

中国材料大会 2024
暨第二届世界材料大会
CMC 2024 & WMC 2024

July 8-11, 2024
Guangzhou, China

E09-材料表面工程
E09-Surface Engineering of
Advanced Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

Website: <https://cmc2024.scimeeting.cn>

E09.材料表面工程

分会名誉主席：丁传贤、薛群基、周克崧、宫声凯

分会主席：刘敏、雷明凯、郭洪波、李长久、王立平、刘宜勇、崔洪芝、邓畅光

E09-01

极端条件下润滑耐磨表面工程技术的发展与应用

陈建敏¹

1. 中国科学院兰州化学物理研究所

E09-02

移动式增材修复与再制造技术

朱胜¹

1. 陆军装甲兵学院

E09-03

基于界面能调控的电枢表面改性及其电磁发射服役性能

张诚¹、柳林¹

华中科技大学

电磁发射武器是一种依靠强电流瞬时推进电枢驱动弹丸高速飞行的高科技武器，已被认为是未来海战的战略武器之一。然而，电磁发射武器的服役条件是在电-磁-热-力等多场耦合环境中，在发射过程中，Al 合金电枢可能会熔化并粘附在 Cu 轨道表面，从而降低轨道发射效率与服役寿命。针对枢/轨界面粘着磨损难题，本文提出了一种基于界面能调控的新策略，成功实现枢/轨界面粘着磨损大幅降低。首先，我们发现通过在 7075Al 合金电枢表面构筑与 Cu 非混溶（具有正混合热）的 W 薄膜，可以使摩擦系数（COF）降低 45%，Al 粘附量降低 100%。分子动力学模拟结果表明，Cu/W 之间在摩擦过程中形成了无序非晶界面层，有效匹配接触界面的原子运动并产生了润滑效应，从而导致摩擦系数降低。而 Cu/Al 间的高粘附能促进 Al 原子的扩散并在界面产生冶金反应，导致 Cu 表面发生严重的黏着磨损。其次，考虑到电磁发射涉及多场耦合作用与苛刻的服役环境，进一步提出枢/轨界面能和薄膜力学性能双调控策略实现减摩擦降磨。基于这一理念，开发出了综合性能更加优异的电枢表面改性材料（TiC-W），其中，通过 W 相来调控界面能，而 TiC 相来调控强韧性。电磁发射条件下，我们发现采用 TiC-W 薄膜改性后的电枢进行发射，Cu 合金轨道表面粘附量比采用未改性电枢降低 94.58%，比采用 W 薄膜改性电枢降低 68.48%。我们的工作表明，在电-磁-热-力多场耦合条件下，电枢表面薄膜需同时具有高的断裂抗力以及正界面能，才能更好的满足电磁发射的服役要求。

E09-04

镁合金表面“类水滑石”自修复膜层研究进展

吴量*、姚文辉、潘复生

重庆大学

镁合金“类水滑石”膜层具有耐蚀性高、离子交换和自修复等特点，是新一代主动防护涂层研究的热点。传统的镁合金“类水滑石”膜层的制备一般都需要涉及外来金属离子的引入。本研究利用镁合金阳极/微弧氧化膜中的镁铝混合氧化物，可为“类水滑石”膜层的转化提供铝和镁元素的来源，在一定反应条件下可利用镁合金阳极/微弧氧化膜转化制备出“类水滑石”膜层，并负载有机缓蚀剂、无机缓蚀剂，引入稀土金属阳离子，或者复合有机分子改性等。该方法具备两个优点：一方面，氧化膜的孔洞被生长的 LDHs 纳米片封闭，可以作为很好的物理屏障阻止氯离子的侵蚀；另一方面，LDHs 作为一种纳米容器可以存储和释放缓蚀剂离子，具备主动防护能力，该方法实现了阳极/微弧氧化膜封闭与主动防护能力的一体化。本研究探讨了基于镁合金阳极/微弧氧化膜原位转化生长 LDHs 膜层的生长机制，并通过低表面能试剂、

纳米颗粒、新型二维材料 MXenes、氧化石墨烯等，进一步对“类水滑石”膜层进行表面改性或复合，使得防护膜层兼备“耐蚀、耐磨、自修复、超疏水”等多种功能，使得“类水滑石”膜层具备在多种复杂环境下的服役能力，并对其发展和应用前景进行了评述。

E09-05

摩擦纳米发电机的固液界面构建及其能量转换研究

李潇逸*

中国海洋大学

人类社会面临着化石能源短缺及其利用带来的环境污染问题，因此，推动能源转型升级是当今世界的重大任务之一。此外，随着人工智能、物联网以及大数据时代的到来，人们开始愈发关注发展分布式能源。其中，包含降雨、波浪和河流等多样形式的水能作为可再生清洁能源，因其储量巨大，分布广泛等特点，极具开发价值。摩擦纳米发电机（TENG）作为一种新型能源技术，不仅在收集水能等可再生能源方面具有广阔的前景，而且也能为物联网探测器的分布式能源发展提供可能性。TENG 种类多样，其中，基于固-液接触起电的 TENG 具有结构简单、使用范围广泛以及输出性能高的特点，特别适用于分布式水能收集领域。然而，固-液接触型 TENG 仍存在很多亟待解决的问题。首先，固-液界面的电荷极易耗散，导致 TENG 输出低；其次，目前适用于液体环境的摩擦材料种类较为单一；再次，固-液界面摩擦起电机理尚未明确，电子转移缺乏定量化标准；最后，尚未建立统一的 TENG 能量定量化模型，缺乏对 TENG 器件及集成系统设计的理论指导。报告主要围绕固-液接触起电的水能收集 TENG，通过修饰摩擦材料表面、设计中间层结构以及瞬时结构，成功构筑了面向小尺度液滴能量收集和大尺度蓝色能源收集的高性能 TENG 器件；并同步构建了能量定量分析方法，计算了 TENG 的能量转换过程；分析了液体中离子浓度对不同结构 TENG 的影响，并展示了 TENG 在盐离子环境中的应用，为高性能海洋 TENG 的发展提供参考价值。

