

FeCrB-TiC 抗磨复合材料干摩擦学性能研究^{*}

STUDY ON DRY TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF WEAR RESISTANT FeCrB-TiC COMPOSITES

赵虎成^{**1, 2, 3} 崔功军^{***1, 2, 3} 郭 贺^{1, 2, 3} 崔昊天^{1, 2, 3} 韩文鹏^{1, 2, 3}

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 太原 030024)

(2. 山西省矿山流体控制工程实验室, 太原 030024)

(3. 矿山流体控制国家地方联合工程实验室, 太原 030024)

ZHAO HuCheng^{1, 2, 3} CUI GongJun^{1, 2, 3} GUO He^{1, 2, 3}

CUI HaoTian^{1, 2, 3} HAN WenPeng^{1, 2, 3}

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. Shanxi Mine Fluid Control Engineering Laboratory, Taiyuan 030024, China)

(3. National-Local Joint Engineering Laboratory of Mine Fluid Control, Taiyuan 030024, China)

摘要 采用粉末冶金技术设计制备了质量分数 4% TiC 强化的 FeCrB 基抗磨复合材料,与 GCr15 钢球配副进行往复干摩擦实验,系统研究滑动速度和载荷对复合材料的干摩擦磨损性能的影响。使用 X 射线衍射 (X-Ray Diffraction, XRD)、扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 等技术分析了复合材料的物相成分和微观形貌。实验结果表明:复合材料物相为 α -Fe、FeCr、TiC、Cr₂B 和 Fe₂B 相。TiC 的加入显著提高了材料的硬度,密度略有下降。随着滑动速度和载荷的增大,摩擦因数总体下降而磨损率显著增加。TiC 对铁基体的钉扎作用抑制了材料的剥落和变形,材料的抗磨性能显著提高。综合分析, TiC 能有效提升 FeCrB 合金的干摩擦学性能,其磨损机制主要是剥层磨损和磨粒磨损。

关键词 铁基复合材料 TiC 干摩擦 抗磨 磨损机制

中图分类号 TH117

Abstract The 4% weight percentage TiC reinforced FeCrB based anti-wear composite was designed and prepared by powder metallurgy technology. The effects of sliding speed and load on the dry friction and wear properties of the composite were systematically studied by reciprocating dry friction experiments with GCr15 steel ball pairs. The X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscope (SEM) and other techniques were used to analyze the phase composition and micro morphology of the composite. The experimental results show that the phase of the composite is α -Fe, FeCr, TiC, Cr₂B and Fe₂B. The addition of TiC significantly increases the hardness of the material and slightly decreases the density. With the increase of sliding speed and load, the friction coefficient decreases generally and the wear rate increases significantly. The pinning strengthening effect of TiC on the Fe matrix composite inhibits the spalling and deformation of the material, and the wear resistance of the material is significantly improved. Through comprehensive analysis, TiC can effectively improve the dry tribological properties of FeCrB alloy, and its wear mechanism is mainly delamination wear and abrasive wear.

Key words Fe matrix composite; TiC; Dry friction; Wear resistant; Wear mechanism

Corresponding author: CUI GongJun, E-mail: cuigongjun@tyut.edu.cn, Fax: +86-351-6018949

The project supported by the Shanxi Scholarship Council of China (No. 2021-060), the Natural Science Foundation of China (No. 51775365), and the Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (No. U1910212).

Manuscript received 20221028, in revised form 20221221.

^{*} 20221028 收到初稿, 20221221 收到修改稿。山西省回国留学人员科研项目 (2021-060), 国家自然科学基金项目 (51775365), 国家自然科学基金联合基金项目 (U1910212) 资助。

^{**} 赵虎成, 男, 1998 年生, 山西吕梁人, 汉族, 太原理工大学机械与运载工程学院硕士研究生, 主要研究方向为机械摩擦学。

^{***} 崔功军 (通信作者), 男, 1981 年生, 山东淄博人, 汉族, 太原理工大学机械与运载工程学院教授, 博士, 主要研究方向为机械摩擦学及表面技术。

0 引言

刮板输送机作为综采机械设备的组成之一,在承担煤料运输作用的同时承受着较大的磨损,这不仅直接影响到采煤工作效率,还极大增加了材料的损耗。特别地,刮板输送机中部槽每年因磨损产生的材料损耗折合资金 50 亿元^[1]。尽管传统合金钢材在复杂严苛的煤炭采运过程中表现出优异的抗磨性,但是高成本却限制了其在工业领域的应用,因此有必要研制新型高性能抗磨材料来替代现有材料,以适应工业应用和经济发展的需要。研究发现,铁基复合材料具有较好的力学性能和抗磨性能,同时考虑到钢铁材料成本低、来源广、储量丰富的特点^[2],因此,着力开发新型铁基抗磨复合材料成为工业发展亟待解决的问题。

