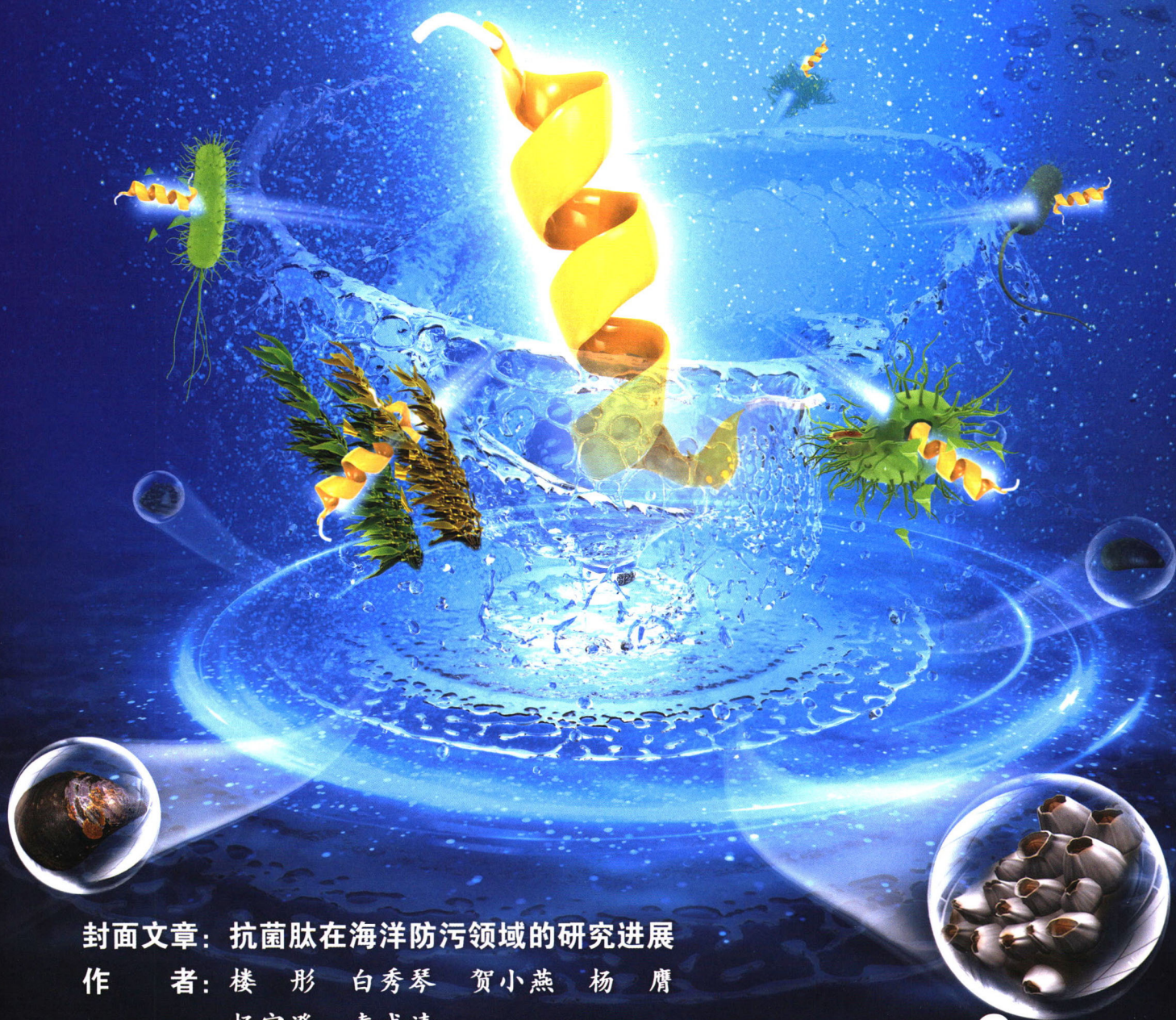


中国表面工程

CHINA SURFACE ENGINEERING



封面文章：抗菌肽在海洋防污领域的研究进展

作者：楼 彤 白秀琴 贺小燕 杨 膺
杨宗澄 袁成清

35卷 **2** 期 双
月刊
2022年4月刊

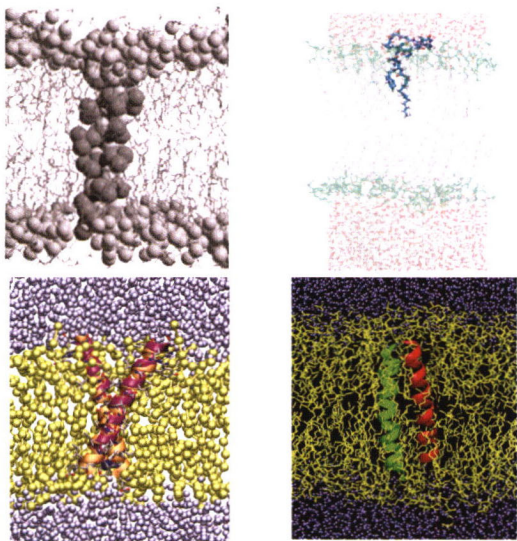
海洋工程装备表面功能防护材料与技术专栏

客座主编：蒲吉斌 研究员

海洋工程装备表面功能防护材料与技术专栏序言

1 抗菌肽在海洋防污领域的研究进展

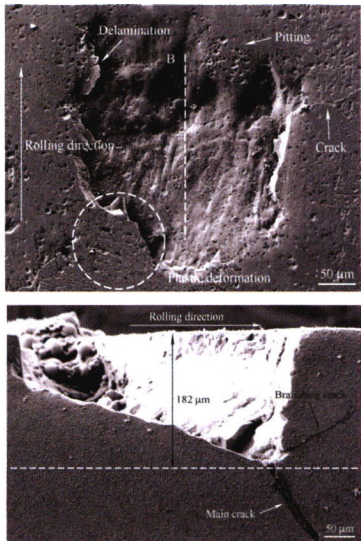
楼 彤 白秀琴 贺小燕 杨 膺 杨宗澄 袁成清



摘要：海洋生物污损仍是目前急需解决的难题，利用抗菌肽对基体进行改性获得防污效果是一种有效的绿色应对策略，然而目前缺少抗菌肽在海洋防污领域应用的全面报道。基于抗菌肽的二级结构，在详细介绍 α -螺旋结构、 β -折叠结构和延伸/弹性结构三类不同结构抗菌肽的基础上，总结抗菌肽引发的膜损伤以及非膜损伤的多种抗菌机理，明晰抗菌肽的作用靶点：细胞膜、酶、蛋白质和核酸；阐述几种目前常见的基体表面接枝抗菌肽的方法；基于常见的海洋细菌、硅藻和大型污损生物繁殖体等典型海洋污损生物，对抗菌肽的防污特性进行分析。最后提出抗菌肽的制备、表面接枝方法，以及构效关系是其在海洋防污领域应用所面临的难题与未来发展方向，填补了抗菌肽防污技术领域目前缺少此类综述的空白。

12 马氏体轴承钢碳氮共渗滚动接触疲劳失效机理

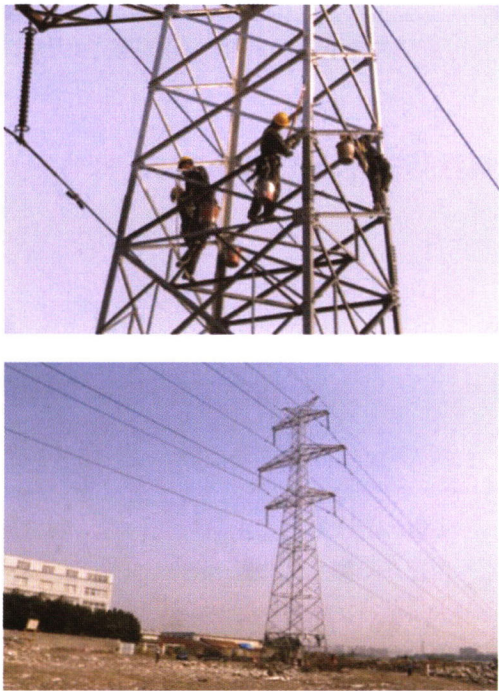
蒋港辉 李淑欣 蒲吉斌 王海新 陈银军



摘要：碳氮共渗工艺应用广泛，但对碳氮共渗后零部件的滚动接触疲劳失效机理研究较少。采用气体碳氮共渗对马氏体轴承钢进行表面改性处理，对碳氮共渗试样进行滚动接触疲劳试验，研究碳氮共渗对轴承钢滚动接触疲劳性能的影响及其失效机理。研究结果表明：碳氮共渗试样表面硬度、残余应力和残余奥氏体含量显著提高，使得其接触疲劳寿命明显高于常规试样。疲劳裂纹萌生于表面和亚表面，其中大量表面平行裂纹主要由表面白色蚀刻层硬度梯度变化而导致，表面材料受到严重微观塑性变形产生晶粒细化；亚表面裂纹萌生位置受最大应力的分布和渗层厚度的影响。表面和亚表面疲劳裂纹的扩展和连接最终导致碳氮共渗试样出现浅层剥落和分层剥落的失效形貌。

