第 37 卷第 2 期 河 北 科 技 大 学 学 报 Vol. 37, No. 2
2016 年 4 月 Journal of Hebei University of Science and Technology Apr. 2016

文章编号:1008-1542(2016)02-0192-06 doi:10.7535/hbkd.2016yx02013

经编间隔织物粘弹性与隔冲性能关系研究

蒋 瑾,林兰天,张福乐,刘晓霞,徐秋月,高 琮

(上海工程技术大学服装学院,上海 201620)

摘 要:选用冲击防护常用的经编间隔织物作为试验材料,研究材料粘弹性与其隔冲性能的关系。搭建了阻尼测试平台以测定不同规格的经编间隔织物阻尼比、压缩弹性模量和不同冲击速度下的冲击剩余载荷。试验结果表明,经编间隔织物的粘性或弹性作为单项指标与隔冲性能不存在明确的关系,提出粘弹比可以表征材料粘弹性与隔冲性能关系,在一定实验范围内,合适的粘弹比可获得较好的隔冲性能。

关键词:纤维制造技术;冲击剩余载荷;隔冲;经编间隔织物;粘弹比

中图分类号:TS181 **文献标志码:**A

Research on the relationship between viscoelasticity and shock isolation performance of warp knitted spacer fabrics

JIANG Jin, LIN Lantian, ZHANG Fule, LIU Xiaoxia, XU Qiuyue, GAO Cong

(Fashion College, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Warp-knitted spacer fabric which is commonly used in impact protection is selected as test materials to study the relationship between viscoelasticity and the performance of shock isolation. A damping test platform is built to test different specifications of warp-knitted spacer fabric including compression elastic modulus, damping ratio and the residual impact load under different impact speed. Experimental results show that there is no clear correlation between the shock isolation performance and the viscidity or the elasticity. Accordingly, viscosity-to-elasticity ratio is proposed to characterize the relationship between viscoelasticity and shock isolation performance, and it is found that appropriate viscosity-to-elasticity ratio within a certain range can help to achieve better shock isolation performance.

Keywords: fiber manufacturing technology; residual impact load; shock isolation; warp knitted spacer fabrics; viscosity-to-elasticity ratio

具有速度和质量的冲击物对另一物体的冲击与碰撞,从物理意义上来说是动能转换成其他能量(如热能、弹性势能等)的过程。防护系统应使冲击物在作用于系统时尽可能地将冲击物的动能转换为热能、弹性势能或以防护装备永久形变甚至破坏的形式将动能转换、消耗,从而实现冲击隔断,达到防护人体或高价值目标的目的[1-3]。动能转换、消耗的形式和程度取决于防护系统或者防护材料固有的粘性和弹性[4-6]。材料

收稿日期:2015-06-09;修回日期:2015-11-03;责任编辑:张 军
基金项目:上海市教委学科建设项目(XKCZ1207)
作者简介:蒋 瑾(1991—),女,江苏扬州人,硕士研究生,主要从事低速冲击防护方面的研究。
通讯作者:林兰天教授。E-mail:llt39@126.com

蒋 瑾,林兰天,张福乐,等.经编间隔织物粘弹性与隔冲性能关系研究[J].河北科技大学学报,2016,37(2):192-197.
JIANG Jin, LIN Lantian, ZHANG Fule, et al. Research on the relationship between viscoelasticity and shock isolation performance of warp knitted spacer fabrics[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2016, 37(2): 192-197.

