

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201906025

转动型摩擦阻尼器试验研究与理论分析*

马立威^{1,3}, 张海宾^{2,3}, 王 燕^{1,3}

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 山东莱钢建设有限公司, 山东 青岛 266000; 3. 青岛理工大学蓝色经济区工程建设与安全协同创新中心, 山东 青岛 266033)

摘要: 为研究不同摩擦材料和螺栓预紧力下转动型摩擦阻尼器的力学性能和稳定性, 采用3种不同摩擦材料, 设计9个转动型摩擦阻尼器试件, 进行低周往复试验研究, 对比分析了3种不同摩擦材料的转动摩擦机理、滞回性能、摩擦力、螺栓预紧力。对转动型摩擦阻尼器受力机理进行了理论分析, 得到转动型摩擦阻尼器的摩擦力理论计算公式, 使用刚塑性模型对阻尼器的恢复力模型进行了拟合。研究表明: ①铜锌合金和铝镁合金摩擦材料的摩擦效应由犁沟效应和粘着效应共同作用, 无石棉有机物摩擦材料以粘着效应为主; ②阻尼器滞回曲线饱满, 接近矩形, 表现出良好的耗能能力; ③铜锌合金和铝镁合金摩擦材料的摩擦力呈现逐渐增加的趋势, 无石棉有机物摩擦材料摩擦力表现下降的趋势; ④铝镁合金摩擦材料的螺栓预紧力比较稳定; ⑤摩擦力理论计算公式与试验结果取得较好的一致性, 可以用于阻尼器设计与分析; ⑥刚塑性模型对铜锌合金和铝镁合金摩擦材料的阻尼器恢复力模型适用性较高。

关键词: 转动型摩擦阻尼器; 滞回特性; 摩擦力; 摩擦系数; 恢复力模型

中图分类号: TU317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)05-1001-11

Experimental Research and Theoretical Analysis of Rotational Friction Damper

MA Liwei^{1,3}, ZHANG Haibin^{2,3}, WANG Yan^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266033, China;

2. ShandongLaiwuSteelconstruction, Co., Ltd, Qingdao 266000, China;

3. Qingdao University of Technology, Cooperative Innovation Center of Engineering Construction and Safety in Shandong Blue Economic Zone, Qingdao 266033, China)

Abstract: In order to address the mechanical properties and stability of rotational friction dampers under different friction materials and bolt pretension, nine rotational friction dampers were designed with three different friction materials. The rotational frictional mechanism, hysteresis behavior, friction force and bolt pretension of rotational friction dampers were compared and analyzed. Low cycle cyclic loading tests were carried out. The theoretical analyses of the rotational friction damper were carried out, and the frictional theoretical calculation formula of the rotational friction damper was obtained. The restoring force model of the damper is fitted by the rigid-plastic model. The results show

* 收稿日期: 2019-06-11; 修回日期: 2019-08-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51678316)资助

作者简介: 马立威(1994—), 男, 研究生。主要从事抗震方面的研究。E-mail: maliweibest@163.com

通讯作者: 王燕(1957—), 女, 教授, 博导, 博士。主要从事钢结构研究。E-mail: yanwang2010803@163.com

that: (1) The frictional effect of metal materials is composed of the ploughing effect and adhesive effect, and the main effect of asbestos-free organic matter is the adhesive effect; (2) The hysteretic curves of dampers are full and close to rectangular, showing good energy dissipation capability; (3) The frictional force of copper-zinc alloy and aluminum-magnesium alloy friction materials increases gradually, and the frictional force of asbestos-free organic matter friction materials show a downward tendency; (4) The bolt pretension of Al-Mg alloy friction material is relatively stable; (5) The theoretical formula of friction force is in good agreement with the experimental results, which can be used for the design and analysis of dampers; (6) The rigid-plastic model can be applied to restoring force model of dampers made of Cu-Zn alloy and Al-Mg alloy friction materials.

Keywords: rotational friction damper device; hysteretic property; friction force; friction coefficient; restoring force model

引言

结构耗能减震技术是在结构物的某些部位(如支撑、剪力墙、节点等)设置耗能(阻尼)装置(或元件)。耗能装置主要包括粘滞阻尼器、金属阻尼器、粘弹性阻尼器及摩擦阻尼器等。摩擦阻尼器是通过摩擦耗能原理对结构进行减震控制的一种装置。具有耗能原理简单、安装布置灵活、体积小、造价低等优点,从而得到大量推广和应用。摩擦阻尼器在钢框架结构中的应用形式如图1所示。

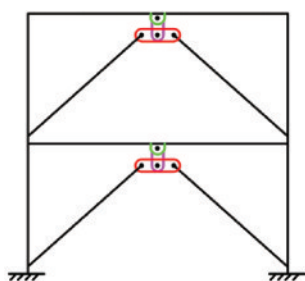


图1 摩擦阻尼器在钢框架结构中的应用

Fig.1 Application of friction dampers in structures

摩擦阻尼器最早于1982年由A.S.Pall等^[1]提出,它由两块带有长孔的钢板通过高强螺栓连接而成,钢板相互交叉通过链杆相连,钢板之间夹设摩擦材料,通过摩擦作用耗散地震能量。I.H.Mualla^[2]对一种转动型摩擦阻尼器进行了试验研究和理论分析,并将其用于新建和加固工程中。P.K.Papadopoulos等^[3]把Pall阻尼器改进为转动摩擦的X型支撑摩擦阻尼器并对此做了试验研究。N.Nabid等^[4]对设置墙板式摩擦阻尼器的混凝土框架结构进行了时程动力分析。M.Latour等^[5]对6种摩擦材料进

