

环保型 NAO 刹车片的摩擦磨损行为和力学性能

花能斌,耿德虎,王劲扬

(福建工程学院 材料科学与工程学院,福建 福州 350118)

摘要:采用成本低廉的纺织废料纤维作为组成原料制备环保型无石棉有机物(NAO)刹车片,研究了不同纺织废料纤维含量对刹车片的结构与摩擦磨损性能的影响。结果表明:纺织边角料复合 NAO 刹车片结构均匀致密,主要含有 SiO_2 、 CaCO_3 、 BaSO_4 3 种晶相。在钢球作为摩擦对偶件往复摩擦条件下,随着 $w_{\text{纺织纤维}}$ 从 0 增加到 6 %,刹车片的摩擦系数从 0.52 降低到 0.33,磨损速率从 $0.787 \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kN}^{-1}$ 降低到 $0.233 \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kN}^{-1}$,耐磨性提高,磨损机制主要是疲劳磨损;刹车片的硬度从 34 HR 增加到 57 HR,抗弯强度从 21.85 MPa 增加到 51.76 MPa,从纺织纤维复合 NAO 刹车片断口中可以看出,韧性纺织纤维的加入改善了刹车片各组分界面结合,提高了强度,从而表现出更优异的耐磨性能。

关键词:无石棉有机刹车片;摩擦行为;纺织纤维;磨损机理;力学性能

中图分类号:TH117.1

文献标志码:A

文章编号:1672-4348(2023)03-0230-07

Friction and wear behaviors and mechanical properties of eco-friendly NAO brake pads

HUA Nengbin, GENG Dehu, WANG Jinyang

(School of Materials Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Eco-friendly non-asbestos-organic (NAO) brake pads were prepared by using low-cost textile waste fibers as raw materials. The effects of the content of textile waste fiber on the structure, friction-and wear properties of brake pads were studied. Results show that the textile waste composite NAO brake pads exhibit an uniform and compact structure, mainly containing SiO_2 , CaCO_3 and BaSO_4 crystalline phases. Under the reciprocating friction condition using steel ball as friction couple pair, as the textile fiber mass fraction w increases from 0 to 6 %, the friction coefficient of brake pads decreases from 0.52 to 0.33, the wear rate decreases from $0.787 \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kN}^{-1}$ to $0.233 \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kN}^{-1}$, and the wear resistance increases. The main wear mechanism is fatigue wear. Meanwhile, the hardness of brake pads increases from 34 HR to 57 HR, and the flexural strength increases from 21.85 MPa to 51.76 MPa. It can be seen from the fracture morphology of textile fiber composite NAO brake pads that the addition of ductile textile fiber improves the interfacial bonding of each component of brake pads, improves the strength, and thus shows superior wear resistance.

Keywords: non-asbestos-organic brake pads; friction behavior; textile fiber; wear mechanism; mechanical properties

高性能刹车片在保证安全性的同时,具有制动衰减低、热稳定性高、耐磨性好、噪音小、环保等优点。纤维作为刹车片主要的添加物,起

着增强和支撑填料骨架的作用^[1]。汽车刹车片按纤维增强材料可分为石棉型、半金属型、少金属型、无石棉有机物(non-asbestos prganic 简称

收稿日期:2023-04-25

基金项目:福建省科技计划项目(2022L3062)

第一作者简介:花能斌(1982—),男,福建南安人,教授,博士,研究方向:非晶纳米晶合金、高熵合金、生物医用金属材料、摩擦材料。

NAO)型、陶瓷型。其中石棉有致癌性,已经禁用于制造汽车刹车片;半金属及少金属型刹车片存在易生锈、摩擦系数大、易产生噪音、易磨损对偶件等缺点;NAO 刹车片在低温或高温下都能保持良好的制动效果,具有磨损少、噪音低、使用寿命长等优点,已经成为引导汽车制动摩擦材料发展的趋势。

