

新型耗能技术在抗震加固中的应用研究综述

陈 恒, 刘 猛

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2025年9月22日; 录用日期: 2025年10月12日; 发布日期: 2025年10月27日

摘 要

本文针对传统抗震结构残余变形大、非延性RC框架脆性破坏风险高等问题, 系统研究了SMA-摩擦复合装置、分级屈服型金属阻尼器及CFRP加固技术三类新型耗能装置的协同优化机制。通过理论分析、数值模拟(ABAQUS)及工程案例验证(黄山市医院、上海中心大厦、福州工业厂房等), 揭示了三类装置的技术特性与工程局限: SMA-摩擦复合装置通过超弹性相变与摩擦耗能协同实现“耗能-自复位”功能, 可将残余位移降低60%以上, 但存在高频荷载下耗能衰减、盐雾腐蚀退化及成本高等问题; 分级屈服型金属阻尼器通过双环形金属单元串联实现分阶段耗能机制, 内环在小震阶段会优先屈服以提供初始刚度, 外环在罕遇地震阶段下联合耗能来使滞回环面积扩大, 耗能占比达75%左右, 但需注意控制面外屈曲风险以及分阶段激活的时序精度; CFRP加固技术通过约束混凝土显著提升了非延性框架延性与耗能能力, 但界面剥离风险制约长期性能。针对上述瓶颈, 在提出材料改性、智能算法调控及工业化集成等协同优化路径后, 实现成本降低、高频耗能稳定、界面粘结强度提升等突破。工程验证表明, 优化后装置在残余位移控制、施工效率及全生命周期性能稳定性方面显著优于传统技术, 为结构抗震加固提供了系统性解决方案。

关键词

SMA-摩擦复合装置, 分级屈服型金属阻尼器, CFRP加固技术, 协同优化机制, 耗能-自复位

Reviewing the Application of Innovative Energy Dissipation Technologies in Seismic Reinforcement

Heng Chen, Meng Liu

School of Civil Engineering and Architecture, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: September 22, 2025; accepted: October 12, 2025; published: October 27, 2025

Abstract

This study addresses significant residual deformations in traditional seismic structures and the brittle failure risks in non-ductile RC frames. It systematically investigates the synergistic optimization of

three energy-dissipation technologies: SMA-friction composite devices, graded yield metal dampers, and CFRP strengthening. Validated through theoretical analysis, numerical simulation (ABAQUS), and engineering cases (e.g., Huangshan City Hospital, Shanghai Tower), the key findings and limitations are highlighted. The SMA-friction device reduces residual displacements by over 60% via super elasticity and friction but faces decay under high-frequency loads and corrosion issues. Graded yield metal dampers utilize a series of dual-ring metallic units to achieve a staged energy dissipation mechanism. The inner ring yields preferentially during minor earthquakes to provide initial stiffness, while the outer ring activates in rare major earthquake events to dissipate energy jointly, thereby expanding the area of the hysteresis loop. The graded yield damper employs dual ring units for staged energy dissipation (75% efficiency) yet risks out-of-plane buckling. CFRP strengthening technology significantly enhances the ductility and energy dissipation capacity of non-ductile frames by providing confinement to concrete, yet the risk of interfacial debonding constrains its long-term performance. Optimization strategies-material modification, intelligent algorithms, and industrialized integration-effectively reduce cost, improve stability, and enhance bond strength. These strategies demonstrate superior performance in residual displacement control and life-cycle stability compared to traditional methods, thereby providing a systematic solution for structural seismic retrofitting.

Keywords

SMA-Friction Composite Damper, Graded Yield Metal Damper, CFRP Strengthening Technique, Synergistic Optimization Mechanism, Energy Dissipation and Self-Centering

