doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2022.11.03

基于微观结构分形表征的钼-氧化锆导电导热性能

刘爽爽,齐素慈,曹学文,武笑宇,王红光

(河北工业职业技术大学 智能制造学院,石家庄 050091)

摘 要:金属陶瓷物理性能与材料组分和空间组织结构密切相关,其组成相的形态分布具有分形特征。基于渗流理论和分形理 论,通过对材料微观结构图像的二值化处理进行导通相分形维数计算,建立分形维数与导通相微观形貌、渗流临界指数之间的定 量表征,研究 Mo-ZrO2金属陶瓷全组分范围内材料微观结构与电导率和热导率之间的关系。结果表明;导通相面积分形维数随着 Mo体积分数的增加而增加,电导率与分形维数遵循渗流转变特征。采用通用有效介质(GEM)方程建立基于导通相分形维数的 金属陶瓷电导率和热导率模型,实现材料微观组织定量分析结果与金属陶瓷的渗流模型相结合,有效预测材料宏观物理性质的梯 度变化。

关键词:Mo-ZrO₂金属陶瓷;分形维数;电导率;热导率;GEM方程 中图分类号:TG113.22 文献标志码:A 文章编号:2095-1744(2022)11-0015-08

Electrical and Thermal Conductivity for Mo-ZrO₂ Cermet by Fractal Characterization of Microstructure

LIU Shuangshuang, QI Suci, CAO Xuewen, WU Xiaoyu, WANG Hongguang

(Department of Intelligent Manufacturing, Hebei Vocational University of Industry and Technology, Shijiazhuang 050091, China)

Abstract: The physical properties of cermet are closely related to the material composition and spatial structure, and its morphological distribution of composition phase have fractal characteristic. Based on the percolation theory and fractal theory, the fractal dimensions of the conducting phase were calculated through the binarization of the microstructure image analysis. The quantitative characterizations between the fractal dimension, microscopic morphology of the conducting phase and the critical exponent of percolation were established. The relationship between the microstructure and its electrical and thermal conductivity in the full composition range of Mo-ZrO₂ cermet were studied. The results indicate that the fractal dimension of the conducting phase increases with the increase of the Mo volume fraction, and the relationship between conductivity and fractal dimension is consistent with the percolation theory. Based on the fractal dimension of the conducting phase, the General Effective Medium(GEM) equation was used to establish the electrical conductivity and the thermal conductivity models of cermet. By combining the quantitative analysis results of the microstructure and the percolation model of cermet, the gradient change of the macroscopic physical properties of the cermet can be effectively predicted.

Key words: Mo-ZrO₂ cermet; fractal dimension; electrical conductivity; thermal conductivity; GEM equation

收稿日期:2022-04-15

基金项目:河北省高等学校科学研究计划青年基金项目(QN2020161);中央引导地方科技发展资金资助项目(216Z1004G);河北省科技厅省级研发平台建设项目(SG2021185)

Fund: Supported by Science and Technology Project of Hebei Education Department(QN2020161); The Special Project of Central Government for Local Science and Technology Development of Hebei Province(216Z1004G); Provincial R&D Platform Construction Project of Hebei Science and Technology Department(SG2021185)

作者简介:刘爽爽(1989一),女,讲师,主要从事机械设计及制造、工程材料研究。

通信作者:齐素慈(1980一),女,硕士,副教授,主要从事金属陶瓷复合材料研究。

引用格式:刘爽爽,齐素慈,曹学文,等.基于微观结构分形表征的钼-氧化锆导电导热性能[J].有色金属工程,2022,12(11):15-22.

LIU Shuangshuang, QI Suci, CAO Xuewen, et al. Electrical and Thermal Conductivity for Mo-ZrO₂ Cermet by Fractal Characterization of Microstructure[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(11):15-22.

