

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20150428.002

新型自润滑 YBa₂Cu₃O₇/Cu 复合材料的制备及性能

王爱琴^{1, 2, *}, 李敏¹, 谢敬佩¹

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 洛阳 471023; 2. 河南省有色金属协同创新中心, 洛阳 471023)

摘 要: 采用草酸盐共沉淀法制备了 YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) 粉体, 利用真空热压烧结法制备了不同质量分数的 YBCO/Cu 复合材料, 测定了 YBCO/Cu 复合材料的密度、硬度和电导率, 利用 MMU-5GA 磨损试验机对 YBCO/Cu 复合材料进行了摩擦磨损试验。采用 XRD、SEM 和 TEM 对 YBCO 粉体及 YBCO/Cu 复合材料的微观结构、磨损表面形貌及物相组成进行了表征。研究了 YBCO 质量分数对 YBCO/Cu 复合材料组织及性能的影响。结果表明: 所制备的 YBCO 粉体物相为 Y123 相, 其层状结构明显, 粉体纯度高、杂质少, 粒度达到纳米级; 纳米 YBCO 可显著细化 YBCO/Cu 复合材料的基体组织, 提高复合材料的摩擦学性能。随着 YBCO 质量分数增加, 基体组织中纳米 YBCO 颗粒分布均匀度降低, 逐渐出现团聚; YBCO/Cu 复合材料的电导率和密度降低, 硬度先升高后降低, 摩擦系数逐渐减小。3% YBCO/Cu 复合材料的摩擦磨损性能最好。YBCO/Cu 复合材料强化机制为 Orowan 强化、热错配强化和细晶强化; 其磨损机制主要为塑变磨损、磨粒磨损和疲劳剥落。

关键词: YBa₂Cu₃O₇; Cu; 复合材料; 自润滑; 微观组织; 强化机制; 磨损机制

中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2016)02-0318-09

高强高导电材料在航空航天和电工电子等方面具有广泛的用途。电触头、电刷电车及电力火车架空导线材料不仅要求具有较高导电性, 而且要求具有较好的减磨耐磨性能^[1]。传统的铜及铜合金通过合金化强化基体, 一定程度上提高了材料的强度, 但降低了材料的电导率, 适用于一般工况, 而且在高温情况下, 由于高温强度不足, 材料容易发生软化变形, 不能满足实际工况要求。Cu 基复合材料不仅基体强度高, 导电性与导热性和纯 Cu 相似, 具有良好的抗电弧侵蚀和抗磨损能力, 而且可以同时发挥基体与第 2 相的协同作用, 具有广泛的应用前景。

YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) 作为第 2 代高温超导材料由于其优异的性能, 备受各国研究学者的青睐。YBCO 与石墨类似, 具有层状结构, 在摩擦学性能上表现出良好的固体润滑性。将其加入 Cu 基体中形成 Cu 基复合材料, 在保证材料导电性的前提下发挥其自润滑性能, 从而提高材料的摩擦磨损性能^[2-3]。目前颗粒增强 Cu 基复合材料研究最为广泛, 最具有应用前景的是以石墨^[4-6]、MoS₂^[6]、Nb-Se₂^[7]、SiC^[8-9] 和 Ti₃SiC₂^[10-11] 为增强颗粒的 Cu 基复合材料。而以陶瓷颗粒 YBCO 作为第 2 相增强的 Cu 基复合材料在国内外的研究中却很少报道。

本文利用草酸盐共沉淀法制备了 YBCO 纳米粉体, 采用真空热压烧结法制备了 YBCO/Cu 复合材料, 研究了 YBCO 含量对 Cu 基复合材料组织与性能的影响, 为 YBCO/Cu 复合材料的开发与工程应用提供理论依据。

1 试验材料及方法

1.1 YBCO 粉体的制备

按照 Y³⁺: Ba²⁺: Cu²⁺ = 1: 2: 3 的物质的量比例称取硝酸钪、硝酸钡、硝酸铜粉体, 分别放进 3 个干燥的烧杯中, 加入适量的去离子水, 完全溶解后混合均匀, 将草酸溶液加入到混合溶液中, 搅拌均匀, 静置待其沉淀后, 加入聚乙二醇分散剂, 滴入氨水, 调节溶液 pH 值为 6~7, 过滤、抽滤获得

收稿日期: 2015-02-12; 录用日期: 2015-04-07; 网络出版时间: 2015-04-28 16:44
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.tb.20150428.1644.002.html
基金项目: 河南科技大学博士启动基金(20080425)
通讯作者: 王爱琴, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型金属基复合材料。 E-mail: aiqin_wang888@163.com

引用格式: 王爱琴, 李敏, 谢敬佩. 新型自润滑 YBa₂Cu₃O₇/Cu 复合材料的制备及性能[J]. 复合材料学报, 2016, 33(2): 318-326. WANG A Q, LI M, XIE J P. Preparation and properties of new self-lubricant YBa₂Cu₃O₇/Cu composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(2): 318-326 (in Chinese).

沉淀粉末,沉淀粉末在设定温度为 80 ℃ 的真空干燥箱中干燥 15 h。干燥后的前驱粉体在箱式电阻炉中进行 900 ℃,4 h 煅烧,制得黑色 YBCO 粉体。

1.2 YBCO/Cu 复合材料的制备

YBCO/Cu 复合材料基体采用市售的纯度为 99.5%、粒度<30 μm 的 Cu 粉,增强体采用 YBCO 粉体,按 YBCO 质量分数(总量为 100)分别为 1%、2%、3%、4% 进行配比,称取粉体并采用行星式球磨机混粉,球料比为 4:1,设定转速为 250 r/min,球磨时间为 24 h。将混好的原料装在内壁涂有 Al₂O₃ 粉末的模具中,将模具放在 VDBF-250 型设备中进行真空热压烧结。烧结工艺为:室温下压力 10 MPa,加压 10 min;升温至 500 ℃,压力升高到 30 MPa,加压 10 min,并保温 30 min;继续升温至 750 ℃,提高压力到 70 MPa,加压 30 min 并保温 2 h,随炉冷却至室温取出 YBCO/Cu 复合材料试样。

