第18卷 第2期 2018年1月
1671—1815(2018)002-0199-05

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018
ⓒ 2018 Sci. Tech. Engrg.

引用格式:黄微波, 李华阳, 张志超, 等. 约束阻尼结构板振动性能实验研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 199—203
Huang Weibo, Li Huayang, Zhang Zhichao, et al. Experimental study on vibration performance of constrained damped structural plates[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 199—203

力学

约束阻尼结构板振动性能实验研究

黄微波 李华阳* 张志超 张 锐 马衍轩
(青岛理工大学,青岛 266033)

摘 要 通过对约束阻尼结构试样进行单点锤击实验,研究了约束层厚度和阻尼层厚度对约束阻尼结构振动性能的影响。分析了各组结构的振动幅值、振动加速度、振动加速度总级值和结构复合损耗因子。研究发现,当结构约束层厚度从40 mm增加至60 mm时,试样减振性能改善最明显。当结构约束层为80 mm厚时,3 mm厚阻尼层结构减振效果最好且阻尼层阻尼效率最高。当结构约束层为20 mm、40 mm和60 mm时,2 mm厚阻尼层结构减振效果最好且阻尼层阻尼效率最高。综合考虑结构性能、减振效率和经济因素,60 mm厚约束层、2 mm厚阻尼层为所研究试样中的最优组合。

关键词 约束阻尼结构 锤击实验 约束层厚度 阻尼层厚度 动态力学性能
中图法分类号 O328 TB123; **文献标志码** A

随着社会经济的高速发展和人们生活水平的不断提高,各个领域对噪声与振动的控制要求越来越高。约束阻尼结构作为一种在振动与噪声控制中常用的结构形式被广泛关注。

约束阻尼结构(以下简称CLD结构)的形式在1959年首次被Kerwin[1]提出。随后Ross、Mead等和Ditaranto等[2—4]对CLD结构进行了大量研究与理论完善。CLD结构由约束层、阻尼层和基层三部分构成,各层的厚度均会对结构的动态力学性能产生影响。近年来,国内外许多专家学者研究了CLD结构各层厚度及层间厚度比对其结构动态力学性能的影响。王慧彩和吕平、王淼等[5—8]研究了阻尼层厚度对CLD结构的动态力学性能影响。结果表明,在一定厚度范围内随着阻尼层层厚增加,结构的复合损耗因子增加、固有频率降低。谭亮红、张敬莹等[9, 10]研究了结构各层厚度对CLD结构减振性能的影响。研究发现,在其研究范围内基层厚度越小,阻尼层及约束层越厚,CLD结构复合损耗因子越大。高金岗等[11]研究了阻尼层与基层厚度比对CLD结构减振性能的影响。研究发现,结构复合损耗因子随着结构阻尼层与基层厚度比的增加而先增大后减小。黄加才等[12]通过理论分析和试验验证的方式研究了CLD结构约束层和阻尼层厚度对结构减振性能的影响。分析表明,CLD结构复合损耗因子随着阻尼层厚度的增加先减小再增大,随着约束层厚度的增加先增大后减小,且当阻尼层较薄时实验结构与理论分析结果吻合较好。舒歌群等和赵文龙[13, 14]通过有限元方法研究了约束层与基层之间厚度比对CLD结构动态力学性能的影响。结果表明,当约束层厚度与基层的厚度比小于1时,结构复合损耗因子随着该比值的增加而增加;当该比值在1左右时,达到最大结构复合损耗因子。

本文采用单点锤击实验对试样进行锤击测试,借助DASP系列软件,研究了约束层和阻尼层厚度对结构动态力学性能的影响。

1 实验方案及原理

1.1 实验材料及设备

实验结构中,约束层、基层材料采用砂浆板,阻尼层材料采用Q-tech413阻尼材料。实验所用设备包括北京东方所提供的INV3018系列振动数据采集仪、Dasp-v10振动信号处理软件等。

