

# 石墨烯强化 CuCr25 合金的制备与性能

肖文凯<sup>1</sup>, 穆迪琨祺<sup>1</sup>, 翟显<sup>1</sup>, 阮学锋<sup>2</sup>, 王国栋<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

(2. 武汉大学 纳米科学与技术研究中心, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 采用高压低温 SPS 烧结的新工艺制备了高硬度高电导率的 CuCr25/石墨烯复合材料。X 射线衍射 (XRD) 和拉曼分析 (Raman) 揭示石墨烯在新合金的制备过程中并未变性亦无新相产生, 利用扫描电镜 (SEM) 以及能谱仪 (EDS) 进行形貌分析显示石墨烯在新合金中分散均匀。性能测试结果显示, 在 600 °C, 300 MPa 条件下经 SPS 烧结后制得的 CuCr25/石墨烯合金, 与对比试验中采用相同工艺制得的未添加石墨烯的 CuCr25 合金相比, 硬度提高了 11.3%, 电导率下降了 4.2%; 而与传统工艺制备的 CuCr25 合金相比, 其电导率和硬度则分别提高了 35% 和 48%, 表明成分和工艺的改进对性能的提高均有贡献。

**关键词:** 复合材料; CuCr25 合金; 石墨烯; 组织; 性能

**中图分类号:** TG146.1+1

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2017)12-3862-06

CuCr 合金本质上是一种两相的假合金, 两相间的固溶度极低, 就此结合可充分发挥出 Cu 相的高电导和 Cr 相的高硬度的综合性能<sup>[1]</sup>, 现已成为大功率触头材料中最为成功的一种<sup>[2]</sup>。目前制备 CuCr 触头材料的主要手段有粉末冶金法, 熔渗法和熔铸法三种<sup>[3]</sup>。而提高 CuCr 合金性能的方法主要有以下两种: (1) 添加第三相组元以强化基体, 但按电导理论因强化引起的晶格畸变往往在强度提高的同时会损失部分电导率, 因此关键在于优化添加元素及工艺, 做到强度提高多, 电导降低小; (2) 革新或改进制备工艺及其参数, 改进第二组元性质, 优化两相组织以提高综合性能。

已有研究表明, 在 CuCr25 合金中加入一定的 Ni 或 Co 后, 合金的硬度得到了提高, 但是电导率有所下降<sup>[4]</sup>; 添加适量 W 和 C 可以提高合金的耐电压强度, 但电导率下降较为明显<sup>[5]</sup>。而制备出的微晶, 纳米晶 CuCr 合金虽然提高了真空电弧稳定性, 但由于其晶粒微小, 晶界过多导致其致密度和电导率等性能指标都未能超出传统 CuCr 合金水平<sup>[6]</sup>。近来有研究<sup>[7]</sup>采用机械活化热压法以 Cr<sub>2</sub>Nb 相代替 Cr 相制备出 Cu/Cr<sub>2</sub>Nb 合金, 电导率达到 29.6 MS/m, 硬度(HV)达到 1580 MPa, 使其性能有了显著提高。

对于 CuCr 合金, 同时拥有高电导率和高硬度一直是令人期待的。石墨烯 (graphene) 有着突出的热导率

(5000 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>), 最高的电导率 (100 MS/m) 和硬度<sup>[8]</sup>, 而这些性能正是 CuCr 合金所需要的, 我们认为将其作为第三组元添加其中值得尝试。目前已有一些将石墨烯加入到金属基体中的研究获得了进展。在 TiAl 基体中添加少量多层石墨烯可以使得基体的硬度提高 30%<sup>[9]</sup>; 在纯铜中添加石墨烯后使得纯铜的抗拉强度和弹性模量各提高了 30%<sup>[10]</sup>。但几乎所有在金属基体中添加石墨烯的研究多侧重于力学性能方面, 鲜有涉及对电学性能的探讨, 如前所述由于强化相的添加易使触头材料在各项性能之间发生此消彼长的情况, 因此在添加石墨烯的过程中如何实现新型触头材料的优异综合性能仍是一个值得继续探索的问题。

