

# 复式钢管混凝土结构动态力学性能研究进展

丁嘉伟 刘锋 王学友

苏州中材建设有限公司, 中国·江苏 昆山 215300

**摘要:** 复式钢管混凝土结构兼具钢材与混凝土的协同受力优势, 在承载力、延性、耗能能力及抗灾性能方面表现出良好潜力。随着研究不断深入, 其研究重点已由早期静力性能分析逐步拓展至地震、爆炸和冲击等动力性能领域。本文系统分析总结了该类结构在爆炸冲击与地震作用下受力性能的研究进展, 并对后续研究工作进行了展望。

**关键词:** 复式钢管混凝土结构; 爆炸冲击; 抗震性能; 动力性能; 研究进展

## Research Progress on Dynamic Mechanical Properties of Concrete-Filled Double Steel Tubular Structures

Ding Jiawei, Liu Feng, Wang Xueyou

Suzhou Zhongcai Construction Co., Ltd, China Jiangsu Kunshan 215300

**Abstract:** The concrete-filled double steel tubular structures combine the mechanical advantages of steel and concrete, showing considerable potential in terms of bearing capacity, ductility, energy dissipation, and disaster resistance. With the continuous development of research, the focus has gradually expanded from static behavior to dynamic performance under extreme actions such as earthquakes, blasts, and impacts. This paper systematically analyzes and summarizes the research progress on the mechanical behavior of such structures under explosive shock and seismic loads, and outlines future research directions.

**Keywords:** Concrete-filled double steel tubular structures; Explosion shock; Seismic performance; Power performance; Research progress

## 0 引言

钢管混凝土结构能够较好地发挥钢材与混凝土的协同受力优势, 因而在高层建筑、高耸结构、桥梁及其他工程结构中得到广泛应用。随着工程结构向大跨、高耸、重载和复杂环境发展, 传统单层钢管混凝土构件在承载力、稳定性和抗灾能力等方面逐渐显现出一定局限。复式钢管混凝土结构通过在截面内部设置内钢管, 形成多层受力体系, 在提高承载能力、改善延性和增强整体稳定性方面具有较好潜力。根据截面形式的不同, 复式钢管混凝土可分为中空夹层钢管混凝土和实复式钢管混凝土。

近年来, 相关研究已由早期静力性能分析逐步拓展到地震、爆炸和冲击等动力荷载作用下力学性能研究领域, 并取得了丰硕的研究成果。

本文系统分析、总结复式钢管混凝土结构在爆炸冲击以及地震作用下的力学性能研究进展, 并对后续发展方向进行探讨。

## 1 爆炸冲击下复式钢管混凝土结构力学性能研究

与静力荷载相比, 爆炸荷载具有作用时间短、峰值

高、加载速率快等特点。构件在受爆过程中, 往往会出现局部压溃、整体弯曲、剪切滑移以及爆后承载力急剧下降等问题。就现有研究而言, 复式钢管混凝土结构的抗爆研究仍主要集中在柱构件上, 研究手段也以爆炸试验和数值模拟为主。

吴赛等<sup>[1]</sup>采用数值模拟手段对复式钢管混凝土柱在三种典型工况下的动态响应进行了分析。结果表明: 由于钢管的存在, 复式钢管混凝土柱体现出良好的抗爆性能。

李晓燕<sup>[2]</sup>基于数值模拟分析方法和等效单自由度分析方法对近场爆炸作用下中空双层钢管混凝土柱动态响应及损伤评估进行了探究。

崔莹<sup>[3]</sup>采用试验研究和数值模拟方法对爆炸荷载下复式空心钢管混凝土柱的动态响应和损伤评估进行了系统研究, 建立了基于固端约束下复式空心钢管混凝土柱中挠度的超压-冲量损伤准则及判定公式。

任逸文<sup>[4]</sup>采用试验研究、数值分析和理论分析相结合方法研究了中空夹层钢管混凝土的抗冲击力学性能。

邓旭辉等<sup>[5]</sup>采用 ALE 多物质流固耦合算法分析了中空夹层超高性能钢管混凝土柱在近爆作用下的损伤机理、能

量吸收特性和影响参数。张焕青<sup>[6]</sup>通过理论分析和数值模拟方法研究了八边形中空夹层钢管混凝土柱轴压承载力的计算方法和爆炸作用下的动力响应。

徐慎春等<sup>[7]</sup>通过野外爆炸试验和数值模拟,对圆形中空夹层钢管超高性能纤维混凝土柱的抗爆性能进行了研究。结果表明,轴压比、折合距离、空心率以及内外钢管的径厚比,都会对构件的动态响应和损伤破坏产生明显影响。

