

增强相体积分数和烧结温度对(AISiTiCrNiCu)p/ 6061Al 复合材料热导率的影响

朱德智, 戚龙飞, 丁霞

(华南理工大学 广东省金属新材料制备与成形重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 采用 AISiTiCrNiCu 高熵合金颗粒作为增强相增强铝合金, 研究高熵合金体积分数与烧结温度对复合材料导热性能的影响。结果表明, (AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的热导率随着 AISiTiCrNiCu 颗粒体积分数的增大而降低, 颗粒体积分数为 20% 的 (AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的热导率为 61.6 W/m·K, 相比于基体 6061Al 合金降低了 52%。当增强相体积分数为 10% 时, 随着烧结温度的升高, 复合材料的热导率降低, 烧结温度为 540 °C 时, 复合材料的热导率为 65.8 W/m·K。

关键词: 高熵合金; 铝基复合材料; 热导率; 界面

中图分类号: TB331

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)02-0614-06

众所周知, 高速、节能、安全、环保是现代交通运输的重要研究目标, 而轻量化是实现目标最有效的途径。由于铝合金具有重量轻、比强度高、加工性好、可焊接、耐腐蚀、环保等特点, 因而成为促进交通运输高速化、轻量化的关键材料。在新型轻质材料中, 金属基复合材料(metal matrix composites, MMCs)在成分、组织和性能上具有可设计性, 可以通过合理的设计获得比传统材料更为优异的性能, 契合了人们对材料的需求, 如更高的比强度和比模量, 更好的耐磨性能和耐高温力学性能, 且制备工艺简单, 可进行二次加工, 因此成为当前材料工作者研究和探讨的热点^[1-4]。

迄今为止, 人们对陶瓷颗粒增强铝基复合材料的研究比较成熟。然而, 陶瓷颗粒虽然可以极大提高基体材料的强度、硬度和模量以及物理性能, 但会导致其塑性和韧性急剧降低。作为新型材料之一的高熵合金(HEAs), 具有高强度、高硬度、高模量、高热稳定性以及优异的物理性能, 同时具有金属属性^[5,6]。根据文献资料显示, 高熵合金颗粒与 Al、Cu 等合金的界面润湿性好、界面结合强度高^[7,8], 可有效提高材料性能, 是一种比较理想的增强相材料。Wang^[9]等人采用 FeNiCrCoAl₃ 颗粒增强 2024 铝合金, 在适当条件下, 热挤出的合金的抗压缩强度达 710 MPa。刘鑫旺^[10,11]等人采用 AlCoCrFeNiTi_{0.5} 高熵合金颗粒增强铝合金, 所制备的高熵合金颗粒增强铝基复合材料的抗拉强度

提高了 32.4%~90.1%, 延伸率提高了 29.6%~52.0%。Karthik^[12]等人通过摩擦沉积法制备了体积分数为 12% 的 CoCrFeNi 高熵合金增强 AA5083 铝合金的复合材料, 单层沉积和多层沉积的抗拉强度和延伸率分别达到了 400±6 MPa、(6±1)% 和 395±7 MPa、(5±2)%。因此, 高熵合金作为金属基复合材料中的增强相是一个非常好的选择。目前已有关于高熵合金颗粒增强铝基复合材料的研究报道, 采用的增强相通常是高密度 FeCoNiAlTi(Cr) 系高熵合金^[13], 高熵合金体系的组分主要是 Co、Cr、Fe、Ni、Mn 等过渡族金属元素和一些较高熔点的金属元素, 所制备的铝基复合材料表现出较好的强韧化效果。目前, 关于低密度高熵合金颗粒增强铝基复合材料以及高熵合金颗粒增强铝基复合材料物理性能的研究尚未见报道。

为此, 本实验选用 6061Al 合金作为基体材料, 采用轻质高熵合金颗粒作为增强相, 利用放电等离子烧结工艺制备 5%~20% (体积分数, 下同) 高熵合金增强 6061Al 复合材料, 并对导热性能进行研究。

1 实验

所用的高熵合金颗粒由 Al、Cu、Si、Ni、Ti、Cr 多种纯金属粉末 (纯度≥99.9%, 粒度≤45 μm) 通过机械合金化工艺制备。按 AISiTiCrNiCu 配制高熵合金粉末, 置于 V 型混粉机内混合 20 h 后, 在 QM-2SP20

