

镀层厚度对镀钛金刚石/铝复合材料热导率的影响

陈代刚, 于家康, 于 威, 袁 曼

(西北工业大学 凝固技术国家重点实验室, 西安 710072)

摘 要: 通过在金刚石表面镀钛来改善金刚石和铝基体之间的弱界面结合, 并用气压浸渗法制备体积分数为 60% 的镀钛金刚石/铝复合材料。研究镀钛后金刚石颗粒的物相组成、不同镀层厚度和不同颗粒尺寸下复合材料的热导率; 用 H-J 和 DEM 模型预测复合材料的热导率, 并将预测结果与实验值进行对比。结果表明, 镀钛后金刚石颗粒的物相由金刚石、碳化钛和钛三相组成; 随着镀层厚度的增加, 界面传热系数减小, 复合材料的热导率减小; 颗粒的尺寸越小, 这种变化趋势越明显; 相对于 H-J 模型, DEM 模型更能准确地预测镀钛金刚石增强的复合材料的热导率; 通过计算得出镀钛金刚石/铝复合材料的临界镀层厚度为 1.5 μm , 当超过此临界镀层厚度时, 镀层反而不利于复合材料热导率的提高。

关键词: 镀钛金刚石/铝复合材料; 镀层厚度; 热导率; 界面传热系数; 气压浸渗

中图分类号: TB333

Effect of coating thickness on thermal conductivity of Ti-coated diamond/Al composites

CHEN Dai-gang, YU Jia-kang, YU Wei, YUAN Man

(State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Titanium coating on diamond surface was adopted to improve the weak interface bonding between diamond and aluminum matrix. The Ti-coated diamond/Al composites were fabricated by gas pressure infiltration with a 60% volume fraction of diamond. The phase composition of diamond after coating titanium and the thermal conductivity (TC) of Ti-coated diamond/Al composites under different coating thicknesses and different particle sizes were also studied. The predicted results of the H-J and DEM models were compared with the experimental values. The results show that, the diamond particles are composed of three phases: diamond, TiC and Ti; along with the increase of the coating thickness, interface heat transfer coefficient and TC of composites decrease, the smaller the particle, the more obvious the tendency. Compared with the H-J model, the DEM model gives more accurate predictions for Ti-coated diamond/Al composites. The critical coating thickness was calculated to be 1.5 μm for diamond/Al composites. When the coating thickness exceeds this critical value, the coating is detrimental to improving the TC.

Key words: Ti-coated diamond/Al composites; coating thickness; thermal conductivity; interface heat transfer coefficient; gas pressure infiltration

随着电子元器件集成度越来越高, 工作时产生的热量也将越来越多。如果热量不能及时散出, 相邻部件会因产生较大的热应力而导致热疲劳失效, 降低其寿命^[1], 因此, 散热问题成为电子信息产业关注的焦点^[2]。传统的电子封装材料虽然具有与基板相匹配的

热膨胀系数, 但是其热导率较小(200~250 W/(m·K)), 散热效率低。金刚石/铝复合材料是一类新型、具有可调整与基板相匹配的热膨胀系数、高热导率的电子封装材料。王新宇等^[3]研究了该类材料的界面及热膨胀性能。为了降低生产成本, 薛晨等^[4]采用 SiC 和金刚

石混合来增强铝基体, 并研究了其热膨胀性能。对于金刚石/铝复合材料的热导率, 目前的最大值为 $670 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 由 RUCH 等^[5]采用气压浸渗法制备金刚石/铝复合材料时所测得。

但是, 金刚石和铝的界面结合较弱, 铝基体选择性地粘结在金刚石的 $\{100\}$ 面上, 而很难粘附在 $\{111\}$ 面上^[5]。此外, 未经镀层处理的金刚石/铝复合材料在界面处会生成 Al_4C_3 , 该产物使复合材料的性能降低。研究者在运用镀层来改变基体和增强体之间较弱的界面结合、阻止有害界面反应产物生成方面进行了研究: JOHNSON 和 SONUPARLAK^[6]在金刚石表面镀 SiC 来阻止 Al_4C_3 的生成; SCHUBERT 等^[7-8]发现在金刚石表面涂覆一薄层 Cr_3C_2 可以显著改善金刚石和铜的界面结合; WEBER 和 TAVANGAR^[9]在铝基体中加入 Cr、B 等活性元素, 通过这些元素与基体的化学反应来增强界面结合; FENG 等^[10]采用在金刚石表面镀钛来减缓金刚石和铝的选择性粘结现象。

目前, 虽然在采用镀层来改善金刚石复合材料界面结合方面进行了不少研究, 但是, 对于镀层厚度对复合材料性能的影响研究很少。为此, 本文作者采用在 3 种颗粒尺寸的金刚石表面镀不同厚度的钛层来研究镀层厚度对金刚石/铝复合材料热导率的影响, 并将实验值与 H-J^[11]模型和 DEM^[12-14]模型的预测结果进行比较。

1 实验

在本实验中选用纯 Al(99.7%, 质量分数)作为基体材料, 选用平均粒径为 70、150 和 $300 \mu\text{m}$ 的 MBD-4 型金刚石颗粒作为增强体。表面镀层采用气相沉积法, 涂覆过程在 750°C 和 $6\sim 7 \text{ Pa}$ 的真空度下完成。通过控制电镀时间和称量法获得金刚石表面镀层的厚度约为 100、200、300、400 和 500 nm 。金刚石颗粒的形貌如图 1 所示。从图 1 可以看出, 金刚石颗粒的形貌为规则的十四面体。无镀层的金刚石颗粒表面比较光亮, 镀钛后变得昏暗。在有些镀钛的金刚石颗粒表面可以看到白色的小点, 这可能是在真空微镀钛时残留的钛颗粒。

制备金刚石/铝复合材料采用的浸渗设备如图 2 所示。浸渗前, 首先将金刚石颗粒装在石墨模具中振动、压实, 使其密实化并放入上炉炉腔内, 然后将铝合金液放入下炉炉腔, 设定上炉温度为 750°C , 下炉温度为 800°C 。开真空阀, 上炉温度到达 400°C 前将设备腔内的真空度控制在 4 kPa 以下。上炉温度达到 750°C

后保温 20 min 达到热平衡。最后, 通入压缩空气, 在 1.45 MPa 下浸渗, 浸渗后的凝固时间约为 3 min 。详细的浸渗过程参见文献[10]。经计算, 所制备的复合材料中金刚石的体积分数为 60%。

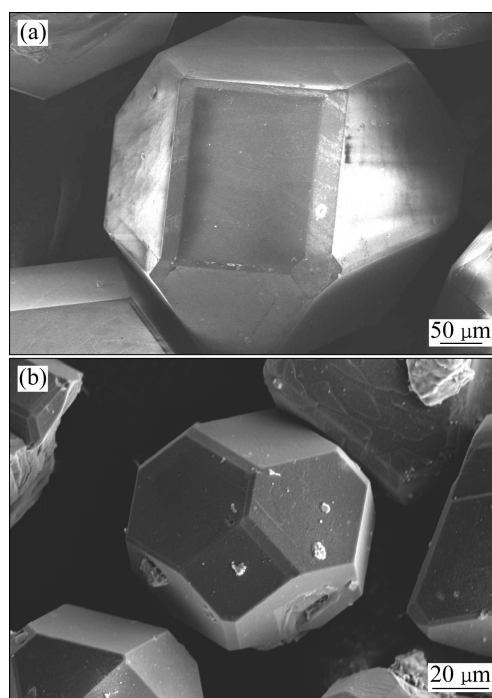


图 1 未镀钛和镀钛金刚石颗粒的形貌

Fig. 1 Morphologies of diamond particles: (a) Uncoated; (b) Ti-coated

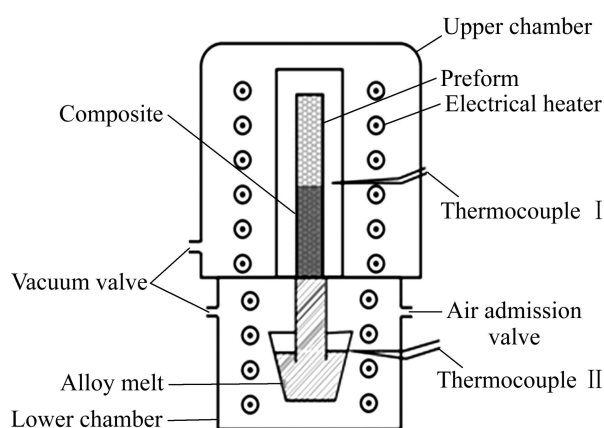


图 2 气压浸渗设备示意图

Fig. 2 Schematic diagram of gas pressure infiltration apparatus

利用 Philips X' Pert MPD Pro 型自动 X 射线衍射仪(XRD)分析该复合材料的物相组成; 通过 Olympus MPG4 光学显微镜和 Zeiss SUPRA 55 型扫描电子显微镜(SEM)观察复合材料的显微组织和断口形貌; 采用 LFA457 型激光导热仪测定复合材料的热导率, 试样

