

两种低蛋白天然橡胶在建筑隔震支座的应用分析

杨树磊^{1,2},曾 争^{1,2},王 帅³,徐 杉^{1,2},张桂梅^{1,2*}

(1. 云南省天然橡胶可持续利用研究重点实验室, 云南景洪 666100; 2. 云南省热带作物科学研究所, 云南景洪 666100; 3. 云南先进弹性体产业创新研究院有限公司, 昆明 650233)

[摘要]以低蛋白天然橡胶(LPNR)、低蛋白恒黏天然橡胶(LPCVNR)为原料与市售标准胶对比, 对三者用于隔震支座内层胶和保护层胶配方进行了胶料性能测试, 并选择合适胶样(LPNR)制成橡胶隔震支座测试。实验结果表明, LPNR、LPCVNR 作为内层胶, 在拉伸强度、扯断伸长率、100%应变弹性模量、硬度、黏结强度以及剪切性能上与市售标准胶相差不大, 均达到相关标准, 但 LPCVNR 胶料存在后熟现象; 在保护层胶配方中, 三者在性能上差别不大, 均满足相关标准。经比较选用 LPNR 制成的隔震支座在力学性能、老化性能、剪切性能和极限剪切性能上均满足相关使用标准。

[关键词]天然橡胶; 低蛋白天然橡胶; 低蛋白恒黏天然橡胶; 橡胶隔震支座

中图分类号: TQ332.5 文献标识码: A 文章编号: 1672-450X(2025)04-0092-07

Application Analysis of Two Types of Low-Protein Natural Rubber in Seismic Isolation Bearings for Buildings

YANG Shulei^{1,2}, ZENG Zheng^{1,2}, WANG Shuai³, XU Shan^{1,2}, ZHANG Guimei^{1,2*}

1. Yunnan Key Laboratory of Sustainable Utilization Research on Rubber Tree, Jinghong 666100, China;

2. Yunnan Institute of Tropical Crops, Jinghong 666100, China;

3. Yunnan Advanced Elasticity Material Industry Innovation Research Institute Co., Ltd, Kunming 650233, China

Abstract: Low-protein natural rubber (LPNR), low-protein constant viscosity natural rubber (LPCVNR) as raw rubber raw materials and commercially available standard rubber comparison, the three used for seismic isolation bearing inner layer rubber and protective layer rubber formulation of the rubber performance test, and select the appropriate rubber samples (LPNR) made of building seismic isolation bearings. The experimental results show that LPNR, LPCVNR as the inner layer of the rubber, in tensile strength, elongation at tear, 100% strain modulus of elasticity, hardness, adhesive strength and shear properties with the standard commercially available rubber is not much different, have reached the relevant standards, but LPCVNR has the phenomenon of after vulcanization.; In the protective layer formula, the three in the performance of almost no difference, are to meet the relevant standards. After comparison, the seismic isolation bearing made of LPNR meets the relevant standards in terms of mechanical properties, aging properties, shear properties and ultimate shear properties.

Key words: natural rubber; low-protein NR; low-protein constant viscosity NR; rubber isolation bearings

天然橡胶具有优异的弹性和力学性能, 广泛应用于建筑隔震支座领域^[1]。我国有5个震区和23个地震带^[2-3], 隔震支座的应用可减轻地震对房屋等建筑结构的影响, 保护人民群众生命财产

安全。隔震支座通常由橡胶和钢板交替叠加组成, 再通过上、下两块大钢板与建筑主体连接^[4]。天然橡胶得益于其大分子量的不饱和烯烃结构, 兼具优异的弹性、力学性能和低滞后损

收稿日期: 2025-05-22

基金项目: 云南省现代农业橡胶产业技术体系建设专项(2024KJTX008); 云南省热带作物科技创新体系建设项目(RF2024)

作者简介: 杨树磊(1997—), 男, 研究实习员, 硕士, 研究方向为天然橡胶加工。E-mail: ysl2456310201@163.com

*通信作者: 张桂梅(1981—), 女, 副研究员, 硕士, 研究方向为天然橡胶加工。E-mail: zgm1027@163.com

失,可以在隔震支座中起到承受冲击和隔绝震动的作用^[5-6]。杜永峰^[7]等研究了两种天然橡胶所制隔震支座的低温结晶性能,发现隔震支座低温下的结晶性能和稳定性因橡胶品质的不同而存在明显差异。肖同亮等^[8]采用超聚态天然橡胶作为主体材料改善了橡胶支座的性能;穆浩然等^[9]采用纤维复合增强的方式提高了支座橡胶材料的性能稳定性。这些方法改善了支座中天然橡胶的性能,但加工工艺比较复杂。

