

高阻尼橡胶复合材料在桥梁隔震支座中的应用

张 凯^{1,2}, 岳 耀¹, 张宏生¹, 赵秀英^{1,2}, 张立群^{1,2*}

(1. 北京化工大学 北京市新型高分子材料制备与加工重点实验室, 北京 100029; 2. 北京化工大学 北京市先进弹性体工程技术研究中心, 北京 100029)

摘要: 选用天然橡胶(NR)、丁腈橡胶(NBR)、氯化丁基橡胶(CIIR)和丁基橡胶(IIR)为基体, 制备4种高性能橡胶复合材料, 并用于高阻尼桥梁隔震支座样品制备。结果表明: NBR/AO80和NR/NBR/AO80复合材料的硬度、拉伸强度和拉伸伸长率满足桥梁支座用橡胶材料的要求; NBR/AO80, NR/NBR/AO80和CIIR/石油树脂复合材料在与支座的工作环境温度相匹配的温域内表现出良好的阻尼性能; 应用NR/NBR/AO80复合材料制备的橡胶支座样品, 其竖向刚度、水平等效刚度和等效阻尼比符合桥梁支座用橡胶材料国家标准要求。

关键词: 高阻尼橡胶材料; 橡胶支座; 竖向刚度; 水平等效刚度; 等效阻尼比; 物理性能

中图分类号: TQ332; TQ333; TQ336. 4⁺2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2018)00-0000-05

近年来, 国内地震频发^[1], 对桥梁建筑工程结构采取有效的隔震保护措施变得非常重要。天然橡胶(NR)具有高弹性、高强度等优点, 大部分橡胶隔震支座均使用NR。但由于NR大分子链结构非常柔顺, 其阻尼性能相对差, 不能完全满足隔震支座用橡胶材料高阻尼性能的要求。目前的解决方案是通过在隔震支座中加注铅芯材料来提高支座的阻尼性能, 而铅金属存在着容易污染环境^[2]、地震发生时铅芯易发生屈服断裂、压缩永久变形大等不足。采用具有高阻尼性能的橡胶复合材料制备的隔震支座具有更好的地震波衰减能力和结构位移控制能力, 是新一代隔震支座的发展趋势^[3]。

大量研究表明, 丁基橡胶(IIR)、丁腈橡胶(NBR)、氯化丁基橡胶(CIIR)等阻尼性能优异, 但力学性能相对较差, 通常并用NR、三元乙丙橡胶(EPDM)等提高其物理性能。杨静娜^[4]研究了NR和NBR不同共混比下的动态力学性能, 试验结果表明, 两个胶种所占比例不同, 则在各自玻璃化转变温域内, 有效阻尼效果所占比例则不同。Perera M C S等^[5]研究了NBR和氯化聚乙烯二元共混物, 通过动态力学分析仪(DMA)表征, 发现二者相容性良好, 且共混后二者玻璃化转变温度向中间移

动, 即向高温方向移动, 只有一个阻尼峰值, 阻尼温域变宽。郭大通等^[6]研究发现, 加入石油树脂可以明显提高CIIR/石油树脂复合材料的有效阻尼温度, 拓宽阻尼温域。

本工作研究4种高阻尼橡胶复合材料的配方, 测试其力学性能和阻尼性能, 并制成桥梁减震支座样品, 对其竖向刚度(K_v)、水平等效刚度(K_h)和等效阻尼比(h_{eq})这3个性能进行测试和比较, 筛选出适用于制作桥梁隔震支座的理想材料。

1 实验

1.1 主要原材料

NR, 1[#]烟片胶, 云南橡胶股份有限公司产品; NBR, 牌号N220S, 丙烯腈质量分数为0.41, 日本JSR公司产品; IIR301, 加拿大宝兰山公司产品; 受阻酚AO80, 日本Asahi Denka公司产品。

1.2 试验配方

1[#]配方(NBR/AO80复合材料): NBR 100, AO80 40, 炭黑N330 20, 氧化锌 5, 硬脂酸 1, 硫黄 2, 促进剂D 1, 促进剂DTDM 3。

2[#]配方(NR/NBR/AO80复合材料): NR 70, NBR 30, AO80 12, 炭黑N330 50, 氧化锌 5, 硬脂酸 1, 硫黄 1.5, 促进剂D 1, 促进剂DM 1。

