

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

D39-海洋新材料
D39-Marine Functionality and
Protective Materials

Organized by

Chinese Materials Research Society

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

D39. 海洋新材料

分会主席：王立平 孙明先 王华 崔洪芝 赵永庆 董超芳 汪怀远

油气与新能源管道服役安全评估与完整性技术分析

程玉峰*

University of Calgary

极端环境材料设计及表面损伤防护技术

崔洪芝*

中国海洋大学

海洋平台、海洋风电、疏浚船舶等装备长期服役于风、浪、流、蚀等极端环境，且承受复杂载荷、冲击、温变、腐蚀、磨损等耦合损伤，其对支撑装备的关键部件的耐蚀性、耐磨性、强韧性提出更高要求。基于“耐蚀耐磨强韧梯度化-高效制备复合化-材料工艺工程化”的全流程一体化设计路线，采用高通量组合制备方法，以等离子熔覆/高速激光熔覆/激光-等离子耦合熔覆技术制备铁基、镍基、钛基、多主元高熵非晶合金涂层等复合涂层，通过成分设计及工艺参数调控，形成纳米强化相弥散强化的“强-韧”配合的复合结构，使涂层在海洋环境下的腐蚀、磨损性能协同提升。建立了涂层成分-工艺参数-组织结构-耐蚀耐磨强韧性能的关系，研究成果将为海洋环境下耐磨、耐蚀涂层成分、结构设计及制备提供理论基础和技术支撑。

抗冰蛋白人工设计及防冰涂料应用

张雷*

天津大学

海洋环境下先进耐蚀金属材料腐蚀行为和机理研究

骆鸿*

北京科技大学

海洋环境中的高盐度、高湿度及多变的化学成分使金属材料面临严峻的腐蚀挑战。高熵合金（HEAs）以其独特的多主元成分和优异的机械性能，展现出作为先进耐蚀材料的巨大潜力。本论文系统研究了高熵合金在海洋环境下的腐蚀行为及其机理。通过电化学测试、表面分析等研究发现高熵合金在模拟海洋环境（如人工海水和含氯离子溶液）中表现出优异的耐腐蚀性能。其耐腐蚀性能优于传统不锈钢和部分高性能合金，主要由于其形成的稳定且致密的氧化膜。HEAs 在海洋环境下的腐蚀机理主要包括均匀腐蚀和局部腐蚀。合金中不同元素的分布和相组成对腐蚀行为有显著影响，某些元素（如铬、钼）的存在有助于增强其抗腐蚀能力。电化学阻抗谱（EIS）和动电位极化曲线分析，揭示了 HEAs 在海洋环境中的电化学反应机制。高熵效应导致的成分复杂性和结构无序性有助于提高电化学稳定性。本研究结果表明，高熵合金在海洋环境下具有优异的耐腐蚀性能，其复杂成分和多相结构在腐蚀过程中发挥了重要作用。这些发现为开发新型高性能耐蚀材料提供了理论依据和技术支持，有望推动 HEAs 在海洋工程、海洋能源开发等领域的广泛应用。

高强韧“聚合物陶瓷”海洋防污涂层

马春风*

华南理工大学

海洋工程装备材料失效分析及其防护技术

陈守刚*

中国海洋大学

习近平总书记在党的十九大报告中指出要坚持陆海统筹,加快建设海洋强国。海洋强国战略要求积极拓展海洋经济发展空间,建设现代海洋产业体系,培育壮大海洋工程装备。然而,海洋装备材料的腐蚀造成灾难性事故频发,严重制约了海洋工程装备的制造、安全服役和经济发展。海工装备的服役寿命与海洋环境的腐蚀防护息息相关,建立海洋工程装备全生命周期质量控制、寿命预测和防护技术势在必行。基于此,我们的研究主要集中于实际涉海合金管材在海洋环境及实际工况下的成膜特性及耦合腐蚀机制。通过科学量化微生物膜及代谢产物、腐蚀电化学、应力应变、材料微观成分组成等主要参数间的关联,全面评估多环境因子体系下合金的微生物腐蚀机制。同时,针对服役于海洋环境中的典型材料,设计合理的室内模拟加速试验方法,对其服役寿命进行预测,服务于材料选材及安全评价。针对焊接接头这一结构材料的薄弱环节开展腐蚀与应力腐蚀开裂行为研究。

