

DOI:10.11918/202501006

SMA 自复位转动摩擦阻尼器的滞回特性 与参数影响分析

高渊,熊二刚,温景北,张焱,王尚

(长安大学 建筑工程学院,西安 710061)

摘要:为减少结构在地震作用下的残余变形,本文提出了一种基于形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)螺栓的自复位转动摩擦阻尼器(shape memory alloy self-centering rotary friction damper, SMA-SRFD),介绍了其基本构造及工作原理,开展了 SMA 螺栓材性实验,对螺栓及 SMA-SRFD 的受力性能进行了理论分析,并与有限元分析结果进行了对比,验证所采用理论公式的准确性;建立 SMA-SRFD 三维有限元模型,并选取旋转子中摩擦斜面倾角、摩擦系数及 SMA 螺栓预紧力为变量进行了参数分析。结果表明:SMA 螺栓的应力-应变曲线呈典型的“旗帜”形,具有良好的耗能及自复位能力;SMA-SRFD 理论分析与数值模拟结果吻合,二者均可准确反映阻尼器的受力过程;增大斜面倾角,会提升 SMA-SRFD 的承载能力及等效刚度,但阻尼器耗能及阻尼比降低;提高接触面之间的摩擦系数,SMA-SRFD 的耗能、等效刚度及等效阻尼比均随之增加,自复位能力减弱;随着 SMA 螺栓预紧力的增加,SMA-SRFD 的最大承载力基本相同,而变形量会略有减小,此外,对 SMA 螺栓施加不同的预紧力,阻尼器的滞回性能无显著变化。

关键词:形状记忆合金;自复位摩擦阻尼器;滞回性能;理论分析;有限元分析

中图分类号: TU352.1 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2026)01-0171-13

Hysteresis characteristics and parameter influence analysis of SMA self-centering rotational friction damper

GAO Yuan, XIONG Ergang, WEN Jinbei, ZHANG Yao, WANG Shang

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: To reduce the residual deformation of structures under seismic loading, a self-centering rotary friction damper (SMA-SRFD) based on shape memory alloy (SMA) bolts was proposed. The basic structure and working principle of the damper were introduced. Material property tests of SMA bolts were conducted, and theoretical analysis of the force performance of the bolts and SMA-SRFD was carried out. The results were compared with those from finite element analysis to verify the accuracy of the theoretical formulas used. A three-dimensional finite element model of the SMA-SRFD was established, and a parametric analysis was performed with the rotation angle of the frictional inclined plane, the friction coefficient, and the pre-tension of the SMA bolts as variables. The results show that the stress-strain curve of the SMA bolt exhibits a typical “flag” shape, indicating good energy dissipation and self-centering capabilities. The results of theoretical analysis and numerical simulation of the SMA-SRFD are consistent, both accurately reflecting the force process of the damper. Increasing the inclination angle of the inclined plane enhances the load-bearing capacity and equivalent stiffness of the SMA-SRFD, but the energy dissipation and damping ratio decrease. By increasing the coefficient of friction between the contact surfaces, the energy dissipation, equivalent stiffness, and equivalent damping ratio of the SMA-SRFD all increase, while the self-centering capability weakens. As the pre-tension of the SMA bolts increases, the maximum load-bearing capacity of the SMA-SRFD remains essentially the same, while the deformation decreases slightly. Moreover, the different pre-tensions to the SMA bolts does not significantly change the hysteresis performance of the damper.

Keywords: shape memory alloy; self-centering friction damper; hysteresis performance; theoretical analysis; finite element analysis

收稿日期: 2025-01-06; 录用日期: 2025-03-05; 网络首发日期: 2025-09-19

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250918.0915.002>

基金项目: 陕西省重点研发计划(2021SF-461); 未来城市建设与管理创新联合研究中心揭榜挂帅基金(2024WHZ0225)

作者简介: 高渊(1998—),男,博士研究生;熊二刚(1980—),男,教授,博士生导师

通信作者: 熊二刚, xerg@chd.edu.cn

我国处于环太平洋地震带与欧亚地震带之间,是世界上遭遇地震灾害最多的国家之一。地震频繁发生,对人类社会构成了严重的安全威胁,危及人们的生命和财产。历次地震灾害表明:95%以上的人员伤亡是由于地震中建筑结构的倒塌所致,建筑结构的破坏是造成地震经济损失的主要原因^[1-2]。因此,提高建筑结构的抗震性能,保障人类的生命及财产安全一直以来都备受国内外学者的关注。

目前,消能减震技术是实现结构被动控制和减轻地震灾害的有效手段之一,已在建筑结构抗震领域广泛应用^[3-4]。相较于传统的延性设计思想,该技术主要在结构中设置耗能装置,以减轻结构关键部位的损伤^[5-6]。实际应用于建筑结构的耗能装置主要为黏滞阻尼器、黏弹性阻尼器、金属阻尼器及摩擦阻尼器^[7-9]。然而,黏滞阻尼器因其特殊构造,易发生油体外漏现象,导致阻尼器性能衰退^[10];黏弹性阻尼器对于温度变化较为敏感,因此在循环荷载下性能退化较为严重^[4];金属阻尼器和摩擦阻尼器在耗散地震能量的同时会产生较大的残余变形,难以根据地震大小自适应地调节耗能能力^[11-12]。因此,研发一种能够有效减少震后残余变形且具有稳定滞回性能的消能减震装置,已成为当前研究的热点问题。

随着新技术、新材料的不断发展,越来越多的智能材料被应用于消能减震装置中,形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)就是其中之一,其具有形状记忆、超弹性、高阻尼等特性^[13]。在一定的恒温范围内,由外荷载产生的应力可以诱发 SMA 材料中奥氏体相转变为非自协作马氏体相,当外荷载消失时,会自发的进行逆相变,从而恢复 8%~10% 的变形。因此在整个加卸载过程中, SMA 的应力-应变曲线呈“旗帜”形,其具有良好的自复位和耗能能力。相较于传统阻尼器,含 SMA 材料的阻尼器,其能量耗散及自复位性能均有显著的提升^[14-16],因此, SMA 阻尼器被广泛应用于自复位结构领域。

Dolce 等^[17]开发了具有自复位和耗能功能的 SMA 支撑和隔震耗能器,并通过振动台实验研究了其减震控制性能;黄宙等^[18]基于杠杆原理,提出了一种可根据需求进行位移放大的 SMA 阻尼器;Qiu 等^[19]设计了仅含 SMA 丝的自复位阻尼器并应用于钢框架中,其振动台实验结果表明,无论在近场还是远场地震作用下,钢框架均具有良好的恢复变形能力,结构损伤有限。然而,由于 SMA 丝材直径较小,通常需要大量的 SMA 丝才能满足建筑结构的承载力需求,这不仅会加大端部锚固的难度,而且对丝材在复杂应力下的断裂提出了更高的要求。因此在设

计阻尼器时,研究者们逐渐考虑选用大直径的 SMA 棒材代替 SMA 丝材。俞昊然等^[20]提出了装配有超弹性 SMA 螺杆及 U 形阻尼器的自复位钢框架梁柱节点,通过拟静力实验证实了该节点具有良好的自复位能力和可修复性;邱灿星等^[21]开发了基于防屈曲镍钛 SMA 棒的自复位隅撑,并安装于钢框架中,开展了缩尺模型实验,结果表明该隅撑的滞回曲线呈现出“旗帜”形特性,拥有优越的自复位能力和较好的耗能能力。由于摩擦耗能装置具有较强的耗能能力和稳定性,因此众多学者将 SMA 材料与摩擦耗能装置相结合,以进一步提升 SMA 阻尼器的耗能能力。Zhu 等^[22]引入摩擦机制以增强阻尼器的能量耗散;常召群等^[23]基于大直径 SMA 棒的超弹性性能,设计了一种新型自复位摩擦阻尼器,数值模拟分析表明,该新型阻尼器具有稳定、饱满的滞回曲线且残余变形可控;Zhang 等^[24]采用 SMA 棒及楔形摩擦滑块,设计出可方便调节强度及变形的自复位摩擦阻尼器;Li 等^[25]利用较长的 SMA 棒及金属构件研制出可快速更换摩擦装置的自复位阻尼器,并通过实验验证了其自复位能力。