E09-06

二维过渡金属碳化物的有机共价表面修饰

周辰坤*¹、王棣²、Dmitri V². Talapin²

1. 南京师范大学
2. 芝加哥大学

二维过渡金属碳化物 MXenes 材料在超级电容器、电池、电磁干扰屏蔽和电催化等多领域中表现优异。这类材料不仅具有高导电性等优异性质，还具有可共价修饰的表面端基，为功能导向的二维材料表面化学研究提供了理想的平台。表面端基可调控材料的本征性质，包括电子结构、载流子迁移率、铁磁性等。构建有机无机杂化材料作为二维 MXene 结构调控工作中的重要方向，可充分结合无机层状结构的优异特性和有机配体的结构可调性，构建机械性能、结构性能可调的功能性复合材料。然而，传统方法制备的 Tx 终端-MXene (Tx=-O, -OH 和-F, 主要为 Ti₃C₂T_x)中 Ti-O 和 Ti-F 的键能较高，有机功能化仅能通过插层化学或与-OH 终端反应等方式开展，配体表面修饰不均一旦端基无法调控。

我们报道了基于胺基/亚胺基键合模式的 MXene 有机无机杂化新策略，实现了端基可调控的均一有机表面修饰。结合配位化学、自组装单层膜和表面化学的原理对杂化材料的结构进行了系统的表征分析和理解，阐明了终端键合模式对有机配体均一修饰和有机-无机组分相干耦合的重要作用，解决了 MXene 易氧化的稳定性问题，在水系超级电容器等应用中具有重要潜力。

E09-07**高温自合涂层的宽温域摩擦磨损行为研究**邵天敏¹

1. 清华大学

E09-08**先进航空发动机高温功能涂层研究进展**

郭洪波

北京航空航天大学

E09-09**密排六方结构金属如何实现低摩擦磨损**

陈翔*

南京理工大学

摩擦诱导金属表面形变微结构演化规律尚未知晓,使得材料摩擦磨损行为难以预测,严重制约高端精密制造技术的发展,是材料摩擦学面临的核心挑战之一。针对该关键科学问题,本报告将首先简单介绍金属摩擦诱导微结构演化的基本过程,重点介绍密排六方结构金属在摩擦加载下的位错运动和孪生机制,揭示低摩擦系数的微结构起源,并通过激光表面改性和二维材料耦合作用实现低摩擦磨损,为低摩擦高耐磨密排六方金属材料提供理论基础。

E09-10**面向高端装备核心零部件的表\界面强化改性智能制造关键技术**

梁忠伟*

广州大学

高端装备属于国之重器,是实现国家现代化的重大战略装备。面向核心零部件高精度保持性、高能效降耗、高抗疲劳寿命、高载荷强度、高运行可靠性服役性能重大需求,提出其表\界面强化改性智能制造关键技术,建立基于材料—结构—工艺—组织—表\界面功能一体化的智能制造“卡脖子”关键共性技术体系。该技术在零部件表\界面强化改性协同机制与性能梯度组织结构智能精准调控领域具有创新性,通过制定形-性协同精准制造新工艺,使核心零部件具备耐腐蚀、耐磨损、抗疲劳、高硬度、高强韧优势,助力高端装备运转平稳性、重复定位精度、回转精确度及可靠寿命等使役性能提升。该技术为突破核心零部件“五高”性能瓶颈提供关键变革性手段,扩展服务于重载机器人,风电\核电机组、航发主轴、燃气轮机、液压泵组、特种装备、海工平台等重大装备先进制造领域,助力国家“新质生产力”、“制造强国”及“粤港澳大湾区先进制造集群”等战略的高质量实现,具有重大意义和深远影响。

E09-11**生物镁合金表面离子束改性及性能研究**齐福刚*¹、余加²、戴翌龙¹、欧阳晓平¹

1. 湘潭大学

2. 重庆大学

生物镁合金可降解吸收,具有良好生物相容性,弹性模量与人体骨接近,是理想的人体植入物材料。然而,过快的降解速率一直是限制生物镁合金临床应用的主要难题。离子束表面改性技术是把所需元素的离子注入或沉积到工件表层内的一种表面强化处理工艺,能使工件的摩擦系数,耐磨性,抗蚀性,耐疲劳

性以及生物性能等发生变化。本研究以 WE43 生物镁合金为基体,采用离子注入和磁过滤离子镀技术在基体表面制备注入层和沉积层,系统地探究了不同注入参数和沉积参数对 WE43 镁合金表面形貌与结构、耐腐蚀性和生物性能的影响。

E09-12

SLM-Ti6Al4V 表面氮化处理及其磨损腐蚀性能研究

崔中雨、满成、崔洪芝*

中国海洋大学

本文以轧制态 Ti6Al4V 为参照,研究了 SLM-Ti6Al4V 在 820℃和 920℃下的气体渗氮及 820℃下的等离子氮化行为,并分析了氮化处理后材料的硬度及磨损-腐蚀行为。两种氮化处理后,Ti6Al4V 表面形成由 TiN 和 Ti₂N 组成氮化物层以及氮原子固溶区,高温气体渗氮时,随着处理温度从 820℃升高 920℃,SLM-Ti6Al4V 和轧制态 Ti6Al4V 合金的氮化物层的最大厚度分别达到 10.2 μm 和 8.23 μm (920℃),显微硬度分别达到 1251 HV0.2 和 1290 HV0.2;等离子氮化后 SLM-Ti6Al4V 和轧制态 Ti6Al4V 氮化物层厚度分别为 14.8 μm 和 18.4 μm,硬度分别达到 1642 HV0.2 和 1490 HV0.2。由此可见,SLM-Ti6Al4V 中极细的针状 α'相及高密度位错能够促进氮原子的扩散行为。此外还发现,通过氮化处理后 SLM-Ti6Al4V 基体由针状 α'相转变为典型的层片组织,未发生明显的组织粗化现象,具有良好的综合性能。磨损-腐蚀行为研究表明,氮化处理后 SLM-Ti6Al4V 的抗磨损、腐蚀、磨损-腐蚀性能均有显著提升,其中未处理的 SLM-Ti6Al4V 磨损类型以磨粒磨损为主,而经过氮化处理的合金的磨损机制转化为是磨粒磨损和黏着磨损的组合。综合上述研究结果,适当温度下的氮化处理能够同时达到组织结构调控和表面强化,具有“一石二鸟”的效果。

