DOI:10.11918/202405066

层间黏结废旧轮胎隔震垫破坏机制与力学性能

张广泰[1,2],陈韵竹[1,2],张军福[1,2],聂凡淇[1,2],陈 辉[1,2]

(1.新疆大学 建筑工程学院,乌鲁木齐 830046;2.新疆建筑结构与抗震重点实验室,乌鲁木齐 830046)

摘 要:为了将隔震技术推广应用至低层村镇建筑,研发一种造价低廉、制造工艺简单的层间黏结废旧轮胎隔震垫(LBSTP)。选用3种高韧性黏结剂,以层间黏结的方式对废旧轮胎隔震垫(STP)进行增韧补强,并开展黏结破坏试验和力学性能试验。观察废旧轮胎黏结剥离与黏结剪切的破坏现象,结合黏结破坏机制,对LBSTP力学性能进行分析。结果表明:V-SC2000黏结剂强度最高而延展性最差,鱼珠牌万能胶强度最低而延展性最好,且与压剪试验中LBSTP角部翘曲的受拉黏结破坏现象对应;卫力固-801黏结剂黏结的LBSTP-2竖向极限承载力显著高于其他支座;LBSTP-2的极限剪应变为150%,相比STP提升了50%,且具有更强的耗能能力和复位能力。LBSTP呈现出良好的力学性能,研究成果可为废旧轮胎隔震垫在村镇隔震技术中的应用提供理论参考。

关键词:层间黏结废旧轮胎隔震垫;废旧轮胎隔震垫;黏结破坏机制;力学性能

中图分类号:TU375 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2025)05-0157-09

Damage mechanisms and mechanical properties of layer-bonded scrap tire rubber pads

ZHANG Guangtai[1,2], CHEN Yunzhu[1,2], ZHANG Junfu[1,2], NIE Fanqi[1,2], CHEN Hui[1,2]

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;
2. Xinjiang Key Laboratory of Building Structures and Earthquake Resistance, Urumqi 830046, China)

Abstract: To promote the application of isolation technology in low-rise village buildings, a low-cost and easy-to-produce layer-bonded scrap tire rubber pads (LBSTP) is developed. Three types of high-toughness bonding agents were selected to reinforce the scrap tire rubber pads (STP) through interlayer bonding. Bonding failure tests and mechanical performance tests were conducted to observe the failure pehomena of bonding delamination and shear. Based on the bonding failure mehcanisms, the mechcanical properties of LBSTP were analyzed. Results show that the V-SC2000 adhesive has the highest strength but the lowest ductility, while the Yuzhu adhesive has the lowest strength but the best ductility, corresponding to the tensile bonding failure phenomena observed at the corners of LBSTP during the shear test. The LBSTP-2 bonded with Weili-801 adhesive shows a significantly higher vertical ultimate bearing capacity compared to other supports. The ultimate shear strain of LBSTP-2 is 150%, which is a 50% increase over the STP, indicating improved energy dissipation and repositioning capabilities. The LBSTP exhibits excellent mechanical properties, and the research findings provide theoretical references for the application of waste tire shock absorbers in isolation technology for village buildings.

Keywords: layer-bonded scrap tire rubber pads (LBSTP); scrap tire pads (STP); bonding failure mechanism; mechanical behavior

历次震害中,村镇建筑倒塌破坏严重,成为抗震设防中的薄弱环节[1-4]。目前,隔震技术是最广泛应用的减震手段之一,其用“以柔克刚”的方式来隔离地震、以延长结构自振周期来减少结构的地震反应。叠层钢板橡胶支座作为最常用的建筑隔震支座,过于高昂的生产成本和繁琐的设计标准致使其大多应用于大型、复杂的结构中,限制了其在村镇建筑中的使用。

目前,废旧轮胎处理方式主要有填埋、焚烧、旧轮胎翻新等[5-6],但各类回收技术均有一定的局限性,因此,亟需探寻更加简便并高效的废旧轮胎处理路径。由于废旧轮胎胎冠由钢丝网层和帘布层与橡胶共同硫化制成,将废旧轮胎片堆叠类似于叠层钢板橡胶支座的作用机制,废旧轮胎隔震垫(scrap tire

收稿日期:2024-05-28;**录用日期**:2024-07-02;**网络首发日期**:2024-07-19
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240718.1755.002
基金项目:新疆维吾尔自治区科学技术厅自然科学重点项目(2021D01D07);国家自然科学基金(52268035)
作者简介:张广泰(1963—),男,教授,博士生导师
通信作者:张广泰,zgtlxh@126.com

pads,STP)应运而生,其具有造价低、制造工艺简单、环保、减碳等优点,且适用于村镇隔震技术[7-9]。

废旧轮胎隔震垫最早由 Turer 等[10]提出,通过试验评估了不同轮胎品牌、不同层数和方向的 STP 试样的力学性能。Mishra 等[11]发现 STP 的等效阻尼比为 10% ~22%,耗能能力优越,竖向与水平刚度比为 450 ~600,满足规范要求,且 STP 表现出独特的侧翻变形,在剪切变形较大时会产生接触面分离的现象,此现象会伴随水平刚度降低,试验结果与有限元分析结果吻合。Shirai 等[12]研究了废旧轮胎隔震垫的力学性能,拟动力试验表明,STP 在水平循环载荷下滞回性能稳定,并研究了水平等效刚度和黏滞阻尼系数对剪应变、压应力、加载频率和循环次数的依赖性。

众多学者已经对 STP 进行了大量理论、试验和数值模拟研究,证明其作为低层村镇建筑隔震支座的可行性。在以往的研究中,STP 层间无黏结,仅依靠摩擦力约束,导致其整体性欠缺,韧性不佳,且轮胎胎冠存在一定翘曲,致使其竖向位移量较大。本文在 STP 研究的基础上,选用工艺简单并经济的冷黏结技术制作层间黏结废旧轮胎隔震垫(layer-bonded scrap tire rubber pads,LBSTP),以层间黏结的方式对 STP 的力学性能进行增韧补强,并开展了黏结破坏试验和支座力学性能试验,结合黏结机制着重分析其极限破坏能力、滞回性能和复位能力,所得结果可进一步为其工程推广应用提供参考。

