

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.11.007

聚氨酯阻尼材料及其约束阻尼结构动态性能

周海军¹, 张晓蕾², 周萌萌¹, 陈孝起¹, 杨淑兰¹, 刘德居², 李彦涛¹

(1. 河北省科学院能源研究所, 石家庄 050081; 2. 河北科技大学, 石家庄 050054)

摘要: 分别采用聚己二酸新戊二醇酯-2,4-甲苯二异氰酸酯(TDI)-3,3'-二氯-4,4'-二氨基二苯甲烷(MOCA), 聚己二酸新戊二醇酯-异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)-MOCA, 聚丁二酸 1115 酯酯-TDI-MOCA 体系合成 3 种聚氨酯阻尼材料——PU-1, PU-2, PU-3, 并制备了 3 种四片型约束阻尼结构, 进行动态性能试验, 考察了加载频率、激励振幅、试验温度对约束阻尼结构的水平等效刚度、等效阻尼比的影响。结果表明, 3 种聚氨酯阻尼材料的损耗因子($\tan\delta$)峰值均在 0.8 以上, 其中 PU-3 的最高, 为 1.04, $\tan\delta > 0.3$ 的有效阻尼温域都在 60℃ 以上; 随激励振幅和试验温度的上升, 3 种聚氨酯约束阻尼结构的水平等效刚度均下降, 随加载频率的增加, PU-2 体系的水平等效刚度升高, 而其它两种体系均下降; 随激励振幅的上升, PU-2 体系的等效阻尼比基本不变, 而其它两种体系均先升高后下降, 在试验温度范围内 3 种约束阻尼结构的等效阻尼比均在 0.20 以上。综合分析, 以聚丁二酸 1115 酯酯-TDI-MOCA 合成的聚氨酯阻尼材料及其约束阻尼结构综合性能最优。

关键词: 聚氨酯阻尼材料; 约束阻尼结构; 损耗因子; 水平等效刚度; 等效阻尼比

中图分类号: TQ323.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)11-0035-05

Polyurethane Damping Material and Dynamic Performance of Constrained Damping Structure

Zhou Haijun¹, Zhang Xiaolei², Zhou Mengmeng¹, Chen Xiaoxi¹, Yang Shulan¹, Liu Deju², Li Yantao¹

(1. Institute of Energy Resources, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang 050081, China;

2. Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050054, China)

Abstract: Three polyurethane damping materials (PU-1, PU-2, PU-3) were synthesized by three systems of polyneopentanediol adipate-2,4-tolylene diisocyanate (TDI)-3,3'-dichloro-4,4'-diamino-diphenylmethane (MOCA), polyneopentanediol adipate-isophorone diisocyanate (IPDI)-MOCA and succinic acid ester 1115-TDI-MOCA. Meanwhile, there were three kinds of four-piece type constrained damping structures prepared by corresponding three polyurethane damping materials and tested for dynamic performances. In addition, the effects of loading frequency, excitation amplitude and temperature on the horizontal equivalent stiffness and equivalent damping ratio of the constrained damping structure were studied. The results show that the loss factor ($\tan\delta$) peak values of the three kinds of damping materials are all higher than 0.8, with the highest value of 1.04 for PU-3, and the three damping materials all have effective damping temperature range (above 60℃) of $\tan\delta > 0.3$. With the increase of excitation amplitude and temperature, the horizontal equivalent stiffness of the three constrained damping structures decrease, and with the increase of loading frequency, the horizontal equivalent stiffness of PU-2 increases and others decrease. With the increase of excitation amplitude, the equivalent damping ratio of PU-2 has no change basically but others first increase and then decrease, within the test temperature, the equivalent damping ratio of the three constrained damping structure are above 0.2. In summary, the damping material synthesized by succinic acid ester 1115-TDI-MOCA and its constrained damping structure have best overall performances.

