

# 丁腈橡胶/酚醛树脂/受阻酚 AO60 共混阻尼橡胶贮存稳定性研究

Storage Stability of Vulcanized Acrylonitrile-butadiene/  
Phenolic Resin/Hindered Phenol AO60 Damping Rubbers

赵云峰<sup>1,2</sup>, 张继华<sup>2</sup>, 游少雄<sup>2</sup>, 詹茂盛<sup>1</sup>

(1 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100191;

2 航天材料及工艺研究所, 北京 100076)

ZHAO Yun-feng<sup>1,2</sup>, ZHANG Ji-hua<sup>2</sup>, YOU Shao-xiong<sup>2</sup>, ZHAN Mao-sheng<sup>1</sup>

(1 School of Materials Science & Engineering, Beihang University,  
Beijing 100191, China; 2 Aerospace Research Institute of Materials &  
Processing Technology, Beijing 100076, China)

**摘要:** 在丁腈橡胶(NBR)中添加酚醛(PR)和受阻酚 AO60, 制备 NBR/ PR/ AO60 共混橡胶。采用 DSC, FTIR, 扫描电子显微镜和黏弹谱仪等方法表征 NBR/ PR/ AO60 共混橡胶的结构, 并详细研究其阻尼机理。结果表明: 在共混橡胶结构中, 除 NBR 的硫化交联网络外, 还包含 NBR/ AO60 的超分子氢键网络、NBR/ PR 的络合作用、AO60 与 PR 分子间作用、AO60 分子聚集体(富相区)以及在 AO60 相中的 NBR 分子等多种微观作用形式。多种的分子作用形式, 造成了硫化胶的分子间内摩擦增大, 提高了阻尼性能。但随着贮存时间的延长, 硫化胶的  $\tan\delta$  温度曲线由双峰特征变为三峰特征, AO60 分子逐渐聚集、结晶, 形成大的结晶聚集体, 造成硫化橡胶阻尼性能的不稳定。

**关键词:** 受阻酚; 丁腈橡胶; 酚醛树脂; 阻尼; 贮存时间

中图分类号: TB324 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)12-0024-06

**Abstract:** The phenolic resin (PR) and tetrakis (methylene 3-(3,5-ditertbutyl-2,4,6-trihydroxy phenyl) propionyloxy) methane (AO60) were added into the acrylonitrile-butadiene rubber (NBR) to prepare the vulcanized NBR/ PR/ hindered phenol rubbers. The structures of the vulcanized rubbers were characterized by DSC, FTIR, DMTA and SEM. And their damping and mechanical mechanism were investigated in detail. The results show that the microscopic structures of vulcanized rubber include the networks of intermolecular hydrogen bonds between NBR and AO60 molecules, the nonbonding complexation of PR in NBR, the molecular aggregation of AO60 (AO60 rich phase) and NBR segments incorporate into the AO60 molecular aggregations besides the vulcanized networks of NBR. These complex molecular interactions lead to the increase of internal friction, and thus vulcanized rubber obtain good damping properties. However, with the increasing of the deposited time, the two-peak  $\tan\delta$  temperature curve changes to three-peak  $\tan\delta$  temperature curve, the AO60 molecules aggregate and crystalline in the inner structures of rubbers, and gather together to form bigger AO60 congeries, which affects the stability of damping properties of the vulcanized rubber.

**Key words:** hindered phenol; acrylonitrile-butadiene; phenolic resin; damping; deposited time

黏弹性橡胶材料是一种优异的阻尼材料, 特别在其玻璃化转变温度附近, 可依靠大分子链段的运动将外界机械振动能或噪音的声能转化成热量释放出去, 达到减振降噪的目的, 目前已广泛应用于交通运输、建筑、仪器仪表、机械、电子和航空航天等领域<sup>[1-5]</sup>。但其阻尼性能受温度和振动频率等的影响较大, 且其阻

尼温域较窄。因此许多研究者采用添加填料、共聚、共混或互穿网络等方法提高橡胶的阻尼峰值, 拓宽其使用温域<sup>[1-6]</sup>。但这些方法很难同时实现拓宽阻尼温域和提高阻尼峰值的效果, 因而往往在应用中受到限制。