1 层间黏结废旧轮胎隔震垫(LBSTP)

1.1 LBSTP 试件

隔震垫由 3 种常用品牌(普利司通、邓禄普、米其林)的废旧四季轮胎片层间黏结制成,轮胎片选取轮胎胎冠中间部分,每片轮胎片由一层钢丝网层和一层帘布层与橡胶共同硫化构成。参考 GB/T 528—2009《硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》[13],进行 3 种品牌废旧轮胎的 2 型哑铃试件(图 1)单轴拉伸试验,获得了试样的力-位移关系曲线(图 2),并得到橡胶的性能参数。参考 GB/T 11181—2016《子午线轮胎用钢帘线》[14]和 GB/T 19390—2023《轮胎用聚酯浸胶帘子布》[15]得出钢丝和帘线的性能参数,如表 1。隔震垫几何尺寸为 200 mm×200 mm×75 mm,橡胶的邵氏硬度(HA)为 90 度,LBSTP 实物如图 3 所示,具体参数见表 2,试件编号见表 3。



图 1 2 型哑铃试件

Fig. 1 Type 2 dumbbell specimen

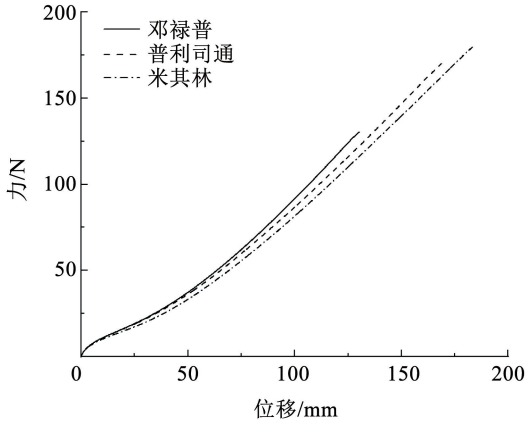


图 2 废旧轮胎橡胶材料力-位移曲线

Fig. 2 Force-displacement curves of scrap tire rubber

表 1 轮胎片材料性能

Tab. 1 Tire rubber material performance

材料	直径/mm	抗拉强度/MPa	最小断裂力/N	断裂伸长率/%
橡胶	—	12.5	76	310
钢丝	1.10	—	1 060	—
帘线	0.56	—	140	15



图 3 LBSTP 实物

Fig. 3 Layer-bonded scrap tire rubber pads

表 2 隔震垫参数

Tab. 2 Isolation pad parameters

尺寸/mm×mm	总高度/mm	橡胶层数	橡胶单层厚度/mm	钢丝网层数	帘布层层数	第一形状系数 S1	第二形状系数 S2
200×200	75	6	10	6	6	5.0	3.3

表 3 试件编号设置

Tab. 3 Specification of specimen identification numbers

编号	STP	LBSTP-1	LBSTP-2	LBSTP-3
黏结剂	—	V-SC2000	卫力固-801	鱼珠牌万能胶

1.2 黏结破坏机制

黏结结构的界面破坏行为常用断裂力学理论来

描述。界面黏结能表示产生一个单位面积的黏结界面裂纹所需的能量，也称为界面黏附功。界面黏结能[16]由黏附断裂能 Γ_0 和界面变形能 Γ_D 组成：1）黏结剂和被粘物基体材料之间的化学键断裂产生黏附断裂能 Γ_0；2）黏结剂在界面附近变形产生的能量耗散为界面变形能 Γ_D。界面黏结能 Γ 可表示为

$$\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_D \tag{1}$$

但对于被粘物基体为超弹性材料，不同于硬质黏结结构，超弹性黏结结构界面的黏结破坏复杂程度显著增加，具有典型的大变形和非线性特征。黏结破坏试验过程中的力–位移曲线为黏结剂和超弹性基体机械性能耦合影响的结果，且不可忽略，故黏结破坏耗能为界面黏结能和基体形变能的总和。考虑到轮胎橡胶的硬度远大于黏结剂的硬度，选用以条形轮胎为基体的 180°剥离试验，更能体现出轮胎整体形变对黏结破坏过程的影响。选用黏结剪切试验则可大幅减少黏结破坏时轮胎整体形变的影响，黏结剪切试验加荷后，轮胎形变贡献小，更能体现出黏结剂的黏附断裂和界面变形对黏结性能的影响。

为进一步描述界面黏结能，图 4 显示了粘接界面破坏机制。采用双线性内聚力模型[16]表征界面强度 S_{inf} 和断裂距离 δ 的关系。黏结剂界面变形具有明显的马林斯效应，黏结界面破坏遵循二次名义应力准则为

$$\left(\frac{\sigma_n}{S_{inf}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{S_{inf}}\right)^2 = 1 \tag{2}$$