低蛋白天然橡胶(LPNR)是由天然橡胶胶乳经过添加蛋白酶处理得到的氮含量和灰分含量极低的天然橡胶,蛋白质等非胶组分的去除使得天然橡胶分子链之间的作用减少,所制的硫化胶制品弹性更高,相较于未处理的天然橡胶拥有低蠕变、低应力松弛和耐疲劳等性能,在隔震减震、绿色轮胎等领域有广泛应用^[10-13]。低蛋白恒黏天然橡胶(LPCVNR)是在蛋白酶处理天然橡胶的同时加入恒黏剂所得的天然橡胶,恒黏剂的加入可以抑制橡胶在存储过程中的内部交联,维持橡胶的塑性初值、塑性保持率、门尼黏度的稳定,便于后期的生产加工^[14-15]。

本研究以自制的低蛋白天然橡胶(LPNR)和低蛋白恒黏天然橡胶(LPCVNR)为原料进行相关性能测试,并与市售标准胶作比较,筛选出符合隔震支座要求的橡胶,再用选中的橡胶按现有成熟的隔震橡胶专用配方制作成隔震支座,进行相关测试分析和性能评价。

1 材料和方法

1.1 原材料

新鲜混合天然胶乳来自景阳公司橄榄坝第四制胶厂;木瓜蛋白酶购自东恒华道生物科技有限责任公司;市售标准胶由云南先进弹性体产业创新研究院有限公司提供;新型恒黏剂购自大冢材料科技(上海)有限公司;其余试剂均为市售。

1.2 生胶样品制备

低蛋白天然橡胶制备:鲜胶乳经过筛网过滤,在离心过滤除杂后加水稀释,再加入木瓜蛋白酶(以干胶质量计,0.1% wt)混合均匀,待胶乳凝固熟化约20 h后采用乳胶生产线进行加工,制得

低蛋白天然橡胶样品LPNR。

低蛋白恒黏天然橡胶制备:鲜胶乳经筛网过滤,离心过滤除杂后加水稀释,再加入木瓜蛋白酶(以干胶质量计,0.1% wt)和新型恒黏剂(以干胶质量计,0.2% wt)混合均匀,待胶乳凝固熟化约20 h后采用乳胶生产线进行加工,制得样品LPCVNR。上述胶样制备时间为2023年9月,均在云胶集团景阳公司橄榄坝第四制胶厂进行。

1.3 检测样品制备

1.3.1 内外层混炼胶的制备

3种橡胶生胶混炼分别按云南先进弹性体产业创新研究院有限公司“内部橡胶”和“保护层橡胶”两种自有成熟配方进行。

1.3.2 隔震支座制备

以LPNR为基体材料,采用云南先进弹性体产业创新研究院有限公司自有成熟隔震橡胶支座生产配方及工艺生产LNR500-II型试验支座6个和缩尺模型LNR300-I型试验支座2个。上述检测样品制备时间为2023年11月至2024年10月,均在云南先进弹性体产业创新研究院有限公司进行。

1.4 性能测试

1.4.1 内层胶原料性能测试

依据建筑隔震支座标准GB/T 20688.3—2006、JG/T 118—2018、DBJ 53/T-47—2020对3种橡胶的内层胶原料性能(老化前后的拉伸强度、老化前后扯断伸长率、老化前后硬度、黏合性能、压缩形变以及剪切性能)进行测试。

1.4.2 保护层胶原料性能测试

依据建筑隔震支座标准GB/T 20688.3—2006、JG/T 118—2018、DBJ 53/T-47—2020对3种橡胶的保护层胶原料性能(拉伸强度、硬度、老化性能、黏合性能、抗臭氧性能、脆性性能)进行测试。

1.4.3 支座性能测试

依据《橡胶支座 第3部分:建筑隔震橡胶支座》(GB/T 20688.3—2006)力学性能试验项目及要求进行常规力学性能及温度相关性、极限剪切性能、老化性能等力学性能试验检测。其中,LNR500-II型隔震支座为无铅支座,没有等效阻尼比、屈服力、屈服后刚度等指标,竖向刚度、水平