行了长孔螺栓摩擦阻尼器的低周往复试验,M.Anoushehi等^[6]对3种不同刹车片材料的转动型摩擦阻尼器进行了低周往复试验和有限元分析。

吴斌等^[7]对Pall阻尼器进行了静力反复加载和低周疲劳试验,全面研究了耗能器的滞回和疲劳性能。张蓬勃等^[8]对铝板摩擦材料的剪切型摩擦阻尼器进行了低周往复试验和伪动力子系统试验,研究表明铝板材料阻尼器的力学性能非常稳定。张艳霞等^[9]对不同材料长孔螺栓摩擦阻尼器进行了试验研究,结果表明使用黄铜摩擦材料的阻尼器在多次往复荷载作用下摩擦力变化幅度较小,稳定性良好。叶良浩等^[10]对采用刹车片材料的长孔螺栓摩擦阻尼器进行单轴往复加载试验,结果表明加载速率对摩擦系数有一定的影响。国巍等^[11]使用Abaqus有限元软件对转动型摩擦阻尼器进行了数值模拟,结果表明较小的初始夹角和较大的板长可以实现更大的耗能量。隋伟宁等^[12]采用Abaqus有限元软件对转动型摩擦阻尼器的力学性能进行了数值模拟,并且采用Opensees分析软件对包含了转动型摩擦阻尼器的钢框架结构进行了弹塑性动力时程分析,结果表明转动型摩擦阻尼器具有良好的耗能减震效果。李华等^[13]对一种新型金属变摩擦耗能器进行了理论与试验研究。任文杰等^[14]对一种新型自复位变摩擦阻尼器进行了试验研究与有限元分析,数值模拟结果与试验结果吻合较好。

I.H.Mualla^[2]于2000年提出转动型摩擦阻尼器(Rotational Friction Damper Device),它由三块可以在不同方向转动的钢板组成,在钢板中间设置摩擦片,钢板和摩擦片通过高强螺栓连接,通过调节螺栓预紧力的大小和加减单元个数使阻尼器达到不同的起滑力(阻尼器开始转动时摩擦力的大小)。该阻尼器通过转动摩擦原理进行耗能,当阻尼器两

端受到的力 F 很小的时候,阻尼器处于弹性状态,钢板之间不发生相对转动,可以为结构提供一定的刚度;当阻尼器受到的力达到它的起滑力 F 的时候,阻尼器处于塑性状态,钢板之间发生相对转动,阻尼器两端产生水平位移 Δ_u ,阻尼器的能量耗能 $W_d = F\Delta_u$ 。该摩擦阻尼器可用于设有支撑的混凝土结构或钢结构中,也可与结构中隔墙连接形成减震墙板,还可置于梁柱节点形成消能减震节点。

目前国内对于转动型摩擦阻尼器的力学性能研究较少,还处于有限元模拟阶段。为更加精准地对转动型摩擦阻尼器的工作性能进行研究,对使用不同材料及螺栓预紧力的转动型摩擦阻尼器开展了试验研究与理论分析,以期为摩擦阻尼器在结构中的设计提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

转动型摩擦阻尼器的构造及尺寸如图 2 所示,主要由钢板、摩擦片和高强螺栓组成,通过设置硬垫圈使高强螺栓预紧力均匀施加至钢板与摩擦片之间,采用弹簧垫圈和平垫圈对高强螺栓预紧力进行稳定和松弛补偿。

为研究不同材料和高强螺栓预紧力下转动型摩擦阻尼器的性能,设计 3 组共 9 个试件,采用 3 种不同类型摩擦片,分别是铜锌合金(copper-zinc al-

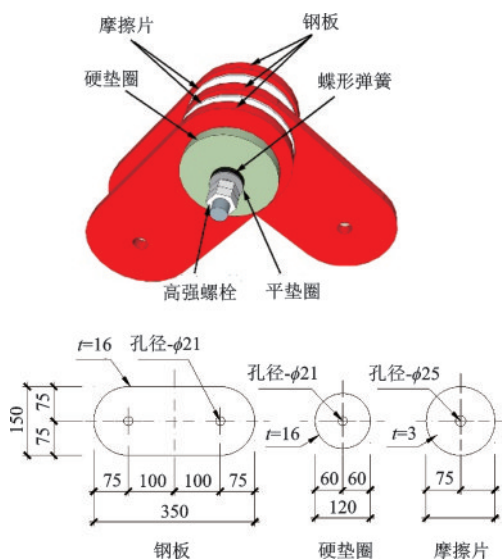


图 2 转动型摩擦阻尼器构造及尺寸

Fig.2 Structure and dimensions of the rotational friction damper

loy)、铝镁合金(aluminum-magnesium alloy)和无石棉有机物(Non-Asbestos Organic,NAO),无石棉有机物主要以复合碳纤维、高碳石墨、铜纤维等 10 余种材料组成;钢板选用 Q345 钢,高强螺栓选用 8.8 级 M20,对 3 种摩擦片高强螺栓施加预紧力设计值分别为 0.5P、0.65P、1P(P 为高强螺栓预拉力设计值^[15]);碟形弹簧根据 GB/T 1972—2005《碟形弹簧》^[16]选用碟簧 A 40-1。试件设计参数见表 1。

表 1 试件设计
Table 1 Specimen design

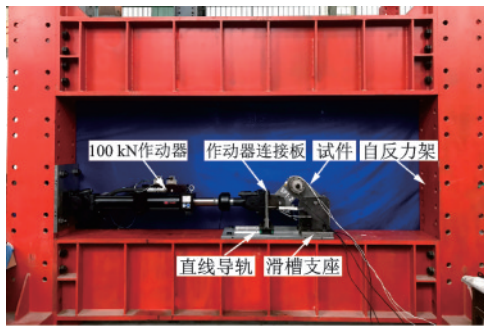
试件编号	摩擦片材料	高强螺栓预紧力设计值/kN	高强螺栓直径/mm
SP1-1	铜锌合金	62.5	20
SP1-2	铜锌合金	81.25	20
SP1-3	铜锌合金	125	20
SP2-1	铝镁合金	62.5	20
SP2-2	铝镁合金	81.25	20
SP2-3	铝镁合金	125	20
SP3-1	无石棉有机物	62.5	20
SP3-2	无石棉有机物	81.25	20
SP3-3	无石棉有机物	125	20

1.2 试验加载及量测

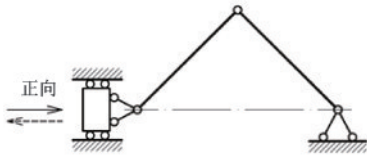
试验采用自平衡反力加载系统,选用 100 kN 液压伺服作动器进行低周往复加载,试验加载装置及模型如图 3 所示,本文以作动器推出为正向加载。在反力梁上设置直线导轨以保证试件做水平方向直线运动,采用可调节的滑槽底座以及作动器连接板以防止阻尼器发生平面外位移。以作动器推出方向为正向加载,拉回方向为负向加载。

