

文章编号: 1000-4750(2007)03-0126-05

# 新型钢铅组合耗能器试验研究

\*辛亚军, 王焕定, 程树良

(哈尔滨工业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘 要:** 利用钢和铅各自的优点开发了一种低屈服极限新型钢铅组合耗能器, 通过 2 组不同参数耗能器和 1 个纯钢耗能器的试验研究, 分析了翼缘宽度和腹板厚度等参数对耗能器性能的影响, 对同等位移和同等出力情况下的钢铅组合耗能器和纯钢耗能器滞回曲线进行了对比。结果表明, 所开发的新型耗能器滞回曲线饱满、耗能稳定, 可通过设计耗能器的参数达到所需屈服性能, 耗能器制作工艺简单、经济性好, 是一种性价比较高的耗能器。

**关键词:** 耗能减震; 钢铅组合耗能器; 低屈服极限; 试验研究; 高性价比

中图分类号: P315.9 文献标识码: A

## EXPERIMENTAL STUDY ON NEW COMBINED STEEL-LEAD DAMPER

\*XIN Ya-jun, WANG Huan-ding, CHENG Shu-liang

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150090, China)

**Abstract:** A new combined steel-lead damper (CSLD) which combines the merits of steel and lead and exhibits low yield strength is developed. Two groups of tests with CSLD for different working parameters and one contrast test with conventional steel damper were conducted. The influences of flange girth width and web plate thickness of the CSLD were analyzed, and the comparison of hysteresis curves of CSLD and steel damper were carried out. The results show that the new CSLD exhibits full hysteresis loop and stable energy dissipation. And its expected performance can be achieved by appropriate parameter design. From the study, it can be seen that the new CSLD is economical and easy to manufacture, and has a high performance-price ratio.

**Key words:** energy dissipation; combined steel-lead damper (csld); low yield strength; experimental study; high performance-price ratio

耗能减震技术因其减震效果好, 构造简单、造价低廉、适用范围广、维护方便等优点, 受到各国研究者的重视, 因此多种不同类型的耗能减震装置和阻尼器被研制<sup>[1,2]</sup>, 其中软钢阻尼器和铅阻尼器都是性能良好的耗能元件。文献[3~6]等介绍了利用低屈服点钢材研制的新型耗能器, 结果表明性能优越。但低屈服点钢材价格昂贵, 国内尚无生产。文献[7, 8]等利用软钢和铅的优点提出了钢铅组合耗能器, 初步研究表明了钢铅组合耗能器有较好的耗

能性能, 可是由于制作和构造方面的原因, 性能不够理想。本文参考文献[7, 8]等的思路, 提出了一种新型钢铅组合耗能器, 其形状与文献[6]相同。利用不锈钢包裹铅代替低屈服点软钢, 既考虑了耐锈蚀, 又能通过设计达到所需屈服性能。通过两组共 15 个钢铅组合耗能器及 1 个纯钢耗能器试件的往复加载试验, 结果表明新型钢铅组合耗能器构造简单, 制作方便, 滞回曲线饱满, 具有耗能能力大, 耗能稳定的特点。证明了可用普通材料制作而达到

收稿日期: 2005-07-15; 修改日期: 2006-08-23

基金项目: 广东省地震工程与应用技术重点实验室开放基金(kzg-004)

作者简介: \*辛亚军(1975), 女, 辽宁昌图人, 硕士生, 从事防灾减灾研究;

王焕定(1942), 男, 浙江仙居人, 教授, 博导, 主要从事工程抗震理论与防灾减灾研究(E-mail: hdwhrb@hit.edu.cn);

程树良(1975), 男, 河北人, 博士, 从事结构振动控制研究。

低屈服极限软钢耗能器同样的性能。

### 1 钢铅组合耗能器的构造简介

本文设计的钢铅组合耗能器是由不锈钢和铅组成，较普通钢而言，不锈钢不易生锈，韧性好<sup>[9]</sup>，而铅具有高密度、低刚度及高阻尼<sup>[10]</sup>的特点。钢铅组合耗能器的形状参考文献[6]，做成工字型，这种形状的耗能器在受到剪力作用时，腹板受剪而翼缘