近年来, 有机小分子和黏弹性橡胶材料共混形成复合材料的独特阻尼性能, 引起了研究者的广泛关注。

添加有机小分子后, 依据其与橡胶的相容性, 不仅可有效拓宽黏弹性橡胶材料的阻尼温域, 而且可以带来阻尼峰值的大幅提高, 是一种提高黏弹性橡胶材料阻尼性能的有效方法<sup>[7-16]</sup>。本工作以丁腈橡胶(NBR)/酚醛(PR) 共混体系为基础, 加入受阻酚 AO60, 制备了宽温域高阻尼 NBR/PR/AO60 共混橡胶体系, 重点讨论该体系的阻尼机理及其性能和结构随贮存时间的变化, 旨在为以后针对该体系进一步的深入研究和应用提供研究基础。

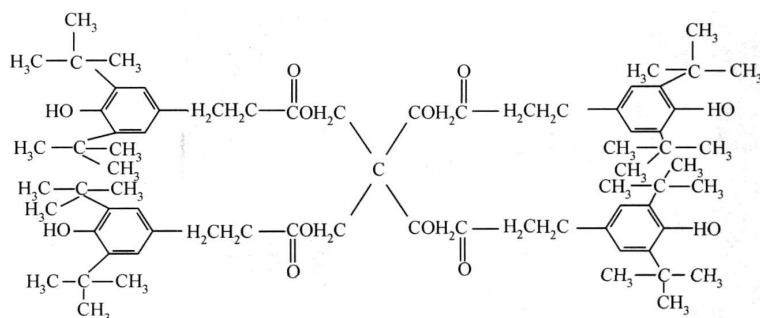


图1 AO60 的分子式

Fig. 1 The molecular structure of AO60

## 1.2 试样制备

基本配方(按质量份)为: 丁腈橡胶(NBR) 100, 酚醛树脂(PR) 40, 硫磺(S) 1, 氧化锌(ZnO) 3, 硬脂酸(SA) 2, 促进剂(TMTD) 1, 受阻酚(AO60) 50。

将NBR在室温塑炼后, 加入AO60混炼均匀; 将开炼机升温至130℃, 混炼5min后晾置至室温; 再加入酚醛树脂、硫化剂和促进剂等配合剂, 室温下割胶、打三角包、薄通, 直至混炼均匀, 下片; 然后在160℃下硫化成型。

## 1.3 测试与表征

样品的熔点和玻璃化转变温度由示差扫描量热(DSC)分析仪测试。测试温度从室温至160℃, 扫描速度为10.0℃/min; 断面形貌由扫描电子显微镜(SEM)观察, 扫描电压为15kV; 动态力学性能由黏弹谱仪(DMTA)测试, 测试标准为GJB 981—1990, 扫描频率为125Hz, 扫描温度范围为-30~150℃, 扫描速度为3℃/min; 傅里叶红外光谱测试的波数范围是550~4500cm<sup>-1</sup>, 分辨率为2cm<sup>-1</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 丁腈橡胶/酚醛树脂/受阻酚 AO60(NBR/PR/AO60) 共混橡胶的动态力学性能

图2为放置1天、1个月和1年后的NBR/PR/

## 1 实验材料与方法

### 1.1 原材料

实验用丁腈橡胶的丙烯腈含量40%(摩尔分数)左右。线形甲阶酚醛树脂为国产, 受阻酚四[β-(3', 5'-二叔丁基-4'-羟基苯基)丙酸]季戊四醇酯(AO60)分子式如图1所示。为便于比较, 将商业化的结晶AO60在150℃熔融后放入冰水混合物中淬冷, 得到无定形的AO60。

