

快速硫化型丁腈橡胶的制备及性能研究

李昱彤^{1,2}, 陈东平³, 李铁柱³, 王福善^{3*}, 李琳¹, 王辉^{1*}

(1. 青岛科技大学 高分子科学与工程学院, 山东 青岛 266042; 2. 上海未蓝工业技术有限公司, 上海 201802;
3. 中国石油兰州石化公司, 甘肃 兰州 730060)

摘要: 采用湿法混炼的工艺, 将三烷基氯化铵(TAC)、二硫化四甲基秋兰姆(TMTD)和二苄基二硫代氨基甲酸锌(ZTC)这三种促进剂分别填充于丁腈胶乳中, 以此改善填料的分散性。将促进剂加入廉价易得的丁腈胶乳中经过混合、絮凝、洗涤、干燥得到丁腈橡胶(NBR), 以快速硫化型丁腈橡胶 NBR3445F 和 NBR3345 的性能作为参照标准, 制备了一种新型的快速硫化型 NBR, 并研究了不同种类及用量的促进剂对 NBR 硫化特性、力学性能及微观结构的影响。结果表明: 相较于快速硫化型 NBR, 添加 2 份 TAC 的 NBR(TAC-2) 硫化速度加快了 4.7 s, 拉伸强度提升了 138%, 撕裂强度提高了 59%, 其综合性能也明显优于其他两种促进剂 ZTC 和 TMTD, 以上结果与扫描电子显微镜(SEM) 图像所呈现的微观结构特征吻合较好。基于在确保较快硫化速度与安全加工性能的前提下, 选择性能较优异的促进剂 TAC 来制备快速硫化型 NBR, 为相关材料的制备提供了技术路径与实验依据。

关键词: 快速硫化; 湿法混炼; 促进剂; 丁腈胶乳; 丁腈橡胶(NBR)

中图分类号: TQ333.7 文献标志码: A 文章编号: 1002-4026(2025)06-0086-08

开放科学(资源服务)标志码(OSID):



Research on preparation and properties of rapidly vulcanized nitrile rubber

LI Yutong^{1,2}, CHEN Dongping³, LI Tiezhu³, WANG Fushan^{3*}, LI Lin¹, WANG Hui^{1*}

(1. College of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;
2. Shanghai Weilan Industrial Technology Co., Ltd, Shanghai 201802, China; 3. PetroChina Lanzhou
Petrochemical Company, Lanzhou 730060, China)

Abstract: Herein, a wet-mixing process was used to improve the dispersion of fillers in nitrile latex by incorporating three types of accelerators: trialkyl chlorides (TACs), tetramethylthiuram disulfide (TMTD), and zinc dibenzylthiocarbamate (ZTC). These accelerators were added to cost-effective and readily available nitrile latex, followed by mixing,

收稿日期: 2024-11-14 修回日期: 2025-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51603111, 5170311); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2021ME107); 中国博士后科学基金项目(2022M721903, 2021M700553, 2020M672014); 赵氏建新集团有限公司博士后项目

作者简介: 李昱彤(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为快速硫化型丁腈橡胶的制备及性能研究

* 通信作者, 王福善(1966—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为合成树脂、合成橡胶新材料和炼化新技术的开发、生产和应用。

E-mail: wfshan@petrochina.com.cn;

王辉(1982—), 男, 博士, 教授, 研究方向为橡胶原材料合成、橡胶合成新技术、橡胶加工及制品的设计与开发以及电池新能源方向。E-mail: hwang@qust.edu.cn

coagulation, washing, and drying to obtain nitrile rubber nitrile butadiene rubber (NBR). A novel rapidly-vulcanized NBR was developed using the properties of NBR3445F and NBR3345 as reference standards, and the effects of different types and dosages of accelerators on the vulcanization characteristics, mechanical properties, and microstructure of the developed NBR were studied. Results showed that compared with conventional rapidly vulcanized NBR, the developed NBR with 2 parts of accelerator TAC (TAC-2) exhibited 4.7 s higher vulcanization speed, a 138% higher tensile strength, and 59% higher tear strength. This NBR also exhibited substantially higher overall performance than NBRs with the other two accelerators, ZTC and TMTD. These findings were well aligned with the microstructural characteristics observed in scanning electron microscopy image. Based on the premise of ensuring rapid vulcanization speed and safe processing performance, TAC, an accelerator with better performance, can be selected to manufacture a rapidly vulcanized NBR, providing a technical path and an experimental basis for the development of related materials.

