

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.05.023

氟橡胶含量对酚醛树脂基摩擦材料性能的影响

张翔, 郭建兵, 张凯, 危兰兰, 李胜男, 蒋团辉

(贵州省材料产业技术研究院贵州省重晶石及其伴生资源高端化利用全省重点实验室, 贵阳 550016)

摘要: 采用干法模压工艺制备了氟橡胶改性酚醛树脂基摩擦材料, 探究了氟橡胶含量对摩擦材料力学性能、热稳定性、不同温度下的摩擦系数和高温磨损率的影响。结果表明, 随着氟橡胶含量的增加, 材料剪切强度呈现降低趋势, 特别是氟橡胶质量分数为20%时, 剪切强度显著降低; 加入氟橡胶后, 摩擦材料的冲击强度虽有波动, 但均高于未含氟橡胶的摩擦材料。氟橡胶对材料在200~600℃的热分解速率有较大影响, 随着氟橡胶含量的增加, 此阶段的最大热分解速率增大, 导致摩擦材料热稳定性降低。相对于未添加氟橡胶的摩擦材料, 氟橡胶质量分数增至5%时, 随着温度的升高, 材料摩擦系数先增加后略有降低, 此时磨损表面产生少量孔洞, 高温磨损率增加; 当氟橡胶质量分数为10%时, 不同温度下的摩擦系数较高且波动较小, 磨损表面产生了连续的摩擦层, 高温磨损率的增加幅度降低; 当氟橡胶质量分数为15%时, 摩擦系数随着温度的升高先增加后略有降低, 磨损表面形成大量微小凹坑, 摩擦层连续性被破坏, 导致高温磨损率增加幅度变大; 当氟橡胶质量分数达到20%时, 随着温度的升高摩擦系数降低, 但在较低温度下产生了最高的摩擦系数, 此时磨损表面发生了严重的剥离现象, 高温磨损率最高。

关键词: 摩擦材料; 氟橡胶; 摩擦系数; 力学性能; 热稳定性; 高温磨损率

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)05-0199-08

Effect of fluororubber content on properties of phenolic resin-based friction materials

ZHANG Xiang, GUO Jianbing, ZHANG Kai, WEI Lanlan, LI Shengnan, JIANG Tuanhui

(Guizhou Key Laboratory of Advanced Utilization of Barite and Associated Resources, Guizhou Material Industrial Technology Institute, Guiyang 550016, China)

Abstract: Fluororubber modified phenolic resin-based friction materials were prepared by dry molding process. The effects of fluororubber contents on the mechanical properties, thermal stability, friction coefficient at different temperatures and high-temperature wear rate of the friction materials were investigated. The results show that with the increasing fluororubber content, the shear strength is decreased. Especially, when the fluororubber content is 20 wt%, the shear strength is dropped sharply. After adding fluororubber, although the impact strength of the friction material fluctuates, it is still higher than that of the friction materials without fluororubber. The fluororubber has a significant impact on the thermal decomposition rate of the material within 200–600 °C, where the maximum thermal decomposition rate increases as the content of fluororubber increases, which results in a decrease in thermal stability of the friction materials. Compared with the friction material without fluororubber, when the fluororubber content rises to 5 wt%, the friction coefficient is firstly increased and then slightly decreased as the temperature rises. At this time, a small amount of holes are produced on the wear surface, and the high-temperature wear rate increases. As the content of fluororubber is 10 wt%, the friction coefficient is higher and shows little fluctuation at different temperatures, and the continuous friction film is formed on the wear surface, reducing the increase amplitude of high-temperature wear rate. When the fluororubber content is 15 wt%, the friction coefficient increases initially and then slightly decreases with the rising temperature, and a large number of tiny pits are formed on the wear surface, and the continuity of the friction film is destroyed, resulting in a greater increase in the high-temperature wear rate. When the fluororubber content reaches 20 wt%, the friction coefficient is decreased as the temperature rises. However, the highest

基金项目: 贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2023]一般163), 国家重点研发计划项目(2018YFC1903502)

通信作者: 张翔, 副研究员, 研究方向为纤维增强树脂基复合材料

收稿日期: 2026-04-08

引用格式: 张翔, 郭建兵, 张凯, 等. 氟橡胶含量对酚醛树脂基摩擦材料性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(5): 199–206.

ZHANG Xiang, GUO Jianbing, ZHANG Kai, et al. Effect of fluororubber content on properties of phenolic resin-based friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(5): 199–206.

friction coefficient is achieved at the lower temperatures. At the same time, the severe peeling occurs on the wear surface, and the high-temperature wear rate is the highest.

Keywords: friction material; fluororubber; friction coefficient; mechanical property; thermal stability; high-temperature wear rate

树脂基摩擦材料是车辆制动器和离合器中的关键安全部件用材料,工作温度可以达到 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1-2],其通常由树脂基体、纤维增强体、摩擦性能调节剂和填料组成^[3],其中树脂基体主要起到将各组分黏结在一起的作用,同时也提供一定的力学性能、耐热性能和摩擦磨损性能^[4]。酚醛树脂是摩擦材料中广泛应用的树脂基体黏结剂^[5],但其具有硬度过高、韧性低等缺点^[6],因而需要对酚醛树脂进行改性处理^[7-9],其中橡胶和酚醛树脂共混是一种重要的改性方法^[10-11]。Gou等^[12]利用硅橡胶粉(SRP)对树脂基摩擦材料进行了共混改性,发现SRP增强了材料阻尼性能和冲击强度,提高了摩擦系数的稳定性,减少了疲劳磨损,提高了耐磨性,降低了摩擦诱发振动的平均振幅。张煜焜等^[13]采用溶胶法和挤胶法分别制备了丁苯橡胶改性酚醛树脂(SBR-PF)和丁腈橡胶改性酚醛树脂(NBR-PF)摩擦材料,研究发现NBR-PF的抗热衰退能力和抗振颤能力更优异,SBR-PF的摩擦系数在 $380\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右下降到0.2以下,而NBR-PF的摩擦系数在 $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时仍未衰减到0.2以下。Wang等^[14]采用热压成型工艺制备了腰果油改性酚醛树脂/丁腈橡胶制动摩擦材料,研究发现当腰果油改性酚醛树脂与NBR的质量比为13:12时,摩擦材料具有良好的耐热性、优异的摩擦稳定性和耐磨性。由上述研究可知,丁腈橡胶和丁苯橡胶在酚醛树脂基复合材料中应用最多。在合成橡胶中,氟橡胶因具有优异的热稳定性、力学性能和耐化学性等,被广泛应用于汽车、航空航天、石油、重型机械等恶劣环境中^[15-16]。现有研究主要涉及氟橡胶作为密封材料使用时的力学和摩擦性能方面^[17-18],而在氟橡胶改性树脂基摩擦材料的研究方面,Yin等^[19]考察了氟橡胶/酚醛树脂基复合材料在室温环境下的力学和惯量摩擦磨损性能,研究发现氟橡胶的加入促使复合材料的断裂模式由脆性断裂转变为韧性断裂,适量氟橡胶的添加可以得到更好的摩擦系数稳定性、更加平缓的扭矩曲线和更高的耐磨性。总体上看,关于氟橡胶改性酚醛树脂基摩擦材料热学特性和高温摩擦性能的研究较少,然而在重载高速等复杂工况下,摩擦材料表面必然产生一定

的高温,树脂基体也会发生一定的热分解,导致树脂基摩擦材料的性能发生衰减^[20],所以高温摩擦磨损性能的研究极其重要。因此,本文采用粉状氟橡胶与腰果油改性酚醛树脂进行机械共混,然后通过干法模压工艺获得酚醛树脂/氟橡胶基摩擦材料,并讨论氟橡胶含量对摩擦材料高温摩擦磨损性能、力学性能和热稳定性的影响,以期对酚醛树脂基摩擦材料的设计提供实验依据。

1 实验部分

1.1 主要原材料

氟橡胶:26型,含氟量约为66%,美国3M公司;

腰果油改性酚醛树脂:流动度为25~40 mm,聚合时间($150\text{ }^{\circ}\text{C}$)为40~65 s,游离酚含量为2%~4%,六次甲基四胺含量为9.0%~10.0%,济南圣泉集团股份有限公司;

短切石墨纤维:长度为2.0~6.0 mm,直径约为 $10\text{ }\mu\text{m}$,拉伸强度约为1 300 MPa,拉伸弹性模量约为690 GPa,含碳量约为99%,中国台湾塑胶工业股份有限公司;

硫酸钙晶须:长度为10~200 μm ,直径为1~50 μm ,自制;

摩擦性能调节剂与填料:氧化铝、石墨、碳酸钙、硫酸钡,均为工业级,粒度为10~110 μm ,市售。

1.2 主要仪器及设备

平板硫化机:XLB-D350 $\times$ 350 $\times$ 2/0.25MN,青岛锦九洲橡胶机械有限公司;

定速摩擦性能试验机:XD-MSM,咸阳新益摩擦密封设备有限公司;

热重(TG)分析仪:NETZSCH TG209F1,德国耐驰公司;

全自动恒应力试验机:JYE-300B,北京科达京威科技发展有限公司;

摆锤式冲击试验机:ZBC8400-B,美特斯工业系统(中国)有限公司;

扫描电子显微镜(SEM):KYKY-EM6200,北京中科科仪股份有限公司。

1.3 试样制备

首先按照一定的配比称取原材料,然后将摩擦

性能调节剂与填料粉体、纤维、粉状酚醛树脂和氟橡胶按顺序加入高速混料机中,搅拌至原材料均匀分散,得到呈羊绒状的混合料;然后将混合料在平板硫化机上进行近净模压成型,得到复合材料预制体,热压工艺参数如下:温度为160~180℃,压力为5~15 MPa,时间为5~15 min。随后,将预制体放入鼓风干燥箱中在200℃下进行2 h的后处理,得到摩擦材料试样。摩擦材料所用原材料组分、含量及试样代号见表1。

表1 酚醛摩擦材料各组分质量分数

Tab. 1 Mass fraction of each component in phenolic friction materials

Components	Samples				
	FC0	FC1	FC2	FC3	FC4
Phenolic resin	20	20	20	20	20
Fluororubber	0	5	10	15	20
Graphite fiber	5	5	5	5	5
CaSO ₄ whisker	20	20	20	20	20
Al ₂ O ₃	5	5	5	5	5
Graphite	5	5	5	5	5
BaSO ₄	20	20	20	20	20
CaCO ₃	25	20	15	10	5

