

# TiB<sub>2</sub> 颗粒和 TiB 晶须混杂增强铜基复合材料 导电率有限元模拟

刘楠<sup>1,2</sup>, 刘圆聪<sup>1,2</sup>, 姜伊辉<sup>1,2</sup>, 曹飞<sup>1,2</sup>, 罗斌<sup>1,2</sup>, 梁淑华<sup>1,2</sup>

(1. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

(2. 陕西省电工材料与熔渗技术重点实验室, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 建立了 TiB<sub>w</sub>/Cu、(TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu、TiB<sub>2p</sub>/Cu 复合材料的三维细观结构有限元模型, 基于 ABAQUS 非耦合的热电分析理论, 通过有限元数值模拟方法揭示了复合材料微观结构特征参量与宏观导电性能之间的定量关系。结果表明: TiB<sub>2</sub> 颗粒体积分数为导电率主要影响因素, 随体积分数增大导电率逐步减小, 颗粒粒径大小对导电率影响不显著; TiB 晶须体积分数和晶须取向角为导电率主要影响因素, 晶须取向角平行于电流方向时导电率最好, 垂直于电流方向时的导电率最差。在颗粒晶须混杂增强复合材料中, 增强体体积分数和晶须取向角为导电率的主要影响因素, 增强体种类对导电率影响较小。本研究为颗粒晶须混杂增强铜基复合材料导电率计算提供了新的思路和方法, 为颗粒和晶须增强复合材料混杂设计提供依据。

**关键词:** 导电率; TiB<sub>2</sub> 颗粒; TiB 晶须; 铜基复合材料; 数值模拟

**中图分类号:** TB333

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2022)02-0559-07

颗粒增强铜基复合材料具有良好的强度和导电性和导热性, 广泛地应用于焊接电极、集成电路引线框架、电触头材料等部件<sup>[1-3]</sup>。铜基体中加入颗粒增强体提高其强度和硬度的同时, 导电率相应降低, 但是导电性能对铜基复合材料有特殊意义, 因此有必要探索铜基复合材料增强体特征参量与材料性能之间定量关系, 这对电力电子行业相关新型复合材料的参数选择、设计发展和性能优化具有重要价值<sup>[4-6]</sup>。

铜基复合材料的导电性与其组分相的导电性、组分相之间的占比有很大关系, 同时其导电率也与内部增强体含量, 增强体类型和分布形态等细观特征密切相关。在混杂增强铜基复合材料制备实验中, 保持 TiB<sub>2</sub> 颗粒增强体含量不变, 增加少量 TiB 晶须可显著提高复合材料力学性能<sup>[7-10]</sup>, 这为通过增加 TiB<sub>2</sub> 含量来提高复合材料力学性能提供了新思路, 但颗粒晶须混杂如何协同影响导电率的影响规律尚不清楚。

而目前针对颗粒晶须增强铜基复合材料电学性能的研究工作主要采用实验法和解析法 2 种。实验法通过对原位自生的复合材料增强体类型、尺寸、含量和分布等特征的调控可以获得理论上综合性能极佳的铜基复合材料。但是, 实验法有耗时耗力、周期长、成本高的缺点<sup>[11-14]</sup>, 同时实验中增强体特征参量交互、

协同影响复合材料的力学性能和导电率, 单纯依赖实验手段难以揭示各个参量的具体影响规律<sup>[15-17]</sup>。

同时, 研究复合材料的导电率一般采用简单的加权平均方法来进行计算<sup>[18,19]</sup>, 铜基复合材料的导电率理论解析模型大多基于圆形颗粒增强体, 仅考虑体积分数、各相导电率等特征参量, 而未考虑到实际中颗粒分布、颗粒尺寸、晶须取向等客观存在因素对材料导电的影响<sup>[20,21]</sup>。相比实验法和解析法, 有限元法可以更快更准确地建立接近于真实增强体形貌的颗粒、晶须模型, 在类型和尺度上更加精准操控, 可更为有效地分析颗粒、晶须对铜基复合材料导电率的影响以及两者的协同影响机制, 同时有限元法也有建模速度快、结果可视化、低成本和重复实验简便的特点。

本实验基于 ABAQUS 非耦合的热电分析理论, 通过有限元数值模拟方法揭示了复合材料微观结构特征参量与宏观导电性能之间的定量关系, 全面分析 TiB<sub>2</sub> 颗粒和 TiB 晶须的颗粒尺寸、种类和晶须取向等增强体特征对铜基复合材料导电率的影响规律。同时, 该研究方法为颗粒晶须混杂增强铜基复合材料导电率计算提供新的思路和方法, 对颗粒和晶须增强复合材料中增强相各参量的选择和设计提供了参考, 为面向电工领域缩短材料设计周期、开发制备新高导电率铜

收稿日期: 2021-09-03

基金项目: 国家自然科学基金 (51834009, 51974244, 51605382); 陕西省重点研发计划项目 (2020ZDLGY12-07)

作者简介: 刘楠, 男, 1983 年生, 博士, 西安理工大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710048, E-mail: liunan@xaut.edu.cn