AO60共混体系硫化胶的动态力学温度谱。从图2(a)可知, 放置1天和1个月的NBR/PR/AO60硫化胶的tanδ温度曲线均呈现双峰特征, 说明NBR/PR/AO60共混体系是微观相分离的。第一个损耗峰的峰值所对应的温度接近NBR/PR的玻璃化转变温度, 应属于NBR/PR相的力学损耗, 第二个损耗峰的峰值则对应了部分相容的AO60相的损耗。放置1天和1月的共混硫化胶的tanδ温度曲线几乎完全相似, 说明共混体系在短时间有很好的稳定性。文献[13]曾报道, 氯化聚乙烯/AO60共混体系的tanδ温度曲线在1个月呈现明显的峰值下降, 但较好地保持了损耗峰的形状, 说明交联网络的形成部分阻碍了橡胶内部结构的相分离。

由图2(a)可知, 放置1年的NBR/PR/AO60硫化胶的tanδ温度曲线出现了三个损耗峰。表1为放置不同时间的NBR/PR/AO60硫化胶的损耗峰值(tanδ)<sub>max</sub>及其对应的温度。由表1可知, 放置1年后硫化胶试样tanδ温度曲线的第一损耗峰值温度(T<sub>g1</sub>)向高温方向偏移, 而第二损耗峰值温度(T<sub>g2</sub>)稍有升高, 但变化不大, 并且存在一狭窄的第三损耗峰(T<sub>g3</sub>)。对比各曲线的损耗峰值, 放置1年后硫化胶试样的第一损耗峰值变化很小, 而第二损耗峰值则发生了明显的降低, 第三损耗峰值最高, 为1.25。

结晶的AO60的熔融温度在120℃左右, 因此推

断第三损耗峰与结晶的 AO60 有关。其狭窄的峰宽也说明第三损耗峰对应着低分子量的有机小分子的阻尼。虽然 AO60 与 NBR/PR 体系发生了相互作用,但第三损耗峰值与第一和第二损耗峰值相比是最高的。因此可以认为, AO60 的高阻尼是造成聚合物/ AO60 体系高损耗峰值的原因,这与普通的黏弹性橡胶体系是大不相同的。

由图 2(b) 中储能模量  $E'$  和温度关系曲线可以看出, 放置 1 天和 1 个月后的硫化胶的储能模量  $E'$  随温

度的升高出现两个转变平台, 第一个平台始于 15℃ 的转变区域, 对应于 NBR/PR 的玻璃化转变; 而第二个平台始于 60℃ 的转变区, 对应于部分相容的 AO60 的玻璃化转变。而放置 1 年后的硫化胶则出现第三个平台, 其储能模量在 100~ 120℃ 出现一个凸起, 对应于结晶的 AO60 的熔融变化。此外, 放置 1 年后硫化胶的储能模量明显高于放置 1 天和 1 个月的硫化胶的储能模量, 这可能是由于聚集的 AO60 结晶在橡胶中起到了部分增强作用所致。

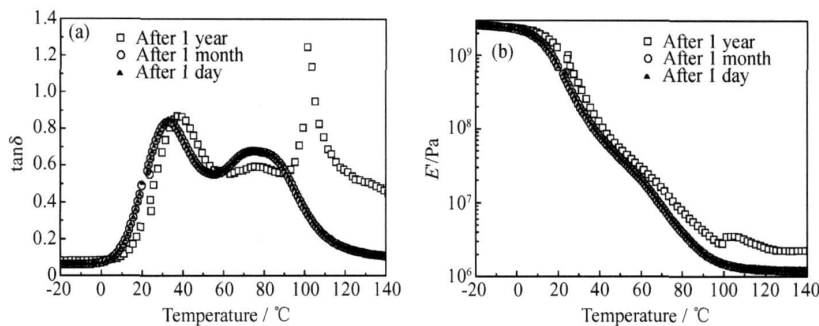


图 2 不同放置时间的 NBR/PR/AO60 硫化胶的动态力学温度谱 (a)  $\tan\delta$  与温度; (b) 储能模量  $E'$  与温度

Fig. 2 Temperature dependence of the dynamic properties for vulcanized NBR/PR/AO60 sample deposited for different time  
(a) the temperature dependence of  $\tan\delta$ ; (b) the temperature dependence of storage modulus  $E'$