E09-13

海洋环境材料强耦合损伤与防护

王立平

中科院宁波材料所

E09-14

极端环境材料表面高效强化技术与测试评价

崔洪芝

中国海洋大学

E09-15

航空发动热障涂层环境沉积物 CMAS 腐蚀与防护

郭磊*、高远、张馨木、孟诗钧、叶福兴

天津大学

热障涂层 (Thermal barrier coating, TBC) 是涂覆在航空发动机涡轮叶片表面的高温防护涂层,大幅提高叶片合金工作温度和叶片寿命。近年来,随着航空发动机向高推重比发展,发动机工作温度和 TBC 表面温度越来越高,TBC 表面发现有很多环境沉积物(主要成分为 CaO、MgO、Al₂O₃、SiO₂,简称 CMAS)。CMAS 对 TBC 有严重的腐蚀性,是导致叶片热障涂层过早剥落的重要原因;一旦 TBC 剥落,叶片金属将直面恶劣高温环境,给发动机安全造成严重隐患。因此,CMAS 高温腐蚀成为 TBC 发展的麻烦,CMAS 防护是 TBC 领域研究热点和难点。本报告总结了导致 TBC CMAS 破坏的主要原因,提出了基于抑制熔融 CMAS 内渗的防护方法,发展了抗 CMAS 腐蚀 TBC。此外,还提起了令 TBC CMAS 腐蚀雪上加霜的新问题:海洋环境下 CMAS、海盐耦合腐蚀的问题,为未来 TBC 高温腐蚀研究提出了新方向。

E09-16**先进超长距离等离子喷涂技术的研究进展**

刘森辉*、李成新、李长久

西安交通大学

热喷涂技术各有特点，但无论那种方法，在喷涂过程中形成涂层都需要经历喷涂材料的加热熔化、飞行、碰撞、沉积。涉及到，如气体/液滴/固体/浆料/燃料的燃烧、横向交叉流、雾化、多相流气体动力学、多相可压缩流动、湍流、悬浮液和纳米流体流动等多种问题。本文以大气层流等离子喷涂技术（ALPS，喷涂距离 500 mm）和低压 PS-PVD 技术（喷涂距离 1500 mm）为研究对象，通过研究等离子射流向基体的热质传输行为，研究了等离子体射流对陶瓷材料的瞬时汽化和雾化破碎作用机理，揭示了不同腔室压力（50-1000 Pa）下陶瓷纳米团聚粉末在低压等离子射流中随时间变化的多相流体热质传输特点，澄清了飞行粒子的自阴影效应、液滴的闪蒸、液滴的破碎和雾化产生的物理机制，以及对热障涂层准柱状陶瓷涂层的形成和影响，并将结果与现场实验测量结果进行了比较。

E09-17**二维碳化钛基电磁功能材料的构筑及其多功能化应用研究**

曾小军

景德镇陶瓷大学

E09-18**先进动力对表面技术的需求**

刘巧沐

中国航发四川燃气涡轮研究院

E09-19**粒子界面氧化物形态对冷喷涂固态增材金属塑性的影响**雒晓涛¹

1. 西安交通大学

E09-20**类液膜层功能化连续灵敏监测电极传感器的研究**

杨成端*

南方医科大学

生物传感器可以随时间推移自动和连续跟踪生物标志物水平，这对于生物医学和环境应用中的实时传感至关重要。虽然许多电化学传感器已经被开发可快速和灵敏地监测生物标记物，但它们在复杂生物液体中的传感稳定性依旧会受到不可避免的蛋白质或细菌的非特异性粘附的干扰。近年来，各种基底表面改性技术不断发展用于抵抗生物污染，但传感器电极的功能化抗生物污染很少实现。在这里，我们报道了一个集成的三电极系统（ITES），采用“类液”聚二甲基硅氧烷（PDMS）刷，可以连续稳定地监测复杂流体中的活性氧（ROS）。基于光滑的“类液”涂层，改性的 ITES 表面可以防止各种液体的粘附以及蛋白质和细菌的粘附。“类液”涂层对电极检测 ROS 的灵敏度没有显著影响，即使与细菌孵育 3 天后，传感性能仍保持稳定，不受细菌影响。此外，由于电极表面的细菌污染，可以减少 PDMS 刷修饰 ITES（PMITES）并在 24 小时内在富细菌液中具有稳定的稳定性。这项技术为生物标志物的持续和实时监测提供了新的机会，这将促进生物医学和环境应用的先进传感器的发展。