24 苛刻海洋大气腐蚀环境下石墨烯改性重防腐涂料在输电铁塔表面的服役性能评价

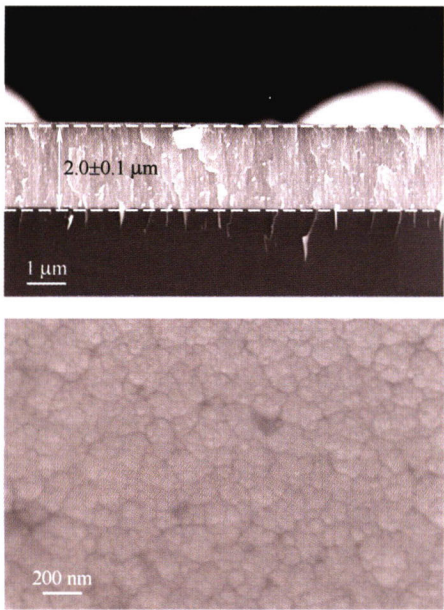
陈志宇 郭小平 水晓雪 江 炯 周开河 刘 桢



摘要：目前国家电网输电铁塔普遍采用镀锌钢进行施工建设，钢材表面镀锌层可以抑制基体腐蚀，保障输电铁塔长期安全服役。但在沿海地区的苛刻海洋工业大气腐蚀环境中，输电铁塔表面镀锌层易发生快速腐蚀失效。研制一种低表面处理石墨烯改性重防腐涂料体系，包括低表面处理石墨烯防腐底漆、环氧石墨烯阻隔中间漆和聚氨酯耐候面漆。通过实验室性能测试、环境考核试验和示范工程涂装，对其服役性能进行综合评价。结果表明：研制的石墨烯改性重防腐涂料具有良好的隔水性和低表面处理施工性能，复合涂层耐盐雾性能超过 5 000 h，耐循环老化 4 200 h 后漆膜完整。在国网宁波供电公司北坞 2321 线 10 级输电铁塔示范涂装 54 个月后，石墨烯改性重防腐涂层光泽度降低，漆膜变色 1 级，百格附着力在 0~1 级，拉拔附着力 8.56~11.37 MPa。根据室内模拟加速试验和实际工程服役性能测试结果，研制的石墨烯改性重防腐涂料对输电铁塔在苛刻海洋大气腐蚀环境下的综合防护寿命可达 10 年以上。研究了石墨烯改性重防腐涂料体系的实际服役性能，实现在苛刻海洋大气腐蚀环境中对输电铁塔的长效腐蚀防护，为电网设施的长期腐蚀防护提供可靠途径。

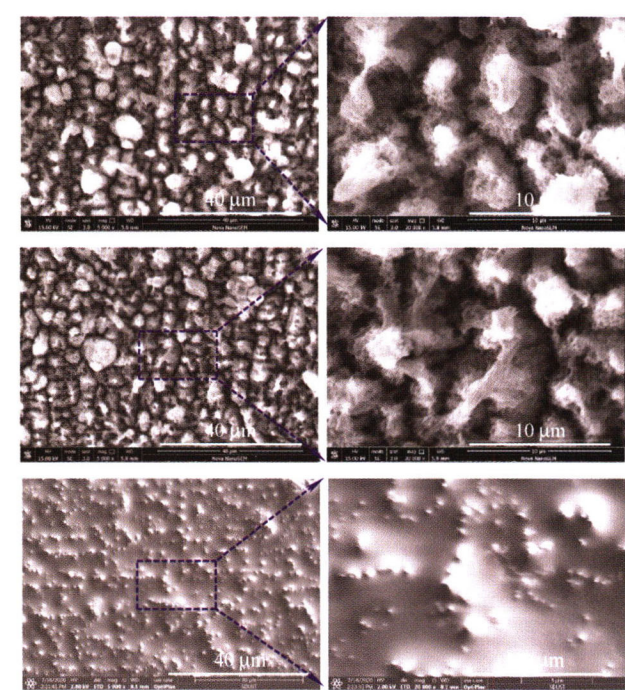
35 (CrNbTiMoZr)C 薄膜在人工海水环境中的摩擦腐蚀性能

刘鑫宇 张 艳 蔡吴敏 王军军



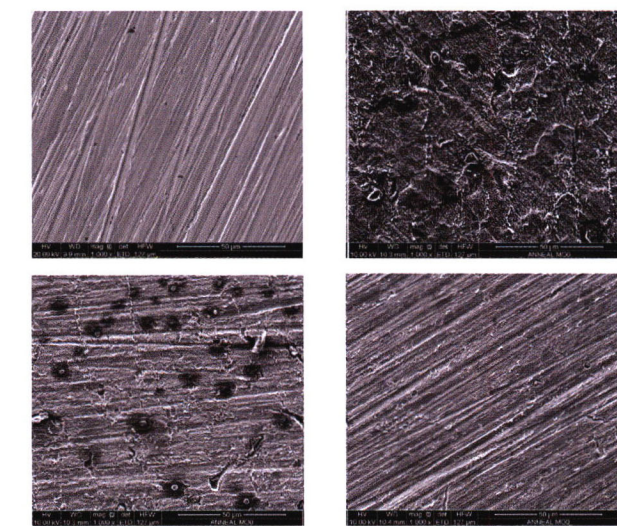
摘要：高熵合金碳化物（HEAC）薄膜具有高硬度、耐磨性和耐腐蚀性良好等特性，在摩擦腐蚀环境下的材料防护领域具有广阔的应用前景，但关于 HEAC 薄膜的摩擦腐蚀行为以及腐蚀磨损之间交互作用的研究较少。为促进 HEAC 薄膜在海水环境下的应用，利用反应直流磁控溅射技术制备 (CrNbTiMoZr)C 薄膜，并对其微观结构和力学性能进行表征，再对薄膜在人工海水环境中不同载荷（1 N、2 N、4 N）条件下的摩擦腐蚀行为进行研究。研究表明，(CrNbTiMoZr)C 薄膜在人工海水中表现出良好的耐腐蚀和耐磨损性能，即使在较高载荷（4 N）条件下，薄膜总腐蚀磨损率（ $T=0.1587\text{ mm}^3\cdot\text{d}^{-1}$ ）也仅为相同测试条件下 304L SS 的 1/3。交互作用分析表明，薄膜的腐蚀加速磨损速率所占总腐蚀磨损率（ T ）的比值最大（约 80 %），腐蚀磨损过程中腐蚀对于磨损的促进作用更为明显。为促进 (CrNbTiMoZr)C 薄膜在海水环境下材料防护领域中的应用以及摩擦腐蚀交互作用分析提供了理论与数据支持。

李 好 辛 蕾 冯晓磊 彭玉洁 李鹏昌 丁建旭 张 杰

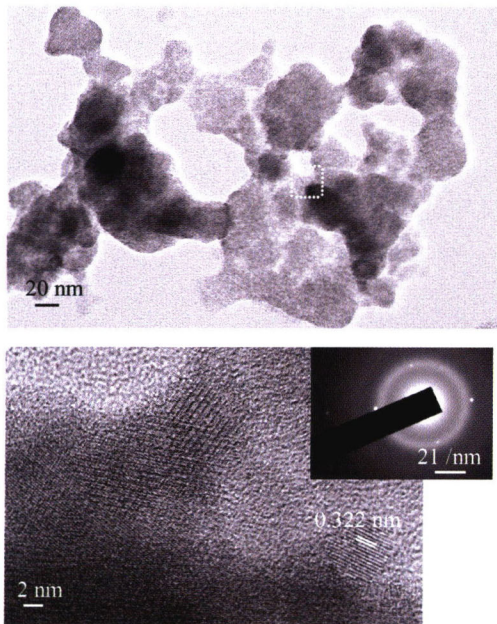


摘要：仿猪笼草超滑表面具有疏液性和防污性等优异性能。然而仿生超滑表面的润滑油膜受损后，其超滑性能会被破坏，因此制备具有自修复性能的仿生超滑表面对于解决其耐久性差的问题至关重要。首先采用阳极氧化法在铝合金基体表面制备锥形微结构，然后经过全氟硅烷进行低能修饰，最后往微结构间隙中注入全氟聚醚、低黏度硅油和高黏度硅油三种不同的润滑油，得到三种仿生超滑表面。水滴在三种仿生超滑表面的接触角分别为 $\sim 116^\circ$ 、 $\sim 105^\circ$ 、 $\sim 103^\circ$ ，滑动角分别为 $\sim 10^\circ$ 、 $\sim 10^\circ$ 、 $\sim 9^\circ$ 。试验结果表明，全氟聚醚和低黏度硅油的仿生超滑表面比高黏度硅油的仿生超滑表面具有更优的自清洁性和防污性，可以有效地预防污染物堆积造成的疏液性失效。此外，全氟聚醚与低黏度硅油的仿生超滑表面呈现较好的热辅助自修复性，修复后的疏水性与新制备样品基本一致；高黏度硅油仿生超滑表面只表现出一定的自修复能力，修复后与新制备样品的疏水性存在差异。所制备出的具有热辅助自修复功能的铝合金基底仿生超滑涂层，在海洋生物污损防护方面具有潜在的应用前景，并为克服传统仿生超滑表面使用耐久性差的问题提供了解决思路。