表 1 放置不同时间的 NBR/PR/AO60 硫化胶的阻尼峰值  $\tan\delta$  及其对应的温度

Table 1 The peak value of  $\tan\delta$  and the corresponding temperatures of vulcanized NBR/PR/AO60 rubbers deposited for different time

Deposited time	First transition		Second transition		Third transition	
	$T_{g1}/^{\circ}\text{C}$	$(\tan\delta)_{\max}$	$T_{g2}/^{\circ}\text{C}$	$(\tan\delta)_{\max}$	$T_{g3}/^{\circ}\text{C}$	$(\tan\delta)_{\max}$
After 1 day	32.8	0.85	74.7	0.68		
After 1 month	33.1	0.85	75.0	0.69		
After 1 year	37.5	0.87	75.6	0.59	101.4	1.25

2.2 NBR/PR/AO60 共混橡胶的 DSC 分析

图 3 为结晶 AO60、淬冷处理的 AO60 和放置不同时间共混橡胶硫化胶的 DSC 曲线。由图 3 可知, 未处理的结晶 AO60 的熔点为 128.7℃; 而经过淬冷处理的 AO60 没有出现对应的熔融峰, 只在 58.2℃ 处呈现了一微弱的吸热峰, 表现为明显的无定形结构。而在 1 个月测试的三元共混橡胶硫化橡胶则出现两个微弱的吸热峰, 峰位所对应的温度分别为 52.5℃ 和 90℃, 与动态性能中出现的双峰特征是一致的。第一个吸热峰对应了无定形 AO60 结构, 可能是 AO60 分散在 NBR/PR(AO60 贫相) 中形成的。而第二个吸热峰则是由 NBR/PR 分散在 AO60(AO60 富相) 中形成的。在放置 1 年后的硫化胶的 DSC 曲线中, 则对应有三个微弱的吸收峰, 峰位温度分别为 57.2、90℃ 和 115.9℃。对比在 1 个月测试的 DSC 曲线, 前两个

吸热峰的峰位温度相近, 说明对应了相同的结构关系。而第三个微弱的吸热峰, 则与结晶的 AO60 峰值相对应, 峰位向低温偏移, 可能是由于交联网络的限制, AO60 的结晶尺寸较小或有部分 NBR/PR 溶解在 AO60 晶体中造成的。三元共混橡胶硫化胶热分析的结果与动态力学性能的结果是一致的, 这说明共混硫化胶内部存在多种相态形式, 这些相态影响共混橡胶的阻尼性能。

2.3 NBR/PR/AO60 共混橡胶断口的 SEM 分析

为考察 AO60 对共混橡胶硫化胶内部结构的影响, 观察了其脆断断口的形貌。图 4 是贮存不同时间 NBR/PR/AO60 硫化胶的断面 SEM 图。图 4(a) 是放置 1 天后观察的硫化胶断面形貌。添加 50 份 AO60 的硫化胶断面产生多孔状的相分离形貌。在高于 AO60 熔点的温度下硫化成型时, 由于过量的 AO60

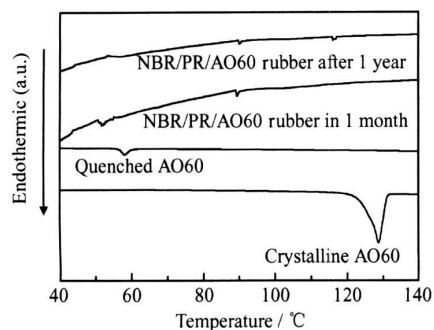


图3 结晶、淬冷处理的 AO60 和放置不同时间硫化胶的 DSC 曲线

Fig. 3 The DSC curves of crystalline and quenched AO60 and the vulcanized rubber deposited for different time