## 1 实验

本研究采用在原料中添加石墨烯粉体而后进行低温高压 SPS 烧结的新型工艺路线来制备 CuCr25/石墨烯触头材料。烧结温度限定在不超过 600 °C, 为的是防止石墨烯本身的性能改变及与铬元素的反应, CuCr25 触头材料的常规烧结温度一般是在 900~1000 °C, 而在 600 °C 的较低温度下烧结则需要通过提高烧结压力方有可能达到目的, 为此我们将烧结压力分别设定为 50, 100, 150, 200, 250 和 300 MPa 以便比较。常规 SPS 烧结模具通常为石墨制造, 只能承受 80 MPa 以下的压强, 为此我们特别采用了碳化钨

收稿日期: 2016-12-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51403223)

作者简介: 肖文凯, 男, 1967 年生, 博士, 副教授, 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072, 电话: 027-68772253, E-mail: xiaowenkai2003@163.com

的模具进行烧结。为探讨石墨烯作为新型第三组元对 CuCr25 合金性能的影响, 本研究特意不采用有高速球磨特征的机械合金化 (MA) 处理, 因为此法常导致杂质明显增多, 引起电导率的下降, 从而使影响因素多元化以至于干扰对石墨烯作用的清晰认定, 因此只是将原始粉末在球磨机上进行低转速短时间混合以达均匀分散目的即可。同时为分析石墨烯在新触头合金中的作用, 对不加石墨烯的样品做同条件下的对比试验。本项利用 SPS 技术进行低温高压烧结制备新型 CuCr25/石墨烯复合材料的研究工作鲜见报道。

实验所用的原始粉末, Cu 粉由常州广汇金属有限公司提供, 粒度小于 74  $\mu\text{m}$ ; Cr 粉来自国药集团化学试剂有限公司, 粒度小于 74  $\mu\text{m}$ ; 添加的单层石墨烯粉体来自南京先锋纳米公司, 单层率 80%, 厚度 0.7 nm, 平均颗粒大小为 2  $\mu\text{m}$ 。

原始粉末的混合在 HFG7-R75S2 行星式球磨机上进行, 将 Cu 粉和 Cr 粉按照质量比 3:1 称取后, 再加入 1% (质量分数) 的石墨烯粉体进行球磨混合 (乙醇中)。将球磨罐抽真空至 0.1 Pa, 磨球为不锈钢球, 转速 60 r/min, 球料比 8:1, 球磨时间 4 h。将混合后的粉体在 80  $^{\circ}\text{C}$  干燥 5 h, 再进行 SPS (住友石碳 320MKII) 放电等离子烧结, 压力分别为 50, 100, 150, 200, 250 和 300 MPa, 升温速度 50  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , 烧结温度 600  $^{\circ}\text{C}$ , 保温保压时间 10 min。

用 FQR-7501 型涡流电导仪测量电导率, 用排水法测量致密度, 采用 RM-1000 型 Confocal Raman Microspectroscopy 拉曼光谱分析石墨烯特征, 利用 BRUKER axs D8 ADVANCE X 射线衍射仪, FESEM (FEI-SIRION) 扫描电子显微镜, Genesis 7000 EDS 分别对试样进行相结构, 形貌观察和成分分布分析, 用 HVS-3 型维氏硬度计测量烧结试样硬度, 加载负荷 30 N。

## 2 结果与讨论

### 2.1 XRD 和 Raman 分析

图 1a, 1b, 1c 分别为所要添加的单层石墨烯粉体, 混合后的原始粉末和 300 MPa, 600  $^{\circ}\text{C}$  SPS 烧结后 CuCr25/石墨烯试样的 XRD 图谱。从图 1a, 1b 中可以看出, 石墨烯的峰是在 20  $^{\circ}$ ~30  $^{\circ}$  附近出现的 1 条比较宽的谱带<sup>[11]</sup>, Cu 与 Cr 的衍射峰突出, 其中 Cu 峰比 Cr 峰更高些, 这与两相含量的比例相符合。图 1c 是经过 SPS 烧结过后试样的 XRD 图谱, Cu 和 Cr 峰的形状和位置与烧结前相一致, 但基本观察不到 C 的峰的存在, 这可能是因为烧结后 Cu 相和 Cr 相的衍射效应更强, 加之石墨烯的含量仅有 1%, 又属轻元素, 这导致了 XRD 图谱难以显示其衍射峰。值得注意的是, 由上述 3 幅图谱和标准 PDF 卡片<sup>[12]</sup>对比可知, 并无 Cr 的碳化物的产生, 说明在 SPS 烧结中 Cr 并没有与石墨烯发生反应形成碳化物, 原因在于 Cr 的碳化物的形成温度大约在 1100  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[12]</sup>, 而本烧结是在较低的 600  $^{\circ}\text{C}$  完成的, 即有效避免了新相的生成。

