

浅析铝/金刚石复合材料热导率研究

余垂有, 王一诚, 曾强明, 田非凡, 欧帆

湖南航天诚远精密机械有限公司, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年10月11日; 录用日期: 2022年11月12日; 发布日期: 2022年11月22日

摘要

铝/金刚石复合材料受金刚石粒度、体积分数和界面性能直接影响材料热导率变化, 大量学者通过原材料改性处理促进铝/金刚石界面结合, 优化制备工艺方法改善材料热导率更接近理论值。本文基于对铝基复合材料制备工艺和微观界面的认识, 综述如何改善铝/金刚石界面热导优化复合材料热导率, 主要通过原料配方和改性、材料制备工艺等方法优化界面热导, 使复合材料尽可能达到理论预测模型, 同时分析了铝/金刚石在散热领域的应用前景。

关键词

铝/金刚石, 导热系数, 界面传热

Study on Thermal Conductivity of Aluminum/Diamond Composites

Chuiyou Yu, Yicheng Wang, Qiangming Zeng, Feifang Tian, Fan Ou

Hunan Aerospace Chengyuan Precise Machinery Co., Ltd., Changsha Hunan

Received: Oct. 11th, 2022; accepted: Nov. 12th, 2022; published: Nov. 22nd, 2022

Abstract

The thermal conductivity of aluminum/diamond composites is directly affected by the particle size, volume fraction and interface properties of diamond. A large number of scholars have promoted the interface bonding of aluminum/diamond through the modification of raw materials, and optimized the preparation process to improve the thermal conductivity of materials closer to the theoretical value. Based on the understanding of the preparation process and micro interface of aluminum matrix composites, this paper reviews how to improve the thermal conductivity of aluminum/diamond interface to optimize the thermal conductivity of composites, mainly through

the formulation and modification of raw materials, material preparation process and other methods to optimize the thermal conductivity of the interface, so that the composites can reach the theoretical prediction model as much as possible. At the same time, the application prospect of aluminum/diamond in the field of heat dissipation is analyzed.

Keywords

Aluminum/Diamond, Thermal Conductivity, Interfacial Heat Transfer

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

当今世界,随着电子行业、军事领域、航空航天等领域高速的发展,高功耗、高稳定性的材料和部件需求逐渐增大,对高性能散热材料带来更高的挑战。单一的散热材料已无法满足高性能散热需求,因此高散热复合材料逐渐成为主流,而金属基复合材料充分发挥金属机械性能和增强体高散热性能广泛用于散热领域。常见金属基复合散热材料如铝/硅、铝/碳化硅、铝/金刚石、铜/金刚石等,铝/金刚石相比铝/碳化硅拥有近 3 倍的热导率,相比铜/金刚石其密度和成本更低,因此铝/金刚石拥有极其广泛的应用前景。

铝/金刚石复合材料(Al/diamond),又被称为金刚石颗粒增强相铝基复合材料,是将金刚石颗粒均匀分散至铝材中形成的一种颗粒增强相金属基复合材料,该复合材料集合了铝材和金刚石材料的优点。金刚石是自然界导热性能较好且热膨胀系数低的材料之一,而铝材又作为导热性能较佳的金属材料之一,且具有密度小和制造成本较低的特点,铝/金刚石得益于其优良的性能广泛应用于电子行业、激光材料、动力电池、航空航天等高散热领域。

铝/金刚石热导率具有极为诱人的理论预期,但是由于金刚石具有特殊的晶体结构,使其与金属基体间的界面优化机制和过程十分复杂,从而限制了金刚石优异性能向复合材料的传递和转移,通过成型技术改进及创新来实现两相界面最佳优化是推进铝/金刚石复合材料研发和应用的关键。因此,为了优化两相界面热导改善铝/金刚石复合材料热导率,研究人员通过铝基体和金刚石改性处理改善复合材料界面性能和热导率。同时研究了铝/金刚石复合材料成型工艺,包括气压渗透、压力铸造、搅拌熔铸、热压烧结、放电等离子烧结等。本文首先介绍铝/金刚石复合材料热导率理论预测模型,然后介绍铝基体和金刚石原料界面改性和成型工艺对界面热导改善及复合材料热导率的影响,最后分析和介绍了铝/金刚石在各领域的应用前景。