与 NBR/PR 共混物的相容性不好, 部分 A O60 会形成

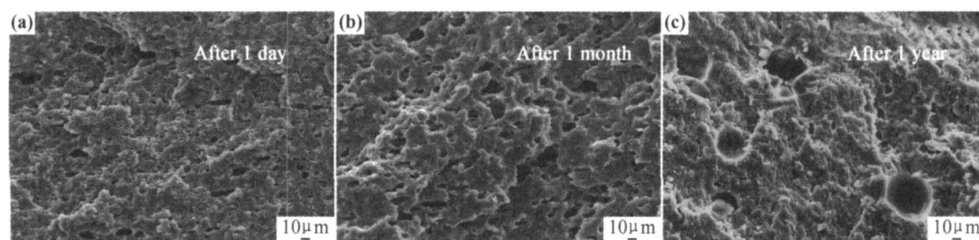


图4 放置不同时间的 NBR/PR/AO60 共混橡胶硫化胶试样的 SEM 照片 (a) 1 天后; (b) 1 个月后; (c) 1 年后

Fig. 4 The SEM images of vulcanized NBR/PR/AO60 samples deposited for different time

(a) after 1 day; (b) after 1 month; (c) after 1 year

## 2.4 NBR/PR/AO60 共混橡胶红外光谱(FTIR)分析

图 5 是 NBR/PR/AO60 硫化胶(VR)在不同制备阶段的红外光谱图。为揭示 AO60 在硫化橡胶中的作用, 选择波数为  $3500\sim 3700\text{cm}^{-1}$  的羟基( $-\text{OH}$ )拉伸振动和波数为  $1650\sim 1800\text{cm}^{-1}$  的羰基( $-\text{C}=\text{O}$ )拉伸振动的 AO60 特征峰作为观测范围。图 5(a) 是  $3500\sim 3700\text{cm}^{-1}$  范围的红外光谱, 从未处理的晶态 AO60 试样中观测到  $3635\text{cm}^{-1}$  处的非氢键自由吸收峰和  $3594\text{cm}^{-1}$  ( $\text{OH}-\text{OH}$ ) 氢键吸收峰。而淬冷后无定形的 AO60 则呈现一个主吸收峰 ( $3632\text{cm}^{-1}$ )。因此, 可判断无定形的 AO60 的  $-\text{OH}$  基主要以非氢键的自由态存在。NBR 的吸收峰在  $3500\sim 3700\text{cm}^{-1}$  的波数范围内没有任何吸收。而热混炼后的 NBR/AO60 的红外光谱中则呈现双峰特征, 峰位分别对应  $3630\text{cm}^{-1}$  和  $3597\text{cm}^{-1}$ 。由此可知, 胶料的热机械混合使 AO60 分子的  $-\text{OH}$  基和 NBR 分子发生相互作用, 但 AO60 仍以晶态和无定形态共存于橡胶中。将 NBR/AO60 试样和 PR 混合后, 在该区域的吸收峰位分别为  $3635$ ,  $3597\text{cm}^{-1}$ , 说明 PR 的酚羟基和 AO60 分子间存在作

自聚体, 而与橡胶相间形成弱的界面作用, 特别是随着硫化网络的形成, 橡胶相收缩形成的内应力将沿弱的界面处释放, 破坏 AO60 聚集体和橡胶相之间的作用, 形成无规的孔洞结构<sup>[14]</sup>; 图 4(b) 是放置 1 个月后硫化胶的断面形貌。由图可知, 其形貌没有明显变化, 说明共混橡胶呈现出较稳定的微观结构; 图 4(c) 是放置 1 年后硫化胶的断面照片。橡胶内部除产生较小孔洞外, 还包含了直径为  $30\sim 50\mu\text{m}$  的大孔洞。大孔洞的边界光滑, 是典型的相分离结构形貌。综合图 2(a) 可知, 这种大尺寸的相分离形貌可能是由于小分子 AO60 经长时间热运动聚集造成的。由于小分子 AO60 易于结晶, 因此橡胶内部的大量聚集, 会形成明显的 AO60 结晶聚集体。这种硫化胶内部随时间而发生的明显变化, 必然会对其阻尼性能的稳定性产生影响。