Key words : rapid vulcanization; wet mixing; accelerator; butadiene nitrile latex; nitrile rubber

丁腈橡胶(NBR)是由丁二烯和丙烯腈经过乳液聚合得到的,主要用于各种耐油及抗静电制品^[1-2]。在橡胶制品生产中硫化是必不可少的步骤,然而普通型NBR橡胶分子中丙烯腈质量分数为15%~53%,150℃下工艺正硫化时间在20 min左右,而快速硫化型NBR在160℃下的工艺正硫化时间为6~8 min。橡胶的生产效率往往受到硫化工艺的影响,硫化时间越长,硫化速度越慢,生产效率越低^[3]。快速硫化型NBR在工业生产及市场应用中,其可以有效实现节能减排,极大的改善劳动条件同时降低生产成本。快速硫化型NBR因硫化时间短,并且对模具污染小、流动性好、回弹性佳等优点,被广泛应用于市场上^[4-6]。

由于工业生产中对NBR的要求不仅是快速硫化,还要求其兼具优异的综合性能,因此我们选用丁腈胶乳进行制备。由于丁腈胶乳价格低廉且产量充足,还具有优异的耐磨性、气密性、弹性和强度等,为高端NBR橡胶复合材料的开发提供了无限可能,湿法混炼则是其优选工艺之一^[7]。湿法混炼主要用于改善促进剂等填料在橡胶中的分散度,同时增强了促进剂与NBR之间的作用力,提高橡胶/填料复合材料的力学性能^[8-10]。

促进剂的加入可加速硫化过程、缩短硫化时间,因此我们选择了3种不同类型的促进剂,研究其对丁腈橡胶性能的影响。本文用到的促进剂有三烷基氯化铵(TAC)、二硫化四甲基秋兰姆(TMTD)和二苄基二硫代氨基甲酸锌(ZTC)。ZTC是一种白色粉末状固体,具有轻微的气味,是一种二硫代氨基甲酸盐类的促进剂,活性高,具有极强的促进作用,广泛应用于橡胶中^[11],硫化速度极快,称为“超速促进剂”^[12]。ZTC通过其活性基团与橡胶分子链上的双键发生反应,促进橡胶分子链之间形成新的共价键,提高橡胶的交联密度,橡胶的断裂伸长率、撕裂强度和耐磨性都随之提高^[13]。促进剂TMTD是白色粉末,属于秋兰姆类的促进剂。TMTD可以与氧化锌反应生成二甲基二硫代氨基甲酸锌,提高了体系的交联密度^[14-15],促进了良好的热稳定性、高硫化度和最终产品的良好机械性能^[16]。TMTD可以形成较强的硫键,提高橡胶的力学性能^[17]。还可以改善橡胶的流动性和可塑性,提高橡胶的加工性能。同时其适用范围广,可以提高橡胶的耐老化性能^[18]。促进剂TAC是一种长链烷基醇醚季铵盐的无色黏稠液体,属于阳离子表面活性剂,是合成丁苯橡胶中的硫化促进剂,可显著提高橡胶300%定伸应力,在洗涤、活性纺织、油田、矿物浮选、造纸、油漆、皮革等行业有广泛应用^[19]。

普通型NBR硫化如果在生胶混炼配方中加入促进剂TMTD、ZTC和TAC,其工艺正硫化时间较长。本工作将不同种类及用量的促进剂分散在水中并于NBR胶乳混合,所得到的生胶分别按标准配方进行了混炼、硫化和性能测试,考察了在NBR中填充不同种类及用量的促进剂对NBR混炼胶的硫化速率和物理性能的影响。

1 实验部分

1.1 实验材料

NBR3345RC-14,台湾镇江南帝石化公司;NBR3445F,德国朗盛;LZ3305,中国石油兰州石化公司;氧化

锌,兴化市兴江锌品厂;硬脂酸、硫磺,安庆鑫泉硫化剂厂;促进剂 TMTD,上海麦克林生化科技股份有限公司;促进剂 ZTC,青岛联昊化工有限公司;促进剂 TAC,武汉贝乐叶生物医药科技有限公司;其他助剂均为市售。

1.2 主要设备和仪器

BL-6175-BL 型开炼机,东莞市宝轮精密检测仪器有限公司;MV2000 型门尼粘度仪,美国 ALPHA 公司;HS 1007-RTMO 型平板硫化机,佳鑫电子设备科技有限公司;LX-A 型邵尔硬度计,江苏明珠试验机械有限公司;Z005 型万能电子拉力试验机,德国 Zwick/Roell 集团;RPA2000 型橡胶加工分析仪,德国 Montech 公司;MDR2000 型无转子硫化仪,台湾高铁检测仪器有限公司;ZLD-300 型电动搅拌调速器,上海美强实业发展有限公司。

