

DOI: 10.11779/CJGE202206003

黏弹性阻尼减震层的吸能特性试验研究

梅松华¹, 盛谦^{2,3}, 崔臻^{*2,3,4}, 梅贤丞^{2,3}

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司水能资源利用关键技术湖南省重点实验室, 长沙 湖南, 410014; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 暨南大学重大工程与控制教育部重点实验室, 广东 广州, 510632)

摘要: 柔性减震技术在隧道等地下工程结构震害控制中的应用已被广泛认可, 为了能够进一步推动柔性减震技术的全面发展和应用, 基于黏弹性阻尼理论在桥梁建筑抗震领域中应用的认识, 提出一种拟应用于地下隧道工程抗震领域的黏弹性阻尼减震层结构。通过改进分离式 Hopkinson (SHPB) 试验系统对不同的岩石-阻尼层-混凝土组合试件进行冲击试验, 以此来分析黏弹性阻尼减震层的吸能特性。对比探讨了橡胶、硅胶不同阻尼层材料及蜂窝状、波纹状、圆柱状阻尼层结构在冲击试验中的吸能规律及其吸能效果; 同时在相同阻尼层材料及其结构形状条件下, 对比分析了不同厚度阻尼层的吸能规律, 探讨了黏弹性阻尼减震层中阻尼层的最佳厚度; 研究表明: 与对照组(岩石-混凝土组合试件)相比, 不同阻尼层的阻尼减震层结构吸收的入射能均提高了 10%以上, 表明该结构优越的吸能特性, 同时高阻尼的橡胶比硅胶作为阻尼层材料具有更好地吸能效果; 在 3 种不同形状的阻尼层中, 蜂窝状阻尼层结构具有更好的吸能效果; 对比分析不同厚度阻尼层结构的吸能效果时发现效果最佳的阻尼层厚度为 20 mm; 研究成果将为隧道地下工程抗震结构设计提供理论和数据支撑。

关键词: 黏弹性; 阻尼层; 吸能特性; 地下工程

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2022)06-0997-09

作者简介: 梅松华(1974—), 男, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事工程岩体力学性质与稳定性评价、地质灾害防治等方面的研究工作。E-mail: msh_mail@163.com。

Experimental study on energy absorption property of viscoelasticity damping layer

MEI Song-hua¹, SHENG Qian^{2,3}, CUI Zhen^{2,3,4}, MEI Xian-cheng^{2,3}

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Key Technology on Hydropower Development, Power China Zhongnan Engineering Corporation Limited, Changsha 410014, China; 2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences State Key Lab of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Wuhan 430071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. MOE Key Lab of Disaster Forecast and Control in Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China)

Abstract: The flexible damping technology has been extensively acknowledged as an application for seismic damage reduction in underground engineering projects. To further develop and implement this technology, a viscoelastic damping layer structure is proposed based on the understanding of viscoelastic damping theory in the field of seismic resistance of bridge construction. An improved split hopkinson pressure bar (SHPB) test system is used to perform the impact tests on different rock-damping layer-concrete specimens. The energy absorption laws using different damping layer materials (rubber and silicone) and different damping layer structures (honeycomb, corrugated and cylindrical) are comparatively studied. At the same time, with the same layer material and structure of the damping layer, the energy absorption laws of the structures with different thicknesses of damping layer are compared and analyzed, and the optimal thickness is investigated. The results show that the incident energy absorbed by the damping layer structures of different damping layers has increased by more than 10%, compared to the control group (rock-concrete specimen). It is indicated that the structure has superior energy absorption characteristics and the rubber can absorb more incident energy as the damping layer than the high-damping silicone. Among various damping layer shapes, the composite damping layer structure with a honeycomb damping layer has better energy absorption characteristics than the others. In addition, after comparing and analyzing the energy absorption effects of the structures with different thicknesses of the damping layer, it is

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079133, 51991393); 重大工程灾害与控制教育部重点实验室开放基金项目(20200904002)

收稿日期: 2021-07-21

*通信作者(E-mail: zcui@whrsm.ac.cn)

found that the optimal thickness of the damping layer with the best energy absorption effect is 20 mm. The overall results can serve as a theoretical and data support for the application of composite damping layer structures in seismic design of underground engineering projects.

Key words: viscoelasticity; damping layer; energy absorption characteristic; underground engineering

0 引言

在新时代全面推进“一带一路”建设，同时随着中国经济建设持续向西部倾斜，青藏高原以其丰富的自然资源成为下一个国民经济资源开发建设的主战场的背景下，不得不面临着在强震区兴建隧道（洞）等基础战略与生命线工程的现状^[1-2]。长久以来，国内外对于强震区隧道（洞）的抗震减震方法以灌浆、加密加长锚杆、强化衬砌等刚性手段为主^[3]。但是近年来历次大地震中均有大量的隧道（洞）遭到破坏^[4-7]，对国家和人民造成了严重的经济财产损失及生命安全的威胁。已有的隧道震害使得工程界意识到，传统的刚性抗震手段应该予以摒弃。因此，柔性减震技术成为近年来隧道结构震害控制的研究热点之一，并已取得了丰富的成果。

