

老化-荷载下叠层轮胎隔震垫恢复力模型研究

张广泰^{1,2}, 王明阳^{1,2}, 张文梅¹, 章金鹏¹

(1. 新疆大学建筑工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆建筑结构与抗震重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要: 为研究老化-荷载作用下废旧叠层轮胎隔震垫(Scarp Tire Rubber Pads, STP)恢复力模型,对 72 个尺寸为 180 mm×180 mm×69 mm 的 STP 经受 0, 77, 154, 231, 308 h 老化时间、5 MPa 荷载作用后进行低周反复加载试验,分析 STP 的破坏特征、承载力衰减、刚度退化、滞回耗能特性。基于试验结果,得到带有负刚度段的三折线骨架曲线,并结合未老化-荷载作用下 STP 恢复力模型特征参数,得到考虑老化-荷载作用下 STP 骨架曲线特征点计算公式;采用基于滞回耗能的循环退化指数建立了可考虑老化-荷载作用下 STP 试件的捏缩效应、承载力衰减和刚度退化的恢复力模型。研究表明:老化-荷载作用对 STP 在实际老化时间为 50 a 内的滞回耗能没有损伤,且因 STP 表层橡胶老化硬化而增加;基于循环退化指数建立的 STP 恢复力模型,与试验滞回曲线对比,两者基本吻合,在一定程度上验证了该恢复力模型的准确性和适用性。

关键词: 废旧叠层轮胎隔震垫; 隔震性能; 老化-荷载作用; 循环退化指数; 恢复力模型

中图分类号: TU352.12; TU317⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2021)04-0809-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.04.018

引言

废旧叠层轮胎隔震体系是一种适用于高烈度村镇建筑的新型基础隔震措施,其构造简单,施工方便,价格低廉,具有良好的经济效益和推广价值,并且符合农村隔震实情^[1]。然而由于橡胶材料极易在荷载、氧气、紫外线等条件下发生老化,从而影响废旧叠层轮胎隔震垫的力学性能和隔震性能^[2-4]。目前关于橡胶隔震支座的老化试验较多,但大多数研究主要基于单因素下的老化研究^[5-6],对于荷载作用下废旧叠层轮胎隔震垫在热氧老化作用下的隔震性能研究较少,使其在村镇建筑中的应用受到一定的阻碍。理想的恢复力模型可较好地反映叠层轮胎隔震垫在地震作用下的受力情况,在废旧轮胎隔震体系弹塑性地震反应分析中至关重要,因此建立老化-荷载耦合作用下叠层轮胎隔震垫恢复力模型是亟需解决的问题。

目前,国内外关于橡胶隔震支座的经典恢复力模型有:Pan 等^[7]将隔震支座剪力用恢复力方程和阻尼力方程表示,其中恢复力方程用来描述力与位移滞回关系的骨架曲线,阻尼力方程则用来描绘滞回性能,但是模型中参数较多,且参数难以准确确定。Jankowski^[8]在 Pan 模型的基础上,提出了高阻尼橡胶支座的非线性应变率模型,在模型中考虑了应变

和速率的影响,但是无法反映设计压应力对恢复力的影响。Dall 等^[9]对高阻尼橡胶隔震支座在不同应变率和幅值下做了大量的水平剪切试验,基于试验结果,提出了高阻尼橡胶隔震支座的非线性应变率模型。Bhuiyan 等^[10]合理考虑应变率非线性模型,提出高阻尼流变模型。但上述研究均是针对无环境因素影响下试件或构件的荷载-位移曲线关系,并未考虑耐久性对其恢复力模型的影响,且参数复杂,针对 STP 恢复力的计算有一定的局限性,对在热氧老化、荷载共同作用下 STP 隔震性能和其恢复力模型的研究鲜有报道。

鉴于此,基于几何尺寸为 180 mm×180 mm×69 mm 的 72 个 STP 经受 0, 77, 154, 231, 308 h 老化时间、5 MPa 荷载作用下的拟静力试验结果,得到 5 MPa 荷载作用、不同老化时间下 STP 骨架曲线模型和考虑捏拢效应的循环退化指数,基于此建立老化-荷载作用下 STP 恢复力模型。结合试验结果,对该环境因素下的恢复力模型进行验证,从而为老化-荷载作用下 STP 隔震结构的隔震性能评估提供理论依据。

1 试验概况

1.1 STP 参数和试验装置

STP 主要成分为橡胶层、钢丝网层、卷帘布层

等,其中一片轮胎包含着两层钢丝网层及一层卷布层,其总厚约为1.5 mm。STP试件选取废旧四季轮胎切割叠放而成,具体参数如表1所示,STP实物图如图1所示,连接方式如图2所示。

表1 废旧轮胎基本参数

Tab. 1 Basic parameters of used tires

品牌	胎冠型号	胎面花纹名称	胎面花纹深度	生产周号	载重指数
邓禄普	185/60R15	VE301	1.6 mm	2113	95

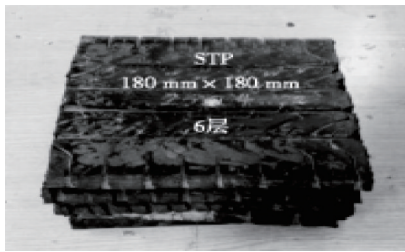


图1 STP实物图

Fig. 1 Actual picture of STP

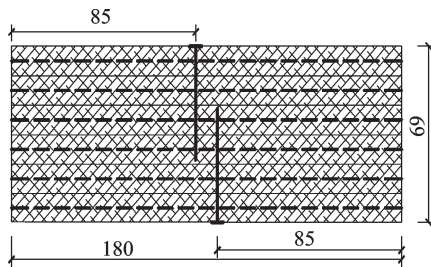


图2 连接方式(单位:mm)

Fig. 2 Connection type of STP(Unit:mm)