的粘性阻尼在冲击过程中将动能转换为系统或材料的内能最终耗散，材料的弹性则将动能转换为弹性势能而延长了冲击过程、降低了冲击峰值[7-9]。因此，系统或材料固有的粘弹性是构建防护结构所必须考虑的因素。三维经编间隔织物作为冲击防护常用材料已被广泛应用到各种冲击防护装备中，如防弹衣内衬、安全背心、缓冲垫等[10-11]，本文以此为研究对象，测定了不同品种三维经编间隔织物的压缩弹性和阻尼特性，以隔冲性能(即剩余冲击载荷)为评价指标，研究其与该材料粘弹性的关系。

1　试验部分

1.1　试验材料

本试验采用的 10 种经编间隔织物(PET 纤维织造)结构参数如表 1 所示。本文所选的试验材料着重考虑了人体防护，因此对其厚度有所限制。

表 1　试样结构参数

Tab. 1　Structure parameters of fabrics

编号	表面结构	横密度/(纵行・5 cm^{-1})	纵密度/(横列・5 cm^{-1})	孔密度/(孔・cm^{-2})	间隔纱直径/mm	厚度/mm	面密度/(g・m^{-2})
f_1	菱形网孔	40.0	30.0	24.0	0.20	13.5	1 508.8
f_2	菱形网孔	40.0	30.0	24.0	0.20	18.5	1 730.4
f_3	六角网孔	42.5	15.0	5.0	0.20	9.0	881.2
f_4	六角网孔	42.5	15.0	8.5	0.20	9.0	771.6
f_5	六角网孔	45.0	30.0	9.0	0.20	6.0	761.2
f_6	六角网孔	50.0	30.0	10.0	0.20	6.0	1 166.4
f_7	六角网孔	40.0	32.5	9.0	0.20	10.5	1 477.2
f_8	六角网孔	30.0	32.5	4.5	0.20	5.0	930.0
f_9	六角网孔	42.5	15.0	7.0	0.20	15.5	1 253.2
f_{10}	六角网孔	47.5	15.0	7.5	0.20	12.5	1 166.4

1.2　试样粘弹性测试

1.2.1　阻尼比测定

由于经编间隔织物与常用的缓冲包装材料有一定的相似性，本试验参考了包装用缓冲材料阻尼的测定方法，采用幅值共振法测定经编间隔织物的阻尼[12-16]。根据 GB 8169－1987 包装用缓冲材料振动传递特性试验方法，由质量块、试样、振动台构成振动系统，试样放在振动台上，启动振动台使被测试样与系统一起作正弦振动，试验中利用传感器测得质量块和振动台上的加速度信号，将两者比值与频率绘制成频率-传递率曲线，根据该曲线计算得到阻尼比。该阻尼比表征了振动过程中，该振型下消耗振动能量的能力。原理如图 1 所示。

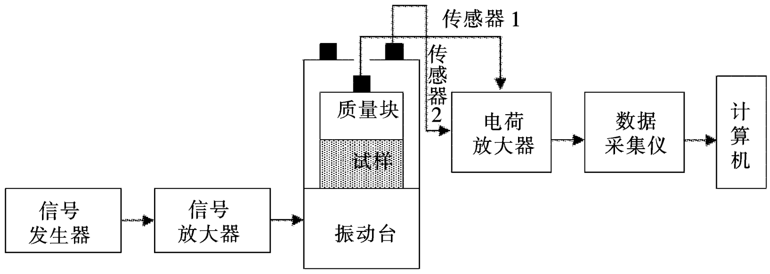

图 1　振动传递测试示意图

Fig. 1　Schematic diagram of vibration transmission test

根据 GB/T 18258－2000 的要求，自主搭建的试验装置包括振动台(含 ZDT-20 型激振器、质量块、固定装置)、测试系统(含加速度传感器、GF-50 功率放大器、F10 型数字合成函数信号发生器等显示或记录装置)。试验装置连接示意图如图 2 所示。