1.4 测试与表征

摩擦磨损试验参照GB/T 5764-2011,采用定速摩擦性能试验机进行测试,测试条件如下:试样尺寸为25 mm×25 mm×10 mm,摩擦盘转速约为490 r/min,压力为0.49 MPa,对偶盘材质为灰铸铁HT250,温度为100~350℃。测定各温度下摩擦盘旋转5 000转的平均摩擦系数。磨损率由公式(1)计算得到^[21]。

$$V = \frac{1}{2\pi r} \times \frac{A}{n} \times \frac{d_1 - d_2}{f} \quad (1)$$

式中: V 为磨损率,单位 $\text{cm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$; r 为试样中心到摩擦盘轴中心的距离,单位 m ; n 为摩擦盘的总转数; A 为试样的总面积,单位 cm^2 ; d_1 为未磨损试样的平均厚度,单位 cm ; d_2 为磨损后试样的平均厚度,单位 cm ; f 为总平均摩擦力,单位 N 。

采用TG分析仪测试试样的热稳定性,测试条件如下:氮气气氛,气体流量为50 mL/min,温度区间为35~1 000℃,升温速率为10℃/min。

剪切强度参照GB/T 26739-2011测试,采用全自动恒应力试验机进行测试,测试条件如下:试样尺寸为20 mm×20 mm×10 mm,试验速度约为4 500 N/s,测试结果取3个有效数据的平均值。

无缺口冲击强度参照GB/T 1043.1-2008进行测试,试样尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,测试结果

取3个有效数据的平均值。

采用SEM观察试样剪切断面和磨损表面的微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 氟橡胶含量对摩擦材料力学性能的影响

图1为氟橡胶含量与摩擦材料力学性能的变化关系。随着氟橡胶含量的增加,摩擦材料的剪切强度整体呈现降低趋势,当氟橡胶质量分数增至5%时,剪切强度略有降低,随着氟橡胶含量的进一步增加,剪切强度缓慢减小。但当氟橡胶质量分数达到20%时,剪切强度降低到4.95 MPa,降幅达到83.13%,这主要归因于过量的粉状氟橡胶在酚醛树脂中产生聚集,阻碍了酚醛树脂与石墨纤维、硫酸钙晶须和粉体填料之间的结合,进而导致剪切强度严重衰减。如图2剪切断面SEM照片所示,相对于未含氟橡胶的摩擦材料(图2a),当氟橡胶含量较低时,石墨纤维、氟橡胶颗粒和硫酸钙晶须、填料等依然被酚醛树脂较好地包裹(图2b),同时酚醛树脂与氟橡胶之间可能发生一定的交联作用^[22],从而形成稳定的网络结构,此时石墨纤维和硫酸钙晶须依然承受主要的拉伸载荷,材料的整体剪切强度变化不大;然而当氟橡胶含量继续增加时,粉状氟橡胶的分散性变差,这将导致石墨纤维与酚醛树脂之间的界面结合力减弱^[19],部分石墨纤维发生脱黏(图2c和图2d),剪切强度有所降低;随着氟橡胶质量分数继续增至20%,此时过量的氟橡胶产生聚集(图2e),导致其与纤维、树脂之间的界面黏合力骤然降低,纤维和氟橡胶颗粒从树脂基体极易脱离,进而导致剪切强度严重衰退。同时发现,含有氟橡胶的摩擦材料的冲击强度均高于未含氟橡胶的摩擦材料,含有氟橡胶的摩擦材料的冲击强度在2.60 kJ/m²

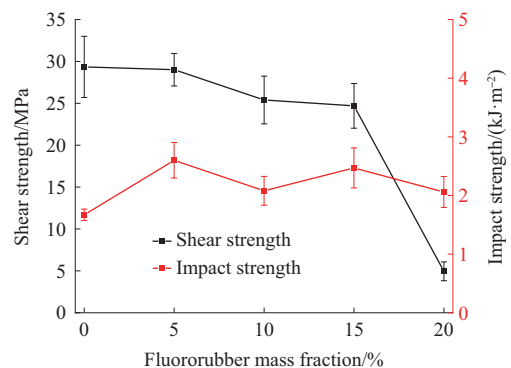


图1 不同氟橡胶质量分数下摩擦材料的力学性能

Fig. 1 Mechanical properties of friction materials with different fluororubber mass fractions

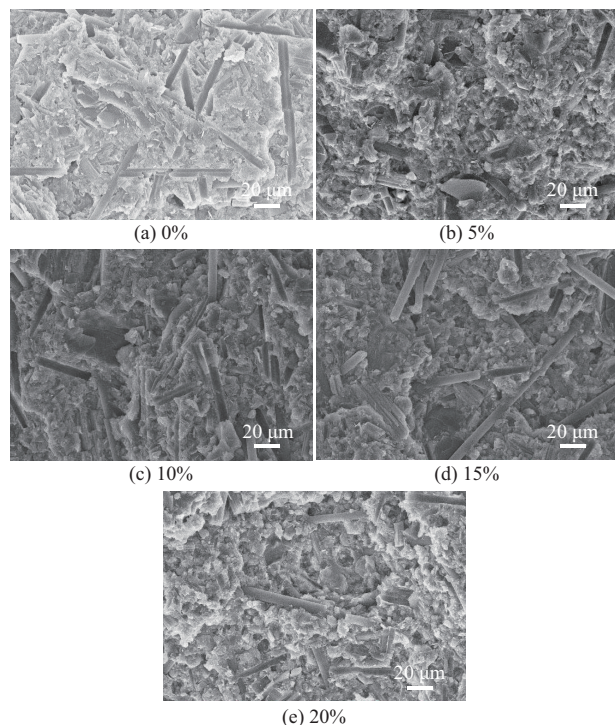


图2 不同氟橡胶质量分数下摩擦材料的剪切断面SEM照片

Fig. 2 SEM images of shear sections of friction materials with different fluororubber mass fractions