生物污损问题严重影响海工装备的使用寿命,造成巨大的经济损失,威胁海洋安全。特别是在海洋环境水线附近,由于阳光充沛,温度适宜,更有利于微生物膜的形成和发展,导致海工装备材料的生物附着现象更严重,因此,因此如何解决水线附近的生物污损问题尤为紧迫。通过材料复合及材料表面微纳结构调控,构筑光催化防污材料,通过有机无机半导体设计新型防污剂实现防污涂层的长效防污性能,实现了功能涂层材料在 pH、光照等环境因素交替变化下的智能防护。

海洋多功能涂层的定向设计和防腐机制

曹发和*

中山大学

深海金属材料腐蚀防护技术研究

刘莉*

东北大学

柔性气凝胶材料

宋淼*

中南大学

大口径 TA15 钛合金无缝管开发实践

肖强*

成都先进金属材料产业技术研究院股份有限公司

船用钢的绿色化发展与应用前景展望

严玲*

鞍钢集团钢铁研究院

钛及钛合金在舰船领域的研究进展

侯智敏*

西部钛业有限责任公司

极地低温海洋环境下海工钢损伤行为与加速试验评估

崔中雨、崔洪芝*

中国海洋大学

本文基于文献调研与课题组研究成果，总结了极地环境下影响钢铁材料腐蚀、断裂的关键因素，包括极地低温、温度大幅季变、高载荷、热应力、冲击与磨损载荷等变化特征。探讨了极地环境下材料的腐蚀速度变化，腐蚀发生发展的主要微观机制，包括盐颗粒富集导致结冰点降低、材料-水-冰界面离子浓聚、结晶潜热等机制的适用性及腐蚀发生的临界判据。分析了极地低温环境下材料力学性能变化的主要形式及环境敏感断裂发生的可能性。同时，明确了极地环境下材料在环境大幅季变作用下的动态累积损伤效应及其导致的低温-氢耦合作用机制。最后，介绍了基于室内外试验的极地环境加速试验谱的建立、适用性验证工作，所建立加速谱满足加速倍率大于 15 倍，在腐蚀速度、腐蚀产物物相占比、局部腐蚀深度三个方面的室内外相关性均大于 80%，预测偏差小于 20%，满足极地环境下钢铁材料的适用性快速考核评价需求。

Fe 基非晶复合涂层海洋环境下耐蚀防污性能研究

褚振华*

上海海洋大学

与传统的晶态合金材料相比，非晶合金具有优良特性，如良好加工特性、高强度、优良软硬磁性、良好耐腐蚀性等。将非晶合金作为涂层材料，应用于材料表面技术领域，即采用现代先进喷涂技术制备大面积厚度可控的非晶涂层，既可突破非晶合金尺寸上的限制，又可充分发挥非晶合金优异的性能，起到防护作用，或形成特种物理化学性能，拓展非晶材料的应用范围。就非晶涂层而言，可采用添加第二相的方法来改善非晶性能。然而制备得到组织均匀、成分可控的复合涂层是一难点。如涂层中非晶和陶瓷相比比例不可控，性能波动较大。因此，实现添加第二相成分比例可控且能均匀分布于基体，对提高非晶涂层的耐磨性具有重要意义。此外，随着现代科学技术的发展，电子产品在为人们带来方便的同时也由于辐射出的电磁波而给人们的健康、安全等造成负面影响。军事方面，各种军用电子设备，如飞机、舰船及地面军事装备辐射出的电磁波若被敌方采集便会泄露军事机密。因此，电磁波吸收材料的研究与开发，在智能制造大力发展的今天，不管在民用还是军用都具有重要的研究意义及价值。因此开发一种满足海洋复杂工况下具有高耐蚀性能，且兼具良好的吸波性能的涂层材料，具有重要的应用和科学价值。本文研究了制备非晶复合涂层的工艺，并分析了涂层的耐蚀性能及海洋环境下的防污损性能。