1.2.2　压缩弹性测试

试验使用 YG026D 型多功能电子织物强力机测试压缩织物，采用平头压脚，下部为环形平台，以恒定速度下压，到达设定的最大顶力后停止，得到力-压缩量曲线，根据曲线和式(1)计算得到压缩弹性模量 E_s，以此表征各试样的弹性。测试参数设定见表 2。试样为直径 50 mm 的圆形，每个样品测量 5 次。

$$E_s = \frac{F}{SL}, \tag{1}$$

式中：E_s 为压缩弹性模量，kPa；F 为最大压力，N；S 为受压面积，mm^2；L 为伸长长度，mm。

1.3 低速冲击测试

冲击试验仪器为上海工程技术大学研发、莱州电子仪器公司制造的SHLJ-LSIT-01型低速冲击测试仪。本研究中采用450 g的冲击头，试验时，夹持机构夹持冲击头向上压缩弹簧到指定压力后释放，冲击头冲击试样，记录冲击载荷平台内置的压力传感器测出的冲击，经过试样阻隔后的下方传感器接收的剩余冲击载荷，以该值表征系统在相同冲击条件下的隔冲性能。试样制成50 mm×50 mm的正方形。

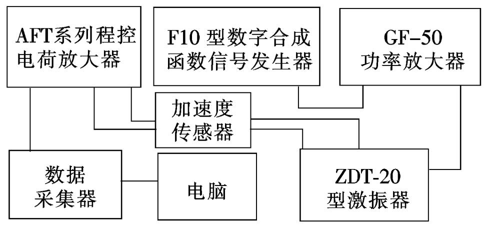

图2 试验装置连接示意图

Fig.2 Parts connection diagram of test apparatus

表2 弹性测试参数设定

Tab.2 Parameters setting in elasticity test

定点力/N	预张力/N	速度/(mm·min^{-1})	定点伸长/%
3 000	1.0	30	100

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

2.1.1 经编间隔织物的粘弹性测定结果

采用时域、频域转换，并根据2个传感器在对应频率下的峰值比，利用Matlab软件一维离散数据的极值及极值位置计算出传递率。通过转换和计算，得到了10种经编间隔织物的频率-传递率曲线，每种试样都有一个明显的传递率峰值，传递率峰值对应的频率即为所测试样的共振频率(f_n)。各试样具体的传递率及共振频率见表3。

根据频率-传递率曲线，利用Matlab软件进行最小二乘法曲线拟合后，得到阻尼比(ζ)和共振频率(f_n)。求得的各试样的阻尼比(ζ)与粘弹性测试结果汇总见表4。

表3 试样振动传递率及共振频率汇总表

Tab.3 Vibration transmissibility and resonance frequency

编号	共振频率(f_n)/Hz	传递率极值(T_{max})
f_1	19.61	1.74
f_2	14.49	1.17
f_3	32.79	2.61
f_4	58.82	2.9
f_5	66.67	3.71
f_6	76.92	2.33
f_7	55.56	2.77
f_8	100	2.44
f_9	16.39	1.03
f_{10}	34.48	2.44

表4 粘弹性测试结果

Tab.4 Results of viscoelasticity test

编号	压缩弹性模量/kPa	阻尼比(ζ)
f_1	0.025	0.35
f_2	0.020	0.82
f_3	0.026	0.21
f_4	0.031	0.18
f_5	0.045	0.14
f_6	0.066	0.24
f_7	0.050	0.19
f_8	0.054	0.22
f_9	0.021	2.03
f_{10}	0.023	0.23

从表4可以看出，对于压缩弹性模量，在其他参数相同的条件下，试样厚度大的，弹性模量小；孔密度大的较孔密度小的弹性模量小。这是由于随着试样厚度增加，间隔丝增长，在压缩过程中更容易弯曲，压缩弹性模量减小；孔密度大的试样间隔丝密度小，相比于间隔丝密度大的试样抗压能力减弱，因此压缩弹性模量小[17-19]。对于阻尼比，在其他参数条件相同的情况下，织物厚度大的阻尼比大；而孔密度不同，阻尼比相差不大，厚度对阻尼比的影响较大。

