

# 镀镍石墨颗粒增强耐磨 CuCrZr 基复合材料组织及性能研究

王昭<sup>1,2</sup>, 范新会<sup>1,2</sup>, 李炳<sup>1</sup>, 王鑫<sup>1</sup>, 杨珂<sup>1</sup>, 孔一龙<sup>1,2</sup>, 赵新<sup>1,2</sup>, 刘杰<sup>1,2</sup>

(1. 西安工业大学材料与化工学院, 陕西西安 710021; 2. 商洛学院, 陕西商洛 726000)

**摘要:** 采用金属熔化铸造工艺制备了体积分数为2%、6%、8%的镀镍石墨颗粒增强铬锆铜基复合材料, 分析测试了其组织、硬度、耐磨性及磨损特征, 并与基体铬锆铜进行了对比研究。结果表明: 镀镍石墨颗粒均匀分布在基体中, 并与基体紧密结合, 无其他明显反应物生成; 未经热处理的体积分数为8%的镀镍石墨颗粒增强铬锆铜基复合材料的硬度最低, 为HV 135.75, 仅比基体铬锆铜硬度减少了2.9%; 体积分数为8%的镀镍石墨颗粒增强铬锆铜基复合材料的耐磨性高于体积分数为2%和6%的镀镍石墨颗粒增强铬锆铜基复合材料, 其耐磨性较基体提高了76%; 磨损表面较为平坦, 无明显的犁沟及抛削坑, 颗粒组织均匀, 表现为磨粒磨损。

**关键词:** 金属熔化铸造; 镀镍石墨颗粒; 铬锆铜基复合材料; 摩擦磨损; 耐磨性

材料的耐磨性是指材料在使用过程中抵抗外力磨损的能力。而耐磨损材料作为国防建设的重要基础性材料, 对其性能的研究非常重要, 尤其是颗粒增强金属基复合材料, 不仅制备工艺简单, 制造成本低, 而且材料性能优良。

国外对于耐磨复合材料的研究和应用大多是在20世纪60年代以前完成的。而我国于21世纪初才开始研究耐磨复合材料并将其逐渐应用于实际生产和国防建设中<sup>[1-3]</sup>。周永欣等<sup>[4]</sup>通过粉末冶金的方法在铜基体中加入少量的石墨颗粒, 明显提高了复合材料的耐磨性; Zhang Conglin等<sup>[5]</sup>采用大电流脉冲电子束辐照的方法依据粉末冶金的原理制备了Cu-C复合材料; 张晓丹等<sup>[6]</sup>研究了不同百分数含量下的铜包石墨对铜基复合材料摩擦磨损性能的影响。对于镍包石墨的研究较少。镀镍石墨颗粒增强铬锆铜基自润滑复合材料是在基体铬锆铜合金中加入固体镍包石墨颗粒以提高复合材料的耐摩擦磨损特性<sup>[7]</sup>。其所制备的复合材料具有耐腐蚀、耐磨损、抗氧化性能好等优点, 作为自润滑材料广泛应用于各个领域。由于石墨与铜固液不相容的界面特点, 致使以往的铜基复合材料制备与生产只能使用粉末冶金的方法来完成。然而, 所生产的材料只能应用于普通生活领域, 难以满足重工业及国防领域的应用<sup>[8]</sup>。因此, 本研究通过全液态金属熔炼铸造工艺来制备铬锆铜基石墨自润滑复合材料, 考察其在固定载荷下不同含量的镀镍石墨颗粒对复合材料组织及性能影响, 并探讨其摩擦磨损机理。

## 1 试样制备和测试方法

### 1.1 试验材料

试验所用基体材料为标准铬锆铜基材, 其密度为8.9 g/cm<sup>3</sup>, 抗拉强度≥380 N/mm<sup>2</sup>, 硬度HV 110~145, 伸长率≥80%, 导电率≥75% IACS, 热导率330 W/m·K。加入的功能材料为镀镍石墨颗粒, 其密度为2.25 g/cm<sup>3</sup>, 摩擦系数0.14~0.18, 电阻率

作者简介:

王昭(1994-), 男, 硕士生, 研究方向为铜基复合材料的制备与成形。电话: 13629147035, E-mail: 1300124327@qq.com

中图分类号: TG249.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2019)03-0277-05

