

MXene/铜合金复合材料的制备与性能研究

司晓阳, 陈凡燕, 邓启煌, 都时禹, 黄 庆

(中国科学院 宁波材料技术与工程研究所 特种纤维与核能材料工程实验室, 宁波 315201)

摘 要: 采用分子级混合方法及 SPS 烧结技术制备了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量分别为 5vol%、10vol% 和 20vol% 的 $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料, 研究了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量对铜基复合材料的导电性、力学性能及摩擦磨损性能的影响。研究发现: 随 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量增加, $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料的相对密度及电导率均持续下降, 拉伸强度则先升高后下降; 当 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量为 5vol% 时, $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料的拉伸强度相比纯铜提高了 43%。添加 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 可以明显改善 $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料的摩擦磨损性能, 当 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量为 10vol% 时, $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料的磨损率仅为 $2.55 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 比纯铜降低了一个数量级。

关 键 词: $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$; 铜基复合材料; 导电; 摩擦磨损

中图分类号: TB333 文献标识码: A

Preparation and Property of MXene/Copper Alloy Composites

SI Xiao-Yang, CHEN Fan-Yan, DENG Qi-Huang, DU Shi-Yu, HUANG Qing

(Engineering Laboratory of Specialty Fibers and Nuclear Energy Materials (FiNE), Ningbo Institute of Industrial Technology, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)

Abstract: $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ composites with $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ content of 5vol%, 10vol% and 20vol% were prepared by using a molecular-level mixing process and spark plasma sintering (SPS). Influence of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ content on electrical, mechanical and tribological properties was investigated. The result showed that relative density and electrical conductivity of $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ composites gradually decreased with the $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ content increase, while the tensile strength of $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ composites increased at first and then decreased. When the $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ content was 5vol%, the tensile strength of $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ composites increased by 43% than that of pure copper. Tribological properties of $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ composites were enhanced by the addition of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$. When the $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ content was 10vol%, the wear rate of $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ composites was $2.55 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, which was one magnitude lower than that of pure copper.

Key words: $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$; copper matrix composites; electrical conductivity; friction and wear

铜及铜合金具有良好的塑性和韧性, 优异的导电导热性, 易于加工成型和强耐腐蚀性, 被广泛应用于电子电气、机械交通、能源、航空航天及国防工业等领域。但是它的强度低、耐磨性能差等缺点限制了其发展。层状材料(如石墨烯、 MoS_2 、BN 等)因具有特殊的结构和性能, 被大量应用于改善铜基复合材料的性能^[1-4]。Chen 等^[5]通过分子级混合技术

制备了石墨烯分散均匀的铜/石墨烯复合材料, 通过添加石墨烯可以明显改善复合材料的力学及摩擦磨损性能。

MXenes 材料是一种近年来发展起来的二维层状结构的前过渡金属碳化物和碳氮化合物, 对应的三元体相材料为 MAX 相^[6]。MAX 相是一种三元层状结构碳化物或氮化物材料, 其结构通式为 $\text{M}_{n+1}\text{AX}_n$

收稿日期: 2017-06-12; 收到修改稿日期: 2017-12-10

基金项目: 宁波市石墨烯重大专项(2014S10001) Ningbo Municipal Key Project (2014S10001)

