

原材料·配方

芳纶纳米纤维对溶聚丁苯橡胶胶料性能的影响

张寒珠¹, 梁琳¹, 郝福兰², 张保岗¹, 丁乃秀^{1*}, 刘光烨¹

(1. 青岛科技大学 高性能聚合物及成型技术教育部工程研究中心, 山东 青岛 266042; 2. 黄河三角洲京博化工研究院有限公司, 山东 滨州 256500)

摘要:制备芳纶纳米纤维(ANFs)预分散体,研究ANFs用量对溶聚丁苯橡胶(SSBR)胶料性能的影响。结果表明:随着ANFs用量的增大,SSBR混炼胶的 t_{10} 和 t_{90} 无明显变化, F_L 、储能模量和损耗模量增大,Payne效应增强;SSBR硫化胶的邵尔A型硬度、100%定伸应力和撕裂强度增大,拉伸强度先减小后增大,损耗因子($\tan\delta$)最大值减小。ANFs用量为4份的SSBR硫化胶0℃时的 $\tan\delta$ 最大,抗湿滑性能最好。

关键词:芳纶纳米纤维;预分散体;溶聚丁苯橡胶;硫化特性;物理性能;动态力学性能

中图分类号: TQ330.38⁺3; TQ333.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2023)03-0195-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.03.0195



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

溶聚丁苯橡胶(SSBR)作为一种通用合成橡胶,具有较好的弹性、耐磨性能、低温性能和抗湿滑性能,广泛应用于轮胎工业。但SSBR的抗撕裂性能较差,为进一步扩大SSBR的应用,需要制备高性能的SSBR胶料^[1]。

芳纶纳米纤维(ANFs)作为一种新型纳米材料,不仅具有强度和模量大,还具有比表面积和长径比大的优点,能够通过有效地传递应力改善胶料的性能^[2]。同时,ANFs表面具有较多的极性基团,其反应活性增大,解决了芳纶纤维表面化学惰性的缺点^[3-5]。基于ANFs独特的尺寸和表面效应,ANFs有望赋予胶料优异的性能^[6-7]。ANFs/橡胶复合材料常用制备工艺为乳液共混法,但该工艺不利于工业化生产^[8]。

本工作通过制备ANFs预分散体,采用机械共混法制备SSBR胶料,研究ANFs用量对SSBR胶料性能的影响,为开发高性能的SSBR胶料和制备性能优异的SSBR制品提供参考。

1 实验

1.1 原材料

SSBR,牌号2525,江苏爱同国际贸易有限公司提供;ANFs,山东京博聚芳新材料股份有限公司产品;丁腈胶乳,中国石油兰州化工研究中心提供;无水氯化钙,上海埃彼化学试剂有限公司产品;白炭黑ZX955,山东振兴化工有限公司产品;偶联剂KH550、氧化锌、硬脂酸、防老剂RD、硫黄和促进剂CBS,工业级,市售品。

1.2 主要仪器与设备

RW20 digital型悬臂搅拌器,艾卡(广州)仪器设备有限公司产品;101-1AB型电热鼓风干燥箱,天津市泰斯特仪器有限公司产品;X(S)K-160型开炼机,上海双翼橡塑机械有限公司产品;RPA2000橡胶加工分析仪,美国阿尔法科技有限公司产品;XLB-D400×400型平板硫化机,湖州东方机械有限公司产品;LX-A型邵尔A型硬度计,江苏新真威试验机械有限公司产品;GT-TCS-2000型

作者简介:张寒珠(1997—),女,山东济宁人,青岛科技大学在读硕士研究生,主要从事高分子工程材料与功能材料的研究。

*通信联系人(nxding1717@163.com)

引用本文:张寒珠,梁琳,郝福兰,等.芳纶纳米纤维对溶聚丁苯橡胶胶料性能的影响[J].橡胶工业,2023,70(3):195-200.

Citation: ZHANG Hanzhu, LIANG Lin, HAO Fulan, et al. Effect of aramid nanofibers on properties of SSBR compound[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(3): 195-200.

万能拉力机和GT-7042-RAE型回弹仪,高铁检测仪器(东莞)有限公司产品;EPlenor 5000N型动态力学分析(DMA)仪,耐驰(上海)机械仪器有限公司产品。

1.3 配方

SSBR 100, ANFs(在预分散体中的质量分数为30%) 变量(0, 1, 2, 3, 4), 白炭黑 50, 偶联剂KH550 4, 氧化锌 3, 硬脂酸 1.5, 防老剂RD 1.5, 硫黄 1.8, 促进剂CBS 1.2。

1.4 试样制备

ANFs预分散体:按一定比例分别称取ANFs和丁腈胶乳,两者搅拌均匀后逐滴加入质量分数为8%的氯化钙水溶液以絮凝沉降,所得沉降物于开炼机上挤出部分水分,最后于60℃烘箱中干燥至恒质量,得到ANFs预分散体。

混炼胶制备:在开炼机上加入SSBR生胶塑炼1 min后,加入ANFs预分散体混炼均匀,再依次加入氧化锌、硬脂酸、防老剂,然后分批加入白炭黑和偶联剂KH550,最后加入硫黄和促进剂CBS,混炼均匀后薄通、下片,混炼胶停放16 h。

混炼胶在平板硫化机上硫化,硫化条件为160℃/10 MPa×($t_{90}+2$ min)。

1.5 测试分析

(1)硫化特性和物理性能。按照相应的国家标准进行测试。

(2)RPA分析。混炼胶的应变扫描范围0.28%~100%,温度60℃,频率1 Hz。

(3)DMA分析。硫化胶的温度扫描范围-60~100℃,升温速率3℃·min⁻¹,频率10 Hz,动态应变0.1%。

2 结果与讨论

2.1 硫化特性

ANFs用量对SSBR混炼胶硫化特性的影响如表1所示。

从表1可以看出:随着ANFs用量的增大,SSBR混炼胶的 t_{10} 和 t_{90} 无明显变化,这表明ANFs用量对混炼胶的加工安全性及硫化速率影响不大;SSBR混炼胶的 F_L 增大, $F_{\max}-F_L$ 先增大后减小,这

表1 SSBR混炼胶的硫化特性

Tab. 1 Curing characteristics of SSBR compounds

项 目	ANFs用量/份				
	0	1	2	3	4
t_{10}/min	0.90	0.88	0.91	0.92	0.87
t_{90}/min	28.20	27.60	27.24	28.06	27.24
$F_L/(\text{dN} \cdot \text{m})$	4.04	4.24	4.72	4.78	4.90
$F_{\max}/(\text{dN} \cdot \text{m})$	30.68	31.05	30.65	29.87	29.85
$F_{\max}-F_L/(\text{dN} \cdot \text{m})$	26.64	26.81	25.93	25.09	24.85

说明ANFs能够与SSBR分子链相互穿插、缠绕,阻碍SSBR分子链的运动,降低混炼胶的流动性。

2.2 RPA分析

填料补强的胶料对应变具有依赖性,具体表现为胶料的动态模量随应变的增大而急剧减小,即Payne效应^[9]。ANFs用量对SSBR混炼胶储能模量(G')和损耗模量(G'')的影响分别如图1和2所示。

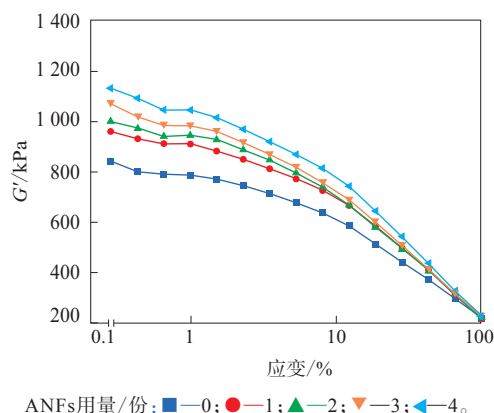
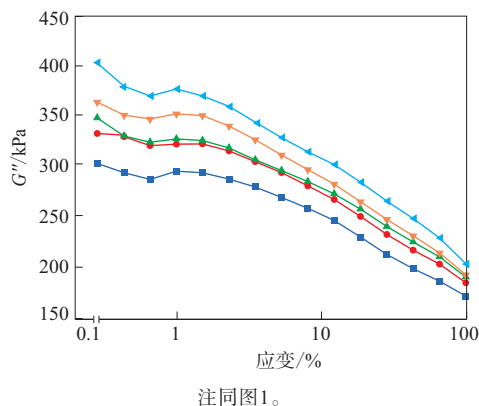


图1 ANFs用量对SSBR混炼胶 G' 的影响

Fig. 1 Effect of ANFs amounts on G' of SSBR compounds



注同图1。

图2 ANFs用量对SSBR混炼胶 G'' 的影响

Fig. 2 Effect of ANFs amounts on G'' of SSBR compounds

从图1可以看出,随着ANFs用量的增大,SSBR混炼胶的 G' 和 $\Delta G'$ 增大。 G' 能够反映SSBR混炼胶中填料的网络结构强度, G' 越大,填料与填料之间的相互作用越强,填料网络结构的强度越大。分析认为:随着ANFs用量的增大,ANFs与白炭黑之间形成的刚性连接增加,填料与填料之间的相互作用增强,且ANFs能与SSBR分子链相互缠绕,使填料与橡胶形成的网络结构逐渐增强,导致SSBR混炼胶的 G' 逐渐增大;随着应变的增大,破坏填料网络刚性连接的速度加快,SSBR混炼胶的 G' 急剧减小,最终填料网络结构的破坏程度趋于一致, G' 相差不大。

从图2可以看出:随着应变的增大,SSBR混炼胶的 G'' 先小幅减小后增大,再大幅减小;同一应变下,随着ANFs用量的增大,SSBR混炼胶的 G'' 增大。在小应变下,SSBR混炼胶的 G'' 变化与网络结构的破坏和重建速率有关,当破坏速率快于重建速率时,橡胶分子链被释放, G'' 减小,反之, G'' 增大^[10];在高应变下,网络结构的破坏速率加快, G'' 快速下降。

2.3 物理性能

ANFs用量对SSBR硫化胶应力-应变曲线和物理性能的影响如图3和表2所示。

从图3和表2可以看出:随着ANFs用量的增大,SSBR硫化胶的邵尔A型硬度、100%定伸应力和撕裂强度增大,拉伸强度呈先减小后增大的趋势;与未添加ANFs的SSBR硫化胶相比,ANFs用量为4份的SSBR硫化胶的100%定伸应力增大了78%,加入ANFs的SSBR硫化胶的拉断伸长率变化不大,这表明ANFs在SSBR中分散均匀,通过制备预分散体的方式有利于ANFs在SSBR中的分散。

随着ANFs用量的增大,SSBR硫化胶的100%定伸应力明显增大,这是由于ANFs保留了芳纶纤维的高模量,在硫化胶受到应力时通过两相界面作用将应力转移至ANFs,使硫化胶在相同应变下承受的力更大,同时ANFs的加入提高了填料与橡胶之间的相互作用,有利于阻止裂纹的产生和扩展,增强网络结构抵抗外力的能力^[11-12]。但在更大应变下,ANFs很难随着SSBR分子链段运动而运动,这时主要依靠白炭黑与橡胶形成的网络结构

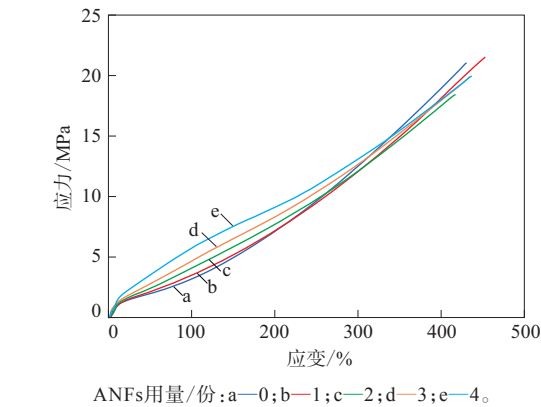


图3 ANFs用量对SSBR硫化胶应力-应变曲线的影响
Fig. 3 Effect of ANFs amounts on stress-strain curves of SSBR vulcanizates

表2 ANFs用量对SSBR硫化胶物理性能的影响
Tab. 2 Effect of ANFs amounts on physical properties of SSBR vulcanizates

项 目	ANFs用量/份				
	0	1	2	3	4
邵尔A型硬度/度	67	70	71	72	75
100%定伸应力/MPa	3.2	3.5	4.0	4.7	5.7
拉伸强度/MPa	21.1	21.5	18.4	19.9	20.0
拉断伸长率/%	431	453	418	434	437
撕裂强度/(kN·m ⁻¹)	39	41	42	44	47
100℃×72 h热空气老化后					
邵尔A型硬度变化/度	+7	+6	+7	+7	+5
拉伸强度变化率/%	-14	-15	-1	-10	-6
拉断伸长率变化率/%	-39	-42	-38	-45	-48
撕裂强度变化率/%	-18	-15	-9	-3	-6

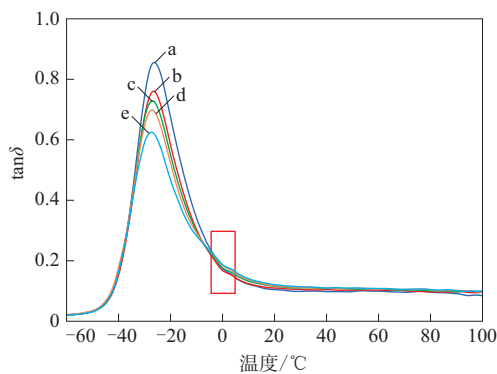
承担应力,故ANFs用量较大时SSBR硫化胶的拉伸强度减小。ANFs改善SSBR硫化胶的抗撕裂性能的原因是ANFs能够阻挡撕裂口的延伸,使撕裂口不能按照原来方向扩展,撕裂口绕开ANFs继续前进需要耗散部分能量,故硫化胶的撕裂强度增大。

从表2可以看出,老化后SSBR硫化胶的邵尔A型硬度增大,拉伸强度、拉断伸长率和撕裂强度均减小。这是因为SSBR分子链发生了氧化交联反应,SSBR分子链之间的交联网络更强,SSBR分子链活动能力下降,导致硫化胶变硬变脆。综合来看,添加ANFs的SSBR硫化胶老化后的拉伸强度和撕裂强度变化较小,耐老化性能较好。

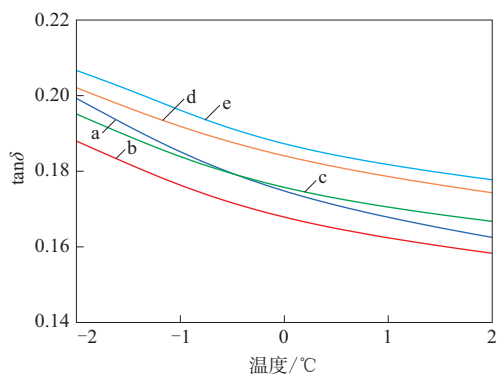
2.4 动态力学性能

损耗因子($\tan\delta$)是表征硫化胶在动态应变下能量损耗的物理量, $\tan\delta$ 最大值($\tan\delta_{\max}$)可表征填

料与橡胶之间的相互作用。 $\tan\delta_{\max}$ 越大,硫化胶的能量损耗越大,即自由活动的橡胶分子链越多,填料-橡胶的相互作用越小。ANFs用量对SSBR硫化胶 $\tan\delta$ 的影响如图4所示。



(a) 整图



(b) 局部放大图 (红框部分)

注同图3。

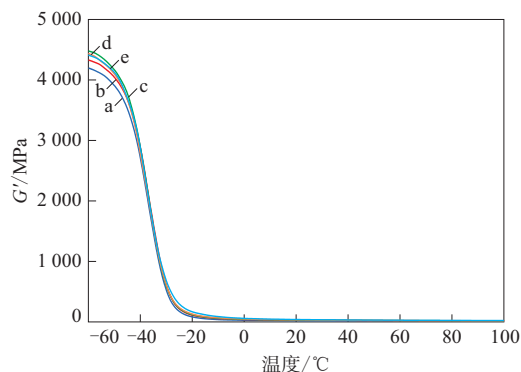
图4 ANFs用量对SSBR硫化胶 $\tan\delta$ 的影响

Fig. 4 Effect of ANFs amounts on $\tan\delta$ of SSBR vulcanizates

从图4(a)可以看出,随着ANFs用量的增大,SSBR硫化胶的 $\tan\delta_{\max}$ 减小。这是因为ANFs穿插在SSBR分子链中,与其相互缠绕,能够自由移动的SSBR分子链减少,填料与橡胶之间的相互作用更强,在应变作用下,SSBR分子之间的内摩擦减小,硫化胶的能量损耗变小^[13]。

硫化胶0 °C时的 $\tan\delta$ 可反映抗湿滑性能,0 °C时的 $\tan\delta$ 越大,硫化胶的抗湿滑性能越好^[14]。从图4(b)可以看出,随着ANFs用量的增大,SSBR硫化胶0 °C时的 $\tan\delta$ 先减小后增大,ANFs用量为4份的SSBR硫化胶0 °C时的 $\tan\delta$ 最大,表明其抗湿滑性能最好。

ANFs用量对SSBR硫化胶 G' 的影响如图5所示。



注同图3。

图5 ANFs用量对SSBR硫化胶 G' 的影响

Fig. 5 Effect of ANFs amounts on G' of SSBR vulcanizates

从图5可以看出:当温度较低时,SSBR硫化胶的 G' 保持平稳;随着温度的升高,在玻璃化转变区域SSBR硫化胶的 G' 迅速下降;随着温度的继续升高,SSBR硫化胶的 G' 基本不变。这是由于温度较低时,SSBR处于玻璃态,SSBR硫化胶的 G' 大;当温度升高时,填料网络被破坏,SSBR硫化胶的 G' 表现为大幅减小;当温度继续升高时,SSBR分子链链段自由运动,SSBR硫化胶的 G' 趋于稳定^[15-18]。

从图5还可以看出,加入ANFs后SSBR硫化胶的 G' 在玻璃态和高弹态均增大,这表明ANFs可增强填料与橡胶之间的相互作用,限制SSBR分子链运动,提高SSBR硫化胶的模量。

3 结论

(1) 随着ANFs用量的增大,SSBR混炼胶的 t_{10} 和 t_{90} 无明显变化, F_L 增大, $F_{\max}-F_L$ 先增大后减小。

(2) 随着ANFs用量的增大,SSBR混炼胶的 G' 和 $\Delta G'$ 和 G'' 增大,填料网络结构增强。

(3) 随着ANFs用量的增大,SSBR硫化胶的邵尔A型硬度、100%定伸应力和撕裂强度增大,拉伸强度先减小后增大;ANFs用量为4份的SSBR硫化胶的100%定伸应力增大了78%;添加ANFs的SSBR硫化胶热空气老化后的拉伸强度和撕裂强

度变化较小,耐老化性能较好。

(4) 随着ANFs用量的增大,SSBR硫化胶的 $\tan\delta_{\max}$ 减小;ANFs用量为4份的SSBR硫化胶0℃时的 $\tan\delta$ 最大,表明其抗湿滑性能最好。

参考文献:

- [1] 刘华侨,潘天人,汪传生,等.白炭黑和白炭黑/炭黑并用补强末端基改性溶聚丁苯橡胶/顺丁橡胶并用胶的性能研究[J].橡胶工业,2020,67(2):104-108.
- LIU H Q, PAN Y R, WANG C S, et al. Properties of silica and silica/carbon black reinforced end-modified SSBR/BR blend[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(2): 104-108.
- [2] WU J P, ZHANG X M, JIANG K, et al. Water-dispersible hydrothermal aramid nanofibers reinforced styrene-butadiene rubber with enhanced mechanical behaviour and solvent resistance[J]. Fibers and Polymers, 2020, 21(8): 1808-1815.
- [3] ZHAO Y, LI X, SHEN J N, et al. The potential of Kevlar aramid nanofibers composite membranes[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2020, 8(16): 7548-7568.
- [4] 张美云,罗晶晶,杨斌,等.芳纶纳米纤维的制备及应用研究进展[J].材料导报,2020,34(5):158-166.
- ZHANG M Y, LUO J J, YANG B, et al. Research progress of preparation and application of aramid nanofibers[J]. Materials Reports, 2020, 34(5): 158-166.
- [5] 郭大双.芳纶纤维增强丁腈橡胶复合材料性能的研究[D].青岛:青岛科技大学,2020.
- GUO D S. Study on properties of aramid fiber reinforced NBR composites[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2020.
- [6] XUE X D, JIANG K, YIN Q, et al. Tailoring the structure of Kevlar nanofiber and its effects on the mechanical property and thermal stability of carboxylated acrylonitrile butadiene rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(26): 47698-47708.
- [7] JUNG J, SODANO H A. Synergetic effect of aramid nanofiber-graphene oxide hybrid filler on the properties of rubber compounds for tire tread application[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(13): 51856-51868.
- [8] JUNG J, SODANO H A. Aramid nanofiber reinforced rubber compounds for the application of tire tread with high abrasion resistance and fuel saving efficiency[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2020, 2(11): 4874-4884.
- [9] SUN C Z, WEN S P, MA H W, et al. Improvement of silica dispersion in solution polymerized styrene-butadiene rubber via introducing amino functional groups[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, 58: 1454-1461.
- [10] 张琳,王玉海,刘震.用RPA2000橡胶加工分析仪研究胶料硫化过程中填料的聚集程度[J].橡胶科技,2017,15(6):13-21.
- ZHANG L, WANG Y H, LIU Z. Study on filler aggregation of rubber compound during curing process by RPA2000 rubber processing analyzer[J]. Rubber Science and Technology, 2017, 15(6): 13-21.
- [11] CHEN Y, YIN Q, ZHANG X M, et al. Rational design of multifunctional properties for styrene-butadiene rubber reinforced by modified Kevlar nanofibers[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 166: 196-203.
- [12] YIN B, LI G, WANG D N, et al. Enhanced mechanical properties of styrene-butadiene rubber with low content of bacterial cellulose nanowhiskers[J]. Advances in Polymer Technology, 2018, 37(5): 1323-1334.
- [13] LIU X, ZHAO S H, ZHANG X Y, et al. Preparation, structure, and properties of solution-polymerized styrene-butadiene rubber with functionalized end-groups and its silica-filled composites[J]. Polymer, 2014, 55(8): 1964-1976.
- [14] 邵光谱,丁乃秀,彭迁迁,等.白炭黑改性剂对溶聚丁苯橡胶性能的影响[J].橡胶工业,2019,66(1):27-31.
- SHAO G P, DING N X, PENG Q Q, et al. Effect of silica modifier on properties of SSBR[J]. China Rubber Industry, 2019, 66(1): 27-31.
- [15] ZHANG X M, CHEN Y, YIN Q, et al. Highly improved compatibility and mechanical properties of carboxylated nitrile rubber/styrene butadiene rubber by incorporating modified Kevlar nanofibers[J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 238: 121926.
- [16] 翟振强,李英哲,黄伟,等.芳纶纳米纤维强化浸渍处理芳纶纤维及其橡胶复合材料的界面黏合性能[J].复合材料学报,2022,39(9):4327-4336.
- ZHAI Z Q, LI Y Z, HUANG W, et al. Aramid nanofiber reinforce dipping of fibers and its effect on the interfacial adhesive properties of aramid fiber to rubber[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4327-4336.
- [17] 尹恋鹏.芳纶纤维/丁苯橡胶复合材料疲劳行为研究[D].贵阳:贵州大学,2020.
- YIN L P. Study on fatigue behavior of aramid fiber/styrene butadiene rubber composites[D]. Guiyang: Guizhou University, 2020.
- [18] 高剑虹,杨晓翔.芳纶短纤维增强橡胶复合材料大变形力学性能的相关性实验[J].福州大学学报(自然科学版),2018,46(5):677-684.
- GAO J H, YANG X X. Experimental study on the dependent factors of mechanical properties of aramid short fiber reinforced rubber composites at large deformation[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2018, 46(5): 677-684.