近年来,利用纺织废料制备的汽车刹车片摩擦材料,在硬度、密度、摩擦系数、磨损率等性能上都有所提升^[2]。纺织废料来源于纺织企业废弃的纺织物边角料,以棉纤维为主(占 95%~97%),属于天然纤维,相对于玻璃纤维和金属纤维具有轻质化和密度低的优点。纺织纤维的加入不仅提高了产品质量,还使废料资源得到可循环利用,降低了成本。基于此,本文研制了一种以纺织废料纤维作为原料的 NAO 型刹车片,研究了不同纺织

废料纤维添加量对刹车片的结构、物理性能和摩擦磨损性能的影响,探讨了纺织废料复合 NAO 型刹车片的磨损机理,为该新型刹车片的应用提供理论和实验基础。

1 试样制备与试验方法

1.1 试样制备

NAO 刹车片由纺织废料、复合纤维、树脂、叶蜡石、膨润土、丁腈橡胶、碳素石墨、焦炭粉、增摩剂以及玻璃纤维组成,各试样的组成如表 1 所示。制备时,将各组元投入搅拌机内搅拌混合;在液压机上,压力 30 MPa、温度 160 ℃、保压时间 5 min 热压成型;成型后的初料在炉中先加热到 140 ℃保温 2 h,再加热升温到 180 ℃,保温 6 h,随炉冷却至 70 ℃ 以下出炉,即得到纺织废料复合 NAO 刹车片。

表 1 3 种不同 NAO 刹车片试样配方组成
Tab.1 Composition of three different NAO brake pad samples

样品	w/%									
	纺织废料	复合纤维	树脂	叶蜡石	膨润土	丁腈橡胶	碳素石墨	焦炭粉	增摩剂	玻璃纤维
S1	0	10	20	25	10	5	10	5	7	8
S2	3	10	17	25	10	5	10	5	7	8
S3	6	10	14	25	10	5	10	5	7	8

1.2 试验方法

Bruker-AXS-D8 型 X 射线衍射仪(XRD)表征试样的物相结构,扫描速度为 4°/min,扫描范围为 20°~80°;S-3400N 型钨灯丝扫描电子显微镜(SEM)观察试样的显微组织形貌;电子能谱仪(EDS)进行试样特征区域的成分分析;HSR-2M 型往复摩擦磨损测试机测试刹车片试样在摩擦磨损时摩擦系数随时间变化关系,通过传感器实时测量法向载荷和摩擦载荷,由计算机计算出摩擦系数,摩擦系数=摩擦载荷/法向载荷。采用直径 6 mm 的钢球作为对偶件,摩擦振幅 5 mm,往复频率 200 r/min,摩擦时间 30 min;磨损体积(ΔW)通过 MT-500 型探针式材料表面磨痕测量仪测定,通过公式(1)计算样品的磨损速率 W_s 。

$$W_s = \frac{\Delta W}{S \times P}$$

(1)

式中, S 为摩擦的总路程,m; P 为法向载荷,kN。

每个样品在同一条件下重复进行 3 次摩擦试验,误差棒范围为 3 次试验数据的标准差;阿基米德排水法测定试样的密度;洛氏硬度计 HR-150A 测定样品的洛氏硬度;AGS-X 型电子万能试验机测定试样的 3 点弯曲抗弯强度,通过公式(2)计算样品的抗弯强度 σ 。

$$\sigma = \frac{3F \times L}{2 \times b \times h \times h}$$

(2)

式中, F 为断裂载荷,N; L 为跨距,mm; b 为宽度,mm; h 为厚度,mm。

2 试验结果与讨论

图 1 为刹车片原料中纺织废料纤维的 XRD 图谱和 SEM 照片。从图 1(a)可以看出,纺织纤维在图谱 23°处有宽泛的衍射峰,经对比 PDF 标准卡片发现,纺织纤维主要由纤维晶组成^[3]。从图 1(b)中可以发现,纺织纤维呈无规则絮状,对