受弯，腹板部分当耗能器产生小的剪切变形时即可提供较大的抗力，翼缘部分不但保证了耗能器的出平面稳定性，而且在耗能器进入较大的变形时也能耗散部分能量。耗能器正面图和断面图如图 1 所示，为了防止外包钢板过早进入屈曲破坏及保证两种材料协同工作，在耗能器的腹板和翼缘都安排一定量小螺栓进行约束，其间距综合钢板发生屈曲破坏的宽厚比限值和构件尺寸进行设计。

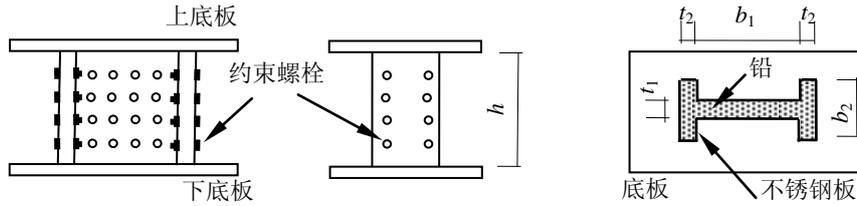


图 1 钢铅组合耗能器侧面图和断面图

Fig.1 Side and cross section views of the new combined steel-lead dampers

### 2 试验方案

为了探索钢铅组合耗能器的腹板和翼缘含铅量对耗能能力的影响，以及钢铅组合耗能器与纯钢耗能器的区别，设计制作了试件参数如表 1 的第一

组试件。这组试件是在哈尔滨工业大学制作完成和试验的。在第一组试验的基础上，为了研究耗能器各种参数变化对耗能器性能的影响，又设计了参数如表 2 的第二组试件，这组试件是在广州大学制作完成和试验的。

表 1 第一组试件设计参数

Table 1 Parameters of the 1<sup>st</sup> group of dampers

试件序号	不锈钢板厚 $\delta$ /mm	腹板铅厚度 $t_1$ /mm	翼缘铅厚度 $t_2$ /mm	腹板宽度 $b_1$ /mm	翼缘宽度 $b_2$ /mm	试件高度 $h$ /mm
1-1	1	6	6	80	40	80
1-2		9	9			
1-3		12	12			
1-4		均为 4 mm 厚不锈钢板				

表 2 第二组试件设计参数

Table 2 Parameters of the 2<sup>nd</sup> group of dampers

试件序号	不锈钢板厚 $\delta$ /mm	腹板铅厚度 $t_1$ /mm	翼缘铅厚度 $t_2$ /mm	腹板宽度 $b_1$ /mm	翼缘宽度 $b_2$ /mm	试件高度 $h$ /mm
2-1	1.0	20	15	150	0	150
2-2					80	
2-3					120	
2-4		15	150	80	150	
2-5		25				
2-6		30				
2-7	1.5	25	20	150	0	150
2-8					80	
2-9					120	
2-10		20	150	80	150	
2-11		30				
2-12		35				

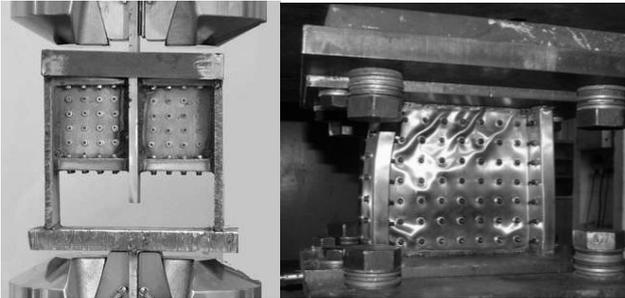
因为钢铅组合耗能器属于金属耗能器，是位移相关型阻尼器，考虑到加载设备的频率响应，试验采用 0.5Hz 的位移控制正弦波进行加载，每个位移

