

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2021.07.013

# 屈曲约束折形叠合耗能器试验和模拟分析

杨熠明<sup>1</sup>, 杨溥<sup>1</sup>, 舒媛<sup>1</sup>, 李英民<sup>1</sup>, 冯力强<sup>2</sup>, 张孝斌<sup>2</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 甘肃省建设投资(控股)集团有限公司, 兰州 730050)

**摘要:**在自复位结构中设置耗能器能够耗散地震能量、减轻结构构件的损伤,地震后更换耗能器即可快速恢复结构的抗震性能。文中提出一种采用高强螺栓装配到梁柱节点中的屈曲约束折形叠合耗能器,便于施工连接和震后更换。耗能器将节点的耗能集中在耗能芯板,通过附加约束装置防止芯板屈曲,同时耗能器能够作为梁翼缘的加强板以及节点的抗剪连接装置。对该耗能板进行轴向拉压试验,考察了其耗能能力、刚度、承载力和连接强度等,采用有限元软件 ABAQUS 进行模拟对比分析,结果表明,在保证连接装置强度的前提下,屈曲约束折形叠合耗能板具有较好的耗能能力和较高的刚度、承载力,能够作为装配到梁柱节点中的耗能装置。

**关键词:**屈曲约束;耗能板;阻尼器;抗震性能;震后修复

**中图分类号:**TU391;TU398+.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-582X(2021)07-129-10

## The experiment and simulate study of buckling restrained L-shape superimposed steel damper

YANG Yiming<sup>1</sup>, YANG Pu<sup>1</sup>, SHU Yuan<sup>1</sup>, LI Yingmin<sup>1</sup>, FENG Liqiang<sup>2</sup>, ZHANG Xiaobin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Gansu Construction Investment(Holdings)Group Co., Ltd., Lanzhou 730050, P. R. China)

**Abstract:** Applying the seismic energy dissipating damper in the self-centering structure can reduce the damage of the beam and column caused by the earthquake. The structure can be quickly restored by replacing the damaged dampers. We propose a new buckling restrained L-shape superimposed steel damper connecting with high-strength bolts which can dissipate the most seismic energy through the steel plate. The proposed damper can avoid the buckling of the steel plate through the additional restraining devices, and easily be replaced after earthquake. The flange of the beam end can be reinforced by the new damper, which also can be regarded as a shear transfer device. The consequences of the axial tension and compression test and ABAQUS simulation indicate that the proposed buckling restrained L-shape superimposed steel damper has essential capabilities of energy dissipation and good bearing and stiffness with the sufficient connecting strength.

**Keywords:** buckling restrained; energy dissipating steel plate; damper; seismic behavior; restore after earthquake

收稿日期:2020-12-19

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(cstc2018jcyjAX0061);国家自然科学基金资助项目(51578093);住房和城乡建设部研究开发项目(2018-K9-072)。

Supported by the Chongqing Natural Science Foundation(cstc2018jcyjAX0061), the National Natural Science Foundation of China(51578093), and the Research and Development Project of the Ministry of Housing and Urban-Rural Development(2018-K9-072).

作者简介:杨熠明(1993—),男,博士研究生,主要从事防震减灾研究,(E-mail)yangym@cqu.edu.cn。

通讯作者:杨溥,男,教授,(E-mail)yangpu@cqu.edu.cn。

传统的梁柱节点在地震作用下由梁端或柱端出现塑性铰而耗能,这种做法既不经济也不方便修复,为保证主体结构在地震作用中不产生损伤,研究者提出了自复位结构形式减小震后残余变形,将结构损伤集中于耗能装置,地震后更换耗能器即可恢复结构功能。耗能装置作为自复位消能减震结构的关键装置,国内外的学者对此展开了研究<sup>[1-2]</sup>。而软钢阻尼器作为一种力学模型明确、材料易得、更换方便的阻尼器,具有良好的变形性能和稳定的滞回特性,能够给结构提供额外的刚度,设计时通常小震时起支撑作用,大震时发挥耗能作用。Kelly 等<sup>[3-4]</sup>在提出被动耗能减振概念,首次将承载功能和耗能功能分开,将耗能转移到阻尼器中,为结构抗震设计提供了新思路,随后学者们围绕这一思路进行了多种阻尼器的研究。目前,多数软钢阻尼器为单片软钢阻尼器,Whittaker 等<sup>[5]</sup>和 Tsai 等<sup>[6]</sup>分别提出了 X 型钢板和三角形钢板阻尼器,在此基础上改变钢板几何形状以产生多点屈服<sup>[7-9]</sup>,使钢板充分发挥耗能作用,也有学者提出多片加劲型软钢耗能器<sup>[10]</sup>,由定位装置和平行单片钢板组装而成,以及四连杆机构钢板阻尼器<sup>[11]</sup>,以上阻尼器均是安装于层间支撑处,由层间位移带动阻尼器耗能。另一些软钢阻尼器可应用于柱脚或梁柱节点处,由主体结构间相对转动带动阻尼器耗能,柱脚处可安装防屈曲支撑形式的软钢阻尼器<sup>[12-13]</sup>或防屈曲钢板形式的阻尼器<sup>[14]</sup>,现有的应用于梁柱节点处的软钢阻尼器有扇形阻尼器<sup>[15]</sup>和角钢阻尼器<sup>[16-17]</sup>。其中扇形阻尼器体积较大,角钢阻尼器容易刚度退化且失效快、不易更换。同时针对自复位节点的可修复性能需求,需要设计一种方便更换的耗能器。