目前拉曼光谱已成为检测石墨烯最为普遍的方法。如图 2 所示, 图 2a 为所要添加的石墨烯粉体的拉曼光谱, 图 2b 为经过 300 MPa, 600  $^{\circ}\text{C}$  SPS 烧结后得到的 CuCr25/石墨烯试样的 Raman 光谱。从以上 2 幅图中都能看到石墨烯所具有的 3 个典型特征峰<sup>[13]</sup>: 在 1580  $\text{cm}^{-1}$  处的 G 峰, 代表了  $\text{sp}^2$  碳原子的面内振动, 1350  $\text{cm}^{-1}$  处的 D 峰代表了石墨烯的结构缺陷, 在 2700  $\text{cm}^{-1}$  处还有 1 个少层石墨烯所具有的特征峰 2D 峰。除此之外, 还可以在图中观察到在约 2950  $\text{cm}^{-1}$  处有 1 个特征峰 D+G 峰, 它也是石墨烯的缺陷峰之一。所以根据上图中峰的形状与位置可以综合判定出, 经过 SPS 300 MPa 高压 600  $^{\circ}\text{C}$  烧结后, 作为第三组元添加的石墨烯的性能并未发生明显变化。

### 2.2 CuCr25/石墨烯复合材料的微观组织与结构

经过 300 MPa, 600  $^{\circ}\text{C}$  SPS 烧结后得到 CuCr25/石墨烯试样的微观形貌和 C 分布状态在图 3a、3b 中已经分别给出。图 3a 是试样的金相组织形貌, 其中腐蚀程度较深的是 Cu 相, 腐蚀程度较浅呈岛屿状的是

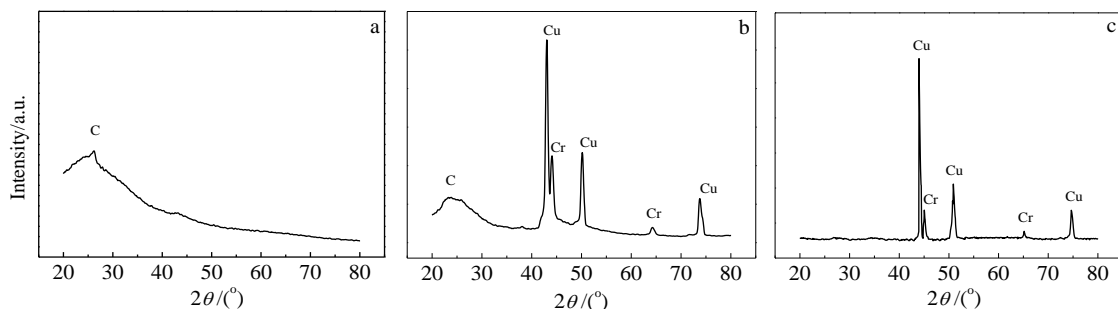


图 1 石墨烯原始粉末和经 300 MPa, 600  $^{\circ}\text{C}$  SPS 烧结所制备试样的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of graphene (a), original powders (b) and CuCr25/graphene sample sintered under 300 MPa, 600  $^{\circ}\text{C}$  (c)

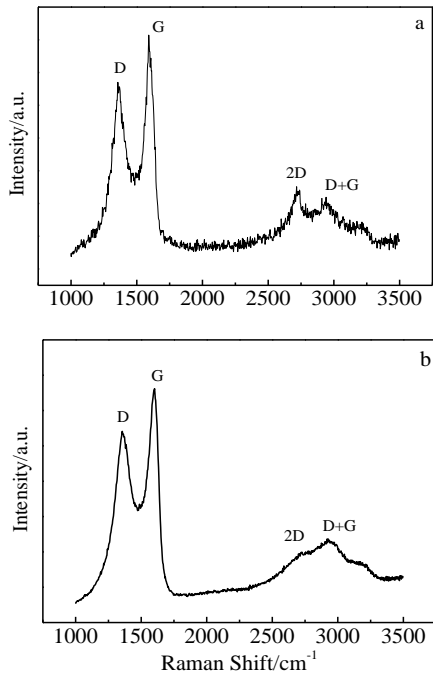


图 2 原始粉末和经 300 MPa, 600 °C SPS 烧结制备试样的拉曼光谱

Fig.2 Raman spectra of original powders (a) and CuCr25/graphene sample sintered under 300 MPa, 600 °C (b)