近年来,研究者们通过在摩擦板上开槽,并在槽孔内插入 SMA 棒材使相邻摩擦板之间紧密贴合,从而在提高摩擦耗能的同时兼顾了阻尼器的自复位性能。Qiu 等^[26-28]将 SMA 螺栓与开槽摩擦板装配成阻尼器,实验及数值模拟分析表明, SMA 螺栓的超弹性特性使开槽摩擦板之间产生较大的挤压力,在地震作用下,该阻尼器具有良好的摩擦耗能效应和优异的自复位能力,随后,其又将该阻尼器延展为自复位耗能支撑^[29];Ke 等^[30]提出了具有耗能时序的变摩擦自复位阻尼器,该阻尼器由两组“十字”形分布的 SMA 螺栓与开槽摩擦板组合而成;史庆轩等^[31]将 SMA 螺栓与开槽摩擦板相结合提出了一种基于形状记忆合金的自复位转动摩擦阻尼器,并对阻尼器的弯矩-转角恢复力模型进行了研究。目前所研究的 SMA-带槽摩擦板阻尼器的自复位能力主要由 SMA 棒材来提供,且大多数研究中对 SMA 棒材的应变控制在 6% 以内,以获得最佳的自复位效果,导致阻尼器的实际位移较小,耗能效果不佳,若调整 SMA 的应变方向与实际位移方向平行,则需要较长的棒材才能使阻尼器获得更为优异的耗能能力,必然会增加构件的制造成本。针对上述问题,本研究在现有研究成果的基础上,提出一种新型 SMA 自复位转动摩擦阻尼器(SMA-SRFD),其自复位能力由 SMA 螺栓提供,能量耗散依赖旋转子摩擦斜面,并通过杠杆放大原理提升耗能能力,同时降低制造成本。阻尼器的滞回性能可通过调整 SMA 螺栓预紧力与尺寸、旋转子几何参数及摩擦系数等实现

调控。为深入研究其力学性能,本文阐述了阻尼器的基本构造及工作机理,开展了 SMA 棒材循环拉伸实验以获取材料参数,推导了阻尼器的滞回性能公式,并基于 ABAQUS 建立三维有限元模型,进一步探讨了摩擦斜面倾角、摩擦系数及 SMA 螺栓预紧力对滞回性能的影响。其自复位能力主要由 SMA 螺栓提供,旋转子上的摩擦斜面为主要耗能机制。该阻尼器利用杠杆原理,将旋转子的转动角度放大为阻尼器的平动位移,以提升阻尼器的耗能能力,同时降低制造成本。其滞回性能可通过控制 SMA 螺栓的尺寸和预紧力、旋转子的内外半径及倾角、摩擦面的摩擦系数以及连接板长度等参数进行灵活调节。为深入探究 SMA-SRFD 的力学性能,本文阐述了阻尼器的基本构造及工作机理,开展了 SMA 棒材的循环拉伸实验以确定 SMA 材料的力学参数,并对 SMA-SRFD 的滞回性能进行了理论推导。采用 ABAQUS 有限元软件,建立了 SMA-SRFD 的三维实体模型,对其滞回性能进行了数值模拟,并对比理论分析结果验证了模型的可靠性。选取摩擦斜面倾角、摩擦系数及 SMA 螺栓的预紧力作为主要影响参数,分析了阻尼器的滞回性能。

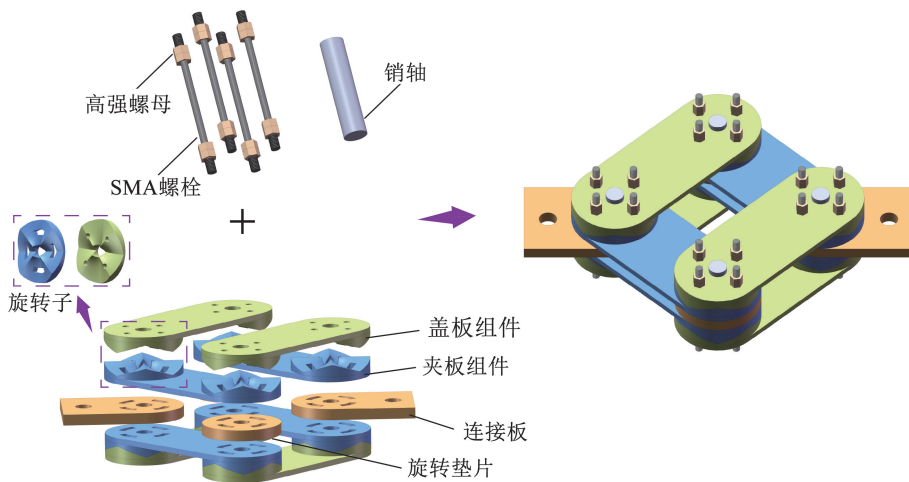


图1 SMA自复位转动摩擦阻尼器

Fig. 1 SMA self-centering rotary friction damper

1.2 工作原理

图2给出了 SMA-SRFD 在受拉与受压状态下的变形模式, F 表示施加的外部荷载, Δ 表示阻尼器的位移。当 SMA-SRFD 受到拉荷载作用时,连接板在拉力作用下沿着阻尼器轴向向外平移,同时靠近荷载端的旋转子首先发生转动,进而带动盖板组件和夹板组件绕销轴进行旋转。该过程中,位于旋转子上的上下两斜面紧密贴合并发生相互错动,增大了夹板与盖板之间的距离,引起了 SMA 螺栓的轴向伸长。SMA 螺栓因拉伸而产生的轴力会通过两端的高强螺母传递给旋转子,使旋转子中两相互贴合斜

1 SMA自复位转动摩擦阻尼器

1.1 基本构造

本研究提出的阻尼器(SMA-SRFD)包含夹板组件、盖板组件、连接板件、旋转垫片、销轴、SMA 螺栓和高强螺母。夹板组件由连接板及开槽型孔的旋转子焊接而成,在 SMA-SRFD 中心面两边对称设置两对;盖板组件是由连接板及开圆型孔的旋转子焊接而成,与夹板组件上的旋转子紧密贴合进行摩擦耗能,复位状态时,上述两相邻组件之间的夹角为 90° 。SMA 螺栓穿过各旋转子中的预留孔,两端通过高强螺母进行连接,可根据实际需求对 SMA 螺栓施加预紧力。SMA 螺栓中间为削弱段,两端直径加大并设置螺纹,方便螺母连接。受拉状态下,由于 SMA 螺栓会发生轴向变形,因此为防止应力集中,在螺纹段与削弱段连接处设置圆弧予以过渡。在 SMA-SRFD 加载端的两个夹板之间各设置一块连接板,连接板上预留圆型孔以连接建筑物,而在非加载端的夹板之间设置旋转垫片以匹配高度差。销轴通过旋转子中心的预留孔,使夹板组件和盖板组件可围绕其旋转。整个结构中,除 SMA 螺栓外,其余各部件均为钢材。SMA-SRFD 具体构造如图1所示。

面上的法向力增加,进而在接触面上产生摩擦力,由此进行摩擦耗能。当外拉荷载继续增大时,SMA 螺栓的轴力会逐渐增大,从而使旋转子内接触面上的摩擦力增加,提高了 SMA-SRFD 的耗能能力,因此该阻尼器是一种变摩擦阻尼器。由于 SMA 材料具有优异的超弹性性能,当减小 SMA-SRFD 上的外拉荷载时,SMA 螺栓会自发地恢复变形,进而驱使 SMA-SRFD 中的各个组件回到复位状态,实现了阻尼器的自复位功能。由于阻尼器具有对称性,因此其拉压状态下的变形模式及受力机理均相同,SMA 螺栓始终处于受拉状态。

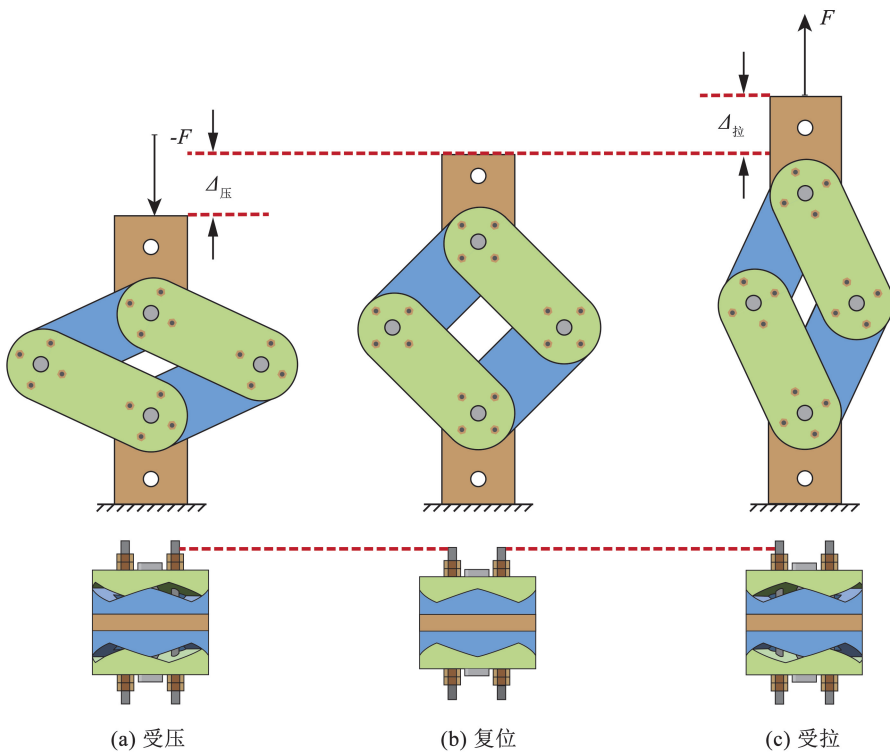


图 2 SMA-SRFD 工作机理示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of SMA-SRFD