1.2 试样制备

试样由约束层、阻尼层和基层组成;基层为400 mm × 200 mm × 20 mm的砂浆板;阻尼层为

2017年6月5日收到 国家自然科学基金青年基金(51408330)、青岛地铁科研课题类采购项目(M2-ZX-2015-63)和青岛市博士后基金(2016199)资助

第一作者简介:黄微波(1963—),男,重庆人,博士,教授,博士研究生导师。研究方向:聚脲及黏弹性阻尼材料工程应用。
*通信作者简介:李华阳(1993—),男,山东滕州人,硕士研究生。研究方向:黏弹性阻尼材料工程应用。E-mail:18354205474@163.com。

Q-tech413阻尼材料,DMA 测试结果见图 1。采用手工刮涂的方式进行施工,厚度有 2 mm、3 mm、4 mm 和 5 mm;约束层为 400 mm × 200 mm 砂浆板,厚度分别为 20 mm、40 mm、60 mm 和 80 mm。各组试样编号见表 1。

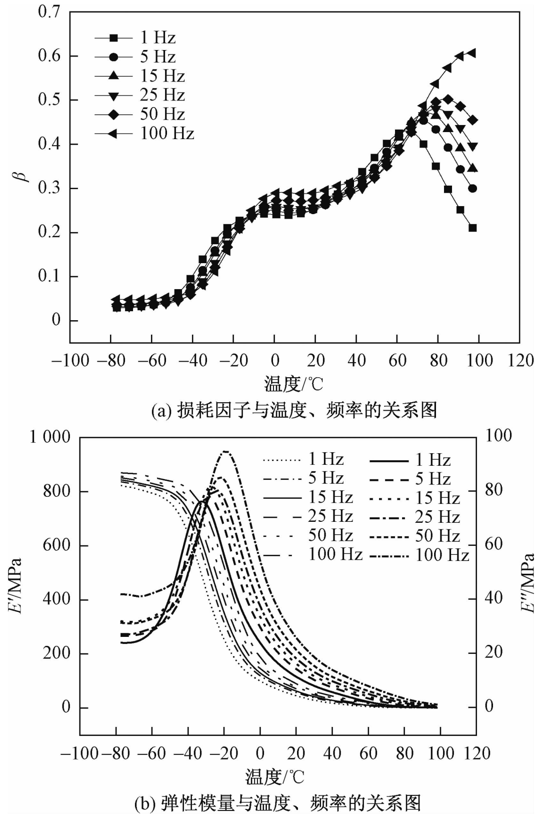

图 1 材料参数与温度、频率关系图

Fig. 1 Relationship between material parameters and temperature-frequency

表 1 各组试样编号

Table 1 Sample number of each group

约束层厚度/mm	阻尼层厚度/mm 2	3	4	5
20	2-2	2-3	2-4	2-5
40	4-2	4-3	4-4	4-5
60	6-2	6-3	6-4	6-5
80	8-2	8-3	8-4	8-5

注:各试样编号方式为约束层厚度(cm)-阻尼层厚度(mm),如对于约束层为 2 cm、阻尼层为 2 mm 的试样,编号为 2-2。

1.3 测试方案

以简支约束的支撑方式采用单点激励多点拾振的方法对试样进行锤击试验。使用 INV3018 振动数据采集仪进行数据的采集,激振力为 100 N,采样频率为 5 120 Hz,激振点为约束层中心位置,传感器布置位置为基层,如图 2 所示。

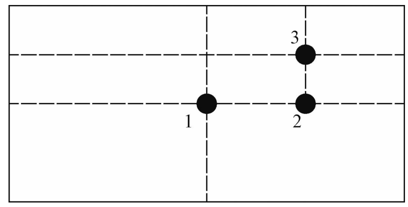

图 2 测点布置图

Fig. 2 Layout of measuring points

2 实验结果与分析

2.1 时域分析

以上节所述方案对试样进行敲击试验。对 CLD 结构进行时域分析,结果表明各组结构振动持续时间均在 0.1 ~ 0.16 s 的范围内,各组结构最大振幅如表 2 所示。