魏佳煜 邱诗惠 赵海超 杨 凤

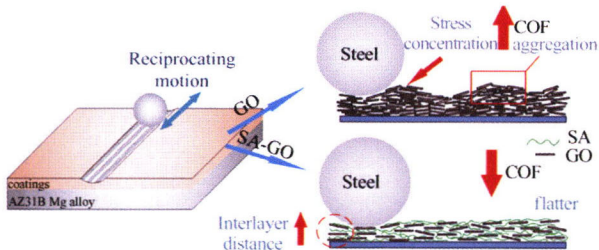


摘要：随着缓蚀剂的广泛应用，传统缓蚀剂对环境和生物的负面影响日益显现，开发高水溶性、健康无毒、绿色环保的高效缓蚀剂成为研究热点。基于纳米胶体 SiO₂ 在水中良好的分散性、无毒等特性，通过左旋多巴（L-DOPA）在纳米胶体 SiO₂ 表面接枝聚合，实现聚左旋多巴（Poly-(L-DOPA)）在纳米胶体 SiO₂ 上的负载，制备低细胞毒性、良好分散性的聚左旋多巴-SiO₂（Poly-(L-DOPA)-SiO₂）缓蚀剂，并探究 1 M HCl 中 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 对 Q235 碳钢的缓蚀作用。傅里叶红外光谱（FTIR）、紫外可见光吸收光谱（UV-vis）和 X 射线衍射（XRD）结果证实了 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的合成。电化学结果表明，缓蚀效率随 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 浓度的增加而增加，当 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 的浓度为 500 mg / L 时，缓蚀效率可以达到 85.9%。添加 Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 使极化曲线的阴阳极斜率发生明显改变，说明阳极的金属氧化反应和阴极 O₂/H⁺ 的还原反应和均被抑制，是一种混合型抑制剂。扫描电子显微镜（SEM）和激光共聚焦显微镜（CLSM）观察发现，Poly-(L-DOPA)-SiO₂ 可以在金属表面形成保护膜有效抑制酸性溶液对碳钢的腐蚀。该缓蚀剂以生物质 L-DOPA 为原料，纳米 SiO₂ 为载体，是绿色高效缓蚀剂合成的新思想。

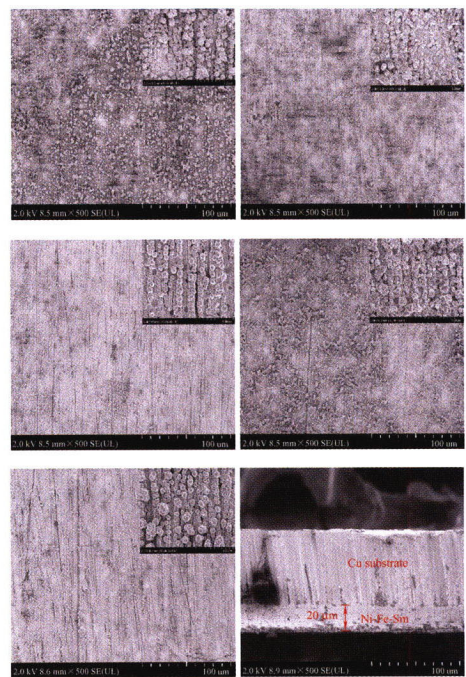


摘要: H62 黄铜因其良好的加工性能和较好的传热性能, 常用于冷凝器的热交换材料, 但是在使用过程中易于发生腐蚀。为了进一步提升 H62 黄铜的耐蚀性能, 采用电化学剥离的方法成功制备得到铋碳纳米材料, 与聚氨酯混合制备得到铋碳 / 聚氨酯复合涂料, 通过在 H62 黄铜表面涂装铋碳 / 聚氨酯复合涂料制备铋碳 / 聚氨酯复合涂层, 并利用扫描电子显微镜、电化学工作站、浸泡等表征手段探究涂层的表界面形貌和耐蚀性能。结果表明: 与聚氨酯涂层相比, 铋碳 / 聚氨酯复合涂层在腐蚀测试过程中具有更正的腐蚀电位 (-0.209 V)、高阻抗模值和阻抗值 ($\sim 7.0\text{ k}\Omega \cdot \text{cm}^2$); 铜基底表面无明显腐蚀, 呈现优异的防护性能。这主要归因于铋碳纳米材料的加入有效地降低了涂层的孔隙率和延缓了腐蚀介质的渗入, 从而提高了 Cu 基底的抗腐蚀性能。首次使用有机+无机 (乙二醇+硫酸钠) 混合电解液成功电解出水溶性铋碳纳米材料, 能很好地分散于水性聚氨酯中, 在聚氨酯涂层中起到良好的密封和阻隔作用, 可为进一步提升 H62 黄铜的耐蚀性提供参考。

70 镁合金表面 SA / GO 耐蚀 / 耐磨一体化复合涂层



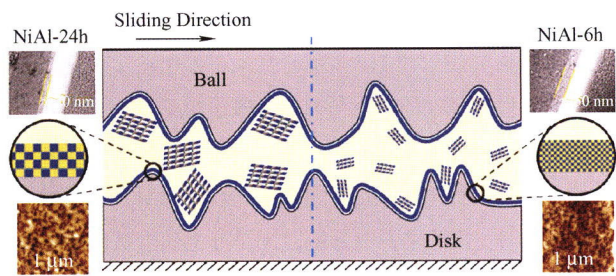
摘要: 氧化石墨烯 (GO) 作为一种典型的二维层状材料在表面防护领域具有较大的应用潜力, 然而其团聚现象和表面大量纳米孔隙的存在往往会削弱其对基体的保护作用。将硬脂酸 (SA) 接枝到 GO 片层并采用自组装的方法, 在 AZ31B 镁合金表面制备 SA-GO 复合涂层。采用 SEM、XRD 和 FT-IR 表征涂层的表面形貌、结构以及官能团; 采用接触角测试仪、电化学工作站和摩擦磨损试验机分别表征涂层的润湿性、耐蚀性以及耐磨性。电化学测试结果表明, 该复合涂层的引入使得腐蚀电流密度降低了约三个数量级, 显著提高了镁合金基体的耐蚀性, 这与涂层孔隙率的降低以及疏水性的增加有关。摩擦测试结果表明: 与镁合金基体相比, SA-GO 涂层的磨损率降低了 99.3%, 摩擦因数降低了 83.1%, 这与 SA 的自润滑性能以及 GO 层间距增加导致 GO 片层更易滑移有关。研究成果为实现金属表面防腐/耐磨一体化防护研究提供了实验依据和理论基础。



摘要: 针对在传统水溶液电解质中制备的 Ni-Fe 合金存在表面粗糙且耐腐蚀性能差的问题, 在氯化胆碱-尿素离子液体体系 (Reline) 中, 加入稀土元素 Sm 对 Ni-Fe 合金进行改性, 制备 Ni-Fe-Sm 三元合金膜。采用循环伏安测试、塔菲尔测试、扫描电镜、X 射线能谱仪研究金属离子在 Reline 离子液体中的电化学行为、合金膜表面形貌及其耐腐蚀性能。结果表明, Ni(II)、Fe(II) 为一步不可逆还原过程, Ni-Fe-Sm 合金在 Reline 体系中成核机制为三维瞬时成核。合金膜表面各金属元素分布均匀, 微观结构呈瘤状球形颗粒, 合金膜表面细致, 裂纹少, 排布整齐。在 3.5 wt.%NaCl 和 10 wt.%HCl 溶液中, 加入稀土元素 Sm, 合金膜的耐腐蚀性能显著提高, 当沉积电位为 -1.22 V, 沉积时间为 20 min 时, 自腐蚀电流密度最小, 腐蚀速度最低, 自腐蚀电位最正, 耐腐蚀性能最高。进一步丰富了在 Reline 体系中添加稀土元素提高合金耐腐蚀性能的认识, 使其在防护、存储等领域有较好的应用前景。