等效刚度“设计值”为所有测试支座实测平均值取整。LNR300-I型支座为LNR500-II型支座的缩尺模型支座,用于测试拉伸、徐变性能,不做常规力学性能测试。相关检测试验于2024年7—10月在云南先进弹性体产业创新研究院有限公司进行。

2 结果与分析

2.1 内层胶配方胶料性能测试

拉伸强度是橡胶制品力学性能的关键。由图1可知,LPNR、LPCVNR和市售标准胶的拉伸强度几乎一致,其中市售标准胶最高(27.9 MPa),LPNR最低(27.3 MPa),三者均达到相关标准要求(>13 MPa)。经过70 °C × 168 h 老化之后,市售标准胶和LPCVNR拉伸强度有所提高,拉伸强度变化率分别为0.58%和1.09%,LPNR拉伸强度稍有下降,拉伸强度变化率为-0.4%。此外,试验中发现胶样LPCVNR存在一定的后熟现象。

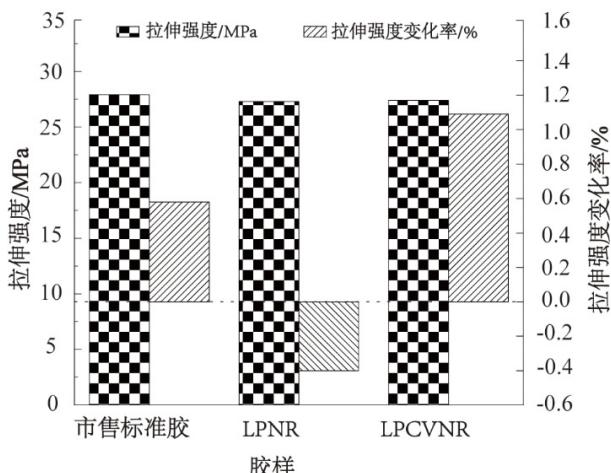


图1 内层胶原料拉伸强度及老化后变化率

扯断伸长率和100%应变弹性模量反映了橡胶的弹性,是建筑隔震支座性能表现的关键。由图2可知,三者的扯断伸长率以市售标准胶最高(805%),LPNR最低(785%),均达到相关标准要求(>600%)。从扯断伸长率变化率上看,LPCVNR的变化率最大,这可能与其存在后熟现象有关。由图3可知,市售标准胶和LPNR的100%应变弹性模量分别为1.24 MPa和1.20 MPa,LPCVNR则达

到1.45 MPa,而老化之后LPCVNR的100%应变弹性模量减小,变化率为-2%,其他两个稍有增大。

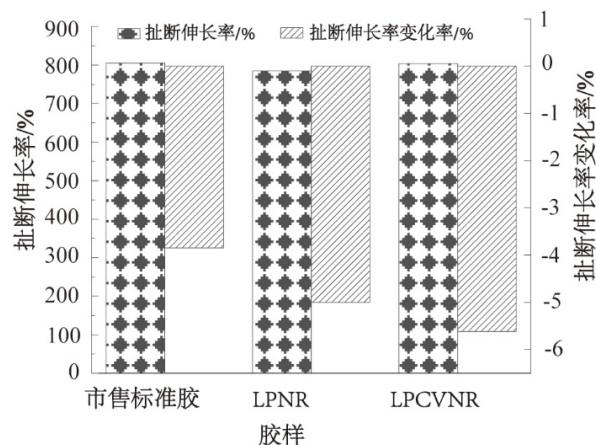


图2 内层胶原料扯断伸长率及老化后变化率

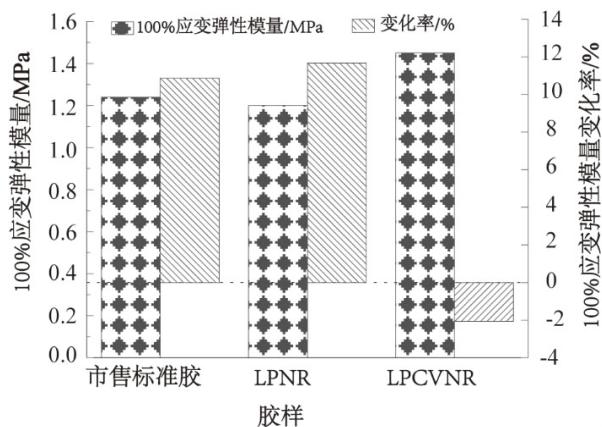


图3 内层胶原料100%应变弹性模量及老化后变化率

硬度是隔震支座的考核指标,过硬或过软的胶料都无法提供有效的隔震效果。图4为市售标准胶、LPNR、LPCVNR老化前后的硬度,老化前三者硬度相同均为44,老化后变化值依次为+2,+3,+3。根据标准里胶料硬度范围要求(35~44)和硬度在老化前后的变化值要求(-5~+10)来分析,3种原料制备的混合胶料均符合标准。