图中的 1 点处进行能谱分析,结果表明,纺织纤维

中有较高含量的 C 元素。

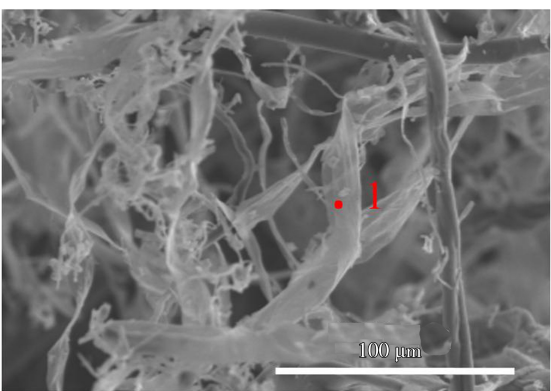
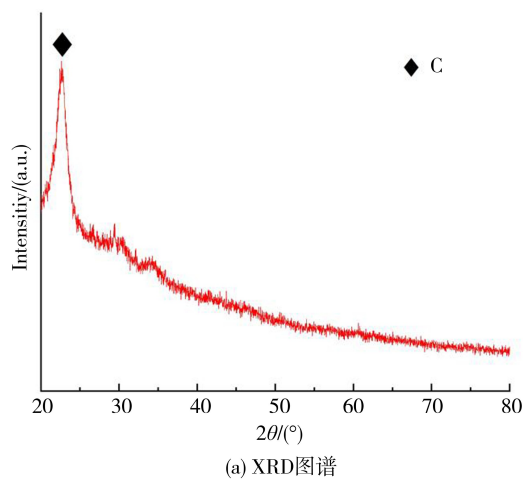


图 1 刹车片原料中纺织纤维的 XRD 图谱和 SEM 照片

Fig.1 XRD pattern and SEM image of textile fiber in the raw materials of brake pads

图 2(a) 是 S1、S2、S3 三种刹车片试样的 XRD 图谱。由图可知,S1、S2、S3 试样均具有多个尖锐的衍射峰,各个试样衍射峰的位置也基本一致。S1、S2、S3 试样主要由 SiO₂、CaCO₃、BaSO₄ 3 种晶相组成。3 种晶相对应刹车片原料

组元中玻璃纤维、叶腊石等无机材料。图 2(b) 是 S3 试样的表面形貌 SEM 照片。从图中可以看出,经热压成型后,S3 试样具有相对平整的表面,材料较为致密完整,各组元分布均匀。S1 和 S2 试样的表面形貌与 S3 基本一致。

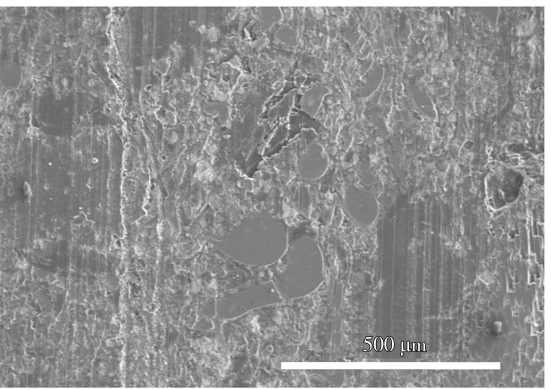
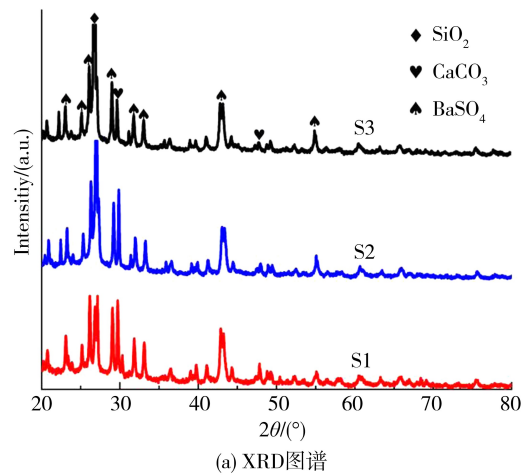