3[#]配方(CIIR/石油树脂复合材料): CIIR

作者简介: 张凯(1991—), 男, 山东潍坊人, 北京化工大学硕士研究生, 主要从事高阻尼橡胶复合材料的研究。

*通信联系人

100,石油树脂 30,炭黑N330 30,纳米氧化锌 7.5,氧化镁 0.75,硫黄 1.5,促进剂DM 2,促进剂TMTD 1.5。

4[#]配方(NR/IIR复合材料):NR 80,IIR 20,炭黑N330 40,氧化锌 3,硬脂酸 1,硫黄 1,促进剂CZ 1.2,促进剂TMTD 1。

1.3 支座制备

按照配方分别制备4种橡胶复合材料,将薄钢板和薄混炼胶交替层叠铺满模具内,在相应条件下进行硫化,最后进行整体的外套装配,得到高阻尼隔震支座制品,分别记作1[#]、2[#]、3[#]、4[#]支座。4个支座均采用HDR 320 mm×420 mm×177 mm的规格进行设计,中间共7层橡胶,每层橡胶厚10 mm,钢板采用300 mm×400 mm规格。

1.4 性能测试

1.4.1 物理性能

复合材料的拉伸性能、撕裂强度采用深圳新三思计量技术公司生产的CMT4104型电子拉力机在室温下按相应国家标准测试,拉伸试样采用哑铃形,撕裂试样为直角形。其余物理性能也均按相应国家标准测试。

1.4.2 动态力学性能

采用法国01dB-Mettravib公司制造的VA3000型动态力学分析仪(DMA)测试试样的动态力学性能,试样尺寸为20 mm×6 mm×2 mm,拉伸模式,温度为-100~+100℃,频率为1 Hz,应变为0.1%,升温速率为3℃·min⁻¹。

1.4.3 支座性能

高阻尼隔震橡胶支座的性能计算过程比较复杂,其中较为重要的几个计算公式如下:

$$K_v = (P_2 - P_1) / (Y_2 - Y_1)$$

$$K_h = (Q_2 - Q_1) / (X_2 - X_1)$$

$$h_{eq} = 2 \Delta W / \pi K_h (X_1 - X_2)^2$$

式中, P_1 和 P_2 分别指第三次循环的较小压力和较大压力; Y_1 和 Y_2 指第三次循环的较小位移和较大位移; ΔW 代表滞后环面积,滞回曲线^[7]示意如图1所示, Q_1 和 Q_2 分别代表最大剪力和最小剪力, X_1 和 X_2 分别代表最大位移和最小位移。

高阻尼橡胶隔震支座的检测按相应国家标准进行,本试验采用YSZ-3000型压剪试验机测试试样的 K_v 、 K_h 和 h_{eq} ,其中竖向载荷为30 000 kN,水平

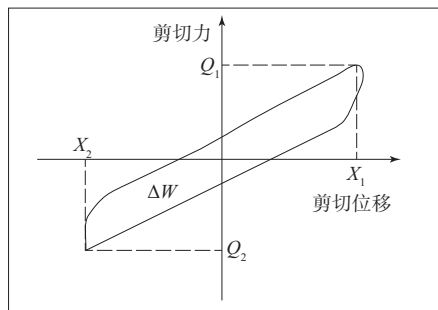


图1 橡胶支座剪切滞回曲线

力为500 kN,试验温度为23℃。

K_v 的测试方法:对试验支座施加竖向载荷至6 MPa(P_2)持续1 min,之后将载荷卸载至1.5 MPa(P_1)持续1 min,重复4次,测试第4次加载6 MPa和1.5 MPa时支座的压缩量,以此来计算 K_v 。

K_h 和 h_{eq} 的测试方法:先对试验支座施加竖向载荷6 MPa,保持恒定,之后以0.01 Hz的频率在水平方向反复施加载荷11次,使其产生±175%水平位移。取2—11次平均值计算 K_h 和 h_{eq} 。

2 结果与讨论

2.1 物理性能

4种橡胶复合材料的物理性能如表1所示。

表1 硫化胶的物理性能

项 目	配方编号			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
邵尔A型硬度/度	56	51	50	64
100%定伸应力/MPa	1.3	1.2	0.8	2.2
300%定伸应力/MPa	5.1	2.5	1.5	10.4
拉伸强度/MPa	21.6	23.3	8.1	19.8
拉伸伸长率/%	584	753	1 099	483
撕裂强度/(kN·m ⁻¹)	28	36	26	40

注:国标要求为邵尔A型硬度 55~75度;拉伸强度 ≥8 MPa;拉伸伸长率 ≥650%。

从表1可以看出:NBR/AO80复合材料与NR/NBR/AO80复合材料的拉伸强度均达到20 MPa以上,原因是橡胶基体中的丙烯腈基团与AO80中的羟基形成了氢键,分子间相互作用力增大,因此定伸应力和拉伸强度比较高^[8-9];CIIR/石油树脂复合材料的拉伸强度较低,拉断伸长率很高,达到1 000%以上,原因是CIIR中加入石油树脂以后,使材料的粘度增大、硬度降低,更容易变形;NR/IIR的硬度和定伸应力较高,拉断伸长率较低,说明其在受力情况下不易变形。综上所述,NR/NBR/