作者简介: 司晓阳(1991-), 女, 硕士研究生. E-mail: sixiaoyang@nimte.ac.cn

通讯作者: 黄 庆, 研究员. E-mail: huangqing@nimte.ac.cn

($n=1, 2$ 或 3), 其中 M 代表前过渡金属元素, A 代表主族元素(主要是 III, IV 族元素), X 代表碳元素或氮元素, 目前已发现的 MAX 材料已超过 70 种^[7-8], 而 MXenes 材料是将 MAX 相中 A 位元素抽出所形成的二维材料, 其通式为 $M_{n+1}X_n$ ($n=1, 2$ 或 3)^[9]。MXenes 材料通常是在水溶液中选择性刻蚀获得的, 这使得 MXenes 材料表面往往含有大量 $-OH$ 、 $-F$ 等官能团, 所以 MXenes 材料又记为 $M_{n+1}X_nT_x$ (T 表示 $-OH$ 、 $-F$ 等官能团, x 表示官能团数目)^[10-11]。研究表明大部分 MXenes 材料具有金属导电性, 良好的力学和减磨性能^[12-14], 而 $Ti_3C_2T_x$ 作为研究最多的 MXenes 材料, 已被应用于多种树脂基复合材料。Shahzad 等^[15]制备的 $Ti_3C_2T_x$ -SA(海藻酸钠)复合材料表现出良好的电磁屏蔽效应; Cao 等^[16]研究发现在聚偏二乙烯中添加 5wt% 的 $Ti_3C_2T_x$ 可以使其复合材料的储能模量提高 64%; Zhang 等^[17]研究发现在高分子复合材料中添加 $Ti_3C_2T_x$ 可以改善复合材料的导热性、力学性能及耐磨性能。然而, 在铜基复合材料领域还鲜有以 $Ti_3C_2T_x$ 为增强相的报道。

本工作通过分子级混合工艺及 SPS 烧结技术制备 $Cu/Ti_3C_2T_x$ 复合材料, 初步探索了 $Ti_3C_2T_x$ 含量对铜基复合材料的力学、电学及摩擦磨损性能的影响。

1 实验方法

1.1 实验原料

Ti 粉(99.9%, 48 μm)及 Al 粉(99.9%, 48 μm)采购自北京有色金属研究总院; 鳞片石墨(99.9%, 300 目)购自青岛天盛达石墨有限公司; 三水合硝酸铜($Cu(NO_3)_3 \cdot 3H_2O$, AR)、葡萄糖($C_6H_{12}O_6$, AR)及氢氧化钠($NaOH$, AR)均购自上海阿拉丁生化科技有限公司; 氯化钠($NaCl$, AR)、氯化钾(KCl , AR)及氢氟酸(HF , $\geq 40\text{wt}\%$, AR)购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 复合材料制备

1.2.1 $Ti_3C_2T_x$ 材料制备

采用熔盐法直接合成了 Ti_3AlC_2 粉体, 具体工艺过程如下: 将 Ti、C、Al 的元素粉按摩尔比为 3.0:2.0:1.2 放入 $NaCl-KCl$ (1:1, mol/mol) 熔盐体系中, 并混合均匀; 将含熔盐的混合粉体置于 1100 $^{\circ}C$ 下 Ar 气氛中充分反应, 反应完毕后取出反应产物, 用去离子水多次洗涤后烘干, 即得 Ti_3AlC_2 粉体。

取一定量的 Ti_3AlC_2 粉体, 放在 40vol% 的 HF 酸溶液中, 室温下震荡浸泡两周, 经多次洗涤后真空烘干, 即得 $Ti_3C_2T_x$ 粉体材料。

1.2.2 $Cu/Ti_3C_2T_x$ 复合材料制备

采用分子级混合工艺制备 $Cu/Ti_3C_2T_x$ 复合材料

粉体, 具体工艺过程如下: (1)对含有 $Ti_3C_2T_x$ 的铜盐的乙醇溶液磁力搅拌 3 h; (2)加入葡萄糖溶液继续搅拌 2 h; (3)在超声作用下缓慢加入氢氧化钠溶液; (4)在 60 $^{\circ}C$ 下保温反应 4 h, 经多次洗涤后干燥、还原即得 $Cu/Ti_3C_2T_x$ 复合材料粉体; (5)采用 SPS 烧结块体 $Cu/Ti_3C_2T_x$ 复合材料, 烧结温度为 800 $^{\circ}C$, 升温速率为 50 $^{\circ}C/min$, 保温时间为 5 min, 保温压力为 35 MPa, 降温时压力升至 40 MPa。