2 理论分析

2.1 SMA 螺栓材性实验及简化模型的建立

SMA 是一种新型智能材料,具有形状记忆、超弹性、高阻尼等特性^[13]。为研究 SMA-SRFD 的滞回性能,首先需要明确 SMA 螺栓的力学性能。将 SMA 螺栓制作成哑铃型标准试件,其削弱段直径为 9 mm,削弱段长度为 70 mm,夹持段直径为 12 mm。在削弱段与夹持段之间设置圆弧以减小应力集中,加载装置如图 3 所示。实验室温(25 ℃)条件下进行,应力和应变分别是由实验机自带的力传感器和标距为 50 mm 的引伸计测得。

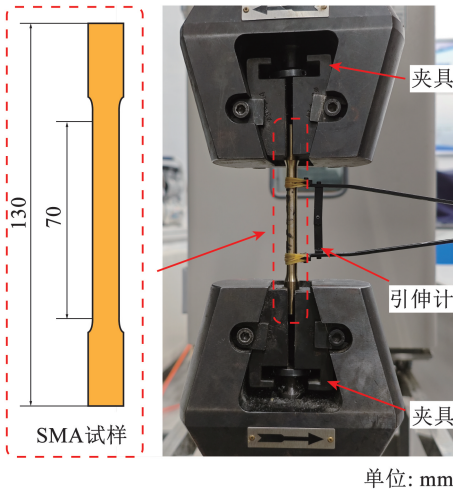


图 3 加载装置

Fig. 3 Loading device

为了激发 SMA 螺栓的超弹性,实验前对试件进行 30 min,400 ℃ 的热处理^[32],随后放入凉水中冷却至室温。采用恒定的加载速率对试件进行加载,应变速率为 0.000 5 s⁻¹,卸载时速率为 10 MPa/s,循环拉伸加载应变幅值由 1% 逐级加至 6%,增量为 1%,每级应变幅值下循环 2 次^[33](图 4)。SMA 螺栓的应力-应变曲线见图 4(a),其中, E_A 和 E_M 分别为 SMA 奥氏体和马氏体的弹性模量。图 4(a)中曲线表现出典型的“旗帜”形特征,当加载幅值小于 5% 时,试件最终残余位移较小。依据实验结果,假设 SMA 螺栓在 5% 应变幅值以后进入强化阶段,其滞回曲线可简化为图 4(b)所示的多折线模型。该折线主要有 4 个特征点:A 点和 B 点分别代表马氏体正相变的起始和结束状态,C 点和 D 点则分别代表马氏体逆相变的起始和结束状态。

2.2 旋转子受力理论计算

由 SMA-SRFD 的工作机理可知,阻尼器受轴向力时,通过盖板组件和夹板组件将轴向力转化为旋转子的转矩,进而使 SMA 螺栓伸长,最终实现摩擦耗能及自复位效果,因此首先对旋转子受力过程进行分析。旋转子参数及受力分析如图 5 和图 6 所示,其中, F_s 为 SMA 螺栓因伸长而产生的拉力, μ 为接触斜面上的摩擦因数, R_1 为旋转子内半径, R_2 为旋转子外半径, φ 为摩擦斜面转动角度, H 为摩擦斜面坡口高度, θ 为外半径所对应摩擦斜面的倾角。由

于阻尼器中摩擦斜面为三维曲面, 为了方便计算, 假设: 旋转子中相互贴合的摩擦斜面上所受压力沿半

径均匀分布且斜面上的摩擦因数恒定; 忽略各组件之间的相互挤压所引起的微小变形。

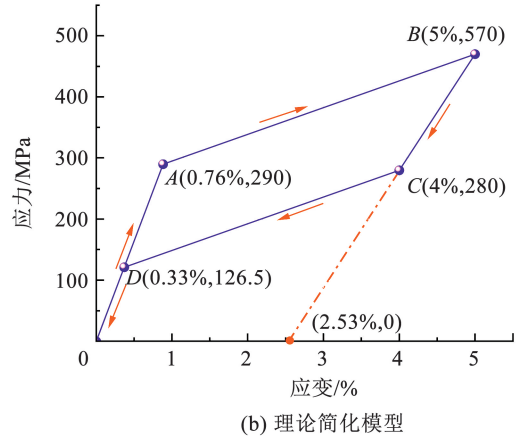
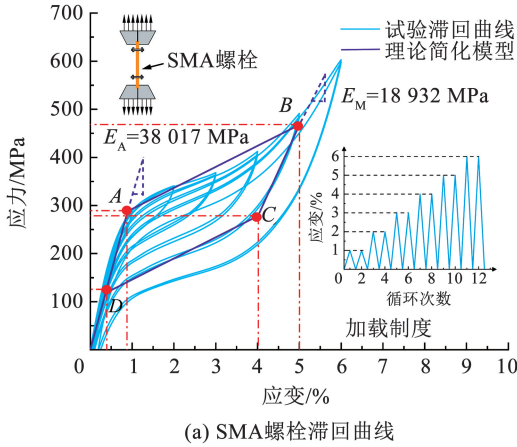


图 4 SMA 螺栓力学性能及简化模型

Fig. 4 Mechanical properties and simplified model of SMA bolt

如图 5 所示, 旋转子可分割为 8 个大小相等的摩擦斜面, 当旋转角超过 45° 时, 摩擦斜面就会滑过坡面界线进入下一斜面中, 分割之后的摩擦斜面又可划分为 n 个半径增量为 Δr 的圆环^[34-35]。由此可得

$$n = \frac{R_2 - R_1}{\Delta r} \quad (1)$$

当旋转子受到外荷载作用时, 相互贴合的两摩擦斜面发生滑动, 引起 SMA 螺栓伸长, 若 SMA 螺栓伸长对每个圆环产生的压力为 F_N , 则有

$$F_N = \frac{n_b F_s}{n} \quad (2)$$

式中 n_b 为单侧 SMA 螺栓的数量。

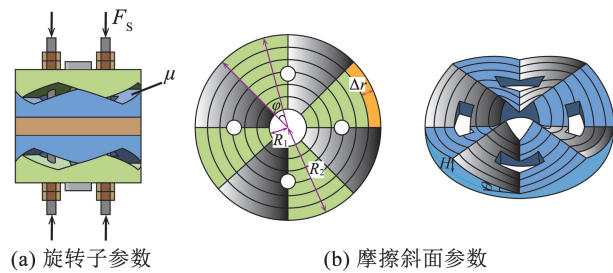


图 5 旋转子参数

Fig. 5 The parameters of rotor

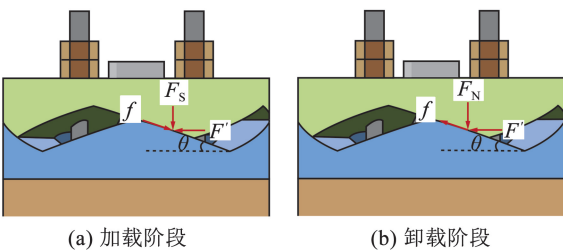


图 6 旋转子受力分析

Fig. 6 The force analysis of rotor

旋转子中摩擦斜面发生滑动而在圆环上产生摩擦力 f 的表达式为

$$f = \mu(F_N \cos \theta + F' \sin \theta) \quad (3)$$

加载阶段, 根据静力平衡原理, 沿着摩擦力 f 方向, 外荷载 F' 、压力 F_N 及摩擦力 f 满足

$$f = F' \cos \theta - F_N \sin \theta \quad (4)$$

联立式(2)、式(3)和式(4)可得

$$F' = \frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \times \frac{2n_b F_s}{n} \quad (5)$$

因此加载阶段, 旋转子所受到的转动弯矩 M_s 可近似认为是由 n 个圆环所受弯矩的累加, 即:

$$M_s = 2 \sum_{i=1}^n F'_i \times r_i = 4 \lim_{\Delta r \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \times \frac{n_b F_s}{R_2 - R_1} \times r \Delta r = 4n_b F_s \int_{R_1}^{R_2} \frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \times \frac{r}{R_2 - R_1} dr \quad (6)$$

如图 6(b) 所示, 卸载时, 摩擦力反向, 参照加载时的计算过程, 卸载阶段旋转子所受到的转动弯矩 M_r 的计算公式为

$$M_r = 4n_b F_s \int_{R_1}^{R_2} \frac{\tan \theta - \mu}{1 + \mu \tan \theta} \times \frac{r}{R_2 - R_1} dr \quad (7)$$