收稿日期:

2018-10-16 收到初稿,

2018-12-09 收到修订稿。

$2.64 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$ , 熔点 $\geq 3000 \text{ }^\circ\text{C}$ , 平均粒径为 $80 \mu\text{m}$ 。

## 1.2 复合材料试样的制备工艺

试验采用GWW.0.012型中频感应熔化炉制备复合材料试样。为了研究不同石墨含量对材料摩擦磨损性能的影响, 镀镍石墨颗粒加入量分别为2%、6%、8% (体积分数)。将称量好的铬锆铜原料放入中频感应炉的石墨坩埚中进行熔化, 调节加热功率至 $30 \text{ kW}$ 。待铬锆铜全部熔化后, 将感应炉加热功率调节至 $15 \text{ kW}$ 进行保温, 并将准备好的镀镍石墨颗粒缓慢加入铬锆铜溶液中。利用感应线圈的电磁感应作用对金属液进行自搅拌, 同时使用带有石墨搅拌头的机械搅拌器进行搅拌, 使石墨颗粒与金属液完全均匀混合<sup>[9-10]</sup>。保温 $5 \text{ min}$ 后将金属液浇至预先制作好的砂型中, 砂型的制作必须设置合理的排气系统, 以保证浇注时型腔、砂芯以及由金属液析出的气体能及时由排气系统排出, 同时也能起到保温作用。待其冷却后取出试样进行组织和性能分析。

## 1.3 复合材料试样测试及计算方法

试验采用立式双目BM-4XC型数码金相显微镜观察试样组织; THVS-M-A显微硬度计测试试样的显微硬度值, 选取载荷为 $200 \text{ g}$ , 对每个试样测试三组取平均值; 采用Quanta 400F型扫描电子显微镜观察试样磨损表面形貌; MMW-1A型万能摩擦磨损试验机测试材料的耐磨性。试验方式为销-盘式干摩擦磨损, 对磨材料为GCr15钢, 载荷压力为 $50 \text{ N}$ , 滑动距离 $350 \text{ m}$ , 滑动速度 $0.2 \text{ m/s}$ , 时间为 $1750 \text{ s}$ 。依据同一载荷条件下磨擦试样前后质量变化, 根据公式(1)计算试样体积磨损率。

$$V_m = \frac{\Delta M}{NL\rho_v} \quad (1)$$

式中:  $V_m$ 为体积磨损率,  $\text{cm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\Delta M$ 为试样摩擦后质量损失,  $\text{g}$ ;  $N$ 为试验载荷力,  $\text{N}$ ;  $L$ 为滑动摩擦距离,  $\text{m}$ ;  $\rho_v$ 为试样体积密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