至 2.06 kJ/m^2 之间波动,且氟橡胶质量分数为5%时,冲击强度较高,这主要是因为冲击强度与摩擦材料中橡胶弹性体的含量以及氟橡胶、纤维与酚醛树脂基体之间的界面结合状态密切相关,当摩擦材料体系中添加氟橡胶时,随着无机碳酸钙含量的减少,较低含量(质量分数5%)的氟橡胶也能显著提升摩擦材料的冲击强度,然而当氟橡胶含量增加到一定程度后,分散性变差的氟橡胶降低了石墨纤维和晶须与酚醛树脂之间的结合性,冲击强度略有降低^[14]。

2.2 氟橡胶含量对摩擦材料热稳定性的影响

图3是不同氟橡胶含量的摩擦材料的TG和DTG曲线图。由图3可知,摩擦材料的热解过程可分为4个阶段。第1阶段在 35°C 至 200°C 之间,主要是以水分的蒸发和酚醛树脂中低聚物的去除为主,进而导致了试样质量的轻微减少。摩擦材料组分的分解过程主要发生在 200°C 以后,特别是在 200°C 至 600°C 之间、 600°C 至 850°C 之间以及 850°C 至 1000°C 之间。在 200°C 至 600°C 的第2阶段主要发生了酚醛树脂和氟橡胶的裂解、脱氢以及脱水反应,挥发出 H_2O 、 H_2 和 CO_2 等气体^[23-24],这一阶段是影响摩擦材料热稳定性的关键,对摩擦材料的摩擦系数和耐磨性具有重要的影响,此阶段的最

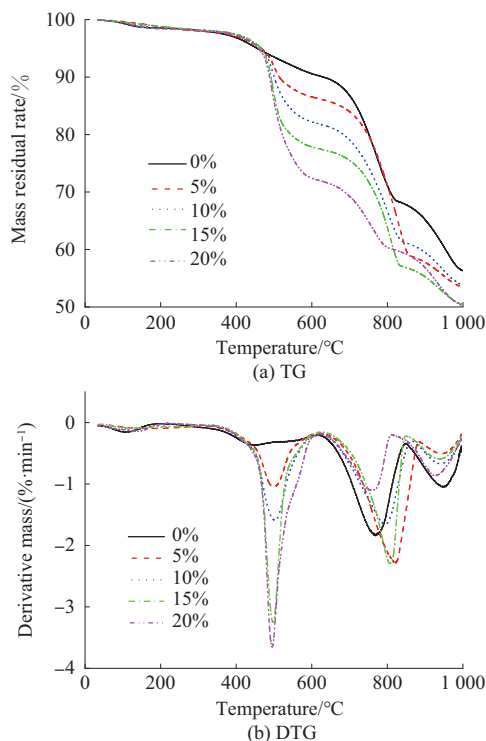


图3 不同氟橡胶质量分数下摩擦材料的热稳定性

Fig. 3 Thermal stability of friction materials with different fluororubber mass fractions

大热分解速率对应温度在 500°C 左右,如图3b所示,随着氟橡胶含量的增加最大热分解速率急剧增加,且最大分解速率对应温度略有降低,这主要是因为氟橡胶的热稳定性低于热固性酚醛树脂。在 600°C 至 1000°C 之间主要以试样中部分无机填料、摩擦性能调节剂等耐高温组分的分解反应为主,特别是 600°C 至 850°C 的第3阶段主要以碳酸钙的热分解为主^[25]。同时由图3a可知,随着氟橡胶含量的增加,试样的残余质量降低,表明复合材料的热稳定性降低。因此,由TG和DTG结果可知,随着氟橡胶含量的增加,酚醛树脂基摩擦材料的热稳定性明显降低。

2.3 氟橡胶含量对摩擦材料摩擦磨损性能的影响

图4a为不同氟橡胶含量下摩擦材料的摩擦系数。当氟橡胶质量分数为10%时,随着试验温度的升高,材料的摩擦系数先降低后增加,但不同温度下的摩擦系数变化不大,波动幅度相对较小。当氟橡胶质量分数为5%和15%时,摩擦系数随温度升高先快速增加,随后开始降低。当氟橡胶质量分数为20%时,在较低温度 100°C 下的摩擦系数最高,随着温度升高摩擦系数快速下降,且在高温 300°C 和 350°C 下的摩擦系数最低。

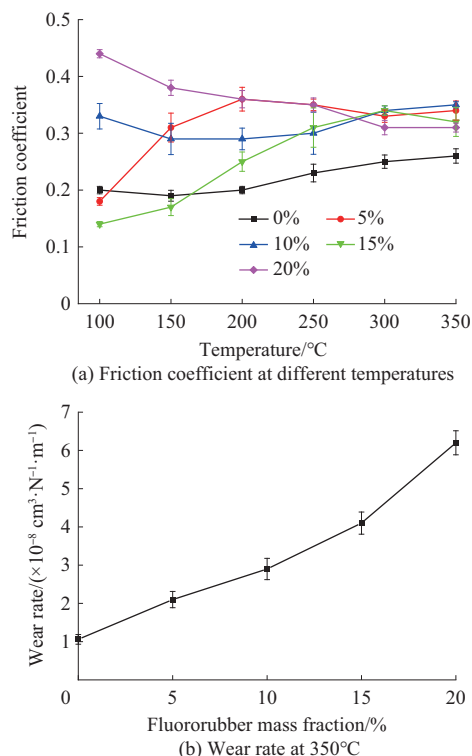


图4 不同氟橡胶质量分数下摩擦材料的摩擦系数和磨损率

Fig. 4 Friction coefficient and wear rate of friction materials with different fluororubber mass fractions

