

橡胶材料摩擦学理论及试验研究进展

黄海波¹, 沈明学²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 华东交通大学 材料科学与工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 橡胶高分子聚合物因其良好的物化和力学特性而被广泛应用于工业领域。本文首先综述了橡塑摩擦学的主要理论研究成果, 随后从改性、改形、磨粒磨损以及研究方法等方面介绍了近5年来橡塑试验摩擦学的一些研究进展, 最后对橡塑摩擦学可能聚焦的未来发展方向进行了展望。

关键词: 橡胶聚合物; 改性; 改形; 磨粒磨损

中图分类号: TH117.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 06-0001-08

高分子聚合物指由各类键重复链接而成的高分子量(通常可达 $10^4 \sim 10^6$) 化合物。橡胶和塑料(主要原料为树脂)就是典型的高分子聚合物, 是以合成或天然聚合物为主要成分, 辅以各类填料在一定温度和压力下加工成型的材料或制品。由于具有独特的物理化学特性以及制造工艺简单、成本低廉等优势, 高分子聚合物被广泛应用于汽车、航空航天、石油化工、工程机械等涉及界面接触的摩擦学应用领域中, 较为常见的高分子聚合物摩擦学部件有密封件、轮胎、轴承支架以及传送轮等。因此, 怎样保证摩擦部件的高可靠性和高稳定性一直是高分子聚合物摩擦学的研究热点。

高分子聚合物的特性与高分子的层次结构和运动方式以及加工工艺等密切相关, 虽然橡胶和树脂同属于高聚物, 但两者也会反映出一些独特的物性特点。橡胶是一类具有高黏弹性的聚合物, 界面接触滑擦运动时存在黏滑(stick-slip)趋势。相对橡胶来说, 树脂一般具有较高的硬度, 但同时也具有较好的自润滑性能。随着高端装备的发展, 对高分子聚合物的摩擦学性能也提出了越来越高的要求, 如聚合物零部件需要具有较好的耐磨性、耐热性、耐腐蚀性和抗老化性能等等。

本文将介绍橡塑摩擦学理论方面的一些研究成果。同时, 重点阐述高分子聚合物摩擦学在近5年的一些研究进展。

1 橡塑摩擦学理论

橡胶等高分子聚合物因具有高弹性、耐腐蚀性、抗渗性、中等应力松弛和蠕变性能、对接触表面具有良好的补偿性和耐磨性等优点, 被广泛用作流体机械中的软接触密封材料^[1-3]。关于橡塑摩擦的公认物理概念和理论大多在半个世纪前建立, 并被广泛用于解释橡塑材料的摩擦和磨损。橡塑摩擦的主要理论最初由 Schallamach^[4]建立, 并由 Grosch^[5]、Ludema 等^[6]进一步研究发展, Moore^[7]在他的编著中已经很好地总结了这些理论。上述理论很大程度上取决于橡胶材料的黏弹性假设, 例如使用 WLF 变换^[8]。Schallamach^[4]是最早报道橡胶摩擦力与温度和滑动速度关系的研究者之一, 他发现摩擦力随速度的增加略有增加, 随温度的降低而大幅增加, 试验得出的摩擦系数与温度的指数关系类似于液体黏性流动时流动性与温度的关系, 如图 1 所示。在运动过程中, 分子连续在基质上附着和分离, 橡胶链末端在滑动方向上在切向应力作用下有小幅跳跃, 这一点在 Bartenev 等^[9]的工作中有详细的讨论。Grosch^[5]扩展并准备了一个更大的数据集来证明橡胶摩擦对滑动速度和温度的依赖关系, 其中摩擦系数是在 $10^{-5} \sim 1 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的低滑动速度下测量的, 并作为温度的函数, 如图 2 所示。试验过程中他应用了 WLF 叠加概念, 获得

了在 20 °C 下 $10^{-8} \sim 10^8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 范围内摩擦系数和滑动速度之间独特的钟形主曲线, 如图 2 所示. 他假设主曲线上的一个峰值速度对应于一个 $\tan \delta$ 的峰值. Ludema 等^[6]也进行了类似的试验. 这些发现被报道后, 橡胶的摩擦行为由橡胶块本身的黏弹特性决定的概念在橡胶研究领域得到了广泛认可.

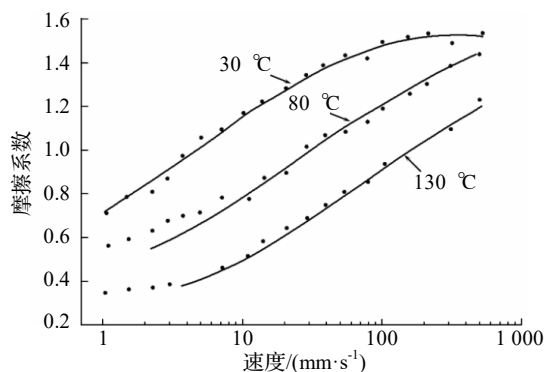


图 1 摩擦系数在恒温下随滑动速度演变的函数分布^[10]

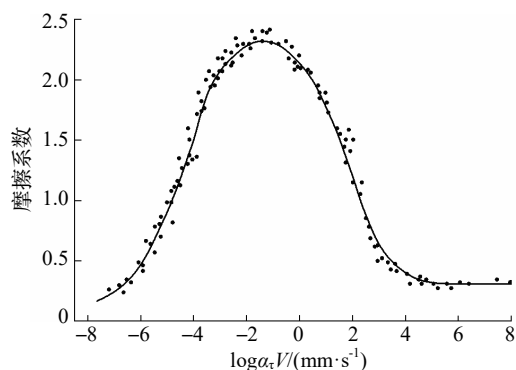


图 2 20 °C 下丁腈橡胶的摩擦系数随滑动速度演变的分布函数主曲线^[5]

在此基础上, Moore 提出了橡胶总摩擦系数的概念, 即 μ_{all} 由黏着组分 μ_{adh} 和形变组分 μ_{def} 之和得到, 即:

$$\mu_{\text{all}} = \mu_{\text{adh}} + \mu_{\text{def}} = \left[K'_1 \frac{E}{P^r} + K'_2 \left(\frac{P}{E} \right)^n \right] \tan \delta, \quad (1)$$

$$\mu_{\text{adh}} = K'_1 \left(\frac{E}{P^r} \right) \tan \delta, \quad (2)$$

$$\mu_{\text{def}} = \mu_{\text{hys}} = K'_3 \left(\frac{P}{E} \right)^n \tan \delta, \quad (3)$$

其中: K'_1 、 K'_2 、 K'_3 为恒量常数; E 为弹性模量; P 为法向压力; $\tan \delta$ 为损耗角正切, 又称损耗因子; μ_{hys} 对应于橡胶在接触刚性粗糙表面时形变所损失的滞后能量. 值得一提的是, 在方程(1~3)中 μ_{all} 、 μ_{adh} 、 μ_{def} 都可以表示为材料特性相关的函数.

近年来, Fukahori 等^[11]对总摩擦系数相关方程进行修正和改进, 考虑了橡胶滑移过程中花舌根部断裂的能量损失, 指出橡胶总摩擦系数由黏着组分 μ_{adh} 、形变组分 μ_{def} 和裂纹形成组分 μ_{crac} 组成, 修正方程如下:

$$\mu_{\text{all}} = \mu_{\text{adh}} + \mu_{\text{def}} + \mu_{\text{crac}} = K_1 \eta v \left[1 + K_2 \tan \delta / \sqrt{2} + \sqrt{2} K_3 c \right] E^{-7/6} W^{1/6}, \quad (4)$$

其中: K_e 为恒量常数; η 为未交联相的黏度; E 为交联相的弹性模量; v 为滑移速度; c 为裂纹长度; W 为法向载荷. 以上学者的数据为支撑, Moore 理论已成为橡塑摩擦最基本的概念, 至今仍被广泛接受.

2 橡塑摩擦学试验研究进展

改性和改形是摩擦学设计和试验研究的两种基本方法. 改性是指改变基体本身或表面材料的性质而达到减摩抗磨的目标. 改形一般是指对基体表面的结构进行处理从而达到提升摩擦学性能的目标. 橡塑磨粒磨损是造成高铁等密封件失效的重要机理, 本文也将重点介绍. 因此, 本文将从改性、改形、橡塑材料磨粒磨损和研究方法等方面来阐述橡塑摩擦学的试验研究进展.

2.1 改性

如前所述, 虽然橡胶和塑料都是典型的高分子聚合物, 由于不同的基材、填料和加工工艺, 不同品种的橡胶成品表现出的摩擦学性能也会有很大的差异. 虽然橡胶有着较好的物性特点, 但由于是高分子聚合而成, 因此不可避免地也存在耐磨性、耐热性、耐腐蚀性、耐老化性不强等诸多问题. 为改善这些性能, 填料在其中起到了非常关键的作用, 如历史上通过添加炭黑和硫等填料来增强橡胶基体的耐磨性和力学特性. 也就是说, 通过改变基体本身的材料性质来达到减摩抗磨的目标, 即改性.

改性一般通过试验进行研究, 通常通过调配不同比例的填料和配方比例或质量分数并采用合适的工艺制备出橡胶材料来探查其摩擦学特性. 这里又分为两种类型, 一种是增摩材料, 另一种是减摩材料. 增摩的一种方式是通过树脂与橡胶以及高性能填料混合来提高制动材料的摩擦系数、耐磨性和稳定性. 如将腰果壳油改性酚醛树脂(CPR)与丁腈橡胶(NR)按一定比例混合, 再配以 MoS_2 、

石墨、 Al_2O_3 等经特殊工艺制备而成的高性能填料,通过干法热压成型工艺可以获得不同硬度、冲击强度、摩擦系数与比磨损率的聚合物增摩制动材料^[12]。减摩的一种方法是通过加入润滑性能较好的树脂填料来改善材料的摩擦学性能。一方面,树脂可以在摩擦热作用下在界面形成具有减摩作用的转移膜,另一方面也可以与基体结合增加接触面积,从而实现复合材料的减摩增寿。如超高分子量聚乙烯复合丁腈橡胶^[13],可以有效提高丁腈橡胶的抗磨损性能。这种方法较适合低速重载的工况^[14],复合橡胶的力学性能也有显著提高^[15]。另外,丙烯腈也可以提高水润滑丁腈橡胶的耐油性能,在高速下降低丁腈橡胶的摩擦系数^[16]。

金属化合物也是一种常用的金属氧化物增强填料,如纳米氧化锌^[17-18]能够活化整个胶料的硫化体系,使硫化胶的物化性能、耐热性、耐磨性和耐疲劳性都得到改善。二硫化钼也是一种重要的固体润滑剂,在与橡胶复合后二硫化钼可以改善橡胶材料的摩擦性能,特别适用于高温高压工况,但亦有研究显示其表面耐磨性提高不显著^[19]。

在橡胶中加入玻璃纤维微粉、玄武岩纤维等填料,可以有效提高橡胶高聚物的力学特性。通过将玻璃纤维微粉加入复合有聚四氟乙烯的橡胶密封材料中,可以调整材料的力学回弹量,降低磨损率,并且可以减轻黏着磨损的程度^[20]。改性玄武岩纤维^[21]则会促使聚醋酸乙烯酯在橡胶界面形成完整的摩擦膜,有助于稳定摩擦系数以及降低磨损率。

也有学者期望通过调控基体物性来实现摩擦系数的主动控制。其中一种思路^[22]是通过在橡胶基体中以羰基铁粉为填料制备橡胶基体,经过磁场强弱的调控来调整橡胶界面的摩擦系数。

碳纳米材料也是一种较为常用的增强填料。作用机理是当碳纳米材料填充到橡胶基体中并达到一定含量时,碳纳米材料将起到“网格骨架”作用,从而提高复合材料的致密性和硬度。常见的碳纳米材料有碳纳米管、多层石墨烯和纳米石墨等。碳纳米材料可以提高橡胶的抗磨耐磨性能,但不同维度的碳纳米填料对橡胶复合材料性能的影响迥异,其中三维结构纳米石墨的抗磨效果最优^[23],机理是三维纳米材料的颗粒与橡胶基体相互嵌入,能增加黏附力,减少界面的脱附现象。

鉴于橡胶的黏弹特性,填料在橡胶制备过程中的团聚问题一直是工业制备的难点。目前采用较多的方法是对填料进行预处理以达到较好的分散效果。如通过将填料表面改性,在表面枝接各类官能团,使官能团与橡胶分子链交联耦合来达到填料均匀分散在基体中的目的。周新聪教授团队^[24]以多巴胺改性的多壁碳纳米管为补强材料,解决了在丁腈橡胶中的团聚问题,为提高水润滑橡胶轴承的耐磨性和工业制备奠定了基础。采用 γ -巯丙基三乙氧基硅烷对碳化硅表面改性^[25],制备 NBR/SIC 复合材料,改性 SIC 用量为 5 份时复合材料综合性能达到最佳。碳纳米材料表面功能基团的特性也会对摩擦性能造成影响^[26]。相比较碳纳米管和羟基碳纳米管,羧基碳纳米管复合橡胶具有最佳的摩擦磨损性能,原因是改性后的 MWNT 在复合材料中分散均匀,提高了复合材料的耐磨性能。

另外,也可以通过表面改性处理来提高橡胶的摩擦学性能。对丁腈橡胶进行恰当时间的空气等离子体处理,可以增加含氧官能团的含量,使表面接触角减小,疏水性增强,提高橡胶基体的耐磨性^[27]。对丁腈橡胶表面进行氟化改性,可以使氟代替 C 和 H,在橡胶表面形成具有较高能量 C-F 键的氟类橡胶聚合物,使橡胶的力学性能提高,硬度增大,摩擦系数减小,从而可以大幅提高丁腈橡胶的摩擦学性能^[28]。

2.2 改形

改形通过改变基体表面结构,形成具有一定规律性的表面织构从而达到提升其摩擦学性能的目标。为了便于加工,一般基体表面的织构形状为圆形、三角形或方形。一方面,这些表面织构可以改变接触压力分布,另一方面也可以储存润滑介质或者磨粒,一定程度上减少界面磨损。如采用激光加工技术在橡胶试样表面加工出微坑织构^[29],在水润滑条件下可以一定程度上减小丁腈橡胶的摩擦系数,但效果与微凹坑深径比、面积占有率以及凹坑直径均有关系。再如,不同深度沟槽的阻尼件可以通过调控橡胶的剪切变形有效抑制其黏滑特性,在减少摩擦诱导振动和改善磨损状况方面展现更大的潜力^[30]。