2.1.2 经编间隔织物冲击试验结果

用3种冲击速度(3,5,7 m/s)对试样进行冲击试验，记录剩余冲击载荷，每种试样在不同速度下冲击10

次，对 10 次试验数据进行统计平均见表 5。各组数据的变异系数均小于 0.05。

表 5　冲击数据统计表

Tab. 5　Statistic of impact data

编号	剩余冲击载荷/N		
	3 m/s	5 m/s	7 m/s
f_1	1 035	2 225	5 751
f_2	1 083	2 350	6 366
f_3	991	2 101	5 271
f_4	986	2 071	5 434
f_5	1 405	2 951	5 203
f_6	1 335	2 804	5 177
f_7	697	1 499	7 376
f_8	673	1 433	3 659
f_9	1 147	2 489	3 533
f_{10}	1 004	2 128	7 009

2.2　经编间隔织物粘性和弹性与隔冲性能关系分析

2.2.1　经编间隔织物粘性与隔冲性能关系

对试验数据进行处理分析，各试样粘性即阻尼比与剩余冲击载荷关系如图 3 所示。在 3 种冲击速度下，阻尼比与剩余冲击载荷的关系曲线变化趋势保持一致，且随着冲击速度增加，不同阻尼比试样的剩余冲击载荷波动幅度变大。但从图中并没有直接表现出某种变化规律。

为检验阻尼比与剩余冲击载荷是否存在某种线性关系，对阻尼比与剩余冲击载荷进行相关性分析。阻尼比与剩余冲击载荷的 Pearson 相关系数为 −0.102，绝对值小于 0.3，可以认为阻尼比与剩余冲击载荷之间无相关关系。

根据阻尼比的定义，$\zeta=\mathrm{sqrt}(c^2/(4mk))$，该值是阻尼系数 c 与质量 m 和刚度 k 积的 1/2 次项的比值，在本文的试验里，阻尼比大多数数值≤1，属于欠阻尼范围，其振动过程如图 4 所示。

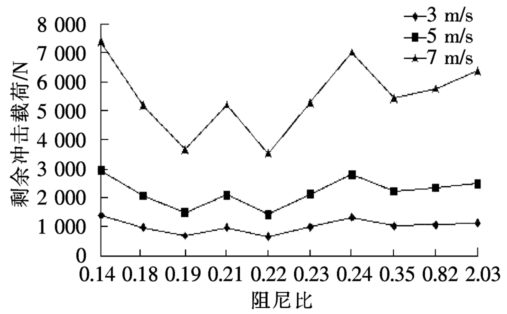

图 3　阻尼比与剩余冲击载荷的关系

Fig. 3　Relationship between damping ratio and residual impact load

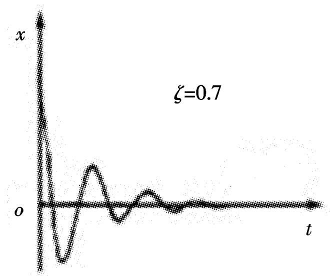

图 4　欠阻尼振动

Fig. 4　Owe damping vibration

由于该数值表征了振动过程中，该振型下消耗振动能量的能力，但是在图 3 中并没有看出系统消耗振动能量的能力对隔断冲击的显著性贡献，即使数值在 0.82 和 2.03 之间，从接近临界阻尼到过阻尼也未见剩余冲击载荷有明显的正相关变化。

2.2.2　经编间隔织物弹性与隔冲性能关系

对试验数据进行处理分析，得到试样弹性与低速冲击剩余冲击载荷的关系如图 5 所示。

图 5 中，在 3 种冲击速度下，压缩弹性模量与剩余冲击载荷的关系曲线变化趋势也是一致的，压缩弹性模量与剩余冲击载荷也没有呈现出明显的线性相关关系。

同样，为检验压缩弹性模量与剩余冲击载荷是否存在某种线性关系，对压缩弹性模量与剩余冲击载荷进行相关性分析。压缩弹性模量与剩余冲击载荷的 Pearson 相关系数为 −0.009，一般认为，2 个变量之间无相关关系。