量级循环 3 周。

第一组试件试验在哈尔滨工业大学材料学院电液伺服动静万能试验机(简称 MTS 试验机)上完

成，由于 MTS 夹具形式，试件做成对称的双剪形式，图 2(a)为试验中的钢铅组合耗能器照片。

第二组试件试验在广州大学工程抗震研究中心的压剪试验机上完成，试验中压剪机竖向压力为 0，加载装置的力由力传感器测得，位移由安装在耗能器上下底板的 LVDT 位移传感器测得。图 2(b)为试验中的钢铅组合耗能器。



(a) MTS 试验中的试件 (b) 压剪机试验中的试件

图 2 试验中的耗能器

Fig.2 Dampers in the tests

### 3 试验结果

#### 3.1 破坏过程说明

钢铅组合耗能器的破坏过程大体分三个阶段：

(1) 加载初始阶段，耗能器外形没有明显变化，耗能器应力应变处于弹性阶段；(2) 随着荷载增加，当荷载超过屈服荷载后，耗能器进入塑性变形阶段，之后不久可看到腹板如图 3 所示的 45° 屈曲现象，但耗能器并未丧失其承载力，位移增大时承载力还可以有一定提高。原因是虽然这时内部铅已经进入屈服，可是由于腹板屈曲而发生微小出平面位移之后，在腹板上产生薄膜拉应力，使腹板还可以继续承受逐渐增大的荷载，这一现象可以用薄板屈曲后的张力场理论来解释<sup>[11]</sup>；(3) 进行大位移破坏试验时，耗能器首先在翼缘端部的焊接处或腹板中部的不锈钢斜向屈曲处出现裂缝。破坏过程示意图见图 3，试验后钢铅组合耗能器典型破坏形态见图 4。

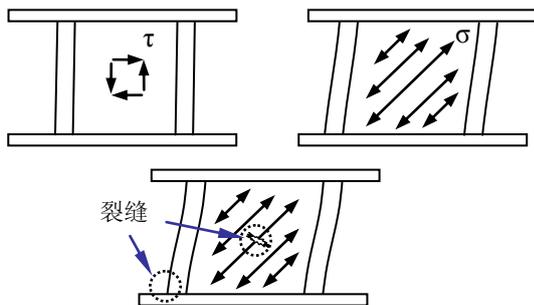


图 3 新型钢铅组合耗能器破坏过程示意图

Fig.3 Failure sequence of the dampers

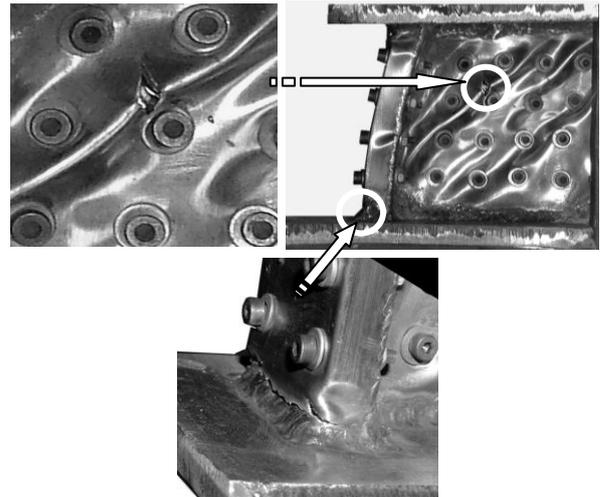
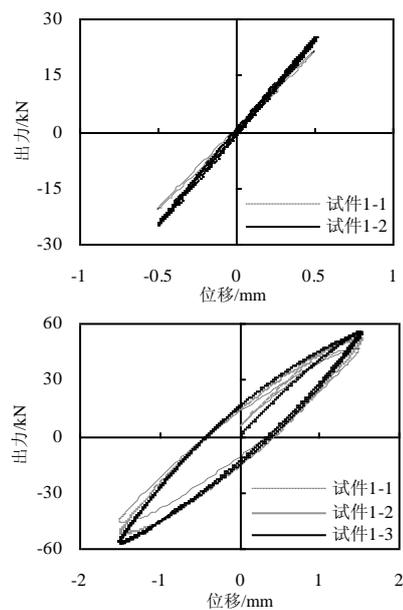


