李文轩,李斌,吴成亮.新型阻尼钢U型阻尼器滞回性能试验研究[J].地震工程学报,2026,48(5):1169-1177.DOI:10.20000/j.1000-0844.20241217001
LI Wenxuan,LI Bin,WU Chengliang.Experimental study on the hysteretic performance of a novel damping steel U-shaped damper [J].China Earthquake Engineering Journal,2026,48(5):1169-1177.DOI:10.20000/j.1000-0844.20241217001

新型阻尼钢U型阻尼器滞回性能试验研究

李文轩[1],李 斌[1],吴成亮[2]
(1.湖南理工学院 土木建筑工程学院,湖南 岳阳 414006;
2.武汉鑫拓力工程技术有限公司,湖北 武汉 430073)

摘要:U型阻尼器是一种高效的耗能减震装置,已在各类工程结构中得到广泛应用。为进一步提升U型阻尼器在隔震结构中的减震效能,将力学性能优异的新型阻尼钢材应用于U型阻尼器的研制。确定该新型钢材的屈服强度、抗拉强度与弹性模量等关键力学参数后,加工制备5个新型阻尼钢U型阻尼器试件,并开展滞回性能试验。试验结果表明,该新型阻尼钢U型阻尼器在循环荷载作用下滞回曲线饱满,耗能性能稳定,具备优良的滞回特性。在此基础上,建立对应的有限元数值模型,模拟阻尼器在循环加载工况下的力学响应,系统探究板厚、板宽、板间距及圆角直线段长度等结构参数对其力学性能的影响规律。结果表明,新型阻尼钢U型阻尼器整体力学性能优异、滞回耗能效果良好,可为阻尼器的结构优化设计与工程应用提供理论依据与技术参考。

关键词:新型阻尼钢;U型阻尼器;滞回性能;数值模拟;参数分析
中图分类号:TU352.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)05-1169-09
DOI:10.20000/j.1000-0844.20241217001

Experimental study on the hysteretic performance of a novel damping steel U-shaped damper

LI Wenxuan[1], LI Bin[1], WU Chengliang[2]
(*1.School of Civil Engineering and Architecture, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, Hunan, China;*
2.Wuhan Xintuoli Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 430073, Hubei, China)

Abstract: U-shaped dampers are efficient energy dissipation devices that have been widely used in various engineering applications. To improve the damping performance of U-shaped dampers in seismic isolation structures, a novel damping steel with superior mechanical properties was used to fabricate the dampers. The material properties, including yield strength, tensile strength, and elastic modulus, were determined. Five U-shaped dampers made of this novel damping steel were manufactured, and hysteretic performance tests were conducted. The test results indicate that under cyclic loading, the dampers exhibit stable hysteretic behavior and full hysteretic loops. Based on these find-

收稿日期:2024-12-17
基金项目:湖南省自然科学基金(2026JJ80250);湖南省大学生创新项目(S202512658010)
第一作者简介:李文轩(2001-),男,硕士,主要从事桥梁用阻尼器力学性能及抗震研究。E-mail:2836341995@qq.com。
通信作者:李 斌(1981-),男,博士,副教授,主要从事桥梁工程减隔震研究。E-mail:12007030@hnist.edu.cn。

ings, a finite element model of the U-shaped damper was developed to simulate its mechanical behavior under cyclic loading. The effects of plate thickness, plate width, plate spacing, and the length of the straight segment of the fillet on damper performance were then investigated. The parametric analysis results indicate that the U-shaped damper made of the novel damping steel possesses excellent mechanical properties and favorable hysteretic performance, providing a reference for the optimal design of such dampers.

Keywords: novel damping steel; U-shaped damper; hysteretic performance; numerical simulation; parameter analysis

0 引言

地震、强风等动力荷载易引发建筑结构振动、开裂、倾斜甚至坍塌等病害。为抑制结构动力响应、提升整体抗震性能,各类减隔震技术得以快速发展与应用[1]。其中,U型金属阻尼器凭借受力性能优异的优势,可有效为结构提供附加刚度与阻尼,显著控制结构地震位移响应,适用性极强,已广泛应用于各类工程结构[2]。

国内外学者针对U型金属阻尼器的力学特性与耗能减震性能开展了大量研究。Oh等[3]通过振动台试验证实,由叠层橡胶支座与U型阻尼器组成的减隔震体系,可有效削弱框架结构的地震响应;Atasever等[4]优化了U型阻尼器的结构形式,提出了穿孔式、非平行臂式新型构造;Kishiki等[5]通过拟静力试验验证了U型金属屈服阻尼器具备优异的面内耗能能力。宋俊伯等[6]对比分析了S304、S2205不锈钢与传统SN490B钢制备的U型阻尼器性能,证实不锈钢U型阻尼器减震性能优异,可有效应用于连续梁桥减震设计。种迅等[7]通过数值模拟研究,验证了实体单元模型可精准模拟U型阻尼器的力学响应规律。于天昊等[8]研发新型碟簧-U型阻尼器三维隔震装置,为三维隔震技术发展提供了新思路。邵浩等[9]和杨明飞等[10]设计了限位式U型软钢阻尼器,通过数值模拟验证了其力学性能,为工程优化布置提供参考。冯欢等[11]提出可快速更换的装配式蝶形金属阻尼器,证实其具备优良的减震性能与工程实用性。朱翔等[12]将U型阻尼器应用于防撞吸能装置,有效降低车辆撞击下桥墩的受力与损伤。徐增武等[13]探究了U型阻尼器应用于梁柱节点的受力特性。文献[14-16]通过试验研究,明确了材质硬度、约束条件等参数对U型阻尼器耗能与力学性能的影响规律。文献[17-19]研发开槽式U型阻尼器与履带式桥梁耗能器,通过试验与数值模拟完成结构尺寸优化,有效提升了阻尼器耗能性能,完善了相关设计方法。