文中提出一种屈曲约束折形叠合耗能板,如图 1 所示。可用高强螺栓装配到钢框架节点或钢筋混凝土柱-钢梁自复位节点处,耗能器与节点变形协调,在现有的位移条件下不会发生拉断、平面外屈曲等非理想的破坏情况。对自复位结构而言,该耗能器也是加强板和抗剪抗弯连接装置。文中对该耗能器进行单轴拉压试验以测试其耗能能力、刚度、承载力和连接强度等性能,并采用 ABAQUS 有限元软件对该耗能器进行模拟分析。

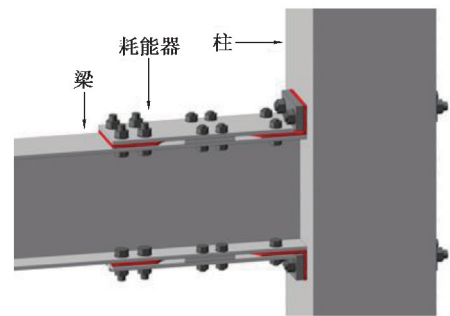


图 1 节点构造图

Fig.1 Schematic diagram of the damper

## 1 耗能器的设计与构造

耗能器构造及组装如图 2 所示,采用高强螺栓连接,可将耗能器方便地应用于自复位钢框架节点或混凝土柱与钢梁组合(RCS)节点中。屈曲约束折形叠合耗能器主要由折形耗能芯板和附加约束部件两部分组成。折形耗能芯板中部为削弱耗能段,耗能段的长度和截面面积对耗能器的各项性能均有影响,耗能段的截面较小,在受拉压时最先达到屈服,从而快速耗散地震能量;两端为连接段,分别开孔用螺栓连接至梁侧和柱侧(短边为柱侧连接段,长边为梁侧连接段);连接段与耗能段之间圆滑过渡,防止产生应力集中现象。附加约束部件包括梁侧盖板、柱侧盖板和侧向垫块,这些盖板和夹板同时起到屈曲约束和梁端加强的作用。需要注意的是,芯板弯折段设长圆孔、盖板和钢梁设圆孔,使耗能芯板可以相对盖板和钢梁移动,保证芯板在地震作用下能有充分的变形来耗散能量、而梁侧弯折处的螺栓并不传递剪力。

耗能器的连接全部采用高强螺栓,便于更换,附加约束部件也可重复利用。能很好地实现自复位结构中对于节点的可修复功能,实现结构的震后快速回复功能。相比于传统钢结构节点或者 RCS 节点的刚性连接方式,这种屈曲约束折形叠合钢板耗能器不会占用额外的空间,能够很好地匹配现有的楼板墙设计方式。在阻尼器试验中,额外设置了一块内约束盖板代替实际节点中的工字钢梁,体现钢梁对耗能芯板的屈曲约束。由于泊松效应,耗能芯板受压时会产生横向变形,故梁侧盖板和耗能芯板之间使用螺栓垫片调整 1 mm 的间隙,侧向垫块也与耗能段保持 2 mm 的间距。侧向垫块加强了梁侧盖板的平面外刚度。柱侧盖板为耗能芯板的重要锚固构件,用来保证耗能板与柱端的稳固连接。这些附加约束部件共同保证了耗能板在地震作用下仅发生沿梁长方向的轴向变形,对耗能芯板起到屈曲约束的作用,同时还可对钢梁翼缘起到一定的加强作用。

