

全氟聚醚改性丁苯橡胶的制备及其性能研究

宋国维¹, 龚光碧², 冯裕智², 李福崇², 李怀宁², 胡建波²

¹兰州交通大学化学化工学院, 甘肃 兰州

²中国石油兰州化工研究中心, 甘肃 兰州

收稿日期: 2024年3月14日; 录用日期: 2024年4月12日; 发布日期: 2024年4月19日

摘要

第一部分选用全氟聚醚甲酯(PFPE-A)作为原料, 用其与丁苯橡胶进行接枝得到(PFPE-A-SBR), 通过FT-IR、¹H-NMR进行表征分析, PFPE-A成功与SBR进行接枝, 然后将其作为一种改性剂, 将其与SSBR共混, 制备成氟改性SSBR硫化胶。通过调控不同投料比的全氟聚醚-丁苯改性剂(PFPE-A-SBR), 用于改性SSBR胶料, 提升胶料的综合性能, 结果表明: 对SSBR的力学性能和静摩擦系数没有影响。PFPE-b-SBR可以改善SSBR的耐低温性, 玻璃化转变温度升高约4°C, 损耗因子的峰值提高了约14%。另外, 一些微交联的PFPE-A-SBR在SSBR交联网络中起到良好的滑动作用, 可以降低SSBR分子链之间的相互作用。

关键词

耐磨性, 混炼胶, 全氟聚醚, 动态力学性能

Preparation and Properties of Perfluoropolyether Modified Styrene Butadiene Rubber

Guowei Song¹, Guangbi Gong², Yuzhi Feng², Fuchong Li², Huaining Li², Jianbo Hu²

¹School of Chemistry and Chemical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu

²Lanzhou Research Center of Chemical Industry, PetroChina, Lanzhou Gansu

Received: Mar. 14th, 2024; accepted: Apr. 12th, 2024; published: Apr. 19th, 2024

Abstract

The first part selects perfluoropolyether methyl ester (PFPE-A) as the raw material, which is grafted with styrene butadiene rubber to obtain (PFPE-A-SBR). FT-IR and ¹H-NMR characterization analysis show that PFPE-A is successfully grafted with SBR, and then used as a modifier to blend with SSBR to prepare fluorine modified SSBR vulcanized rubber. By adjusting the different feed ratios of per-

fluoropolyether butadiene styrene modifiers (PFPE-A-SBR) to modify SSBR rubber, the comprehensive performance of the rubber was improved. The results showed that it had no effect on the mechanical properties and static friction coefficient of SSBR. PFPE-b-SBR can improve the low temperature resistance of SSBR, with a glass transition temperature increase of about 4°C and a peak loss factor increase of about 14%. In addition, some micro crosslinked PFPE-A-SBR play a good sliding role in the SSBR cross-linking network, which can reduce the interaction between SSBR molecular chains.

Keywords

Wear Resistance, Blended Rubber, Perfluoropolyether, Dynamic Mechanical Properties

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

溶聚丁苯橡胶(SSBR)是一种通用橡胶,其性质介于乳聚丁苯橡胶和顺丁橡胶之间[1]。它由苯乙烯和丁二烯组成,使用有机锂引发剂,通过阴离子聚合工艺制得。由于 SSBR 分子结构中顺式 1,4-丁二烯结构含量较高、支链较少、分子量分布较窄以及独特的分子链结构,因而具有耐磨、耐候、耐热、耐油、耐老化、较低疲劳应变生热、挤出膨胀和灰分、较好纯度与色泽、较快硫化速度等性能,同时兼具抗湿滑、滚动阻力小等优点[2] [3]。

为了应对溶聚丁苯橡胶在高负荷条件下易磨损、高温下易老化和分子链摩擦产热等问题,需开发高耐磨损有机氟改性溶聚丁苯橡胶的制备方法,可以拓展我国弹性体应用领域,推动材料科研领域自主创新和专业化发展[4] [5]。全氟聚醚(Perfluoropolyethers, 缩写为 PFPE)是一种独特的透明无味无色的液态全氟化合物,分子仅含碳、氟和氧三种元素,最早在 20 世纪 60 年代开始研究。与传统防水材料相比,全氟聚醚硅氧烷具备高耐磨性、动摩擦系数低、润滑性好、使用量少等特点[6] [7] [8]。PFPE 是一种由 C—F 键、C—O 键和 C—C 键组成的全氟聚合物,因此具有其他高分子化合物所没有的出色特性。例如出色的化学惰性、高热氧化安定性、与氧的兼容性、阻燃性、抗辐射性、低挥发性和绝缘性等[9] [10] [11]。

SSBR 的性能是由分子链上的重复单元结构决定。当 SSBR 分子链上的侧乙烯基摩尔含量增大时,硫化胶的玻璃化转变温度、滚动阻力和生热发生降低,耐磨损性得到改善,但抗湿滑性变差。同 SSBR 中的侧苯基摩尔含量改善硫化胶的定伸应力、拉伸强度、扯断伸长率、耐切割性、刚性和模量的关键因素[12]。本文选用全氟聚醚甲酯(PFPE-A)作为原料,将其作为改性剂添加到溶聚丁苯橡胶(SSBR)中进行共同硫化,并对该硫化胶的物理机械性能、磨耗、摩擦系数进行测试,探究其不同共混比对硫化胶性能的影响。

2. 实验部分

2.1. 原材料

丁苯橡胶: 牌号 2557s, 中国石油独山子石化公司; 氟橡胶: 牌号 246, 三爱富公司; 无水乙醇: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 三乙胺: 色谱级, 天津市信诺威化工有限公司; 丙酮: 分析纯, 现代东方(北京)科技发展有限公司; 硬脂酸: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 氧化锌: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 硫磺: 工业级, 华迅化工有限公司; 白炭黑, 安耐吉化学; 促进剂(TBBS): 工业级, 高青和谐化工有限公司; 偶联剂(Si69): 工业级, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

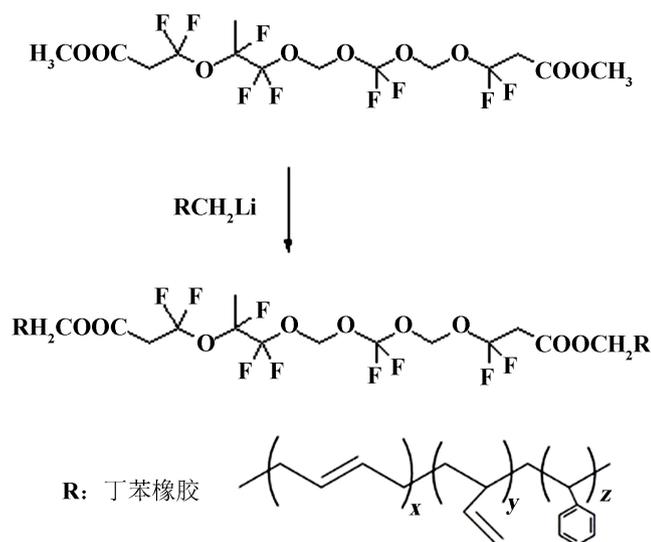
2.2. 设备和仪器

磁力搅拌器：Hei-Tec，德国海道尔夫公司；旋转蒸发仪：RV 10，德国 IKA 集团；傅里叶红外光谱分析仪：Bruker Vector 22，德国布鲁克公司；核磁共振氢谱分析仪：Bruker AC 400，德国布鲁克公司；双辊开炼机：X(S)K-160，大连一橡橡塑机械有限公司；平板硫化机：QLB-Q400*400-2，美国 PHI 公司；无转子硫化仪：PT-M200A，高铁检测仪器有限公司；拉力测试机：3365E，Instron 仪器公司；橡胶硬度计：LX-A，上海六菱仪器厂；阿克隆磨耗仪：WML-0333，泰仕特仪器(福建)有限公司；门尼粘度测试仪：TY-6004，江苏天源实验设备有限公司；DMA 动态力学分析仪：861E，瑞士梅特勒-托利多集团。

2.3. 试样制备

1) 全氟聚醚甲酯接枝丁苯橡胶

在常温下将全氟聚醚甲酯加入到约 2000 mL 红棕色的丁二烯-苯乙烯共聚物烷基锂-环戊烷溶液中(含量为 10%，分子量约为 15,000)，于常温下搅拌 30 分钟，溶液由红褐色变为乳白色。随后通过旋转蒸发除去溶剂，得到全氟聚醚-A-丁苯橡胶(PFPE-A-SBR)改性剂。反应式如式 1 所示。



式 1

2) 制备改性 SSBR 胶料样品

采用橡胶混炼基础配方(200 g SSBR2557、100 g 白炭黑、52 g 促进剂 TBBS、2 g 硬脂酸、3.5 g 硫磺、6 g 氧化锌、14 g Si69)，之后将改性剂 PFPE-A 分别加入 0、1、3、5、7 份，进行混炼 20 min，辊筒表面温度为室温-45℃。然后，在室温下放置 24 h，随后将其采用平板硫化机在 160℃、模压为 70 MPa 下进行硫化 40 min，获得 PFPE-A-SBR 含量(以 SSBR 的质量为基准，下同)为 1 份的改性 SSBR 样品，记为 F1。

2.4. 性能测试

红外光谱测试条件为：分辨率 3 cm^{-1} ，扫描范围 $4000\sim 500\text{ cm}^{-1}$ 。

核磁共振表征($^1\text{H NMR}$)：将样品分别溶解在氘代氯仿中，通过德国 BRUKER 公司的 BRUKER 400 MHz AVANCE NEO 超导核磁共振仪测定样品的氢谱($^1\text{H-NMR}$)。

混炼胶硫化特性测试：将混炼胶片裁剪成质量约为 5 g 的圆形试样，测试条件设为 $160^\circ\text{C} \times 35\text{ min}$ ，在 MDR2000 型无转子硫化仪上进行测试，测试参考标准 GB/T9869-2014。

混炼胶门尼粘度测试：将机械共混后的混炼胶片裁剪成 20 g 左右的样品，按照 GB/T1232.1-2000 对

混炼胶进行门尼粘度测试。

力学性能测试：将硫化好的胶片用裁刀裁成哑铃形，参考标准 GB/T2411-2008，用 LX-A 邵氏硬度计测定橡胶的邵氏硬度。拉力机拉伸速率设置为 500 mm/min，参考标准 GBT528-1998，使用台湾高铁拉力测试机测试复合材料样品的物理机械性能。

混炼胶 RPA 测试：采用 RPA2000 橡胶加工分析仪测试胶料的 Payne 效应。测试条件：混炼胶温度 60℃，频率 10 Hz，应变范围 0.28%~42%。

硫化胶动态力学测试：为探究橡胶的动态损耗模量，现设定测试条件：温度范围-80℃~80℃，升温速率 3℃/min，频率 10 Hz，应变 0.1%。样品呈圆柱形试样，厚度 2.0~2.2 mm，直径 10 mm。参考标准 GB/T40396-2021。采用德国 METTLER 公司 DMA242C 动态力学分析仪，选用剪切模式进行测试。

硫化胶磨耗性能测试：将混炼胶裁剪成宽度约 1.5 cm 的长带，盘绕成圆盘形状，装入预热后的模具（约 50~55 g），于 160℃ 下硫化 90 + 2 min。硫化结束后，取出样品，称重并测量密度，记录数据，采用阿克隆磨耗仪(WML-0333, 泰仕特仪器有限公司)进行磨耗测试，参考标准 GB/T1689-2014。

3. 结果与讨论

3.1. PFPE-A-SBR 结构分析

3.1.1. 红外 FT-IR 分析

图 1 为 SBR 和 PFPE-A-SBR 的 FTIR 谱图，由谱图可知，3081 cm^{-1} 的位置展现了 C=C 键上 C—H 的振动谱峰，1630 cm^{-1} 处呈现了丁二烯重复单元的 C=C 振动特征，1580 cm^{-1} 处显示了苯环内 C=C 的振动谱峰。而在 PFPE-A-SBR 曲线上，1070~1201 cm^{-1} 范围内出现明显的 C—F 和 C—O 振动特征峰，证明 PFPE-A-SBR 嵌段聚合物的成功制备。

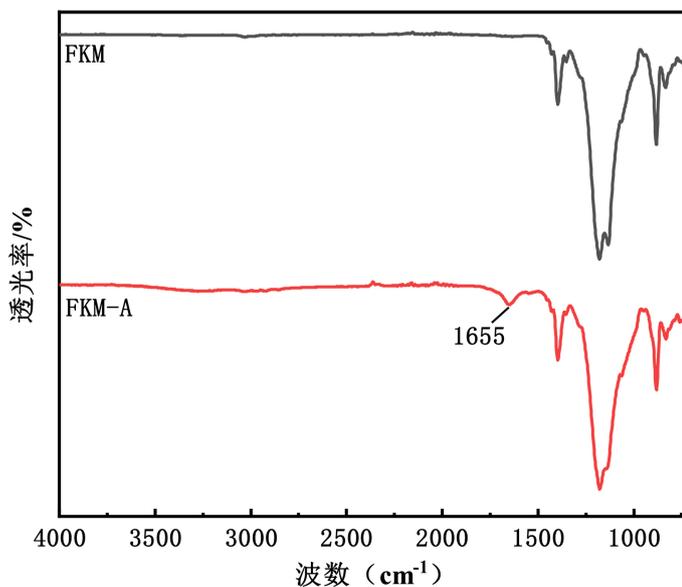


Figure 1. Infrared spectrum

图 1. 红外谱图

3.1.2. 磁共振 ^1H NMR 分析

图 2 为 PFPE-A-SBR 的核磁氟谱图。由图 2 得到核磁氟谱信息如下， ^{19}F -NMR (CCl_3CF_3): $\delta = -54.25$ ($-\text{OCF}_2\text{O}$), -80.39 ($-\text{CF}_2\text{CH}_2$), -90.08 ($-\text{OCF}_2\text{CF}_2\text{O}$)。通过积分面积，可以计算出 PFPE 中的 p 值为 7，q

值为 10，分子量约为 1500。并成功证实了 PFPE 已经嵌段于 SBR 分子链之中。

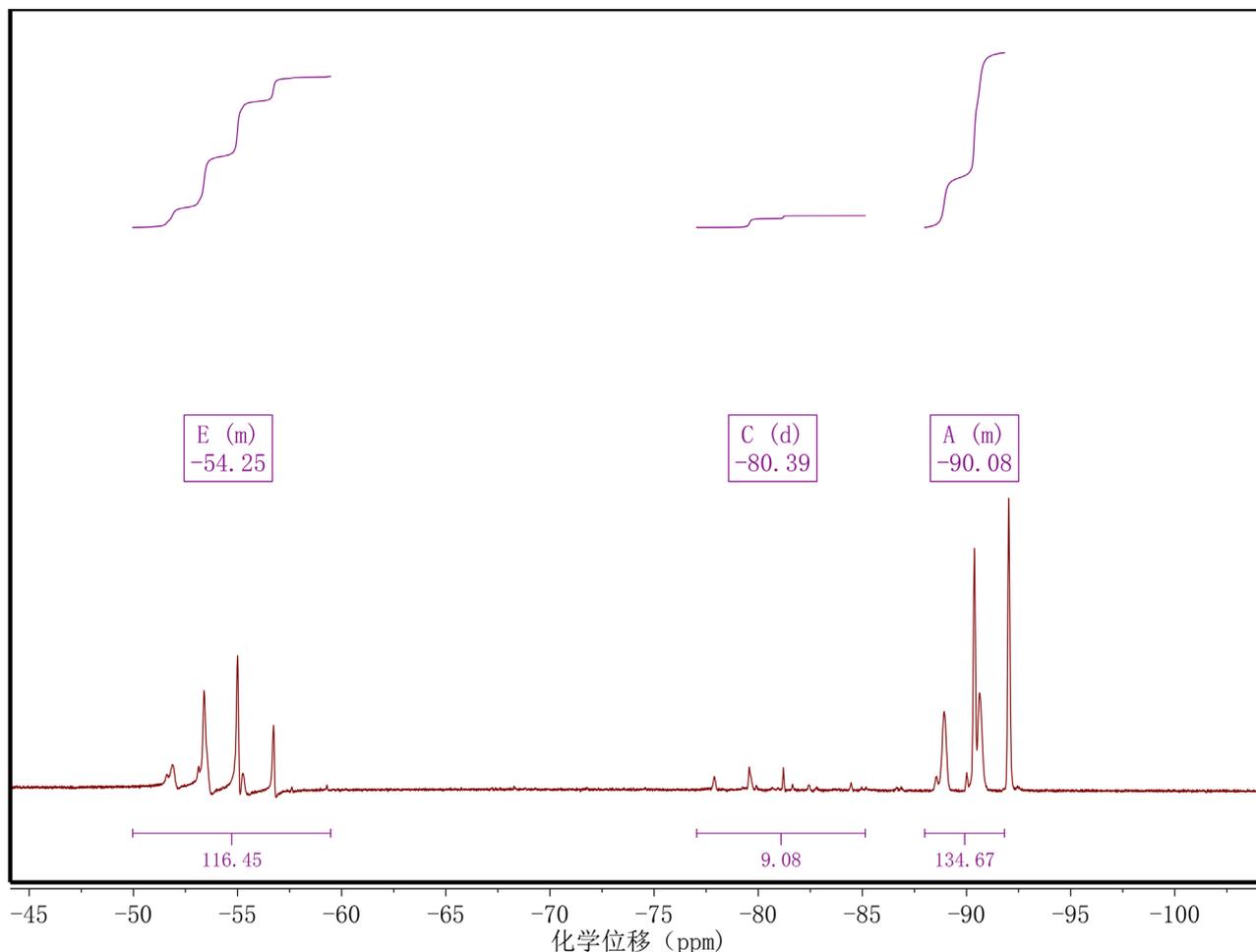


Figure 2. Nuclear magnetic hydrogen spectrum

图 2. 核磁氢谱图

3.2. 混炼胶性能测试

3.2.1. 硫化特性

Table 1. Vulcanization characteristics of FKM-A modified SSBR rubber with different parts added

表 1. 添加不同份数 FKM-A 改性 SSBR 胶料的硫化特性

硫化特性	F0	F1	F2	F3	F4
t_{10}/min	7.39	6.67	6.79	7.20	6.91
t_{90}/min	22.06	22.01	21.82	20.78	20.60
$M_L/(\text{dN}\cdot\text{m})$	5.30	3.63	2.33	2.12	2.11
$M_H/(\text{dN}\cdot\text{m})$	24.56	23.22	22.87	22.69	21.89
硫化速率指数	2.01	1.68	1.59	1.32	1.24
$M_H-M_L/(\text{dN}\cdot\text{m})$	19.26	19.59	20.54	20.57	19.78

将 PFPE-A-SBR 引入后,对改性 SSBR 的硫化特性进行了研究,相关数据见表 1。从表 1 可以观察到,随着 PFPE-A-SBR 添加量的增加,焦烧时间、工艺正硫化时间、最小扭矩和最大扭矩逐渐减少,但 (MH-ML)值提高。在初始硫化阶段,由于 PFPE-A-SBR 吸收热量,导致分子链间的解缠结,同时 PFPE 链段易于移动,这促使 SBR 链段上的侧乙烯基团迅速与促进剂、硫化剂和交联剂发生反应,从而快速引发 SSBR 分子链的化学交联,形成网络结构,缩短了焦烧时间和工艺正硫化时间。通过扭矩数值可以发现,更多的硫化剂和交联剂被用于 PFPE-A-SBR 自身和 PFPE-A-SBR 与 SSBR 的交联反应。根据(MH-ML)值的反映,PFPE-A-SBR 有助于提高 SSBR 的交联密度,主要是通过 SBR 链段提供更多的交联点。当添加量为 4 份时,改性 SSBR 的(MH-ML)值达到最大,表明交联密度最高。增加 PFPE-A-SBR 用量之后,改性 SSBR 的(MH-ML)值没有增加,而 ML 和 MH 值降低,这表明更多的 PFPE 链段在 SSBR 的硫化过程中起到了良好的润滑作用。和 MH 值都降低,说明较多的 PFPE 链段在 SSBR 硫化过程中起到良好的润滑作用。

3.2.2. 物理机械性能

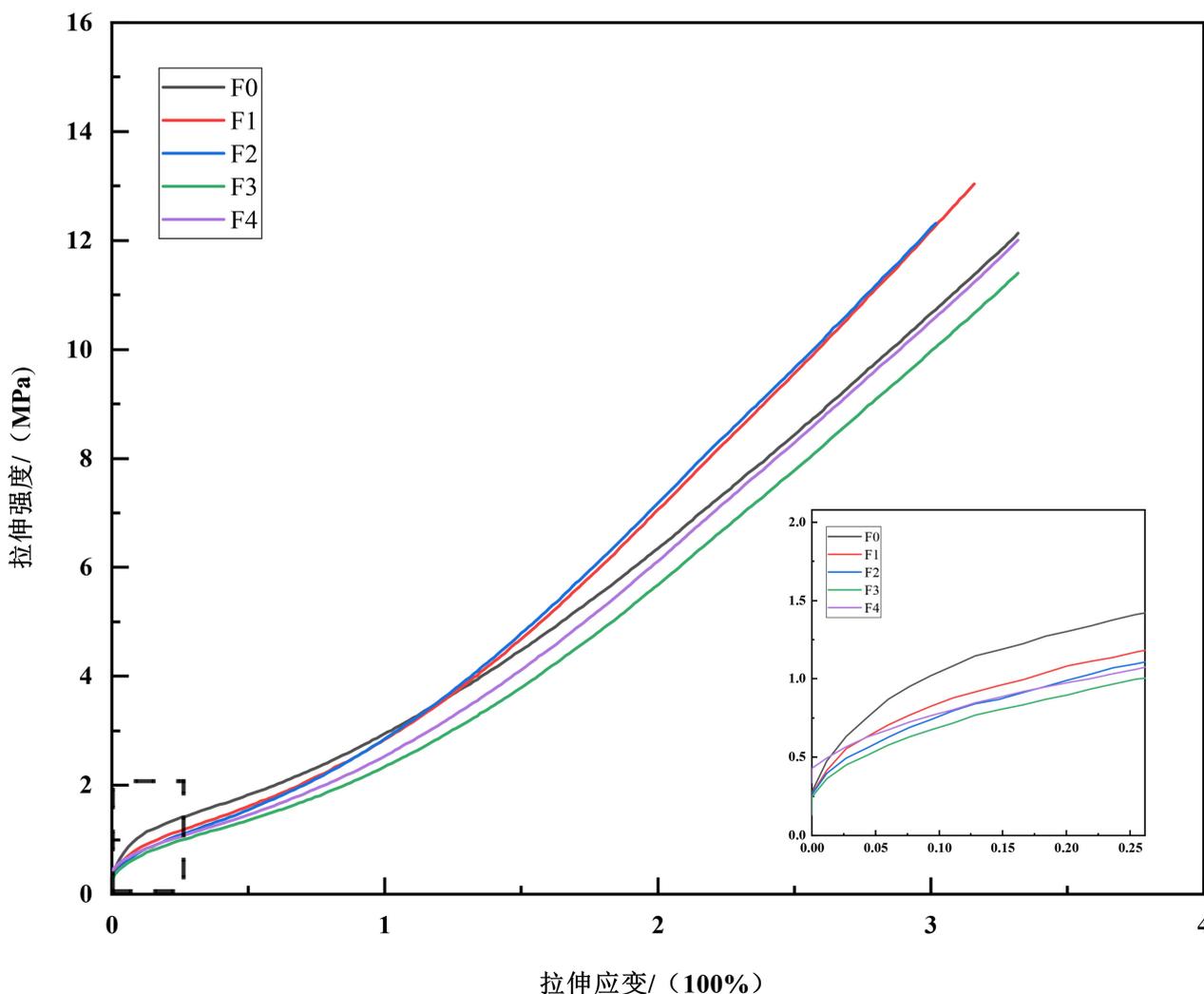


Figure 3. Tensile curves of SSBR modified with different parts of PFPE-A-SBR

图 3. 添加不同份数 PFPE-A-SBR 改性 SSBR 胶料的拉伸曲线

图3为加入不同份数FKM-A改性剂的SSBR硫化胶的拉伸曲线。从图中曲线可以看出,由图3可知,未加入PFPE-A-SBR改性剂时,SSBR胶料的拉伸强度为12.01 MPa,扯断伸长率为332%,随着PFPE-A-SBR改性剂的加入,胶料的拉伸强度从12.01 MPa升高到13.1 MPa,随后下降到11.4 MPa;伸长率先下降后升高,但相比较未加入改性剂的F0组,伸长率均降低。PFPE-A-SBR通过绕在白炭黑表面的柔软分子链,有效地阻止白炭黑团聚的产生,改善了白炭黑的分散性,提高了白炭黑的增强效果,从而提升了SSBR胶料的拉伸强度。另一方面,PFPE分子链中包含一部分刚性、具有结晶链段的 $-(CF_2CF_2)_x-$ 结构,形成了微晶区。在拉伸过程中,微晶区吸收能量并发生形变,而 $-(CF_2CF_2)_x-$ 链段则发挥着分子链之间的润滑作用,导致了拉伸强度先升高后下降的现象。随着PFPE-A-SBR含量的增加,白炭黑颗粒在PFPE分子链上的数量也增加,形成更大的白炭黑聚集体,在胶料中形成更强的相互作用力。这导致在受到应力作用时容易产生破坏,从而降低了胶料的物理机械性能。

图4为添加不同份数PFPE-A-SBR改性SSBR胶料的邵氏硬度,从图中可见,加入PFPE-A-SBR使硫化胶的硬度稍有下降,其中加入2~3份时,胶料的硬度达到最低72。

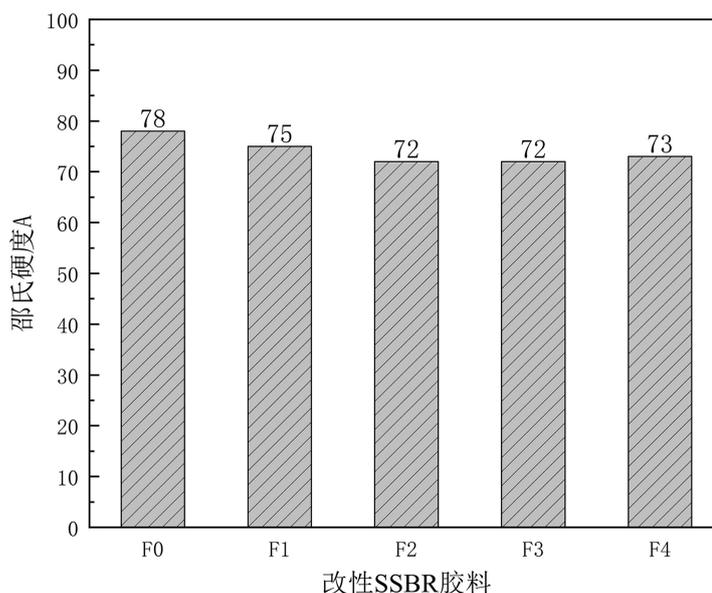


Figure 4. Shore hardness of SSBR modified with PFPE-A-SBR with different parts added