温度对摩擦系数具有重要且复杂的影响^[14],如图5磨损表面形貌所示,未添加氟橡胶时,磨损表面较为平整(图5a2),酚醛树脂固化后摩擦材料表面硬度较高^[9],摩擦界面的实际接触面积较小,导致摩擦系数较小,且摩擦系数在100~350 °C范围内波动较小,表明摩擦系数对温度的敏感性较小。当氟橡胶质量分数为5%时,因酚醛树脂相对于氟橡胶的占比依然较大,腰果壳油改性酚醛树脂对摩擦材料硬度的影响大于氟橡胶,固化后树脂基体依然具有较高的硬度,导致摩擦材料与对偶盘的实际接触面积依然较少,因此在较低温度下的摩擦系数较小,而随着温度的增加,摩擦材料表面发生一定的软化^[16],在滑动摩擦过程中实际接触面积不断增加,摩擦系数增大,但当温度升高至250~350 °C时,摩擦表面受温度影响产生一定的热分解行为,导致摩擦系数略有降低,同时在试验温度范围内摩擦系数波动较大,摩擦系数对温度的敏感性较大。当氟橡胶质量分数增至10%时,此时材料既能保持适中的剪切强度和冲击韧性(图1)以抵抗摩擦过程中的剪切应力,且橡胶的弹性特征能够改善材料的抗变形能力,通过弹性变形稳定了实际接触面积^[26],同时摩擦过程中的机械化学作用促使磨损表面产生了稳定的摩

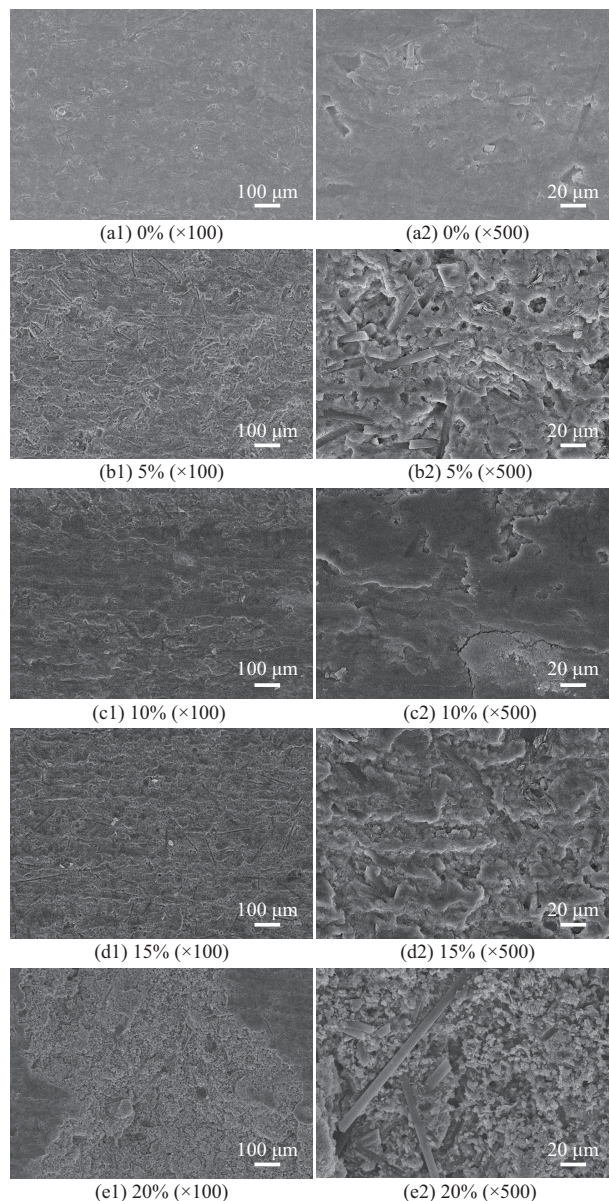


图5 不同氟橡胶质量分数下摩擦材料试样的磨损表面形貌

Fig. 5 Wear surface morphology of friction material samples with different fluororubber mass fractions

擦层(图5c2),摩擦层在改善摩擦稳定性方面起着主导作用^[27],因此在试验温度范围内保持较为稳定的摩擦系数,此时摩擦系数对温度的敏感性最小。随着氟橡胶质量分数进一步增加至15%,在较低温度下出现了最低的摩擦系数,且随着温度增加而增加,这可能与氟橡胶在材料中的分散性、与酚醛树脂的结合性以及物化性能密切相关,在热和剪切应力的作用下,摩擦层的连续性遭到破坏(图5d1),此时在试验温度范围内摩擦系数波动最大,摩擦系数对温度的敏感性最大。在高氟橡胶含量(质量分数20%)下,摩擦材料依然保持较高的冲击强度,同时