除了在橡胶表面进行表面织构的设计外,在橡胶对磨件材料上进行表面织构设计^[31]来提高样

品的润湿性和摩擦学性能也是一种较为有效的方法,在水润滑条件下对磨件表面织构可起到明显的减摩降温作用,降低橡胶磨损率,从而提高系统界面的摩擦学特性^[32-33]。

2.3 磨粒磨损

摩擦即意味着相互接触的摩擦副发生相对运动,其难免致使表层材料不断被去除而脱落,造成物理磨损和化学磨损,进而导致摩擦副磨损失效。数据显示,矿采行业因摩擦磨损每年造成愈 21 亿欧元损失,其中 27% 的机械磨损部件亟待更换^[34]。暴露在研磨环境下的橡塑磨粒磨损失效被认为占比近半成^[35]。为了理解失效密封件的摩擦机理,人们重点研究了磨粒的质量浓度、颗粒锐利度、外加载荷与滑动速度等参数对摩擦副摩擦学性能的影响^[36-39]。例如,“颗粒尺寸效应”(图 3)已被指出是两体或三体磨损的重要特征^[40-41]。磨粒粒径对摩擦副摩擦磨损特性的影响研究表明,大尺寸磨粒比小尺寸磨粒的进攻性更强,对材料的去除和犁削效应更为显著^[42]。此外,高接触压力下的磨粒在摩擦过程中倾向于破碎,磨粒对摩擦副进行二次损伤,破碎小颗粒的滚动损伤行为尤为突出^[43-45]。

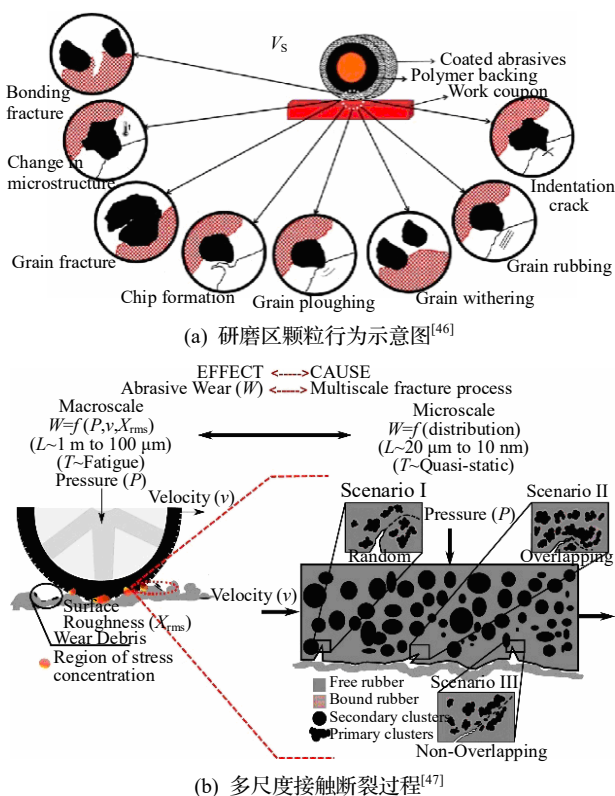


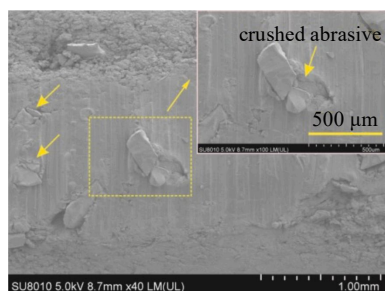
图3 摩擦界面的颗粒行为

根据 ASTM G65-00 标准,磨粒磨损试验最常用的测试结构是将试样加载在旋转的橡胶轮上,磨损颗粒通过漏斗或鱼嘴被带入接触区域。Mills 等^[48]指出,颗粒存在一个临界尺寸(50~60 μm),在临界尺寸之上,颗粒在摩擦界面产生滚动效应,在临界尺寸之下,微颗粒因高比表面积和表面能而趋于团聚,然后产生滑移效应。然而,颗粒大小对摩擦学行为的影响仍然存在争议。摩擦界面上粒子的出现被认为是降低摩擦的加速因素。Persson 等^[49]指出,当颗粒进入润滑介质时,混合液黏度升高,摩擦界面的润滑效果得到改善。类似现象也已在其他摩擦系统中被观察到,例如发动机燃烧室的活塞环和气缸壁之间的摩擦副^[50]。然而,也有学者报道,颗粒本身就可以改善润滑。Heshmat^[51]指出,硬质颗粒可以作为载油载体,其性能与润滑膜相似。Hichri 等^[52]还研究了干沉积颗粒对轮胎与路面摩擦的影响,发现摩擦行为与颗粒数量之间存在相关性,即颗粒越少,摩擦越大。Dong 等^[53]研究表明,水中的砂粒破坏摩擦副之间的润滑膜,加速了摩擦副的磨损,磨损机理以磨粒磨损为主。