综上可知,U型金属阻尼器工程应用广泛,但仍存在性能优化与升级空间。传统U型阻尼器在极端环境、复杂荷载作用下的性能短板逐渐凸显,难以完全适配实际工程需求。基于此,本文采用新型阻尼钢材研制U型阻尼器,系统探究不同结构参数下新型阻尼器的滞回性能与力学特性,研究成果可为新型U型阻尼器的优化设计与工程应用提供理论依据与技术支撑。

1 新型阻尼钢力学性能试验

为了测试新型阻尼钢的基本力学性能指标,按照标准[20]制作了三个标准试件,采用3 mm/min的恒定速率进行单向拉伸加载直至破坏。阻尼钢试件、应力-应变曲线分别如图1、图2所示。阻尼钢屈服强度、抗拉强度和弹性模量等力学性能列于表1。



(a) 拉伸前



(b) 断裂后

图1 阻尼钢试件图

Fig. 1 Damping steel specimen

试验结果表明,该材料平均屈服强度达到了603 MPa,抗拉强度1 171 MPa,弹性模量为180.49 GPa,相较于U型阻尼器常用的Q235、Q345钢材,新型阻尼钢表现出较高的强度和抗变形能力。

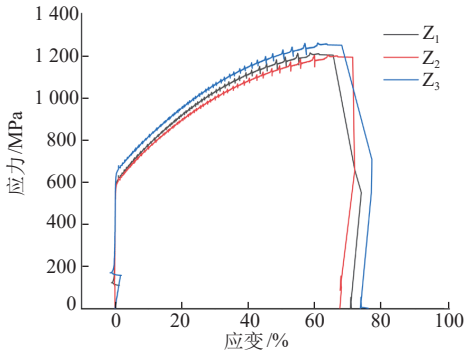


图 2　材料拉伸应力-应变曲线

Fig. 2　Tensile stress-strain curve of the material

表 1　标准试样拉伸试验结果

Table 1　Tensile test results of standard specimens

试样编号	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa
Z_1	599	1 172	179.23
Z_2	574	1 099	171.35
Z_3	636	1 242	190.89
平均值	603	1 171	180.49

2　新型阻尼钢U型阻尼器滞回性能试验

2.1　试件构造

如图3所示，U形金属阻尼器主要由三个部分组成：即圆槽孔直板、中部弯曲板以及圆孔直板。主要几何参数，板厚、板宽、板间距、圆角直线段长度和弯曲半径分别为t、b、h、L_1、r。其他几何参数，如螺孔半径、螺栓间距、圆槽孔的长度分别为R、D、K。

制作加工5个U型阻尼器试件，具体编号尺寸参数列于表2及加工成型的试件如图4所示。

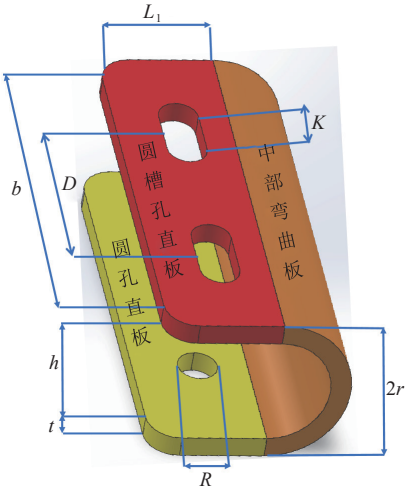


图 3　试件构造示意图

Fig. 3　Schematic diagram of specimen configuration

表 2　U型阻尼器试件尺寸参数

Table 2　Dimensional parameters of U-shaped damper specimens

编号	t/mm	b/mm	h/mm	L_1/mm
S_1	16.5	330	90	83
S_2	13	330	90	83
S_3	16.5	300	90	83
S_4	16.5	330	70	83
S_5	16.5	330	90	73



图 4　阻尼器试件

Fig. 4　Damper specimen

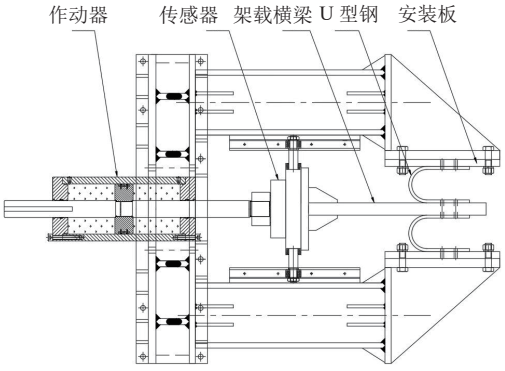
2.2　加载装置及加载制度

试验采用高强度螺栓将U型阻尼器圆孔直板与安装板紧固连接，并与加载装置的刚性支座形成可靠约束；带圆槽孔的直板则与布设传感器的加载横梁端部相连，具体装配形式如图5所示。完成试件安装后，对各类试验仪器与设备进行全面检查与调试，确认设备工况正常、数据采集系统无误后，通过作动器驱动加载横梁开展循环加载试验。