图4. 添加不同份数PFPE-A-SBR改性SSBR胶料的邵氏硬度

3.2.3. 耐磨性能的影响

图5为添加不同份数FKM改性SSBR胶料的阿克隆磨耗体积,计算公式为: $V = (m_1 - m_2)/\rho$, 其中 m_1 为试样实验前质量, m_2 为试样试验后质量, ρ 为试样的密度。根据图5显示的结果,可观察到在SSBR配方中添加PFPE-A-SBR并未降低阿克隆磨耗体积,反而提高至 0.39 cm^3 ,增加了约15%。这种现象主要源于添加剂中的链段含有更多可进行交联的 $C=C$ 键,既能够发生自身交联,也能与SSBR分子链发生交联。当PFPE-A-SBR的添加量超过4份时,SSBR橡胶制品的阿克隆磨耗体积由 0.39 cm^3 降至 0.36 cm^3 ,意味着配方中的硫化剂和交联剂已经用尽,部分PFPE-A-SBR只发生了少量的化学交联。同时,这也揭示了支化结构的PFPE-A-SBR更容易与SSBR分子链打结缠绕在一起,阻止了其移动,在自身交联的同时形成局部聚集,生成凝胶块,提高了交联密度,从而导致PFPE链的生成。由于PFPE链段被封闭困住,无法迁移,失去了降低磨损的功能,因此增加了改性SSBR的阿克隆磨耗体积。

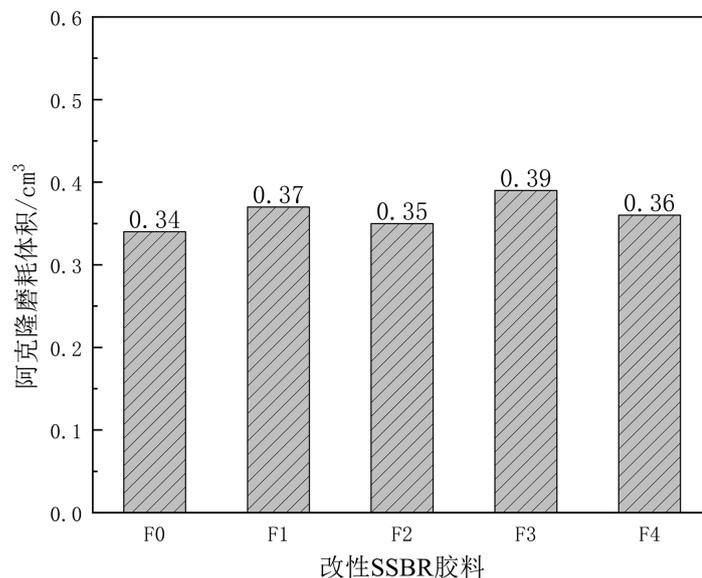


Figure 5. Akron abrasion volume of PFPE-A-SBR modified SSBR compound with different parts added

图 5. 添加不同份数的 PFPE-A-SBR 改性 SSBR 胶料的阿克隆磨耗体积

3.2.4. 门尼测试

图 6 为添加不同份数 PFPE-A-SBR 改性 SSBR 胶料的门尼粘度。由图可知，随着 PFPE-A-SBR 的引入，SSBR 胶料的门尼值先增大后减小，相比于 F0 组胶料，其他各组胶料均有所增加，其中添加 2 份 PFPE-A-SBR 时门尼值达到最高，因为 PFPE-A-SBR 分子链和 SSBR 分子链发生了物理缠结，导致 SSBR 分子链被阻碍，自由移动受限，因此改性 SSBR 混炼胶的门尼粘度得到了一定程度的提高。然而随着 PFPE-A-SBR 的含量增加，SSBR 分子链之间的距离也增大，作为小分子增塑剂的作用逐渐减弱，因此胶料的门尼粘度会降低。

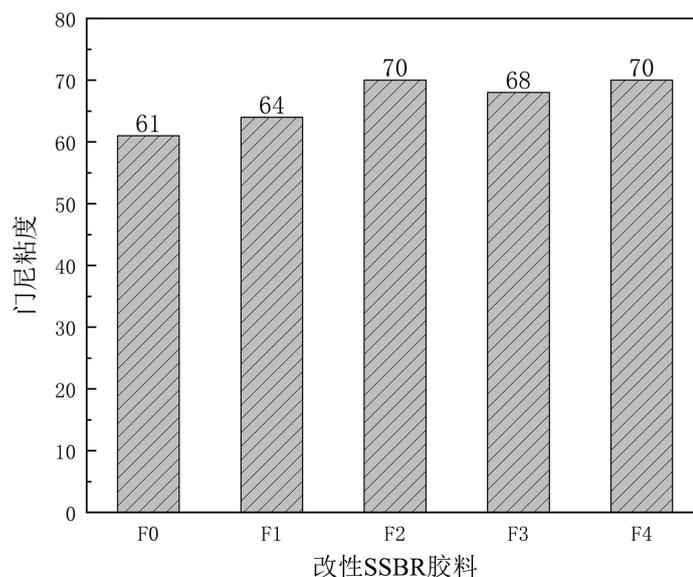


Figure 6. Mooney viscosity of SSBR modified with PFPE-A-SBR with different parts added