老化加载试验选用101-3A型电热恒温鼓风干燥箱,制作加载模具的Q235钢板厚度为20 mm,尺寸为280 mm×280 mm,开洞半径为14 mm,加载模具如图3所示,热氧老化过程STP放置位置如图4所示,STP试件参数如表2所示。

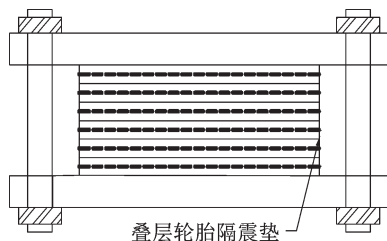


图3 加载模具示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the loading mold

老化后STP的墙下拟静力试验中的竖向加载试验装置采用JSKF-IV/31.5-8计算机全数字伺服液压机,其在墙下隔震体系的布置方式如图5所示。其中, N 为竖向压(kN), F 为水平挤压力(kN), V 为水平剪力(kN)。水平加载试验装置使用MTS微机



图4 STP在电热恒温鼓风干燥箱中放置图

Fig. 4 STP placed in the electric thermostat blast drying oven

表2 STP试件参数

Tab. 2 The specimen parameters of scrap tire rubber pads

极限压应力/ MPa	竖向刚度/ (kN·mm ⁻¹)	第一形状 系数S1	第二形状 系数S2
16.61	81.89	4.5	3

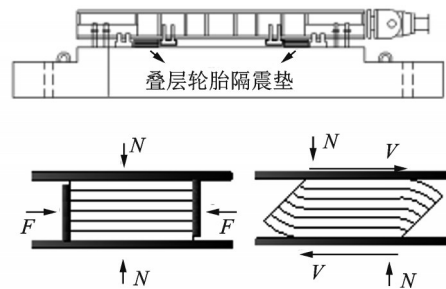


图5 加载装置中STP受力及放置图

Fig. 5 STP placement diagram in loading device

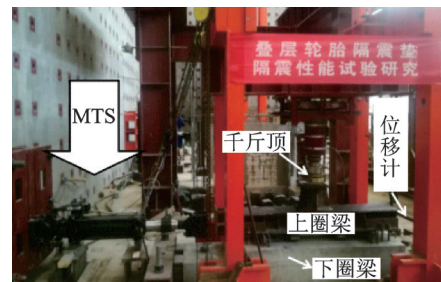


图6 加载装置实物图

Fig. 6 Loading device diagram

控制电液伺服加载系统,其加载装置实物图如图6所示。

1.2 老化-荷载试验依据

本试验老化过程参考了文献[11]的老化性能试验方法,选取实际环境温度为20℃,加速老化试验温度为100℃。

$$t_{100} = t_{20} \times 10^{0.434 \frac{E}{R} \left(\frac{1}{T_{100}} - \frac{1}{T_{20}} \right)} \quad (1)$$

式中 E 为活化能,橡胶材料的取值为90.4 kJ/mol; R 为气体常数,取8.314 J/(mol·K); t_{20} 为常温20℃

下的老化时间(d); T_{20} 为20℃下的绝对温度; t_{100} 为100℃下的老化时间(d); T_{100} 为100℃下的绝对温度。根据国内外相关标准,村镇建筑的设计基准期为50年,因此本试验老化时间以25年为梯度,综合研究STP加速老化到100年后的隔震性能。根据团队前期对不同设计压应力及不同尺寸下STP进行的力学性能研究,结果表明:当设计压应力为5 MPa,STP尺寸为180 mm×180 mm时,其各种力学性能最优^[2,4],且设计压应力5 MPa与当前大量使用的铅芯橡胶隔震支座(LRB)规定的设计压应力相同。

1.3 加载方案

利用JSKF-IV/31.5伺服压机对水平试验装置施加一定的竖向荷载,加载作用线位于上圈梁的中心位置,加载速率为30 kN/min,当设计压应力达到5 MPa时,保持竖向荷载不变,进行水平向加载试验,水平向加载方式采用位移控制加载方法,加载速率为2 mm/s,加载位移等级依次为±15, ±30, ±45, ±60 mm,每一级位移加载循环3次,±60 mm加载循环完成再加载至+60 mm MTS卸载,让其依靠STP的回复力自动归位,并用游标卡尺测量其残余位移,水平加载方案如图7所示。

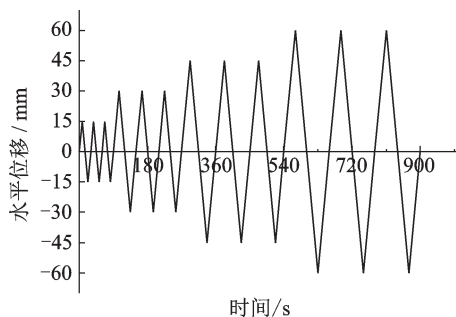


图7 位移-时间加载曲线

Fig. 7 Displacement-time loading curve

1.4 试验内容

STP试件共72个,试件放置于101-3A型电热鼓风干燥箱中进行加速老化。老化后的STP均在室温下放置48 h,再进行拟静力试验,STP老化试验内容如表3所示。

表3 STP老化试验内容

Tab. 3 Aging experiment content of scrap tire rubber pads

试件编号	温度/℃	试验时间/h	相当条件	试件个数
STP-25-5	100	77	20℃×25 a	18
STP-50-5	100	154	20℃×50 a	18
STP-75-5	100	231	20℃×75 a	18
STP-100-5	100	308	20℃×100 a	18

注:STP后面的数字表示老化模拟的使用年限;5代表设计压应力,为5 MPa;a代表使用年限单位,如50 a代表实际使用50年

2 试验结果及其分析

2.1 STP破坏特征分析

为便于分析热氧老化对STP隔震性能的影响,将STP-0-5-5(K)定义为未老化,耦合荷载5 MPa,拟静力加载竖向设计压应力5 MPa。图8反映了挤压侧STP在不同老化时间、荷载5 MPa耦合作用后的破坏图。在挤压侧的STP,随着水平推力的增大,变形增长缓慢,当达到一定挤压变形时,STP产生波浪形扭曲,并伴随脱胶现象。