式中 σ_n、σ_s 分别为裂纹表面法向和切向应力。

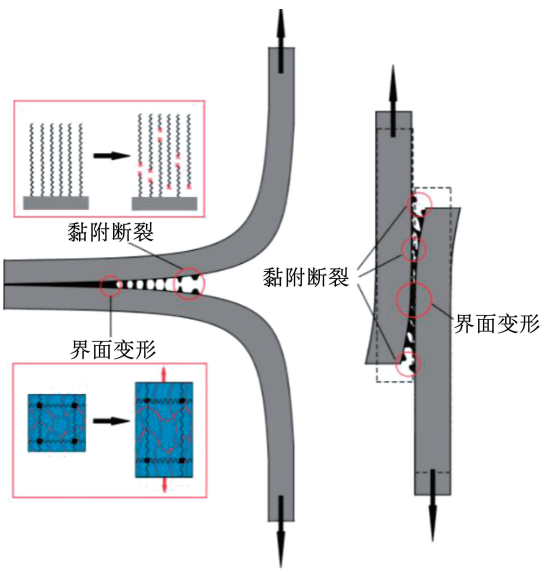


图 4　剥离与剪切过程

Fig. 4　Peeling and shear process

当表面应力满足二次名义应力准则时，黏结界面开始损伤。其中，黏结剥离试验的黏附断裂能主要产生在界面裂纹尖端附近区域，在该区域以外产生界面变形能，为线弹性变形。不同于黏结剥离试验，黏结剪切试验的黏附断裂能和界面变形能由整个黏结界面贡献。主要原因是黏结剥离的裂纹表面法向应力 σ_n 远大于切向应力 σ_s，表征为界面分离，而黏结剪切反之，σ_s 远大于 σ_n，表征为界面错动，导致了黏结剥离和黏结剪切破坏机制的不同。本文通过黏结剥离和剪切试验观察黏结破坏试验现象，并测定黏结破坏强度，以便进一步探究黏结剂对 LBSTP 力学性能的影响。

2　废旧轮胎黏结破坏机制

2.1　黏结剥离与剪切试验设计

通过剥离试验，在众多造价低廉且高韧性的黏结剂中初步选定 V-SC2000 黏结剂、卫力固-801 黏结剂、鱼珠牌万能胶。黏结剥离试验参考 GB/T 2791—1995《黏结剂 T 剥离强度试验方法 挠性材料对挠性材料》[17]进行试验设计，轮胎片切割成尺寸为 200 mm × 25 mm 的试样条进行剥离试验（图 5）。

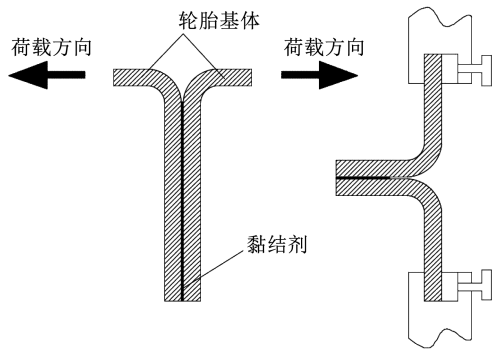


图 5　黏结剥离试验

Fig. 5　Adhesive peel test

为了减小橡胶形变对黏结性能的影响，且在实际地震作用下，剪切力为主要的作用力形式，选用黏结剪切试验对黏结剪切强度进行测定。参考 GB/T 35465.6—2020《聚合物基复合材料疲劳性能测试方法第 6 部分：胶粘剂拉伸剪切疲劳》[18]，设计黏结剪切试验试样的尺寸，如图 6 所示。

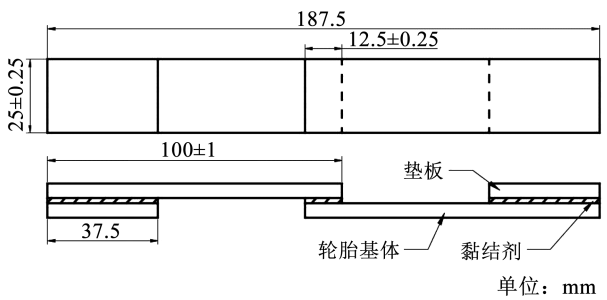


图 6　黏结剪切试验试样尺寸

Fig. 6　Adhesive shear test sample dimensions

黏结剥离试验和黏结剪切试验采用万能试验机,加载速率为 50 mm/min,该速度慢到足以忽略黏结剂黏度的贡献[19],加载至黏结破坏,以测试 3 种黏结剂黏结结构界面的剥离强度[17]和剪切强度。

2.2 黏结破坏形式

通过观察黏结结构的失效形式,进一步判定超弹性黏结结构黏结效果的优劣。黏结破坏形式[20](图 7)为:1)橡胶的内聚破坏,说明黏结剂的黏结性能和强度均达到要求,从而导致黏结剪切时的破坏发生在橡胶部分;2)黏结剂的内聚破坏,说明黏结剂与橡胶的黏结性能满足要求,但黏结剂本身的强度还未达到要求;3)界面破坏,破坏现象为黏结层和橡胶之间的界面脱开,此时的黏结强度取决于界面强度;4)混合破坏,破坏现象兼具内聚破坏和界面破坏的特征。其中,黏结破坏现象的优劣规律为内聚破坏 > 混合破坏 > 界面破坏。黏结剥离与剪切试验破坏形式如表 4。

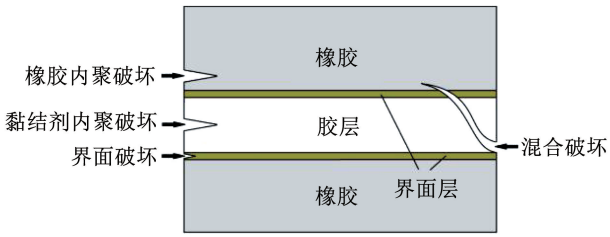


图 7 4 种黏结破坏形式

Fig. 7 Four types of adhesive failure modes

表 4 黏结剥离与剪切试验参数

Tab. 4 Adhesive peel and shear test parameters

黏结剂	剥离破坏形式	剪切破坏形式	剥离力/N	剪切力/N	剥离强度/(kN·m^{-1})	剪切强度/MPa
V-SC2000	橡胶内聚破坏	黏结剂内聚破坏	113.7	598.84	4.548	1.916
卫力固-801	混合破坏(内聚破坏为主)	混合破坏(界面破坏为主)	92.7	463.23	3.708	1.482
鱼珠牌万能胶	界面破坏	界面破坏	67.2	418.82	2.688	1.340