图 2 S1、S2、S3 刹车片试样的 XRD 图谱和 S3 表面 SEM 形貌

Fig.2 XRD patterns of S1, S2 and S3 brake pad samples and SEM surface morphology of S3

图 3(a) 是 3 种刹车片 S1、S2、S3 试样在钢球对偶件条件下进行摩擦磨损实验的摩擦系数随时间变化情况。由图可知,随着纺织纤维含量的提高,材料的平均摩擦系数呈下降的趋势,3 种刹车片 S1、S2、S3 试样的平均摩擦系数分别为 0.52、0.40 和 0.33,这与文献报道的刹车片摩擦系数范围接近^[4]。S3 试样具有最低的摩擦系数,且摩擦系数的波动范围比 S1 和 S2 试样更小,说明纺织纤维的加入有助于降低刹车片摩擦材料的摩擦系

数,表现出更好的摩擦系数稳定性,有利于汽车刹车片性能稳定性的提高。

图 3(b) 是 3 种不同成分刹车片 S1、S2、S3 试样在钢球对偶件条件下进行摩擦磨损实验的磨损率。由图可知,随着纺织纤维含量的增加,材料的磨损率呈下降的趋势,耐磨性明显提高,3 种刹车片 S1、S2、S3 试样的磨损率为 0.787、0.348、0.233 mm³ · m⁻¹ · kN⁻¹。这也与摩擦系数的变化结果相吻合。

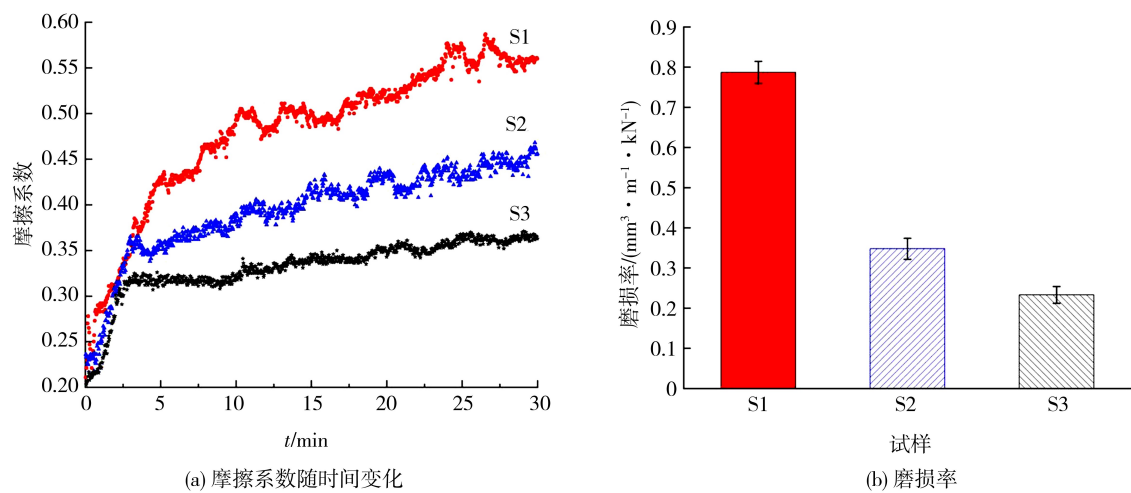


图 3 3 种刹车片 S1、S2、S3 试样的摩擦系数随时间变化和磨损率

Fig.3 Friction coefficient vs. friction time and wear rate of S1, S2 and S3 brake pad samples

图 4 为 3 种刹车片 S1(a-b)、S2(c-d)、S3(e-f) 试样在摩擦磨损后磨痕表面形貌 SEM 照片。对磨痕表面典型区域进行 EDS 成分分析,结果列于表 2。