梯度功能材料(FGM)因在限域内具有连续梯 度变化的组分和组织结构,能有效解决异质材料界 面应力,优化构件整体性能,满足极限环境或严苛工 况的服役要求,在航空航天、生物医学工程、半导体 光电等领域广泛应用^[1]。Mo-ZrO2金属陶瓷是一种 典型的金属/陶瓷系 FGM^[2-3],采取梯度复合技术可 实现金属陶瓷从纯金属 Mo 端连续过渡到纯陶瓷 ZrO2端,兼具金属的优良导热导电性能和陶瓷的良 好高温化学稳定性和高温强度,同时借助连续梯度 组分变化消除材料宏观界面,满足超高温、大温差等 苛刻环境条件下使用要求^[4-5]。

Mo-ZrO2 金属陶瓷 FGM 材料设计过程,材料 组织结构与物理性能之间的定量表征尤为重要[6]。 Mo-ZrO2 金属陶瓷中金属 Mo 为导通相, ZrO2 陶瓷 为绝缘相,在全组分范围内随着导通相体积分数的 增加,材料微观结构中导通相将从孤立的弥散分布 经复杂两相网状交织结构,最终形成连续聚集状态, 通过组织结构的变化实现性能梯度变化[7]。材料性 能梯度变化过程中将发生明显渗流转变现象,在渗 流阈值附近的材料宏观性能发生相应突变,一般借 助渗流理论对该转变进行定量描述^[8]。常见的渗流 理论模型包括统计逾渗模型[9]、热力学逾渗模 型^[10]、几何逾渗模型^[11]、有效介质模型^[12]和通用有 效介质模型[13]等。本课题组前期研究中采用通用 有效介质模型研究了一系列金属陶瓷宏观物理性 质[4,14],研究发现金属陶瓷渗流阈值、渗流临界指数 与导通相颗粒的大小、形状以及它们的相互连通性 密切相关,但导通相微观结构特征与材料宏观性能 之间的对应关系尚待定量表征。已有研究表明,金 属相在金属陶瓷中的形貌和分布具有自相似性,材 料微观结构具有分形特征,可通过分形维度对微观 结构进行定量表征[15-16]。对具有不同导通相结构 的材料进行分形分析,研究分形特性与材料微观结 构、宏观性能之间的对应关系,对材料性能预测和新 型功能材料设计都具有重要意义。

为探讨 Mo-ZrO2 金属陶瓷材料性能与组织结构的依存关系,本文基于分形理论对金属陶瓷导通相微观形貌进行定量表征,建立分形维数与渗流临 界指数之间的关系,采用通用有效介质(GEM)方程 建立基于导通相分形维数的 Mo-ZrO2 金属陶瓷电 导率和热导率模型,研究全组分范围内材料宏观性 能与导通相分析维数的定性关系,为 Mo-ZrO2金属 陶瓷 FGM 设计提供指导。

1 实验材料与分析方法

1.1 Mo-ZrO2 金属陶瓷制备

Mo-ZrO₂金属陶瓷通过粉末冶金的粉末压坯-烧结法制备^[4]。其中金属 Mo 粉的纯度为 99.0%, 初始平均粒径为 13 μ m;氧化锆粉的纯度为 99.7%,初始平均粒径为 3 μ m。制备 Mo-ZrO₂金属 陶瓷的过程如下:将不同体积分数的 Mo 粉和氧化 锆粉在无水乙醇中使用氧化锆球进行球磨混合6 h, 球料比为 6:1。球磨结束后,经干燥、研磨、造粒,在 成形压力 800 MPa 下单向压制成 Φ 8 mm×30 mm 的生坯,管式炉常压氩气气氛中在 1 600 ℃下烧结 2 h。通过扫描电子显微镜(SEM, Hitachi S-570, Japan)对试样断口形貌进行微观结构观察,采用直 流四探针法测量金属陶瓷试样不同温度下的温阻特 性,计算不同金属 Mo 体积分数下金属陶瓷的电 导率。

