

烧结银细观孔隙结构对宏观力学性能的影响

龙旭¹, 种凯楠², 苏昱太¹

(1. 西北工业大学重庆科创中心, 重庆, 400000; 2. 西北工业大学, 西安, 710072)

摘要: 为研究烧结纳米银材料细观孔隙结构对宏观力学性能的影响, 首先利用高斯滤波算法和分位数切割函数生成具有不同孔隙率(0.1, 0.2 和 0.3)的代表性微元(RVE)。通过对 RVE 施加周期性边界条件, 获得其单轴拉伸力学性能, 使用 Abaqus 软件建立了由烧结纳米银颗粒制成的搭接接头的宏观模型模拟剪切试验, 烧结层的材料属性与预测的 RVE 的弹塑性应力-应变曲线保持一致。结果表明, 随着孔隙率的减小, RVE 模型的弹性模量和屈服强度增大; 值得注意的是, 随着应变的增大, 塑性变形最后阶段的应力呈现较大的下降趋势, 使得材料更容易受到损伤。通过比较宏观模型的剪切模拟, 可以观察到孔隙率的变化对烧结纳米银颗粒的剪切变形有显著影响, 具体而言, 随着孔隙率的增加, 孔隙部位更容易出现裂纹并扩展, 形成多个孔隙的贯通裂纹, 从而导致烧结银的抗剪强度降低。

创新点: (1) 以代表性体积单元和周期性边界条件为核心的数值均匀化模型, 有效预测了具有复杂孔隙特征的烧结纳米银材料弹塑性性能。

(2) 通过建立宏细观数值仿真模型有效揭示了烧结银细观孔隙特征与宏观力学响应之间的关系。

关键词: 烧结纳米银; 孔隙结构; 微元 RVE; 弹塑性响应

中图分类号: TG 492

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20230613005

0 序言

随着电子元件的不断小型化和复杂化^[1], 传统合金焊料的高温可靠性差、导热性差等局限已难以满足现代电子技术的高要求^[2]。为了应对这种趋势, 烧结银已逐渐成为了互连材料中备受瞩目的一个, 其出色的导热导电性和杰出的力学性能已得到广泛的认可^[3-6]。

近年来, 学者们针对烧结银材料的本构特性开展了广泛研究, 其中最常见的是利用 Anand 本构模型表征烧结纳米银材料在一系列应变速率和温度下的拉伸应力-应变性能^[7]; 同时基于纳米压痕试验和反演算法获取完整的本构关系也成为了当前研究的热点方向^[8-9]。从细观角度看, 银颗粒在烧结过程中, 熔融的颗粒之间会生成三维网状孔隙结构^[10]。

收稿日期: 2023–06–13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52175148); 国家重点实验室基金资助项目 2022-JCJQ-LB-006(6142411232212); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2022NSCQ-MSX0574)。

烧结银材料长期处于复杂的服役环境中, 内部孔隙的存在会促使裂纹的产生和扩展, 从而最终导致材料发生断裂^[11-13], 因此孔隙特征被认为是影响烧结银材料力学特性的关键因素。大量试验研究表明, 孔隙率对烧结银材料的杨氏模量具有显著影响^[14-16], 除此之外, 为优化烧结银材料在特定互连结构中的机械可靠性, 一些学者采用试验与理论相结合的方法揭示了烧结银孔隙特征与宏观本构行为之间的关系。研究发现, 材料配比和银颗粒的特征尺寸对烧结银细观形态能够产生极大的影响^[10, 17], 当烧结银材料形成具有较小孔隙的致密细观结构时, 其屈服强度会显著提高^[10]。

烧结银作为一种典型的双相复合材料, 其细观结构具有良好的周期性^[18]。随着有限元技术的发展, 研究人员普遍采用能够代表材料细观结构的代表性体积元(RVE)进行模拟和分析。为了准确获得有效的力学性能, 施加周期性边界条件(PBC)是必不可少的前提条件^[19-20], 因此以这两者为核心的数值均匀化模型已经受到了广泛的关注, 这意味着与试验耗时耗力的特点相比, 该模型能够快速有效地

建立起材料细观结构与宏观力学性能之间的关系。另一方面,考虑到烧结银细观结构的复杂程度,因此必须提出有效的算法构建 RVE 模型,从而进一步有效映射其宏观力学性能。