AO80复合材料的硬度、拉伸强度和拉断伸长率均满足国家标准对隔震支座用橡胶材料的力学性能要求。

2.2 动态力学性能

4种橡胶复合材料的损耗因子($\tan\delta$)与温度的关系曲线如图2所示。对应的阻尼性能数据如表2所示。通常情况下,桥梁减震支座的工作温度即周围环境的温度大概在 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,DMA曲线在此温度区间内的积分数值为TA,TA值越大,说明材料在此温度区间内的阻尼性能越好。

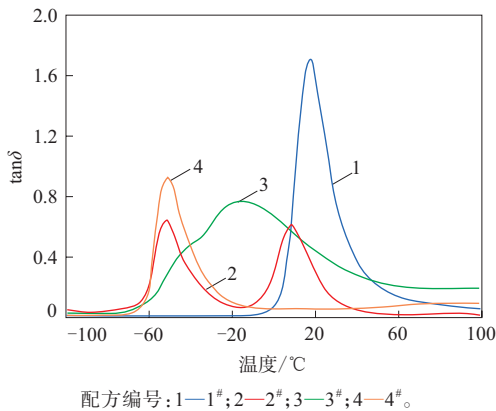


图2 4种橡胶复合材料的 $\tan\delta$ -温度曲线

表2 4种橡胶复合材料的阻尼性能数据

项 目	配方编号			
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
$\tan\delta_{\max}$				
峰值	1.69	0.85	0.34	0.78
对应温度/ $^{\circ}\text{C}$	17.1	-52.0	-2.4	-16.0
$\tan\delta\geq 0.3$				
温度范围/ $^{\circ}\text{C}$	5~45	-62~-28	-16~15	-51~37
ΔT	40	65	88	25
TA值($-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$)	44.4	19.8	54.8	13.3

从图2可以看出:NBR/AO80复合材料只有1个阻尼峰,阻尼峰值达到1.69。结合表2数据,该复合材料的阻尼温域($\tan\delta\geq 0.3$)在 $5\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,不仅阻尼温域宽,并且对应于常温区域,这可能是由于NBR与AO80相容性好,NBR的极性基团与AO80的端羟基形成了大量的氢键,导致 $\tan\delta$ 高和阻尼温域移向高温区^[10];NR/NBR/AO80复合材料在高低温区出现两个阻尼峰,分别对应于NR相和NBR相,有效阻尼温域也相应分成两段,总温域达到 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中NBR相对应的阻尼峰在常温区

域;CIIR/石油树脂复合材料从低温到高温都有较好的阻尼性能,有效阻尼温域达到 $88\text{ }^{\circ}\text{C}$,原因是石油树脂具有增粘效果,使得其与CIIR共混后在玻璃化转变区有较大的滞后导致阻尼温域变宽;NR/IIR复合材料只在低温区出现了一个阻尼峰,有效阻尼温域只有 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,这可能是由于阻尼性能主要由含量较少的IIR提供,并且NR与IIR的玻璃化转变温度均在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。

从表2还可以看出:NBR/AO80与CIIR/石油树脂复合材料的TA值最大,说明其在此温度区间具有优异的阻尼性能;NBR/AO80,CIIR/石油树脂这两种橡胶复合材料的有效阻尼温域可以很好地覆盖桥梁隔震支座的工作温度范围;NR/NBR/AO80在高低温区各出现一个阻尼峰,NBR相提供的阻尼峰落在支座的工作温域内,但由于NBR所占比例较小,导致TA值较小;NR/IIR复合材料由于NR和IIR的玻璃化转变温度均在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,导致其有效阻尼温域也在较低温度区。

2.3 支座性能

橡胶支座是桥梁上端结构和桥墩之间的连接枢纽,需要具有一定的承载力,而且竖向变形不可过大,即要求有一定的 K_v 。 K_v 定义为设计竖向承受力与竖向变形量之比。 K_h 代表地震时支座上部移动时抗破坏的能力, K_h 越大,支座抗破坏的能力就越强。 h_{eq} 代表地震时支座吸收耗散地震波的能力, h_{eq} 越大,隔震支座耗散地震波的能力就越强。因此,桥梁支座的 K_v 、 K_h 和 h_{eq} 是检验其是否合格的3个基本指标。支座的性能参数和试验结果数据如表3所示。

