

摩擦学学报

TRIBOLOGY



盾构机主驱动用丁腈橡胶密封材料的加工、力学及耐磨性能研究

张彩霞, 王廷梅, 陈守兵, 张新瑞, 王齐华

Processing, Mechanics and Wear Resistance Performance of Nitrile Rubber Sealing Material for Main Drive of Shield Machine

ZHANG Caixia, WANG Tingmei, CHEN Shoubing, ZHANG Xinrui, WANG Qihua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2023209>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水介质中丁腈橡胶溶胀机理及其对磨粒磨损行为影响

Swelling Mechanism and its Effect on Abrasive Wear Behavior of Nitrile Rubber in Water Medium

摩擦学学报. 2021, 41(1): 56 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020039>

丁腈橡胶紫外线臭氧照射亲水改性及其水润滑性能研究

Hydrophilic Modification and Water Lubrication Performance of NBR Rubber UV/Ozone (UVO) Treatment

摩擦学学报. 2019, 39(4): 463 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2018197>

大环径比O形金属橡胶密封件的疲劳力学特性及试验研究

Fatigue Mechanical Characteristics and Experimental Study of O-Shaped Metal Rubber Seals with Large Ring Diameter Ratio

摩擦学学报. 2021, 41(3): 293 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2020138>

盾构滚刀刀圈材料的冲滑复合磨损性能研究

Impact-Sliding Composite Wear Properties of Shield Cutter Ring Material

摩擦学学报. 2022, 42(2): 314 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2021012>

管道封堵机器人的大变形橡胶筒静态密封特性仿真与试验研究

Simulation and Experimental Research on Static Sealing Characteristics of Large Deformation Rubber Cylinder of Pipeline Plugging Robot

摩擦学学报. 2023, 43(9): 1034 <https://doi.org/10.16078/j.tribology.2022150>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张彩霞, 王廷梅, 陈守兵, 张新瑞, 王齐华. 盾构机主驱动用丁腈橡胶密封材料的加工、力学及耐磨性能研究[J]. 摩擦学学报(中英文), 2024, 44(12): 1730–1738. ZHANG Caixia, WANG Tingmei, CHEN Shoubing, ZHANG Xinrui, WANG Qihua. Processing, Mechanics and Wear Resistance Performance of Nitrile Rubber Sealing Material for Main Drive of Shield Machine[J]. Tribology, 2024, 44(12): 1730–1738. DOI: [10.16078/j.tribology.2023209](https://doi.org/10.16078/j.tribology.2023209)

盾构机主驱动用丁腈橡胶密封材料的加工、力学及耐磨性能研究

张彩霞, 王廷梅*, 陈守兵*, 张新瑞, 王齐华

(中国科学院兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 盾构机主驱动密封件是一种大型异形橡胶密封件, 橡胶材料的加工性能在其精细结构成型过程中发挥着举足轻重的作用, 而焦烧时间和门尼黏度是影响橡胶材料加工性能的关键因素. 针对盾构机主驱动橡胶密封件的成型工艺对丁腈橡胶(NBR)加工性能的要求, 本研究中以松明油、癸二酸二丁酯和固体古马隆树脂为原料, 合成复合增塑剂; 并使用高结构炭黑和低结构炭黑并用的补强体系, 对NBR密封材料进行加工性能、物理机械性能和摩擦性能的宏观调控. 结果表明: 由于复合增塑剂中三组分的协同作用, 当复合增塑体系中松明油的使用量为0.9 phr (parts per hundred parts of rubber, 每百份橡胶中组份的重量份数)时, 本研究中制备的高性能NBR密封材料, 不仅满足大型盾构机用异形密封圈的成型工艺要求, 混炼胶焦烧时间 T_{10} 可长达168.6 s, 门尼黏度值 $M_{L(1+4)}$ 可低至46.95; 还是1种兼具高强度、高韧性、高耐磨、高回复性与高耐热性的自润滑橡胶密封材料, 且该材料的耐磨性能已在盾构机主驱动模拟试验台中进行了验证, 可以满足盾构机主驱动系统对密封有效性和寿命的需求, 本研究可以为大型盾构机主驱动密封材料的设计制备提供支撑.

关键词: 丁腈橡胶; 盾构机主驱动密封; 焦烧时间; 门尼黏度; 密封材料

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0595(2024)12-1730-09

Processing, Mechanics and Wear Resistance Performance of Nitrile Rubber Sealing Material for Main Drive of Shield Machine

ZHANG Caixia, WANG Tingmei*, CHEN Shoubing*, ZHANG Xinrui, WANG Qihua

(Lanzhou Institute of Chemical Physics, State Key Laboratory of Solid Lubrication,
Chinese Academy of Sciences, Gansu Lanzhou 730000, China)

Abstract: Nitrile Butadiene Rubber (NBR) has polar nitrile group (-CN) and trans-1,4 structure in the molecular structure, with excellent oil resistance, heat resistance and wear resistance, widely used in aerospace, petrochemical, engineering machinery, pharmaceutical and vehicle equipment hydraulic seal, pneumatic seal and mechanical seal auxiliary sealing device. The severe working conditions of the main drive seal of large Shield Tunneling Machine are matched with the performance of NBR, and the wear resistance of NBR plays a crucial role in its sealing performance, and even directly determines the working life of the whole machine. The main drive seal material of Shield Tunneling

Received 7 October 2023, revised 6 December 2023, accepted 6 December 2023, available online 28 October 2024.

*Corresponding author. E-mail: tmwang@licp.cas.cn, Tel: +86-931-4968252; E-mail: chenshoubing@licp.cas.cn.

This project was supported by the National Key Research and Development Project (2020YFB2006900) and the CAS Project for Young Scientists in Basic Research (YSBR-023).

国家重点研发计划(2020YFB2006900)和中国科学院稳定支持基础研究领域青年团队计划项目(YSBR-023)资助.

