

文章编号: 1004-0609(2004)03-0471-08

纳米 Al_2O_3 化学镀铜复合粉末的烧结致密化^①

刘远廷, 凌国平, 酆 剑

(浙江大学 金属材料研究所, 杭州 310027)

摘 要: 化学镀是制备纳米颗粒增强金属基复合材料的有效方法。对纳米 Al_2O_3 化学镀铜粉末的烧结致密化特点进行了研究, 分析了化学镀粉末的预处理、成型压力、烧结温度、保温时间、复压复烧工艺等对致密化的影响。在优化各影响因素的情况下, 对 Al_2O_3 含量为 10% 的化学镀铜粉末采用常规粉末冶金工艺得到了相对致密度达 94% 的试样。

关键词: 铜基复合材料; 纳米氧化铝; 粉末冶金; 致密化; 化学镀

中图分类号: TB 331; TF 12

文献标识码: A

Sintering densification of Cu/ Al_2O_3 nano-composite powders by electroless copper plating

LIU Yuan-ting, LING Guo-ping, LI Jian

(Institute of Metallic Materials, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Electroless plating is an effective method to prepare various metal/ceramic compounds, which can get a high mixing homogeneity and improved metal/ceramic interface bond in metal matrix composites (MMCs) reinforced by ceramic. The characteristics of sintering densification of Cu/ Al_2O_3 composites were investigated. The influences of powder preparation, pressing pressure, sintering temperature, soaking time and repressing-resintering on the densification were studied. On the basis of optimizing parameters, the relative density of Cu/ nano- Al_2O_3 with nominal content of 10% Al_2O_3 (mass fraction) can reach 94% via conventional powder metallurgy.

Key words: copper matrix composites; nano- Al_2O_3 ; powder metallurgy; densification; electroless plating

Al_2O_3 颗粒增强铜基复合材料具有良好的力学和物理性能, 同时由于其性能的改变容易通过改变增强体的体积分数、排列方式, 或者改变基体的成分, 或者改变热处理工艺等来实现, 这使 Al_2O_3 颗粒增强铜基复合材料有广泛的应用前景^[1]。如 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cu}$ 可提高 Al_2O_3 陶瓷的热导率, 满足电子封装材料的要求^[2, 3]; 铜基体中加入 Al_2O_3 微粒, 可以提高铜再结晶温度和高温强度, 而不会明显降低铜基体的导电性^[4]。

当小粒子尺寸进入到纳米量级 (1~100 nm) 时, 其本身产生了表面效应、小尺寸效应、宏观量

子隧道效应和量子尺寸效应, 使得材料的力学、物理和化学性能发生全面变化。由于纳米 Al_2O_3 异于常规微米级 Al_2O_3 , 有可能得到力学、物理和化学性能完全异于常规微米 Al_2O_3 颗粒增强的铜基复合材料。同时根据弥散强化奥罗万理论, 弥散强化相的体积含量一般在 1%~15%, 粒子间距 0.01~0.30 μm , 大小 0.01~0.10 μm 。用纳米 Al_2O_3 增强的铜基复合材料在相同 Al_2O_3 体积分数的情况下, 由于 Al_2O_3 质点更为弥散, 可以更加有效地强化基体金属, 而对复合材料的其它性能影响较小。

用纳米 Al_2O_3 颗粒增强铜基复合材料, 从而得

① 基金项目: 国家“八六三”计划资助项目 (2002AA332100)

收稿日期: 2003-06-30; 修订日期: 2003-10-15

作者简介: 刘远廷 (1969-), 男, 硕士。

通讯作者: 凌国平, 电话: 0571-87952648, 13505712628; E-mail: linggp@cmsce.zju.edu.cn

到高强、高电导率的材料,国内外进行了广泛的研究^[5-7]。制备方法主要有:内氧化法^[4, 5],高能球磨法^[7],以及热化学还原法^[8, 9]。也有用化学镀方法制备铜与陶瓷颗粒的复合粉末,并与铜粉混合制备颗粒增强铜基复合材料,以改善陶瓷颗粒与基体的结合性^[8-10]。如用化学镀铜粉末直接制备纳米 Al_2O_3 增强铜基复合材料,可避免纳米复合粉与铜粉之间混合不均匀的现象,有利于提高陶瓷颗粒在金属基体中分布的均匀性。但是,化学镀铜粉末难以通过常规的粉末冶金方法烧结致密化。因此,本文作者通过研究影响纳米 Al_2O_3 化学镀铜复合粉末烧结致密化因素,探讨各种工艺因素影响致密化的程度和方向,以期得到致密化程度较高的烧结体。

1 实验

1.1 原始粉末

实验所用粉末为自制的纳米 Al_2O_3 化学镀铜粉末,采用低温超声波化学镀铜的方法制备^[11],其形貌如图 1 所示。原始 Al_2O_3 粉末尺寸为 10~20 nm,从透射电镜像可以看出,化学镀后粉末颗粒存在一定的团聚现象。粉末的 XRD 分析表明,该粉末由晶态铜和 Al_2O_3 组成,不含 CuO 及 Cu_2O 。粉末其它性能见表 1。