对比不同老化时间下挤压侧STP破坏现象可知:未老化下的STP在拟静力试验中,其边角位置基本没有裂纹,STP整体未发生翘曲现象,说明STP弹性恢复力良好。在老化25 a时,STP边角位置出现破坏、底层轮胎彼此之间出现错层现象,这是因为老化使STP变硬,弹性恢复力减弱,使其复位能力逐渐降低。老化50,75 a时的STP,其边角位



图8 挤压侧STP破坏图

Fig. 8 STP destruction diagram on the extruded side

置出现大量的裂缝,边角翘起,且整体出现波浪形的扭曲,STP侧面钢丝网和橡胶开始局部剥离,层与层之间在边角部分出现大量的脱空分离裂缝。老化100 a时的STP,其裂缝数量在胎冠花纹处最多,STP发生不可恢复的波浪形扭曲变形,此时轮胎中炭黑从橡胶中大量掉落,钢丝网和帘布层已失去对橡胶的径向约束。

对比不同老化时间下剪切侧STP破坏现象,如图9可知:未老化作用下STP在剪切侧水平力作用

下,STP上顶面发生错层滑移现象,但整体平整。在老化25 a时,试验结束后,STP中间出现明显的S型翘曲和边角裂缝。在老化50 a时,STP底部单片轮胎发生较大程度的翘曲、边角裂缝逐渐延伸,STP侧面伴随明显的脱胶现象、炭黑开始掉落;在老化75,100 a时,STP边角裂缝宽大达到2 mm左右,STP钢丝网与橡胶基本脱离,在裂纹集中区域,STP出现明显破坏。



图9 剪切侧STP破坏图

Fig. 9 STP destruction diagram on the shear side

2.2 承载力衰减

用承载力衰减系数 ζ_i 来表征STP承载力与老化时间、位移幅值之间的关系^[12],表4给出了在5 MPa荷载作用时、不同老化时间下STP承载力衰减系数变化规律。

由表4可知,在同一位移幅值中,STP试件承载力衰减系数随着加载循环次数增加而逐渐降低,这是因为STP随加载循环次数的增加,内部损伤逐渐

积累;个别STP承载力衰减系数在循环次数下无明显变化,这是因为在加载往复试验过程中,STP内部钢钉弯曲,引起层间滑移。在相同老化时间下,第2次循环加载的承载力衰减幅度大于第3次循环加载,产生该现象的原因是:第2次循环加载下STP中钢丝网、帘布层与橡胶出现局部的脱空分离。随着老化时间的增加,承载力衰减系数越来越小,承载力发生显著降低,说明热氧老化使STP产生了一定程度的损伤,从而其承载力衰减更为明显。

表4 承载力衰减系数

Tab. 4 Bearing capacity degradation ration

老化时间/a	$\Delta=(\Delta_c+15)/\text{mm}$			$\Delta=(\Delta_c+30)/\text{mm}$			$\Delta=(\Delta_c+45)/\text{mm}$		
	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_1	ζ_2	ζ_3	ζ_1	ζ_2	ζ_3
0	1.00	0.98	0.97	1.00	0.95	0.95	1.00	0.91	0.95
25	1.00	0.97	0.98	1.00	0.98	0.97	1.00	0.97	0.96
50	1.00	0.99	0.97	1.00	0.98	0.96	1.00	0.96	0.94
75	1.00	0.98	0.98	1.00	0.98	0.96	1.00	0.99	0.97
100	1.00	0.97	0.98	1.00	0.90	0.88	1.00	0.92	0.89

注: $\zeta_1, \zeta_2, \zeta_3$ 分别为第1,2,3次循环位移最大点对应的荷载值与第1次循环位移最大点对应的荷载值之比,即 $\zeta_1 = F_1/F_1, \zeta_2 = F_2/F_1, \zeta_3 = F_3/F_1$; Δ 为最大位移幅值, Δ_c 为初始位移幅值。

2.3 刚度退化

用割线刚度 K_i 来表征STP的刚度退化,表达式如下

$$K_i = \frac{|F_i| + |-F_i|}{|\Delta_i| + |-\Delta_i|} \quad (2)$$

式中 F_i 为第*i*次峰值荷载; Δ_i 为第*i*次峰值位移。

刚度退化曲线如图 10 所示,分析 STP 刚度退化曲线,有以下结论:

1) STP 初始抗侧水平刚度较大,随着剪应变的增大,刚度逐渐降低。在剪应变 $\gamma=50\%$ 之前,刚度退化幅度较小,在 $\gamma=50\%$ 之后刚度退化曲线陡峭,刚度下降速率较快,幅值较大。

2) 随着老化时间的增加,STP 的初始刚度逐渐增大,这是由于在老化进程中,STP 橡胶分子在后期发生交联反应,形成网状结构,分子量变大,性能变硬变脆^[13]。

3) 经老化作用后 STP 的刚度退化速率较未老化 STP 明显加快,且随着老化时间的增加,刚度退化速率相应加快。由图 10 可知,STP-100-5-5(K) 的刚度退化更为显著,基本呈线性下降,这是因为随着老化时间的增加,STP 橡胶分子失去弹性,与钢丝网、帘布层的黏性大幅降低,在循环往复加载中,三者脱空分离^[14]。

2.4 STP 滞回曲线分析

图 11 为 STP 在不同老化时间、5 MPa 荷载作用后的滞回曲线。取各老化时间下 STP 滞回曲线的第三循环数据^[15],如图 11(f) STP-X-5-5(K),X 为不同老化时间。由图可知,STP 在 5 MPa 设计压应力作用下的滞回曲线形状基本相似,基本都呈“捏拢”型。在位移幅值为正时,STP 在不同老化时间下峰