本文位移加载制度参照FEM-46规范及国内相关标准[21]制定，最大位移加载峰值设定为50 mm，全程共设置10级加载工况，具体加载参数如表3所列。试验过程中，每一级位移幅值下均完成两次往复循环加载，且后一级位移幅值为前一级的1.4倍，通过逐级递增的加载方式逐步逼近预设最大位移峰值，完成全过程滞回加载试验(图6)。

2.3　试验现象

循环加载过程中，U型阻尼器随加载指令发生往复伸缩变形，其不同结构区段呈现差异化受力特征：阻尼器直线段主要承担拉压交变荷载，弯曲段主要承受剪切作用(图7)。当加载横梁单侧推移、阻尼器受压时，带圆槽孔直板产生向内弯曲变形，且弯曲程度随加载压力增大持续加剧，直至构件进



(a) 加载装置示意图



(b) 现场实物图

图 5 加载装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of loading device

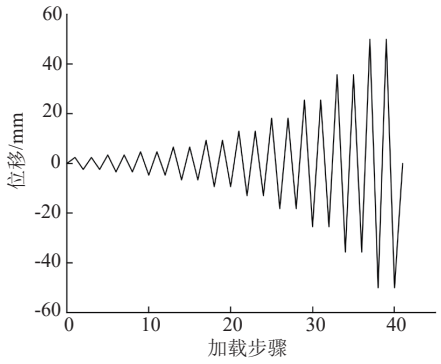


图 6 加载制度曲线

Fig. 6 Loading protocol curve

表 3 加载曲线幅值

Table 3 Amplitude values of loading curve

加载步	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
位移/mm	2.4	3.4	4.7	6.6	9.3	13	18.2	25.5	35.7	50.00

入屈服状态，变形特征如图 7(b)所示；当加载横梁反向推移、阻尼器受拉时，带圆槽孔直板随即向外弯曲，整体进入拉伸受力状态，变形形态如图 7(c)所示。在反复拉压、剪切耦合作用下，阻尼器持续耗散结构振动能量，其中大部分能量以热能形式耗散，少量能量以残余应力形式储存在构件内部，最终实现良好的结构减震与能量耗散效果。

试验测得试件的力-位移关系曲线，发现滞回曲线饱满对称，没有出现传统金属阻尼器在类似荷载作用下可能出现的捏缩现象(图 8)，表明该新型阻尼器材料性能与结构设计具有一定优势。



(a) 初始状态



(b) 压缩状态



(c) 拉伸状态

图 7 阻尼器不同受力状态下的变形图

Fig. 7 Deformation diagram of the damper under different stress states

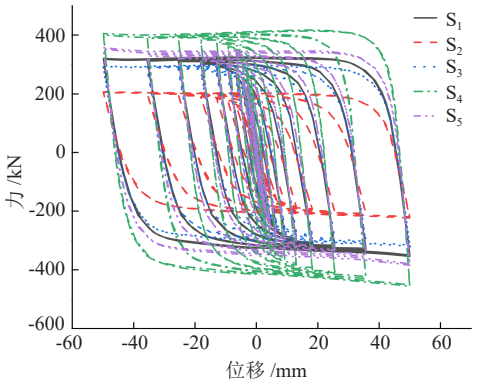


图 8 阻尼器滞回曲线

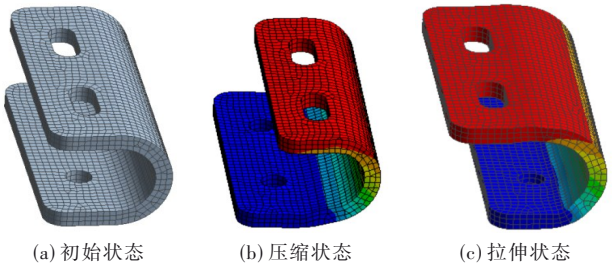
Fig. 8 Hysteretic curves of the damper

2.4 试验结果分析对比

为了验证试验结果的准确性，更好地研究不同结构尺寸新型阻尼钢 U 型阻尼器的滞回性能，采用 ANSYS 软件建立有限元模型，如图 9 所示。该模型采用八节点六面体线性缩减积分单元(C3D8R)，选用双线性各向异性硬化弹塑性模型，其中弹性模量 $E=171.35$ GPa、泊松比 $\mu=0.3$、屈服应力 $f_y=574$ MPa，采用试验最低值。