1.3 性能测定及组织表征

使用 MMU-5GA 磨损试验机对 YBCO/Cu 复合材料进行摩擦磨损试验,磨损试样为 ∅3 mm×12.8 mm 的圆柱体,每组由 3 个同样材质的试样组成。摩擦配副为碳钢,尺寸为 ∅43 mm×3 mm;试验在室温下进行,选定载荷为 50~200 N。磨损前后,采用酒精超声波清洗试样,烘干并称重,计算平均磨损失重。

物相分析采用德国产 D-8X 射线衍射仪。使用 JSM-5610LV 型扫描电子显微镜对试验材料微观组织及摩擦磨损表面形貌进行表征;利用 JEM-2100 型高分辨透射电镜观察检测试验材料的微观结构。采用阿基米德排水法测定 YBCO/Cu 复合材料的密度;利用 MH-3 型显微硬度计测定 YBCO/Cu 复合材料的显微硬度;使用 D60K 数字金属电导率测量

仪测定 YBCO/Cu 复合材料的电导率。

2 结果分析

2.1 YBCO 粉体微观形貌

YBCO 粉体的 SEM 照片及 XRD 谱图如图 1 所示。可以看出,YBCO 粉体颗粒圆整,表面光滑,颗粒与颗粒之间分散性较好,颗粒的尺寸大多数在 100 nm 以下;XRD 谱图中仅有 YBCO 的衍射峰,所制备的 YBCO 粉体纯度高,杂质少;粉体衍射分析及高分辨透射形貌表明,YBCO 结晶度好,并具有层状结构。

2.2 YBCO/Cu 复合材料的微观组织

图 2 为 4% YBCO/Cu 复合材料微观组织及相组成分析。可知,基体组织中晶粒大小较均匀,YBCO 分布在 Cu 基体晶粒内和基体晶界处。XRD 谱图中观察不到 YBCO 物相衍射峰。选区对应的 EDS 分析可知,Y、Ba、O 的原子比大约为 1:2:7,表明图 2(b)中的黑色颗粒为 YBCO,组织中存在轻微的 YBCO 颗粒团聚现象。

图 3 为 YBCO/Cu 复合材料基体组织中的孪晶及位错。Cu 为面心立方晶体结构,基体的(111)面为孪晶面。YBCO/Cu 复合材料中孪晶的存在阻碍位错的运动,增加位错运动的阻力,材料的加工硬化能力得到提高。同时孪晶界是一种低能的界面,对电子的散射作用较低,因而对复合材料电学性能的负面影响较小^[12]。试验材料在热压烧结制备过程中,增强体 YBCO 与基体的热膨胀系数不同,温度的变化导致基体与增强体发生不同的热变形,导致热错配并产生塑性残余应力,界面处产生高密度位错。大量孪晶和高密度位错的形成提高了 YBCO/Cu 复合材料的硬度和强度等性能^[13-14]。

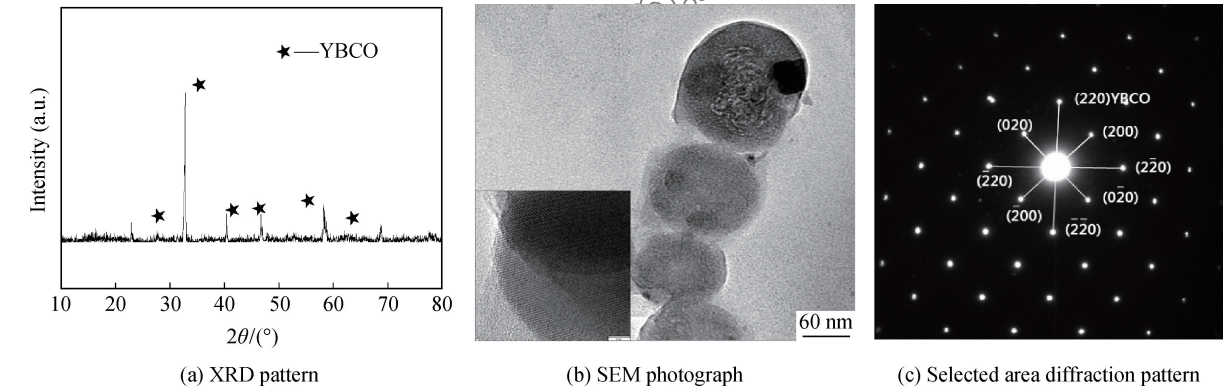


图 1 YBCO 粉体的 SEM 照片及 XRD 谱图
Fig. 1 SEM photograph and XRD pattern of YBCO powders

YBCO 在 YBCO/Cu 复合材料中的分布形态及衍射花样如图 4 所示。图 4(a)中的纳米 YBCO 主要分布在 YBCO/Cu 基体晶粒晶界处。

电子衍射花样表明，烧结过程中纳米 YBCO 依然保持化学性质稳定状态。基体晶粒大小不均

匀，位于 YBCO 颗粒周围的基体晶粒较小，尺寸处于纳米级，衍射斑点呈环状。这主要是由于晶界处的纳米 YBCO 颗粒阻碍晶粒长大，细化了基体晶粒^[13]。YBCO/Cu 组织中还观察到大量的纳米 YBCO 颗粒分布在基体晶粒内，见图 4(b)。其纳米晶