文中首先利用高斯滤波算法和分位数切割函数的基本原理,生成不同孔隙率(0.1, 0.2 和 0.3)的烧结纳米银三维 RVE 模型;在此基础上,施加周期性边界条件以获取烧结银的弹性和弹塑性响应,以及细观层面的应力分布等特征;最后,采用有限元分析软件 Abaqus 构建烧结纳米银搭接接头的三维模型,将预测的 RVE 的应力应变响应作为材料属性赋予给搭接件的烧结银层,进一步模拟烧结银搭接接头的剪切变形,深入探究其宏观力学行为。

1 烧结纳米银 RVE 模型生成算法

高斯滤波算法是一种常用的平滑化处理方法,也称高斯平滑,它利用符合高斯分布的空间核对尖锐的数值矩阵进行卷积,得到光滑的矩阵。该算法在随机场构建中可以更好地处理空间上的相关性,从而生成更真实的随机场^[21]。三维高斯滤波算法的实现过程为:首先创建一个大小为 L^3 的随机点矩阵作为初始种子,其次生成一个以目标点坐标为中心的高斯核,并通过矩阵卷积计算目标点的值,最后在目标点矩阵中形成目标点的分配值。

基于上述原理,如图 1 所示,生成烧结纳米银复合材料 RVE 模型的具体过程为:首先在全局直角坐标系下构建一个边长为 L 的立方体矩阵,其中 x, y 和 z 轴的取值范围为 $R_1=(0, L]^3$,然后为空间中的所有点离散地分配随机值以生成一个空间点矩阵,在此过程中,每个点的值都遵循正态分布 $N(0,$

$1^2)$,且彼此独立,这保证了随机点的各向同性和独立性;其次利用具有指定高斯宽度的高斯核对随机点矩阵进行高斯滤波,由于采用的高斯核卷积具有方向独立特性,因此模糊的空间点矩阵是各向同性的,同时由于高斯核从中心开始降低权重,模糊的个体随机点在空间上具有高斯宽度相关性,而与相邻点值相关的各向同性点矩阵的建模类似于高斯随机场的实现。需要注意的是,高斯核的高斯宽度最终决定了 RVE 模型中目标单元的大小,对于烧结纳米银复合材料来说,通过改变高斯宽度可以控制孔径的大小;最后基于分位数切割函数来确定切割水平(也称为阈值),以高效准确地创建一个具有特定比例成分的 RVE 模型^[21]。

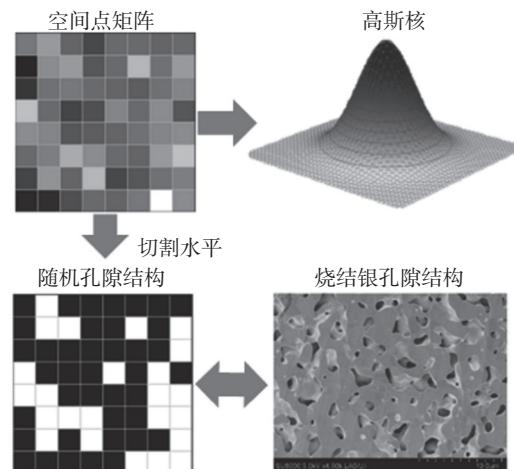


图 1 烧结纳米银 RVE 的生成算法

Fig. 1 Generation algorithm of RVE for sintered silver nanoparticles

经过上述分析,如图 2 所示,考虑到实际烧结银材料的孔隙率通常在 10% ~ 40%,通过改变切割水平生成了 3 种孔隙率(0.1, 0.2 和 0.3)下的 RVE 模型,以进行后续的分析与研究。从图中可以观察到,基体银和孔隙的尺寸、形状和分布都具有随机性。

