



制备工艺参数对超大颗粒石墨/铜基复合材料 结构及相对密度的影响

张铭君, 刘培生, 宋 帅

(北京师范大学 核科学与技术学院, 射线束技术教育部重点实验室, 北京 100875)

摘要:石墨/铜基复合材料可以同时具有良好的导热性和润滑性。本文尝试采用超大粒度(粒度约为 1500 μm)的石墨颗粒制备石墨/铜基复合材料, 以获得更加简便高效的制备工艺方法以及性能优良的复合制品。采用粉末烧结工艺探讨了不同工艺参数对复合材料内部组织结构及相对密度的影响。结果发现: 影响该复合材料组织结构的主要因素为石墨添加量及其颗粒的粒度, 石墨颗粒粒度为 1500 μm 的复合材料相对密度较大, 1000°C 烧结 2.5 h 时相对密度高达 0.67; 采用等质量的较小粒度石墨颗粒时, 同样条件下烧结所得的复合材料相对密度较小, 石墨颗粒粒度为 120 μm 的复合材料相对密度仅为 0.43。

关键词:石墨/铜基复合材料; 组织结构; 相对密度

文章编号: 1004-0609(2022)-02-0406-10

中图分类号: TB333

文献标志码: A

引文格式: 张铭君, 刘培生, 宋 帅. 制备工艺参数对超大颗粒石墨/铜基复合材料结构及相对密度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(2): 406–415. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37857

ZHANG Ming-jun, LIU Pei-sheng, SONG Shuai. Effects of preparation parameters on structure and relative density of copper based composites with large particles of graphite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(2): 406–415. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-37857

复合材料是新型功能材料研究的主要领域之一, 尤其是金属基复合材料, 其发展受到当今各国的高度重视。铜及其合金无论是在结构性能方面还是物理性能方面都很优异, 例如优良的延展性能、抗腐蚀性能、导电导热性能等, 而且在航天、电子、机械等领域都有诸多应用, 但是其在润滑耐磨等性能方面也存在不足之处^[1–3]。随着高科技产业的发展, 传统单一的铜及其合金已经不能满足现代工业的要求, 因此, 需要开发综合性能更加优良的铜基复合材料^[4–7]。

颗粒增强铜基复合材料制备工艺简单、成本低廉, 在保证铜基本优良性能的同时, 还能提高润滑耐磨性能, 并有较低的线膨胀系数等^[8–9]。此类复合材料发展势头良好, 其中关于石墨/铜基复合材料的研究较为突出^[10–14]。石墨/铜基复合材料是在铜

基体中添加一定含量的石墨, 以此来提高材料的综合性能, 其组成成分为纯铜基体和石墨, 且石墨颗粒均匀地分布在铜基体中。铜的密度为 $8.92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 其导热导电性能优良, 强度韧性好, 非常适合作为复合材料的基体^[15]。铜基体在复合材料中的作用主要是固结石墨颗粒以及传递和承受载荷^[3, 5]。在复合材料中, 因为铜基体占有很大的体积比例, 所以复合材料的基本物理性能和力学性能都与其性能有着密切关系^[10–11]。

石墨/铜基复合材料具很好的应用前景, 可以在诸多领域发挥出重要作用。虽然国内外专家学者都对其进行了大量的相应研究, 但其制备方法和工艺参数方面还有待改进和探索。例如, 在添加石墨颗粒方面, 大部分关于石墨/铜基复合材料的研究都局限于添加小粒度石墨颗粒, 添加 100 μm 以上大粒

基金项目: 北京师范大学测试基金专项(C20)

收稿日期: 2020-11-13; 修订日期: 2021-10-08

通信作者: 刘培生, 教授, 博士; 电话: 010-62205350; E-mail: Liu996@263.net

度石墨颗粒的研究甚少, 而添加 1 mm 以上粒度石墨颗粒的研究则尚未发现。研究显示^[16], 石墨颗粒的存在会割裂铜基体, 粒度越小, 石墨分布得越均匀, 对铜粉的烧结影响越大, 会降低材料的致密性和力学性能。因此在本工作中, 本文作者尝试制备添加大粒度(粒径达 1.5 mm 左右)石墨颗粒的石墨/铜基复合材料, 并对其基本属性进行测试分析。旨在采用操作更简便、成本更低廉的方法制备出优良的铜基复合材料, 并探讨大粒度石墨颗粒对该复合材料内部结构及基本属性的影响。

1 实验

1.1 石墨/铜基复合材料的制备

因为铜和石墨两种材料的性能差异太显著, 无论是熔点还是密度都差别很大, 而且铜、石墨无论液相还是固相都不互溶, 两者结合也可叫作“假合金”^[17-18]。该复合材料的制备方法主要以粉末冶金和铸造这两种制备方法为主, 有时也会采用半凝固态搅拌、热喷涂等方法^[19]。

本实验所用主要原材料为铜粉和石墨颗粒, 其中铜粉粒度约为 30 μm , 石墨颗粒分为 1500 μm 、720 μm 和 120 μm 等三个粒级, 其颗粒形貌如图 1 和 2 所示。

石墨/铜基复合材料的样品制备包括混粉搅拌、压制成型和烧结等几个过程。首先, 按一定质量比将铜粉与石墨颗粒混合, 装入球磨机的球磨罐中, 不加球磨子, 在球磨机中球磨混合 10 min, 使其分布均匀; 然后, 将混合粉末装入模具, 用液压机以一定的压力压制成预烧结体; 最后, 对预烧结体进行隔离空气的保护处理, 放入高温炉中烧结, 保温一定时间后, 得到成型的石墨/铜基复合材料样品(见图 3)。按不同的原料配比及烧结参数制得 10 组样品, 其具体工艺参数见表 1。