El Sherbiny 等<sup>[8]</sup>在综述中指出,钢管混凝土柱和中空夹层钢管混凝土柱的抗爆研究多围绕近距爆炸或接触爆炸展开,关注的重点包括构件的动态响应、破坏模式以及爆后剩余承载力的变化。装药量、爆距、空心率、钢管厚度、混凝土强度、钢材强度以及轴压水平等因素,都会对中空夹层钢管混凝土柱的损伤程度、位移响应和残余承载力产生影响。

王宇等<sup>[9]</sup>利用落锤试验研究了双层钢管混凝土组合结构在多次侧向冲击作用下的抗冲击性能,分析了构件的变形机理,并获取了试件在历次冲击过程中的冲击力时程曲线以及历次冲击后的整体变形和凹陷变形数据。

随着装配式桥梁技术的发展,预制节段拼装双层钢管混凝土墩柱的抗爆性能也开始受到关注。夏梦涛、李明鸿等<sup>[10-11]</sup>采用模型试验、数值模拟等方法,研究了预制拼装双层钢管混凝土墩柱的抗爆性能,探究了爆炸作用下墩柱的耗能机理、破坏模式和关键参数的影响。研究表明:墩柱典型失效表现为后张预应力筋断裂引起的整体失效,核心混凝土损伤主要集中在接缝区和预应力筋挤压区;爆炸距离、节段数量和预应力水平都会对墩柱的抗爆表现产生影响,其中提高预应力有利于减小柱中最大水平位移和墩底滑移。

近年来,FRP、UHPC 等高性能材料也被引入新型复式钢管混凝土构件中。谢云鹏等<sup>[12]</sup>通过近场爆炸试验和数值模拟研究了 FRP-UHPC-钢双壁空心柱的抗爆性能。研究表明:该类构件依靠外层 FRP 管、UHPC 夹层和内钢管的协同作用,在近爆作用下主要表现为局部破坏模式;外层 FRP 管和 UHPC 夹层能够有效抑制近爆区混凝土剥落,减轻局部损伤,并提高爆炸后的残余承载力;与传统 RC 桥墩相比,该类构件在抗爆能力和爆后工作性能方面表现出更明显的优势。

从上述研究进展来看,爆炸冲击作用下复式钢管混凝土结构的研究已从普通柱构件逐步扩展到节段拼装墩柱和高性能新型构件,研究重点也由早期的位移和损伤分析,

逐渐转向爆后剩余承载力评估和工程设计方法。但仍主要集中在柱构件层面,关于节点、结构整体体系的抗爆抗冲击研究还较少,这也是后续需要继续深入的方向。

## 2 地震作用下复式钢管混凝土结构力学性能研究

与爆炸冲击作用相比,地震作用更强调反复荷载下的累积损伤、刚度退化和耗能能力,因此复式钢管混凝土结构在抗震研究中,更多关注滞回性能、延性、塑性铰发展以及节点区受力机理。

Faramarzadeh 等<sup>[13]</sup>对带新型加强圆形截面的双层钢管混凝土柱进行了循环荷载加载研究。研究表明,加强构造后构件的循环受力性能得到了明显改善,尤其是在外层钢管受损后,柱的承载力不会出现较强的下降。

谭敬儒<sup>[14]</sup>采用试验研究、数值模拟和理论分析方法,系统研究了方套圆中空夹层 Q690 钢管高延性混凝土柱在循环荷载作用下的破坏模式、滞回行为以及应变分布特征,探讨了关键设计参数对其抗震性能的影响规律,并提出了相应的抗震设计方法。

王慧智<sup>[15]</sup>研究了钢管再生陶瓷混凝土构件的静力和拟静力性能。舒赣平等<sup>[16]</sup>开展了中空波纹夹层钢管混凝土柱的拟静力试验,分析了试件的破坏模式、承载能力、延性与耗能能力、刚度退化和强度退化等性能指标。