当前的柔性减震技术，多采用弹性、弹塑性材料（聚苯乙烯土工泡棉、塑性混凝土、泡沫混凝土）作为减震材料，在衬砌与围岩间设置一层减震层^[8]，通过减震材料的塑性变形吸收围岩传递的地震动能量，以期降低衬砌的地震响应。国内学者^[9-10]通过设置减震层的振动台试验，证明了减震层可以有效的降低衬砌中的地震响应加速度，减弱围岩向衬砌传递的能量。胡俊^[11]、仇文革等^[12]、赵武胜等^[13]则分别通过试验、数值等手段研究了上述一些减震材料的减震机理与减震性能。但当前采用的减震材料均以力学性质较弱、塑性明显的材料为主，且在减震层的设置中通常仅考虑了厚度因素，特别是未能考虑材料的黏弹性，即阻尼特性^[8]。黏弹性阻尼减震结构（图1）作为基于黏弹性阻尼理论的一种减震隔振结构，其原理是通过高分子阻尼材料的分子链间的摩擦将振动能量转变为热能耗散出去，以达到减震目的^[14-15]。曾宪奎等^[16]对阻尼材料中胶料配合剂的成分对比对减震性能的影响开展了相关的正交试验，发现炭黑N330对材料的减震性能影响最大。李皓等^[17]通过数值计算分析了橡胶隔震和BRB减震俩和加固的既有单跨框架结构的抗震性能，发现该措施大大提升了结构的抗震能力。同时，在桥梁建筑抗震领域，曾志斌等^[18]以约束阻尼理论为基础，研制了减震支座、阻尼墙等实用的减震结构。Thompson等^[19]和马学强^[20]研究了基于黏弹性阻尼材料的约束阻尼结构对轨道交通减振降噪的性能。艾振等^[21]基于经典的自由阻尼和约束阻尼耗能原理提出

了一种复合阻尼层结构，通过层间位移连续关系和薄板理论建立了阻尼复合板的位移方程和应变能能量方程，并推导处理其运动微分方程和振动频率特征值方程，为该结构在汽车减振降噪上的应用提供理论依据。但在地下隧道（洞）工程的抗震减震领域，虽然早有学者提出复合阻尼减震层结构的减震设计设想^[22]，目前尚未开展系统深入的研究。

岩体在地震作用下承受的应变速率范围为 $10^{-1} \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 的“中等应变速率”^[23-25]，同时分离式Hopkinson（SHPB）试验系统通过冲击气压的设置可以将试样在冲击作用下的应变率控制在 $0 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ ^[26]。为了能够深入系统评价复合高分子阻尼减震结构的吸能特性，本文通过改进分离式Hopkinson试验方法，对不同阻尼层材料及不同阻尼层结构在相同加载速率条件下的冲击试验，研究阻尼层的吸能规律及其效果，探讨了阻尼减震结构吸能效果最佳的阻尼层材料及其形状；最后，在相同阻尼层材料及形状的条件下，通过对比不同厚度阻尼层的吸能规律，探讨了复合阻尼减震结构中阻尼层与混凝土层的最佳厚度比。

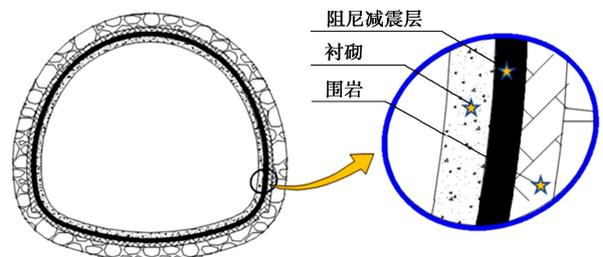


图1 黏弹性阻尼减震层结构示意图

Fig. 1 Diagram of viscoelasticity damping layer structure

1 高分子阻尼材料吸能原理

延塑性减震材料在发生塑性变形以后，当受到外力再次压缩时，产生塑性变形部分将失去吸能作用，使得材料难以实现二次吸能。而黏弹性高分子阻尼材料是一团不规则的大分子链段聚合物，通过大分子间的摩擦作用将摩擦力转化为热能耗散出去，从而实现吸能特性。所以当材料在受到地震冲击时具有多次吸能的能力，从而实现对隧道支护系统的防护作用。如图2所示，由黏弹性阻尼材料的应力-应变曲线可知，材料在受到一次外力冲击时，滞回环（OABD）面积代表着被耗散的能量。其耗能原理是材料在受力压缩

过程中 (OAB), 材料内部分子链受力后被压缩相互挤压, 同时将外力所作的功转换为克服大分子间的摩擦及阻力压缩后产生的热能及内能, 在回伸恢复变形的过程中 (BCD), 材料将内能转化为克服大分子间的摩擦及阻力拉伸后产生的热能, 使得内部分子链结构得以回伸。最终以热量耗散的形式吸收外力冲击产生的能量^[27-28]。

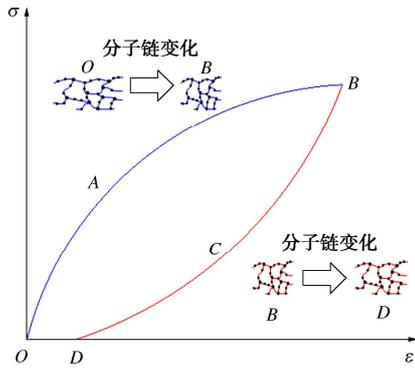


图 2 黏弹性阻尼材料的应力 - 应变曲线及分子链的变化
Fig. 2 Stress-strain curve of viscoelastic damping materials and change of molecular chain

2 试验系统及计算原理

2.1 试验设备

试验测试系统采用广东工业大学工程力学试验中心的直径为100 mm的SHPB测试系统, 如图3所示。入射杆长5500 mm, 透射杆长3500 mm, 同时压杆的密度为7740 kg/m³, 弹性模量为206 GPa。