Machine is a large special-shaped rubber seal, and the processing performance of rubber material plays an important role in its forming process its fine structure. The scorch time and Mooney viscosity are the key factors affecting the processing properties of rubber materials. According to the processing requirement of NBR for the main drive rubber seal of Shield Tunneling Machine, in this study, the compound plasticize was synthesized from pine tar, dibutyl sebacate and solid coumarone resin. The reinforcement system formed by high structure carbon black and low structure carbon black was used to control the processing performance, physical and mechanical properties and friction properties of NBR sealing materials. In this paper, the effects of different contents of pine oil in composite plasticizer on the processability, physical and mechanical properties and frictional properties of NBR composites were systematically studied. The results showed that pine oil could reduce the softening point of solid gumarone resin, and could effectively improve the elongation at break of rubber materials and enhance the flexibility of rubber materials due to the synergistic action of three components in the composite plasticizer. When the amount of pine oil used in the composite plasticizing system was 0.9 phr (parts per hundred parts of rubber), and the amount of high structure carbon black and low structure carbon black added in the reinforcing system was 45 phr and 15 phr, respectively, the high-performance NBR sealing material prepared in this study could not only meet the molding process requirements of special-shaped sealing ring for large shield tunneling machine, the scorch time T_{10} of the compound could be as long as 168.6 s, and the Mooney viscosity $M_{L(1+4)}$ could be as low as 46.95. It was also a self-lubricating rubber sealing material with high strength, high toughness, high-wearing feature, high recovery and high heat resistance. The tensile strength was as high as 22.51 MPa, while the elongation at break was 684.4%, the compression permanent deformation rate could be as low as 22.7% (100 °C, 25% compression rate, 24 h), and the Akron wear value was as low as 0.1 cm³/1.61 km. The wear resistance of the material was also verified in the simulation test bench of the main drive of the shield machine, which could meet the requirements of the main drive system for sealing effectiveness and life. This study could provide support for the design and preparation of the main drive sealing material of large shield tunneling machine.

Key words: NBR; main drive seal of shield tunneling machine; scorch time; Mooney viscosity; sealing material

我国盾构机整机研制能力已达到世界先进水平,但是影响盾构机整机可靠性和安全性的主驱动密封关键核心零部件几乎全部依赖进口,核心技术被欧美国家垄断,加之受愈演愈烈俄乌战争局势和复杂多变国际形势影响,加剧了对国内盾构机企业关键核心零部件的封锁制裁^[1-4].受制于关键零部件“卡脖子”问题,我国高端盾构机技术水平与国外仍存在较大差距,特别是国内缺乏高性能的主驱动橡胶密封件,表现在国产密封材料加工性能差,压变性和耐磨性不足,导致盾构机主驱动橡胶密封件长期依赖进口材料,严重制约了我国盾构机产业的高质量发展,危及盾构机产业安全^[5-10].

大型盾构机主驱动橡胶密封件直径可达7 m以上,其截面是1种VD型异形密封结构,橡胶材料的加工性能在其精细结构成型过程中发挥着举足轻重的作用,而焦烧时间和门尼黏度是影响橡胶材料加工性能的关键因素^[11].焦烧时间越短,加工过程中越容易发生橡胶早期硫化现象,导致密封件唇口精细结构处出现缺陷;门尼黏度反映橡胶加工性能的好坏和分子量高低及分布范围宽窄,黏度值高,表明橡胶分子量大,可塑性差.在大型盾构机用异形密封圈的成型过程中,通常要求密封材料门尼黏度 $M_{L(1+4)} < 50$,焦烧时间 $T_{10} > 150$ s.

针对大型盾构机主驱动橡胶密封的成型工艺对丁腈橡胶加工性能的要求,本研究中以松明油、癸二酸二丁酯和固体古马隆树脂为原料,合成复合增塑剂;并使用高结构炭黑(每100 g炭黑的邻苯二甲酸二丁酯吸收值不低于110 mL)和低结构炭黑(每100 g炭黑的邻苯二甲酸二丁酯吸收值不高于70 mL)并用的补强体系,对NBR密封材料进行加工性能、物理机械性能和摩擦性能的宏观调控,结果表明改性后的NBR在兼具良好力学性能和耐磨性能的同时,加工性能得到显著改善,研制的NBR混炼胶焦烧时间 T_{10} 可长达168.6 s,门尼黏度值 $M_{L(1+4)}$ 可低至46.95,满足了大型盾构机主驱动橡胶密封的成型工艺需求,可以推动国内盾构机主驱动密封用NBR复合材料的发展.

1 试验部分

1.1 原料

丁腈橡胶N21购买于中国石油兰州石化公司;炭黑N220购买于江西黑猫炭黑股份有限公司;槽法炭黑购买于山东德蓝化工有限公司;过氧化二异丙苯(DCP)购买于上海凯茵化工有限公司;古马隆树脂购买于濮阳市恒泰石油化工有限公司;松明油(Pine Tar)购买于衡水帝亿石油化工有限公司;氧化锌、硬脂酸、2-硫醇

基苯并咪唑、2,2,4-三甲基-1,2-二氢化喹啉、癸二酸二丁酯、四甲基秋兰姆二硫化物、硫磺和N,N'-间苯撑双马来酰亚胺均购买于阿拉丁生化科技股份有限公司。

1.2 材料组成

基本组成: NBR (兰化 N21)100份, 氧化锌5份, 硬脂酸1份, 炭黑N220 45份, 槽法炭黑15份, 2-硫醇基苯并咪唑2.5份, 2,2,4-三甲基-1,2-二氢化喹啉1份, 古马隆树脂5份, 癸二酸二丁酯2份, 四甲基秋兰姆二硫化物1.5份, 硫磺1份, 过氧化二异丙苯2.5份, N,N'-间苯撑双马来酰亚胺1份。改变松明油加入量, 不同松明油(Pine ar)含量的橡胶材料样品编号列于表1中。

表1 不同松明油使用量的丁腈橡胶配方设计
Table 1 Formulation design of NBR with different amount of pine tar

Sample	Content of pine tar/phr (weight parts per hundred parts of rubber)
1 [#]	0.0
2 [#]	0.3
3 [#]	0.6
4 [#]	0.9
5 [#]	1.2

1.3 NBR硫化胶的制备

首先将烧杯放置在加热炉上, 预热至50~80 °C; 加入固体古马隆树脂, 升温至100 °C使其熔化, 然后再加入松明油和癸二酸二丁酯, 搅拌直至三组份分散均匀; 将加热炉缓慢升温到120 °C, 搅拌10~20 min后停止搅拌, 将混合液体放置在室温下自然冷却至室温, 得到粒状三组份复合增塑剂。