收稿日期:2022-10-16

Effect of Aramid Nanofibers on Properties of SSBR Compound

ZHANG Hanzhu¹, LIANG Lin¹, HAO Fulan², ZHANG Baogang¹, DING Naixiu¹, LIU Guangye¹

(1. Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China; 2. The Yellow River Delta Chambroad Institute Co., Ltd, Binzhou 256500, China)

Abstract: The solution polymerized styrene butadiene rubber (SSBR) compound was prepared by adding the dispersion of the aramid nanofibers (ANFs), and the effect of the ANFs amount on the properties of the SSBR compounds was studied. The results showed that, with the increase of the ANFs amount, the t_{10} and t_{90} of the SSBR compound did not change significantly, the F_L , storage modulus and loss modulus increased, and the Payne effect was enhanced. Meanwhile, the Shore A hardness, tensile stress at 100% elongation and tear strength of the SSBR vulcanizates increased, the tensile strength decreased first and then increased, and the maximum value of loss factor ($\tan\delta$) decreased. The SSBR vulcanizate with 4 phr of the ANFs had the largest $\tan\delta$ at 0 °C and the best wet skid resistance.

Key words: ANFs; pre-dispersion; SSBR; curing characteristic; physical property; dynamic mechanical property

专利3则

由东营高沃橡胶科技有限公司申请的专利(公布号 CN 115232357A, 公布日期 2022-10-25)“一种对废旧轮胎再生橡胶表面化学改性的方法”, 提供了一种对废旧轮胎再生橡胶表面化学改性的方法: (1) 废旧轮胎胶粉的氧化。将废旧轮胎胶粉、氧化剂和溶剂混合后, 球磨反应至溶剂完全挥发, 出料, 得球磨料。(2) 球磨料的交联。将球磨料、交联剂和溶剂混合后, 加热搅拌反应, 蒸干溶剂, 得硬化料。(3) 冷冻压榨。将硬化料冷冻压榨, 得压榨料。(4) 硫化细菌发酵。将压榨料用硫化细菌发酵后过滤, 洗涤和干燥, 即完成废旧轮胎再生橡胶的表面化学改性。该再生橡胶具有优异的性能, 可与天然橡胶等稳定相容。

由浙江葆润应用材料有限公司申请的专利(公布号 CN 115216156A, 公布日期 2022-10-21)“一种发泡硅橡胶密封片材及制备方法”, 涉及的发泡硅橡胶材料配方为: 乙烯基硅油(粘度为 8 000 mPa·s) 100, 发泡助剂[羟基多面体低聚倍半硅氧烷(POSS)封端硅氧聚合物, 羟基质量分数为 0.03~0.077] 6~20, 铂金催化剂(质量分

数为 10×10^{-3}) 0.5~1.5, 抑制剂 0.1~0.4, 含氢硅油(氢质量分数为 0.001 2) 25~60。该发泡硅橡胶材料通过刀模冲切制成发泡硅橡胶密封片材, 片材的泡孔为独立闭孔的圆形泡孔, 平均孔径在 20~60 μm 之间。该发泡硅橡胶密封片材不仅具有优异的力学性能, 而且密封性能较好。

由国网湖南省电力有限公司、国网湖南省电力有限公司电力科学研究院和国家电网有限公司申请的专利(公布号 CN 115216270A, 公布日期 2022-10-21)“一种新型常温固化硅橡胶密封胶及其应用”, 涉及的硅橡胶密封胶由主体胶和固化剂组成, 主体胶与固化剂的质量比为 10:(1~3)。主体胶为乙酰氧基封端乙烯基聚二甲基硅氧烷; 固化剂由甲基硅油和五水硫酸铜组成, 甲基硅油与五水硫酸铜的质量比为 (3~4):1。该硅橡胶密封胶具有优良的耐老化性能, 且固化不受施工环境的影响, 在干旱、干燥地区同样可快速固化; 不论灌注的厚度多大, 其内外部都是同步固化, 固化时间短; 通过颜色变化, 可直观地判断密封部位是否已经固化, 便于施工。

(本刊编辑部 赵敏)