1.2 结构观察和密度测试

1.2.1 内部结构形貌

采用扫描电子显微镜(SEM)观察复合样品的内部组织结构。该实验中样品的显微组织图是由 Hitachi 公司生产的 S-4800 型冷场发射扫描电子显微

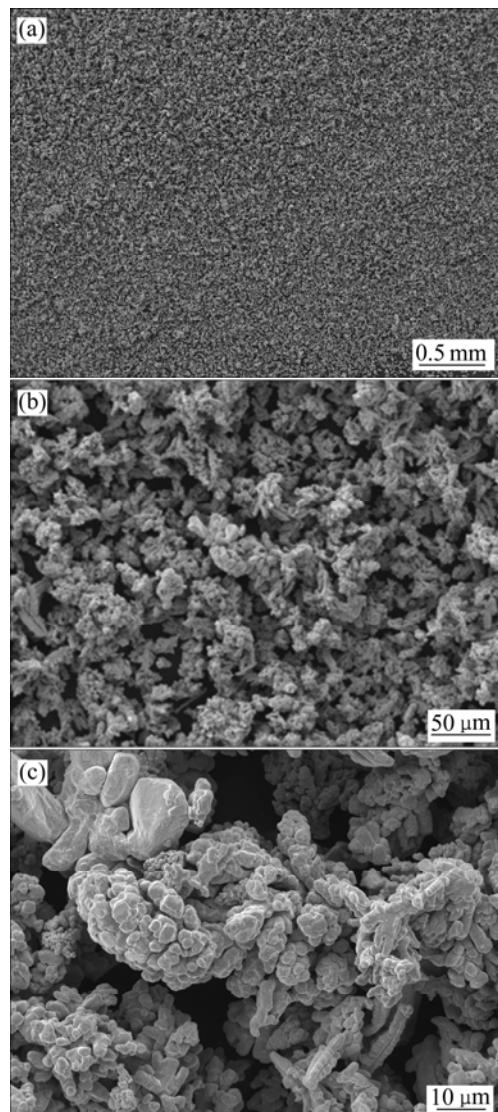


图 1 不同倍数下铜粉的 SEM 像

Fig. 1 SEM images of copper powder at different magnifications: (a) Low; (b) Middle; (c) High

镜拍摄, 其分辨率为 2.0 nm。

1.2.2 复合材料的密度

密度体现了该复合材料组分颗粒间的结合情况, 它能够衡量材料的疏密程度和均匀性, 从而判断该复合材料的烧结状态。此外, 密度对材料的力学性能有显著的影响, 因此对该复合材料密度的测量计算是十分必要的^[20]。

该复合材料的表观密度采用体积-质量法计算得出。每组复合制品取 3 个试样, 用游标卡尺测量计算其体积, 用天平称其质量, 然后逐一计算每个试样的密度, 最后取其算术平均值。

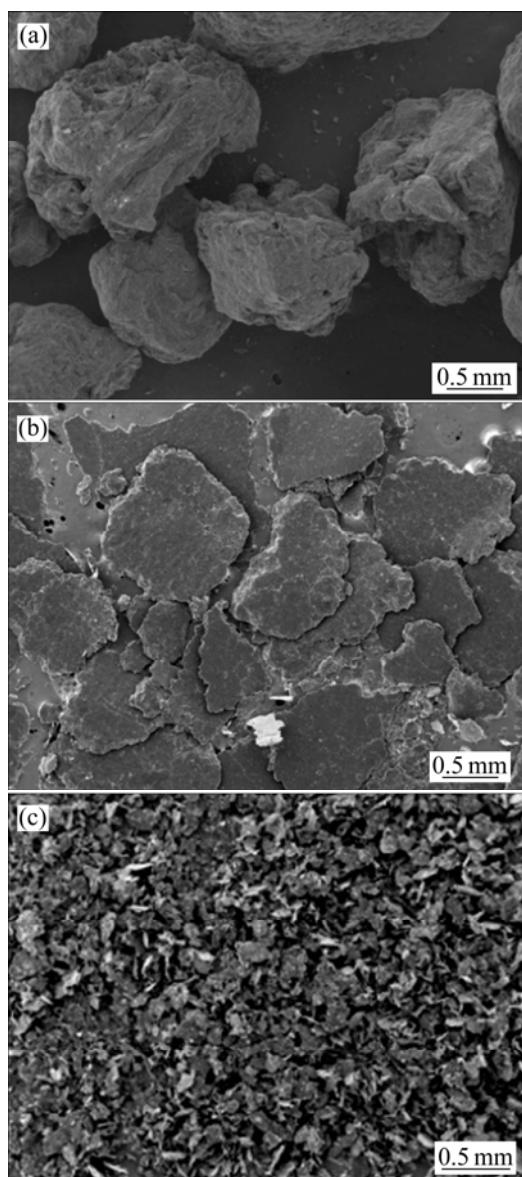


图2 不同粒度级别石墨颗粒的SEM像

Fig. 2 SEM images of graphite particles with different granularities: (a) 1500 μm ; (b) 750 μm ; (c) 120 μm



图3 烧结成型的石墨/铜基复合材料样品

Fig. 3 Sample of sintered graphite/copper based composites

表1 复合材料样品的制备工艺参数

Table 1 Preparation process parameters of composite samples

Group number	Graphite granularity/ μm	Graphite mass content/%	Sintering temperature/ $^{\circ}\text{C}$	Holding time/h
A	1500	10	1000	2.5
B	750	10	1000	2.5
C	120	10	1000	2.5
D	750	5	1000	2.5
E	750	15	1000	2.5
F	750	10	1000	2.0
G	750	10	1000	3.0
H	750	10	970	2.5
I	750	10	1030	2.5
Copper	—	—	1000	2.5

该复合材料相对密度(d)的计算公式为:

$$d = \rho / (a \times \rho_1 + b \times \rho_2) \quad (1)$$

式中: d 为石墨/铜基复合材料的相对密度; ρ 为石墨/铜基复合材料的表观密度(g/mm^3); a 和 b 分别为复合材料中铜和石墨的体积分数(%); ρ_1 为铜的密度($8.92 \text{ g}/\text{mm}^3$); ρ_2 为石墨的密度($2.25 \text{ g}/\text{mm}^3$)。