收稿日期: 2018-02-13

基金资助: 广东省科技计划项目 (2016A010103006); 广东省自然科学基金 (2015A030313668)

作者简介: 朱德智, 男, 1980 年生, 博士, 副教授, 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640, 电话: 020-87113267, E-mail: zdzandy@126.com

行星球磨机上进行高能球磨。采用高纯氩气作为保护气体，转速为 200 r/min。AISiTiCrNiCu 的球磨工艺为干磨 20 h，乙醇湿磨 2 h，在 0、5、10、15、20、22 h 进行 XRD 检测。

复合材料中基体合金和增强相颗粒分别为市售的 6061Al 合金粉末（粒度≤38 μm）和自制的高熵合金粉末，粒度≤20 μm，按体积分数为 5%、10%、15%、20%分别与 6061Al 合金粉末在 V 型混粉机内混合 15 h 后，装入模具中，在 THP-60A 快速油压机上压实，压力为 400 MPa，保压时间为 1 min，制得冷压坯料；再将冷压坯料进行 500，520，540 °C 的放电等离子烧结得到复合材料。

采用 X 射线衍射仪（XRD, Bruker-D8 Advance, Germany）对不同球磨阶段的合金粉末进行物相分析。其测试条件为：Cu 靶 Kα 射线（入射线波长 λ=0.154 18 nm），Ni 滤波片，管压 40 kV，管流 40 mA，扫描步长 0.02°，扫描速度 19.2 s/步。采用阿基米德排水法测量复合材料的密度。采用激光扩散法直接测量材料的导热率。在已知试样密度、比热和热扩散系数的情况下，可根据式(1)计算得到导热率：

$$\lambda = \rho_s C \alpha \tag{1}$$

式中：λ—试样的热导率(W/m·K)；ρ_s—试样的密度(kg/m³)；C—试样的比热(J/kg·°C)；α—试样的热扩散系数(m²/s)。

在本研究中，采用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry, DSC)测量试样的比热 C (special heat capacity)。标样为 10 mg 的蓝宝石，则试样的质量约为 10 mg。测试时，首先在-10 °C 下保温 10 min，然后以 10 °C/min 的升温速度从-10 °C 升温到 40 °C，并保温 5 min，最终获得试样在 30 °C 时的比热。

采用激光导热仪 NETZSCH LFA-447 测量试样的热扩散系数 α。测试温度为 30 °C，试样尺寸为 Φ12.7 mm×2 mm。选取 5 个测试点的试验数据，并计算平均值作为试样的热扩散系数。测试的试样用金刚石砂纸打磨切割痕迹和氧化物，并且严格保证圆柱试样的上下两个面平行，并在试样的 2 个端面喷一层石墨。

2 结果与分析

2.1 AISiTiCrNiCu 高熵合金及复合材料的 XRD 分析

机械合金化过程中，合金化顺序与元素的熔点高低最具关联性，熔点越低的元素越容易合金化；而当元素的熔点接近时，硬脆的合金元素优先合金化。图 1 显示了 AISiTiCrNiCu 高熵合金粉经过 5 h 球磨后，大部分元素的衍射峰强度明显减弱，特别是高角度对应的衍射峰强度减弱较快。球磨至 15 h 时，大部分元

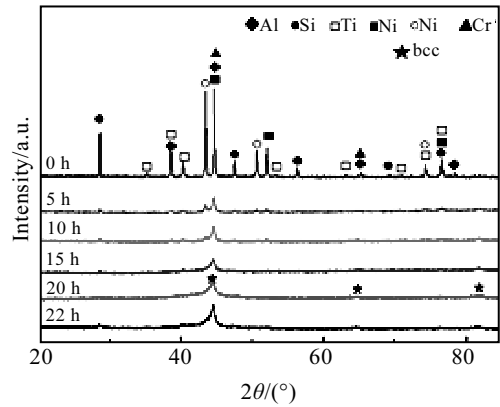


图 1 机械合金化 AISiTiCrNiCu 粉末的 XRD 图谱

Fig.1 XRD patterns of AISiTiCrNiCu HEAs alloy powders with different milling time