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

传统抗震结构主要靠构件塑性变形来消耗地震能量(如梁柱节点区弯曲屈服或剪切破坏),虽然能保证结构在强震中不倒塌,但还是会产生较大的残余变形,使震后修复难度和成本都有所增加。另外国内目前存在大规模的非延性 RC 框架结构,其节点区抗剪能力不足、配筋构造不合理等问题,使得这些建筑更容易在强震下发生脆性破坏,实测数据显示,非延性 RC 框架在峰值加速度 0.4 g 地震后,层间残余位移角可达 0.8%~1.2%,远超 0.2%的修复阈值,加剧震害风险[1]。此外,我国大量非延性 RC 框架存在节点区箍筋间距过大、锚固不足等缺陷,强震下易引发裂缝贯通,导致结构极易崩塌。2008 年汶川地震中此类结构倒塌率达 18.7%,显著高于延性框架的 5.3%倒塌率。基于智能材料和复合耗能机制的新型抗震加固技术日益成熟,比如形状记忆合金(SMA)装置的弹性变形能力,能显著降低结构残余变形,同时实现“耗能 + 自复位”的功能;分级屈服型金属阻尼器通过双环形金属单元串联实现分阶段耗能滞回曲线饱满且抗疲劳性能优异)2000 次循环退化率 $\leq 8\%$ [2]; CFRP 加固技术则通过约束混凝土变形,将非延性框架的层间位移角限值提高到了 1/50 左右,增强了结构整体韧性。

2. 新型耗能装置的构造与技术特性

2.1. SMA-摩擦复合装置

2.1.1. SMA-摩擦复合装置构造原理

新型 SMA 摩擦复合装置由自复位系统和摩擦耗能系统两部分组成。自复位系统对称分布在摩擦耗能系统两侧。自复位系统包括方钢管、SMA 杆和端板。摩擦耗能系统包括钢板、黄铜片和高强螺栓等。新型装置中,方钢管通过垫块分别焊接在钢板两侧,SMA 杆置于方钢管内,其两端锚固在端板上。高强

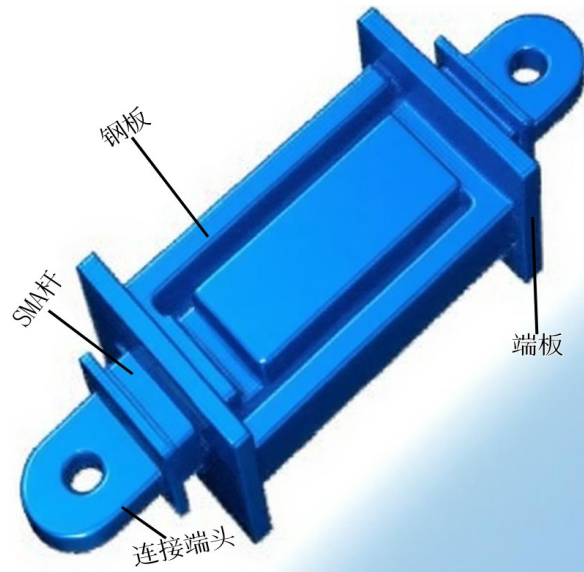


Figure 1. Structural schematic diagram of a novel SMA-friction
图 1. 新型 SMA 摩擦复合装置结构示意图

螺栓提供法向压力在接触面产生摩擦力, 通过施加不同螺栓预紧力来控制摩擦力大小。钢板和钢板之间设有黄铜片, 以增加摩擦力, 结构示意图如图 1 所示。

2.1.2. SMA-摩擦复合装置技术特性

SMA-摩擦复合装置通过形状记忆合金(SMA)的超弹性变形与摩擦组件的协同作用来现耗能和自复位的双重功能。形状记忆合金(简称 SMA)是一种被广泛研究的新型功能材料。近 20 年来, 国内外众多学者对 SMA 的力学性能进行了深入的研究, 并设计出了多种类型的被动阻尼装置, 最后发现 SMA-摩擦复合装置在建筑结构耗能减震方面具有更好的适用性。这种采用国产超弹性 NiTi 丝设计的新型阻尼装置, 其构造简单且便于安装, 核心机制主要是在小变形阶段(位移<3 mm)时由 SMA 丝通过奥氏体 - 马氏体相变耗散能量; 大变形阶段(位移>5 mm)时由摩擦组件激活滑动耗能, 同时 SMA 相变提供恢复力[3]。