E09-21

原位自生复合石墨烯涂层及其强韧化机制研究

张楷浩*

香港科技大学（广州）

金属薄膜材料具有较低的抗弯刚度，与柔性基底贴合可进一步降低外加载荷对金属材料的影响，因此被广泛应用于柔性电子、可穿戴设备领域。然而，通过降低金属材料厚度或者设计蛇形可拉伸结构并不能从根本上解决金属薄膜材料，特别是金属纳米薄膜因为塑性变形区不足引起的剪切带过早形成以及脆性断裂等行为，这制约了金属薄膜材料的应用。保持金属薄膜在大变形以及循环载荷下的机械完整性和高导电性对柔性电子材料、可穿戴设备的实际应用至关重要。本文提出了利用化学气相沉积法在金属纳米薄膜基底上原位生长高品质石墨烯层实现碳纳米增强金属基复合薄膜材料。由于原位自生石墨烯层的结构连续性，该方法能有效利用 sp^2 二维碳纳米材料优异的层内本征特性提高石墨烯-金属界面剪切强度；同时原位生长的石墨烯层与金属基体贴合程度高，能有效阻碍金属薄膜内部剪切带的形成，并且在裂纹尖端区域提高了材料加工硬化性能，阻碍了裂纹扩展，这有效提高了纳米薄膜材料的韧性。本报告将主要介绍：（1）通过快速碳扩散-偏析调空实现 50-1000 nm 厚钼薄膜表面高品质单层石墨烯生长机理和优化工艺；（2）原位生长石墨烯-钼纳米复合薄膜的力学强韧性机制与实验分析；（3）利用该纳米复合薄膜制备可拉伸导电薄膜，实现了在超过 60% 宏观变形下仍保持高导电性能，疲劳强度相比于未覆盖石墨烯纳米钼膜提升近 30 倍。综上，本研究发现利用化学气相沉积法直接原位自生制备的石墨烯-金属纳米复合薄膜能有效利用二维碳纳米材料层内特性提升力学强韧性，有望促进金属薄膜材料在柔性电子和可穿戴设备领域的实际应用。

E09-22

CoCrNi 基耐磨蚀涂层

姜迪¹、崔洪芝^{*1,2}、宋晓杰¹、陈浩²

1. 山东科技大学

2. 中国海洋大学

摘要内容：海工、能源开采装备对耐磨蚀材料需求量巨大而迫切，每年因腐蚀、磨损及其耦合作用造成巨大的经济损失。设计开发耐磨蚀新材料体系对于提高能源利用率，降低碳排放至关重要。常规金属基复合材料难以突破磨损与腐蚀的导致关系，导致材料无法服役于磨损与腐蚀耦合作用的严酷环境。本文根据多主元合金设计理念，结合传统耐磨耐蚀合金的设计原则，以 CoCrNi 体系为基础，采用激光熔覆的方式原位制备复合涂层，从调控涂层中物相种类、组织结构、界面关系以及电位差等特征出发，以期制备兼具耐磨耐蚀性能的多主元合金复合涂层材料，探究各组元对于磨损、腐蚀的具体作用，为后续进一步开发耐磨耐蚀一体化新材料提供试验和理论依据。

E09-23

高硬度、高韧性 WC 基涂层的制备与耐磨损性能研究

王海滨*、王晨、吕皓、刘雪梅、宋晓艳

北京工业大学

重载荷、强冲击、高速磨擦等恶劣工况要求热喷涂 WC 基涂层具有更高的综合性能，特别是在降低或者避免 WC 的分解脱碳、提高涂层的断裂韧性等方面亟需技术上的突破。本研究在初始 WC-Co 粉末中分别引入了 TiC 和 ZrO₂，探讨了添加剂含量对超音速火焰喷涂 WC 基涂层组织和性能的影响。揭示了 TiC 在涂层中的多种存在形式，包括(Ti,W)C 固溶体颗粒和界面层、残留的 TiC 颗粒以及存在于 WC 晶粒内诱导产生面缺陷的单层 Ti 原子。WC/Co 界面处(Ti,W)C 层的高稳定性有效抑制了 WC-TiC-Co 涂层中 W₂C 的形成。由于(Ti,W)C 颗粒和界面层的硬化作用，摩擦时 Co 粘结相的塑性变形、挤出和微切削以及随后 WC 颗粒的拔出等磨损机制得到有效抑制，使得添加适量(例如 10%) TiC 的涂层的耐磨性达到传统 WC-Co 涂层的 2 倍。而添加适量 ZrO₂ 可以细化涂层中 WC 晶粒，制备的涂层中 ZrO₂ 保持四方晶体结构，得益

于四方结构向单斜结构的相变增韧,涂层在保持较高硬度(1459 HV0.3)的同时,相对于传统 WC-12Co 涂层,其韧性提高了约 16% (达到 6 MPa·m^{1/2}),耐磨损性能约是传统涂层的 2 倍,使涂层获得了更优的硬度和韧性配合,减少了摩擦时大尺寸裂纹的形成,从而避免了涂层材料的大块状剥落,是涂层耐磨性提升的主要原因。本研究结果可为 WC 类金属陶瓷涂层综合性能的进一步增强提供重要参考。

E09-24

氮气含量对(TiSiAlCrV)N 高熵合金涂层微观结构、力学性能及腐蚀性能的影响

张玉芬、马凯丽、林铁贵*、韩玥、覃凯凯、杨哲

山西农业大学

采用三靶高功率脉冲磁控共溅射在氮气和氩气的混合气氛中制备了(TiSiAlCrV)N 高熵合金涂层,研究了不同氮气流量比对涂层微观结构、力学性能及腐蚀性能的影响。结果表明:随着氮气流量比的增大,涂层沉积速率下降,涂层中元素含量发生轻微波动,晶体结构不发生变化,均为单相 FCC 固溶体,但晶格常数增加,晶粒尺寸降低;涂层硬度和韧性随氮气流量比的增大而增大,当氮气流量比为 66.7%时,涂层硬度和韧性最优,磨损率最低,约为 $6.8 \times 10^{-6} \text{mm}^3/(\text{N} \cdot \text{m})$,具有最优异的耐磨性能,且在 3.5wt.%NaCl 溶液和土壤模拟溶液中均具有最佳的耐蚀性能。