尺寸为 $d12.7\text{ mm} \times 3.8\text{ mm}$ 。复合材料密度由阿基米德原理测得。

2 结果和讨论

2.1 镀钛金刚石的物相组成

图3所示为镀钛后金刚石颗粒的XRD谱。从图3可以看出,镀钛后的金刚石颗粒由金刚石、碳化钛和钛三相组成。说明在气相沉积法镀钛过程中发生了如下化学反应:



李国彬等^[15]计算了该反应的热力学参数,600~900℃时,得出式(2):

$$\Delta G = -186 + 0.008\ 8T \quad (2)$$

本实验中,镀层时采用的温度为750℃,可以算出 $\Delta G = -176.99\text{ kJ/mol} < 0$ 。从热力学角度说明在该镀层温度下反应(1)完全可以进行。

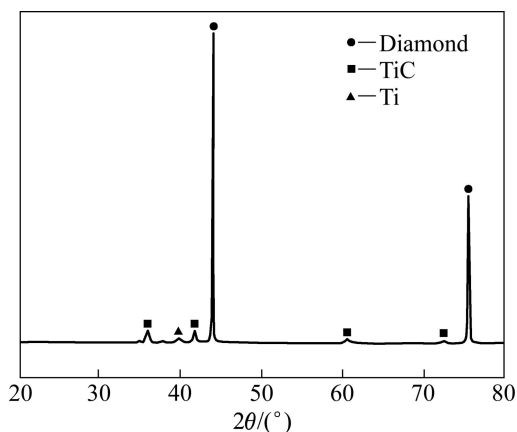


图3 镀钛后金刚石颗粒的XRD谱

Fig. 3 XRD pattern of diamond particles after coating Ti

从图3的峰值可以看出,钛的衍射峰较弱,说明上述反应进行的程度大,反应后只有少量残余的钛。残余钛存在的原因可能是随着反应生成的碳化钛层厚度的增加,阻止了金刚石与外层钛的进一步反应。镀钛后金刚石颗粒的结构为金刚石-碳化钛-钛。

2.2 显微组织

图4所示为镀钛金刚石/铝复合材料的光学显微照片和SEM像。从图4可以看出,金刚石在铝基体中的分布比较均匀,颗粒的轮廓清晰。由于金刚石的硬度很高,因此,用来观测的试样很难磨平,表面不平

整,未提供高倍下的光学显微照片。从SEM像可看出,金刚石颗粒突出表面,像是将颗粒以不同的形态插入铝基体中。光学显微照片中的颗粒亮、有的暗,这可能是金刚石颗粒突出的程度不同,导致景深的不同而造成的。

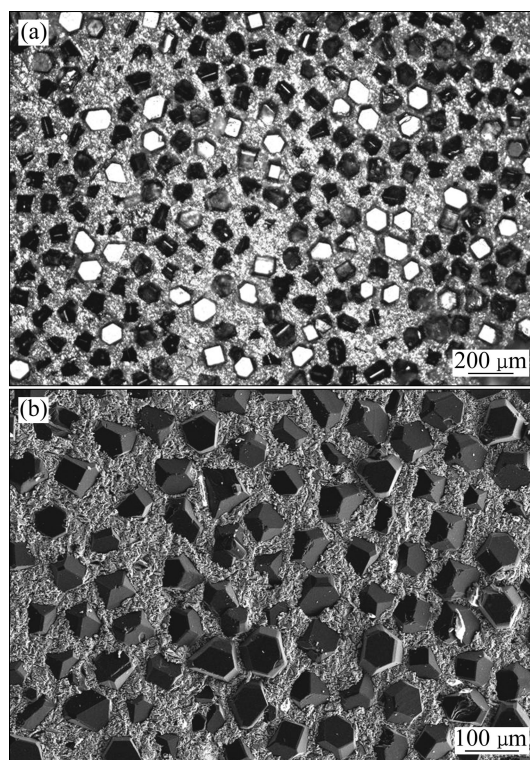


图4 镀钛金刚石/铝复合材料的光学显微照片和扫描电镜照片

Fig. 4 Optical microscope image (a) and SEM image (b) of Ti-coated diamond/Al composites