图 4 新型钢铅组合耗能器破坏形态

Fig.4 Failure state of the dampers

#### 3.2 试验结果分析

图 5 为第一组钢铅组合试件位移分别为 0.5mm、1.5mm、3mm 和 5mm 时钢铅组合试件滞回曲线对比，从图中可知，在 0.5mm 位移时钢铅组合耗能器基本处于弹性，但是随着内部铅厚度的增加，弹性刚度稍有增加，最大荷载稍有增大。在位移为 1.5mm 时钢铅组合耗能器就形成了一定的耗能环，说明钢铅组合耗能器对小变形敏感，在位移 3mm 和 5mm 时形成比较饱满的滞回环，充分说明了钢铅组合耗能器的耗能能力；从三个试件的滞回曲线比较可知，随着钢铅组合耗能器中铅含量的增加，耗能能力明显增加，说明内部铅充分发挥了耗能能力。



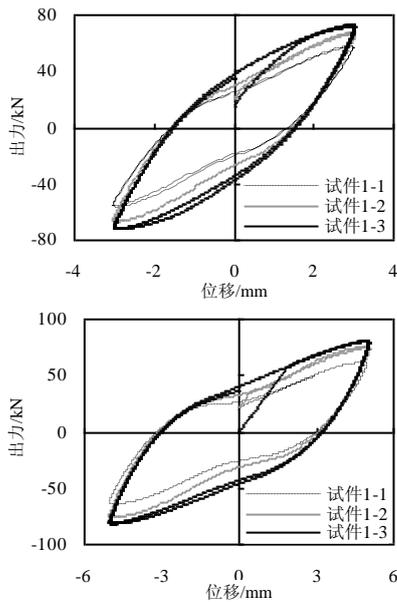


图 5 第一组钢铅组合试件滞回曲线比较

Fig.5 Hysteresis curves of the 1<sup>st</sup> group of dampers

图 6 为第二组钢铅组合试件在翼缘宽度变化时的滞回曲线比较, 从图中看出, 钢铅组合耗能器滞回曲线比较饱满, 基本呈双线性形状, 耗能性能是稳定的。从图 6(a)可看出, 变化翼缘宽度对滞回曲线是有影响的, 试件 2 比试件 1 翼缘宽出 80mm, 屈服荷载较试件 1 有所提高(约提高 25kN 左右), 但试件 3 比试件 2 翼缘又宽出 40mm, 可屈服荷载提高很小, 耗能能力反而有所减少。说明翼缘宽度应该存在一个优化的尺寸。图 6(b)中翼缘宽度的变化存在同样的现象, 但屈服荷载变化没有图 6(a)明显。分析产生差别的原因是试件 7、试件 8、试件 9 比 1 截面、2 截面、3 截面变大了, 钢板厚度增大了(1.0mm 变为 1.5mm), 说明耗能器主要耗能部分在受剪部分, 阻尼器截面增大之后, 翼缘弯曲部分对性能的影响相对变小。

图 7 为第二组钢铅组合试件在腹板铅厚度变化时的滞回曲线比较。从图 7(a)看出, 试件 4、试件 5、试件 6 随着腹板铅厚度增加, 滞回环屈服荷载基本呈增大趋势, 说明腹板厚度对滞回性能有影响, 腹板增厚, 耗能能力增强; 图 7(b)中试件 10、试件 11、试件 12 虽也存在图 7(a)现象, 但是变化不明显。分析原因可能是: 试件 10~试件 12 中不锈钢板厚度为 1.5mm, 钢的贡献增大, 增加的铅的贡献减小, 腹板铅厚度影响没有图 7(a)中明显。

