

引用:张云龙,王俊青,张唯一,等. SiC_p/Cu 基复合材料性能提升与界面调控优化的研究进展 [J]. 聊城大学学报(自然科学版), 2026, 39 (1): 75-83.

Citation: ZHANG Yunlong, WANG Junqing, ZHANG Weiyi, WANG Weie, REN Xiaoxue, LI Chenghai, ZHAI Ziyu, LIU Debao. Research progress on performance improvement and interface control optimization of SiC_p/Cu matrix composites [J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2026, 39(1): 75-83.

文章编号 1672-6634(2026)01-0075-09

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025050010

SiC_p/Cu 基复合材料性能提升与界面 调控优化的研究进展

张云龙¹, 王俊青¹, 张唯一¹, 王伟娥², 任晓雪³, 李成海¹, 翟梓桀¹, 刘德宝¹

(1. 佳木斯大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 佳木斯 154007; 2. 佳木斯大学 药学院, 黑龙江 佳木斯 154007;
3. 黑龙江农业工程学院 机械工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要 随着高端制造、电子封装与热管理等领域对材料综合性能的持续提升要求,传统铜及其合金材料在强度、耐磨性与导电导热性能方面逐渐显现出瓶颈。碳化硅颗粒增强铜基复合材料(SiC_p/Cu)因其优异的力学、电学与热物理性能,受到广泛关注。围绕 SiC 颗粒粒径、含量及分布等组成设计参数的优化,系统综述了 SiC_p/Cu 基复合材料在耐磨、导电、导热和耐蚀等方面的性能提升机制,探讨了 Cu 基体微合金化与 SiC 颗粒表面修饰的界面调控策略以及多相协同增强的设计理念,将为高性能 SiC_p/Cu 基复合材料的设计开发提供参考依据。

关键词 SiC_p/Cu 基复合材料; 界面调控; 性能提升机制; 材料设计优化

中图分类号 TB333; O469

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Research progress on performance improvement and interface control optimization of SiC_p/Cu matrix composites

ZHANG Yunlong¹, WANG Junqing¹, ZHANG Weiyi¹, WANG Weie²,
REN Xiaoxue³, LI Chenghai¹, ZHAI Ziyu¹, LIU Debao¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China; 2. College of Pharmacy, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China; 3. College of Mechanical Engineering, Heilongjiang University of Agriculture and Engineering, Harbin 150036, China)

Abstract With the continuous improvement of comprehensive performance of materials requirements in fields such as advanced manufacturing, electronic packaging, and thermal management, traditional copper and its alloys are increasingly facing limitations in strength, wear resistance, and electrical and thermal conductivity. Silicon carbide particle-reinforced copper matrix composites (SiC_p/Cu) have attracted exten-

收稿日期: 2025-05-23

基金项目: 黑龙江省教育厅科研项目(2021-KYYWF-0557)资助

通信作者: 张云龙, 男, 汉族, 博士, 教授, 研究方向: 先进复合材料的智能制造, E-mail: jmsdxzhang@126.com; 王伟娥, 女, 汉族, 博士, 副教授, 研究方向: 基于光谱学用途的新型检测材料的制造与研发, E-mail: wwwekuaile_1980@163.com.

sive attention due to their excellent mechanical, electrical, and thermal properties. This paper provides a systematic review of the performance enhancement mechanisms of SiC_p/Cu composites in terms of wear resistance, electrical conductivity, thermal conductivity, and corrosion resistance, focusing on the optimization of compositional design parameters such as SiC particle size, content, and distribution. Moreover, the interfacial control strategies through Cu matrix microalloying and surface modification of SiC particles, as well as the concept of multiphase synergistic reinforcement, are discussed. This study aims to provide a valuable reference for the design and development of high-performance SiC_p/Cu matrix composites.

Keywords SiC_p/Cu -based composites; interface control; performance improvement mechanism; material design optimization

0 引言

铜(Cu)及其合金凭借其卓越的导电性、导热性、延展性和耐腐蚀性,在电子、电力、交通及航空航天等领域有着广泛应用(图 1)^[1]。然而,传统的强化方法如固溶、析出和塑性变形虽能提升材料强度,却往往以牺牲导电性为代价,难以满足高强度、高导电性和耐磨性等综合性能要求。复合化技术通过在 Cu 基体中引入陶瓷或金属间化合物等增强相,实现了力学与电学性能的协同优化。例如,添加陶瓷颗粒或金属间化合物不仅能显著增强材料强度,还能在一定程度上保留甚至提升导电性能,同时改善耐磨性和耐腐蚀性^[2]。其中,碳化硅颗粒(SiC_p)因其高硬度、高热导率和低热膨胀系数,成为极具潜力的增强材料,在电子封装、热管理和航天等领域展现出优异性能。然而,复杂的制备工艺、高昂成本以及 SiC_p 分散不均和界面结合不良等问题仍是制约其规模化应用的关键因素^[3]。目前的研究多集中于单一性能的优化,缺乏对多性能协同提升及界面调控的系统性研究。鉴于此,本文综述了 SiC_p/Cu 复合材料的性能提升机制与材料设计优化策略,详细阐述了其耐磨、导电、导热和耐蚀等主要性能特征。从 SiC 颗粒的粒度分布、尺寸、含量和级配等方面探讨了组分设计优化及多相协同增强策略,并分析了 Cu 基体微合金化和 SiC 增强相表面修饰等界面调控方法。

1 SiC_p/Cu 基复合材料性能特点

1.1 耐磨性能

耐磨性是衡量材料抗磨损性能的关键指标,通常通过磨损率、摩擦系数和表面损伤程度来量化。纯 Cu 因其低硬度和较差的耐磨性,不适合用于高摩擦工况,尽管其导电导热性能优异。在 Cu 基体中分散高硬度陶瓷颗粒(如 SiC)可显著提高耐磨性能。近年来,研究者通过优化制备工艺、调控 SiC 颗粒的尺寸和体积分数以及界面改性等手段,进一步提升了 SiC_p/Cu 复合材料的耐磨性能。Zhan 等人^[4]研究发现,在高温摩擦磨损过程中, SiC 颗粒碎屑、氧化物和 Cu 基体在摩擦界面形成了一层较为致密的涂层,显著提升了复合材料的高温耐磨性能。Somani 等人^[5]利用粉末冶金法制备了含有不同体积分数 SiC 的 Cu 基复合材料,发现均匀分布的 SiC 颗粒不仅提高了材料的硬度和抗拉强度,还有效降低了磨损率,表明 SiC 颗粒的添加能显著增强 Cu 基复合材料的耐磨性。为进一步提升耐磨性能,采用激光增材制造或热等静压等先进工艺优化粉末熔覆及烧结参数,可使 SiC 颗粒在 Cu 基体中分布更致密。此外,对 SiC 颗粒表面进行改性,例如涂覆含钛

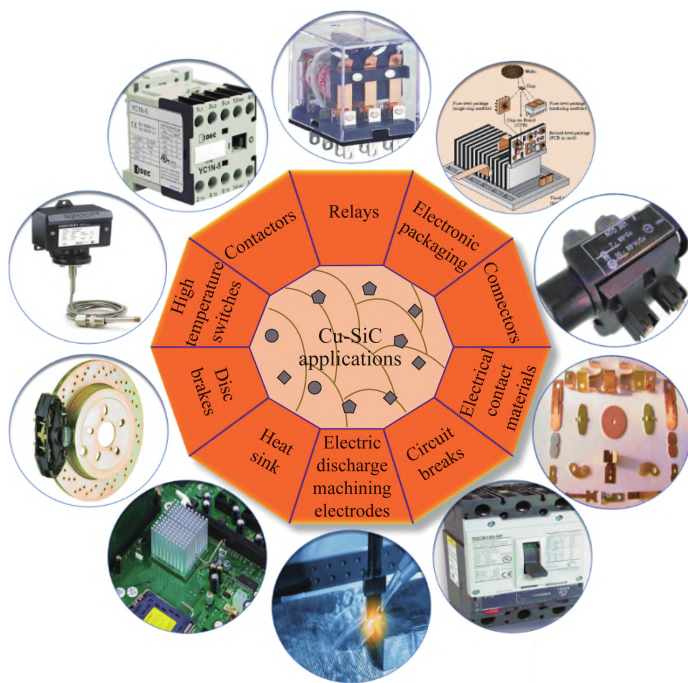


图 1 SiC_p/Cu 基复合材料的应用领域^[1]

Fig. 1 Application areas of SiC_p/Cu matrix composites^[1]

(Ti)、镍(Ni)或类金刚石的复合涂层,能增强颗粒与基体界面的润湿性和结合强度,从而降低磨损率。通过精确调控颗粒尺寸与体积分数、优化界面结合及改进制备工艺, SiC_p/Cu复合材料的耐磨性能得到了显著提升,能够满足特殊工况下的高载荷、高温等苛刻要求。

1.2 导电性能

导电性能是材料在电场作用下输运电荷的能力,通常用电导率来衡量。Cu基材料凭借其优良的导电性被广泛应用于电子和电力领域,但其纯Cu强度较低,容易在高温或高应力环境下发生磨损与腐蚀,限制了其应用范围。为解决这一问题,研究者引入SiC颗粒,通过优化颗粒含量、尺寸及界面结合,将SiC均匀分散于Cu基体中,以提高材料的强度和硬度,并确保其在高温、高载荷条件下的服役安全性。尽管SiC是电绝缘体,但合理的设计可以有效抑制其对整体电导率的负面影响,从而实现机械性能与导电性能的综合优化。SiC颗粒的引入虽然提升了材料的强度和耐磨性,但也可能导致导电性能下降。因此,在Cu/SiC复合材料的设计中,需要平衡电学与力学性能。Sadawy等人^[6]在质量分数为3.5% NaCl溶液中的研究发现, SiC的引入虽然提高了抗腐蚀性,但也使电导率降低。Arvas等人^[7]通过制备SiC颗粒表面镀Ni的SiC_p/Cu复合材料,发现SiC颗粒粒径越小、界面面积越大,电子散射越强,电导率下降越显著。因此,合理选择SiC颗粒尺寸对优化导电性能至关重要。为了优化SiC/Cu复合材料的导电性能,研究者们进行了深入的探索。通过Cu基体中微量添加Ti、Fe等活性元素,可在SiC/Cu界面原位生成金属化合物过渡层,从而改善界面润湿性。此外,在SiC颗粒表面电化学沉积超薄Cu或Ni层,有利于提升界面连续性和电子传导效率,有效缓解导电性能的下降问题。通过精细调控SiC颗粒的尺寸、体积分数、分布、界面结构和工艺参数,可以实现性能的协同优化。未来的研究可以聚焦于纳米界面改性、放电等离子体烧结、增材制造等先进技术,以便在特定工况下最大限度地平衡导电性与耐磨性之间的关系。

1.3 导热性能

导热率是衡量材料传热能力的关键指标,在电子封装、高功率器件及热管理系统中具有重要意义^[8]。Cu基材料凭借其优异的导热性被广泛应用于这些领域。向Cu基体中添加适量的SiC颗粒,可以在保持较高热导率的同时提升材料的力学性能。当SiC的体积分数保持不变时,增大SiC的粒径可以在一定程度上提高复合材料的热导率。例如,Sharifi等人^[9]报告称增大SiC粒径可使Al-4%Cu/SiC材料热导率提升约10.3%。然而, SiC与Cu因界面反应生成的Cu-Si固溶体可能导致热导率降低。为抑制界面反应, Lai等人^[2]在SiC表面沉积Mo涂层,这一方法有助于改善界面结合能力并提升热导率。Wu等人^[10]的研究发现,通过优化烧结温度并在Al-SiC_p/Cu体系中引入Cu金属颗粒,可在高压条件下使热导率提升两倍以上。在SiC颗粒表面沉积Mo或Ti涂层,利用物理气相沉积(PVD)在颗粒与基体界面形成稳定的扩散屏障,可抑制Cu₃Si等脆性相的生成,降低界面热阻,从而实现热导率的最大化。此外,结合高压烧结或热挤压技术可进一步消除孔隙,进而提升复合材料的整体导热性能。通过优化增强相的颗粒尺寸、体积分数、界面结合程度及制备工艺等因素,可以进一步增强材料的导热性,使SiC_p/Cu复合材料能够满足高负载、高温等苛刻工况的应用需求。为了实现SiC_p/Cu复合材料在耐磨性与导热性能之间的协同优化,需要针对SiC颗粒的绝缘特性和载荷承载能力进行系统设计。一方面,可以采用微米/纳米级颗粒混杂分布的策略,利用微米级SiC提升耐磨性,同时利用纳米级SiC调控界面结构。这样做可以在增强颗粒分布均匀性和优化界面结合的基础上,缓解电子散射、降低界面电阻。另一方面,通过在SiC与Cu界面引入过渡导电涂层(如Ni、Cu等)或构筑梯度结构,可以在颗粒区域提供导电路径,从而突破颗粒增强力学性能与导热能力之间的矛盾。此外,采用层状复合结构和原位合成等工艺手段,有望在提升强度和耐磨性的同时,尽可能高地保留复合材料的整体导热性能。

1.4 耐蚀性能

耐蚀性指材料在特定环境下抵抗腐蚀的能力,常用腐蚀电位、腐蚀电流密度、极化电阻等指标评估。SiC_p/Cu复合材料的耐蚀性能受SiC颗粒体积分数、分散性、界面结合度及制造参数等多因素影响。Sadawy等人^[6]研究发现,在NaCl溶液中,随SiC体积分数增加, SiC_p/Cu复合材料腐蚀电位从-240 mV升至-183 mV,腐蚀电流密度从5.01 μA/cm²降至0.02 μA/cm²,耐蚀性提高;但当SiC体积分数超20%时,腐蚀电流密度上升,耐蚀性下降,这与颗粒团聚或界面结合不良导致的组织缺陷相关。Sridhar等人^[11]采用粉末冶金

法制备 SiC_p/Cu 复合材料,盐雾腐蚀试验表明,添加质量分数为 10% SiC 的复合材料耐蚀性最佳,腐蚀率为 $8.94 \times 10^{-4} \text{ mm/a}$,说明 SiC 颗粒能显著提升 Cu 基复合材料的耐蚀性。适量的 SiC 含量、均匀分散的颗粒和良好界面结合是提升耐蚀性的关键。 SiC 体积分数超过 20% 后,颗粒团聚、界面结合不良和孔隙率增加会使力学性能下降。采用多模尺度颗粒级配技术和高压制造策略,可突破颗粒相含量限制,协同分散纳米与微米 SiC 颗粒,提高填充密度,改善界面结构。对 SiC 颗粒表面进行化学镀、溶胶-凝胶包覆或 PVD 涂层处理,能增强陶瓷颗粒与 Cu 基体的润湿性和结合强度,降低高含量陶瓷相带来的腐蚀风险。针对腐蚀环境,可对复合材料整体或 SiC 颗粒进行化学镀 Ni/Co 处理,形成致密金属镀层以阻隔腐蚀介质。此外,利用氧化钝化、硅烷偶联剂或石墨烯薄膜等在界面构建多级钝化屏障,可协同提升 SiC_p/Cu 体系的耐蚀性。这些复合策略有望使高体积分数的 Cu 基复合材料在保持良好耐蚀性方面取得进展。

2 SiC_p/Cu 基复合材料的组分设计优化

在 SiC_p/Cu 复合材料多元化制备技术基础上,探究制造过程参数与材料性能间的构效关系,有望实现突破现有制备技术瓶颈,实现材料综合性能的协同优化。本节将重点研究 SiC 颗粒粒度等关键制造过程参数的调控机制,揭示其对材料微观组织演变及宏观性能的影响规律,将有助于扩展高性能 SiC_p/Cu 复合材料工程化的应用范围。

2.1 SiC 颗粒粒度分布和尺寸

在 SiC_p/Cu 复合材料的制备与应用研究中, SiC_p 粒度作为关键工艺参数,显著影响复合材料的微观结构及宏观力学、热学和物理性能,且作用机制复杂多样。Celebi 等人^[12]制备的 SiC_p/Cu 复合材料(图 2)显示,复合材料硬度随着 SiC 粒径增大而增加。含 1 和 5 μm SiC 颗粒的复合材料硬度分别处于 143~167 HV 和 156~182 HV 区间,这表明 SiC 颗粒能有效阻碍 Cu 基体塑性流动,从而提高复合材料硬度。Akbarpour^[13]指出,在纳米晶 Cu 中加入 SiC 纳米颗粒,通过“钉扎效应”抑制晶粒长大。在 400~600 $^{\circ}\text{C}$ 退火时,复合材料晶粒生长缓慢;即使退火温度超过 600 $^{\circ}\text{C}$,其晶粒生长速度仍低于未添加 SiC 的 Cu ,这表明在一定条件下,添加 SiC 颗粒有助于维持细晶结构。Qin 等人^[14]的实验发现,在低载($\leq 120 \text{ N}$)条件下,增大 SiC 颗粒粒径有助于提升复合材料的耐磨性,主要磨损机制为磨粒磨损。Celebi 等人^[15]还发现,随着 SiC 含量的增加,复合材料的相对密度降低,但粒径增大时密度上升,致密性提高。然而, SiC 含量的增加会阻碍电子迁移,降低电导率;而增大 SiC 粒径则有助于减少电子散射,改善导电性。综合来看, SiC 颗粒粒度对复合材料性能具有双向影响。较大粒径的颗粒有利于提高硬度和耐磨性,但在高载荷下可能引发颗粒脱落;纳米级颗粒则可均匀分散于基体中,增强晶界钉扎能力和致密性,但由于其显著增加的界面面积和电子散射,会导致电导率下降。因此,在电子封装等领域应用 SiC_p/Cu 复合材料时,需权衡导电性与力学性能,合理选择 SiC 颗粒尺寸。研究表明,当 SiC_p 粒径在 0.5~2 μm 时,复合材料展现出较优的力学-电学综合性能,存在一个特定的“临界尺寸阈值”,可作为工程设计的重要参考。利用纳米 SiC 颗粒的量子限域效应和界面声子散射调控等新机制,有望在优化电子迁移路径的同时,保持晶粒细化的优势,缓解导电性劣化的趋势。

2.2 SiC 颗粒含量和级配

SiC 颗粒含量将对 Cu 基复合材料的综合性能产生重要影响。当 SiC 含量低时,能够实现颗粒弥散强化,提高其硬度与耐磨性,同时能够保留 Cu 基复合材料优良的导热性能;而当引入适中含量的 SiC 时, SiC_p/Cu 的界面结合占主导地位,优化界面的综合性能,缺陷界面引发韧性下降;而当引入高含量的 SiC 时, SiC 颗粒团聚形成网络,但复合材料的塑性与导热性明显降低。 SiC 含量在 12%~18% 区间内为性能的平衡点,纳米颗粒可在更低含量通过量子效应实现等效增强。因此,在制备 SiC 颗粒增强 Cu 基复合材料时,需合理控制 SiC 颗粒的含量是关键措施。

Cu 基复合材料因兼具优异的力学性能以及高导电、导热性能而具有广泛应用前景。微米级 SiC 增强体领域已开展诸多研究,然而针对纳米 SiC 的系统性研究仍显不足。Akbarpour^[16]制备了纳米晶 Cu 与不同体积分数(2%~6%) SiC 的复合材料(图 3),研究结果表明,当 SiC 体积分数达到或超过 4% 时,晶粒仍能保持纳米尺度,显示出卓越的晶粒稳定性。从力学性能角度深入分析, SiC 体积分数为 4% 时,复合材料的屈服强度与抗压强度达到最大值,这主要归因于晶粒细化效应以及颗粒的均匀分布;然而,当 SiC 体积分数超过该

临界值后,由于界面结合强度的降低,材料强度呈现下降趋势。相关研究表明,Hall-Petch 强化机制在材料增强过程中占据主导地位。Ding^[17]进一步对磁控溅射包覆 Cu 层的 SiC_p/Cu 对复合材料性能的影响展开研究。实验结果表明,随着 SiC_p/Cu 含量的逐步增加,复合材料的相对密度呈现降低趋势,孔隙率相应升高,而维氏硬度则表现出上升态势。同时,断裂机制随着 SiC 含量的变化而发生显著转变。当 SiC 体积分数低于 20%时,断裂模式主要为 Cu 基体的韧性断裂;而当 SiC 体积分数超过 30%时,界面脱粘以及脆性断裂现象开始显现,这充分印证了颗粒含量对材料的致密性、硬度、断裂行为具有重要影响。

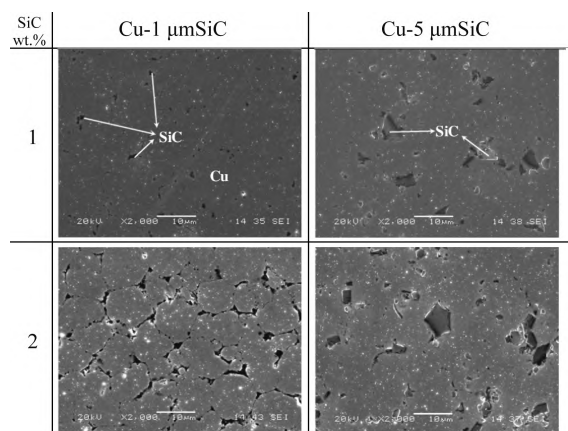


图2 用1 μm粒度和5 μm粒度的SiC颗粒制备的Cu-SiC复合材料的SEM照片^[12]

Fig. 2 SEM images of Cu-SiC composites prepared with 1 μm and 5 μm SiC particles^[12]

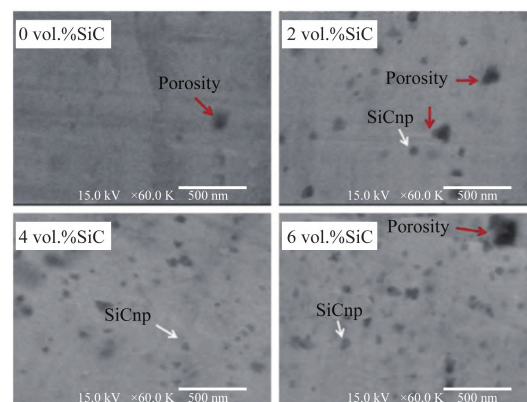


图3 SiC在所制备的块体材料中分布的SEM照片^[16]

Fig. 3 SEM images of SiC distribution in the fabricated bulk materials^[16]