表 2 各组最大振幅

Table 2 Maximum amplitude of each group /($m \cdot s^{-2}$)

约束层厚度/mm	阻尼层厚度/mm 2	3	4	5
20	46.57	55.62	51.47	49.18
40	28.14	29.99	39.72	26.73
60	15.39	15.85	16.34	16.56
80	11.03	10.69	11.33	11.62

从表 2 中可以看出,随着结构约束层厚度的增加,CLD 结构时域波形最大振幅均减小。出现这种现象的原因主要有两个,首先是 CLD 结构约束层厚度增加的同时约束层对阻尼层的约束作用增强,从而增加了阻尼层在剪切变形中的耗能;其次增加约束层的厚度也会增加结构本身的质量并且约束层材料本身具有一定的耗能能力从而使 CLD 结构最大振幅减小。结构约束层厚度每增加 20 mm,相应结构最大振幅下降率的最大值分别为 46.1%、58.9%、32.6%,最小值分别为 22.8%、38.1%、28.3%,总体来说结构约束层厚度从 40 mm 增加至 60 mm 时结构最大振幅下降率最大。当结构约束层厚度确定时改变阻尼层厚度对最大振幅的影响并不是特别明显。

2.2 振动加速度

通过对采集到的振动数据进行自谱分析可以得到结构的振动加速度谱图,各组结构的振动加速度对比曲线如图 3。

由图 3 可以看出,当 CLD 结构阻尼层厚度分别为 2 mm、3 mm、4 mm 和 5 mm 时,CLD 结构振动加速度与约束层厚度之间的变化关系与时域分析最大幅值的变化规律基本一致。2 cm 约束层结构振动加速度最大,其次是 4 cm 约束层结构,6 cm 约束层结构和 8 cm 约束层结构的振动加速度相差较小。这是由于增加结构约束层厚度后对阻尼层的约束能力增强从而增大了阻尼材料的剪切耗能,而当约束层达到一定厚度后其对阻尼材料的约束作用不再明显增加,且过大的约束层重量会导致阻尼层被压缩