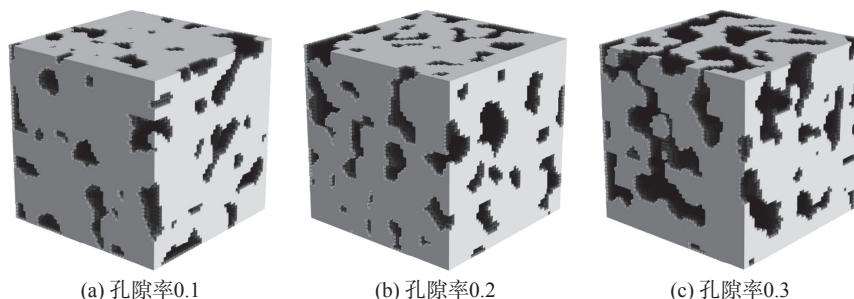


图 2 3 种孔隙率下的 RVE 模型

Fig. 2 RVE models under three types of porosity. (a) 0.1; (b) 0.2; (c) 0.3

2 模型周期性边界条件

目前,研究者们已经开发出了多种用于表征复合材料力学性能的理论方法,其中通过给 RVE 模型表面施加合理的边界条件是关注的重点。一般来讲,预测复合材料力学性能的边界条件应满足 Hill-Mandel 定律^[22]。大量研究表明,与均匀应力或均匀应变等边界条件相比,PBC 不仅能够获取复合材料的宏观力学性能,还能够进一步预测其在细观层面的应力/应变分布特点^[23-24]。对于复合材料的 RVE 模型,PBC 要求两个相对的平行表面必须满足相同的啮合模式,因此相对位置上的节点对应该具有相同的平面坐标。为了达到这一目的,采用八节点六面体单元对 RVE 模型进行网格剖分,这能够保证 RVE 模型平行边界上的节点可以一一对应,以下给出了施加 PBC 的主要过程。

当 RVE 的宏观应变 ε_i^0 为 u 时,可以将位移场 u 的 PBC 作为线性约束应用于有限元软件 Abaqus 中^[25],即

$$u_i(x, y, z) = \varepsilon_i^0 x_k + u_i^*(x, y, z) \quad (1)$$

式中: u_i^* 是周期性复合材料的线性位移场; x_k 为 RVE 中的任意坐标; i 表示在 x 、 y 和 z 方向上的自由度。进一步地,对于两个平行相对的界面,它们之间的位移差可以表示为

$$u_i^{\varphi+} - u_i^{\varphi-} = \varepsilon_{ik}^0 (x_k^{\varphi+} - x_k^{\varphi-}) = \varepsilon_{ik}^0 \Delta x_k \quad (2)$$

式中: $u_i^{\varphi+}$ 、 $u_i^{\varphi-}$ 分别为两个平行相对面上的位移; $x_k^{\varphi+} - x_k^{\varphi-}$ 是常数。值得注意的是,对于 RVE 模型中包含表面、顶点和边的平行边界上的每一对节点,因此对于一个给定的宏观应变 ε_{ik} ,方程(2)右侧的

位移差是恒定的。在这种情况下,PBC 可以很容易地在有限元分析中作为一个节点位移约束,即

$$u_i^+ - u_i^- = \tilde{\varepsilon}_{ij} (x_k^+ - x_k^-) = \Delta u_i \quad (3)$$

文中重点预测了单轴拉伸条件下复合材料的弹性性能和弹塑性响应,在这种情况下,PBC 应服从零宏观应力约束,具体如表达式为

$$\begin{cases} \oint_{\omega} \sigma_{ii} dV_{RVE} = 0 \\ \oint_{\omega} \sigma_{kk} dV_{RVE} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: σ_{ii} 和 σ_{kk} 分别表示 i 和 k 方向的应力; V_{RVE} 为代表性体积单元的体积。

综合上述分析,为了快速完成周期性边界条件的施加,首先对 RVE 边界上的节点进行分类,基于此,在模型对立面的节点对之间创建约束,需要注意的是,周期性边界条件下的 RVE 均匀化分析是基于 Abaqus 有限元软件以及 Python 脚本的二次开发共同实现的。

3 结果与讨论

3.1 RVE 模型弹性性能

研究表明,烧结纳米银中银基体的弹塑性响应遵循幂律本构模型^[8],即

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, \varepsilon \leq \varepsilon_y \\ R\varepsilon^n, \varepsilon > \varepsilon_y \end{cases} \quad (5)$$

式中:设定弹性模量 E 为 80.0 GPa;硬化系数 R 为 0.655 GPa;硬化指数 n 为 0.235;屈服应力为 150 MPa;对应的屈服应变为 0.1875。RVE 模型中孔隙的弹性模量忽略不计。

建立长度为 10 μm 的 RVE 模型,设定模型的网格尺寸为 0.2 μm,在 RVE 模型表面分别施加沿 x 、 y 和 z 轴的 3 种单调拉伸条件。[图 3](#) 给出了这