Keywords: polyurethane damping material; constrained damping structure; loss factor; horizontal equivalent stiffness; equivalent damping ratio

粘弹性阻尼材料常用于振动控制等场合, 通常情况下, 粘弹性阻尼材料很难单独使用, 而是通过附加在金属结构上, 共同构成复合阻尼结构^[1]。常用的复合阻尼结构有自由型阻尼结构和约束型阻尼结构两种^[2-3]。约束型阻尼结构由基层、阻尼层、约束层 3 部分构成。基层和约束层一般为钢板、铝板、合

金板、陶瓷板等高弹性模量材料, 阻尼层一般为粘弹性阻尼材料^[4]。约束型阻尼结构在受到外力作用时, 阻尼层与基层和约束层之间产生拉伸形变和压缩形变, 阻尼层将部分机械能转化为热能消耗掉, 从而达

联系人: 周海军, 副研究员, 主要从事高分子材料的研究与开发
收稿日期: 2017-09-12

到减振降噪的目的^[5-7],而广泛应用于航空航天、工业机械、土木工程、桥梁等领域^[8]。

随着现代工业的迅速发展,约束型阻尼结构因其独特的功能性和实用性而备受关注,结构研究日趋成熟,各种粘弹性阻尼材料作为阻尼层的研究层出不穷,但以高性能的聚氨酯阻尼材料为阻尼层的约束型阻尼结构研究涉略较少。盖盼盼^[9]采用粘弹性阻尼材料作为阻尼层,通过 Matlab 对动态力学性能分析 (DMA) 数据进行拟合,对比分析了频率、阻尼层厚度等对损耗因子的影响。王焘^[10]选用聚氨酯基阻尼材料作为阻尼层,采用悬臂梁强迫共振法,考察了阻尼厚度等对结构损耗因子的影响。王绍宸等^[11]以聚醚型聚氨酯阻尼材料为阻尼层,环氧材料为约束层,发现该阻尼结构具有较高的阻尼比。张静^[12]采用聚氨酯阻尼材料作为阻尼层,玻璃条为约束层,采用悬臂梁共振法对约束结构进行测试,并对阻尼材料及其约束结构的老化性能进行表征。高小茹^[13]采用接枝型聚氨酯弹性体为阻尼层,环氧材料为约束层,制备了约束阻尼复合材料,并对其进行表征,其损耗因子达到 0.6 以上。以上研究距离在低频区对于刚度、阻尼比要求较高的高阻尼减隔震支座、阻尼器等方面的应用还存在一定差距,等效阻尼比很少达到 0.2 以上。

笔者采用聚己二酸新戊二醇酯-2,4- 甲苯二异氰酸酯 (TDI)-3,3'- 二氯-4,4'- 二氨基二苯甲烷 (MOCA),聚己二酸新戊二醇酯-异佛尔酮二异氰酸酯 (IPDI)-MOCA,聚丁二酸羟基特戊酸新戊二醇单酯酯 (聚丁二酸 1115 酯酯)-TDI-MOCA 3 种体系合成了具有同碳二甲基结构的聚氨酯阻尼材料,该材料阻尼性能优异,且具有很好的力学性能,其综合性能能够满足阻尼器、高阻尼减隔震支座对材料的要求。按照 GB/T 20688.1-2007 隔震橡胶支座的试验要求,将聚氨酯阻尼材料与钢板复合,制成了四片型约束型阻尼结构,对材料及其结构的动态性能进行测试,考察加载频率、激励振幅、温度等对约束型阻尼结构的水平等效刚度、等效阻尼比等动态性能的影响,为不同类型的隔振器、阻尼垫、阻尼器、减隔震支座等减震结构的设计与制作提供依据。

1 实验部分

1.1 原料

TDI-100 : 工业级,德国 Bayer 公司;

IPDI : 工业级,德国 Bayer 公司;

MOCA : 工业级,苏州市湘园特种精细化工有

限公司;

聚己二酸新戊二醇酯、聚丁二酸 1115 酯酯: 自制。

1.2 设备及仪器

DMA 仪: Q800 型,沃特斯中国有限公司;

