与方钢管混凝土相比具有更好的长期性能。这一发现为 CFRP 铝合金管混凝土在长期荷载作用下的徐变性能研究提供了参考。

张皓勃^[16]等研究了方形铝合金管混凝土的长期徐变性能, 发现其长期变形比方钢管混凝土更大, 但徐变非线性较弱。通过建立考虑徐变泊松效应的有限元模型, 较好地预测了长期变形发展。

4.5 组合结构研究

随着建筑结构形式的多样化, CFRP 铝合金管混凝土组合结构逐渐成为研究热点。例如, 张纪刚^[17]提出了一种新型铝合金管混凝土组合海洋平台, 研究了其频率变化和抗震性能, 发现该结构体系具有较好的抗震性能。此外, 曾伟哲^[18]研究了圆中空夹层铝合金管-混凝土-钢管组合截面的受弯承载力, 提出了精确的计算方法, 为该类组合结构的设计提供了理论支持。

5 研究不足与展望

5.1 研究不足

尽管 CFRP 铝合金管混凝土构件的研究已取得显著进展, 但仍存在一些不足之处。目前研究多集中在单一荷载作用下的力学性能, 对复合荷载作用下的性能研究较少。在实际工程中, 构件可能同时承受轴压、偏压、弯曲和扭转等多种荷载的组合作用, 而目前对这种复杂受力状态下构件的性能研究还比较缺乏。其次, 对于 CFRP 与铝合金管之间的粘结性能研究尚不充分, 这在一定程度上影响了构件的整体性能评估。CFRP 与铝合金管之间的粘结质量直接影响到两者之间的应力传递, 进而影响构件的承载能力和变形性能。此外, 对于 CFRP-铝合金管混凝土构件的耐久性研究也需进一步加强。虽然已有一些研究关注了构件在高温、冻融循环等特殊环境下的性能, 但对于长期暴露在复杂环境中的构件性能演变规律还需要更深入的研究。

5.2 研究展望

未来 CFRP-铝合金管混凝土的研究可从以下几个方向展开:

材料性能优化: 进一步研究 CFRP、铝合金管和混凝土之间的协同工作机制, 通过优化材料组合方式、界面处理方法等, 提高三者之间的粘结性能和协同效率, 充分发挥材料的优势, 提升构件的综合力学性能。

结构体系拓展: 将 CFRP-铝合金管混凝土构件应用于更复杂的结构体系中, 研究构件在整体结构中的受力性能和协同工作机制, 为新型结构体系的设计和应用提供理论与实践依据。

地震、风灾等自然灾害作用下的响应研究: 开展 CFRP-铝合金管混凝土结构在地震、风灾等自然灾害作用下的响应研究, 建立相应的抗震、抗风设计理论和方法, 提高结构在灾害环境下的安全性和可靠性。

多场耦合作用研究: 深入研究 CFRP-铝合金管混凝土构件在多场耦合(如温度场、湿度场、

化学腐蚀场与力学场耦合)环境下的性能演变规律。考虑不同环境因素的交互作用对材料性能、界面性能以及构件整体性能的影响,建立多场耦合作用下的构件力学性能分析模型,为在复杂环境中应用该组合结构提供准确的设计和评估方法。

参考文献

- [1] 查晓雄,宫永丽.新型金属管混凝土柱力学性能研究 I : 轴压短柱强度承载力的研究[J].建筑钢结构进展,2012, 14(3):12-18,35.
- [2] 杨虓宇,蒋华.CFRP 约束铝合金圆管混凝土短柱轴压性能试验研究[J].建筑结构,2022,52(S2):1362-1368.
- [3] Elkafrawy M, Fayed S, Ramadan B A. Strengthening of RC beams defected in shear using external bonded ribs made of aluminum tube sandwich filled with strain hardening cementitious composites[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03998.
- [4] Gkantou M, Georgantzia E, Kadhim A, et al. Geopolymer concrete-filled aluminium alloy tubular cross-sections[J]. Structures, 2023, 51: 528-543.
- [5] Bin Ali S, Kamaris G S, Gkantou M. Flexural behaviour of concrete-filled double skin aluminium alloy tubes[J]. Engineering Structures, 2022, 265: 114972.
- [6] Bin Ali S, Kamaris G S, Gkantou M, et al. Concrete-filled and bare 6082-T6 aluminium alloy tubes under in-plane bending: Experiments, finite element analysis and design recommendations[J]. Thin-Walled Structures, 2022, 179: 108907.
- [7] Cheng C, Tang C, Xiong X, et al. Experimental study and numerical analysis on the axial compression performance of CFRP strip reinforced round-end aluminum alloy tube concrete column[J]. AIP Advances, 2024, 14(2): 025115.
- [8] 刘玉强.铝合金管(圆)混凝土轴压短柱力学性能试验研究[D].沈阳建筑大学,2020.
- [9] 王兰,姜航,谢文超,等. CFRP-铝合金复合管高强混凝土短柱轴压性能研究[J].建筑钢结构进展,2024, 26(04): 1-9.
- [10] 杨长森,邱其荣,唐守靖. 圆端形 CFRP-铝管约束混凝土柱轴压试验研究[J]. 广东建材,2025, 41(07): 30-34.
- [11] 赵鹏.CFRP 条带加固铝合金管柱轴压承载性能研究[D].长春:吉林大学,2024.
- [12] 张皓勃,耿悦,马明凤,等. 方形铝合金管混凝土短柱长期性能研究[J]. 建筑结构学报,2024, 45(S1): 161-168.
- [13] 丁杰,黎明. 高温后带肋铝合金管混凝土短柱有限元分析[J]. 安徽建筑,2024, 31(10): 55-57.
- [14] 宁春珍,曾翔,曾伟哲,等.中空夹层铝管-混凝土-钢管组合构件受弯试验[J].混凝土, 2025(6).
- [15] 马明凤.方钢/铝合金管混凝土非线性徐变性能研究[D].哈尔滨工业大学,2024.
- [16] 张皓勃,耿悦,马明凤,等.方形铝合金管混凝土短柱长期性能研究[J].建筑结构学报,2024,45(S1):161-168.
- [17] 张纪刚,刘菲菲,刘康利,等.新型铝合金管混凝土组合海洋平台抗震性能分析[J].结构工程师, 2018, 34(A01):5.
- [18] 曾伟哲,宁春珍,曾翔.圆中空夹层铝合金管-混凝土-钢管组合截面受弯承载力[J].海南大学学报(自然科学版中英文), 2025(1).
- [19] 吴鹏.冻融循环作用后铝合金管混凝土轴心受压构件力学性能研究[D].重庆交通大学,2018.
- [20] 向旗.冻融循环作用后金属管混凝土梁柱节点力学性能研究[D].重庆交通大学,2019.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS