

SMA 阻尼器在建筑抗震工程中的应用优化对策研究

康莉萍

郑州航空工业管理学院, 河南 郑州 450000

DOI:10.61369/ECE.2026060021

摘 要 : 形状记忆合金 (SMA) 阻尼器由于具有超弹性、形状记忆等特点, 在建筑抗震工程中有着不俗的消能减震效果。但是目前 SMA 阻尼器在实际使用中还存在着成本高、耐久性差、与建筑结构不匹配等问题。本文通过对 SMA 阻尼器在建筑抗震工程中的应用现状进行系统的梳理, 进而从材料性能改善、阻尼器构造改良、施工安装改善、智能化及维护管理改善四个方面提出系统化的改善和优化方法, 以此为 SMA 阻尼器在建筑抗震工程领域的进一步推广和应用提供理论依据和技术参考。

关 键 词 : 形状记忆合金; SMA 阻尼器; 建筑抗震; 超弹性; 自复位; 优化对策

Research on Application Optimization Countermeasures of SMA Dampers in Building Seismic Engineering

Kang Liping

Zhengzhou University of Aeronautics, Zhengzhou, Henan 450000

Abstract : Shape Memory Alloy (SMA) dampers have favorable energy dissipation and seismic mitigation effects in building seismic engineering due to their characteristics such as superelasticity and shape memory effect. However, the practical application of SMA dampers still faces defects including high manufacturing cost, poor durability and mismatching with building structures. By systematically sorting out the application status of SMA dampers in building seismic engineering, this paper puts forward systematic optimization schemes from four aspects: material performance improvement, damper structure modification, construction and installation optimization, as well as intelligent operation and maintenance management. The research results can provide theoretical basis and technical reference for the further popularization and engineering application of SMA dampers in the field of building earthquake resistance.

Keywords : shape memory alloy; SMA damper; building earthquake resistance; superelasticity; self-centering; optimization countermeasures

引言

地震灾害作为最具破坏性的自然灾害之一, 对建筑结构的安全性构成严重威胁。地震作用下, 建筑结构很容易产生不可逆的变形或者倒塌, 从而造成严重的人员伤亡和财产损失。因此, 发展高效、经济的消能减震技术成为建筑抗震领域的重要研究方向。形状记忆合金 (Shape Memory Alloy, SMA) 是一种智能材料, 它具有独特的形状记忆效应和超弹性特性, 在受到力的作用后可以自动恢复原来的形状, 而且还能通过滞回耗能消耗地震能量。基于 SMA 材料开发的阻尼器, 可以明显减小建筑结构在地震作用下的位移与加速度响应, 又能控制结构残余变形, 达到震后快速恢复的目的。

一、SMA 阻尼器在建筑抗震工程中的应用问题

首先, 材料成本高是限制 SMA 阻尼器大范围使用的主要原因。Ti-Ni 形状记忆合金制备工艺复杂、原材料价格高, 使得阻尼器的制造成本远远高于传统的钢制阻尼器或者粘滞阻尼器^[1]。如何在保证性能的基础上降低材料成本, 是目前急需解决的经济性

问题。

其次, SMA 材料的耐久性、疲劳性能仍需提高。SMA 阻尼器在长时间使用中会存在疲劳损伤、腐蚀和性能下降等状况。经过研究得知, SMA 材料在循环加载过程中, 其超弹性特性随着加载次数的增加而不断减退, 在较大的变形情况下, 疲劳寿命明显下降^[2]。另外, SMA 材料对于环境温度比较敏感, 温度变化会影

响它的相变特性以及耗能情况,从而限制了它在极端气候条件下的应用价值。

其三,SMA 阻尼器与不同建筑结构的匹配度还有待提高。由于 SMA 阻尼器的力学性能与它的几何参数、预变形量、安装方式等有关,不同的建筑结构类型对阻尼器的性能要求也大不相同。设计不合理容易造成局部应力集中或者阻尼器失效,从而对结构安全造成不良影响^[3]。如何借助合理的力学分析和数值模拟改进 SMA 阻尼器与不同建筑结构的匹配情况,这是改善其工程应用效果的重要环节。

此外,施工安装及后期维护管理不规范。SMA 阻尼器安装精度要求高,安装误差会造成阻尼器性能不符合设计要求。同时,目前缺少 SMA 阻尼器系统化的维护管理标准以及检测评价体系,无法保证 SMA 阻尼器全生命周期内性能的稳定。

二、SMA 阻尼器在建筑抗震工程中的应用优化对策

(一) 材料性能优化

材料性能是决定 SMA 阻尼器耗能能力、使用寿命的主要因素。就 SMA 材料成本高、耐久性差等问题,可以从合金成分优化与热处理工艺改进两个方面入手。

在合金成分中加入一定量的合金元素可以明显提高 SMA 材料的综合性能。研究发现,在 Ti-Ni 合金中加入铌(Nb)或者碳(C)等元素,可以有效改善 SMA 材料的抗腐蚀性以及抗疲劳性,并且可以减小相变温度滞后,使它更适用于复杂环境。对 Cu-Al-Ni 系形状记忆合金,可以通过控制合金成分可调控马氏体相变温度和微观结构演变,从而改善其阻尼性能^[4]。另外,加入铁(Fe)可以提高 SMA 的耐腐蚀性和高温稳定性。需要注意的是,成分优化的关键是既要提高某一性能,又不能使 SMA 的超弹性性质受到影响,因此还需要在材料设计与性能测试之间建立反馈优化机制。

热处理工艺改进对于获取优质超弹性性能来说是非常重要的。从研究可知,热处理温度、淬火速度、时效条件都会对 SMA 的微观结构、相变温度、力学性能产生较大影响。通过改善热处理工艺可以细化晶粒结构,提高材料的力学稳定性以及耐久性。就具体的 SMA 棒材而言,通过不同温度下的热处理拉伸试验,可以得到超弹性性能最好的热处理工艺标准,以此作为阻尼器核心元件制备的基准。从降低材料成本的角度来说,研发低成本的 SMA 体系,例如 Cu 基 SMA,并改善其性能,是减小 Ti-Ni 合金成本压力的途径之一^[5]。

(二) 阻尼器结构设计优化

结构设计属于决定 SMA 阻尼器耗能效率和适应性的重要部分。传统 SMA 阻尼器依靠材料的超弹性特性直接耗能,在强震作用下它的耗能能力会受到影响。因此可以从位移放大机制、自复位机制、复合耗能机制三个方面进行设计优化。

第一,采用位移放大机制充分发挥 SMA 材料的耗能作用。自复位放大位移型 SMA 阻尼器(RDASD)可以利用杠杆原理或者齿轮传动等位移放大方式,使 SMA 材料在更大变形范围内发挥作

用。基于 SMA 材料的旗帜型恢复力模型中,预变形量、超弹性拉伸位移、刚度、长度这四个参数对阻尼器耗能系数有较大影响。经过对这些参数进行改进后,可以大幅提高阻尼器的耗能效果。从实验结果可以看出,RDASD 在相同的地震作用下,其耗能能力比传统阻尼器提高约 30%^[6]。

第二,加强自复位,控制结构残余变形。残余位移是衡量建筑结构在震后是否可以修复的指标之一,当残余层间位移角大于 0.5% 时,建筑修复就没有了经济意义。将 SMA 和传统摩擦阻尼器结合的自复位摩擦阻尼器(SCFD),可以同时达到高耗能和自复位效果。通过相关研究可知,SMA 直径增大有利于自复位。复位弹簧和 SMA 组成的双重复位驱动系统,在预紧力大、加载位移幅值大时,对阻尼器卸载后的残余变形率的降低作用更大^[7]。但是,增大预紧力虽然可以提高耗能性能,但是也会增大残余变形率。因此,设计优化要找到耗能和自复位的最优平衡。摩擦比的合理选择是达到平衡的重要因素,当摩擦比由 10.79% 提高到 27.77% 时,耗能面积增大了 247.06%,等效粘滞阻尼系数增大了 123.06%,但是相对自复位比下降了 69.46%^[8]。

第三,发展复合耗能机制提高综合性能。将 SMA 和粘滞阻尼器、摩擦阻尼器或者橡胶阻尼器结合,可以发挥各个部件的优势,达到“1+1>2”的协同作用。SMA-高阻尼橡胶复合阻尼器(SMA-HRD)在高频加载时滞回曲线更饱满。

(三) 施工安装优化

施工安装质量直接影响 SMA 阻尼器在工程中能否达到设计要求的抗震效果。针对目前施工安装不规范的问题,可以从施工方案制定、模块化安装技术、质量控制三个方面进行改善。

首先,制订详细的施工方案,确定阻尼器安装位置、连接方法和调试程序。连梁施工前要先设计出合理的 SMA 阻尼器及连梁特征参数,再用预埋钢板将阻尼器和混凝土梁可靠连接。施工方案必须经过设计单位、施工单位、阻尼器生产厂家三方协商一致,符合现行国家施工质量验收规范的规定。该过程要严格控制施工质量,防止由于安装误差造成阻尼器性能下降或者失效。