1.3 基本配方

基本配方为:NBR 100 phr;硬脂酸 1 phr;氧化锌 5 phr;硫磺 0.5 phr;促进剂 TMTD 0.5 phr;促进剂 CZ 2 phr。

1.4 试样制备

1.4.1 生胶

将市售的 NBR3345RG-14 和 NBR3445F 生胶分别按基本配方混炼得到混炼胶分别记为 NBR3345 和 NBR3445F。

在定量 LZ3305 胶乳中加入干胶质量分数为 5% 的 TAC(纯度 32.4%)、TMTD 和 ZTC,经混合、絮凝、洗涤、干燥得到的干胶分别标记为 TAC-5、TMTD-5 和 ZTC-5。

另取定量的 LZ3305 胶乳,加入干胶质量分数为 2% 的 TAC(纯度 32.4%)、TMTD 和 ZTC,经混合、絮凝、洗涤、干燥得到的干胶分别标记为 TAC-2、TMTD-2 和 ZTC-2。

1.4.2 硫化胶

NBR 的混炼操作在开炼机上进行,先将胶料放置于辊筒上,进行破胶、包辊,再依次加入硬脂酸、氧化锌,持续混炼直至小料完全被胶料吸收。加入硫磺继续混炼,为促进混炼的均匀性,分别在辊筒两侧距边缘约 3/4 处割胶各 3 次。最后调节辊距至 2 mm,使胶料薄通 5 次,以进一步优化混炼效果,随后将混炼好的胶料制成 5 mm 厚的胶片试样。

将试样放置 8 h 后,在硫化仪上于 160 °C 下进行测试;硫化胶在平板硫化机上硫化,硫化条件:温度为 160 °C,时间为 15 min。

1.5 性能测试

(1)按照标准 GB/T 531.1—2008 标准^[20]将 3 个哑铃状试样重叠在一起,使试验样品的厚度在 6 mm 左右,选 3 个点用邵氏硬度计测量其硬度,取 3 个数值的中间数作为最终硬度。

(2)硫化胶拉伸强度按照 GB/T 528—2009 标准^[21]进行测试,采用 2 型哑铃型试样,采用拉力试验机进行拉伸强度测试,拉伸速率 500 mm/min。

(3)硫化胶撕裂强度按 GB/T 529—2008 标准^[22],采用直角型试样。使用拉力试验机进行撕裂强度测试,拉伸速度为 500 mm/min。

(4)硫化性能测试采用的试样是在制备的混炼胶上裁取的质量至少为 5 g 圆片型试样,并将其用聚酯薄膜夹层覆盖。进行 MDR2000 测试。测试温度为 160 °C,测试时间为 15 min^[23]。

(5)门尼黏度按照 GB/T 1232.1—2016 标准^[24]对生胶及混炼胶进行测试,称取 20 g 左右硫化胶测试门尼黏度,预热时间为 1 min,测试时间为 4 min,温度为 100 °C。

(6)使用 JSM-6700F(日本电子公司)显微镜观察硫化胶断面的形态,SEM 样品在表面镀金 60 s^[25]。

2 结果与讨论

2.1 混炼胶的门尼黏度

不同种类及用量的促进剂对 NBR 门尼黏度的影响如表 1 所示。由表 1 可以看出,在 3 种促进剂中, TAC-5、TMTD-5 与 ZTC-2 的门尼黏度较低,其中 ZTC-2 与 NBR3345 和 NBR3445F 门尼黏度比较接近,加工性能最好。即促进剂用量较多时,促进剂为 TMTD 和 TAC 的胶料加工性能最好;随着促进剂用量的减少,促进剂为 ZTC 的胶料加工性能最好。

2.2 硫化胶的硫化特性

由图 1 和表 2 可知,TAC-5 的工艺正硫化时间(t_{90})最短,较 NBR3345 提高了 4.66 min,较 NBR3445F 提高了 2.54 min,但焦烧时间(t_{10})较短,从生产的角度加入促进剂 TAC 后生产成本低,但是实验的加工安全性差;其次是 ZTC-5 的 t_{90} 最短,较 NBR3345 提高了 4.23 min,较 NBR3445F 提高了 2.11 min,说明促进剂的加入提高了橡胶分子链的交联程度,加快了硫化速度,缩短了硫化时间。但胶乳中有部分促进剂因絮凝导致