2.3 黏结剥离与剪切试验分析

图 8 为卫力固-801 黏结剂的剥离与剪切试验图,图 9 为黏结剥离曲线,曲线存在多个峰值且波动明显,一小部分黏结剂的黏附断裂伴随着剥离力的下降,随着界面裂缝的扩展,之前未发生界面变形和界面断裂的黏结剂开始贡献剥离强度,导致剥离力上升,黏结界面裂纹断裂、扩展又再次断裂,致使曲线多次波动。在 180°剥离试验中,可以观察到黏结界面一定区域内存在黏结剂“藕断丝连”的情况,原因为废旧轮胎胎面橡胶较硬且带有钢丝网层和帘布层,轮胎条产生 90°弯曲变形需要更长的传力路径,故界面变形区域较大。

黏结剪切曲线如图 10 所示,均有明显上升段和下降段,卫力固-801 黏结剂和鱼珠牌万能胶由于其韧性,界面完全断裂前存在平台段,其中,鱼珠牌万能胶延展性最好,而 V-SC2000 黏结剂延展性较弱。试验现象表明,剪切界面完全滑动后,卫力固-801 黏结剂和鱼珠牌万能胶仍存在大量界面变形区域,仍有一定的承载能力,而 V-SC2000 黏结剂发生大量黏附断裂,界面完全丧失承载能力。

黏结剂的剥离强度和剪切强度计算结果见表 4。3 种试件的剥离试验黏结破坏形式、剥离强度、剪切强度均呈现出一致的黏结强度优劣规律:V-SC2000 黏结剂 > 卫力固-801 黏结剂 > 鱼珠牌万能胶。试验结果的剥离力远小于剪切力,表明黏结剂的抗拉薄弱而抗剪性能良好,有利于满足实际地震工况剪切黏结性能的需求。原因为黏结剥离试验的黏附断裂主要产生在界面裂纹尖端附近区域,区域较小,而黏结剪切试验的黏附断裂存在于整个黏结界面区域,致使剪切力远大于剥离力。



(a) 黏结剂界面剥离形态 (b) 黏结剂界面剪切形态

图 8 黏结剥离与剪切试验

Fig. 8 Adhesive peel and shear tests

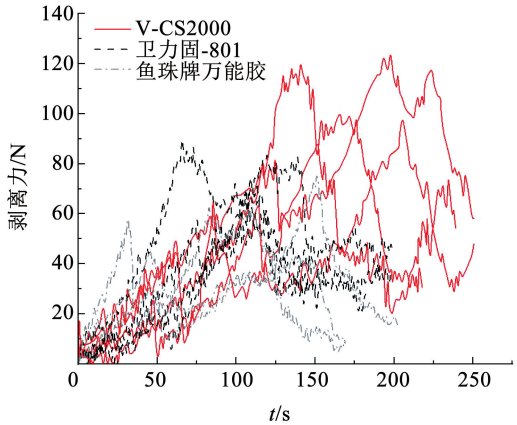


图 9 黏结剥离试验曲线

Fig. 9 Adhesive peel test curves

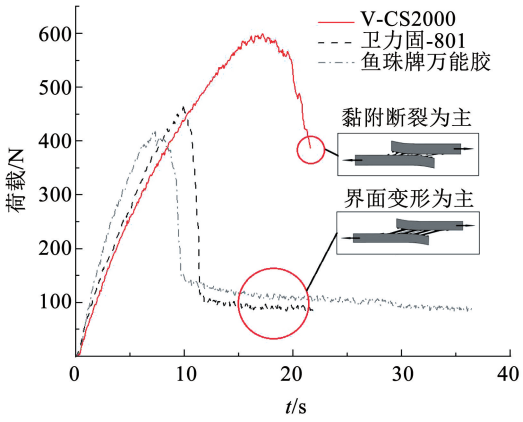


图 10　黏结剪切试验曲线

Fig. 10　Adhesive shear test curves

3　STP 与 LBSTP 竖向力学性能对比分析

3.1　竖向试验设计

竖向压缩试验如图 11 所示，加载仪器采用 WAW1000 型压力试验机，加载速率为 0.1 MPa/s。试验测试内容：1）竖向压缩刚度，设计压应力 σ_0 为 5 MPa，参考 GB/T 20688.1—2007《隔震橡胶支座试验方法》[21]，竖向压应力加载至 σ_0，然后以 σ_0 ±30% 循环加载，取第 3 次滞回曲线计算竖向压缩刚度；2）竖向极限承载力，恒定速率竖向加载直至曲线第 1 次突降并伴随着爆鸣声的出现，以此判定试件达到承载力极限状态。

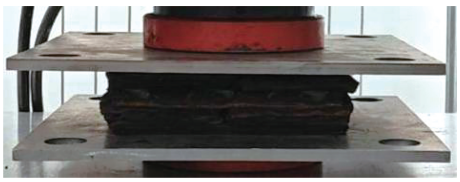


图 11　竖向力学性能试验

Fig. 11　Vertical mechanical performance tests

3.2　竖向力学性能分析

竖向压缩试验过程中，承载力明显波动时均伴随着爆鸣声，爆鸣声前后均有劈啪声，但不同试件响声的大小和密集程度略有不同。相比无黏结的 STP，LBSTP 破坏时产生的噼啪声和爆鸣声更大，噼啪声更密集。原因为黏结剂约束基体橡胶形变，持续加压后局部黏结约束达到极限，界面产生黏附断裂伴随着劈啪声，对橡胶的形变约束减弱，基体橡胶形变促使临近的帘布层与钢丝网一同膨胀变形，局部帘布层达到极限断裂产生爆鸣声。局部帘布层断裂导致承载力明显波动，由于帘布层是一同硫化在轮胎片中的，继续施压会使得临近区域继续发生上述现象，这便是承载力曲线多次波动且时间接近的原因。其中，LBSTP-1 噼啪声和爆鸣声最响，但噼啪声密集程度最弱，原因为黏结破坏试验中表征 V-SC2000 黏结剂强度最高而延展性最差，黏结破坏需要积攒较大的能量，破坏更具突然性。