尹国安等<sup>[17]</sup>开展了多腔中空夹层钢管混凝土穿心螺栓端板式梁柱节点的低周往复荷载试验,研究了节点的失效模式和抗震性能,分析了内钢管截面形状、有无楼板和柱截面空心率等因素对节点抗震性能的影响。别雪梦<sup>[18]</sup>对方套方中空夹层钢管混凝土弦杆-方钢管腹杆 T 形节点的抗震性能进行了试验和理论研究,并提出了抗震设计方法。

张冬芳等<sup>[19]</sup>对考虑楼组合作用的复式钢管混凝土柱-钢梁节点进行了低周往复荷载试验研究。结果表明:该类节点滞回曲线较饱满,刚度退化较明显而承载力退化不明显,表现出较好的抗震性能;楼板与钢梁的组合作用能显著提高节点承载力,并影响节点内力与变形分布,使节点破坏由单纯梁端破坏向梁端与柱端共同参与破坏转变。

张玉芬等<sup>[20]</sup>对复式钢管混凝土外环板节点和半穿心节点抗震性能进行了对比研究。研究指出,两类节点均表现出梁端塑性铰破坏的特征,且节点连接刚度较大。在不同构造措施中,增设外环板更有利于提高节点承载力和延性,而增设腋板则对初始刚度和耗能性能的提升更为明显。

樊军超等<sup>[21]</sup>提出一种便于灾后修复的装配式复式钢管混凝土节点,并通过 6 个缩尺节点试件的拟静力试验,研

究了节点的承载力、延性、刚度退化、承载力退化和耗能能力。研究表明,节点表现出较好的塑性变形能力和承载力稳定性;增大端板厚度能较明显地改善节点的整体抗震性能,而提高混凝土填充度和采用方形内钢管虽能提升承载力,但会在一定程度上削弱耗能能力。

刘忠华<sup>[22]</sup>提出一种适用于大跨度、高容积率和多高层的中空波纹夹层钢管混凝土柱组合框架结构体系,并采用试验研究、数值模拟和理论分析等手段对该结构体系从构件、节点、体系三个不同尺度空间开展了系统的研究。

王静峰等<sup>[23]</sup>采用混合试验方法开展了装配式中空夹层钢管混凝土组合框架拟动力试验,获得了组合框架在地震作用下的破坏模式和动力响应,分析了中空夹层混凝土柱和组合节点的受力性能,揭示了组合框架的整体抗震性能。

赵均海等<sup>[24]</sup>提出了装配式复式钢管混凝土柱-钢梁框架结构,并开展了3榀1:2缩尺框架模型的拟静力试验,得到各试件的破坏模式、滞回性能、延性、刚度与承载力退化。试验研究表明,3个模型均表现出良好的承载能力和延性,最大层间位移角超过4%,位移延性系数大多超过4。

郭磊<sup>[25]</sup>通过试验研究、数值模拟和理论分析研究了附加金属阻尼器装配式中空夹层钢管混凝土组合框架的抗震机理、地震损伤分布以及设计方法。

总体来看,地震作用下复式钢管混凝土的研究已经形成了柱构件-梁柱节点-框架结构体系的基本脉络。研究结果普遍表明,复式钢管混凝土结构具有较好的承载能力、延性和耗能潜力,但目前研究仍以构件和节点抗震性能为主,关于结构体系层面的协同抗震机理、实用抗震设计方法等问题,仍需深入探讨。

### 3 结语与展望

复式钢管混凝土结构能够较好发挥钢材与混凝土的协同作用,在承载力、延性、耗能和抗灾性能等方面表现出明显优势,工程应用前景广阔。近年来,相关研究已由静力性能逐步扩展到爆炸冲击和地震作用等动力性能领域,研究对象也由普通构件拓展到节点和整体结构。已有研究表明,截面形式、空心率、钢管厚度、材料强度及连接构造等因素,对其动力性能和破坏特征都有较明显影响。

但从整体上看,目前研究仍是以构件和节点为主,对结构体系层面的受力机理、灾后剩余性能以及工程设计方法的研究还不够。后续有必要进一步加强整体结构的动力性能研究,关注震后、爆炸冲击后性能评估和可修复设计,同时结合装配式发展需求以及高性能材料应用,推动复式