2.3 断口形貌

图5所示为未镀钛和镀钛金刚石/铝复合材料的断口形貌。对于无镀层的复合材料,断裂方式以界面断裂为主。铝基体只是选择性地粘附在{100}晶面上,而在{111}面上没有发现铝基体。在金刚石表面镀钛后,上述选择性粘结现象得到了明显减缓。金刚石的{100}和{111}面都被铝基体包裹,复合材料的断裂方式以基体断裂为主。这说明金刚石和铝基体之间的界面结合强度高于铝基体的强度,相对于无镀层的复合材料的界面断裂,后者的界面结合强度得到了明显提高。这说明镀钛有利于改善金刚石和铝基体之间的选择性粘结,进而提高界面结合强度。

2.4 热导率

复合材料的热导率在很大程度上受到界面结合情

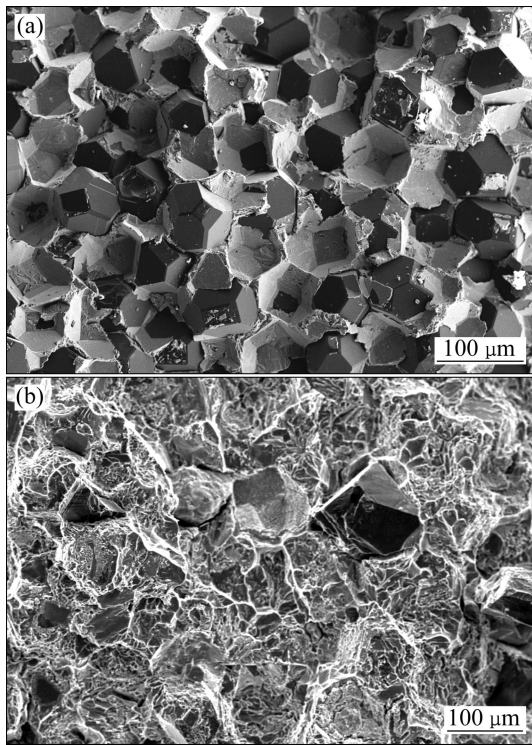


图 5 未镀钛和镀钛金刚石/铝复合材料的断口形貌

Fig. 5 Fracture morphologies of diamond/Al composites: (a) Uncoated; (b) Ti-coated

况的影响, 镀钛可明显改善界面的结合情况, 因此, 不同厚度的镀层必然会造成界面结合强度的不同, 进而引起复合材料热导率的不同。

本文作者选用 H-J 模型和 DEM 模型预测不同镀层厚度下镀钛金刚石/铝复合材料的热导率, 并与实验值进行了比较。在用模型预测两相复合材料的热导率时, 需要考虑此两相之间的界面传热系数。因为复合材料的界面为非理想界面, 所以引入有效热导率 k_p^{eff} 来代替颗粒本身的热导率: $k_p^{\text{eff}} = k_p^{\text{in}} / [1 + k_p^{\text{in}} / (ah)]$, 其中: k_p^{in} 为增强颗粒本身的热导率; a 和 h 分别为经球形近似处理后增强颗粒的半径和界面传热系数。H-J 模型^[8]是在 Maxwell 模型^[16]的基础上引入界面传热系数的概念, 经修正后 H-J 模型的表达式为

$$k_{\text{com}} = k_m \left[\frac{2 \left(\frac{k_p^{\text{eff}}}{k_m} - \frac{k_p^{\text{eff}}}{ah} - 1 \right) \varphi_p + \frac{k_p^{\text{eff}}}{k_m} + \frac{2k_p^{\text{eff}}}{ah} + 2}{\left(1 - \frac{k_p^{\text{eff}}}{k_m} + \frac{k_p^{\text{eff}}}{ah} \right) \varphi_p + \frac{k_p^{\text{eff}}}{k_m} + \frac{2k_p^{\text{eff}}}{ah} + 2} \right] \quad (3)$$