将密炼机预热至40 °C后投入NBR生胶进行塑炼至生胶包辊, 然后向密炼机依次投入三组份复合增塑剂、氧化锌、硬脂酸、炭黑N220、槽法炭黑、2-硫醇基苯并咪唑和2,2,4-三甲基-1,2-二氢化喹啉, 混炼20 min, 将所述混炼后的橡胶从密炼机中取出, 在室温条件下静置24 h, 得到丁腈橡胶混炼胶。将得到的混炼橡胶置于开炼机中, 依次加入硫磺、四甲基秋兰姆二硫化物、过氧化二异丙苯和N,N'-间苯撑双马来酰亚胺, 经打三角包3次和打卷3次后出片, 橡胶片在室温条件下静置24 h, 得到混炼胶压延片。将混炼胶压延片置入相应的模具, 放入平板硫化机, 在160 °C和8 MPa条件下硫化, 硫化时间为20 min, 得到NBR硫化胶。

1.4 性能测试

硫化参数测试按照GB/T 1233-2008, 采用橡胶加工分析仪(RPA, RPA 2000型, 美国 Alpha 科技有限公司)进行测定, 设置测试压力为10 MPa, 角度为±0.5°。

门尼黏度按照 GB/T1232.1-2000, 采用门尼黏度仪(MV, MV 2000型, 美国Alpha科技有限公司)进行测试, 设置其测试时间为4 min, 预热时间为1 min, 温度为100 °C。

硬度按照GB/T 531. 1-2008, 采用邵氏A型硬度计进行测试, 样品的尺寸为50 mm×50 mm×6 mm。

拉伸性能按照GB/T 528-2009中的1型试样, 采用万能电子拉伸试验机(Shimadzu, AD-X, 5 kN)进行测试, 拉伸速率为500 mm/min。

压缩永久变形按照 GB/T 7759.1-2015中的方法进行测定, 设置温度为100 °C, 保温时间为24 h。

耐磨性能即阿克隆磨耗按照GB/T 1689-2014, 采用高温阿克隆磨耗试验机(GT-7012-AH1)进行测试。

摩擦系数按照GB/T 12444-2006, 采用高速环块摩擦磨损试验机(MR-H3B型)进行测试, 测试条件为载荷132 N, 转速70 r/min, 样品尺寸为12.32 mm×12.32 mm×19.05 mm, 金属对偶为Φ49.22 mm×13.06 mm尺寸及304不锈钢材质。

2 结果与讨论

2.1 硫化参数和门尼黏度

采用橡胶加工分析仪(RPA 2000)以及门尼黏度仪(MV 2000)测试了NBR混炼胶的硫化参数和门尼黏度, 如图1所示。NBR混炼胶硫化参数的测试结果列于表2中, 由表2可看出, 当NBR复合增塑剂中的松明油使用量少于0.9 phr时, NBR的焦烧时间 T_{10} 和门尼黏度 $M_{L(1+4)}$ 呈现出显著的线性相关性, 其中当松明油使用量由0 phr增加到0.9 phr时, T_{10} 由130.2 s增加到168.6 s, $M_{L(1+4)}$ 由85.55降低到46.95。图2所示为不同硫化参数的混炼胶加工成盾构机主驱动用VD密封圈唇口图片, 由图2可以看出, 1[#]NBR密封件唇口处有明显缺陷, 而4[#]NBR密封件唇口处平整饱满, 4[#]相比于1[#], 由于焦烧时间的延长和门尼黏度的降低, 加工性能得到显著提升, 能够满足主驱动VD型橡胶密封件唇口处精细结构的完整成型对橡胶材料加工性能的要求。这主要是因为, 在本研究中合成的三组份复合增塑剂中癸二酸二丁酯对古马隆树脂主体能够发挥溶胀作用, 可以增加古马隆树脂中分子的自由体积, 增强其分子链段的运动能力, 提高橡胶加工时的柔韧性; 同时黏稠的松明油中吸附的萜烯类物质可作为再生剂, 其间的活性小分子能均匀渗透到古马隆树脂分子中间, 使其溶胀, 增加分子间的距离及氧的渗透, 反应作用机理如图3所示, 因此, 三组份复合增塑剂在橡胶体系中

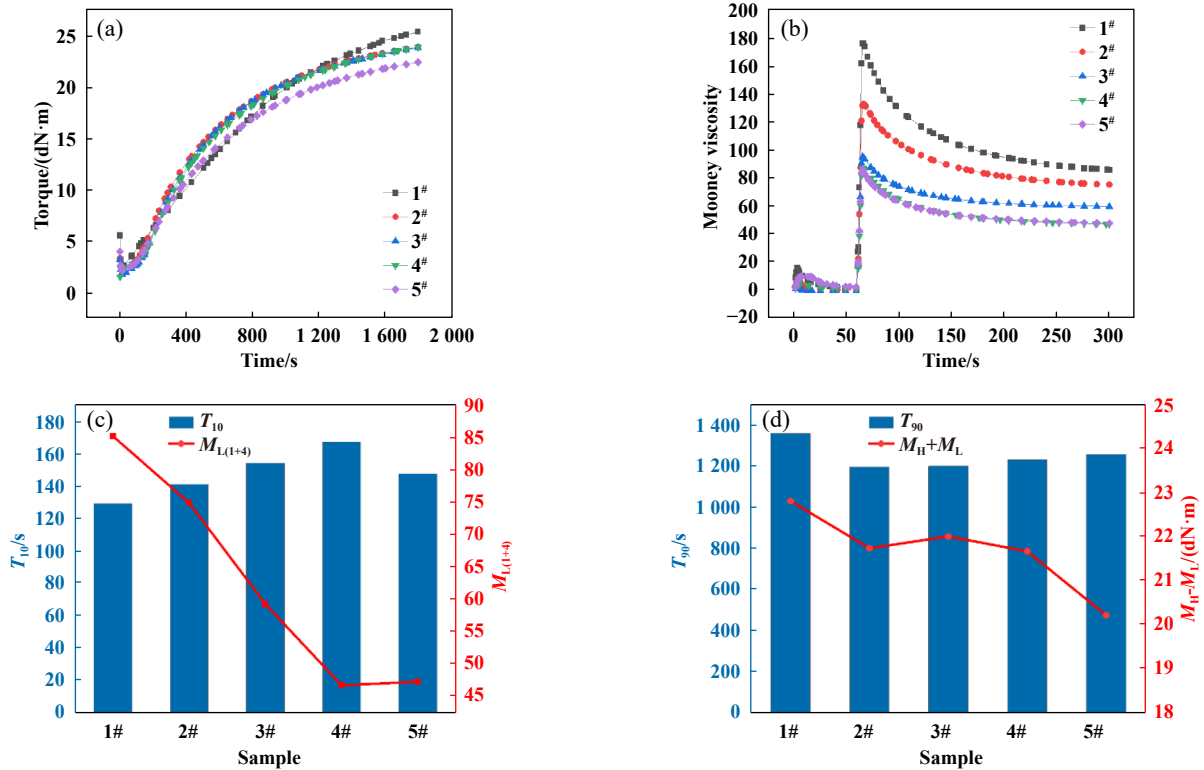


Fig. 1 Curing parameters and Mooney viscosity of NBR: (a) vulcanization curve of NBR; (b) Mooney viscosity curve of NBR; (c) effect of pine tar additive on T_{10} and $M_{L(1+4)}$; (d) effect of pine tar additive on T_{90} and $(M_H - M_L)$

图 1 丁腈橡胶的硫化参数和门尼黏度: (a) 丁腈橡胶的硫化曲线; (b) 丁腈橡胶的门尼黏度; (c) 松明油使用量对 T_{10} 和 $M_{L(1+4)}$ 的影响; (d) 松明油使用量对 T_{90} 和 $(M_H - M_L)$ 的影响

表 2 不同松明油使用量丁腈橡胶的硫化参数
Table 2 Curing parameters of NBR with different pine tar content

Sample	T_{10}/s	T_{90}/s	$M_H/(dN \cdot m)$	$M_L/(dN \cdot m)$	$M_H - M_L/(dN \cdot m)$	$M_{L(1+4)}$
1#	130.2	1 366.8	25.43	2.59	22.84	85.55
2#	142.2	1 202.4	23.95	2.18	21.77	75.18
3#	155.4	1 206.6	23.89	1.85	22.04	59.53
4#	168.6	1 237.2	23.94	2.24	21.70	46.95
5#	148.8	1 263.6	22.48	2.23	20.25	47.51

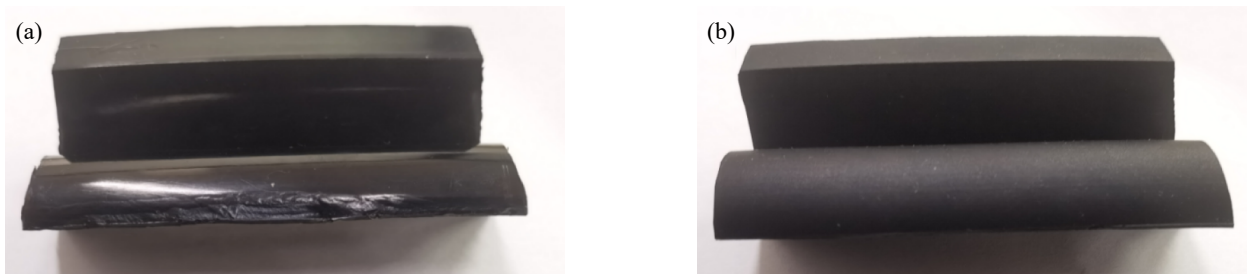


Fig. 2 Partial drawing of VD type NBR seal for shield tunneling machine: (a) 1# NBR; (b) 4# NBR

图 2 盾构机用 VD 型 NBR 密封件局部图: (a) 1# NBR; (b) 4# NBR

的分散性和溶解性较高, 制备的橡胶密封材料具有较长的焦烧时间和较低的门尼黏度。

此外, 橡胶体系中高结构炭黑和低结构炭黑并用,

在填充时产生了颗粒互补效应, 提高了胶料的分散度和分子链段的运动能力, 延长了胶料在硫化过程中的可流动时间, 即焦烧时间, 也能够进一步改善胶料的加工性能。

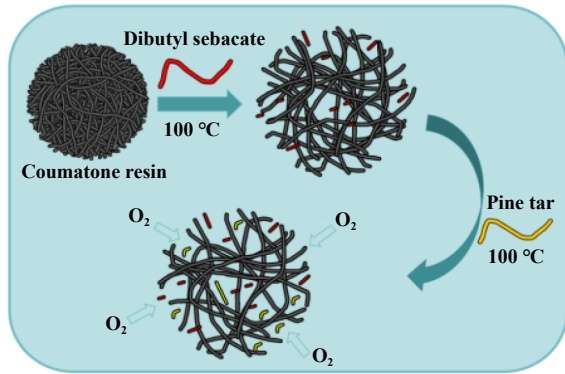


Fig. 3 Synthesis route and synergistic mechanism of composite plasticizer

图 3 复合增塑剂合成路线及协同作用的机理

2.2 力学性能

大型盾构机的主驱动密封工况严苛,为了防止密封泄露,要求橡胶密封材料能够承受较高的压强,因此,橡胶密封材料需具备优异的硬度、强度和回弹性.橡胶材料的拉伸应力应变曲线如图4(a)所示,其具体的物理机械性能参数列于表3中,本研究中不同配方的NBR拉伸强度均大于21 MPa,相比于进口主驱动橡胶密封件材料的拉伸强度(14 MPa),提升了50%以上.主要原因是,在本研究中NBR补强体系采用颗粒较小的高结构炭黑和颗粒较大低结构炭黑并用,2种不同结构

炭黑的颗粒之间在填充时发生互补,小的炭黑颗粒填充到了大的炭黑聚集体中间,且2种炭黑在分散过程中因表面活性不同促进了炭黑分散性,解决了炭黑容易聚集的难题,增大了炭黑与橡胶分子链之间的微观接触面积,提升了炭黑的补强效果,提高了橡胶材料的强度^[12-13].

在一定范围内,复合增塑剂中松明油的使用量对NBR强度[图4(a)]和压缩永久变形[图4(b)]影响较小,但随复合增塑剂中松明油的使用量由0 phr增加到1.2 phr, NBR硬度降低了9.5%[图4(b)],拉断伸长率增长了59.3%.这是因为松明油中含有的有机酸基团,能够降低橡胶分子链间的作用力,提高胶料的黏着性.此外,古马隆树脂虽然与橡胶的相容性良好,但因其软化点较高,在开炼机和密炼机中都难分散均匀,本研究中将古马隆树脂、松明油和癸二酸二丁酯预先混合制备成三组份复合增塑剂,能够有效降低古马隆树脂的软化点,既保持了三组份原有功能特性,同时又解决了古马隆软化点较高难分散均匀,松明油和癸二酸二丁酯配料困难等问题.