用。而在  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$  硫化的 NBR/PR/AO60 共混橡胶中, AO60 的两个特征峰则消失, 而产生一个在  $3623\text{cm}^{-1}$  处的新峰, 可将其归结为 NBR 的  $-\text{CN}$  和 AO60 的  $-\text{OH}$  基间的氢键峰, 说明 AO60 在 NBR 的网状分子间形成氢键网络。而且 NBR 橡胶的硫化交联网络有效地阻止了 AO60 聚集成晶态, 即 AO60 以无定形形态存在于交联网络中。但是放置 1 年后, 硫化胶呈现了双峰特征, 峰值分别对应于  $3639$ ,  $3603\text{cm}^{-1}$ , 与未硫化胶料的峰值相近。这说明橡胶的交联网络已无法阻止 AO60 的聚集, AO60 在橡胶内部形成较大的晶态结构。对比图 4(c) 中硫化胶的断面中明显的相分离形貌, 可以说明这种小分子的聚集、结晶现象。

图 5(b) 是波数为  $1600\sim 1800\text{cm}^{-1}$  (对应 AO60 的羰基拉伸振动) 的红外光谱。对未处理的结晶 AO60, 波数为  $1745\text{cm}^{-1}$  的峰位对应了自由的羰基振动峰, 而波数为  $1734\text{cm}^{-1}$  的峰位则对应羰基  $-\text{C}=\text{O}$  和腈基  $\text{CN}$  间的氢键作用峰。将 AO60 和 NBR 热混炼后,  $1745\text{cm}^{-1}$  的峰位消失, 呈现  $1736\text{cm}^{-1}$  单峰, 说明 AO60 的自由羰基( $-\text{C}=\text{O}$ )吸附在 NBR 分子链上

或其他 AO60 分子链上,但这种作用较弱,并没有引起羰基氢键作用峰的位移。再添加 PR 后,  $1734\text{cm}^{-1}$  处的单峰并没有任何改变,但谱峰略有拓宽,其原因可能是 PR 的酚羟基造成的。而 1 周内测试的硫化橡胶在  $1734\text{cm}^{-1}$  处呈现单峰,几乎没有峰位变化,说明 AO60 的羰基 C=O 和 NBR 分子没有明显作用。硫化胶放置 1 年后,出现双峰特征。对比结晶 AO60 的红外图

谱,硫化胶的自由羰基( $\text{C}=\text{O}$ )和腈基-CN 的作用峰略向高峰位偏移( $1738\text{cm}^{-1}$ ),而自由羰基的峰位( $1745\text{cm}^{-1}$ )则没有发生变化。这说明 AO60 在共混橡胶硫化胶中有无定形态和晶态两种共存形式。由于热运动的影响,硫化胶的硫化网络结构并不能将 NBR, PR 和 AO60 的共混态冻结,小分子 AO60 在硫化橡胶内聚集、结晶。

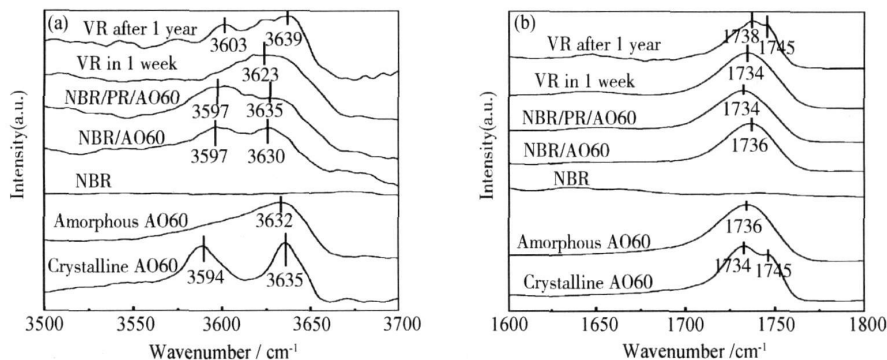


图 5 NBR/PR/AO60(质量比 100/40/50) 硫化橡胶的红外光谱

(a) 羟基的拉伸振动区; (b) 羰基的拉伸振动区

Fig. 5 The FTIR spectra of vulcanized NBR/PR/AO60 rubber (the mass ratio was 100/40/50)