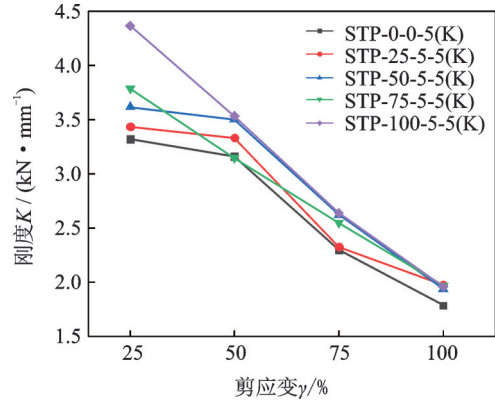


图 10 STP 刚度退化

Fig. 10 Stiffness degradation of STP

值荷载基本相同;在负方向上,其峰值荷载随老化时间增长而增大。STP 在不同位移幅值、不同老化时间下其滞回特性又有以下不同。

比较图 11(a)-(e)可知,随着老化时间的增加,STP 的峰值荷载先增加后减小,在老化时间为 50 a 时,STP 的峰值荷载达到最大的 112.70 kN;滞回曲线斜率随位移幅值增加而减小,表明 STP 由于内部损伤,刚度逐渐退化。随着老化时间的增加,滞回曲线的捏拢效应更加明显,说明热氧老化使 STP 弹性复位能力逐渐降低,其水平残余位移增大。STP 累计耗能能力在实际老化时间为 50 a 时达到最大,满足村镇建筑设计基准期为 50 a 内的隔震耗能。

由图 11(a)可知,在 5 MPa 荷载、未老化作用下

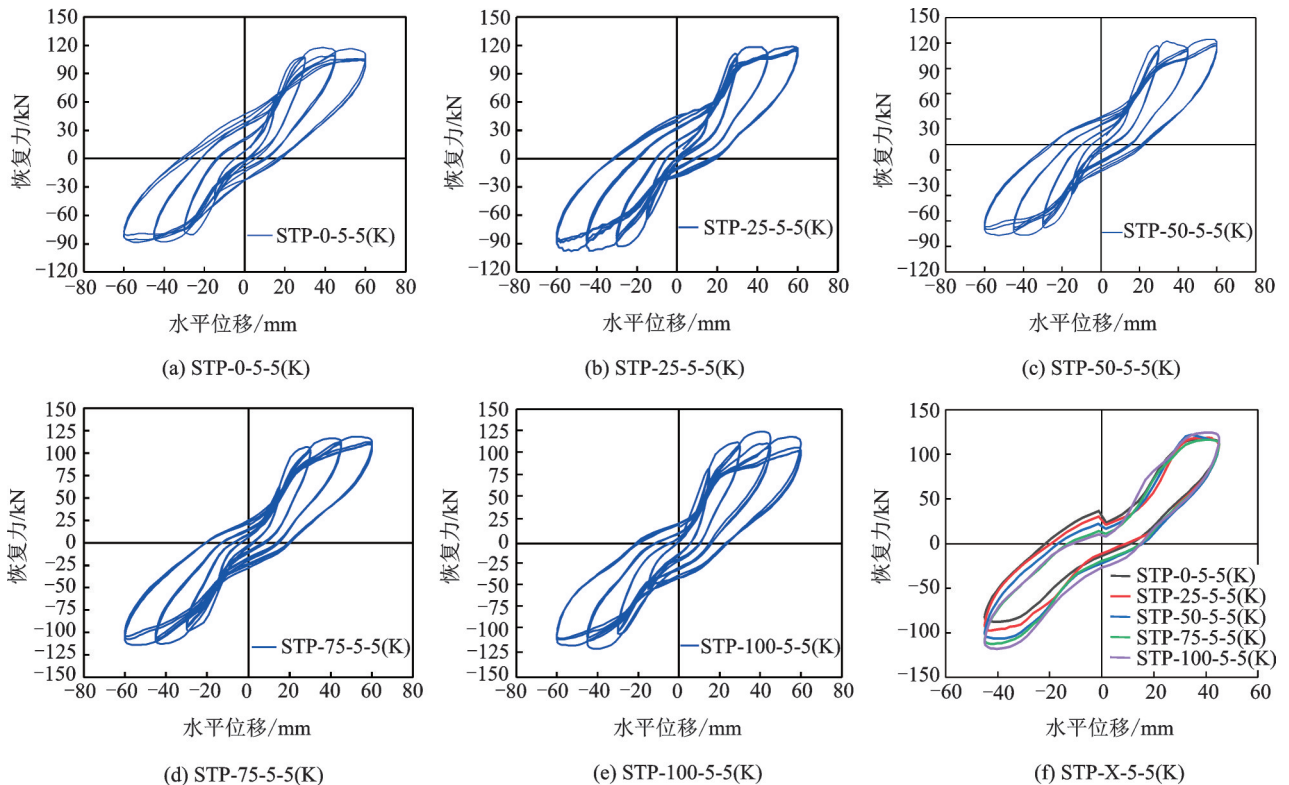


图 11 STP 滞回曲线

Fig. 11 Hysteretic curves of STP

STP在屈服之前,其荷载-位移呈线性关系,具有完全复位能力,但其耗能较小;当STP屈服后,滞回曲线呈弯弓形并逐渐向右倾斜,STP滞回耗能逐渐增大,出现明显的强度、刚度退化;滞回曲线由于STP内部钢丝网的断裂、橡胶与帘布层的脱离,捏拢效应显著增强。比较图11(a)和(c)可知,其滞回曲线形状基本相似,这说明实际老化25,50 a对STP滞回耗能、复位能力以及刚度退化规律基本无影响。但图11(c),(d),(e)与图11(a),(b)相比,STP加载曲线更为陡峭,加卸载刚度明显提高,根据文献[15]对橡胶分子进行电镜扫描分析,这是由于老化使橡胶表面的交联密度提升,橡胶分子的运动状态由内旋转状态变为长链状态;STP的极限承载能力也明显提高,如试件STP-50-5-5(K)极限承载能力比试件STP-0-5-5(K)提高约5.7%。