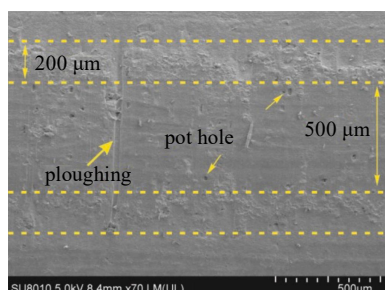
相似地,界面间的磨粒浓度是影响摩擦副摩擦学性能的又一重要指标。然而关于磨粒颗粒浓度的报道较少,且存在争议。例如,在水润滑条件下,石英砂颗粒之间的摩擦力较小,摩擦副材料的磨损较干燥条件下低得多^[54]。Dong 等^[53]还指出,随着砂粒浓度的增加,配副金属盘的磨损率和表面粗糙度持续增加,摩擦系数先缓慢增长然后迅速上升。然而,许多学者强调,磨粒浓度增加,摩擦系数会降低。Do 等^[55]模拟了污染物颗粒在干、湿污染路面上的沉积,评价了污染物颗粒对路面抗滑性能的影响。分析表明,高浓度的污染物颗粒会导致较低的摩擦系数。但部分学者认为,低摩擦系数是由于摩擦副之间的润滑介质所致,而不是由颗粒浓度所导致的^[56-57]。Shen 等^[58]系统讨论了水润滑条件下颗粒浓度的影响(图 4),磨粒具有较强的攻击性,阻碍了减摩水膜的形成,界面润滑效应被削弱。低磨粒浓度下的摩擦系数较小,且摩擦系数随磨粒浓度的增加而增大。

一般而言,磨粒粒径的变化引发磨损机理发生相应的转变,颗粒在界面诱发两体磨损到三体磨损再到滚动磨损。在不同的磨粒浓度和粒度下,

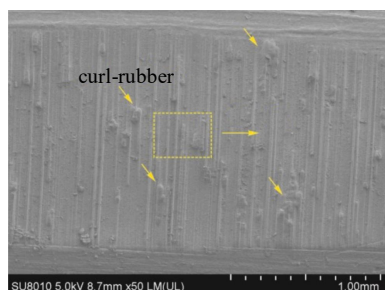
橡塑基体受到硬颗粒的冲击形式主要表现为钉扎、颗粒团聚嵌入和磨粒流冲蚀等。磨粒浓度也影响摩擦副的损伤行为, 一般高浓度下, 磨粒侵入摩擦副界面的概率升高, 易加剧磨粒磨损。



(a) 70 mesh, 0.5%



(b) 500 mesh, 2%



(c) 5 000 mesh, 1.5%

图4 不同磨蚀环境下 NBR 的磨损形貌 SEM 图片^[58]

2.4 研究方法

就研究方法来说, 聚合物摩擦磨损一般采用试验、有限元模拟和分子动力学模拟等方法。试验方法是研究聚合物摩擦磨损的主要方法, 有限元模拟主要用于聚合物在摩擦学行为中力学特性的模拟, 起到间接验证和机理说明的作用。近几十年来, 分子动力学已经成为在纳观领域计算材料性能的一种高效方法。由于 COMPASS 力场^[59]可以更准确地描述高聚物分子链之间的相互作用, 这也使橡胶分子动力学模型被广泛应用于探索橡胶材料的微观摩擦学特性。

橡胶分子动力学模型已经可以较好地模拟摩

擦、黏附、磨损^[60-61]和润滑膜^[62-63]等摩擦学行为。最近的研究探索了纳米材料的摩擦学性能, 例如碳纳米管^[64]和石墨烯^[65], 它们被用作橡胶的补强填充材料。Li 等通过引入石墨烯^[66]和碳纳米管^[67]作为增强材料和利用范德瓦耳斯力与橡胶基体连接, 降低了复合材料的平均摩擦系数, 提高了橡胶的力学和摩擦学性能。但是由于尺度效应, 利用宏观物理试验很难验证分子动力学模型, 因此分子动力学模型通常用纳米尺度的摩擦学变化趋势来解释宏观摩擦学的本质机理, 而不是试图在模拟结果和试验数据之间实现数值一致性。

2.5 其他研究

除上述研究外, 众多学者也在特殊工况下橡胶高分子材料的摩擦磨损机理方面做了很多工作。彭旭东研究组在橡胶热老化^[68]、张俊彦研究组在橡胶表面碳基薄膜耐磨改性^[69]、黄海波研究组在轮胎磨损颗粒产生机理及形性^[70-71]以及橡胶材料的分子动力学模拟^[72-73]等方面获得了诸多研究成果, 读者可以自行参阅。

3 研究展望

橡胶高分子材料的理论研究已经较为完善, 形成了较为系统的理论体系和理论框架。试验研究方面, 主要以通过添加各种类型的填料以及在表面构筑织构来改善橡胶基体的摩擦学性能, 提高摩擦和抗磨损特性, 分别应对高寒、高热、重载、高速等极端条件工况。然而, 尚未形成较好的理论体系用以指导试验的设计和开展, 机理研究仍然缺乏系统性。