1.2 粉末预处理

将粉末在石英玻璃管中氢气氛下还原 1 h,还原温度依实验条件的不同而变。同时,为了清除粉末

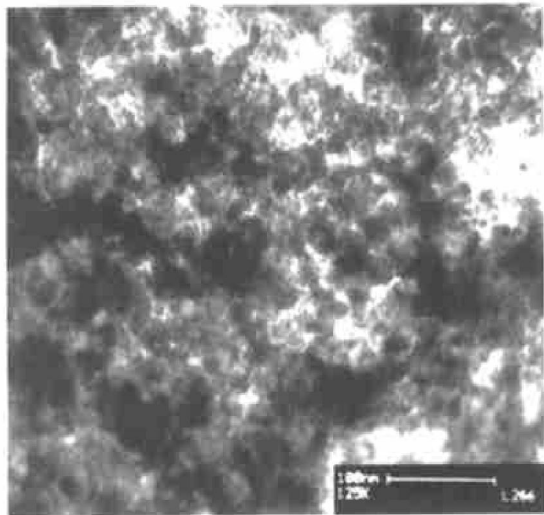


图 1 纳米 Al_2O_3 化学镀铜后的 TEM 形貌

Fig. 1 TEM image of nano- Al_2O_3 coated by copper

表 1 $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 化学镀粉末性能

Table 1 Properties of Cu-coated nano- Al_2O_3 powder

Nominal content of Cu/ %	Actual content of Cu%	Loose packed density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Tap density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
90	88	0.93	2.31

表面可能存在的杂质,对粉末进行了清洗,清洗剂分别为 H_2O_2 和乙醇。

1.3 样品制备

将粉末在模具中压制直径为 15 mm 的试样,成型压力为计算值。压制好的试样装入 SK-2.5-13D 型管式炉中,在氢气保护下烧结。

1.4 性能检测

烧结试样的密度采用阿基米德法测定。用 JEOL JSM-5610 扫描电子显微镜进行形貌观察与能谱成分分析。

2 结果与讨论

2.1 粉末预处理对烧结致密性的影响

化学镀铜的纳米 Al_2O_3 粉末外观呈紫铜色,未经还原的粉末直接压制烧结时,试样致密性很差。考虑到粉末中可能存在由于化学镀引入的杂质元素以及粉末表面存在铜的氧化物^[12],对粉末进行了还原和清洗处理。图 2 所示为未经还原的粉末、350 °C 还原粉末、用不同清洗剂清洗后再还原的粉末在相同烧结工艺下的致密度对比。由图 2 可见,粉末经还原处理后试样的致密度提高了,说明粉末表面确实存在氧化铜,它对烧结的致密化产生了不利影响,对化学镀铜粉末进行 350 °C 的氢气还原是必要的^[13]。

从图 2 中还可以看到,经过清洗的试样比未清洗的试样致密化程度要高,说明粉末表面可能存在不利于致密化的杂质离子,仅仅经过 350 °C 的氢气还原处理不能有效地去除这些杂质。对化学镀粉末用去离子水清洗,并对清洗离心后水溶液的电导率进行了测定。结果表明(图 3):粉末经过 3 次以上清洗以后,去离子水的电导率的变化较为平缓。这说明化学镀粉末含有较多的杂质离子,如清洗不充分,它们将极大地影响粉末的烧结性能。

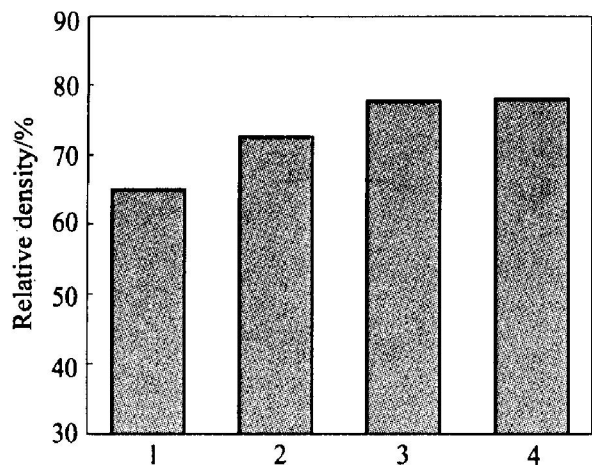


图 2 粉末预处理对相对密度的影响

Fig. 2 Effect of pretreatment on relative density (550 MPa, soaking at 900 °C for 1 h, H_2 atmosphere)