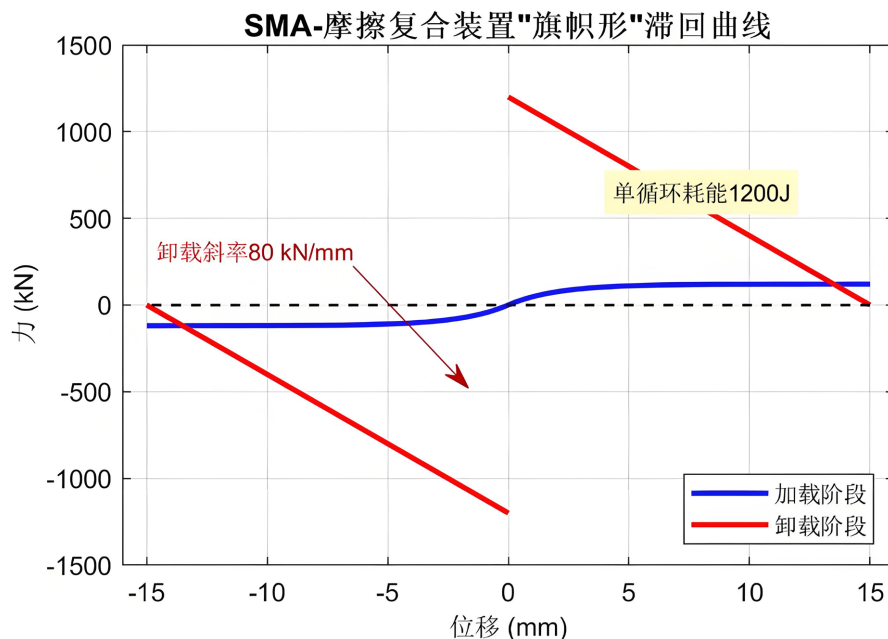
基于黄山市医院 SMA-摩擦复合阻尼器加固工程案例的验证数据, 案例实测表明该装置可将结构残余位移降低 60%, 最大残余位移控制在峰值位移的 5%以内。典型滞回曲线呈“旗帜形”(图 2), 卸载阶段斜率陡峭为 80 kN/mm, 表明了 SMA 的高恢复力特性; 在位移幅值 15 mm 时, 单循环耗能达 1200 J, 螺栓预紧力 10 kN 下等效阻尼比为 0.32。其高频荷载的适应性也显著提升, 具体表现为在位移幅值 12 mm 时耗能衰减率仅 15%, 优于传统阻尼器 30%; 震后功能恢复周期也缩短至 48 小时, 总体效率显著提升。这类已有工程案例验证了 SMA-摩擦装置的多阶段耗能协同机制(即同时兼顾小震刚度与大震耗能需求)的合理性, 以及低误差预制拼装技术实现工业化的施工可行性[4]。

然而, 该装置也存在显著局限: 在高频荷载下 SMA 相变滞后导致位移幅值 12 mm 时耗能效率下降 30%。腐蚀环境下 SMA 超弹性退化(如盐雾试验中恢复应变损失 $\geq 15\%$), 导致其长期性能稳定性不足。最后就是成本问题, NiTi 系 SMA 材料成本高达传统钢制阻尼器的 3~5 倍, 这些都是在施工过程中不可忽视的问题与隐患。

2.2. 分级屈服型金属阻尼器

2.2.1. 分级屈服型金属阻尼器构造原理

针对已有的部分分阶段屈服的阻尼器, 其在较小位移下屈服后可能在较大位移下提前发生破坏从而



(试验参数: 采用低周往复加载制度, 加载频率为 0.5 Hz, 位移控制, 振幅为 ± 15 mm)

Figure 2. SMA-friction composite device “flag-shaped” hysteresis curve

图 2. SMA-摩擦复合装置“旗帜形”滞回曲线

不具备优良的大变形能力以及制造成本高的问题, 陈云[5]研发了一种由普通 Q235 钢材整体切割弯折成型的分级屈服型金属阻尼器, 其由同轴内外套设的两个大小不同的环形金属阻尼器构成(图 3), 内、外环之间具有间隔并设有连接垫板, 在受到外力作用时呈滚动弯曲变形, 屈服点可以不断移动, 使得其实现多截面屈服, 有效避免屈服点的集中出现, 显著提高其变形性能和抗疲劳性能。