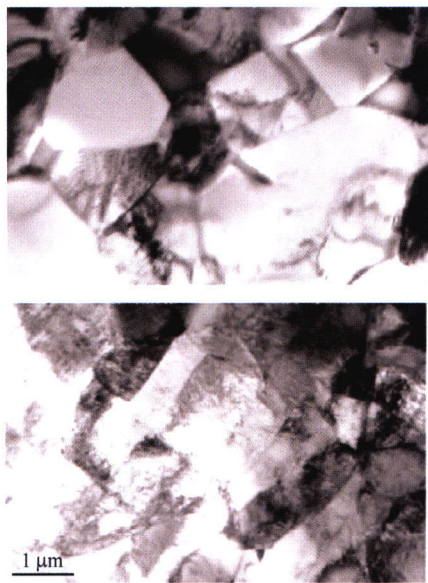
综述论文

91 层状双氢氧化物的制备及其摩擦学性能研究进展



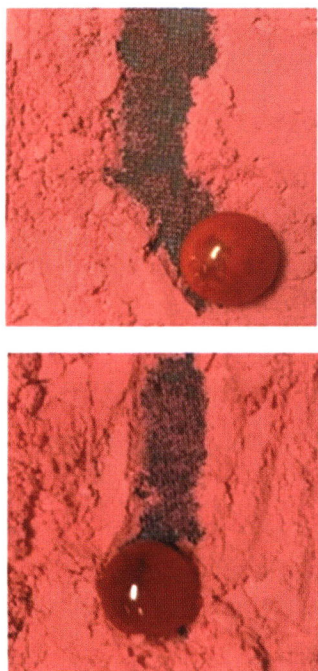
摘要: 具有特殊层状结构的双氢氧化物 (LDHs) 作为润滑添加剂能极大地降低机械系统的摩擦和材料磨损, 但在摩擦学领域对该材料的研究还相对较少。概述了 LDHs 的结构、性能和制备方法, 并对不同制备方法进行比较和评价, 重点综述 LDHs 材料作为油基、脂基以及水基润滑添加剂时的摩擦学行为。相关研究结果表明: LDHs 材料作为油基、脂基以及水基润滑添加剂时可以形成含有金属氧化物的保护膜, 该保护膜具有高耐磨性和自润滑能力, 可以达到减摩降磨的效果。但是 LDHs 材料作为油基润滑添加剂时, 存在尺寸效应以及分散稳定性差的问题, 成为制约其广泛应用的关键因素。通常采用表面改性剂来改善 LDHs 材料在润滑油中的分散性, 如月桂酸、油酸和油胺等。对于层状双氢氧化物的研究和应用具有参考意义。

钱丽艳 王艳虎 戴峰泽 KONOVALOV Sergey 闻 明 陈希章



摘要：对提升钛合金零件的疲劳强度，已有相关技术的试验研究，但缺乏对技术的系统介绍，阻碍了该技术的产业化应用。通过整理大量试验数据及其结果，就激光冲击强化对钛合金零件的疲劳特性的影响展开分析。简要介绍激光冲击强化技术的发展状况，分别从表面形貌、残余应力、微观组织、硬度、表面粗糙度等方面进行分析总结。结果发现，当激光脉冲能量为 7 J 时，材料塑性变形量最大；当激光功率密度为 3 GW / cm² 时，材料表面残余压应力值最高；当冲击次数达到 5 次以上时，材料表层的位错密度不断增大；当在工件表面覆盖一层高强度的光滑金属接触膜时，材料表面粗糙度将降低。综合数据可知激光功率密度及冲击次数对钛合金疲劳寿命的影响最大。整理了大量试验数据，可为得到最佳的激光冲击强化效果及提升疲劳寿命提供理论参考。

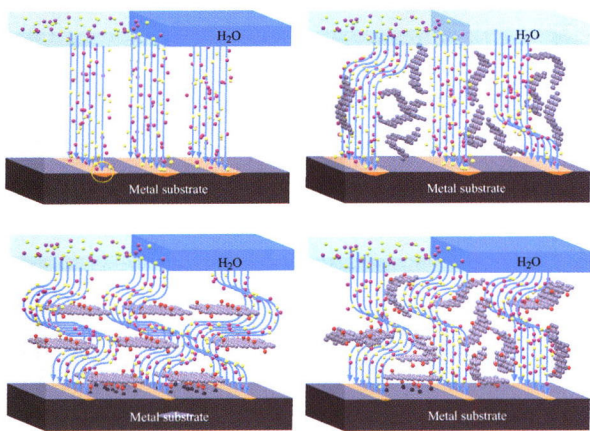
王 闯 刘嘉琪 顾梁雪 王锦标 文 峰



摘要：超双疏涂层在材料表面工程的研究中占据着一席之地，其对水与油表现出极大的双疏性，常用于防污、防腐蚀及自清洁等领域，在传统油烟机行业中得到广泛的应用。然而对于新型静电油烟机中的特殊部位，还少有相关的表面防护研究与综述总结。简述超双疏涂层的研究近况，对超双疏涂层的起源以及润湿理论的发展进行系统性的梳理，指出在 Young' s 方程的理论基础上进行延伸与修正是普遍使用的研究方法，在所得到的 Cassie-Baxter 理论模型基础上进行更细化的修正是目前理论研究的主流方向。介绍在不同金属基底制备超双疏涂层的方法，发现涂层材料与基底之间的相互作用机理的研究相对较少，多数研究人员停留在实用这一要求上，没有做机理性的分析与研究。概述超双疏涂层在油烟机中不同部位的应用状况，并对超双疏涂层在静电油烟机中静电模块的应用提出展望，研究其在电场的作用下是否仍可保持超双疏性，借此来探究其能否满足静电油烟机的清理要求。指出涂层与基底之间机理研究缺乏的现象，提出在静电油烟机领域中将表面防护与结构优化相结合的方案，为油烟机行业以及环境保护提供了新思路。

126 2-6 二氨基吡啶改性氧化石墨烯复合涂层的制备及防腐性能

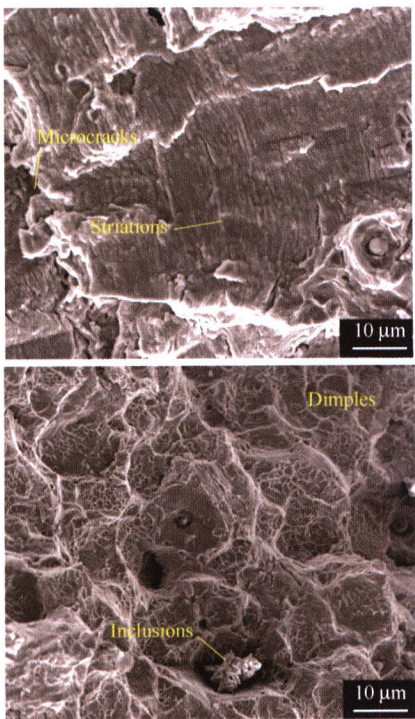
郭洪飞 赵增祺 朝 宝 楠 顶 刘景顺



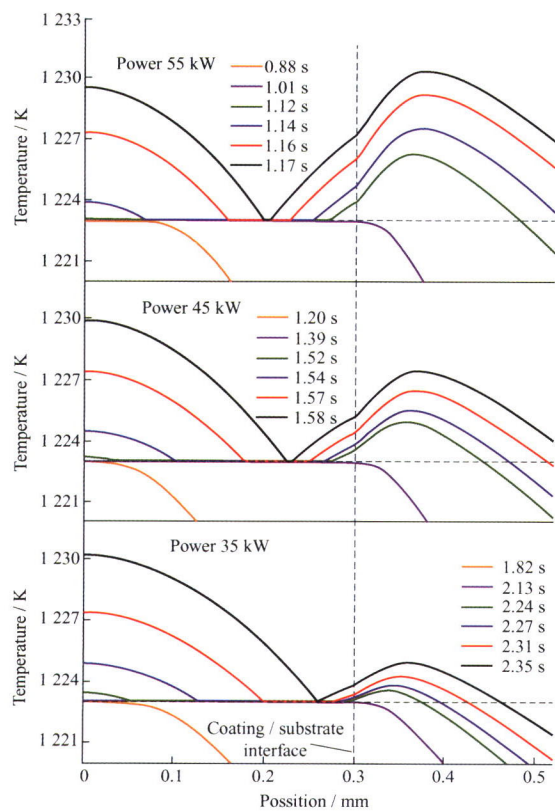
摘要：石墨烯材料作为填料加入到聚合物涂层中可以有效提高涂层防腐性能。以提高 GO 分散性获取高防腐性能复合涂层为切入点，采用 2-6 二氨基吡啶为改性剂制备改性氧化石墨烯复合材料（BGO），分析改性温度、改性剂配比量对 BGO 制备及防腐性能影响。再将 BGO 添加到环氧树脂中制备改性氧化石墨烯复合涂层（BGO / EP），探究 BGO 添加量对复合涂层防腐性能的影响，并揭示涂层防腐机理。XRD、Raman、FT-IR、SEM、AFM、TEM 等系列表征结果表明 2-6 二氨基吡啶成功接枝到 GO 表面。当反应温度为 80 ℃，改性剂与 GO 配比量为 1 : 5 时，对 GO 的改性效果最佳。电化学试验、盐雾试验和附着力试验结果证明 BGO 的添加对环氧树脂防腐性能有明显提升作用，且当添加量为 0.1 wt.% 时效果最佳。在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 10 d 后 BGO / EP 的涂层电阻仍达到 1.03 GΩ · cm²，比纯环氧树脂涂层的 38.9 kΩ · cm² 提高了 5 个数量级，比改性前的 GO / EP 复合涂层的 262 kΩ · cm² 提高了 4 个数量级，防腐性能显著提高。研究成果可为进一步优化石墨烯基防腐涂层制备工艺，探究氨基改性氧化石墨烯复合材料在环氧树脂中的分散效果，挖掘其在涂层体系中的作用机理奠定基础。