隔震支座通常由橡胶和钢板交替叠加构成,胶料与钢板之间必须保持较好的黏结性能和较低的压缩永久形变才能保证支座的正常使用。由表1可知,LPNR和LPCVNR黏合性能略低于市售标准胶,但均达到相关标准(≥ 6 kN/m),压缩永久形变上基本相同,均达到相关标准($\leq 35\%$)。

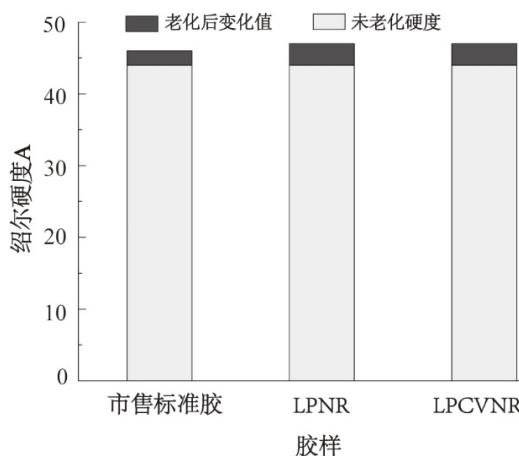


图4 内层胶原料绍尔硬度及老化后变化值

表1 内层胶原料黏结性能

测试项目	市售标准胶	LPNR	LPCVNR
黏合性能/ (kN·m ⁻¹)	12	10	10
压缩性能/%	19	18	19

注: 黏合性能指橡胶与金属黏合后采用 90° 剥离法测试, 下同。

隔震支座需要承受不同方向的力, 支座内部橡胶需要具有较高的剪切模量和一定的等效阻尼比。由表 2 可知, 不同温度下 LPNR 和 LPCVNR 均具有与市售标准胶相当的剪切模量和等效阻尼比, 二者在震动发生时能有与市售标准胶相当的耗能, 特别在-10℃以下时, 低蛋白胶样等效阻尼比大于市售标准胶, 这与低蛋白胶样分子链间交联作用较小是相对应的。但是, LPCVNR 的破坏剪应变略低于市售标准胶和 LPNR, 这可能与 LPCVNR 胶样未硫化完全导致的制品性能不稳定有关。

表2 内层胶原料剪切性能

测试项目	市售标准胶	LPNR	LPCVNR
40℃剪切模量/MPa	0.42	0.41	0.41
40℃等效阻尼比/%	1.87	1.67	1.91
23℃剪切模量/MPa	0.42	0.41	0.42
23℃等效阻尼比/%	2.22	2.14	2.24
0℃剪切模量/MPa	0.43	0.43	0.45
0℃等效阻尼比/%	2.86	2.76	2.94
-10℃剪切模量/MPa	0.48	0.50	0.50
-10℃等效阻尼比/%	3.94	4.65	4.48
-20℃剪切模量/MPa	0.57	0.65	0.66
-20℃等效阻尼比/%	4.92	5.87	5.78
破坏剪应变/mm	73.89	73.01	70.90

2.2 保护层配方胶料性能测试

保护层是隔震支座的橡胶外皮, 对内部胶料和钢板起到保护和包覆作用。由图 5 可知, 市售标准胶、LPNR 和 LPCVNR 的拉伸强度都在 26 MPa 以上, 其中市售标准胶拉伸强度最高 (28.26 MPa)。经过 70 ℃ × 168 h 老化之后, LPCVNR 的变化率最大, 这与该胶样存在一定的后熟现象有关, 不利于最终制品性能的稳定。