式中: k_{com} 和 k_m 分别为复合材料的热导率和基体的热导率; φ_p 是增强体的体积分数。

对于两种不同相增强金属基复合材料, 其 DEM 模型^[14, 17-18]为

$$\frac{dk}{d\varphi_p^*} = k \sum_i \varphi_i \frac{-(k - k_{pi}^{\text{eff}})}{(k - k_{pi}^{\text{eff}})S - k} \quad (4)$$

式中: φ_i 是预制型中相 i 所占的体积分数, $\sum_i \varphi_i = 1$;

S 为表征增强相的一个几何参数, 在这里假设为球形, $S=1/3$ 。 φ_p^* 定义为 $\varphi_p^* = -\ln(1 - \varphi_p)$ 。边界条件如下: 当基体中没有增强体时, $k_c = k_m$, $\varphi_p = 0$, $\varphi_p^* = 0$ 。

设材料热导率的增大比例 $A = k_c / k_m$, 材料的有效相差 $B = k_p^{\text{eff}} / k_m$, H-J 模型的表达式转变为

$$A = \frac{B(1 + 2\varphi) + 2(1 - \varphi)}{B(1 - \varphi) + (2 + \varphi)} \quad (5)$$

用同样的方式对 DEM 模型进行处理后, DEM 理论模型将变为

$$1 - \varphi = \frac{B - A}{B - 1} A^{-1/3} \quad (6)$$

公式(6)中参量的值是通过文献得到的, 假设铝的热导率为 $238 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[19], 金刚石的热导率为 $1300 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[20]。而复合材料的界面传热系数 h 可以由很多公式得到, 其中一个最简单的模型是声子的不匹配模型:

$$h \approx \frac{1}{2} \rho_1 c_p \frac{c_1^3 \rho_1 \rho_2 c_1 c_2}{c_2^2 (\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2)^2} \quad (7)$$

式中: c_p 是基体的比热容; ρ 是密度; c_1 和 c_2 分别是基体相和增强相的声子传播速度。将基体密度 $\rho_1 = 2700 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、比热容 $c_p = 895 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 、传播速度 $c_1 = 3595 \text{ m}/\text{s}$ 、金刚石密度 $\rho_2 = 3520 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、传播速度 $c_2 = 17500 \text{ m}/\text{s}$ ^[21]代入式(7), 得到金刚石/铝复合材料的界面传热系数 $h_{\text{diamond/Al}} = 2.12 \times 10^7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

如果忽略镀钛金刚石表面微量的钛, 将镀钛金刚石/铝复合材料的界面层分为金刚石-TiC、TiC 和 TiC-Al 层 3 个部分进行分析, 界面传热系数 h 可用式(8)表示^[22]:

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_{\text{diamond/TiC}}} + \frac{d_{\text{TiC}}}{k_{\text{TiC}}} + \frac{1}{h_{\text{TiC/Al}}} \quad (8)$$

式中: TiC 的声子传播速度可以通过 $c = \sqrt{B/\rho}$ ^[23]计算得到, 其中 B (240 GPa)^[24]为体积模量, TiC 的密度为 $4930 \text{ kg}/\text{m}^3$, TiC 的比热容为 $568 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ^[25], 由式(7)计算得到 $h_{\text{diamond/TiC}}$ 为 $3.6 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $h_{\text{TiC/Al}}$ 为 $2 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; k_{TiC} 为 TiC 的热导率, 其值为 $36.4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ^[26]; d_{TiC} 为 TiC 镀层的厚度, 分别为 100、200、300、400 和 500 nm。将上述数据代入式(8)可得

到不同镀层厚度下金刚石/铝复合材料的界面传热系数。

在实验测定复合材料的热导率时, 涉及公式:

$$k_{\text{com}} = \alpha c_{\text{theor}} \rho_{\text{theor}} \quad (9)$$

式中: α 、 c_{theor} 和 ρ_{theor} 分别为复合材料的热扩散系数、比热容和密度, 其中 $\rho_{\text{theor}} = 3.615 \text{ g/cm}^3$ 。

$$c_{\text{theor}} = \frac{c_{\text{dia}} \varphi_{\text{dia}} \rho_{\text{dia}} + c_{\text{Al}} \varphi_{\text{Al}} \rho_{\text{Al}}}{\rho_{\text{theor}}} \quad (10)$$