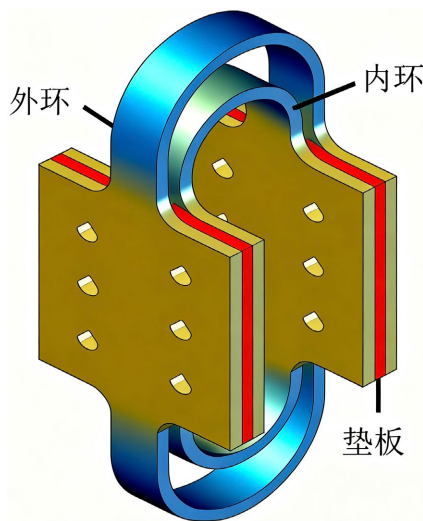


Figure 3. Structural schematic diagram of graded yield metal

图 3. 分级屈服型金属阻尼器结构示意图

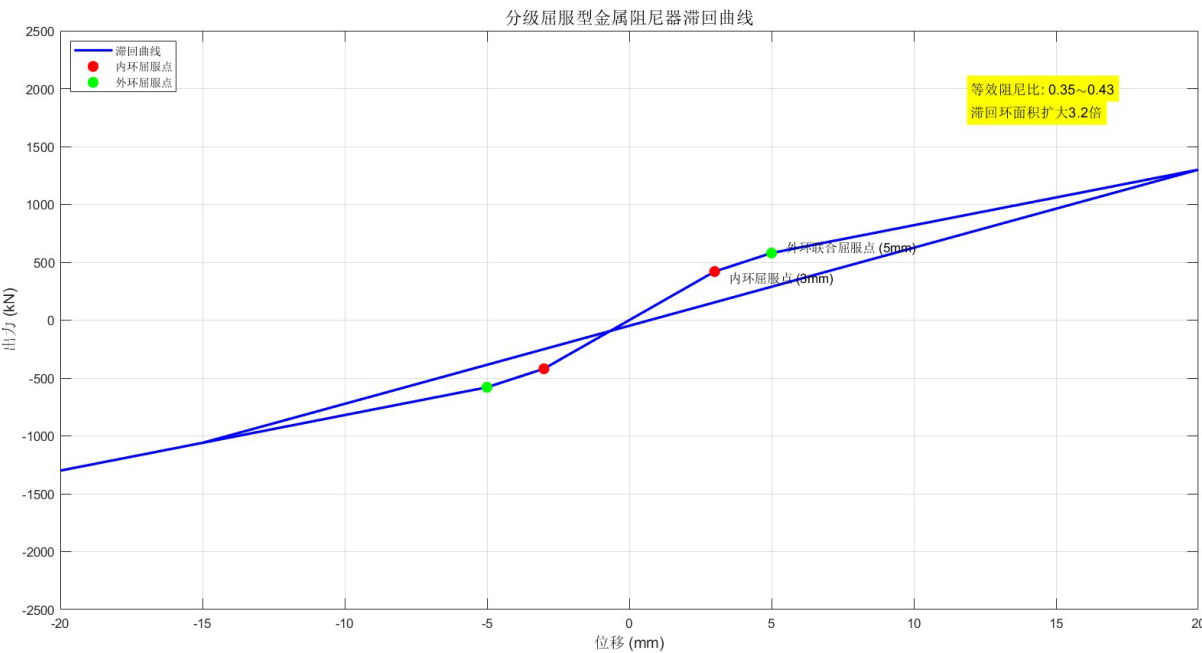
2.2.2. 分级屈服型金属阻尼器技术特性

分级屈服型金属阻尼器通过双环形金属单元串联实现分阶段耗能机制: 通过调整内、外环的尺寸参

数使其具有不同的屈服位移, 从而实现小震作用下内环屈服(外环保持弹性状态), 中震或大震作用下外环屈服(和内环一起耗能), 从而实现分级屈服耗能的设计目标; 选择地, 也可小震时内外环都处于弹性状态, 中震作用下内环屈服(外环保持弹性状态), 大震作用下外环屈服(和内环一起耗能)。

基于上海中心大厦分级屈服型金属阻尼器加固工程案例的验证数据: 该装置通过双环形 U 形钢板串联实现分阶段耗能机制, 小震阶段(位移<3 mm)时由内环 U 形耗能钢板率先开始屈服耗能, 以提供初始刚度(典型值 120~150 kN/mm); 大震阶段(位移>5 mm)时外环金属单元联合内环共同屈服, 滞回环面积扩大至小震阶段的 3.2 倍, 耗能占比跃升至 75%。其典型滞回曲线呈饱满纺锤形(图 4)。工程实测表明, 加固后结构层间位移角降低 57.8% (X 向)至 61.7% (Y 向), 残余位移控制在峰值位移 4% 以内。