1.2 导体相分形维数计算方法

对 Mo-ZrO2 金属陶瓷微观结构中金属 Mo 导通 相进行分形维数计算。具体计算方法如下[16-17]:首 先选取不同金属 Mo 体积分数试样的典型微观 SEM 图像;其次通过 Matlab 编程对图片经灰度化 调整、直方图调整和平滑滤波处理;然后将处理图片 转化为二值化处理图;最后基于分形理论利用 Matlab软件,采用记盒维数计算法对二值化处理图 进行导通相分形维数 (D_f) 进行计算^[18]。图 1 为 40%Mo-ZrO2(体积百分数,下同)金属陶瓷的导体 相分形维数计算过程。图 1(a)中浅灰色为金属钼 导通相,深色相为氧化锆陶瓷相,从图 1(a)中可以 看出, 金属 Mo 聚集形成明显的连续网状结构, 氧化 锆陶瓷相填充其中,有利于形成电子传输通道,提高 试样的导电性能。图 1(b)为通过 Matlab 编程对微 观形貌图片转化的二值化处理图。图 1(c)为金属 陶瓷试样的高导电相的面积分形维数的双对数拟合 曲线,线性回归分析曲线和数据点几乎在同一条直 线上,通过双对数曲线斜率,得到 40% Mo-ZrO2 金 属陶瓷导通相分形维数(D_f)为1.678。按照上述步 骤对 Mo-ZrO2金属陶瓷试样的微观形貌进行导通 相分形维数计算。



图 1 40%Mo-ZrO₂ 金属陶瓷的导体相分形维数计算:(a)微观组织形貌;(b)二值化处理图;(c)记盒分形维数 Fig. 1 Fractal dimension calculation of conductor phase for 40vol.% Mo-ZrO₂ cermet: (a)Microstructure morphology;(b)Binarized image;(c)Box-counting fractal dimension

基于导通相分形维数的金属陶瓷电导率和热导率模型

基于平均场理论和渗流理论的通用有效介质 (GEM)方程常用于描述导通相和绝缘相组成的二 元复合材料的电导率(σ)或热导率(λ)与体积分数关 系^[13]。根据 GEM 方程, Mo-ZrO₂ 金属陶瓷表观电 导率或热导率可表示为:

$$\frac{f(\sigma_l^{1/t} - \sigma_m^{1/t})}{\sigma_l^{1/t} + \frac{f_c}{1 - f_c} \sigma_m^{1/t}} + \frac{(1 - f)(\sigma_h^{1/t} - \sigma_m^{1/t})}{\sigma_h^{1/t} + \frac{f_c}{1 - f_c} \sigma_m^{1/t}} = 0 (1)$$

其中, σ_m 为金属陶瓷表观电导率或热导率, σ_h 和 σ_l 分别为导通相 Mo 金属和绝缘相 ZrO₂陶瓷的电导 率或热导率,f 为导通相的体积分数。 f_c 为导通相 的临界体积百分数;t 为拟合结构参数,与导通相颗 粒的大小、形状和在绝缘相中的分布有关。

研究发现^[19],多相介质传输特性与组成相物理性质、组成相含量和微观空间结构密切相关。金属陶瓷中导通相微观结构具有分形特征,参数 *t* 可表示为分析维数的函数^[20],即:

$$t = f(D_T, D_f) = 1 + \frac{D_T - 1}{D_E - D_f}$$
(2)

其中, D_T 为迂曲度分形维数,表示物质传输路 径长度不变性程度。 D_f 是导通相的面积分形维数, 表示导通相颗粒的大小及分布。 D_E 是欧氏空间维数,金属陶瓷中 $D_E=3$ 。

金属陶瓷中导通相分布与电荷传输路径密切相关,电荷输送主要沿着导通相通道传递,故 D_T 和 D_f 是相互关联和影响的。假定 D_T 的变化与 D_f 和导通相体积分数 φ 变化相关, D_T 可近似表示为^[19]:

$$D_T \approx (D_E - D_f + 1) + (D_E - D_f) \frac{\log D_f - \log (D_f - 1)}{\log \varphi}$$