2. 热导率理论预测模型

研究者们亦提出了可用于预测金属基复合材料热导率的理论模型主要有 Maxwell 模型[1]、Hasselman-Johnson (H-J)模型[2]以及微分有效介质理论模型(Differential Effective Medium DEM) [3]。

(一) Maxwell 模型

Maxwell 理论模型[1]是在不考虑界面热阻假设增强体颗粒为球形的前提下预测增强体与基体合金对复合材料热导率的影响。

$$\lambda_c = \lambda_m \frac{2 \left(\frac{\lambda_d}{\lambda_m} - 1 \right) V_d + \left(\frac{\lambda_d}{\lambda_m} + 2 \right)}{\left(1 - \frac{\lambda_d}{\lambda_m} \right) V_d + \left(\frac{\lambda_d}{\lambda_m} + 2 \right)} \quad (1)$$

式中： λ_c 、 λ_m 、 λ_d 分别为复合材料、基体和增强体的热导率，W/(m·K)； V_d 为复合材料中颗粒所占的体积分数，vol%。

(二) Hasselman-Johnson (H-J)模型

Hasselman-Johnson (H-J)模型[2]也称有效介质近似方法(Effective Media Approximation 简称 EMA)在 Maxwell 理论的基础上考虑了颗粒粒径对复合材料热导率的影响将 Maxwell 模型中颗粒体积分数参数转变为与颗粒体积分数和尺寸相关的函数同时引入了界面热阻的影响其具体方程式为：

$$\lambda_c = \lambda_m \frac{2 \left(\frac{\lambda_d}{\lambda_m} - \frac{\lambda_d}{a \cdot h} - 1 \right) V_d + \left(\frac{\lambda_d}{\lambda_m} + \frac{2\lambda_d}{a \cdot h} + 2 \right)}{\left(1 - \frac{\lambda_d}{\lambda_m} + \frac{\lambda_d}{a \cdot h} \right) V_d + \left(\frac{\lambda_d}{\lambda_m} + \frac{2\lambda_d}{a \cdot h} + 2 \right)} \quad (2)$$

式中： λ_c 、 λ_m 、 λ_d 分别为复合材料、基体和增强体的热导率，W/(m·K)； V_d 为复合材料中颗粒所占的体积分数，vol%； a 为颗粒的半径， μm ； h 为界面传热系数，W/(m²·K)。可见，当 $h = \infty$ 时，式(2)与 Maxwell 模型的表达式(1)一致。

(三) DEM 模型[3]

$$\frac{d\lambda}{dV_d^*} = \lambda \sum_i V_i \frac{-(\lambda - \lambda_{di}^{eff})}{(\lambda - \lambda_{di}^{eff})S - \lambda} \quad (3)$$

式中： V_i 是相 i 在预制型中所占的体积分数； S 是表征增强相的几何参数，在这里假设为球形， $S = 1/3$ ； $V_d^* = -\ln(1 - V_d)$ 。当基体中没有增强体时， $V_d^* = 0$ 。

λ_d^{eff} 为增强相的有效热导率：

$$\lambda_d^{eff} = \frac{\lambda_d}{1 + \lambda_d / (a \cdot h)} \quad (4)$$

设材料热导率的增大比例 $A = \lambda_c / \lambda_m$ ，材料的有效相差 $B = \lambda_d / \lambda_m$ ，则 DEM 模型的表达式(3)转变为：

$$1 - V = \frac{B - A}{B - 1} A^{-1/3} \quad (5)$$

界面传热系数 h 可以通过声子不匹配模型获得：

$$h = \frac{1}{2} \rho_1 c_p \frac{v_1^3 \rho_1 v_1 \rho_2 v_2}{v_2^2 (\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2)^2} \quad (6)$$

式中： c_p 是基体的比热容，J/(kg·K)； ρ_1 和 ρ_2 分别为基体、增强体的密度，kg/m³； v_1 和 v_2 分别为基体、增强体声子传播速度，m/s。