参考 JGJ 297—2013《建筑消能减震技术规程》^[17]及相关文献的加载制度^[6-9,18],采用分段位移加载制度。采取位移控制加载,加载速率为 3 mm/s,分为 4 个加载步,分别是加载步 1(±5 mm 共 3 圈,合计 60 mm)、加载步 2(±10 mm 共 10 圈,合计 400 mm)、加载步 3(±20 mm 共 10 圈,合计 800 mm)、加载步 4(30 mm 共 10 圈,合计 1 200 mm),总加载 33 圈共计 2 460 mm。加载制度如图 4 所示。

试验时在碟形弹簧上串联 1 个压力传感器用以保证施加的螺栓预紧力满足试验要求和监测试验过程中螺栓预紧力的变化情况。施加预紧力具体方法如下:对高强螺栓施加预紧力前,首先采用 300 kN 压力试验机对 200 kN 压力传感器进行标定,得



(a) 试验加载装置



(b) 加载装置模型

图3 试验加载装置及模型

Fig.3 Test set up and the simplified model

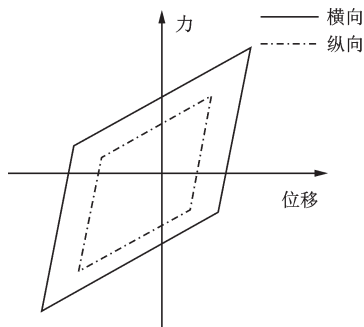


图4 加载制度

Fig.4 Loading system

到传感器力—电压变化曲线,得到 $0.5P$ 、 $0.65P$ 、 $1P$ 预紧力对应的预定电压值分别为5.13、6.65、10.19 mV。再将标定过的压力传感器与转动型摩擦阻尼器串联,在对高强螺栓施加预紧力过程中观察压力传感器电压变化,达到预定电压值即停止加压,以满足预紧力精确施加的目的。试验过程中通过观察电压变化,从而得到螺栓预紧力的变化。

布置2个水平方向应变式直线位移计用以测量阻尼器的相对水平位移;在钢板上靠近摩擦片的位置布置2个热电偶温度传感器用以监测试验过程中试件表面温度变化。

2 试验结果

2.1 试验现象与机理分析

9个摩擦阻尼器试件表现出典型的耗能现象。

当荷载小于阻尼器滑动力时,阻尼器不产生滑动,随荷载增加,阻尼器作直线水平运动。试件SP2-1、SP2-2、SP2-3(铝镁合金摩擦材料)、试件SP3-1、SP3-2、SP3-3(无石棉有机物摩擦材料)在试验过程中耗能较为平稳,没有出现摩擦振动和响声;试件SP1-1、SP1-2、SP1-3(铜锌合金摩擦材料)在试验过程中由于钢板和摩擦片之间的反复摩擦引起了不同程度的摩擦振动和响声。试验过程中钢板没有发生翘曲和侧向失稳。试验完成后钢板温度略有升高,升高幅度为 $2\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

同一摩擦材料转动型摩擦阻尼器试验前后钢板与摩擦片的试验现象基本一致,试件SP1-1、SP2-1、SP3-1试验前后对比如图5所示。由图5(d)、(e)可知试验后SP1-1、SP2-1钢板表面分别吸附有铜锌合金粉末和铝镁合金粉末,试验过程中摩擦片两面都有摩擦,试验后摩擦片表面产生多条沟槽;由图5(f)可知SP3-1钢板表面吸附有NAO材料粉末,试验过程中摩擦片仅有一个面参与摩擦,另一个面则与钢板紧密贴合,试验后摩擦片表面变得较为光滑,没有沟槽产生。

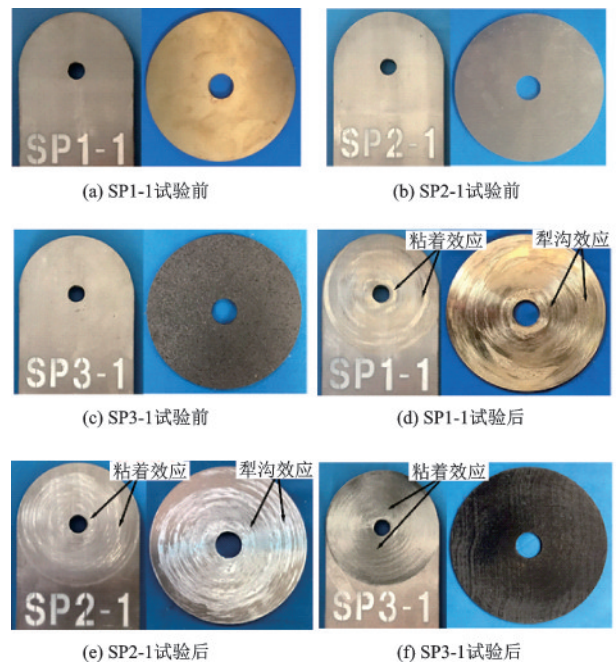


图5 试验前后钢板和摩擦片对比

Fig.5 Comparison of the steel plate and friction pad before and after test

F.Bowden等^[19]表明固体表面的摩擦力是犁沟效应和粘着效应的总和。犁沟效应会在较软的摩擦材料表面产生沟槽,SP1-1、SP1-2铜锌合金和铝

镁合金材料表面产生的沟槽与文献[19]摩擦学理论相吻合。粘着效应会产生摩擦材料间的迁移, SP1-1、SP2-1、SP3-1钢板表面吸附的摩擦材料粉末由粘着效应产生。由此可知,铜锌合金摩擦材料(SP1-1、SP1-2、SP1-3)和铝镁合金摩擦材料(SP2-1、SP2-2、SP2-3)的摩擦效应由犁沟效应和粘着效应共同作用,无石棉有机物摩擦材料(SP3-1、SP3-2、SP3-3)的摩擦效应以粘着效应为主。

2.2 滞回性能

图6为试件摩擦力—位移滞回曲线。从图中滞回曲线可以看出,各试件滞回曲线饱满,接近矩形,具有典型的理想弹塑性滞回特性,表现出良好的耗能能力。同一材料试件在试验过程中表现出的力学性能较为接近,随高强螺栓预紧力增加,摩擦力逐渐增大。

设置铜锌合金摩擦材料的试件 SP1-1、SP1-2、SP1-3 在加载第1圈试件由静止状态变为转动状态时的瞬时摩擦力较大,随后在每1圈加载过程中摩擦力变化较为平稳,但是摩擦力总体呈现增加的趋势;试件 SP1-1、SP1-2、SP1-3 滞回曲线均出现不同