其次,采用模块化安装技术,提高 SMA 阻尼器与建筑结构的协同工作能力。该技术把阻尼器分成若干个独立模块,在工厂内完成预制和调试后再运到现场进行组装。不但可以加快施工速度,还可以提高安装的精确度和可靠性。例如,在大跨空间结构的减震控制项目中,研究人员采用模块化安装的 SMA-摩擦阻尼器,成功实现了对索穹顶结构的减震性能优化^[9]。

最后,创建完备的施工质量把控体系。一方面,安装时应应对阻尼器的定位精度、连接牢固度、预紧力施加等做全过程监控并做好记录。另一方面,对于 SMA 螺栓的阻尼器,可以适当施加预紧力可以提高初始刚度,但是预紧力过大会降低自复位能力。因此施工参数确定时还要依靠理论分析和试验数据的支持。

(四) 智能化与维护管理优化

SMA 阻尼器在全生命周期内的性能保障,不能只依靠材料、设计、施工的改进,还要有智能化的监测手段以及科学的维护管理方法。

一方面,推动 SMA 阻尼器智能化发展。在集成传感器、数

据处理单元以及自适应控制算法支持下,未来 SMA 阻尼器可以实现对地震进行实时监测并主动调节,根据地震动的变化情况调节耗能特性,从而最大程度地保护建筑结构的安全。例如,基于 SMA 弹簧的调频 TMD 可通过调节输入电流改变装置频率,实现与主体结构的动态调谐。智能 SMA 阻尼器可以与建筑信息模型(BIM)技术融合,从而为建筑全寿命周期抗震性能评价及改良给予支撑。

另一方面,建立科学的维护管理体系。因为 SMA 阻尼器在长时间使用中会存在疲劳损伤或者腐蚀等隐患,所以需要对其性能进行定期检测和评价。具体来说,一要利用在线监测系统实时采集阻尼器工作状态数据(包括位移、力、温度等);二要结合有限元分析结果对阻尼器剩余使用寿命进行预测,制定定期检修计划;三要对 SMA 元件超弹性性能进行抽检。研究表明,SMA 电缆-摩擦混合装置在重复加载下有较好的响应,在 40mm 位移时最大力为 116kN,卸载后残余位移很小^[10]。以数据为驱动的维

护管理方式可以及时发现潜在问题,也可以为阻尼器的更换或修复提供科学的依据,保证建筑结构在全生命周期内具有良好的抗震性能。

三、结语

总之,SMA 阻尼器属于一种新型的智能耗能减震装置,在建筑抗震工程中具有明显的技术优势以及广阔的应用前景。本文对 SMA 阻尼器的使用现状进行了系统的梳理,并对它的应用案例、减震效果和存在的主要问题做了详细分析。在此基础上,从材料性能优化、结构设计优化、施工安装优化、智能化和维护管理优化四个方面提出优化措施。展望未来,随着材料科学、智能控制技术和数值模拟方法的不断进步,SMA 阻尼器有望在更多类型的建筑结构中得到应用。

参考文献

- [1] 王伟,张瑞斌,陈建兴,杜美余.基于恢复轨迹的高层建筑抗震韧性评估[J].建筑结构学报,2025,46(7):46-55.
- [2] 沈忠伟.耗能减震技术在建筑抗震设计中的应用研究[J].工程与建设,2024,38(6):1410-1411+1416.
- [3] 左迎辉,胡峥辉.阻尼器在地铁上盖物业设计中的应用[J].浙江建筑,2021,38(5):24-27.
- [4] 吴迈,刘政,袁继强,赵欣.粘滞阻尼器在既有建筑抗震加固中的应用[J].工程抗震与加固改造,2020,42(6):90-95.
- [5] 李勇.混凝土结构工程中剪切型抗震阻尼器施工技术[J].城市建筑,2020,17(17):133-135.
- [6] 刘政.粘滞阻尼器在某既有框架结构建筑抗震加固中的应用研究[D].河北工业大学,2020.
- [7] 王文星.阻尼器在既有建筑抗震加固中的应用[J].工程质量,2020,37(10):88-91.
- [8] 李梓健.SMA 自复位转动摩擦梁柱节点抗震性能研究[D].燕山大学,2025.
- [9] 王曦,罗晴.高性能阻尼器在建筑结构抗震中的应用研究[J].产品可靠性报告,2025,(5):130-131.
- [10] 戚亮杰,曹懿,袁振,薛建阳,刘孟达.带 SMA 杆-摩擦阻尼器的钢结构仿古建筑梁柱节点抗震性能研究[J].振动与冲击,2025,44(5):207-217.