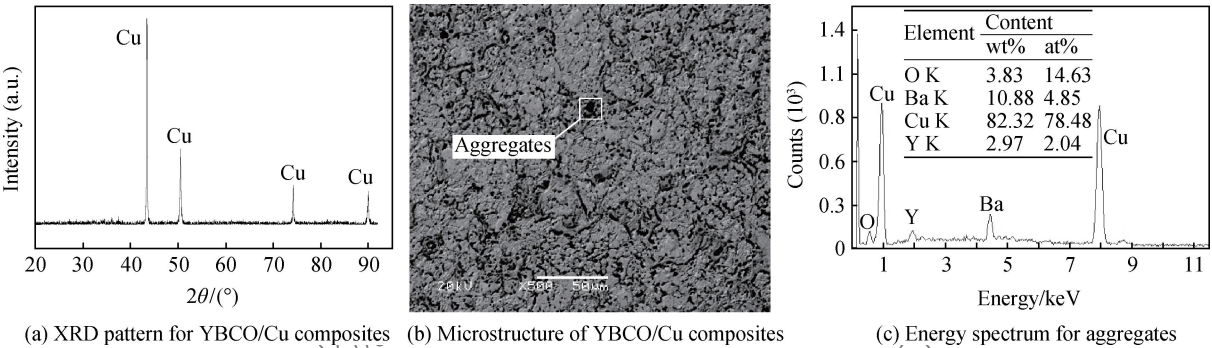


图 2 4% YBCO/Cu 复合材料微观组织及相组成分析

Fig. 2 Microstructures and phase composition analysis of 4% YBCO/Cu composites

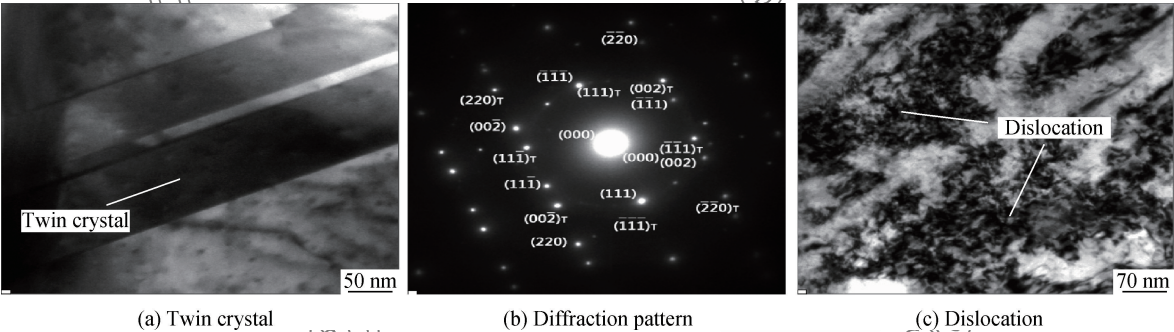


图 3 YBCO/Cu 复合材料基体组织中的孪晶及位错

Fig. 3 Twin crystal and dislocation in matrix structure of YBCO/Cu composites

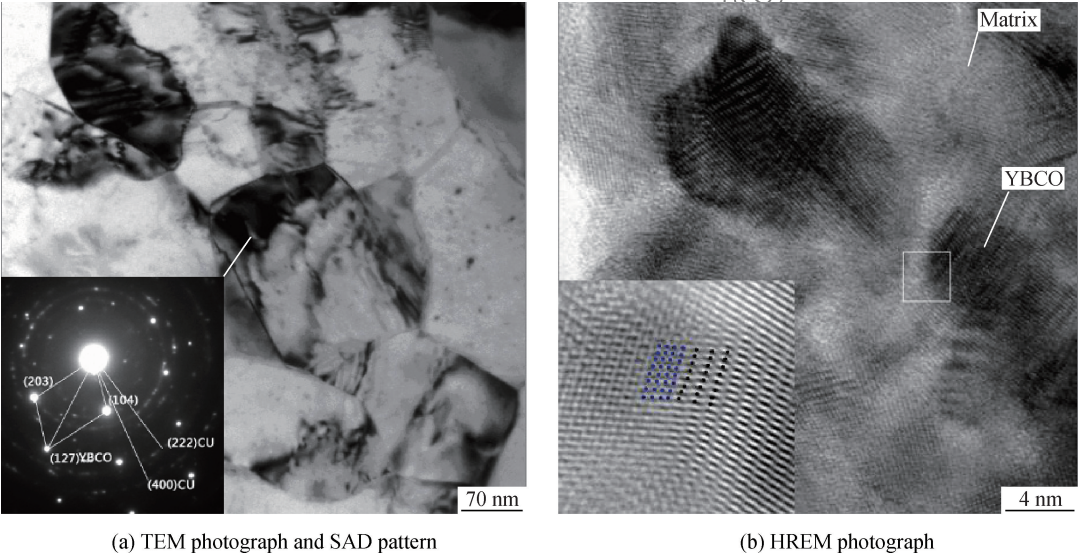


图 4 YBCO 在 YBCO/Cu 复合材料中的分布形态及衍射花样

Fig. 4 Distribution morphologies and diffraction patterns of YBCO in YBCO/Cu composites

粒尺寸更加微小, 远远小于分布在晶界的 YBCO 颗粒, 高分辨电子衍射花样表明, YBCO 与基体晶粒保持共格关系, 纳米 YBCO 在基体中产生强烈的弹性共格应变场, 极大地阻碍了基体中位错的运动, 从而起到 Orowan 强化作用。

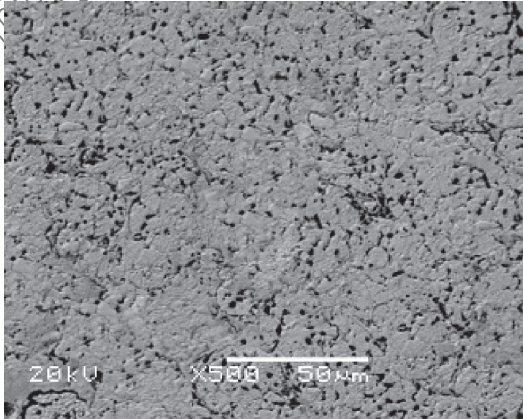
2.3 YBCO 质量分数对 YBCO/Cu 复合材料微观组织的影响

图 5 为不同 YBCO 质量分数的 YBCO/Cu 复合材料的微观组织。浅灰色组织为基体 Cu, 黑色颗粒状组织为增强相 YBCO, YBCO 颗粒均匀分布在基体和基体晶界处。随着 YBCO 质量分数增加, YBCO/Cu 基体晶粒尺寸逐渐减小, YBCO 颗粒在基体中分布更加均匀; 这是由于分布在 YBCO/Cu 基体晶界上的纳米 YBCO 颗粒对基体颗粒运动起到钉扎作用, 阻碍晶界的滑移, 抑制位错的运动, 限制了基体颗粒的长大, 故对基体起到了细化晶粒的作用。继续增加 YBCO 质量分数到 4% 时, 虽然基体晶粒依然细化, 但增强体 YBCO 明显发生了团聚现象。纳米 YBCO 颗粒的比表面积大, 其含