3 恢复力模型的建立

3.1 骨架曲线

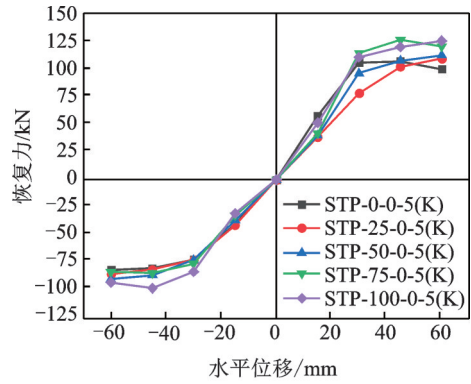
通过对STP在荷载5 MPa、不同老化时间下的滞回曲线进行分析,得到STP骨架曲线如图12所示。

由图12可知,当STP水平位移较小时,老化使STP的刚度较未老化作用下略有升高,这是因为随着老化时间增加,STP表面橡胶分子的交联密度增大^[15]。不同老化时间下STP的承载力和刚度在屈服位移之后出现较为明显的波动;随着老化时间的增加,其承载力先上升后下降,在实际老化50 a时,承载力达到最大。试件STP-0-5-5(K)屈服后,其骨架曲线有较为明显的直线段,说明未老化作用下STP有较好的弹性;老化时间越长,骨架曲线平直段逐渐变短,表明老化使STP弹性变形能力逐渐降低。STP极限位移和弹性变形能力随着老化时间的增加而逐渐降低,STP由弹塑性破坏发展为脆性破坏,从而STP隔震性能下降。

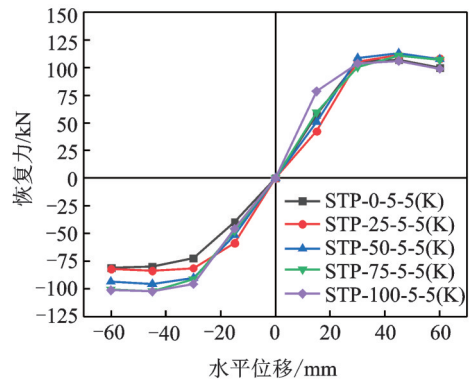
由图12可知,在老化-荷载作用后,不同老化时间下STP的恢复力较未加载老化下STP有不同程度的减少,但减少程度均在3%以内,骨架曲线都呈三折线骨架曲线模型,说明加荷老化与直接老化作用,对STP恢复力模型基本无影响。

综上所述,在5 MPa荷载作用下STP承载力、刚度等恢复力模型特征参数取值发生变化,但滞回曲线形状并未改变,故基于试验结果分析恢复力模型特征参数与老化-荷载作用的关系,以此来体现老化-荷载作用对STP恢复力特性退化的影响。

因此,本文建立恢复力模型时采用三折线骨架



(a) 未加载老化
(a) Unloaded aging



(b) 5 MPa加载老化
(b) Loaded aging of 5 MPa

图12 STP骨架曲线

Fig. 12 Skeleton curves of STP

曲线模型表征STP在不同阶段的恢复力特性退化;采用基于滞回耗能的循环退化指数表征滞回曲线的捏拢效应。骨架曲线如图13所示,图中 $F'_y, \Delta'_y, F'_c, \Delta'_c, F'_u, \Delta'_u$ 分别为5 MPa荷载、未老化作用下STP骨架曲线特征点参数,对应的 $F_y, \Delta_y, F_c, \Delta_c, F_u, \Delta_u$ 为5 MPa荷载、不同老化时间下STP骨架曲线特征点参数。

3.2 老化STP骨架曲线参数确定

本文将STP-0-5-5(K), STP-50-5-5(K), STP-

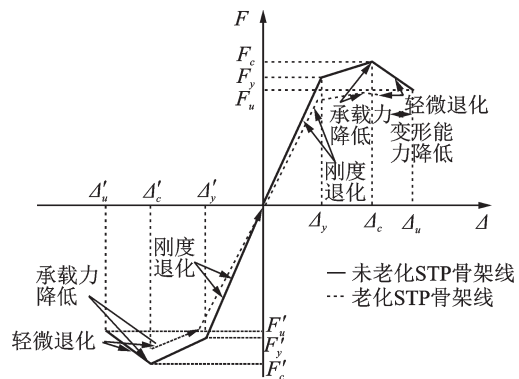


图13 STP三折线骨架曲线

Fig. 13 Triangle line skeleton curve of STP

100-5-5(K)作为基准组,对其 54 组试验数据进行最小二乘拟合,获得老化-荷载作用下 STP 在屈服阶段、峰值阶段、极限阶段的荷载特征值和位移特征值的表达式,分别如下所示:

1) 恢复力模型骨架曲线各折线段刚度
弹性段刚度

$$K_e = \frac{F_y}{\Delta_y} \quad (3)$$

硬化段刚度

$$K_s = \frac{F_c - F_y}{\Delta_c - \Delta_y} \quad (4)$$

下降段刚度

$$K_d = \frac{F_u - F_c}{\Delta_u - \Delta_c} \quad (5)$$

2) 屈服荷载 F_y 与屈服位移 Δ_y :

$$F_y = (1.005 + 0.0012t - 1.7357 \times 10^{-5}t^2)F'_y \quad (6)$$

$$\Delta_y = (1.00024 + 1.8592 \times 10^{-5}t)\Delta'_y \quad (7)$$

3) 峰值荷载 F_c 与峰值位移 Δ_c :

$$F_c = (0.99987 + 0.0023t - 2.3747 \times 10^{-5}t^2)F'_c \quad (8)$$

$$\Delta_c = (0.99987 - 1.05714 \times 10^{-5}t)\Delta'_c \quad (9)$$

4) 极限荷载 F_u 与极限位移 Δ_u :