2.3 耐磨性能

橡胶材料的耐磨性能是影响盾构机主驱动密封系统寿命和可靠性的关键因素^[14-19].本研究中通过摩擦系数、磨损率和不同温度下的阿克隆磨耗量和磨损形

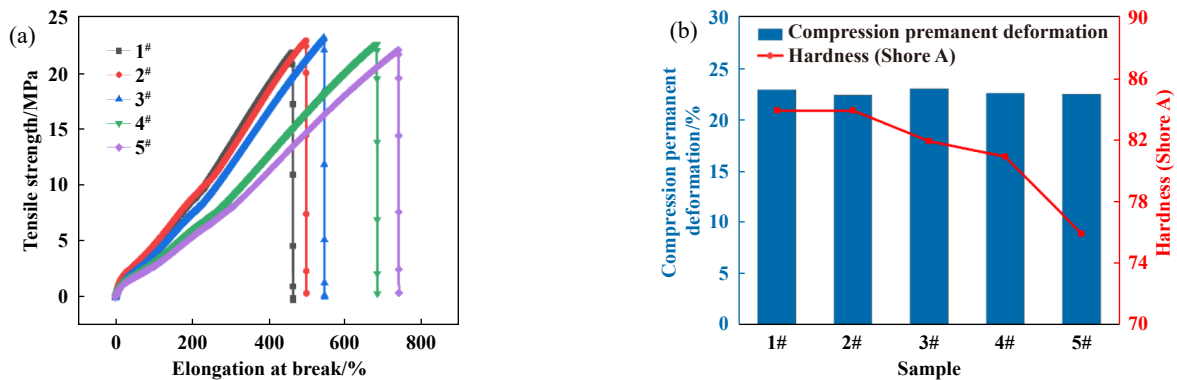


Fig. 4 Physical and mechanical properties of NBR: (a) stress-strain curve of NBR; (b) effect of pine tar additive on hardness (Shore A) and compression permanent deformation

图 4 丁腈橡胶的物理机械性能:(a)丁腈橡胶的应力应变曲线;(b)松明油使用量对硬度(邵A)和压缩永久变形的影响

表 3 不同松明油使用量丁腈橡胶的物理机械性能

Table 3 Physical and mechanical properties of NBR with different pine tar content

Samples	Hardness (Shore A)	Tensile strength/MPa	Elongation at break/%	Compression permanent deformation/%
1#	84	21.77	464.800	23.0
2#	84	22.83	499.000	22.5
3#	82	23.07	546.350	23.1
4#	81	22.51	684.368	22.7
5#	76	21.98	740.563	22.6

貌对比分析了三组份复合增塑剂中不同松明油使用量对NBR耐磨性能的影响。图5(a)所示为不同含量松明油改性NBR的摩擦系数随时间的变化关系图,图5(b)所示为不同配方NBR的摩擦系数和磨损率,随着复合增塑剂中松明油含量的增加,NBR的摩擦系数和磨损率均先降低再升高,在132 N和70 r/min的条件下,与无松明油添加的1#相比,4#的摩擦系数从0.770降低至0.655,降低了14.9%;4#的磨损率从 $1.6 \times 10^{-7} \text{ cm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 降低至 $6.8 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$,降低了57.6%,但当松明油添加量超过0.9 phr时,NBR的摩擦系数和磨损率均大幅度上升。采用SEM对NBR样品磨损表面微观形貌进行分析,如图6所示,1#和2#摩擦接触表面在交变接触压应力的作用下,循环应力的应力幅超过材料的弹性极限,导致材料表面因疲劳损伤而引起磨损,出现裂纹;当复合增塑剂中松明油添加量在0.6~0.9 phr时,样品表面只有轻微磨痕,无明显磨损,耐磨性能较好;当复合增塑剂中松明油添加量超过0.9 phr时,古马隆树脂在松明油和癸二酸二丁酯的协同作用下,软化点过低,导致胶料的黏着性过高,在摩擦力作用下2个相对滑动的摩擦表面发生塑性变形,橡胶表面和对偶表面发生黏着,橡胶表面因强度较低发生剪切破坏,耐磨性能变差。

在盾构机实际运行工况中,NBR密封材料的工作环境温度可高达90 °C,因此本研究中开展了不同温度下的阿克隆磨耗试验,研究了不同温度以及极限温度环境对NBR摩擦磨损性能的影响。图7所示为不同温度下NBR阿克隆磨耗量的变化趋势,阿克隆磨耗量列于表4中,可以看出,相比于室温条件下NBR的阿克隆磨耗量,60 °C时NBR的阿克隆磨耗量增幅很小,仅约1%;在90 °C时,NBR的阿克隆磨耗量相比于室温NBR的阿克隆磨耗增长率约9%,在室温~90 °C的温度范围内,5种配方NBR的阿克隆磨耗量较平稳,说明材

料的耐热性能好,化学稳定性高。其中4#样品在不同温度下的阿克隆磨耗量皆最小,图8所示为4#样品在不同温度下阿克隆磨耗试验后形貌的SEM照片,可以看出:在室温~90 °C时,4#样品表面无明显磨损,耐磨性能较好,这主要是因为,在本研究中合成的三组份复合增塑剂中,松明油中含有的松节油是1种天然精油,是以萜烯为主的多种萜烯类的混合物,有特有的化学活性,其间的活性小分子能均匀渗透到古马隆树脂分子中间,使其溶胀,增加分子间的距离及氧的渗透,在摩擦过程中能够在硫化胶表面形成润滑膜而产生自润滑效果;但当松明油的使用量超过0.9 phr时,在硫化的高温条件下和古马隆树脂分子黏附在一起,使得橡胶分子无法分散均匀,并且会在橡胶分子表面变成黏流态,摩擦表面由于黏附作用使材料堆积变形发生黏着磨损,耐磨性能变差,磨耗量增加。

本研究中开发的NBR密封材料已经制备成密封件,在盾构机主驱动密封试验台上开展了模拟密封工况下(密封最大压力:1.0 MPa;密封最大压差:0.1 MPa;主驱动轴最大线速度:3.0 m/s;轴径:2.0 m;密封介质:HBW黑油、EP2黄油和320齿轮油)的密封性能考核,考核结果表明NBR密封件能够实现盾构机运行工况下的有效密封,可以满足盾构机掘进长度大于4 km和等效工作天数大于400天的密封寿命要求。研制的NBR密封材料能够满足目前国内大型盾构机对主驱动密封件的需求。

