

文献解读 · SEM-SERVO 材料科研 · 金属陶瓷

文献解读 | 新型耐磨Ag-MAX相三维互穿金属陶瓷复合材料: 制备、结构与性能

中国科学院金属研究所

使用岛津SEM SERVO带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机实时观察记录裂纹扩展长度, 基于非线性弹性断裂力学通过公式计算材料的J积分, 并转换为与J积分相对应的有效应力强度因子评价材料的断裂韧性。

Wear-resistant Ag-MAX phase 3-D interpenetrating-phase composites: processing, structure and properties

Y. Guo^{a, b}, Y. Y. Liu^{a, b}, Z. Q. Liu^{a, b}, Z. F. Zhang^{a, b}

^a *Shi-Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*

^b *School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*

<https://doi.org/10.1007/s12274-023-6015-1>

Nano Research, 2023: 1-14.

期刊影响因子: 10.269

电接触材料广泛应用于电气开关、功率继电器等电子电气设备, 在开关电路、传导电流和承载等方面发挥着关键作用, 对于保障电子仪器和电气设备的安全可靠与高效运行至关重要。电接触材料需要具有优异的导电性和导热性、良好的力学性能, 以及高耐磨性和抗电弧侵蚀性能。常用的电接触材料通常是由导电金属铜或银与一种或多种增强相组成的复合材料, 其中铜或银提供导电性和导热性, 而增强相提供硬度、强度、耐磨性和抗电弧侵蚀性能。相比于铜基复合材料, 银基电接触材料具有电导率和热导率高、接触电阻小、化学性质稳定等优点。商用银基电接触材料的增强相主要包括金属 (如钨、镍、钛) 和陶瓷 (如氧化锡、氧化镉、氧化锌) 两大类。MAX相陶瓷具有共价键、金属键、离子键等混合键合状态, 兼具金属和陶瓷的优异特性, 并且与银之间具有良好的润湿性, 有望作为银基电接触材料的理想增强相。目前已报道的Ag-MAX相复合材料大多采用粉末冶金法 (热压烧结或放电等离子烧结等) 制备而成, 材料中的MAX相分散在银基体中, 难以避免孔洞、杂质等缺陷, 并且材料的微观结构有待进一步优化控制, 性能亟待提升。与之相比, 自然界经长期进化形成的生物材料往往表现出微观三维互穿结构, 各组元均保持连续并且在三维空间相互穿插, 该结构被证实可有效保留组元的性能优势, 并促进组元间应力传导, 提升复合材料的损伤容限。生物材料的巧妙结构可为高性能Ag-MAX相电接触材料研制提供有益的启示。

如图1所示，中国科学院金属研究所刘增乾研究组从生物材料中广泛存在的三维互穿结构获得灵感，利用Ag与Ti₃SiC₂ MAX陶瓷之间良好的润湿性，将Ag熔体无压浸渗到预烧结成型的Ti₃SiC₂多孔骨架中，研制了一系列具有微米和超细尺度的高陶瓷含量(>50 vol.%)新型耐磨Ag-MAX相三维互穿金属陶瓷复合电接触材料。连续的陶瓷相可起到高效的强化作用，连续的Ag相可提供连续的电荷传输路径，Ag和陶瓷在三维空间的相互穿插与机械互锁可促进相间应力传导，并限制各自相内部及两相界面处的损伤演化，而MAX相陶瓷的自润滑性质及其与Ag之间的强界面结合可有效减轻磨损和磨屑剥落。

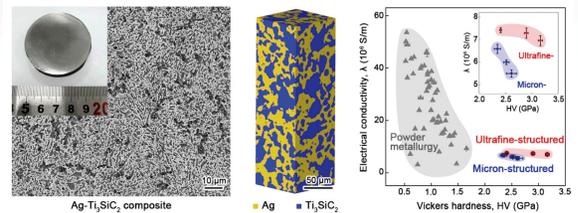


图1 新型Ag-MAX相三维互穿金属陶瓷复合材料的宏观形貌、微观结构及其性能与其他材料的比较

如图2所示，复合材料表现出超过2.3 GPa的高硬度、超过530 MPa的高弯曲强度、超过10 MPa·m^{1/2}的良好断裂韧性，以及10⁻⁵ mm³/(N·m)量级的低磨损速率，并且随着三维互穿结构从微米细化到超细尺度，材料的硬度、强度、电导率和断裂韧性得以同步提升。优异的综合性能以及简便的制备工艺使得新型耐磨Ag-MAX相三维互穿金属陶瓷复合材料在电接触领域具有显著优势，同时本工作提出的结构设计策略，即以MAX相陶瓷作为增强相、构筑微观三维互穿结构、将结构细化到超细尺度，有望扩展应用于新型高性能复合材料研发。

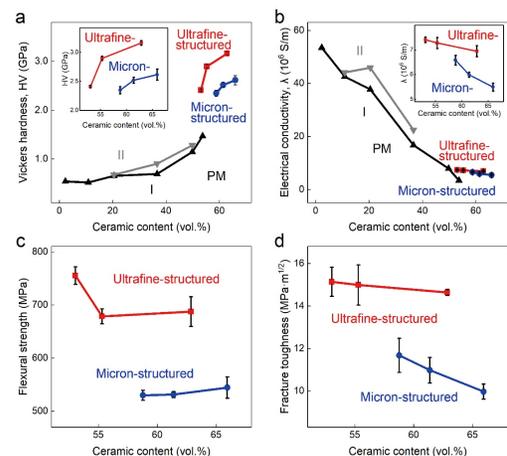


图2 Ag-Ti₃SiC₂复合材料的力学和电学性能。微米和超细结构复合材料的 (a) 维氏硬度、(b) 电导率、(c) 弯曲强度和 (d) 断裂韧性随陶瓷含量的变化

课题组通过自主设计夹具，改变加载方式，使用岛津SEM SERVO带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机实时观察记录裂纹扩展长度，基于非线性弹性断裂力学通过公式计算材料的J积分，并转换为与J积分相对应的有效应力强度因子评价材料的断裂韧性，研究人员得到高韧性和高损伤容限的复合材料。相关研究结果发表在Nano Research, Materials Today, Communications Materials等期刊。



图3 岛津SEM SERVO带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机