根据几何关系可知, 摩擦斜面的旋转角 φ 和 SMA 螺栓的轴向拉伸量变形量 δ 具有如下关系:

$$\delta = \varphi \times R_2 \times \tan \theta \quad (8)$$

SMA 螺栓的轴力计算公式为

$$F_s = E_t \varepsilon \times A = \frac{E_t \delta \times A}{L'} \quad (9)$$

式中: A 为 SMA 螺栓削弱段的横截面积; E_t 和 ε 分别为 SMA 螺栓的弹性模量及应变; L' 为 SMA 螺栓削弱段长度。

为了保证阻尼器的自复位能力,根据式(7)可知,旋转子中摩擦斜面的倾角应满足

$$\tan(\theta) \geq \mu \quad (10)$$

值得注意的是,旋转子在受力过程中,盖板组件和夹板组件相互挤压,不应出现屈服现象,因此应满足以下关系:

$$f_p = n_b F_s \cos(\theta) \leq \sigma_y A_p \quad (11)$$

式中: f_p 为盖板组件和夹板组件所受到的压力; σ_y 为钢材的屈服强度; A_p 为盖板与夹板组件之间斜面的接触面积。

由于 SMA 材料的特殊性,其在加载过程中会经历由奥氏体到马氏体的正相变,而卸载时会发生由马氏体到奥氏体的逆相变,因此,旋转子的滞回性能在整个加卸载过程中会发生阶段性的变化,具体可分为如图 7 所示的 6 个阶段。 OA 阶段中,当旋转子受到弯矩作用,相互贴合的摩擦斜面发生滑动并使盖板组件产生向外的竖向位移,引起 SMA 螺栓的轴向伸长,该阶段中 SMA 处于完全奥氏体阶段;随着弯矩的增加,SMA 螺栓不断伸长,当 SMA 达到正相变应力时,旋转子转角为 φ_a ,所受弯矩为 M_a ,继续加载,SMA 处于由奥氏体向马氏体相变的过程,旋转子的滞回曲线表现为 AB 段的斜直线;当增大旋转子转角直至 φ_b 时,SMA 正相变结束,若继续增加外荷载,SMA 将进入强化阶段,这会对 SMA-SRFD 的自复位效果产生不利影响,因此, B 点为旋转子加载的极限状态,该转角下所对应的弯矩 M_b 即为旋转子所能承受的最大荷载;减小弯矩使旋转子处于卸载阶段,如图 6(b) 所示,两相互贴合的斜面即将进行归位,接触面保持相对静止状态,摩擦力反向,滞回

曲线为图 7 中的 BC 段,该阶段旋转子不发生转动;当旋转子受到弯矩降低至 M_c 时,静摩擦力转变为滑动摩擦力,旋转子开始复位转动, CD 阶段中 SMA 始终处于马氏体状态;继续减小荷载,SMA 将发生由马氏体到奥氏体的逆相变阶段,即 DE 段。当荷载减小至 M_e 时,SMA 已完成逆相变处于完全奥氏体状态,由于是卸载阶段,摩擦力方向与加载时相反,故旋转子滞回曲线中 EO 段与 OA 段的斜率不同,说明其刚度有所差异。

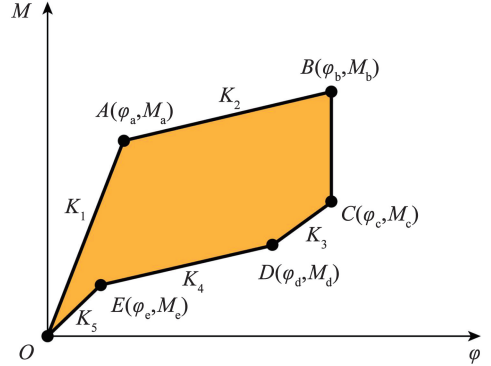


图 7 旋转子理论简化模型

Fig. 7 Theoretical simplified model of rotor

2.3 SMA-SRFD 受力理论计算

图 8 所示为 SMA-SRFD 在拉压荷载作用下的受力分析。由几何关系可知,SMA-SRFD 在外荷载 F 作用下,变形量 ΔL 可按式表示:

$$\Delta L = 2L \times \left| \cos\left(\beta_0 + \frac{\varphi}{2}\right) - \cos\beta_0 \right| \quad (12)$$

式中: L 为盖板组件中两旋转子中心连线的长度; β_0 为变形前盖板组件水平轴的夹角。

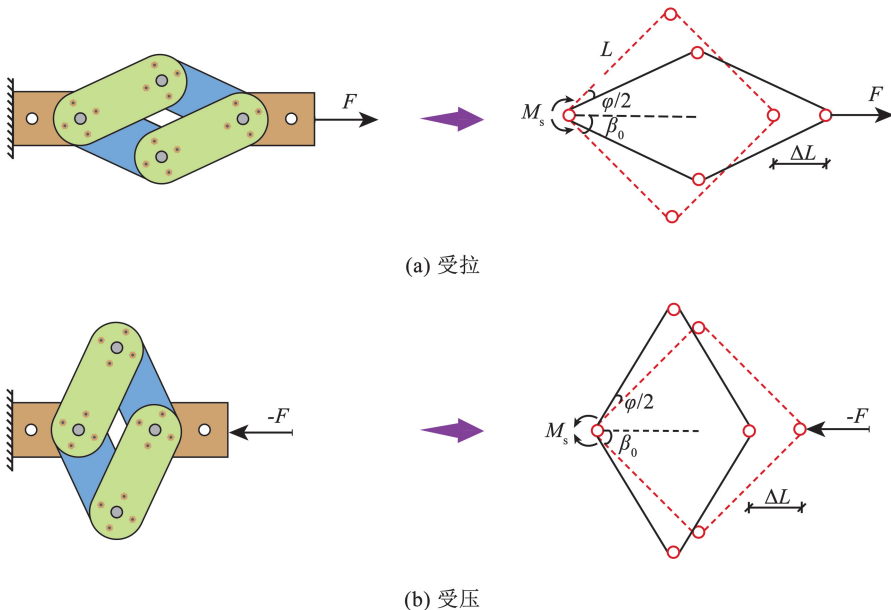


图 8 SMA-SRFD 受力分析

Fig. 8 The force analysis of SMA-SRFD

根据虚功原理, SMA-SRFD 在拉压状态下的力学方程均为:

$$F = \frac{4M_i \times \varphi}{\Delta L} \quad (13)$$

式中: M_i 为旋转子所受到的转动弯矩(分别指加载阶段和卸载阶段)。

SMA-SRFD 受力过程中, 假设夹板组件和盖板组件、连接板始终处于弹性状态且销轴不出现剪断现象, 即分别满足式(11)、(14)和式(15), 因此 SMA-SRFD 的最大位移由 SMA 螺栓削弱段的变形决定, 即 SMA 进入应变强化阶段前的变形量 δ_b 。

$$F_i \leq 2R_1 t f_b \quad (14)$$

$$V = F_i \leq 2A_v f_v \quad (15)$$

式中: F_i 为 SMA-SRFD 所受到的拉力或压力; t 为连接板的厚度; f_b 为连接板材料的承压强度; A_v 为销轴的有效截面积; f_v 为销轴的抗剪强度。

为保证 SMA-SRFD 具有良好的复位能力, 结合式(8)和式(12)可知阻尼器最大变形量 ΔL 应为:

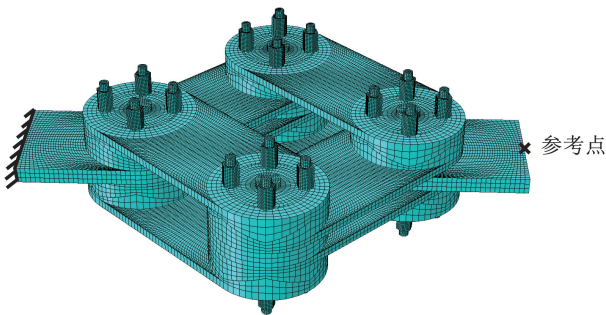
$$\Delta L \leq 2L \left| \cos \left(\beta_0 + \frac{\delta_b}{2R_2 \times \tan \theta} \right) - \cos \beta_0 \right| \quad (16)$$

联立式(6)、(8)、(9)、(12)和式(13), 可以得到 SMA-SRFD 在加载阶段的荷载-位移表达式为:

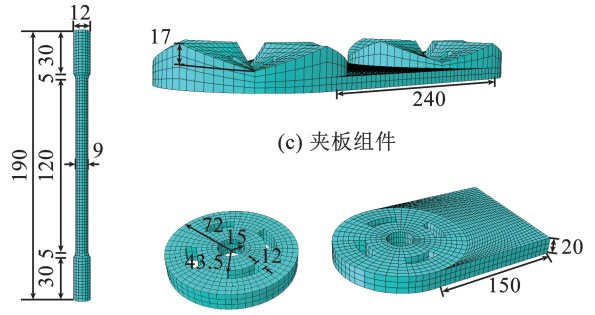
$$F_s = 32n_b E_i A R_2 \times (R_1 + R_2) \times \tan \theta \times \frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \times \left[\arccos \left(\cos \beta_0 \pm \frac{\Delta L}{2L} \right) - \beta_0 \right]^2 \times \frac{1}{\Delta L \times L'} \quad (17)$$