二维层状半导体材料中物理性能的氧化还原调控

王蕾*

宁波材料技术与工程研究所

二维导电高分子配位聚合物材料是近十多年来发展起来的一类新型多功能电子材料。这类材料兼具了传统金属-有机框架材料结构设计多样性，可调节孔道的特性，以及半导体材料物理性质可调控的特点。这些特性使得它们在很多领域展现出应用前景。然而，这类多功能材料的设计合成空间还较为狭窄，精细调控结构及物理性质的手段有限，更多特定应用场景有待开发。这里，我们通过后合成化学计量氧化有机配体以及金属异价取代诱导有机配体氧化等方法，实现了一类含硫的二维层状半导体材料中物理性质的广泛调控响应。这些发现证明二维导电高分子配位聚合物材料是非常好的电子结构可调控平台，有望成为新型的多功能材料体系。它们独特的结构与物理性质也有望在海洋功能材料（如耐腐蚀电磁屏蔽涂层和长效防污抗菌涂层材料）领域得到应用前景。

极地船舶用钢超疏水表面的制备及性能研究

苏显栋*

鞍钢集团钢铁研究院

钛合金换热管在海水中的结垢特性及除垢工艺研究

朱光^{1,2}、刘峰^{1,2}、王鑫^{1,2}、邢路阔^{1,2}、许凤玲^{1,2}

1. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护全国重点实验室

2. 洛阳船舶材料研究所

海水换热器被广泛应用于电力、船舶、石油等领域，直接接触海水的服役环境使得换热管等核心部件面临着严重的腐蚀风险。耐蚀性好、比强度高的钛合金是海水换热管的理想材料，但因结垢而导致换热效率降低成为限制钛合金换热管应用的关键问题。以三亚天然海水为冷流体，热淡水为热流体来模拟钛合金换热管的实际工况，对结垢特性进行研究。结果表明，TA2 换热管在经过 60 天连续运行后，换热管的传热能力出现明显下降，清洁度降低至初始状态的 90% 以下；管内壁形成一层泥沙颗粒与钙镁沉积物组成的混合物，厚度达到 30 μm 左右。在热水条件相同时，海水流速低的换热管传热能力下降更快。为保障换热器长时间运行，需定期对换热管进行除垢。高效、环保、不受空间限制的高压水射流是钛合金换热管除垢的理想工艺。以 30MPa 和 70MPa 的高压水射流对结垢管进行除垢处理，垢层清除效果显著，换热管的清洁度可分别恢复至 97% 和 99%。对高压水射流对换热管的损伤进行评价，在 70MPa 的水射流冲洗 10 次后，管内壁未见宏观缺陷，显微组织未见变化，力学性能未出现降低，说明该除垢工艺不会对换热管造成损伤。

钛合金/碳纤维复合材料深海潜航器耐压壳的研究

吴廷洋、张宝龙、丁俊杰、唐福康、茅东升*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

耐压壳作为深海潜航器的核心部件承担着保障人员安全、仪器设备正常和提供浮力等作用，深海特有的超高压、强腐蚀和浮力-重力交替等复杂苛刻环境对耐压壳的设计制造提出了更高的要求。本文在结构设计的基础上，结合有限元累积损伤理论，对不同构型的耐压壳进行有限元渐进损伤模拟和水压试验验证。在保证耐压壳壁厚相同的情况下，研究了钛合金层及碳纤维复合材料层厚度的不同比例对耐压壳力学性能及失效行为的影响。计算结果表明，碳纤维复合材料耐压壳的临界失稳载荷对比钛合金耐压壳可提升 44.8%，复合材料层的加入可显著提升耐压壳的爆破强度，并降低整体的重量。然而，钛合金层厚度较小会降低其强度，钛合金层厚度与碳纤维复合材料层厚度相近时强度提升较为显著。此外，基于经典层合板理论和自编程语言，对碳纤维复合材料层进行了铺层优化设计。将有限元仿真结果与水压试验结果进行对比，结果符合性较好，验证了有限元仿真模拟模型和铺层优化模型的准确性。