1—Unreduced; 2—Reduced at 250 °C;
3—Rinsed by ethanol; 4—Rinsed by H_2O_2

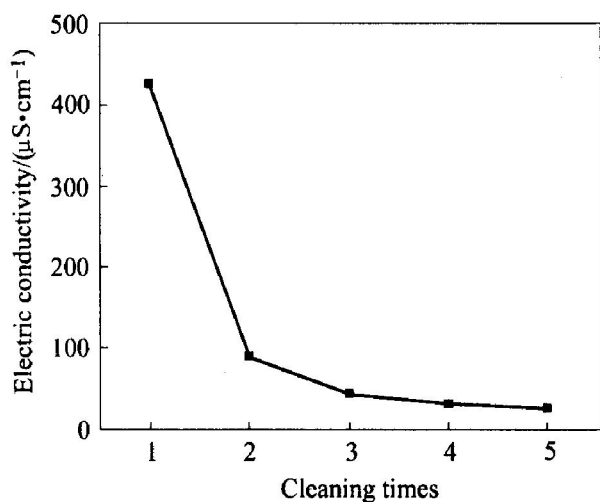


图 3 清洗次数对水的电导率的影响

Fig. 3 Effect of cleaning times on electric conductivity of water

2.2 成型压力对烧结致密化的影响

由图 2 可见, 试样的相对密度并不高, 其最大致密度仅为 80%。为了得到更高的密度, 对成形压力与烧结致密化的关系进行了研究, 结果如图 4 所示。可见在采用单次烧结工艺时, 纳米 Al_2O_3 化学镀铜复合粉末的烧结致密度随压制压力变化的规律与微米 Al_2O_3 增强铜基复合材料的行为相似^[14], 在低于某一压力时, 较高的压力可获得较高的致密度。这是由于 Al_2O_3 化学镀粉末是在很硬的陶瓷颗粒外面包覆了一层金属层, 因此粉末质点很硬, 金属层难于塑性变形。提高成型压力, 有助于减少生坯中原始孔隙率, 减少大尺寸孔隙在孔隙中所占的体积分数。文献^[15]表明, 在固相烧结时, 存在一个临界气

孔尺寸, 小于临界尺寸的气孔在烧结时将会收缩, 而大于临界尺寸的气孔在烧结时将稳定存在。提高成型压力, 可以得到较多尺寸小于临界尺寸的气孔。

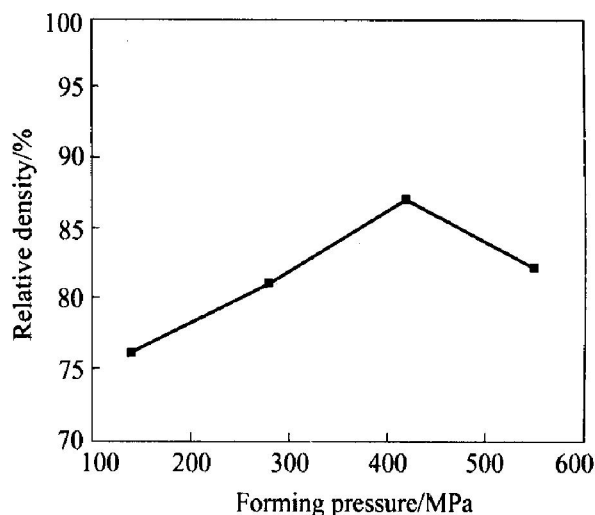


图 4 成型压力对相对密度的影响

Fig. 4 Effect of forming pressure on relative density (soaking at 950 °C for 1 h, H_2 atmosphere, powder reduced at 350 °C)

致密度在 417 MPa 处出现最大值, 可能是由下列原因造成的: 粉末中仍然存在部分杂质, 这些杂质在高温下气化分解成气体, 在较高的压力下(在该压力下 Al_2O_3 化学镀铜层会发生塑性变形, 从而造成烧结体内连通孔的弥合, 对本实验所用粉末大约在 417 MPa 左右), 被密闭在试样内部, 在烧结过程中受热膨胀, 从而出现过高的压力下致密度反而下降的现象; 而在相对较低的压力下, 试样中的孔洞是连通孔, 气体相对容易溢出。

2.3 烧结温度对致密化的影响

按照粉末冶金理论, 由于氧化铝和铜的熔点相差很大, 该种粉末属于难于烧结的粉末冶金体系, 过高的烧结温度将导致两相烧结体系发生反应^[12, 16]。因此, 本实验选择的烧结温度在铜的熔点以下, 即固相烧结, 温度为 800~950 °C。

烧结温度对致密化程度的影响如图 5 所示。对含铜量为 90% 的化学镀粉末来说, 烧结温度对粉末致密化程度的影响较小。这与用内氧化法制备的低 Al_2O_3 含量的铜基复合材料^[17]的结果不同, 与高体积分数的石墨/铜基复合材料^[18]的结果一致。其原因分析如下。烧结过程一般可分为以下几个连续过程: 烧结颈长大-孔洞圆化-孔洞粗化-孔洞收缩。在烧结末期, 由于孔洞收缩造成烧结体的尺寸减少,

从而得到很高的致密度。对本实验所用的粉末来说, 由于氧化铝含量比较高(体积分数约为 20%), 在烧结进行到中后期时, 一方面提高烧结温度有助于金属原子的热激活扩散; 另一方面, 烧结体中的增强相已经在空间形成颗粒之间互相连接的网络, 由于温度提高所增加的烧结收缩力不足以造成烧结体的整体收缩, 使粉末烧结体在较低的相对密度下就已经停止烧结过程, 从而造成烧结体的密度在不同的烧结温度下相差不多。

