

# 岛津合作之窗

2024.3 - 001刊

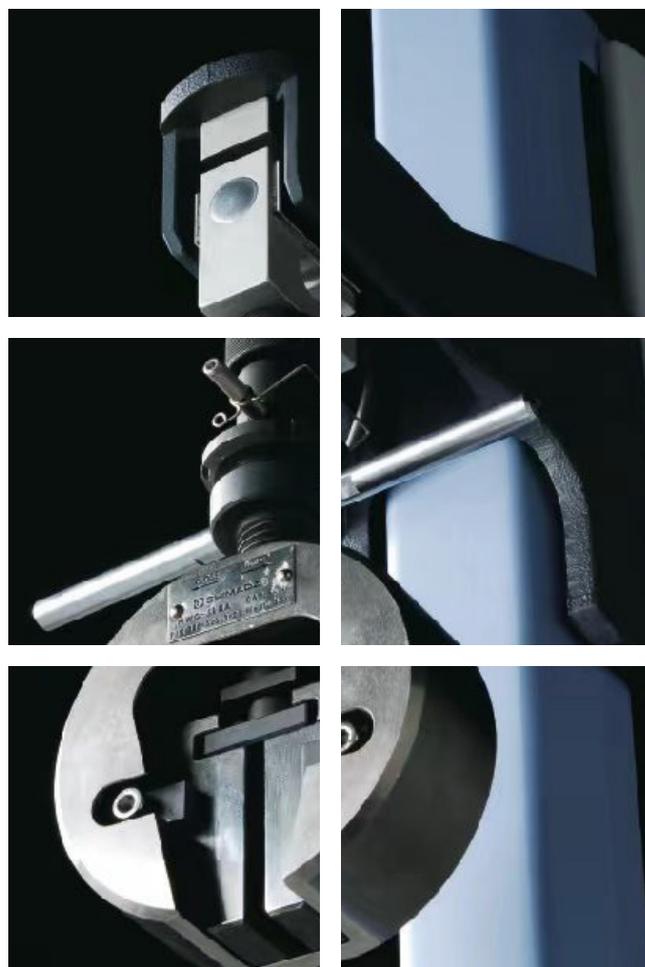
中国科学院金属研究所-岛津  
合作实验室

合作部门：材料疲劳与断裂国家重点实验室

合作应用方向：材料力学性能测试

合作仪器：各类试验机

# Shimadzu Co-Laboratory

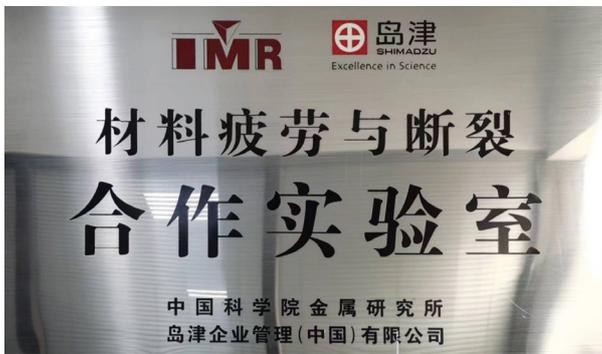


## 本期热点：

- ▶ 轻质高强韧高阻尼镁-MAX相仿生金属陶瓷  
(岛津SEM SERVO带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机应用)
- ▶ 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  
(岛津SEM SERVO带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机应用)

# 中国科学院金属研究所-岛津合作实验室

## 中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂实验室：



中国科学院金属研究所材料疲劳与断裂实验室成立于1983年，1991年通过国计委“材料疲劳与断裂国家重点实验室”验收，主要从事力学性能测试、构件失效分析、疲劳断裂机制、材料计算模拟、材料工艺技术研究。

材料疲劳与断裂实验室拥有国内先进、功能齐全的力学性能测试平台，具有一批经验丰富的力学性能测试专家，实验室已纳入GB/T 19001质量管理体系并取得CNAS资质认证。测试平台具有各种力学性能测试设备59台。可实现常