同时借鉴杜红凯等[14]和赵珍珍等[22]提出的理论公式，结合 U 型钢板的弹塑性行为模型、截面特性以及材料属性等参数[23]，分别计算 U 型阻尼器的屈服力 F_y、屈服位移 Δ_y 和弹性刚度 K_e，即：

$$F_y=\frac{f_y b t^2}{2h+3t} \tag{1}$$



(a) 初始状态　(b) 压缩状态　(c) 拉伸状态

图 9　有限元模型

Fig. 9　Finite element model

$$\Delta_y=\frac{3\pi f_y(h+2t)^3+12f_yL_1(h+2t)^2}{Et(2h+3t)} \tag{2}$$

$$K_e=\frac{Ebt^3}{3\pi(h+2t)^3+12L_1(h+2t)^2} \tag{3}$$

有限元模拟结果与试验结果的对比如图 10 所示，可见二者在各级循环加载阶段的力学响应规律基本吻合。整体来看，各试件的有限元模拟承载力均略低于试验实测值。究其原因，本文有限元模型为保证结构设计安全性，材料参数均选取规范最小值。其中，弹性模量表征材料抵抗弹性变形的能力，取值偏小时，构件更易产生弹性变形，会降低结构整体承载水平；屈服强度为材料发生塑性变形的临界应力，取值偏小会使试件在更低的应力水平下进入塑性状态，进一步导致模拟承载力偏低。因此，数值计算所得承载力整体小于试验实测结果，属于合理的安全偏差。

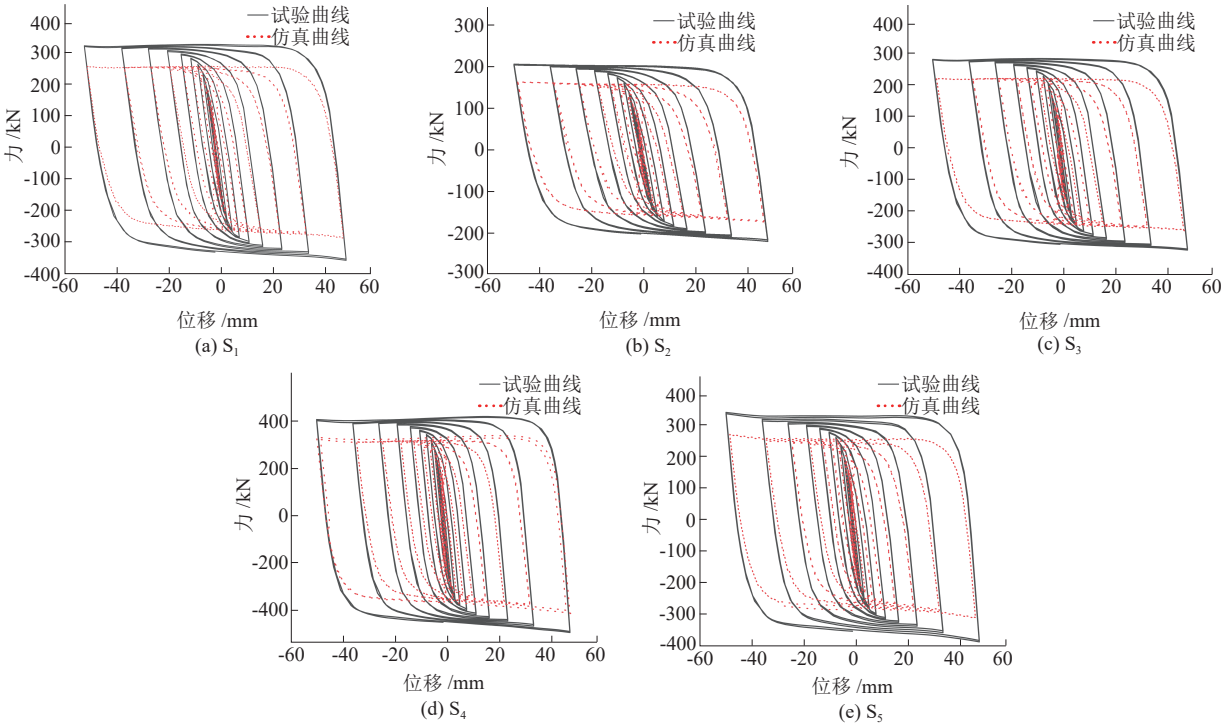


图 10　阻尼器滞回曲线仿真与试验结果

Fig. 10　Comparison between simulated and experimental hysteretic curves of the damper

与此同时，采用理论公式(1)、(2)、(3)分别计算各试件的屈服力 F、屈服位移 Δ_y 与初始刚度 K，计算结果如表 4 所列。对比结果可知，理论计算值与试验实测值整体吻合良好。其中，屈服力、屈服位移、初始刚度的最大相对误差分别为 11.58%、12.85%、14.28%。

2.5　参数影响分析

为进一步分析各结构参数对新型阻尼钢U型阻尼器滞回性能、刚度退化、能量耗散等性能的影响，根据板厚、板宽、板间距以及圆角直线段长度 4 个参数，设计 9 种不同尺寸的U型阻尼器试件，同样遵循表 3 的加载制度。其中，以 U1 为基准试件，用于对比。编号及详细尺寸如表 5 所列。

2.5.1　板厚的影响

不同板厚工况下U型阻尼器的力学与耗能性能差异显著，具体变化规律如图 11 所示。以试件 U1 为基准对照组，试件 U6 板厚较 U1 增大 22%，其最大滞回曲线面积提升 44%；试件 U2 板厚较 U1 减小 22%，其最大滞回曲线面积降低 36%。由此表明，在相同荷载作用下，增大阻尼器板厚可有效提