图 6. 添加不同份数 PFPE-A-SBR 改性 SSBR 胶料的门尼粘度

3.2.5. 动态力学性能

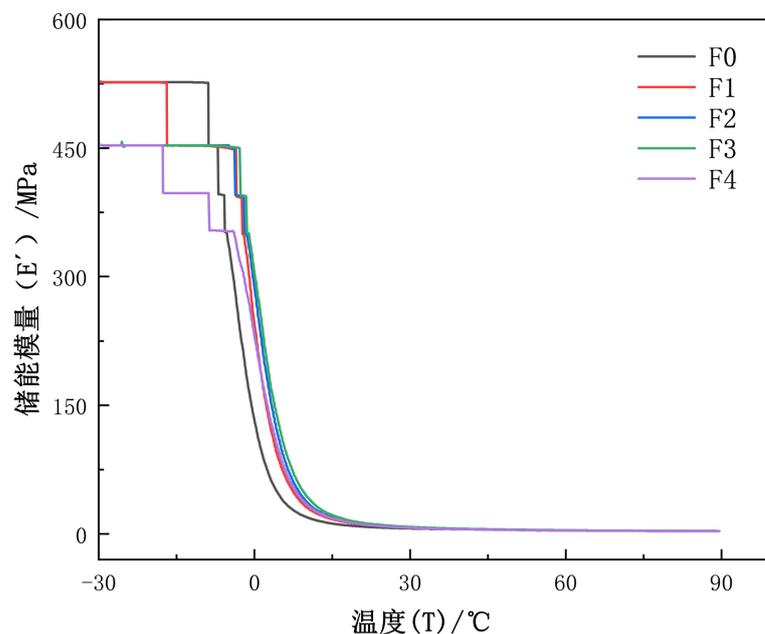


Figure 7. Storage modulus (E') - temperature (T) curve of SSBR modified with different parts of PFPE-A-SBR

图 7. 添加不同份数 PFPE-A-SBR 改性 SSBR 胶料的储能模量(E') - 温度(T)曲线

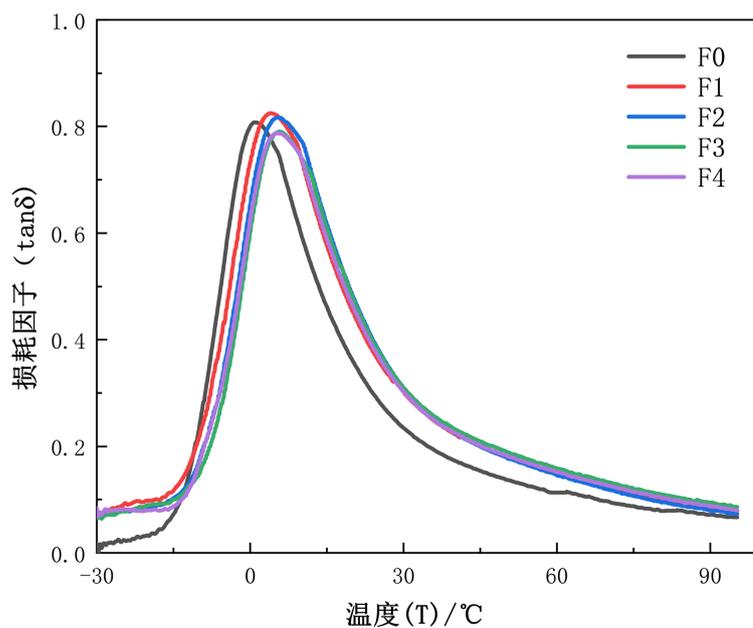


Figure 8. Loss factor ($\tan \delta$) of modified SSBR rubber with different fractions of PFPE-A-SBR added δ)-Temperature (T) curve

图 8. 添加不同份数 PFPE-A-SBR 改性 SSBR 胶料的损耗因子($\tan \delta$) - 温度(T)曲线

图 7 为添加不同份数 PFPE-A-SBR 改性 SSBR 胶料的储能模量(E')-温度(T)曲线, E' 主要收到粘弹性和刚度的影响。在此实验中, 每种胶料的填料用量相同, 从图中可以观察到, 各组胶料的 E' - T 关系曲线变化趋势基本相似, 以未改性的 SSBR 胶料来说, 其玻璃态在 -8°C 以下此时分子链被冻结, 然而在受到

恒定力和频率作用时, 主要变化是在聚合物内键长的改变, 从而吸收能量。从图中可以看出, F0 组胶料的 E' 525.7 KPa 最高, 说明 F0 组胶料中的白炭黑填料分散性较差, 填料-填料相互作用较大, 填料网络结构较多, 由于 PFPE-A-SBR 的加入, F1、F2、F3、F4 四组胶料中, 胶料的 E' 均有所降低, E' 承下降趋势, 这表明 PFPE-A-SBR 的引入能改善白炭黑的分散性, 抑制白炭黑团聚, 有效降低填料网络。并且由于 PFPE-A-SBR 的分子链包覆在白炭黑表面, 也增强了白炭黑颗粒在 SSBR 基体中的相容性。

Table 2. $\tan\delta$ of SSBR modified with PFPE-A-SBR with different fractions added at 0°C and 60°C
表 2. 添加不同份数 PFPE-A-SBR 改性 SSBR 在 0°C 和 60°C 的 $\tan\delta$