素的衍射峰基本消失。20 h 时，合金的衍射峰趋于稳定，说明高能球磨基本达到相对平衡状态，即粉末完全合金化。在衍射角为 44.39°保留了 1 个主峰，粉末最终形成了具有 bcc 结构的过饱和固溶体。可以看出，球磨 22 h 后，粉末的 XRD 图谱与 20 h 相比，其衍射峰宽度没有明显的变化，衍射强度略有增大。

图 2 为不同烧结温度下 10%高熵合金的 (AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的 XRD 图谱。从图中可以看出，当烧结温度为 500 和 520 °C 时，在复合材料中只检测到 2 种相，分别为 6061Al 合金和 bcc 结构的 AISiTiCrNiCu 增强相；当烧结温度升高 540 °C 时，X 射线检测到复合材料中有新相生成。

2.2 增强相体积分数对(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料导热性能的影响

对于不同的材料，其导热机理不同，金属材料的

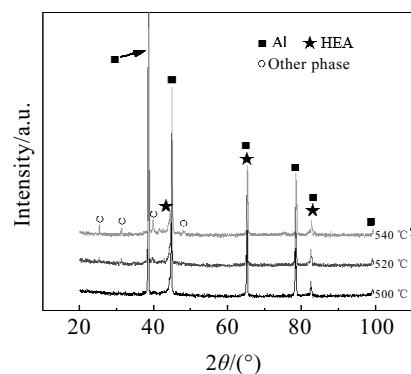


图 2 不同烧结温度下(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of (AISiTiCrNiCu)p/6061Al composites at different sintering temperatures

导热主要依靠自由电子的运动。一般来说，影响颗粒增强铝基复合材料导热率的因素^[14]主要有：基体和增强相材料的导热性能、杂质、复合材料的致密度和微结构。高熵合金颗粒的加入会在基体材料中引入大量界面，对载热体的运动起到散射作用，阻碍热传导的进行。

图 3 是在烧结温度为 520 °C 制备的不同增强相体积分数的(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料导热率的变化趋势。表 1 为材料的密度、热扩散系数，热导率和比热的具体数值。由此可见，当 AISiTiCrNiCu 高熵合金颗粒的体积分数在 0%~20%范围时，复合材料的热导率随着高熵合金颗粒含量的增大而不断降低。6061Al 合金的热导率为 129.0 W/m·K，当 AISiTiCrNiCu 高熵合金的体积分数增加到 20%时，复合材料的热导率降低至 61.6 W/m·K，相比于基体 6061Al 合金降低了 52%。

目前，对于颗粒增强铝基复合材料热导率的理论模型较多。其中比较完善的有混合定律、Maxwell 模型、P.G 模型和 EMA 模型，其计算公式分别为式(2)、(3)、(4)和(5)所示：

$$\lambda_{com} = \lambda_m V_m + \lambda_p V_p \quad (2)$$

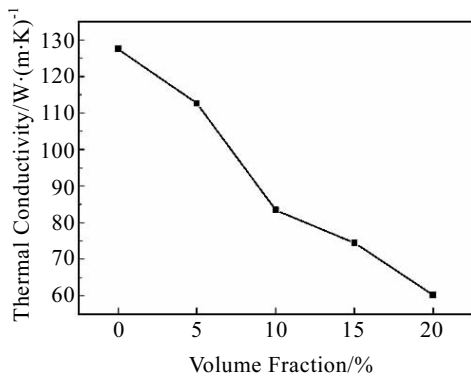


图 3 增强相的体积分数对复合材料热导率的影响

Fig.3 Effect of volume fraction of HEAs particles on thermal conductivity of (AISiTiCrNiCu)p/6061Al composites

表 1 不同增强相体积分数的(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的热学性能

Table 1 Thermal properties of (AISiTiCrNiCu)p/6061Al composites with different volume fractions of HEAs particles

| Materials | Density/ kg·m ⁻³ | Specific heat/ J·(kg·K) ⁻¹ | Diffusion coefficient/ × 10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹ | Thermal conductivity/ W·(m·K) ⁻¹ |
|-----------|--------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 6061Al | 2711 | 955 | 49.81 | 128.96 |
| 5%HEA/Al | 2753 | 931 | 42.87 | 109.88 |
| 10%HEA/Al | 3023 | 783 | 35.94 | 85.07 |
| 15%HEA/Al | 3176 | 746 | 32.08 | 76.01 |
| 20%HEA/Al | 3331 | 668 | 27.68 | 61.59 |