Ti407 导电填料增强环氧富锌涂层综合防护性能的机制研究

雷冰*、李晶晶、孟国哲

中山大学

环氧富锌涂层（ZRE）广泛应用于海洋防腐工程，其防护机制包括使役初期的牺牲阳极阴极保护作用 and 使役后期的介质阻挡作用。在使役初期，H₂O/O₂/Cl⁻等侵蚀介质渗透到涂层/金属界面后，涂层中的 Zn 粉与钢基材在局部电解质环境下形成腐蚀原电池，Zn 作为相对低电位的阳极被消耗，钢作为相对高电位的阴极得到防护。随着 Zn 的消耗，其腐蚀产物在膜内积累，Zn-Zn、Zn-钢基材之间的连接电阻增加，阴极保护效果逐渐减弱甚至丧失，此时富锌漆的防护机制转为使役后期的 Zn 腐蚀产物介质阻挡作用。受 Zn 粉稳定性和腐蚀寿命的限制，富锌漆的使役寿命一般较短，多用作海洋钢结构的防护底漆，难以在苛刻海洋

环境下形成长期的保护效果。寻求能够同时增强 ZRE 阴极保护效果和屏蔽效果的方法是高性能 ZRE 涂层研究的热点关注。

采用稳定的导电填料增强 ZRE 综合防护性能是当前的主流方法,例如碳系填料、金属系填料等,但可能存在额外的电偶腐蚀风险。针对此问题,作者尝试了将一种具有高导电率、自身稳定好且腐蚀电位合适的 Ti4O7 填料用于 ZRE 改性,获得的良好效果。研究发现 Ti4O7 填料能够显著改善 ZRE 的前期阴极保护性能和后期的介质屏蔽性能,从导电网络和 Zn 腐蚀产物锚定效应两方面解释了 Ti4O7 对 ZRE 综合防护性能的增强机制。

HRB400cE 耐蚀钢筋的钝化与腐蚀行为研究

范志宏*、刘国强、张东方、陈昊翔

中交四航工程研究院有限公司

在恶劣的海洋服役环境中,由于氯离子引发的钢筋锈蚀是造成钢筋混凝土结构耐久性失效的主要因素之一,采用耐蚀钢筋替代普通碳素钢筋是解决钢筋腐蚀、延长钢筋混凝土服役寿命的重要手段。本文以 HRB400cE 耐蚀钢筋和 HRB400E 普通钢筋为研究对象,采用开路电位测试、电化学阻抗谱测试、线性极化曲线测试、动电位极化曲线测试、莫特-肖特基曲线测试等电化学测试方法研究 2 种钢筋在模拟海洋混凝土环境中的自然钝化行为与腐蚀行为,对比 2 种钢筋临界氯离子浓度,并研究其在海水海砂混凝土环境中的长期性能,结合 x 光电子能谱表征钢筋表面钝化膜的组成,分析其耐蚀机理,以期耐蚀钢筋的工程应用提供一些指导。

结果表明,2 种钢筋均能在混凝土孔隙模拟液中完成钝化,HRB400cE 耐蚀钢筋和 HRB400E 普通钢筋钝化 240 h 后表面钝化膜均显示 n 型半导体性质,HRB400cE 耐蚀钢筋钝化后具有更低的点缺陷密度、维顿电流密度及更高的点蚀击破电位和总电阻。x 光电子能谱测试结果表明,HRB400E 普通钢筋钝化膜表面主要由 Fe 的氧化物及羟基氧化物组成,HRB400cE 耐蚀钢筋在此基础上富含 Cr 的氧化物及氢氧化物。在含氯混凝土孔隙模拟液中,HRB400cE 耐蚀钢筋的临界氯离子浓度约为 HRB400E 普通钢筋的 2 倍,表现出更优异的耐氯盐侵蚀性能。在海水海砂混凝土环境中,HRB400cE 耐蚀钢筋海水海砂混凝土体系在 3.5wt.% NaCl 溶液浸泡 140 d 龄期后仍具有较低的腐蚀速率,具有更优异的长期服役性能。结合测试表征结果,HRB400cE 耐蚀钢筋的耐蚀性能较 HRB400E 普通钢筋优异的原因是钢筋中 Cr 耐蚀元素参与了钝化膜的形成,形成的 Cr 氧化物对氯离子具有较强的排斥作用,并且 Cr 耐蚀元素抑制了 Fe^{2+} 向 Fe^{3+} 的氧化过程,提高了 Fe^{2+} 在钝化膜中的含量,从而增强了其耐蚀性能。