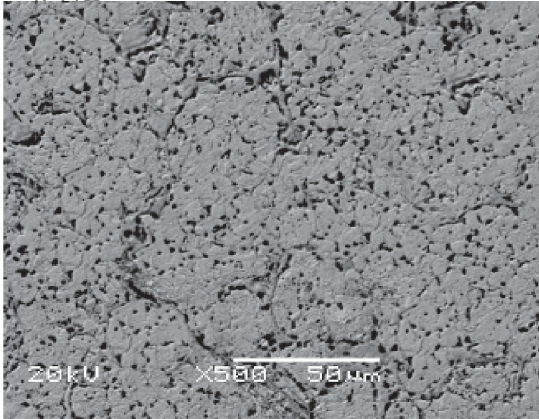
量较少时, 能够均匀分布在基体上, 不发生或很少发生 YBCO 的聚集; 随着 YBCO 增强体质量分数的增加, 其更加密集均匀地分布在 YBCO/Cu 的基体上, 颗粒之间距离更近, 相互接触聚集的几率增多。YBCO 质量分数达到一定程度时, 增强体颗粒与颗粒之间的距离更近, 聚集在一起形成团聚体。

2.4 YBCO 质量分数对 YBCO/Cu 复合材料性能的影响

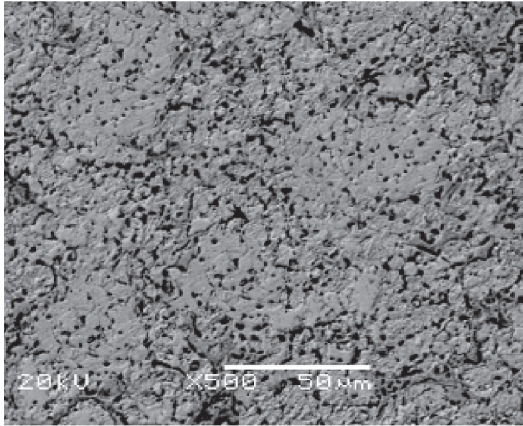
图 6 为 YBCO 质量分数对 YBCO/Cu 复合材料密度及硬度的影响曲线。可知, 随着 YBCO 质量分数的增加, YBCO/Cu 复合材料的密度呈下降趋势。这主要是由于 YBCO 为陶瓷相, 在压制过程中很难变形, 进入 Cu 粉会阻碍 Cu 粉的压缩变形, 致使 YBCO/Cu 复合材料的压制密度随着 YBCO 质量分数的增加而下降。在粉末冶金固相烧结过程中, 烧结的主要机理为扩散和流动, YBCO 陶瓷颗粒阻碍 Cu 的自扩散, 随着其质量分数的增加, 对 Cu 扩散的阻碍效应增大, 使 YBCO/Cu 复合材料的密度减小^[6]。YBCO/Cu 复合材料的硬度随着增强相 YBCO



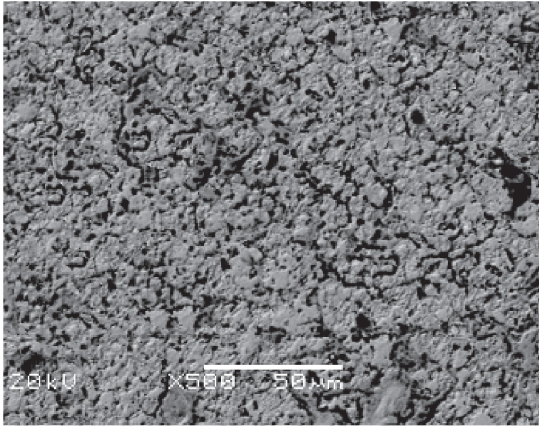
(a) 1% YBCO/Cu composites



(b) 2% YBCO/Cu composites



(c) 3% YBCO/Cu composites



(d) 4% YBCO/Cu composites

图 5 不同 YBCO 质量分数的 YBCO/Cu 复合材料的微观组织

Fig. 5 Microstructures of YBCO/Cu composites with different YBCO mass fractions

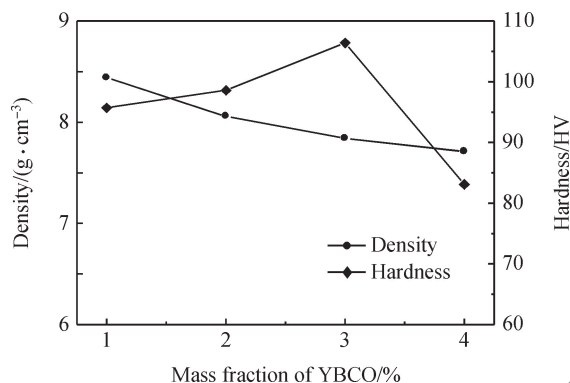


图6 YBCO/Cu复合材料的密度和硬度随YBCO质量分数变化

Fig. 6 Changes of density and hardness with mass fraction of YBCO for YBCO/Cu composites

的增加先上升后降低。这主要是由于YBCO提高位错密度和形变抗力,故YBCO/Cu复合材料的硬度值逐渐提高^[12]。当YBCO质量分数达到一定程度后,YBCO在基体上发生团聚,影响了强化效果。YBCO质量分数为3%时,复合材料的硬度达到峰值。

图7为YBCO质量分数与YBCO/Cu复合材料电导率的变化关系曲线(IACS为国际退火铜标准规定的电导率单位)。可知,YBCO/Cu复合材料的电导率随YBCO质量分数的增加呈下降趋势。作为增强体的YBCO,在室温下的电阻率比较高,其在YBCO/Cu复合材料中相当于孔洞。在复合材料的导电截面上,YBCO质量分数越大,则能够使电流通过的铜基体面积越小,YBCO/Cu复合材料的电导率就越小。同时,YBCO/Cu复合材料中存在的孪晶、位错和孔洞等缺陷增多,使复合材料中自由电子的散射

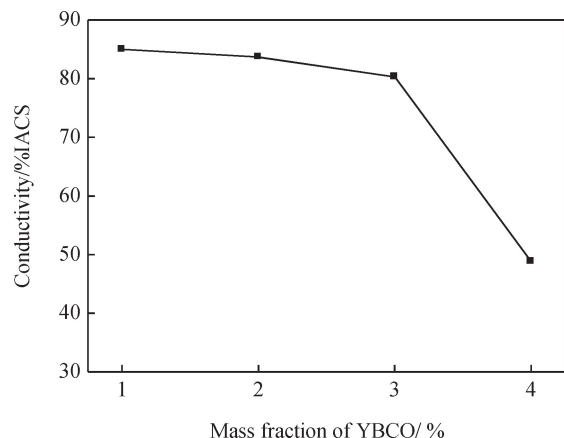


图7 YBCO/Cu复合材料电导率随YBCO质量分数的变化

Fig. 7 Changes of conductivities with mass fraction of YBCO for YBCO/Cu composites