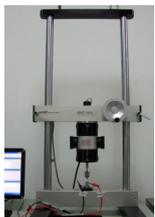
温、高温及低温下的拉伸、压缩、弯曲、撕裂、剥离、剪切、销钉支撑、应力疲劳、应变疲劳、扭转疲劳、旋转变形疲劳、热机械疲劳、原位疲劳、硬度、 $K_{IC}$ 、 $K_C$ 、 $J_{IC}$ 、CTOD、 $da/dN$ 、 $\Delta K_{th}$ 等测试。服务对象涵盖航空、航天、轨道交通、汽车、核电、钢铁、机械制造、科研机构等行业及领域。

## 岛津和中国科学院金属所的合作过往



2021年5月28日，“材料疲劳与断裂国家重点实验室-岛津合作实验室”正式揭牌建成。同时进行了相关的学术报告交流及探讨。

中国科学院金属所目前拥有岛津多台典型试验机：岛津SEM-SERVO高温原位疲劳试验机（配JSM-6510电子显微镜），岛津50kN常规液压疲劳试验机、岛津50kN低温液压疲劳试验机、岛津100kN低温液压疲劳试验机、岛津100kN高温电子万能材料试验机、岛津MMT-10NV-10型微小载荷电磁疲劳试验机。



MMT-101NV-10型  
微载荷疲劳机  
(2010年)



SEM-SERVO  
高温原位扫描疲劳机  
(2014年)



EHF-UV100K2-040-1A型  
10吨低温液压疲劳机  
(2019年)



EHF-EV051k2-040-0A型  
5吨低温液压疲劳机  
(2020年)



EHF-EV050K2A-040-1型  
50kN液压疲劳试验机  
(2022年)



AGX-100kN型  
100kN高温  
电子万能材料试验机  
(2022年)



## 段启强

工学博士, 副研究员

中国科学院金属研究所师昌绪先进材料创新中心材料使役行为研究部主任助理, 中国材料研究学会疲劳分会理事。

长期从事工程材料及构件的力学性能测试及评价, 定义了本征冲击韧性的概念和测试方法, 提出了一种通过几个小尺寸试样评价标准冲击韧性及任意厚度冲击韧性的新方法。同时, 提出了通过小尺寸试样评价材料断裂韧性的新方法, 以及通过材料疲劳及裂纹扩展速率评价构件疲劳使役寿命的评价方法。

从事力学性能测试近17年, 为外企、航空航天、高铁汽车、核电钢厂、机械制造、大学研究所等140余家单位提供了测试服务, 服务企业覆盖全国24个省、项目数量达300余项。主持或参与国家自然科学基金重大项目、重点基金、面上基金、青年基金、国家重点基础研究发展规划(973)项目、中科院战略先导科技专项、院地合作及企业委托项目200余项, 在Acta Mater.、Philos. Mag.、Mater. Sci. Eng., A和Metall. Mater. Trans.等SCI刊物上发表学术论文40余篇, 申请发明专利9项, 参与制定国家标准和企业标准2项。

### 专家与岛津的互动活动:

2023.3.2

参加北京科技大学-岛津合作实验室挂牌技术交流活动中, 邀请报告题目: 《金属材料及构件的疲劳断裂性能评价介绍》



2024.1.9

参加岛津公司与辽宁科技大学合办的高校材料学院专家会, 邀请报告题目: 《金属材料及构件的疲劳断裂性能评价》



2024.2.1

参加慧眼识“材”, 岛津助“力”-岛津新春答谢会试验机专场会, 邀请报告题目: 《金属材料及构件的疲劳断裂性能评价》

## 轻质高强韧高阻尼镁-MAX相仿生金属陶瓷

期刊影响因子：24.2。

采用岛津SEM SERVO带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机，基于自主设计的加载夹具，实时观察记录裂纹扩展长度，评价了材料的断裂韧性。

### A strong, lightweight, and damping cermet material with a nacre-like ultrafine 3D interpenetrated architecture

Y. Y. Liu<sup>a,b</sup>, Z. Q. Liu<sup>a,b</sup>, Z. F. Zhang<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Shi-Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

<sup>b</sup> School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

<https://doi.org/10.1016/j.mattod.2022.12.002>

Materials Today, 2023, 62: 62-70.