近年来,关于铁基复合材料的研究有了一定进展,部分学者通过改变铁合金基体中的成分或含量来材料性能,其中,以硬质硼化物替代碳化物作为耐磨骨架可在提高材料耐磨性的同时降低材料成本^[3],但是脆性相 Fe_2B 的存在会劣化硬质相与铁基体的润湿性,导致材料的韧性降低^[4]。CUI G J 等^[5]制备了 FeCrB 合金,研究发现高硬度的 FeCr 基体和 Fe_2B 的支撑作用提高了材料的耐磨性,但硬质相 Fe_2B 的存在使得 FeCr 基体由韧性材料变为脆性材料,磨损机制主要表现为疲劳剥落。也有学者尝试通过向铁基体中加入陶瓷颗粒并优化其含量以获得良好的材料性能,常见的陶瓷颗粒有 TiC、 SiO_2 、 Al_2O_3 、SiC 等,其中面心立方的 TiC 颗粒以共价键形式结合^[6],具有高硬度、高熔点和低密度,且与铁基体有良好的相容性,故 TiC 常作为铁基复合材料的增强相。XU S H 等^[7]对 TiFe-xTiC 复合材料进行了研究,结果表明,随着 TiC 含量的增加,TiC 尺寸和材料硬度相应增大,显微组织得到细化,抗磨性提高的同时摩擦因数明显降低,但高含量的 TiC 会导致增强相和基体的结合强度降低,致使 TiC 颗粒极易从基体中脱落。耿文霞等^[8]在 1 300 ℃ 的烧结温度下制备了 Fe-25%TiC 复合材料,研究发现增强相和铁基体发生了界面反应,生成的针状物 Ti_8C_5 和 Fe_2C 影响到材料的结合强度进而导致材料硬度下降。董虎林等^[9]通过改变铁基复合材料中 TiC 的含量来研究其力学性能和耐磨性,结果显示加入质量分数 40% TiC 时材料具有最佳的力学性能和耐磨性,TiC 颗粒弥散分布于铁基体中,但是两者结合较差,这归结于烧结温度较低,元素扩散速率较慢,不足以形成良好的界面结合。

颗粒增强铁基复合材料多以显微组织和力学性能研究为主,针对滑动速度和载荷对其摩擦学性能的综

合影响及磨损机制的探讨相对较少。因此本研究选择铁合金作为复合材料基体,加入硬质 TiC 作为增强相,设置对照组后采用真空热压烧结技术制备铁基复合材料,在干摩擦条件下进行摩擦学实验并探究其磨损机制。

1 实验

实验材料为市售的还原 Fe 粉(纯度 98%,粒度 400 目)、Cr 粉(99.5%,200 目)、高纯 B 粉(99.9%,200 目)和 TiC 粉(99%,2~4 μm),按照表 1 制备了 FeCrB 和 FeCrB-4% TiC,分别简记为 T_0 、 T_4 。

将表 1 中的材料称取后球磨混合,球料质量比为 2:1,混料 6 h,转速 300 r/min。将混合均匀的粉末装填于石墨模具中,进行真空烧结制备,升温速率为 10 ℃/min,当炉内温度达到 1 150 ℃时加压 35 MPa,保温保压 35 min 后降温至 900 ℃卸压,随炉冷却至室温。将烧结块切割为 $\phi 30 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ 的圆片,用砂纸对试样表面逐级打磨抛光,之后进行超声清洗、干燥备用。

表 1 试样成分的质量分数

试样 Specimen	Fe	Cr	B	TiC
T_0	84.5	12.0	3.5	0
T_4	80.5	12.0	3.5	4.0

使用 EX324 型电子天平,并依据阿基米德排水法测定试样的实际密度。采用静载压入法(法向载荷 4.9 N,保持时间 10 s)测定 10 次后取其平均值作为试样维氏硬度。使用 CFT-I 型球盘往复式摩擦磨损试验机进行测试,并以 GCr15 钢球($\phi 6 \text{ mm}$, $R_a 0.02 \mu\text{m}$,硬度 63 HRC)配副,往复行程 5 mm。实验环境温度为室温,测试时间为 30 min,测试载荷为 5、10、15、20 N (0.066 m/s),测试速度为 0.033、0.066、0.1、0.133 m/s (10 N),每个实验条件测试 3 次后取平均值作为最后结果,对摩擦因数实时记录。使用 2207 型表面轮廓仪测定磨痕横截面积并计算磨损体积,磨损率由公式 $W = V/(SF)$ 计算。其中, V 为磨损体积, mm^3 ; S 为摩擦距离,m; F 为法向载荷,N。