$$\lambda_{com} = \lambda_m \frac{1 + 2\lambda_m / \lambda_p - 2V_p (\lambda_m / \lambda_p - 1)}{1 + 2\lambda_m / \lambda_p + V_p (\lambda_m / \lambda_p - 1)} \quad (3)$$

$$\lambda_{com} = \lambda_m (1 - V_p) + \lambda_p V_p - \frac{1}{3} (1 - V_p) V_p \frac{(\lambda_m - \lambda_p)^2}{\lambda_m (1 - V_p) + \lambda_p V_p} \quad (4)$$

$$\lambda_{com} = \lambda_m \frac{\left[2 \left(\frac{\lambda_p}{\lambda_m} - 2 \frac{\lambda_p \cdot R_{Bd}}{d} - 1 \right) V_p + \frac{\lambda_p}{\lambda_m} + 2 \frac{2\lambda_p \cdot R_{Bd}}{d} + 2 \right]}{\left[\left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_m} + 2 \frac{\lambda_p \cdot R_{Bd}}{d} \right) V_p + \frac{\lambda_p}{\lambda_m} + 2 \frac{2\lambda_p \cdot R_{Bd}}{d} + 2 \right]} \quad (5)$$

其中，λ_{com}、λ_m 和 λ_p 分别为复合材料、基体和增强相的热导率；V_m 和 V_p 分别为基体和增强相的体积分数。R_{Bd} 为复合材料的界面热阻；d 为增强相颗粒的直径。

由于目前没有关于(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料界面热阻的报道，无法直接用式(5)计算复合材料的热导率，因此只能利用前 3 种模型分别对不同体积分数增强相的(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的热导率进行理论计算。根据文献可得，6061Al 合金的热导率为 180 W/m·K，本实验测得 AISiTiCrNiCu 高熵合金在 30 °C 时热扩散系数为 65.0 × 10⁻⁶ m²/s，比热为 495 J/kg·K，密度为 5.77 g/cm³，则由式(1)计算得到高熵合金的热导率为 185.7W/m·K。复合材料热导率的理论计算值与实测值如表 2 所示。

从表 2 中可以看出，根据以上 3 个模型计算得到的复合材料热导率的理论值均明显高于测试值，而且随着增强相体积分数的增大，预测值与测试值的变化趋势恰好相反。这是因为这 3 种模型都只考虑了增强相的体积分数，而没有涉及到颗粒的形状与尺寸，忽略了界面热阻的影响。本实验中的 AISiTiCrNiCu 高熵合金增强颗粒是不规则的几何体，且界面热阻对复合材料的导热性具有较大的影响。因此，以上 3 种模型不适合用来预测(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的热导率，这也进一步表明复合材料中的界面与缺陷对其热导率的影响比较大。

复合材料的导热率对微观组织很敏感。材料中的缺陷越多，其热导率越低。一方面，由于本实验中的 AISiTiCrNiCu 颗粒增强相采用高能球磨工艺制备，在球磨过程中会产生很多位错或变形，随着加入的高熵合金颗粒增多，复合材料中的缺陷越多，载热体的自

表 2 复合材料热导率的实测值与计算值

Table 2 Predicted and experimental thermal conductivities of (AISiTiCrNiCu)p/6061Al composites (W·(m·K)⁻¹)

| Materials | Measured | ROM | Maxwell | P.G |
|-----------|----------|---------|---------|---------|
| 5%HEA/Al | 109.88 | 180.284 | 180.281 | 180.281 |
| 10%HEA/Al | 85.07 | 180.568 | 180.562 | 180.562 |
| 15%HEA/Al | 76.01 | 180.852 | 180.844 | 180.844 |
| 20%HEA/Al | 61.59 | 181.136 | 181.127 | 181.127 |