动态试验机: UD-3600 型,台湾优肯科技股份有限公司。

1.3 聚氨酯阻尼材料及其结构制备

采用聚己二酸新戊二醇酯、聚丁二酸 1115 酯酯及 TDI,IPDI 与 MOCA 合成了 3 种聚氨酯阻尼材料,分别为 PU-1, PU-2 和 PU-3。其中 PU-1 采用聚己二酸新戊二醇酯与 TDI-100 合成预聚体,两者物质的量之比为 1:2; PU-2 采用聚己二酸新戊二醇酯与 IPDI 合成预聚体,两者物质的量之比为 1:2; PU-3 采用聚丁二酸 1115 酯酯与 TDI-100 合成预聚体,两者物质的量之比为 1:2。

将上述制备的预聚体再与扩链剂 MOCA 按羟基与氨基物质的量之比为 1:0.95 混合均匀后,浇注模具中,100℃下 4 h 或室温放置 7 d 固化成型。

将制备的聚氨酯阻尼材料与金属板复合组成约束型阻尼结构,其为四片剪切型,试件由 4 片聚氨酯阻尼材料和 4 块金属板组成,如图 1 所示,聚氨酯阻尼板厚 3.0 mm、长宽均为 25 mm。



图 1 聚氨酯约束阻尼结构

1.4 性能测试

聚氨酯阻尼材料动态性能测试: 采用 DMA 法, 形变模式为薄膜拉伸, 测试条件频率 1 Hz, 升温速率 5℃/min ;

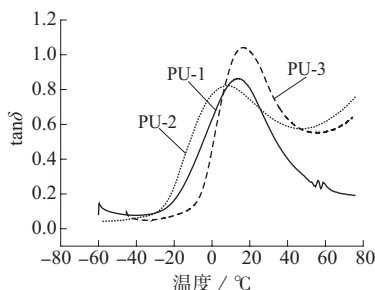
聚氨酯约束阻尼结构动态性能测试: 按照 GB/T 20688.1-2007 试验方法, 采用正弦激励法^[14], 加载频率分别为 0.05, 0.3, 1.5 Hz, 激励振幅分别为 0.3, 0.6, 1.5, 3.0, 6.0, 9.0 mm, 测试温度分别为 -20, -10, 0, 23, 40℃。

2 结果与讨论

2.1 聚氨酯阻尼材料动态性能

对制备的 3 种聚氨酯阻尼材料进行了 DMA 测试, 获得了相应的损耗因子 ($\tan\delta$) 曲线, 结果如图 2 所示。

由图 2 可以看出, 由 TDI 制备的 PU-1 材料的 $\tan\delta$ 峰值 ($\tan\delta_{\max}$) 为 0.87, $\tan\delta_{\max}$ 所对应的温度为

图2 聚氨酯阻尼材料的 $\tan\delta$ 曲线

14.3℃, $\tan\delta > 0.3$ 的有效阻尼温域为 $-11.5 \sim 50^\circ\text{C}$; 由 IPDI 制备的 PU-2 的 $\tan\delta_{\max}$ 为 0.83, $\tan\delta_{\max}$ 所对应的温度为 7.98℃, $\tan\delta > 0.3$ 的有效阻尼温域为 $-18.5 \sim 60^\circ\text{C}$ 。与 PU-1 相比, PU-2 有效阻尼温域更宽,其初始温度低了 7℃,这是因为由 IPDI 制备的聚氨酯材料的硬段结构规整性差,链段可以在更低的温度下发生运动,从而使硬段更好地分散在软相中,软硬段的接触面积相对增多,当材料振动时,更多的机械能会转变成热能耗散。

PU-3 的 $\tan\delta_{\max}$ 为 1.04, $\tan\delta_{\max}$ 所对应的温度为 16.5℃, $\tan\delta > 0.3$ 的有效阻尼温域为 $-2.1 \sim 60^\circ\text{C}$, 相对于 PU-1, $\tan\delta_{\max}$ 和对应温度提高幅度较大。这是因为 PU-1 和 PU-3 硬段结构相同,都是由 TDI-MOCA-TDI 构成,所不同的是软段聚酯二醇的结构,PU-3 的软段为聚丁二酸 1115 酯酯,PU-1 的软段为聚己二酸新戊二醇酯,而前者侧甲基含量远高于后者,同时次甲基含量降低,其运动需要克服的内摩擦阻力增大,导致 PU-3 的 $\tan\delta_{\max}$ 及其对应的温度升高。

2.2 试验条件对约束阻尼结构水平等效刚度的影响

水平等效刚度体现了约束阻尼结构水平方向抵抗弯曲变形的能力,具有一定水平等效刚度的约束阻尼结构能够有效防止水平变形过大对结构造成的破坏。测试 PU-1, PU-2, PU-3 在 23℃ 时,不同激励幅值、不同加载频率条件下的水平等效刚度,具体数据列于表 1、表 2、表 3。

表1 不同试验条件下 PU-1 约束阻尼结构的水平等效刚度 kN/m

加载频率 / Hz	激励幅值 / mm					
	0.3	0.6	1.5	3.0	6.0	9.0
0.05	515.8	462.5	386.1	359.4	290.8	212.2
0.30	453.8	425.8	359.7	306.6	259.0	204.0
1.50	423.4	392.8	291.0	294.4	225.9	182.7

表2 不同试验条件下 PU-2 约束阻尼结构的水平等效刚度 kN/m

加载频率 / Hz	激励幅值 / mm					
	0.3	0.6	1.5	3.0	6.0	9.0
0.05	345.9	327.2	291.3	248.7	196.4	163.3
0.30	415.9	424.1	357.5	295.8	225.8	176.4
1.50	547.5	501.1	421.2	341.5	234.0	167.4

表3 不同试验条件下 PU-3 约束阻尼结构的水平等效刚度 kN/m

加载频率 / Hz	激励幅值 / mm					
	0.3	0.6	1.5	3.0	6.0	9.0
0.05	619.7	588.8	397.7	326.4	232.2	189.9
0.30	579.8	505.8	391.6	325.5	210.5	180.4
1.50	567.2	494.0	388.2	311.4	185.6	174.3

约束阻尼结构需具有一定的水平等效刚度,这样能够保证结构在一定的载荷下不轻易发生晃动,同时避免过大载荷下发生过大大水平变形而导致结构永久损坏。由表 1、表 2 和表 3 可以看出,3 种聚氨酯约束阻尼结构的水平等效刚度随着激励幅值的增加明显呈现下降趋势,在较大激励幅值下,聚氨酯约束阻尼结构的水平等效刚度相对小一些,这对于减震效果具有一定的益处,可以延长减震周期。同时随着激励幅值的增加,基于 IPDI 的 PU-2 体系水平等效刚度变化值相较于 TDI 的 PU-1, PU-3 体系小。这是因为 IPDI 为脂肪族二异氰酸酯,TDI 为芳香族二异氰酸酯,作为聚氨酯阻尼材料的硬段,基于 IPDI 的体系相较于 TDI 的体系柔性好、模量低,水平方向发生位移时,施加的水平力小,水平等效刚度及其变化率都相对较低。

另外,还可以看出随着加载频率的增加,PU-2 体系的水平等效刚度逐渐增加,而 PU-1, PU-3 体系的水平等效刚度随着加载频率的增加逐渐降低。这说明基于 IPDI 的 PU-2 体系在低频时,水平等效刚度较小,有利于结构的阻尼缓冲。但在实际应用过程中,对于材料与结构来说并不是水平等效刚度越小越好,其越小结构越容易被破坏,所以在实际应用过程中,要根据工况使用需求综合考虑,选取综合性性能优异的材料与结构。

2.3 试验温度对约束阻尼结构水平等效刚度的影响

测试 PU-1, PU-2, PU-3 在加载频率为 0.3 Hz, 激励幅值为 3 mm, 试验温度为 $-20, -10, 0, 23, 40^\circ\text{C}$ 条件下的水平等效刚度,具体数据见表 4。

表4 不同试验温度下聚氨酯约束阻尼结构水平等效刚度 kN/m

材料种类	试验温度 / $^\circ\text{C}$				
	-20	-10	0	23	40
PU-1	4 623	3 675	1 148	306.6	258
PU-2	4 257	3 340	1 007	295.8	228
PU-3	5 001	3 999	1 217	325.5	273

由表 4 可以看出,在加载频率和激励振幅一定的情况下,3 种聚氨酯约束阻尼结构水平等效刚度随着试验温度的升高明显呈现下降趋势,但 PU-1, PU-2, PU-3 的水平等效刚度随着试验温度的变化率相差不大,这是因为无论是硬段结构不同的 PU-1, PU-2, 还是软段结构不同的 PU-1, PU-3, 这

3种聚氨酯阻尼材料的分子量相差不大,这说明了在材料的分子量和分子结构相近的情况下,水平等效刚度随试验温度变化的趋势基本相似。

2.4 试验条件对约束阻尼结构等效阻尼比的影响

等效阻尼比是指结构在一个载荷循环内吸收的能量与弹性变形能的比值,体现了约束阻尼结构在振动过程中耗散能量的能力,等效阻尼比越大,约束阻尼结构的阻尼性能越好,减震效果越好。测试PU-1, PU-2, PU-3在23℃时,不同激励幅值、不同加载频率条件下的等效阻尼比,具体数据列于表5、表6、表7。

表5 不同试验条件下PU-1约束阻尼结构的等效阻尼比

加载频率 / Hz	激励幅值 / mm					
	0.3	0.6	1.5	3.0	6.0	9.0
0.05	0.22	0.28	0.29	0.36	0.29	0.28
0.30	0.26	0.32	0.36	0.39	0.31	0.30
1.50	0.26	0.28	0.29	0.26	0.22	0.21

表6 不同试验条件下PU-2约束阻尼结构的等效阻尼比

加载频率 / Hz	激励幅值 / mm					
	0.3	0.6	1.5	3.0	6.0	9.0
0.05	0.37	0.39	0.39	0.38	0.39	0.39
0.30	0.38	0.40	0.40	0.40	0.40	0.39
1.50	0.22	0.24	0.25	0.24	0.23	0.22

表7 不同试验条件下PU-3约束阻尼结构的等效阻尼比

加载频率 / Hz	激励幅值 / mm					
	0.3	0.6	1.5	3.0	6.0	9.0
0.05	0.46	0.59	0.55	0.53	0.51	0.49
0.30	0.42	0.55	0.54	0.51	0.48	0.48
1.50	0.36	0.40	0.38	0.35	0.32	0.30

由表5、表6、表7可以看出,3种聚氨酯阻尼结构等效阻尼比都比较高,均在0.20以上,而软段结构为聚丁二酸1115酯酯的PU-3等效阻尼比明显更高,这是因为PU-3侧甲基含量远高于PU-1, PU-2,导致其在一个载荷循环吸收的能量更多,PU-3阻尼材料的阻尼性能更好。由表5~表7还可以看出,基于TDI的PU-1, PU-3体系的等效阻尼比随着激励振幅升高先升高后降低,基于IPDI的PU-2体系随着激励振幅升高变化不大,这是因为PU-2的硬段以脂肪族结构为主,其对约束阻尼结构在一个载荷循环内吸收的能量与弹性变形能变化的影响较硬段以芳香族结构为主的PU-1和PU-3体系小。

2.5 试验温度对约束阻尼结构等效阻尼比的影响

温度直接影响材料的具体性能,等效阻尼比在不同温度下大小体现了约束结构的阻尼能力。测试PU-1, PU-2, PU-3在加载频率为0.3 Hz,激励幅值为0.6 mm,试验温度为-20, -10, 0, 23, 40℃条件下

的等效阻尼比,具体数据见表8。

表8 不同试验温度下聚氨酯约束阻尼结构等效阻尼比

材料种类	试验温度 / ℃				
	-20	-10	0	23	40
PU-1	0.25	0.29	0.39	0.33	0.29
PU-2	0.27	0.31	0.41	0.39	0.37
PU-3	0.22	0.28	0.38	0.55	0.40

由表8可以看出,PU-1, PU-2, PU-3的3种约束阻尼结构在-20~40℃均具有较高的等效阻尼比,体现了3种结构均具有较宽的阻尼温域,能够满足不同自然环境下结构对高阻尼的使用要求。而相对于PU-1, PU-3体系,基于IPDI的PU-2体系的等效阻尼比随温度变化最小。这是因为脂肪族结构对一个载荷循环内吸收的能量与弹性变形能变化的影响小。对于不同软段结构的PU-1和PU-3体系,PU-1体系等效阻尼比在0℃以下高于PU-3,在23℃以上低于PU-3,这是因为以聚丁二酸1115酯酯为软段的PU-3体系的侧甲基含量和作为次硬段的酯基含量高于以聚己二酸新戊二醇酯为软段的PU-1,导致其阻尼温域向高温方向移动。由于结构在振动过程中会将一部分机械能转化为热能耗散掉,其在连续工作过程中温度会有所升高,因此在实际应用中PU-3要优于PU-1和PU-2。虽然PU-3的水平等效刚度高于PU-1, PU-2,但是由于其材料本身 $\tan\delta_{\max}$ 高于PU-1和PU-2,且PU-3具有很高的等效阻尼比,所以综合应用要求、材料与结构的性能等多个因素考量,可以认为PU-3的阻尼性能最为优异。

3 结论

(1) 3种聚氨酯阻尼材料在 $\tan\delta>0.3$ 时的有效阻尼温域都在60℃以上,其中软段为聚丁二酸1115酯酯、硬段为TDI的聚氨酯阻尼材料 $\tan\delta_{\max}$ 最高,为1.04。

(2) 在试验温度、加载频率一定的条件下,聚氨酯阻尼材料约束阻尼结构的水平等效刚度随着激励幅值的增加明显下降;在试验温度、激励振幅一定的条件下,基于IPDI的约束阻尼结构的水平等效刚度随着加载频率的增加而逐渐增加,而基于TDI的约束阻尼结构的水平等效刚度随着加载频率的增加而逐渐降低;在加载频率、激励振幅一定的条件下,3种体系结构的水平等效刚度随着测试温度的升高明显呈下降趋势。

(3) 3种约束阻尼结构的等效阻尼比都比较高,而软段结构为聚丁二酸1115酯酯的等效阻尼比明

显更高;在试验温度、加载频率一定的条件下,基于TDI的体系等效阻尼比随激励振幅增加先升高后降低,基于IPDI的体系随着激励振幅升高变化不大。3种体系的阻尼结构在试验温度范围内的等效阻尼比均在0.20以上,具有较宽的阻尼温域。综合多个因素考量,PU-3体系的阻尼性能最为优异。

参考文献

- [1] 倪楠楠,温月芳,贺德龙,等.结构-阻尼复合材料研究进展[J].材料工程,2015,43(6):90-101.
Ni Nannan, Wen Yuefang, He Delong, et al. Process on the research of structure-damping composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(6):90-101.
- [2] Melleta C, Le F, Poissonb F, et al. High speed train noise emission:Latest investigation of the aerodynamic / rolling noise contribution[J]. Noise & Vibration Worldwide, 2007, 293(3):535-546.
- [3] 吕平,盖盼盼,伯仲维,等.阻尼层厚度对结构阻尼性能的影响[J].噪声与振动控制,2013,33(2):101-104.
Lyu Ping, Gai Panpan, Bo Zhongwei, et al. Influence of damping layer's thickness on vibration damping performance of structures[J]. Noise and Vibration Control, 2013, 33(2):101-104.
- [4] 何鑫,陈凯华,何筱珊.粘弹性约束阻尼结构的研究现状与应用[J].上海涂料,2014,52(11):29-31.
He Xin, Chen Kaihua, He Xiaoshan. Research status and application of viscoelastic constrained damping structure[J]. Shanghai Coatings, 2014, 52(11):29-31.
- [5] 周云.粘弹性阻尼减震结构设计[M].武汉:武汉理工大学出版社,2006:12-13.
Zhou Yun. Structural design of viscoelastic damping structures[M]. Wuhan:Wuhan Technology University Press, 2006:12-13.
- [6] 吕平,高金岗,李晶,等.影响约束阻尼结构阻尼性能的因素[J].噪声与振动控制,2014,34(5):234-238.
Lyu Ping, Gao Jingang, Li Jing, et al. Impacting factors of damping performance of constraint damping structures[J]. Noise and Vibration Control, 2014, 34(5):234-238.
- [7] 谭亮红,陈红,罗亿科,等.阻尼结构对复合结构阻尼性能的影响[J].橡胶工业,2014,61(2):84-88.
Tan Lianghong, Chen Hong, Luo Yike, et al. Effect of damping structure on damping property of composite structure[J]. Rubber Industry, 2014, 61(2):84-88.
- [8] 张晓蕾.聚氨酯阻尼材料的结构设计及其性能研究[D].天津:河北工业大学,2014:87.
Zhang Xiaolei. Study on structure design and properties for polyurethane damping materials[D]. Tianjin:Hebei University of Technology, 2014:87.
- [9] 盖盼盼.粘弹阻尼材料性能及其约束阻尼结构的动态性能研究[D].青岛:青岛理工大学,2012:49-62.
Gai Panpan. Study on viscoelastic damping material and dynamic performance of constrained damping structure[D]. Qingdao:Qingdao Technology University, 2012:49-62.
- [10] 王焱.聚氨酯阻尼材料及其约束结构研究[D].成都:西南交通大学,2008:34-42.
Wang Yao. Investigation on polyurethane damping material and constrained damping structure[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University, 2008, 34-42.
- [11] 王绍宸,郭艳宏.聚氨酯基约束阻尼复合材料的制备及性能研究[J].化学工程师,2017(2):1-3.
Wang Shaochen, Guo Yanhong. Preparation and properties of polyurethane-based damping composite material constraints[J]. Chemical Engineer, 2017(2):1-3.
- [12] 张静.改性聚氨酯粘弹阻尼材料及其约束阻尼结构的表征及老化研究[D].青岛:青岛理工大学,2011:31-38.
Zhang Jing. Characterization and aging studies on modified polyurethane viscoelastic damping material and its constrained damping structure[D]. Qingdao:Qingdao Technology University, 2011:31-38.
- [13] 高小茹.聚氨酯基约束阻尼复合材料的制备及性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012:37-58.
Gao Xiaoru. Research on synthesis of polyurethane matrix constrained damping composites and their properties[D]. Harbin:Harbin Engineering University, 2012:37-58.
- [14] 王建华,罗陈雷,杨伟,等.聚氨酯阻尼材料研究进展[J].工程塑料应用,2002,30(10):51-53.
Wang Jianhua, Luo Chenlei, Yang Wei, et al. Advance in the research of polyurethane damping materials[J]. Engineering Plastics Application, 2002, 30(10):51-53.
- [11] 吕夏燕.聚乙烯/蒙脱土复合材料的制备及阻隔性能研究[J].农村经济与科技,2016,27(22):276,278.
Lyu Xiayan. Preparation and barrier properties of polyethylene / montmorillonite composite[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2016, 27(22):276, 278.
- [12] 毛超英,黄亚江,李光宪,等.聚合物/层状纳米填料阻隔复合薄膜研究进展[J].中国塑料,2015,29(10):7-13.
Mao Chaoying, Huang Yajiang, Li Guangxian, et al. Review on the high barrier polymer films enhanced by nanoplatelets[J]. China Plastics, 2015, 29(10):7-13.

(上接第34页)

Lyu Xiayan, Ci Jihao. Preparation and barrier properties of PVA / graphene oxide composite film[J]. Modern Business Trade Industry, 2016, 37(31):197-198.

- [10] 张晓亮.功能化氧化石墨烯/UHMWPE复合薄膜的制备及气体阻隔性研究[D].西安:西安理工大学,2015.
Zhang Xiaoliang. Preparation and gas barrier property of functionalized graphene oxide / ultra-high molecular weight polyethylene composite film[D]. Xi'an:Xi'an University of Technology, 2015.