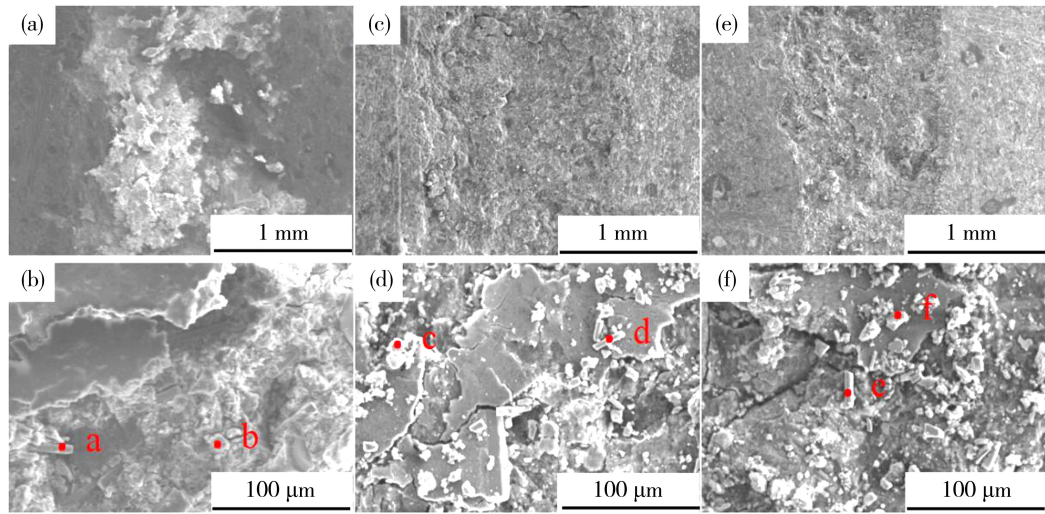


图 4 3 种刹车片 (a-b) S1、(c-d) S2、(e-f) S3 试样在钢球配偶件条件下摩擦磨损后磨痕表面形貌 SEM 照片

Fig.4 SEM images of the surface morphology of three brake pad (a-b) S1, (c-d) S2 and (e-f) S3 samples after friction and wear using the steel ball as couple pair

从图 4(a)可见,S1 试样磨痕破坏严重,表面较为粗糙,存在较多的孔洞、裂纹等缺陷,磨痕宽度大约为 1.4 mm。由图 4(b)可见,磨痕处存在着基体脆性剥落,脆性磨屑的加入加速了磨损,S1 试样的摩擦系数和磨损速率在 3 种刹车片中最高。从图 4(c)可见,S2 样品磨痕表面较为平整,磨痕宽度减小,磨痕表面有坑状剥落,说明磨损机制主要是疲劳磨损。由图 4(d)可见,有很多细碎的磨屑分布在摩擦层和基体处。从图 4(e)可见,S3 试样磨痕宽度进一步减小,磨痕表面相对平整,磨损机制为疲劳磨损。由图 4(f)可见,

基体表面连续性较好,这些平整面为摩擦过程中实际接触面,均匀分布的接触面有利于摩擦力的传递,减少摩擦过程中的震颤。S2、S3 试样磨痕表面存在的微小碎屑,起到一定的“滚珠”作用,降低了试样的摩擦系数和磨损速率^[5]。EDS 成分分析结果表明,长条状碎屑主要为玻璃纤维,在摩擦过程中,高硬度的玻璃纤维与摩擦副发生对磨破裂,并被碾碎成细小的玻璃纤维短棒;圆形状碎屑主要为硬质的 CaCO_3 ,在摩擦过程中起到“滚珠”作用。