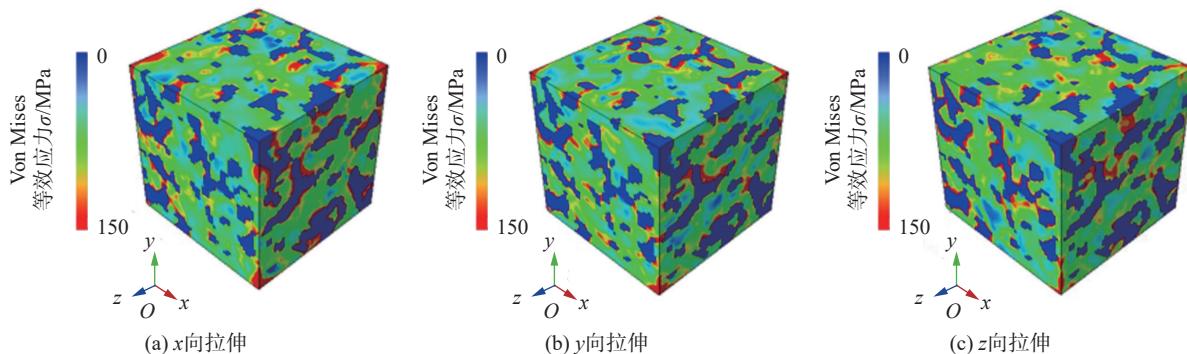


图 3 3 种单调加载条件下 RVE 的冯米塞斯应力分布

Fig. 3 Von Mises stress distribution of RVE under three monotonic loading conditions. (a) x tension; (b) y tension; (c) z tension

3 种加载条件下烧结纳米银 RVE 模型的冯米塞斯应力云图, 可以看出, 在单调拉伸周期性边界条件下, 细观层面的应力分布表现出各向异性的特点, 尤其是在靠近孔隙的区域, 应力以不同的方式分布, 并且应力集中现象更加明显。

为了实现理想的 RVE 均质化, 进一步预测了不同孔隙率(0.1, 0.2 和 0.3)烧结纳米银 RVE 模型的弹性性能。为了便于比较, 图 4 给出了分别沿着 x , y 和 z 方向 3 种单调拉伸条件下预测的弹性模量和泊松比的平均值, 可以看出, 当孔隙率从 0.1 增加到 0.3 时, 这两者均随之降低, 可以合理推断, 较大的基体体积分数有助于弹性性能的稳定。

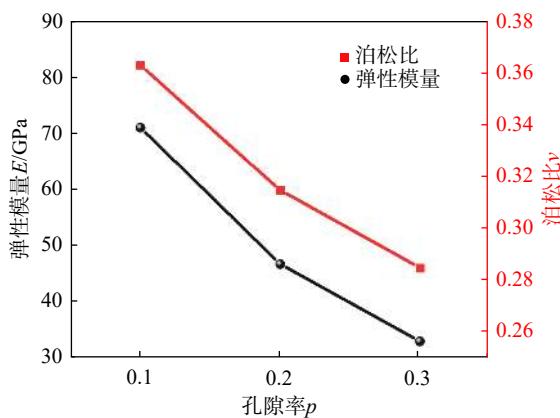


图 4 不同孔隙率 RVE 模型的弹性模量和泊松比

Fig. 4 Predicted elastic modulus and poisson's ratio for RVE models with different porosities

3.2 烧结纳米银搭接接头剪切变形模拟

3.2.1 有限元模型建立

为了进一步探究微孔结构对烧结银宏观力学性能的影响, 如图 5 所示, 在 Abaqus 中建立烧结纳米银搭接接头的有限元模型, 进行剪切试验模拟。为了符合实际的加载方式, 模型的一端被完全固定, 另一端设定一个参考点, 并与模型右端进行刚体约束, 给参考点施加轴向位移。考虑到烧结银本身特性, 将烧结层与上下铜基底之间采用 Tie 绑定约束。模型的网格类型为 C3D8(八节点六面体单元), 为了平衡计算效率和精确度, 在铜基板处所划分的网格尺寸较大, 越靠近烧结银处, 网格逐渐加密。

3.2.2 剪切变形模拟分析

在进行烧结银搭接接头剪切模拟之前, 首先通过数值均匀化模型预测出单轴拉伸条件下 RVE 模型的弹塑性响应, 将拉伸应变设置为 0.025。从图 6 中可以看出, 当 RVE 模型中的孔隙率越小时,