Cr 相。从图中的显微组织中可以看出两相分布均匀，没有出现铸造法生产经常会发生的 Cr 相偏聚等不利于材料性能的现象。细小 Cr 相的存在，对于提高 CuCr 合金的耐电压水平有很重要的意义<sup>[14]</sup>。传统粉末冶金法烧结温度较高，容易造成晶粒的偏聚和长大，而本研究将烧结过程控制在非液相烧结，升温降温速度快，保温时间短，在相当程度上避免了成分偏析和晶粒长大。图 3b 是 C 元素的 EDS 面分布图，其中红色点状部分代表 C 元素的分布状态。根据上述 XRD 和 Raman 光谱分析可知，该材料中的 C 元素只有石墨烯一种存在形式，所以在这里即为石墨烯的分布状况。结合以上三者的测试结果对比分析可知，经过球磨混粉再经 SPS 高压烧结后，石墨烯性能稳定，在所制备的 CuCr25/石墨烯复合材料中的分布细小而均匀，未发生大面积的团聚现象。

图 4a 是 CuCr25/石墨烯复合材料断口的 SEM 图，结合微区 EDS 能谱分析（见图 4b）及石墨烯特征形貌及尺寸可知，图中箭头处即为石墨烯。根据图 4a 可推断出，新合金中的石墨烯的尺寸在 5~8 μm，比原始的石墨烯粉体颗粒尺寸要大，可能还是在于球磨混粉方式未能进一步将石墨烯彻底分散所致。虽然高速长时间球磨会使得粉末分散更为均匀，且能在一

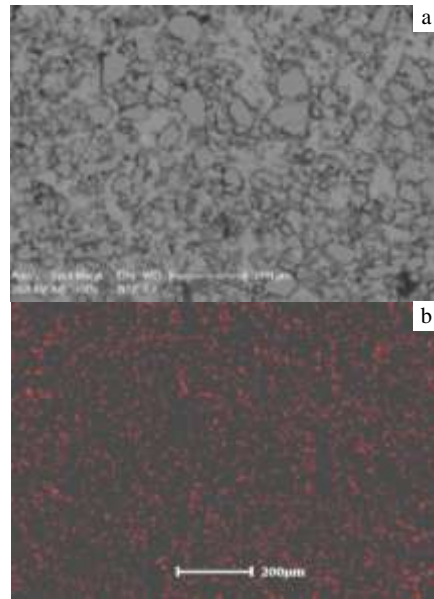


图 3 300 MPa, 600 °C SPS 烧结制备试样的微观形貌和 C 元素的 EDS 面分布图

Fig.3 Microstructure (a) and distribution of C by EDS (b) of CuCr25/graphene sample sintered under 300 MPa, 600 °C

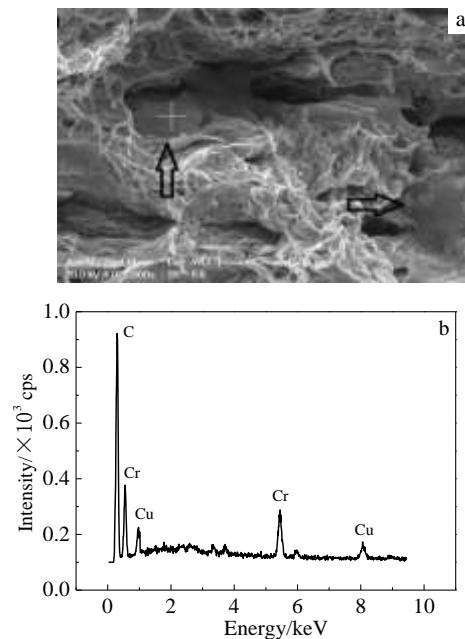


图 4 300 MPa, 600 °C SPS 烧结制备试样的断口形貌和 EDS 能谱

Fig.4 SEM fracture surface of CMCG (a) and EDS spectrum of the graphene in CuCr25/graphene sample sintered under 300 MPa, 600 °C (b)

一定程度上改善石墨烯的团聚问题, 但是高速球磨会给原始粉末引入诸多杂质如 Fe, Cr 等, 对材料本身的力学和电学性能带来很大的影响, 所以本研究只是采用低速球磨来达到混粉的目的, 如何有效分散添加石墨烯仍然是一个需要进一步探索的问题。