具有高的弹性和柔韧性,提高了摩擦过程中的实际接触面积,因此在较低温度下摩擦界面的摩擦力较高,产生了最高的摩擦系数,但其在高温下也具有最高的热分解速率(图3b),在高温和摩擦热的作用下聚合物基体发生热变形和衰退^[16],摩擦界面的剪切应力降低^[14],与此同时聚合物基体在高温下发生反应产生了小气体分子,进而形成气垫效应,反而减少了摩擦过程的实际接触面积^[28],导致摩擦系数快速衰退,但摩擦系数在100~350℃范围内的波动处于适中状态,此时摩擦材料具有适中的温度敏感性。

摩擦材料的高温磨损是一个由多种热激活机制引发的复杂过程^[29],取决于试验温度、加载压力、滑动速度、滑动时间以及材料性能、摩擦层特征等因素^[30],其中温度对耐磨性具有决定性的影响^[31]。如图4b所示,在350℃下的高温磨损率随着氟橡胶含量的增加而增加。这是因为,一方面随着氟橡胶含量增加,其与酚醛树脂、石墨纤维和硫酸钙晶须间的结合力变弱,力学性能降低(图1);另一方面由于氟橡胶的热稳定性低于热固性酚醛树脂,氟橡胶的添加导致摩擦材料的热稳定性降低(图3),抗热应力破坏的能力减弱;另外橡胶相在酚醛树脂中的分散状态对磨损表面形成的平台状摩擦层具有复杂的影响,进而影响摩擦系数和磨损率。未添加氟橡胶时,摩擦材料剪切强度和热稳定性较高,在高温下磨损表面较平整(图5a1),未产生明显的孔洞和凹坑等(图5a2),此时磨损率低。当氟橡胶质量分数增至5%时,摩擦材料中酚醛树脂相对于氟橡胶的占比减少,酚醛树脂良好的热稳定性、适度的力学性能和固有的结构刚性影响着摩擦材料的耐磨性、摩擦系数和热稳定性^[32],尽管此时剪切强度较未加氟橡胶时基本没有变化,但摩擦材料热稳定性和表面硬度降低,磨损表面在热应力作用下产生孔洞(图5b1和图5b2),导致磨损率增加。当氟橡胶质量分数增至10%时,摩擦材料的剪切强度降低,摩擦材料热稳定性进一步降低,导致磨损率增加,但此时摩擦表面产生了大面积且连续的摩擦层(图5c1),并且牢固地附着在材料表面(图5c2),从而保护了树脂基体表面材料,进而减少了由基体表面磨损造成的材料损失^[27],合适的摩擦层降低了磨损速度^[33],降低了磨损率的增加幅度(当氟橡胶质量分数由0%增加至5%时,磨损率增幅为98.1%,而当由5%增加至

10%时,磨损率增幅仅为38.1%)。当氟橡胶质量分数达到15%时,氟橡胶的分散性和界面结合性进一步减弱,此时摩擦材料剪切强度略有降低,但摩擦材料热稳定性显著下降(图3b),摩擦制动过程中的热应力作用导致摩擦层的密实度降低^[34],连续性受到破坏(图5d1),材料磨损表面形成大量微小凹坑,呈现出非常不平整的粗糙形貌(图5d2),磨损率增加幅度较大。当氟橡胶质量分数高至20%时,氟橡胶严重聚集,摩擦材料剪切强度急剧降低(图1),热稳定性进一步降低(图3),氟橡胶的不均匀分散可能导致摩擦表面不同区域因热膨胀差异而进一步产生裂缝^[35],同时高温下摩擦表面的基体产生热变形和软化,与对偶盘的黏着接触面积增加,且高温下树脂基体的黏附能力会减弱^[31],导致树脂与纤维、氟橡胶的界面结合强度降低,在机械应力和热应力的共同作用下纤维容易从树脂基体中分离(图5e2),同时在界面剪切应力的作用下材料发生脱黏,磨损表面产生严重的剥离凹坑(图5e1),发生黏着磨损导致高温下的磨损率显著增加,对制动安全性不利。

3 结论

(1)随着氟橡胶含量的增加,酚醛树脂基摩擦材料的剪切强度降低,当氟橡胶质量分数为20%时,剪切强度严重衰减,降幅达到83.13%;另外,含有氟橡胶的摩擦材料的冲击强度均高于未含氟橡胶的摩擦材料。

(2)氟橡胶对摩擦材料在200℃至600℃之间的热分解速率有较大影响,随着氟橡胶含量的增加,最大热分解速率增大,摩擦材料整体热稳定性降低。

(3)当氟橡胶质量分数为10%时,摩擦系数较高且不同温度下的摩擦系数波动较小,此时产生了连续的摩擦层,稳定了摩擦系数,降低了磨损率的增加幅度;当氟橡胶质量分数为20%时,低温摩擦系数得到了提高,但高温摩擦系数降低,同时高温下磨损表面发生严重的剥离现象,导致350℃的磨损率大幅增加。

参考文献

- [1] LIU M, ZHENG K K, GAO C H, et al. Enhanced mechanical and tribological properties of phenolic resin matrix composites reinforced with natural sisal and aluminum silicate hybrid fibers[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2026, 206. DOI:10.1016/j.compositesa.2026.109745.
- [2] HARAMINA K, ŠKUGOR B, HOIĆ M, et al. Stochastic modelling of dry-clutch coefficient of friction for a wide range of operating conditions[J]. Applied Sciences, 2026, 16(3). DOI: 10.3390/