作用增强,从而使YBCO/Cu复合材料的电导率下降^[6]。而且,随着YBCO质量分数的增加,YBCO/Cu基体晶粒细化,晶界增多,从而增加对电子的散射,降低材料的电导率。当YBCO质量分数由3%增加到4%时,YBCO/Cu复合材料的电导率下降明显。主要是由于YBCO发生了团聚,严重地割裂了YBCO/Cu基体,破坏了电流的流通网络,使YBCO/Cu复合材料的导电性能急剧下降。

综上分析,纳米增强体YBCO质量分数较少时,YBCO均匀分布在复合材料基体上,具有细化晶粒作用。随着YBCO质量分数增加,增强体更加密集均匀地分布在基体上,YBCO/Cu复合材料的显微组织更加细化,当YBCO质量分数达到一定程度时,其在组织中发生团聚,YBCO/Cu复合材料的性能降低。YBCO质量分数为3%时,其综合性能最好。

2.5 YBCO/Cu复合材料摩擦磨损特性

2.5.1 YBCO质量分数对YBCO/Cu复合材料摩擦磨损性能的影响

图8为载荷150 N时,YBCO质量分数对YBCO/Cu复合材料摩擦系数及磨损率的影响。YBCO/Cu复合材料的摩擦系数与磨损率随着YBCO质量分数的增加均减小。当YBCO质量分数达到3%之后,YBCO/Cu复合材料的摩擦系数和磨损率减小趋势削弱,即摩擦系数和磨损率开始趋于稳定。这是由于在YBCO质量分数较低时,YBCO/Cu复合材料的硬度低,摩擦表面抗磨粒磨损能力低;起自润滑作用的YBCO不足以在YBCO/Cu复合材料的表面形成完整的润滑膜。因此,YBCO质量分数较低时,YBCO/Cu复合材料的摩擦系数比

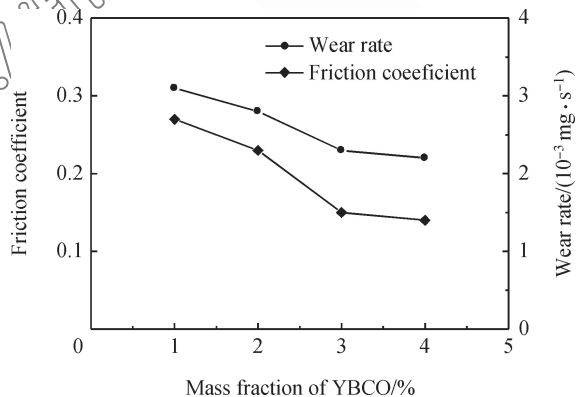


图8 YBCO质量分数对YBCO/Cu复合材料摩擦系数及磨损率的影响

Fig. 8 Effects of mass fraction of YBCO on friction coefficients and wear rates for YBCO/Cu composites

较大, 磨损率较大^[15-17]。随着 YBCO 质量分数的增加, YBCO/Cu 复合材料的晶粒细化效果增强, 组织中位错密度增大, 复合材料的强度和硬度提高, 抗磨粒磨损抗力提高; 当 YBCO 质量分数增加到 3% 时, YBCO/Cu 复合材料在摩擦热和变形挤压的共同作用下, 基体中被挤出的 YBCO 进入到摩擦副与 YBCO/Cu 复合材料之间, 在 YBCO/Cu 复合材料表面形成一层完整连续的 YBCO 润滑膜, YBCO/Cu 复合材料的摩擦系数降低, 磨损率降低。继续增加 YBCO 质量分数到 4% 时, YBCO/Cu 复合材料磨损表面润滑膜变化不大。由于基体中 YBCO 团聚, 基体硬度降低, 故复合材料摩擦系数和磨损率降低不明显。

2.5.2 载荷对 YBCO/Cu 复合材料摩擦系数的影响

图 9 为不同载荷下 3% YBCO/Cu 复合材料的摩擦系数及磨损率。可知, 随着载荷的增大, YBCO/Cu 复合材料的摩擦系数和磨损率均呈现先减小后增大的变化趋势。载荷从 50 N 增大到 150 N 时, YBCO/Cu 复合材料的摩擦系数由 0.62 减小到 0.15;

磨损率从 $3.2\times10^{-3}\text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$ 减小到 $2.3\times10^{-3}\text{ mg}\cdot\text{s}^{-1}$; 当载荷增大到 200 N 时, 摩擦系数和磨损率均急剧增加。

图 10 为不同载荷下 3% YBCO/Cu 复合材料

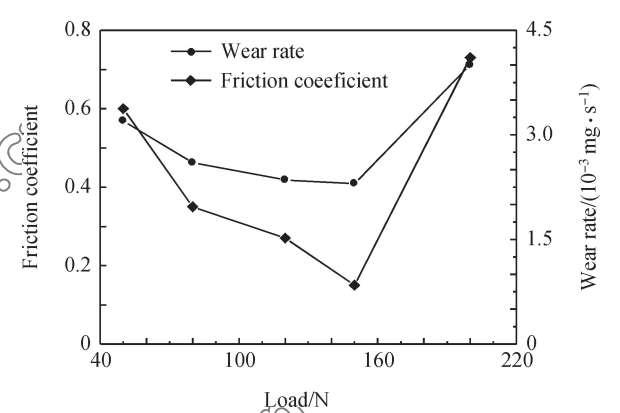
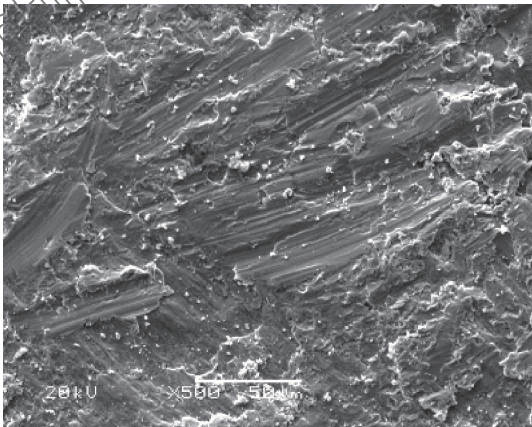
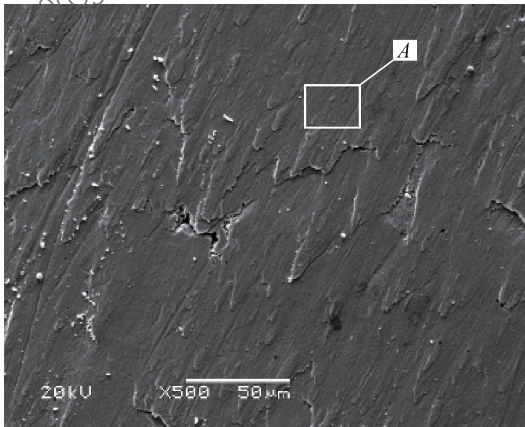