式中: ρ_{dia} 和 ρ_{Al} 分别为金刚石、铝基体的密度, 其值分别为 3.51 和 2.68 g/cm^3 ; φ_{dia} 为金刚石的体积分数, 本实验中其值为 60% 。 c_{dia} 和 c_{Al} 分别为金刚石和铝基体的比热容, 其值分别为 0.512 和 $0.88 \text{ J/(g}\cdot\text{K)}$ 。实验结果和模型预测值如图 6 所示。

从 3 种尺寸复合材料的热导率随镀层厚度的变化可以看出: 颗粒尺寸为 $70 \mu\text{m}$ 时, 二者之间线性关系的斜率最大, $150 \mu\text{m}$ 的次之, $300 \mu\text{m}$ 的斜率最小。说明颗粒越小, 复合材料的热导率受界面层厚度的影

响越大, 这可能是由于在相同体积分数的情况下, 颗粒越小, 金刚石与铝基体的界面结合面积越大。

DEM 模型的预测结果稍高于实验值, 而且这种误差随着颗粒直径的增加而变大。造成这种误差的原因可能是 DEM 模型是基于球形的假设前提, 而金刚石实际是一种正十四面体, 这样相对于球形会降低界面传热系数; 另外, 界面传热系数的计算公式中没有考虑扩散速率的影响。H-J 模型的预测值却远低于实验值, 且颗粒的直径越大, 相差的也就越多。因此, 在预测有镀层的金刚石/铝复合材料时, 相对于 H-J 模型来说, DEM 能得到更好的预测结果。

由上可知, $h_{\text{diamond/Al}} = 2.12 \times 10^7 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$, 而根据实验中采用的几种镀层厚度所算得的界面传热系数都高于这个值。如图 6 (d) 所示, 随着镀层厚度的增加, 界面传热系数下降, 复合材料的热导率降低, 这是因为相对于理想界面来说, 非理想界面必然会增加热量在界面处传导的阻力。随着镀层厚度的进一步增大, 镀层后的界面传热系数将可能低于 $h_{\text{diamond/Al}}$, 因此,