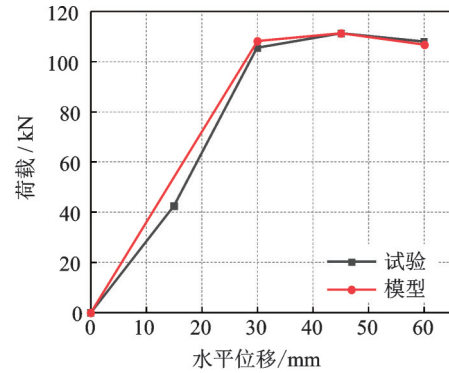
$$F_u = (1.00091 + 0.0038t - 3.8836 \times 10^{-5}t^2)F'_u \quad (10)$$

$$\Delta_u = (1.0004 + 3.4309 \times 10^{-5}t)\Delta'_u \quad (11)$$

3.3 模型计算骨架曲线与试验结果对比

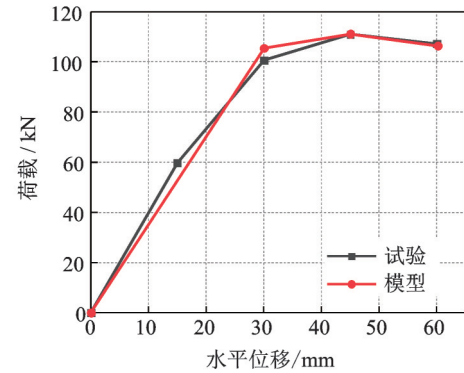
利用式(6)-(11),计算 STP-25-5-5(K)和 STP-75-5-5(K)骨架曲线特征点,STP 特征点对应的理论计算值和试验值分别见表 5 和 6。由表可知:荷载特征点的最大误差为 0.77%,位移特征点的最大误差为 0.26%,误差总体很小,表明预测老化-荷载作用下 STP 特征值的计算是正确的,建立的老化-荷载作用下 STP 恢复力模型符合其滞回特性规则。

将恢复力模型骨架曲线计算结果与试验结果进行比较分析,如图 14 所示。可以看到:两者在各阶段吻合较好,且模型计算结果在特征点处基本与试验值重合,表明本文建立的老化-荷载作用下 STP 恢复力模型骨架模型是可行的,且此骨架曲线计算模型有一定的适用性。



(a) STP-25-5-5对比

(a) Backbone curves of STP-25-5-5: comparison between experiment and model



(b) STP-75-5-5对比

(b) Backbone curves of STP-75-5-5: comparison between experiment and model

图 14 恢复力模型骨架曲线计算结果与试验结果比较
Fig. 14 Comparison of calculation and test results of the restoring force model skelection curve

表 5 特征点荷载计算值与试验值对比

Tab. 5 The comparison of the load between computation and test at feature points

试件编号	试验值/kN			计算值/kN			$\frac{\text{计算值} - \text{试验值}}{\text{试验值}} \times 100\%$		
	F_y	F_c	F_u	F_{y1}	F_{c1}	F_{u1}	屈服	峰值	极限
STP-25-5-5(K)	107.43	111.24	107.26	108.22	111.28	106.75	0.73	0.04	-0.48
STP-75-5-5(K)	103.60	110.94	107.15	105.44	111.09	106.33	1.78	0.13	-0.77

表 6 特征点位移计算值与试验值对比

Tab. 6 The comparison of displacement between computation and test at feature points

试件编号	试验值/mm			计算值/mm			$\frac{\text{计算值} - \text{试验值}}{\text{试验值}} \times 100\%$		
	Δ_y	Δ_c	Δ_u	Δ_{y1}	Δ_{c1}	Δ_{u1}	屈服	峰值	极限
STP-25-5-5(K)	30.00	45.05	60.03	30.00	45.05	60.10	0.00	0.00	0.11
STP-75-5-5(K)	30.03	45.03	60.04	30.03	45.03	60.20	-0.00	0.00	0.26

3.4 热氧老化下STP恢复力特性分析

为建立能够表征老化-荷载作用下STP恢复力模型特性退化,需要考虑5MPa荷载、不同老化时间下STP的捏拢规则和循环退化规则^[16]。因此本文建立老化-荷载作用下STP恢复力模型的方法为:结合试验结果得到循环退化指数,通过循环退化指数来反映5MPa荷载、不同老化时间下STP滞回特性退化。本文建立的考虑捏拢效应和滞回特性退化的恢复力模型如图15所示。循环退化指数表达式为^[17]

$$\beta_i = \left(\frac{E_i}{E_i - \sum_{j=1}^i E_j} \right)^C \quad (12)$$

式中 E_i 为5MPa荷载、不同老化时间下STP试件在第*i*次的滞回耗能,如图16所示; $\sum_{j=1}^i E_j$ 为5MPa荷载、不同老化时间下STP试件在第*j*次的累计滞回耗能; C 为循环退化速率参数,参照文献[18]建议方法取值,取 $C=3/2$; E_i 为老化-荷载作用下STP试件自身耗能能力,按下式计算