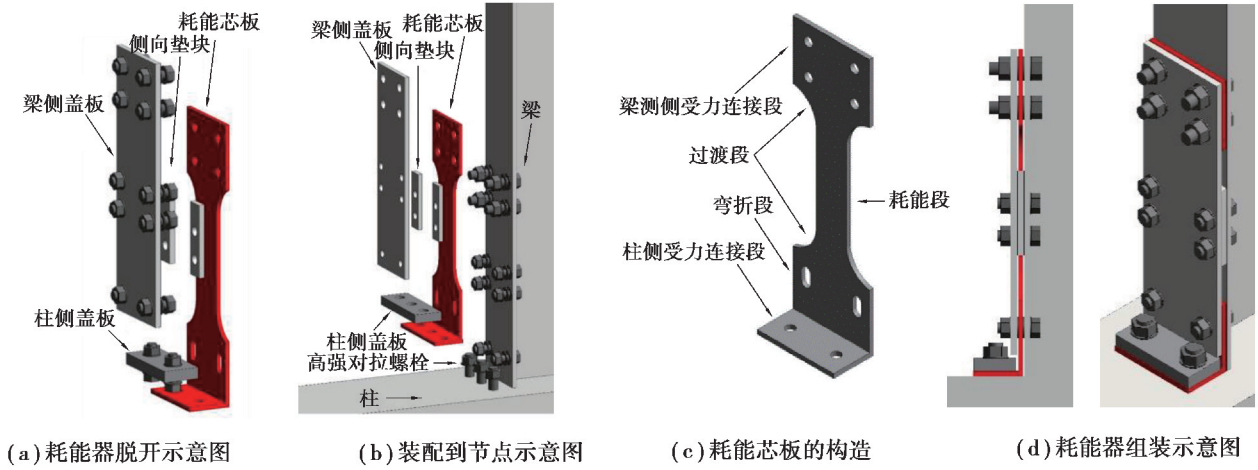


图 2 耗能器构造示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the damper

## 2 试验加载及测量

### 2.1 试验分组

根据阻尼器性能参数,阻尼器试验共分为 3 组,每组 2 个试件,耗能芯板尺寸如图 3 所示,具体参数和编号如表 1 所示。

表 1 试验分组

Table 1 Group of experiments

试件编号	耗能段宽度/ mm	耗能段截面面积 / mm <sup>2</sup>
1-A	56	448
1-B	56	448
2-A	66	528
2-B	66	528
3-A	76	608
3-B	76	608

### 2.2 加载装置

试验在重庆大学结构实验室进行,轴向加载采用 50 t 液压千斤顶进行往复加载。在耗能器加载平面外放置侧向约束装置,以防止加载过程中的试件出现平面外偏移或扭转。耗能芯板的柱侧连接段与刚度较大的连接支座相连。施加的荷载值由千斤顶下面传感器测量并控制,耗能器各处的位移值由位移计测量,这些数据均由计算机自动采集。具体设置如图 4 所示。

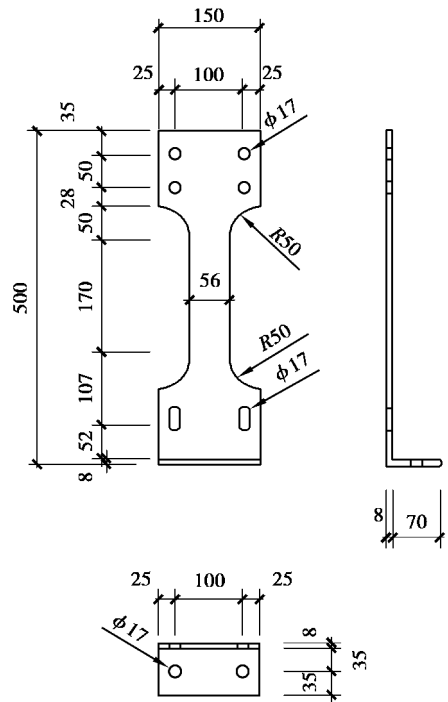


图 3 耗能内芯板尺寸

Fig. 3 The design of energy dissipating plate

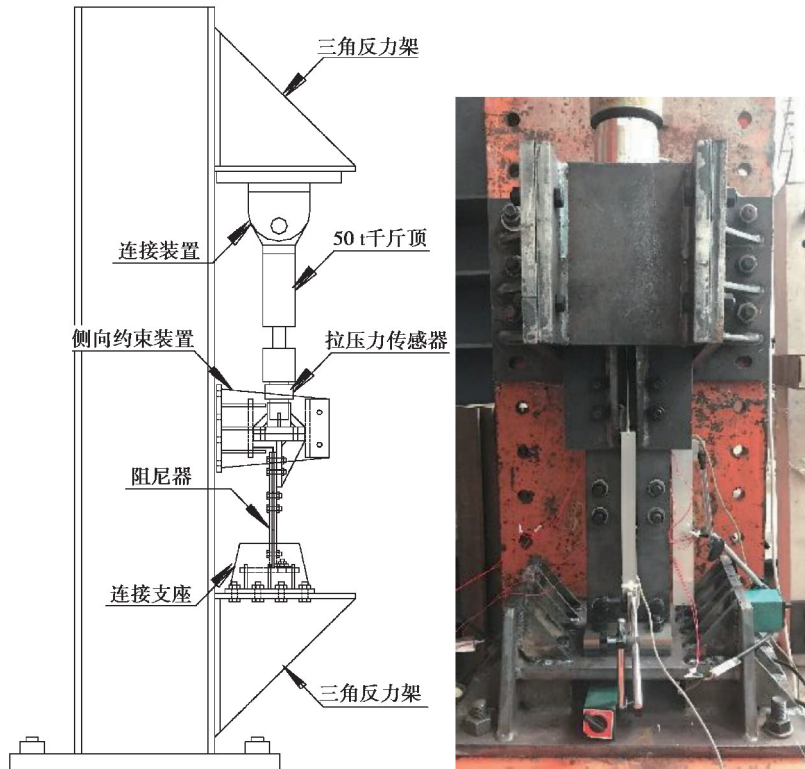


图 4 加载装置示意图

Fig. 4 Test device diagram

### 2.3 加载制度

加载方式为单向拉压加载, 整个加载过程采用位移控制, 根据美国 AISC(2005) 规范关于梁柱节点加载制度的规定确定设置此类耗能器的节点应达到的变形程度, 换算得到耗能器的加载位移幅值, 各加载级的位移值如图 5 所示, 耗能器加载至最大位移 12 mm 时, 可等效至节点达到 4% 层间位移角时的耗能器变形。试验过程中保持加载的连续性和均匀性。