竖向荷载–位移曲线如图 12 所示，3 种 LBSTP 曲线接近，界面黏结使得层间空隙小，以致竖向位移较小。对比曲线波动差异可以看出，LBSTP 波动幅度较大，与爆鸣声大小规律一致，V-SC2000 黏结剂黏附断裂强度最大，致使 LBSTP-1 试验曲线波动幅度最大。卫力固-801 黏结剂成分中的氯丁二烯使得黏结剂完全固化后，施加一定压应力仍有相当强度的黏结效果，故在受压状态下，黏结界面不易产生黏附断裂，对基体橡胶约束稳定，致使 LBSTP-2 试验曲线在仪器量程范围内迟迟未产生波动，其极限承载力大于 950 kN，提升了至少 100 kN。竖向压缩刚度和极限承载力见表 5，LBSTP-1 和 LBSTP-3 与 STP 极限承载力差别不大，表征 V-SC2000 黏结剂和鱼珠牌结剂的约束不足以延迟帘布层的破坏。

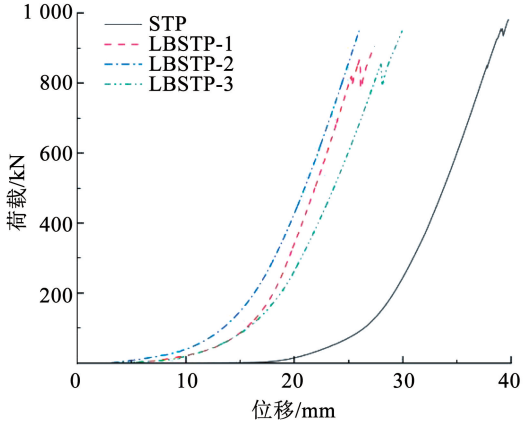


图 12　竖向荷载–位移曲线

Fig. 12　Vertical load-displacement curves

表 5　隔震垫竖向力学性能

Tab. 5　Vertical mechanical properties of isolation pads

试件编号	压缩刚度/(kN·mm^{-1})	极限承载力/kN
STP	107.086	852.48
LBSTP-1	96.088	820.02
LBSTP-2	84.479	>950
LBSTP-3	91.515	855.67

4　STP 与 LBSTP 水平力学性能对比分析

4.1　压剪试验设计

水平压剪试验加载仪器采用 1 000 t 的微机控制电液伺服压剪试验机，如图 13 所示，竖向压应力为 5 MPa，加载频率为 0.03 Hz。选用正弦波加载，加载剪应变 γ 等级依次为 20%、60%、80%、100%、

110%、120%、130%、140%、150%，每级循环 3 次。参考 JG/T 118—2018《建筑隔震橡胶支座》[22]，取第 3 圈滞回曲线计算试件的剪切性能参数，出现加载往复 3 圈的滞回曲线明显不重合，则判定试件在该加载剪应变 γ 等级下达到极限状态。

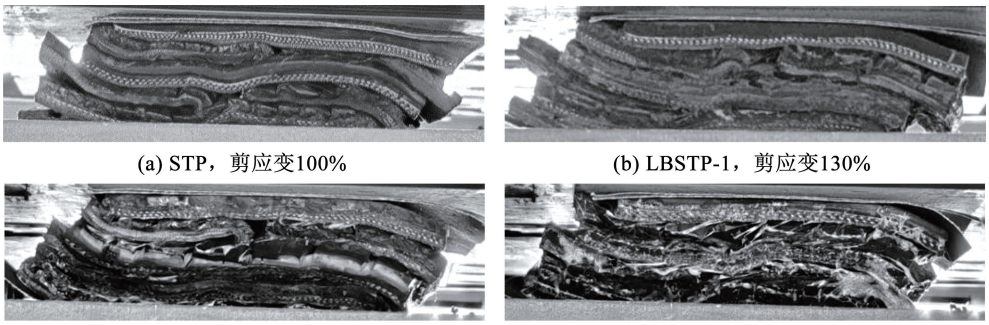


图 13 压剪试验机

Fig. 13 Shear compression test machine

4.2 压剪试验现象

在压剪试验过程中，无黏结 STP 主要试验现象有：角部边缘两层轮胎片翘曲；γ = 60% 时错层滑动明显；γ = 80% 时侧面翻转至上下平面。LBSTP 主要试验现象则为：γ = 100% 内仍可复位，且损伤较小；顶底面翘曲；层间侧边缘发生黏结破坏的同时，出现 3 圈滞回环不重合。综合 LBSTP 的变形现象，可分为 3 个工作阶段，即纯剪切变形、翻转变形、层间侧边缘黏结破坏。如图 14 所示，在剪切变形下的 LBSTP 侧边缘发生翘曲，黏结界面压应力基本为零，因此，第 3 阶段试件侧边缘的黏结破坏现象与黏结剪切破坏现象一致。STP 和 LBSTP-1 破坏时，层间滑动明显，而 LBSTP-2 和 LBSTP-3 破坏时，侧边缘黏结界面的“藕断丝连”现象明显。



(a) STP，剪应变100%　(b) LBSTP-1，剪应变130%

(c) LBSTP-2，剪应变150%　(d) LBSTP-3，剪应变140%

图 14 极限剪切变形

Fig. 14 Ultimate shear deformation

4.3 滞回曲线与骨架曲线

支座滞回曲线和骨架曲线如图 15 ~ 17 所示，可归纳以下几点特征：1）滞回曲线平滑且饱满，表明 4 种支座的压剪性能优越；2）每级加载会产生一定损伤，致使水平等效刚度退化现象的产生，LBSTP-3 水平等效刚度退化现象最明显，表征鱼珠牌黏结剂在剪切滞回中损伤最大；3）剪应变增加导致黏结界面对层间约束增强，故 LBSTP-1、LBSTP-2 试件有明显的大变形硬化现象，而鱼珠牌黏结剂黏结强度较弱且延展性过大，致使 LBSTP-3 大变形硬化现象不明显；4）LBSTP-2 滞回曲线在 150% 剪应变内始终未出现明显的退化现象；5）不同黏结剂 LBSTP 骨架曲线表征的滞回抗剪强度趋势与黏结剪切试验结论一致；6）不同于层间黏结的延展性约束，STP 变形能力最弱，大部分靠轮胎片层间摩擦抵抗剪切变形，致使其骨架曲线最刚；7）LBSTP-2 极限剪切变形最大，相比其他试件水平等效刚度退化最弱，且抗剪能力良好。