无论是从关系图直观地观察还是通过相关性分析的结果，都表明，作为一个单独的参数，经编间隔织物的粘性或弹性与剩余冲击载荷之间不存在相关关系。

依胡克定理，刚度和压缩距离与压缩力正相关，也就是说，刚度越大在同等压缩距离前提下运动物体所受弹簧力也越大，从本试验涉及的结果观察，作为冲击体所受弹簧力的传递-剩余冲击力也应该越大，但是在图 5 中没有看出这个趋势。

2.3　经编间隔织物粘弹比与隔冲性能关系综合分析

由图 3 和图 5 所显示的试验结果可见，具备粘弹性特性的经编间隔织物，其材料阻尼比和压缩弹性模量作为单独的参数，其变化与冲击隔断性能的变化没有直接的相关性。因此尝试将粘弹比（即阻尼比）与弹性模量之比作为参数，考察其与剩余冲击载荷的关系。粘弹比按式(2)计算。

$$R=C/E_s, \tag{2}$$

式中：R 为粘弹比；C 为阻尼比；E_s 为压缩弹性模量。

计算得到的各试样的粘弹比如表 6 所示。剩余冲击载荷与粘弹比的关系如图 6 所示。

表 6　粘弹比结果

Tab.6　Viscosity-to-elasticity ratio results

试样编号	粘弹比
f_1	13.99
f_2	40.29
f_3	8.20
f_4	5.83
f_5	3.12
f_6	3.65
f_7	3.82
f_8	4.08
f_9	96.50
f_{10}	9.91

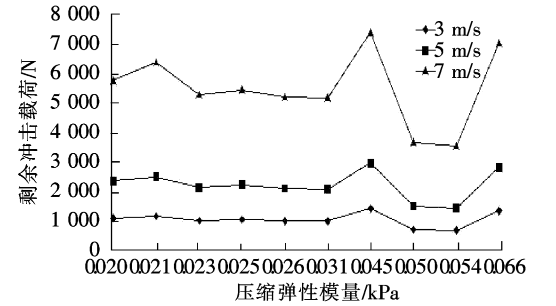

图 5　压缩弹性模量与剩余冲击载荷的关系

Fig.5　Relationship between compression modulus and residual impact load

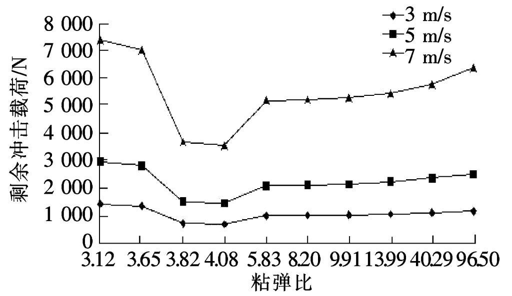

图 6　3 种速度档剩余冲击载荷与粘弹比的关系

Fig.6　Relationship between residual impact load and viscosity-elasticity ratio under three speeds

从图 6 中可以看出，在 3 种冲击速度条件下，剩余冲击载荷随粘弹比增加都呈现出先减小后变大的趋势。

为检验粘弹比与剩余冲击载荷是否存在某种线性关系，对粘弹比与剩余冲击载荷进行相关性分析。粘弹比与剩余冲击载荷的 Pearson 相关系数为－0.304，绝对值大于 0.3，可以认为粘弹比与剩余冲击载荷之间有相关关系。

粘弹比说明了冲击过程中被试系统弹性变形和非弹性变形吸收总能量的比例，粘弹比小说明在冲击体与被试材料碰撞减速过程中，冲击体对材料弹性变形做了更大的功，这部分能量会在随后的冲击体回弹中释放，并以弹簧力形式对被试材料施压，表现为压缩峰值不变，作用时间延长。反之则由粘性阻尼吸收耗散更多的动能，这部分是不可恢复的形变，不会延长作用时间。