2 结果与分析

2.1 复合材料的组织结构

2.1.1 不同石墨粒度对组织结构的影响

采用 Hitachi 公司生产的 S-4800 型冷场发射扫描电子显微镜(分辨率为 2.0 nm)观测了所得石墨/铜基复合材料的内部显微组织结构。图 4(a)、(b)和(c)所示分别为添加大粒度(约 $1500 \mu\text{m}$)、中粒度(约 $750 \mu\text{m}$)和小粒度(约 $120 \mu\text{m}$)石墨颗粒的石墨/铜基复合材料, 添加量都是 10%(质量分数), 其复合坯体在 1000°C 下烧结, 保温 2.5 h 。由图 4(a)可见, 颜色较深的为石墨颗粒, 在铜基体中呈明显的孤立镶嵌状态; 由图 4(b)可见, 均匀混合的片状石墨嵌入铜基体, 与铜基体的界面也比较清晰; 由图 4(c)可见, 石墨颗粒与铜基体完全均匀混合, 烧结成一体。可以看出, 石墨颗粒越大, 对整个样品中的铜粉烧结的阻隔影响越小, 铜基体连续性越好; 但石墨颗粒太大会使其与铜基体之间的间隙较大, 烧结后两者

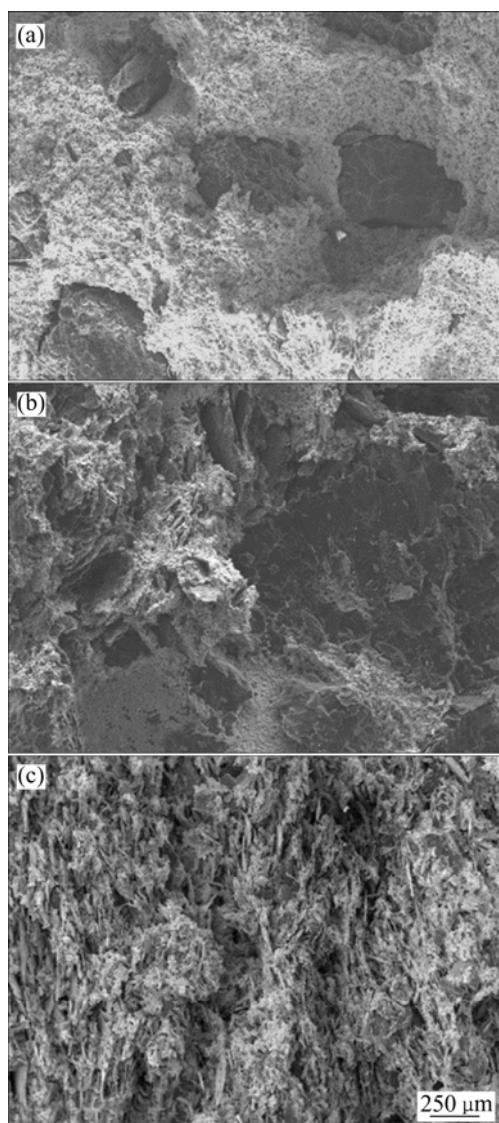


图 4 添加不同粒级石墨颗粒的石墨/铜复合材料的 SEM 显微结构形貌

Fig. 4 SEM micrographs of graphite/copper based composites with different graphite particle sizes: (a) 1500 μm ; (b) 750 μm ; (c) 120 μm

结合得较差。为了降低石墨颗粒对铜基体的割裂作用, 但又获得石墨与铜均匀混合的效果, 选用石墨颗粒的粒度应适当, 不能太小, 也不宜过大。

2.1.2 不同石墨含量对组织结构的影响

图 5 所示为 3 种不同石墨颗粒含量的烧结样品内部组织结构, 石墨的质量分数分别为 5%、10% 和 15%, 其余工艺参数相同: 石墨颗粒粒度约 750 μm , 烧结温度 1000 $^{\circ}\text{C}$, 保温时间 2.5 h。通过对图 5 中 3 组样品的结构形貌, 可以区分出其石墨含量的不同: 在石墨含量最低的图 5(a)中, 石墨颗粒

分布较稀疏, 零散地分布在铜基体中; 在图 5(b)中, 石墨含量增加, 分布也变得密集, 分布均匀性也更好, 与铜粉的融合良好; 在图 5(c)中, 石墨含量继续增加, 石墨与铜混合得更加均匀, 石墨分布密集度上升。通过这些分析, 可以看出石墨含量越多, 其与铜粉的混合越均匀。

2.1.3 不同烧结温度对组织结构的影响

图 6 所示为不同烧结温度下的石墨/铜基复合材料的内部组织结构, 石墨颗粒(粒度约 750 μm)添加量均为 10%, 分别在 970 $^{\circ}\text{C}$ 、1000 $^{\circ}\text{C}$ 和 1030 $^{\circ}\text{C}$ 温度下烧结 2.5 h。由图 6 可以看出, 烧结温度对复

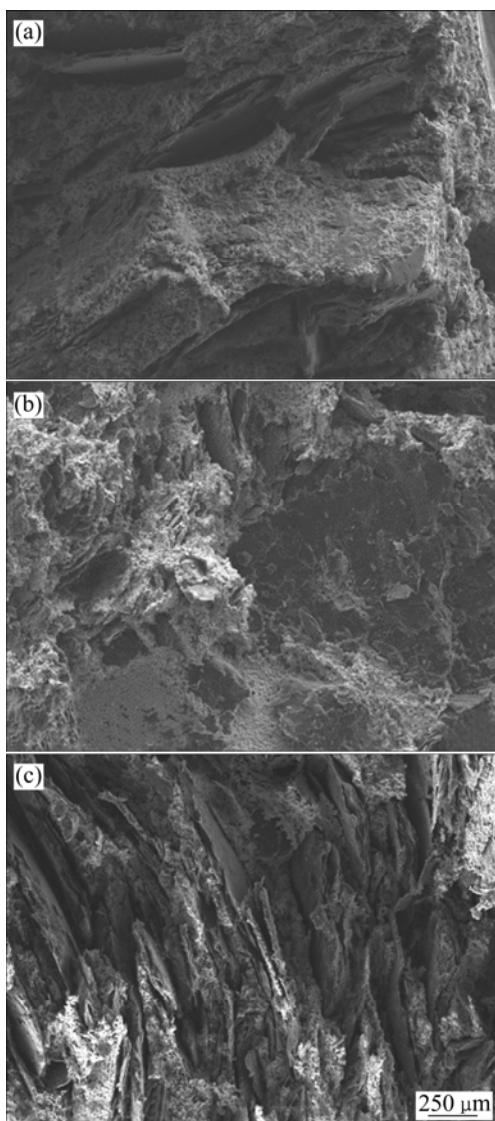


图 5 添加不同石墨含量的石墨/铜基复合材料的内部结构形貌

Fig. 5 Internal structure morphologies of graphite/copper based composites with different graphite contents: (a) 5%; (b) 10%; (c) 15%