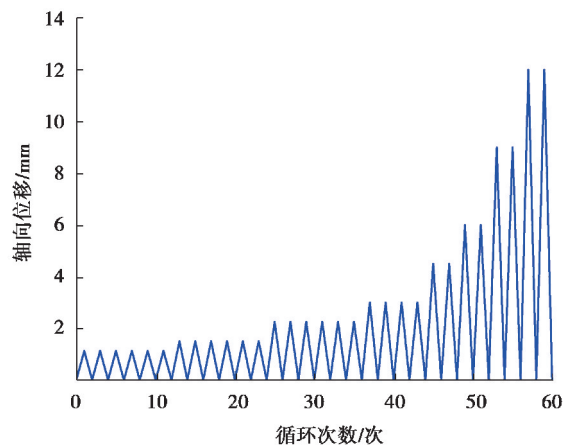


图 5 加载制度

Fig. 5 Loading protocol

## 2.4 材性试验

耗能器试验构件所用的材料为:耗能芯板采用 Q235 软钢材料,附加约束部件均采用 Q345 钢材,如表 2 所示。

表 2 各材料力学性能指标

Table 2 Mechanical properties of all materials

试件材料	屈服应力/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/ $\times 10^5$ MPa
Q235	304.7	459.3	1.903
Q345	465.3	589.0	1.970

## 3 试验现象和结果数据分析

### 3.1 试验现象

耗能器试验中观察到的现象:1)6 组耗能器在试验过程中均出现了高强螺栓相对钢板错动的现象。从第 5 个加载级(加载位移 4.5 mm,对应节点层间位移角 1.5%)开始后的每个加载级中,加载至 20 kN 时,装置发出较大的连续响声,同时试验曲线出现相应的搓齿状。通过观察螺栓处的标记,可知产生这种情况的原因是螺栓相对钢板的错动,错动位移值约为 1 mm。2)如图 6 所示,侧边白色标记可以明显观察到梁侧盖板与耗能芯板的相对位移,证明耗能芯板的耗能段能够较好地实现屈服耗能,梁侧和柱侧盖板均无变形,装置未见失稳现象。3)在加载时,折形耗能芯板的柱侧部分发生开口现象,弯折部分变形明显,开口高度约为当前加载位移的 1/3,表明除却芯板耗能段有屈服耗能外,弯折处也发生了类似于传统角钢阻尼器的屈服变形耗能现象。这之后的每个加载循环中,加载位移归零时观察到底部弯折部分向梁侧方向弯曲成一弧度。如图 6 所示,耗能器的破坏形态为弯折部分有较大变形,连接段、底部螺栓孔有一定程度的变形。

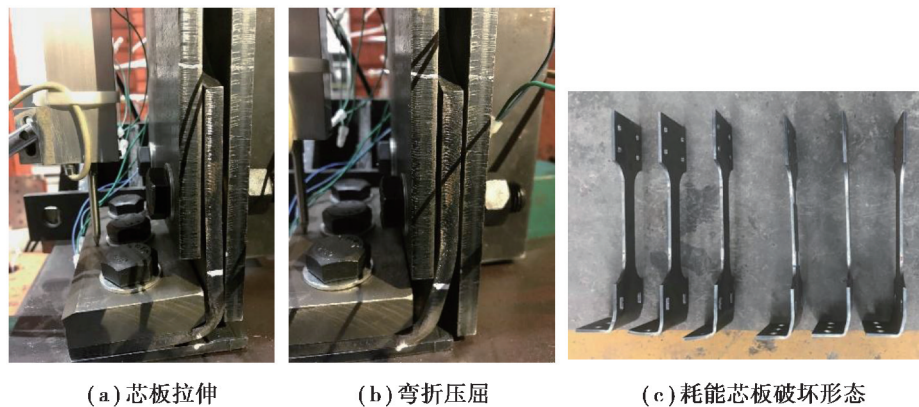


图 6 试验现象和破坏形态

Fig. 6 Test phenomena and failure mode of the specimens

### 3.2 滞回曲线

耗能器的滞回曲线是在单向循环竖向轴力作用下得到的耗能芯板轴向位移-轴力曲线。图 7 所示为 6 组耗能器耗能芯板的滞回曲线,轴力以受拉为正,轴向位移以伸长为正。由图 7 可知,耗能器初始刚度较大,整体滞回曲线较为饱满,呈现出较好的耗能能力。各组耗能器分别在加载至 2~4 mm 时出现明显的屈服台阶,横截面积越大的耗能器屈服台阶出现的也越晚。屈服台阶出现之后,横截面积大的耗能器滞回曲线更加饱满,具有更强的耗能能力。