由程越小。同时随着高熵合金含量的增大，铝合金和高熵合金之间形成的相界面越多，大量的界面破坏了铝合金基体的连通性，导致铝合金中的自由电子发生散射，增大铝合金和高熵合金的界面热阻，降低复合材料的导热性能。另一方面，本实验中在制备块体复合材料时，首先将 AISiTiCrNiCu 高熵合金粉体与 6061Al 合金粉在 400 MPa 下冷压，而且随着高熵合金颗粒含量的增加，颗粒难免会相互接触。在冷压过程中，颗粒相互挤压，导致高熵合金颗粒内部产生位错等缺陷。在烧结后冷却过程中，由于二者的热膨胀系数不匹配，与高熵合金相邻的基体铝合金受到残余拉应力^[15]。这些缺陷破坏了铝原子的有序排列，阻碍铝合金中自由电子的热运动，使电子运动的自由程缩短，从而降低了(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的导热性能。

2.3 烧结温度对(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料导热性能的影响

在 500、520 和 540 °C 3 种烧结温度下制备的 10% 增强相的(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料热学性能如表 3 所示。不同烧结温度下(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的导热率如图 4 所示。从图 4 中可以看出，当烧结温度为 500 和 520 °C 时，材料的热导率分别为 86.9 和 85.1 W/m·K，二者没有明显的区别。但是当烧结温度升高到 540 °C 时，复合材料的热导率为 65.8 W/m·K，相比于烧结温度为 500 和 520 °C 的材料，热导率降低比较明显。

Hasselmann 和 Johnson^[16]提出，基体材料和增强相的界面结合情况对复合材料的热导率具有很大影响。界面反应会降低界面传热系数，影响复合材料的导热性能。图 5、图 6 和图 7 分别是在烧结温度为 500、520 和 540 °C 制备的(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的组织和界面特征。从图 5 和图 6 中可以看出，通过扫描电镜观察在 500、520 °C 制备的复合材料，铝合金

与高熵合金之间没有明显的扩散层和裂纹。通过在透射电镜下观察二者的界面（图 5c，6c），发现复合材料的界面类型主要为扩散型界面，没有界面反应产物，表明铝合金和高熵合金结合较好，因此在该温度下制备的复合材料具有更高的热导率。当烧结温度升高到 540 °C 时，从图 7a 可以看出，高熵合金已经发生分解，并与铝合金之间发生元素扩散（图 7b，7c）。在前文

表 3 不同烧结温度制备的(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的热学性能
Table 3 Thermal properties of (AISiTiCrNiCu)p/6061Al composites at different sintering temperatures

| Temperature/ °C | Density/ kg·m ⁻³ | Specific heat/ J·(kg·K) ⁻¹ | Diffusion coefficient/ ×10 ⁻⁶ m ² ·s ⁻¹ | Thermal conductivity/ W·(m·K) ⁻¹ |
|--------------------|--------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| 500 | 3010 | 764 | 37.77 | 86.86 |
| 520 | 3023 | 783 | 35.94 | 85.07 |
| 540 | 3032 | 696 | 31.18 | 65.80 |

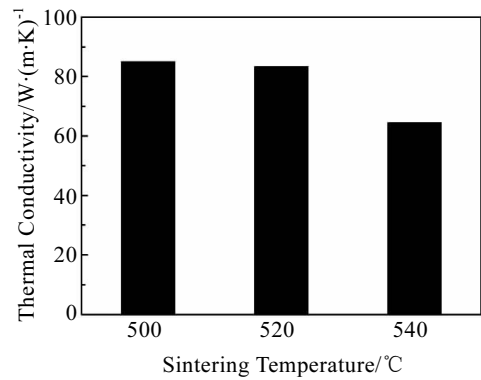


图 4 烧结温度对(AISiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料热导率的影响

Fig.4 Effect of sintering temperature on thermal conductivity of (AISiTiCrNiCu)p/6061Al composites