表3 支座的性能参数和试验结果

项 目	支座编号				国标要求
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	
$K_v/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	579	854	469	720	$875\times(1\pm 30\%)$
$K_h/(\text{kN}\cdot\text{mm}^{-1})$	1.5	2.0	1.2	1.9	$1.7\times(1\pm 15\%)$
$h_{eq}/\%$	30.6	17.2	25.4	12.0	$15\times(1\pm 15\%)$

从表3可以看出,2[#]支座各项性能满足国家标准对桥梁减震支座的要求,其他3个支座均不能完全满足桥梁减震支座的性能要求。2[#]支座与1[#]支座相比, K_v 和 K_h 高于1[#]支座,但 h_{eq} 明显低于1[#]支座,原因是NBR的物理性能不如NR,但阻尼性能优于NR,结合表1,NR/NBR/AO80复合材料的定伸应

力低于NBR/AO80复合材料,这也导致了2[#]支座的水平等效刚度高于1[#]支座。同理,由于CIIR与IIR有着相似的物理性能,并且石油树脂起到增粘的作用,因此3[#]支座的 K_v 和 K_h 低于4[#]支座。后两者 h_{eq} 的差异主要由两方面因素导致,其一,4[#]支座中IIR与NR并用,势必会降低复合材料的阻尼性能;其二,石油树脂会提高CIIR的阻尼性能。

橡胶支座的剪切力-位移试验曲线见图3。

滞回曲线包围的面积表示产品剪切过程中对能量的耗散效果,反映了材料阻尼性能。滞回曲线的面积越大,代表该样品的阻尼性能越好,耗能能力越强。由 K_h 和 h_{eq} 的计算公式可知,支座滞回曲线的面积与 K_h 和 h_{eq} 的乘积成正比关系,结合表3数据及图3可看出:1[#]和2[#]支座的 K_h 和 h_{eq} 的乘积大于3[#]和4[#]支座,故1[#]和2[#]支座的滞回曲线面积较大,剪切耗能效果优于3[#]和4[#]支座;1[#]支座的滞回曲线面积大于2[#]支座,3[#]支座的滞回面积大于4[#]支座,原因是1[#]和3[#]支座的 h_{eq} 远高于2[#]和4[#]支座。但支座的 h_{eq} 越大,也就说明其刚度越小,找到刚度与 h_{eq} 之间

的最佳平衡点,才能使橡胶支座满足桥梁减震的要求。

3 结论

(1) NBR/AO80和NR/NBR/AO80复合材料的硬度、拉伸强度和拉断伸长率满足桥梁支座用橡胶材料的要求。

(2) NBR/AO80, NR/NBR/AO80和CIIR/石油树脂复合材料的阻尼温域分别为5~45, -16~15和-51~37℃,在与支座的工作环境温度相匹配的温域内表现出良好的阻尼性能。

(3) 应用NR/NBR/AO80复合材料制备的橡胶支座样品,其 K_v 、 K_h 和 h_{eq} 符合桥梁支座用橡胶材料国家标准要求,具有很好的应用价值。

参考文献:

- [1] 刘凯,廖顺宝,张赛. 中国地震发生频率与烈度的空间分布[J]. 地理科学进展,2008,27(3):13-18.
- [2] 陈彦江,郭凯敏,李勇,等. 桥梁高阻尼隔震橡胶支座性能试验研究