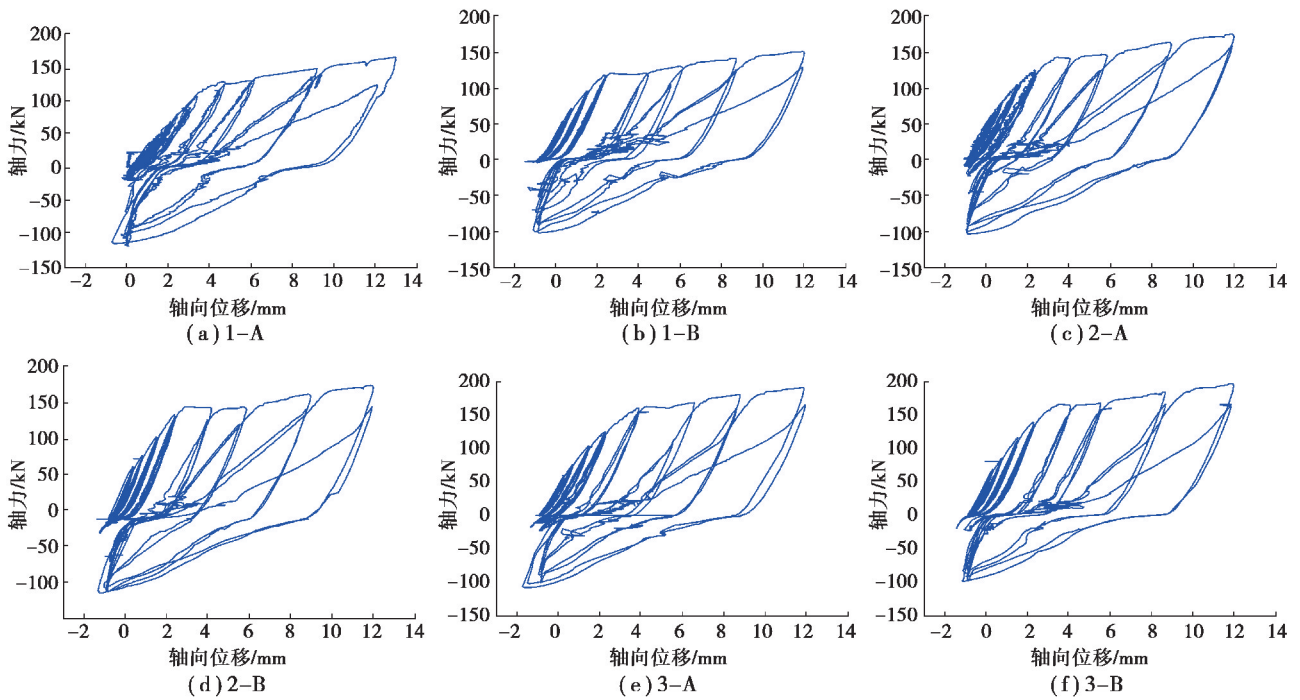


图 7 轴力-轴向位移滞回曲线

Fig. 7 Hysteresis curves of force-displacement

耗能芯板柱侧连接段在受拉时有开口现象,此处钢板变形较大,造成了弯折部分也参与了耗能。如图 8 所示,参考纯角钢耗能曲线<sup>[18]</sup>和中间段削弱的软钢耗能试验曲线<sup>[19]</sup>,可以看出,本次耗能器试验结果结合了二者的耗能特点,在每一级加载制度的第一个循环呈现与中间段削弱的软钢耗能的耗能曲线相似的形状,有明显的屈服点和屈服平台,之后的循环沿上一次的卸载曲线上升,呈现尖角形的耗能曲线。产生此现象的部分原因是,内约束盖板和螺栓连接的强度不够,无法达到实际的刚度条件。故每个加载级别的第一次加载循环中,耗能芯板被压回原位时,内约束板无法完全将其约束至原形,导致弯折段有较大弯曲变形,在随后的加载循环中刚度退化严重,滞回曲线不如首次循环饱满,呈现出角钢耗能曲线的特点。螺栓的错动现象在每组试件的耗能曲线 20 kN 荷载时均有出现,曲线呈现横向的抖动,在试验中有剧烈的异响。

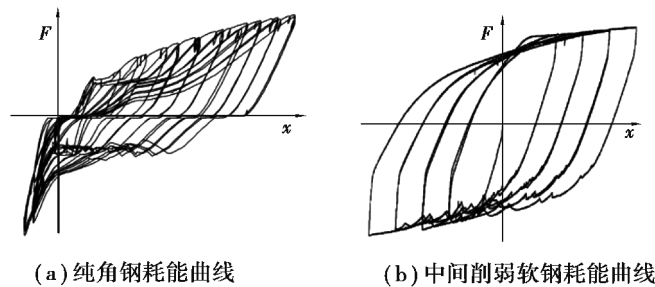


图 8 其他形式阻尼器滞回曲线

Fig. 8 Hysteresis curves of other dampers

### 3.3 耗能分析

将耗能器在每一加载级的前 2 个循环的耗能面积整理如图 9 所示。由图可知:

1) 轴向位移增大,滞回环的耗能面积随之增大;每一个加载级的第二个循环的耗能面积与第一个循环相比降低较多,原因是第二个循环的曲线更接近于角钢的变化特点,耗能能力不足。