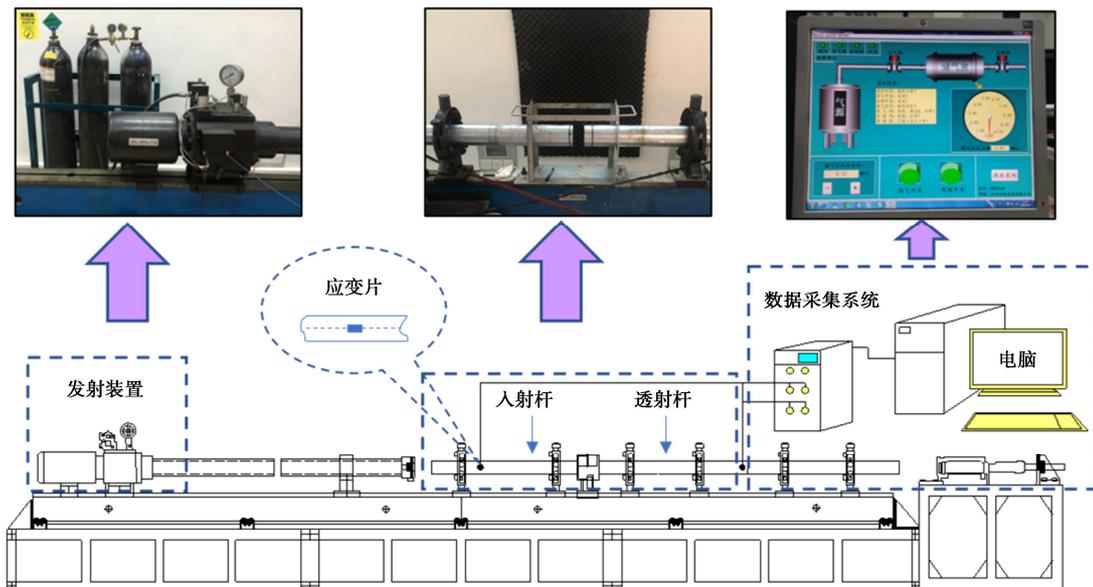


图 3 分离式霍普金森压杆试验系统
Fig. 3 Sketch of SHPB system

$$C_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

式中, C_0 为应力波在杆中的传播速度 (m/s), E 为压杆的弹性模量 (Pa), ρ 为压杆的密度 (kg/m³)。

通过式 (1) 即可得杆中的波速为5158.97 m/s。在试验过程中, 通过使用锥形子弹在高压气体的作用下以一定速度撞向入射杆, 从而在入射杆中产生倾斜的半正弦入射波, 使得动态力平衡^[28]。图4所示为锥形子弹及其在该测试系统内产生的入射波, 其中子弹为经过热处理的钢质材料, 最大直径100 mm, 长1000 mm。

2.2 计算原理

通过在入射杆及透射杆的中轴线上安装应变片 (图3), 记录子弹撞击压杆后产生的应力波在杆中传播的过程。SHPB 试验是建立在两个基本的假定基础上的, 一个是一维假设 (平面假设), 这样通过应变片测点处可知其他各点处的应变波形, 即试件与入射杆、透射杆界面处的应变波形均可得到。第二个是均匀性假设, 即试件中应力场和应变场沿着试件长度方向是均匀的。

通过 SHPB 的三波法公式^[27]可确定试件材料的应力 $\sigma(t)$, 应变 $\varepsilon(t)$ 和应变率 $\dot{\varepsilon}(t)$:

$$\sigma(t) = \frac{A_s}{2A_0} E(\varepsilon_T + \varepsilon_R + \varepsilon_I) \quad (2)$$

$$\varepsilon(t) = \frac{C_0}{L_S} \int_0^t (\varepsilon_T - \varepsilon_R - \varepsilon_I) dt \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{C_0}{L_S} (\varepsilon_T - \varepsilon_R - \varepsilon_I) \quad (4)$$

式中, ε_I , ε_R 为入射杆上测到的入射波和反射波的应变, ε_T 为透射杆上测到的透射波的应变, L_S 为试件长度, A_0 为压杆的横截面面积, A_S 为试件的横截面面积。通过该公式可推导出在对应的应变率下试件的应力应变关系曲线。

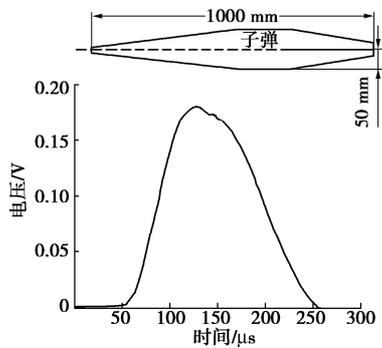


图4 锥形子弹及其产生的入射波

Fig. 4 Cone-shaped striker and incident wave produced

假设在试验过程中压杆与试件、试件与试件之间接触面的摩擦产生的能量忽略不计, 因此由能量守恒定律可知:

$$W_S(t) = W_I(t) - W_R(t) - W_T(t) \quad (5)$$

式中, $W_S(t)$ 为试件吸收的能量 (J), $W_I(t)$, $W_R(t)$, $W_T(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波所携带的能量, 可通过下式计算求得^[22]:

$$W_x(t) = \int_0^t A_x \sigma_x(t) C_0 \varepsilon_x(t) dt \quad (6)$$

$$\sigma_x(t) = E \varepsilon_x(t) \quad (7)$$

式中 A_x 为相应压杆的横截面面积, 因为各压杆为等截面压杆, 故 $A_x = A_0$; $\sigma_x(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波的应力时程; $\varepsilon_x(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波的应变时程。将式 (7) 代入式 (6) 并结合式 (5) 可得入射波、反射波及透射波的能量:

$$W_I(t) = EC_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_I^2(t) dt \quad (8)$$

$$W_R(t) = EC_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_R^2(t) dt \quad (9)$$

$$W_T(t) = EC_0 A_0 \int_0^t \varepsilon_T^2(t) dt \quad (10)$$

再结合式 (5) 即可得到试件在试验过程中所吸收的能量 $W_S(t)$ 。

3 试验概况

3.1 试样的制备

按照C30混凝土强度标准, 通过人工浇筑后, 进行标准养护28 d, 得到尺寸为50 mm(ϕ) \times 25 mm(d)的混凝土试样, 混凝土试样密度为2106 kg/m³, 单轴抗压强度为28.71 MPa, 同时将白鹤滩水电站所取玄武岩岩样制备成相同尺寸大小的圆盘形试样 (密度为2954

kg/m³, 单轴抗压强度为151.07 MPa), 而阻尼层试样则选用两种不同阻尼比的橡胶 (黑, 密度为1100 kg/m³) 和硅胶 (白, 密度为1200 kg/m³) 两种不同材料, 试样实物如图5所示, 试样物理力学参数如表1所示。