利用扫描电镜(JEOL-IT300 型)观察磨损形貌和显微结构,通过 X 射线衍射仪(XRD-6100 型)和能谱仪分析试样物相组成和元素分布。

2 结果与讨论

2.1 微观结构

图 1 给出了两试样的 X 射线衍射(X-Ray Diffraction,XRD)图谱。Fe、Cr 原子在烧结过程中发生

固溶反应,Cr 原子可固溶到 Fe 原子晶格中形成固溶体^[10],且式(1)在 500 ~ 3 000 K 范围内 ΔG 为负值^[11],即生成硬质硼化物 Fe_2B ,再加上原子半径相近的 Cr 原子和 Fe 可部分发生置换,因此 T_0 的物相有 $\alpha\text{-Fe}$ 、 FeCr 固溶体及 Fe_2B 、 Cr_2B 。整体上,固溶体和硼化物所产生的固溶强化、弥散强化作用有利于提高材料的硬度。此外, T_4 中还检测到加入的 TiC 相,且未见其他衍射峰,说明 TiC 具有良好的热稳定性;随着 TiC 的加入, $\alpha\text{-Fe}$ 的峰强相对减弱。

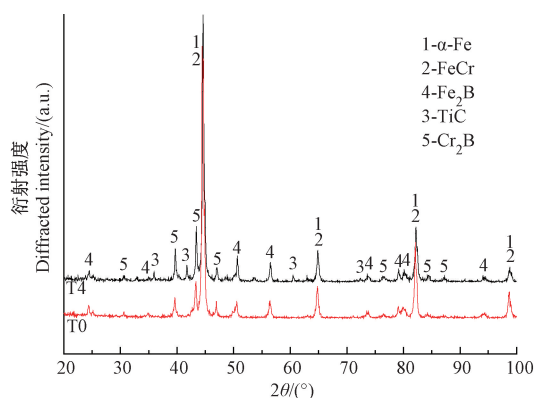


图 1 试样的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of specimens

图 2 所示为复合材料 T_4 的背散射电子图像和元素面分布。观察到试样组织结构较为致密,无明显的裂纹和孔洞,Fe、Cr、C、B 元素分布均匀;结合 XRD 图谱分析,浅色部分对应 FeCr 合金基体,较深颜色部分

对应的硬质硼化物 (Fe_2B 、 Cr_2B) 与铁基体结合紧密,且均匀分布于铁基体中构成材料的耐磨骨架,黑色部分是 Ti 元素的富集区,对应 TiC 增强相。

2.2 物理性能

表 2 给出了两试样的维氏硬度和密度值。由于铁合金基体中加入了低密度 (4.93 g/cm^3) 的 TiC 陶瓷颗粒,故 T_4 的密度略有下降。 T_4 的硬度由于 TiC 的加入由 346 HV 上升至 477 HV,增幅为 37.86%。这是由于高硬度 (3 000 HV) 的 TiC 作为硬质相弥散分布于以硬质硼化物为耐磨骨架的铁基体中,其弥散强化和钉扎作用强化了材料的硬度和强度^{[12]225-235}。

表 2 试样的维氏硬度和密度

Tab. 2 Vickers-hardness and density of specimens

试样 Specimen	维氏硬度 Vickers-hardness/HV	密度 Density/(g/cm^3)
T_0	346	7.07
T_4	477	6.24

2.3 摩擦磨损性能

图 3 给出了两试样摩擦因数随滑动速度和载荷变化的曲线。摩擦因数是摩擦过程中摩擦副接触面之间材料黏着和微观粗糙峰相互作用的综合结果^[13],故摩擦因数与滑动速度、载荷等因素也存在着密切的关系。干摩擦实验中,摩擦热 ($Q = \mu Fv$ ^[14],其中 μ 为摩擦因数; F 为法向载荷; v 为滑动速度) 的产生一定程度上会影响到材料的摩擦因数。总体上,摩擦因数随着滑动速度的增大而减小,这是因为摩擦热的产生导致材料发生了热软化,而材料剪应力降低又会导致材料摩