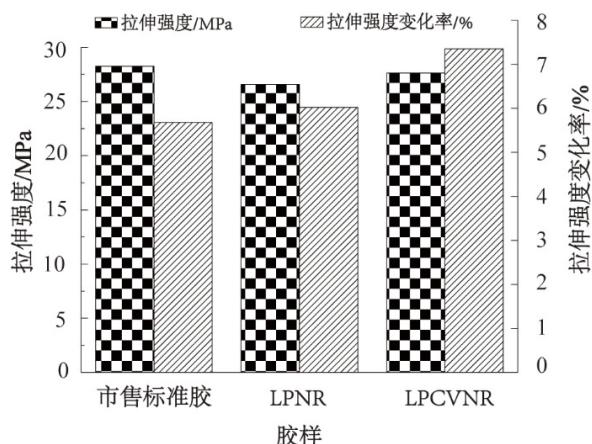


图5 保护层原料拉伸强度及老化后变化率

保护层橡胶虽不是主要的受力部分, 但在隔震支座工作状态下仍需要具有较好的伸长率和弹性, 也需要具有一定的硬度。由图 6 可知, 3 种橡胶的扯断伸长率均在 600% 以上, 其中 LPCVNR 的最高 (720%), 市售标准胶则与 LPNR 相近。老化后 LPCVNR 的变化率最大, 达到 16.68%, 表明其抗老化性能相对较差。由图 7 可知, 市售标准胶、LPNR 和 LPCVNR 的 100% 弹性应变模量依次提高, 总体相近。老化之后 LPCVNR 的变化率较大, 表明其性能衰减在 3 种橡胶中较为严重。

保护层橡胶直接与内部胶、钢板和外部环境三方相接触, 需重点考察其与钢板的黏合性能和抵抗环境变化的能力。由表 3 可知, 市售标准胶的黏合性能略好于 LPNR 和 LPCVNR, 三者均符合标准 (>6 kN/m)。3 种橡胶的脆性性能和抗臭氧性能相同。3 种橡胶的硬度值相差不大, 其中市售标准胶最高为 58, LPNR 最低为 54, 经过低温环境处理之后三者硬度的变化基本一致, 老化后三者的变化值均为 +2。

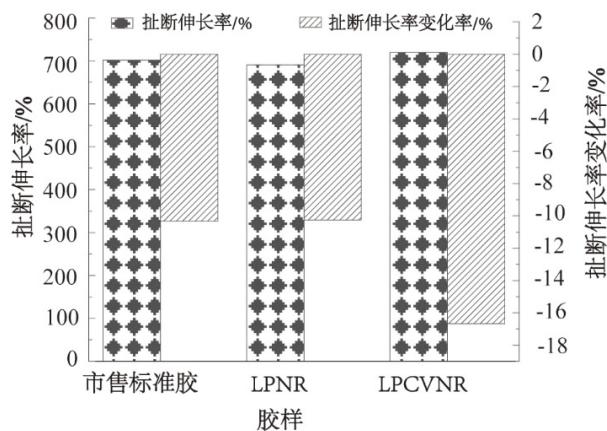


图 6 保护层原料扯断伸长率及老化后变化率

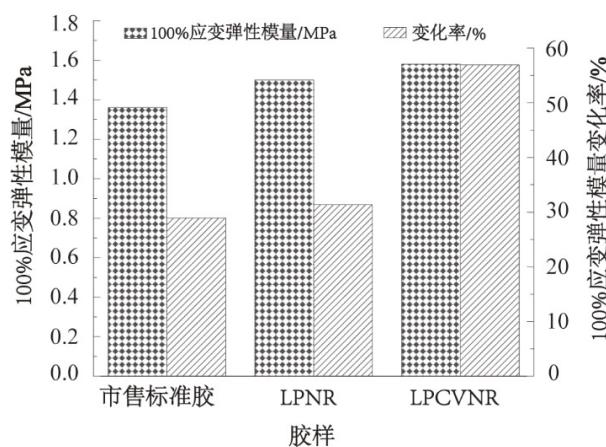


图 7 保护层原料 100% 应变弹性模量及老化后变化率

表 3 保护层原料黏合及抗环境变化性能

测试项目	市售标准胶	LPNR	LPCVNR
黏合性能/(kN·m ⁻¹)	12	10	10
脆性性能/℃	-46.5	-46.5	-46.5
抗臭氧性能	不龟裂	不龟裂	不龟裂
低温结晶初始硬度	58	54	56
性能 -25 ℃, 168 h 后硬度	90	89	90
168 h 后硬度变化率/%	55.17	64.8	60.71
70 ℃×168 h 硬度变化	+2	+2	+2