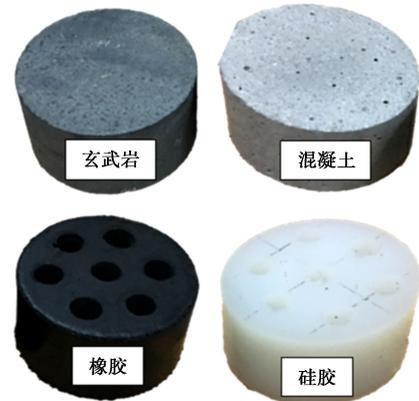


图5 试样实拍图

Fig. 5 Real shot of specimens

表1 各种试样物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical properties of testing samples

材料	厚度 /mm	密度 /(kg·m ⁻³)	单轴抗压强度 /MPa
混凝土	25	2106	28.71
玄武岩	25	2954	151.07
橡胶	10, 20, 25	1100	—
硅胶	10, 20, 25	1200	—

针对两种不同材料的阻尼层, 试样直径均为50 mm, 同时设计了3种不同的形状, 分别是圆柱状、蜂窝状及波纹状 (图6(c))。其中圆柱状为实心试样 (图6(a)), 蜂窝状是在圆柱样的基础上按照图6(b)所示位置, 裁剪掉7个半径为5 mm的圆洞, 波纹状则是在圆柱样的基础上按照图6(c)所示尺寸, 削减出3个波峰两个波谷的形状。考虑阻尼减震层与混凝土层的厚度关系^[29]的同时参考文献[28, 30]中的试验方案设计和试验要求, 两种不同材料的试样在每个形状下分别设计了10, 20, 25 mm 3种不同阻尼层厚度, 具体形状及尺寸如图6所示。

3.2 试验方案

为了研究阻尼层不同材料及结构形态对结构吸能效果的影响规律。分别选用与混凝土试样的厚度比为1:1的圆柱状、波纹状及蜂窝状的橡胶及硅胶进行试验。试验中在不同材料接触面间均擦涂适量凡士林以减小摩擦带来的能量损耗, 同时将岩样放置在入射杆一侧, 混凝土试样放置在透射杆一侧, 与地震波在到达隧道结构时的传递顺序保持一致, 试样摆放如图7所示。每组试验方案重复3次, 取最后结果的平均值,

具体试验方案如表 2, 3 所示。

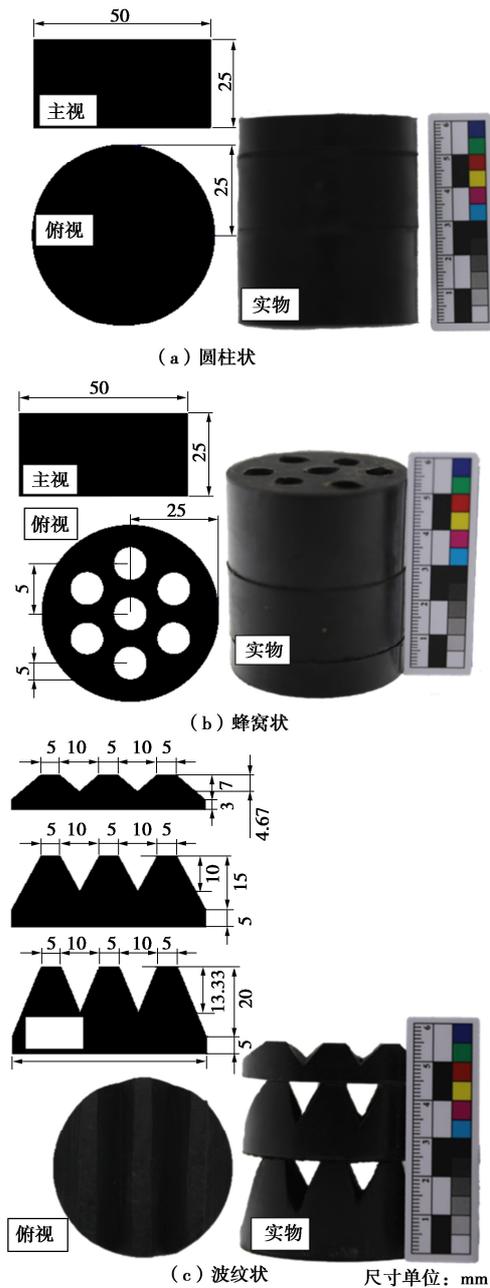


图 6 不同形状阻尼层设计与实物图

Fig. 6 Design and real shot of damping layers with different shapes

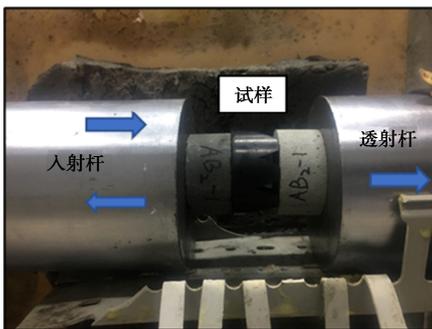


图 7 动荷载冲击

Fig. 7 Real shot of impact tests

表 2 不同阻尼层结构形态及材料试验方案

Table 2 Test schemes, involving shapes and materials of damping layers

材料	分组	形状	厚度比
橡胶	AB1	圆柱状	1 : 1
	AB2	波纹状	
	AB3	蜂窝状	
硅胶	AC1	圆柱状	1 : 1
	AC2	波纹状	
	AC3	蜂窝状	
对照组	DZ	—	1 : 1