钢管混凝土结构研究向更系统、更深入、更贴近工程应用的方向发展。

#### 参考文献:

- [1] 吴赛, 赵均海, 魏雪英等. 爆炸荷载作用下复式钢管混凝土柱的数值分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(1): 112-117, 135.
- [2] 李晓燕. 近场爆炸作用下中空双层钢管混凝土柱动态响应及损伤评估[D]. 西南科技大学, 2024.
- [3] 崔莹. 爆炸荷载下复式空心钢管混凝土柱的动态响应及损伤评估[D]. 长安大学, 2013.
- [4] 任逸文. 冲击荷载下中空夹层钢管混凝土动态力学性能试验研究[D]. 东南大学, 2018.
- [5] 邓旭辉, 王达锋. 近爆作用下中空夹层超高性能钢管混凝土柱的抗爆性能[J]. 高压物理学报, 2020, 34(06): 151-164.
- [6] 张焕青. 八边形中空夹层钢管混凝土柱承载力统一解及抗爆性能研究[D]. 长安大学, 2021.
- [7] 徐慎春, 刘中宪, 吴成清. 圆形中空夹层钢管超高性能钢纤维混凝土柱抗爆性能野外实验与数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(4): 649-660.
- [8] El Sherbiny M G, Serror M H, Ramadan O M O, et al. Gap study on concrete filled steel tube (CFST) and concrete filled double steel tube(CFDST)columns subjected to blast loads[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 43195.
- [9] 王宇, 钱旭东. 多次侧向冲击下双层钢管混凝土结构的响应分析[J]. 振动与冲击, 2017, 36(02): 1-6.
- [10] 夏梦涛, 李明鸿, 宗周红等. 大当量爆炸作用下预制节段拼装双层钢管混凝土墩柱的失效模式[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(11): 14-27.
- [11] 李明鸿, 刘晏辰, 夏梦涛等. 爆炸荷载下预制节段拼装双层钢管混凝土墩柱的动力响应数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(3): 647-657.
- [12] 谢云鹏, 王梓博, 李婧瑜等. 近爆条件下FRP-UHPC-钢双壁空心柱抗爆性能[J]. 陆军工程大学学报, 2026, 5(1): 56-64.
- [13] Faramarzadeh V, Ferdousi A, Zandi Y. Cyclic behavior of concrete-filled double steel tubular column with new reinforced circular cross-section[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2025, 49: 4747-4763.
- [14] 谭敬儒. 方套圆中空夹层Q690钢管高延性混凝土

柱抗震性能研究[D]. 西安理工大学, 2024.

[15] 王慧智. 中空夹层钢管再生陶瓷自密实混凝土柱静力及拟静力力学性能研究[D]. 华东交通大学, 2025.

[16] 舒赣平, 姚震, 张萌等. 中空波纹夹层钢管混凝土柱抗震性能拟静力试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2024, 54(03): 539-548.

[17] 尹国安, 张瀚林, 宋秉权等. 半刚性中空夹层钢管混凝土梁柱节点抗震性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2026, 23(03): 1324-1337.

[18] 别雪梦. 方中空夹层钢管混凝土 T 形节点抗震性能研究[D]. 大连理工大学, 2025.

[19] 张冬芳, 贺拴海, 赵均海等. 考虑楼板组合作用的复式钢管混凝土柱 - 钢梁节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(7): 55-65.

[20] 张玉芬, 金光磊, 贾立勇. 复式钢管混凝土刚性连接节点抗震性能对比研究[J]. 建筑结构, 2025, 55(16): 112-120.

[21] 樊军超, 赵均海, 尤浩镔. 装配式复式钢管混凝土节点抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2023, 55(10): 49-62.

[22] 刘忠华. 中空波纹夹层钢管混凝土柱组合框架受力性能与应用研究[D]. 东南大学, 2024.

[23] 王静峰, 王翰澜, 王涛等. 装配式中空夹层钢管混凝土组合框架混合动力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(04): 237-246.

[24] 赵均海, 胡壹, 张冬芳等. 装配式复式钢管混凝土柱 - 钢梁框架抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(08): 88-96.

[25] 郭磊. 附加金属阻尼器装配式中空夹层钢管混凝土框架结构损伤分析和抗震设计方法[D]. 合肥工业大学, 2022.

作者简介: 丁嘉伟(1996.08-), 男, 汉族, 江苏省丹阳市, 助理工程师, 工学硕士, 研究方向: 钢结构工程技术。