由于 Maxwell 模型只考虑了增强相体积分数对复合材料热导率的影响，因此，更多的研究者采用 H-J 模型和 DEM 模型进行热导率理论计算。

3. 热导率的影响因素

由复合材料热导率预测模型公式中可以看出，铝金刚石复合材料热导率的主要影响因素为铝基体和

金刚石增强体的热导率、金刚石颗粒所占的体积分数、金刚石颗粒粒径、复合材料界面传热系数。

(一) 基体和增强体

基体和增强体的热导率越高，其复合材料热导率理论也将越高，因此采用热导率更高的基体和增强体会得到更高复合材料热导率。

不同铝合金导热性能各有不同，通过对其改性可以有效提高基体热导率，吴孟武发现铝合金中合适的 Mg 和 Si 质量比有利于提高导热性能，微量稀土元素如 Er、La、Ce 等的添加可以提高铝合金的导热特性。金刚石具有很好的综合热物理性能，其室温下的热导率为 700~2200 W/(m·K)，其作为增强体一般选用人造金刚石，霍喜平等人分析影响金刚石热导率主要与晶体表面状态、晶体形状、包裹体含量等有关。

(二) 体积分数

铝/金刚石复合材料中，金刚石增强体的热导率远大于铝基体，膨胀系数远低于铝基体。因此，在界面结合良好的情况下，提高金刚石体积分数可以获得更高热导率的复合材料。刘永正[4]选用粒径为 100 μm 的低成本普通研磨级金刚石颗粒采用无压浸渗法制备了体积分数分别为 25 vol%、40 vol% 和 55 vol% 的铝/金刚石复合材料，研究表明，随着体积分数的增加复合材料热导率由 158 W/(m·K) 升高到 298 W/(m·K)。图 1 为 Zhanqiu Tan 等人[5]得出体积分数与热导率实际值和理论计算值。

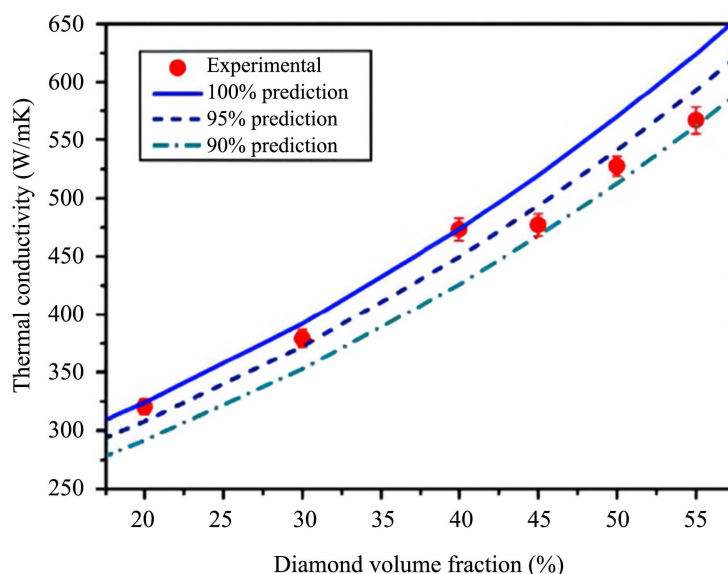


Figure 1. Aluminum/diamond volume fraction and thermal conductivity [4]

图 1. 铝/金刚石体积分数与热导率[4]

(三) 颗粒粒径

当添加体积分数相同时，选用颗粒粒径越大，其表面积越小，即增强体与基体接触面积越小。在界面结合相同的情况下，即界面热阻相同，接触面越大其复合材料传热性能越小。Tan 等[6]首先将金刚石颗粒与纯铝粉在室温下冷压成型然后通过真空热压烧结制备了金刚石体积分数为 40 vol% 的铝/金刚石复合材料，结果表明，随着金刚石颗粒由 30 μm 增大到 200 μm 复合材料的热导率由 313 W/(m·K) 提高至 475 W/(m·K) 增幅约 52%。

(四) 界面传热系数

铝/金刚石复合材料中，铝基体和金刚石的界面传热系数为研究过程最难控制的影响因素，其中铝基

体只选择性粘附在金刚石的{001}晶面上,而难以与金刚石的{111}晶面结合[7][8],导致界面传热部分受阻,这是由于缺陷密度和金刚石平面上氧官能团浓度导致材料的选择性界面结合。除了颗粒与铝的选择性粘附外,颗粒的{001}晶面族易与铝基体发生界面反应生成 Al_4C_3 晶相[9],尽管 Al_4C_3 是坚硬的陶瓷相仍然会降低复合物的导热性,且 Al_4C_3 在潮湿环境下容易发生水可能导致材料失效。