图 9 不同载荷下 3% YBCO/Cu 复合材料的摩擦系数及磨损率

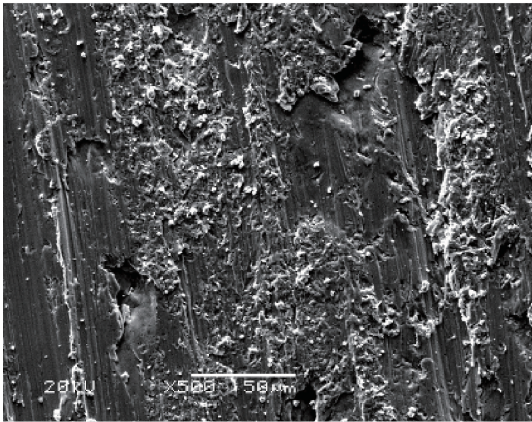
Fig. 9 Friction coefficients and wear rates of 3% YBCO/Cu composites at different loads



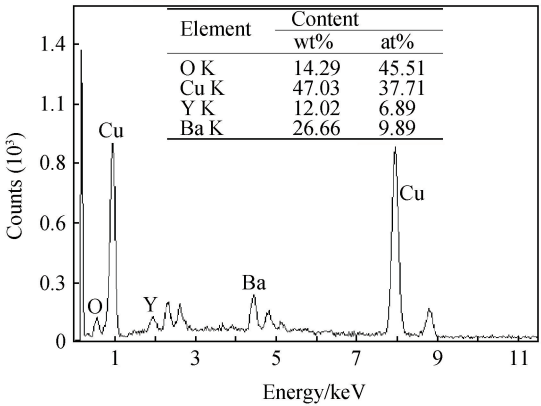
(a) Load is 50 N



(b) Load is 120 N



(c) Load is 200 N



(d) EDS obtained from A

图 10 不同载荷下 3% YBCO/Cu 复合材料的磨损形貌及 EDS 分析

Fig. 10 Wear morphologies and EDS analysis of 3% YBCO/Cu composites at different loads

的磨损形貌及 EDS 分析。可知，在低载荷下，磨损表面非常粗糙，既有犁沟磨痕、剥落坑，还有少量的磨屑粘着在犁沟处，磨损方式以粘着和犁削为主，磨损严重。主要是由于载荷低，YBCO/Cu 复合材料中仅有位于晶界处的 YBCO 颗粒被挤出于磨损表面，不足以形成连续的 YBCO 自润滑膜，故磨损严重。随着载荷增加，摩擦表面所受到的挤压力增加，YBCO/Cu 复合材料中基体及晶界处的 YBCO 颗粒均被挤出，对应图 10(b)磨损表面选区 EDS 分析表明，Y、Ba、O 原子比接近 1 : 2 : 7。见图 10(d)。表明在 YBCO/Cu 复合材料磨损表面形成了连续的润滑膜，阻止了 YBCO/Cu 复合材料与对偶的直接接触，磨面光滑平整，其磨损主要为塑变磨粒磨损。当载荷增加到 200 N 时，处于摩擦副之间的润滑膜受到的压力过大，润滑膜厚度变薄，部分润滑膜分层黏附于摩擦偶件上，润滑膜的连续性遭到破坏，磨损表面呈现局部光滑平整，局部区域润滑膜起层剥落，其磨损主要是犁沟磨粒磨损和疲劳剥落磨损。

2.5.3 YBCO/Cu 复合材料的磨损机制

图 11 为 3% YBCO/Cu 复合材料的摩擦系数曲线，图 12 为 3% YBCO/Cu 复合材料在载荷为 100 N 条件下，磨损不同时间(*t*)后的摩擦表面形貌和 EDS 分析。可知，在磨损 40 s 时，即磨损启动阶

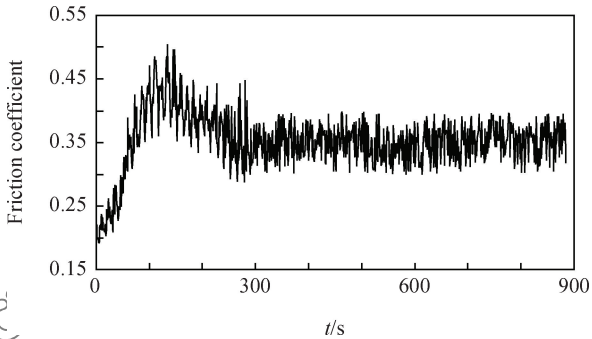


图 11 3% YBCO/Cu 复合材料的摩擦系数曲线
Fig. 11 Friction coefficient curve of 3% YBCO/Cu composites

段，YBCO/Cu 复合材料表面粗糙，摩擦副之间局部接触，摩擦磨损基本以金属基体和对偶材料之间的接触为主，摩擦比较剧烈，YBCO/Cu 复合材料磨损表面存在犁沟和剥落坑。YBCO/Cu 复合材料表面开始挤压变形，并伴随有大量摩擦热，经过一段时间的磨损，到磨损 140 s 时，摩擦产生的热量使磨损表面材料软化，塑性变形加剧，摩擦副之间紧密接触，磨损表面形貌主要表现为磨粒磨损，犁沟痕迹宽而深，摩擦系数逐渐增大到最高值。同时，在塑变挤压力和载荷的双重作用下，均匀分布于 YBCO/Cu 复合材料基体内部的 YBCO 颗粒逐渐向外表挤出，材料表面 YBCO 固体润滑剂含量增