图 8 为第一组试件中纯钢试件和钢铅组合试件在同等位移 1.0mm、1.5mm、3mm 时的滞回曲线比较图, 由图可知, 钢铅组合耗能器屈服荷载比纯钢

耗能器大大降低, 仅为纯钢耗能器的 1/3~1/2 左右。表明利用普通不锈钢和铅制作钢铅组合耗能器能够达到降低屈服点, 实现低屈服极限软钢耗能器的性能。

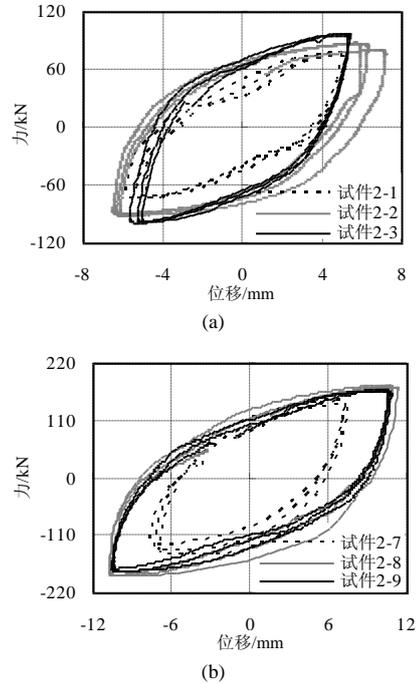


图 6 第二组钢铅组合试件翼缘宽度变化滞回曲线比较

Fig.6 Hysteresis curves of the 2<sup>nd</sup> group of dampers with

varying flange width

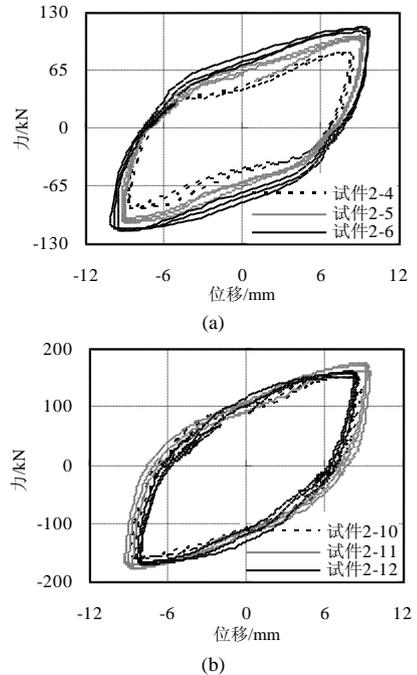


图 7 第二组钢铅组合试件腹板厚度变化滞回曲线比较

Fig.7 Hysteresis curves of the 2<sup>nd</sup> group of dampers with

varying web plate thickness

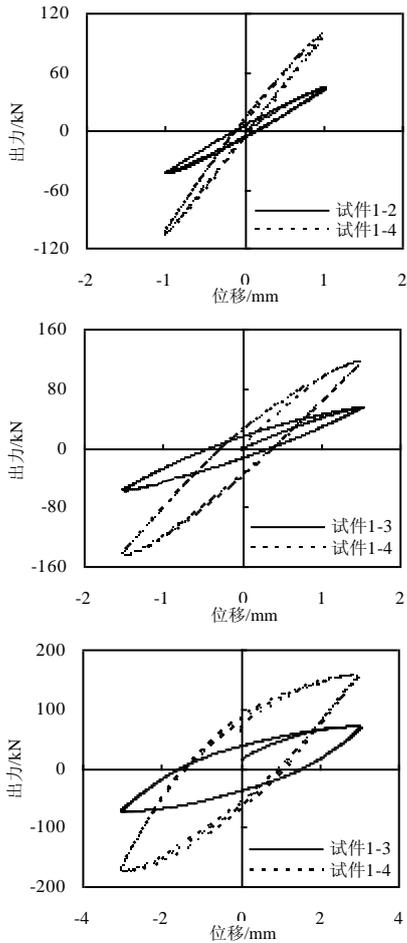


图 8 钢铅组合试件与纯钢试件同等位移时滞回曲线比较

Fig.8 Comparisons of Hysteresis curves of combined

steel-lead and steel damper with equal displacement amplitude

图 9 为第一组试件中纯钢试件和钢铅组合试件在同等出力时的滞回曲线比较图,从图中看出,在最大出力都为 50kN 时,钢铅组合耗能器形成了较为饱满的滞回环,而纯钢试件基本处于弹性,在最大出力达 90kN 左右时,钢铅组合耗能器形成非常饱满的滞回环,而纯钢耗能器滞回环非常小。在同等出力的情况下,钢铅组合耗能器滞回曲线比纯钢滞回曲线要饱满的多,充分说明了钢铅组合耗能器的耗能能力比较好。

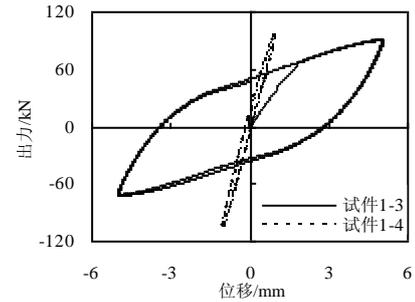
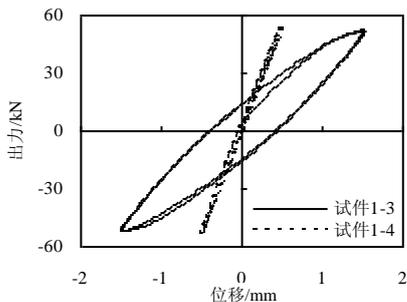


图 9 钢铅组合试件与纯钢试件同等出力时滞回曲线比较

Fig.9 Comparisons of Hysteresis curves of combined steel-lead to steel damper with equal load amplitude

### 4 结 论

本文开发了一种新型钢铅组合耗能器,对其进行了往复加载试验研究,得到了如下一些结论:

- (1) 耗能器滞回曲线饱满,有良好的耗能能力,基本呈双线性形状;
- (2) 证明可以利用普通不锈钢材料和铅组合实现国内尚不能生产的低屈服点软钢性能;
- (3) 含铅量直接影响耗能器性能,耗能器内铅厚度越大,耗能器滞回环越饱满,耗能能力越强;
- (4) 耗能器主要靠腹板耗能,翼缘宽度对滞回曲线有一定影响,存在一个优化的翼缘宽度。

### 参 考 文 献:

- [1] Soong T T, Spencer Jr B F. Supplemental energy dissipation: state-of-art and state-of-practice [J]. Engineering Structures, 2002, 24: 243~259.
- [2] Lu Xilin, Zhao Bin. Recent advances in structural control research and applications in China mainland [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 2(1): 117~132.
- [3] Nakashima Masayoshi. Strain-hardening behavior of shear panels made of low-yield steel, I: test [J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1995, 121(12): 1742~1749.
- [4] Yamaguchi Tanemi, Takeuchi Toru, Nagao Toshimichi. Seismic control devices using low-yield-point steel [R]. Nippon Steel Technical Report, 1998, (77,78): 65~72.
- [5] Shih Minghsiang, Sung Wenpei, Go Cheergerm. Investigation of newly developed added damping and stiffness device with low yield strength steel [J]. Journal of Zhejiang University: Science, 2004, 5(3): 326~334.

(参考文献[6]~[11]转第 109 页)