优化界面结合提高界面传热系数,主要途径有金刚石粉体表面处理、铝基体合金化及制备工艺的改善,在金属基体和金刚石结合处形成的强碳化物降低了润湿角,使基体铝与金刚石之间的润湿性大大改善,提高基体与金刚石的粘结强度和界面传热系数。

4. 改善界面传热

铝金刚石界面传热主要影响因素为界面晶相的控制和界面结合的优化,基体的合金化和金刚石表面处理可以在界面形成强碳化物降低润湿角,且有效避免 Al_4C_3 的形成,而制备工艺的不同和优化可以促进界面缺陷减少、结合更加紧密。

(一) 铝基体合金化

铝基体添加合金元素可以促进金刚石-铝界面的结合。C. Guo 等人研究发现 Si 元素可以抑制界面 Al_4C_3 的生成,有效提高复合材料的热性能[10][11]。Bef-fort 等在 Al 基体中添加 Si 元素得到热导率为 375 W/(m·K)的复合材料。J. Wu 等人[12]加入 Cu 元素,导致界面处生成 Al_2Cu ,促进了铝/金刚石界面结合,使热导率从 210 W/(m·K)提高至 330 W/(m·K)。

(二) 金刚石表面处理

改善铝/金刚石复合材料中金刚石和铝基体界面,金刚石表面金属化也可以良好的改善界面性能,许多学者对金刚石表面镀覆金属层很好的提升复合材料热导率。郭开金等人[13]探究几种常见的金属镀层(包括 W、Mo、Cr、Ti、Cu 和 Ag),表 1 为不同镀层复合材料的界面热导和 DEM 理论热导率。

Table 1. Theoretical calculation values of ITC and TC of composite materials with different coatings [13]

表 1. 不同镀层复合材料的 ITC 和 TC 理论计算值[13]

镀层材料	界面导热 $\times 10^7$ W/(m ² ·K)	热导率 W/(m·K)
W	8.31	741.4
Mo	8.37	741.7
Cu	4.53	680.46
Cr	12.35	768.94
Ti	4.84	688.31
Ag	1.09	453.75

C. Xue 等人[14]比较金刚石表面镀钛与铝基体中加入钛含量材料的热导率。得出金刚石表面镀钛热导率为 475 W/(m·K),对比提升 31.9%,铝基体加钛热导率为 405 W/(m·K),对比提升 12.5%。Wenshu Yang 等人[15]采用磁控溅射对金刚石进行镀 W 处理,得到均匀的表面 W 层,并且研究镀层厚度对铝/金刚石热导率的影响,结果如图 2 所示,当厚度为 45 nm 时热导率最高至 620 W/(m·K)。

除表面镀层外,Longtao Jiang [16]仅对金刚石表面进行了离子抛光处理,改善了铝和金刚石的界面性能,热导率达 613 W/(m·K)。图 3 为其抛光后金刚石和铝/金刚石断面形貌,可以看出处理后金刚石表面光滑,抛光处理有效改善表面缺陷密度和金刚石平面上氧官能团,促进复合材料的界面结合效果。

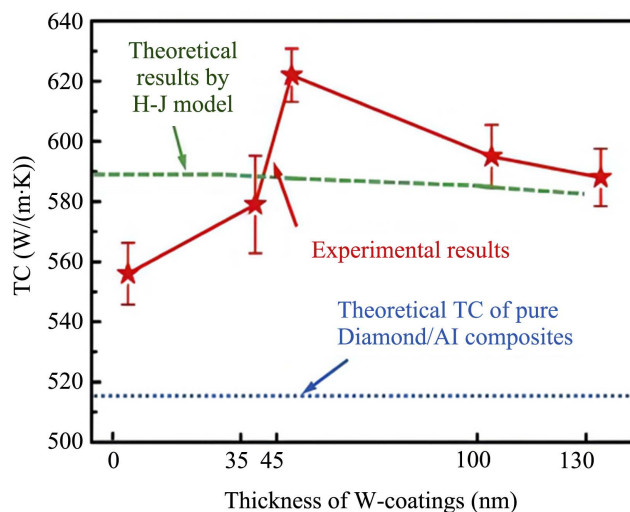


Figure 2. Coating thickness corresponding to composite thermal conductivity [15]
图 2. 镀层厚度对应复合材料热导率[15]