- app16031177.
- [3] 陈晓东,林荣会.亚麻纤维对酚醛树脂基摩擦材料的影响[J].工程塑料应用,2021,49(9):130–134.
CHEN Xiaodong, LIN Ronghui. Effect of flax fiber content on phenolic resin-based friction materials[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(9):130–134.
- [4] 谷杨浪,赵运才,孙嘉晨,等.稀土混合纳米颗粒改性对酚醛树脂基摩擦材料力学性能和摩擦学性能的影响[J].机械工程材料,2024,48(10):71–77.
GU Yanglang, ZHAO Yuncai, SUN Jiachen, et al. Effects of rare earth mixed nanoparticles modification on mechanical and tribological properties of phenolic resin-based friction materials[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2024, 48(10):71–77.
- [5] 王晓东,李欢,张嘎,等.纳米凹凸棒石对酚醛复合材料摩擦学性能的影响[J].工程塑料应用,2024,52(6):95–102, 109.
WANG Xiaodong, LI Huan, ZHANG Ga, et al. Effect of nano-attapulgite on tribological properties of phenolic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(6):95–102, 109.
- [6] GOU Z X, ZHANG S, ZHU W T, et al. Improving friction vibration and noise characteristics of carbon fiber-reinforced resin composites by utilizing polyurethane's enhanced damping capacity [J]. Composites Communications, 2025, 57. DOI: 10.1016/j.coco.2025.102492.
- [7] HE Y, DUAN R, ZHANG Q Q, et al. Reinforce the mechanical toughness, heat resistance, and friction and wear resistance of phenolic resin via constructing self-assembled hybrid particles of graphite oxide and zirconia as nano-fillers[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2021, 4(2):317–323.
- [8] JIA Y F, ZHANG Y M, MENG F L, et al. The preparation of an environmentally friendly novel daidzein-modified lignin phenolic resin with high performance and its application in friction materials [J]. Polymers, 2025, 17(1). DOI:10.3390/polym17010094.
- [9] ZHAO X, SUN W, CHEN S Y, et al. The effect of molding temperature on the mechanical and tribological properties of modified phenolic resin-based friction materials[J]. ACS Omega, 2025, 10(23):24 490–24 501.
- [10] 李慧亮,罗玉梅.温度对酚醛树脂/丁腈橡胶复合材料摩擦学性能的影响[J].合成橡胶工业,2022,45(3):223–230.
LI Huiliang, LUO Yumei. Effect of temperature on tribological properties of phenol formaldehyde resin/nitrile rubber composites [J]. China Synthetic Rubber Industry, 2022, 45(3):223–230.
- [11] 陈之举.丁腈橡胶/酚醛树脂复合材料的力学与摩擦学性能研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2025.
CHEN Zhiju. Study on mechanical and tribological properties of nitrile butadiene rubber/phenolic resin composites[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2025.
- [12] GOU Z X, LI B, FEI J, et al. Frictional characteristics and vibration behavior of silicone rubber powders modified resin-based friction materials[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2024, 141(19). DOI:10.1002/app.55344.
- [13] 张煜焜,赵早君,蒋琦峰,等.橡胶改性酚醛树脂基摩擦片性能研究[J].工程设计学报,2025,32(4):569–578.
ZHANG Yukun, ZHAO Zaojun, JIANG Qifeng, et al. Research on performance of rubber modified phenolic resin matrix friction plates[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2025, 32(4): 569–578.
- [14] WANG Z Y, LING J H, LUAN D C, et al. Effect of blending cashew oil modified phenolic resin and nitrile rubber on thermal, mechanical, and tribological performance of friction materials[J]. Polymer Composites, 2023, 44(7):4 038–4 046.
- [15] ZHAO J, WANG T M, YANG Y D, et al. Mechanical and tribological properties of fluororubber enhanced by three carbon nanomaterials at a high temperature: A molecular simulation approach [J]. Journal of Polymer Research, 2024, 31(9). DOI: 10.1007/s10965-024-04087-0.
- [16] 袁同鑫,周琴,秦坤,等.实时温度和磨粒条件下氟橡胶密封圈摩擦磨损特性研究[J].润滑与密封,2024,49(5):92–101.
YUAN Tongxin, ZHOU Qin, QIN Kun, et al. Study on the frictional wear characteristics of FKM ring seals under real-time temperature and abrasive conditions[J]. Lubrication Engineering, 2024, 49(5):92–101.
- [17] KIM H S, KWAK M K, LEE S H. High friction, durability non-slip pads consisting of fluoroelastomer with microstructures for high vacuum and high temperature[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2024, 25(10): 2 145 – 2 152.
- [18] 张嘉琦,贾现召,关颜慧,等.乏油环境下氧化铝填充氟橡胶的高温摩擦性能研究[J].润滑与密封,2022,47(6):108–115.
ZHANG Jiaqi, JIA Xianzhao, GUAN Yanhui, et al. Study on high temperature friction properties of fluorine rubber filled with alumina in oil-deficient environment[J]. Lubrication Engineering, 2022, 47(6):108–115.
- [19] YIN T, FU Q G, ZHOU L, et al. Superior wear resistance of boron phenolic resin-based composites using fluorine rubber micro powder as high-performance additive[J]. Tribology International, 2020, 142. DOI:10.1016/j.triboint.2019.106001.
- [20] ZHOU Z, LI M, LI Z, et al. Effect of diamond content on thermal, mechanical, and tribological properties of resin-based friction materials[J]. Polymer Composites, 2026, 47(1):81–95.
- [21] CHENG P, FEI J, QI L H, et al. Multi-matrix co-optimization and artificial neural network-assisted property prediction of carbon fiber reinforced friction materials[J]. Tribology International, 2026, 214. DOI:10.1016/j.triboint.2025.111309.
- [22] YU H D, LIANG S, TIAN C. High-temperature co-cured phenolic resin damping composite embedded with fluororubber film[J]. Advanced Composite Materials, 2026, 35(1):139–160.
- [23] ZHANG X, LI K Z, LI H J, et al. Investigation of the thermal property and tribological behavior of CaSO_4 whisker-modified