在本试验中，当粘弹比数值在 3.82 到 4.08 之间时，剩余冲击载荷大幅度减小，说明在此区间，阻尼比与压缩弹性模量的比值对冲击隔振存在一个最佳匹配值区间，而且冲击速度越大这个倾向越明显。

单纯从隔冲角度而言，具有很低的刚度和粘度并有足够压缩距离的系统，具备最好的隔冲性能，但是这在工程上是无意义的。作为一个防护系统，设计者总是考虑如何在具备符合要求的隔冲能力的前提下，尽一切可能降低系统的质量和几何尺寸。图 3 和图 5 间接地说明了这个内在关系：过低的刚度和粘度使系统没有来得及完全转换冲击体动能，之前冲击体已经将系统（经编材料）完全压缩至实体，系统基本失效，因此要让低的粘度和刚度发挥完全隔冲效果必须要有距离，在这里是以厚度作为代价换取的，若在空间有限的前提下，这是无法实现的。

根据式(2)，以及阻尼比的物理意义可知，该式可以简化为

$$R\propto f(\sqrt{k/m},C), \tag{3}$$

从式(3)可知材料的粘弹比与系统的质量、刚度及阻尼系数有关，从量纲上看与阻尼比有类似之处，但该值调整了系统弹性的作用。

图 6 直观地说明了隔冲性能与整个防护系统的刚度质量、粘性系数以及它们之间的匹配有关，尤其是在防护系统质量体积受到一定限制的情况下。由于现实的材料是粘弹特性兼具的，因此在设计一个防护系统

时，单纯考虑系统刚性或者粘性是不可能获得合乎要求的防护系统的。而阻尼比这个值虽然将粘性和弹性一并考虑，但对于隔冲这个与减振相似但有不同的工程应用领域，依然存在不足之处。

3 结　论

1）对于粘弹性材料，单独的弹性和阻尼比与低速冲击隔冲性能不存在显著相关性，弹性因素和粘性因素对隔冲的作用是相互影响和制约的。

2）基于粘性和弹性的相互影响，本文提出可用粘弹比表征材料的隔冲性能，试验结果显示，当粘弹比在一定范围时，剩余冲击载荷会明显降低。当粘弹比为 4.08 时，经编间隔织物隔冲效果最明显。相比于单纯的粘弹指标，该值更适于表征经编间隔织物类防护系统的隔冲性能。据此推断，在特定的冲击条件下，防护系统的粘弹比与隔冲特性关系存在一个“走廊”，在这个“走廊”内，防护系统的隔冲特性可达到最佳值。

参考文献/References：

[1] 何曼君. 高分子物理[M]. 上海：复旦大学出版社，1990.

[2] 徐超，林松，王立峰，等. 基于 Layerwise 理论的共固化粘弹阻尼复合材料动特性分析[J]. 振动与冲击，2015，34(1)：6-12.
XU Chao，LIN Song，WANG Lifeng，et al. Layerwise dynamic analysis of composite laminates with co-cured viscoelastic damping layers [J]. Journal of Vibration and Shock，2015，34(1)：6-12.

[3] 蒋鞠慧，尹冬梅，张雄军. 阻尼材料的研究状况及进展[J]. 玻璃钢/复合材料，2010(4)：76-80.
JIANG Juhui，YIN Dongmei，ZHANG Xiongjun. Research situation and progress of damping materials[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites，2010(4)：76-80.

[4] 缪旭红，葛明桥. 衬垫用经编间隔织物振动特性探讨[J]. 纺织学报，2008，29(11)：57-60.
MIAO Xuhong，GE Mingqiao. Vibration behavior of cushioning warp knitted spacer fabric[J]. Journal of Textile Research，2008，29(11)：57-60.