1.3 测试方法

采用 D8 Advance 型 X 射线分析仪及 FEG 250 型扫描电子显微镜对 $Ti_3C_2T_x$ 、 $Cu/Ti_3C_2T_x$ 的物相及微观形貌进行分析。利用 InVia-reflex 型拉曼光谱仪及 FD-120 涡流电导仪分别对 $Cu/Ti_3C_2T_x$ 复合材料进行拉曼分析及导电性测试。 $Cu/Ti_3C_2T_x$ 复合材料的拉伸强度在 XQ-1 型纤维强度仪上进行测试。 $Cu/Ti_3C_2T_x$ 复合材料摩擦性能在 UMT-3 高真空摩擦磨损试验机上进行测试, 实验条件为: 将 3 mm 大小的 Al_2O_3 球作为对立面球, 摩擦运动长度为 5 mm, 滑动速度为 0.05 m/s, 施加负载为 5 N, 持续时间为 30 min, 测试环境湿度为 60%, 温度为 16 $^{\circ}C$ 。借助于台阶仪计算摩擦实验磨损率, 利用台阶仪对磨痕横截面进行扫描, 得到磨痕截面轮廓图。通过对磨痕轮廓积分可得磨痕截面面积 A , 将截面面积 A 带入公式(1)即可得到样品的磨损率 I 。

$$I=(A \cdot l)/(N \cdot L) \quad (1)$$

其中: l 是磨痕长度, L 是摩擦距离, N 是加载载荷。

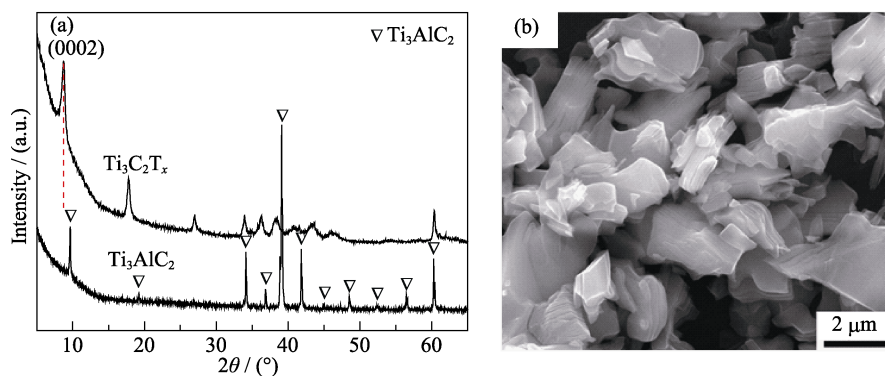
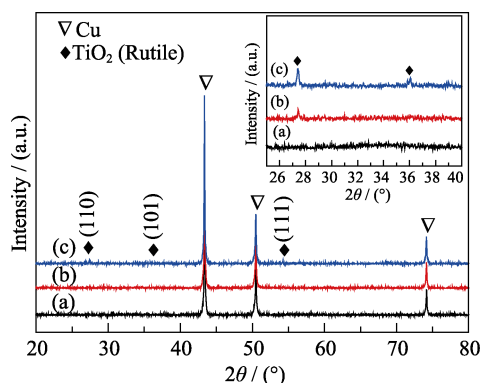
2 结果与讨论

2.1 物相及微观形貌

图 1 为 $Ti_3C_2T_x$ 的 XRD 图谱与 SEM 照片。由图 1(a)可知, 经 HF 刻蚀后, Ti_3AlC_2 相的低位峰向左偏移, 说明随着 Al 原子被抽出, Ti_3AlC_2 相腐蚀产物的层间距变大。在 $2\theta=8^{\circ}$ 左右出现的(0002)衍射峰对应 $Ti_3C_2T_x$ 相的特征衍射峰。由图 1(b)可观察到大量层状堆叠的 $Ti_3C_2T_x$ 片。

图 2 为 $Cu/Ti_3C_2T_x$ 复合材料块体的 XRD 图谱, 由图可以看出, 当 $Ti_3C_2T_x$ 含量为 5vol% 时, 只有 Cu 的 XRD 衍射峰; 随着 $Ti_3C_2T_x$ 含量增加, 逐渐出现 TiO_2 相衍射峰; $Ti_3C_2T_x$ 含量越高, TiO_2 相的衍射峰强度越强。这是由 $Ti_3C_2T_x$ 在粉体制备的碱性环境中氧化形成的。而所有样品中均为未检测到 $Ti_3C_2T_x$ 相的衍射峰, 这是由于 Cu 基底的 XRD 衍射峰太强, 将其掩盖造成的。