表 2 试样摩擦磨损后磨痕表面典型区域 EDS 成分分析结果

样品	区域	w/%									
		C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ba
S1	a	2.52	60.32	2.21	5.25	5.89	14.25	0	7.86	1.40	0
	b	53.96	18.96	0.18	0.52	1.33	4.75	0	5.55	3.63	4.59
S2	c	56.62	25.43	0	0.09	0	1.84	2.98	9.46	0.70	2.27
	d	10.70	58.04	1.62	4.50	4.19	11.96	0	6.87	1.45	0
S3	e	5.07	61.41	1.63	5.40	4.94	12.80	0	6.93	1.25	0
	f	51.53	38.93	0	0.42	0.37	0.90	0.44	6.81	0.14	0.34

图 5 为 3 种刹车片 S1(a-b)、S2(c-d)、S3(e-f) 试样的磨屑表面形貌 SEM 照片。从图中可知, 刹车片磨屑由 10~100 μm 的片状磨屑和1~5 μm 的粉末状磨屑组成。表 3 为试样的磨屑表面典型区域 EDS 成分分析结果。从表中可知,各试样的磨屑中 C 和 O 含量较高,其中片状磨屑处 C 含量

富集,说明片状磨屑的主要成分为黏结剂树脂材料等有机物,粉末状磨屑的 Si、Ca 和 O 比例较高,说明粉末状磨屑主要由 SiO₂、CaCO₃ 等硬质氧化物填料构成。在摩擦磨损过程中,黏结剂树脂材料等有机物由于具有较低的硬度,优先发生磨损破裂,随着黏结材料的脱落,填料也随之发生剥落。

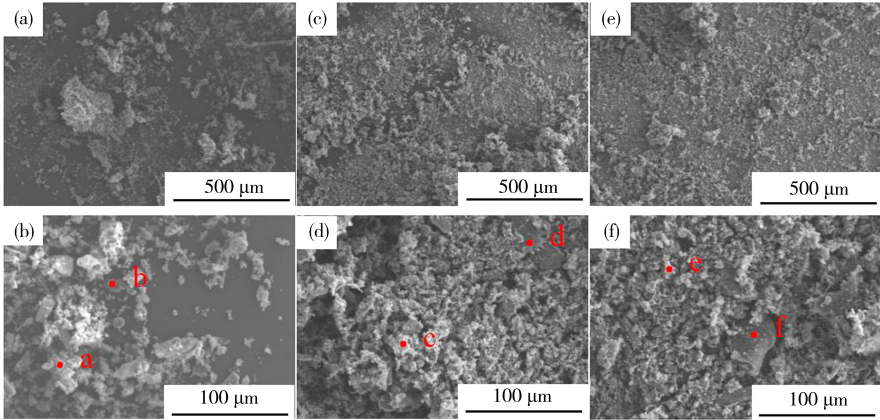


图 5 3 种刹车片 (a-b) S1、(c-d) S2、(e-f) S3 试样磨屑表面形貌 SEM 照片

Fig.5 SEM image of wear debris surface morphology of (a-b) S1, (c-d) S2 and (e-f) S3 brake pad samples

表 3 刹车片试样的磨屑表面 EDS 成分分析结果

Tab.3 EDS of wear debris compositional analysis results of brake pad samples										
样品	区域	w/%								
		C	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Ba
S1	a	63.35	21.29	0.36	1.49	5.40	0.41	4.59	0.61	0
	b	81.87	7.83	0	0.45	1.90	4.49	1.51	0	1.51
S2	c	74.12	21.11	0.25	0.22	1.26	0.95	0.95	0.13	1.02
	d	98.31	1.21	0	0	0.09	0	0	0	0
S3	e	72.67	19.85	0.56	0.47	1.31	1.50	1.30	0.29	1.39
	f	90.97	7.45	0	0	0.32	0.38	0.14	0.57	0.17