3 结论

a. 以古马隆树脂、癸二酸二丁酯和松明油制备的复合增塑剂在橡胶体系中的分散性和溶解性较高,制备的NBR橡胶密封材料具有较长的焦烧时间和较低的门尼黏度,加工性能优异。

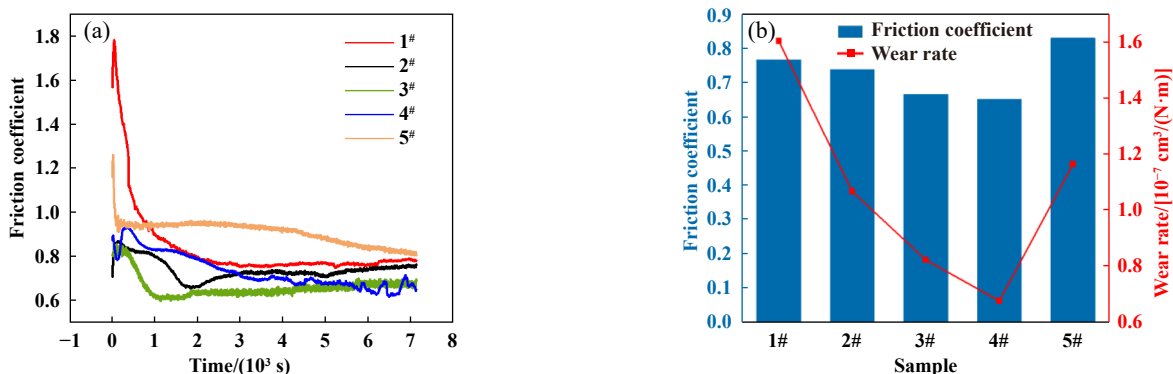


Fig. 5 Abrasion resistance of NBR: (a) ring friction test curve of NBR; (b) friction coefficient and wear rate of NBR

图 5 丁腈橡胶的耐磨性能:(a)丁腈橡胶的环块摩擦试验曲线;(b)丁腈橡胶的摩擦系数和磨损率

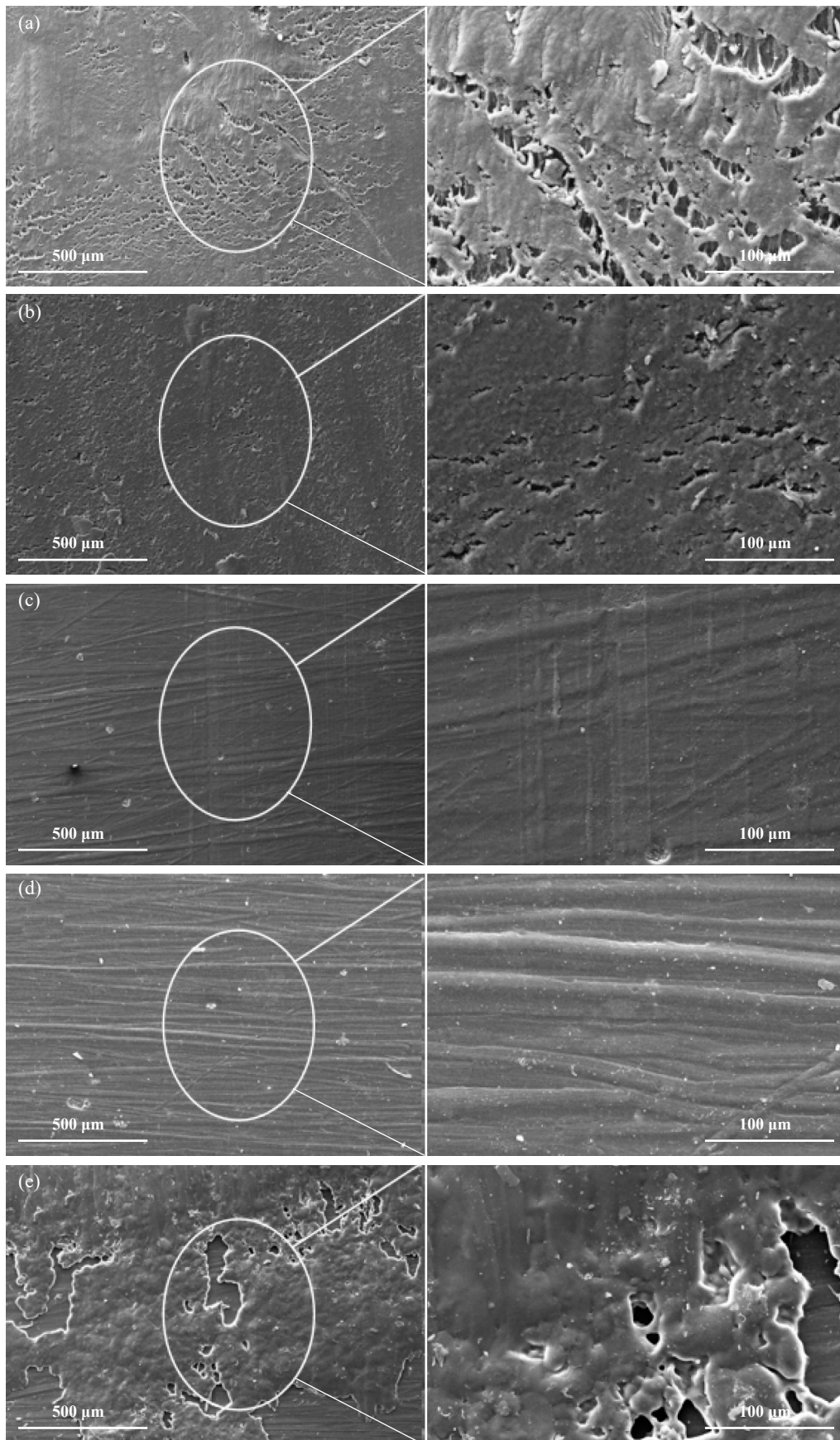


Fig. 6 SEM micrographs of wear morphology of ring blocks with different formulations of NBR: (a) 1[#]; (b) 2[#]; (c) 3[#]; (d) 4[#]; (e) 5[#]