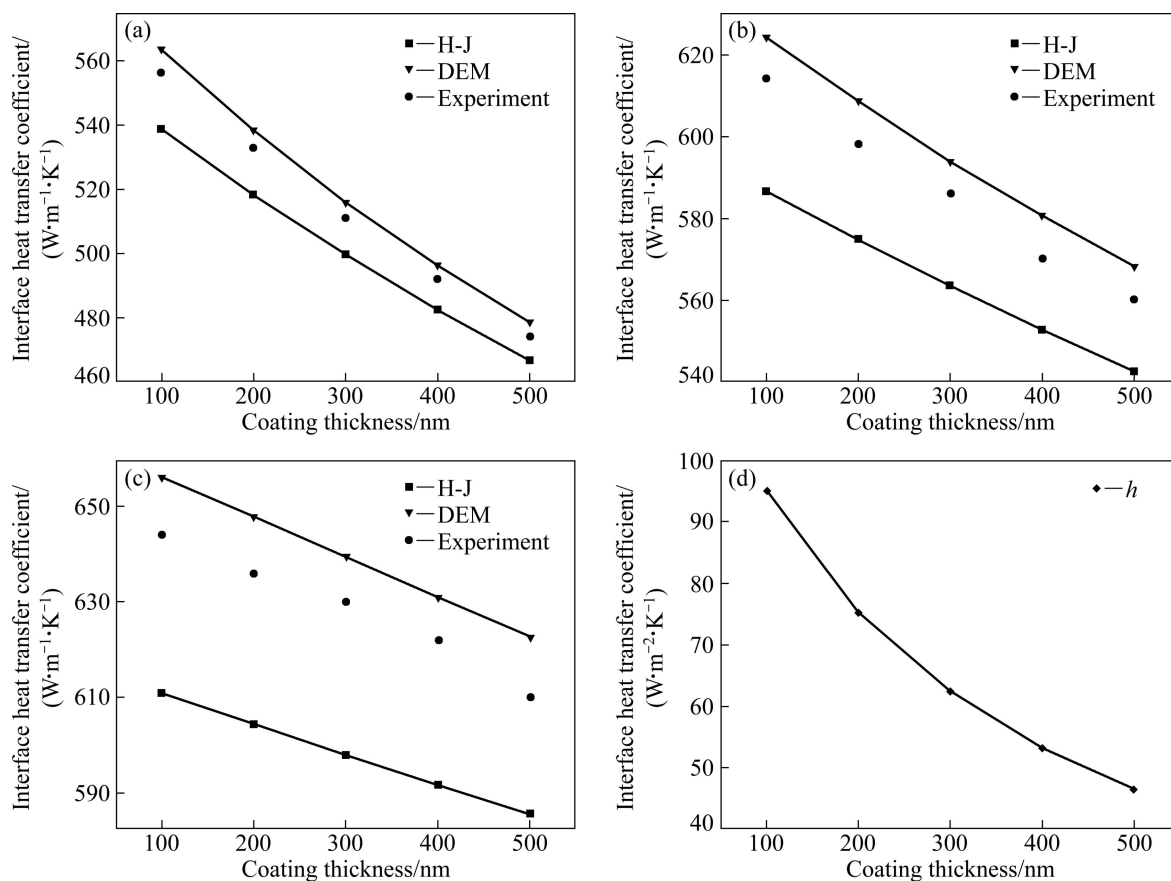


图 6 不同颗粒尺寸下镀钛金刚石/铝复合材料热导率的实验值和两种模型的预测值以及界面传热系数随镀层厚度的变化

Fig. 6 Experimental thermal conductivity of Ti-coated diamond/Al composites and their model predictions by H-J and DEM models along with interface heat transfer coefficient versus coating thickness: (a) $70 \mu\text{m}$; (b) $150 \mu\text{m}$; (c) $300 \mu\text{m}$; (d) Interface heat transfer coefficient

镀层将起到与设想相反的效果。将 $h_{\text{diamond/Al}}$ 代入式(8),可计算得到临界镀层厚度为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$ 。当镀层厚度超过此临界值时,得到的复合材料的界面传热系数小于无镀层时的热导,在该情形下镀层反而不利于提高复合材料的热导率。

3 结论

1) 采用气压浸渗法制备了不同镀层厚度镀钛金刚石增强铝基复合材料。金刚石在铝基体中分布均匀,镀层后的金刚石颗粒的物相组成为金刚石、碳化钛和钛。

2) 颗粒越小,镀层厚度对复合材料热导率的影响越大;与H-J模型相比,DEM模型预测的镀钛金刚石/铝复合材料的热导率更接近于实验值。

3) 通过计算得出镀钛金刚石/铝复合材料的临界镀层厚度为 $1.5\text{ }\mu\text{m}$,当镀层厚度超过此临界值时,镀层反而不利于复合材料热导率的提高。