程度波动,预紧力越大,波动越明显,这是由试验过程中铜锌合金摩擦片与钢板之间的振动产生的,随着预紧力的增加,振动幅度和持续时间都有所增加。

设置铝镁合金摩擦材料的试件 SP2-1、SP2-2、SP2-3 加载初期摩擦力也出现一定程度波动,加载至第3加载步时,摩擦力趋于稳定;由于试件试验过程中没有振动,因此滞回曲线较为平稳。

设置NAO摩擦材料的试件 SP3-1、SP3-2、SP3-3 在加载第1~5圈摩擦力出现明显波动,摩擦力逐渐降低,在第6~30圈加载过程中非常稳定,滞回曲线基本重合,表明无石棉有机物摩擦材料具有很好的稳定性。

此外,由图6还可以看到:滞回曲线中出现2 mm滑移,是由于试件与加载装置之间存在连接间隙;所有试件的滞回曲线正向加载摩擦力大于负向加载摩擦力,是由于作动器与试件不完全对中从而导致正向加载时摩擦力偏大;滞回曲线左右呈现不对称性,摩擦力随位移加载不断变化,加载至最大负位移(-30 mm)时摩擦力绝对值最大,加载至最大正位移(+30 mm)时摩擦力绝对值最小。

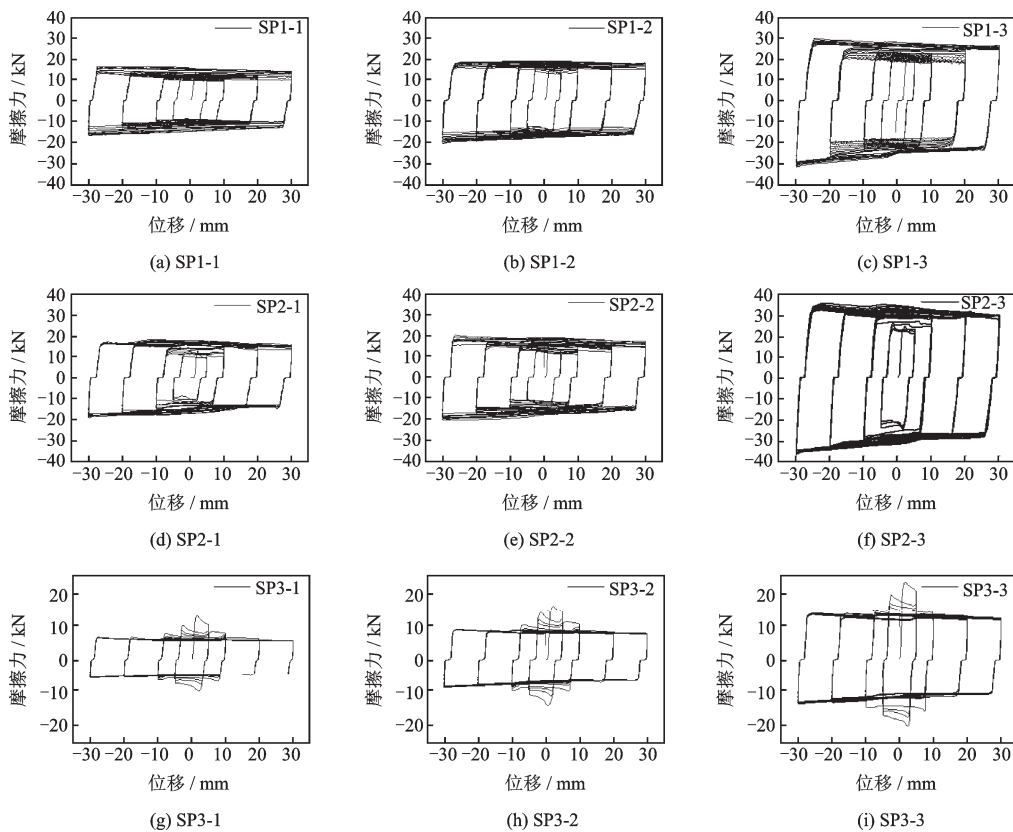


图6 试件滞回曲线

Fig.6 Hysteretic curves of specimens

2.3 摩擦力

摩擦力是衡量摩擦阻尼器性能的重要参数,摩擦力的大小与稳定直接影响阻尼器在结构中的耗能效果和阻尼器设计。

图7(a)~(c)给出不同材料摩擦力一位移变化曲线及其均值线,图中均值线自上至下分别是1P、0.65P、0.5P高强螺栓预紧力对应的摩擦力均值,曲线右侧数字表示每个试件试验前后摩擦力变化,正号表示增加,负号表示减小。图7(d)为各试件平均摩擦力随预紧力变化的曲线。摩擦力统计分析见表2。

由图7和表2可见:相同预紧力下摩擦力大小铝镁合金>铜锌合金>无石棉有机物;随预紧力增加,同一摩擦材料试件的摩擦力均值呈现增加的趋势,变化关系近似线性;铜锌合金摩擦材料(SP1-1、SP1-2、SP1-3)和铝镁合金摩擦材料(SP2-1、SP2-2、SP2-3)试验过程中摩擦力不断增加,这表明犁沟效应与粘着效应在摩擦过程中相互促进,不断加强;NAO

摩擦材料(SP3-1、SP3-2、SP3-3)试验加载初期摩擦力出现下降,这是NAO摩擦材料表面粗糙颗粒由于摩擦脱落导致,颗粒脱落之后摩擦界面变得光滑,此时摩擦以粘着效应为主,摩擦力变化较小。

摩擦力稳定性方面,无石棉有机物>铝镁合金>铜锌合金。根据均值线与摩擦力变化曲线可以看出,试件SP3-1、SP3-2、SP3-3摩擦力最为稳定,试验初期摩擦力快速下降,第2加载步后与均值线基本重合;试件SP2-1、SP2-2、SP2-3试验初期摩擦力快速上升,第2加载步后有轻微波动,但摩擦力在均值线附近,离散性较低;SP1-1、SP1-2、SP1-3的稳定性最差,随着位移的增加,摩擦力处于不断变化之中,试验值与均值的离散程度较大,其中SP1-3的样本方差最大,达到8.42。