联立式(7)、(8)、(9)、(12)和式(13), 可以得到 SMA-SRFD 在卸载阶段的荷载-位移表达式为:

$$F_r = 32n_b E_i A R_2 \times (R_1 + R_2) \times \tan \theta \times \frac{\tan \theta - \mu}{1 + \mu \tan \theta} \times \left[\arccos \left(\cos \beta_0 \pm \frac{\Delta L}{2L} \right) - \beta_0 \right]^2 \times \frac{1}{\Delta L \times L'} \quad (18)$$



(a) 模型边界条件



(b) SMA螺栓

(d) 摩擦垫片

(e) 拉板

图 10 阻尼器有限元模型(单位:mm)

Fig. 10 Finite element model of the damper in ABAQUS

SMA-SRFD 中所有部件均采用六面体实体单元(C3D8R), 为简化分析, 约束阻尼器模型中左侧拉板端面的所有自由度, 右侧拉板端面与参考点设置“耦合”约束, 将拉压循环荷载施加在参考点上, 以

根据式(17)和式(18)可以发现, SMA-SRFD 的滞回曲线与旋转子的不同, 旋转子在每个阶段具有固定的刚度, 然而 SMA-SRFD 的刚度会随着变形的增加而提升。图 9 为 SMA-SRFD 的理论简化模型, 由于旋转子是由 4 对摩擦相互贴合的摩擦斜面组成, 无论其发生顺时针或逆时针转动, 都具有相同的滞回性能。

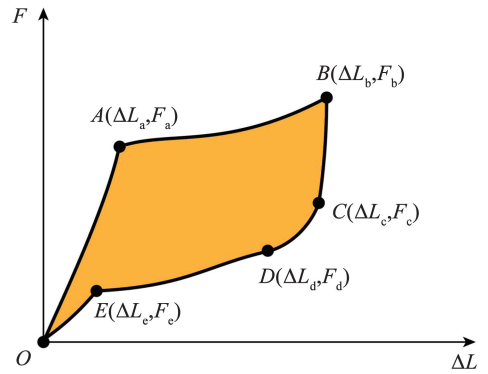


图 9 SMA-SRFD 理论简化模型

Fig. 9 Theoretical simplified model of SMA-SRFD

3 数值模拟

3.1 有限元模型建立

本节利用 ABAQUS 有限元软件对 SMA-SRFD 进行了数值模拟分析。SMA-SRFD 各构件尺寸如图 10 所示, 其中 SMA 螺栓总长 190 mm, 两端螺纹段直径为 12 mm, 削弱段直径 9 mm, 削弱段长度为 120 mm, 过渡段设置半径为 5 mm 的圆弧, 旋转子中摩擦斜面的正切值 $\tan \theta = 0.3$ 。

模拟整个加卸载过程, SMA-SRFD 可在外荷载作用下发生均匀变形。模型采用“面与面”接触, 各构件接触面之间的法向接触行为设为“硬接触”, 切向采用“罚函数”模拟基础面间的摩擦行为, SMA 螺纹段

的外表面与高强螺母的内表面之间设置“绑定”约束。SMA 螺栓和高强螺母为 SMA-SRFD 的主要复位构件,单元尺寸设为 2 mm^[26],其余各受力部件单元尺寸均为 6 mm。SMA 螺栓采用 ABAQUS 软件内置的 Super Elasticity 本构模型,具体参数依据 2.1 小节实验确定。螺母采用 10.9 级 M12 高强螺母,盖板、夹板组件、连接板、旋转垫片和销轴均采用 Q345 钢,其屈服强度为 345 MPa,弹性模量为 206 GPa,泊松比为 0.3,且考虑 0.1% 的屈服后硬化^[36]。

3.2 模型验证

根据图 4 中的实验数据可知,SMA 螺栓在 5% 应变范围内具有较小的残余位移,因此设置位移幅值为 SMA 螺栓对应削弱段的 1% ~ 5%,模拟 SMA 螺栓在循环拉伸下的力学行为,实验结果与有限元结果对比如图 11 所示,可以看到二者吻合良好。随后,模拟了 SMA-SRFD 在拉压循环荷载作用下的滞回性能,并与理论分析进行对比,结果如图 12 所示。

由图 12 可知,两种计算条件下的滞回曲线吻合较好,表明本研究所采用的理论方法可以用于预测

SMA-SRFD 的滞回性能和构件的设计。需要注意的是,当第 1 圈拉压循环开始时,随着荷载的增加,盖板组件与夹板组件之间产生相对滑移,无预紧力施加的 SMA 螺栓出现微小变形进而使接触面上的静摩擦力陡增,而理论计算并未考虑这一现象,因此表现出图 12 加载初期两种计算条件下的刚度差异。

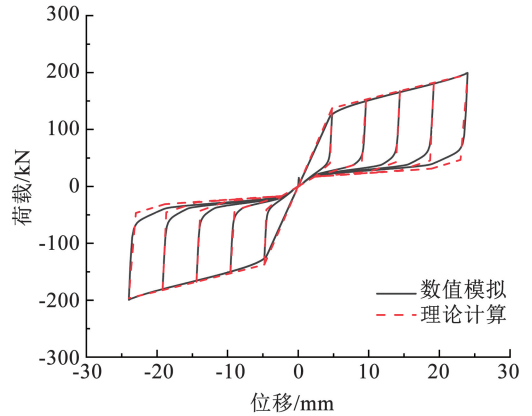


图 12 数值模拟与理论计算结果对比

Fig. 12 Comparison of the theoretical analysis results and FE results

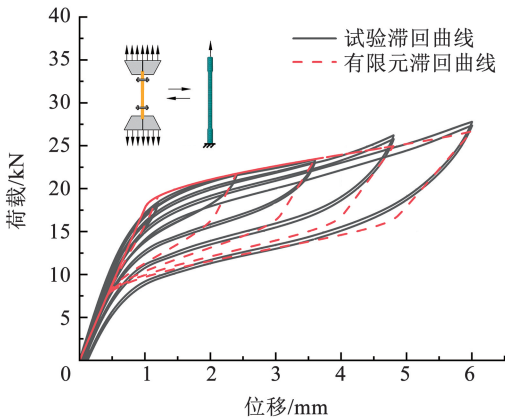
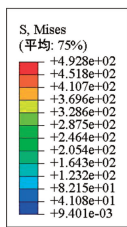


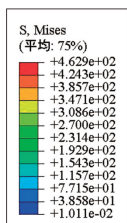
图 11 SMA 螺栓循环拉伸实验结果与有限元结果对比

Fig. 11 Comparison between cyclic tensile test results and FE results of SMA bolt

图 13 为 SMA-SRFD 及主要构件在最大拉、压位移幅值下的应力分布图,可以看到,SMA-SRFD 无论是受拉还是受压,盖板组件与夹板组件发生滑动,SMA 螺栓均被拉伸,且内力均匀分布在 SMA 螺栓的削弱段中,与预期的变形模式相一致;盖板组件与夹板组件上靠近销栓位置处的应力最大,分别为 260 和 319 MPa,因此,在实际设计时,宜在靠近销栓的位置处设置圆弧段以减小应力集中。此外,在摩擦斜面的交界处也分布有较大应力,然而远小于屈服应力 345 MPa,表明当前状态下主要受力构件尚处于弹性阶段。因此,当荷载继续增加时,SMA 螺栓将首先进入强化阶段而影响阻尼器整体的自复位效果,此时只需更换 SMA 螺栓即可使 SMA-SRFD 重新获得自复位能力。



(a) 阻尼器受拉



(b) 阻尼器受压

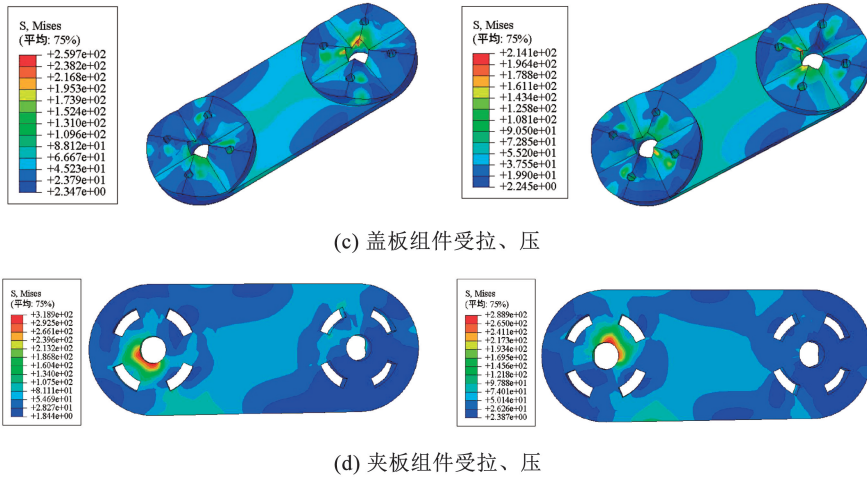


图 13 SMA-SRFD 在最大位移幅值处应力分布图

Fig. 13 Stress distribution diagram of SMA-SRFD at the maximum displacement amplitude