摩擦和磨损均不是材料的固有特性, 对磨副材料和工况均对其摩擦学特性有较大的影响, 是一种材料的被动行为。因此, 建议未来可以聚焦以下几个方向开展研究: (1)适应极端条件的橡塑材料。橡塑材料的属性决定了其稳定性与金属材料有差距, 因此研究宽温域、超重载等极端条件下橡塑材料的摩擦学行为并进行改进和提高, 仍然是一个很大的挑战。(2)实现橡塑摩擦材料针对不同情况的摩擦性主动控制。高分子材料链间空间较大, 通过主动调控填料行为等方式实现分子链间行为和性质改变具有很高的可行性, 因此针对不同工况和对磨副材料发展主动控制可变摩擦系数

的高分子橡塑材料是未来的一个发展方向。(3)填料影响材料摩擦学行为的机理研究。通过填料改变高分子材料性质是改善材料摩擦学性能的一种常用方法,然而造成摩擦学性能改变的根本机理尚未进行系统化的研究和梳理,微观层面上的机理研究尚显不足,这方面的研究具有很大的提高空间。

参考文献:

- [1] Xuan L, Zhao J, Rui Y, et al. Effect of lubricating oil on thermal aging of nitrile rubber[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2018, 151:136-143.
- [2] Major Z. Morphology, mechanical, cross-linking, thermal, and tribological properties of nitrile and hydrogenated nitrile rubber/multi-walled carbon nanotubes composites prepared by melt compounding: The effect of acrylonitrile content and hydrogenation[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 257(2):565-573.
- [3] Degrange J M, Thomine M, Kapsa P, et al. Influence of viscoelasticity on the tribological behaviour of carbon black filled nitrile rubber (NBR) for lip seal application[J]. *Wear*, 2005, 259(1):684-692.
- [4] Schallamach A. Friction and abrasion of rubber[J]. *Wear*, 1958, 1(5):384-417.
- [5] Grosch K A. The relation between the friction and viscoelastic properties of rubber[J]. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1963, 274(1356):21-39.
- [6] Ludema K C, Tabor D. The friction and visco-elastic properties of polymeric solids[J]. *Wear*, 1966, 9(5):329-348.
- [7] Moore D F. *The Friction and Lubrication of Elastomers* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1972.
- [8] Williams M L, Landel R F, Ferry J D. The temperature dependence of relaxation mechanism in amorphous polymers and other glass forming liquid[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1955, 77(14):3701-3707.
- [9] Bartenev G M, El'kin A I. Friction properties of high elastic materials[J]. *Wear*, 1965, 8(1):8-21.
- [10] Edil T B, Bosscher P J. Engineering properties of tire chips and soil mixtures[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1994, 17(4):453-464.
- [11] Fukahori Y, Gabriel P, Liang H, et al. A new generalized philosophy and theory for rubber friction and wear[J]. *Wear*, 2019, 446/447:203166.
- [12] 龚乾江, 徐祥, 杨明, 等. CPR/NR 和高性能填料对复合摩擦材料力学性能的影响[J]. *材料导报 B: 研究篇*, 2018, 32(5):1628-1644.
- [13] 曹源. UHMWPE 改性水润滑橡胶轴承材料的制备及摩擦磨损性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [14] 秦红玲, 周新聪, 闫志敏, 等. Rubber/UHMWPE 复合尾轴承材料及其性能分析[J]. *兵器材料科学与工程*, 2014, 37(3):23-27.
- [15] Yan Z, Zhou X, Qin H, et al. Study on tribological and vibration performance of a new UHMWPE/graphite/NBR water lubricated bearing material[J]. *Wear*, 2015, 332/333: 872-878.
- [16] 裴高林, 王珊, 苏正涛, 等. 丙烯腈含量对水润滑丁腈橡胶摩擦性能的影响初探[J]. *弹性体*, 2020, 30(3):35-40.
- [17] 贾其苏, 滑婕, 周杨京, 等. 不同粒径氧化锌填充丁腈橡胶的摩擦磨损机制[J]. *合成橡胶工业*, 2020, 43(2): 100-106.
- [18] 张钊, 戴陈兵, 卢咏来. 植活式纳米氧化锌在天然橡胶中的应用研究[J]. *橡胶工业*, 2017, 64(4):213-218.
- [19] 王军, 周新聪, 周潇然, 等. 二硫化钼改性水润滑尾轴承摩擦磨损性能研究[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(4):42-52.
- [20] 魏刚, 魏莉岚, 谢强, 等. GF/MoS₂改性 PTFE 密封唇片材料的力学及摩擦学性能[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2020, 38(3):22-28.
- [21] 谢奥林, 尹彩流, 王秀飞, 等. 改性玄武岩纤维增强橡胶基摩擦材料的摩擦学性能[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(8):101-106.
- [22] Li R, Ren D, Wang X, et al. Tunable friction performance of magneto-rheological elastomer induced by external magnetic field[J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2018, 29(2):160-170.
- [23] 王超, 周新聪, 况福明, 等. 不同维度碳纳米材料对水润滑橡胶轴承摩擦磨损性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2020, 45(2):35-39.
- [24] 贾承贇. MWNT 补强水润滑橡胶轴承材料的制备及摩擦磨损性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- [25] 胡文博, 杜爱华. NBR/SiC 复合材料摩擦磨损性能的研究[J]. *特种橡胶制品*, 2021, 42(2):16-22.
- [26] 贾承贇, 周新聪, 王超, 等. 丁腈橡胶/碳纳米管复合轴承材料摩擦磨损性能研究[J]. *中国修船*, 2019, 32(5): 37-41.
- [27] 张兆想. 等离子体处理改性丁腈橡胶表面及其摩擦学性能研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
- [28] 韩珩, 王照洲, 陈肖飞. 丁腈橡胶表面氟化改性及其摩擦学性能研究[J]. *沈阳理工大学学报*, 2020, 39(6):69-87.
- [29] 王立辉, 韩智斌, 张秀丽, 等. 激光加工微织构对丁腈