2.3 支座性能测试

经过 2.1、2.2 内层胶和保护层橡胶原料测试对比之后,发现 LPNR 的性能与市售标准胶性能相当且符合要求,而 LPCVNR 因为存在后熟现象,一定程度上会造成橡胶制品性能稳定性降低,因此不做考虑。支座实验中选择 LPNR 为原料进行支座性能测试分析。

由表 4 可知,由 LPNR 制成的试验支座的力学性能满足标准 GB/T 20688.3—2006 和 DBJ 53/T-47—2020 中关于竖向刚度、水平等效刚度、竖向压缩变形、侧向不均匀变形、极限拉应力的各项设计参数要求,均达到合格线。由表 5 可知,依据 DBJ 53/T-47—2020 要求,对制成的试验支座耐久-老化性能进行了关于竖向压缩刚度、水平等效刚度、水平极限变形能力和支座外观的测试,各项结果均为合格。

表 4 试验支座的常规力学性能测试

测试项目	设计参数	检验结果	偏差
竖向刚度/(kN·mm ⁻¹)	1 300 1	299.35	-0.05% (±20%)
水平等效刚度/(kN·mm ⁻¹)	0.88	0.868	-1.33% (±10%)
竖向压缩变形/mm	≤5	2.12	合格
侧向不均匀变形/mm	≤3	0.40	合格
极限拉应力/MPa	≥4.0	>4.01	合格

注: GB/T 20688.3—2006 极限拉应力不小于 1.0 MPa, DBJ 53/T-47—2020 极限拉应力不小于 4.0 MPa。

表 5 试验支座的耐久-老化性能测试

测试项目	老化前检测值	老化后检测值	变化率	判定
竖向压缩刚度/(kN·mm ⁻¹)	1 267.9			合格
水平等效刚度/(kN·mm ⁻¹)	0.86	0.95	+10.47%	合格
水平极限变形能力			>400%	合格
支座外观			目视无龟裂	合格

注: 老化后刚度变化率在±20%内,极限剪应变≥360%。

依据标准 DBJ 53/T-47—2020, 老化前无需检测水平极限变形能力, 老化后无需检测竖向压缩刚度。

隔震支座的工作状态决定了其受力方式通常处于剪切应变的状态。由表 6 可知,在不同应变、不同压力、不同加载频率、不同加载次数以及不同温度下,试验支座水平等效刚度和竖向刚度的检测值部分达到基准,其余数值的变化率也都在标准范围内,均满足对应的要求,认为 LPNR 制备的隔震支座满足使用要求的剪切性能。橡胶隔震支座处于极限剪切性能状态,在设计压力条件下,上下面水平相对位移达到设计胶层厚度的 450%,本试验支座设计胶层厚度 92 mm,即极限剪切上下面相对剪切位移达 414 mm,未出现破坏,满足使用要求。

表 6 试验支座的剪切性能相关性测试

测试项目	检测条件		检测值/(kN·mm ⁻¹)	变化率	判定
剪应变相关性(±25%)	50% 剪应变		0.97	+16.87%	合格
	100% 剪应变		0.83	基准	合格
	150% 剪应变		0.78	-6.02%	合格
	200% 剪应变		0.75	-9.64%	合格
	250% 剪应变		0.74	-10.84%	合格
压应力相关性(±15%)	5 MPa		0.98	+6.52%	合格
	10 MPa		0.92	基准	合格
	15 MPa		0.83	-9.78%	合格
加载频率相关性(±10%)	0.02 Hz		0.91	+5.81%	合格
	0.05 Hz		0.89	+3.49%	合格
	0.1 Hz		0.87	+1.16%	合格
	0.2 Hz		0.86	基准	合格
反复加载次数相关性(±25%)	第1次		0.89	+1.14%	合格
	第3次		0.88	基准	合格
	第5次		0.88	0	合格
	第10次		0.87	-1.14%	合格
	第30次		0.87	-1.14%	合格
	第50次		0.87	-1.14%	合格
温度相关性(水平等效±25%, 坚向±30%)	-20 °C	坚向刚度	1 560.2	+16.75%	合格
		水平等效刚度	1.08	+20.0%	合格
	-10 °C	坚向刚度	1 457.2	+18.38%	合格
		水平等效刚度	0.99	+10.0%	合格
	0 °C	坚向刚度	1 360.8	+10.55%	合格
		水平等效刚度	0.94	+4.44%	合格
	23 °C	坚向刚度	1 230.9	基准	合格
		水平等效刚度	0.90	基准	合格
	40 °C	坚向刚度	1 218.2	-1.03%	合格
		水平等效刚度	0.86	-4.44%	合格