Figure 3. Sectional morphology of diamond and aluminum/diamond [16]. (a): Ionic polishing of diamond surface; (b): (a) enlarged picture; (c): Aluminum/diamond sectional morphology
图 3. 金刚石和铝/金刚石断面形貌[16]。(a): 离子抛光金刚石表面; (b): 为(a)放大图; (c): 铝/金刚石断面形貌

(三) 制备工艺

铝/金刚石制备工艺改善使复合材料界面结合更加紧密、减少缺陷的产生，有效控制界面传热系数。其制备工艺主要分为液相工艺和固相工艺两种，液相工艺例如搅拌熔铸、无压渗透、压力渗透等，固相工艺例如放电等离子烧结、热压烧结、热等静压等粉末冶金方法。

1) 无压渗透

无压浸渗法(PI)的原理为金属基体在高温下熔化后利用毛细管力作用渗入预制体孔隙。无压浸渗法包括上置法，蘸液法和浸液法。其区别主要在于预制体与合金基体的相对位置。郭开金[13]利用无压浸渗法制备了铝/金刚石复合材料，研究发现浸渗温度过高导致金刚石石墨化现象，破坏金刚石的组织使热物性下降。浸渗温度过低会影响基体与增强体的润湿性，导致致密度和界面结合性能下降。且温度为 600℃ 以上界面 Al_4C_3 相的吉布斯自由能均为负，意味着温度越高越有利于 Al_4C_3 相的生成。

2) 气压渗透

气压渗透(GPI)工艺是将金刚石颗粒制成预制件，高温熔铝后利用高压气体将铝液渗入预制件得到铝/金刚石复合材料，通过大气压力提升金属基体与金刚石间的结合强度。气压渗透工艺有如下优势：高压气体提供各向同性的成型压力、气氛环境可以有效避免基体金属铝熔体的氧化、有效防止复合材料成型过程中金属熔体的飞溅并降低熔体及增强相的扰动、实现大尺寸部件的近净成型[17]。

I. E. Monje 等人[18]采用气压渗透探究了渗透温度和接触时间对性能的影响,得出温度和保温时间对热导率的影响,具体结论如图4所示:

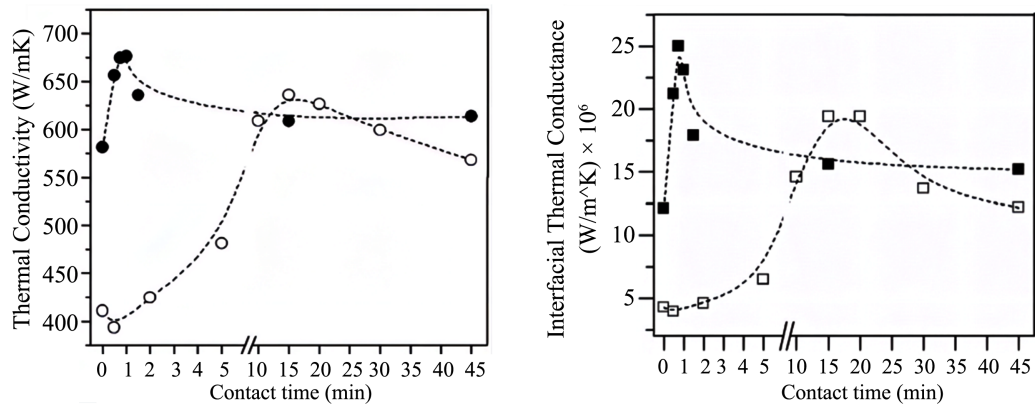


Figure 4. Variation of thermal conductivity and interfacial thermal conductivity of composites with temperature and holding time [18]

图4. 复合材料热导率及界面热导随温度和保温时间的变化规律[18]