E09-25

植介入材料表面功能化改性及转化应用探索

刘宣勇

中国科学院上海硅酸盐研究所

E09-26

核反应堆中材料的服役环境条件及涂层使用现状

焦拥军

中国核动力研究设计院

E09-27

Research on the vacuum carburization process of titanium and titanium alloys

Yin Yang^{1,2}, Xiaodong Yan³, Chongqing Di⁴, Shuming Wang², Zhigang Fan^{*2}

1. China United Testing & Certification Co., Ltd

2. Guobiao (Beijing) Testing & Certification Co., Ltd.

3. GRIMAT Engineering Institute Co., Ltd.

4. Key Laboratory of Advanced Marine Materials, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering

Vacuum carburizing technology was performed on titanium and titanium alloys to explore the rules of experimental results under different time and temperature. X-ray diffraction(XRD), optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM) and Energy dispersive spectrometer (EDS) were utilized to investigated phase composition and the microstructure of the carburized layer. The results showed that the thickness of carburized layer was increased with the enhancement of temperature. With the extension of carburization time, the layer thickness also was increased significantly. The thickness of TA1 carburized layer could reach 110-115 μm after carburizing at 1100°C for 7h, while the carburized layer thickness of TC4 and TA18 were 78-80 μm and 88-90 μm , respectively. The surface of the carburized layer was dense with no cracks and other defects, which's phase composition were mainly TiC and Ti. The phase content of TA1 carburized layer was 85% TiC, meanwhile the phase content of TC4 and TA18 were 80% TiC and 77% TiC respectively. The result suggested that TA1 was easier to carburize than TC4 and TA18, which was because the alloying elements in TC4 and TA18

inhibited the expansion of C element into the matrix, which led to a thinner carburized layer.

E09-28**蔡司显微表征及分析技术在材料表面的应用**

王雪丽

卡尔蔡司有限公司

E09-29**聚硅氧烷基空间润滑防护涂层的设计制备及性能研究**

赵志成*

新疆大学

有机粘结固体润滑防护涂层因其优异的减摩抗磨性能在航天工业领域得到广泛应用,解决了大量空间装备的润滑防护问题。但是,随着航天科技的快速发展,新型空间装备对润滑防护涂层的性能要求越来越高,导致现有涂层已无法满足相关装备日益提高的长寿命和高可靠性设计需求。具体问题体现在以下两个方面:一方面,空间装备设计在轨寿命已经延长至 10~15 年,这对涂层空间环境适应性和长寿命服役要求大幅提高;另一方面,涂层还需随空间装备经历贮存及装配环节,航天发射中心的湿热环境极易造成涂层中 MoS₂ 的氧化,直接影响到涂层性能的稳定性及可靠性。原子氧(AO)是近地球轨道空间中对粘结固体润滑防护涂层危害性最大的环境因素之一。涂层中的树脂极易被 AO 氧化侵蚀,从而严重影响涂层的性能和寿命。在众多有机材料中,聚硅氧烷表现出优异的耐 AO 侵蚀性能,在空间装备用粘结固体润滑防护涂层中具有较大的应用潜力。然而,聚硅氧烷作为润滑防护涂层的基础树脂却存在着与基材附着力低、耐磨性能不足和透湿特性等导致涂层易磨损且性能受湿热环境影响等问题。基于此,本论文围绕改性聚硅氧烷树脂基润滑防护涂层的设计制备及其构效关系;环境因素作用下涂层组成、结构与性能的演变机制两个关键科学问题,开展了改性聚硅氧烷树脂基润滑防护涂层的设计制备、表界面结构调控设计、AO 辐照及湿热环境下涂层结构与性能演变机制等方面的研究。

E09-30**碳/聚酰亚胺界面行为及其复合材料摩擦学性能研究**

段海涛

中国机械总院集团武汉材料保护研究所

E09-31**先进硬质耐磨涂层研究与应用**

邓春明

广东省科学院新材料研究所

E09-32**海洋湿热环境二硫化钼基薄膜的损伤机理与界面调控**

任思明

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

E09-33**基于深度学习的飞秒激光微结构表面制备工艺优化与应用研究**

王冰*、王长昊、刘立英、姜前蕾、王如志

北京工业大学

通过在材料表面构筑微结构能够调控或增强材料的诸多性能，如调节材料的光学性能、润湿性能，增强表面的抗菌、抗腐蚀、防污性能等。飞秒激光具有加工精度高、热效应小、速度快等优点，被广泛应用于微结构表面的制备中。然而，微结构的表面形貌、尺寸、加工质量等均受激光加工参数影响，尤其是在纳米级到几微米的小尺寸加工空间上，激光加工的可控性较差，微结构随激光参数变化呈现演化趋势，工艺参数对表面结构起决定性作用。本研究采用深度学习算法对飞秒激光加工的纳米级、微米级结构进行工艺参数优化，确定了高质量纳米级结构加工范围与加工类型，模型整体预测准确率达到 90%，微米级结构加工方面，对飞秒激光加工光栅结构的形貌、尺寸进行了预测，准确率达 95% 以上。并进一步结合有限元模拟与深度学习算法，对加工光栅结构的光学性能进行了研究，实现了特定光谱特性下，微结构的反向设计。

E09-34

激光增材制造镁合金及其复杂表面再制造应用

常成*

广东省科学院新材料研究所

目前，我国航空航天领域对减重的迫切需求为镁合金新材料的开发与应用提供了机遇与挑战。由于可焊性差和沸点低，采用选区激光熔化（SLM）技术制造具有优异机械性能的镁合金相当困难。为了应对这些挑战并寻求最佳处理参数，本研究系统地利用响应面方法来确定适当的 SLM 参数组合，探索出具有相对密度高($99.5\pm0.28\%$)、强韧性优良（显微硬度= $95.6\pm5.28\text{HV}0.1$ ，UTS= 370.2MPa ，At= 10.4% ）等多种稀土及非稀土系镁合金。发现样品以随机织构为主，显微组织主要由大量细小的等轴晶（ $\alpha\text{-Mg}$ 相）和少量的 $\beta\text{-Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 结构、短棒状的 Al_8Mn_5 纳米颗粒。受益于各种纳米粒子（ $\beta\text{-Al}_{12}\text{Mg}_{17}$ 和 Al_8Mn_5 ）的晶界强化、固溶强化和沉淀硬化，制造出了多款具有优良性能的镁合金复杂构件，为航空航天机匣、壳体等关键部件在三维复杂区域的局部修复及再制造方面提供了一种创新性的解决方法。