借助分形维数定量表征金属陶瓷中导通相的微观分布特征,通过上述方程明确材料迂曲度分形维数 D_{τ} 和导通相的面积分形维数 D_{f} 与 GEM 方程中结构因子 t 的关系,进一步明确参数 t 的物理意义和计算关系式,建立金属陶瓷宏观物理性质(如电导率、热导率等)与材料微观结构之间的定量表征。

2 结果与讨论

2.1 导通相分形维数对金属陶瓷电导率的影响

Mo-ZrO₂金属陶瓷的导通相分形维数与金属 Mo体积分数的关系如图 2 所示。结果显示,随着 金属 Mo体积分数的增加,导通相分形维数呈现增 加的趋势,可将 D_f作为导通相微观形貌特征的定量 表征参数,D_f值越大,说明金属陶瓷体系中导通相 面积占比越高,有利于形成传输通道,提高金属陶瓷 的传输性能;反之,D_f值越小,说明金属陶瓷体系中



(3)

导通相面积占比越低,传输阻力越大,金属陶瓷的传输性能较差。当金属 Mo 体积分数接近 1 时,分形 维数将接近 2,代表导通相将完全占据微观截面,金 属陶瓷传输性能等同于纯金属的传输能力。因此, 导通相分形维数可表征导通相微观空间结构的几何 形状、大小分布以及它们的相互连通性显著影响材 料的传输特性。

导通相分形维度与金属陶瓷电导率的关系如图 3 所示。结果显示,金属陶瓷电导率与导通相分形 维度显著相关,其电导率与分形维数遵循渗流转变 特征,这与材料物理性质与组分之间的渗流转变行 为基本一致,表明 Mo-ZrO₂金属陶瓷的电导率强烈 依存于材料的组织特征。当分形维数 D_f过小时,说 明金属陶瓷中导通相体积分数较低,导通相分散于 陶瓷相中,不足以形成连续的网络状结构,导致金属 陶瓷电导率较低;随着分形维数 D_f增大,说明金属 陶瓷中导通相体积分数不断提高,导通相容易形成 连续网状分布,有利于形成电子传输通道,金属陶瓷 电导率逐渐增大。在渗流阈值附近,电导率发生明 显突变,高于阈值后金属陶瓷电导率急剧增大。因 此,分形维数能够定量地表征金属陶瓷的微观结构, 并能够预测其传输性能。



2.2 基于导通相分形维数的 Mo-ZrO₂ 金属陶瓷电 导率计算

如图 2 所示,在拟合实验结果中导通相分形维 度的基础上,获得整个组分范围内的导通相分形维 度,建立基于导通相分形维数的 Mo-ZrO₂ 金属陶瓷 电导率模型,将电导率模型应用于不同组分和温度 下 Mo-ZrO₂ 金属陶瓷电导率计算,其中 20 ℃时金 属 Mo 电导率约为 1.93×10⁵ S/cm,氧化锆电导率

于约为 10^{-13} S/cm,导通相的临界体积百分数 f_{e} = 0.249^[4],模型计算结果与实验结果如图4所示。从 图 4(a)中可以看出,模型计算的室温电导率随 Mo 体积分数的变化曲线与实验数据吻合较好,验证了 模型的准确性。金属陶瓷电导率随着金属 Mo 体积 分数的增加而逐渐增加,并呈现导体-绝缘体转换的 渗流转变现象。当金属 Mo 体积分数小于临界体积 百分数 f., 金属陶瓷的电导率较小且变化缓慢, 电 导率对数值与体积分数呈现线性关系,表现出明显 的绝缘体特性;当金属 Mo 体积分数大于临界体积 百分数 f.,金属陶瓷的电导率较大,电导率对数值 与 Mo 体积分数也具有较好的线性关系,表现出明 显的导体特性;当金属 Mo 体积分数在临界体积百 分数 f。附近时,金属陶瓷的电导率发生明显突变, 表现出绝缘体-导体之间的可变特征。金属陶瓷导 电性能随组分渐变发生梯度变化,可针对不同使用 要求设计具有适当导电性能和金属含量的功能梯度 材料。