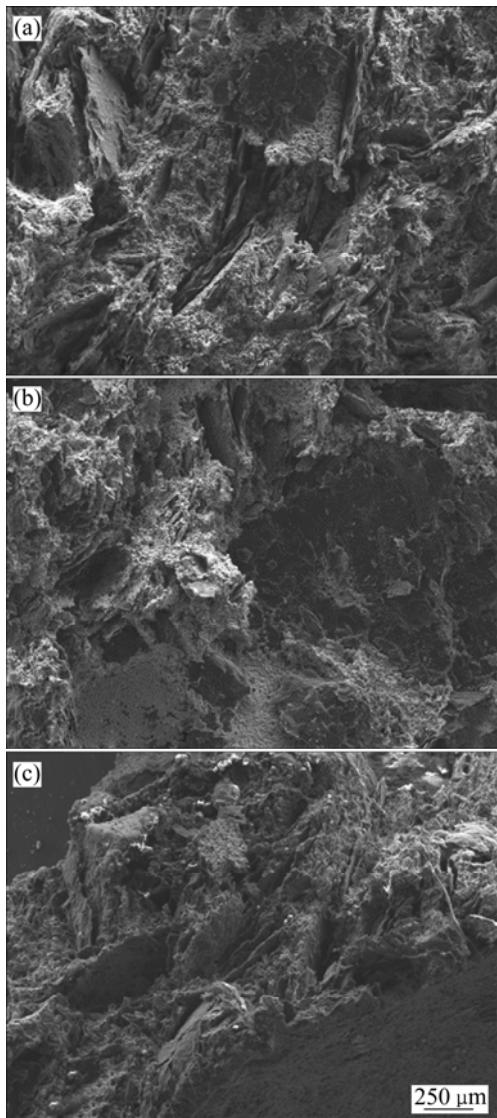


图 6 不同烧结温度下石墨/铜基复合材料的内部结构形貌

Fig. 6 Internal structure morphologies of graphite/copper based composites at different sintering temperatures: (a) 970 °C; (b) 1000 °C; (c) 1030 °C

合材料的内部组织结构影响都很小,在970~1030 °C烧结可以获得几乎相同的石墨颗粒均布状态。这说明影响该复合材料组织结构的主要因素为石墨粒度及其添加量,而烧结工艺条件的影响很小。

2.1.4 不同保温时间对显微组织的影响

图 7 中样品的石墨颗粒(粒度约 750 μm)添加量均为 10%(质量分数),烧结温度为 1000 °C,保温时间分别为 2 h、2.5 h 和 3 h。从图 7 可以看出,3 件样品的显微组织形貌十分相似,石墨颗粒都是均匀地分布在铜基体中,可见保温时间对该石墨/铜基复

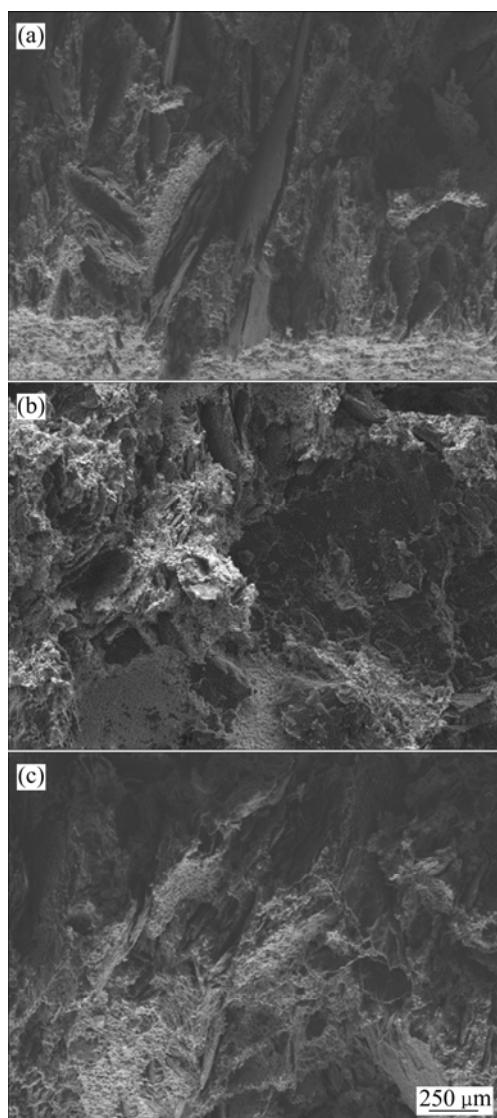


图 7 不同保温时间的石墨/铜基复合材料的内部结构形貌

Fig. 7 Internal structure morphologies of graphite/copper based composites with different holding time: (a) 2 h; (b) 2.5 h; (c) 3 h

合材料内部的组织形貌基本没有影响。

2.1.5 关于复合结构中的两相结合

从前面 2.1.1 节“不同石墨粒度对组织结构的影响”分析看到,石墨颗粒过大将增大其与铜基体间的间隙,而实际上石墨颗粒过小则会增加其与铜基体间的界面,因此适中的粒度才能获得较好的整体结合致密度。由后面 2.2 节“复合材料的相对密度”可知,石墨颗粒含量较高(15%)、烧结温度较低(970 °C)以及保温时间较短(2 h)时,都会出现相对密度较低的结果,这就意味着此时两相的整体结合