E09-35

表面自组装技术实现 MXene 高湿环境高效润滑

强力*

中国科学院兰州化学物理研究所

MXene 因易剪切的二维结构和可调节的表面化学特性等优势，是具有广泛应用前景的固体润滑剂。然而，高湿度环境对其润滑性能构成了挑战，因为水分子的过多存在会破坏其二维结构并最终降低其润滑性能。为应对这一问题，本研究通过 MXene 表面形成氯化（MXene-Cl）和氟化（MXene-F）的自组装单层（SAMs），并探索了其不同湿度条件下的摩擦性能。研究表明，无论是在高湿度（75%相对湿度）还是低湿度（25%相对湿度）环境中，MXene-F 和 MXene-Cl 都表现出较稳定的摩擦系数，显著优于未处理的 MXene。这种性能改善主要得益于 SAMs 功能化处理后的 MXene 能够保持其二维层状结构和层间距的增加。尽管 MXene-F 表现出优异的耐水性，MXene-Cl 却因其独特的纳米结构和更大的层间距表现出更低的摩擦系数。这一现象表明，在高湿度环境下，MXene-Cl 能够更有效地降低摩擦，这主要得益于其能够在其结构中吸附一定量的纳米结构水分子，从而提高润滑性能。本研究深化了 MXene 润滑行为在不同湿度环境下的理解，并为通过表面化学功能化技术定制 MXene 作为高湿度条件下的高效固体润滑剂提供了重要的理论支撑。

E09-36**燃气轮机叶片内腔 CoAl 涂层应用研究**

张超

中国船舶重工集团公司第 703 研究所

E09-37**海洋环境下燃机涂层的开发及应用**

宫骏

中国科学院金属研究所

E09-38**NiAlHf 基涂层混合熔盐腐蚀行为研究**

李小亚

广东省科学院新材料研究所

E09-39**增材制造银涂层的制备及高承载高载流摩擦学行为研究**

陈德馨*、李卫、张鹏、王启伟

暨南大学

电接触材料在电气时代得到空前发展，其中以涂层形式的电接触材料相对于块体电接触材料而言，因其具有节省材料、改善电接触性能和良好的环境适应性等特点而被广泛应用。其中银金属以高导电性、高稳定性、优异耐腐蚀性等优势已成为电接触涂层材料的首选之一，但其强度低和耐磨性能较差，致使银涂层在应用中的稳定性、精度和使用寿命面临严峻挑战。此外，对于电流和摩擦的协同作用对银涂层的摩擦学行为与磨损机制尚未明确。因此本研究通过开发一种增材制造技术制备高强耐磨银涂层的新方法，在恒电流模式下对银涂层进行往复载流摩擦试验，探究其摩擦学行为、磨损机理、接触导电性能以及微观结构演变规律。结果表明，涂层的生长模型为岛状生长，当喷涂距离为 5 cm、流量为 16 mL/min、时间为 15 min 时，所制备的银涂层表面平整均匀，涂层表面平均硬度可达 145 HV，电阻率低至 $1.711 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。对比其他制备方法所获得的银基电接触材料，本方法制备的银涂层在硬度和电阻率上具有显著优势。通过微观组织分析，涂层具有高硬度主要原因是沉积过程中形成高密度孪晶所致。

选用聚 α 烯烃（PAO 6）基础润滑油和商用导电润滑脂作为润滑介质，研究银涂层在大载荷和大电流的载流润滑摩擦试验。结果表明，在 PAO 6 基础油润滑下，摩擦因数、磨痕粗糙度、磨损深度和宽度均随电流和载荷的增加而增加，这主要由于电流热效应不断积累引起涂层的软化，在剪切作用下发生严重的塑性变形所导致。而平均接触电阻降低主要是接触面积增大和涂层软化引起摩擦副之间发生材料粘连，该现象导致电流流通性要优于简单的金属接触。在相同载荷和电流条件下，导电润滑脂下的磨损形貌和磨损类型与 PAO 6 基础油润滑下的情况基本相似，但磨痕深度、磨痕宽度和平均接触电阻有所降低，主要归因于润滑脂中良好的导电能力，降低因电阻热所引起的热效应积累。从微观组织分析结果表明，磨痕表面并无连续润滑膜层或氧化膜层形成，导电机理仍通过接触斑点进行；载流润滑摩擦后磨痕横截面呈现出微-纳尺寸层片状结构，该结构可以很好吸收应力应变从而获得良好的耐磨性能。在润滑作用下银涂层未出现剧烈磨损失效现象，摩擦过程总体平稳以及低且稳定的接触电阻。

E09-40（修改过）**特种材料熔炼装置用钽、钛、锆表面渗硼制备及性能研究**

赵满圆*、闫晓东、叶蔚

有研工程技术研究院有限公司

核工业领域中,核材料是发展核能的重要关键资源,而核材料的熔炼、分离、提纯是核能工业持续发展的重要前提。钽、钛、锆凭借其较高的熔点、良好的耐腐蚀性能、优异的抗辐射性能和良好的机械加工性能而广泛应用于航空航天、核工业、发动机和武器装备等领域,但由于其在高温下的硬度、耐腐蚀性及抗氧化性较差,限制了其在特种材料熔炼装置领域的发展。本文以纯钽、锆、钛作为基体,采用固体渗硼法对其进行表面改性,探索改善纯钽、锆、钛表面处理工艺。结果表明,钽、锆、钛表面均能形成均匀致密的渗硼层,渗硼温度、时间和渗剂配方对渗硼层质量均有影响,表面渗硼厚度在 15~22 μm 之间。钽渗硼层由 TaB_2 相、 Ta_3B_4 相和 TaB 相组成;钛渗硼层由 TiB_2 相和 TiB 相组成;锆渗硼层由 ZrB_2 相和 ZrB 相组成。其中,钽渗硼层与基体结合力最大,为 27.1N,钛和锆渗硼层与基体结合力相近。

对渗硼后的样品进行熔融金属铈腐蚀,钛和锆渗硼腐蚀后样品融化,渗硼层未能对金属基体起到有效的保护作用;钽渗硼腐蚀后表面产生白色层状腐蚀开裂,渗层内部出现部分点状腐蚀,腐蚀部分占渗层总厚度的 10%;腐蚀速率为 0.0885 $\mu\text{m}/\text{h}$,相比钽基体降低 30%,表明渗硼层可对钽基体起到有效的保护作用。