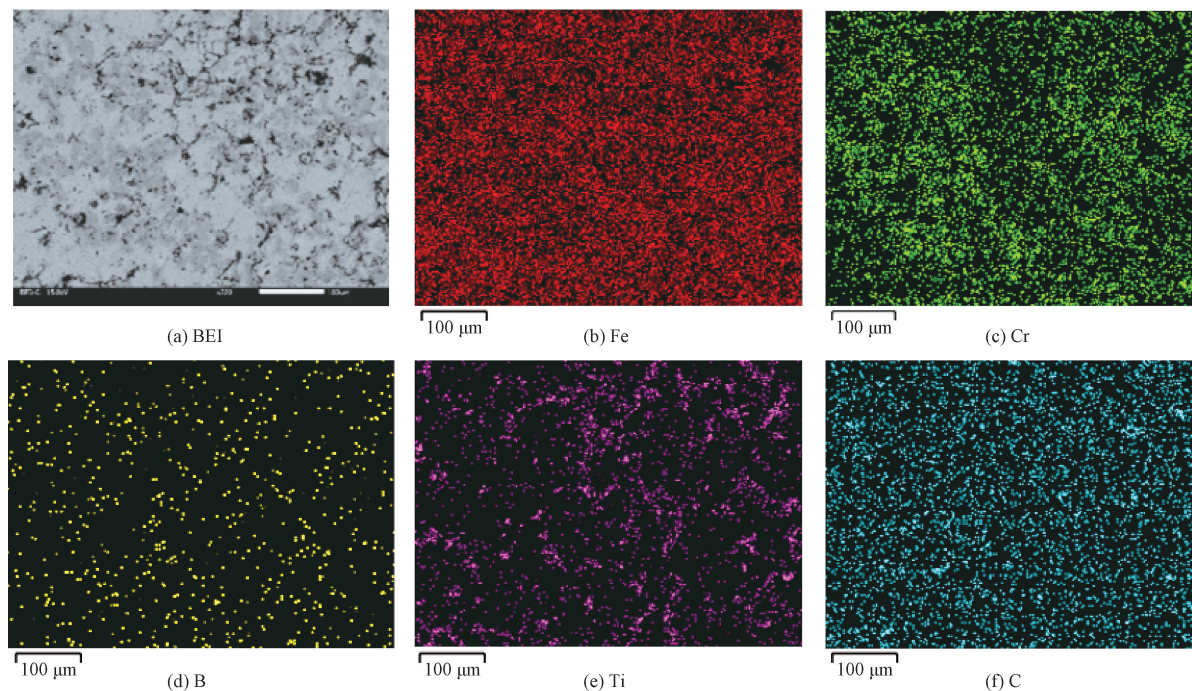


图 2 T_4 的背散射电子图像及元素面分布

Fig. 2 Back scattered electron map and surface element distribution of T_4

摩擦因数降低^[15]。图 3(b) 中摩擦因数随着载荷的增加先减小后增大,这是因为载荷较小时,摩擦副之间的微观粗糙峰难以被磨平而导致其啮合作用较强,摩擦因数较高。载荷 15 N 时摩擦因数为 0.445,此时材料表面微观粗糙峰之间的相互作用减弱,摩擦副之间的实际接触面积增大并趋于稳定,因此摩擦因数较低。而

随着载荷继续增大,由摩擦产生的热效应和摩擦振动随之加剧,使摩擦因数增大^{[13]1-7}。在摩擦学实验中 T_4 摩擦因数总体低于 T_0 ,这是由于 TiC 颗粒对铁基体的钉扎作用可以有效抑制材料剥落和硬质相的嵌入,且在克服磨屑和微观粗糙峰犁削作用的同时降低了材料发生黏着的可能性。

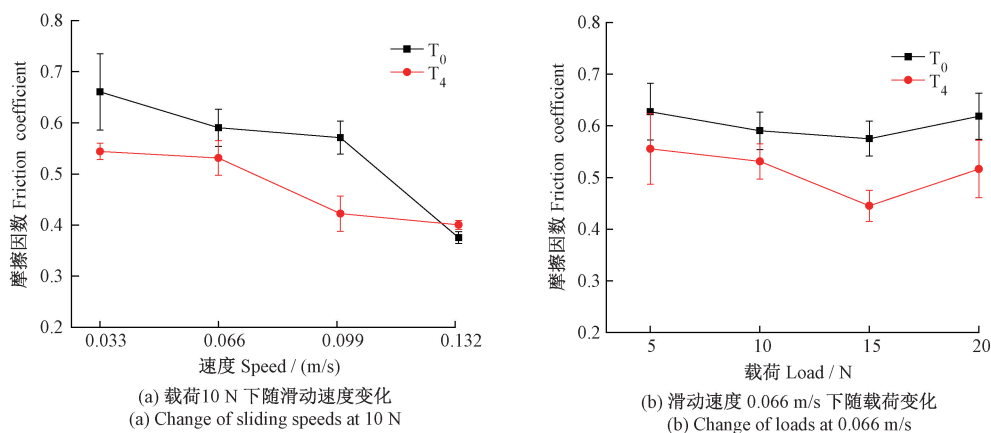


图 3 试样的摩擦因数变化曲线

Fig. 3 Variation curve of friction coefficients of specimens

图 4 给出了两试样的磨损率变化曲线。数据显示, T_0 和 T_4 的磨损率呈相同的变化趋势,即磨损率随着滑动速度和载荷的增加而增加,这是因为速度和载荷的增加必然会导致更多摩擦热的产生,而材料的热软化效应会严重削弱材料的硬度和抗塑性形变能力^[16],因此在较大的速度和载荷条件下,材料亚表层