图 3 为 $Cu/Ti_3C_2T_x$ 复合材料的断面微观形貌。由图 3(a)、(b)和(c)可知, $Ti_3C_2T_x$ 在铜基体中均匀分布,

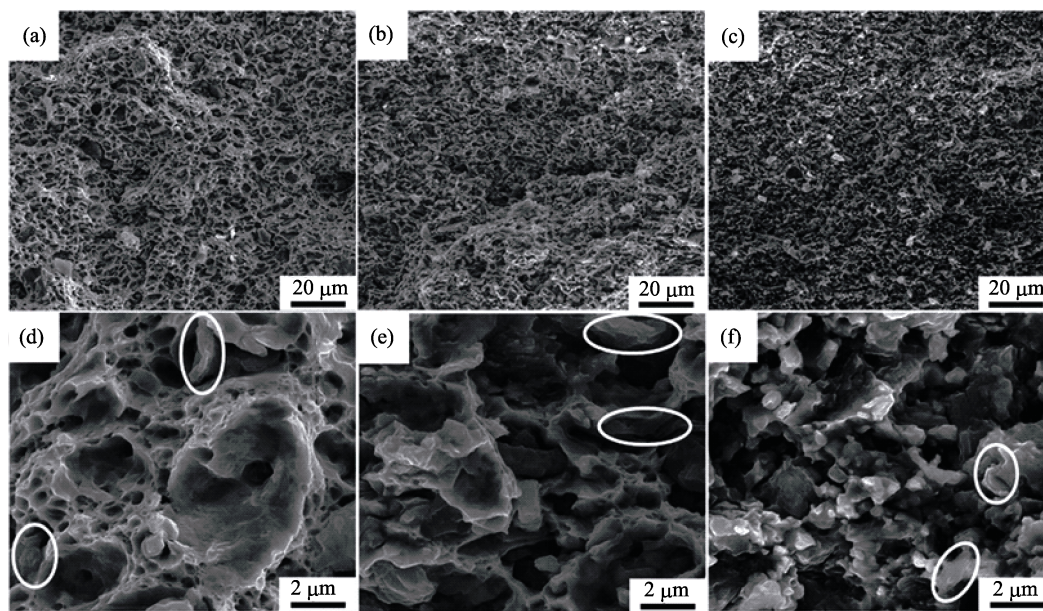
图 1 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的 XRD 图谱(a)与 SEM 照片(b)Fig. 1 XRD pattern (a) and SEM image (b) of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 图 2 块体 $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料的 XRD 图谱Fig. 2 XRD patterns of $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ bulk composites(a) $\text{Cu}/5\text{vol}\% \text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$; (b) $\text{Cu}/10\text{vol}\% \text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$; (c) $\text{Cu}/20\text{vol}\% \text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$

随着 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量增加, 断面形貌中韧窝数量逐渐减少, 说明 $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料的塑性逐渐变差。

由图 3(d)、(e)和(f)可知, 随着 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量增加, 断面形貌中气孔增多, 说明 $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料的致密性逐渐降低。由图 3(f)中可观察到大量白色颗粒状物质, 结合 XRD 分析其为金红石 TiO_2 。另外, 图 3 中 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 形貌与图 1 中 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 表现出明显不同。图 1 中原始 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 为“书页”状层状分离形貌, 且 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 片表面光滑; 而图 3 中 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 中层状分离结构消失, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 表面粗糙。这种结构形貌的转化与复合材料制备过程中 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 材料表面官能团的变化及烧结过程中与铜的相互作用有关。

2.2 性能分析

图 4 为 $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料的电导率及相对密度随 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量的变化曲线。由图 4 可知, 随着 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 含量增加, $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料的相对密度及

图 3 $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 复合材料断面的 SEM 照片Fig. 3 SEM images of $\text{Cu}/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ composites(a, d) $\text{Cu}/5\text{vol}\% \text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$; (b, e) $\text{Cu}/10\text{vol}\% \text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$; (c, f) $\text{Cu}/20\text{vol}\% \text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$

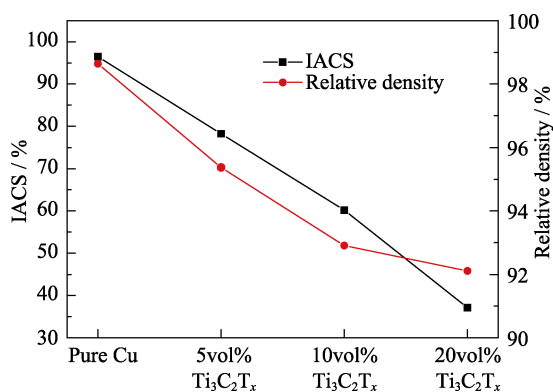


图 4 Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的相对密度及电导率随 Ti₃C₂T_x 含量的变化曲线