### 2.3 CuCr25/石墨烯复合材料的性能

图 5 是在 600 °C, 不同压力下 SPS 烧结制备的一系列 CuCr25/石墨烯合金和 CuCr25 合金的电导率(图 5a) 和致密度(图 5b) 曲线。据图中曲线可以看出, 随着烧结压力的增加, 2 种合金的致密度和电导率都有了明显的提高, 但提高的趋势最后都趋于平缓。在 200 MPa 压力以上烧结时即可得到致密度高达 99% 以上的致密合金。与此同时可以发现, 加入石墨烯烧结后合金的致密度比未加的要高, 这可能与复合粉体中不同颗粒度的粒度协调配合有关, 亦有可能是石墨烯降低了颗粒间的摩擦阻力所致, 对此将在以后进一步研究。

致密度和电导率的提高与压力的增加呈正相关, 烧结过程中随着压力的增加, 合金内部的空洞和缝隙减少, 晶粒结合更为紧密, 致密度得以提高, 由此电子传播遇到的散射更少, 于是电导率上升。对比两者的电导率可以看出, 300 MPa 时 CuCr25/石墨烯的电导率相比于同等条件下制备的 CuCr25 合金 (35.3 MS/m)

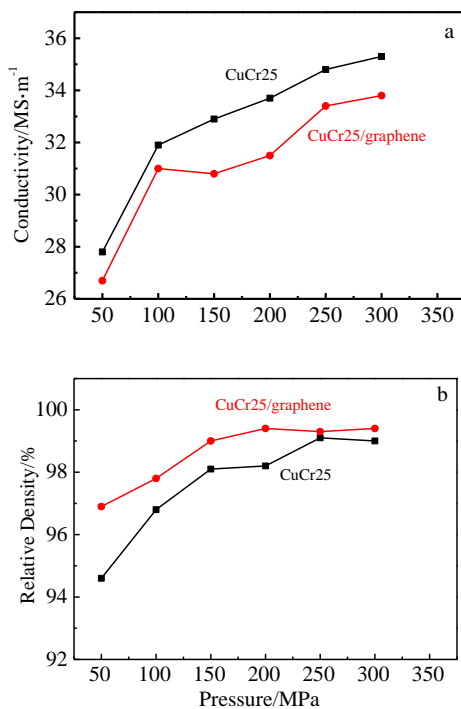


图 5 600 °C 不同压力下 SPS 制备试样的电导率和致密度曲线  
Fig.5 Conductivity (a) and density (b) of CuCr25/graphene and CuCr25 samples sintered under different pressures by SPS

略微下降了约 4.2%, 但仍达到了很高的 33.8 MS/m, 约是常规方法制备的 CuCr25 合金 (25MS/m)<sup>[5]</sup> 的 1.35 倍。新相石墨烯的加入可能是导致合金电导率有所下降的原因, 由于石墨烯对金属电导率影响的相关报道很少, 为了探究这个问题, 我们设计了下面的实验予以验证。采取 60 r/min 球磨低速混粉, 在 600 °C, 50 MPa (对纯铜粉而言, 50 MPa 压力已能保证足够致密度), 保温 5 min 的条件下用 SPS 烧结出了 1% 石墨烯/Cu 复合材料和同等条件下制备的纯铜试样。经过测量, 烧结出的纯铜试样电导率为 56 MS/m, 与标准纯铜棒的电导率完全一致, 而石墨烯/Cu 复合材料的电导率为 52.2 MS/m, 电导率约下降了 6.7%, 由此可见石墨烯的加入会使纯铜的电导略微下降。

近代电导理论从微观层面探讨了电阻的本质, 在实际晶体中, 杂质、缺陷、晶粒间界面等结构上的不完整会产生电阻, 而石墨烯的加入使得晶格发生畸变缺陷, 引起本来的周期性势场发生偏离, 形成所谓的“杂质散射”, 从而导致电导率的下降<sup>[15]</sup>, 但由于石墨烯本身的电导率很高, 其下降的幅度可能会小于其他添加组元。显然, 第三相加入的目的在于提高合金的强度, 这构成了下面部分要讨论的内容。