由表2可以看出,同一材料,随着预紧力的增加,摩擦力方差逐渐增大,这表明预紧力的提高降低了转动型摩擦阻尼器的稳定性,在进行摩擦阻尼器设计时可采用多个阻尼器串联方式,以避免使用预紧力较大的单个阻尼器。

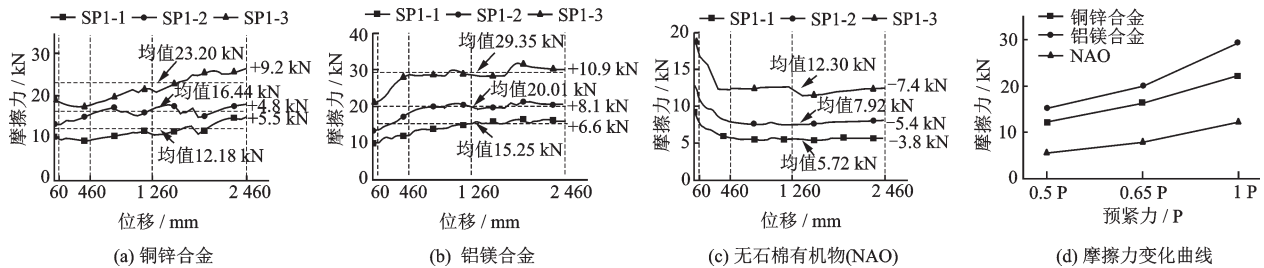


图7 不同摩擦材料的摩擦力变化曲线

Fig.7 Friction force curve of different friction material

表2 摩擦力统计分析

Table 2 Statistical analyses of friction forces

统计量	SP1-1	SP1-2	SP1-3	SP2-1	SP2-2	SP2-3	SP3-1	SP3-2	SP3-3
\bar{F}_s	12.18	16.44	23.20	15.25	20.01	29.35	5.72	7.92	12.30
β	1.59	1.37	1.53	1.66	1.61	1.52	1.70	1.72	1.65
S^2	2.46	1.67	8.42	3.44	4.61	6.17	0.56	1.16	2.25

注: \bar{F}_s 为摩擦力均值; β 为最大摩擦力与最小摩擦力的差值(F_s^{\max}/F_s^{\min}); S^2 为样本方差

2.4 高强螺栓预紧力

高强螺栓预紧力变化对于转动阻尼器设计及性能具有至关重要的影响。图8为试件预紧力随加载位移变化曲线,表3为试验前后预紧力值大小及变化范围。可以看出,所有试件加载前初始预紧力均满足试件设计要求。在加载初期,除试件SP3-3

外,其余试件高强螺栓预紧力加载初期均出现瞬间下降,这是因为加载初期由静摩擦转变为动摩擦,摩擦界面之间的摩擦行为还不稳定,从而导致高强螺栓预紧力损失。

由图8和表3可得:试件SP1-1、SP1-2、SP1-3的预紧力在加载过程中持续下降,高强螺栓预紧力损失值随着初始高强螺栓预紧力的增加而增大,下降

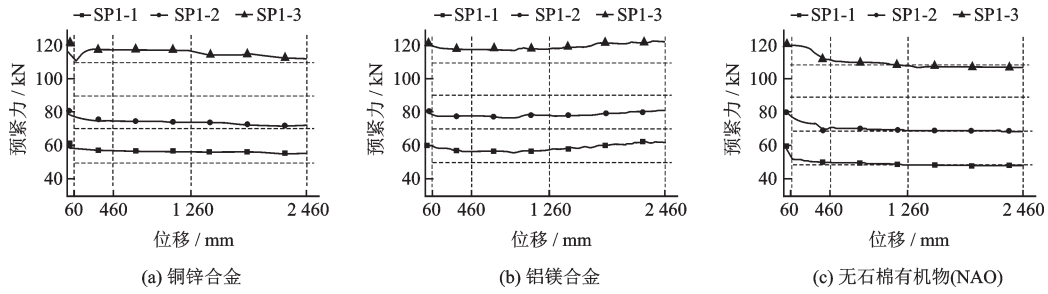


图8 高强螺栓预紧力

Fig.8 Preload of high-strength bolts

表3 高强螺栓预紧力

Table 3 Preload of high-strength bolts

试件编号	试验前 P_{bl}^s/kN	试验后 P_{bl}^e/kN	$F_{bl}^e - F_{bl}^s /$ kN	变化 范围/%
SP1-1	60.52	55.33	-5.19	-8.57
SP1-2	80.45	72.22	-8.23	-10.23
SP1-3	121.20	111.97	-9.23	-7.61
SP2-1	60.02	62.34	2.32	3.86
SP2-2	80.94	81.04	0.10	0.13
SP2-3	122.20	122.37	0.17	0.14
SP3-1	60.02	48.96	-11.06	-18.43
SP3-2	80.69	69.55	-11.14	-13.81
SP3-3	121.31	107.46	-13.85	-11.41

百分比为7.61%~10.23%;试件SP2-1、SP2-2、SP2-3的高强螺栓预紧力表现为先下降后上升的趋势,试验过程中下降幅度较小,表现出稳定的性能;试件SP3-1、SP3-2、SP3-3的高强螺栓预紧力在前两个加载步出现急剧下降,随后保持稳定,下降幅度11~13 kN,下降幅度均超过《建筑消能减震技术规程》^[17]规定设计值的10%,表明NAO材料的高强螺栓预紧力损失较为严重。

综上,不同材料的高强螺栓预紧力表现为不同波动形式,且相同材料在不同预紧力下变化规律基本一致。可以得出铝镁合金材料在转动型摩擦阻尼器中高强螺栓预紧力较为稳定;NAO材料在加载初期预紧力会有所下降,下降幅度为11~13 kN,且后期预紧力比较稳定,在设计时可以考虑施加高于设计值约10~15 kN预紧力;铜锌合金材料高强螺栓预紧力试验过程中不断降低,不利于阻尼器的设计。