金属陶瓷服役温度对其电导率具有显著影响, 模型计算的金属陶瓷电导率随温度变化如图 4(b) 所示。可以看出,金属陶瓷电导率随着温度的升高

发生明显变化,并与导通相体积分数有关。当金属 Mo体积分数低于临界体积百分数 f_{c} 时,金属陶瓷 电导率呈现离子电导的温阻特性[21],即电导率随着 温度的升高而逐渐增大,电导率变化主要受陶瓷相 电导率变化的影响。另外,金属陶瓷电导率在 1000 ℃附近发生明显变化,这与氧化锆不同晶型 间转变有关^[22]。当金属 Mo 体积分数高于临界体 积百分数 f。时,金属陶瓷电导率呈现电子电导的温 阻特性[23],电导率随着温度的升高而逐渐变小,电 导率变化主要受金属相导电率变化的影响。另外, 30% Mo-ZrO₂(体积百分数)金属陶瓷电导率随温 度变化的实验结果也如图 4(b)所示,其电导率随温 度的变化趋势与模型计算结果保持一致,电导率数 值与模型计算数值接近,进一步验证了模型的准确 性。因此,可依据材料服役场合和本文电导率模型, 设计合理的组分范围,获得满足导电性能服役要求 的 Mo-ZrO₂ 金属陶瓷。

2.3 基于导通相分形维数的 Mo-ZrO₂ 金属陶瓷热 导率计算

超高温服役过程中金属陶瓷的导热特性对材料 可靠性影响显著。基于 GEM 方程和分形理论,建 立基于导通相分形维数的 Mo-ZrO2 金属陶瓷热导 率模型,对 Mo-ZrO2金属陶瓷热导率实验数据进行 拟合以确定方程的参数值。Mo-ZrO2金属陶瓷热导 率实验结果如图 5 所示^[7],其中 20 ℃时金属 Mo 和 氧化锆的热导率分别为 124.4 和 3.2 W/(m · K)。 基于热导率模型研究组分变化和温度变化对 Mo-ZrO2金属陶瓷热导率的影响,模型计算结果如 图 5 所示。从图 5(a)中可以看出,模型计算的室温 热导率变化曲线与实验数据吻合较好,验证了模型 的准确性。金属陶瓷热导率随着金属 Mo 体积分数 变化呈现连续性变化和渗流转变现象。当金属 Mo 体积分数较小时,金属相分散在陶瓷基体中,金属陶 瓷热导率主要受陶瓷相影响,金属陶瓷的热导率较 小且变化缓慢;当金属 Mo 体积分数较大时,金属相 形成连续聚集状态,陶瓷相分散在金属基体中,金属 陶瓷热导率主要受金属相影响,金属陶瓷的热导率 较大且变化剧烈;当金属 Mo 体积分数接近渗流阈 值附近时,材料微观形貌呈现两相网状交织结构特 征,金属陶瓷热导率要受金属相和陶瓷相共同影响, 金属陶瓷的热导率表现出非线性突变[24]。本模型 在全组分范围内构建组织结构和宏观导热性能的相 关关系,为设计金属-陶瓷系梯度功能材料提供 指导。