基复合材料提供指导。

### 1 有限元模型的建立

基于随机序列吸附算法重构了颗粒晶须混杂复合材料三维微观模型,通过真实 TiB<sub>2</sub> 颗粒 TiB 晶须增强铜基复合材料 SEM 微观组织照片,提取了增强体的尺寸、形貌和微观几何特征,如图 1a 和 1b, 1d 和 1e 所示。TiB<sub>2</sub> 颗粒为粒径  $d_p=2\ \mu\text{m}$ 、长度  $l_p=2\ \mu\text{m}$  的六棱柱,如图 1c 所示; TiB 晶须为直径  $d_w=0.2375\ \mu\text{m}$ 、长径比为 10 的圆柱棒,如图 1f 所示。

通过随机吸附算法,建立了不同增强体大小、分布、

占比和含量的铜基复合材料细观有限元电学模型。由于有限元模型中增强体体积分数可以通过程序控制,建立了体积分数为 6% 单一纯晶须增强铜基复合材料三维模型<sup>[22]</sup>,如图 1g 所示; 体积分数 3% 颗粒和体积分数 3% 晶须的颗粒晶须混杂增强铜基复合材料三维模型,如图 1h 所示; 体积分数为 6% 的单一纯颗粒增强铜基复合材料,如图 1i 所示。如图 1h 显示上下电势面和加载方向,其中黑色构件为 TiB 晶须,灰白色构件为 TiB<sub>2</sub> 颗粒,黄色构件为铜基体。两段红色显示电流载荷加载接触面, A 面为指定的零电势面, B 面为电势施加面。铜基体材料和颗粒晶须增强体材料的性能参数见表 1。

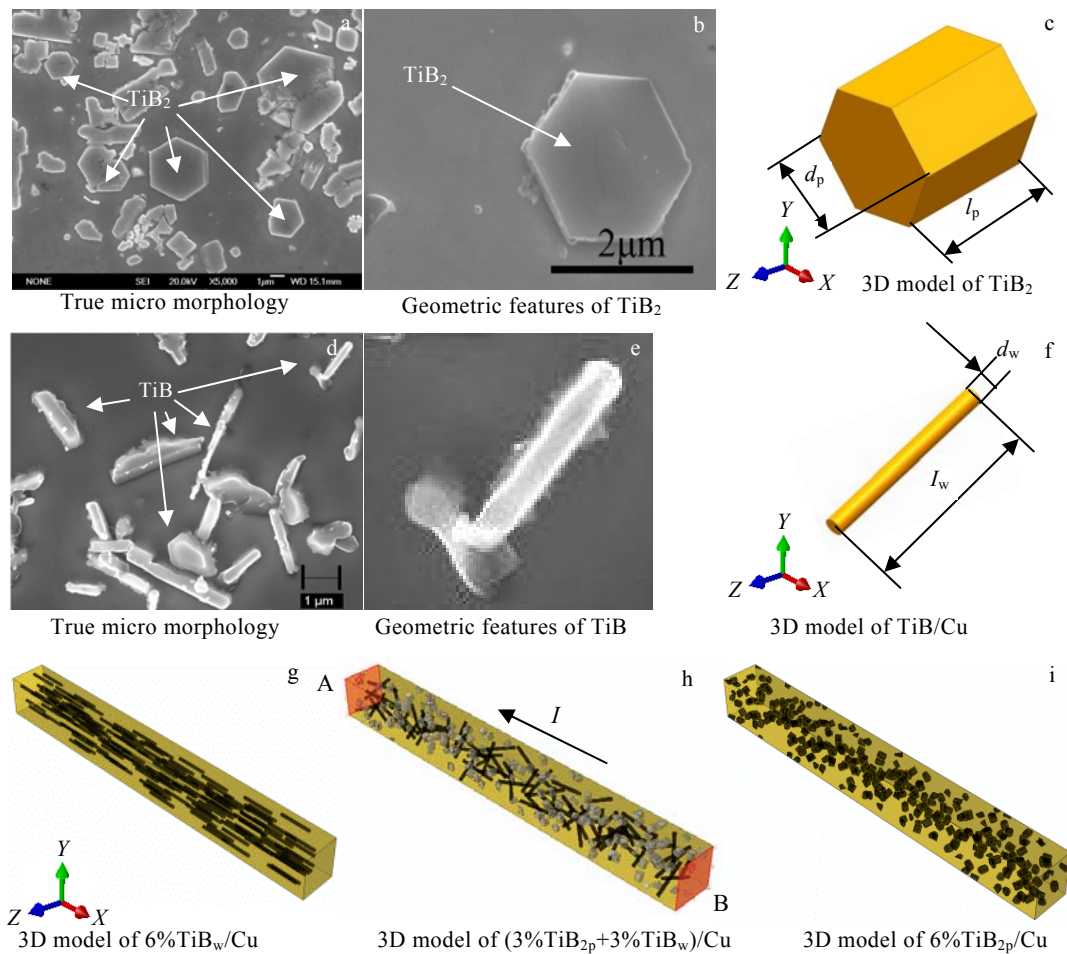


图 1 TiB<sub>2</sub> 颗粒和 TiB 晶须混杂增强铜基复合材料实际微观形貌转化为三维模型建模过程; TiB<sub>w</sub>/Cu 复合材料、(TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu 复合材料、TiB<sub>2p</sub> /Cu 复合材料的三维有限元模型