3 理论分析

3.1 摩擦系数

摩擦阻尼器属于位移型阻尼器,阻尼器摩擦力

与荷载大小及频率、循环次数无关^[20]。此类型摩擦装置的力学模型可以用库伦摩擦定律^[21]表示。

$$F = \mu N \quad (1)$$

式中, F 为摩擦阻尼器的滑动力; μ 为摩擦系数; N 为作用在摩擦面上的正压力。

式(1)适用于长孔螺栓摩擦阻尼器,转动型摩擦阻尼器使用转动摩擦力矩 M 表现其摩擦性能。摩擦面几何参数如图9所示, M 通过摩擦面上各点摩擦力对转动中心 O 取矩得到。取摩擦片面积微元进行分析,根据库伦定律,可以得到微元体的摩擦力

$$f = \mu \frac{P_{bl}}{A} dA \quad (2)$$

式中, μ 为摩擦系数; P_{bl} 为螺栓预紧力; A 为摩擦面面积; dA 为微元体面积,且 $dA = r dr d\theta$ 。

微元体摩擦力 f 对摩擦片中心 O 取矩得 $r\mu \frac{P_{bl}}{A} dA$ 。对整个摩擦面进行积分即得转动摩擦力矩:

$$M = \iint r\mu \frac{P_{bl}}{A} dA = \frac{2}{3} \mu P_{bl} \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_2^2 - R_1^2} \quad (3)$$

式中, R_1 和 R_2 分别为摩擦片内径和外径。

对阻尼器运动前后进行几何分析与受力分析,根据图10(a),可以得到变形后阻尼器角度变化:

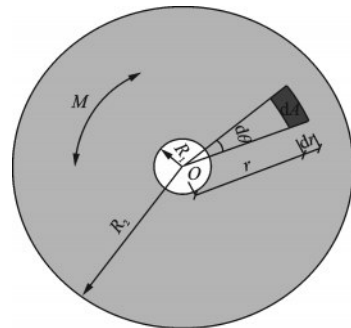


图9 摩擦面几何参数

Fig.9 Geometry of the friction surface

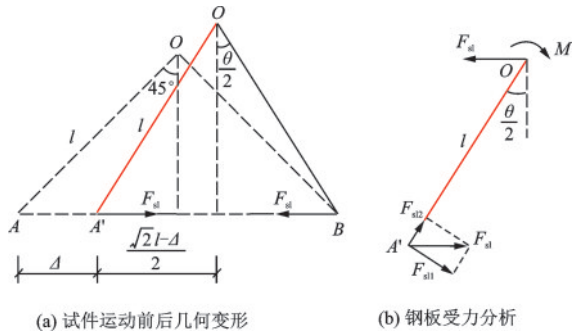


图10 试件运动前后几何变形及受力分析

Fig.10 Geometric deformation and stress analyses of the specimens before and after motion

$$\frac{\theta}{2} = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{2}l - \Delta}{2l} \right) \quad (4)$$

式中, θ 为运动后试件夹角; l 为阻尼器臂长; Δ 为加载位移, 本试验中 $\Delta \in [-30 \text{ mm}, 30 \text{ mm}]$ 。

如图10(b)所示, 对钢板进行受力分析, 可以得

到摩擦力矩 M 与摩擦力 F_{sl} 的关系:

$$M = F_{sl1}l = F_{sl} \cos \frac{\theta}{2} l \quad (5)$$

综上, 由式(3)~(5)可以得到摩擦力 F_{sl} 理论计算公式:

$$F_{sl} = \frac{2}{3l} \mu n P_{bl} \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_2^2 - R_1^2} \sec \left(\sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{2}l - \Delta}{2l} \right) \right) \quad (6)$$

式中, n 为摩擦面个数, 1单元时 n 取2。

根据公式(6)可以看出摩擦力的大小不仅和摩擦系数 μ 、预紧力 P_{bl} 以及单元个数 n 有关系, 还和阻尼器臂长 l 、摩擦片内外径尺寸 R_1 、 R_2 及滑动位移 Δ 有关。由公式(6)还可以得到转动型摩擦阻尼器摩擦力随位移的变化是非线性的。

取 SP1-1、SP2-1 和 SP3-1 最后一圈加载位移为 0 时的螺栓预紧力与摩擦力, 根据公式(6)求得其摩擦系数并且计算不同加载位移 Δ 下钢板夹角 θ 和摩擦力 F_{sl} , 计算结果见表4。

表4 不同位移下摩擦力理论值与试验值对比

Table 4 Comparison of theoretical and experimental values of friction force with displacements

位移 Δ/mm	钢板夹角 $\theta/(\text{°})$	公式(6)/kN			试验值/kN		
		1-1	2-1	3-1	1-1	2-1	3-1
-30	102.91	16.6	18.4	6.4	16.8	19.0	6.3
-15	96.32	15.5	17.1	6.0	15.7	16.8	5.9
0	90.00	14.6	16.2	5.7	14.6	16.2	5.7
15	84.13	13.9	15.4	5.4	14.1	15.9	5.4
30	78.41	13.3	14.8	5.2	14.0	15.7	5.4

由表4可以看出, 加载位移 Δ 由 -30 mm 加载至 30 mm 时, 加载位移的变化引起钢板夹角 θ 的变化, 转动摩擦力矩 M 保持不变, 摩擦力 F_{sl} 呈现减小的趋势。摩擦力的减小导致滞回曲线左右不对称, 这与试验所得滞回曲线左右呈现不对称性现象基本吻合, 本文提出的摩擦力计算公式(6)与试验取得了较好的一致性。

进而求得在此摩擦系数和预紧力下不同位移的摩擦力, 得到理论滞回曲线, 与试验滞回曲线进行对比如图11所示。滞回曲线理论值与试验值基本重合, 因此转动型摩擦阻尼器可以用公式(6)进行摩擦系数分析。