While materials that are light, strong, tough and simultaneously damping are highly attractive for a range of applications, it remains a challenge to achieve a combination of all these properties in a single material as these properties are often mutually exclusive. Here we present a cermet material comprising an ultrafine-grained Mg-Al-Zn magnesium alloy with ultrafine  $Ti_3AlC_2$  ceramic platelets, where the two phases are bi-continuous and interpenetrated in 3D space yet are alternately arranged in a layered fashion as in natural nacre. Such an architecture was constructed by infiltrating the alloy into the porous ceramic scaffold where the  $Ti_3AlC_2$  platelets were preferentially aligned by vacuum filtration and partially sintered. The resulting cermet exhibits a high flexural strength exceeding 1 GPa and a high specific flexural strength (strength normalized by density) of over 350 MPa/(gcm<sup>-3</sup>) – both exceeding those of most other bulk magnesium (and magnesium alloys), ceramics, and their composite materials – as well as high damping capacities and good fracture toughness. The architectural design strategy and the robust fabrication approach may prove to be effective for developing new high-performance cermet materials.

轻质高强韧高阻尼材料对于促进结构减重、保障安全服役，以及提升减振、吸能、降噪等功能至关重要，在航空航天、精密仪器等领域具有广泛应用前景。金属和陶瓷是工程应用最广泛的两类结构材料。陶瓷具有高模量、高硬度、高热稳定性等优点，但断裂韧性和阻尼偏低，力学性能对缺陷较为敏感，特别是在张应力条件下强度明显减弱。与之相比，金属通常表现出更为优异的延展性和断裂韧性，其中镁和镁合金具有突出的比强度、比刚度和阻尼性能，然而，其绝对强度、刚度以及断裂韧性均偏低，一定程度上限制了它们的广泛应用。

由金属和陶瓷组成的复合材料，又称金属陶瓷（cermet），有望综合两相的性能优势，同步获得轻质高强韧高阻尼性能。然而，现有金属陶瓷大都以强化相分散于连续基体相中，各相三维空间连通性较差，并且往往缺乏特定空间构型设计，难以兼具陶瓷的高强度与金属的高韧性，同时阻尼系数普遍偏低，并且随着强度提升而进一步下降。自然界中的贝壳、骨骼等天然生物材料具有微观三维互穿结构，即各组成相在三维空间均保持连续并且相互贯穿，以此实现不同性能优势的高效结合，这种巧妙结构可为研制新型高性能金属陶瓷材料提供重要启示。

近日，中国科学院金属研究所仿生材料研究团队与轻质高强材料研究部及国内外科研人员合作，选用兼具金属和陶瓷特性并且与镁界面润湿性良好的MAX相陶瓷作为组元，利用含氧气氛下的可控球磨工艺将MAX相剥离成亚微米尺度薄片，进而利用真空抽滤实现陶瓷薄片的择优定向排列，最后将镁熔体浸渗入部分烧结的多孔陶瓷骨架中，研制了具有超细尺度三维互穿类贝壳结构的新颖镁-MAX相仿生金属陶瓷材料，如图1所示。