表 4 试件屈服力、屈服位移和初始刚度

Table 4 Yield force, yield displacement, and initial stiffness of specimens

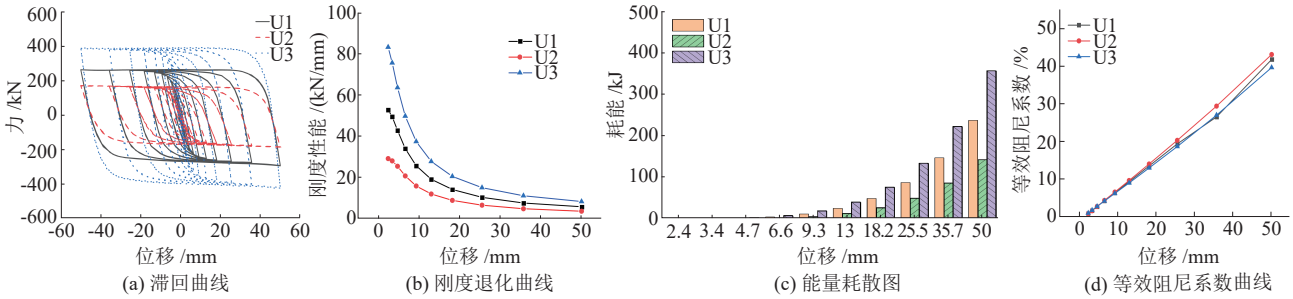
编号	F_y /kN			Δ_y /mm			K_e /(kN/mm)		
	理论值①	试验值②	[(②−①)/②]/%	理论值①	试验值②	[(②−①)/②]/%	理论值①	试验值②	[(②−①)/②]/%
S_1	223.14	252.35	11.58	10.49	10.73	2.24	21.27	24.56	13.39
S_2	145.15	165.12	12.10	12.15	12.94	6.11	11.95	13.82	13.55
S_3	202.84	224.83	9.78	10.49	11.14	5.84	19.34	22.56	14.28
S_4	270.24	302.56	10.68	8.38	9.22	9.16	32.26	36.83	12.40
S_5	223.14	247.72	9.93	9.69	11.12	12.85	23.03	26.18	12.05

表 5 阻尼器参数模型尺寸参数

Table 5 Dimensional parameters of the damper parametric model

编号	t /mm	b /mm	h /mm	L_1 /mm
U1	16.5	330	90	83
U2	13	330	90	83
U3	16.5	300	90	83
U4	16.5	330	70	83
U5	16.5	330	90	73
U6	20	330	90	83
U7	16.5	330	110	83
U8	16.5	360	90	83
U9	16.5	330	90	93

升构件的能量吸收与耗散能力。刚度特性方面，U2初始刚度较U1下降44%，U6初始刚度较U1提升58%。究其原因，板厚变化改变了阻尼器整体截面刚度与受力特性，使不同板厚阻尼器在受力变形过程中呈现出差异化的刚度水平。耗能性能方面，U2最大耗能值较U1降低40%，U6最大耗能值较U1提升50%，说明增大板厚可提高阻尼器有效受力体积，充分挖掘构件的耗能潜力，显著提升整体耗能能力。此外，在大位移幅值工况下，板厚对等效阻尼系数的影响更为突出：U2最大等效阻尼系数较U1小幅提升3%，U6最大等效阻尼系数较U1降低5%，体现出板厚对阻尼器阻尼特性的调控作用。



(a) 滞回曲线 (b) 刚度退化曲线 (c) 能量耗散图 (d) 等效阻尼系数曲线

图 11 板厚对U型阻尼器性能的影响

Fig. 11 Effect of plate thickness on the performance of U-shaped damper

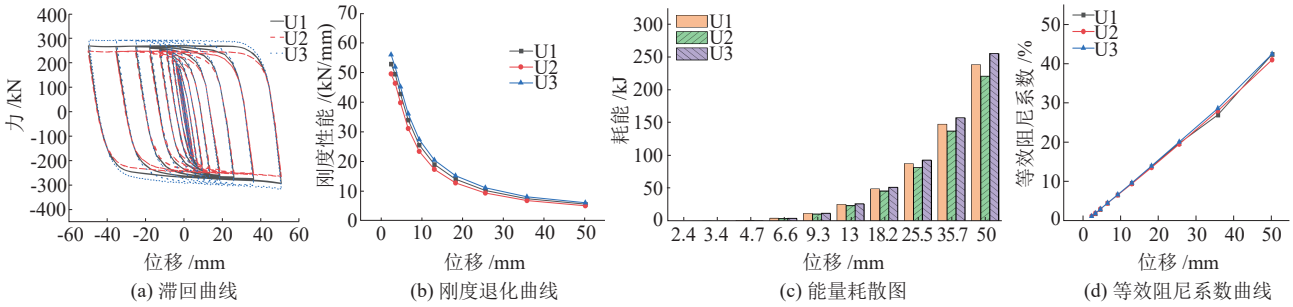
2.5.2 板宽的影响

板宽是影响U型阻尼器力学性能的关键参数，在工程安装空间受限的工况下，合理调控板宽对阻尼器发挥最优减震耗能性能具有重要工程意义。不同板宽对阻尼器的性能影响规律如图12所示。仍以试件U1为基准进行对比分析：试件U8板宽较U1增大9%，最大滞回曲线面积提升8%；试件U3板宽较U1减小9%，最大滞回曲线面积降低10%。刚度与耗能特性呈现同步变化规律，U3初始刚度、最大耗能值较U1分别下降6%、7%，U8初始刚度、最大耗能值较U1分别提升6%、7%。