图12为各试件摩擦系数变化曲线, 可以看到铜锌合金和铝镁合金摩擦材料的摩擦系数加载过程

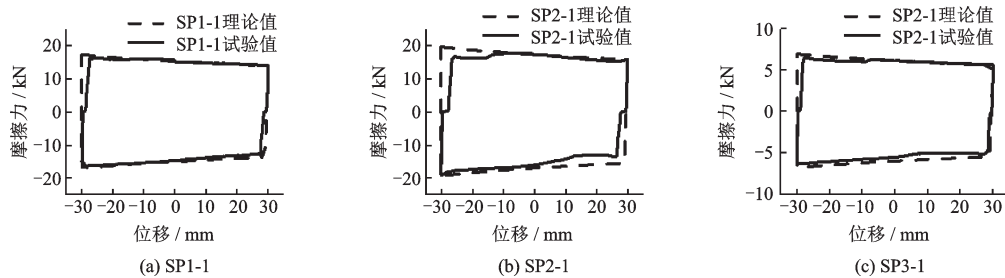


图11 试验滞回曲线与理论滞回曲线

Fig.11 Comparisons of experimental and the oretical results on hysteretic curves

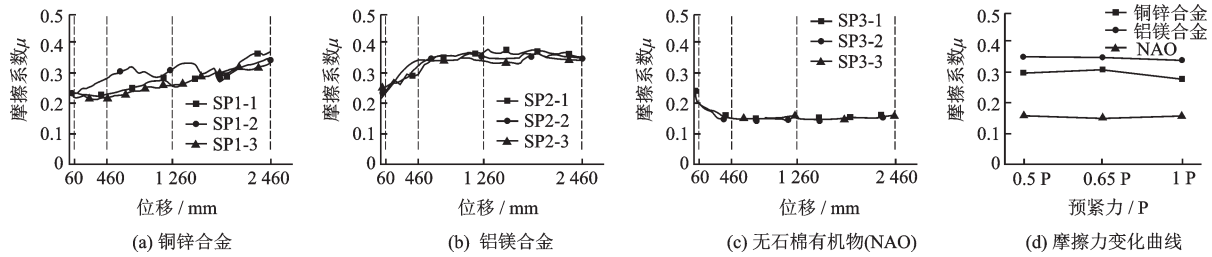


图 12 不同摩擦材料的摩擦系数变化曲线

Fig.12 Friction coefficient curves of different friction materials

中表现出增加的趋势,而NAO摩擦材料的摩擦系数表现出下降的趋势,相同材料摩擦系数具有基本一致的变化规律。

由图 12 和表 5 综合分析可得,3 种材料的平均摩擦系数铝镁合金>铜锌合金>无石棉有机物,加

载初期各试件摩擦材料摩擦系数较为接近,为 0.21~0.26;随着加载位移的增加,铜锌合金和铝镁合金材料的摩擦系数均出现不同程度上升,NAO 材料摩擦系数呈下降的趋势;各试件试验前后摩擦系数都有较大幅度的变化,为 45%~69%。

表 5 摩擦系数统计分析

Table 5 Statistical analyses of friction coefficients

统计量	SP1-1	SP1-2	SP1-3	SP2-1	SP2-2	SP2-3	SP3-1	SP3-2	SP3-3
$\bar{\mu}$	0.3	0.31	0.28	0.35	0.35	0.34	0.16	0.15	0.16
α	1.69	1.5	1.61	1.58	1.45	1.58	1.61	1.55	1.49
$S^2(\times 10^{-5})$	195.48	83.43	147.84	124.29	66.69	124.29	30.54	26.61	18.56

注: $\bar{\mu}$ 为摩擦系数均值; α 为最大摩擦系数与最小摩擦系数比值(μ_{\max}/μ_{\min}); S^2 为样本方差

摩擦系数整体稳定性排序:无石棉有机物>铝镁合金>铜锌合金。可见铜锌合金摩擦材料在试验过程中摩擦系数波动较大,铝镁合金摩擦材料和 NAO 摩擦材料在第 2 个加载步后均趋于稳定;图 12 (d) 表明,各试件摩擦系数均值在不同预紧力下基本保持不变,表现了摩擦材料本身良好的稳定性;表 5 中 NAO 材料样本方差明显小于其余两种金属材料,进一步说明 NAO 材料具有更加稳定的性能。

3.2 阻尼器恢复力模型

在进行摩擦型阻尼器分析的时候,摩擦阻尼器滑动后摩擦力保持不变,滞回曲线呈矩形,因此多数摩擦阻尼器建立理想的弹塑性模型或刚塑性模型^[3-8],弹塑性模型与刚塑性模型的区别在于是否考虑塑性变形前的弹性变形段,由试验结果可知转动型摩擦阻尼器弹性位移几乎为 0,因此采用刚塑性模型对阻尼器的恢复力模型进行拟合。

刚塑性模型如图 13 所示,基恢复力表达式为:

$$P_y = P \operatorname{sgn}(d(t)) \quad (7)$$

式中, P_y 为起滑摩擦力; P 为摩擦力,是由公式(6)求位移为 0 时的摩擦力; $d(t)$ 为滑动位移。

摩擦阻尼器一个周期所耗散的能量 W_d 为:

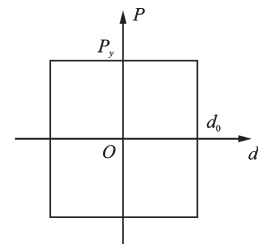


图 13 刚塑性模型

Fig.13 Rigid-plastic model

$$W_d = 4P_y d_0 \quad (8)$$

式中, W_d 为摩擦耗能器一个周期所消耗的能量; d_0 为最大滑动摩擦位移。

转动型摩擦阻尼器的滞回曲线呈梯形,为研究刚塑性模型对 3 种材料的适用性,取第 4 加载步 ± 30 mm 共 10 圈加载的滞回曲线,计算试验耗能与理论耗能的差值。理论耗能计算公式的摩擦系数取所有加载步平均摩擦系数,螺栓预紧力取设计值。得到结果见表 6。

由表 6 可得,摩擦材料为铝镁合金时,试验值与理论值的能量差值均在 5% 以内,摩擦材料为铜锌合金时,能量差值在 10% 以内,刚塑性模型可以很好地对这两种材料的转动摩擦恢复力模型进行拟

表6 试验与理论能量耗散对比

Table 6 Comparison of experimental and theoretical results on energy dissipation

试件编号	试验值/J	理论值/J	差值/%
SP1-1	15 667	14 604	6.78
SP1-2	19 255	20 856	8.32
SP1-3	29 180	27 120	7.06
SP2-1	18 483	17 736	4.0
SP2-2	23 609	22 944	2.8
SP2-3	35 115	35 460	0.98
SP3-1	6 598	8 344	26.47
SP3-2	9 174	11 124	21.25
SP3-3	14 117	16 692	18.24

合。铝镁合金材料拟合情况更好的原因是铝镁合金材料的螺栓预紧力和摩擦力表现都比较稳定;而铜锌合金材料误差在10%以内的原因是铜锌合金材料螺栓预紧力下降时摩擦力却处于上升之中,有正负相互抵消的趋势;而NAO摩擦材料由于试验过程中螺栓预紧力和摩擦力同时下降,使得理论值计算所得的阻尼器耗散能量偏大,不能很好地用刚塑性模型对NAO材料的恢复力模型进行拟合。