3) 挤压铸造

挤压铸造(SQ)与气压铸造原理相似,不过压力为机械压力,同样需要成型预制件。挤压铸造中机械压力无法实现各向压力,且只能成型形状简单工件,该法的优势在于生产效率高、操作简单、致密度较高且不需顾及增强相与基体的润湿性。挤压铸造中预热温度、渗透温度、渗透压力和渗透压力因素会影响铝/金刚石复合材料致密性和界面结合性能。Pingping Wang [19]采用传统挤压铸造和优化挤压铸造制备体积分数 58% 铝/金刚石复合材料,研究了预热温度、渗透温度、渗透压力和渗透压力影响,并优化工艺得到铝/金刚石复合材料热导率 606 W/(m·K)。

4) 真空热压烧结

真空热压烧结(VHP)为一种通过机械加压的粉末冶金工艺,此法是将铝基体和金刚石混合原料加入模腔内,在加压的同时将温度甚至铝基体烧成温度,由于外部压力提供驱动力达到改善复合材料的致密度和界面结合效果。Zhanqiu Tan 等人[5]首先将粉末混合冷压成型,然后利用石墨模具真空热压烧结,其探究了成型压力、烧结温度和时间等因素对铝/金刚石致密度和热导率的影响,图5为单因素实验对热导率的影响图。徐洋等人[20]通过控制工艺制备高导热铝/金刚石,当制备温度 650℃、保温时间 12 min、颗粒尺寸 500 μm 时,热导率最高达到 677.5 W/(m·K)。

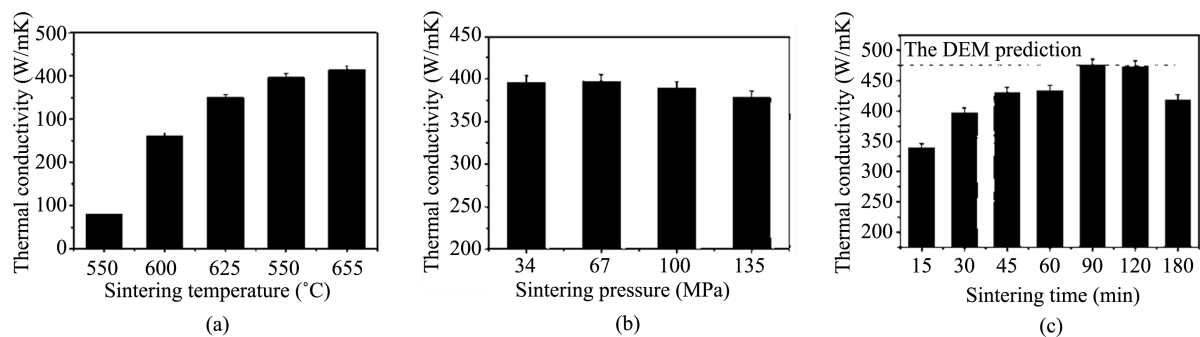


Figure 5. Forming temperature, forming pressure and holding time—Aluminum/diamond thermal conductivity [5]

图5. 成型温度、成型压力、保温时间——铝/金刚石热导率[5]

5) 放电等离子烧结

放电等离子烧结(SPS)是利用直流脉冲电流直接通电烧结的加压烧结方式(不同于热压烧结),可通过调节脉冲直流电的大小控制升温速率和烧结温度,整个烧结过程可在真空的环境下进行,也可以在保护气氛中进行。该法烧结铝/金刚石复合材料,保留热压烧结优势的同时,具有升温速度快、烧成时间短、效率高等优势,Zhanqiu Tan 等人[21]利用石墨模具等离子烧成工艺制备铝/金刚石复合材料,如图 6 为 SPS、VHP、H-J 模型和 DEM 模型的复合材料热导率。得出结论 SPS 烧结各项工艺指标均大幅提高效率,且铝/金刚石复合材料热导率可以达到良好的效果。

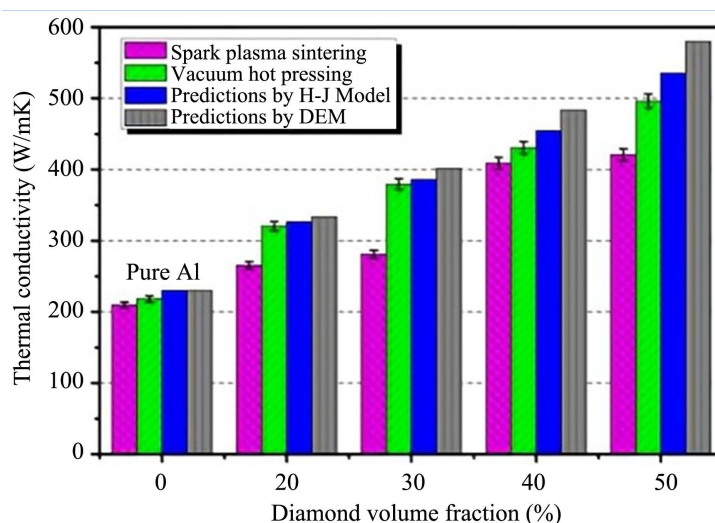


Figure 6. SPS, VHP volume fraction, H-J model and DEM model volume fraction and thermal conductivity [21]