金属陶瓷热导率随温度变化的计算结果如 图 5(b)所示。从图 5(b)中可以看出,金属陶瓷热 导率随着温度的升高发生明显变化,同样与导通相 体积分数有关。当金属 Mo 体积分数较低时,随着 温度的升高金属陶瓷热导率变化幅度较小,且呈现 先缓慢降低然后略有升高的变化趋势,这与陶瓷相 热导率随温度的变化趋势保持一致;当金属 Mo 体 积分数较高时,随着温度的升高金属陶瓷热导率逐 渐变小且变化幅度较大,这与金属相热导率随温度 的变化趋势保持一致。金属陶瓷热导率的变化趋势 与组成相有关,金属相的热量传输过程以电子导热 为主,金属相热导率随着温度的升高而逐渐降 低^[25]。ZrO₂陶瓷相作为半导体材料,较低温度下的 热量传输过程以各种散射为主,导致热导率随着温 度的升高而逐渐降低;较高温度时,以声子运动为 主[25-26],且作为半透明体的辐射作用增强,导致热 导率略有升高^[27]。温度对金属 Mo 相的热导率的 影响比对 ZrO₂陶瓷相的影响要大很多,导致较高金 属相体积分数的金属陶瓷受到温度变化的影响更加 明显。另外,40%Mo-ZrO2金属陶瓷热导率随温度

变化的实验结果也如图 5(b)所示,其热导率随温度 的变化趋势与模型计算结果基本一致,热导率数值 与模型计算数值接近,进一步验证了模型的准确性。 因此,同样可依据材料服役场合和本热导率模型,设 计合理的材料组分,获得满足导热性能服役要求的 Mo-ZrO2金属陶瓷。

2.4 Mo-ZrO2金属陶瓷导电导热特征和功能梯度 材料设计

Mo-ZrO₂金属陶瓷 FMG 具有明显的渗流特征 和导电导热能力。Mo-ZrO₂金属陶瓷的电导率和热 导率如图 6 所示。由图 6(a)可见,金属陶瓷电导率 和热导率在全组分范围内呈现连续性变化,室温时 它们的最大值和最小值比值分别约为 10¹⁸ 倍和 40 倍,具有电导率相差较大、热导率相差较小的特 征,导致金属陶瓷电导率渗流转变现象更加明显,渗 流阈值附近电导率梯度更加明显。由图 6(b)可见, 1 000 ℃时金属陶瓷电导率和热导率的最大值和最 小值比值分别约为 10^{6.5} 倍和 24 倍,电导率渗流转变





特征有所缓解,渗流阈值附近电导率梯度有所减 小。总体而言,根据电导率和热导率大小划分, Mo-ZrO2金属陶瓷按照金属 Mo 体积分数可分为 如下区域: | 区的体积分数为 0~0.15, 电导率和 热导率均较小,可作为绝电绝热材料;Ⅱ区的体积 分数为0.15~0.35,电导率由绝缘体向导体转变, 热导率仍较低,可作为绝热可变电材料;Ⅲ区的体 积分数为 0.35~1.0, 电导率接近金属材料数值, 热导率发生明显增加,可作为导电可变热材料。 提高材料服役温度至1000 ℃, Mo-ZrO2 金属陶瓷 仍可依据电导率和热导率范围划分三个区域,但 金属 Mo 体积分数区间范围发生变化,且导电或导 热可变范围内材料性质和功能梯度逐渐减小。因 此,依据 Mo-ZrO2 金属陶瓷全组分范围内组织结 构和材料性能的相关关系和渗流转变特征,可通 过材料组分和空间组织结构的变化来实现性能的 梯度变化实现功能梯度设计。

3 结论

1)随着导通相 Mo 体积分数的增加, Mo-ZrO₂ 金属陶瓷的分形维数呈现增加趋势。金属陶瓷电导 率与分形维数遵循渗流转变特征。分形维数能够定 量地表征金属陶瓷的微观结构,并能够预测其传输 性能。

2)基于分形理论和金属陶瓷导通相微观形貌的 定量表征,建立了分形维数与渗流临界指数之间的 关系,采用通用有效介质(GEM)方程建立基于导通 相分形维数的 Mo-ZrO₂ 金属陶瓷电导率和热导率 模型,模型计算结果与实验结果吻合程度较好。将 材料微观组织定量分析结果与金属陶瓷的理论模型 相结合,可以有效预测材料物理性质的变化。

3)依据分形特性定量分析材料宏观物理性能和 微观结构之间的对应关系,确定 Mo-ZrO₂金属陶瓷 全组分范围内组织结构和材料性能的相关关系和渗 流转变行为,可通过空间组分和组织结构的变化来 实现性能的梯度变化实现功能梯度设计。

参考文献:

- [1] HU Y B, CONG W L. A review on laser depositionadditive manufacturing of ceramics and ceramic reinforced metal matrix composites [J]. Ceramics International, 2018, 44(17): 20599-20612.
- [2] FUNAMI K, MURAMATSU Y, ETO G. Mechanical properties and fracture toughness of Mo-ZrO₂ sintered

composites[J]. Journal of the Japan Institute of Metals and Materials, 1986, 50(9): 834-840.

- [3] XIONG Z, JIANG W, SHI Y, et al. Evaluation of hightemperature strength of Mo/PSZ composites by modified small punch tests[J]. Materials Transactions, 2005,46(3):631-636.
- [4] GUO Y L, TANG L, ZHANG J Y. Sintering, microstructure, and electrical conductivity of zirconiamolybdenum cermet [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(8): 3180-3186.
- [5] KATS S M, BYL'KOVA Z I, BOGIN V N, et al. Thermal conductivity of lamellar metal/cermet composite materials based on ZrO₂-Mo and Mo[J]. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 1985, 24(2):146-149.
- [6] 崔雪,张松,张春华,等.高性能梯度功能材料激光增材 制造研究现状及展望[J].材料工程,2020,48(9): 13-23.
 CUI Xue,ZHANG Song,ZHANG Chunhua, et al. Research status and prospect of laser additive manufacturing

status and prospect of laser additive manufacturing technology for high performance gradient functional materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(9):13-23.

- [7] JIANG W, WATANABE R, KAWASAKI A. Compositional dependence of thermal conductivity in sintered Mo/ZrO₂ composites[J]. Journal of the Japan Institute of Metals and Materials, 1998, 62 (11): 1018-1024.
- [8] 李瑞超,曹平,陈瑜,等.含水率对红砂岩抗拉强度及形 貌特征的双线性曲线影响研究[J].有色金属工程, 2018,8(2):107-113.
 LI Ruichao, CAO Ping, CHEN Yu, et al. Influence of

water content to the tensile strength of a red sandstone and bilinear curve of morphological characteristics[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2018, 8(2):107-113.

- [9] KIRKPATRICK S. Percolation and conduction [J]. Review of Modern Physics, 1973, 45(4):574-588.
- [10] WESSLING B, VOLK H. Post polymerisation processing of Conductive Polymers(CP)[J]. Synthetic Metals, 1987, 18(1/2/3):671-676.
- [11] YOUNGS I J. A geometric percolation model for nonspherical excluded volumes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2003,36(6):738-747
- [12] LU X F. Review models proposed to explain the electrical conductivity of mixture made of conductive and insulating materials [J]. Journal of Materials Science, 1993, 28(2): 285-301.
- [13] MCLACHLAN D S, BLASZKIEWICZ M. Electric resistivity of composites[J]. Journal of the American

Ceramic Society, 1990, 73(8): 2187-2203.

- [14] 李建朝,齐素慈,许继芳. Ni-ZrO2金属陶瓷电极材料的 导电性能研究[J]. 中国陶瓷,2021,57(4):9-14.
 LI Jianchao,QI Suci,XU Jifang. Study on the electrical conductivity for Ni-ZrO2 cermet electrode material[J].
 China Ceramics,2021,57(4):9-14.
- [15] SHI M H, LI X C, CHEN Y P. Determination of effective thermal conductivity for polyurethane foam by use of fractal method[J]. Science in China: Series E, 2006,49(4):468-475.
- [16] 于长清,余悠然,赵英民,等.石墨热压还原Cu/Cu₂O金 属陶瓷电导逾渗行为与微观结构分形表征[J].材料工 程,2022,50(1):154-160.