用量减少,增加了产品的成本^[26]。由表 2 可知,随着促进剂用量的减少,交联程度下降, t_{90} 延长,但仍优于快速硫化型 NBR; t_{10} 也相应延长,加工安全性能得到提高,所以本文采用较少的促进剂制备快速硫化型丁腈橡胶。在硫磺硫化反应中,TMTD 硫化促进作用很强,硫与 TMTD 分裂成的自由基反应形成硫自由基,然后再与橡胶大分子链反应,最终完成硫化。TMTD-5 和 TMTD-2 的硫化速度较慢,本文优先选择硫化速度较快的两种促进剂 TAC 和促进剂 ZTC。当胶料的 t_{90} 接近时,本文优先选择 t_{10} 较长的促进剂 ZTC-5,来提高胶料的加工安全性。促进剂 ZTC 具有较好的抗焦烧性能,在胶乳配合料中有极好的防止预硫化作用^[27]。

转矩差 ΔM (即最大转矩与最小转矩差)可以用来表征胶料交联密度的大小。 ΔM 越大,硫化胶交联密度越大,硫化程度越高。由表 2 可知,湿法混炼得到的 NBR 交联密度较大,硫化程度都较 NBR3345 高,TAC-5、TMTD-2 及 ZTC-5 的交联程度较高。 ΔM 随着促进剂用量的减少,促进剂 TAC 和 ZTC 的交联程度增大,其它胶料的交联程度减小,说明随着促进剂用量的减小,以单硫键或者多硫键的形式提高了交联密度^[28],丁腈橡胶在硫化过程中产生的有效交联的自由基的数量增多,从而产生的交联点数目逐渐增多,致使交联程度提高^[29]。如果对产品有较高的交联程度的要求,优先选择 TMTD-2 来制备快速硫化型 NBR。

表 1 促进剂种类及用量对 NBR 门尼黏度的影响

Table 1 Impacts of accelerator type and dosage on the Mooney viscosity of NBR

编号	门尼黏度
NBR3345	37.4
NBR3445F	36.6
TAC-5	78.5
TAC-2	84.3
TMTD-5	71.7
TMTD-2	71.9
ZTC-5	76.6
ZTC-2	37.4

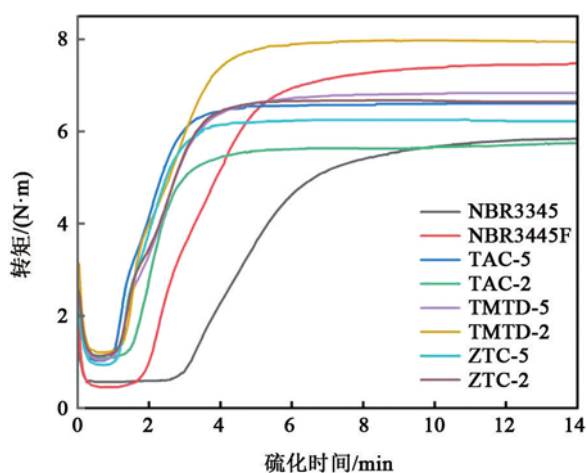


图 1 促进剂种类及用量对 NBR 硫化曲线的影响

Fig.1 Impacts of accelerator type and dosage on NBR vulcanization curve

表2 促进剂种类及用量对 NBR 硫化特性的影响

Table 2 Impacts of accelerator type and dosage on NBR vulcanization characteristics

编号	$M_H/(N \cdot m)$	$M_L/(N \cdot m)$	$\Delta M/(N \cdot m)$	t_{10}/min	t_{90}/min
NBR3345	5.87	0.53	5.34	3.20	7.68
NBR3445F	7.49	0.46	7.03	2.06	5.56
TAC-5	6.63	1.03	5.60	1.13	3.02
TAC-2	6.68	1.13	5.55	1.29	3.45
TMTD-5	6.85	1.05	5.80	1.26	3.73
TMTD-2	7.98	1.21	6.77	1.42	3.89
ZTC-5	6.29	0.93	5.36	1.23	3.05
ZTC-2	5.78	1.07	4.71	1.61	3.52