E09-41

梯度结构镍/石墨复合涂层的摩擦磨损行为

潘杰^{*1}、李佳桢²、石远涛¹、林研¹、柳林¹

1. 华中科技大学材料科学与工程学院
2. 中国科学院金属研究所

金属涂层被广泛应用于铜、铝合金等软金属的耐磨保护中。然而,随着对金属材料使用需求的日益苛刻(如电磁力热耦合环境),传统金属涂层已无法满足这些严苛的摩擦和磨损要求。本研究提出梯度结构与固体润滑剂表面改性相结合的方法,利用电沉积技术制备了梯度结构镍/石墨复合涂层,以提升其摩擦磨损性能。改复合涂层的微观结构呈现梯度变化,由靠近基体侧的粗柱状晶粒($\sim 8\mu\text{m}$)逐渐过渡为表面处的纳米晶($\sim 50\text{nm}$),同时石墨均匀分散在涂层表层 $\sim 80\mu\text{m}$ 内。当与 WC-5%Co 合金摩擦时,GS Ni/石墨涂层的摩擦系数(COF)和磨损率分别为 0.33 与 $1.14 \times 10^{-5}\text{mm}^3/\text{N}\cdot\text{m}$,与铜合金基体相比分别降低了 47%和 93%。亚表层微观结构和应力分布分析表明,梯度结构能协调 GS Ni/石墨涂层内部的屈服应力分布,有效容纳亚表层塑性变形,同时石墨起到减磨润滑、降低剪切应力及抑制脆性纳米晶混合层形成的作用。该研究可为新型涂层的设计与开发提供了技术指导。

E09-42

航空发动机新型环境障涂层研究

张小锋

广东省科学院新材料研究所

E09-43

C 原位去氧效应对大气等离子喷涂金属热障涂层热循环寿命的影响

朱永胜、雒晓涛、杨冠军、李长久*

西安交通大学

MCrAlY 涂层作为隔热层被广泛运用在液体火箭发动机推力室铜合金内壁表面以降低铜合金基体的表面温度。大气等离子喷涂 MCrAlY 涂层因金属粒子不可避免的飞行氧化而引入氧化物夹杂使得涂层粒子层间结合弱,从而影响热障涂层的热循环寿命。对此,本文采用大气等离子喷涂,在金属粉末中引入脱氧剂碳并通过熔滴温度控制获得低氧化物含量的 NiCrAlY 涂层,并通过低氧含量铜基合金涂层,设计了 NiCrAlYC 隔热层和 NiCrCu2B 与 CuNi2B 粘结层依次构成的梯度结构金属热障涂层体系。采用扫描电镜、X 射线衍射等方法表征了涂层显微结构及物相组成,采用激光热循环试验测试了热障涂层的热循环寿命。

研究表明, C 元素的加入能够有效降低 NiCrAlY 粒子在飞行过程中的氧化物含量。NiCrAlYC 氧含量从原始 NiCrAlY 粒子的 2.87 wt%降至 0.40 wt%, NiCrAlYC 涂层孔隙率低, 组织结构致密、结合质量高。涂层的结合强度从 53 MPa 提升至 >71 MPa。激光热循环试验结果表明, 基于 C 元素原位去氧效应制备的多层结构的梯度金属热障涂层能够经受 50 次热循环不发生涂层脱落。热循环 55 次后, 涂层出现部分脱落现象。相较于利用大气等离子制备的传统金属热障涂层, 热循环寿命提高了 1 倍以上。

E09-44

高速激光工艺制备耐磨铁基涂层: 引入纳米晶-非晶双相梯度纳米结构表面层

马国梁、崔洪芝*

中国海洋大学材料科学与工程学院

采用高速激光熔覆制备 Fe 基涂层, 并通过高速重熔引入双相纳米晶-非晶的梯度纳米结构层。沿深度方向微观结构梯度演变特征为: 纳米晶层→等轴晶区→树枝晶区→柱状晶区→过渡区→基体。最表层区域为双相纳米晶-非晶核-壳结构, 平均晶粒尺寸 47 nm。中部等轴晶区组织由 α -Fe、 γ -Fe 相、M7C3 和 MC 相组成, 平均晶粒尺寸 6 μ m。由于 Hall-Petch 效应, 梯度纳米结构层和硬度强度显著提高, 具有 1136 HV0.2 表面硬度和更高的加工硬化能力。同时, 涂层中部具有较高硬度, 主要取决于大量的网状 M7C3 相和 MC 颗粒的弥散强化作用。涂层不同深度区域均表现出较低的磨损率, 其中最表层磨损率为 4.36×10^{-6} mm³/m³·N, 双相纳米晶-非晶核-壳结构表面具有更高的抵抗塑性变形能力, 表现出杰出的耐磨减磨性能。

E09-45

高频电脉冲辅助激光冲击强化 Ti6Al4V 合金的双趋肤效应与深层塑性变形

邓维维、鲁金忠*

江苏大学

激光冲击强化 (LSP) 作为一种先进的表面塑性变形强化技术, 在处理难加工材料时遇到硬化层浅、表面易剥落等问题。在本工作中, 我们引入了高频电脉冲辅助 LSP (HFEP-LSP) 工艺, 将 LSP 工艺与高频电脉冲耦合以实现显著深层强化效果。在 HFEP-LSP 工艺中, 我们首先考虑了双重“趋肤效应”, 即高频电脉冲的趋肤效应与激光冲击波诱导的力效应的“趋肤效应”耦合。首先搭建了综合实验平台, 包括电脉冲发生器、LSP 设备和数据监控单元。该工艺可以获得 >1600 μ m 深的残余压应力层, 同时使得塑性变形层深度增加了 83.3%。此外, 我们还阐明了该工艺带来的异质结构和 β 相变。综合分析揭示了 HFEP-LSP 工艺引起更深的塑性变形层的原因。此外, 还研究了 LSP 和 HFEP-LSP 对力学性能 (包括拉伸、疲劳和摩擦学性能) 的影响。与原始试样相比, HFEP-LSP 样品的极限拉伸强度和伸长率分别提高了 11.8% 和 56%, 疲劳寿命提高了 176.4%。解释了双重“趋肤效应”触发的 TRIP/TWIP 机制, 并证明了 HFEP-LSP 对强度和延展性的出色调控。最后, 建立了 LSP 和 HFEP-LSP 工艺力学性能的六维雷达图, 有助于工程应用选择。