2) 耗能器的耗能能力与耗能段截面面积成正相关。在相同的连接强度下,耗能段截面面积越大,滞回环面积越大,耗能器耗能能力越强,如 1-A 和 2-A、1-B 和 2-B;对于 3-A 和 3-B,耗能段截面面积太大导致完成

试验所需的约束也更强,而柱侧连接段和内侧约束板的刚度并不能完全满足,因此这 2 组试验的弯折处变形远大于横截面积较小的 4 组试验,在较大的荷载作用下,曲线类似于角钢的耗能特点,角钢的耗能不如钢板耗能饱满,总体而言,3-A 和 3-B 的耗能面积反而较小,特别是每一级加载的第二循环,耗能极差。

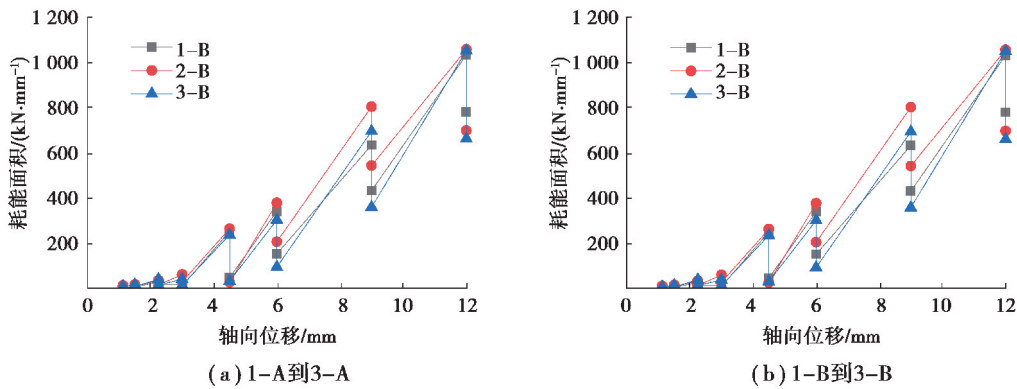


图 9 轴向位移—耗能面积图  
Fig. 9 Axial displacement-energy dissipation area

### 4 耗能器模拟分析

#### 4.1 耗能器有限元模型

采用 ABAQUS 有限元软件对耗能器进行数值分析。模型包括耗能芯板、内外盖板、压块和底座。由于在加载过程中耗能芯板与其余构件都有接触,所有构件都采用 C3D8R 八节点六面体减缩积分实体单元,使计算容易收敛。耗能芯板的梁身受力连接段与盖板上部使用绑定连接,耗能芯板的耗能段、过渡段和不受力连接段与盖板建立接触,耗能芯板的柱身受力连接段与压块和底座建立接触。在底座、耗能芯板的柱身受力连接段部分端面建立固定边界条件,以防止在加载过程中产生位移,通过对柱侧盖板一定程度的放松约束来模拟实际的盖板刚度。模型的加载制度与试验一致。模型的材料定义参考材性试验确定,钢材的本构采用双折线模型。

#### 4.2 滞回曲线对比

图 10 为屈曲约束折形叠合耗能器试验与模拟的滞回曲线对比图。可以看出,模拟与试验曲线在耗能芯板进入屈服平台的轴力和受拉承载力相符,初始刚度、受拉屈服后刚度、受压刚度较为吻合。对于进入屈服状态后的每一加载级,数值模拟中芯板的柱侧连接段与压块的快速接触使第二次循环的上升段曲线有一个较大的刚度变化,而试验中的刚度变化则更加平缓。

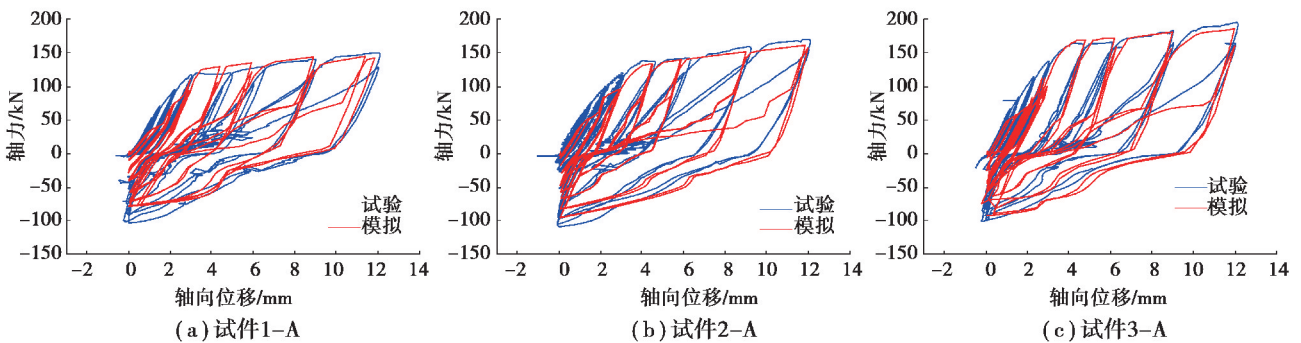


图 10 荷载—位移曲线对比分析  
Fig. 10 The comparison of load-displacement curves

图 11 为耗能芯板的应力云图,达到塑性应力部分的变形包括柱身受力连接段的受弯变形、梁侧受力连接段和弯折段的拉压变形,前者是造成角钢耗能形式的原因,后两者则是钢板的耗能形式。