注: M_H 为最大扭矩; M_L 为最小转矩; t_{10} 为焦烧时间; t_{90} 为工艺正硫化时间。

2.3 硫化胶的物理机械性能

促进剂的作用是加速橡胶的硫化反应,即促进橡胶分子链之间的交联。通过提高交联密度,可以增加橡胶的强度和韧性,从而提高拉伸强度和撕裂强度。

由图2(a)~(f)可知,本文制备的快速硫化型 NBR 的物理机械性能普遍优于 NBR3345 和 NBR3445F,这是因为湿法混炼可以提高填料在橡胶基体中的分散性,减小工艺操作过程对橡胶内部结构和填料的破坏,从而提高了橡胶的综合性能^[30]。其中 TAC-2 的综合性能最好,拉伸强度及撕裂强度较高,拉伸伸长率保持较高,说明其能使橡胶高分子链之间交联度增加,使相对分子质量增大,强度增加,弹性保持较好^[31]。TAC-5 的拉伸强度增加,韧性变差,这是因为随着促进剂用量的增加,胶乳硫化后,胶粒内部产生交联结构,在硫化胶乳成膜过程中,一方面此交联结构可通过分子运动与相互扩散而部分地转移到粒子之间,加强胶粒的黏合性,进而提高橡胶的拉伸强度^[32]。随着 ZTC 用量的增加,硫化胶膜的 100% 定伸应力、拉伸强度都随之变大,这是由于随着 ZTC 用量的增加,反应分解出的游离硫浓度也在增大,硫化速度加快的同时硫化过程中的交联键也在增多,硫化胶膜的交联密度就会不断增大,导致橡胶分子之间的应力也随之变大^[33]。促进剂 ZTC 的综合力学性能最差,说明促进剂用量相同时,促进剂 TAC 填充的丁腈橡胶的物理机械性能好,其次是 TMTD,所以优先选择 TAC 作为促进剂。TAC-5、TMTD-5 和 ZTC-5 的硬度较高,说明随着促进剂用量的增加,硬度得到相应提高。