$$E_i = \frac{\sum_{j=1}^i E_j}{F_y \Delta_y} \quad (13)$$

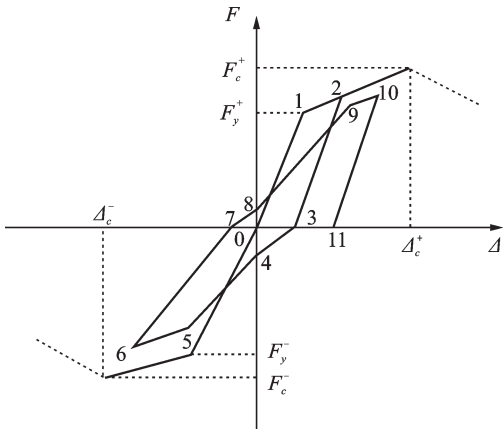


图 15 恢复力模型简图

Fig. 15 The restoring force model diagram

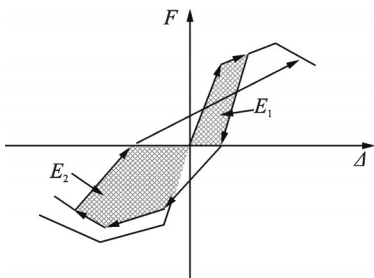


图 16 滞回耗能简图

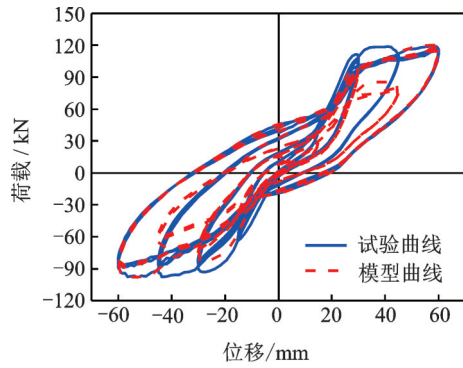
Fig. 16 Hysteresis energy consumption diagram

循环退化指数 β_i 的取值范围在 $[0,1]$ 之间,其值越接近1表明STP的性能退化越严重,因此STP失效准则表示为

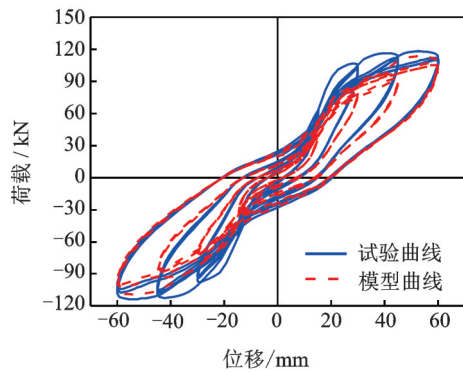
$$E_i - \sum_{j=1}^i E_j < E_i \quad (14)$$

3.5 模型验证

将STP-25-5-5(K)及STP-75-5-5(K)试验滞回曲线与本文建立的恢复力模型滞回曲线进行对比,如图17所示。由图可知:试验滞回曲线与模型滞回曲线基本吻合,但仍有一定偏差,主要原因是STP在5MPa荷载、不同老化时间下STP内部不均匀老化,从而试验工况下其滞回曲线正反向不对称,而本文建立恢复力模型时,考虑原始骨架曲线正反向荷载和位移特征点是相同的,使得模型滞回曲线在正向与试验滞回曲线吻合度较高,负向取值总体比试验值偏小。综上,本文建立的老化-荷载作用下STP恢复力模型可为后期STP在隔震建筑中的应用提供一定的理论参考。



(a) STP-25-5-5(K)



(b) STP-75-5-5(K)

图 17 试验滞回曲线与计算滞回曲线对比

Fig. 17 Comparison of testing and calculating hysteretic curves

3.6 滞回耗能验证

本文以耗能能力表示试验计算曲线和模型计算

曲线的耗能特性,滞回耗能简图如图16所示,耗能能力按下式计算

$$E = E_1 + E_2 \quad (15)$$

式中 E_1 为正向滞回耗能; E_2 为负向滞回耗能。

老化-荷载作用下STP耗能能力和位移幅值关

系如表7所示。由表7可知,模型计算滞回曲线的单圈滞回耗能能力比试验值总体偏小。这是因为,本文建立恢复力模型时在STP屈服之前不考虑能量耗散,即屈服点之前恢复力方程按理想弹性考虑,但试验情况下STP屈服之前存在一定的能量损耗。

表7 STP单圈循环耗能结果与模拟结果的比较

Tab. 7 Comparison of energy consumption per cycle between the test results and theoretical predictions

t/a	±15 mm			±30 mm			±45 mm			±60 mm		
	试验值 D/(kN· mm)	计算值 K/(kN· mm)	(D- K)/K	试验值 D/(kN· mm)	计算值 K/(kN· mm)	(D- K)/K	试验值 D/(kN· mm)	计算值 K/(kN· mm)	(D- K)/K	试验值 D/(kN· mm)	计算值 K/(kN· mm)	(D- K)/K
25	306.58	271.92	0.13	1394.18	1575.99	-0.11	3751.97	3548.82	0.06	6761.05	7033.06	-0.04
75	300.97	258.03	0.17	1416.18	1477.35	-0.04	3377.56	3354.68	0.01	6083.09	6460.92	-0.06

总体而言,本文提出的老化-荷载作用下STP恢复力模型能够较好反映STP在5 MPa荷载,不同老化时间作用下的恢复力特性,对热氧老化作用下STP隔震结构的弹塑性地震反应分析提供理论参考。

4 结 论

(1)通过拟静力试验结果表明,老化-荷载作用下的STP试件在峰值荷载前,塑性变形很小,损伤较轻,同级位移水平下,STP强度、刚度随着老化时间的增加而增大,在实际老化50 a时两者达到最大;峰值荷载后,STP塑性变形增加,累计损伤增大,STP强度、刚度随着位移幅值增加而有所降低,并且随着老化时间的增加退化速率加快。

(2)基于理论分析与试验结果相结合的方法,提出了考虑不同老化时间影响下的骨架曲线简化模型,并给出5 MPa荷载、不同老化时间下STP荷载、位移特征点计算模型,为STP在实际隔震建筑中的应用提供一定的理论参考。

(3)引入循环退化指数,建立考虑循环退化效应的老化-荷载作用下废旧叠层轮胎隔震垫的恢复力模型且试验滞回曲线与计算滞回曲线吻合较好,较好表征老化-荷载作用下STP滞回耗能特性,在一定程度上验证了该模型的准确性。研究成果为老化-荷载作用下STP的弹塑性地震反应分析提供理论参考。

参考文献:

[1] Ahmet T, Bayezid Ö. Seismic base isolation using low-cost Scrap Tire Pads (STP)[J]. Materials and Struc-

tures, 2008, 41(5): 891-908.