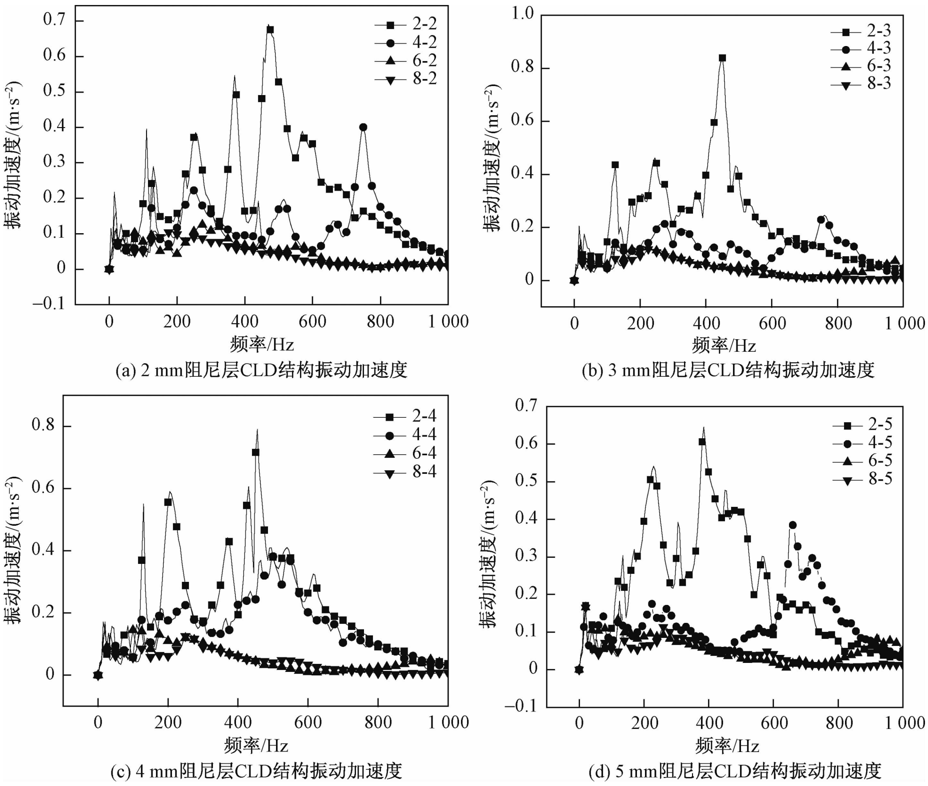

图 3　各组振动加速度对比图

Fig. 3　Comparison of vibration acceleration in each group

从而减小其耗能能力，因此出现 6 cm 厚约束层与 8 cm厚约束层试样振动加速度相近的情况。而当确定 CLD 结构约束层厚度改变结构阻尼层厚度时结构振动加速度谱图规律并不明显。

2.3　振动加速度总级值

通过对结构进行振动测试，可以得到各组结构的振动总级值，具体数据见表 3。

表 3　各组结构振动加速度总级值

Table 3　Total vibration acceleration level value of each group　　/dB

约束层厚度/mm	阻尼层厚度/mm			
	2	3	4	5
20	17.64	21.89	20.16	19.86
40	12.51	13.44	16.65	16.75
60	6.2	7.66	7.77	7.75
80	6.07	4.42	6.4	5.44

由表 3 数据可以明显看出，对于实验研究范围内各阻尼层厚度结构，其总级值均呈随约束层厚度增加而减小的趋势。结构约束层厚度每增加 20 mm，相应结构振动加速度总级值下降率最大值分别为 38.6%、53.7%、42.3%，最小值分别为 15.7%、43%、2.1%，总体来说当约束层厚度由 40 mm增加为 60 mm 时结构总级值下降率最大，此结果与时域分析中最大幅值下降率分析结果相同。当确定结构的约束层厚度而改变结构的阻尼层厚度时，除80 mm厚约束层结构外其余各组结构均为在 2 mm阻尼层厚度时取得最小总级值，当约束层厚度为80 mm时，CLD 结构在 3 mm 阻尼层厚度时取得总级值最小值。这是由于当阻尼层厚度增加时阻尼材料的剪切变形会相对减小从而对 CLD 结构的阻尼性能产生负面影响，而当 CLD 结构约束层厚度增加到80 mm时，结构约束层的重力作用使阻尼层被压缩，此时 30 mm 阻尼层反而会比 20 mm 厚阻尼层产生更大的剪切变形从而产生更好的阻尼效果。

2.4　复合损耗因子

通过测试可以得出各组结构在各阶固有频率下的复合损耗因子，下面以一阶频率下的结构复合损耗因子为例进行分析，各组结构一阶复合损耗因子见表 4。

表 4　各组结构一阶频率下的复合损耗因子

Table 4　Structural loss factor at fundamental frequency of each group

约束层厚度/mm	阻尼层厚度/mm			
	2	3	4	5
20	0.196	0.170	0.162	0.159
40	0.328	0.131	0.179	0.283
60	1.148	1.119	0.598	0.301
80	0.183	1.041	0.413	0.189