所产生的剪切变形会更容易累积而形成微裂纹^{[17]1-9}。之后裂纹扩展并在外力作用下以片状磨屑的形式剥落下来,并在摩擦副的相互碾压过程中破裂成为颗粒状磨屑,从而加剧材料的磨损, T_4 的最大磨损率分别为 6.587×10^{-6} 、 $8.07 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 / (\text{N} \cdot \text{m})$ 。

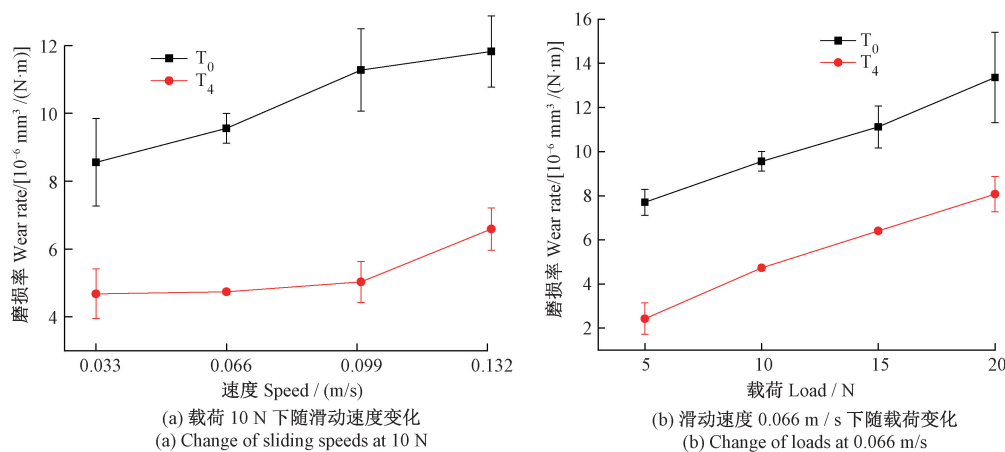


图 4 试样的磨损率变化曲线

Fig. 4 Variation curve of wear rates of specimens

T_4 是由铁合金基体和 TiC 陶瓷颗粒经过组分优化复合而成的具有良好强韧匹配性的材料。在磨损初期,材料表面较软的铁基体在与硬质对磨球的摩擦过程中首先剥离下来成为磨屑。在磨损中期,随着较多的铁基材料成为磨屑,弥散分布的 TiC 颗粒逐渐裸露于磨损表面,由于下凹的铁基体牢牢支撑着 TiC 颗粒,此时其支持力远大于摩擦过程中微凸体施加于 TiC 颗

粒摩擦方向的切向力。因此, TiC 颗粒不易被外力折断或者脱落,而 TiC 颗粒则抵抗着来自磨粒和对磨球表面微凸体的犁削,并且 TiC 颗粒的钉扎作用阻碍了位错运动,有效抑制了材料亚表层裂纹扩展的趋势^{[12]225-235},降低了材料剥落的可能性。这种“阴影效应”和“支撑作用”^[18]的相互作用使 T_4 表现出良好的抗磨损性能。到磨损后期,随着铁基材料磨损增加,基

体对 TiC 的支持作用不足以抵抗摩擦过程中 TiC 所受到的切向力,因此部分 TiC 颗粒会脱落成为磨屑而参与磨损,从而加剧材料的磨损。

2.4 磨损机制

图 5 所示是滑动速度为 0.066 m/s 时两试样在不同载荷下的磨损表面形貌。由图 5 可以看出,在较低载荷条件下,两材料的磨损表面均存在大面积未被磨掉的黑色片状层, T_0 表面有较多的粒状磨屑,且黑色片状层的边缘有较多的微观裂纹存在。其主要原因是脆性相 Fe_2B 的晶胞在 $[002]$ 位向上的 B-B 空间键结合能弱,在受到外力作用后极易发生断裂^[19]。故材料亚表层在循环应力作用下会产生周期