航空发动机叶片在海洋大气环境中的腐蚀行为

雷晓维*

西北工业大学

5383 铝合金在天然海水环境下的应力腐蚀行为研究

郭云峰*

中国船舶集团有限公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护全国重点实验室

5 系高镁铝合金具有耐蚀性能好,比强度高,切削性能好以及良好的焊接性能,广泛的应用在船舶、航空航天等领域。在服役 20 年的舰船上发现由高镁铝合金制造成的舰船甲板、燃气轮机进气的内部结构板以及横舱壁上均出现了大量裂纹,这是由于环境敏感引起的开裂。本文以船用 5383 铝合金母材及其钨极氩弧焊焊接件为研究对象,以天然海水为腐蚀介质,在 5℃、15℃、25℃、35℃、45℃ 的不同温度下,通过开展慢应变速率拉伸试验(SSRT)、恒载荷应力腐蚀试验、电化学测试等试验,研究了 5383 铝合金母材及其焊接件的应力腐蚀行为规律。试验结果表明在 25℃ 时,5383 铝合金及其焊接件的应力腐蚀敏感性最低。5℃、15℃ 低温条件下,铝合金的塑性变形能力较差,断口的韧窝变小变浅,脆性断裂特征明显,应力腐蚀敏感性较强。35℃、45℃ 高温条件下,有一定的应力腐蚀敏感性,但其敏感性小于低温环境。通过对

母材和焊接件的电化学性能分析, 5383 铝合金及其焊接件在较低的温度环境中更容易产生应力腐蚀开裂, 5383 铝合金在不同温度的海水中表面生成的钝化膜具有 p 型半导体性质, 25℃时, 钝化膜中缺陷最少, 对基体的保护能力最强。

极地海洋环境牺牲阳极电化学性能研究

张一晗*

中国船舶集团有限公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护全国重点实验室

随着全球极地科考事业深度不断扩展, 极地地区的经济、军事等战略地位凸显, 作为近北极国家, 我国气候生态环境和地区经济利益直接受北极自然环境状况的影响, 开发极地航道、开展极地科学考察对于我国具有重要的战略意义。受到南北极地区特殊的地理位置与极端气候条件制约, 极地环境复杂海域的探索研究极度依赖先进可靠的中高冰级极地船舶装备, 然而, 目前成熟应用于极地科考建设的大型破冰船装备一直存在船体阴极保护电位不当的问题。因此, 开展极地环境下阴极保护材料和船体腐蚀防护应用研究, 明确极地低温阳极材料活化溶解行为规律与机理, 对于建立极地低温环境电化学防腐技术和综合防腐设计方案有重大意义。

为探究极地海洋环境牺牲阳极服役行为规律, 解决极地低温环境船体阴极保护问题, 以常规 Al-Zn-In 牺牲阳极为基础, 通过合金化设计实现多组分复合活化, 提升新型极地海洋环境牺牲阳极电化学性能, 开发极地低温环境用 Al-Zn-In-Mg-Ti-Ga-Mn 牺牲阳极材料, 通过进行模拟服役环境电化学测试, 同时开展完整周期的“雪龙号”实船极地航行试验, 考察极端环境因素对牺牲阳极电化学性能的影响, 采用高倍率扫描电镜等手段观测材料腐蚀产物特征和表面微观形貌, 探明极地航行环境中阳极活化溶解行为机理。结果表明, 在极端环境因素影响下阳极材料的活化溶解行为发生变化, 海水环境中较高的溶解氧含量削弱了低温条件对离子运动的影响, 阳极自腐蚀电流密度增大, 阴极去极化反应加剧, 阳极表面活化溶解和活性金属沉积过程速率提升, 表面钝化膜的更新动态平衡得到有效维持。Al-Zn-In-Mg-Ti-Ga-Mn 阳极具备良好的船体保护电位, 在极地海洋环境中表现出良好的阴极保护性能, 部分研究成果为极地环境装备的安全服役提供了可靠的数据支持和理论指导。