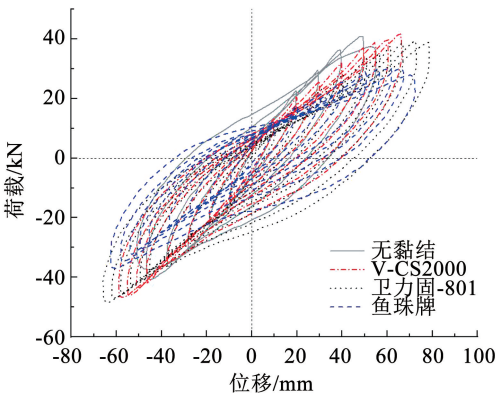


图 15 第 3 圈滞回曲线

Fig. 15 The 3rd hysteresis curve

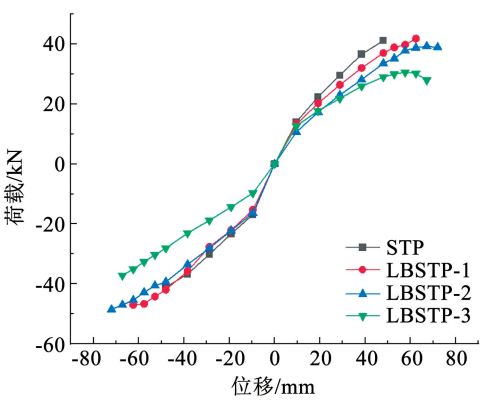


图 16 支座骨架曲线

Fig. 16 Bearings frame curves

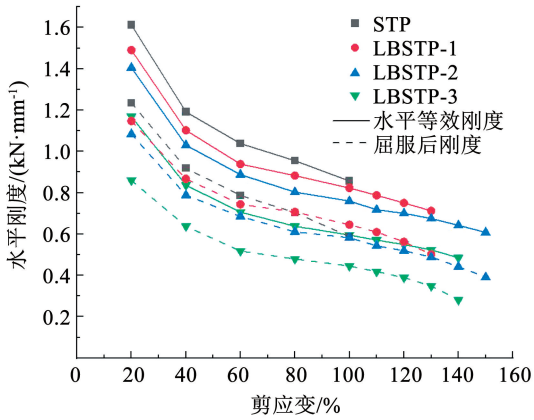


图 17　支座水平刚度

Fig. 17　Horizontal stiffness of bearings

4.4　水平力学性能分析

表 6 为试件的基本力学性能，可以看出，黏结剂强度越大，对橡胶剪切变形约束越强，不同黏结剂 LBSTP 水平等效刚度的大小关系基本与前期的黏结强度规律一致。LBSTP-2 的极限剪应变最大，相比 STP 提升了 50%，且在极限剪应变 150% 时，3 圈滞回曲线轻微不重合，LBSTP-2 试件相较于其他试件没有明显的破坏。原因为卫力固-801 胶成分中的氯丁二烯致使界面黏附断裂后再次施加一定压应力，界面具有相当强度的黏性，故 LBSTP-2 在压剪循环试验过程中边缘翘曲区域再次滞回受压后，仍可恢复一定黏结强度，导致 LBSTP-2 试极限剪应变更大，残余位移比较小。

表 6　隔震垫水平力学性能

Tab. 6　Horizontal mechanical performance of isolation pads

试件编号	水平等效刚度			极限剪应变/%	第 3 圈滞回耗能/(kN·mm)			等效阻尼比			残余位移比/%
	γ=20%	γ=60%	γ=100%		γ=20%	γ=60%	γ=100%	γ=20%	γ=60%	γ=100%	γ=100%
STP	1.612	1.038	0.857	100	122.022	732.022	2 239.203	0.131	0.135 2	0.180	45.1
LBSTP-1	1.490	0.939	0.823	130	110.858	544.339	1 465.555	0.128	0.111 2	0.123	33.6
LBSTP-2	1.405	0.887	0.759	150	112.235	588.332	1 432.739	0.138	0.127 1	0.130	34.7
LBSTP-3	1.168	0.706	0.595	140	101.172	540.931	1 237.371	0.149	0.147 0	0.144	40.7

为了更好地揭示支座的水平力学性能，基于滞回曲线计算水平等效刚度、屈服后刚度、等效阻尼比、屈服力、第 3 圈滞回环包络面积、残余位移以及复位率，如图 17 ~ 20 所示。其中，复位率定义为复位位移与对应加载等级下剪切位移之比。由图 17 可知，水平等效刚度和屈服后刚度随剪应变增加而递减，剪应变 80% 后减幅减缓，两种水平刚度变化趋势基本一致，屈服后刚度相比水平等效刚度小 20%~40%，侧面说明滞回曲线稳定且比较饱满。选用的 3 种黏结剂均具有高韧性，水平刚度相当于黏结界面刚度和 STP 水平刚度的串联，致使 LBSTP 的水平刚度比 STP 的低。图 18 表明，等效阻尼比均大于 10%，可视为高阻尼隔震支座，均有先减小后增大的趋势。LBSTP-3 的等效阻尼比在剪应变 60% 时出现峰值，结合图 18，剪应变 60% 时的复位率大幅下降，可判定峰值出现的原因在于隔震垫内部产生损伤。LBSTP-2 的等效阻尼比标准差为 0.021，表征其滞回性能稳定。由图 19 可知，LBSTP 的耗能差值波动不大，且趋势一致，表明耗能的变化受黏结剂种类影响较小，而 STP 的层间错动显著，以增加损伤为代价，其耗能值大于 LBSTP 的值。图 20 表明，在剪应变 100% 以内，LBSTP-1 的复位能力最优，LBSTP-2 次之，而在剪应变大于 100% 后，LBSTP-2 的复位能力最优，LBSTP-1 次之。LBSTP-3 的复位能力最差，残余变形相对较大，主要是由鱼珠牌黏结剂延展性大但强度不够导致的，即其黏结界面约束能力相对欠缺，此原因也同样导致其水平等效刚度和屈服后刚度最小。综上，明显表征 LBSTP-2 的水平力学性能在绝大多数情况最优，选用此黏结剂大幅提升了 STP 的力学性能。