整体分析可知，U型阻尼器的滞回耗能面积、初始刚度及最大耗能能力与板宽呈正相关变化规律，但相较于板厚参数，板宽对阻尼器力学与耗能性能的影响幅度更小。同时，不同板宽工况下阻尼器的等效阻尼系数曲线基本重合，进一步说明板宽对阻尼器耗能特性的调控作用有限。因此，在实际工程中，可根据现场安装空间的约束条件，通过微调板宽实现阻尼器力学性能的小幅优化与适配，满足不同工况的减震设计需求。

2.5.3 板间距的影响

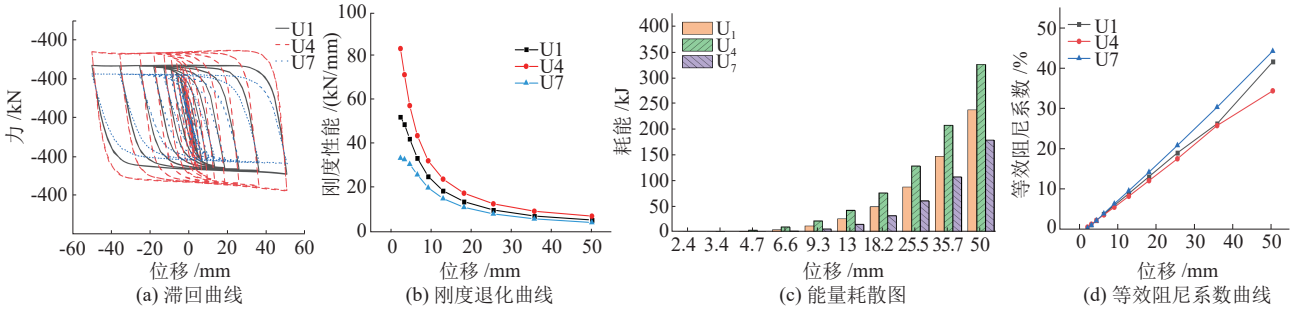
图13四组对比曲线表明，板间距的变化对U型



(a) 滞回曲线　(b) 刚度退化曲线　(c) 能量耗散图　(d) 等效阻尼系数曲线

图 12　板宽对U型阻尼器性能的影响

Fig. 12　Effect of plate width on the performance of U-shaped damper



(a) 滞回曲线　(b) 刚度退化曲线　(c) 能量耗散图　(d) 等效阻尼系数曲线

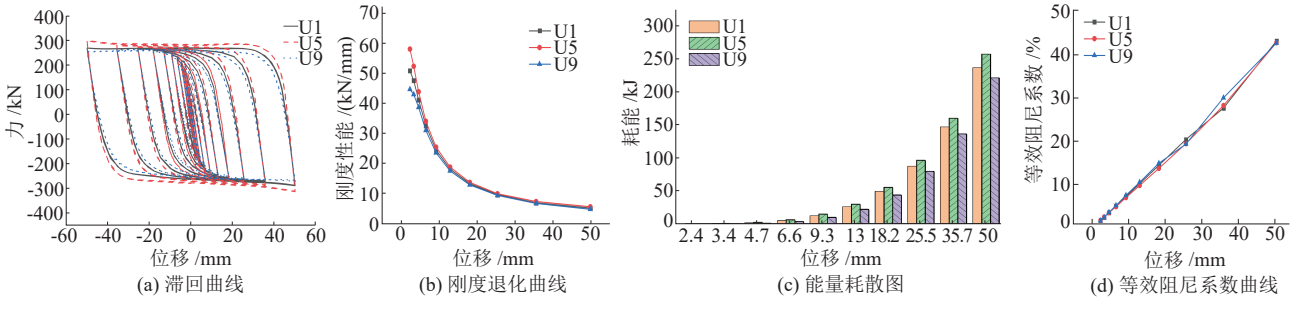
图 13　板间距对U型阻尼器性能的影响

Fig. 13　Effect of plate spacing on the performance of U-shaped damper

阻尼器力学性能有较大影响。与U1相比，U7板间距增加22%，最大滞回曲线面积减小19%，而与U1相比，U4板间距减少22 %，最大滞回曲线面积增大29%。这说明紧凑的板间距可以增强阻尼器的能量耗散效率，这对于提高结构的抗震性能具有积极作用。刚度方面，U7比U1的初始刚度减少了35%，U4比U1的初始刚度增大了59%，充分证明板间距的变化会影响阻尼器在剪切过程中的变形能力，进而影响其刚度表现。能量消耗方面，U7比U1的最大耗能减少了25%，U4比U1的最大耗能增大了37%，这是因为增加（减少）板间距减少（增加）了阻尼器的接触面积，从而降低（提高）了能量耗散的机会。等效阻尼系数方面，U7比U1的最大等效阻尼系数增大了6%，U4比U1的最大等效阻尼系数减小了17%。