### 4.3 改进后的耗能器模拟

折形耗能芯板的连接强度和约束刚度对耗能器参与耗能的部位以及耗能能力有较大的影响,根据试验和模拟结果,对此耗能器的设计和试验装置提出如下的改进建议,并对改进后的耗能器进行数值模拟分析。

1) 耗能芯板的柱侧连接段需加强,考虑钢结构规范中螺栓孔的间距限制,以及和节点的尺寸协调,仅将耗能芯板的柱侧连接段适当加宽。

2) 试验中由于采用的是高强螺栓承压型连接,钢板之间有较明显的错动现象,将之改为高强螺栓摩擦型连接能更好地保证耗能器的性能。

3) 试验装置的刚度不够会导致耗能器的性能无法完全在试验中发挥。在实际的梁柱节点中,钢梁和盖板能提供较大的约束作用。试验中只对千斤顶与耗能器的连接段进行轴向和转动约束,耗能器弯折部位仍有较大的弯曲存在,在试验装置此处增加额外的约束装置可得到更好的试验效果。

在此基础上进行改进后的耗能器模拟工作,耗能芯板的柱身受力连接段宽度增大并将其完全固定;对盖板施加只在轴向运动的约束。改进后的耗能器模拟的轴向位移-轴力滞回曲线如图 12 所示。与对应的试验曲线相比,滞回环更饱满,初始刚度更大,承载力也更大。

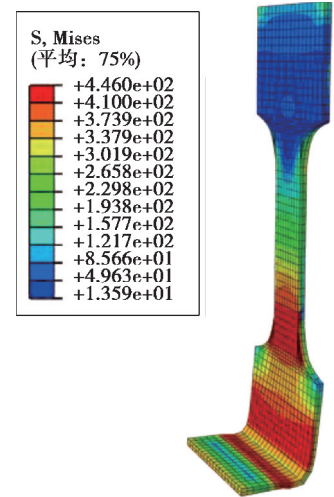


图 11 耗能芯板应力云图  
Fig. 11 Stress contour of energy-dissipating plate

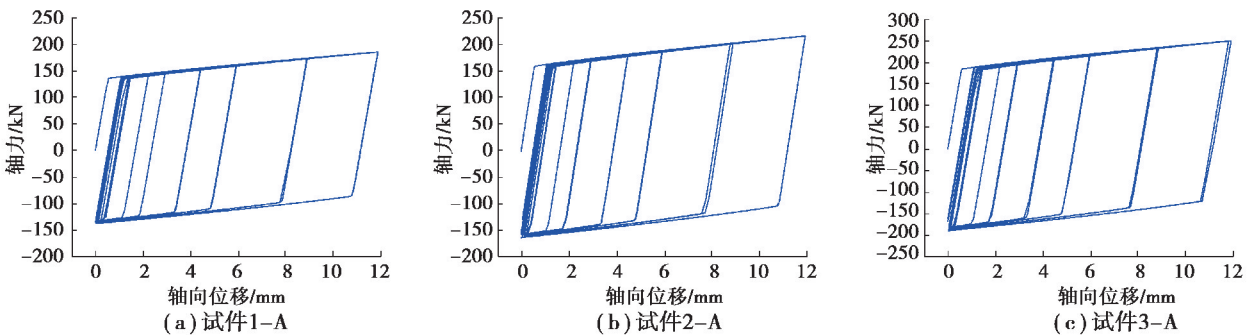


图 12 改进后耗能器滞回曲线

Fig. 12 Hysteresis curve of improved damper

图 13 为改进后耗能芯板的应力云图,可见耗能基本集中在中间削弱段,达到了较佳的耗能状态。

## 5 结 论

通过屈曲约束折形叠合钢板耗能器的试验和有限元模拟,主要得到以下结论:

1) 该耗能器装拆方便,更换耗能器耗能芯板即可恢复其抗震性能,能够实现“可更换”的性能目标,作为自复位梁柱节点的耗能器使用。

2) 该耗能器具有较好的耗能能力、刚度和承载力,在单轴拉压过程中,除耗能芯板外其余构件均处于弹性状态,其破坏模式与预期相符。

3) 模拟结果与试验结果吻合较好,说明了有限元模拟的有效性;在此基础上对耗能器进行了优化改进,模拟结果表明,改进后的耗能器具有更饱满的耗能、更高的承载力和刚度。

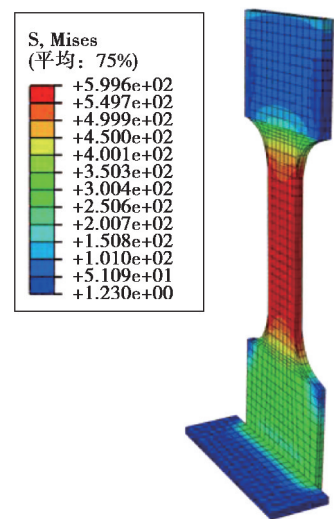


图 13 改进后耗能器应力云图  
Fig. 13 Stress contour of the improved damper



## 参考文献:

- [1] Liu Y, Guo Z X, Liu X J, et al. An innovative resilient rocking column with replaceable steel slit dampers: Experimental program on seismic performance[J]. *Engineering Structures*, 2019, 183: 830-840.
- [2] Shen P W, Yang P, Hong J H, et al. Seismic performance of steel frame with a self-centering beam[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 175: 106349.
- [3] Kelly J M, Skinner R I, Heine A J. Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures[J]. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 1972, 5(3): 63-88.
- [4] Skinner R I, Kelly J M, Heine A J. Hysteretic dampers for earthquake-resistant structures[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1974, 3(3): 287-296.
- [5] Whittaker A S, Bertero V V, Thompson C L, et al. Seismic testing of steel plate energy dissipation devices[J]. *Earthquake Spectra*, 1991, 7(4): 563-604.
- [6] Tsai K C, Chen H W, Hong C P, et al. Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction[J]. *Earthquake Spectra*, 1993, 9(3): 505-528.
- [7] Li G, Li H N. Experimental study on improved mild Metallic dampers[C]. *Proceedings of the Third China-Japan-US Symposium on Structural Health Monitoring and Control and Fourth Chinese National Conference on structural Control*, 2004.
- [8] 李江刚. 装有钢阻尼器钢框架的减震性能研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2009: 25-29.  
Li J G. Performance research of vibration suppression of steel frame attached with metallic dampers[D]. Shantou: Shantou University, 2009: 25-29.(in Chinese)
- [9] 晏晓彤, 袁波. 金属阻尼器的滞回性能分析[J]. *工业建筑*, 2014, 44(1): 49-53, 137.  
Yan X T, Yuan B. Hysteresis performance analysis of metal damper[J]. *Industrial Construction*, 2014, 44(1): 49-53, 137.(in Chinese)
- [10] 乐登, 邓雪松, 周云. 金属耗能器在结构抗震加固中的应用[J]. *震灾防御技术*, 2006, 1(4): 309-318.  
Yue D, Deng X S, Zhou Y. Application of metallic dampers to seismic strengthening of structures[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2006, 1(4): 309-318.(in Chinese)
- [11] 欧进萍, 吴斌. 组合钢板屈服耗能器性能及其对高层钢结构减振效果的试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2001, 22(1): 26-32.  
Ou J P, Wu B. Experimental study on behavior of composite steel plate yielding energy dissipators and its effectiveness on absorbing seismic vibration of steel tall buildings[J]. *Journal of Building Structures*, 2001, 22(1): 26-32.(in Chinese)
- [12] 沈培文, 杨溥, 洪基豪, 等. 不同柱脚连接的自复位钢梁框架抗震性能试验[J/OL]. *哈尔滨工业大学学报*: 1-12 [2020-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20200227.1434.003.html>.  
Shen P W, Yang P, Hong J H, et al. Experiment on seismic behavior of self-centering steel beam frame with different column foot connections [J/OL]. *Journal of Harbin Institute of Technology*: 1-12 [2020-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20200227.1434.003.html>.(in Chinese)
- [13] 杨溥, 洪基豪, 杨熠明, 等. 自复位 RC 框架柱脚抗震性能模拟分析研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019, 51(6): 775-783.  
Yang P, Hong J H, Yang Y M, et al. Simulation analysis of self-centering RC column base joints[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition)*, 2019, 51(6): 775-783.(in Chinese)
- [14] 王先铁, 谢川东, 林麟琿, 等. 外张拉式自复位方钢管混凝土柱脚抗震性能试验研究[J/OL]. *建筑结构学报*: 1-10 [2020-04-12]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2018.0679>.  
Wang X T, Xie C D, Lin L H, et al. Experimental study on seismic behaviour of self-centring concrete-filled square steel tubular column base with external prestressing[J/OL]. *Journal of Building structures*: 1-10 [2020-04-12]. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2018.0679>.(in Chinese)

- [15] 丁阳. 预应力装配框架结构边节点抗震性能试验研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2015: 12-34.  
Ding Y. Experimental study on seismic performance of precast concrete frame edge node[D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2015: 12-34.(in Chinese)
- [16] 崔强. 利用角钢耗能的自复位结构体系的抗震性能[D]. 苏州: 苏州科技学院, 2015: 11-17.  
Cui Q. Research on seismic performance of self-centering system with angle[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015: 11-17. (in Chinese)
- [17] 潘振华, 潘鹏, 叶列平, 等. 自复位钢框架节点有限元模拟及参数分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 35-42.  
Pan Z H, Pan P, Ye L P, et al. Modeling and parametric study of beam-to-column connection for self-centering steel moment frames[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3): 35-42.(in Chinese)
- [18] 于樵. 预应力自复位钢筋混凝土框架节点的试验研究及数值模拟[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2017: 18-19.  
Yu Q. Experimental study and numerical simulation of prestressed self-centering RC frame joints[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017: 18-19(in Chinese)
- [19] 刘璐. 自复位防屈曲支撑结构抗震性能及设计方法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 47-48.  
Liu L. Seismic behavior and design of structure with self-centering buckling-restrained braces [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013: 47-48.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)