致密度较差。因此, 根据实验结果, 选择石墨颗粒含量为 10%, 烧结温度在 1000 °C 以上, 保温时间在 2.5 h 以上。

2.2 复合材料的相对密度

图 8 和 9 所示为不同石墨粒度、不同石墨含量、不同保温时间以及不同烧结温度下制备的复合材料样品以及纯铜的表观密度和相对密度。从这 10 组样品的对比结果来看, 纯铜密度最大, 为 6.78 g/mm³(紫铜密度为 8.92 g/mm³), 致密性也最高, 相对密度为 0.76; 而添加石墨颗粒的石墨/铜基复合材料的密度都有所下降, 其中 C 组样品的表观密度最低, 仅为 3.3 g/mm³, 质地疏松, 致密性差, 相对密度仅为 0.43。C 组样品的制作工艺为: 添加 10% 粒度约 120 μm 的石墨颗粒, 在 1000 °C 烧结 2.5 h。F 组样品的密度也较低, 为 4.22 g/mm³, 相对密度分别为 0.56。F 组样品保温时间较短, 仅为 2 h, 烧结温度为 1000 °C, 添加 10% 的中粒度(粒度约 750 μm)

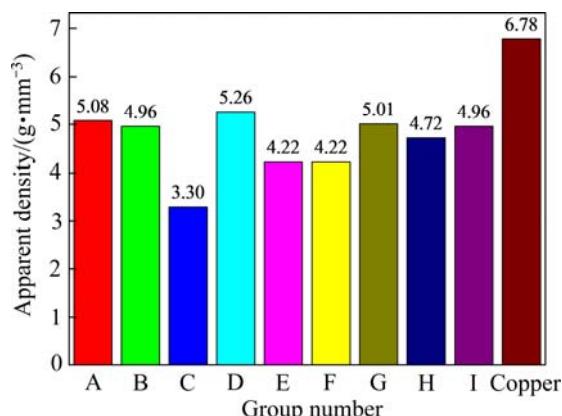


图 8 复合材料样品的表观密度

Fig. 8 Apparent density of composite samples

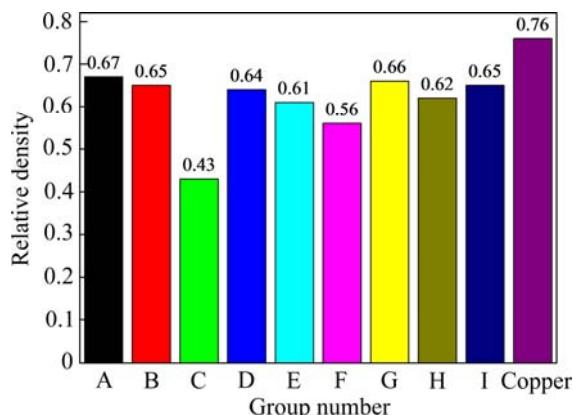


图 9 复合材料样品的相对密度

Fig. 9 Relative density of composite samples

石墨颗粒。在这些复合材料中, D 组样品的表观密度最高, 为 5.26 g/mm³, 其次为 A 组样品的表观密度, 为 5.08 g/mm³。但 A 组样品致密性高, 相对密度为 0.67。由图 8 和 9 可知, 石墨粒度和含量对复合材料密度影响最大。随着石墨含量增多, 因其质轻, 所以复合材料的表观密度值也会降低。而石墨颗粒大小影响复合材料致密性, 其越细小, 对铜的割裂作用越明显, 阻隔粉末烧结, 材料致密性变差, 相对密度就越低。

2.2.1 不同石墨粒度对密度的影响

图 10 所示为不同石墨颗粒粒度对石墨/铜基复合材料密度的影响, A、B、C 组分别代表大粒(粒度约 1500 μm)、中粒(粒度约 750 μm)、小粒(粒度约 120 μm) 石墨, 添加量均为 10%, 均在 1000 °C 烧结 2.5 h。C 组样品的表观密度最低, 为 3.3 g/mm³, 相对密度也仅为 0.43。结合其形貌(见图 4(c))可知, 当石墨粒度较小时, 可以与铜粉均匀混合; 但在烧结过程中, 小颗粒对铜基体的割裂作用明显, 它们

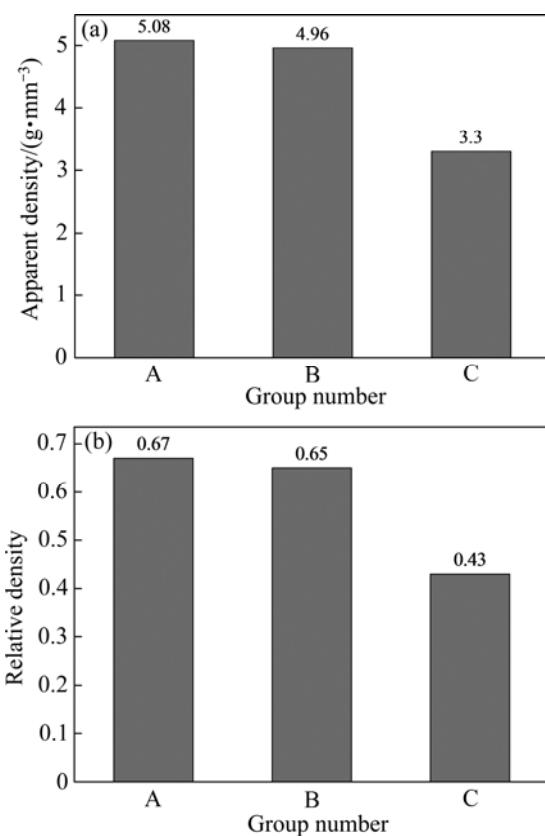


图 10 不同石墨颗粒粒度对复合材料样品密度的影响

Fig. 10 Effects of different graphite particle sizes on densities of composite samples: (a) Apparent density; (b) Relative density; Group A: particles of 1500 μm; Group B: particles of 750 μm; Group C: particles of 120 μm