2.5.4　圆角直线段长度的影响

由图14可知，U型阻尼器的力学性能随圆角直线段长度增加有所降低，但影响较小。与U1相比，U9圆角直线段长度增加12%，最大滞回曲线面积降低7%，而U5圆角直线段长度减少12%，最大滞回曲线面积提高8%，圆角直线段长度的增加导致耗能效率的降低。刚度方面，U9比U1的初始刚度减少了12%，U5比U1的初始刚度增大了14%。能量消耗方面，U9比U1的最大耗能减少了6%，U5比U1的最大耗能增大了8%。圆角直线段长度变化对等效阻尼系数影响相对较小，三条曲线基本重



(a) 滞回曲线　(b) 刚度退化曲线　(c) 能量耗散图　(d) 等效阻尼系数曲线

图 14　圆角直线段长度对U型阻尼器性能的影响

Fig. 14　Effect of the length of fillet straight segment on the performance of U-shaped damper

合。圆角直线段长度的改变可以微调阻尼器的性能、优化局部应力分布，但如果长度过长，耗能效率将降低。

由此可见，U型阻尼器的设计参数对其性能有重要影响。厚度和板间距是影响其耗能能力和刚度的关键因素，而宽度和圆角直线段长度影响相对较小。在精细的设计工作中，各种参数的微小调整都会对整个结构的减震性能产生影响。因此，在设计U型阻尼器时，每一个参数都需要认真考虑，以确保在实际工程中达到最佳减震效果。

3 结论

本文针对新型阻尼钢U型阻尼器开展滞回性能试验与有限元数值模拟研究，系统探究不同结构参数对阻尼器力学特性与耗能性能的影响规律，主要结论如下：

（1）新型阻尼钢具备优异的屈服强度、抗拉强度与弹性模量，整体抗变形能力突出。循环加载试验结果表明，新型阻尼钢U型阻尼器的滞回曲线饱满对称，无明显捏缩、退化现象，在往复荷载作用下耗能性能稳定，表现出良好的塑性变形能力与能量耗散水平，适用于结构减震耗能工况。

（2）本文试验实测结果、有限元模拟结果与理论计算结果整体吻合良好，验证了理论公式与有限元模型的准确性与可靠性。试验与理论计算对比可知，屈服力、屈服位移、初始刚度的最大相对误差分别为11.58%、12.85%、14.28%，各项误差均处于合理工程允许范围内，可为该类阻尼器的理论计算与数值仿真提供依据。

（3）板厚与板间距是影响新型阻尼钢U型阻尼器滞回耗能性能的核心参数。板厚增大22%时，阻尼器最大滞回面积提升44%；板间距减小22%时，最大滞回面积可提升29%。表明在同等荷载作用下，增大板厚、减小板间距可显著提升阻尼器的能量吸收与耗散能力，减震效果更优。板宽与圆角直线段长度对阻尼器力学性能与耗能特性的影响相对有限，可作为辅助优化参数，在工程设计中通过微调实现阻尼器性能的精准适配。

综上，本文所采用的试验方案、有限元分析方法及所得研究结论，可为此类新型阻尼钢U型阻尼器的结构优化设计、工程应用与性能评估提供可靠的理论参考与技术支撑。

参考文献(References)

[1] 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(增刊1)：253-257.
CHENG Xuansheng，JIA Chuansheng，DU Xiuli. The application of energy dissipation technology in seismic strengthening [J]. China Civil Engineering Journal，2012，45(Suppl01)：253-257.

[2] 叶列平，陆新征，马千里，等. 屈服后刚度对建筑结构地震响应影响的研究[J]. 建筑结构学报，2009，30(2)：17-29.
YE Lieping，LU Xinzheng，MA Qianli，et al. Influence of post-yielding stiffness to seismic response of building structures [J]. Journal of Building Structures，2009，30(2)：17-29.

[3] OH S H，SONG S H，LEE S H，et al. Experimental study of seismic performance of base-isolated frames with U-shaped hysteretic energy-dissipating devices[J]. Engineering Structures，2013，56：2014-2027.

[4] ATASEVER K，CELIK O C，YUKSEL E. Development and cyclic behavior of U-shaped steel dampers with perforated and nonparallel arm configurations[J]. International Journal of Steel Structures，2018，18(5)：1741-1753.

[5] KISHIKI S，OHKAWARA Y，YAMADA S，et al. Experimental evaluation of cyclic deformation capacity of U-shaped steel dampers for base-isolated structures[J]. Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)，2008，73(624)：333-340.

[6] 宋俊伯，王东升，陈磊，等. 设置不锈钢U型阻尼器连续梁桥减震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造，2023，45(2)：107-117.
SONG Junbo，WANG Dongsheng，CHEN Lei，et al. Seismic isolation performance of continuous beam bridge with stainless steel U-shaped damper[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting，2023，45(2)：107-117.

[7] 种迅，侯林兵，陈曦，等. U型金属阻尼器受力性能和数值模拟分析方法研究[J]. 建筑结构，2021，51(1)：114-120.
CHONG Xun，HOU Linbing，CHEN Xi，et al. Study on mechanical performance and numerical simulation analysis method of U-shaped metal damper [J]. Building Structure，2021，51(1)：114-120.

[8] 于天昊，张超，丁超，等. 碟簧-U型阻尼器组合三维隔震装置的工作机理及有限元分析[J]. 土木工程与管理学报，2023，40(1)：124-129，135.
YU Tianhao，ZHANG Chao，DING Chao，et al. Working mechanism and finite element analysis of a three-dimensional isolation device with disc springs-U-shaped dampers[J]. Journal of Civil Engineering and Management，2023，40(1)：124-129，135.