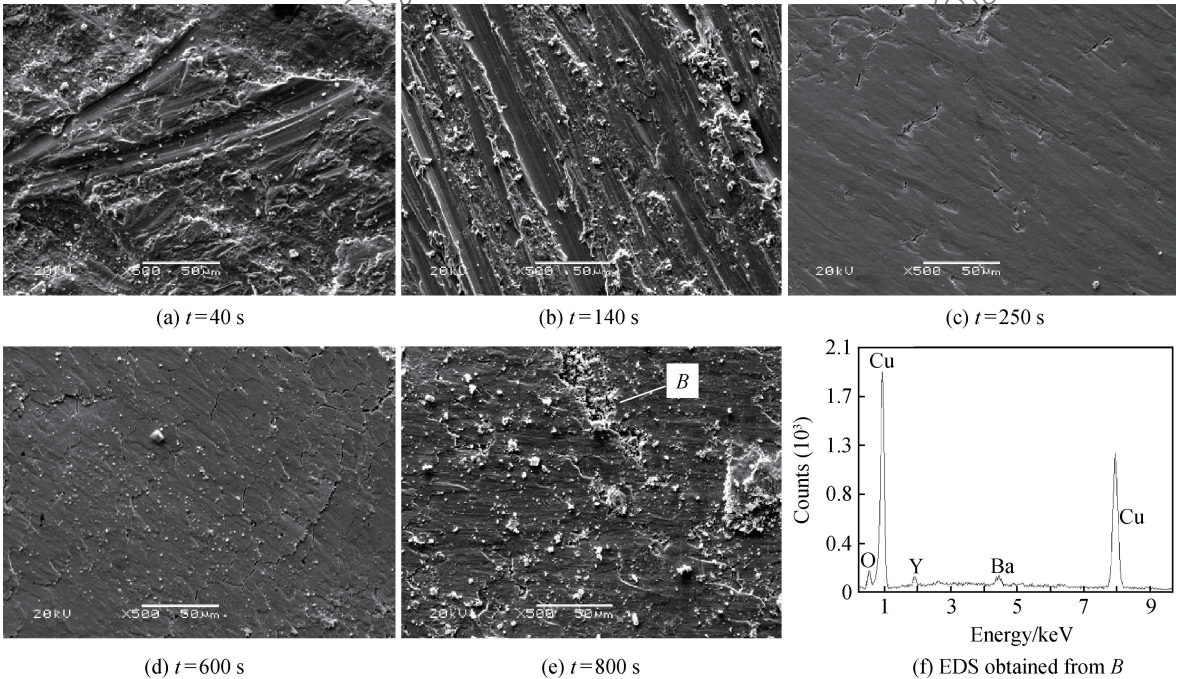


图 12 3% YBCO/Cu 复合材料磨损不同时间后的摩擦表面形貌和 EDS 分析

Fig. 12 Wear surface morphologies and EDS analysis of 3% YBCO/Cu composites at different wear time

多。随磨损时间延长,到 250 s 时,YBCO/Cu 复合材料中被挤出的 YBCO 在摩擦副间铺开逐渐形成均匀连续的固体润滑膜,摩擦系数逐渐降低,磨损进入稳定状态,磨损表面光滑平整,塑变减轻,犁沟变窄变浅,表现为轻微的塑变、磨粒磨损。在稳定磨损阶段,磨损表面润滑膜保持稳定。经过长时间的磨损和挤压,到 600 s 时,磨损表面观察到少量的微裂纹产生和微小颗粒状 YBCO 渗出,摩擦系数保持稳定。磨损 800 s 时,渗出的 YBCO 逐渐聚集成大颗粒,微裂纹增多;同时,原有的裂纹经过一段时间的塑变,裂纹宽度增宽,YBCO/Cu 复合材料磨面亚表层的 YBCO 从裂纹中挤出,裂纹经碾压逐渐愈合。YBCO/Cu 复合材料本身的自耗和塑变不断补充和提供固体润滑剂,修复被撕裂的润滑膜,润滑膜保持稳定。YBCO/Cu 复合材料摩擦系数稳定无波动,磨损形貌依然表现为轻微的塑变磨损。磨损过程中,YBCO 固体润滑膜不仅与 YBCO/Cu 复合材料的基体结合良好,而且还具有优异的自修复性,使 YBCO/Cu 复合材料具有优异的摩擦学性能。摩擦系数表现为先升高后降低,并逐渐进入平稳状态。

3 结 论

(1) 随着纳米 YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) 质量分数的增加,YBCO/Cu 复合材料基体组织细化;YBCO 质量分数较低时,纳米 YBCO 均匀分布在基体晶粒内和晶界处,当 YBCO 质量分数达到 4% 时,YBCO/Cu 复合材料组织中产生 YBCO 颗粒团聚。

(2) YBCO 质量分数由 1% 增加到 4% 时,YBCO/Cu 复合材料的密度和电导率呈下降趋势,硬度先增加后降低。3% YBCO/Cu 复合材料的综合性能最好。

(3) 摩擦磨损过程中,YBCO/Cu 复合材料表面形成完整致密的固体润滑膜,使其具有优异的摩擦学性能;随着 YBCO 质量分数的增加,YBCO/Cu 复合材料的摩擦系数和磨损率逐渐减小,摩擦磨损性能提高;随着载荷的增大,YBCO/Cu 复合材料的摩擦系数和磨损率呈现先减小后增大的趋势,当载荷达到 150 N 时,YBCO/Cu 复合材料的摩擦系数和磨损率均最小。

参考文献:

[1] 王常川,王日初,彭超群,等. 金属基固体自润滑复合材料

的研究进展[J]. 中国有色金属学报,2012,22(7): 1945-1955.

WANG C C, WANG R C, PENG C Q, et al. Research progress of metallic solid self-lubricating composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(7): 1945-1955 (in Chinese).

[2] 陈雷明,徐斌,张新月,等. 新型高温超导复合材料的制备及其电磁、摩擦学性能研究[J]. 功能材料,2014,45(10): 10090-10094.

CHEN L M, XU B, ZHANG X Y, et al. The synthesis and electromagnetic and tribological properties of novel high T_c superconductor composite[J]. Journal of Functional Material, 2014, 45(10): 10090-10094 (in Chinese).

[3] 仇国泉,李长生,颜科红,等. 高温超导材料 YBa₂Cu₃O₇ 的摩擦学特性[J]. 复合材料学报,2005,22(6): 66-71.

QIU G Q, LI C S, YAN K H, et al. Tribological behavior of super conducting material YBa₂Cu₃O₇[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2005, 22(6): 66-71 (in Chinese).