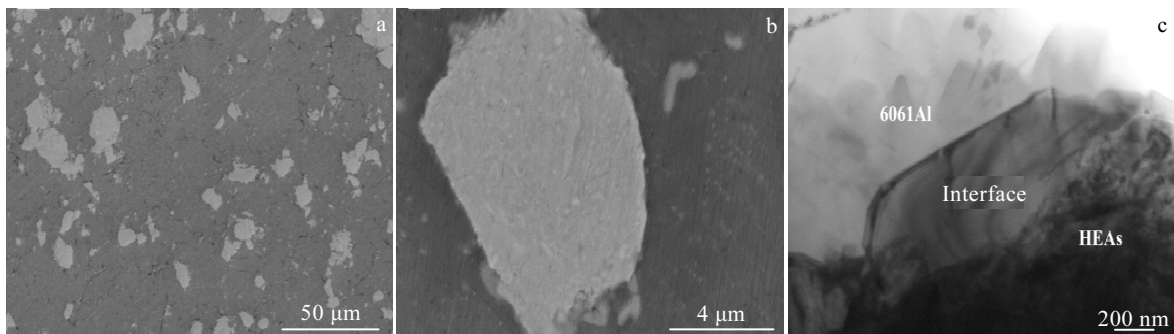


图 5 500 °C 烧结时复合材料的组织与界面特征

Fig.5 SEM micrographs of microstructure of HEAs/6061Al (a, b) and TEM image of interface (c) between 6061Al and reinforcement in composites sintered at 500 °C

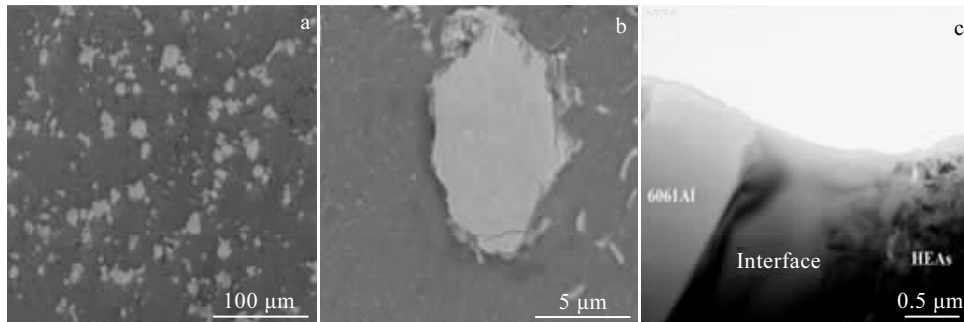


图 6 520 °C 烧结时复合材料的组织与界面特征

Fig.6 SEM micrographs of microstructure of HEAs/6061Al (a, b) and TEM image of interface (c) between 6061Al and reinforcement in composites sintered at 520 °C

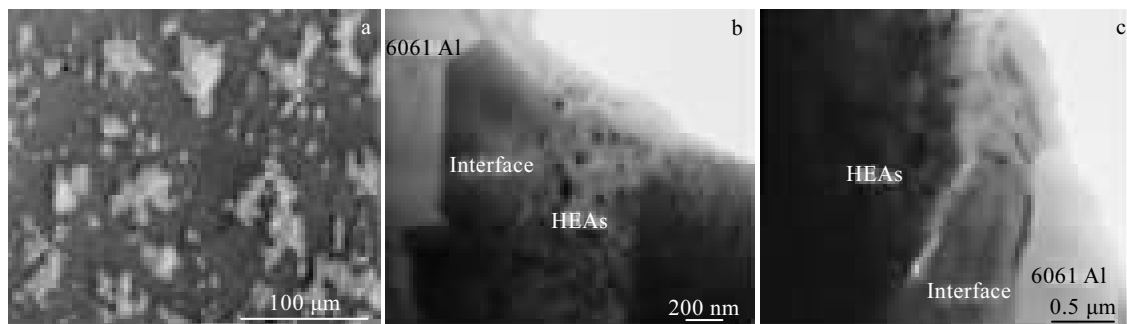


图 7 540 °C 烧结时复合材料的组织与界面特征

Fig.7 SEM micrograph of microstructure of HEAs/6061Al (a) and TEM images of interface (b, c) between 6061Al and reinforcement in composites sintered at 540 °C

图 2 分析发现复合材料中有新相产生，即高熵合金分解的产物，分解产物对传热载体有散射作用，减小了传热载体的自由程，从而降低复合材料的热导率。同时在部分近界面中观察到孪晶(如图 7c 所示)，这些缺陷进一步降低复合材料的热导率。再者，随着烧结温度的升高，由于高熵合金和基体铝合金的物理性质差别较大，从高温冷却到室温时，与高熵合金相邻的铝合金产生较大的残余拉应力或变形，这些缺陷也会降低复合材料的热导率。由此可以得出，复合材料的界面对其热导率有较大的影响，减少高熵合金的分解以及内应力可以提高其热导率。