表 3 不同阻尼层厚度试验方案

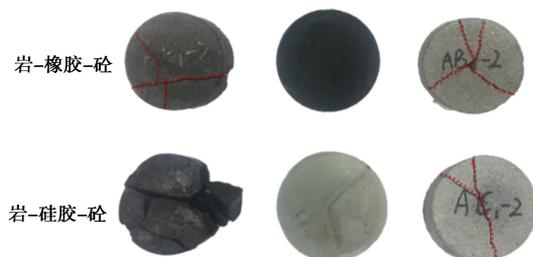
Table 3 Test schemes, involving thickness of damping layers

材料	分组	厚度比	阻尼层厚度/mm
上述试验	AD1	0.4 : 1	10
方案的最	AD2	0.8 : 1	20
优结果	AD3	1 : 1	25

在上述试验结果的基础上可以确定吸能效果最佳的阻尼层材料及其结构形状的方案, 再通过表中的试验方案进行不同阻尼层厚度的试验, 从而得到吸能效果最佳的阻尼层厚度。上述所有试验方案中加载的冲击气压均为 0.35 MPa, 即保持入射加载条件一致。

4 试验结果分析

根据表中的试验方案分别对各组试样在相同载荷条件下进行冲击试验, 图 8 展示了冲击后试样的形态。没有设置阻尼层的岩-砼对照组在动荷载冲击后破碎程度十分严重, 其中混凝土试样部分破碎成粉状颗粒。对照之下, 试验组在阻尼层的作用下, 试样均能够保持整体上相对较好的形态, 说明设置在岩-砼之间的阻尼层在动荷载的冲击下吸收耗散了大部分能量。同时可以发现动荷载的冲击下, 阻尼层的存在减弱了岩样及混凝土试样的破碎程度, 甚至能够保持未受损的完整形态, 仅出现部分试样破裂的现象, 说明该复合阻尼减震层结构受冲击荷载传递方向的影响不大, 同时尽管阻尼层是处于“夹心”位置, 不是首先受到荷载的冲击, 但阻尼层与混凝土层和岩层之间的接触导致阻尼层产生拉、压变形, 从而削弱岩样和混凝土样的破碎程度。



(a) 不同阻尼材料组合

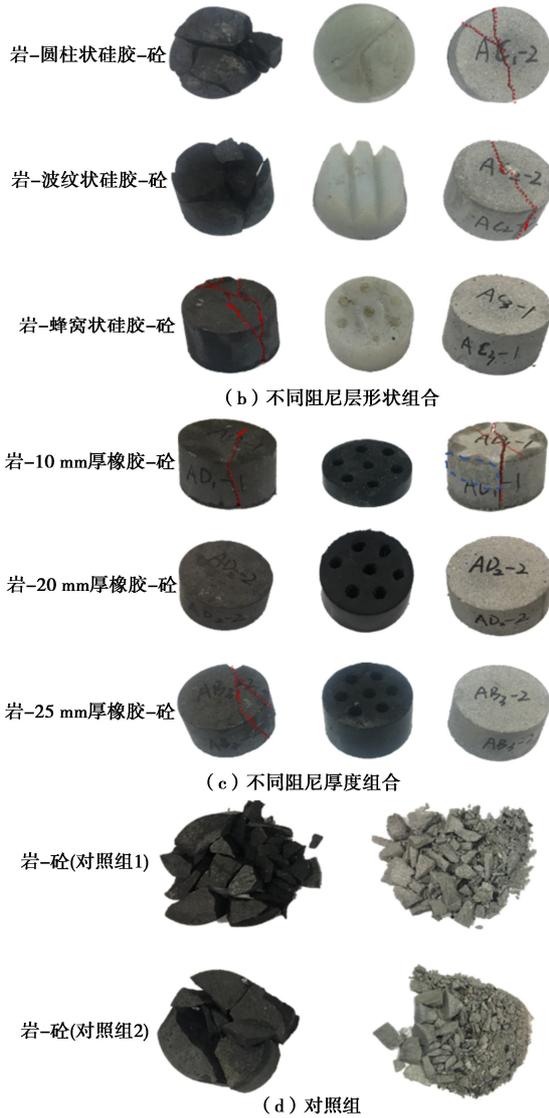


图8 冲击后的试样形态

Fig. 8 Morphologies of specimens after impact

4.1 不同阻尼层材料对吸能特性的影响

在完成冲击试验后，按照3.2节所述计算原理，获得了冲击过程中入射能量、反射能量、透射能量及试样吸收能量的变化曲线。由于各试验组变化趋势相近，在此仅列出圆柱状的橡胶和硅胶作为阻尼层以及对照组的变化趋势，如图9所示。

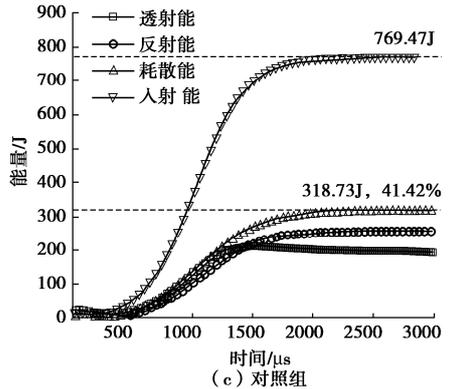
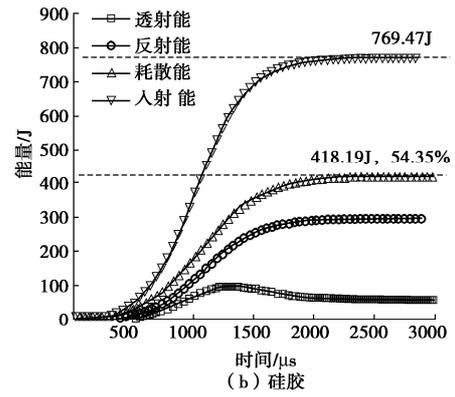
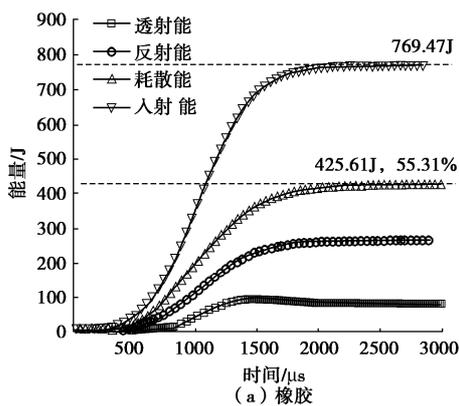