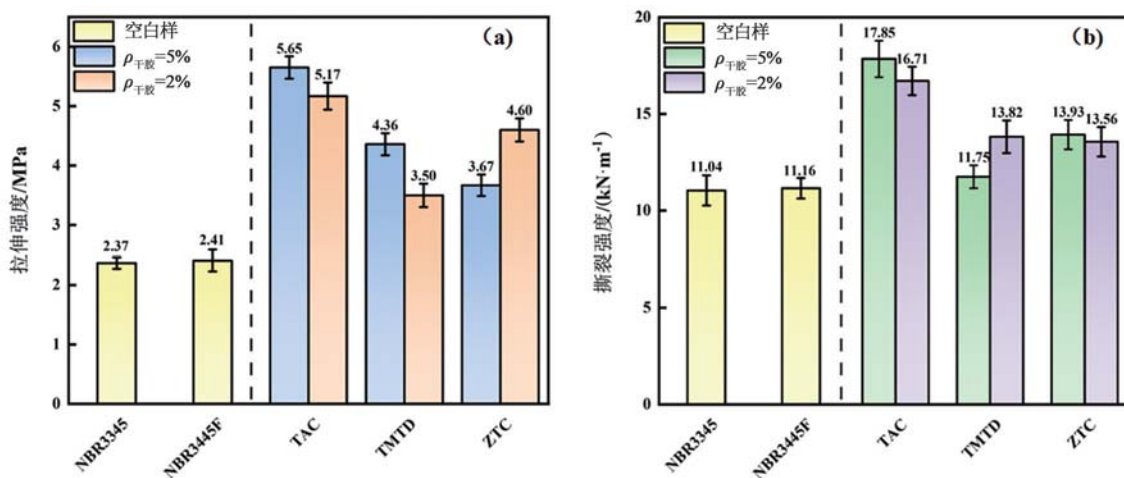


图2 NBR 的物理机械性能

Fig.2 Physical and mechanical properties of NBR

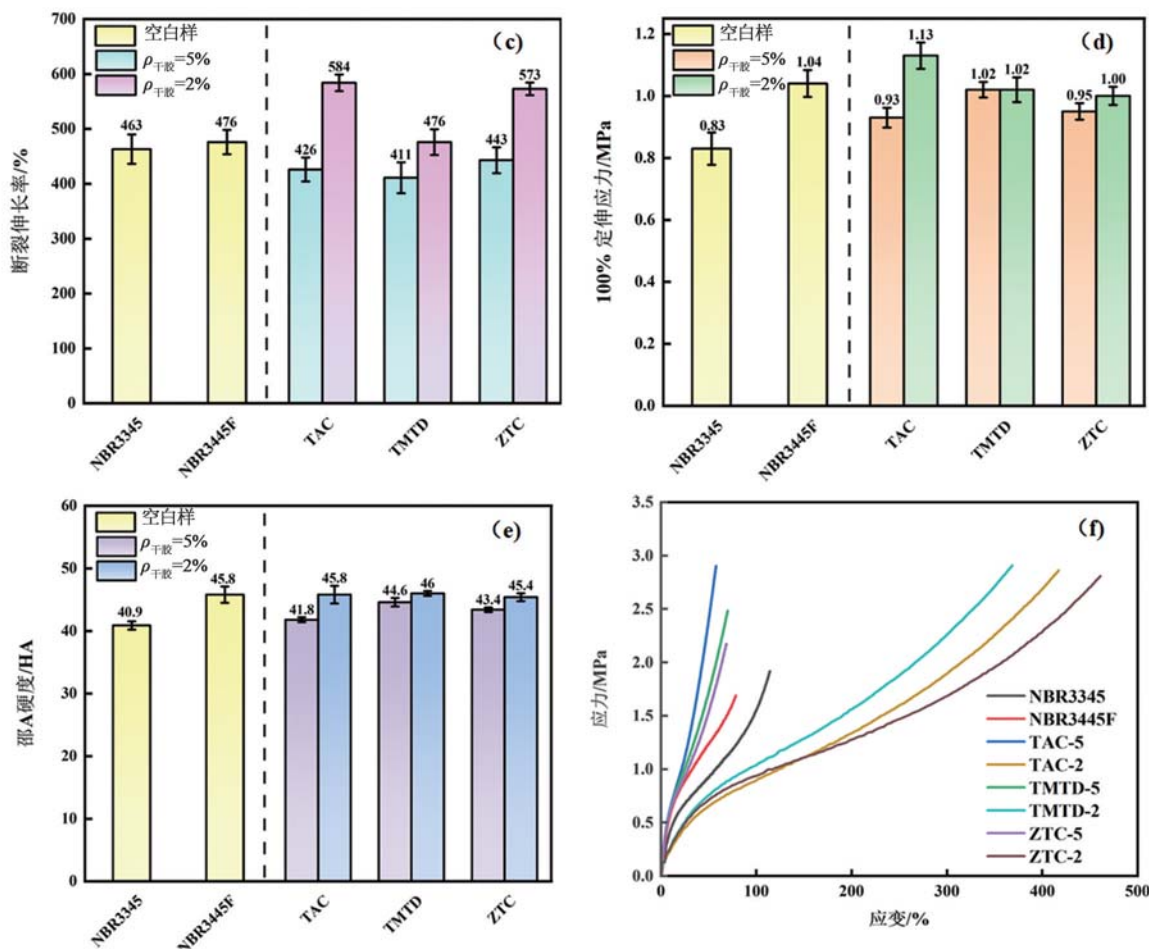


图 2(续)

2.4 硫化胶的扫描电子显微镜形貌

形态决定了共混物的相容性程度,相结构受组分组成、共混比、各组分黏度、表面特性和复合工艺等因素的影响,共混物的组成是决定形貌的主要因素^[34]。图 3 为添加促进剂的 NBR 复合材料的扫描电子显微镜(SEM)形貌。促进剂 TAC 为液体类促进剂,在 NBR 中以波纹的形式呈现,TAC-5 波纹数明显多于 TAC-2,且无明显团聚现象,表明促进剂 TAC 与橡胶的相容性较好。圆圈处为促进剂 TMTD 和 ZTC 的团聚体,TMTD 的团聚现象较多,ZTC 分散性明显优于 TMTD。因此 TAC 的综合性能较好,其次是 ZTC,TMTD 的性能较差,上述测试结果与 SEM 图吻合较好。