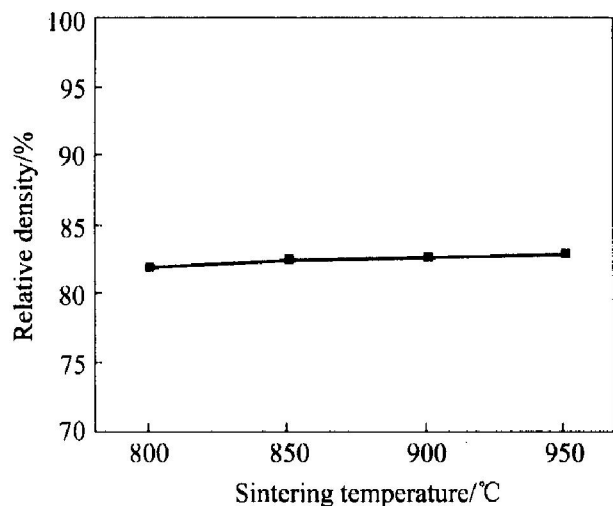


图 5 烧结温度对相对密度的影响

Fig. 5 Effect of sintering temperature on

relative density

(550 MPa, soaking for 1.5 h, powder reduced at 350 °C)

2.4 保温时间对致密度的影响

烧结时保温时间可以保证原子的充分扩散。对机械混合的 Cu/Al₂O₃ 来讲, Moustafa 等人^[10]认为在 45 min 就可以达到致密化。过长的保温时间会造成烧结体的反致密化。实验测定了保温时间对致密化的影响, 结果如图 6 所示。

由图 6 可知, 最佳保温时间在 1.5 h 左右, 过长的保温时间会造成烧结体的反致密化。造成铜粉烧结时反致密化的原因通常有以下几种^[19]: 封闭孔洞中气体的膨胀; 铜与氧化铝发生界面反应; 烧结过程由于内应力的释放造成体积膨胀; 烧结时间过长造成的聚晶长大。铜在与氧化铝粉末烧结过程中会发生界面反应, 生成 CuAlO₂^[16]。界面反应是提高金属/陶瓷界面接合力的重要手段, 但如果烧结时间过长, 在中性或弱还原性气氛中(虽然在氢气气氛下烧结, 但如果氢气流量小仍会有一些的氧分压), 导致过多 CuAlO₂ 的形成从而出现膨胀现象。

2.5 复压复烧对致密度的影响

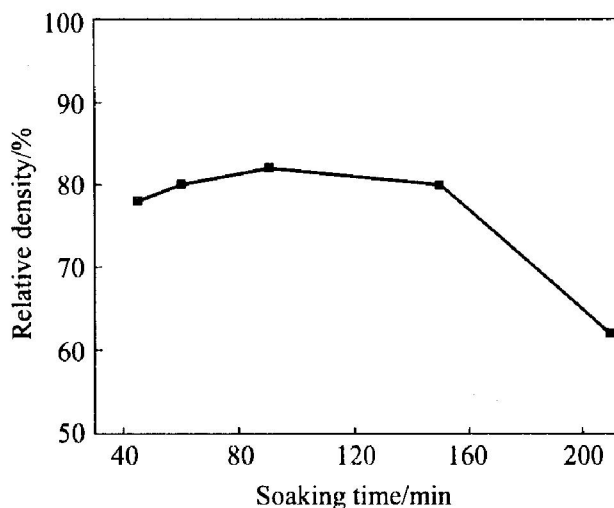


图 6 保温时间对相对密度的影响

Fig. 6 Effect of soaking time on

relative density

(950 °C, 400 MPa, powder reduced at 350 °C)

单次压缩烧结工艺难以达到很高的致密度, 因为化学镀铜粉末中的金属镀层在压制成型过程中会发生加工硬化。而二次加压烧结有助于减少烧结体中的孔洞, 改善陶瓷与基体之间的结合^[20]。采用复压复烧工艺, 一方面, 初压本身可以得到密度较大的素坯, 另一方面, 由初压造成加工硬化的金属镀层在初烧时内应力会松弛以及再结晶, 金属镀层软化, 因此在复压复烧时可以进一步提高致密度。为了得到相对致密度大于 90% 的试样, 以利于以后试样的锻、挤、拉拔等后续加工, 本文探讨了复压复烧工艺对致密化的影响。所用工艺为: 选择不同的初压压力, 初烧温度为 950 °C, 保温 1.5 h; 复压压力为 550 MPa, 复烧温度为 920 °C, 复烧保温时间选择 70 min, 结果如图 7 所示。

由图可见, 试样经过复压复烧工艺后密度有明显的提高, 如初压 140 MPa 下试样相对密度从 76% 增加到 89%, 证明复压复烧工艺对提高致密化是行之有效的。复压复烧工艺所以能提高材料的致密度, 在于粉末在初次压制烧结时, 烧结体中大于临界尺寸的孔洞在烧结时不会发生收缩^[15]; 而在复压过程中, 由于烧结体在初烧后发生再结晶退火, 材料软化, 这些大于临界尺寸的孔洞会有相当部分在复压时尺寸减少到临界尺寸以下。这样, 一方面复压本身可以提高材料的致密度; 另一方面, 小于临界尺寸的孔洞在复烧时也会消失, 这二者均提高了材料的致密度。