E09-46

钛表面钛酸锶钡生物压电纳米棒涂层的构建及载银抗菌性能研究

吴聪*、汤玉斐

西安理工大学

钛及钛合金由于优异的性能而被广泛的用作骨植入材料, 然而由于其本身的生物惰性, 使得钛植入体

内后只能形成简单的机械嵌合,不能形成良好的骨性结合,存在松动甚至失效的风险。因此,如何使得钛植入体表面具有生物活性是钛基植入材料研究的重点和热点。利用压电效应对骨修复的促进作用,在钛表面制备生物压电涂层是赋予钛基材料生物活性的研究方向之一,尤其是在钛表面制备具有局部释药功能的钛酸钡纳米管涂层可以兼具促进骨修复和抗感染的特性。但是压电效应是一个机电转换过程,由于纳米管结构的紧密排列导致其在微小力的作用下很难发生形变,压电效应对骨修复的促进作用难以得到体现。针对上述问题,本研究在钛表面构建能响应微小力的纳米棒结构生物压电涂层,并通过铈元素掺杂,进一步提高涂层的压电系数,强化对微小力的压电响应。此外,引入医用低频脉冲超声作为外场,研究了不同外场作用下涂层的体外矿化过程。最后,将纳米银负载在纳米棒的表面,研究纳米棒结构载银涂层的药物释放特点,以及压电效应对纳米棒表面银离子释放的影响,分析纳米棒载银涂层的抗菌性能。

通过水热反应法在钛表面制备了钛酸钡纳米棒结构涂层,当钡与铈的摩尔比为 9:1,水热温度为 200℃,水热时间为 2h,水热溶液中离子浓度为 0.05mol/L 时,钛表面二氧化钛纳米棒发生原位转变,钡离子和铈离子与二氧化钛纳米棒发生反应,从纳米棒的表层到内部逐步将二氧化钛纳米棒转化为钛酸钡纳米棒,所制备的钛表面钛酸钡纳米棒结构涂层的压电系数为 0.78pC/N,结合力可达 31.8N。

在低频脉冲超声作用下,纳米棒结构涂层发生压电响应,产生的表面电荷可以提升涂层诱导钙沉积的能力,其中极化处理之后的钛酸钡纳米棒结构涂层经过 7d 矿化后,涂层表面沉积的羟基磷灰石将涂层表面完全覆盖,重量增加 2.9mg,SBF 中钙离子浓度降低了 48 ug/mL;涂层表面电荷还可以促进成骨细胞的粘附和增殖,因此钛表面钛酸钡纳米棒结构涂层的生物相容性良好,无细胞毒性。

E09-47

激光辅助制备(W₂C+TiC)/Ni 基网状异质结构金属材料

张云淞、战再吉*

燕山大学

异质结构金属材料作为一种新型复合材料,表现出传统均质材料无法企及的综合力学性能。本研究采用原位合成法成功构建了围绕晶胞分布的网壳层,用于承担载荷,并利用晶胞的变形特性构建了网状异质结构金属材料。利用 XRD, SEM, TEM 等分析方法对(W₂C+TiC)/Ni 基网状异质结构材料的微观形貌进行表征,并对其力学性能进行测试与分析。

利用 W-C 相图中 W₂C 高温相仅在 1250 °C 以上析出的特点,设计原位反应自固溶体中引入 W₂C+TiC 高温相。在固液界面的排他作用下,高温相自液相中均匀析出,并随固液界面移动,最终形成网状异质结构。网壳的存在赋予了材料突破强度-韧性权衡的可能,而适度的网壳厚度才可以使网壳承担载荷的同时,使晶胞承担变形并钝化裂纹。通过调整增强相添加含量、激光功率以及扫描速度,能够有效地改变网状结构的尺寸,进而影响材料的力学性能。当反应物含量不变时,晶胞尺寸和网壳厚度成正比;而增加反应物含量,则晶胞尺寸减小,网壳厚度增大。此外,激光功率的增大会使晶胞和网壳尺寸增大,而扫描速度的增大会使晶胞和网壳尺寸降低。当激光工艺参数为 2400 W、扫描速度为 4 mm/s 时,晶胞和网壳的尺寸分别为 8.27 μm 和 233 nm,此时,网状异质结构材料达到了最佳的抗拉强度(841 MPa)和延伸率(24.3%),相较于未添加增强相的材料性能提升了 29%,而延性没有降低,这也突显了异质结构设计策略的优越性。

仅发表论文

分会编号-PO01

Y-Hf 共掺杂 AlCrFeNiCu 高熵合金涂层的组织与性能研究

陈志培、任晓娜*、汪鹏、王耀、葛昌纯

北京科技大学

本工作采用高速激光熔覆(HSLC)技术在锆合金棒表面制备了 Y-Hf 共掺杂的 AlCrFeNiCu 高熵合金(HEA)涂层。对涂层的组织结构、显微硬度和耐高温氧化性进行了测试和分析。结果表明:涂层的硬度高

达 900 HV，这可能是由 HEA 特有的固溶强化、晶格畸变和慢扩散效应引起的。在 1200°C 下氧化 60 min 后仍能保持涂层的结构完整性。氧化过程遵循生长动力学曲线，表面的氧化物主要由 Al_2O_3 和 Cr_2O_3 组成，HEA 涂层具有较低的氧化速率，提高了钎合金的高温抗氧化性。