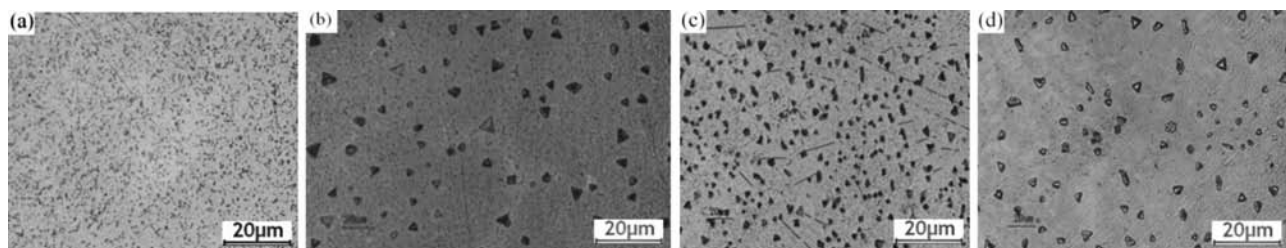
## 2 试验结果与讨论

### 2.1 复合材料的显微组织与界面结合状态

复合材料所用基体铬锆铜的金相显微组织如图1a所示, 在铜基体中分布着大量的铬和锆物相粒子, 共晶反应导致铜和锆、铬和锆形成多种化合物相, 因而在晶界处有黑色颗粒相偏聚, 晶界内也分布着少量的黑色颗粒相<sup>[11]</sup>。添加2%、6%、8%石墨颗粒复合材料的金相显微组织如图1b、c、d所示, 其中较小的点状颗粒为铬锆铜基体中经腐蚀后的铜、铬、锆微粒, 较大的片状物为加入的石墨颗粒并均匀分布在铬锆铜基体中。并且, 镀镍石墨表面包覆的金属镍可以与铬锆铜基体中的铜无限互溶, 使复合材料的界面结合由简单的机械结合变为以面心立方结构形式的固溶体结合<sup>[12]</sup>。这表明, 可以通过机械搅拌的方法使石墨颗粒功能相成功地加入到金属液中, 制备出颗粒增强金属基复合材料。

### 2.2 复合材料的硬度

表1为基体铬锆铜及不同镀镍石墨含量的复合材料显微硬度值。可以看出: 添加镀镍石墨颗粒复合材料的硬度相比基体铬锆铜都有所降低, 这是因为基体铬锆铜试样经过热处理退火、冷压、轧制等一系列工艺处理。而石墨复合材料并没有经过此等工艺处理。通过对比发现, 随着石墨含量的增大, 复合材料的硬度逐渐降低, 但降低幅度很小。因此, 后续试验中可通过热处理工艺来提高石墨复合材料的硬度值<sup>[13]</sup>。



(a) 铬锆铜

(b) 2%石墨

(c) 6%石墨

(d) 8%石墨

图1 不同石墨含量复合材料的金相显微照片

Fig. 1 Metallographic micrograph of composite materials with different amounts of graphite

### 2.3 复合材料的耐磨性

#### 2.3.1 复合材料摩擦磨损性能

复合材料摩擦磨损试验结果如图2所示，由图2a可以看出，基体铬锆铜的摩擦系数表现最高为0.45，添加石墨颗粒的复合材料摩擦系数均低于基体铬锆铜。随着石墨含量的增加和摩擦时间的延长，摩擦系数逐渐降低并趋于稳定，石墨含量为8%的复合材料摩擦系数最低为0.3。这表明所加入的石墨颗粒依据自身的润滑特性赋予了复合材料优良的减磨耐磨性，使得摩擦过程趋于稳定。由图2b可以看出：加入体积分数为2%、6%、8%镀镍石墨颗粒的复合材料体积磨损率与基体铬锆铜相比均有所降低，即复合材料的耐磨性均高于基体铬锆铜合金。而且添加2%、6%、8%镀镍石墨颗粒复合材料的磨损率依次降低，即体积分数为2%的复合材料的耐磨性最差，体积分数为8%的复合材料的耐磨

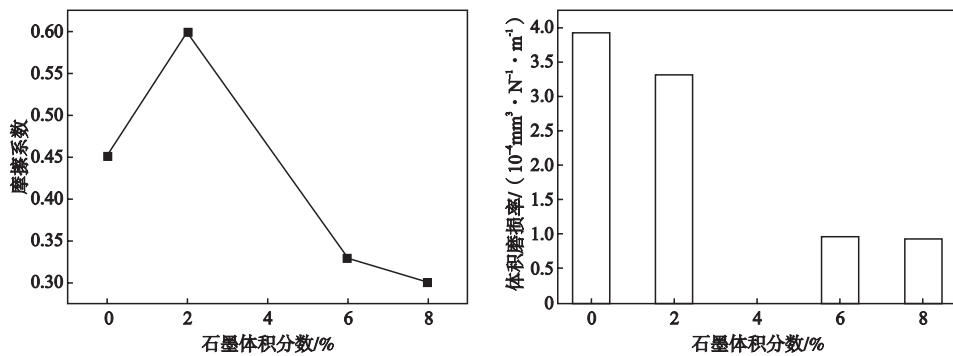
性最好。体积分数为8%的复合材料耐磨性较基体铬锆铜提高了76%。石墨复合材料的耐磨性好于基体铬锆铜是因为加入的石墨粒大、质硬，具有很好的润滑减磨性能<sup>[14]</sup>。加入铬锆铜基体后在基体金属表面形成一层固体润滑膜，在复合材料承受磨损时可以看作是石墨颗粒直接承受载荷，使基体材料避免直接与摩擦副接触，减小磨损<sup>[15]</sup>。