阻断了铜粉间的链接，并带来大量间隙，最终表现出样品疏松，相对密度低。比较 A 组和 B 组样品可知，前者的表观密度只比后者稍高一点，都在 5 g/mm^3 左右，而且相对密度也很接近，材料致密性相似。在添加相同石墨含量的情况下，A 组样品烧结后的密度与 B 组样品相差无几，这是因为 A 组样品中添加的是大粒度石墨颗粒，石墨质轻。此外，石墨颗粒越大，与铜基体的界线越明显，两者融合性差，在边界处会留有较大的间隙。A 组样品中纯铜基体连续性较好，致密性好，烧结收缩明显。但是，如图 6 中样品微观结构所示，因为较大的石墨含量以及石墨与铜基体之间的间隙存在，致使 A 组样品的表观密度和相对密度并未与 B 组样品有显著差别。

2.2.2 不同石墨含量对密度的影响

图 11 所示为不同石墨含量对石墨/铜基复合材料密度的影响。D、B、E 三组样品的石墨含量分别为 5%、10%、15%，添加的都是中粒度石墨颗粒，

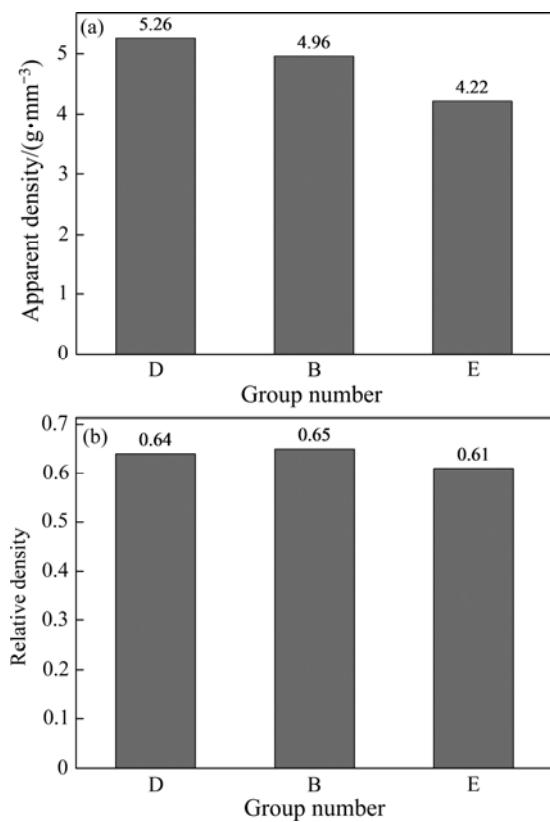


图 11 不同石墨含量的复合材料样品密度

Fig. 11 Density of composite samples with different graphite contents: (a) Apparent density; (b) Relative density; Group D of 5% graphite particles; Group B of 10% graphite particles; Group E of 15% graphite particles

烧结温度为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ，保温 2.5 h。由图 11 可以看出，这三组样品的相对密度值很接近，但是当石墨含量超过 10%(质量分数)时，继续增加石墨含量会影响复合材料的致密性，使相对密度降低。随着石墨颗粒的增多，复合材料样品的表观密度不断下降。产生此种现象的原因是，石墨质轻，密度值小，近似于孔隙存在于铜基体中，其含量越多，复合材料的整体密度值就会趋于降低^[21]。

2.2.3 不同保温时间对密度的影响

图 12 所示为不同保温时间对石墨/铜基复合材料密度的影响。F、B、G 三组样品的保温时间分别为 2 h、2.5 h、3 h，添加 10% 的粒度约 $750 \mu\text{m}$ 的石墨颗粒， $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 烧结。由图 12 可以看出，当保温时间较短，为 2 h 时，材料的表观密度较低，仅为 4.22 g/mm^3 ；致密性也不好，相对密度也仅为 0.56。这是因为烧结颈的生长需要一定的时间。在保温时间不足的情况下，原子扩散不充分，孔隙较多，材料致密性差，表观密度低。延长保温时间到 2.5 h，铜粉充分烧结，基体致密性变好，因此，B 组样品的

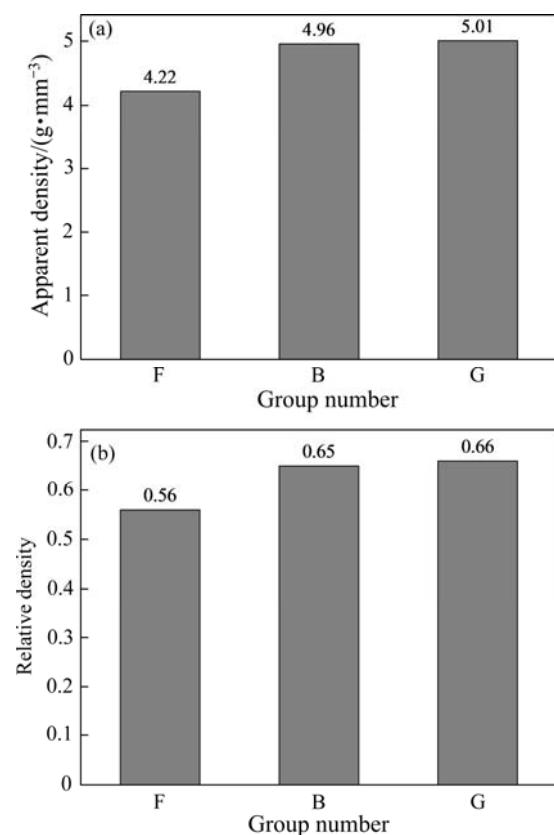


图 12 不同保温时间的复合材料样品密度

Fig. 12 Bulk density of composite samples with different holding time: (a) Apparent density; (b) Relative density; Group F of 2 h; Group B of 2.5 h; Group G of 3 h