Fig.1 3D model generation process of (TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu composite with the true micro morphology (a~f); 3D finite element model of TiB<sub>w</sub>/Cu composite (g), (TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu composite (h) and TiB<sub>2p</sub>/Cu composite (i)

表 1 Cu 基体、TiB<sub>2</sub> 颗粒和 TiB 晶须性能参数

Table 1 Performance parameters of Cu matrix, TiB<sub>2</sub> particles and TiB whiskers

Material	Conductivity/%IACS	Density/g·m <sup>-3</sup>
Cu <sup>[7]</sup>	93.00	8.96
TiB <sub>2</sub> <sup>[23]</sup>	0.12	4.52
TiB <sup>[23]</sup>	0.05	4.50

## 2 导电率计算关键技术

### 2.1 非耦合的热电分析

焦耳热是当流经导体的电流耗散的能量被转化为热能时产生的。ABAQUS 标准为分析这类问题设立了一个完全耦合的热电过程: 耦合热电方程在节点上同时求解温度和电势。非耦合电学分析是通过从材料描述中省略热性质来实现的, 在这种情况下, 只有电势自由度在元素中被激活, 所有的传热效应都被忽略。指定因电流而产生的热能量, 焦耳定律把通过导体的电流所耗散的电能率描述为:

$$P_{ec} = JE = \frac{\partial \phi}{\partial x} \cdot \sigma^E \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (1)$$

这种能量作为体内热量释放的数值是  $n_v \cdot P_{ec}$ , 其中  $n_v$  是能量转换因子, 在材料定义中指定。假设所有的电能都转化为热量 ( $n_v=1.0$ ), 即焦耳热  $Q$ 。根据焦耳热公式:

$$Q = I^2 R t \quad (2)$$

式中,  $Q$  为焦耳热,  $J$ ;  $I$  为电流,  $A$ ;  $R$  为复合材料电阻,  $\Omega$ ;  $t$  为加载时间,  $s$ 。根据公式(2)可以计算出复合材料的电阻。模型设计时给定模型尺寸, 根据电阻率公式(3)和导电率公式(4), 可以求得复合材料的电阻率以及导电率。

$$\rho = \frac{RA}{l} \quad (3)$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho} \quad (4)$$

式中,  $A$  为垂直电流载荷方向截面积,  $m^2$ ;  $l$  为模型  $X$  方向上长度,  $m$ ;  $\rho$  为电阻率。  $\gamma$  为导电率, 电阻率的倒数。

### 2.2 载荷边界条件

默认情况下, 模型节点初始温度为零, 边界条件可以规定模型的一端节点电势和温度, 根据电势差计算的模型两端电压值, 电流方向即为从 B 面指向 A 面方向, 这里设置 A 面为零电势面。在 B 面上施加一个面电流密度载荷  $I$ , 大小为  $2 A/\mu m^2$ 。

## 3 模型可行性分析

金属基复合材料的电学性能受到增强体类型和含量的影响, 其中, 增强体含量的增加是颗粒晶须混杂增强复合材料导电率降低的主要因素。表 2 为本实验室不同质量分数 TiB<sub>2</sub> 颗粒和 TiB 晶须增强铜基复合材料 I、II、III、IV 导电率实际测量结果<sup>[4]</sup>。根据 4 组实验数据建立对应的不同质量分数的有限元模型, 计算结果与实验结果对比如图 2 所示。其中, 复合材料 I、

II、III、IV 实验与数值模拟导电率结果分别为  $87.9 \pm 3.1\%$  IACS、 $80.2 \pm 4.8\%$  IACS、 $62.2 \pm 5.4\%$  IACS、 $70.7 \pm 5.1\%$  IACS 和  $90.2\%$  IACS、 $88.9\%$  IACS、 $86.4\%$  IACS、 $86.5\%$  IACS, 4 组复合材料实验值与模拟结果导电率最小误差分别为 0.9%、4.5%、27.8%、14.1%。

文献[4]中, 低含量增强相的复合材料 I 和 II 在制备过程中, 原位反应进行比较充分, Cu 基体中未固溶 Ti 元素, 实验与模拟结果吻合良好。而较高含量增强相的复合材料 III 和 IV 在制备过程中, 原位反应未充分进行, 导致少量的 Ti 元素固溶到 Cu 基体中, 造成复合材料导电率急剧下降。本文提出的有限元模型中未考虑固溶合金元素含量对导电率的影响, 因此复合材料 III 和复合材料 IV 模拟结果误差达 27.8%和 14.1%。综上所述, 在实验完全反应的情况下, Cu 基体中无显著固溶元素, 所建立的导电率预测模型是准确和可靠的。

## 4 模拟结果

### 4.1 单一颗粒增强铜基复合材料导电率结果

首先研究了 TiB<sub>2</sub> 颗粒的粒径和体积分数对铜基复合材料导电率的影响规律。研究表明: 由于 TiB<sub>2</sub> 颗粒导电率低于 Cu, 降低复合材料致密度及基体连续性, 使电子散射几率增大, 进而影响电子在材料中的传导。

表 2 不同复合材料导电率实验结果

Table 2 Experimental results of electrical conductivity of different composites<sup>[4]</sup>

Sample	Theoretical concentration	Conductivity/%IACS
Composite I	0.7%TiB <sub>2p</sub> +0.6%TiB <sub>w</sub>	87.9±3.1
Composite II	1.0%TiB <sub>2p</sub> +0.9%TiB <sub>w</sub>	80.2±4.8
Composite III	1.4%TiB <sub>2p</sub> +1.2%TiB <sub>w</sub>	62.2±5.4
Composite IV	2.6 %TiB <sub>2p</sub>	70.7±5.1

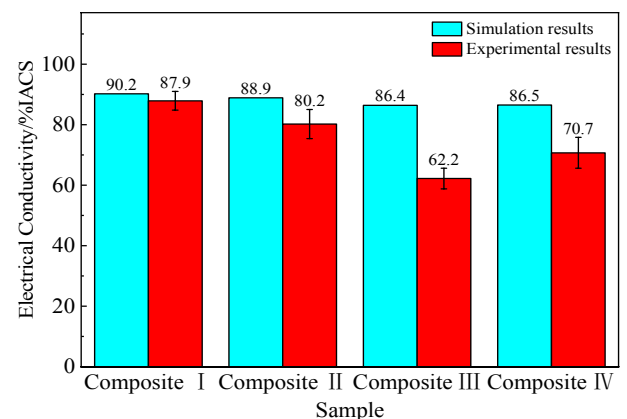


图 2 TiB<sub>2</sub> 颗粒和 TiB 晶须混杂增强铜基复合材料导电率模拟结果和实验结果对比

Fig.2 Comparison of experimental and simulation results of TiB<sub>2</sub> particle and TiB whisker-reinforced hybrid copper matrix composites

而由金属自由电子理论可知,颗粒间距的减小对导电率有减弱的作用;但粒径大小变化主要影响电子传导路径,对散射路径影响较小,难以通过影响材料致密度明显影响电子传导。随着 TiB<sub>2</sub> 体积分数的增加, TiB<sub>2</sub>/Cu 复合材料导电率逐渐下降;随着 TiB<sub>2</sub> 粒径的增加,对 TiB<sub>2</sub>/Cu 复合材料导电率影响不显著,如图 3 所示。

#### 4.2 单一晶须增强铜基复合材料导电率结果

探究铜基复合材料中 TiB 晶须含量和晶须在基体中的取向角 ( $\theta$ ) 2 个特征参量对铜基复合材料导电率的影响规律。结果表明:随着晶须含量增加,复合材料的导电性能逐渐降低;定义电流方向与晶须方向一致时,取向角  $\theta=0^\circ$ ,垂直时,  $\theta=90^\circ$ 。在  $\theta=0^\circ$  时,随着晶须含量的逐渐增加,导电率的下降速度比  $\theta=90^\circ$  时更快;随着晶须取向  $\theta$  从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  变化,复合材料的导电率逐渐降低,说明沿着晶须方向的导电率最好,垂直晶须方向的导电率最差,如图 4 结果所示。铜基复合材料中晶须的取向性不同,造成铜基复合材料微观组织和导电性能的各向异性。由于电子传输通道中晶须排列方向与电子传输的连续性和关联性密切相关,

当 TiB 晶须与电流方向轴向平行时,电子在垂直电流方向的导体中连续碰撞概率较少,电子弛豫时间较大,进而导电率较大。

#### 4.3 颗粒晶须混杂增强铜基复合材料导电率结果

在混杂增强铜基复合材料制备实验中,保持 TiB<sub>2</sub> 颗粒增强体含量不变,增加少量 TiB 晶须可显著提高复合材料力学性能<sup>[4]</sup>,这为通过增加 TiB<sub>2</sub> 含量来提高复合材料力学性能提供了新思路,但颗粒晶须混杂如何协同影响导电率的影响规律尚不清楚,本节建立了颗粒与晶须混杂增强铜基复合材料电学有限元模型,如图 5 所示,建立了纯晶须、纯颗粒以及颗粒晶须混杂增强铜基复合材料的有限元模型。颗粒晶须增强体总体积分数固定为 6%,其中,晶须体积分数为 0%、1%、2%、3%、4%、5%和 6%时对应的颗粒体积分数为 6%、5%、4%、3%、2%和 1%。得到的混杂增强铜基复合材料导电率模拟结果如图 6 所示。同时控制晶须取向角  $\theta$  为  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  和完全随机 3 种分布状态。在  $\theta=0^\circ$  时,随着晶须占比的增加,复合材料导电率逐渐增加;在  $\theta=90^\circ$  时,随着晶须占比的增加,复合材料导电率逐

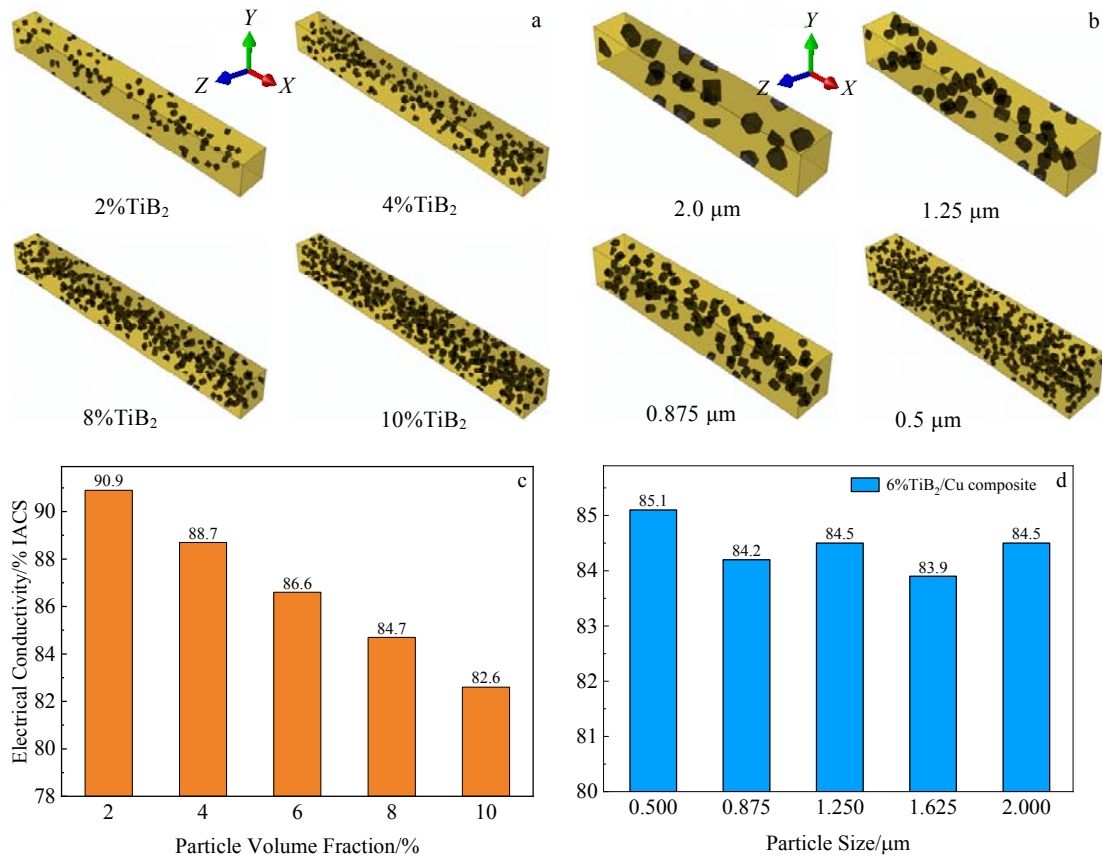


图 3 不同体积分数和不同颗粒尺寸下的单一 TiB<sub>2</sub> 颗粒增强铜基复合材料的模型及导电率模拟结果

Fig.3 Simulation results of model (a, b) and electrical conductivity (c, d) of copper matrix composites reinforced by single TiB<sub>2</sub> particle with different volume fractions and different particle sizes



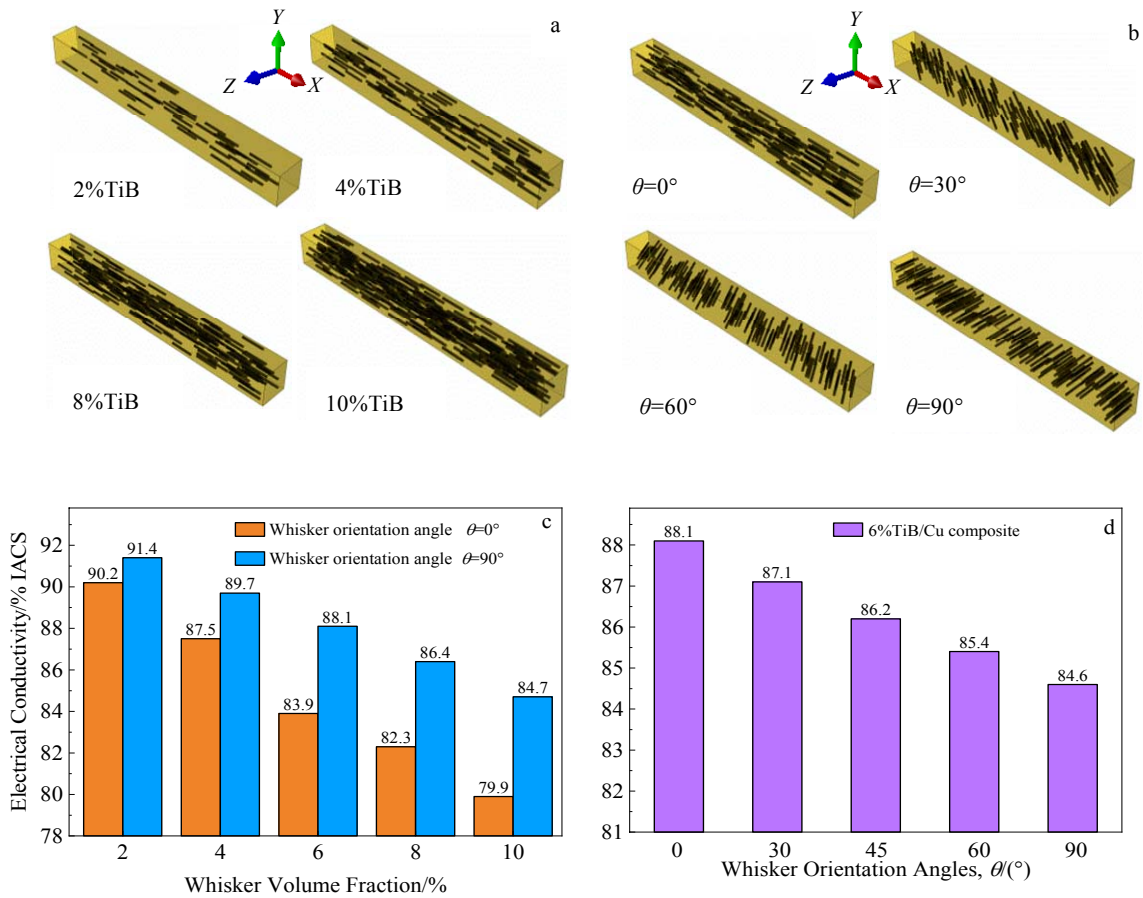


图 4 不同体积分数和不同晶须取向角下的单一 TiB 晶须增强铜基复合材料的模型及导电率模拟结果

Fig.4 Simulation results of the model (a, b) and electrical conductivity (c, d) of copper matrix composites reinforced by single TiB whisker with different volume fractions and different whisker orientation angles

渐下降；当晶须为随机分布状态时，颗粒、晶须占比对材料导电率影响不显著。这是因为当 TiB 晶须取向角为  $0^\circ$ ，晶须方向与电流方向轴向平行，电子在垂直电流方向的导体中连续碰撞概率较少，电子弛豫时间较大，复合材料导电率较高；当 TiB 晶须取向角为  $90^\circ$ ，晶须方向与电流方向轴向平行，电子在垂直电流方向的导体中连续碰撞概率较大，电子弛豫时间较小，复合材料导电率较小；当晶须为随机分布时，电子与垂直电流方向的导体部分发生碰撞，导电率处于二者之间。

在确定体积分数情况下，晶须取向角为  $0^\circ$  的纯晶须模型导电率大于纯颗粒增强铜基复合材料，二者均大于随机分布的颗粒晶须混杂增强铜基复合材料；晶须取向角为  $90^\circ$  的纯晶须增强复合材料导电率小于颗粒晶须混杂增强铜基复合材料，纯晶须增强复合材料与纯颗粒相差不显著；对于随机分布的颗粒晶须混杂增强铜基复合材料，不同占比的晶须和颗粒对导电率影响不显著。

综上所述，体积分数和晶须取向角对复合材料导

电率具有重要影响，增强体种类对影响较小，这是由于金属的导电主要依靠自由电子在基体中的运动，体积分数和晶须取向角主要影响材料的致密度和电子传导路径，通过影响导体中连续碰撞概率和电子弛豫时间进而影响导电率。

所建立的 TiB<sub>2</sub> 颗粒 TiB 晶须混杂增强铜基复合材料细观有限元电学模型，揭示了复合材料微观结构特征参量与宏观导电性能之间的定量关系。研究了单一颗粒、单一晶须和颗粒晶须混杂对复合材料导电率的影响；定量确定了含量、颗粒晶须混杂占比、不同晶须取向角等因素对复合材料导电率的影响规律。在下一步工作中，该电学模型将尝试考虑复合材料增强体-基体界面结构、基体中固溶合金元素含量、复合材料界面附近合金元素分布位错密度（冷加工量）、增强体导电率等因素对金属基复合材料导电性的影响，以更接近复合材料的实际加工状态下的导电率变化规律。

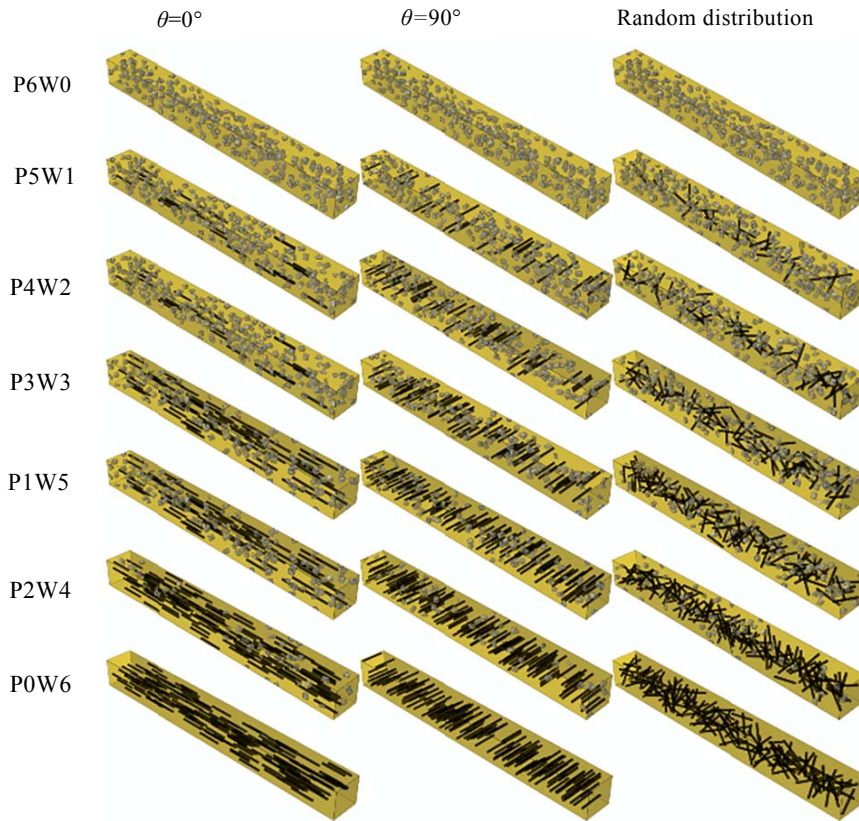


图 5 TiB<sub>w</sub>/Cu、(TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu 和 TiB<sub>2p</sub>/Cu 复合材料导电率预测模型

Fig.5 Electrical conductivity prediction models of TiB<sub>w</sub>/Cu, (TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu, and TiB<sub>2p</sub>/Cu

Note: P-Particle, W-Whisker, PxWy-the particles volume fraction is x% and the whisker volume fraction is y% in the hybrid reinforced copper matrix composites

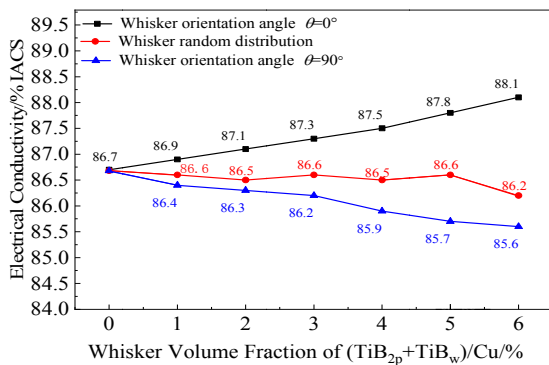


图 6 增强体总体积分数为 6% (TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu 基复合材料导电率模拟结果

Fig.6 Simulation results of electrical conductivity of (TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu matrix composites with total volume fraction of 6% (when the whisker volume fraction is 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5% and 6%, the corresponding particle volume fraction is 6%, 5%, 4%, 3%, 2% and 1%)

### 5 结 论

1) 对于单一颗粒增强铜基复合材料, TiB<sub>2p</sub>/Cu 导电率随 TiB<sub>2</sub> 颗粒体积分数的增加而降低; 不同粒径的 TiB<sub>2</sub> 颗粒对 TiB<sub>2</sub>/Cu 复合材料导电率影响不显著。

2) 对于单一晶须增强铜基复合材料, TiB<sub>w</sub>/Cu 导电率随 TiB 晶须体积分数的增加而降低; TiB 晶须取向角  $\theta$  从 0°到 90°复合材料的导电率逐渐降低, 沿着晶须方向的导电率最好, 垂直晶须方向的导电率最差。晶须增强体主要通过增大电子在垂直电流方向的导体中连续碰撞概率, 进而影响电子弛豫时间影响导电率。

3) 对于增强体为 6%的颗粒晶须混杂增强铜基复合材料, 晶须取向角平行于电流方向时, 导电率最高, 增强体体积分数和晶须取向角为其导电率主要影响因素。对于随机分布的颗粒晶须混杂增强铜基复合材料, 不同占比的晶须和颗粒对导电率影响不显著, 增强体种类对其影响较小。