(a) the hydroxyl stretching region; (b) the carbonyl stretching region

图 6 是根据红外图谱分析结果绘制的 NBR/PR/AO60 共混橡胶硫化胶的内部结构示意图。硫化胶放置 1 周后,其分子的大交联网络中有多种分子间作用形式:AO60/NBR 橡胶的氢键网络(AO60 贫相区)、橡胶交联网络结构、橡胶分子与线形 PR 分子间的络合作用、AO60 与 PR 分子间作用、AO60 分子聚集体(富相区)以及溶解在 AO60 相中的 NBR 分子。这些复杂的作用形式,使橡胶分子不仅能依靠其分子链段

的运动而达到阻尼耗能的目的,而且其他的分子作用,也加大了硫化橡胶内部各分子之间的内摩擦运动而提高了整个材料的阻尼性能,拓宽了使用的阻尼温域。但随着时间的延长,由于分子热运动的作用,一些与 PR 分子、橡胶分子有氢键等弱分子作用的 AO60,会不断自聚、结晶、长大,进而形成大的结晶聚集体。这种微观形态的变化,造成了 NBR/PR/AO60 共混橡胶硫化胶阻尼性能的不稳定。

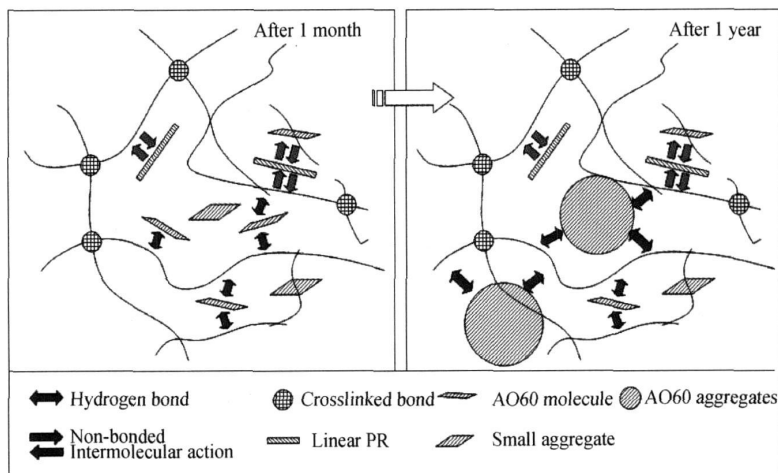


图 6 放置不同时间后的 NBR/PR/AO60 硫化胶内部结构示意图

Fig. 6 The schematic structures of vulcanized NBR/PR/AO60 rubber deposited for different time

### 3 结论

(1) 在较短时间内, NBR/PR/AO60 共混橡胶硫化胶的  $\tan \delta$  温度曲线呈双峰特征; 在贮存 1 年后, 硫化胶的  $\tan \delta$  温度曲线呈三峰特征。

(2) NBR/PR/AO60 共混橡胶硫化胶内部呈现微观的多孔状相分离形态, 随着时间的延长, 孔状微结构尺寸增大, 相分离程度加大。

(3) NBR/PR/AO60 共混橡胶硫化胶微观结构中, 除 NBR 的硫化交联网络外, 还包含了 NBR/AO60 的超分子氢键网络、NBR/PR 的络合作用、AO60 与 PR 分子间作用、AO60 分子聚集体(富相区), 以及溶解在 AO60 相中的 NBR 分子等多种微观结构形式; 但随着时间延长, AO60 小分子将在热运动的作用下聚集, 在橡胶内部形成较大的晶体形态。

(4) 添加 AO60, 造成了 NBR/PR/AO60 共混橡胶内部复杂的分子间作用关系, 拓宽了其阻尼温域, 提高了阻尼性能。但随着贮存时间的延长, AO60 会自聚结晶, 形成大的结晶聚集体, 这种热力学的不相容性使硫化橡胶阻尼性能不稳定。

#### 参考文献

- [1] 赵云峰. ZN 系列黏弹性阻尼材料性能及应用[J]. 宇航材料工艺, 2001, 31(2): 19–23.
- [2] 赵云峰. 高性能黏弹性阻尼材料及其应用[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(5): 1–6.
- [3] 涂春潮, 周文英, 米志安, 等. 橡胶阻尼材料的研究进展[J]. 合成橡胶工业, 2006, 29(5): 388–391.
- [4] 杨亦权, 杜森, 郑强. 新型高聚物阻尼材料研究进展[J]. 功能材料, 2002, 33(3): 234–236.
- [5] 陈喜荣, 王晏研, 郑静, 等. 聚丙烯酸酯复合阻尼材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2004, (2): 17–25.
- [6] QU L, HUANG G, WU J, et al. Damping mechanism of chlorobutyl rubber and phenolic resin vulcanized blends[J]. J Mater

Sci, 2007, 42(17): 7256–7262.