硫化特性	F0	F1	F2	F3	F4
$\tan\delta/0^\circ\text{C}$	0.73	0.71	0.69	0.65	0.67
$\tan\delta/60^\circ\text{C}$	0.11	0.15	0.15	0.16	0.15
$\tan\delta$ 峰值	0.81	0.83	0.82	0.79	0.79
$T_g/^\circ\text{C}$	0.98	4.53	4.83	4.82	4.77

图 8 和表 2 可得, 对不同添加量的 PFPE-A-SBR 改性 SSBR 胶料进行的损耗因子($\tan\delta$) - 温度(T)曲线和在 0°C 和 60°C 时的 $\tan\delta$ 值的研究显示, 橡胶常被用作轮胎胎面胶, 通常 0°C $\tan\delta$ 值用来表示其抗湿滑能力好坏, 而 60°C $\tan\delta$ 则反映了其滚动阻力的大小。 $\tan\delta$ 峰值的高低与填料与橡胶相互作用以及填料网络的形成息息相关, 不同胶料的 $\tan\delta$ -T 关系曲线均呈现出相似的变化趋势, 都表现出 $\tan\delta$ 峰值先上升后下降的特点。这些峰值对应的温度可被看作玻璃态转变温度 T_g 。研究结果显示, PFPE-A-SBR 的添加, 改性 SSBR 的 T_g 最高从 -0.98°C 增加到 4.83°C, 内耗峰值最高从 0.72 增加到 0.83, 这可能是由于胶体内部的交联密度增加, PFPE 链段内的 F 原子和 SSBR 分子链的 H 原子发生了氢键作用, 相当于增加了交联点, 从而导致 T_g 值升高。PFPE-A 有助于提高 SSBR 的内耗峰值, 表明在 T_g 附近, PFPE 链段的运动促进了附近 SSBR 链段的运动, 加速能量消耗并引发构型转变。另一方面改性 SSBR 胶料的 $\tan\delta/0^\circ\text{C}$ 值均低于 F0 组, $\tan\delta/60^\circ\text{C}$ 的值结果相反, 说明 PFPE-A-SBR 的加入使得橡胶的滚动阻力上升, 抗湿滑性降低。

4. 结论

分析结果表明: PFPE-A-SBR 作为添加剂, 根据测试少量添加于 SSBR 胶料中, 混炼胶的加工性能得到提升, 门尼粘度值从 61 升高到 70, 有所增加。硫化胶的机械性能也有所提升, 拉伸强度可从 12.01 MPa 提升到 13.0 MPa, 但伸长率均略有降低。PFPE-A-SBR 改性剂, 对 SSBR 的力学性能和静摩擦系数没有影响, 但使其磨损性能降低大约 15%。PFPE-A 可以改善 SSBR 的热稳定性, 玻璃化转变温度升高约 4°C, 损耗因子的峰值提高了约 14%。另外, 一些微交联的 PFPE-A-SBR 在 SSBR 交联网络中起到良好的滑动作用, 可以降低 SSBR 分子链之间的相互作用, 胶料的动态力学性能稍有提升, 有效降低填料网络, 其中添加 2~4 份 PFPE-A-SBR 改性 SSBR 胶料具有最佳的白炭黑分散性。

参考文献

- [1] 苏忠魁, 肖函, 李雷雷, 等. 我国溶聚丁苯橡胶生产现状及发展趋势[J]. 轮胎工业, 2022, 42(1): 10-12.
- [2] 闫波. 溶聚丁苯橡胶市场进展与工艺技术分析[J]. 江西化工, 2021, 37(4): 20-22.
- [3] 马万彪, 梁爱民, 王雪, 等. 官能化溶聚丁苯橡胶的研究与进展[J]. 石油化工, 2020, 49(12): 1246-1250.
- [4] 周步杰, 张才亮, 冯连芳, 等. 溶聚丁苯橡胶生产技术专利综述[J]. 合成橡胶工业, 2020, 43(4): 336-341.
- [5] 杨玉琼. 溶聚丁苯橡胶的结构、性能、加工及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [6] 邵光谱. 改性炭黑/白炭黑补强国产溶聚丁苯橡胶的性能研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛科技大学, 2018.

- [7] 吴世清. 一种全氟聚醚端基连续氟化装置与方法[J]. 化工生产与技术, 2023, 29(1): 46.
- [8] 刘冬洁, 陈飞, 魏进家. 空间用全氟聚醚润滑油动力学形态的分子动力学研究[C]//中国力学学会流体力学专业委员会. 第十二届全国流体力学学术会议摘要集. 西安: 西安交通大学化工学院, 2022: 1.
- [9] 孙旗龄, 裴一博, 冯裕智, 等. Y型全氟聚醚UV固化涂料的制备及其性[J]. 合成树脂及塑料, 2020, 37(3): 25-29.
- [10] 黄宇祥, 朱胜兰, 张鸣, 等. 热力学稳定全氟聚醚基磁流体的研制[J]. 化工新型材料, 2020, 48(4): 112-116.
- [11] 孙旗龄, 张明晖, 冯裕智, 等. 含全氟聚醚聚氨酯丙烯酸酯的合成及性能研究[J]. 涂料工业, 2019, 49(12): 9-13.
- [12] 汪冬冬, 邵卫, 梁滔, 等. 白炭黑的液相分散工艺对溶聚丁苯橡胶改性研究[J]. 当代化工, 2016, 45(3): 538-541.