有机硅污损释放防污涂层失效机制与涂层防污性能快速评价

王利*、蔺存国、张金伟、郑纪勇、孙智勇、张广龙、邱峥辉

中国船舶集团有限公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护全国重点实验室 洛阳船舶材料研究所

海洋生物污损给海运船舶等带来严重危害, 涂装防污涂层是海洋船舶防除生物污损最为经济有效的方法。随着国际社会对海洋生态环境保护的日益重视, 有机锡、DDT 等有毒防污剂已被禁用, 氧化亚铜等铜类防污剂由于其在海洋环境中的累积效应, 面临限用甚至禁用的问题, 环境友好型防污涂层已成为必然的发展趋势。依靠表面不沾性与污损释放性能进行防污的污损释放型防污涂层, 因其优越的环境友好性和长效性受到世界各国的重视, 已成为船舶防污材料的重要发展方向。在防污涂层研发中, 配方筛选与防污性能评价是其重要环节之一, 目前主要依靠浅海挂片和防污性能动态试验进行考核, 所需周期长、耗费高, 无法实现对防污涂层性能的快速评价, 大大加长了防污涂层在开发过程中的筛选与测试环节的研制周期。

本研究通过污损释放防污涂层 2 年期实海浸泡试验, 系统获得了涂层表面能、表面化学基团、表面粗糙度等关键防污特性参数随时间的变化规律, 涂层材料表面粗糙度、表面能逐步升高, 甲基-硅氧硅基团峰高比逐渐下降。通过红外光谱、拉曼光谱、X 射线光电子能谱与固体核磁分析, 探清了有机硅污损释放防污涂层实海失效机制, 涂层失效主要是由材料在海水环境中逐步老化(氧化)、磨损等引起防污特性参数退化失衡导致的。基于防污涂层实海环境退化机制, 建立了防污涂层含砂酸性水室内加速退化方法, 在此基础上, 基于防污性能、表面能、粗糙度等关键特性的退化规律及其实验室加速模拟条件下与实海测试的相关性, 建立了污损释放防污涂层性能评价模型, 以国外某污损释放防污涂层为对照, 进行实验验证, 防污期效误差为 4.0%。本研究解析了有机硅污损释放防污涂层实海环境失效机制, 建立了涂层防污性能室内快速评价方法, 为该类涂层的设计提供了新的理论依据, 也为涂层防污期效的理论预测提供了新的技术途径。

多相高熵合金的腐蚀和摩擦磨损行为研究

姚宏伟*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所海洋关键材料重点实验室

强韧与耐磨、耐蚀一体化金属结构材料是支撑海洋工程发展的重要保障。第二相是材料最有效的强化方式之一，例如具有多相结构的共晶高熵合金，实现了强度和韧性的优异匹配以及良好的摩擦磨损性能。然而，合金元素在多相高熵合金的不均匀分布，往往会导致合金表面的局部腐蚀。本研究通过物相结构和凝固冷却调控，实现高熵合金表面组织的微纳化，从而有效地抑制了局部腐蚀，同时提高了表面硬度，实现耐磨损和耐蚀性能的协同提升。该研究为强韧与耐磨、耐蚀一体化多相高熵合金的研发提供了新思路。

基于载银石墨烯两亲性复合防污/防腐涂层的制备及性能研究

田澍、卢光明*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

腐蚀和生物污损是海洋工程装备面临的两大挑战，而在一种涂层中同时实现防腐和防污性能是十分困难的。在本工作中，通过将载银石墨烯和亲水性聚合物加入到合成的生物基有机硅环氧树脂中制备了一种同时具有防污性能和防腐性能的涂层。涂层通过低表面能污损释放、接触抑制、水化作用实现三元防污；通过片层阻隔、致密互穿网络结构、形成钝化膜实现三元防腐。其中合成的有机硅环氧树脂兼具环氧树脂与金属基底优异的附着力和有机硅树脂较低的表面能；载银石墨烯通过阻隔机制和触杀机制有效提高了涂层的防腐性能和防污性能，亲水性聚合物通过水化作用提升了涂层的抗生物粘附性能并通过与基底形成钝化膜抑制了腐蚀。进一步的，载银石墨烯与亲水性聚合物通过金属配位作用形成交联网络，提高了涂层中载银石墨烯的分散性和两亲性聚合物与树脂的相容性。实验结果显示该涂层具有优异的抗蛋白、细菌和海藻以及大型海洋污损生物粘附性能，同时具有优异的防腐性能，而载银石墨烯与两亲性聚合物通过动态交联形成的网络赋予了涂层一定的自愈合性能。该工作将为海洋工程装备提供一种防腐防污一体化的防护涂层。