[9] 邵浩，杨明飞，王辛，等. 特定限位U型软钢阻尼器设计与数值分析[J]. 工程抗震与加固改造，2019，41(1)：62-69.
SHAO Hao，YANG Mingfei，WANG Xin，et al. Research on design and numerical analysis of the constrained U-shaped soft steel damper[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retro-

fitting，2019，41(1)：62-69.

[10] 杨明飞，查晨呈．环形剪切软钢阻尼器在受控结构中的位置优化[J]．安徽理工大学学报(自然科学版)，2023，43(5)：24-29.
YANG Mingfei，ZHA Chencheng. Position optimization of annular shear soft steel dampers in controlled structures[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)，2023，43(5)：24-29.

[11] 冯欢，周方圆，吕云辉．新型蝶形金属阻尼器力学性能试验及其应用研究[J]．土木工程学报，2024，57(5)：15-26，85.
FENG Huan，ZHOU Fangyuan，LÜ Yunhui. Experimental study on mechanical properties of butterfly metallic damper and its application[J]. China Civil Engineering Journal，2024，57(5)：15-26，85.

[12] 朱翔，王伟旭，李万润，等．基于U型阻尼器的防撞吸能装置力学性能研究[J]．工程力学，2026，43(2)：180-193.
ZHU Xiang，WANG Weixu，LI Wanrun，et al. Study on the mechanical properties of collision avoidance and energy absorption device based on anti-impact U-shaped damper[J]. Engineering Mechanics，2026，43(2)：180-193.

[13] 徐增武，杨应华．一种U形阻尼器力学性能分析[J]．结构工程师，2015，31(3)：106-113.
XU Zengwu，YANG Yinghua. Mechanical behavior analyses of the U-shaped damper[J]. Structural Engineers，2015，31(3)：106-113.

[14] 杜红凯，韩淼，闫维明．约束U形钢板力学性能的计算方法研究[J]．土木工程学报，2014，47(增刊2)：158-163.
DU Hongkai，HAN Miao，YAN Weiming. Study on the calculation method of me chanical characteristics for constrained U-shaped steel plates[J]. China Civil Engineering Journal，2014，47(Suppl02)：158-163.

[15] 杜红凯，韩淼，闫维明，等．U型钢板力学性能受硬度和层数的影响分析[J]．工程力学，2016，33(增刊1)：101-106.
DU Hongkai，HAN Miao，YAN Weiming，et al. Mechanical properties analysis of U-shaped steel plates of different hardness and numbers of layers[J]. Engineering Mechanics，2016，33(Suppl01)：101-106.

[16] 韩淼，段言彪，杜红凯．基于改进的R-O模型模拟U型软钢阻尼器滞回曲线研究[J]．北京建筑大学学报，2016，32(3)：43-48.
HAN Miao，DUAN Yanbiao，DU Hongkai. Analysis of simulating hysteresis curve of U-shape mild steel damper based on the improved R-O model[J]. Journal of Beijing University of Civil Engineering and Architecture，2016，32(3)：43-48.

[17] DENG K L，PAN P，WANG C Y. Development of crawler steel damper for bridges[J]. Journal of Constructional Steel Research，2013，85：140-150.

[18] 邓开来，潘鹏，苏宇坤，等．开槽U型金属屈服阻尼器横向性能试验研究[J]．振动与冲击，2015，34(12)：157-163.
DENG Kailai，PAN Peng，SU Yukun，et al. Experimental study on lateral performance of slotted U-shaped steel damper[J]. Journal of Vibration and Shock，2015，34(12)：157-163.

[19] 苏宇坤，潘鹏，邓开来，等．双向地震作用下U形钢阻尼器力学性能研究[J]．建筑结构学报，2014，35(8)：44-49.
SU Yukun，PAN Peng，DENG Kailai，et al. Mechanical properties of U-shaped steel damper subjected to bi-axial ground motions[J]. Journal of Building Structures，2014，35(8)：44-49.

[20] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会．金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法：GB/T 228.1—2010[S]．北京：中国标准出版社，2010.
General Administration of Quality Supervision，Inspection and Quarantine of the People's Republic of China，Standardization Administration of China. Metallic materials—tensile testing—part 1：method of test at room temperature：GB/T 228.1—2010[S]. Beijing：China Standards Press，2010.

[21] Federal Emergency Management Agency. Interim testing protocols for determining the seismic performance characteristics of structural and nonstructural components：FEMA 461[R]. Washington，D.C.：Federal Emergency Management Agency，2007.

[22] 赵珍珍，张爱军，何斌．U型金属阻尼器的力学公式推导及阻尼性能研究[J]．结构工程师，2017，33(2)：143-150.
ZHAO Zhenzhen，ZHANG Aijun，HE Bin. Study on mechanics formula deduction and damping performance of U-shaped metal damper[J]. Structural Engineers，2017，33(2)：143-150.

[23] 徐秉业．应用弹塑性力学[M]．北京：清华大学出版社，1995.
XU Bingye. Applied elastic-plastic mechanics[M]. Beijing：Tsinghua University Press，1995.

（本文编辑：任　栋）