[2] 张广泰,陆东亮,魏飞来,等.热氧老化作用下废旧叠层轮胎隔震垫的力学性能[J].华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(08):16-22.

ZHANG Guangtai, LU Dongliang, WEI Feilai, et al. Mechanical properties of scarp tire rubber pads based on thermal oxygen aging[J]. Journal of South China University of Technology (Nature Science Edition), 2019, 47(08): 16-22.

[3] 陆东亮,张广泰,魏飞来,等.叠层轮胎隔震垫轴压状态下的破坏准则[J].河南科技大学学报(自然科学版),2019,40(2):70-75.

Lu Dongliang, Zhang Guangtai, Wei Feilai, et al. Failure criterion of scrap tire rubber pads under axial compression[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 40(2): 70-75.

[4] 张广泰,陆东亮,章金鹏,等.老化-荷载耦合下叠层轮胎隔震垫的竖向力学性能[J].材料导报,2019,(18):3140-3146.

ZHANG Guangtai, LU Dongliang, ZHANG Jinpeng, et al. Vertical mechanical properties of scrap tire rubber pads under aging-loading[J]. Materials Reports, 2019, (18): 3140-3146.

[5] Razzaq M K, Okui Y, Mitamura H, et al. Seismic performance of a highway bridge with different modeling techniques for laminated rubber bearings at a low temperature[J]. Cold Regions Engineering, 2012: 467-477.

[6] 由世岐,刘斌,楼永林.低温环境对叠层橡胶支座变形特性影响的试验研究[J].东北大学学报,2005,(03):297-299.

YOU Shiqi, Liu Bin, LOU Yonglin. Low-temperature effect on deformation behavior of laminated rubber isolators[J]. Journal of Northeastern University, 2005, (03): 297-299.

[7] Pan T C, Yang G. Nonlinear analysis of base-isolated

- MOOF structures [C]. Proceedings of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Mexico, 1996: 1534.
- [8] Jankowski R. Nonlinear rate dependent model of high damping rubber bearing [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2003, 1: 397-403.
- [9] Dall Asta A, Ragni L. Experimental tests analytical model of high damping rubber dissipating devices [J]. Engineering Structures, 2006, 28(13): 1874-1884.
- [10] Bhuiyan A R, Okui Y, Mitamura H, et al. A rheology model of high damping rubber bearings for seismic analysis: Identification of nonlinear viscosity [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 64(7): 1778-1792.
- [11] GB/T 20688.1-2007, 橡胶支座 第1部分: 隔震橡胶支座试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
GB/T 20688.1-2007, Rubber bearing-Part1: Seismic protection isolators test methods[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [12] 郑山锁, 牛丽华. 酸雨腐蚀砌体组合墙抗震性能试验及恢复力研究 [J]. 建筑结构学报, 2019, 40(7): 162-172.
ZHENG Shan-suo, NIU Li-hua. Research on seismic behavior of brick composite walls under acidic atmospheric environment [J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(7): 162-172.
- [13] Wood L A, Bekkedahl N. Crystallization of unvulcanized rubber at different temperatures [J]. Journal of Applied Physics, 1946, 17(5): 362-375.
- [14] Sugimoto H, Mizoe M, Yamamoto Y, et al. Research on low temperature resistance of the natural rubber bearing [J]. Doiboku Gakkai Ronbunshu, 2001, 2001(693): 73-86.
- [15] 汪月琼. 稀土促进剂的制备及其在橡胶中的应用 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
Wang Yueqiong. Preparation of rare earth accelerator and its application in rubber [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.
- [16] 曹琛, 郑山锁, 胡卫兵, 等. 近海大气环境下锈蚀RC框架梁恢复力模型研究 [J]. 工程力学, 2019, 36(04): 125-134.
CAO Chen, ZHENG Shansuo, HU Weibing, et al. A restoring force model of corroded RC frame beams in offshore atmospheric environment [J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(04): 125-134.
- [17] Rahnama-Hazaveh M. Effect of soft soil and hysteresis model on seismic demands [D]. Palo Alto: Stanford University, 1993.
- [18] Medina R A, Krawinkler H. Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 34(12): 1489-1511.

Restoring force model of scarp tire rubber pads under aging-load coupling

ZHANG Guang-tai^{1,2}, WANG Ming-yang^{1,2}, ZHANG Wen-mei¹, ZHANG Jin-peng¹

(1. School of Architecture and Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Building Structures and Seismic, Urumqi 830047, China)

Abstract: To study the isolation performance of Scarp Tire Rubber Pads (STP) under aging-load coupling, 72 STPs with dimensions of 180 mm × 180 mm × 69 mm are subjected to aging time of 0, 77, 154, 231 and 308 h and 5 MPa load coupling, then a low cycle repeated loading test is carried out to analyze failure characteristics, bearing capacity attenuation, hysteretic energy loss characteristics of STP. Based on the experimental results, the three-fold line skeleton curve with negative stiffness segment is obtained and according to the characteristic parameters of the STP restoring force model, the formula for calculating the characteristic points of STP skeleton curve considering aging-load coupling is obtained. Using regression analysis, the cyclic degradation index is obtained based on hysteretic energy consumption. Through the cyclic degradation index, the STP restoring force model under aging-load coupling considering the pinch effect, strength degradation and stiffness degradation effects is established. The study shows that the aging-load coupling effect does not damage the hysteretic energy of STP in the actual aging time of 50 a, while the hysteretic energy of STP even increases due to aging and hardening of STP surface rubber. The STP resilience model established by introducing the cyclic degradation index is in good agreement with the test hysteresis curve, which verifies the applicability of the resilience model.

Key words: scarp tire pads; isolation performance; aging-load coupling; cycle deterioration index; restoring force model

作者简介: 张广泰(1963-),男,教授,博士生导师。电话:(0991)8592266;E-mail:zgtlxh@126.com