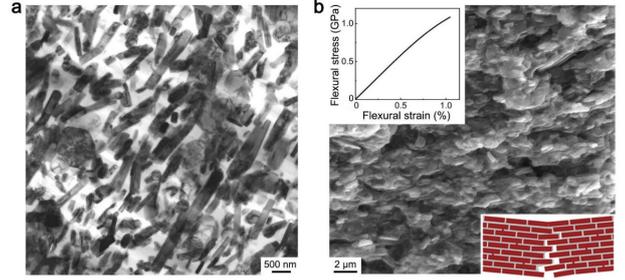


图1: 镁-MAX相仿生金属陶瓷的微观结构、弯曲力学性能与断裂机制

- 超细结构尺度：镁和MAX相的特征尺寸均在亚微米到纳米范围，实现金属相细晶强化，同时减小MAX相中的缺陷尺寸，充分发挥陶瓷组元的强化作用，并且获得高密度 ( $\sim 7.5 \times 10^3 \text{mm}^{-1}$ ) 的两相界面，通过促进位错在界面处形成与可逆运动提高阻尼性能；
- 两相三维互穿：镁和MAX相各自保持连续，连续的镁有助于保留其高阻尼性能，连续的MAX相有助于获得高强化效率，并且两相在三维空间相互贯穿，促进各相内部以及两相之间的应力传递，减轻应力集中，延缓因各单一相或两相界面损伤导致整体过早断裂；
- 仿生空间构型：MAX相薄片择优定向排列，镁填充薄片之间的空隙，形成类似天然贝壳的微观软硬交替层状结构，有助于减弱裂纹尖端的有效应力强度水平，诱导裂纹沿镁相发生偏转，并通过MAX相薄片的桥接与拔出阻碍裂纹面张开，从而起到有效的增韧作用。

上述组成与结构的巧妙设计赋予仿生材料优异的轻质高强韧高阻尼性能，在密度与铝合金相当的条件 (  $2.79 \text{gcm}^{-3}$  )，其室温压缩与弯曲强度均超过1GPa，即使在200°C下，其强度依然接近700MPa，均显著高于各组元以及其他镁-陶瓷复合材料，同时获得了超过350MPa/( $\text{gcm}^{-3}$ )的超高比强度，高于绝大多数块状镁及镁合金、陶瓷以及其他金属-陶瓷复合材料。此外，研究人员采用**岛津 SEM SERVO 带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机**，基于自主设计的加载夹具，实时观察记录裂纹扩展长度，进而基于非线性弹性断裂力学计算得到材料的J积分，并转换为与之对应的有效应力强度因子定量评价了的断裂韧性，仿生材料表现出超过单一镁组元的优异阻尼性能以及良好的断裂韧性 ( $16.4 \text{MPam}^{1/2}$ )，如图2所示。

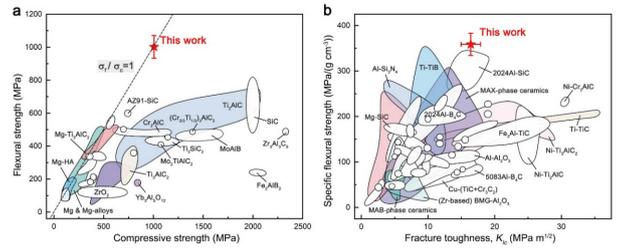


图2: 镁-MAX相仿生金属陶瓷的力学性能及其与其他材料的比较

新型镁-MAX相仿生金属陶瓷在承载、减振等方面具有独特优势，有望应用于航空航天、精密仪器等领域，该仿生设计思路也可为开发新型高性能金属陶瓷材料提供有益启示，相关研究成果发表在Materials Today。



## 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

期刊影响因子：10.269。

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 <sup>a,b</sup>, Y. Y. Liu <sup>a,b</sup>, Z. Q. Liu <sup>a,b</sup>, Z. F. Zhang <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup> Shi-Changxu Innovation Center for Advanced Materials, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

<sup>b</sup> 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.