2.6 化学镀粉末高温还原处理的影响

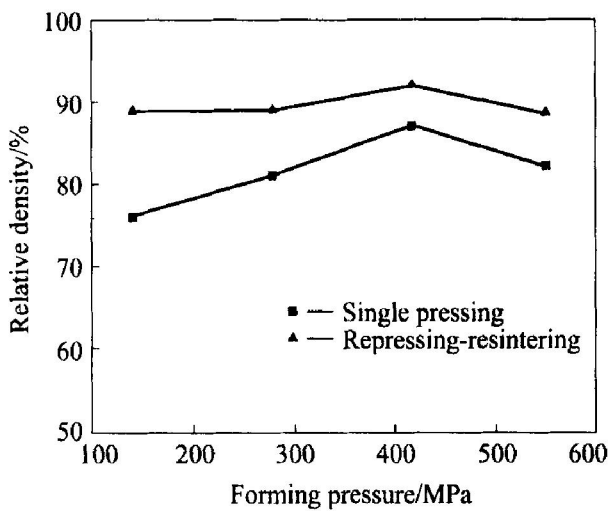


图 7 复压复烧工艺对相对密度的影响

Fig. 7 Effect of repressing-resintering process on relative density (powder reduced at 350 °C)

在图 4 和图 7 中, 随着压制压力的变化, 致密度出现峰值点。为了验证前述的分析, 同时也为了减少气态物质对致密度的影响, 对化学镀粉末在更高的温度下进行还原处理。致密度测定结果见图 8, 与图 4 和图 7 比较可知, 经过 650 °C 高温还原后的粉末在压制烧结时未出现相对密度峰值点。这是由于粉末经过了高温还原, 其中的杂质发生了分解或挥发, 即使在大于 417 MPa 下压制成型, 由于缺少产生气体的杂质源, 在烧结时不会产生气体, 因此相对密度随压制压力增加而单调增大。而图 4 和图 7 由于铜粉还原温度偏低, 产生气体杂质源挥发不充分, 所以存在 417 MPa 处的峰值。该实验结果说明, 对化学镀粉末采用高温还原处理是必要的。

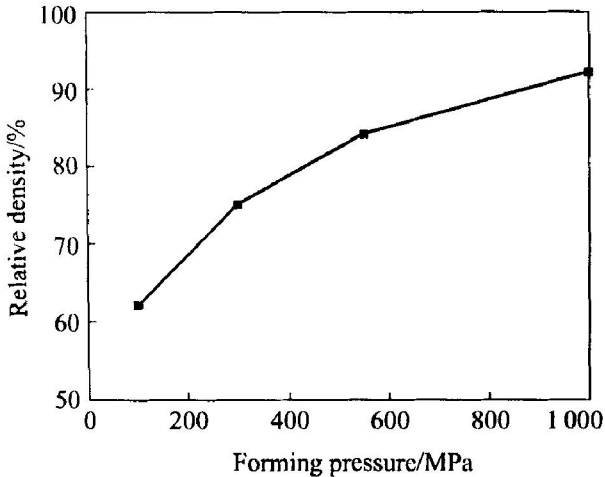


图 8 压制压力对相对密度的影响

Fig. 8 Effect of pressure on relative density (soaking 1 h at 900 °C, H_2 atmosphere, copper powder reduced at 650 °C)

对影响化学镀铜粉末致密度的参数作一简单汇总, 结果见表 2。

表 2 各因素影响化学镀铜粉末烧结致密化的程度

Table 2 Degrees of factors affecting densification for electroless copper plating powder				
Pre treatment of powder	Forming pressure	Repressing resintering process	Soaking temperature	Soaking time
Great	Great	Great	Less	Less

2.7 优化工艺

可以设想, 对表 2 中影响烧结的诸多因素, 在实验中尽量减少不利于烧结的因素的影响, 尽量增大有利于提高致密化程度的因素的作用, 应该能得到更好的结果。实验具体操作如下:

- 1) 粉末预处理: 90% 铜含量纳米 Al_2O_3 化学镀铜粉末, 经过清洗, 烘干, 在 650 °C 高温氢气中还原 1 h。
- 2) 应用复压复烧工艺: 烧结工艺采用复压复烧工艺, 初压可变。
- 3) 提高成型压力: 复压压力增大到 1 GPa。
- 4) 初烧烧结温度为 950 °C, 保温 1 h; 复烧温度为 930 °C, 保温 1 h, 氢气保护。

在上述实验条件下, 测定了试样致密度的变化, 结果如图 9 所示。与图 7 比较可见, 化学镀铜粉经过 650 °C 高温还原后已不存在 417 MPa 下的

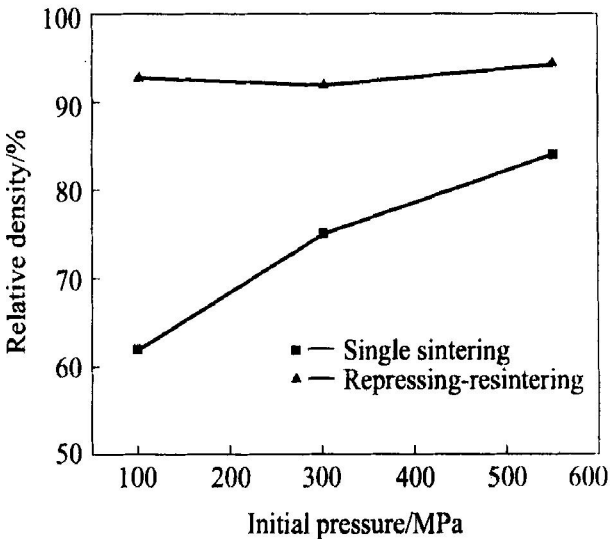


图 9 优化工艺下相对密度的变化

Fig. 9 Changes of relative density after optimized processing (copper powder reduced at 650 °C)

峰值, 这与 2.6 中的讨论是一致的。同时看到, 不论采用何种初压压力, 试样在复压复烧以后可以达到相似的致密度。这与上面的分析中, 粉末经过高温还原以后压制压力的选择是至关重要的一致。本实验所得试样能够达到 94% 左右的相对致密度, 这样为后续的挤压、拉拔、锻造等提供了良好的基础。

图 10 所示为试样的金相组织。从图中可以看出增强体颗粒分布弥散, 但存在黑色条状及粒状物质。为确定其种类, 对试样进行了 SEM 及能谱分析, 结果见图 11。从 SEM 像及元素的面分布上可以看出, 显微组织中的黑色颗粒少部分为烧结后留下来的孔洞, 大部分为团聚状态的 Al_2O_3 , 在团聚的 Al_2O_3 内部也存在一定的铜。

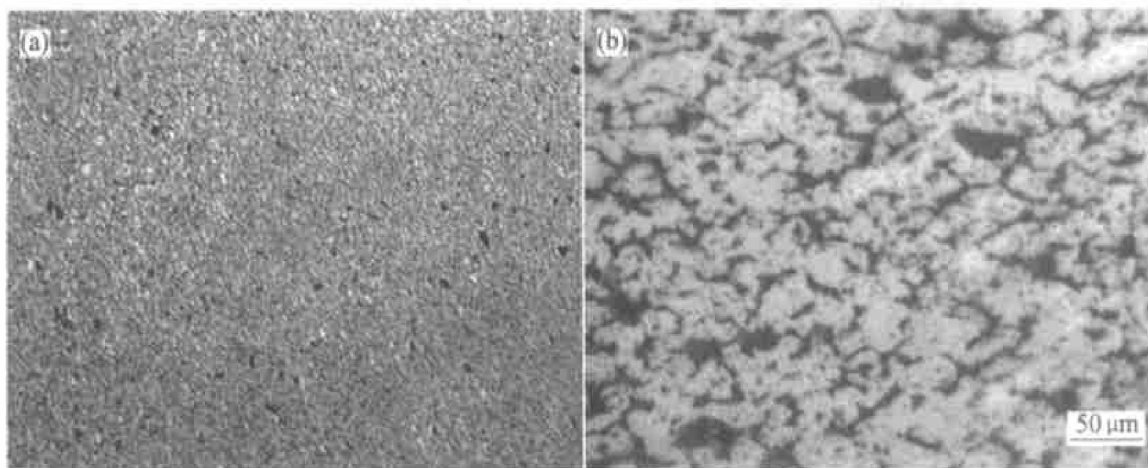


图 10 优化工艺下 $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_{3\text{p}}$ 的显微组织

Fig. 10 Microstructures of $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ after optimized processing

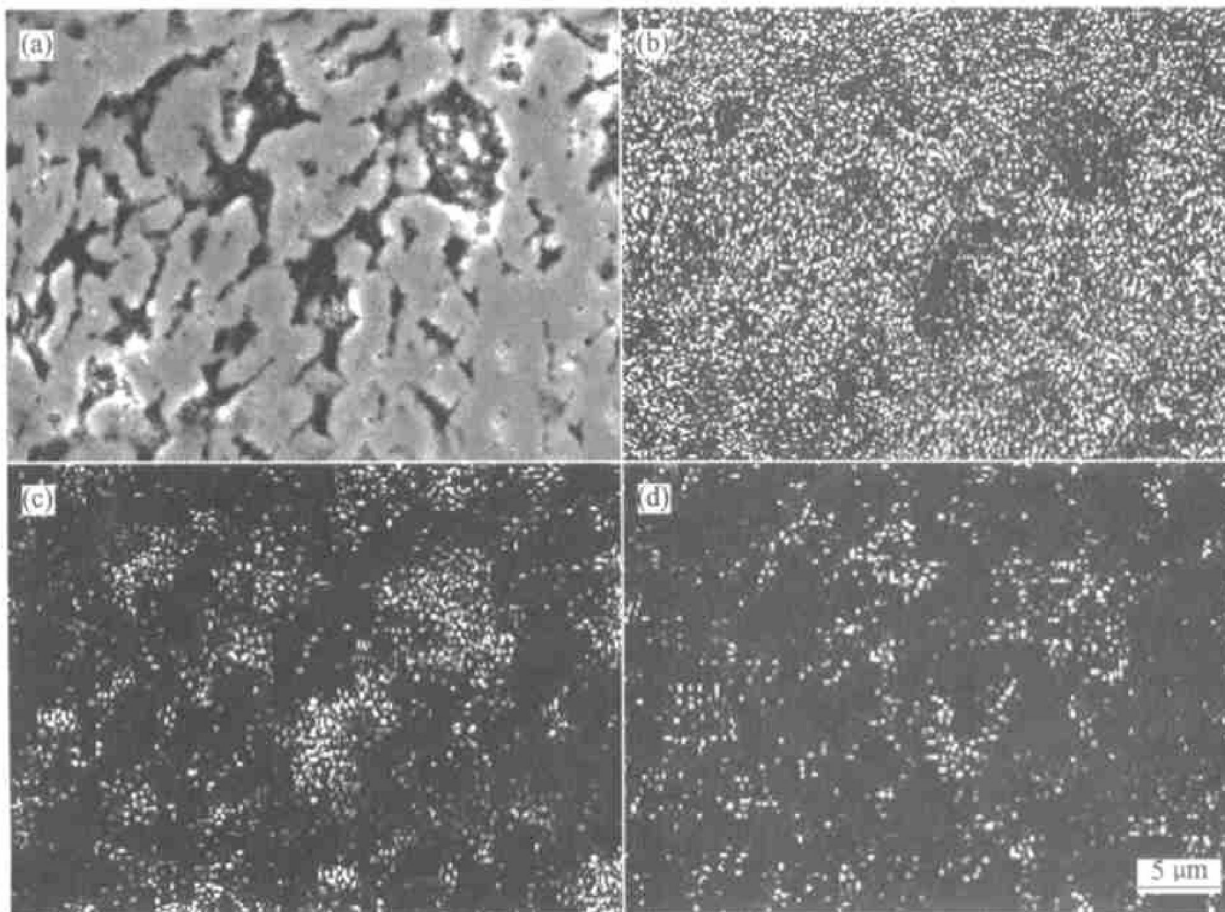


图 11 优化工艺下 $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_{3\text{p}}$ 的 SEM 像及 Cu, Al, O 的 EDS 谱

Fig. 11 SEM image and EDS composition mappings of Cu, Al, O for $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (10%) after optimized processing
(a) —SEM image; (b) —Cu; (c) —Al; (d) —O

3 结论

1) 纳米 Al_2O_3 化学镀铜粉末表面存在影响烧结的杂质, 对化学镀粉末烧结前应采用清洗、氢气还原等手段来去除表面的杂质。

2) 高温煅烧是化学镀粉末的预处理的关键性工艺。化学镀带入大量的有机及无机组分, 这些物质是烧结时气体的主要来源, 对化学镀粉末应采用高温煅烧来消除其影响。

3) 采用复压复烧工艺是提高化学镀粉末致密度的有效手段。提高复压压力有助于提高致密度。烧结温度、保温时间对高 Al_2O_3 含量的化学镀铜粉的烧结的影响相对较小。