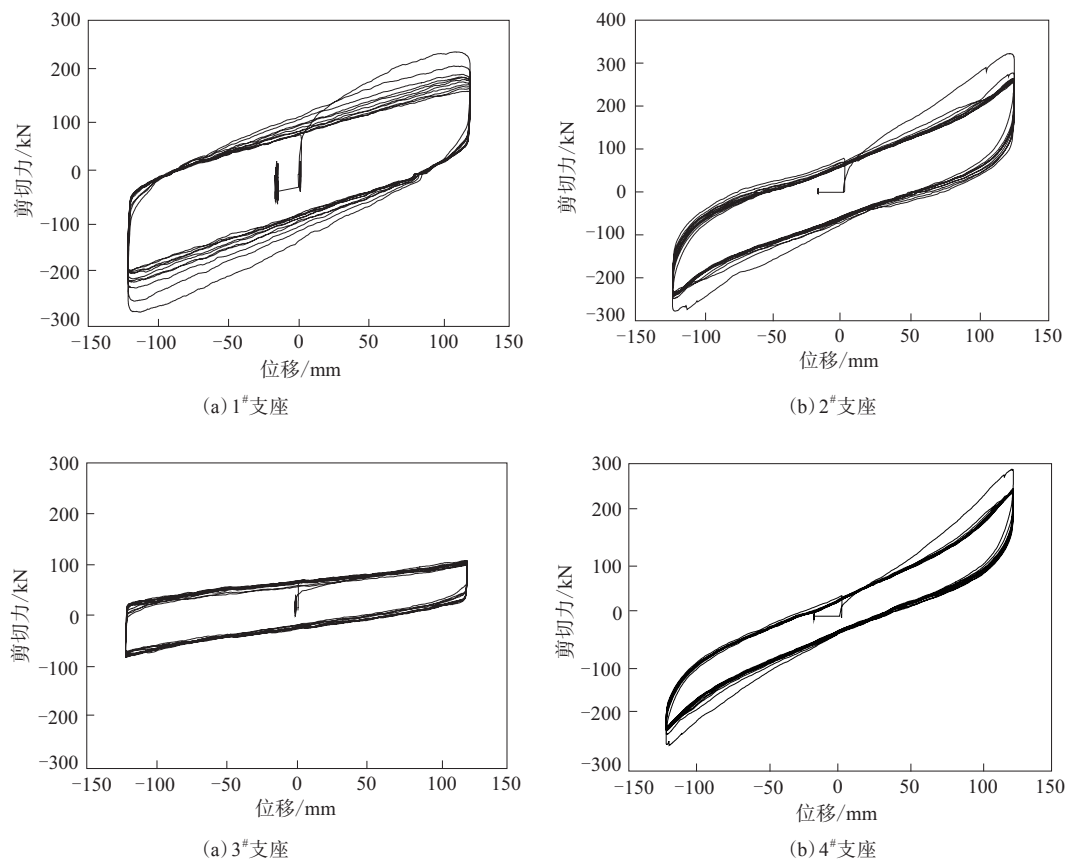


图3 橡胶支座的剪切力-位移试验曲线

- [J]. 振动与冲击, 2015, 34 (9) : 136–140.
- [3] 杨静娜, 赵秀英, 卢咏来, 等. 隔震支座用橡胶材料的研究进展[J]. 橡胶工业, 2014, 61 (8) : 502–506.
- [4] 杨静娜. 天然橡胶/受阻酚-丁腈橡胶杂化复合材料的制备及性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015
- [5] Perera M C S, Ishiaku U S, Ishak Z A M. Characterisation of PVC/NBR and PVC/ENR50 Binary Blends and PVC/ENR50/NBR Ternary Blends by DMA and Solid State NMR[J]. European Polymer Journal, 2001, 37 (1) : 167–178.
- [6] 郭大通, 岳耀, 杨守申, 等. 石油树脂/氯化丁基橡胶复合材料的性能及其在桥梁支座中的应用[J]. 橡胶工业, 2017, 64 (12) : 744–748.
- [7] Nishi T, Murota N. Elastomeric Seismic-protection Isolators for Buildings and Bridges[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2013, 31 (1) : 50–57.
- [8] 赵秀英, 向平, 曹亚军, 等. 受阻酚AO-60/NBR/BPF复合材料的结构与性能[J]. 橡胶工业, 2011, 58 (3) : 156–159.
- [9] Zhao X Y, Cao Y J, Zou H, et al. Structure and Dynamic Properties of Nitrile-Butadiene Rubber/Hindered Phenol Composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2012, 123 (6) : 3696–3702.
- [10] Zhao X, Yang J, Zhao D, et al. Natural Rubber/Nitrile Butadiene Rubber/Hindered Phenol Composites with High-damping Properties[J]. International Journal of Smart & Nano Materials, 2015, 6 (4) : 239–250.

收稿日期: 2016–12–03

Application of High Damping Rubber Composites in Bridge Seismic Isolation Bearing

ZHANG Kai, YUE Yao, ZHANG Hongsheng, ZHAO Xiuying, ZHANG Liqun

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: NR, NBR, CIIR and IIR were selected as matrix to prepare four kinds of high-performance rubber composites, which applied to make high damping bridge seismic isolation bearings. The results showed that, the hardness, tensile strength and elongation at break of NBR/AO80 and NR/NBR/AO80 composites met the requirements of rubber materials for bridge bearings. NBR/AO80, NR/NBR/AO80 and CIIR/petroleum resin composites exhibited good damping properties in the temperature range that matched the operating ambient temperature of bearings. The vertical stiffness, horizontal equivalent stiffness and equivalent damping ratio of the rubber bearing samples made from NR/NBR/AO80 composites met the national standard requirements of rubber materials for bridge bearings.

Key words: high damping rubber materials; rubber bearings; vertical stiffness; horizontal equivalent stiffness; equivalent damping ratio; physical property