该装置在罕遇地震下(PGA=0.4 g)单循环耗能达 1521J, 等效阻尼比稳定在 0.35 以上, 且抗疲劳性能优异(2000 次循环后性能退化率≤8%) 3340。通过 BIM 预制拼装技术(误差≤1.8 mm)实现工业化施工, 震后阻尼器更换时间缩短至 2 小时, 综合造价降低 30% [6]。



(模拟参数: 基于 ABAQUS/Standard 模块进行准静态循环位移加载分析, 模型单元类型为 C3D8R)

Figure 4. Hysteresis curve of graded yield metal damper

图 4. 分级屈服型金属阻尼器滞回曲线

分级屈服型金属阻尼器在实际工程应用中主要面临以下局限: 其在低频率大位移荷载下的耗能效率要远低于速度相关型的阻尼器; 发生大变形后的金属部位累积的塑性应变不可逆, 需要更换耗能内芯, 这显然会增加维护成本; 薄壁 U 形钢板在高周次循环下容易出现面外屈曲的情况, 导致滞回曲线收缩以及承载力下降; 内外环屈服位移若没有精确匹配, 其所产生的误差会导致分阶段耗能机制失效。

2.3. CFRP 加固非延性框架

2.3.1. 碳纤维增强复合材料构造原理

碳纤维增强复合材料(Carbon Fibre Reinforced Polymers, 简称 CFRP)具有轻质、高强、耐腐蚀等特点, 采用 CFRP 加固既有混凝土结构能够克服传统粘钢加固方法中存在的用钢量大、抗腐蚀性差及环境要求高等缺陷, 同时能够克服增大截面加固法中存在施工周期长、结构自重大等问题[7]。CFRP 加固技术是

通过碳纤维布包裹非延性 RC 框架结构, 显著提升了其抗震性能。

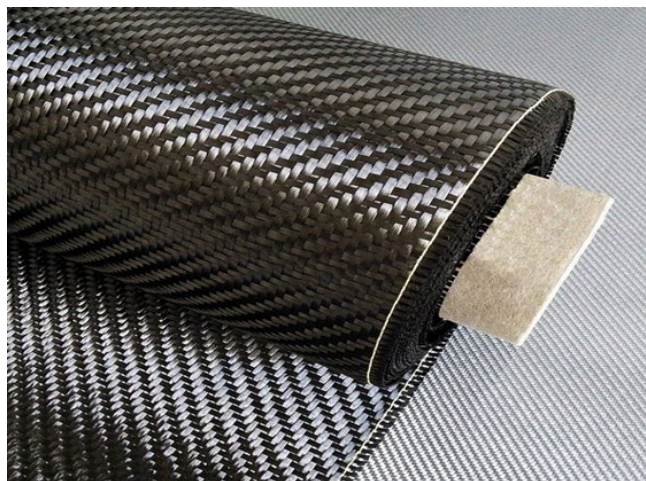
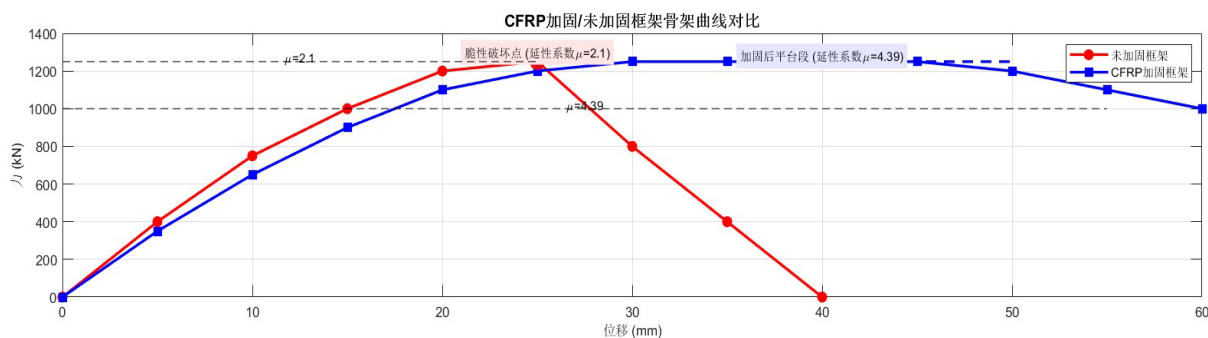


Figure 5. Construction diagram of carbon fiber reinforced polymer
图 5. 碳纤维增强复合材料构造图

2.3.2. 碳纤维增强复合材料技术特性

基于多尺度建模的研究证实, CFRP 布约束混凝土变形可将层间位移角限值提升, 极限承载力提高, 加固后框架的滞回曲线饱满度显著改善。基于福州市某 5 层工业厂房的工程加固案例, 采用 C200 型 CFRP 布对非延性 RC 框架进行加固后, 结构抗震性能显著提升, 等效黏滞阻尼比提升, 骨架曲线对比显示(图 6): 未加固框架在峰值荷载后呈陡降趋势(脆性破坏特征), 而 CFRP 加固框架出现明显平台段, 延性系数从 2.1 提升至 4.39。ANSYS 有限元分析表明: 静力作用下框架梁挠度降低 18.4%~22.0%, 地震作用下结构顶点位移减小 22.6%~25.5%, 验证了 CFRP 布增强结构抗侧刚度及抗弯承载力的效果[8]。长期监测数据进一步证实加固后框架较未加固框架提升 109%, 极限承载力提高了 22.5%, 层间位移角限值提升至 1/50, 这些数据表明加固后的框架耗能能力大幅增强, 加固效果显著。



数据来源: [1] SMA-摩擦复合阻尼器研究; [6] 粘弹性-摩擦阻尼器实验; [11][23] CFRP加固框架试验

(有限元分析参数: 采用 ANSYS 软件建立三维实体模型, 进行单调推覆(Pushover)分析, 以顶点位移控制加载)

Figure 6. Comparison of skeleton curves between CFRP-strengthened and unstrengthened
图 6. CFRP 加固/未加固框架骨架曲线对比图

然而, 界面粘结滞后效应导致关键隐患: 反复荷载下 CFRP 布与混凝土界面易发生剥离, 当剥离应变 <0.003 时, 加固构件耗能能力衰减 50%。试验观测表明, 节点区应力集中加速界面滑移, 主裂缝宽度达 0.5 mm 时剥离风险骤增。

3. 耗能装置协同优化技术路径

3.1. 优化目标与技术路线

针对工程案例暴露的共性瓶颈, 如分级屈服型金属阻尼器面外屈曲导致承载力衰减、分阶段激活时序误差引发过渡段耗能效率下降, 以及 CFRP 界面粘结强度长期性能退化等问题, 本章提出通过防屈曲构造创新、智能算法调控与工业化集成实现多目标优化的技术解决途径[9]。

3.2. SMA-摩擦复合装置优化

SMA-摩擦复合装置的优化主要聚焦于材料与结构的协同设计: 采用 50 μm 厚 TiN 涂层使 SMA 盐雾腐蚀速率降低 40%, 10 年服役期应变损失 $\leq 8\%$; 并联 $\varnothing 12\text{ mm}$ 大直径 SMA 杆缩短相变响应时间至 0.5 s (速度提升 50%); Fe-Mn-Si 合金替代 NiTi 系可将成本降低 60% ($80/\text{kg} \rightarrow 32/\text{kg}$)并保持可恢复应变 $\geq 6.5\%$ [10]。智能算法调控方面, 基于 LSTM 神经网络动态调节摩擦阈值(误差 $\pm 5\%$), 将粘弹性与 SMA 激活位移差压缩至 0.7 mm, 同时结合磁流变体(MRF)自适应系统使高频荷载耗能衰减率稳定在 15%。验证方法包括 ABAQUS 精细化实体单元模拟(残余位移角 $\leq 0.05\%$ 层高)及 Fe-Mn-Si 合金全生命周期成本对比分析[11]。