140 渗铝复合激光冲击对 321 不锈钢腐蚀疲劳性能的影响

李 微 肖国源 陈辉涛 杨 蕾 张圣德



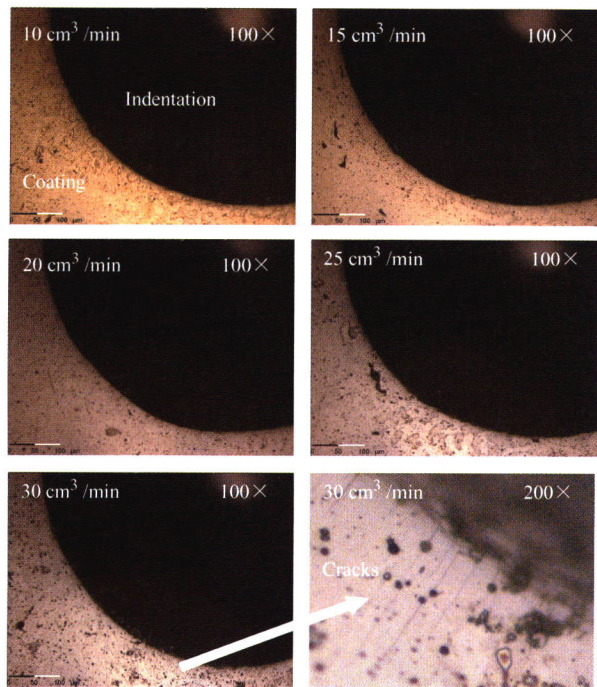
摘要：针对聚焦型太阳能热发电换热管材料在熔融铝硅环境中易发生腐蚀疲劳失效的问题，采用粉末包埋渗铝和激光冲击对 AISI 321 不锈钢进行表面改性，研究其熔融铝硅环境下腐蚀疲劳性能。结果表明，渗铝钢表面形成以 FeAl 金属间化合物为主的渗层，尽管能够有效地隔离基体和腐蚀介质，但是作为疲劳裂纹的形核源，会导致腐蚀疲劳寿命降低 40%；经不同功率密度的激光冲击强化处理后，渗铝钢表面硬度显著提高，延缓了疲劳裂纹萌生，提升了耐蚀性，降低了腐蚀损伤的影响，疲劳损伤占据主导地位，使得渗铝钢腐蚀疲劳寿命提高 100%~200%。



摘要：重熔处理技术作为提高基体与涂层界面结合强度的方法之一，具有加热速度快、工作环境清洁等优点，但仍存在热影响偏大时造成基体损伤的风险。以感应重熔涂层为研究对象，建立二维有限元传热模型，研究涂层感应重熔过程中的温度场变化规律。以 TC11 钛合金基体表面感应重熔钛基涂层 Ti49Zr49Be 为典型材料，研究发现：集肤深度分别为 4.0 mm、1.5 mm 和 0.6 mm 时，三种集肤深度下涂层熔化界面推移方式均不同，且基体热敏感温度区深度和持续时间随着集肤深度的减小呈现递减趋势；感应重熔功率分别为 35 kW、45 kW 和 55 kW 时，发现界面推移方式相同，均为涂层表面、涂层 / 基体界面处向涂层内部双向推移，且基体热敏感温度区深度和持续时间随加热功率的增加呈现递减的趋势。涂层感应重熔过程传热模型和温度场变化规律研究表明，增大功率、减小集肤深度有助于工程应用中抑制基体热影响。

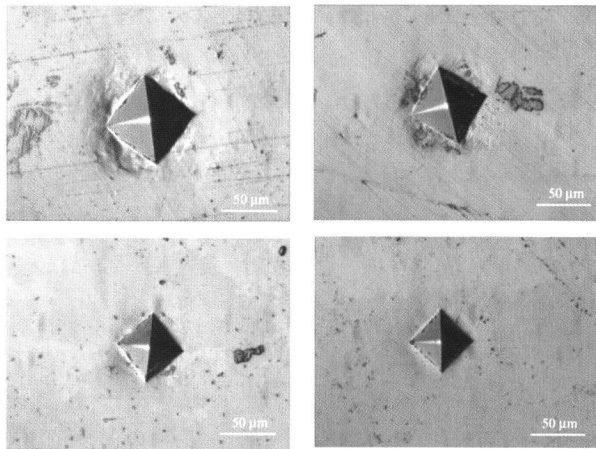
160 金属陶瓷 nc-Ti (C, N) 复合自润滑碳介质涂层的制备及性能

陈 强 张而耕 周 琼 黄 彪 梁丹丹 张 帆 孙思睿 孙国庆



摘要：金属陶瓷涂层与类金刚石涂层的性能不同，在实际应用中两种涂层不能够互换使用，对于涂层的应用来说是一个缺陷。为了克服上述缺陷，将金属陶瓷涂层与类金刚石涂层的优异性能相结合，提出一种金属陶瓷复合自润滑碳涂层，并以三元 TiCN 涂层为对象，采用 SEM、EDAX、XRD、Raman、XPS 及维氏硬度计、压痕试验、摩擦磨损试验，研究具有自润滑特性的碳相对含量对于涂层微观组织结构、力学及摩擦磨损性能的影响。结果表明：随着碳含量的增加，涂层表面更为致密光滑，涂层的主要组成相为 TiN、TiC、TiC_{0.3}N_{0.7} 及 TiC_{0.7}N_{0.3}；涂层中 Ti-N、Ti-C 键随着碳含量的增加呈现先增加后减少趋势，当碳含量为 31.24 at% 时，涂层中便有多余的非晶碳析出，形成金属陶瓷复合自润滑碳涂层 nc-Ti(C, N) / a-C，此时涂层不锈钢的硬度最高为 HV_{0.05} 1052.2，同时涂层表现出较好的结合力、较低的摩擦因数及磨损率；涂层中碳含量为 43.85 at% 时，摩擦因数较低，在 0.1 以下波动，磨损率达最小值 3.31×10⁻¹⁵ m³ / (N·m)，但压痕周围有微裂纹产生。解释了自润滑碳对于金属陶瓷涂层性能的影响机制，可为高性能涂层的制备提供理论指导及试验依据。

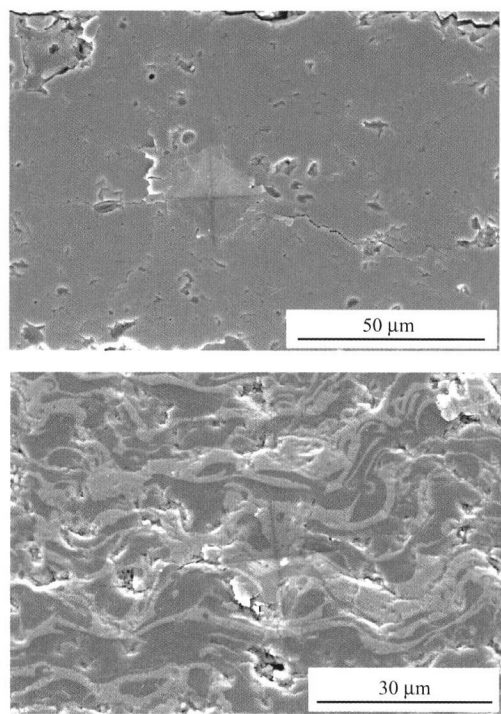
麻 恒 罗 琪 魏坤霞 周正华 胡 静



摘要：以 42CrMo 钢为材料，探索添加微量硼对离子渗氮效率和渗层组织性能的影响。利用光学显微镜、X 射线衍射仪（XRD）、显微硬度计、摩擦磨损测试仪等仪器对截面显微组织、物相、截面硬度、渗层韧性以及耐磨性等性能进行测试和分析。研究表明，离子共渗可显著提高渗氮效率，在相同离子渗氮工艺 520 ℃保温 6 h 条件下，化合物层厚度随 B 添加量增加逐渐加厚，由常规离子渗氮处理后的 18.78 μm 增加到 29.44 μm；同时硼氮离子共渗后在化合物层与扩散层相连处形成了锯齿状垂直楔入基体的硼铁化合物 FeB 和 Fe₂B，达到增强渗层与基体结合力及提高渗层硬度的显著效果。随 B 添加量增加，试样表面硬度和有效硬化层深度都逐渐提高，表面硬度可由常规离子渗氮的 750 HV_{0.05} 提高至 1002 HV_{0.05}；有效硬化层厚度由常规离子渗氮的 265 μm 增加到 355 μm，相当于渗氮效率提高约 35%。硼氮离子共渗处理后试样耐磨性和渗层韧性明显高于常规离子渗氮。