海洋环境中碳钢和不锈钢螺栓紧固件的腐蚀机制差异研究

王长罡*

中国科学院金属研究所

电子层面的力化学耦合机理探索

孙军辉*

西南交通大学

力化学耦合机理是应力腐蚀、材料损伤/磨损/断裂、机械力合金、润滑膜生长、超精密加工等工程问题面临的共性基础科学问题，然而目前对机械应力在电子水平上如何激活化学反应的一般规律仍然未知。报告人团队最近从应力驱动电子转移的角度，揭示了机械应力如何激活固体界面中的化学反应。运用第一性原理密度泛函理论，研究了机械应力修饰的电子态在不同机械化学系统中如何传递机械能量以触发化学反应。定义了反应过程中初始、过渡和最终构型之间的电子密度重分布，以关联反应过程中的能量演化。结果发现，应力诱导的电子密度重分布与活化能和反应能呈线性关系，表明了从机械作用到化学反应的转变。关联系数被定义为“界面反应系数”，可以作为评估材料界面对机械作用的化学反应敏感性的本征系数。进一步，结合 AFM 实验，对微观磨损的关键模型，如应力修正的阿伦纽斯方程，进行了基于电子行为的物理化学解析，帮助在电子水平认识磨损发生机制。上述工作揭示了机械应力如何影响固体界面中的化学反应，为我们理解力化学的基本模型和力化学现象提供了新视角，于 Nano Letters 2023、2024 先后发表。

湿热环境二硫化钼基薄膜的界面结构设计及损伤机理研究

任思明*、王海新、王立平
中国科学院宁波材料技术与工程研究所

临海高技术装备的服役安全与其机械运动部件的可靠性密切相关,而大量暴露于海洋大气腐蚀性环境的机械运动部件普遍存在多因素耦合损伤行为。二硫化钼因其独特的层状结构特征,作为减摩耐磨材料已被广泛应用于航空航天、机械、电子等领域,但二硫化钼薄膜在海洋大气或高温环境下易发生氧化腐蚀反应,导致薄膜的可靠性失稳、寿命大幅缩减。本研究针对海洋大气环境机械运动部件面临的多因素耦合损伤难题,采用多靶-非平衡磁控溅射技术,设计构筑二硫化钼基超晶格和核壳结构薄膜,实现薄膜在真空、高湿、高温等苛刻工况下的低摩擦磨损;利用模拟海洋大气环境实验平台,研究二硫化钼基超晶格和核壳结构薄膜在多因素交互作用下的损伤演化过程;通过表面/界面的跨尺度表征,阐明转移膜的组分结构与性能之间的内在关系,为海洋复杂环境下机械表面功能防护材料的设计提供理论和技术支撑。

不同耐蚀钢筋海水海砂混凝土体系的长期性能对比研究

刘国强*、张东方、范志宏、陈昊翔
中交四航工程研究院有限公司

由于严酷的海洋环境,钢筋混凝土的服役寿命面临严峻考验,国内外由于钢筋混凝土结构耐久性失效引发的事故屡见不鲜,采用耐蚀钢筋替代普通碳素钢筋是解决钢筋锈蚀、提升海洋钢筋混凝土服役寿命的主要措施。然而,由于耐蚀钢筋造价过于昂贵,国内外使用耐蚀钢筋的工程较少,只有在一些重大工程的关键部位上使用。同时,海工结构的大规模建设导致了天然淡水和河砂的过度消耗,海水海砂在混凝土结构中的使用日益引起关注。为了兼顾服役性能和经济成本,具有较高临界氯离子浓度的耐蚀钢筋和较低成本的海水海砂混凝土作为一种新型组合形式,在海工结构尤其是偏远岛礁工程建设受到了广泛关注。开展耐蚀钢筋在海水海砂混凝土中的腐蚀行为研究,对海洋工程建设的发展具有重要意义。本文以低合金钢筋、不锈钢钢筋、不锈钢覆层钢筋、镀层钢筋、涂层钢筋等耐蚀钢筋为研究对象,将不同耐蚀钢筋浇筑在海水海砂混凝土中,采用开路电位测试、电化学阻抗谱测试、线性极化曲线测试,研究了耐蚀钢筋海水海砂混凝土体系在模拟海水中的腐蚀行为,通过测试不同龄期下的腐蚀电位、极化电阻、腐蚀速率,对比分析其长期性能与失效机制,以为海洋工程建设提供一些指导。