图9 不同阻尼层材料条件下 SHPB 杆中应力波能量

Fig. 9 Energy in SHPB rods under different damping layer materials

由图9可以看出，在冲击过程中，各部分能量的变化趋势相似。在对照组中，试样吸收了40.42%的能量，均作用在岩样和混凝土试样上，导致结构发生严重破碎（图8）。而设置了阻尼层的结构中试样结构均耗散了50%以上的能量，其中圆柱状硅胶作为阻尼层时，结构耗散了54.35%的入射能，而圆柱状橡胶作为阻尼层时，结构耗散了55.31%，表明相比于硅胶材料，橡胶用作阻尼层材料时具有更好的吸能效果。

将试验结构在冲击过程中耗散的能量随时间变化的速度称作为结构耗散能变化率，

$$\psi_s(t) = \frac{dW_s(t)}{dt} \quad (11)$$

式中， $\psi_s(t)$ 试验结构耗散能变化率， $W_s(t)$ 为耗散能 (J)。

试验结束后按照式 (11) 计算得到圆柱状橡胶和硅胶作为阻尼层及对照组的耗散能变化率的变化趋势，如图 10 所示。

由图10可知，试验结构耗散能变化率随时间的变化趋势整体上呈“草帽”形态分布，即先快速增大，到达峰值后再快速减小，最后慢慢趋近于零直到冲击结束变化为零。同时具有阻尼层的结构在冲击中耗散能变化率的峰值要明显大于对照组，表明阻尼层对于该结构吸能效果提升具有显著意义。同时橡胶作为阻尼层的耗散能变化率峰值相对硅胶材料时更大，并且从耗散能变化率达到峰值的时间上看，橡胶阻尼结构

要早于硅胶阻尼结构, 表明该橡胶材料的吸能效率要高于试验所用的硅胶材料。

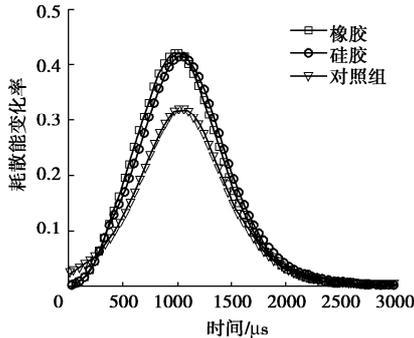


图 10 不同材料的阻尼层结构耗散能变化率

Fig. 10 Variation rate of dissipated energy of damping layer structure with different damping materials

4.2 不同阻尼层形状对吸能特性的影响

图11展示了两种材料条件下不同阻尼层形状的结构在子弹初次有效撞击入射杆的整体过程中耗散吸收能量的情况。同时该过程中每组不同结构阻尼层耗散能与入射能比值的具体情况如表所示。两种不同材料条件时均出现蜂窝状阻尼层结构吸能效果最好, 其次是圆柱状阻尼层, 最后是波纹状阻尼层。其中, 蜂窝状阻尼层结构平均耗散了57.66%的入射能, 圆柱状阻尼层结构平均耗散了54.83%的入射能, 而波纹状阻尼层结构平均耗散了52.19%的入射能。同时发现蜂窝状橡胶阻尼层结构耗散的入射能占比最高, 为58.31%, 而由图8可知, 冲击后的蜂窝状橡胶阻尼层结构中岩样和混凝土样均未发生严重破裂, 甚至保持完整的形态, 表明结构耗散的大部分能量均被橡胶阻尼层转化为内能和热能, 与龙娟^[31]结论一致。

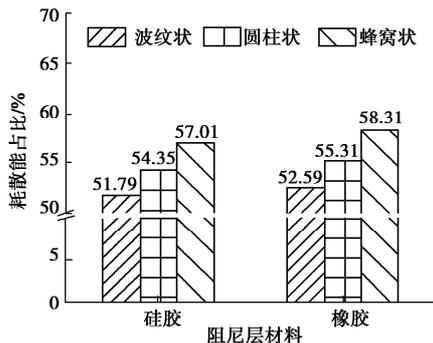


图 11 不同阻尼层形状条件下耗散能所占比例

Fig. 11 Percentage of dissipated energy under different damping layer shapes

4.3 不同阻尼层厚度对吸能特性的影响

在表4所示试验方案的结果及对阻尼层材料、形状对结构吸能特性影响分析的基础上, 按照表所示试验方案针对不同阻尼层厚度对结构吸能特性影响进行冲击试验。在保持混凝土试样厚度不变的情况下, 选择阻尼层与混凝土层厚度比分别为0.4 : 1, 0.8 : 1, 1 : 1进行试验。

表 4 不同阻尼层形状条件下耗散能占比均值

Table 4 Mean values of proportion of dissipated energy under different damping layer shapes (%)

形状	硅胶	橡胶	平均值
圆柱状	54.35	55.31	54.83
波纹状	51.79	52.59	52.19
蜂窝状	57.01	58.31	57.66

完成冲击载荷试验后, 通过计算得到圆柱状橡胶阻尼结构在3种不同厚度条件下结构耗能占比情况, 如图12所示。当阻尼层与混凝土层厚度比为0.8 : 1时, 结构耗能效果最佳, 占入射能的61.16%, 其次是厚度比为1 : 1时, 耗能占比58.31%, 最后是厚度比为0.4 : 1时, 耗能占比54.28%。表明阻尼层厚度与复合阻尼减震层结构的耗能效果是非线性关系, 并不是阻尼层厚度越厚, 结构的吸能效果越好, 与乔兰等^[28]得出的结论类似。