- [7] 何利军, 赵云峰, 詹茂盛, 等. 有机小分子杂化阻尼材料研究进展[J]. 宇航材料工艺, 2007, 37(3): 9–12.
- [8] 赵秀英, 向平, 张立群. 受阻酚/丁腈橡胶复合材料的结构与性能[J]. 复合材料学报, 2007, 24(2): 44–49.
- [9] 向平, 赵秀英, 张立群. 丁腈橡胶/聚氯乙烯/受阻酚 AO-60 共混物的结构与性能[J]. 合成橡胶工业, 2007, 30(3): 219–223.
- [10] WU C. Organic hybrid of chlorinated polyethylene and hindered phenol. IV. modification on dynamic mechanical properties by chlorinated paraffin[J]. J Polym Sci Part B: Polym Phys, 2001, 39(1): 23–31.
- [11] WU C, YAMAGISHI TA, NAKAMOTO Y, et al. Organic hybrid of chlorinated polyethylene and hindered phenol. I. dynamic mechanical properties[J]. J Polym Sci Part B: Polym Phys, 2000, 38(17): 2285–2295.
- [12] WU C, MORIKI, OTANI Y, et al. Effects of molecular aggregation state on dynamic mechanical properties of chlorinated polyethylene/hindered phenol blends[J]. Polymer, 2001, 42(19): 8289–8295.
- [13] WU C, YAMAGISHI TA, NAKAMOTO Y, et al. Organic hybrid of chlorinated polyethylene and hindered phenol. II. influence of the chemical structure of small molecules on viscoelastic properties[J]. J Polym Sci Part B: Polym Phys, 2000, 38(22): 1496–1503.
- [14] 赵云峰, 张继华, 游少雄, 等. 丁腈橡胶/酚醛树脂/受阻酚 AO60 三元阻尼橡胶的结构与性能[J]. 功能材料, 2009, 40(6): 986–989.
- [15] 赵云峰, 张继华, 游少雄, 等. 丁腈橡胶/酚醛树脂/受阻酚 AO80 三元阻尼橡胶的结构与性能[J]. 航空材料学报, 2009, 29(3): 71–77.
- [16] 赵云峰, 何利军, 游少雄, 等. 丁腈橡胶/聚氯乙烯/酚醛树脂/受阻酚共混阻尼材料研究[J]. 高分子通报, 2010, 23(11): 70–76.

收稿日期: 2010-01-22; 修订日期: 2010-09-01

作者简介: 赵云峰(1964—), 男, 博士研究生, 研究员, 主要从事高分子材料及其应用研究工作, 联系地址: 北京 9200 信箱 73 分箱(100076), E-mail: zhaoyf@yahoo.cn

### 欢迎订阅 2011 年《航空材料学报》

非常感谢各位订户这些年来对《航空材料学报》的支持! 2011 年的征订工作已开始, 非常欢迎新老订户踊跃订阅本刊。

《航空材料学报》采用铜版纸印刷, 双月刊。主要刊登与航空工业有关材料、材料制备工艺、数值模拟、材料计算和材料性能等方面的最新学术研究论文。同时也刊登在航空工业有应用前景的材料及工艺的相关文章。

《航空材料学报》为《中文核心期刊要目总览》收录期刊, 中国科技论文统计源期刊, 被美国工程索引(EI)、美国化学文摘(CA)、英国科学文摘(IN SPEC)、美国金属文摘(MA)、美国剑桥科学文摘等多家检索机构收录。

《航空材料学报》每册 25 元(含邮费), 全年 150 元。