表 4 列出 3 种刹车片 S1、S2、S3 试样的密度、硬度及抗弯强度数据。从表中可以看出,S1、S2、S3 试样的密度均在 $2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 左右,与文献[6]的刹车片密度相近,符合目前常规使用 NAO 型刹车片的要求。从 3 种刹车片样品的硬度来看,随着纺织纤维含量的增加,刹车片试样的洛氏硬度从 34 HR 升高到 57 HR,3 点弯曲测试的抗弯强度从 27.85 MPa 升高到 51.76 MPa,说明纺织纤维的添加有助于提高刹车片的硬度和抗弯强度。

表 4 3 种刹车片 S1、S2、S3 试样的密度、硬度及抗弯强度

Tab.4 Density, hardness and bending strength of brake pad S1, S2 and S3 samples			
样品	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-2})$	硬度/HR	抗弯强度/MPa
S1	2.08	34	27.85
S2	2.06	47	49.71
S3	2.07	57	51.76

图 6 为 3 种刹车片 S1、S2、S3 试样在 3 点弯

曲试验后的断口形貌 SEM 照片。表 5 为 3 种刹车片 S1、S2、S3 试样断口表面典型区域 EDS 成分分析结果。从图 6(b)(f)(j)结合点 d 处的成分分析,3 种刹车片断口均有玻璃纤维的聚集,且尺寸较长,说明在原料共混和热压成型过程中,玻璃纤维并没有发生明显的断裂。S1 样品中的玻璃纤维较为集中,S2 和 S3 样品中的玻璃纤维分散度较好,说明纺织纤维的加入,有利于刹车片各组分原料的共混均匀性提高。断口表面存在碎片状区域如 a、b 和 c 处,主要是由 SiO_2 和 CaCO_3 等氧化物填料构成。S2 和 S3 样品中的 e 点和 f 点成分分析可知,图 6(h)(l)标出处为纺织纤维,纺织纤维良好地结合在材料内部,当材料发生断裂时,纺织纤维由于本身存在韧性阻碍了裂纹扩展,提升了刹车片的强度。有研究表明^[7],材料的耐磨性受硬度和韧性共同作用。提高硬度和增加韧性都有利于材料耐磨性的提高。本研究纺织纤维的加入并在材料内部均匀分布,良好的结合同时提高了摩擦材料的硬度和强度,纺织纤维本身的韧性也对耐磨性的提高起到促进作用。