4) 含量为 10% (质量分数) 的纳米 Al_2O_3 化学镀铜粉末采用常规粉末冶金工艺可以得到相对致密度达 94% 的试样。

REFERENCES

- [1] 高陇桥. 国外军用微波真空电子器件用关键材料[J]. 电子材料, 1994(8-9): 1-8.
GAO Long-qiao. Key materials for microwave vacuum electronic device in foreign military[J]. Electronic Materials, 1994(8-9): 1-8.
- [2] 陈文革, 王 纯. 集成电路用金属铜基引线框架和电子封装材料研究进展[J]. 材料导报, 2002, 16(7): 29-30, 57.
CHEN Wen-ge, WANG Chun. Advances in copper matrix material for leadframe and electronic packaging of integrated circuitry (IC) [J]. Materials Review, 2002, 16(7): 29-30, 57.
- [3] 况延香, 马莒生. 迈向新世纪的微电子封装技术[J]. 电子工艺技术, 2000, 21(1): 1-6.
KUANG Yan-xiang, MA Ju-sheng. Microelectronic package technology of striding forward new millenary[J]. Electronics Process Technology, 2000, 21(1): 1-6.
- [4] 申玉田, 崔春翔, 孟凡斌. 高强度高电导率 $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合材料的制备[J]. 金属学报, 1999, 35(8): 888-892.
SHEN Yu-tian, CUI Chun-xiang, MENG Fan-bin. Fabrication of $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ composites with high strength and electric conductivity[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1999, 35(8): 888-892.
- [5] 李玉桐, 董治中, 齐增生, 等. 纳米 Al_2O_3 增强铜基复合材料的组织及性能[J]. 天津大学学报, 1996, 29(1): 123-129.
LI Yu-tong, DONG Zhi-zhong, QI Zeng-sheng, et al. Microstructure and properties of Cu matrix composite reinforced by nano- Al_2O_3 particle[J]. Journal of Tianjin University, 1996, 29(1): 123-129.
- [6] WU Jian-jun, LI Guo-bin, ZHANG Yun, et al. Copper matrix composites reinforced with nanometer alumina particle[J]. J Mater Sci Technol, 1999, 15(2): 143-146.
- [7] YING D Y, ZHANG D L. Processing of $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ metal matrix nanocomposite materials by using high energy ball milling[J]. Mater Sci Eng A, 2000, A286: 152-156.
- [8] 郭均高, 罗肖邦. $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米复合粉末的合成[J]. 国外金属热处理, 2002, 23(2): 8-9.
GUO Jun-gao, LUO Xiao-bang. Synthesis of $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ nano-composite powder [J]. Foreign Metal Heat Treatment, 2002, 23(2): 8-9.
- [9] Jena P K, Brocchi E A, Motta M S. In situ formation of $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ nano-scale composites by chemical routes and studies on their microstructures[J]. Mater Sci Eng A, 2001, A313: 180-186.
- [10] Moustafa S F, Abdel-Hamid Z, Abdel-Hay A M. Copper matrix SiC and Al_2O_3 particulate composites by powder metallurgy technique[J]. Materials Letters, 2002, 53: 244-249.
- [11] 范启义, 凌国平, 酆 剑. 化学镀铜法制备纳米 $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 复合材料的研究[J]. 材料科学与工艺, 2002, 10(4): 357-361.
FAN Qi-yi, LING Guo-ping, LI Jian. Preparation of $\text{Cu}/\text{Al}_2\text{O}_3$ nano-composite powders by electroless copper plating[J]. Mater Sci Technol, 2002, 10(4): 357-361.
- [12] Silvain J F, Bobet J L, Heintz J M. Electroless deposition of copper onto alumina sub-micronic powders and sintering[J]. Composites, 2002, 33A: 1387-1390.
- [13] 王文芳, 许少凡, 应美芳. 用镀铜石墨粉制备铜/石墨复合材料[J]. 机械工程材料, 1999, 23(2): 41-43.
WANG Wen-fang, XIU Shao-fan, YING Mei-fang. Study on the microstructure and properties of copper-coated graphite/Cu matrix composite material[J]. Materials for Mechanical Engineering, 1999, 23(2): 41-43.
- [14] 武建军, 张学仁, 蒋正行, 等. 氧化铝颗粒增强铜基复合材料[J]. 河北工业大学学报, 1996, 25(3): 62

- 67.
WU Jian-jun, ZHANG Xue-ren, JIANG Zheng-xing, et al. Alumina particulate reinforced composites with copper base[J]. Journal of Hebei University of Technology, 1996, 25(3): 62 - 67.
- [15] 施剑林. 固相烧结(I) —气孔显微结构模型及其热力学稳定性, 致密化方程[J]. 硅酸盐学报, 1997, 25(5): 499 - 513.
SHI Jian-lin. Solid state sintering (I) —pore microstructural model and thermodynamic stability, densification equation[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1997, 25(5): 499 - 513.
- [16] Kim S T, Kim C H. Interfacial reaction product and its effect on the strength of copper to alumina eutectic bonding[J]. Journal of Materials Science, 1992, 27: 2061 - 2066.
- [17] 武建军, 雷廷泉, 张 运, 等. 弥散强化铜基复合材料制备工艺[J]. 粉末冶金技术, 1999, 17(3): 195 - 200.
WU Jian-jun, LEI Ting-quan, ZHANG Yun, et al. A new method to prepare dispersive strengthened copper matrix composites[J]. Powder Metallurgy Technology, 1999, 17(3): 195 - 200.
- [18] 孙杏因, 谈 萍, 崔永福. 影响铜/石墨材料密度的工艺因素[J]. 材料工程, 1999(9): 43 - 45.
SUN Xin-nan, TAN Ping, CUI Yong-fu. Influence factors of density for Cu/C material[J]. Materials Engineering, 1999(9): 43 - 45.
- [19] 丁华东, 浩宏奇, 金志浩. 石墨含量对铜基滑板烧结膨胀的影响[J]. 中国有色金属学报, 1996, 6(3): 106 - 110.
DING Hua-dong, HAO Hong-qi, JIN Zhi-hao. Influence of graphite content on sintering expansion of copper base alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1996, 6(3): 106 - 110.
- [20] 梁淑华, 范志康, 肖 鹏. Al_2O_3 颗粒增强铜基复合材料的组织[J]. 铸造设备研究, 1998(3): 20 - 22.
LIANG Shu-hua, FAN Zhi-kang, XIAO Peng. The microstructure of copper matrix composite reinforced by Al_2O_3 particulates[J]. Foundry Equipment, 1998(3): 20 - 22.

(编辑 黄劲松)