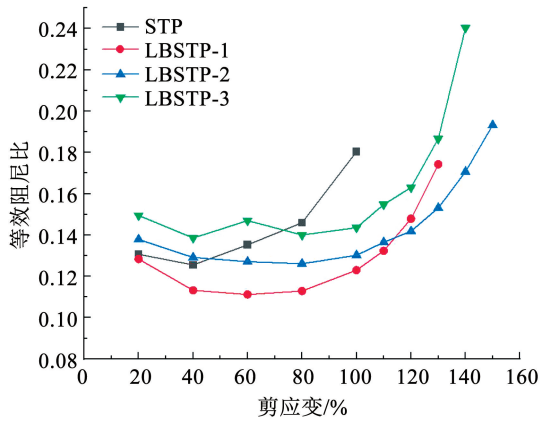


图 18　支座等效阻尼比

Fig. 18　Equivalent damping ratio of bearings

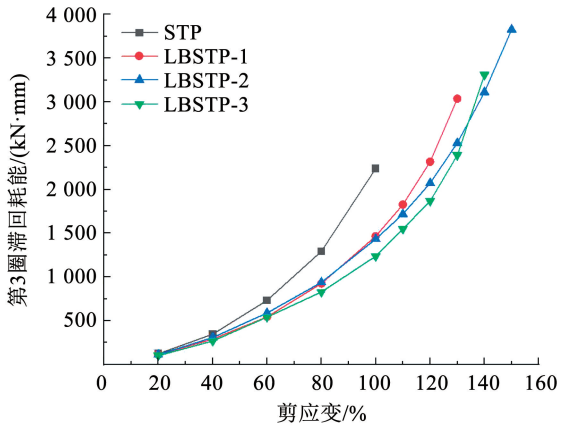


图 19 第 3 圈滞回环面积

Fig. 19 Envelope area of the 3rd hysteresis curve

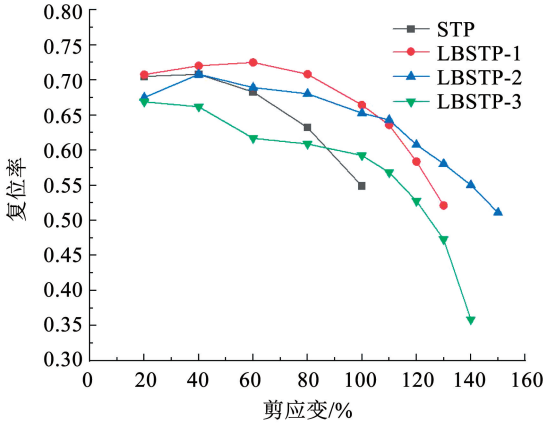


图 20 支座复位率

Fig. 20 Recentering rate of bearings

5 结 论

1)黏结破坏试验表明,3 种试件黏结强度优劣规律为 V-SC2000 黏结剂 > 卫力固-801 黏结剂 > 鱼珠牌万能胶。废旧轮胎黏结剥离的黏附断裂主要产生在界面裂纹尖端附近区域,废旧轮胎黏结剪切试验的黏附断裂存在于整个黏结界面区域,致使剥离强度远小于剪切强度,表明黏结剂的抗拉性能薄弱而抗剪性能良好,也与压剪试验中 LBSTP 角部翘曲的受拉黏结破坏现象对应。

2)卫力固-801 黏结剂黏结的 LBSTP-2 受压状态下黏结界面不易产生黏附断裂,对基体橡胶约束稳定,故 LBSTP-2 竖向极限承载力大于 950 kN,且相比 STP 提升了至少 12%。

3)压剪试验中,卫力固-801 黏结剂黏结的 LBSTP-2 和鱼珠牌万能胶黏结的 LBSTP-3 侧边缘黏结界面的“藕断丝连”现象明显,与黏结破坏试验结果一致,即此两种黏结剂破坏形式以黏结界面变形为主。LBSTP-2 的极限剪应变为 150%,相比 STP 提升了 50%。但黏结层间错位限制了 LBSTP 极限剪应变进一步提升,如何提高 LBSTP 的黏结质量和剪切变形能力将是后续研究的重点。

4)综合 LBSTP-2 力学性能看,隔震垫竖向承载力大,水平刚度小,耗能能力好,等效阻尼比大于 12%,复位率始终能保持在 50% 以上。卫力固-801 黏结剂对 STP 的竖向承载力、极限剪应变和复位能力提升显著,实现了隔震垫力学性能上的增韧补强效果。有利于 LBSTP 在村镇建筑隔震技术中推广使用。

参考文献

[1]李钢, 刘晓宇, 李宏男. 汶川地震村镇建筑结构震害调查与分析[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 724
LI Gang, LIU Xiaoyu, LI Hongnan. Seismic damage investigation and analysis on rural buildings in Wenchuan earthquake[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, 49(5): 724. DOI:10.7511/dllgxb200905017

[2]潘毅, 王忠凯, 曲哲, 等. 尼泊尔自建 RC 框架结构的抗震能力分析[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 304
PAN Yi, WANG Zhongkai, QU Zhe, et al. Seismic performance of owner-built RC frame structures in Nepal[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 304. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20170755