图 6 不同配方丁腈橡胶的环块磨损形貌的SEM照片:(a) 1[#]; (b) 2[#]; (c) 3[#]; (d) 4[#]; (e) 5[#]

表 4 不同温度下NBR的阿克隆磨耗量
Table 4 Akron wear value of NBR at different temperatures

Samples	Akron wear value of NBR/(cm ³ /1.61 km)		
	Room temperature	60 °C	90 °C
1 [#]	0.116 1	0.116 3	0.121 3
2 [#]	0.114 0	0.114 9	0.120 7
3 [#]	0.110 8	0.110 9	0.120 2
4 [#]	0.107 1	0.109 1	0.117 6
5 [#]	0.116 5	0.117 4	0.126 8

b. 松明油能降低固体古马隆树脂的软化点, 通过复合增塑剂中三组分的协同作用, 能够有效提高橡胶材料的拉断伸长率, 增强橡胶材料的柔韧性.

c. 复合增塑体系中加入0.9 phr松明油时, NBR弹性的摩擦系数和阿克隆磨耗量低, 耐磨性能优异, 且该材料的耐磨性能在盾构机主驱动模拟试验台中也进行了验证, 可以满足盾构机主驱动系统对密封有效性和寿命的需求.

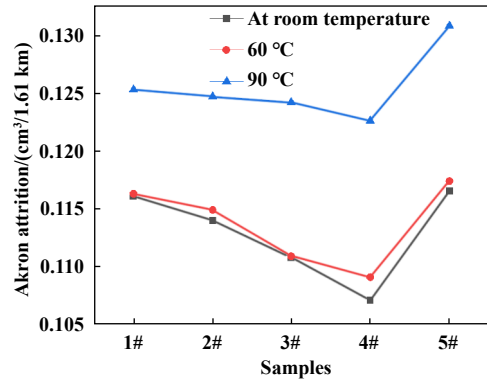


Fig. 7 Change trend of NBR Akron attrition at different temperatures

图 7 不同温度下NBR阿克隆磨耗量的变化趋势

d. 本文中制备的高性能NBR密封材料, 在兼具高强度、高韧性、高回复性、高耐热与高耐磨性的基础上, 还满足大型盾构机的成型工艺要求, 为大型盾构机主驱动密封的设计制备提供材料支撑.

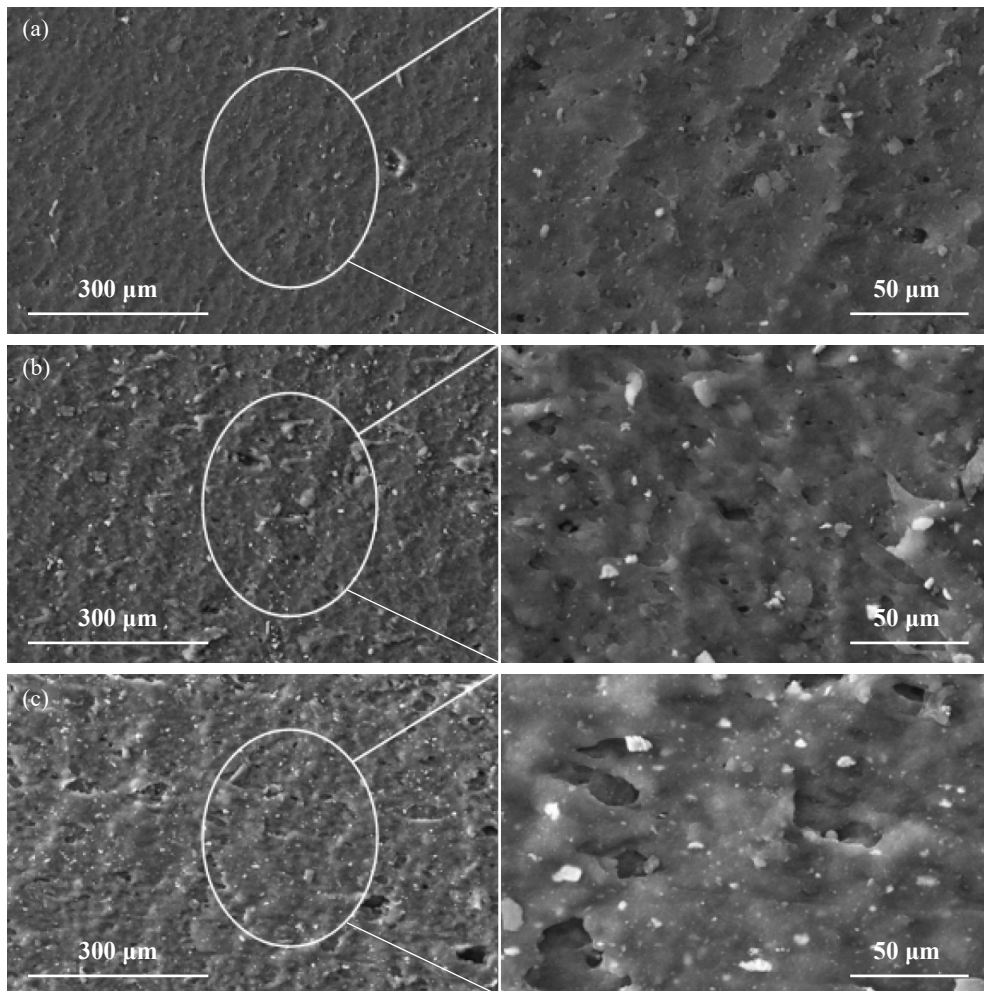


Fig. 8 SEM micrographs of Akron wear morphology of 4[#] at different temperatures: (a) room temperature; (b) 60 °C; (c) 90 °C