Electrical contact materials are generally Ag- or Cu-based composites and play a critical role in ensuring the reliability and efficiency of electrical equipments and electronic instruments. The MAX phase ceramics display a unique combination of properties and may serve as an ideal reinforcement phase for electrical contact materials. The biological materials evolved in Nature generally exhibit 3-D interpenetrating-phase architectures, which may offer useful inspiration for the architectural design of electrical contact materials. Here, a series of bi-continuous Ag-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> MAX phase composites with high ceramic contents exceeding 50 vol.% and having micron- and ultrafine-scaled 3-D interpenetrating-phase architectures, wherein both constituents were continuous and mutually interspersed, were exploited by pressureless infiltration of Ag melt into partially sintered Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> scaffolds. The mechanical and electrical properties as well as the friction and wear performance of the composites were investigated and revealed to be closely dependent on the ceramic contents and characteristic structural dimensions. The composites exhibited a good combination of properties with high hardness over 2.3 GPa, high flexural strength exceeding 530 MPa, decent fracture toughness over 10 MPa m<sup>1/2</sup>, and good wear resistance with low wear rate at an order of 10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/(N·m), which were much superior compared to the counterparts made by powder metallurgy methods. In particular, the hardness, electrical conductivity, strength, and fracture toughness of the composites demonstrated a simultaneous improvement as the structure was refined from micron- to ultrafine-scales at equivalent ceramic contents. The good combination of properties along with the facile processing route makes the Ag-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 3-D interpenetrating-phase composites appealing for electrical contact applications.

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Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub> 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Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>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。

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<sup>1/2</sup>的良好断裂韧性，以及10<sup>-5</sup> mm<sup>3</sup>/(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。

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。

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。

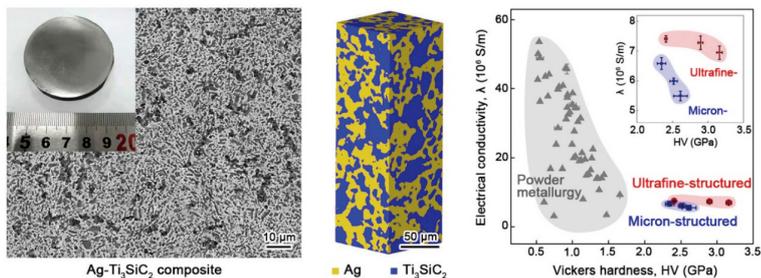


图1 新型Ag-MAX相三维互穿金属陶瓷复合材料的宏观形貌、微观结构及其性能与其他材料的比较

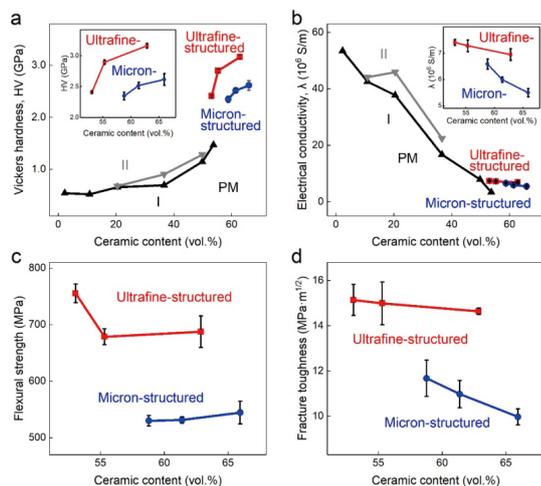


图2 Ag-Ti<sub>3</sub>SiC<sub>2</sub>复合材料的力学和电学性能。微米和超细结构复合材料的 (a) 维氏硬度、(b) 电导率、(c) 弯曲强度和 (d) 断裂韧性随陶瓷含量的变化

## 中国科学院金属研究所采用岛津SEM-SERVO带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机发表的部分典型文献：

1 Guoqi Tan, Jian Zhang, Long Zheng, et al., Nature-Inspired Nacre-Like Composites Combining Human Tooth-Matching Elasticity and Hardness with Exceptional Damage Tolerance, *Adv. Mater.*, 2019, 31, 1904603

《类天然贝壳型高强度、高韧性义齿复合材料》

期刊影响因子 29.4

岛津带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机在仿生材料研究中的应用

2 Yanyan Liu, Xi Xie, et al., A strong, lightweight, and damping cermet material with a nacre-like ultrafine 3D interpenetrated architecture, *Materials Today*, 2023, 62: 62-70

《轻质高强韧高阻尼镁-MAX相仿生金属陶瓷》

期刊影响因子 24.6

岛津带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机在金属陶瓷研究中的应用

3 Yu Guo, Xi Xie, et al., Wear-resistant Ag-MAX phase 3-D interpenetrating-phase composites: processing, structure and properties, *Nano Research*, 2023: 1-14