4 参数分析

尽管理论分析可以预测不同参数下 SMA-SRFD 滞回性能的变化规律, 然而很难判断其在变形过程中各关键部件的内力分布情况。为了能够更加清楚地了解 SMA-SRFD 在各参数下的受力机理及滞回性能, 本节基于有限元模型对 SMA-SRFD 开展了参数分析。考虑了旋转子中摩擦斜面倾角 θ 、摩擦系数 μ 及 SMA 螺栓预紧力 F_{pre} 三个影响阻尼器滞回性能的关键参数。参数分析共包含 7 个模型, 模型编号为 SS1 ~ SS7, 每个模型仅改变一个参数, 其余无变化, 具体信息见表 1 所示。表 2 给出了有限元模型在 SMA 螺栓应变幅值下的最大承载力, 随着循环次数的增加, 阻尼器的承载力呈逐渐增大的趋势。为了衡量不同参数下 SMA-SRFD 的滞回性能及刚度退化效应, 选取单圈耗能 W 、等效刚度 K 和等效阻尼比 ξ 为关键指标, 具体计算公式如下:

$$K = \frac{F_1 - F_2}{D_1 - D_2} \quad (19)$$

$$\xi = \frac{W}{2\pi F_1 D_1} \quad (20)$$

式中: W 为 SMA-SRFD 在单次拉压荷载下, 荷载-位移曲线所包围的面积; F_1 和 F_2 分别为在单次拉压荷载下, SMA-SRFD 产生的最大拉力和压力; D_1 和 D_2 分别为 SMA-SRFD 在 F_1 和 F_2 荷载作用下对应的位移值。

表 1 有限元模型参数

Tab. 1 Finite element model parameters

模型编号	$\tan\theta$	μ	F_{pre}/kN
SS1	0.2	0.15	0
SS2	0.3	0.15	0
SS3	0.4	0.15	0
SS4	0.3	0.20	0
SS5	0.3	0.30	0
SS6	0.3	0.15	5.5
SS7	0.3	0.15	11.1

表 2 循环加载过程中有限元模型的最大承载力对比

Tab. 2 Comparison of maximum bearing capacity of the FE under cyclic loading

模型编号	最大承载力/kN				
	1	2	3	4	5
SS1	98.6	110.0	123.8	130.8	148.6
SS2	131.5	151.9	165.6	180.1	199.3
SS3	156.3	186.2	203.4	218.1	237.5
SS4	149.8	173.7	192.5	210.5	230.0
SS5	179.4	234.9	262.5	275.2	304.0
SS6	131.6	149.9	165.6	180.1	196.3
SS7	139.7	155.6	170.0	183.9	200.2

4.1 摩擦斜面倾角

旋转子中相互贴合的摩擦斜面倾角是影响 SMA-SRFD 滞回性能的重要参数, 为了探究斜面倾角对其滞回性能的影响, 选取 3 个不同的摩擦斜面倾角 ($\tan\theta = 0.2, 0.3, 0.4$) 进行参数分析, 阻尼器性能变化规律如图 14 所示。由图 14 可知, SMA-SRFD 的最大承载力随斜面倾角的增加而增大, 由于最大变形量取决于 SMA 螺栓的变形能力, 因此 SMA-SRFD 的变形量呈下降趋势, 这与式 (8) 的预测结果相一致。由图 14(c) 可以发现, 随着斜面倾角的增大, 处于最大变形时, SMA-SRFD 的等效刚度也在增加, 其值分别为 4.21、8.30 和 13.75 kN/mm, 增长率分别为 97.15% 和 65.66%。同时, 等效阻尼比在减小, 分别为 18.78%、17.76% 和 17.22%。这说明增大旋转子中的斜面倾角虽然会提升 SMA-SRFD 的刚度, 但由于变形量减小幅度较大, 因此 SMA-SRFD 的耗能及等效阻尼比均减小。此外, 相比于第 4 次加载循环, SMA-SRFD 在第 5 次加载循环下的等效阻尼略有下降, 这是由于第 5 次加载循环对应的位

移幅值已经达到 SMA 螺栓正相变的阈值, SMA 螺栓的弹性模量得到大幅增加, 导致 SMA-SRFD 的加

载刚度有所提升, 等效阻尼比下降。因此, 在实际设计中, 应避免 SMA 螺栓达到临界变形量。

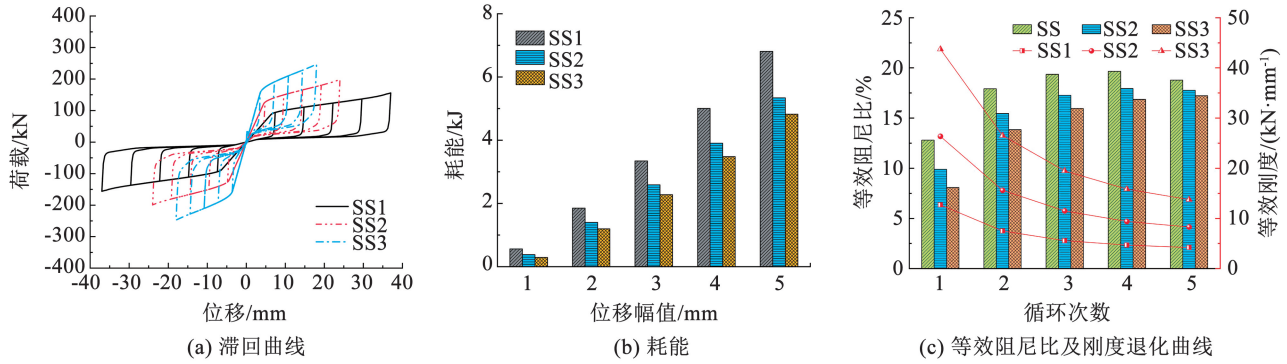


图 14 不同摩擦斜面倾角下 SMA-SRFD 性能对比

Fig. 14 Performance comparison of SMA-SRFD with different frictional slope angles

SMA-SRFD 的滞回曲线为典型的“旗帜”形, 表明其具有良好的自复位能力, 从表 3 中不难发现, 当斜面倾角 $\tan\theta = 0.4$ 时, SMA-SRFD 具有最大的残余位移, 且最大值仅为 0.183 mm, 基本完成了复位。

摩擦系数对 SMA-SRFD 滞回性能的影响, 选取 3 个不同的摩擦系数 ($\mu = 0.15, 0.20, 0.30$)。进行参数分析, SMA-SRFD 性能变化规律如图 15 所示。由图 15 可知, 增大接触面之间的摩擦系数, 可提高 SMA-SRFD 的峰值承载力, 滞回曲线趋于饱满, 耗能能力不断加强。最大位移幅值下, SS2、SS4 和 SS5 的等效刚度分别为 8.30、9.70 和 12.67 kN/mm, 等效阻尼比分别为 17.76%、19.51% 和 21.87%。可见, 随着摩擦系数的增加, SMA-SRFD 的等效刚度和等效阻尼比亦得到了提升。当摩擦系数为 0.3, 即 $\mu = \tan\theta$ 时, SMA-SRFD 的滞回曲线在卸载阶段与水平坐标轴重合, 这与式 (7) 所表述的结果一致。若继续增大旋转子中接触面间的摩擦系数, 会使得 SMA-SRFD 卸载刚度变为负值, 失去自复位能力, 因此在实际设计时须保证 $\mu < \tan\theta$ 。根据表 4 给出的残余位移可知, 随着摩擦系数的增加, SMA-SRFD 的残余位移呈增长趋势, 当 $\mu = 0.2$ 时, 残余位移最大为 0.235 mm, 表明 SMA-SRFD 具有良好的自复位能力。

表 3 不同摩擦斜面倾角下 SMA-SRFD 残余位移

Tab.3 Residual displacement of SMA-SRFD with different frictional slope angles mm

循环次数	$\tan\theta = 0.2$	$\tan\theta = 0.3$	$\tan\theta = 0.4$
1	0.051	0.025	0.020
2	0.060	0.026	0.034
3	0.065	0.028	0.063
4	0.070	0.039	0.106
5	0.085	0.074	0.183