Fig. 4 Electrical conductivity and relative density of Cu/Ti₃C₂T_x composites as a function of Ti₃C₂T_x content

电导率逐渐降低。Ti₃C₂T_x 含量为 5vol% 时, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的 IACS(国际退火铜标准(缩写 IACS)规定的电阻率(体积或质量)与相同单位的试样电阻率之比)电导率有 80%; 当 Ti₃C₂T_x 含量增加为 20vol% 时, 复合材料的 IACS 电导率下降为 37%。增强相的导电性、含量及复合材料相对密度直接影响着金属基复合材料的导电性^[18-19]。随着 Ti₃C₂T_x 含量增加, 复合材料致密性变差, 存在的大量气孔降低了复合材料的导电性; 相对铜基体 Ti₃C₂T_x 本身的导电性差, 而 Ti₃C₂T_x 含量越高时, 铜基体结构破坏越严重, 阻断了基体结构中的电子传输。另外, 随着 Ti₃C₂T_x 含量增加, 复合材料中 TiO₂ 含量增加, 生成的 TiO₂ 进一步恶化了复合材料的导电性。

图 5 为不同 Ti₃C₂T_x 含量的 Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的应力-应变曲线图。由图 5 可知, 纯铜呈典型的塑性断裂, 其断裂延伸率超过 30%。所有 Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料样品均未表现出屈服现象, 呈明显脆性断裂。随着 Ti₃C₂T_x 含量增加, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的延伸率逐渐降低, 而拉伸强度则呈先升高后降低的变化趋势。当 Ti₃C₂T_x 含量为 5vol% 时, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的最大拉伸应力为 390 MPa, 相比纯铜提高了 44%; 而 Ti₃C₂T_x 含量为 20vol% 时, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的最大拉伸应力不足 175 MPa, 低于纯铜的最大拉伸应力, 此时复合材料的力学性能已被严重恶化。结合图 3(d)分析可知, 在拉伸过程中 Ti₃C₂T_x 有被拔出迹象, 故 Ti₃C₂T_x 可以起到一定的增强作用。当 Ti₃C₂T_x 含量增加时, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的基体结构被破坏, 导致铜基体无法有效地承载载荷, 从而造成复合材料性能恶化。另外, 当 Ti₃C₂T_x 含量增加时, 复合材料中气孔及杂相 TiO₂ 含量增加, 进一步造成了 Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的力学性能恶化。

图 6 为 Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的摩擦系数随滑移时间的变化, 由图 6 可知, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的摩擦系数呈先减小后增大的变化趋势。当 Ti₃C₂T_x 含量为 5vol% 时, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的摩擦系数最小约为 0.26; 当 Ti₃C₂T_x 含量为 20vol% 时, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的摩擦系数略高于纯铜样品的摩擦系数。由表 1 可知, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的磨损率随着 Ti₃C₂T_x 含量的增加先减小后增大。当 Ti₃C₂T_x 含量为 10vol% 时, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的磨损率最小, 为 $2.55 \times 10^{-7} \text{ mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$, 比纯铜样品的磨损率小一个数量级。以上结果表明: Ti₃C₂T_x 含量为 10vol% 时, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料表现出最好的耐磨性, 即在铜基复合材料中添加适量 Ti₃C₂T_x 可以提高复合材料的耐磨擦磨损性能。

图 7 为 Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料磨痕微观形貌, 样品表面可以观察到由犁削造成的划痕, 这是由对磨材料 Al₂O₃ 的表面凸起在摩擦运动中割据复合材料表面造成的。图 7(a)中纯铜样品表面有大量微裂纹, 表层材料呈块状脱落, 这是因为摩擦运动是反反复复