2.3 Cu基复合材料的多相协同增强

SiC增强Cu基复合材料(SiC_p/Cu)的多相协同增强机制通过增强相与基体间的界面作用、微观结构调控及多尺度强化效应协同实现,可提升材料力学、热学和机械性能。其核心在于多相增强的互补性,以弥补单一增强相的性能局限。SiC颗粒与Cu基体的结合通过载荷传递、细晶强化和热错配强化共同作用提升材料强度。杨雷等人^[18]基于粉末冶金工艺制备出SiC_p/Cu双梯度纳米结构复合材料,实验表明SiC颗粒与Cu基体晶粒的梯度分布协同强化作用提升了复合材料硬度、抗拉强度和断裂韧性,增强机制为载荷传递、位错阻塞与细晶强化的耦合效应。混杂增强设计进一步拓展了性能优化空间,如碳纳米管网状结构可吸收电弧能量并增强导电性,TiB₂颗粒通过细化晶粒和增强界面结合作用提升抗磨性,两者协同提升材料的电弧抗蚀与摩擦磨损性能^[19]。石墨烯与SiC颗粒的复合通过石墨烯的高强度、高导热性与SiC耐磨性的互补,辅以界面润湿优化,实现力学和热学性能的协同提升。Ayyappadas等人^[20]采用粉末冶金法添加不同质量分数的石墨烯、SiC和石墨,利用微波烧结工艺制备复合材料,研究发现Cu-Gn复合材料相对密度较高,增强颗粒添加量的提高会降低相对密度。在较低添加量时,增强颗粒分布均匀,但烧结导致含氧量增加。SiC添加可提升硬度,过多石墨烯添加则降低硬度。就电导率而言,纯Cu表现最佳,适量石墨烯添加有利于提高电学性能,过多SiC添加则显著降低电导率。多相协同增强通过物理特性互补、界面优化及工艺调控,为高性能Cu基复合材料设计提供了新思路。

3 SiC_p/Cu基复合材料基体/界面的调控策略

提升SiC_p/Cu基复合材料性能的关键在于基体与增强相间的界面调控。Cu与SiC在物理和化学性能上存在显著差异,导致界面结合较弱,引发载荷传递效率低、导电路径受阻及界面热阻升高等问题,严重制约复合材料性能的提升。为解决此问题,研究者们提出不同类型的界面调控策略,包括构建界面反应层、优化界面润湿性、颗粒包覆改性及引入中间相等,这些方法旨在增强SiC_p/Cu复合材料的力学、电学和热学性能。

3.1 Cu基体微合金化组织与性能调控

提升界面润湿性并抑制界面化学反应是制备高导热SiC_p/Cu复合材料的关键。向Cu基体中掺杂Ti、

Cr、Fe、Ni 和 Al 等微量元素以优化界面结合和综合性能已成为研究热点。Ti 掺杂可在 SiC/Cu 界面形成金属间化合物层,显著增强界面结合强度。Moniri 等人^[21]通过粉末冶金在 SiC/Ti-Cu 纳米复合材料中引入 Ti,提升了材料的硬度和耐磨性。Węglewski^[22]等人采用 PVD 在 SiC 颗粒表面镀覆 Ti 层,并通过 SPS 烧结获得 Ti-SiC/Cu 复合材料,发现 Ti 涂层可以改善 SiC/Cu 界面润湿性和热导率,降低界面热阻。研究还表明,Cr 涂层可以在复合材料中形成 Ni₃Si/C 等人金属间化合物层,增强界面结合,提升整体热性能。Jiang 等人^[23]利用激光熔覆在 CuCrZr 基体上原位制备出 Cu-Cr-SiC 复合涂层,使硬度从 125 HV 提升至 1 149 HV,且涂层具有优异的导电性和耐磨性。Węglewski 等人^[22]还发现 Fe 涂层可有效抑制 SiC 在高温烧结过程中的分解,提高复合材料的导热率。Ni 掺杂能够细化 Cu 晶粒,提高机械强度,同时保持高导电性。Lee 等人^[24]通过 Cu-Ni 共电沉积方法在纳米孪晶 Cu 中掺杂超低含量 Ni 掺杂(约 0.467 ppm),将拉伸强度从 766 MPa 提升至 866 MPa,导电性仍保持在 81 IACS 以上。适量 Ni 原子掺杂通过促进孪晶界形成、提高位错密度以及限制晶粒长大等机制显著提升材料强度,增强晶体的应力阻挡能力。由于 Ni 原子与 Cu 原子半径接近、电子结构相容,有助于维持高导电性。但存在“最佳掺杂浓度窗口”,过高 Ni 含量可能引发晶界偏析或第二相析出,导致电导率下降甚至形成非连续电通道。后续需通过系统实验结合理论模拟评估 Ni 掺杂的临界含量区间,以实现力学-电学性能的最优平衡。在 SiC/Cu 体系中,关于 Al 掺杂的报道相对较少。Mei 等人^[25]通过固态合金化法制造了 Al-Cu/SiC 纳米复合材料,显著提升了材料的显微硬度和极限抗拉强度。Al 与 Cu 的合金化能够改善界面结合和力学性能。

3.2 SiC 增强相表面修饰与改性调控

SiC 颗粒增强 Cu 基复合材料(SiC_p/Cu)凭借高热导率[>200 W/(m·K)]和低热膨胀系数(6~8×10⁻⁸/K),在第三代半导体封装、高功率电子热沉和航天热控制系统等热管理领域展现出广阔的应用前景。然而,该体系存在界面热力耦合失衡问题:Cu 与 SiC 的热膨胀差异显著(17×10⁻⁶/K 对比 4×10⁻⁶/K),导致残余应力集中;界面润湿性不佳影响结合质量;高温烧结过程中易生成脆性金属间化合物(如 Cu₃Si),严重劣化材料的服役性能。为此,需引入表面调控手段优化 SiC 与 Cu 的匹配能力,增强界面结合力、缓解热应力不匹配并抑制有害相形成,从而协同提升复合材料的强度、韧性和高温稳定性。常用方法包括化学镀 Cu/Ni、构筑中间过渡层、气相沉积纳米涂层和表面活化处理等。表 1 总结了不同表面改性方法的主要工艺及其优缺点。在增强体表面沉积涂层是改善界面结合的有效策略。

表 1 不同表面改性方法的主要工艺及优缺点

Tab. 1 Main processes, advantages, and disadvantages of different surface modification methods

方法	工艺特点	优势	缺点	使用场景	参考文献
化学镀	无电镀技术,在表面形成均匀金属层	提高结合强度、改善电导率和耐磨性	处理时间较长,需控制化学环境	高导电性要求的电子元件、传导材料	[26]
等离子体表面改性	改变表面化学性质和物理形态	环保、处理均匀性高、精准控制表面特性	设备成本高,技术要求较复杂	电子元器件、光电设备、需改善黏附性	[27]
激光处理	通过高能激光束进行局部加热和熔化	高可控性、局部化加热效果	设备能耗高,材料耐热性受限	精细加工,改性场合	[28]
溶胶-凝胶法	在表面形成保护层,具有化学粘合性能	适用性广泛、低温处理,对温度敏感材料效果佳	附着力和耐久性较差	温度敏感材料表面改性	[29]
热喷涂	形成保护涂层,提高耐磨和抗氧化能力	多样性涂层技术,适用广泛	基体结合力较差	需耐磨耗和抗氧化材料	[30]

表 2 介绍了 SiC 颗粒增强 Cu 基复合材料表面改性的研究成果。为抑制 SiC_p/Cu 界面反应,可在 SiC 颗粒表面引入 TiN、TiC、Al₂O₃、类金刚石碳(DLC)和 Mo 等涂层,形成有效扩散屏障,显著减缓界面反应,降低孔隙率,并提升热物理性能。Prosviryakov^[31]利用气相沉积法在 SiC 表面沉积 Mo 涂层,有效增强界面结合强度,使复合材料热导率提升至 306 W/(m·K)。尽管如此,SiC 作为高导热 Cu 基复合材料增强体的研究仍较有限,提升 SiC_p/Cu 复合材料的热导率仍面临严峻的挑战。学者们还采用多种镀 Cu 或 Ni 的方法(如 Cu 电沉积^[32]、固化+热解^[33]、化学镀^[34]、Cu-硝酸盐固化+热解^[35]和 Ni 化学镀^[36]等)来改善 SiC/Cu 界面润湿性与结合强度。通过 PVD 在 SiC 表面涂覆 Ti、Cr、W 和 Mo 等活性金属层(如 Ti/Cr/W^[37]和

Mo^[38]),有效抑制 Cu-Si 脆性相生成并降低界面热阻。此外,借助等离子体表面改性^[27]、溶胶-凝胶法^[29]在 SiC 颗粒上构筑纳米过渡层以缓释热膨胀失配应力。通过磁控溅射及后续热轧/热挤压等机械加工消除界面孔隙、提升致密度,从而多维协同强化 SiC_p/Cu 复合材料的界面结合性能。

尽管表面改性技术在增强界面结合强度方面展现出显著优势,但在高温摩擦及腐蚀性环境条件下, SiC_p/Cu 复合材料的稳定性仍面临重大技术挑战。部分金属涂层(例如 Ni 和 Mo 等)在高温环境下易发生氧化、剥离以及界面脱粘等现象,从而导致复合材料的长期服役性能下降。此外,在循环热应力作用下,由于 Cu 与 SiC 热膨胀系数存在差异,界面区域易产生微裂纹扩展,进而影响复合材料的热循环寿命。因此,在设计表面修饰策略时,必须同时考虑涂层的热稳定性和热应力缓释能力。为实现这一目标,可以采取多种策略,例如构建多层梯度结构、引入柔性中间相或采用复合涂层体系(如 Ni-P/SiC 梯度层),以此提高涂层与基体之间的匹配性和使用安全性。未来研究中,借助热循环试验与疲劳模拟等手段,能够系统评估不同复合涂层的高温寿命及稳定性,为其工程化应用提供坚实的技术支撑。需要特别注意的是,部分涂层材料(如 Ti)在高温烧结或服役过程中可能与 SiC 发生反应,生成 Ti-Si 等金属间脆性相,这会对接口的韧性和导热性产生不利影响。为避免此类新脆性相的形成,在涂层设计阶段应综合考虑热力学反应活性与相稳定性。通常选择形成能较高且与 Cu 和 SiC 均具有良好界面兼容性的元素(例如 W、Mo 和 Cr 等)作为过渡涂层的候选材料。此外,构建复合涂层或多层中间过渡相(如 TiN/Ti、Ni/Cr 复合)不仅可以减轻有害反应,还能提升界面的结合质量。目前,已有研究采用第一性原理计算和热力学模拟方法(如相图计算、密度泛函理论),预测不同涂层体系的稳定性与界面结合能,从而为高性能界面的设计提供理论依据。通过将理论计算与实验验证相结合,有望实现涂层成分的精准设计,并有效抑制脆性相的生成。