从表4中可以看出,当约束层厚度从20 mm到60 mm变化时,结构复合损耗因子基本呈增加的趋势,当约束层厚度从60 mm增加到80 mm时结构复合损耗因子均减小。各组结构在60 mm约束层厚度时取得最大复合损耗因子,2 mm、3 mm、4 mm和5 mm阻尼层厚度下的最大结构复合损耗因子分别为1.148、1.119、0.598、0.301。除5 mm厚度阻尼层结构外,当结构约束层厚度分别从20 mm增加到40 mm和从40 mm增加到60 mm时损耗因子增大率的最大值分别为67.4%和754.2%,总体来说结构约束层厚度从40 mm增加到60 mm时损耗因子增大率要大于结构约束层厚度从20 mm增加到40 mm时损耗因子的增大率。当确定结构约束层厚度时,除80 mm厚约束层CLD结构在阻尼层厚度为3 mm时取得最大结构复合损耗因子外,其余各组试样均为阻尼层厚度为2 mm时取得最大复合损耗因子。此规律与结构总级值规律相同。定义阻尼层的阻尼效率为结构复合损耗因子/阻尼层厚度,各组结构阻尼层的阻尼效率如表5所示。

表5 各组结构一阶频率下阻尼层阻尼效率

Table 5 Structural damping efficiency of damping layer at fundamental frequency of each group

约束层厚度/mm	阻尼层厚度/mm			
	2	3	4	5
20	0.098	0.057	0.041	0.032
40	0.164	0.044	0.045	0.057
60	0.574	0.373	0.150	0.060
80	0.092	0.347	0.103	0.038

通过表5数据可以看出,除80 mm厚约束层CLD结构试样阻尼层效率为3 mm厚阻尼层时最高外,其余各组约束层厚度情况下均为2 mm厚阻尼层时试样阻尼效率最高,并且60 mm厚约束层、2 mm厚阻尼层的CLD结构试样在所有试样中阻尼层阻尼效率最高。这也与之前分析的结果相符合。总体来说,综合考虑试样的阻尼效率和结构振幅与总级值的减小率以及振动加速度图线,60 mm约束层厚度、2 mm阻尼层厚度的CLD结构试样阻尼效果最好且各层厚度较为合理。

3 结论

通过对几组CLD结构试样进行振动测试,并对测试结果分别进行振动幅值分析、振动加速度分析、振动加速度总级值分析和结构复合损耗因子分析,综合考虑各种因素,得出以下结论:

(1)在实验研究范围内,CLD结构约束层厚度从20 mm到60 mm变化时,结构阻尼性能变好,且从40 mm到60 mm变化时阻尼性能改善最明显;CLD结构约束层厚度从60 mm到80 mm变化时结构一阶复合损耗因子减小。

(2)在实验研究范围内,除80 mm厚约束层试样外CLD结构阻尼层厚度为2 mm时结构减振性能最好且阻尼层阻尼效率最高,当结构约束层为80 mm时3 mm厚阻尼层试样减振性能最好但阻尼层阻尼效率有所降低。

(3)综合考虑CLD结构的减振性能、阻尼效率和实验用料等各种因素,在所有实验试样中60 mm约束层、2 mm阻尼层CLD结构为最优组合。

参 考 文 献

1 Kerwin E M. Damping of flexural waves by a constrained viscoelastic layer. The Journal of the Acoustical Society of America,1959;31(7):952—962

2 Ross D U E A. Damping of plate flexural vibrations by means of viscoelastic laminate. American Society of Mechanical Engineers, 1959

3 Mead D J, Markus S. The forced vibration of a three-layer, damped sandwich beam with arbitrary boundary conditions. Journal of Sound and Vibration,1969;10(2):163—175

4 Ditaranto R A. Theory of vibratory bending for elastic and viscoelastic layered finite-length beams. J Appl Mech,1965;32(4):881—886

5 王慧彩. 黏弹性阻尼夹层板动力特性分析及模态实验研究. 船舶, 2005;(5): 11—16
Wang Huicai. Dynamic performance analysis and mode experimental study on viscid elastic damp interlayer plate. Ship & Boat, 2005;(5): 11—16

6 王慧彩,赵德有. 黏弹性阻尼夹层板动力特性分析及其试验研究. 船舶力学, 2005;(4): 109—118
Wang Huicai, Zhao Deyou. Dynamic analysis and experiment of viscoelastic damped sandwich plate. Journal of Ship Mechanics, 2005;(4): 109—118