图 6. SPS、VHP 体积分、H-J 模型和 DEM 模型体积分和热导率[21]

5. 应用展望

早期,金属基复合材料主要作为结构材料使用,但随着近 30 年的迅猛发展,金属基复合材料在众多领域得到了更加广泛的应用。金刚石颗粒弥散强化金属基复合材料在众多领域中受到应用青睐。其拥有广泛优势,首先就是高的热导率,可以实现热量的快速传输和消散,保证核心器件在理想的工作温度运行;其次就是复合材料热膨胀系数的可调可控性,从而实现了与系统中不同材料间热膨胀系数的匹配,减小变温工作条件下热应力的不利影响。因此在散热工件中得到广泛应用。

电子工业中,随着信息时代的快速发展,逐渐向高集成、小型化发展,因此急需散热材料解决散热问题。铝/金刚石凭借其高热导率可以应用于封装壳体、散热片或基板等部件,利用其超高的热导率将热量快速高效的传递出去,以保证电子器件可以工作在理想温度,同时其适当的热膨胀系数也可以保证各级封装材料的匹配。

除电子工业外,如激光材料可以散除由于量子亏损、激光猝灭、宽谱吸收等因素而产生废热;动力电池领域,在电池的充放电过程消耗热量延长电池组件的使用寿命;航空航天领域,高散热材料可以保证中高端电子器件的稳定工作,空间相机工作温度直接决定着相机的分辨率和观测精度,过高的温度和剧烈的温度波动都会增大相机的暗电流和热噪音,导致信噪比降低,影响成像质量。空间站中的电功率越来越大,器件产生的热量会急剧增加,同时空间中的辐射也将产生大量的热量,这些都会对空间中长期工作的器件产生严重影响。铝/金刚石作为高散热材料,且热膨胀系数可调等优点,具有优良的应用前景。

6. 结语

铝/金刚石复合材料凭借金刚石增强体的高导热性能可以达到优异的理论热导率。影响其热导率的因素为铝基体和金刚石增强体的热导率、金刚石颗粒所占的体积分数、金刚石颗粒粒径、复合材料界面传热系数等, 得出以下结论:

基体、增强体、金刚石体积分数和粒度作为复合材料的热导率的主要调控因素, 基体和增强体热导率越大、金刚石体积分数越大导致复合材料热导率越大。金刚石粒径的大小主要是为了调控增强体和基体的界面接触面积, 界面热阻相同的情况下, 金刚石粒径越大界面面积越小, 热阻越小, 热导率越大。

复合材料热导率的主要限制因素为基体与增强体的界面结合特性, 优异的界面结合可以最大程度减小界面热阻提高材料热导率。改善界面结合的方法主要通过铝合金合金化和金刚石金属化促进界面强碳化物生成, 减少界面 Al_4C_3 的形成, 并且强碳化物的生成优化了铝基体选择性粘附在金刚石的{001}晶面上, 而难以与金刚石的{111}晶面结合的问题。

在界面结合良好的基础上, 改善铝/金刚石制备工艺可以促进材料致密度提高, 从而优化基体与增强体的界面结合, 提高材料热导率。

参考文献

- [1] Hasselman, D.P.H., *et al.* (1987) Effective Thermal Conductivity of Composites with Interfacial Thermal Barrier Resistance. *Journal of Composite Materials*, **21**, 508-515. <https://doi.org/10.1177/002199838702100602>
- [2] Tavangare, R., *et al.* (2007) Assessing Predictive Schemes for Thermal Conductivity against Diamond-Reinforced Silver Matrix Composites at Intermediate Phase Contrast. *Scripta Materialia*, **56**, 357-360. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.11.008>
- [3] Molina, J.M., *et al.* (2008) Thermal Conductivity of Aluminum Matrix Composites Reinforced with Mixtures of Diamond and SiC Particles. *Scripta Materialia*, **58**, 393-396. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2007.10.020>
- [4] 刘永正. 低成本金刚石/铝复合材料的研究[J]. 材料导报, 2013, 27(4): 8-11.
- [5] Tan, Z.Q., *et al.* (2013) Fabrication of Diamond Aluminum Composites by Vacuum Hot Pressing Process Optimization and Thermal Properties. *Composites*, **47**, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.11.014>
- [6] Tan, Z., *et al.* (2016) Effect of Particle Size on the Thermal and Mechanical Properties of Aluminum Composites Reinforced with SiC and Diamond. *Materials & Design*, **90**, 845-851. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.11.028>
- [7] Ruch, P.W., *et al.* (2006) Selective Interfacial Bonding in Al(Si)-Diamond Composites and Its Effect on Thermal Conductivity. *Composites Science & Technology*, **66**, 2677-2685. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.03.016>
- [8] Kleiner, S., *et al.* (2006) Effect of Diamond Crystallographic Orientation on Dissolution and Carbide Formation in Contact with Liquid Aluminium. *Scripta Materialia*, **55**, 291-294. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2006.05.003>
- [9] 喻蒙, 等. 金刚石/铝复合材料的界面结构[J]. 自然科学版, 2014, 53(6): 790-793.
- [10] Guo, C., *et al.* (2016) Effect of (0-40) wt. % Si Addition to Al on the Thermal Conductivity and Thermal Expansion of Diamond/Al Composites by Pressure Infiltration. *Journal of Alloys and Compounds*, **664**, 777-783. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.12.255>
- [11] Zhang, Y., *et al.* (2014) Effect of Metalloid Silicon Addition on Densification, Microstructure and Thermal Physics Properties of Al/Diamond Composites Consolidated by Spark Plasma Sintering. *Materials & Design*, **63**, 838-847. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.06.065>
- [12] Wu, J., *et al.* (2012) Effect of Copper Content on the Thermal Conductivity and Thermal Expansion of Al_2Cu /Diamond Composites. *Materials & Design*, **39**, 87-92. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.02.029>
- [13] 郭开金. 高导热金刚石/铝复合材料界面构建及组织性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北方工业大学, 2020.
- [14] Xue, C., *et al.* (2013) Enhanced Thermal Conductivity in Diamond/Aluminum Composites: Comparison between the Methods of Adding Ti into Almatrix and Coating Ti onto Diamond Surface. *Surface & Coatings Technology*, **217**, 46-50. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2012.11.070>
- [15] Yang, W.S., *et al.* (2017) Enhanced Thermal Conductivity in Diamond/Aluminum Composites with Tungsten Coatings on Diamond Particles Prepared by Magnetron Sputtering Method. *Journal of Alloys and Compounds*, **726**, 623-631. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.08.055>

-
- [16] Jiang, L.T., *et al.* (2015) Interfacial Characteristics of Diamond/Aluminum Composites with High Thermal Conductivity Fabricated by Squeeze-Casting Method. *Materials Characterization*, **106**, 346-351. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2015.06.023>
- [17] 张超, 等. 先进高导热铝/金刚石复合材料及其导-散热部件制备技术[J]. 北京国际高技术中心, 2015(2): 69-74.
- [18] Monje, I.E., *et al.* (2013) Optimizing Thermal Conductivity in Gas-Pressure Infiltrated Aluminum/Diamond Composites by Precise Processing Control. *Composites: Part A*, **48**, 9-14. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2012.12.010>
- [19] Wang, P.P., *et al.* (2015) Enhanced Thermal Conductivity and Flexural Properties in Squeeze Casted Diamond/Aluminum Composites by Processing Control. *Materials and Design*, **88**, 1347-1352. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.09.048>
- [20] 徐洋, 等. 高导热金刚石/铝复合材料的真空热压制备[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 2(41): 46-52.
- [21] Tan, Z.Q., *et al.* (2013) Diamond Aluminum Composites Processed by Vacuum Hot Pressing Microstructure Characteristics and Thermal Properties. *Diamond & Related Materials*, **31**, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2012.10.008>