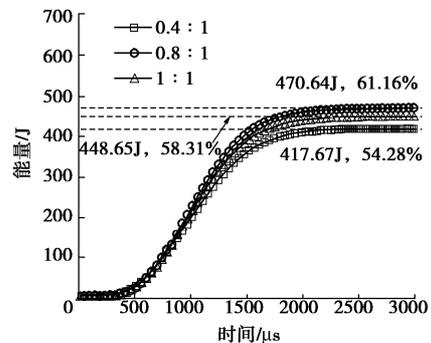


图 12 不同阻尼层厚度耗散能占比

Fig. 12 Proportion of dissipated energy under different thicknesses of damping layer

5 结 论

(1)没有设置阻尼层的对照组在动荷载冲击后破碎程度十分严重, 其中混凝土试样部分破碎成粉状颗粒, 而有阻尼层的试验组在冲击后能够保持相对较为整体甚至未受损的完整形态, 与对照组相比不同试验组结构吸收的入射能均提高了10%以上, 表明阻尼层在动荷载的冲击下吸收耗散了大部分能量, 黏弹性阻尼减震层结构具有优越的吸能特性。

(2)通过对比分析不同阻尼层材料及形状条件下结构吸能效果的影响, 发现相比于硅胶材料, 橡胶作为阻尼层时结构吸能效果最佳, 同时蜂窝状阻尼层吸能效果优于圆柱状, 最后是波纹状。其中蜂窝状橡胶阻尼层吸能效果最佳, 达到58.31%, 并且冲击后的岩样和混凝土样均未发生严重破裂, 甚至保持完整的形态, 表明结构耗散的大部分能量均由橡胶阻尼层转化为内能和热能。同时在硅胶材料作为阻尼层时, 除了蜂窝状硅胶阻尼层结构的岩样仅有裂隙出现, 其余组合的结构中岩样均发生了不同程度的破碎, 并且混凝

土试样有裂隙甚至断裂发生。

(3) 结构耗散能变化率随时间的变化整体上呈“草帽”形态分布,即先快速增大,到达峰值后再快速减小,最后慢慢趋近于零直到冲击结束变为零;同时具有阻尼层的结构在冲击中耗散能变化率的峰值明显大于对照组,表明阻尼层对于该结构吸能效果的提升具有显著意义。

(4) 对比分析所选3种不同阻尼层厚度的试验结果,发现阻尼层厚度与复合阻尼减震层结构的吸能效果是非线性关系,并不是阻尼层越厚,结构的吸能效果越好,同时阻尼层厚度为20 mm时,黏弹性阻尼减震层结构的吸能效果最佳。基于本文的试验结果及分析,黏弹性阻尼减震层结构具有较好的吸能效果,同时应合理选择阻尼层厚度,为隧道地下工程抗震结构设计提供理论和数据支撑。

参考文献:

- [1] 赵勇,田四明. 中国铁路隧道数据统计[J]. 隧道建设. 2017, **37**(5): 3 - 4. (ZHAO Yong, TIAN Si-ming. Statistics of railway tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2017, **37**(5): 3 - 4. (in Chinese))
- [2] 蒋树屏. 中国公路隧道数据统计[J]. 隧道建设. 2017, **37**(5): 1 - 2. (JIANG Shu-ping. Statistics of highway tunnels in China[J]. Tunnel Construction, 2017, **37**(5): 1 - 2. (in Chinese))
- [3] 邵根大,骆文海,李福庭,等. 强地震作用下铁路隧道衬砌耐震性的研究[J]. 中国铁道科学, 1992, **13**(2): 92 - 109. (SHAO Gen-da, LUO Wen-hai, LI Fu-ting, et al. An investigation on aseismic behaviours of railway tunnel lining during earthquake[J]. China Railway Science, 1992, **13**(2): 92 - 109. (in Chinese))
- [4] 曹廷. 西南某铁路高烈度地震山区地质选线研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (CAO Ting. Geological Route Selection of Railway Along High Seismic Mountain Region in Southwest China[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [5] WANG Z Z, GAO B, JIANG Y J, et al. Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, **52**(2): 546 - 558.
- [6] LI T B. Damage to mountain tunnels related to the Wenchuan earthquake and some suggestions for aseismic tunnel construction[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2012, **71**(2): 297 - 308.
- [7] ZHANG X P, JIANG Y J, SUGIMOTO S. Seismic damage assessment of mountain tunnel: a case study on the Tawarayama tunnel due to the 2016 Kumamoto Earthquake[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **71**: 138 - 148.
- [8] 孙铁成, 王伟, 申玉生. 材料刚度匹配关系在地下结构减震原理中作用的研究[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2010, **23**(2): 109 - 116. (SUN Tie-cheng, WANG Wei, SHEN Yu-sheng. Study on action of material stiffness matching relationship in antiseismic mechanism of underground structure[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2010, **23**(2): 109 - 116. (in Chinese))
- [9] 信春雷, 高波, 闫高明, 等. 跨走滑断层隧道地震破坏特征与抗减震措施研究[J]. 振动工程学报, 2016, **29**(4): 694 - 703. (XIN Chun-lei, GAO Bo, YAN Gao-ming, et al. Seismic damage characteristics and anti-seismic damping measures for tunnel across strike-slip faults[J]. Journal of Vibration Engineering, 2016, **29**(4): 694 - 703. (in Chinese))
- [10] 耿萍, 唐金良, 权乾龙, 等. 穿越断层破碎带隧道设置减震层的振动台模型试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, **44**(6): 2520 - 2526. (GENG Ping, TANG Jin-liang, QUAN Qian-long, et al. Shaking table test for tunnel with shock absorption layer through fault zone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, **44**(6): 2520 - 2526. (in Chinese))
- [11] 胡俊. EPS 混凝土力学性能及抗爆、抗震性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012. (HU Jun. Research on Mechanical Properties and Anti-Explosion, Seismic Performance of EPS Concrete[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012. (in Chinese))
- [12] 仇文革, 舒磊, 胡辉, 等. 高压缩性混凝土材料在隧道穿越断层带的应用及减震效果研究[J]. 材料导报, 2012, **26**(20): 154 - 157. (QIU Wen-ge, SHU Lei, HU Hui, et al. Application of high compression ratio concrete on tunnel crossing fault zone and damping effect study[J]. Materials Review, 2012, **26**(20): 154 - 157. (in Chinese))
- [13] 赵武胜, 陈卫忠, 马少森, 等. 泡沫混凝土隧道减震层减震机制[J]. 岩土力学, 2018, **39**(3): 1027 - 1036. (ZHAO Wu-sheng, CHEN Wei-zhong, MA Shao-sen, et al. Isolation effect of foamed concrete layer on the seismic responses of tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, **39**(3): 1027 - 1036. (in Chinese))
- [14] 李明俊, 苏媛, 孙向春, 等. 层合阻尼结构各向异性设计之阻尼特性分析[J]. 复合材料学报, 2002, **19**(3): 94 - 97. (LI Ming-jun, SU Yuan, SUN Xiang-chun, et al. Anisotropic design and its damping analysis of laminated damped structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2002, **19**(3): 94 - 97. (in Chinese))
- [15] 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[J]. 船舶力学, 2005(4): 109 - 118. (WANG Hui-cai, ZHAO De-you. Dynamic analysis and experiment of viscoelastic damped sandwich plate[J]. Journal of Ship Mechanics, 2005(4): 109 - 118. (in Chinese))
- [16] 曾宪奎, 贾伟臣, 陈洪帅, 等. 胶料配合剂用量对橡胶减震器减震性能的影响[J]. 橡胶工业, 2020, 67(3): 192 - 195. (ZENG Xian-kui, JIA Wei-chen, CHEN Hong-shuai, et al. Effect of compounding agent dosage on damping performance of rubber damper[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(3): 192 - 195. (in Chinese))
- [17] 李 皓, 张龙飞, 陶 忠, 等. 单跨框架教学楼橡胶隔震与 BRB 减震联合加固技术研究[J]. 世界地震工程, 2019, 35(2): 31 - 40. (LI Hao, ZHANG Long-fei, TAO Zhong, et al. Research on rubber isolation and BRB damping combined reinforcement technology for a single-span frame teaching building[J]. World Earthquake Engineering, 2019, 35(2): 31 - 40. (in Chinese))
- [18] 曾志斌, 史永吉. 黏弹性阻尼材料减振技术及其在桥梁中的应用[J]. 中国铁道科学, 2002, 23(5): 89 - 94. (ZENG Zhi-bin, SHI Yong-ji. Vibration-suppression technology of visco-elastic damping materials and its application to bridges[J]. China Railway Science, 2002, 23(5): 89 - 94. (in Chinese))
- [19] THOMPSON D J, JONES C J C, WATERS T P, et al. A tuned damping device for reducing noise from railway track[J]. Applied Acoustics, 2007, 68(1): 43 - 57.
- [20] 马学强. 黏弹阻尼减振降噪材料的阻尼性能及约束阻尼结构研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2010. (MA Xue-qiang. The Studies on Damping Properties of Viscous Elastic Damping Shock Absorbing Material and Constrained Damping Structure[D]. Qingdao: Qingdao Tehnology University, 2010. (in Chinese))
- [21] 艾 振, 黄逸哲, 李 壮, 等. 含弹性约束复合阻尼板的振动机理与特性[J]. 振动测试与诊断, 2020, 40(3): 443 - 449, 621. (AI Zhen, HUANG Yi-zhe, LI Zhuang, et al. Vibration mechanism and characteristics of composite damping plates with elastic constraints[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(3): 443 - 449, 621. (in Chinese))
- [22] 王明年. 高地震区地下结构减震技术原理的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 1999. (WANG Ming-nian. Research on Principles of Shock Absorption Technology for Underground Structures in High Seismic Areas[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 1999. (in Chinese))
- [23] GREEN S, PERKINS R. Uniaxial compression tests at varying strain rates on three geologic materials[C]// Proceedings of the 10th Symposium on Rock Mechanics, 1968, Austin.
- [24] LOGAN J M, HANDIN J. Triaxial compression testing at intermediate strain rates Triaxial compression testing at intermediate strain rates[C]// The 12th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 1970, Roola.
- [25] ZHANG Q B, ZHAO J. A review of dynamic experimental techniques and mechanical behaviour of rock materials[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(4): 1411 - 1478.
- [26] 李晓锋, 李海波, 刘 凯, 等. 冲击荷载作用下岩石动态力学特性及破裂特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2393-2405. (LI Xiao-feng, LI Hai-bo, LIU Kai, et al. Dynamic properties and fracture characteristics of rocks subject to impact loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2393-2405. (in Chinese))
- [27] LI X B, ZHOU Z L. Large diameter SHPB tests with special shape striker[J]. ISRM News J, 2009, 12: 76 - 79.
- [28] 乔 兰, 周 明, 杨建明, 等. 高阻尼橡胶用于岩石动载冲击防护的吸能特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(4): 961 - 968. (QIAO Lan, ZHOU Ming, YANG Jian-ming, et al. Experimental study on energy absorption of high damping rubber for rock under dynamic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(4): 961 - 968. (in Chinese))
- [29] MA S S, CHEN W Z, ZHAO W S. Mechanical properties and associated seismic isolation effects of foamed concrete layer in rock tunnel[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2019, 11(1): 159 - 171.
- [30] ZHOU Y X, XIA K W, LI X B, et al. Suggested methods for determining the dynamic strength parameters and mode-I fracture toughness of rock materials[C]// In the ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014. 2011, Springer.
- [31] 龙 娟. EPDM/ENR 宽温域阻尼材料的制备与阻尼机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. (LONG Juan. Preparation and Damping Mechanism Study of EPDM/ENR Damping Materral with Broad Temperature Range[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese))