复合材料学报
Acta Materiae Compositae Sinica

第 37 卷 第 10 期 10 月 2020 年
Vol. 37 No. 10 Oct 2020

DOI：10.13801/j.cnki.fhclxb.20200224.003

不同粒径 TiB_2/Cu 复合材料热传导模拟与实验

张祥峰，国秀花*，宋克兴，冯江，林焕然，王旭
（河南科技大学 材料科学与工程学院，洛阳 471023）

摘 要：采用 ANSYS 对不同粒径 TiB_2/Cu 复合材料热传导过程进行模拟。采用粉末冶金法制备了不同粒径 TiB_2 增强的 Cu 复合材料，采用 LINSEIS LFA1600 激光导热仪测试了室温至 280℃ 下的 TiB_2/Cu 复合材料热传导性能变化，并与模拟结果进行对比。结果表明：热导率模拟结果与实验结果吻合较好。在 50~200℃ 之间，复合材料热导率变化不大，在 6%~9% 范围内波动。200℃ 之后，模拟值与实验值均呈现出随温度升高而增大的趋势，且吻合度较高。这是由于温度低于 200℃ 时，在模拟过程中未考虑材料界面处两相不同热膨胀系数的影响，导致模拟值与实验值有较大的差异。当温度高于 200℃ 时，模拟值和实验值吻合程度趋于稳定。在 200℃ 时，由于两相热膨胀系数的影响，复合材料内部界面处等效应力大于 Cu 基体屈服强度，使其发生塑性变形，从而引起热导率发生较大幅度变化。此外，热导率随着 TiB_2 粒径的增大呈现出先提高后降低的趋势，在 10 μm 时达到最大。这是由于当颗粒直径小于临界平均直径时，颗粒直径的增大会减少界面数量，从而降低界面热阻。当颗粒直径大于临界平均直径时，平均自由程 l 的急剧增加导致热导率降低。

关键词：TiB_2/Cu 复合材料；ANSYS 有限元分析；不同粒径；热导率；热膨胀系数
中图分类号: TB331 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2020)10-2534-09

Thermal conduction simulation and verification of TiB_2/Cu composites with different particle sizes

ZHANG Xiangfeng , GUO Xiuhua* , SONG Kexing , FENG Jiang , LIN Huanran , WANG Xu
(College of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: ANSYS was used to simulate the thermal conduction process of TiB_2/Cu composites with different TiB_2 particle sizes. The TiB_2/Cu composites with different TiB_2 particle sizes were prepared by powder metallurgy. LINSEIS LFA1600 laser thermal conductivity instrument was used to determine the thermal conductivity of the TiB_2/Cu composites ranging from room temperature to 280℃, and the measured values were compared with the simulation results. The simulation results are in good agreement with the measured values. In the range of 50-200℃, the thermal conductivities of the TiB_2/Cu composites fluctuate in the range of 6%-9%. When the temperature is above 200℃, both the simulated results and the measured values increase with the increase of temperature, and they match well with each other. This is because the large difference of their thermal expansion coefficients in the interface between TiB_2 and Cu below 200℃ is not considered in the simulation process. When the temperature is above 200℃, the simulation results have good accordance with the measured values. At 200℃, due to the influence of two-phase thermal expansion coefficients, the equivalent stress at the internal interface of the composite is larger than the yield strength of the Cu matrix, thus causing plastic deformation, which leads to a significant change in the thermal conductivity. In addition, the thermal conductivity increases and then decreases with the increase of particle size, and reaches its maximum value at 10 μm. This is because when the particle diameter is less than the

收稿日期：2019-11-06; **录用日期**：2020-01-09 ; **网络首发时间**：2020-02-25 10:35:22
网络首发地址：https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200224.003
基金项目：国家自然科学基金 (51605146; U1502274); 河南省高等学校青年骨干教师培养计划项目 (2018GGJS045); 中国博士后基金 (2018 M632769); 河南省“创新型科技团队”计划 (182101510003)
通信作者：国秀花, 高级工程师, 研究方向为载流摩擦高性能铜基复合材料设计及其磨损机制 E-mail: guoxiuhua@haust.edu.cn

引用格式：张祥峰, 国秀花, 宋克兴, 等. 不同粒径 TiB_2/Cu 复合材料热传导模拟与实验 [J]. 复合材料学报, 2020, 37(10): 2534-2542.
ZHANG Xiangfeng, GUO Xiuhua, SONG Kexing, et al. Thermal conduction simulation and verification of TiB_2/Cu composites with different particle sizes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(10): 2534-2542(in Chinese).

critical average diameter, the increased particle diameter reduces the number of interfaces, thus reducing the interfacial thermal resistance. When the particle diameter is larger than the critical mean diameter, the mean free path l greatly increases and the thermal conductivity reduces.

Keywords: TiB_2/Cu composite; ANSYS finite element analysis; different particle sizes; thermal conductivity; thermal expansivity

颗粒增强 Cu 复合材料具有高强度、高传导性、耐蚀性、减磨耐磨性等优点，在交通运输、电子通讯等领域发挥着重要作用[1-3]。近年来，随着我国高速铁路、高压开关等行业的迅速发展，Cu 基材料在载流摩擦副中得到大量应用，例如各种轨道运输弓网系统的电力线/滑板、高压开关动/静触头、电气控制系统中的各种控制插接件等[4-5]。对于以上工况服役的 Cu 基复合材料来说，载流条件下的高温是加剧磨损的关键因素。电流的存在会使材料表面温度急剧升高，从而导致 Cu 基材料的失效。因此，摩擦副材料的热传导性能直接影响着载流摩擦副的可靠稳定性，在材料设计阶段需要特别考虑复合材料的热传导性能[6]。

TiB_2 颗粒具有强度高、耐磨性好、热膨胀系数低、传导性能优良等特点，是一种在摩擦磨损领域有着潜在应用价值的复合材料增强相[7]。但对 TiB_2/Cu 复合材料的研究主要集中在材料制备、力学性能及耐磨性能等方面，对其热传导性能研究较少[8-9]。本文采用 ANSYS 有限元分析软件对不同粒径的 TiB_2 增强的 Cu 基复合材料的热传导性能进行模拟。同时采用粉末冶金法制备了 2、10、50 μm 的 TiB_2/Cu 复合材料，并使用 LINSEIS LFA1600 激光导热仪对制备的复合材料在 50℃、100℃、150℃、200℃、250℃ 和 280℃ 的热传导性能进行了测试，与模拟结果进行对比，以期为高性能 Cu 基复合材料的设计提供理论依据。

1 TiB_2/Cu 复合材料有限元模拟依据与模型建立

1.1 有限元模拟依据

热导率的测量方式根据不同的加热及感温方式可以分为两种：接触式测量 (热桥法、瞬态电热 (TET) 法、稳态法、谐波法) 和非接触式测量 (闪光法、拉曼法、时域热反射 (TDTR) 法、光声法)。其中，无需考虑材料导电率、没有接触电阻的闪光法 (激光闪射法) 被广泛用于测量几十微米至几毫米的复合材料[10-18]。其测量原理如下：在一定温度下，激光源瞬间发射一束光脉冲，均匀照射于样品下表面，使其吸收光能后温度瞬时升高。此表面作为热端将能量以一维热传导方式向冷端 (上表面) 传递。同时使用红外温度检测仪连续测量样品上表面中心部位的温升过程。过程示意图如图 1 所示。然后，通过计量温升过程中的半升温时间 t_{50}(定义为在接受光脉冲照射后，样品上表面温度升高到最大值一半所需时间，或称 $t_{1/2}$) 和下式计算得到样品在温度 T 下的热导率：

$$\alpha = \left(0.1388 \times d^2\right)/t_{50} \tag{1}$$

$$\lambda = \alpha \times \rho \times C_p \tag{2}$$

式中：α 为热扩散系数；d 为样品厚度；λ 为热导率；ρ 为样品密度；C_p 为样品比热容。本文数值模拟过程是基于激光闪射法展开的。

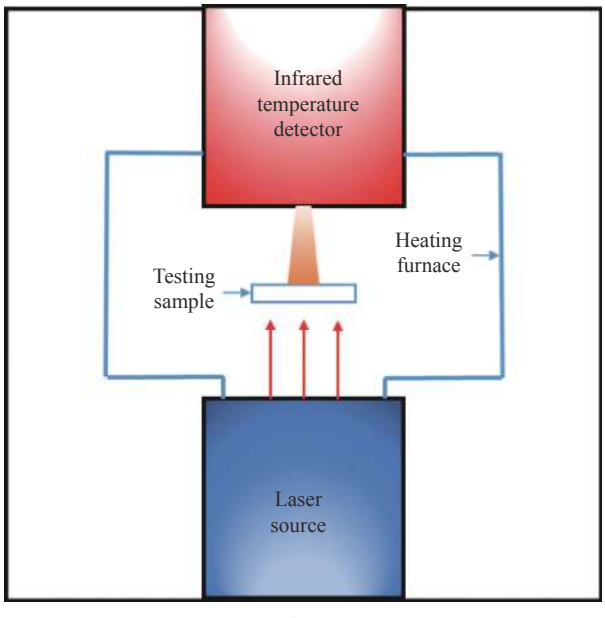


图 1 激光闪射法过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of laser flashing process

1.2 有限元模型建立

本文利用 ANSYS 软件中 APDL 参数化有限元分析技术，建立了 TiB_2 球形颗粒均匀随机分布于 Cu 基体中的 TiB_2/Cu 复合材料有限元模型。模型中 Cu 基体和 TiB_2 颗粒的热导率分别设定为 377 W/(m·K) 和 25 W/(m·K)[19-20]。由于 ANSYS 软件容差限制，设定模拟对象中增强体颗粒数量为 15 个。基于实际热导率测量试样尺寸为 Φ 12.6 mm×2.6 mm，当 TiB_2 颗粒粒径分别为 2、10、50 μm 时，模拟对象尺

寸依次为 Φ20 μm×8 μm、Φ 99 μm×41 μm、Φ 493 μm×206 μm。

在理想条件下，激光热导仪测量热导率时使用的光脉冲宽度接近于无限小，即下表面可视为恒温边界。同时，热量在样品内部的传导过程视为由下表面至上表面的一维传热，不存在横向热流，也不存在热损耗 (即外部测量环境为理想的绝热条件)。因此，将侧表面视为理想的绝热边界。由于所模拟的对象均为曲面，故采用自由网格划分。整体模型及有限元模型示意图如图 2 所示。

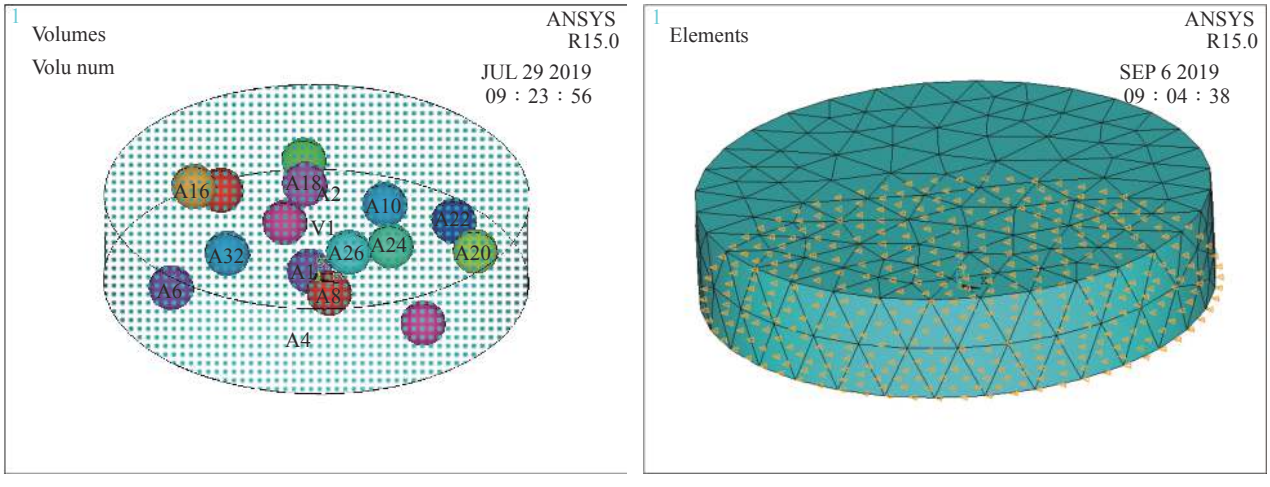


图 2　TiB_2/Cu 复合材料整体模型及有限元模型

Fig. 2　Integral model and finite element model of TiB_2/Cu composites

2　TiB_2/Cu 复合材料热导率理论预测模型

为了开发出具有优良热传导性能的金属基复合材料，国内外学者做了大量研究来建立复合材料热导率预测模型。其中最经典的模型为 Maxwell-Eucken 模型，但其只简单地考虑了增强颗粒体积分数对颗粒增强金属基复合材料热导率的影响，并未涉及到增强颗粒粒径变化对热导率的影响。Hasselman and Johnson 模型是目前颗粒增强金属基复合材料领域应用最广泛的理论预测模型。与 Maxwell 模型和 Rayleigh 模型相比，Hasselman and Johnson 模型不仅包含了增强颗粒粒径的变化，还考虑了增强颗粒与基体之间界面的存在。故本文使用 Hasselman and Johnson 模型对不同颗粒粒径的 TiB_2/Cu 复合材料热导率进行理论预测，并使用其结果与模拟值进行对比分析。Hasselman and Johnson 模型表达式[21]：

$$\lambda_c=\lambda_m\left[\frac{2\left(\lambda_p/\lambda_m-\lambda_p/ah_c-1\right)V_p+\lambda_p/\lambda_m+2\lambda_p/ah_c+2}{\left(1-\lambda_p/\lambda_m+\lambda_p/ah_c\right)V_p+\lambda_p/\lambda_m+2\lambda_p/ah_c+2}\right] \tag{3}$$

式中：λ_c、λ_m、λ_p 分别表示复合材料、基体和增强体的热导率，对于 TiB_2/Cu 复合材料而言，λ_m、λ_p 分别为 377 W/(m·K)、25 W/(m·K)；V_p 为增强体的体积分数；a 为增强体颗粒直径；h_c 为界面热传导率，取 300 W/(m·K)[22]。

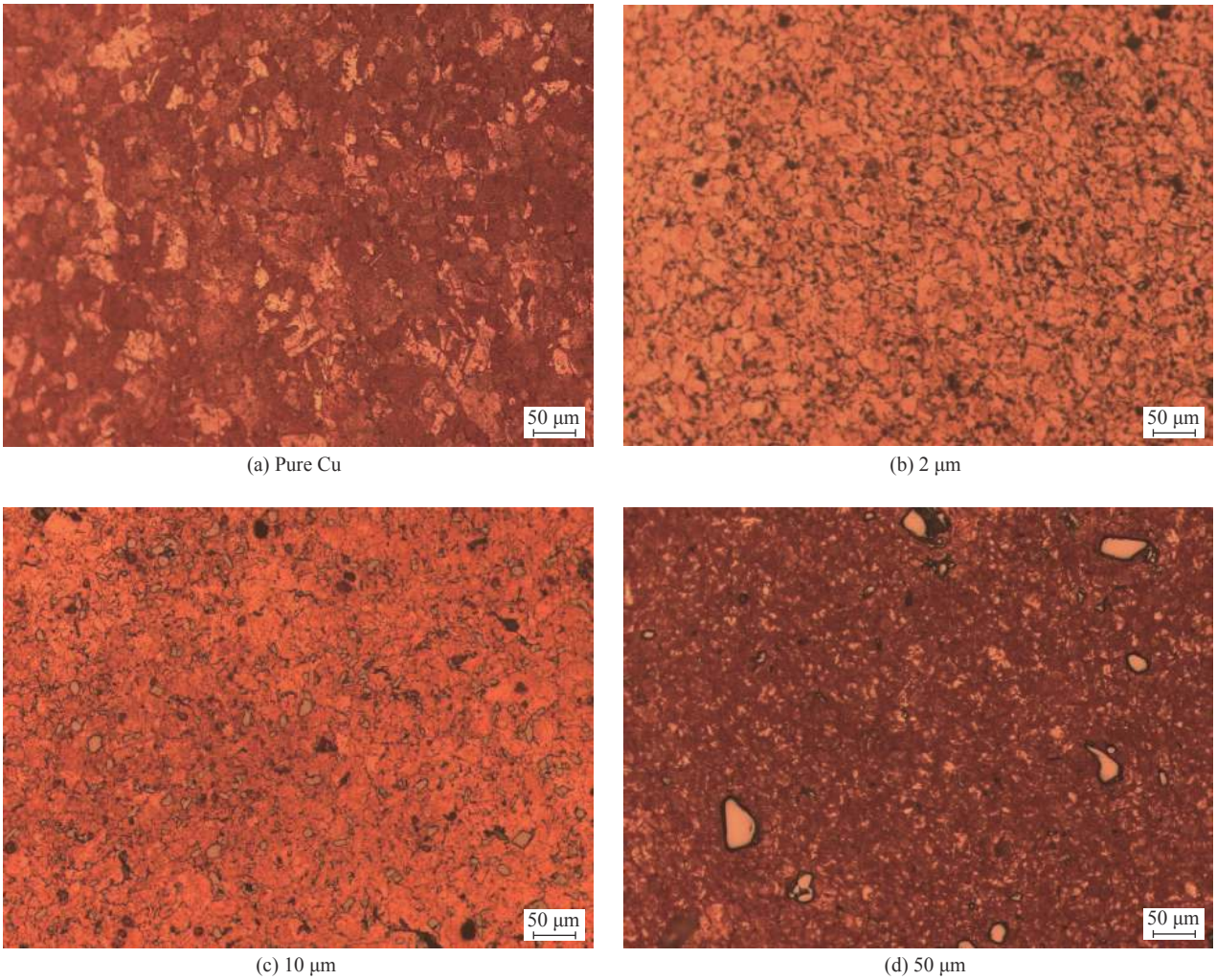
3　模拟结果验证与分析

3.1　TiB_2/Cu 复合材料的制备与微观组织

为验证有限元模拟结果，本文采用粉末冶金法制备不同粒径的 TiB_2/Cu 复合材料。其中 TiB_2 颗粒总体积分数为 5vol%，粒径分别为 2 μm、10 μm、50 μm。材料制备过程见文献 [23]。图 3 为不同粒径的 TiB_2/Cu 复合材料的微观组织。可以看出，TiB_2 颗粒较均匀地分布在 Cu 基体中，在增强体颗粒与 Cu 基体之间既不润湿又不会发生反应的前提下，其界面结合较好、组织致密，没有明显缺陷存在。对制备的不同粒径的 TiB_2/Cu 复合材料进行热导率检测，并将实验结果与模拟结果进行对比分析。

3.2　不同温度下 TiB_2/Cu 复合材料热导率的模拟结果与分析

图 4 为温度分别为 100℃、200℃、280℃ 时，TiB_2 粒径为 2 μm 的 TiB_2/Cu 复合材料热导率模拟温度分布云图和温度梯度分布图。将模拟出的温度梯度分布图中的 t_{50} 提取后代入式 (1)、式 (2) 计算得到 TiB_2/Cu 复合材料热导率模拟值，并选用修正系数为 2.3。将模拟计算结果与实验结果进行对比，如图 5 所示。可知，TiB_2/Cu 复合材料热导



(a) Pure Cu (b) 2 μm (c) 10 μm (d) 50 μm

图 3 纯 Cu 和不同 TiB_2 粒径的 TiB_2/Cu 复合材料的显微组织

Fig. 3 Microstructure of pure Cu and TiB_2/Cu composites with different TiB_2 particle sizes

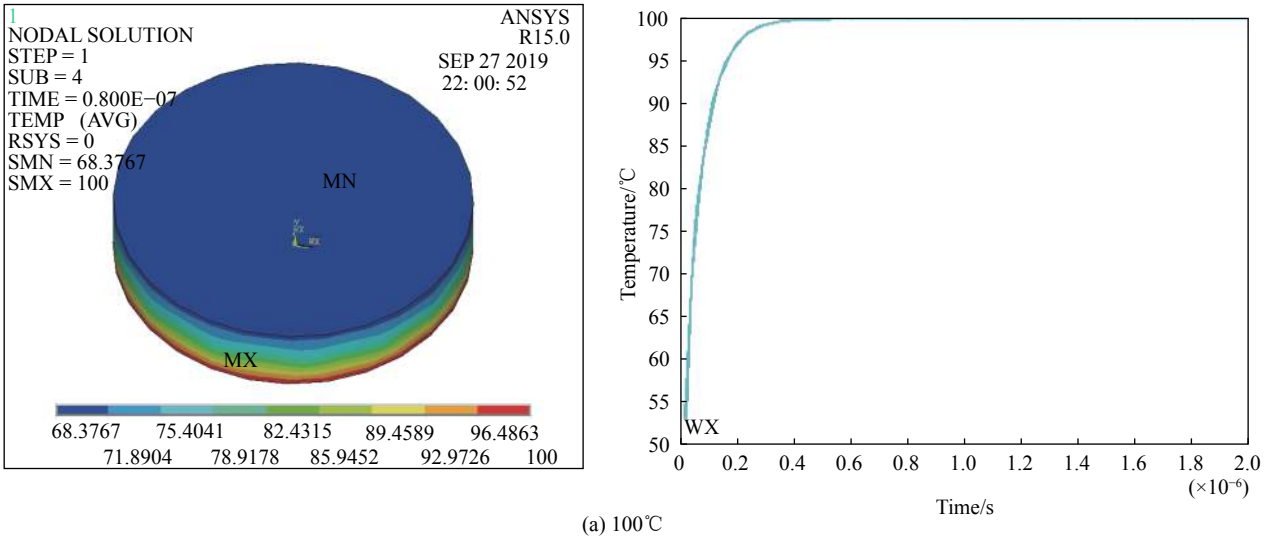
率模拟结果与实验结果基本吻合，在 50~200℃ 之间，复合材料热导率处于小范围波动状态 (波动范围为 6%~9%)。200℃ 之后，模拟值与实验值均呈现出随温度升高而增大的趋势，且吻合度较高。

研究表明[24]，固体中热传导的载体为电子、声子、光子等，其总热导率 λ 由各种载体的热导率叠加而成，如下式所示：

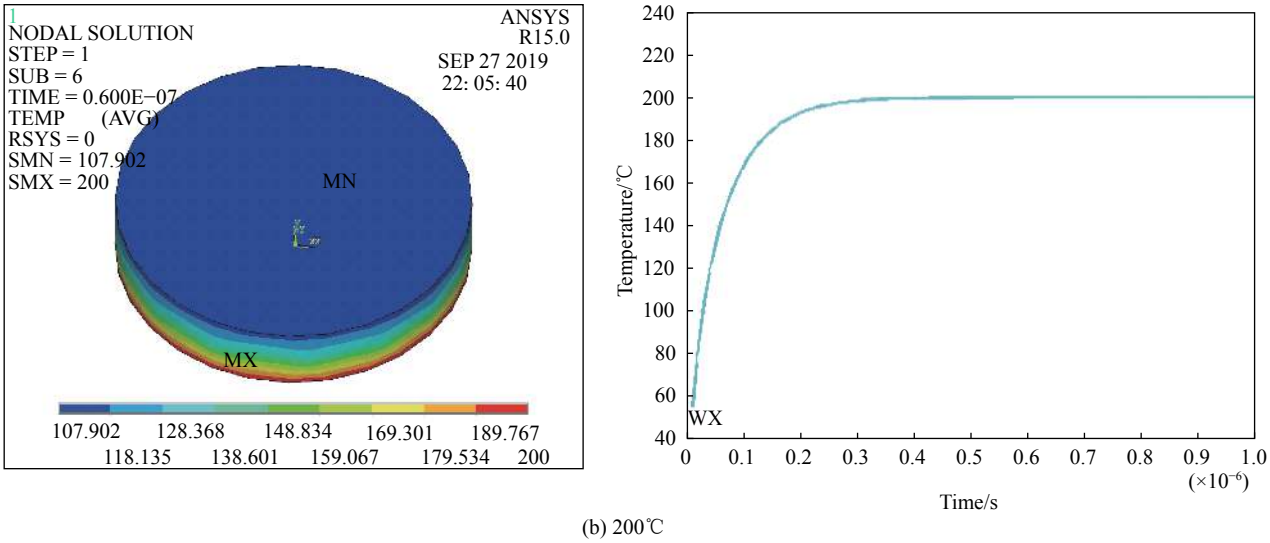
$$\lambda = \frac{1}{3}\sum_i C_i v_i l_i \tag{4}$$

其中：i 为导热载体的类型；C_i 为各种导热载体的单位体积比热；v_i 为导热载体的速度；l_i 为平均自由程。在金属材料中，热量的传递主要是通过自由电子进行的，其导热能力通常是高于声子的。而在陶瓷材料中，发挥主要作用的则是声子。因此，在陶瓷颗粒增强金属基复合材料中，电子和声子共同承担着传递热量的责任。

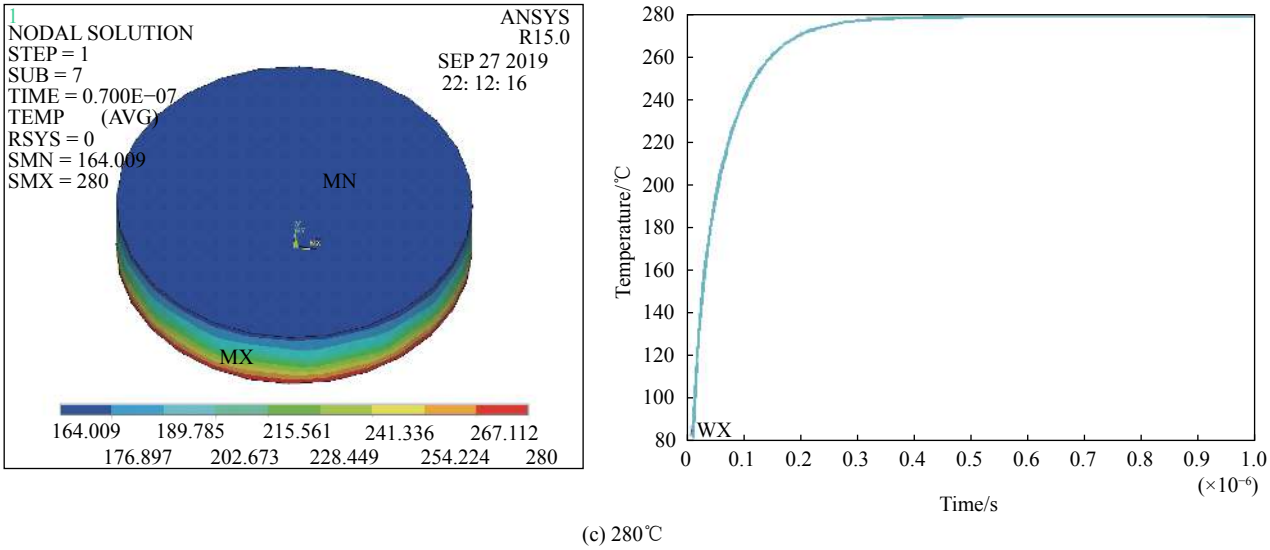
在温度较低时，复合材料主要以声子导热为主。由式 (4) 可知，较低温度区间内对热导率起决定性因素的有：声子热容 C、声子平均速度 v 和声子平均自由程 l。其中，声子平均速度 v 通常可视为常数，声子热容与温度 T 之间呈正比。低温下 l 值的变化范围不大，处于晶粒线度与晶格间距值之间。同时颗粒与基体之间两相结合界面的存在，会对声子的运动产生影响。如图 5 所示，当温度为 50~200℃ 时，复合材料的热导率在小范围内波动。这是由于模拟过程中未考虑界面处两相不同热膨胀系数的影响，模拟值与实验值差值相对较大，在 6%~9% 的范围内波动。随着温度的升高，声子平均自由程 l 减小，热容 C 仍与温度成正比。此时，相较于平均自由程 l 的减小，热



(a) 100℃



(b) 200℃



(c) 280℃

图 4　不同温度下 2 μm TiB_2/Cu 复合材料热导率模拟结果及温度梯度分布图

Fig. 4　Simulation results of thermal conductivity and temperature gradient profiles of 2 μm TiB_2/Cu composites with different temperatures

容 C 的增大将会产生更大的影响。如图 5 所示，在 200℃ 之后热导率呈现出随温度升高而增大的趋势。

此外，根据 Mises 屈服准则，当质点的等效应力 σ_e 超过基体的屈服应力时 (Cu 基体的屈服应力为 60 MPa)，在界面处将产生塑性变形[25]。颗粒增强 Cu 基复合材料的界面应力 P 和等效应力 σ_e 如下式所示：

$$P=\frac{\left(\partial_m-\partial_p\right)\Delta T}{\frac{0.5(1+\nu_m)+(1+2\nu_m)}{E_m\left(1-V_p\right)}+\frac{V_p\left(1-2\nu_p\right)}{E_p}} \tag{5}$$

$$\sigma_e=\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{P^2\frac{0.5\frac{a^6}{r^6}-3V_p\frac{a^3}{r^3}+6V_p{}^2}{\left(1-V_p\right)^2}} \tag{6}$$

相关计算结果如表 1 所示。可以看出，界面应力值和界面处等效应力皆随温度升高而增加。由文献 [25] 可知，当等效应力值超过 60 MPa 时 (Cu 基体的屈服应力)，Cu 基复合材料将发生塑性变形。从表 1 还可以看出，TiB_2/Cu 复合材料等效应力值将在 200℃ 时达到 65.2 MPa，导致塑性变形的产生。如图 5 所示，复合材料的热导率曲线在 200℃ 时发生交叠变化，这是由于热膨胀系数的变化反映了增强体颗粒对 Cu 基体热膨胀的约束作用。由于 Cu 基体和 TiB_2 颗粒热膨胀系数的差异，在加热到 200℃ 时将引起 Cu 基体的塑性变形，从而产生相当大的内应力。其中部分内应力以拉应力的形式存在于增强体颗粒上，增大了其表面面积。由声子边界散射现象可知，声子与增强体颗粒边界处的碰撞将显著增多，声子的平均自由程 l 因此减小[26]。由式 (4) 可知，平均自由程 l 的减小，会造成热导率实验值在 200℃ 时呈下降趋势。而模拟过程中未考虑 Cu 基体的屈服应力，热导率模拟值不会在 200℃ 时呈下降趋势。

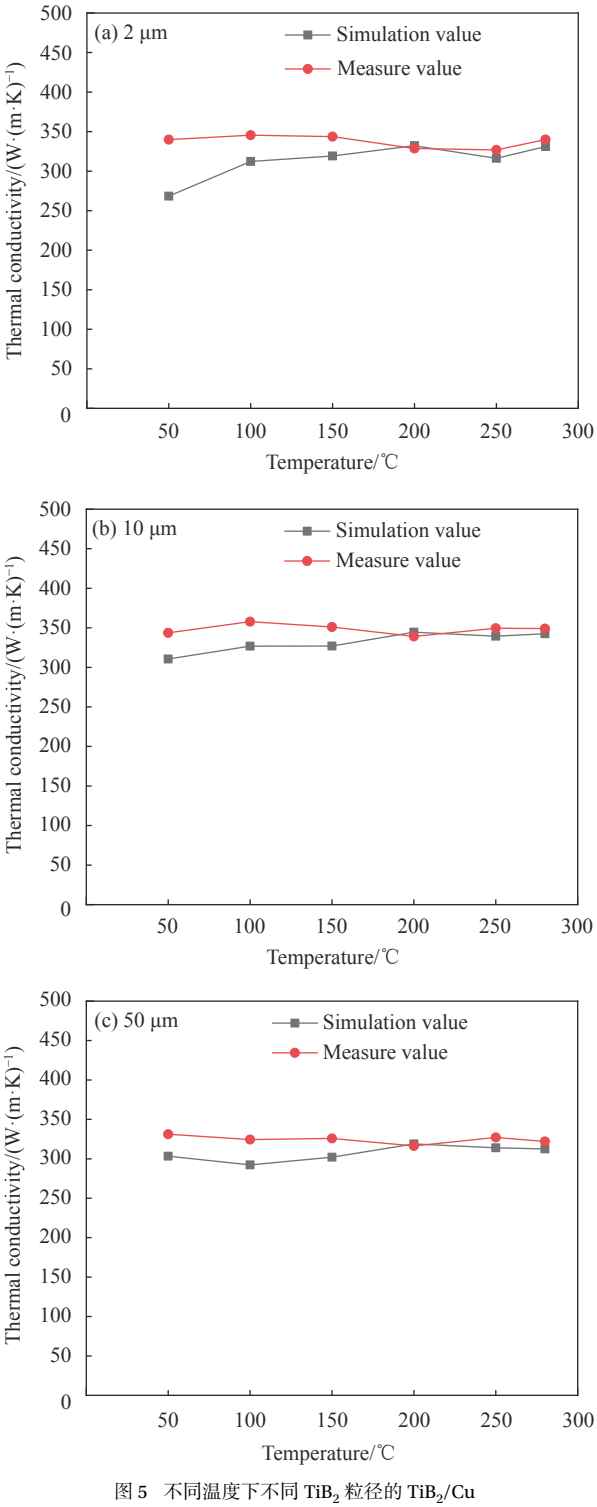


图 5 不同温度下不同 TiB_2 粒径的 TiB_2/Cu 复合材料热导率模拟值与实验值

Fig. 5 Simulated and experimental values of thermal conductivities of TiB_2/Cu composites with different TiB_2 particle sizes at different temperatures

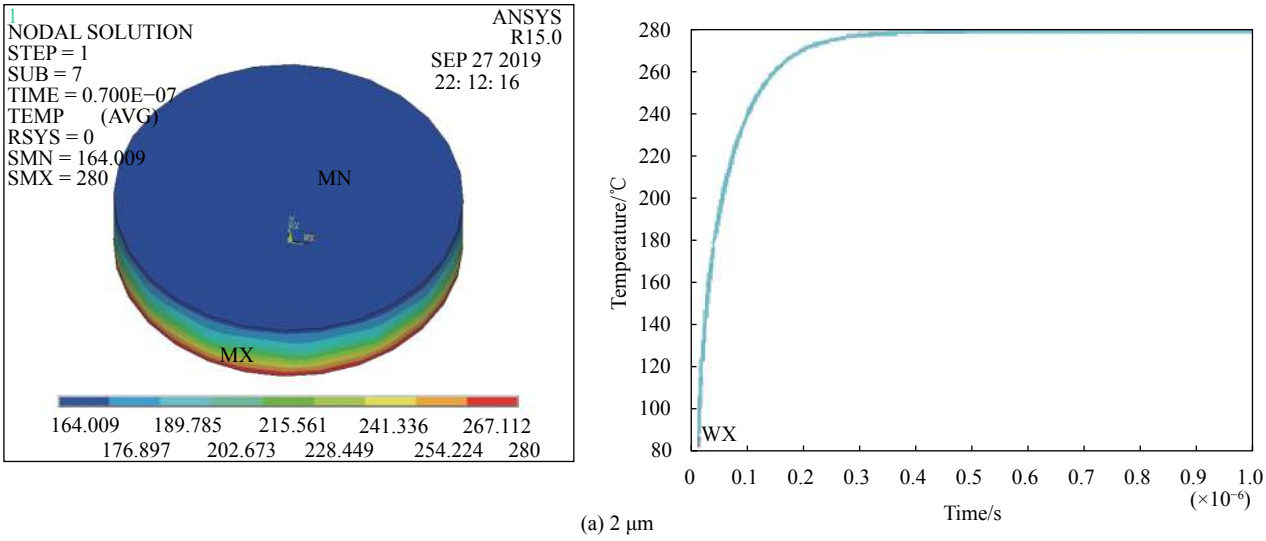
表 1 TiB_2/Cu 复合材料内部界面应力 P 与界面处等效应力 σ_e 的计算值

Table 1 Calculated stress P and equivalent stress σ_e at the interface in TiB_2/Cu composites

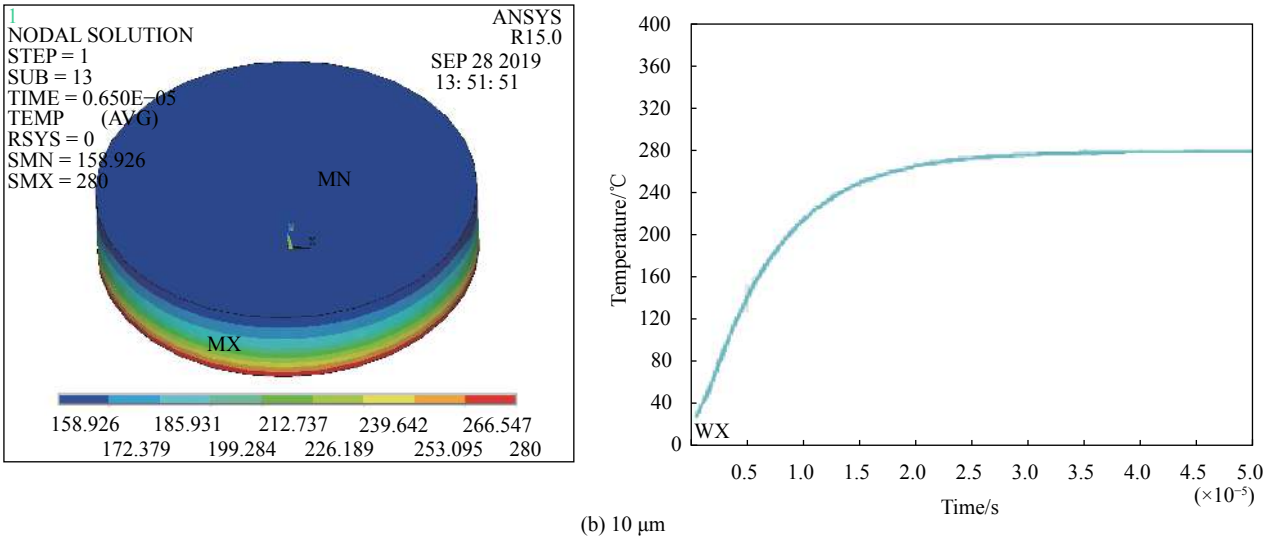
Tempurature/℃	50	100	150	200	250	280
Interfacial stress/MPa	20.7	62.1	103.5	144.9	186.3	211.1
σ_e/MPa	9.3	27.9	46.5	65.2	83.8	94.9

3.3 不同粒径 TiB_2/Cu 复合材料热导率的模拟结果及验证

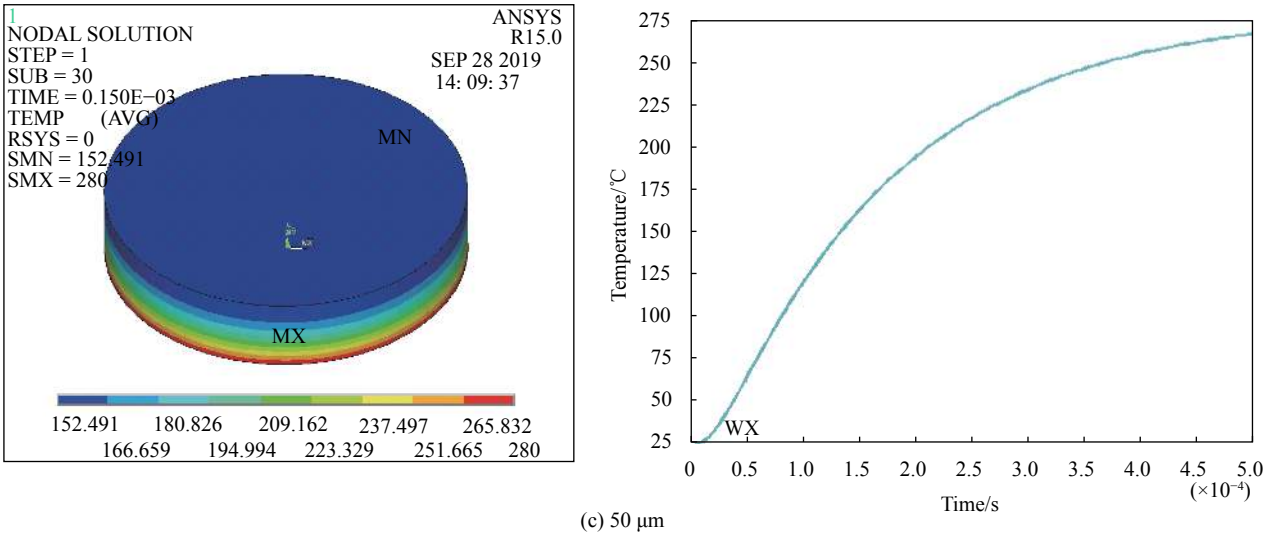
图 6 为温度 280℃ 时，TiB_2 粒径分别为 2 μm、10 μm、50 μm 的 TiB_2/Cu 复合材料热导率模拟温度分布云图和温度梯度分布图。可以看出，随着 TiB_2 粒径的增大，温升过程中的半升温时间 t_{50} 先



(a) 2 μm



(b) 10 μm



(c) 50 μm

图 6　280℃ 时不同粒径的 TiB_2/Cu 复合材料热导率模拟结果及温度梯度分布图

Fig. 6　Simulation results of thermal conductivity and temperature gradient profiles of TiB_2/Cu composites with different TiB_2 particle sizes at 280℃

减少后增加，在 TiB_2 粒径为 10 μm时最少。

图 7 为 280℃ 时，不同粒径的 TiB_2/Cu 复合材料热导率的实验值、模拟值及预测值。可以看出，热导率随着粒径的增大均先增高后降低，在 10 μm 时达到最大。且热导率预测值略大于实验值。这是由于 Hasselman and Johnson 模型虽然构建出了相对完整的复合材料热导率表达式，但因其并未考虑温度变化、界面状态等因素的影响。为解决上述两个问题，在这里引入界面热阻的概念。如果增强体颗粒与基体之间的界面结合达到理想状态，即界面热阻为零，则增强体尺寸对复合材料的热导率没有明显的影响，但界面结合很难达到理想状态，界面仍是材料热阻的主要来源。界面越多，界面热阻越大，复合材料的导热性能会大幅度下降。因此，细颗粒增强相对于粗颗粒来说对材料导热性能产生不利影响。但由式 (3) 可知，存在颗粒的临界平均直径 a_0，当颗粒平均直径小于 a_0 时，复合材料热导率随着颗粒尺寸的增加而提高；当颗粒平均直径大于 a_0 时，复合材料热导率随着颗粒尺寸的增加而降低[27]。

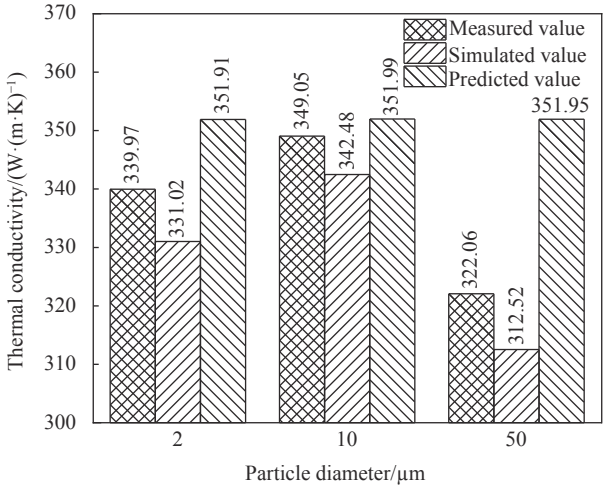


图 7　不同粒径的 TiB_2/Cu 复合材料在 280℃ 下热导率的实验值、模拟值及预测值

Fig. 7　Experimental, simulated and predicted values of thermal conductivities of TiB_2/Cu composites with different TiB_2 particle sizes at 280℃

4　结 论

(1) TiB_2/Cu 复合材料热导率模拟结果与实验结果基本吻合，在 50~200℃ 之间，复合材料热导率处于小范围波动状态 (波动范围为 6%~9%)。200℃ 之后，模拟值与实验值均呈现出随温度升高而增大的趋势，且吻合度较高。

(2) 在 200℃ 时，由于 TiB_2/Cu 复合材料内部界面处等效应力大于 Cu 基体屈服强度，使其发生塑性变形，从而引起热导率大幅度变化。

(3) TiB_2/Cu 复合材料热导率随着粒径的增大而先增高后降低，在 10 μm 时达到最大，这与颗粒尺寸超过临界值而导致电子平均程增大密切相关。

参考文献：

[1] WANG L, LI J, CHE Z, et al. Combining Cr precoating and Cr alloying to improve the thermal conductivity of diamond particles reinforced Cu matrix composites[J]. Journal of Alloys and Compounds，2018，749：1098-1105.

[2] CHEN J, NIU P, WEI T, et al. Fabrication and mechanical properties of AlCoNiCrFe high-entropy alloy particle reinforced Cu matrix composites[J]. Journal of Alloys and Compounds，2015，649：630-634.

[3] AHN B W, KIM J H, HAMAD K, et al. Microstructure and mechanical properties of a B_4C particle-reinforced Cu matrix composite fabricated by friction stir welding[J]. Journal of Alloys and Compounds，2017，693：688-691.

[4] 李国辉, 刘勇, 国秀花, 等. TiB_2/Cu复合材料的电弧侵蚀行为[J]. 复合材料学报, 2018, 35(3)：616-622.
LI Guohui, LIU Yong, GUO Xiuhua, et al. Arc erosion behavior of TiB_2/Cu composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2018，35(3)：616-622(in Chinese).

[5] 张胜利, 国秀花, 宋克兴, 等. 多粒径TiB_2颗粒增强铜基复合材料制备与载流摩擦磨损的特性[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10)：93-101.
ZHANG Shengli, GUO Xiuhua, SONG Kexing, et al. Preparation and electrical wear characteristics of copper matrix composites reinforced with mixing sized TiB_2 particle[J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2019，36(10)：93-101(in Chinese).

[6] WANG P, ZHANG H, YIN J, et al. Wear and friction behaviours of copper mesh and flaky graphite-modified carbon/carbon composite for sliding contact material under electric current[J]. Wear，2017，380：59-65.

[7] DINAHARAN I, SARAVANAKUMAR S, KALAISELVAN K, et al. Microstructure and sliding wear characterization of Cu/TiB_2 copper matrix composites fabricated via friction stir processing[J]. Journal of Asian Ceramic Societies，2017，5(3)：295-303.

[8] 郭明星, 汪明朴, 李周, 等. TiB_2/Cu金属基复合材料的研究[J]. 材料导报, 2004, 18(8)：39-42.
GUO Mingxing, WANG Mingpu, LI Zhou, et al. The studies of TiB_2/Cu metal matrix composites[J]. Materials Review，2004，18(8)：39-42(in Chinese).

[9] 王耐艳, 涂江平, 杨友志, 等. Cu-纳米TiB_2原位复合材料的摩

擦磨损性能[J]. 摩擦学学报, 2002, 22(6): 414-418.
WANG Naiyan, TU Jiangping, YANG Youzhi, et al. Dry sliding friction and wear behavior of Cu-nanosized TiB_2 in-situ composites[J]. Tribology, 2002, 22(6): 414-418(in Chinese).

[10] KIM P, SHI L, MAJUMDAR A, et al. Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes[J]. Physical Review letters, 2001, 87(21): 215502.

[11] GUO J, WANG X, WANG T. Thermal characterization of microscale conductive and nonconductive wires using transient electrothermal technique[J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(6): 063537.

[12] CHENG Z, LIU L, XU S, et al. Temperature dependence of electrical and thermal conduction in single silver nanowire[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10718.

[13] CORBINO O. Periodic resistance changes of fine metal threads which are brought together by alternating streams as well as deduction of their thermo characteristics at high temperatures[J]. Physikalische Zeitschrift, 1911, 12: 292-295.

[14] PARKER W, JENKINS R, BUTLER C, et al. Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity, and thermal conductivity[J]. Journal of Applied Physics, 1961, 32(9): 1679-1684.

[15] GOLI P, NING H, LI X, et al. Thermal properties of graphene-copper-graphene heterogeneous films[J]. Nano Letters, 2014, 14(3): 1497-1503.

[16] YU G C, WU L Z, FENG L J. Enhancing the thermal conductivity of carbon fiber reinforced polymer composite laminates by coating highly oriented graphite films[J]. Materials & Design, 2015, 88: 1063-1070.

[17] CAHILL D G. Analysis of heat flow in layered structures for time-domain thermoreflectance[J]. Review of Scientific Instruments, 2004, 75(12): 5119-5122.

[18] RAMAN C V, KRISHNAN K S. A new type of secondary radiation[J]. Nature, 1928, 121(3048): 501-502.

[19] 徐辉. 高熔点高热导率铜合金组织与性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
XU Hui. Study on microstructure and properties of high melting point and high thermal conductivity copper alloy[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012(in Chinese).

[20] 冯薇薇. 粉末冶金法制备Cu/TiB_2复合材料及其性能的研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
FENG Weiwei. Study on preparation and properties of Cu/TiB_2 composites by powder metallurgy[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2014(in Chinese).

[21] HASSELMAN D, JOHNSON L F. Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance[J]. Journal of Composite Materials, 1987, 21(6): 508-515.

[22] 高晓霞. 金属基复合材料界面热传导性的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2000.
GAO Xiaoxia. Study of the interfacial thermal conductivity of metal matrix composites[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2000(in Chinese).

[23] 张胜利, 宋克兴, 国秀花, 等. TiB_2颗粒混杂对TiB_2/Cu复合材料微观组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(8): 7-13.
ZHANG Shengli, SONG Kexing, GUO Xiuhua, et al. Effect of mixing TiB_2 particles on microstructure and properties of TiB_2/Cu composites[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(8): 7-13(in Chinese).

[24] 杜洛金, 奚同庚, 王梅花. 固体热物理性质导论-理论和测量[M]. 北京: 中国计量出版社, 1987.
DU Luojin, XI Tonggeng, WANG Meihua. Introduction to solid thermophysical properties-theory and measurement[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1987(in Chinese).

[25] GUO X, SONG K, LIANG S, et al. Effect of the thermal expansion characteristics of reinforcements on the electrical wear performance of copper matrix composite[J]. Tribology Transactions, 2014, 57(2): 283-291.

[26] 郭源. 纳米线热导率的尺寸效应[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
GUO Yuan. Size effect of nanowire thermal conductivity[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015(in Chinese).

[27] 马双彦, 王恩泽, 鲁伟员, 等. 金刚石/铜复合材料热导率研究[J]. 热加工工艺, 2008, 37(4): 36-38.
MA Shuangyan, WANG Enze, LU Weiyuan, et al. Research on thermal conductivity of diamond/copper composites[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(4): 36-38(in Chinese).