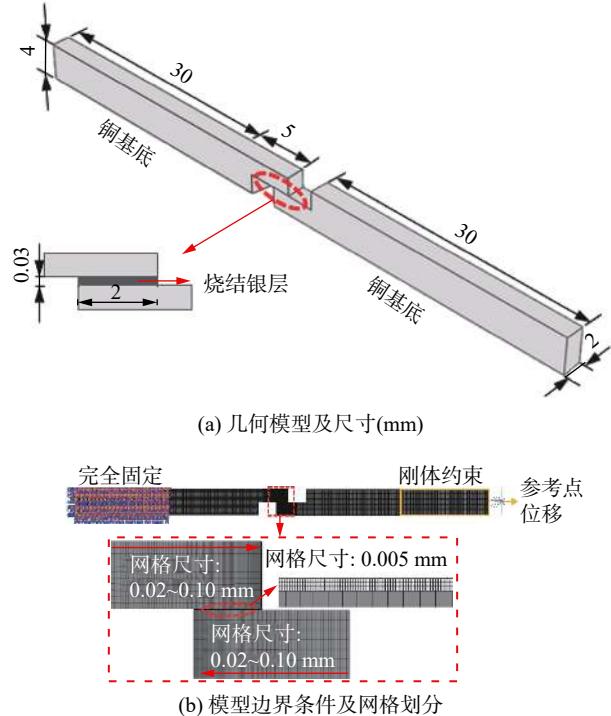


图 5 烧结纳米银搭接接头有限元模型

Fig. 5 Finite element model of the lap joint for sintered silver nanoparticles. (a) geometrical model and its dimensions (mm); (b) boundary conditions and mesh discretization

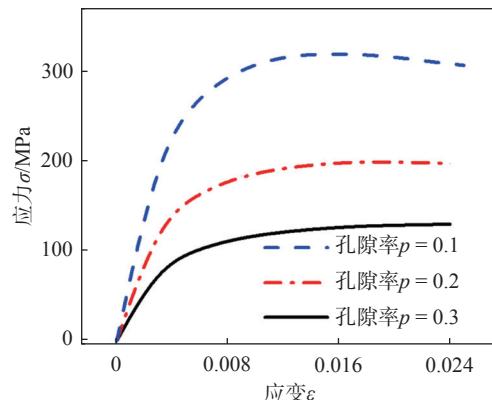


图 6 不同孔隙率 RVE 模型的弹塑性响应的预测结果

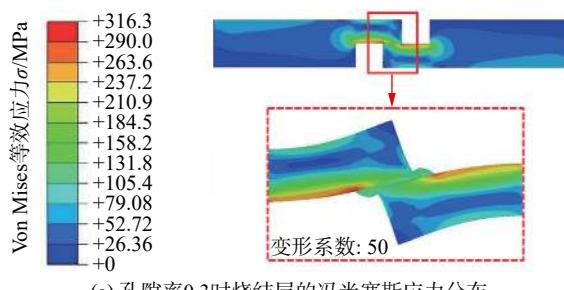
Fig. 6 Predicted elastoplastic response of RVE models with different porosities

在弹性变形阶段, 曲线的斜率即弹性模量越大, 可以推断, 孔隙率为 0.1 的 RVE 模型能够获得更大的极限抗拉强度, 这是由于具有较大基体体积分数的 RVE 在相同的总应变下包含更多的固体材料点。

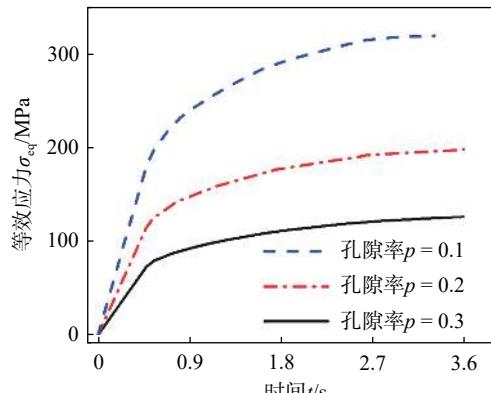
进一步观察到孔隙率为 0.1 的 RVE 在塑性段的应力不能快速稳定地上升, 并且在曲线最后阶段时应力略有下降, 在这种情况下, 材料更容易损坏; 相反由于孔隙的存在吸收了大量的变形, 随着孔隙率的增大, RVE 塑性段的应力相对稳定, 没有观察到较为明显的下降区域, 这提示高孔隙率可能有助

于提高多孔烧结纳米银复合材料的韧性。需要指出的是,由于试验组有限,此结论可能受到孔隙率范围的限制。在孔隙率为 0.3 以上的情况下,这一趋势是否仍然持续存在,未来需要进一步的试验验证。