表 2 Cu/SiC 体系中 SiC 颗粒的表面涂层修饰

Tab. 2 Surface modification coatings on SiC particles of the Cu/SiC systems

复合材料	涂层元素	涂层方法	固结方法	结论	参考文献
Cu-SiC(质量分数为 1.1%)	Cu	电沉积	SPS+热轧	陶瓷相和 Cu 基体间结合强度增加,力学和热学性能提升	[32]
Cu-SiC(体积分数为 30%)	Cu	固化+热解	SPS	改善界面润湿性,界面结合能力增强	[33]
Cu-SiC(质量分数为 0.6%, 2%, 4%, 6%, 8%和 10%)	Cu	化学镀	烧结+热挤压	润湿性的改善,力学和耐磨性能提升	[34]
Cu-SiC(体积分数为 30%)	Cu	磁控溅射	热压	润湿性的改善和界面结合好,力学性能得到提升	[17]
Cu-SiC(体积分数为 30%)	Cu-Nitrate	固化+热解	SPS	润湿性改善和界面结合牢固	[35]
Cu-SiC(体积分数为 10%)	W	PVD	SPS	界面结合强度高,力学和热学性能提升	[37]
Cu-SiC(体积分数为 10%)	Cr	PVD	SPS	界面结合强度优异,孔隙率较高;力学性能显著提升,热导率有所下降	[37]
Cu-SiC(体积分数为 10%和 20%)	Cr	PVD	SPS	界面结合强度高,力学性能得到提升	[22]
Cu-SiC(体积分数为 10 和 20%)	Ti	PVD	SPS	界面结合强度高,力学性能得到提升	[22]
Cu-SiC(质量分数为 40%)	Mo	PVD	SPS	钼涂层成功调控了 Cu 基体与 SiC 实现了强界面结合,热性能好	[38]
Cu-SiC(质量分数为 10%)	Ni	化学镀	烧结+热挤压	界面致密,结合牢固,力学性能提升	[36]

4 结论

本文对 SiC_p/Cu 基复合材料的性能提升机制以及界面调控策略展开了系统性探讨,同时揭示了界面优

化过程中的关键因素。研究发现,通过合理调控 SiC 颗粒的粒度、含量以及级配,能够显著提高复合材料的耐磨性、耐蚀性以及热导率等性能。然而,在这一过程中,需要对导电性能的潜在负面影响进行有效平衡。作为性能优化的核心环节,界面工程在其中扮演着至关重要的角色。具体而言,Cu 基体的微合金化(例如掺杂 Ti、Cr 和 Fe 等元素)以及对 SiC 增强相表面的修饰(例如采用化学镀 Cu/Ni、PVD 涂层等技术),不仅可以增强界面的结合强度,还能有效抑制脆性相的生成,进而降低界面热阻与电子散射现象。此外,多相协同增强策略(例如将 SiC 与石墨烯、碳纳米管进行混杂增强)借助不同材料特性之间的互补以及多尺度效应,成功实现了力学、热学和电学性能的协同优化。尽管目前在 SiC_p/Cu 基复合材料的研究方面已经取得了一定的进展,但仍有许多关键问题有待进一步解决。例如,需要更深入地挖掘不同增强相(如石墨烯、碳纳米管等)之间的多相协同效应,以实现载荷传递、细晶强化和热错配强化的最佳耦合。同时,开展纳米-微米-宏观多尺度结构的调控与数字化设计,结合计算材料学和高通量实验技术,能够快速筛选出最佳的组分与工艺参数。此外,探索包括增材制造、放电等离子体烧结、热等静压+热挤压等在内的先进工程化制备路线,对于解决大规模、绿色、低成本生产的关键技术难题具有重要意义。最后,持续强化界面工程,通过构建梯度中间层、功能涂层以及原位生成金属间化合物层等方法,不断优化界面的润湿性与结合强度。通过这些深入的研究工作,将为 SiC_p/Cu 基复合材料在电子封装、航空航天、热管理等关键领域的应用拓展提供坚实的理论与技术基础。

参 考 文 献

- [1] AKBARPOUR M R, GAZANI F, MOUSA MIRABAD H, et al. Recent advances in processing, and mechanical, thermal and electrical properties of Cu-SiC metal matrix composites prepared by powder metallurgy[J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 140: 101191.
- [2] LAI L Y, NIU B, BI Y X, et al. Advancements in SiC-reinforced metal matrix composites for high-performance electronic packaging: a review of thermo-mechanical properties and future trends[J]. *Micromachines*, 2023; 14(8):1491.
- [3] LIU D W, LI C H, XU P M, et al. SiC_p/Al composites from conventional to empowered machining: mechanisms and processability[J]. *Composite Structures*, 2024, 346: 118433.
- [4] ZHAN Y Z, ZHANG G D. Elevated temperature friction and wear behavior of SiC-reinforced copper matrix composites[J]. *International Journal of Materials Research*, 2022, 95(11): 1040-1045.
- [5] SOMANI N, TYAGI Y K, KUMAR P, et al. Enhanced tribological properties of SiC reinforced copper metal matrix composites[J]. *Materials Research Express*, 2019, 6(1): 016549.
- [6] SADAWY M M, FAYED S M, TAYEA M, et al. Microstructure, corrosion and electrochemical properties of Cu/SiC composites in 3.5wt% NaCl solution[J]. *Metals and Materials International*, 2024, 30(3): 568-584.
- [7] ARVAS C, ALTINSOY İ, YENER T, et al. Development of Cu matrix composite contactors reinforced by nickel coated SiC[J]. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 2023, 11(4): 894-904.
- [8] HAN Y Y, GUO H, YIN F Z, et al. Microstructure and thermal conductivity of copper matrix composites reinforced with mixtures of diamond and SiC particles[J]. *Rare Metals*, 2012, 31(1): 58-63.
- [9] SHARIFI H, EIDIVANDI V, TAYEBI M, et al. Effect of SiC particles on thermal conductivity of Al-4%Cu/SiC composites[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2017, 53(12): 3621-3627.
- [10] WU D X, HUANG C L, WANG Y K, et al. Utilization of SiC and Cu particles to enhance thermal and mechanical properties of Al matrix composites[J]. *Materials*, 2019, 12(17): 2770.
- [11] SRIDHAR M M J, RAVICHANDRAN M, MEIGNANAMOORTHY M, et al. Effect of silicon carbide on microstructural, mechanical and corrosion behavior of electrolytic copper matrix composite produced by the powder metallurgy route[J]. *Silicon*, 2022, 14(11): 5877-5886.
- [12] CELEBI EFE G, ZEYTIN S, BINDAL C. The effect of SiC particle size on the properties of Cu-SiC composites[J]. *Materials & Design*, 2012, 36: 633-639.
- [13] AKBARPOUR M R, FARVIZI M, KIM H S. Microstructural and kinetic investigation on the suppression of grain growth in nanocrystalline copper by the dispersion of silicon carbide nanoparticles[J]. *Materials & Design*, 2017, 119: 311-318.
- [14] QIN Y Q, WU Y C, WANG D B, et al. Influence of SiC particle size on the wear properties of SiC/Cu composites[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 311-313: 635-639.
- [15] CELEBI EFE G, IPEK M, ZEYTIN S, et al. An investigation of the effect of SiC particle size on Cu-SiC composites[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(4): 1813-1822.
- [16] AKBARPOUR M R, SALAHİ E, ALIKHANI HESARI F, et al. Effect of nanoparticle content on the microstructural and mechanical