#### 2.3.2 摩擦试样能谱分析

图3为基体铬锆铜试样及不同石墨含量的复合材料EDS图谱，可以看出，经过摩擦磨损试验后的试样混合层中含有碳、氧、铬、镍、铜等元素，其中氧元素的出现表明在这一试验条件下复合材料在摩擦磨损过程中受到对磨盘的对磨作用，导致大气中的氧与试样组织接触于摩擦表面形成一层光滑致密的氧化膜<sup>[4]</sup>，同时极大地提高了材料的耐磨性。

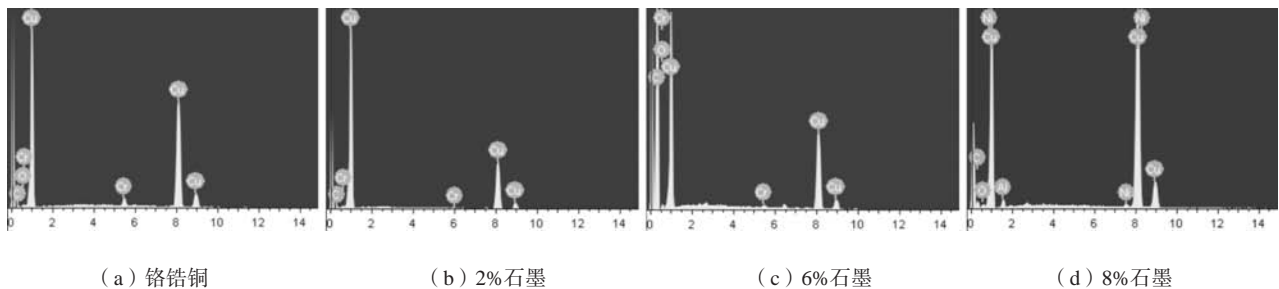
表1 基体铬锆铜及复合材料硬度  
Table 1 Hardness (HV) of Cu-Cr-Zr matrix and composites

Cu-Cr-Zr 基体	石墨2%	石墨6%	石墨8%
139.84	138.26	136.18	135.75



(a) 不同石墨含量的复合材料摩擦系数 (b) 不同石墨含量的复合材料体积磨损率

图2 复合材料摩擦磨损试验结果  
Fig. 2 Friction and wear test results of composites



(a) 铬锆铜 (b) 2%石墨 (c) 6%石墨 (d) 8%石墨

图3 不同石墨含量的复合材料EDS谱  
Fig. 3 EDS spectra of composite materials with different amounts of graphite

### 2.3.3 复合材料表面磨损形貌

图4为基体铬锆铜试样及不同石墨含量的复合材料在50 N载荷下摩擦磨损后的表面形貌。从图4a看出,在扫描电子显微镜下可观察到其摩擦磨损后的表面出现许多凹凸不平的抛削坑,基体表面出现大量层片状组织。这是由于基体铬锆铜没有增强相颗粒和合金强化作用,材料表面润滑性较低,摩擦阻力大。在摩擦磨损试验过程中受到对磨材料的抛削作用而导致基体铬锆铜表面磨损严重,组织出现分层,表现为分层磨损<sup>[16]</sup>。

从图4b看出,相较于基体铬锆铜,其磨损面较平

坦,没有出现大量深而大的抛削坑,组织脱落较少,无明显的分层现象。由于材料本身所存在的组织缺陷导致摩擦时在局部应力的作用下致使摩擦面出现少量的摩擦裂纹。

从图4c看出,摩擦后试样表面组织形貌较为光滑,无抛削坑和摩擦裂纹出现,无颗粒物脱落现象。

从图4d看出,加载作用下石墨颗粒被挤压出并与对磨表面的磨削颗粒物相结合,在连续的机械磨损作用下形成富含石墨颗粒的机械混合层并粘附于试样表面,保护了对磨试样,起到了自润滑作用<sup>[17]</sup>。