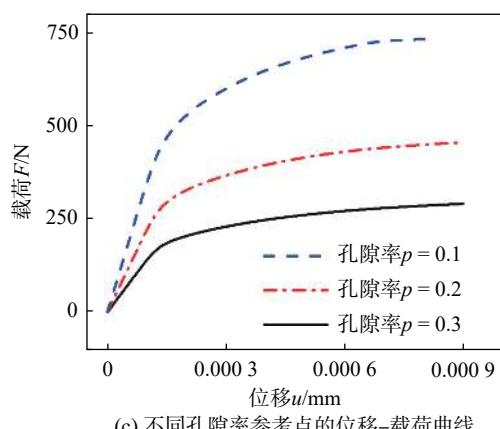
基于上述分析,将所预测的 RVE 模型的弹塑性应力-应变数据作为材料属性输入到搭接件的烧结银层中进行剪切试验模拟。首先给出了孔隙率为 0.3 时烧结银层的冯米塞斯应力云图,如图 7a



(a) 孔隙率 0.3 时烧结层的冯米塞斯应力分布



(b) 不同孔隙率烧结层冯米塞斯等效应力随时间的变化曲线



(c) 不同孔隙率参考点的位移-载荷曲线

图 7 烧结纳米银剪切变形行为模拟结果

Fig. 7 Predicted shear deformation behaviour of sintered silver nanoparticles. (a) von Mises stress distribution of the sintered layer with the porosity of 0.3; (b) von Mises equivalent stress curve with time of the sintered layer with different porosities; (c) displacement -load curve at the reference point under different porosities

所示,当设置变形系数为 50 时,观察到烧结银层在轴向作用力下,发生了较为明显的剪切变形,并且应力分布均匀,而在上文分析中,得知当施加不同方向的拉伸位移于烧结银的 RVE 模型时,得到的细观层面的应力分布在靠近孔隙附近具有明显的各向异性特点,因此宏观分析不能体现出 RVE 模型所能够表征的细观信息。

进一步,图 7b 和图 7c 分别给出了 3 种不同孔隙率(0.1, 0.2 和 0.3)烧结层的冯米塞斯等效应力随时间的变化曲线,以及参考点的载荷-位移曲线,可以明显观察到,随着银基体体积分数的增加,塑性区的等效应力变得更大,因此细观结构参数的变化,如孔隙率的改变会直接影响到烧结银的宏观剪切变形行为,当施加相同大小的位移时,孔隙率较大的烧结银对应的参考点的载荷越小,因此可以合理推测,随着孔隙率的增大,烧结银的抗剪强度会降低,这是由于在拉剪作用力下,孔隙周围的材料很容易发生破坏,而孔隙数目越多,孔隙就更容易贯穿,从而导致材料内部出现裂纹,最终被整体拉断。

综上所述,烧结银的微孔结构特性是影响材料宏观力学性能的关键因素,通过数值均匀化模型能够合理有效地将烧结银的细观变形特性和宏观性能联系起来。在未来的研究中,可以进一步将表征细观结构的参数与宏观性能直接联系起来,为优化烧结银在特定应用中的机械可靠性提供合理的依据。

4 结论

(1) 随着孔隙率的减小,烧结纳米银复合材料 RVE 模型的弹性模量和泊松比随之增大,由于基体的增强作用,孔隙率小的烧结银能够获得更大的抗拉强度。

(2) 微孔结构对烧结纳米银材料宏观力学性能具有显著的影响,通过数值均匀化模型能够有效建立微孔结构与宏观力学性能之间的联系,主要表现为孔隙率的改变能够直接影响细观形貌及其在细观层面的应力分布特点,最终决定了烧结银弹性模量、抗拉强度及抗剪强度等宏观力学性能的改变。