《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》

期刊影响因子 10.269

岛津带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机在金属陶瓷研究中的应用

4 R.Q. Yang, S.X. Li and Z.F. Zhang, Cyclic deformation and dynamic compressive properties of copper bicrystals, *Materials Science and Engineering A*, 466 (2007) :207-217

《铜双晶的循环变形和动态压缩性能》

期刊影响因子 6.4

岛津带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机在金属晶体研究中的应用

5 Qiu Y, Pang J C, Zou C L, et al., Fatigue strength model based on microstructures and damage mechanism of compacted graphite iron, *Materials Science & Engineering A*, 724 (2018) :324-329

《基于压实石墨铸铁微观结构和损伤机理的疲劳强度模型》

期刊影响因子 6.2

岛津带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机在传统铸造材料研究中的应用

6 Z.B. Xing, L.W. Kong, et al., Preparation and mechanical properties of ultra-high strength superalloy fibers, *Journal of Alloys and Compounds*, 960 (2023) :170930

《超高强度高温合金纤维的制备及其力学性能》

期刊影响因子 6.2

岛津带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机在高温合金研究中的应用

7 H.Y. Zhang, S. Qu, et al., Characterization and cause analysis of the "bright spots" on the surface of a GH2674 large-size gas turbine disk, *Engineering Failure Analysis*, 140 (2022): 106559

《GH2674大型燃气轮机轮盘表面“亮点”的表征及原因分析》

期刊影响因子 4

岛津带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机在高温合金研究中的应用

8 D.D. Ben, Y.R. Ma, et al., Heterogeneous microstructure and voids dependence of tensile deformation in a selective laser melted AlSi10Mg alloy, *Materials Science & Engineering A*, 798 (2020) :140109

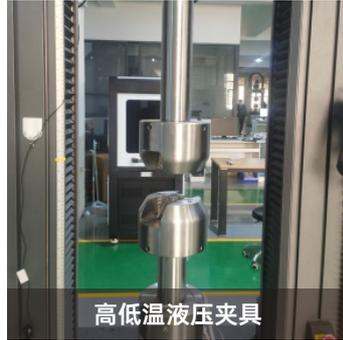
《选择性激光熔化AlSi10Mg合金的非均匀组织和拉伸变形的孔隙相关性》

期刊影响因子 4

岛津带扫描电子显微镜的高温原位疲劳试验机在增材制造金属材料研究中的应用

# 适配岛津试验机的 特制工装夹具

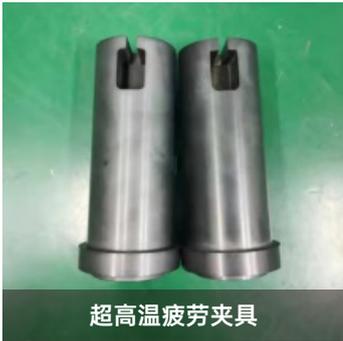
疲劳与断裂实验室平台基于采购的岛津试验机型号，结合测试需求，特制了上百套工装夹具。