## 参考文献 References

- [1] Habibi Asiyeh, Ketabchi Mostafa, Eskandarzadeh Mohammad *et al.* *Journal of Materials Processing Technical*[J], 2011, 211(6): 1085
- [2] Hosseini Sayed Abdollah, Manesh Habib Danesh. *Materials & Design*[J], 2009, 30(8): 2911
- [3] Yu Zhuli(于竹丽), Zhu Heguo(朱和国). *Materials Reports(材料导报)*[J], 2015, 29(S2): 345
- [4] Dai Chunshuang(戴春爽), Li Li(李丽). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2015, 44(11): 2808
- [5] Jia Lei(贾磊), Yue Mingjuan(岳明娟), Wang Chen(王琛) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2018, 47(5): 1567
- [6] Wang Xianhui(王献辉), Yang Hao(杨浩), Liang Shuhua(梁淑华) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2015, 44(11): 2612
- [7] Liang Shuhua, Li Weizhen, Jiang Yihui *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2019, 797: 589
- [8] Hong Changqing(洪长青), Han Jiecai(韩杰才), Zhang Xinghong(张幸红) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2007, 36(3): 546
- [9] Hong Changqing(洪长青), Han Jiecai(韩杰才), Zhang Xinghong(张幸红) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2006, 35(1): 47
- [10] Guo Xiuhua(国秀花), Song Kexing(宋克兴), Wang Xu(王旭) *et al.* *Special Casting and Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金)*[J], 2013, 33(11): 992
- [11] Xu Qiang(徐强), Zhang Xinghong(张幸红), Han Jiecai(韩杰才) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2004(10): 1072
- [12] Li Guohui(李国辉), Liu Yong(刘勇), Guo Xiuhua(国秀花) *et al.* *Acta Materiae Compositae Sinica(复合材料学报)*[J], 2018, 35(3): 616
- [13] Guo Xiuhua(国秀花), Song Kexing(宋克兴), Li Guohui(李国辉) *et al.* *Acta Materiae Compositae Sinica(复合材料学报)*[J], 2019, 36(7): 1684
- [14] Guo Xiuhua(国秀花), Li Huanran(林焕然), Song Kexing(宋克兴) *et al.* *Acta Materiae Compositae Sinica(复合材料学报)*[J], 2020, 37(10): 2526
- [15] Zhang Jianping(张剑平), Ai Yunlong(艾云龙), Zuo Hongyan(左红艳) *et al.* *Special Casting and Nonferrous Alloys(特种铸造及有色合金)*[J], 2012, 32(5): 469
- [16] Guo Xiuhua, Yang Yubo, Song Kexing *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2021, 11: 1469
- [17] Xia Meng(夏梦), Feng Yi(凤仪), Tian Pei(田沛) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2017, 46(11): 3260
- [18] Zhang Xiangfeng(张祥峰), Guo Xiuhua(国秀花), Song Kexing(宋克兴) *et al.* *Acta Materiae Compositae Sinica(复合材料学报)*[J], 2020, 37(10): 2534
- [19] Long Fei, Guo Xiuhua, Song Kexing *et al.* *Journal of Materials Research and Technology*[J], 2020, 9(4): 7989
- [20] Guo Xiuhua, Song Kexing, Xu Wang *et al.* *Materials Science and Technology*[J], 2020, 36(15): 1685
- [21] Zhang Xiangfeng, Guo Xiuhua, Song Kexing *et al.* *Materials Today Communications*[J], 2021, 26: 102153
- [22] Liu Nan, Li Qian, Jiang Yihui *et al.* *Computational Materials Science*[J], 2021, 195(C): 110492
- [23] Ravi Chandran K S, Panda K B, Sahay S S. *JOM*[J], 2004, 56(5): 42

Simulation of Electrical Conductivity of (TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu Composites

Liu Nan<sup>1,2</sup>, Liu Yuancong<sup>1,2</sup>, Jiang Yihui<sup>1,2</sup>, Cao Fei<sup>1,2</sup>, Luo Bin<sup>1,2</sup>, Liang Shuhua<sup>1,2</sup>

(1. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Electrical Materials and Melting Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** Three-dimensional meso-structural finite element models of TiB<sub>w</sub>/Cu, (TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu and TiB<sub>2p</sub>/Cu composites were built. Based on the ABAQUS uncoupled thermo-electric analysis theory, the quantitative relationship between the microstructure characteristic parameters and the macroscopic electrical conductivity of the composites was revealed by simulation method. The results show that the volume fraction of TiB<sub>2</sub> particles is the main factor affecting the electrical conductivity, and the electrical conductivity gradually decreases with the increase of the volume fraction, while the particle size has no significant effect on the electrical conductivity. The volume fraction and the orientation angle of TiB whisker are the main factors affecting the electrical conductivity. When the whisker orientation angle is parallel to the current direction, the electrical conductivity is the best, and when the whisker orientation angle is perpendicular to the current direction, the electrical conductivity is the worst. In the (TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu composites, the volume fraction of the whisker and the whisker orientation angle are the main factors affecting the electrical conductivity, and the type of the whisker has little effect on the conductivity. This paper provides a new idea and method for the electrical conductivity prediction of (TiB<sub>2p</sub>+TiB<sub>w</sub>)/Cu composites, and provides a basis for the hybrid design of the composite with particles and whiskers.

**Key words:** electrical conductivity; TiB<sub>2</sub> particles; TiB whisker; copper matrix composites; simulation

Corresponding author: Liang Shuhua, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P. R. China, E-mail: liangsh@xaut.edu.cn