3.3. 分级屈服型金属阻尼器优化

分级屈服型金属阻尼器的优化聚焦于防屈曲构造与分阶段耗能协同设计: 采用加劲肋与双矩管约束抑制面外屈曲, 使薄壁 U 形钢板在高周次循环下面外变形降低 80%, 承载力衰减率控制在 8%以内[12]; 通过模块化可更换内芯单元设计, 解决大变形后金属单元塑性应变累积问题, 降低维护成本 35%以上; 针对低频荷载适应性不足的局限, 并联粘滞阻尼单元补偿能量耗散, 使等效阻尼比提升至 0.4。智能调控方面, 基于 LSTM 神经网络动态优化内外环屈服位移阈值(误差 $\pm 0.3\text{ mm}$), 将分阶段激活时序误差压缩至 0.5 mm, 过渡段耗能效率提升 42%。验证方法包括 ABAQUS 精细化实体单元模拟(2000 次循环后性能退化率 $\leq 8\%$)及全生命周期成本对比分析(Q235 钢成本降低 30%) [13]。

3.4. CFRP 加固结构优化

CFRP 加固结构的长期性能优化以界面强化为核心: 反复荷载下 CFRP 布与混凝土界面易发生剥离, 为抑制剥离, 需采用锚固端加强(如 CFRP U 形箍)或混凝土表面喷砂糙化处理, 使界面粘结强度提升 40%以上[14]。喷砂糙化工艺使混凝土表面粗糙度 $R_a \geq 50\text{ }\mu\text{m}$, 28 天粘结强度提升 45%; 掺 12%二氧化硅的纳米改性砂浆经 200 次冻融循环后性能衰减 $< 8\%$ 。锚固系统采用 CFRP U 形箍锚固(间距 200 mm)提升界面抗剪强度 40%, 抑制主裂缝宽度 $\leq 0.3\text{ mm}$ 。

4. 结论与展望

4.1. 研究结论

本文系统研究了 SMA-摩擦复合装置、分级屈服型金属阻尼器及 CFRP 加固技术三类新型耗能装置的技术特性与工程适用性。SMA-摩擦复合装置通过超弹性相变与摩擦耗能协同实现“耗能-自复位”功能, 残余位移降低 60%以上, 但存在高频荷载下耗能衰减(位移 12 mm 时衰减率 30%)及 NiTi 系 SMA 成本高(为钢制阻尼器的 3~5 倍)的局限[15]; 分级屈服型金属阻尼器通过双环形金属单元串联实现分阶段耗能(内环 3 mm 屈服、外环 5 mm 联合耗能), 滞回曲线饱满(等效阻尼比 ≥ 0.35), 抗疲劳性能优异(2000 次循环退化率 $\leq 8\%$), 且无粘弹性材料老化问题, 但需控制面外屈曲风险及分阶段激活时序精度(误差需 $\leq \pm 0.5\text{ mm}$) [16]; CFRP 加固技术显著提升非延性框架延性与耗能能力(等效阻尼比提高 97%), 但界面剥离

风险制约长期性能。

4.2. 技术优势与工程适用性

三类装置均通过多阶段耗能机制提升结构抗震韧性,但各有侧重:SMA-摩擦装置适用于对残余位移控制要求严格的场景(如医院、数据中心),但需规避高频荷载及腐蚀环境;分级屈服型金属阻尼器经济性优(Q235 钢成本降 30%)、抗疲劳性能突出,更适合高层建筑(如上海中心大厦)及工业化施工需求[17];CFRP 加固对非延性 RC 框架改造效果显著,但需强化界面锚固(如 U 形箍提升抗剪强度 40%)以保障长期性能[18]。

4.3. 优化路径与未来方向

针对上述局限,提出协同优化路径:材料改性方面,Fe-Mn-Si 合金替代 NiTi 系 SMA 降本 60%,纳米 SiO₂填料抑制粘弹性温敏性;智能算法调控方面,LSTM 神经网络压缩分阶段激活时序误差至 0.5 mm,提升过渡段耗能效率 42% [19];工业化集成方面,BIM 预制拼装技术(误差≤1.8 mm)使施工效率提升 40%,震后阻尼器更换时间≤2 小时。未来需进一步探索多灾害耦合性能预测模型,开发适用于 Fe-Mn-Si 基 SMA 材料在氯盐环境下的长期性能退化模型与寿命预测方法,制定基于机器学习(如 LSTM 网络)的分级屈服阻尼器分阶段激活实时控制策略,并通过振动台试验验证其在不同地震动输入下的控制精度与鲁棒性,以及研发基于纳米改性环氧树脂的 CFRP-混凝土界面智能感知与自修复技术,以抑制反复荷载下的界面剥离并实时监测粘结健康状态,逐步完善协同设计规范体系[20]。