176 Cr₂O₃ 对 Al₂O₃-Cr₂O₃ 涂层干滑动摩擦磨损行为的影响

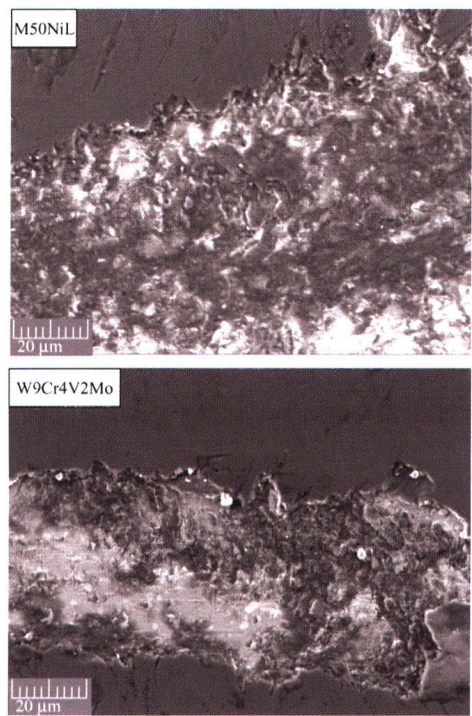
勾俊峰 杨 鑫 张世宏 杨 阳 张小锋 王 冠 刘江文 王 铀 张永康



摘要：Cr₂O₃ 对 Al₂O₃-Cr₂O₃ 复合涂层与高硬度陶瓷接触时的摩擦磨损行为及磨损机制的影响尚未揭示。采用大气等离子喷涂的方法制备 Cr₂O₃ 含量不同的 Al₂O₃-Cr₂O₃ 复合涂层以研究 Cr₂O₃ 的影响机制。试验结果表明：Cr₂O₃ 明显减少了涂层的微观孔隙；复合涂层中 α-Al₂O₃ / γ-Al₂O₃ 的相对含量比明显高于 Al₂O₃ 涂层中的 37%；Al₂O₃-40%Cr₂O₃ 涂层的硬度与 Al₂O₃ 涂层相比提高了 48%，断裂韧性是 Al₂O₃ 涂层的 2 倍多；当载荷为 5 N、10 N 和 15 N 时，Al₂O₃-40%Cr₂O₃ 复合涂层的摩擦因数最低，磨损率依次降低 60%、85%和 79%。但是当载荷为 20 N 时，Al₂O₃-20%Cr₂O₃ 复合涂层的摩擦因数最低，磨损率降低了 50%。微观脆性断裂是涂层的主要磨损机制。复合涂层耐滑动磨损性能与 Cr₂O₃ 含量及磨损条件是密切相关的。微观结构、硬度、断裂韧性、导热系数等是影响 Al₂O₃-Cr₂O₃ 复合涂层耐磨损性能的重要因素。研究结果可为高耐磨性 Al₂O₃ 基涂层的设计和和应用提供指导。

187 不同轴承钢基体沉积 Ti-GLC 薄膜的高温摩擦学性能

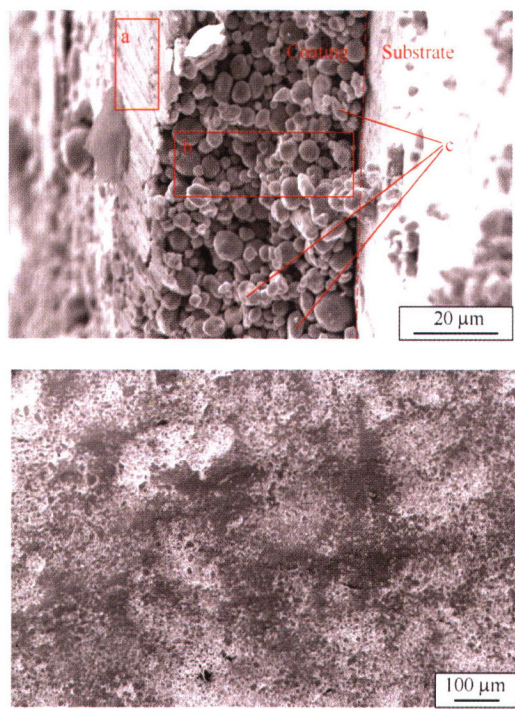
聂傲男 李迎春 范恒华 毕明龙 邱 明 尹津龙



摘要：针对航空发动机主轴轴承服役工况恶劣和类石墨碳基薄膜在高温环境下的性能研究不足等问题，采用磁控溅射技术在不同轴承钢基体（M50 钢、M50NiL 钢和 W9Cr4V2Mo 钢）上沉积 Ti-GLC 薄膜，探究在不同温度下的摩擦学性能。采用 SEM、Raman 分析薄膜的微观结构，采用纳米压痕仪、划痕仪等测试其力学性能，利用 MFT-5000 型多功能摩擦磨损试验机测试所镀薄膜在不同温度下（室温、200 ℃、250 ℃和 300 ℃）的摩擦学性能。结果表明：在三种不同轴承钢基体沉积的 Ti-GLC 薄膜，其硬度和弹性模量变化不大，结合力从大到小依次为 M50>M50NiL>W9Cr4V2Mo。随着温度的升高，三种钢基体沉积 Ti-GLC 薄膜的摩擦因数均逐渐增大，而磨损率则先减小后增大，且表现出不同的磨损形式。三种轴承钢基体沉积 Ti-GLC 薄膜的最佳工作温度区间为室温～200 ℃，M50 钢基体所镀薄膜具有更好的力学性能和摩擦学性能，其结合力达到 80 N 以上，300 ℃时的平均摩擦因数为 0.125，磨损率仅为 $3.05\times10^{-17}\text{ m}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ 。研究成果为类石墨碳基薄膜在高温环境下的实际应用奠定了理论基础。

196 基于离散单元法（DEM）研究镀桶截面形状对机械镀过程物料运动的影响

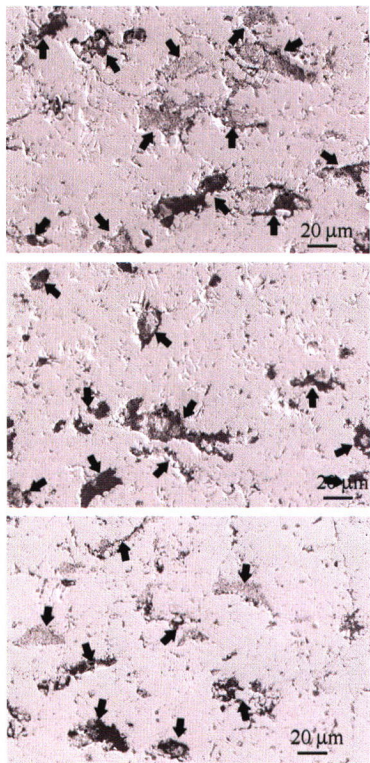
郝朝阳 王胜民 赵晓军 高 凯



摘要：镀桶的截面形状对机械镀过程的影响受限于机械镀设备等原因，相关研究较少。为研究不同截面形状的镀桶对机械镀过程中桶内物料运动规律的影响，采用离散元模拟软件 EDEM 建立不同形状（四边形、六边形、八边形、圆形）下镀桶内物料的运动模型，并从碰撞区域、碰撞频率、碰撞接触力和碰撞能量四个方面对桶内物料间的碰撞情况进行研究。结果表明：镀桶的截面形状对机械镀过程中桶内物料的碰撞和运动规律产生很大影响，在相同模拟条件下，八边形镀桶内物料运动的惰性区域最小；通过对不同形状镀桶内物料间碰撞频率、碰撞接触力和碰撞能量的对比分析，八边形镀桶中的物料运动规律最有利于机械镀工艺过程中镀层的形成和增厚，八边形为最优镀桶截面形状。另外，通过计算机数值模拟的方法探讨镀桶截面形状对机械镀过程中物料运动规律的影响规律，为机械镀设备发展和工艺优化提供理论依据。