3 结 论

1) (AlSiTiCrNiCu)p/6061Al 复合材料的热导率随着 AlSiTiCrNiCu 颗粒体积分数的增大而降低。采用 SPS 制备的 6061Al 合金的热导率为 129.0 W/m·K，当 AlSiTiCrNiCu 颗粒的体积分数增加到 20%时，复合材料的热导率为 61.6 W/m·K，相比于基体 6061Al 合金

降低了 52%。

2) 当 AlSiTiCrNiCu 颗粒的体积分数为 10%时，在 500 和 520 °C 烧结的复合材料热导率比较接近，分别为 86.9 和 85.1 W/m·K，当烧结温度升高到 540 °C 时，复合材料的热导率降低，为 65.8 W/m·K，表明随着烧结温度的升高，复合材料的热导率降低。

参考文献 References

[1] Williams J C, Starke E A. *Acta Materialia*[J], 2003, 51(19): 5775
 [2] Wu Gaohui(武高辉). *Journal of Composites*(复合材料学报)[J], 2014(5): 1228
 [3] Bakshi S R, Lahiri D, Agarwal A. *International Materials Reviews*[J], 2010, 55(1): 41
 [4] Ibrahim I A, Mohamed F A, Lavernia E J. *Journal of Materials Science*[J], 1991, 26(5): 1137
 [5] Wu W, Yang C, Yeh J. *Annales de Chimie-Science des Matériaux*[J], 2006, 31(6): 737

- [6] Yeh J. *Annales de Chimie-Science des Materiaux*[J], 2006, 31(6): 633
- [7] Reddy M P, Ubaid F, Shakoor R A *et al. Metals-Open Access Metallurgy Journal*[J], 2016, 6(7): 817
- [8] Chen J, Niu P, Wei T *et al. Journal of Alloys and Compounds* [J], 2015, 649: 630
- [9] Wang Zhiwei, Yuan Yanbo, Zheng Ruixiao *et al. Trans Non-ferrous Met Soc China*[J], 2014, 24(7): 2366
- [10] Li Jiang, Lu Yiping, Yong Dong *et al. Intermetallics*[J], 2014, 44(1): 37
- [11] Sun Rui(孙 锐), Liu Xinwang(刘鑫旺), Li Cheng(李 橙) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色金属)[J], 2016, 36(3): 274
- [12] Karthik G M, Santanu G D, Janaki R *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 679(2): 193
- [13] Jithin Joseph, Tom Jarvis, Wu Xinhua *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2015, 633: 184
- [14] Molina J M, Narciso J, Weber L *et al. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*[J], 2008, 480(1-2): 483
- [15] Lu L, Lai M O, Ng C W. *Materials Science and Engineering A*[J], 1998, 252(2): 203
- [16] Hasselman D P H, Johnson L F. *Journal of Composite Materials*[J], 1987, 21(6): 508

Effect of Reinforcement Volume Fraction and Sintering Temperature on Thermal Conductivity of (AlSiTiCrNiCu)p/6061Al Composites

Zhu Dezhi, Qi Longfei, Ding Xia

(Guangdong Key Laboratory for Advanced Metallic Materials Processing, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: AlSiTiCrNiCu high-entropy alloy particles were used as the reinforcement to reinforce the aluminum alloy. Then the effect of the volume fraction of high-entropy alloy and the sintering temperature on the thermal conductivity of the composites was investigated. The result shows that the thermal conductivity of (AlSiTiCrNiCu)p/6061Al composites decreases with the increase of the volume fraction of AlSiTiCrNiCu particles, and the thermal conductivity of (AlSiTiCrNiCu)p/6061Al composites with reinforcement of 20% volume fraction is $61.6 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$, which is decreased by 52% compared to that of the matrix 6061Al alloy. When the reinforcement volume fraction is 10%, the thermal conductivity of the composites decreases with increasing the sintering temperature, and the thermal conductivity of the composites is $65.80 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ when the sintering temperature is 540 °C.

Key words: high entropy alloy; aluminum matrix composites; thermal conductivity; interface

Corresponding author: Zhu Dezhi, Ph. D., Associate Professor, School of Mechanical and Automobile Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, P. R. China, Tel: 0086-20-87113267, E-mail: zdzandy@126.com