- paper-based composite friction materials[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2017, 231(12): 1 583–1 594.
- [24] 鲜一, 张友捷, 伍勇. 氟橡胶热分解动力学及热老化寿命研究[J]. 四川化工, 2016, 19(1): 13–16.
- XIAN Yi, ZHANG Youjie, WU Yong. Study on thermal decomposition dynamics and ageing of fluororubber[J]. Sichuan Chemical Industry, 2016, 19(1): 13–16.
- [25] SEESANONG S, SEANGARUN C, BOONCHOM B, et al. Low-cost and eco-friendly calcium oxide prepared via thermal decompositions of calcium carbonate and calcium acetate precursors derived from waste oyster shells[J]. Materials, 2024, 17(15). DOI: 10.3390/ma17153875.
- [26] SINGARAVELU D L, VIJAY R, FILIP P. Influence of various cashew friction dusts on the fade and recovery characteristics of non-asbestos copper free brake friction composites[J]. Wear, 2019, 426–427: 1 129–1 141.
- [27] ZHANG M P, ZHANG E, LUO H Y, et al. Effect of brake disc temperature on synthetic friction material performance[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2026, 3174. DOI: 10.1088/1742-6596/3174/1/012028.
- [28] ZHANG E, GAO F, FU R, et al. Tribological behavior of phenolic resin-based friction composites filled with graphite[J]. Materials, 2021, 14(4). DOI: 10.3390/ma14040742.
- [29] KUMAR M, SATAPATHY B K, PATNAIK A, et al. Hybrid composite friction materials reinforced with combination of potassium titanate whiskers and aramid fibre: Assessment of fade and recovery performance[J]. Tribology International, 2011, 44(4): 359–367.
- [30] KIM S J, JANG H. Friction and wear of friction materials containing two different phenolic resins reinforced with aramid pulp[J]. Tribology International, 2000, 33(7): 477–484.
- [31] BLAU P J. Microstructure and detachment mechanism of friction layers on the surface of brake shoes[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2003, 12(1): 56–60.
- [32] NAWANGSARI P, JAMASRI, ROCHARDJO H S B. Effect of phenolic resin on density, porosity, hardness, thermal stability, and friction performance as a binder in non-asbestos organic brake pad[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 547(1). DOI: 10.1088/1757-899X/547/1/012012.
- [33] BAGHERI KAZEM ABADI S, KHAVANDI A, KHARAZI Y. Effects of mixing the steel and carbon fibers on the friction and wear properties of a PMC friction material[J]. Applied Composite Materials, 2010, 17(2): 151–158.
- [34] LEONARDI M, MENAPACE C, MATĚJKA V, et al. Pin-on-disc investigation on copper-free friction materials dry sliding against cast iron[J]. Tribology International, 2018, 119: 73–81.
- [35] MA Y H, LIU Y C, WANG L D, et al. Performance assessment of hybrid fibers reinforced friction composites under dry sliding conditions[J]. Tribology International, 2018, 119: 262–269.

(上接第189页)

- [32] ZHANG H L, HU W T, XIAO J, et al. Revealing the hydrogen permeation mechanism in polyetheretherketone and polytetrafluoroethylene: From experimental validation to molecular-level interpretation[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2026, 44(1): 278–298.
- [33] 翟海民. 激光冲击强化对非晶合金结构及性能影响的研究进展[J]. 稀有金属, 2025, 49(11): 1 750–1 763.
- ZHAI Haimin. Research progress on the effect of laser shock peening on the structure and properties of amorphous alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2025, 49(11): 1 750–1 763.
- [34] 李仁豪, 鲍艳, 赵海航. 聚酰亚胺类复合隔热材料的研究进展[J]. 材料导报, 2025, 39(10): 231–240.
- LI Renhao, BAO Yan, ZHAO Haihang. Research progress on polyimide composite thermal insulation materials[J]. Materials Reports, 2025, 39(10): 231–240.
- [35] 谢健翔. 电力电子变压器聚酰亚胺绝缘的空间电荷仿真[D]. 南宁: 广西大学, 2023.
- XIE Jianxiang. Numerical simulation of charge transport of polyimide insulation in power electronic transformers[D]. Nanning: Guangxi University, 2023.
- [36] 万朋, 李志敏, 郑丞, 等. 几何偏差对多螺栓复合材料接头螺栓载荷和应力分布的影响研究[J]. 力学季刊, 2024, 45(1): 187–199.
- WAN Peng, LI Zhimin, ZHENG Cheng, et al. Effects of geometrical variation on bolt load and stress distributions in multi-bolt composite joints[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2024, 45(1): 187–199.
- [37] 王洋. 共轭聚合物/石墨烯纳米复合材料的粗粒化建模和力学性能研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.
- WANG Yang. Coarse-grained modeling and mechanical property investigation of conjugated polymers/graphene nanocomposite [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [38] 杨慧. 颗粒增强复合材料细观力学研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- YANG Hui. Micromechanics of particulate reinforced composites [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.