图 6 是在 600 °C 不同压力下 SPS 烧结制备的一系列 CuCr25/石墨烯复合材料和 CuCr25 合金样品的硬度曲线, 从图中可以清楚地看到, 随着烧结过程中压力的增加, 2 种材料的硬度都在增加, 同样都是刚开始增加得较为明显, 到高压时趋于平缓, 由此可以推测出随着压力的继续增加, 硬度上升基本达到极限。压力的提高使得材料的孔隙度更小, 变得更为致密, 有利于硬度的提高, 在超过 100 MPa 进行烧结时, CuCr25/石墨烯复合材料的硬度开始高于 CuCr25 合金, 并在 300 MPa 时达到了的最高硬度 1480 MPa, 比同条件下制得的 CuCr25 合金 (1330 MPa) 提高了

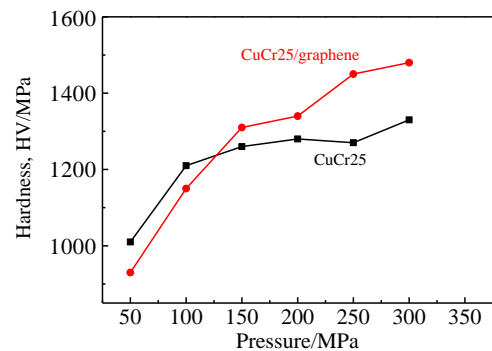


图 6 600 °C 不同压力下 SPS 制备试样的硬度曲线  
Fig.6 Hardness of CuCr25/graphene and CuCr25 samples sintered at 600 °C under different pressures

11.3%，相比于常规方法制得的 CuCr25 合金(1000 MPa)<sup>[4]</sup>则提高了 48%。

采用高压低温 SPS 烧结工艺对硬度的提高有着突出的作用，对比常规烧结工艺(1000 °C, 1.5 h)，由于烧结温度的降低及烧结时间大幅缩短(600 °C, 10 min)，使得 Cu, Cr 两相基本保持了原始混粉的分布状态，没有长大和偏聚，充分发挥了弥散 Cr 相高硬度的作用，导致了硬度的显著提高。

新型合金硬度的提高显然也与石墨烯的加入有关。一方面，石墨烯本身有极高的硬度，属于硬质相，加入到基体中有弥散强化作用及界面上的应力转移效应<sup>[16]</sup>；另一方面，基体与石墨烯因为不同的点阵结构而产生的晶格畸变以及热膨胀系数的不同，会在烧结过程中产生残余应力和大量位错，这都构成了石墨烯相强化导致硬度提高的机制。所以，高压烧结和添加石墨烯的协同作用是本实验不同于常规方法而获得高硬度 CuCr25/石墨烯复合材料的原因。从图中还可观察到压力在 50~100 MPa 阶段，CuCr25/石墨烯复合材料的硬度低于同等方式得到的 CuCr25 合金，原因可能是由于烧结温度和压力还不够充分，合金的内部存在孔洞和空隙，石墨烯界面和 Cu, Cr 界面尚没有实现真正的原子连接，石墨烯大量存在于缝隙中而未钉扎在晶界处，因而没有对硬度的提高产生作用，甚至还阻碍了 Cu 和 Cr 的烧结过程；而单纯的 Cu 和 Cr 相更易于烧结，所以硬度略高，但随着压力的增加，石墨烯与 Cu 相和 Cr 相逐渐连接起来，其作用显现出来，最后超过 CuCr25 合金达到一个更高的硬度。

根据美国西屋公司对 CuCr25 合金的要求<sup>[5]</sup>，电导率在 20~29 MS/m 范围内均为合格，对硬度则尚未提出明确要求，但高硬度显然有利于其综合性能及使用寿命。本研究制备的 CuCr25/石墨烯复合材料在电导率及硬度指标上已显著高于常规方法所得到的水平。已有研究表明，在 CuCr 合金中加入 3% 以内的 C 对合金的耐电压强度没有危害，反有利于提高合金的抗熔焊能力<sup>[17]</sup>。更加全面的电性能指标的研究与测试工作将会在以后的试验中进一步探讨。

### 3 结 论

1) 随着烧结压力的增加，CuCr25/石墨烯复合材料的电导率，致密度和硬度都随之增加，在 300 MPa 时达到最高，分别为 33.8 MS/m, 99.6% 和 1480 MPa，相比于同样条件下制备出的 CuCr25 合金，硬度提高了 11.3%，电导率下降了约 4.2%，是现有常规方法制得的 CuCr25 合金电导率的 1.35 倍，硬度的 1.48 倍。