4.2 摩擦系数

SMA-SRFD 的耗能能力主要取决于旋转子中摩擦力的大小, 因此旋转子中接触面上摩擦系数的大小对 SMA-SRFD 的耗能具有直接影响。为了探究

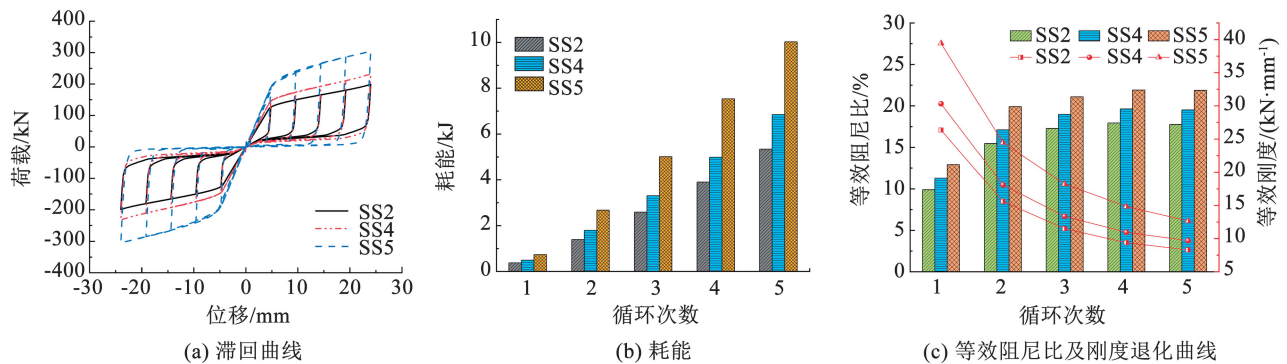


图 15 不同摩擦系数下 SMA-SRFD 性能对比

Fig. 15 Performance comparison of SMA-SRFD with different friction coefficients

表 4 不同摩擦系数下 SMA-SRFD 残余位移

Tab.4 Residual displacement of SMA-SRFD with different friction coefficients mm

循环次数	$\mu = 0.15$	$\mu = 0.20$	$\mu = 0.30$
1	0.025	0.032	0.085
2	0.026	0.046	0.832
3	0.028	0.075	1.734
4	0.039	0.135	2.500
5	0.074	0.235	3.812

4.3 SMA 螺栓预紧力

对 SMA 螺栓施加预紧力可提高 SMA-SRFD 的初始刚度,且预紧力的大小也直接影响着旋转子中摩擦斜面上的摩擦力,进而影响 SMA-SRFD 的耗能能力。相关研究表明^[37],SMA 螺栓的预紧力宜小于 65% 马氏体相变起始应力,故本节选取 3 个不同的 SMA 螺栓预紧力 ($F_{pre} = 0、5.5、11.1$ kN,分别对应 SMA 螺栓 0、30% 和 60% 马氏体相变起始应力)进行参数分析,不同 SMA 螺栓预紧力下 SMA-SRFD 的滞回性能及残余位移如图 16 及表 5 所示。

模型 SS2、SS6 和 SS7 的最大承载力基本相同,而变形量随 SMA 螺栓预紧力的增加而减小,这是由于对 SMA 螺栓施加预紧力会使其产生初始应变,而最大变形量均为螺栓的 5%。此外,由图 16(a) 可以发现,模型 SS6 的起滑荷载始终为 37 kN,而 SS7 在第一次加载循环时的起滑荷载为 63 kN,但在后续加载循环过程中则降为 51 kN,该现象与文献[26]的研究结果相一致,主要是由于 SMA 螺栓逆相变的结束应力介于模型 SS6 和 SS7 之间螺栓的预紧力,因此在模型 SS7 中出现了预紧力损失现象。

由图 16(c)可知,当 SMA 螺栓预紧力从 0 增加到 11.1 kN 时,SMA-SRFD 在最大变形下的等效刚度分别为 8.30、8.80 和 9.19 kN/mm,增长率分别为 6.02% 和 4.43%,同时,SMA-SRFD 的等效阻尼比分别为 17.76%、18.58% 和 18.86%。由此可见,对 SMA 施加预紧力对 SMA-SRFD 的刚度无显著影响。表 5 的数据表明,对 SMA 螺栓施加预紧力可减小 SMA-SRFD 的残余变形,模型 SS7 在最大加载幅值下的残余位移仅为 0.073 mm,说明 SMA-SRFD 的自复位能力优异。

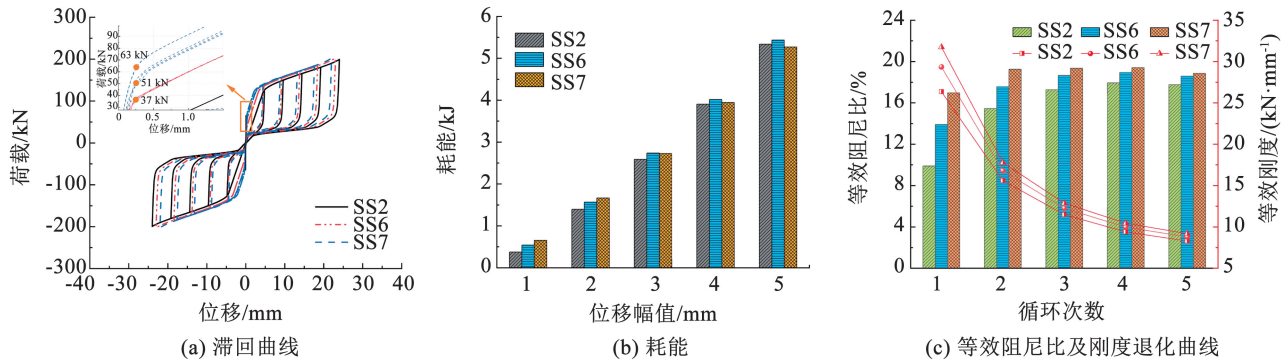


图 16 不同 SMA 螺栓预紧力下 SMA-SRFD 性能对比

Fig. 16 Performance comparison of SMA-SRFD with different SMA bolt preloading forces

表 5 不同 SMA 螺栓预紧力下 SMA-SRFD 残余位移

Tab.5 Residual displacement of SMA-SRFD with different SMA bolt preloading forces mm

循环次数	$F_{pre} = 0$	$F_{pre} = 5.5$ kN	$F_{pre} = 11.1$ kN
1	0.025	0.007	0.012
2	0.026	0.014	0.016
3	0.028	0.024	0.026
4	0.039	0.040	0.040
5	0.074	0.071	0.073

5 结 论

本文提出了一种基于 SMA 螺栓的自复位转动摩擦阻尼器 (SMA-SRFD),介绍了其基本构造及工作原理,开展了 SMA 螺栓材性实验,并根据实验结

果建立了 SMA 螺栓力学简化模型,对 SMA-SRFD 的受力性能进行了理论分析,通过与有限元分析结果对比,验证了所采用的 SMA-SRFD 理论分析的合理性,并基于有限元模型进一步探究了各参数对 SMA-SRFD 滞回性能的影响规律。主要结论如下。

1) SMA 螺栓的应力-应变曲线呈典型的“旗帜”形,具备高承载能力、稳定耗能能力和优良的自复位能力。

2) SMA-SRFD 的理论及数值模拟结果均显示 SMA-SRFD 滞回曲线呈“旗帜”形,耗能及自复位能力良好,理论分析与数值模拟结果吻合,二者均可反映阻尼器的受力过程。

3) 斜面倾角增大,SMA-SRFD 承载力及等效刚度提升,但变形量减小,不利于耗能及阻尼比增加;

摩擦系数增大,滞回曲线更饱满,耗能、等效刚度及阻尼比增加,但自复位能力减弱;为保证自复位能力,需满足 $\mu < \tan\theta$; SMA 螺栓预紧力变化对滞回性能影响较小,残余位移最大仅 0.073 mm,表明 SMA-SRFD 自复位能力优异。