205 基于熔融因子的纳米结构涂层制备工艺优化

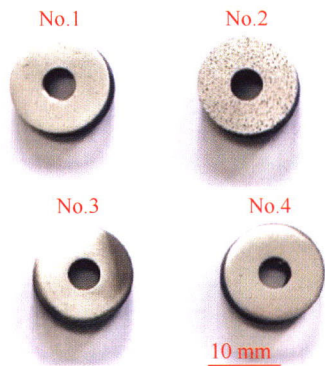
朱金伟 王世兴 郑丽丽 张 辉 何 箫



摘要：在热喷涂制备微米 / 纳米双结构涂层的工艺优化研究中缺乏对颗粒状态与喷涂工艺和涂层结构性能之间关系的综合分析。针对大气等离子喷涂制备双模态微观结构的热障涂层过程开展工艺参数优化研究。首先基于试验测量和数值仿真模拟所获得的颗粒状态以及射流信息，计算可表征飞行粒子受热状态的熔融因子分布，同时开展试验研究获得给定喷涂工况下涂层微观结构和沉积效率。最后以熔融因子为中间参数，研究并建立喷涂工艺-飞行粒子状态-涂层结构特性相关关系。结果表明，数值仿真模拟得到的纳米团聚颗粒状态与试验测量结果基本一致。纳米结构涂层微观结构主要缺陷为未熔纳米团聚粒子及微裂纹。在纳米结构涂层制备过程中，随着喷涂距离增加，飞行粒子的熔融因子先增大后减小，涂层沉积效率先增加后降低，孔隙率和未熔粒子数则先减小后增大。主气流量的增加则会导致熔融因子减小。在喷涂功率相近情况下，采用低电流高电压的组合会使得飞行粒子熔融因子分布取值较大，进而使得涂层沉积效率增加、孔隙率降低。使用熔融因子分析喷涂工艺参数对纳米团聚粉末颗粒状态和涂层结构特性的影响关系，可用于指导纳米双结构涂层制备过程工艺控制。

215 选区激光熔化成形 TC4 钛合金力学性能及其工艺关联性

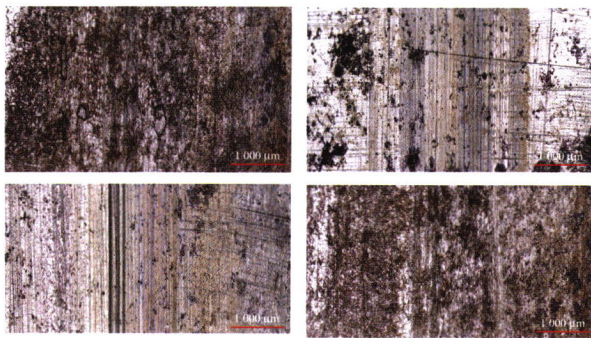
龙 旭 贾啟普 李 娇 种凯楠 杜雷鸣 潘向南 常 超



摘要：增材制造技术可实现复杂结构的无模具，快速、近净成形，高致密度。为保证零件的成形质量，建立金属增材制造技术工艺参数—微观结构—宏观力学性能的关联机制十分关键。采用选区激光熔化技术（SLM）制备四种不同工艺参数组合的 Ti-6Al-4V 合金（又称 TC4），对比和讨论试件微观形貌。通过单轴拉伸试验从宏观角度研究准静态条件下材料本构行为，并确定了流动应力和应变极限等关键力学性能参数，通过纳米压痕试验从微观角度研究 0.01 / s 和 0.10 / s 压痕应变率下材料荷载-位移曲线，并基于连续刚度法获取材料弹性模量和硬度。最后通过引入约束因子和位错密度，结合单轴拉伸和纳米压痕试验所得的力学性能，讨论 SLM 成形过程中激光能量输入密度对 TC4 材料宏观力学性能的影响规律。通过开展工艺参数与力学性能的相关性分析，从更具统计意义的角度阐明 SLM 工艺参数—微观结构—宏观力学性能的关联机制，进而更加有效地确定可用于调控 SLM 成形 TC4 材料宏观力学性能的工艺参数优化组合。研究结果可为提升 TC4 材料力学性能的 SLM 成形工艺参数提供指导。

224 稀土 CeCl_3 复合镀铁层耐磨耐腐蚀性能

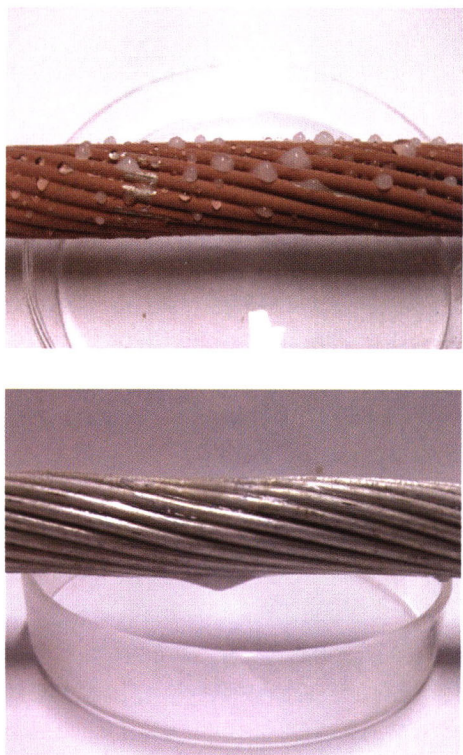
傅云祥 朱新河 董文仲 付景国 尚少伟 张焯凯



摘要：电镀技术常用来对已破损的零件进行修复与再制造，然而其耐磨性及耐腐蚀性能需要进一步改善。在电镀技术的基础上向镀液中添加不同浓度的 CeCl_3 化合物（0、0.5、1、1.5 g / L）制备出复合镀层以探究其对电镀层性能的影响。结果表明：在镀液中添加 CeCl_3 化合物会使复合镀层中铁晶粒呈现较好的择优取向性；随着镀液中 CeCl_3 化合物浓度的逐渐提升，复合镀层的显微硬度、耐磨性、耐腐蚀性均呈现出先提高后减弱的状态；当镀液中 CeCl_3 化合物浓度为 0.5 g / L 时，复合镀层的表面结构更为均匀、镀层中铁晶粒的排列更加致密，其显微硬度达到 611.4 HV，具有最佳的耐磨性和耐腐蚀性能。研究成果表明镀液中添加稀土 CeCl_3 化合物可以大幅度提高镀层的耐腐蚀性，并在一定程度上提高镀层的耐磨性，可为实际生产中提高镀铁层的耐磨性及耐腐蚀性能提供理论指导。

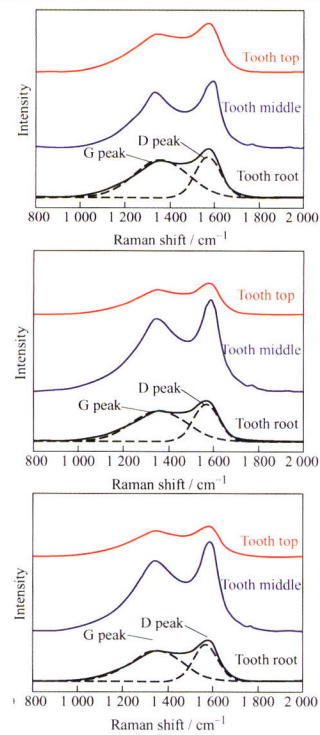
235 硅橡胶粉末 / 环氧树脂超疏水涂层的制备及其在架空导线抗结冰中的应用

赵美云 康 萌 何 钱 杨 帆 赵 彦 赵新泽



摘要：架空输电线路导线在服役过程中经常会受到覆冰影响，引发安全事故，我国是发生输电线路覆冰事故较多的国家之一，为此针对架空导线开展抗结冰工作对保障电力系统安全运行具有重要意义。利用废旧硅橡胶复合绝缘子伞裙制备一种超疏水粉末，与环氧树脂按一定比例喷涂在玻璃基底上制备超疏水表面，其水接触角可达 154° 。将制备的粉末喷涂在钢芯铝绞线表面上，对其自清洁、抗结冰及表面耐久性进行测试。研究结果表明：在低温环境下具有硅橡胶粉末 / 环氧树脂超疏水涂层的导线相比原始导线具有更好的抗结冰性能，在相同环境温度下，相同时间内其结冰量只有原始导线的一半，可以有效延缓结冰，且在光照、腐蚀、反复除冰的环境下，也具有抗冰耐久性。该制备方法简单可行、效率高，能实现废旧材料的循环利用，可进一步应用于生产实践。

徐天杨 詹 华 王亦奇 李碧晗 司彦龙 汪瑞军



摘要: 花键齿严重的磨损失效制约了机械传动部件的可靠性和使用寿命, 传统表面处理技术如渗碳、渗氮等无法满足花键齿减摩耐磨的需求。为提高内花键齿表面的耐磨性, 采用等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 技术, 利用空心阴极放电 (HCD) 产生的高密度等离子体, 在大长径比内花键表面制备多层结构 Si-DLC 薄膜。分别研究薄膜制备过程中, 沉积气压和脉冲频率对花键齿廓方向上薄膜的截面形貌、相结构、厚度均匀性和力学性能的影响。结果表明, 沉积气压及脉冲频率是影响内花键齿表面薄膜性能及厚度均匀性的关键参数。沉积气压从 8 Pa 增加到 10 Pa 时, 花键齿齿顶、齿中及齿根处的 Si-DLC 薄膜厚度均随之增大, 而薄膜的硬度和弹性模量却随之降低。当脉冲频率从 300 Hz 增加到 500 Hz 时, 花键齿表面薄膜厚度均随之减小。薄膜在花键齿廓方向上的厚度均匀性因等离子体密度增加, 鞘层之间交叉重叠减少而变优。研究结果为耐磨强化涂层材料在动力传输系统上的发展与应用提供了基础。