- 橡胶水润滑性能的影响研究[J]. 机械制造, 2020, 53(11): 94-97.
- [30] 卢小东. 沟槽结构阻尼件对滑动摩擦系统动态行为的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [31] 李雪飞. 表面改性对水润滑轴承摩擦性能影响的研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020.
- [32] Zhang Q, Mo J L, Lu X D, et al. Grooved-structure design for improved component damping ability[J]. Tribology International, 2018, 123:50-60.
- [33] 孙亚彬. 表面织构化旋转油封密封性能与摩擦特性研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- [34] Holmberg K, Kivikytö-Reponen P, Härkisaari P, et al. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry[J]. Tribology International, 2017, 115: 116-139.
- [35] Karl-Heinz Z G. Microstructure and wear of materials[J]. Tribology, 1987, 10:554-560.
- [36] Zhang S W. Wet abrasion of polymers[J]. Wear, 1992, 158:1-13.
- [37] Zhang S W. Advances in studies on rubber abrasion[J]. Tribology International, 1989, 22:143-148.
- [38] Trezona R I, Hutchings I M. Three-body abrasive wear testing of soft materials[J]. Wear, 1999, 233/235:209-221.
- [39] 吕晓仁, 陈骥驰, 王世杰, 等. 丁腈橡胶三体湿磨粒磨损中砂粒运动的有限元分析[J]. 润滑与密封, 2016, 41(9):44-48; 68.
- [40] Pellegrin D, Torrance A A, Haran E. Wear mechanisms and scale effects in two-body abrasion[J]. Wear, 2009, 266:13-20.
- [41] Coronado J J. Abrasive size effect on friction coefficient of AISI 1045 steel and 6061-T6 aluminium alloy in two-body abrasive wear[J]. Tribology Letters, 2015, 60:40.
- [42] Shen M X, Dong F, Zhang Z X, et al. Effect of abrasive size on friction and wear characteristics of nitrile butadiene rubber (NBR) in two-body abrasion[J]. Tribology International, 2016, 103:1-11.
- [43] Stachowiak G B, Stachowiak G W, Brandt J M. Ball-cratering abrasion tests with large abrasive particles[J]. Tribology International, 2006, 39:1-11.
- [44] Shen M X, Li B, Zhang Z N, et al. Abrasive wear behavior of PTFE for seal applications under abrasive-atmosphere sliding condition[J]. Friction, 2020, 8(4):755-767.
- [45] Petrica M, Katsich C, Badisch E, et al. Study of abrasive wear phenomena in dry and slurry 3-body conditions[J]. Tribology International, 2013, 64:196-203.
- [46] Pandiyan V, Tjahjowidodo T. Use of acoustic emissions to detect change in contact mechanisms caused by tool wear in abrasive belt grinding process[J]. Wear, 2019, 436/437:203047.
- [47] Harish A B, Wriggers P. Modeling of two-body abrasive wear of filled elastomers as a contact-induced fracture process[J]. Tribology International, 2019, 138:16-31.
- [48] Mills R, Dwyer-Joyce R S, Loo-Morrey M. The mechanisms of pedestrian slip on flooring contaminated with solid particles[J]. Tribology International, 2009, 42:403-412.
- [49] Persson B, Tartaglino U, Albohr O, et al. Rubber friction on wet and dry road surfaces: The sealing effect[J]. Physical Review B, 2005, 3:71.
- [50] Peng Y, Xu Y, Geng J, et al. Tribological assessment of coated piston ring-cylinder liner contacts under bio-oil lubricated conditions[J]. Tribology International, 2016, 107:283-293.
- [51] Heshmat H. Wear reduction systems for coal-fueled diesel engines I. The basics of powder lubrication[J]. Wear, 1993, 162/164:508-517.
- [52] Hichri Y, Cerezo V, Do M T. Effect of dry deposited particles on the tire/road friction[J]. Wear, 2017, 376/377: 1437-1449.
- [53] Dong C L, Yuan C Q, Bai X Q, et al. Study on wear behaviours for NBR/stainless steel under sand water-lubricated conditions[J]. Wear, 2015, 332/333:1012-1020.
- [54] Yang L, Wang D, Guo Y, et al. Tribological behaviors of quartz sand particles for hydraulic fracturing[J]. Tribology International, 2016, 102:485-496.
- [55] Do M T, Cerezo V, Zahouani H. Laboratory test to evaluate the effects of contaminant on road skid resistance [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J: Journal of Engineering Tribology, 2014, 228:1994-1996.
- [56] Mofidi M, Prakash B. Two body abrasive wear and frictional characteristics of sealing elastomers under unidirectional lubricated sliding conditions[J]. Tribology: Materials Surfaces & Interfaces, 2010, 4:26-37.
- [57] Zhang H, Liu S, Xiao H. Tribological properties of sliding quartz sand particle and shale rock contact under water and guar gum aqueous solution in hydraulic fracturing[J]. Tribology International, 2019, 129:416-426.
- [58] Shen M X, Li B, Li S, et al. Effect of particle concentration on the tribological properties of NBR sealing pairs under contaminated water lubrication conditions[J]. Wear, 2020, 456/457:203381.
- [59] Sun H. COMPASS: An *ab initio* force-field optimized for condensed-phase applications – Overview with details on