[5] 林光兴. 经编间隔织物进入系统开发时期[J]. 纺织导报，2015(9)：47-51.
LIN Guangxing. Warp-knitted spacer fabric embracing the Era of systematic development[J]. China Textile Leader，2015(9)：47-51.

[6] 杨维纮. 力学[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2002.

[7] 张忠明，刘宏昭，王锦程，等. 材料阻尼及阻尼材料的研究进展[J]. 功能材料，2001，32 (3)：227-230.
ZHANG Zhongming，LIU Hongzhao，WANG Jincheng，et al. Damping of materials and progress in the damping materials[J]. Journal of Functional Materials，2001，32 (3)：227-230.

[8] 高双胜，陆春，薛继佳，等. CFRP 复合材料层板冲击损伤的空气耦合超声无损检测[J]. 纤维复合材料，2015(3)：10-12.
GAO Shuangsheng，LU Chun，XUE Jijia，et al. Nondestructive testing of impact damage in CFRP laminates by air-coupled ultrasound[J]. Fiber Composites，2015(3)：10-12.

[9] 张彦. 纤维增强复合材料层合结构冲击损伤预测研究[D]. 上海：上海交通大学，2007.
ZHANG Yan. Composite Laminated Structure Impact Damage Prediction of Fiber Reinforced[D]. Shanghai：Shanghai Jiaotong University，2007.

[10] 刘晓辉，黄英，李郁忠. 编织物增强层板的抗冲击性研究[J]. 兵器材料科学与工程，1998，21(6)：12-16.
LIU Xiaohui，HUANG Ying，LI Yuzhong. Study on impact resistance of woven-fabric laminates[J]. Ordnance Material Science and Engineering，1998，21(6)：12-16.

[11] 张友南，杨军，贺才春，等. 阻尼材料的研究与应用[J]. 噪声与振动控制，2006(2)：38-41.
ZHANG Younan，YANG Jun，HE Caichun，et al. Research and application of damping material[J]. Noise and Vibration Control，2006 (2)：38-41.

[12] 张云秀，关小平. 异型模压包装材料弹性模量的构成和刨花形态分析[J]. 包装工程，2012(9)：41-45.
ZHANG Yunxiu，GUAN Xiaoping. Analysis on composing of elastic modulus of hetero-type molded packaging material and shaving shape [J]. Packaging Engineering，2012(9)：41-45.

[13] 张宇，吴懿平，周岁华，等. 粘弹性阻尼减振材料及其在汽车领域的应用[J]. 汽车工艺与材料，2003(6)：1-3.
ZHANG Yu，WU Yiping，ZHOU Suihua，et al. Viscoelastic damping materials and its application in automotive industry[J]. Automobile Technology & Material Automotive Technology and Materials，2003(6)：1-3.

[14] ZHAO Dongxu. Earthquake mitigation study on viscoelastic dampers for reinforced concrete structures[J]. Journal of Vibration and Control，2007，13(1)：29-43.

[15] ROBINSON P，DAVIES G A O. Impactor mass and specimen geometry effects in low velocity impact of laminated composites[J]. International Journal of Impact Engineering，1992，12(2)：189-207.

[16] LIU D，MALVREN L E. Matrix cracking in impacted glass/epoxy plates[J]. Journal of Composite Materials，1987，21(7)：594-609.

[17] KIM J K，SHAM M L. Impact and delamination failure of woven-fabric composites[J]. Composite Science and Technology，2000，60(5)：745-761.

[18] 徐丰辰，李洪林，刘福. 浅谈汽车用阻尼材料阻尼系数的测试方法[J]. 汽车工艺与材料，2008(8)：63-67.
XU Fengchen，LI Honglin，LIU Fu. Test method for damping coefficient of automotive damping materials [J]. Automobile Technology & Material，2008(8)：63-67.

[19] 刘国梁. 三明治板的阻尼特性的分析与测量研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2011.
LIU Guoliang. Analysis and Measurement of the Damping Characteristics of Sandwich Plate[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2011.