[3]戴必辉, 陶忠, 徐国林, 等. 云南漾濞 MS6.4 级地震震中区农房震害调查[J]. 世界地震工程, 2021, 37(3): 9
DAI Bihui, TAO Zhong, XU Guolin, et al. Investigation of seismic damage to rural houses in the epicenter area of Yangbi MS 6.4 earthquake in Yunnan[J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(3): 9. DOI:10.3969/j.issn.1007-6069.2021.03.002

[4]陈云, 董金爽, 张奉超. 泸定县 6.8 级地震村镇建筑震害调查与分析[J]. 振动与冲击, 2024, 43(6): 121
CHEN Yun, DONG Jinshuang, ZHANG Fengchao. Seismic damage investigation and analysis on rural buildings in the Ms 6.8 Luding earthquake[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(6): 121. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2024.06.013

[5]POLICELLA M, WANG Z, BURRA K G, et al. Characteristics of syngas from pyrolysis and CO_2-assisted gasification of waste tires[J]. Applied Energy, 2019, 254: 113678. DOI:10.1016/j.apenergy.2019.113678

[6]国家统计局. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报[N]. 人民日报, 2024-03-01(10)

[7]田原源, 熊峰. 废旧轮胎垫隔震层的拟静力实验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(3): 191
TIAN Yuanyuan, XIONG Feng. Research on seismic behavior of scrap tire seismic isolation pads (STP) by periodical quasistatic test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(3): 191. DOI:10.13197/j.eeev.2014.03.191.tianyy.025

[8]张广泰, 曹银龙, 陆东亮, 等. 热氧老化下废旧轮胎隔震垫隔震性能及压应力相关性研究[J]. 材料导报, 2020, 34(24): 24170
ZHANG Guangtai, CAO Yinlong, LU Dongliang, et al. Study on correlation between seismic isolation performance and compressive stress of waste scrap tire pads under thermal oxygen aging[J].

Materials Reports, 2020, 34(24): 24170. DOI:10.11896/cldb.19100131

[9]张广泰，章金鹏，王明阳，等. 老化-荷载耦合作用下废旧叠层轮胎隔震垫隔震性能[J]. 吉林大学学报(工学版)，2021，51(1)：96
ZHANG Guangtai, ZHANG Jinpeng, WANG Mingyang, et al. Seismic isolation performance of waste scrap tire pads under aging-loading coupling[J]. Materials Reports, 2021, 51(1): 96. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb20190861

[10]TURER A, OZDEN B. Seismic base isolation using low-cost scrap tire pads (STP)[J]. Materials and Structures, 2008, 41(5): 891. DOI:10.1617/s11527-007-9292-3

[11]MISHRA H K, IGARASHI A, MATSUSHIMA H. Finite element analysis and experimental verification of the scrap tire rubber pad isolator[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2013, 11(2): 687. DOI:10.1007/s10518-012-9393-4

[12]SHIRAI K, PARK J. Use of scrap tire pads in vibration control system for seismic response reduction of buildings[J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2020, 18(3): 48. DOI: 10.1007/s10518-020-00787-2

[13]中橡集团沈阳橡胶研究设计院. 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定：GB/T 528—2009[S]. 北京：中国标准出版社，2009
China Rubber Group Shenyang Rubber Research and Design Institute. Rubber, vulcanized or thermoplastic-determination of tensile stress-strain properties: GB/T 528—2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009

[14]江苏兴达钢帘线股份有限公司. 子午线轮胎用钢帘线：GB/T 11181—2016[S]. 北京：中国标准出版社，2016
Jiangsu Xingda Steel Cord Co Ltd. Steel cord for radial tyre: GB/T 11181—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016

[15]江苏太极实业新材料有限公司. 轮胎用聚酯浸胶帘子布：GB/T 19390—2023[S]. 北京：中国标准出版社，2023
Jiangsu Taiping Industrial New Materials Co Ltd. Dipped polyester cord fabric for tyres: GB/T 19390—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023

[16]ZHANG T, YUK H, LIN S, et al. Tough and tunable adhesion of hydrogels: experiments and models[J]. Acta Mechanica Sinica, 2017, 33(3): 543. DOI:10.1007/s10409-017-0661-z

[17]上海橡胶制品研究所. 胶粘剂 T 剥离强度试验方法 挠性材料对挠性材料：GB/T 2791—1995[S]. 北京：中国标准出版社，1995
Shanghai Rubber Products Research Institute. Adhesives, T peel strength test method for a flexible-to-flexible test specimen assembly: GB/T 2791—1995[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995

[18]北京玻璃钢研究设计院有限公司. 聚合物基复合材料疲劳性能测试方法第 6 部分：胶粘剂拉伸剪切疲劳：GB/T 35465.6—2020[S]. 北京：中国标准出版社，2020
Beijing Fiberglass Research and Design Institute Co Ltd. Adhesives, test method for fatigue properties of polymer matrix composite materials. Part 6: fatige properties of adhesives in shear by tension: GB/T 35465.6—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020

[19]AFFERRANTE L, CARBONE G. The ultratough peeling of elastic tapes from viscoelastic substrates[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2016, 96: 223. DOI:10.1016/j.jmps.2016.07.013

[20]关世伟. 胶接接头破坏分析[J]. 中国胶粘剂，2015，24(2)：57

[21]广州大学工程抗震研究中心. 橡胶支座第 1 部分：隔震橡胶支座试验方法：GB/T 20688.1—2007[S]. 北京：中国标准出版社，2007
Guangzhou University Engineering Seismic Research Center. Rubber bearings. Part 1: seismic-protection isolators test methods: GB/T 20688.1—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007

[22]中国建筑科学研究院. 建筑隔震橡胶支座：JG/T 118—2018[S]. 北京：中国标准出版社，2018
China Academy of Building Research. Rubber isolation bearings for buildings: JG/T 118—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018

(编辑　刘　彤)