3 结论

(1) 以市售标准胶、LPNR、LPCVNR 作为内层胶的原料,3 种胶料的拉伸强度、扯断伸长率、100% 应变弹性模量、硬度以及老化后的性能均能达到隔震支座原料的标准,胶料与钢板的黏合性能、压缩性能和剪切应变性能也都满足要求。但是在测试中发现,LPCVNR 胶料存在后熟现象,不利于制品的性能稳定,因此不建议将其用于隔震支座的内层胶。

(2) 市售标准胶、LPNR、LPCVNR 用于保护层,拉伸强度、扯断伸长率、100% 应变弹性模量、硬度以及老化后的性能均能达到隔震支座保护层原料的标准,胶料的黏合性能、抗臭氧性能、脆性性能以及低温结晶性能均能满足相关要求,LPNR 和 LPCVNR 均可用于支座保护层配方。

(3) 根据内层胶原料和保护层原料测试结果,选用 LPNR 作为制备试验隔震支座的原料,测试表明,LPNR 制成支座的力学性能、老化性能、剪切性能均满足相关标准要求。

参考文献:

- [1] 王文博,赵晓健,雷宇,等. 天然橡胶在减震降噪领域的研究进展[J]. 聚酯工业,2024,37(4):66-69.
- [2] 黄玮琼,李文香,曹学锋,等. 中国大陆地震资料完整性研究之二——分区地震资料基本完整的起始年分布图象[J]. 地震学报,1994(4):423-432.
- [3] 梁光河. 中国地震带分布[J]. 百科知识,2016(14):14.
- [4] 舒赣平,墨泽,刘汶津,等. 空气弹簧-铅芯橡胶支座三维隔震装置力学性能[J]. 东南大学学报(自然科学版),2024,54(6):1395-1403.
- [5] IVANOSKA-DACIKJA, BOGOEVA-GACEVA G, JURK

- R, et al. Assessment of the dynamic behavior of a new generation of complex natural rubber-based systems intended for seismic base isolation [J]. *Journal of Elastomers & Plastics*, 2017, 49(7):595-608.
- [6] DERHAM CJ, KELLY JM, THOMAS AG. Nonlinear natural rubber bearings for seismic isolation [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1985, 84(7):417-428.
- [7] 杜永峰, 王光环, 李元, 等. 基于DSC的隔震支座用橡胶材料低温结晶试验 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2025, 52(5):185-194.
- [8] 株洲时代新材料科技股份有限公司. 一种建筑隔震支座用高性能橡胶材料 [J]. *橡胶科技*, 2024, 22(2):115.
- [9] 穆浩然. 纤维增强橡胶隔震支座力学性能与减震性能研究 [D]. 石家庄:石家庄铁道大学, 2023.
- [10] 张桂梅, 岩利, 姜士宽, 等. 低蛋白天然橡胶的制备及性能 [J]. *弹性体*, 2022, 32(1), 10-15.
- [11] NUN-ANAN P, WISUNTHORN S, PICHAIYUT S, et al. Influence of nonrubber components on properties of unvulcanized natural rubber [J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2020, 31(1):44-59.
- [12] NGUYEN LH, NGUYEN, HD, TRAN PT, et al. Biodegradation of natural rubber and deproteinized natural rubber by enrichment bacterial consortia [J]. *Biodegradation*, 2020, 31(4/6):303-317.
- [13] 肖同亮, 穆洪帅, 宋大龙, 等. 国产脱蛋白天然橡胶在轨道交通减振产品中的应用 [J]. *特种橡胶制品*, 2022, 43(5):14-18.
- [14] 岩利, 姜士宽, 徐荣, 等. 低蛋白恒黏度天然橡胶的制备及性能 [J]. *弹性体*, 2023, 33(3):16-19.
- [15] 罗梓蓉, 张北龙, 陶金龙, 等. 恒粘剂对微生物凝固新鲜天然胶乳制备的恒粘天然橡胶性能的影响 [J]. *橡胶工业*, 2024, 71(2):121-126.