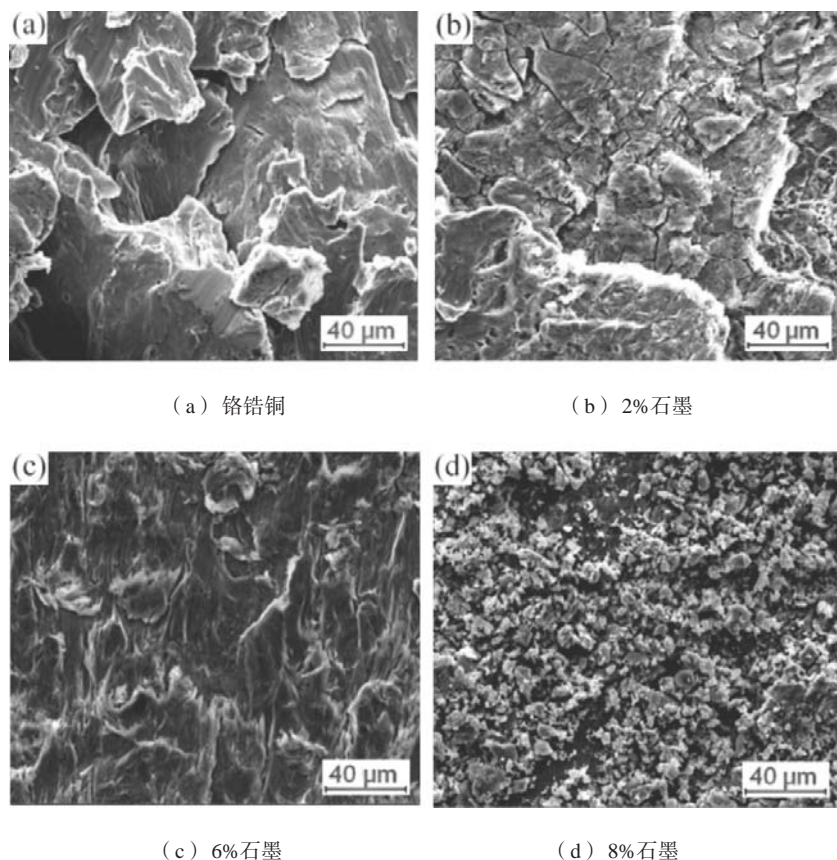


图4 不同石墨含量的复合材料磨损表面SEM形貌

Fig. 4 SEM morphologies of wear surfaces of composite materials with different amounts of graphite

## 3 结论

(1) 铬锆铜合金及镀镍石墨颗粒增强铬锆铜基复合材料的金相组织中都含有微小的点状铜、铬、锆微粒。镀镍石墨颗粒增强铬锆铜基复合材料的金相显微组织中,石墨颗粒呈片状均匀分布在铬锆铜基体中,无其他明显反应物生成。

(2) 未经热处理强化工艺的镀镍石墨颗粒增强铬锆铜基复合材料的硬度都低于经过热处理强化工艺的基体铬锆铜。体积分数为8%的镀镍石墨颗粒增强铬锆

铜基复合材料的硬度最低,为HV 135.75,仅比基体硬度减少了2.9%。

(3) 体积分数为2%、6%、8%的镀镍石墨颗粒增强铬锆铜基复合材料的耐磨性与基体铬锆铜相比均明显提高,磨损率依次降低。体积分数为8%的镀镍石墨颗粒增强铬锆铜基复合材料的耐磨性最好,耐磨性较基体提高了76%。