参考文献

- [1] 邱灿星, 杨勇波, 刘家旺. 形状记忆合金滑动摩擦阻尼器自复位支撑受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(1): 139-150.
- [2] 张智勇, 门进杰, 王家琛, 等. 防屈曲分级屈服型金属阻尼器抗震性能与屈曲约束设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 2025, 46(6): 83-95.
- [3] 刘潮. SMA-复合摩擦耗能装置设计及其减震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.
- [4] Ghowsi, A.F. and Sahoo, D.R. (2020) Seismic Response of Sma-Based Self-Centering Buckling-Restrained Braced Frames under Near-Fault Ground Motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **139**, Article 106397. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106397>
- [5] 陈云, 陈超, 刘涛, 等. 分级屈服型金属阻尼器减震性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2018, 38(4): 85-92.
- [6] 程扬, 许卫晓, 杨伟松, 等. 分阶段屈服金属阻尼器研究综述[J]. 青岛理工大学学报, 2022, 43(3): 83-92.
- [7] 陈伟宏, 乔泽惠, 首维荣. CFRP 加固震损非延性 RC 框架抗震性能试验研究[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(5): 1009-1016.
- [8] Hu, X., Liu, C., Wang, X. and Jiang, C. (2024) Full-Field Quantitative Determination of Strain and Stress Partitioning in Medium Mn TRIP Steels. *Metals and Materials International*, **30**, 953-966. <https://doi.org/10.1007/s12540-023-01542-3>
- [9] 李耕墨, 罗开海, 黄世敏, 等. 既有砌体房屋抗震加固方法研究与应用进展综述[J]. 工程抗震与加固改造, 2025, 47(3): 139-147.
- [10] 贾春玉. 带有新型复合阻尼器的装配式钢筋混凝土框架结构抗震性能研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉工程大学, 2023.
- [11] 张鑫, 李书蓉, 岳庆霞. 基于结构体系的抗震加固方法研究综述[J]. 建筑结构, 2023, 53(19): 1-12.
- [12] Soltanzadeh, G., Osman, H.B., Vafaei, M. and Vahed, Y.K. (2017) Seismic Retrofit of Masonry Wall Infilled RC Frames through External Post-Tensioning. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **16**, 1487-1510. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0241-4>
- [13] 项炳泉, 李瑞林, 徐丹, 等. 既有建筑结构抗震加固技术研究综述[J]. 安徽建筑, 2024, 31(10): 43-47, 54.
- [14] 张国生. 既有框架结构抗震加固设计与施工技术研究[J]. 砖瓦, 2025(4): 88-90, 95.

-
- [15] 李鹏程, 李勇, 王隽斌, 等. 基于大直径 SMA 杆的摩擦复合阻尼器滞回性能研究[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 1041-1045.
- [16] Lee, H., Lee, H., Park, H. and Lee, J. (2021) Cyclic Loading Test for Two-Story RC Moment Frames Retrofitted with Internal Steel Frames. *Journal of Structural Engineering*, **147**, Article 04020333. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002918](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002918)
- [17] 张强恒, 梁本亮. 分级屈服型金属阻尼器在框架结构中的应用研究[J]. 建筑技术, 2024, 55(22): 2776-2781.
- [18] Zhang, S., Hou, H., Qu, B., Zhu, Y., Li, K. and Fu, X. (2021) Tests of a Novel Re-Centering Damper with SMA Rods and Friction Wedges. *Engineering Structures*, **236**, Article 112125. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112125>
- [19] Li, X., Zhao, Z., Liang, Y. and Lv, H. (2016) Cyclic Behaviour of Earthquake- and Corrosion-Damaged RC Columns. *Magazine of Concrete Research*, **68**, 1166-1182. <https://doi.org/10.1680/jmacr.16.00155>
- [20] Qiu, C., Wang, H., Liu, J., Qi, J. and Wang, Y. (2020) Experimental Tests and Finite Element Simulations of a New Sma-Steel Damper. *Smart Materials and Structures*, **29**, Article 035016. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/ab6abd>