性位错并不断累积而形成微观裂纹,随后裂纹继续扩展直至材料以片状磨屑的形式脱落下来^{[17]1-9},并在之后的摩擦过程中被碾压形成粒状磨屑而参与磨损。 T_4 材料由于增强相 TiC 弥散分布于铁基体中,其钉扎作用和弥散强化作用不仅保护了基体,还提高了材料的硬度和抗塑性变形能力,使得形成于亚表层的微观裂纹的扩展受到抑制,因此 T_4 材料剥落较轻,其磨损表面相对平整。 T_0 和 T_4 在较低载荷条件下的磨损机制主要表现为剥层磨损并伴随轻微磨粒磨损。在较高载荷作用下, T_0 和 T_4 磨损表面上的黑色片状层分布相对减少,且均有大量磨屑和鱼鳞状的剥落痕迹,剥层磨损加剧。

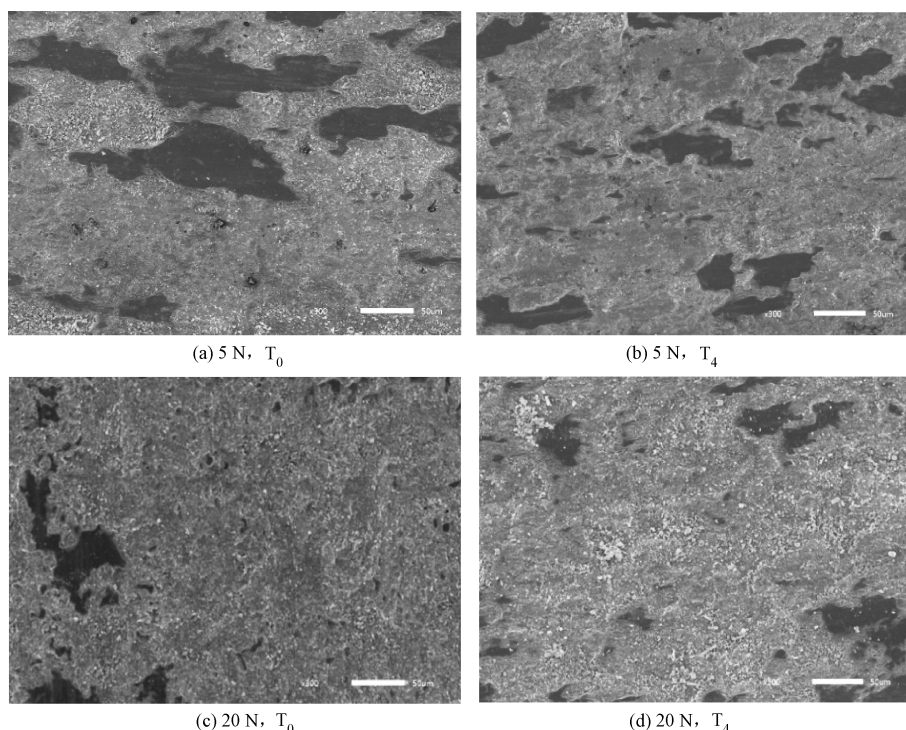


图 5 0.066 m/s 时 T_0 和 T_4 在不同载荷条件下的磨损表面扫描电子显微镜图像

Fig. 5 Scanning electron microscope image of worn surfaces of T_0 and T_4 with different loads at 0.066 m/s

图 6 是载荷为 10 N 时两试样在不同速度条件下的磨损表面形貌。滑动速度较低时, T_0 表面粗糙,存在大量的粒状磨屑及少量黑色片状层,磨损机制表现为剥层磨损和磨粒磨损; T_4 表面有少量的粒状磨屑、片状剥落磨屑,此外较多黑色片状层表面存在少量细而浅的划痕,相较 T_0 , T_4 表现为轻微的剥层磨损和磨粒磨损。在较高滑动速度条件下, T_0 和 T_4 磨损情况相同,均存在鱼鳞状剥落痕迹和较多磨粒,磨损机制表现为严重的剥层磨损和磨粒磨损。

3 结论

通过以上分析,得出结论如下:

1) 利用热压烧结技术制备了质量分数 4% TiC 强

化的 $FeCrB$ 基复合材料,其物相包括 $\alpha-Fe$ 、 $FeCr$ 、 Cr_2B 、 Fe_2B 、TiC,各物相分布均匀,烧结过程中 TiC 未与其他元素发生反应。TiC 的加入显著提高了材料硬度,增幅为 37.86%。