(4) 体积分数为8%的镀镍石墨颗粒增强铬锆铜基复合材料的磨损表面较为平坦,无明显的犁沟及抛削坑,颗粒组织均匀,表现为磨粒磨损。



## 参考文献:

- [1] 冯立明, 魏雪. 一种锂离子电池锡镍碳复合负极材料的制备方法: CN102136567A [P]. 2011-07-27.
- [2] 李搏. 氧化石墨烯/多孔陶瓷复合膜的制备及表征 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [3] 张铭君, 朱世伟, 于俊凤, 等. 石墨/铜基复合材料研究进展 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (11): 2565-2570, 2578.
- [4] 周永欣, 徐飞, 吕振林, 等. SiC和石墨颗粒混杂增强铜基复合材料的摩擦磨损性能 [J]. 机械工程材料, 2015, 39 (2): 90-93, 97.
- [5] ZHANG Conglin, CAI Jie, LV Peng, et al. Surface microstructure and properties of Cu-C powder metallurgical alloy induced by high-current pulsed electron beam [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 697: 96-103.
- [6] 张晓丹, 崔云涛, 马捷, 等. 石墨的铜包覆对自润滑材料的性能影响 [J]. 有色金属: 冶炼部分, 2016 (1): 53-57.
- [7] DU Yunhui, ZHANG Peng, ZHANG Weiyi, et al. Distribution of SiC particles in semisolid electromagnetic-mechanical stir-casting Al-SiC composite [J]. China Foundry, 2018, 15 (05): 351-357.
- [8] 王文芳, 许少凡, 凤仪, 等. 碳-铜基复合材料机械摩擦磨损性能研究 [J]. 金属热处理, 2000 (4): 19-21.
- [9] 纪汉成, 汤叶卫. 浅谈砂型铸造排气系统的设计 [J]. 铸造, 2017, 66 (3): 263-268.
- [10] 马彦彬, 张金山, 张龙龙. 电磁搅拌工艺对Mg-Zn-Y-Mn合金显微组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2018, 67 (7): 616-621.
- [11] 丁润东, 沈以赴, 李博, 等. 机械合金化制备Ti-Cu非晶涂层 [J]. 中国有色金属学报, 2012, 22 (7): 2023-2030.
- [12] 赵江涛, 陈文革, 陈景爱. QBe1.9和Cu-0.5Cr-0.2Zr合金显微组织及焊接性能分析 [J]. 金属热处理, 2012, 37 (12): 20-24.
- [13] 尹延国, 杜春宽, 郑治祥, 等. 镀镍石墨粉对铜基石墨复合材料力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2006 (11): 1895-1901.
- [14] 韩丹. 铜基摩擦制动材料的制备及摩擦磨损性能研究 [D]. 长春: 长春工业大学, 2015.
- [15] 浩宏奇, 丁华东, 李雅文, 等. 石墨含量对铜基材料摩擦磨损性能的影响 [J]. 中国有色金属学报, 1997 (3): 123-126.
- [16] PADEMO V N, BARANOV N G, DYACHENKO L I, et al. Influence of porosity and sliding rate on the tribotechnical properties and features of deformation of the surface layers of copper-graphite materials during friction without lubrication [J]. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1988, 26 (8): 1.
- [17] MOUSTAFA S F, EL-BADRY S A, SANAD A M, et al. Friction and wear of copper-graphite composites made with Cu-coated and uncoated graphite powders [J]. Wear, 2002, 253 (7): 699-710.

## Microstructure and Properties of Ni-Graphite Particles Reinforced Wear-Resistant Cu-Cr-Zr Matrix Composites

WANG Zhao<sup>1,2</sup>, FAN Xin-hui<sup>1,2</sup>, LI Bing<sup>1</sup>, WANG Xin<sup>1</sup>, YANG Ke<sup>1</sup>, KONG Yi-long<sup>1,2</sup>, ZHAO Xin<sup>1,2</sup>, LIU Jie<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China; 2. Shangluo University, Shangluo 726000, Shaanxi, China)

### Abstract:

Ni-coated graphite granules reinforced Cu-Cr-Zr matrix composites with volume fraction of 2%, 6% and 8% were prepared by metal melting casting process, and their microstructure, hardness, abrasion resistance as well as wear characteristics were studied and compared with the matrix. The results showed that the Ni-graphite particles were distributed uniformly in the matrix, and were bound tightly to the matrix without any reactions. The Ni-graphite particle reinforced Cu-Cr-Zr matrix composite with a volume fraction of 8% without heat treatment had the lowest hardness of HV 135.75, which was only 2.9% lower than the Cu-Cr-Zr matrix. The wear resistance of the Ni-coated graphite particle reinforced Cu-Cr-Zr matrix composite with a volume fraction of 8% was higher than those with a volume fraction of 2% and 6%, and with an increase of 76% than Cu-Cr-Zr matrix. Wear surface was relatively flat, with no obvious furrow and throwing pits, grain structure was uniform, and the performance was abrasive wear.

### Key words:

metal melting and casting; Ni-coated graphite particles; chromium zirconium copper matrix composites; friction and wear; wear resistance