7 吕 平,盖盼盼,伯仲维,等. 阻尼层厚度对结构阻尼性能的影响. 噪声与振动控制,2013;(2): 101—104
Lü Ping, Gai Panpan, Bo Zhongwei, *et al.* Influence of damping layer's thickness on vibration damping performance of structures. Noise and Vibration Control, 2013;(2): 101—104

8 王 湦,宋国晶,孙明昌,等. 夹层阻尼结构损耗因子影响因素研究. 第七届中国功能材料及其应用学术会议. 北京:国家仪表功能材料工程技术研究中心, 2010
Wang Gao, Song Guojing, Sun Mingchang, *et al.* Structural parameter analysis of a sandwich beam specimen with a inserted viscoelastic layer. The Proceedings of 7th Functional Materials and Applications Conference. Beijing: National instrument Functional Materials Engineering Technology Research Center,2010

9 谭亮红. 阻尼结构对复合结构阻尼性能的影响. 橡胶工业,2014;(2);84—88
Tan Lianghong. Effect of damping structure on damping property of composite structure. China Rubber Industry, 2014;(2);84—88

10 张敬莹. 黏弹性夹层板振动特性的有限元分析. 大连:大连理工大学, 2007

Zhang Jingying. Finite element analysis of the vibration characteristics of sandwich structure with viscoelastic layer. Dalian: Dalian University of Technology,2007

11 高金岗. 青岛地铁用 Qtech503 阻尼材料性能及其约束阻尼结构研究. 青岛:青岛理工大学, 2014

Gao Jingang. Study on performance of damping materials QTech503 and constrained damping structure in Qingdao subway. Qingdao: Qingdao University of Technology,2014

12 黄加才,游少雄,赵云峰. 板类约束阻尼结构的层间厚度参数优化. 宇航材料工艺, 2013;(1): 30—34

Huang Jiacai, You Shaoxiong, Zhao Yunfeng. Optimization method to optimize layer thickness for constrained damping plate. Aerospace Materials & Technology, 2013;(1): 30—34

13 舒歌群,赵文龙,梁兴雨,等. 约束阻尼结构的振动分析及结构参数优化研究. 西安交通大学学报, 2014;(3): 108—114

Shu Gequn, Zhao Wenlong, Liang Xingyu, *et al*. Vibration analysis and optimization of composite structure with constrained-layer damping treatment. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014; (3): 108—114

14 赵文龙. 黏弹性约束阻尼夹层结构振动分析及优化设计. 天津: 天津大学, 2014

Zhao Wenlong. Vibration analysis and optimization of sandwich structure treated with viscoelastic constrained layer damping. Tianjin: Tianjin University,2014

Experimental Study on Vibration Performance of Constrained Damped Structural Plates

HUANG Wei-bo, LI Hua-yang*, ZHANG Zhi-chao, ZHANG Rui, MA Yan-xuan

(Qingdao University of Technology,Qingdao 266033, China)

[**Abstract**]　The thickness influence of constrain layer and damping layer on vibration performance of the structure is studied by single point hammer test. Vibration amplitude, vibration acceleration, total vibration acceleration level value and compound loss factor are analyzed respectively. The result shows that the damping performance is improved obviously when the thickness of the structural constraint layer increases from 40 mm to 60 mm. When the thickness of the damping layer is 3 mm, the 80 mm-constrain layer structure has the best damping performance, and the damping efficiency of damping layer is the highest. The damping performance of the structure with 2 mm-damping layer is the best and the damping efficiency of damping layer is the highest, when the thickness of the constraint layer is 20 mm, 40 mm and 60 mm respectively. Considering the structure performance, vibration reduction efficiency and economic factors, the structures which the thickness of constraint layer and damping layer are 60 mm and 2 mm respectively, which is the superior combination within the range of research.

[**Key words**]　constrained layer damping structure　　hammer test　　thickness of constrain layer　　thickness of damping layer　　dynamic mechanical properties