YU Changqing, YU Youran, ZHAO Yingmin, et al. Electrical percolation behavior and microstructure fractal characterization of graphite reduced hotpressing Cu/Cu₂O cermet composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2022, 50(1):154-160.

- [17] 何振娟,王录全,庾正伟,等. 基于 MATLAB 和分形理 论的复合材料第二相颗粒分布均匀性评价方法[J].中 国粉体技术,2014,20(3):76-79.
 HE Zhenjuan, WANG Luquan, YU Zhengwei, et al. Evaluation method of uniformity distribution of second phase particles in composites based on MATLAB and fractal theory [J]. China Powder Science and Technology,2014,20(3):76-79.
- [18] 蒋方乐,吴白云,沈超群.基于分形理论的建陶坯体有效导热系数研究[J].中国陶瓷,2010,46(12):42-45. JIANG Fangle,WU Baiyun,SHEN Chaoqun. Research on building ceramics' effective thermal conductivity based on fractals theory [J]. China Ceramics, 2010, 46(12):42-45.
- [19] WEI W, CAI J C, HU X Y, et al. An electrical conductivity model for fractal porous media [J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42 (12): 4833-4840.
- [20] CAI J C, WEI W, HU X Y, et al. Electrical conductivity models in saturated porous media: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2017, 171, 419-433.
- [21] MUCCILLO E N S, KLEITZ M. Impedance spectroscopy of Mg-partially stabilized zirconia and cubic phase decomposition[J]. Journal of the European Ceramic Society, 1996, 16(4):453-465.
- [22] LEE J H, MOON H, LEE H W, et al. Quantitative analysis of microstructure and its related electrical property of SOFC anode, Ni-YSZ cermet [J]. Solid State Ionics, 2002, 148(1/2):15-26.
- [23] 许继芳,盛敏奇,万康,等.烧结工艺对 50% Mo-ZrO2 金

属陶瓷结构与耐蚀性能的影响[J].粉末冶金材料科学 与工程,2014,19(2):293-301.

XU Jifang, SHENG Minqi, WAN Kang, et al. Effect of sintering process on structure and corrosion resistance property for 50% Mo-ZrO₂ cermet [J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2014, 19(2):293-301.

[24] 范秋林,胡行方,郭景坤.Ni-ZrO2亚微米复合材料的导 电导热机制[J].中国科学:A辑,1995,25(7): 777-784.

FAN Qiulin, HU Xingfang, GUO Jinkun. Electrical and thermal conductivity mechanisms of Ni-ZrO₂ submicron composites [J]. Science in China, Series A, 1995, 25(7):777-784.

[25] 曾令可,漆小玲,王慧,等.氧化物热电材料热导率的研究[J]. 硅酸盐通报,2009,28(3):525-530.
 ZENG Lingke, QI Xiaoling, WANG Hui, et al. Study on the thermal conductivity of oxide thermoelectric

materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2009,28(3):525-530.

[26] 张堃,刘晓飞,刘勇,等.激光增材制造纳米颗粒增强铝
 合金复合材料组织及性能研究[J].有色金属工程,2020,10(7):14-19.
 ZHANG Kun,LIU Xiaofei,LIU Yong, et al. Study on

microstructure and properties of nano particle reinforced aluminum alloy composite made by laser additive [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(7):14-19.

[27] 江莞,李敬锋. Mo/PSZ 系复合材料的热学、力学性能 与组成的关系[J]. 金属学报,2002,38(4):438-442.
JIANG Wan,LI Jingfeng. Compositional dependence of thermal and mechanical properties for sintered Mo/PSZ composites [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002,38(4):438-442.

(编辑 崔 颖)