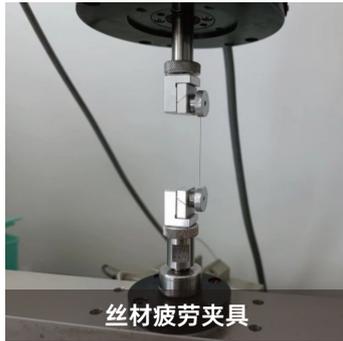
高低温液压夹具



高温液压夹具



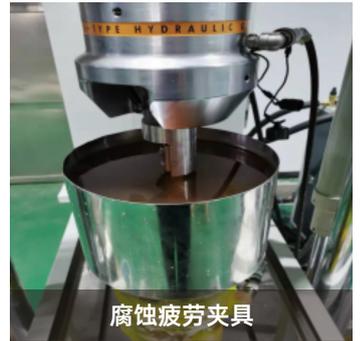
超高温疲劳夹具



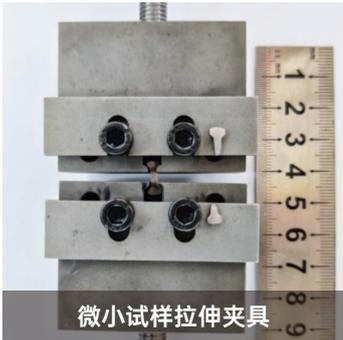
丝材疲劳夹具



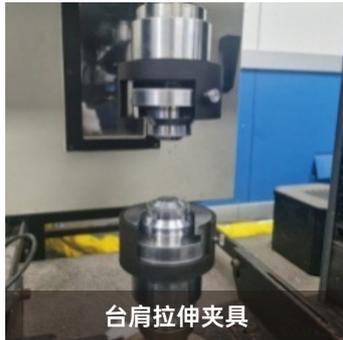
齿轮疲劳夹具



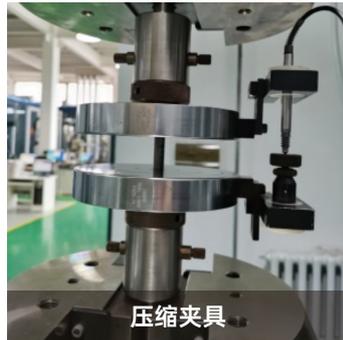
腐蚀疲劳夹具



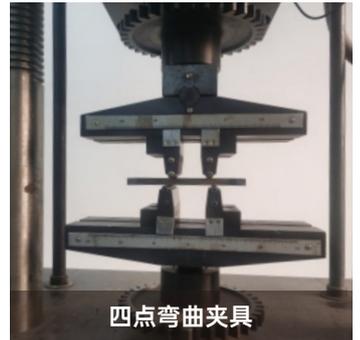
微小试样拉伸夹具



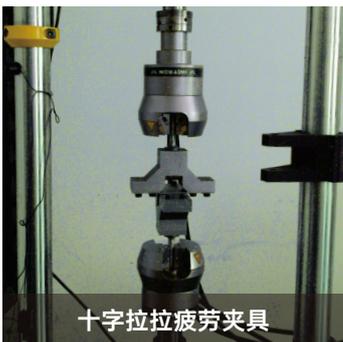
台肩拉伸夹具



压缩夹具



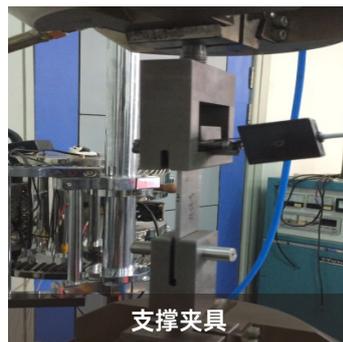
四点弯曲夹具



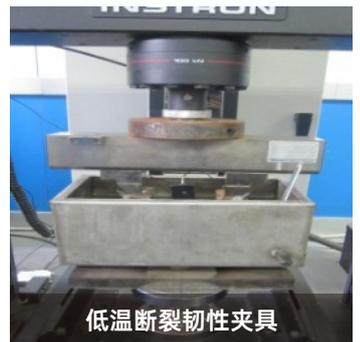
十字拉拉疲劳夹具



剥离夹具



支撑夹具



低温断裂韧性夹具

## 岛津分析仪器 询价有礼

### 活动方式

提交岛津分析仪器相关产品的需求信息，并经核实需求信息真实有效，每月将从真实信息中随机抽取5位中奖名单！  
获奖名单将在每月初通过岛津科技资讯公布，公布后寄出礼品，敬请留意！（同一家公司相同的询价需求不能重复获奖，礼品将颁发给最早提交询价的人员）

### 活动时间

即日起至2024年3月31日。

### 如何参加

扫描右侧二维码，填写并提交岛津分析仪器相关产品的需求信息。

### 奖项设置



双肩包



加湿器

注：礼品图片仅供参考，礼品随机派送。