参考文献

- [1] Mao Minghui, Liu Jiansong, Tian Mengke, et al. Drop impact

- analysis of TSV-based 3D packaging structure by PSO-BP and GA-BP neural networks[J]. *China Welding*, 2022, 31(1): 37–46.
- [2] 吴炜祯, 杨帆, 胡博, 等. 用于大面积芯片互连的纳米银膏无压烧结行为 [J]. *焊接学报*, 2021, 42(1): 83–90.
Wu Weizhen, Yang Fan, Hu Bo, et al. Pressureless sintering behaviour of nanoscale silver paste for large-area chip interconnects[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2021, 42(1): 83–90.
- [3] Chen Chuantong, Zhang Hao, Jiu Jinting, et al. Thermal fatigue behaviors of SiC power module by Ag sinter joining under harsh thermal shock test[J]. *China Welding*, 2022, 31(1): 15–21.
- [4] Long Xu, Guo Ying, Su Yutai, et al. Constitutive, creep, and fatigue behavior of sintered Ag for finite element simulation of mechanical reliability: a critical review [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, 33: 1–17.
- [5] John Bai G, Zhiye Zach Zhang, Jesus N Calata, et al. Low-temperature sintered nanoscale silver as a novel semiconductor device-metallized substrate interconnect material[J]. *IEEE Transactions on Components Packaging Technologies*, 2006, 29(3): 589–593.
- [6] Long Xu, Chong Kainan, Su Yutai, et al. Connecting the macroscopic and mesoscopic properties of sintered silver nanoparticles by crystal plasticity finite element method[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 281: 109137.
- [7] Qian Cheng, Gu Tijian, Wang Ping, et al. Tensile characterization and constitutive modeling of sintered nano-silver particles over a range of strain rates and temperatures[J]. *Microelectronics Reliability*, 2022, 132: 114536.
- [8] Long Xu, Jia Qipu, Li Zhen, et al. Reverse analysis of constitutive properties of sintered silver particles from nanoindentations[J]. *International Journal of Solids Structures*, 2020, 191: 351–62.
- [9] Long Xu, Shen Ziyi, Jia Qipu, et al. Determine the unique constitutive properties of elastoplastic materials from their plastic zone evolution under nanoindentation[J]. *Mechanics of Materials*, 2022, 175: 104485.
- [10] Long Xu, Hu Bo, Feng Yihui, et al. Correlation of microstructure and constitutive behaviour of sintered silver particles via nanoindentation[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019, 161: 105020.
- [11] Yang Fan, Zhu Wenbo, Wu Weizhen, et al. Microstructural evolution and degradation mechanism of SiC–Cu chip attachment using sintered nano-Ag paste during high-temperature ageing[J]. *Journal of Alloys Compounds*, 2020, 846: 156442.
- [12] Su Yutai, Zhu Jiaqi, Long Xu, et al. Statistical effects of pore features on mechanical properties and fracture behaviors of heterogeneous random porous materials by phase-field modeling[J]. *International Journal of Solids Structures*, 2023, 264: 112098.
- [13] Su Yutai, Fu Guicui, Liu Changqing, et al. Thermo-elasto-plastic phase-field modelling of mechanical behaviours of sintered nano-silver with randomly distributed micro-pores[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, 2021, 378: 113729.
- [14] Carr James, Milhet Xavier, Gadaud Pascal, et al. Quantitative characterization of porosity and determination of elastic modulus for sintered micro-silver joints[J]. *Journal of Materials processing technology*, 2015, 225: 19–23.
- [15] Long Xu, Tang Wenbin, Xia Weijuan, et al. Porosity and Young's modulus of pressure-less sintered silver nanoparticles [C]//Proceedings of the 2017 IEEE 19th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC), IEEE, Singapore, December 6–9, 2017: 1–8.
- [16] Yao Yao, Huang Qi, Wang Shaobin. Effects of porosity and pore microstructure on the mechanical behavior of nanoporous silver[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 24: 101236.
- [17] Long Xu, Li Zhen, Lu Xiuzhen, et al. Mechanical behaviour of sintered silver nanoparticles reinforced by SiC microparticles[J]. *Materials Science and Engineering:A*, 2019, 744: 406–414.
- [18] 张超, 许希武, 严雪. 纺织复合材料细观力学分析的一般性周期性边界条件及其有限元实现 [J]. *航空学报*, 2013, 34(7): 1636–1645.
Zhang Chao, Xu Xiwu, Yan Xue. General periodic boundary conditions for fine mechanical analysis of textile composites and their finite element implementation[J]. *Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica*, 2013, 34(7): 1636–1645.
- [19] Luís F A Bernardo, Ana P B M Amaro, Deesy G Pinto, et al. Modeling and simulation techniques for polymer nanoparticle composites—a review[J]. *Computational Materials Science*, 2016, 118: 32–46.
- [20] Tian Wenlong, Chao Xujiang, Fu M W, et al. An advanced method for efficiently generating composite RVEs with specified particle orientation[J]. *Composites Science Technology*, 2021, 205: 108647.
- [21] Su Yutai, Shen Ziyi, Long Xu, et al. Gaussian filtering method of evaluating the elastic/elasto-plastic properties of sintered nanocomposites with quasi-continuous volume distribution [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2023, 872: 145001.
- [22] Hill Rodney. Elastic properties of reinforced solids: some theoretical principles[J]. *Journal of the Mechanics Physics of Solids*, 1963, 11(5): 357–72.