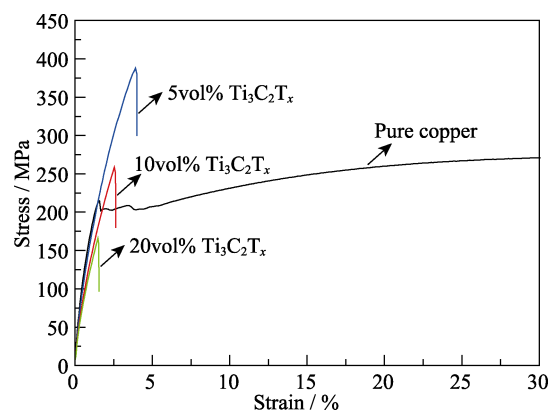


图 5 Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的应力-应变曲线图

Fig. 5 Stress-strain curves of Cu/Ti₃C₂T_x composites

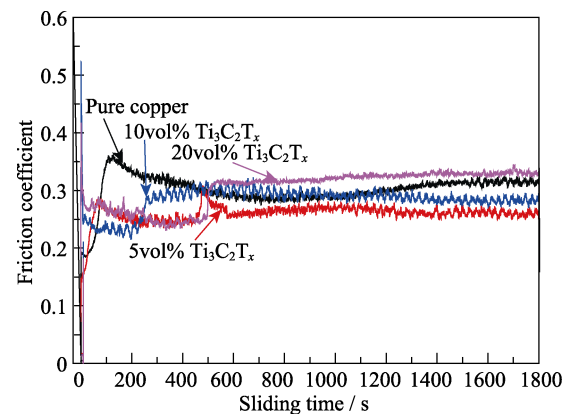


图 6 Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的摩擦系数随滑移时间的变化

Fig. 6 Change of friction coefficients for Cu/Ti₃C₂T_x composites with sliding time

表 1 Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的磨损率
Table 1 Width of wear tracks and wear rates of Cu/Ti₃C₂T_x composites

Sample ID	Wear rate/(mm ³ ·N ⁻¹ ·m ⁻¹)
Pure copper	3.79×10 ⁻⁶
5vol% Ti ₃ C ₂ T _x	2.25×10 ⁻⁶
10vol% Ti ₃ C ₂ T _x	2.55×10 ⁻⁷
20vol% Ti ₃ C ₂ T _x	4.98×10 ⁻⁶

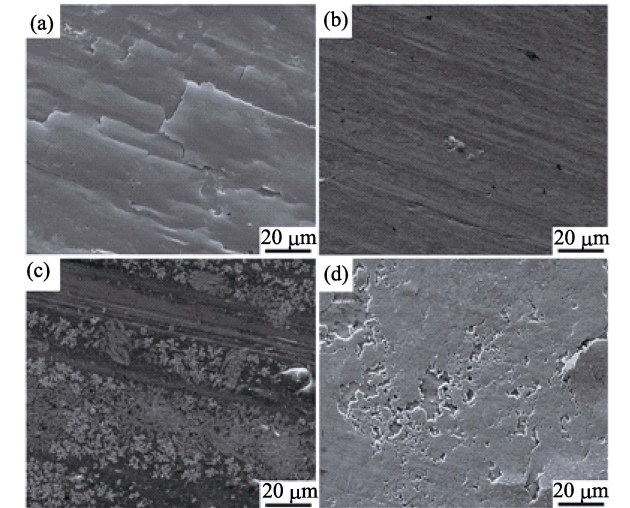


图 7 Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的磨痕微观形貌
Fig. 7 SEM images of the wear tracks of Cu/Ti₃C₂T_x composites
(a) Cu; (b) Cu/5vol% Ti₃C₂T_x; (c) Cu/10vol% Ti₃C₂T_x; (d) Cu/20vol% Ti₃C₂T_x