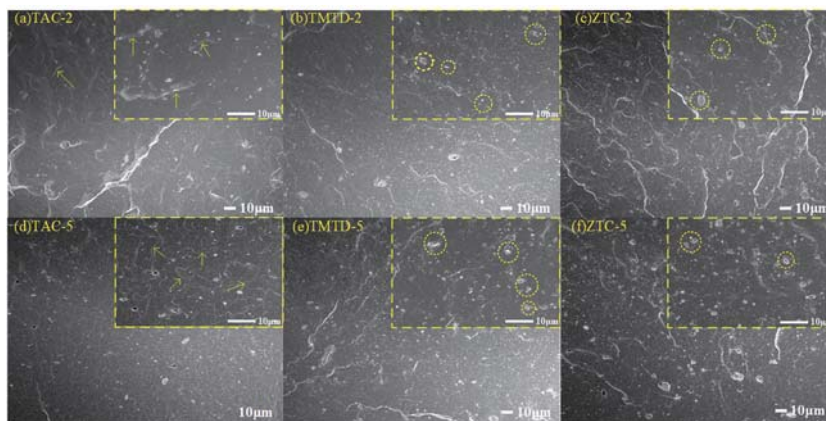


图 3 NBR 的 SEM 图

Fig.3 SEM images of NBR

3 结论

从硫化特性来看,随着促进剂用量的减少,交联程度下降, t_{90} 延长,但仍优于快速硫化型 NBR, t_{10} 也相应延长,加工安全性能得到提高,促进剂 ZTC 则相反。从提高硫化速度的角度,本文优先选择硫化速度快的促进剂。促进剂 ZTC 的硫化速度快于促进剂 TAC,两种胶料的 t_{10} 相差不大,安全加工性能较好。从物理机械性能来看,促进剂用量相同时,TAC 填充 NBR 的物理机械性能最好,拉伸强度、撕裂强度和 100%定伸应力较高,拉断伸长率较低,说明其能使橡胶高分子链之间交联度增加,使相对分子质量增大,强度增加,弹性降低。其次是促进剂 TMTD,最后是促进剂 ZTC。对标 NBR3345 和 NBR3445F 的性能,加入促进剂 TAC-2 的 NBR 硫化速度提高了 4.7 s,拉伸强度提升了 138%,撕裂强度提升了 59%。从 SEM 图上看,促进剂 TAC 分散较好,其次是促进剂 ZTC,促进剂 TMTD 分散较差,上述测试结果与 SEM 图吻合较好。

综上,在保证较快硫化速度和安全加工性能的基础上,选择了力学性能较优异的促进剂 TAC-2 来制备快速硫化型 NBR,在后续的工作中将从提高胶料的室温稳定性和老化性能出发,继续研究更优异的加工工艺、配方及促进剂种类。

参考文献:

- [1] THOMAS S P, MATHEW E J, MARYKUTTY C V. Nanomodified fillers in chloroprene-rubber-compatible natural rubber/acrylonitrile-butadiene rubber blends[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2012, 124(5): 4259-4267. DOI: 10.1002/app.35406.
- [2] SAFIAH A N A, FARISHA A F, HAKIM S A, et al. Effect of degradation by temperature onto nitrile rubber elastomer mechanical properties[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 48(P6): 1941-1946.
- [3] 邓力. 高温快速硫化丁腈橡胶物理性能的研究[D]. 上海: 上海工程技术大学, 2012.
- [4] 付含琦, 吴宇, 赵洪国, 等. 快速硫化丁腈橡胶制备方法研究[J]. *广东化工*, 2017, 44(10): 52-53.
- [5] 王兴刚, 齐永新, 彭仁莘, 等. 我国丁腈橡胶产业发展现状及未来发展趋势[J]. *高分子通报*, 2016(4): 1-16. DOI: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2016.04.001.
- [6] 张建国, 邢立江, 郭灵, 等. 快速硫化型丁腈橡胶的特征行为[J]. *弹性体*, 2021, 31(1): 38-42. DOI: 10.16665/j.cnki.issn1005-3174.2021.01.008.
- [7] 刘苏苏, 王辉, 蒋兴旺, 等. 湿法混炼丁腈橡胶/高岭土复合材料的流变特性和力学性能[J]. *弹性体*, 2023, 33(1): 35-39. DOI: 10.16665/j.cnki.issn1005-3174.2023.01.009.
- [8] 孙泉, 曹仁伟, 韩冬礼, 等. 橡胶湿法混炼技术研究进展[J]. *橡胶工业*, 2020, 67(12): 942-948.
- [9] 张晓光, 毛诗元, 李岩, 等. 碳纳米管/炭黑复配对天然橡胶湿法混炼共沉胶性能的影响[J]. *高分子材料科学与工程*, 2020, 36(7): 39-45. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2020.0168.
- [10] 孙国华, 李辉, 李斌. 湿法混炼橡胶新材料工艺技术优势与研究进程[J]. *橡塑技术与装备*, 2017, 43(6): 17-19. DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2017.06.004.
- [11] PALATY S, JOSEPH R. Studies on xanthate-zinc diethyldithiocarbamate accelerator combination in natural rubber[J]. *Plastics, Rubber and Composites*, 2001, 30(6): 270-274. DOI: 10.1179/146580101101541697.
- [12] 胡元, 钟宏, 王帅, 等. 二硫代氨基甲酸盐(酯)的合成方法及应用进展[J]. *应用化工*, 2013, 42(2): 360-362. DOI: 10.16581/j.cnki.issn1671-3206.2013.02.024.
- [13] KIM D Y, PARK J W, LEE D Y, et al. Correlation between the crosslink characteristics and mechanical properties of natural rubber compound via accelerators and reinforcement[J]. *Polymers*, 2020, 12(9): 2020. DOI: 10.3390/polym12092020.
- [14] LI J H, LU X, BAI Q, et al. Investigation on metal coordination crosslinking nitrile butadiene rubber induced by the synergistic effect between tetramethylthiuram disulfide and cupric sulfate[J]. *Soft Materials*, 2022, 20(4): 414-427. DOI: 10.1080/1539445X.2022.2054822.