2) 在干摩擦实验中,摩擦因数随滑动速度的增加而降低,随载荷的增加先降低后升高;磨损率随着滑动速度和载荷增大而增大。综合比较, T_4 具有良好的抗磨性能。

3) 综合分析, T_0 和 T_4 在干摩擦实验中表现出相同类型的磨损机制,即剥层磨损和磨粒磨损,但在较大的速度和载荷条件下两材料所表现出的剥层磨损和磨粒磨损情况加剧。

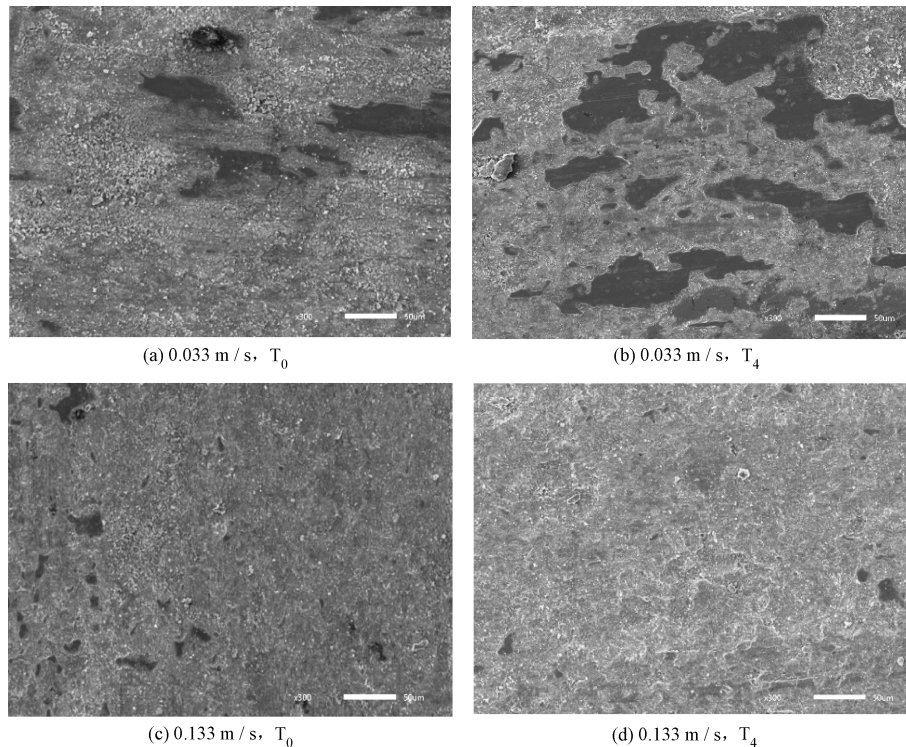


图 6 载荷为 10 N 时 T_0 和 T_4 在不同滑动速度条件下的磨损表面扫描电子显微镜图像

Fig. 6 SEM image of worn surfaces of T_0 and T_4 with different sliding speeds at 10 N

参考文献 (References)