载-卸载的循环过程,当循环应力超过纯铜表层材料的极限疲劳强度时,在表层材料应力集中区域产生微裂纹并扩展,最终导致表层材料剥离脱落。图 7(b)与(c)中样品表面光滑,仅有少量因粘着磨损造成的脱落,并且图 7(c)中复合材料表面可观察到大量 Ti₃C₂T_x,在施加压力作用下层状 Ti₃C₂T_x 会随着滑移运动发生变形,由于非化学计量比 TiC 与铜有较好的润湿性^[20],剥离的 Ti₃C₂T_x 在摩擦表面堆积形成润滑膜,从而起到一定的减磨润滑作用,所以 Cu/10vol% Ti₃C₂T_x 复合材料表现出最低的磨损率。图 7(d)中样品表面有大量微裂纹和因表层材料脱落而留下的空洞,说明复合材料的磨损程度加剧。由 Cu/20vol% Ti₃C₂T_x 复合材料磨痕处的拉曼分析结果(见图 8)可知,在摩擦样品表面可以检测到 Ti-C 振动峰^[9],说明摩擦样品表层中仍然存在 Ti₃C₂T_x。另外在样品表层可检测到较强的 A(Ti-O)和 R(Ti-O) 振动峰^[21-22],说明摩擦产物中存在大量 TiO₂。由于摩擦前样品的 XRD 图谱只检测到金红石 TiO₂,所以锐钛矿 TiO₂ 应该是在摩擦中产生的。摩擦中生成的大量 TiO₂ 加剧了 Cu/Ti₃C₂T_x 的磨损过程,所以 Cu/20vol% Ti₃C₂T_x 复合材料表现出较高的磨损率。

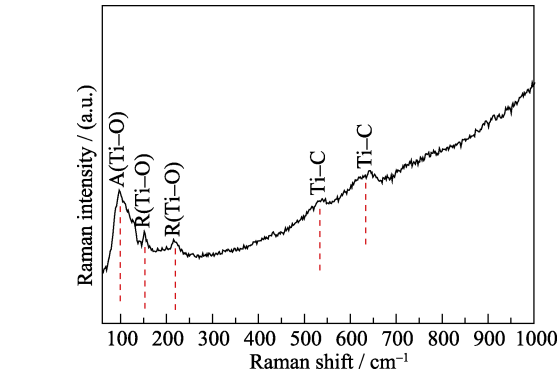


图 8 Cu/20vol% Ti₃C₂T_x 复合材料样品磨痕处的拉曼图谱
Fig. 8 Raman spectra of Cu/20vol% Ti₃C₂T_x composites at the wear track

3 结论

通过对不同 Ti₃C₂T_x 含量的 Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的微观形貌、导电性、拉伸性能及摩擦磨损性能进行分析,得到以下结论:

- 1) 随着 Ti₃C₂T_x 含量增加, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的导电性下降。这是由 Ti₃C₂T_x 本身的导电性差和复合材料的相对密度降低造成的。
- 2) 随着 Ti₃C₂T_x 含量增加, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料的拉伸强度先增加后下降。这是由于 Ti₃C₂T_x 与铜有一定的润湿能力, Ti₃C₂T_x 含量较少时可以强化复合材料界面,在拉伸中承载一定力,从而提高复合材料的拉伸强度,而当 Ti₃C₂T_x 含量过高时,铜基的结构破坏越严重,恶化了复合材料的力学性能。
- 3) 随着 Ti₃C₂T_x 含量增加,复合材料的摩擦系数及磨损率均呈现先减少后增加的变化趋势,当 Ti₃C₂T_x 含量为 10vol% 时, Cu/Ti₃C₂T_x 复合材料表现出最好的耐磨损性。这是因为 Ti₃C₂T_x 为片层结构,在压力作用下可以沿片层方向发生滑动从而起到润滑的作用。

参考文献:

[1] CHEN YA-KUN, ZHANG XIANG, LIU EN-ZUO, *et al.* Fabrication of *in-situ* grown graphene reinforced Cu matrix composites. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 19363.
[2] WANG LI-DONG, CUI YE, YANG SHUAI, *et al.* Microstructure and properties of carbon nanosheet/copper composites processed by particle-assisted shear exfoliation. *RSC Advances*, 2015, **5**(25): 19321-19328.
[3] KOVALCHENKO A M, FUSHCHICH O I, DANYLUK S. The tribological properties and mechanism of wear of Cu-based sintered powder materials containing molybdenum disulfide and molybdenum diselenite under unlubricated sliding against copper. *Wear*, 2012, **290-291**: 106-123.
[4] PAWLAK Z, KALDONSKI T, PAI R, *et al.* A comparative study on the tribological behaviour of hexagonal boron nitride (*h*-BN) as