CONTENTS

- 1 Research Progress of Antimicrobial Peptides in the Field of Marine Antifouling**
LOU Tong BAI Xiuqin HE Xiaoyan YANG Ying YANG Zongcheng YUAN Chengqing
- 12 Rolling Contact Fatigue Failure Mechanism of Martensitic Bearing Steel after Carbonitriding**
JIANG Ganghui LI Shuxin PU Jibin WANG Haixin CHEN Yinjun
- 24 Service Performance Evaluation of Graphene Modified Heavy Anticorrosive Coating on the Surface of Transmission Tower under Harsh Marine Atmosphere Corrosive Environment**
CHEN Zhiyu GUO Xiaoping SHUI Xiaoxue JIANG Jiong ZHOU Kaihe LIU Shuan
- 35 Friction and Corrosion Properties of (CrNbTiMoZr)C Coating in Artificial Seawater**
LIU Xinyu ZHANG Yan CAI Wumin WANG Junjun
- 45 Preparation of the Thermal-assisted Self-healing Bionic Super Slippery Surface on Aluminum Alloy Substrate and the Effect of Lubricant on Its Performance**
LI Hao XIN Lei FENG Xiaolei PENG Yujie LI Pengchang DING Jianxu ZHANG Jie
- 55 Corrosion Inhibition of Polylevodopa-silica Composite in 1 M HCl**
WEI Jiayu QIU Shihui ZHAO Haichao YANG Feng
- 63 Preparation of Sb-C / polyurethane Composite Coating and Its Corrosion Resistance Performance**
HE Zhongyi TIAN Yuqin ZHANG Renhui XIONG Liping LI Qiang
- 70 Stearic Acid / graphene Oxide Composite Coatings on Mg Alloy Surfaces for Anti-corrosion / wear Performances**
WANG Ying TANG Aiguo ZHOU Xingyi PANG Xianjuan YUAN Ningyi DING Jianning
- 80 Preparation of High Corrosion Resistance Ni-Fe-Sm Alloy Films in Reline System**
ZHAO Jing CHEN Biqing DU Chan ZHU Yunna ZHANG Shimin
- 91 Review on Preparation and Tribological Properties of Layered Double Hydroxides**
ZHANG Dongqiang WANG Yuanyuan JIA Qian SUN Lei GAO Kaixiong ZHANG Bin
- 103 Laser Shock Processing and Its Effect on Fatigue Life of Titanium Alloys : A Review**
QIAN Liyan WANG Yanhu DAI Fengze KONOVALOV Sergey WEN Ming CHEN Xizhang
- 113 Research Progress of Superamphiphobic Coating in Electrostatic Lampblack Machine**
WANG Chuang LIU Jiaqi GU Liangxue WANG Jinbiao WEN Feng

- 126 Preparation and Anticorrosion Performance of 2-6 Diaminopyridine Modified Graphene Oxide Composite Coating**
GUO Hongfei ZHAO Zengqi CHAO Bao NAN Ding LIU Jingshun
- 140 Effect of Aluminizing and Laser Shock Peening on Corrosion Fatigue Properties of 321 Stainless Steel**
LI Wei XIAO Guoyuan CHEN Huitao YANG Lei ZHANG Shengde
- 152 Effect of Brazing Coating Induction Parameters on Temperature Field**
SHI Qiusheng ZHAO Mengqi CHEN Lin YANG Guanjun
- 160 Preparation and Properties of Cermet nc-Ti(C, N) and Self-lubricating Carbon Media Composite Coating**
CHEN Qiang ZHANG Ergeng ZHOU Qiong HUANG Biao LIANG Dandan ZHANG Fan
SUN Sirui SUN Guoqing
- 170 Effect of Trace Boron Addition on the Microstructure and Properties of Plasma Nitriding Layer**
MA Heng LUO Qi WEI Kunxia ZHOU Zhenghua HU Jing
- 176 Dry Sliding Wear Behaviour of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$ Coatings with Different Contents of Cr_2O_3**
GOU Junfeng YANG Xin ZHANG Shihong YANG Yang ZHANG Xiaofeng WANG Guan
LIU Jiangwen WANG You ZHANG Yongkang
- 187 High Temperature Tribological Properties of Ti-GLC Films Deposited on Different Bearing Steel Substrates**
NIE Aonan LI Yingchun FAN Henghua BI Minglong QIU Ming YIN Jinlong
- 196 Influence of Section Shape of Plating Barrel on the Movement of Materials in Mechanical Plating Process Based on DEM**
HAO Chaoyang WANG Shengmin ZHAO Xiaojun GAO Kai
- 205 Optimization of Process Parameters for the Preparation of Nanostructured Coatings Based on Melting Index**
ZHU Jinwei WANG Shixing ZHENG Lili ZHANG Hui HE Jing
- 215 Mechanical Properties and Parameter Optimization of TC4 Alloy by Additive Manufacturing**
LONG Xu JIA Qipu LI Jiao CHONG Kainan DU Leiming PAN Xiangnan CHANG Chao
- 224 Wear Resistance and Corrosion Resistance of Rare Earth CeCl_3 Composite Iron Coating**
FU Yunyang ZHU Xinhe DONG Wenzhong FU Jingguo SHANG Shaowei ZHANG Zhuokai
- 235 Preparation of Silicone Rubber Powder / epoxy Resin Superhydrophobic Coating and Its Application in Anti-icing of Overhead Wires**
ZHAO Meiyun KANG Meng HE Qian YANG Fan ZHAO Yan ZHAO Xinze
- 243 Effects of Deposition Pressure and Pulse Frequency on Properties for Si-DLC Films Prepared on Surface of Internal Spline Tooth**
XU Tianyang ZHAN Hua WANG Yiqi LI Bihan SI Yanlong WANG Ruijun

《中国表面工程》第六届编委会

荣誉主任：徐滨士*

荣誉委员：

丁传贤* 王玉明* 左铁镛* 任露泉* 关 桥* 杜正恭 李 健 吴 林 宋天虎
张嗣伟 周 廉* 赵连城* 柯 伟* 钟群鹏* 海锦涛 黄先祥* 曹春晓* 臧克茂*
潘际銮*

主 任：薛群基*

常务副主任：邵天敏

副 主 任：朱 胜 陈建敏 陈超志 王国彪 周仲荣 雷明凯

国内委员：

王 为	王立平	王 彦	王钻开	王 铀	王海斗	王 维	王福会	邓春明
甘晓华*	卢 柯*	叶福兴	史玉升	史佩京	史铁林	白秀琴	朴钟宇	朱旻昊
朱嘉琦	乔培新	向 巧*	庄大明	刘志峰	刘秀波	刘宣勇	刘 敏	刘维民*
刘道新	安茂忠	孙冬柏	孙德恩	严新平*	李长久	李文亚	李争显	李志伟
李晓刚	李晓延	李铸国	李 曙	杨华勇*	杨冠军	吴忠振	吴 渊	邱长军
何丹农	何 实	冷永祥	汪久根	汪爱英	张 平	张永振	张 伟	张晨辉
陆 峰	陈华伟	陈华辉	陈守刚	陈 坚	陈学东*	陈 茜	范多旺	范志超
林 安	林忠钦*	林健凉	岳 文	金 国	周克崧*	周 峰	周留成	庞晓露
单际国	单忠德*	单 磊	孟庆实	赵景茂	段金弟	段海涛	段德莉	姜传海
宫声凯*	姚建华	姚萍屏	贺定勇	袁成清	顾卡丽	徐大可	徐久军	徐可为
高玉魁	高金吉*	涂江平	涂善东*	黄卫东	黄 峰	黄 巍	曹华军	康嘉杰
葛世荣*	董超芳	韩志武	鲁金忠	蒲吉斌	解国新	蔡振兵	蔺 增	雒建斌*
谭 俊	戴振东	鞠鹏飞						

国际委员：

Carsten Gachot (奥地利)	Dongying Ju (日本)	Duc Truong Pham (英国)
Hanlin Liao (法国)	Hanshan Dong (英国)	Hong Liang (美国)
Jacek Senkara (波兰)	Kai Cheng (英国)	Nabil Z. Nasr (美国)
Ping Xiao (英国)	Rolf Steinhilper (德国)	Ronghua Wei (美国)
Sik-Chol Kwon (韩国)	Tomasz Chmielewski (波兰)	William Schwarck (英国)
Winifred Ijomah (英国)	Zhenqi Zhu (美国)	Zhong Chen (新加坡)

(注：带*号的为中国科学院或中国工程院院士)