- [1] 朱秀光, 邱 涵, 穆润青, 等. 煤矿刮板输送机中板失效分析[J]. 铸造技术, 2021, 42(7): 617-620.
ZHU XiuGuang, QIU Han, MU RunQing, et al. Failure analysis of middle plate of scraper conveyor in coal mine [J]. Foundry Technology, 2021, 42(7): 617-620 (In Chinese).
- [2] 庞雅丹. TiC/NbC 陶瓷颗粒增强 Fe 基复合材料的制备及性能研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020: 1-13.
PANG YaDan. Preparation and properties of TiC/NbC ceramic particle reinforced Fe-based composites[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020: 1-13 (In Chinese).
- [3] 田 野, 符寒光. Fe-Cr-B 耐磨合金研究进展[J]. 中国铸造装备与技术, 2018(3): 5-11.
TIAN Ye, FU HanGuang. Development of Fe-Cr-B wear-resistant alloys[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2018(3): 5-11 (In Chinese).
- [4] 王文强, 李艳梅, 邓想涛. 高硼铁基耐磨合金的研究现状[J]. 金属材料与冶金工程, 2022, 50(2): 3-11.
WANG WenQiang, LI YanMei, DENG XiangTao. Research status of high boron iron-based wear-resistant alloy [J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2022, 50(2): 3-11 (In Chinese).
- [5] CUI G J, WEI J, WU G X. Wear behavior of Fe-Cr-B alloys under dry sliding condition [J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2015, 67(4): 336-343.
- [6] 肖琪 equal, 周 峰, 吴 珊. 无压熔渗制备 TiC/Ti₃SiC₂ 复合材料高速载流摩擦磨损性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(10): 2832-2840.
XIAO QiDan, ZHOU Feng, WU Shan. Current-carrying friction and wear characteristics of TiC/Ti₃SiC₂ composites under high speed by infiltration sintering [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(10): 2832-2840 (In Chinese).
- [7] XU S H, QIU J W, ZHANG H B, et al. Friction behavior of Ti-30Fe composites strengthened by TiC particles [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2021, 31(4): 988-998.
- [8] 耿文霞, 王秋林, 万 斌, 等. TiC_p/Fe 复合材料的界面反应[J]. 粉末冶金工业, 2020, 30(4): 51-56.
GENG WenXia, WANG QiuLin, WAN Bin, et al. Research on interfacial reaction of TiC_p/Fe composites [J]. Powder Metallurgy Industry, 2020, 30(4): 51-56 (In Chinese).
- [9] 董虎林, 包海萍, 彭建洪. TiC 含量对铁基复合材料力学性能及耐磨性能的影响[J]. 金属学报, 2019, 55(8): 1049-1057.
DONG HuLin, BAO HaiPing, PENG JianHong. Effect of TiC contents on mechanical properties and wear resistance of iron-based composites [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(8): 1049-1057 (In Chinese).
- [10] 翁子清, 胡兰伟, 刘 平, 等. 真空气雾化制备激光熔覆用 Fe55 合金粉末研究[J]. 应用激光, 2019, 39(3): 370-375.
WENG ZiQing, HU LanWei, LIU Ping, et al. Study on preparation of Fe55 powder for laser cladding by vacuum gas atomization [J]. Applied Laser, 2019, 39(3): 370-375 (In Chinese).
- [11] 蔡玮 equal, 邵 帅, 吴来军. 低合金钢表面 Fe 基 B₄C 耐磨涂层组织与性能[J]. 表面技术, 2018, 47(2): 130-135.
CAI WeiWei, SHAO Shuai, WU LaiJun. Microstructure and properties of Fe-based B₄C wear-resistant coating on 16Mn steel [J]. Surface Technology, 2018, 47(2): 130-135 (In Chinese).
- [12] 吴 军, 金 杰, 朱冬冬, 等. TiC 添加量对高能激光熔覆 Inconel718 基陶瓷涂层显微组织和摩擦磨损性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(9): 225-235.
WU Jun, JIN Jie, ZHU DongDong, et al. Effect of TiC content on

- microstructure, friction and wear properties of Inconel718 based ceramic coatings prepared by high energy laser cladding[J]. Surface Technology, 2021, 50(9): 225-235 (In Chinese).
- [13] 赵虎成. FeCrB-TiC 复合材料的摩擦学性能研究[D]. 太原:太原理工大学,2023:1-7.
ZHAO HuCheng. Study on tribological properties of FeCrB-TiC composites[D]. Taiyuan:Taiyuan University of Technology,2023:1-7(In Chinese).
- [14] JIA B B, LI T S, LIU X J, et al. Tribological behaviors of several polymer-polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions[J]. Wear, 2007, 262(11/12): 1353-1359.
- [15] 杜 洋, 吕晓仁, 李述军. 钛合金干摩擦磨损及减磨方法研究进展[J]. 金属材料与冶金工程, 2021, 49(1): 30-37.
DU Yang, LÜ XiaoRen, LI ShuJun. Research progress on dry friction and wear of titanium alloys and wear reduction methods[J]. Metal Materials and Metallurgy Engineering, 2021, 49(1): 30-37 (In Chinese).
- [16] 刘吉宇, 张 帆, 陈 阳, 等. 低温等离子体辅助加工综述[J]. 航空学报, 2021, 42(10): 67-79.
- LIU JiYu, ZHANG Fan, CHEN Yang, et al. Low-temperature plasma assisted machining: a review [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10):67-79 (In Chinese).
- [17] 谢长钊. 活塞用 Cu、Ni 增强型铝合金力学性能、组织与磨损性能[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017: 1-9.
XIE ChangZhao. Mechanical properties, microstructure and wear properties of Cu and Ni reinforced aluminum alloy for piston[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2017: 1-9 (In Chinese).
- [18] LI C, LI Y F, SHI J, et al. Interfacial characteristics and wear performances of iron matrix composites reinforced with zirconia-toughened alumina ceramic particles [J]. Ceramics International, 2022, 48(1): 1293-1305.
- [19] 赵紫强. 石墨烯对无渣自保护药芯焊丝力学性能的影响[D]. 镇江:江苏科技大学,2022:1-4.
ZHAO ZiQiang. Graphene for slag-free self-shielded flux-cored wire the effect of mechanical properti[D]. Zhenjiang:Jiangsu University of Technology ,2022:1-4(In Chinese).