- properties of nano-SiC dispersed bulk ultrafine-grained Cu matrix composites[J]. *Materials & Design*, 2013, 52: 881-887.
- [17] DING P D, ZHANG Y, HU M. Effect of SiC_p (Cu) addition on the property of the SiC_p (Cu)/Cu composites[C]// *Proceedings of the 2016 4th International Conference on Machinery, Materials and Information Technology Applications*. Paris: Atlantis Press, 2017: 748-751.
- [18] 杨雷, 高求, 刘鸿, 等. 碳化硅颗粒强化铜基双梯度纳米结构复合材料的制备及性能[J]. *粉末冶金技术*, 2016, 34(6): 428-433.
- [19] 龙飞. CNTs-TiB₂ 混杂增强铜基复合材料组织及性能研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020.
- [20] AYYAPPADAS C, SHANU O S, VIJAYAN A, et al. Effect of graphene, SiC and graphite addition on hardness, microstructure and electrical conductivity of microwave sintered copper MMCs fabricated by powder metallurgy route[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, 1355(1): 012035.
- [21] MONIRI JAVADHESARI S, ALIPOUR S, AKBARPOUR M R. Microstructural characterization and enhanced hardness, wear and antibacterial properties of a powder metallurgy SiC/Ti-Cu nanocomposite as a potential material for biomedical applications[J]. *Ceramics International*, 2019, 45(8): 10603-10611.
- [22] WĘGLEWSKI W, PITCHAI P, CHMIELEWSKI M, et al. Thermal conductivity of Cu-matrix composites reinforced with coated SiC particles: numerical modeling and experimental verification[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 188: 122633.
- [23] JIANG Y X, XIAO L R, ZHAI P Y, et al. Microstructure and properties of Cu-Cr-SiC *in situ* composite coatings by laser cladding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2023, 456: 129264.
- [24] LEE K P, CHEN B Y, LIN Y Q, et al. High-strength and high-conductivity nanotwinned Cu lightly doped with Ni[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2024, 891: 145990.
- [25] MEI X M, MEI Q S, PENG Y Q, et al. Achieving enhanced mechanical properties of SiC/Al-Cu nanocomposites *via* simultaneous solid-state alloying of Cu and dispersing of SiC nanoparticles[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 860: 144338.
- [26] SUDAGAR J, LIAN J S, SHA W. Electroless nickel, alloy, composite and nano coatings-a critical review[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, 571: 183-204.
- [27] ZHIANMANESH M, GILMOUR A, BILEK M M M, et al. Plasma surface functionalization: a comprehensive review of advances in the quest for bioinstructive materials and interfaces[J]. *Applied Physics Reviews*, 2023, 10(2): 021301.
- [28] ARTUR K, NORBERT R, LUKASZ O, et al. Laser surface texturing: characteristics and applications[J]. *System Safety: Human-Technical Facility-Environment*, 2023, 5(1): 240-248.
- [29] CARRERA-FIGUEIRAS C, PÉREZ-PADILLA Y, ESTRELLA-GUTIÉRREZ M A, et al. Surface science engineering through sol-gel process[M]// *Applied Surface Science*. London: IntechOpen, 2019.
- [30] FOTOVVATI B, NAMDARI N, DEHGHANGHADIKOLAEI A. On coating techniques for surface protection: a review[J]. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2019, 3(1): 28.
- [31] PROSVIRYAKOV A S. SiC content effect on the properties of Cu-SiC composites produced by mechanical alloying[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 632: 707-710.
- [32] HAN L, WANG J, GUO S Y, et al. Fabrication and performance of SiC-reinforced Cu: role of the aspect ratio of the SiC reinforcement phase[J]. *Materials & Design*, 2022, 220: 110869.
- [33] JEONG Y K, BANG S R, OH S T. Synthesis and consolidation of nano-sized Cu coated SiC powders by a chemical method and spark plasma sintering[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2016, 16(2): 1993-1995.
- [34] SHU K M, TU G C. Fabrication and characterization of Cu-SiC_p composites for electrical discharge machining applications[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2001, 16(4): 483-502.
- [35] JEONG Y K, KIM Y S, OH S T. Fabrication of Cu-based SiC composites by spark plasma sintering of Cu-nitrate coated SiC powders[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, 62(2): 1407-1410.
- [36] JARZĄBEK D M, MILCZAREK M, WOJCIECHOWSKI T, et al. The effect of metal coatings on the interfacial bonding strength of ceramics to copper in sintered Cu-SiC composites[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(6): 5283-5291.
- [37] SCHUBERT T, TRINDADE B, WEIBGÄRBER T, et al. Interfacial design of Cu-based composites prepared by powder metallurgy for heat sink applications[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 475(1/2): 39-44.
- [38] ZHAN Y Z, ZHANG G D. The effect of interfacial modifying on the mechanical and wear properties of SiC_p/Cu composites[J]. *Materials Letters*, 2003, 57(29): 4583-4591.

(责任编辑:蒲锡鹏)