- lubricating micro-particles-an additive in porous sliding bearings for a car clutch. *Wear*, 2009, **267(5/8)**: 1198–1202.
- [5] CHEN FAN-YAN, YING JIA-MIN, WANG YI-FEI, *et al.* Effects of graphene content on the microstructure and properties of copper matrix composites. *Carbon*, 2016, **96**: 836–842.
- [6] HONG NG VINCENT-MING, HUANG HUI, ZHOU KUN, *et al.* Recent progress in layered transition metal carbides and/or nitrides (MXenes) and their composites: synthesis and applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 2017, **5(7)**: 3039–3068.
- [7] BARSOUM M W. MAX Phases: Properties of Machinable Ternary Carbides and Nitrides. John Wiley & Sons, 2013: 1–5.
- [8] LAPAUW T, LAMBRINOU K, CABIOC'H T, *et al.* Synthesis of the new MAX phase Zr_2AlC . *Journal of the European Ceramic Society*, 2016, **36(8)**: 1847–1853.
- [9] NAGUIB MICHAEL, KURTOGLU MURAT, PRESSER VOLKER, *et al.* Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 . *Advanced Materials*, 2011, **23(37)**: 4248–4253.
- [10] ZHANG TIAN, PAN LI-MEI, TANG HUAN, *et al.* Synthesis of two-dimensional $Ti_3C_2T_x$ MXene using $HCl+LiF$ etchant: enhanced exfoliation and delamination. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, **695**: 818–826.
- [11] LIU FAN-FAN, ZHOU AI-GUO, CHEN JIN-FENG, *et al.* Preparation of Ti_3C_2 and Ti_2C MXenes by fluoride salts etching and methane adsorptive properties. *Applied Surface Science*, 2017, **416**: 781–789.
- [12] NAGUIB MICHAEL, MOCHALIN VADYM N, BARSOUM MICHEL W, *et al.* 25th anniversary article: MXenes: a new family of two-dimensional materials. *Advanced Materials*, 2014, **26(7)**: 992–1005.
- [13] HALIM JOSEPH, LUKATSKAYA MARIA R, COOK KEVIN M, *et al.* Transparent conductive two-dimensional titanium carbide epitaxial thin films. *Chemistry of Materials*, 2014, **26(7)**: 2374–2381.
- [14] YANG JIN, CHEN BEI-BEI, SONG HAO-JIE, *et al.* Synthesis, characterization, and tribological properties of two-dimensional Ti_3C_2 . *Crystal Research and Technology*, 2014, **49(11)**: 926–932.
- [15] SHAHZAD FAISAL, ALHABEB MOHAMED, HATTER CHRISTINE B, *et al.* Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes). *Science*, 2016, **353(6304)**: 1137–1140.
- [16] CAO YONG, DENG QI-HUANG, LIU ZHI-DUO, *et al.* Enhanced thermal properties of poly(vinylidene fluoride) composites with ultrathin nanosheets of MXene. *RSC Advances*, 2017, **7(33)**: 20494–20501.
- [17] ZHANG HENG, WANG LI-BO, CHEN QIANG, *et al.* Preparation, mechanical and anti-friction performance of MXene/polymer composites. *Materials & Design*, 2016, **92**: 682–689.
- [18] WEBER L, DORN J, MORTENSEN A. On the electrical conductivity of metal matrix composites containing high volume fractions of non-conducting inclusions. *Acta Materialia*, 2003, **51(11)**: 3199–3211.
- [19] WEI BING-WEI W, QU DONG, HU CHUN-FENG, *et al.* Synthesis and physical properties of graphene nanosheets reinforced copper composites. *Advanced Materials Research*, 2013, **833**: 310–314.
- [20] ZARRINFAR N, KENNEDY A R, SHIPWAY P H. Reaction synthesis of $Cu-TiC_x$ master-alloys for the production of copper-based composites. *Scripta Materialia*, 2004, **50(7)**: 949–952.
- [21] NAGUIB MICHAEL, MASHTALIR OLHA, LUKATSKAYA MARIA R, *et al.* One-step synthesis of nanocrystalline transition metal oxides on thin sheets of disordered graphitic carbon by oxidation of MXenes. *Chemical Communications*, 2014, **50(56)**: 7420–7423.
- [22] GHASSEM H, HARLOW W, MASHTALIR O, *et al.* *In situ* environmental transmission electron microscopy study of oxidation of two-dimensional Ti_3C_2 and formation of carbon-supported TiO_2 . *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, **2(35)**: 14339.