- [15] 蔡善同, 李秀贞, 唐文芝. 防焦剂 MTP 和 CTP 在秋兰姆无硫硫化体系中防焦机理的探讨[J]. 特种橡胶制品, 1979(1): 28-35.
- [16] GOBBI V G, DA SILVA T G, SANTOS CUNHA M, et al. Comparative study among TMTD, TBzTD, and ZBEC accelerators in isobutylene-isoprene elastomer vulcanization[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(33): 48965. DOI: 10.1002/app.48965.
- [17] ALAM M N, KUMAR V, POTIYARAJ P, et al. Synergistic activities of binary accelerators in presence of magnesium oxide as a cure activator in the vulcanization of natural rubber[J]. Journal of Elastomers & Plastics, 2022, 54(1): 123-144. DOI: 10.1177/00952443211020794.
- [18] GE J L, HOU X Y, LIU L, et al. Comprehensive identification and ubiquitous occurrence of eight classes of rubber-derived vulcanization accelerators in urban dusts[J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(11): 5117-5128. DOI: 10.1021/acs.est.3c09920.
- [19] 王茹林, 李秋小, 蒋素萍. 长链烷基醇醚三甲基氯化铵的制备[J]. 日用化学工业, 1995, 25(2): 47-48.
- [20] 中国石油和化学工业协会. 硫化橡胶或热塑性橡胶 压入硬度试验方法 第1部分: 邵氏硬度计法; GB/T 531.1—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 中国石油和化学工业协会. 硫化橡胶或热塑性橡胶 拉伸应力应变性能的测定; GB/T 528—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 硫化橡胶或热塑性橡胶: 撕裂强度的测定(裤形、直角形和新月形试样); GB/T 529—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 橡胶 用无转子硫化仪测定硫化特性; GB/T 16584—1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [24] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 未硫化橡胶 用圆盘剪切黏度计进行测定 第1部分: 门尼黏度的测定; GB/T 1232.1—2016. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 微米级长度的扫描电镜测量方法通则; GB/T 16594—2008. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [26] 王忠超. 丁腈橡胶性能影响因素研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2012.
- [27] 杨宏伟, 易玉琼, 张野, 等. 环保型促进剂 ZBEC-70 在 EPDM 汽车密封条胶料中的应用[J]. 中国橡胶, 2020, 36(4): 43-46.
- [28] 徐洽松. 橡胶硫化促进剂选配技术[J]. 橡胶科技, 2023, 21(5): 226-231.
- [29] 蒋利辉, 张冰华, 张朋飞, 等. 次磺酰胺促进剂对丁腈橡胶性能的影响[J]. 化学研究, 2024, 35(5): 438-442. DOI: 10.14002/j.hxya.2024.05.008.
- [30] 郭大双, 姚彬彬, 魏玉函, 等. 湿法混炼芳纶短纤维/丁腈橡胶复合材料的性能研究[J]. 橡胶工业, 2020, 67(9): 683-686. DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2020.09.0683.
- [31] 付含琦, 吴宇, 赵洪国, 等. 快速硫化丁腈橡胶制备方法研究[J]. 广东化工, 2017, 44(10): 52-53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-1865.2017.10.024.
- [32] 胡又牧. 橡胶胶乳加工行为的特点[J]. 合成橡胶工业, 1988, 11(5): 417-422.
- [33] 艾罡. 环保硫化体系对天然胶乳硫化及其性能的影响[J]. 橡塑技术与装备, 2020, 46(3): 41-47. DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2020.03.008.
- [34] MAYASARI H E, SETYORINI I, YUNIARI A. The blending of EPDM/NR with maleic anhydride as compatibilizer: Comparing the effect of accelerators on cure characteristic and mechanical properties[J]. Indonesian Journal of Chemistry, 2019, 19(1): 106. DOI: 10.22146/ijc.27730.