参考文献

- [1] 朱达邈, 王东明. 基于遥感影像的建筑物空间分布方法在地震灾害损失预评估中的应用[J]. 震灾防御技术, 2021, 16(3): 510
ZHU Damiao, WANG Dongming. Application of building spatial distribution method based on remote sensing image in earthquake disaster loss pre-assessment[J]. Technology for Earthquake Disaster Prevention, 2021, 16(3): 510
- [2] 郑山锁, 尚志刚, 贺金川, 等. 地震灾害经济损失评估方法及应用[J]. 灾害学, 2020, 35(1): 94
ZHENG Shansuo, SHANG Zhigang, HE Jinchuan, et al. Method and application of economic loss assessment for earthquake disasters[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(1): 94
- [3] 程选生, 贾传胜, 杜修力. 消能减震技术在结构抗震加固改造中的应用[J]. 土木工程学报, 2012, 45(S1): 253
CHENG Xuansheng, JIA Chuansheng, DU Xiuli. The application of energy dissipation technology in seismic strengthening[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(S1): 253. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2012.s1.042
- [4] 周云, 商城豪, 张超. 消能减震技术研究与应用进展[J]. 建筑结构, 2019, 49(19): 33
ZHOU Yun, SHANG Chenghao, ZHANG Chao. Progress in research and application of energy-dissipated technology[J]. Building Structure, 2019, 49(19): 33. DOI: 10.19701/j.jzjg.2019.19.005
- [5] 翁大根, 张瑞甫, 张世明, 等. 基于性能和需求的消能减震设计方法在震后框架结构加固中的应用[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(S2): 66
WENG Dagen, ZHANG Ruifu, ZHANG Shiming, et al. Application of energy dissipation method in post-earthquake RC frame retrofit based on performance and demand[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(S2): 66. DOI: 10.14006/j.jzjg.2010.s2.057
- [6] 尚庆学, 张锡朋, 陈曦, 等. 基于位移型阻尼器力学模型的消能减震设计方法[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(7): 62
SHANG Qinxue, ZHANG Xipeng, CHEN Xi, et al. Design method of energy dissipation based on mechanical models of displacement-based dampers[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(7): 62. DOI: 10.14006/j.jzjg.2020.0610
- [7] 吕西林, 武大洋, 周颖. 可恢复功能防震结构研究进展[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(2): 1
LV Xilin, WU Dayang, ZHOU Ying. State-of-the-art of earthquake resilient structures[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(2): 1. DOI: 10.14006/j.jzjg.2019.02.001
- [8] 李慧, 刘迪, 杜永峰. 附设耗能装置的高层基础隔震建筑抗震性能研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(S1): 276
LI Hui, LIU Di, DU Yongfeng. Research on seismic performance of high-rise isolated building with energy dissipation device[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S1): 276. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2010.s1.033
- [9] PANT D R, MONTGOMERY M, CHRISTOPOULOS C. Analytical study on the dynamic properties of viscoelastically coupled shear walls in high-rise buildings[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2017, 143(8): 1. DOI: 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001247
- [10] 徐源庆, 季卫红, 王志强, 等. 悬索桥用新型摩擦阻尼器的研发及试验研究[J]. 公路, 2024, 69(3): 98
XU Yuanqing, JI Weihong, WANG Zhiqiang, et al. Development and experimental study of friction dampers for suspension bridges[J]. Highway, 2024, 69(3): 98
- [11] 陈博文, 任文杰. 新型分阶段屈服金属阻尼器力学性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2023, 43(4): 151
CHEN Bowen, REN Wenjie. Mechanical properties of novel multistage yielding metallic damper[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2023, 43(4): 151. DOI: 10.13197/j.eeed.2023.0415
- [12] 邱灿星, 杜修力. 自复位结构的研究进展和应用现状[J]. 土木工程学报, 2021, 54(11): 11
QIU Canxing, DU Xiuli. A state-of-the-art review on the research and application of self-centering structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(11): 11. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2021.11.006
- [13] DESROCHES R, MCCORMICK J, DELEMONT M. Cyclic properties of superelastic shape memory alloy wires and bars[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(1): 38. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:1(38)
- [14] 薛素铨, 董军辉, 卞晓芳, 等. 一种新型形状记忆合金阻尼器[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(3): 45
XUE Suduo, DONG Junhui, BIAN Xiaofang, et al. A new type of shape memory alloy damper[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(3): 45. DOI: 10.14006/j.jzjg.2005.03.006
- [15] HASHEMI A, ZARNANI P, MASOUDNIA R, et al. Experimental testing of rocking cross-laminated timber walls with resilient slip friction joints[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(1): 04017180. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001931
- [16] ISSA A S, ALAM M S. Experimental and numerical study on the seismic performance of a self-centering bracing system using closed-loop dynamic (CLD) testing[J]. Engineering Structures, 2019, 195: 144. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.05.103
- [17] DOLCE M, CARDONE D, MARNETTO R. Implementation and testing of passive control devices based on shape memory alloys[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2000, 29(7): 945. DOI: 10.1002/1096-9845(200007)29:7<945::AID-EQE958>3.0.CO;2
- [18] 黄宙, 李宏男, 付兴. 自复位放大位移型 SMA 阻尼器优化设计方法研究[J]. 工程力学, 2019, 36(6): 202
HUANG Zhou, LI Hongnan, FU Xing. Optimum design of a re-centering deformation-amplified SMA damper[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(6): 202
- [19] QIU C X, ZHU S Y. Shake table test and numerical study of self-centering steel frame with SMA braces[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2017, 46(1): 117. DOI: 10.1002/eqe.2777
- [20] 俞昊然, 李维滨. 装配 U 形阻尼器的 SMA 自复位钢框架梁柱节点抗震性能研究[J]. 建筑结构学报, 2024, 45(4): 38
YU Haoran, LI Weibin. Seismic behavior of SMA self-centering steel beam-to-column connections with U-shaped dampers[J].

- Journal of Building Structures, 2024, 45 (4): 38. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2023. 0021
- [21] 邱灿星, 姜天缘, 刘家旺, 等. 基于防屈曲镍钛 SMA 棒的自复位隅撑钢框架: 构件试验和结构行为[J]. 工程力学, 2023, 40(10): 33
QIU Canxing, JIANBG Tianyuan, LIU Jiawang, et al. Self-centering knee-braced steel frames with buckling-restrained NiTi SMA bars: component test and structural behavior[J]. Engineering Mechanics, 2023, 40(10): 33
- [22] ZHU S Y, ZHANG Y F. Seismic analysis of concentrically braced frame systems with self-centering friction damping braces [J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(1): 121. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:1(121)
- [23] 常召群, 刘伯权, 韩萌, 等. 新型自复位摩擦耗能阻尼器的设计及数值模拟分析[J]. 工业建筑, 2021, 51(9): 138
CHANG Zhaoqun, LIU Boquan, HAN Meng, et al. Design and numerical analysis of an innovative self-centering friction damper[J]. Industrial Construction, 2021, 51(9): 138. DOI: 10.13204/j. gyjzg20080402
- [24] ZHANG S Y, HOU H T, QU B, et al. Tests of a novel re-centering damper with SMA rods and friction wedges [J]. Engineering Structures, 2021, 236: 112125. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2021. 112125
- [25] LI Y, ZHANG H X, WANG J B, et al. Experimental investigation on the seismic behavior of a novel self-centering friction damper [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107384. DOI: 10.1016/j. jobe. 2023. 107384
- [26] 邱灿星, 刘家旺, 杜修力. SMA 滑动摩擦阻尼器的数值模拟及参数分析[J]. 工程力学, 2022, 39(8): 69
QIU Canxing, LIU Jiawang, DU Xiuli. Numerical simulation and parametric study of shape memory alloy slip friction dampers[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(8): 69
- [27] QIU C X, LIU J W, DU X L. Cyclic behavior of SMA slip friction damper [J]. Engineering Structures, 2022, 250: 113407. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2021. 113407
- [28] QIU C X, LIU J W, JIANG T Y, et al. Tests of double-stage SMA slip friction damper [J]. Engineering Structures, 2023, 288: 116171. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2023. 116171
- [29] 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
QIU Canxing, YANG Yongbo, LIU Jiawang. Research on mechanical behavior of a self-centering brace using SMA slip friction damper [J]. Journal of Building Structures, 2024, 45(1): 139. DOI: 10.14006/j. jzjgxb. 2022. 0725
- [30] KE K, YAM M C H, ZHANG P, et al. Self-centering damper with multi-energy-dissipation mechanisms: Insights and structural seismic demand perspective [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 204: 107837. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2023. 107837
- [31] 史庆轩, 王朴臻, 戎翀, 等. 自复位转动摩擦阻尼器弯矩-转角恢复力性能研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(9): 281
SHI Qingxuan, WANG Puzhen, RONG Chong, et al. Moment-rotating angle restoring force performance of SCRFD damper [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(9): 281. DOI: 10.13465/j. cnki. jvs. 2024. 09. 033
- [32] WANG W, FANG C, LIU J. Large size superelastic SMA bars: Heat treatment strategy, mechanical property and seismic application [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(7): 075001. DOI: 10.1088/0964-1726/25/7/075001
- [33] Ning Q J, Zhu L H, Han W, et al. Experimental study on mechanical properties of large NiTi superelastic shape memory alloy bars [J]. Smart Materials and Structures, 2022, 31(1): 015024. DOI: 10.1088/1361-665X/ac3c00
- [34] SAJAD V, SEYED M M Y, POUYAN Z, et al. Development and parametric study of a new self-centering rotational friction damper [J]. Engineering Structures, 2021, 235: 112097. DOI: 10.1016/j. engstruct. 2021. 112097
- [35] 喻鹏. 新型自复位转动摩擦阻尼器及其 RC 框架结构抗震性能研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2023
YU Peng. Analysis of seismic performance of a new self-centering rotational friction damper and its RC frame structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2023. DOI: 10.27393/d. cnki. gxazu. 2023. 001183
- [36] 邓开来, 潘鹏, 陈浩文, 等. 滚轴式金属屈服耗能阻尼器数值模拟研究 [J]. 工程力学, 2014, 31(6): 110
DENG Kailai, PAN Peng, CHEN Haowen, et al. Numerical investigation of roller steel damper for bridges [J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(6): 110
- [37] FANG C, YAM M C H, LAM A C C, et al. Cyclic performance of extended end-plate connections equipped with shape memory alloy bolts [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 94: 122. DOI: 10.1016/j. jcsr. 2013. 11. 008

(编辑 吕雪梅)