- alkane and benzene compounds[J]. *Journal of Physical Chemistry B*, 1998, 102:7338-7364.
- [60] Pan D, Fan B, Qi X, et al. Investigation of PTFE tribological properties using molecular dynamics simulation[J]. *Tribology Letters*, 2019, 67:28.
- [61] Osei-Agyemang E, Berkebile S, Martini A. Decomposition mechanisms of anti-wear lubricant additive tricresyl phosphate on iron surfaces using DFT and atomistic thermodynamic studies[J]. *Tribology Letters*, 2018, 66:48.
- [62] Duan C, Yang Z, Zhang D, et al. Effect of isomerism on mechanical and tribological properties of thermoplastic polyimide films[J]. *Tribology International*, 2018, 121: 373-380.
- [63] Jin Y, Duan H, Cheng B, et al. Synthesis of a multi-phenol antioxidant and its compatibility with alkyl diphenylamine and ZDDP in ester oil[J]. *Tribology Letters*, 2019, 67:58.
- [64] Song J, Lei H, Zhao G. Improved mechanical and tribological properties of polytetrafluoroethylene reinforced by carbon nanotubes: A molecular dynamics study[J]. *Computational Materials Science*, 2019, 168:131-136.
- [65] Luo Y L, Wu Y P, Luo K Q, et al. Structures and properties of alkanethiol-modified graphene oxide/solution-polymerized styrene butadiene rubber composites: Click chemistry and molecular dynamics simulation[J]. *Composites Science and Technology*, 2018, 161:32-38.
- [66] Li Y, Wang S, Wang Q. A molecular dynamics simulation study on enhancement of mechanical and tribological properties of polymer composites by introduction of graphene[J]. *Carbon*, 2017, 111:538-545.
- [67] Li Y, Wang S, Wang Q, 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.
- [68] 阙刚, 彭旭东, 沈明学, 等. 丁腈橡胶热空气老化力学性能分析及贮存寿命预测[J]. *润滑与密封*, 2018, 43(2): 18-25.
- [69] 强力, 张斌, 于元烈, 等. 橡胶表面碳基薄膜耐磨改性研究进展[J]. *中国表面工程*, 2021, 34(2):25-34.
- [70] Chang X, Huang H, Jiao R, et al. Experimental investigation on the characteristics of tire wear particles under different non-vehicle operating parameters[J]. *Tribology International*, 2020, 150:106354.
- [71] 焦润楠, 黄海波, 李锦棒, 等. 不同工况下软质丁苯橡胶轮表面磨损颗粒的产生量及磨损机理[J]. *机械工程材料*, 2021, 45(3):11-15.
- [72] Zhang T, Huang H, Li W, et al. Vulcanization modeling and mechanism for improved tribological performance of styrene-butadiene rubber at the atomic scale[J]. *Tribology Letters*, 2020, 68:83.
- [73] 潘路奇, 黄海波, 张涛, 等. CNT 复合硫化丁苯橡胶摩擦特性分子动力学模拟[J]. *兵器材料科学与工程*, 2020, 43(4):1-6.

Review of theoretical and experimental progress on tribology of the rubber materials

HUANG Haibo¹, SHEN Mingxue²

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2.School of Material Science and Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: Rubber materials were widely used in industry due to its good chem-physical and mechanical features. The theoretical research achievements were first summarized on rubber tribology. Then, the research progress was introduced from view of nature-alteration of materials, surface-alteration by superficial texture, abrasive wear and the relevant research methods in recent five years. The potential research directions were also suggested for future development of better rubber materials.

Key words: rubber polymer; nature-alteration of materials; surface-alteration by superficial texture; abrasive wear

(责任编辑 韩 超)