4 结 论

(1)金属材料与无石棉有机物摩擦片表现出不同的试验现象,金属摩擦材料由犁沟效应和粘着效应共同作用,无石棉有机物摩擦材料以粘着效应为主。

(2)转动型摩擦阻尼器表现出理想的摩擦阻尼器滞回特性,滞回环面积饱满,耗能能力较强,其中以无石棉有机物摩擦材料滞回行为最稳定。

(3)铜锌合金和铝镁合金摩擦材料在试验过程中摩擦力呈现增大趋势,增大幅度分别为37%~59%、52%~66%。无石棉有机物摩擦材料摩擦力呈下降趋势,下降幅度为65%~72%。

(4)3种材料阻尼器的螺栓预紧力变化各不相同,其中以铝镁合金材料转动型摩擦阻尼器的预紧力最为稳定。

(5)建立了转动型摩擦阻尼器几何变形及受力分析模型,推导得到转动型摩擦阻尼器摩擦力计算公式(6),并与试验取得了较好的一致性。

铝镁合金材料和铜锌合金材料的滞回曲线模型可以采用刚塑性模型进行拟合,无石棉有机物材

料由于预紧力和摩擦力下降使得拟合效果不佳。

参考文献:

- [1] Pall A S, Marsh C. Response of friction damped braced frames [J]. Journal of Structural Engineering, 1982, 108(9): 1313-1323.
- [2] Mualla I H. Experimental evaluation of new friction damper device[C]// 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand: [s.n.], 2000.
- [3] Papadopoulos P K, Salonikios T N, Dimitrakis S A, et al. Experimental investigation of a new steel friction device with link element for seismic strengthening of structures [J]. Structural Engineering And Mechanics, 2013, 46: 4.
- [4] Nabid N, Hajirasouliha I, Petkovski M. Performance-based optimisation of RC frames with friction wall dampers using a low-cost optimisation method[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2018, 16: 5017-5040.
- [5] Latour M, Piluso V, Rizzano G. Experimental analysis on friction materials for supplemental damping devices [J]. Construction and Building Materials, 2014, 65: 159-176.
- [6] Anoushehei M, Daneshjoo F, Mahboubi S, et al. Experimental investigation on hysteretic behavior of rotational friction dampers with new friction materials [J]. Steel and Composite Structures, 2017, 24(2): 239-248.
- [7] 吴斌, 张纪刚, 欧进萍. Pall型摩擦阻尼器的试验研究与数值分析[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(2): 7-13.
Wu B, Zhang J G, Ou J P. Experimental research and numerical analysis of Pall-typed frictional dampers [J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(2): 7-13. (in Chinese)
- [8] 张蓬勃, 赵世春, 孙玉平, 等. 铝板摩擦材剪切型摩擦阻尼器的研究[J]. 工程科学与技术, 2011, 43(5): 218-223.
Zhang P B, Zhao Sh Ch, Sun Y P, et al. Study on Shear Type Friction Damper of Aluminum Alloy [J]. Advanced Engineering Sciences, 2011, 43(5): 218-223. (in Chinese)
- [9] 张艳霞, 赵文占, 陈媛媛, 等. 长孔螺栓摩擦阻尼器试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(4): 90-95.
Zhang Y X, Zhao W Zh, Chen Y Y, et al. Experimental research of slotted bolted friction device [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2015, 37(4): 90-95. (in Chinese)
- [10] 叶良浩, 曲哲, 贺思维, 等. 刹车片型摩擦消能器的单

- 轴力学性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2018, 51(7):70-74,97.
- Ye L H, Qu Zh, He S W, et al. Experimental study on uniaxial mechanical properties of brake pad-type friction damper[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(7):70-74,97. (in Chinese)
- [11] 国巍, 徐恒超. 新型旋转摩擦阻尼器性能研究[J]. 结构工程师, 2018, 34(1):54-58.
- Guo W, Xu H Ch. Performance of a novel rotational frictional damper[J]. Structural Engineers, 2018, 34(1):54-58 (in Chinese)
- [12] 隋伟宁, 周魁, 王占飞. 转动型摩擦阻尼器力学性能及抗震效果分析[J]. 工业建筑, 2018, 48(4): 137-143.
- Sui W N, Zhou K, Wang Zh F. Analysis of mechanical properties and seismic behavior of rotation type friction dampers[J]. Industrial Construction, 2018, 48(4): 137-143. (in Chinese)
- [13] 李华, 张忠恩, 汤二枚. 一种新型金属变摩擦耗能器的研发与应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(4): 459-462.
- Li H, Zhang Zh E, Tang E M. Research & Application of new metal damper of variable friction[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(4): 459-462. (in Chinese)
- [14] 任文杰, 牛杰, 何小林. 新型自复位变摩擦阻尼器力学性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(2): 136-142.
- Ren W J, Niu J, He X L. Investigation on mechanical behavior of new-type self-recovering variable friction damper[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2017, 39(2): 136-142. (in Chinese)
- [15] 钢结构高强度螺栓连接技术规程: JGJ 82—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Technical specification for high strength bolt connections of steel structures: JGJ 82—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)
- [16] 碟形弹簧: GB/T 1972—2005[S]. 北京: 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2005.
- Disc Spring: GB/T 1972—2005 [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of P.R.C., 2005. (in Chinese)
- [17] 建筑消能减震技术规程: JGJ 297—2013[S]. 北京: 北京建筑工业出版社, 2013.
- Technical specification for seismic energy dissipation of buildings: JGJ 297—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013. (in Chinese)
- [18] 张蓬勃, 潘毅, 赵世春, 等. 双行程可变阻尼力摩擦阻尼器的特性[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(6): 946-952.
- Zhang P B, Pan Y, Zhao Sh Ch, et al. Hysteresis characteristics of shear friction damper with two resistances and displacements [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(6): 946-952. (in Chinese)
- [19] Bowden F, Tabor D. The friction and lubrication of solids part 1[M]. Oxford: Clarendon Press, 1950.
- [20] 周云. 摩擦耗能减震结构设计[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2006.
- Zhou Y. Design of friction energy dissipation and shock absorption structure [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [21] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- Wen Sh Zh, Huang P. Principles of Tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. (in Chinese)

(本文责编: 周小潭)