图 8 4[#]样品在不同温度下的阿克隆磨耗试验磨损形貌的SEM照片: (a)室温; (b) 60 °C; (c) 90 °C

参考文献

- [1] Zhangtuo, Mu Liye. Study on main driving seal system of shield machine[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(25): 19, 21 (in Chinese) [张拓, 穆立烨. 盾构机主驱动密封系统研究[J]. 科技创新导报, 2018, 15(25): 19, 21]. doi: CNKI:SUN:ZXDB.0.2018-25-011.
- [2] Cao Xiangqing. The method and control points of dealing with the main driving sealing of shield tunneling in the tunnel under atmospheric pressure[J]. Construction & Design for Engineering, 2018(20): 144-145, 164 (in Chinese) [曹向清. 隧道内常压处理盾构机主驱动密封及管控要点[J]. 工程建设与设计, 2018(20): 144-145, 164]. doi: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2018.10.263.
- [3] Gao Huizhong, Chen Kui, Zhang Bing, et al. Study on the key technology of shield main drive hydraulic control system[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2016, 36(11): 64-68 (in Chinese) [高会中, 陈馈, 张兵, 等. 盾构机主驱动液压控制系统关键技术研究[J]. 液气气动与密封, 2016, 36(11): 64-68]. doi: 10.3969/j.issn.1008-0813.2016.11.019.
- [4] Luo Xingchen. Development trend and application of tunnel shield machine technology at home and abroad[J]. Technology Innovation and Application, 2016(12): 65-66 (in Chinese) [罗星臣. 国内外隧道盾构机技术发展趋势与应用[J]. 科技创新与应用, 2016(12): 65-66]. doi: CNKI:SUN:CXY.0.2016-12-051.
- [5] Li Runjun, Shan Renliang, Li Runsheng, et al. Key technology of shield machine main drive sealing[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2014, 34(5): 579-584 (in Chinese) [李润军, 单仁亮, 李润圣, 等. 盾构机主驱动密封维修改造关键技术[J]. 西安科技大学学报, 2014, 34(5): 579-584]. doi: 10.13800/j.cnki.xakjdx.2014.0513.
- [6] Duan Wenjun, Zhang Mengqi, Gou Bin, et al. Influence of cross-section profile on wear behavior of TBM cutters in hard rock stratum[J]. Tribology, 2023, 43(7): 738-749 (in Chinese) [段文军, 张蒙祺, 勾斌, 等. 刃形对硬岩地层中TBM滚刀磨损行为的影响研究[J]. 摩擦学学报, 2023, 43(7): 738-749]. doi: 10.16078/j.tribology.2022102.
- [7] Zhang Huaguang. Leakage fault treatment for the main bearing sealing system of a shield machine[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(4): 216-220 (in Chinese) [张华光. 某盾构机主轴承密封系统泄漏故障处理浅析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(4): 216-220]. doi: 10.13807/j.cnki.mtt.2018.04.030.
- [8] Zhang Jingjian, Fu Bingjun. Advances in tunnel boring machine application in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(2): 226-238 (in Chinese) [张镜剑, 傅冰骏. 隧道掘进机在我国应用的进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 226-238]. doi: 10.3321/j.issn:1000-6915.2007.02.002.
- [9] Yang Huayong, Gong Guofang. Shield TBM and its applications of hydraulic technology[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2004, 24(1): 27-29 (in Chinese) [杨华勇, 龚国芳. 盾构掘进机及其液压技术的应用[J]. 液气气动与密封, 2004, 24(1): 27-29]. doi: 10.3969/j.issn.1008-0813.2004.01.008.
- [10] Qian Qihu, Li Chaofu, Fu Deming. The present and prospect of application of tunneling in China's underground engineering[J]. Underground Space, 2002(1): 1-11, 93 (in Chinese) [钱七虎, 李朝甫, 傅德明. 隧道掘进机在中国地下工程中应用现状及前景展望[J]. 地下空间, 2002(1): 1-11, 93]. doi: 10.3969/j.issn.1673-0836.2002.01.001.
- [11] Li Hua. Study on the scorch behavior of white carbon black reinforced polystyrene-butadiene rubber using a rubber processing analyzer[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2020, 46(1): 46-49 (in Chinese) [李华. 使用橡胶加工分析仪来研究白炭黑补强溶聚丁苯胶料的焦烧行为[J]. 橡塑技术与装备, 2020, 46(1): 46-49]. doi: 10.13520/j.cnki.rpte.2020.01.009.
- [12] Li Changji. Study on the dispersion and performance of SBR1712Filled with different carbon black doped with[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012 (in Chinese) [李长继. 不同炭黑并用在SBR1712橡胶中分散及性能影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012].
- [13] Li Hantang. Essence of carbon black reinforced rubber[J]. World Rubber Industry, 2016, 43(12): 1-8 (in Chinese) [李汉堂. 炭黑补强橡胶的本质[J]. 世界橡胶工业, 2016, 43(12): 1-8]. doi: 10.3969/j.issn.1671-8232.2016.12.001.
- [14] Liang Y R, Yang H X, Tan Y J, et al. Mechanical and tribological properties of nitrile rubber filled with modified molybdenum disulphide[J]. Plastics, Rubber and Composites, 2016, 45(6): 247-252. doi: 10.1080/14658011.2016.1178968.
- [15] Song Shuyuan, Wang Shijie, Nie Rui, et al. Swelling mechanism and its effect on abrasive wear behavior of nitrile rubber in water medium[J]. Tribology, 2021, 41(1): 56-64 (in Chinese) [宋淑媛, 王世杰, 聂瑞, 等. 水介质中丁腈橡胶溶胀机理及其对磨粒磨损行为影响[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(1): 56-64]. doi: 10.16078/j.tribology.2020039.
- [16] Li Yunlong, Wang Shijie, Wang Quan, et al. Molecular dynamics simulations of tribology properties of NBR (Nitrile-Butadiene Rubber)/carbon nanotube composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2016, 97: 62-67. doi: 10.1016/j.compositesb.2016.04.053.
- [17] Zhou Xincong, Yang Chaozhen, Huang Jian, et al. Tribological behavior of nano-modified NBR materials in sand water-lubricated conditions[J]. Tribology, 2021, 41(4): 564-571 (in Chinese) [周新聪, 杨超振, 黄健, 等. 沙水润滑下纳米改性NBR材料的摩擦学性能[J]. 摩擦学学报, 2021, 41(4): 564-571]. doi: 10.16078/j.tribology.2020196.
- [18] Szczypinski-Sala W, Lubas J. Tribological characteristic of a ring seal with graphite filler[J]. Materials, 2020, 13(2): 311. doi: 10.3390/ma13020311.
- [19] Shen Mingxue, Li Bo, Rong Kangjie, et al. Effect of abrasive size on tribological behavior of rubber sealing pair under water-lubricated conditions[J]. Tribology, 2020, 40(2): 252-259 (in Chinese) [沈明学, 李波, 容康杰, 等. 水润滑条件下磨粒尺寸对橡胶密封副摩擦学行为的影响[J]. 摩擦学学报, 2020, 40(2): 252-259]. doi: 10.16078/j.tribology.2019177.