REFERENCES

- [1] 周贤良, 吴江晖, 张建云, 华小珍, 周云军. 电子封装用金属基复合材料的研究现状[J]. 南昌航空工业学院学报, 2001, 15(1): 11-14.
ZHOU Xian-liang, WU Jiang-hui, ZHANG Jian-yun, HUA Xiao-zhen, ZHOU Yun-jun. Review of metal-matrix composites materials for electronic packaging[J]. Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology, 2001, 15(1): 11-14.
- [2] 李婷婷, 彭超群, 王日初, 王小峰, 刘兵. 电子封装陶瓷基片材料的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(7): 1365-1374.
LI Ting-ting, PENG Chao-qun, WANG Ri-chu, WANG Xiao-feng, LIU Bing. Research progress in ceramic substrate material for electronic packaging[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(7): 1365-1374.
- [3] 王新宇, 于家康, 朱晓敏. 镀TiC金刚石/铝复合材料的界面及热膨胀性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1718-1724.
WANG Xin-yu, YU Jia-kang, ZHU Xiao-min. Interface and expansion properties of TiC-coated diamond/Al composites[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1718-1724.
- [4] 薛晨, 于家康, 谭雯. 金刚石/碳化钛/铝复合材料的热膨胀性能[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(8): 1953-1959.
XUE Chen, YU Jia-kang, TAN Wen. Thermal expansion behavior of diamond/SiC/Al composite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(8): 1953-1959.
- [5] RUCH P W, BEFFORT O, KLEINER S, WEBER L, UGGOWITZER P J. Selective interfacial bonding in Al(Si)-diamond composites and its effect on thermal conductivity composite[J]. Sci Technol, 2006, 66(15): 2677-2685.
- [6] JOHNSON W B, SONUPARLAK B. Diamond/Al metal matrix composites formed by the pressureless metal infiltration process[J]. J Mater Res, 1993, 8(5): 1169-1173.
- [7] SCHUBERT T, CIUPINSKI L, ZIELINSKI W, MICHALSKI A, WEISGARBER T, KIEBACK B. Interfacial characterization of Cu/diamond composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications[J]. Scripta Mater, 2008, 58(4): 263-266.
- [8] SCHUBERT T, TRINDADE B, WEIGARBER T, KIEBACK B. Interfacial design of Cu-based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications[J]. Mater Sci Eng A, 2008, 475(1/2): 39-44.
- [9] WEBER L, TAVANGAR R. On the influence of active element content on the thermal conductivity and thermal expansion of Cu-X (X=Cr, B) diamond composites[J]. Scripta Mater, 2007, 57(11): 988-991.
- [10] FENG H, YU J K, TAN W. Microstructure and thermal properties of diamond/aluminum composites with TiC coating on diamond particles[J]. Mater Chem Phys, 2010, 124(1): 851-855.
- [11] HASSELMAN D P H, JOHNSON L F. Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance[J]. J Compos Mater, 1987, 21(6): 508-515.
- [12] WEBER L, DORN J, MORTENSEN A. On the electrical conductivity of metal matrix composites containing high volume fractions of non-conducting inclusions[J]. Acta Mater, 2003, 51(11): 3199-3211.
- [13] WEBER L, FISHER C, MORTENSEN A. On the influence of the shape of randomly oriented, non-conducting inclusions in a conducting matrix on the effective electrical conductivity[J]. Acta Mater, 2003, 51(2): 495-505.
- [14] TAVANGAR R, MOLINA J M, WEBER L. Assessing predictive schemes for thermal conductivity against diamond-reinforced silver matrix composites at intermediate phase contrast[J]. Scripta Mater, 2007, 56(5): 357-360.
- [15] 李国彬, 王铁宝, 邓春岩. 金刚石表面镀钛及界面微结构的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2007, 158(2): 14-16.
LI Guo-bin, WANG Tie-bao, DENG Chun-yan. Ti coating on diamond and interface micro-structure[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2007, 158(2): 14-16.
- [16] MAXWELL J C. A treatise on electricity and magnetism[M]. Oxford: Clarendon Press, 1891: 435.
- [17] MOLINA J M, RHÊME M, CARRON J, WEBER L. Thermal conductivity of aluminum matrix composites reinforced with mixtures of diamond and SiC particles[J]. Scripta Mater, 2008, 58(5): 393-396.

- [18] MOLINA J M, NARCISO J, WEBER L, MORTENSEN A, LOUIS E. Thermal conductivity of Al-SiC composites with monomodal and bimodal particle size distribution[J]. *Mater Sci Eng A*, 2008, 480(1/2): 483–488.
- [19] JOSEPH R D, PENELOPE A, STEVEN R L. *Metals handbook: Properties and selection*[M]. Florida: ASM Inter, 1979: 2.
- [20] YOSHIDA K, MORIGAM H. Thermal properties of diamond/copper composite material[J]. *Micro Reliab*, 2004, 44(2): 303–308.
- [21] SWARTZ E T, POHL R O. Heat transport between two surfaces in contact[J]. *Rev Mod Phys*, 1989, 61: 5–11.
- [22] XUE C, YU J K. Thermal conductivity of TiC-coated diamond/Al composites[J]. *Emer Mater Res*, 2012, 1(2): 99–105.
- [23] MORUZZI V L, JANAK J F, SCHWARZ K. Calculated thermal properties of metals[J]. *Physical Review B: Condensed Matter* 1988, 37(2): 790–799.
- [24] AHUJA R, ERIKSSON O, WILLS J M, JOHANSSON B. Structural, elastic, and high-pressure properties of cubic TiC, TiN, and TiO[J]. *Physical Review B: Condensed Matter*, 1996, 53(6): 3072–3079.
- [25] ZHANG Y, ZHANG H L, WU J H, WANG X T. Enhanced thermal conductivity in copper matrix composites reinforced with titanium-coated diamond particles[J]. *Scripta Mater*, 2011, 65(12): 1097–1100.
- [26] XIA Y, SONG Y Q, LIN C G, FANG Z Z. Effect of carbide formers on microstructure and thermal conductivity of diamond-Cu composites for heat sink materials[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2009, 19(5): 1161–1166.

(编辑 陈卫萍)