- [10] Shamsolhodaei A, Oliveira JP, Schell N, et al. Controlling intermetallic compounds formation during laser welding of NiTi to 316L stainless steel[J]. *Intermetallics*, 2020, 116: 106656.
- [11] Sun Q, Chen J, Wang X, et al. Study on weld formation and segregation mechanism for dissimilar pulse laser welding of NiTi and Cu wires[J]. *Optics and Laser Technology*, 2021, 140: 107071.
- [12] 柯文超, 从保强, 郭泽武, 等. NiTi 形状记忆合金电弧熔融涂覆及微连接机理 [J]. *机械工程学报*, 2022, 58(2): 176 – 184.
Ke Wenchao, Cong Baoqiang, Qi Zewu, et al. Arc-fused coating process and micro-joining mechanism of NiTi shape memory alloys[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(2): 176 – 184.
- [13] Zhang K, Liu F, Tan C, et al. Effect of heat input modes on microstructure, mechanical properties and porosity of laser welded NiTi-316L joints: A comparative study[J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2022, 848: 143426.
- [14] Ke W, Zeng Z, Oliveira J P, et al. Heat transfer and melt flow of keyhole, transition and conduction modes in laser beam oscillating welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2023, 203: 123821.
- [15] Mayeli P, Sheard G J. Buoyancy-driven flows beyond the Boussinesq approximation: A brief review[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2021, 125: 105316.
- [16] 宫建峰, 李俐群, 孟圣昊. 圆形摆动激光对 5A06 铝合金激光焊接熔池流动行为的影响分析 [J]. *焊接学报*, 2022, 43(11): 50 – 55.
Gong Jianfeng, Li Liqun, Meng Shenghao. Influence of circular oscillating laser on the melt flow behavior during 5A06 aluminum alloy laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2022, 43(11): 50 – 55.
- [17] Gao S, Feng Y, Wang J, et al. Molten pool characteristics of a nickel-titanium shape memory alloy for directed energy deposition[J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 142: 107215.
- [18] Chouhan A, Hesselmann M, Toenjes A, et al. Numerical modeling of in-situ alloying of Al and Cu using the laser powder bed fusion process: A study on the effect of energy density and remelting on deposited track homogeneity[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 59: 103179.
- [19] Hozoorbakhsh A, Hamdi M, Sarhan A, et al. CFD modelling of weld pool formation and solidification in a laser micro-welding process[J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2019, 101: 58 – 69.
- [20] Lee J Y, Ko S H, Farson D F, et al. Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2002, 35(13): 1570 – 1576.
- [21] Lee Y S, Zhang W. Modeling of heat transfer, fluid flow and solidification microstructure of nickel-base superalloy fabricated by laser powder bed fusion[J]. *Additive Manufacturing*, 2016, 12: 178 – 188.
- [22] Fuhrich T, Berger P, Hügel H. Marangoni effect in laser deep penetration welding of steel[J]. *Journal of Laser Application*, 2001, 13(5): 178 – 186.
- [23] Xie X, Zhou J, Long J. Numerical study on molten pool dynamics and solute distribution in laser deep penetration welding of steel and aluminum[J]. *Optics and Laser Technology*, 2021, 140: 107085.

第一作者: 柯文超, 博士研究生; 主要研究方向为激光加工及增材制造; Email: ke@std.uestc.edu.cn.

通信作者: 曾志, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: zhizeng@uestc.edu.cn.

(编辑: 郑红)

[上接第 20 页]

- [23] Hori Muneo, Nemat-Nasser Sia. On two micromechanics theories for determining micro-macro relations in heterogeneous solids[J]. *Mechanics of Materials*, 1999, 31(10): 667 – 82.
- [24] Long Xu, Chong Kainan, Su Yutai, et al. Meso-scale low-cycle fatigue damage of polycrystalline nickel-based alloy by crystal plasticity finite element method [J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 175: 107778.
- [25] Tian Wenlong, Qi Lehua, Chao Xujiang, et al. Periodic boundary

condition and its numerical implementation algorithm for the evaluation of effective mechanical properties of the composites with complicated micro-structures[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2019, 162: 1 – 10.

第一作者: 龙旭, 博士, 副教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为先进电子封装力学; Email: xulong@nwpu.edu.cn.

通信作者: 苏昱太, 博士, 副教授; Email: suyutai@nwpu.edu.cn.

(编辑: 郑红)