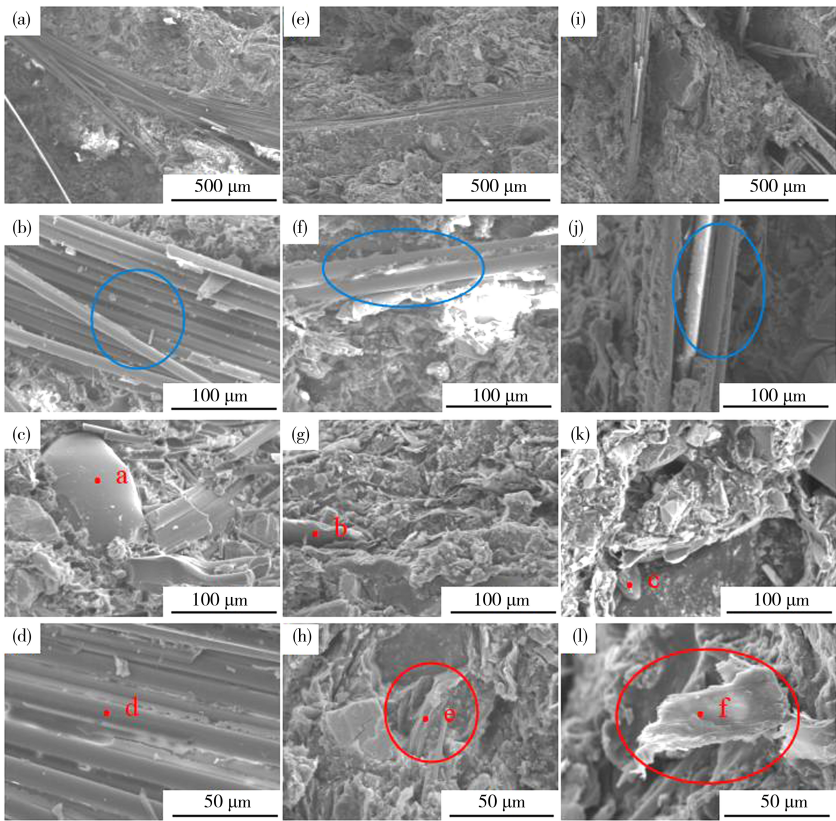


图 6 3 种刹车片 S1(a-d)、S2(e-h)、S3(i-l) 试样的断口形貌 SEM 照片

Fig.6 SEM images of fracture morphologies of brake pad S1 (a-d), S2(e-h) and S3 (i-l) samples

表 5 3 种刹车片 S1、S2、S3 试样断口区域 EDS 成分分析结果

Tab.5 EDS compositional analysis results of fracture area of S1, S2 and S3 brake pad samples

样品	区域	w/%							
		C	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Fe
S1	a	0	60.90	1.64	4.59	5.90	14.07	11.00	1.00
	d	8.64	64.65	0	0	0	26.70	0	0
S2	b	22.19	46.93	1.40	4.09	5.07	11.63	7.36	0.73
	e	76.76	23.24	0	0	0	0	0	0
S3	c	0	66.41	1.35	5.05	5.55	12.15	8.21	0.73
	f	74.26	25.74	0	0	0	0	0	0

3 结论

1) 采用纺织废料纤维作为原料之一, 制备 NAO 刹车片摩擦材料。 $w_{\text{纺织纤维}}$ 为 6 % 的 NAO 刹车片表面均匀致密, 经 XRD 检测表面主要含有 SiO_2 、 CaCO_3 、 BaSO_4 3 种晶相。

2) 在钢球作为摩擦对偶件往复摩擦条件下, 随着 $w_{\text{纺织纤维}}$ 从 0 增加到 6 %, 刹车片的摩擦系数从 0.52 降低到 0.33, 磨损速率从 $0.787 \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kN}^{-1}$

降低到 $0.233 \text{ mm}^3 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{kN}^{-1}$, 耐磨性明显提高, 磨损机制主要是疲劳磨损。

3) 通过试样的力学测试结果可知, 添加纺织纤维的刹车片, 样品硬度和抗弯强度得到明显提升, 随着 $w_{\text{纺织纤维}}$ 从 0 增加到 6 %, 刹车片的硬度从 34 HR 增加到 57 HR, 抗弯强度从 21.85 MPa 增加到 51.76 MPa, 从复合纺织纤维刹车片断口可看出, 韧性纺织纤维的加入阻碍裂纹的扩展, 提高了刹车片的强度, 从而表现出更优异的耐摩擦磨损性能。

参考文献:

[1] 张梦航,段俊杰,王晶晶,等. 碳纤维增韧陶瓷基摩擦材料的研究现状、挑战与展望[J]. 硅酸盐学报,2021,49(9): 1878-1897.

[2] 肖杨. 玉米秸秆纤维增强制动摩擦材料及其缩比台架试验[D]. 长春:吉林大学,2018.

[3] 郭丹华. 新疆营盘出土纺织纤维及其老化状况研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2020.

[4] 韩俊瑞. 树脂基摩擦材料的设计及其制动性能研究[D]. 太原:太原理工大学,2017.

[5] 杨昆鹏,高贤,姚文俊,等. 热压工艺对刹车片摩擦磨损性能的影响[J]. 南京工业大学学报(自然科学版),2015,37(6):13-19.

[6] 黄文豪. NAO 型盘式刹车片成分设计、制备工艺及性能研究[D]. 广州:广东工业大学,2020.

[7] LIAO Z L,HUA N B,CHEN W Z,et al. Correlations between the wear resistance and properties of bulk metallic glasses[J]. Intermetallics,2018,93:290-298.

(责任编辑: 陈雯)