密度提高到 4.96 g/mm^3 , 相对密度也提高到 0.65。当铜基体已经致密成型后, 继续增加保温时间, 其体积外观不会再产生明显变化, 密度变化不大。

2.2.4 不同烧结温度对密度的影响

图 13 所示为不同烧结温度对石墨/铜基复合材料密度的影响。H、B、I 三组样品都是添加了 10% 的中粒度(粒度约 $750 \mu\text{m}$)石墨颗粒, 保温 2.5 h。由图 13 可以看出, 温度为 $970 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 烧结颈细小, 铜粉没有充分烧结, 因此 H 组样品的致密性稍差; 升高烧结温度到 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 加速了铜粉液相的形成, 使其含量增多, 原子得以充分扩散, 烧结颈长大而孔隙减少, 材料致密所以密度值升高。再升高温度到 $1030 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 原子扩散速度会稍有提高, 但是在规定时间内材料已经致密的情况下, 铜基体变化不大。由此可知, 当石墨参数一定时, 在确保材料可以充分烧结并且未融化的情况下, 烧结温度不会对复合材料的密度产生明显影响。

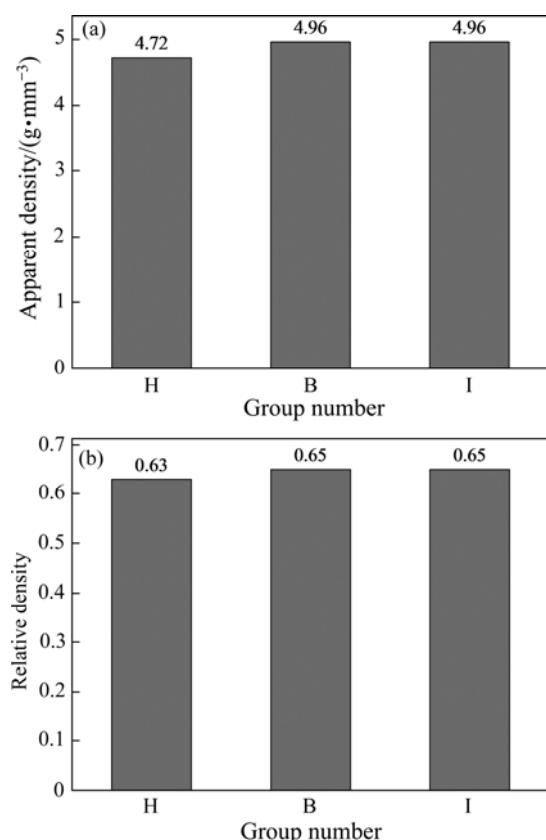


图 13 不同烧结温度的复合材料样品密度

Fig. 13 Bulk density of composite samples at different sintering temperatures: (a) Apparent density; (b) Relative density; Group H at $970 \text{ }^\circ\text{C}$; Group B at $1000 \text{ }^\circ\text{C}$; Group I at $1030 \text{ }^\circ\text{C}$

2.2.5 关于相对密度值及提高途径

石墨/铜基复合材料的相对密度与其对应工艺参数相关, 而工艺参数决定产品的组织结构, 从而影响其性能包括使用性能。从这个角度看, 相对密度与应用相关联。但这不意味相对密度很低就会影响应用, 实质上是组织结构影响应用。例如, 润滑耐磨等主要应用一般对复合材料的相对密度没有特别要求。当然, 在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上的烧结温度下进行加压烧结, 可能在一定程度上提高产品的致密度, 从而进一步提高其相对密度。增加铜在复合体中的体积比可直接提高其相对密度, 但对石墨/铜基复合材料性能影响较大。

3 结论

1) 石墨/铜基复合材料的内部组织结构显示, 石墨颗粒越小, 添加量越大, 与铜粉混合越均匀, 铜基体割裂程度就越严重;

2) 在一定范围内, 复材的烧结温度越高, 保温时间越长, 则铜基体烧结会越致密, 但对于整个复合材料相对密度变化上的作用有限; 添加 10% 粒度 $750 \mu\text{m}$ 的石墨颗粒, 分别在 $970 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $1030 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烧结 2.5 h, 所得 3 种复合材料的相对密度对应为 0.63、0.65、0.65; 在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烧结分别保温 2 h、2.5 h 和 3 h, 所得 3 种复合材料的相对密度对应为 0.56、0.65 和 0.66”

3) 石墨颗粒越小, 添加量越多, 复合材料的相对密度就越低, 添加 10% 的石墨颗粒在 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烧结 2.5 h, 所得 3 种石墨粒度分别为 $1500 \mu\text{m}$ 、 $750 \mu\text{m}$ 和 $120 \mu\text{m}$ 的复合材料的相对密度对应为 0.67、0.65 和 0.43。

REFERENCES

- [1] 丁晓飞, 范同祥. 石墨烯增强铜基复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(S1): 67–73.
DING Xiao-fei, FAN Tong-xiang. Research progress on graphene reinforced copper matrix composites[J]. Materials Reports, 2019, 33(S1): 67–73.
- [2] DONG Y H, ZHANG R Q, HE X B, et al. Fabrication and infiltration kinetics analysis of Ti-coated diamond/copper composites with near-net-shape by pressureless infiltration[J].