2) 较低的烧结温度一方面保证了添加的第三组元

石墨烯相的稳定性，有力发挥了其弥散强化的作用，还避免了常规较高温度烧结工艺所带来的 Cu, Cr 基体相的长大与偏聚的局限性，保持了弥散 Cr 相高硬度的作用，从而大幅度提高了新型 CuCr25/石墨烯触头合金的综合性能，显然烧结中的高压强为这一新工艺提供了有力保证。

3) 石墨烯作为新兴的第三组元添加剂有望发挥出其增加强度显著而降低电导率微弱的突出作用。以上结论对 CuCr 合金体系的设计与制造有着重要的参考价值，不失为一种有较大发展潜力的 CuCr 合金制备的新途径。

### 参考文献 References

- [1] Zhao Q, Shao Z B, Liu C J *et al.* *J Alloy Compd*[J], 2014, 607: 118
- [2] Peng L M, Mao X M, Xu K D *et al.* *J Mater Process Tech*[J], 2005, 166(2): 193
- [3] Xian Aiping(洗爱平), Zhu Yaoxiao(朱耀宵). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2003, 39(3): 225
- [4] Zhang Chengyu(张程煜), Wang Jiang(王江), Zhang Hui(张晖) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2001, 30(4): 286
- [5] Wang Libin(王立彬), Zhang Chengyu(张程煜), Ding Bingjun(丁秉钧). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2003, 32(1): 41
- [6] Li Xiuyong(李秀勇), Wang Yaping(王亚平), Ding Bingjun(丁秉钧). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 1999, 23(5): 362
- [7] Lu Shiqiang(鲁世强), Hu Chunwen(胡春文), Wang Kelu(王克鲁) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(5): 842
- [8] Lee C, Wei X D, Kysar J W *et al.* *Science*[J], 2008, 321(5887): 385
- [9] Xu Z S, Shi X L, Zhai W Z *et al.* *Carbon*[J], 2014, 67: 168
- [10] Hwang J, Yoon T, Jin S H *et al.* *Adv Mater*[J], 2013, 25(46): 6724
- [11] Murugan A V, Muraliganth T, Manthiram A. *Chem Mater*[J], 2009, 21: 5004
- [12] Zhao Zhiwei(赵志伟), Peng Yongbing(彭泳丙), Yuan Haiying(袁海英) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2012, 22(7): 2005
- [13] Nieto A, Lahiri D, Agarwal A. *Carbon*[J], 2012, 50(11): 4068
- [14] Shkodich N F, Rogachev A S, Vadchenko S G *et al.* *J Alloy Compd*[J], 2014, 617: 39
- [15] Vencl A, Rajkovic V, Zivic F *et al.* *Appl Surf Sci*[J], 2013,

280: 646

[16] Kvetkova L, Duszova A, Hvizdos P *et al. Scripta Mater*[J],  
2012, 66(10): 793

[17] Ding Bingjun(丁秉钧), Wang Xiaotian(王笑天). *Journal of Xi'an Jiaotong University*(西安交通大学学报)[J], 1994, 28(7): 79

## Preparation and Mechanical Properties of Graphene Reinforced CuCr25 Composites

Xiao Wenkai<sup>1</sup>, Mu Dikunqi<sup>1</sup>, Zhai Xian<sup>1</sup>, Ruan Xuefeng<sup>2</sup>, Wang Guodong<sup>1</sup>

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(2. Nano Science and Technology Research Centre, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Novel graphene reinforced CuCr25 matrix composites (GCMC) with high hardness and conductivity were prepared by spark plasma sintering (SPS) under high pressure and low temperature after low speed ball-milling mix. It is confirmed that the graphene remains and no new phase is found by X-ray diffraction and Raman spectroscopy. Structural characterization of GCMC was performed using field emission scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS). The results show that the graphene is homogeneously distributed in matrix after the sintering process. The hardness of GCMC with 1wt% graphene sintered under 300 MPa and 600 °C is increased by 11.3% compared with that of CuCr25 alloys fabricated by the same method, though its conductivity is decreased by 4.2%. Compared with the CuCr25 alloys consolidated by the conventional method, the conductivity and hardness of the new-type GCMC are about 1.35 and 1.48 times higher, respectively, which indicates that the additional phase and new process all make contributions to the enhancement of GCMC.

**Key words:** composite; CuCr25 alloy; graphene; microstructure; properties

---

Corresponding author: Xiao Wenkai, Ph. D., Associate Professor, School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China, Tel: 0086-27-68772253, E-mail: xiaowenkai2003@163.com