[4] 冉旭,黄显峰,段利利,等. 铜-石墨复合材料的摩擦学性能和磨损机理[J]. 材料导报,2012,26(4): 33-38.

RAN X, HUANG X F, DUAN L L, et al. Tribological properties and wear mechanism of copper-graphite composites [J]. Materials Review, 2012, 26(4): 33-38 (in Chinese).

[5] 郭俊德,何世权,马文林,等. Fe-Mo-Ni-Cu-石墨高温自润滑复合材料的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报,2014,34(6): 617-622.

GUO J D, HE S Q, MA W L, et al. Tribological characteristics of Fe-Mo-Ni-Cu-graphite high temperature self-lubricating composites[J]. Tribology, 2014, 34(6): 617-622 (in Chinese).

[6] 陈淑娴,凤仪,李庶,等. 室温及气氛条件下铜基自润滑复合材料的摩擦磨损性能研究[J]. 润滑与密封,2009,34(6): 23-27.

CHEN S X, FENG Y, LI S, et al. Friction and wear behaviors of Cu-based self-lubrication composites under room temperature and in atmosphere[J]. Lubrication and Engineering, 2009, 34(6): 23-27 (in Chinese).

[7] 霍生伟,李长生,唐华,等. NbSe₂/Cu 新型自润滑复合材料制备及其摩擦学性能[J]. 复合材料学报,2013,30(4): 121-127.

HUO S W, LI C S, TANG H, et al. Preparation and tribological properties of copper matrix solid self-lubricant composites reinforced with NbSe₂ sheets[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(4): 121-127 (in Chinese).

[8] RADO C, DREVET B, EUSTATHOPOULWS N. The role of compound formation in reactive wetting: The Cu/SiC system[J]. Acta Materialia, 2000, 48(18-19): 4483-4491.

[9] ZHAN Y Z, ZHANG G D. The effect of interfacial modifying on the mechanical and wear properties of SiC_p/Cu composites[J]. Materias Letters, 2003, 57(29): 4583-4585.

- [10] ZHANG Y, SUN Z M, ZHOU Y C. Cu/Ti₃SiC₂ composite: A new electrofriction material[J]. Materials Research Innovations, 1999, 3(2): 80-84.
- [11] 张毅, 周延春. Ti₃SiC₂ 弥散强化 Cu: 一种新的弥散强化铜合金[J]. 金属学报, 2000, 36(6): 662-666.
- ZHANG Y, ZHOU Y C. Cu/Ti₃SiC₂ dispersion-strengthened copper: A new dispersion-strengthened copper alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2000, 36(6): 662-666 (in Chinese).
- [12] 陈先华, 李晶对 Cu 的力学和电学性能影响的研究进展[J]. 材料工程, 2011(9): 87-91.
- CHEN X H. Research progress in influence of twins on mechanical and electrical properties of Cu[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(9): 87-91 (in Chinese).
- [13] 何广进, 李文珍. 纳米颗粒分布对镁基复合材料强化机制的影响[J]. 复合材料学报, 2013, 30(2): 105-110.
- HE G J, LI W Z. Influence of nano particle distribution on the strengthening mechanisms of magnesium matrix composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2013, 30(2): 105-110 (in Chinese).
- [14] 徐娜, 张甲, 侯万良, 等. 热处理对高温固体自润滑涂层组织结构及结合强度的影响[J]. 金属学报, 2009, 45(8): 943-948.
- XU N, ZHANG J, HOU W L, et al. Influence of heat treatment on microstructures and adhesive strength of high temperature solid self-lubricant coating[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2009, 45(8): 943-948 (in Chinese).
- [15] WATANABE Y. High-speed sliding characteristics of Cu-Sn-based composite materials containing lamellar solid lubricants by contact resistance studier[J]. Wear, 2008, 264(7-8): 624-631.
- [16] 王振生, 周兰章, 郭建亭, 等. NiAl-Cr(Mo)-Cr_xS_y 自润滑复合材料的摩擦磨损特征[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(6): 589-595.
- WANG Z S, ZHOU L Z, GUO J T, et al. Friction and wear behavior of NiAl-Cr(Mo)-Cr_xS_y self-lubricating composite[J]. Tribology, 2010, 30(6): 589-595 (in Chinese).
- [17] 陈岁元, 刘义杰, 刘常升, 等. 纳米 Al₂O₃ 颗粒增强新型铜基自润滑复合材料[J]. 复合材料学报, 2009, 26(6): 109-115.
- CHEN S Y, LIU Y J, LIU C S, et al. Nano-Al₂O₃ particle reinforced Cu-based self-lubricating composites[J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2009, 26(6): 109-115 (in Chinese).

Preparation and properties of new self-lubricant YBa₂Cu₃O₇/Cu composites

WANG Aiqin^{1,2*}, LI Min¹, XIE Jingpei¹

- (1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;
2. Non-ferrous Metal Generic Technology Collaborative Innovation Center of Henan Province, Luoyang 471023, China)

Abstract: YBa₂Cu₃O₇ (YBCO) powder was prepared by oxalate co-precipitation method. YBCO/Cu composites with different mass fractions were prepared by vacuum hot-pressed sintering method. The density, hardness and conductivity of YBCO/Cu composites were measured. The friction and wear test was performed on YBCO/Cu composites by MMU-5GA abrasion equipment. The microstructure, wear surface morphology and phase composition of YBCO powder and YBCO/Cu composites were characterized by the means of XRD, SEM and TEM. The influence of YBCO mass fraction on microstructures and properties of YBCO/Cu composites were investigated. The results indicate that the YBCO powder phase is Y123 phase with apparent layer structure, and powders are nano-scale particles with high purity and less impurity. The matrix structures of YBCO/Cu composites are obviously refined and the tribological performance are improved by adding YBCO nano-particles. With the increase of YBCO mass fraction, the uniformity of YBCO nano-particles in matrix reduces and particles agglomerates gradually, the conductivity and density of YBCO/Cu composites decrease, the hardness firstly increases then decreases, the friction coefficient gradually reduces. The friction and wear performance of 3% YBCO/Cu composite are best. The strength mechanisms of YBCO/Cu composites are Orowan strengthening, thermal mismatch strengthening and grain refinement strengthening. The dominant wear mechanisms are plastic deformation wear, abrasive wear and fatigue flaking.

Keywords: YBa₂Cu₃O₇; Cu; composites; self-lubricant; microstructure; strengthening mechanism; wear mechanism