- Materials Science and Engineering B, 2012, 177(17): 1524–1530.
- [3] 凌自成, 闫翠霞, 史庆南, 等. 球磨时间对石墨烯/铜复合材料组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(1): 207–212.
- LING Zi-cheng, YAN Cui-xia, SHI Qing-nan, et al. Effect of ball-milling time on microstructure and mechanical properties of graphene/copper composite materials[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(1): 207–212.
- [4] LI J F, ZHANG L, XIAO J K, et al. Sliding wear behavior of copper-based composites reinforced with graphene nanosheets and graphite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(10): 3354–3362.
- [5] 洪起虎, 燕绍九, 杨程, 等. 氧化石墨烯/铜基复合材料的微观结构及力学性能[J]. 材料工程, 2016, 44(9): 1–7.
- HONG Qi-hu, YAN Shao-jiu, YANG Cheng, et al. Microstructure and mechanical properties of graphene oxide/copper composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(9): 1–7.
- [6] 卢晓通, 张志刚, 罗洪杰, 等. 石墨烯/铜复合材料的制备与摩擦性能测试[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(1): 66–73.
- LU Xiao-tong, ZHANG Zhi-gang, LUO Hong-jie, et al. Preparation of graphene/copper composites and its friction performance[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(1): 66–73.
- [7] WANG J, GUO L N, LIN W M, et al. The effects of graphene content on the corrosion resistance, and electrical, thermal and mechanical properties of graphene/copper composites[J]. New Carbon Materials, 2019, 34(2): 161–169.
- [8] LÓPEZ M, CORREDOR D, CAMURRI C, et al. Performance and characterization of dispersion strengthened Cu-TiB₂ composite for electrical use[J]. Materials Characterization, 2005, 55(4/5): 252–262.
- [9] KANG H K. Microstructure and electrical conductivity of high volume Al₂O₃-reinforced copper matrix composites produced by plasma spray[J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 190(2/3): 448–452.
- [10] 肖鹏, 姜许, 朱佳敏, 等. 树脂碳包覆石墨/铜复合材料组织和性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(10): 3265–3274.
- XIAO Peng, JIANG Xu, ZHU Jia-min, et al. Microstructures and properties of resin carbon-coated graphite/copper composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(10): 3265–3274.
- [11] 李秀辉, 燕绍九, 洪起虎, 等. 石墨烯添加量对铜基复合材料性能的影响[J]. 材料工程, 2019, 47(1): 11–17.
- LI Xiu-hui, YAN Shao-jiu, HONG Qi-hu, et al. Influence of graphene content on properties of Cu matrix composites[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(1): 11–17.
- [12] 刘滩, 方华婵, 李金伟, 等. 加压烧结树脂碳包覆石墨/铜复合材料的显微组织和性能[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(7): 1446–1456.
- LIU Tan, FANG Hua-chan, LI Jin-wei, et al. Microstructure and properties of pressure-sintered resin carbon-coated graphite/copper composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(7): 1446–1456.
- [13] 秦笑, 王娟, 林高用, 等. 镀铜石墨/铜复合材料的组织和摩擦磨损性能[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 380–384.
- QIN Xiao, WANG Juan, LIN Gao-yong, et al. Microstructure, friction and wear properties of copper-coated graphite/copper composites[J]. Materials Reports, 2020, 34(S1): 380–384.
- [14] LIU B, ZHANG D Q, LI X F, et al. The microstructures and properties of graphite flake/copper composites with high volume fractions of graphite flake[J]. New Carbon Materials, 2020, 35(1): 58–65.
- [15] 黄德彬, 李春胜. 金属材料手册(精)[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- HUANG De-bin, LI Chun-sheng. Metal materials handbook[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005.
- [16] 林雪杨, 刘如铁, 熊翔, 等. 石墨粒度及沥青粘结剂对铜-石墨电刷材料性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(7): 1411–1418.
- LIN Xue-yang, LIU Ru-tie, XIONG Xiang, et al. Effects of graphite granularity and pitch binder on properties of copper-graphite brush[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(7): 1411–1418.
- [17] 张钦钊, 李强, 王爱香, 等. 铜-石墨自润滑触头材料的研究进展[J]. 材料导报, 2005, 19(2): 43–46.
- ZHANG Qin-zhao, LI Qiang, WANG Ai-xiang, et al. Recent development in copper-graphite self lubrication contact materials[J]. Materials Review, 2005, 19(2): 43–46.
- [18] 朱成才, 张鹏, 杜云慧, 等. 性能卓越的铜石墨受电弓滑板[J]. 铁道机车车辆, 2006, 26(3): 62–66.
- ZHU Cheng-cai, ZHANG Peng, DU Yun-hui, et al. Copper-graphite pantograph slide plate with superexcellent performance[J]. Railway Locomotive & Car, 2006, 26(3): 62–66.
- [19] 卢铃, 朱定一, 汪才良. 金属基/石墨固体自润滑材料的

- 研究进展[J]. 材料导报, 2007, 21(2): 38–42.
- LU Ling, ZHU Ding-yi, WANG Cai-liang. Recent development of metal-matrix/graphite solid self-lubricating materials[J]. Materials Review, 2007, 21(2): 38–42.
- [20] 张萍, 王文芳, 吴玉程, 等. 纳米 AlN 含量对石墨/铜-0.6%铬复合材料性能的影响[J]. 机械工程材料, 2009, 33(7): 61–63.
- ZHANG Ping, WANG Wen-fang, WU Yu-cheng, et al. Influence of nano-AlN content on the performance of graphite/Cu-0.6%Cr composites[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2009, 33(7): 61–63.
- [21] 余刚, 邹超, 胡波年, 等. 超声流动镀铜法制备铜包石墨粉[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(2): 60–64.
- YU Gang, ZOU Chao, HU Bo-nian, et al. Fabrication of Cu-coated graphite powders with ultrasonic flow electroplating copper[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(2): 60–64.

Effects of preparation parameters on microstructure and relative density of copper based composites with large particles of graphite

ZHANG Ming-jun, LIU Pei-sheng, SONG Shuai

(Key Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Graphite/copper based composites have good thermal conductivity and lubricity at the same time. In this paper, we try to prepare the graphite/copper based composites with the ultra-large graphite particle size of about 1500 μm , in order to develop a more simple and efficient preparation process and obtain the composites with excellent properties. The effects of different processing parameters on the microstructure and relative density of the composites were investigated for the powder sintering products. The results show that the main factors affecting the microstructure of the composites are the content of graphite and the particle size. The relative density is relatively large for the composites from graphite particle with particle size of 1500 μm , and it can be as high as 0.67 by sintering at 1000 $^{\circ}\text{C}$ for 2.5 h. Using graphite particles with smaller particle size, the relative density is relatively small, and it is only 0.43 for the composites from graphite particle with particle size of 120 μm .

Key words: graphite/copper based composites; structure; relative density

Foundation item: Project(C20) supported by the Testing Foundation of Beijing Normal University, China

Received date: 2020-11-13; **Accepted date:** 2021-10-08

Corresponding author: LIU Pei-sheng; Tel: +86-10-62205350; E-mail: Liu996@263.net

(编辑 何学锋)