海洋防腐涂层损伤主动监测与修复技术研究

刘成宝*
山东科技大学

在海洋环境中金属材料腐蚀失效问题成为制约海洋平台、海运船舶、岛礁工程等海洋设施服役和寿命的最重要因素。防腐涂层是保障工程装备可靠性和安全服役最广泛的防护材料,也是支撑我国海洋强国战略的一类关键工程材料。然而,在涂层材料在长期服役过程中不可避免会产生微孔和微裂纹等缺陷,引发局部腐蚀,导致涂层提前失效。对涂层损伤进行早期检测,便于采取相应措施对涂层进行及时修补;自修复涂层能够在缺陷产生后通过一定的物理、化学作用使涂层的防护功能得到一定的恢复。防腐涂层体系的失效通常包括涂层表面损伤、涂层/金属界面腐蚀以及涂层的宏观缺陷三个阶段。本文基于防腐涂层体系失效不同阶段提出了系列损伤监测策略及腐蚀预警机制,开发了相关缺陷自预警与自修复防腐涂层。将负载腐蚀响应探针菲罗琳的纳米容器引入涂层中,实现局部腐蚀反应的自主预警;涂层损伤将引发缺陷处金属基底的电化学腐蚀并产生金属离子;利用腐蚀响应剂菲罗琳与亚铁离子的显色反应,缺陷处的局部腐蚀可在五分钟内以明显的红色显示出来;通过涂层不同部位颜色的变化,可准确定位腐蚀反应产生的位置以及涂层的失效过程,实现了腐蚀反应的可视化。将功能基团菲罗琳接枝到聚氨酯侧链中,开发出缺陷自预警与自修复双功能一体化的智能防腐涂层,依靠树脂分子自身柔顺性与分子间可逆氢键相互作用,弹性体涂层具备快速的室温及水下自修复功能,有效抑制了涂层微区缺陷引发的腐蚀扩展;树脂分子侧链中菲罗琳作为腐蚀探针,可精确定位局部腐蚀的产生,实现了涂层服役可视化。将荧光多巴胺纳米颗粒引入热响应

树脂中,得到荧光响应树脂;涂层损伤处表现出明显的荧光增强现象,提出了基于裂纹诱导荧光增强新机制;依靠多巴胺纳米粒子良好光热转化特性与树脂分子热响应特性,复合涂层表现出快速的光热修复功能,极大增强了涂层环境适应性;利用涂层荧光强度对表面状态的响应性,实现了涂层缺陷产生-裂纹修复动态过程的预警与追踪,为开发智能海洋防护材料及工程化应用提供新思路。

海洋装备用钢生物污损防护技术

高鹏*¹、陈义庆^{1,2}、艾芳芳^{1,2}、李琳^{1,2}、钟彬^{1,2}、苏显栋^{1,2}、伞宏宇^{1,2}、沙楷智^{1,2}

1. 鞍钢集团钢铁研究院

2. 海洋装备用金属材料及其应用国家重点实验室

简述了海洋生物污损及其对海洋装备服役过程的危害。研究了有机无机复合涂料、等离子增强磁控溅射、热喷涂、激光处理结合疏水修饰等技术在海洋装备用钢生物污损防护领域的应用。研究结果表明,以Cu粉为防污剂的有机无机复合涂料防污期效短,效果有限;等离子磁控溅射、热喷涂等技术手段可赋予海洋装备用钢疏水性及一定的防污性能。激光处理结合全氢聚硅氮烷(PHPS)修饰的方法可赋予海洋装备用钢超疏水性能,超疏水性能的持久性、机械稳定性较好。

基于磁控纳米容器的腐蚀自预警与自修复一体化涂层构建及性能研究

姜丹*¹、赵晓硕^{1,2}、黄国胜¹、马力¹

1. 中国船舶集团有限公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护全国重点实验室

2. 武汉理工大学材料科学与工程学院

海洋工程与装备长期服役于复杂多变的海洋环境,其使用的金属结构材料面临严重的腐蚀问题。聚合物涂层凭借成本低、耐蚀性能良好、施工方便等诸多优势,长期以来广泛应用于海洋工程与装备的腐蚀防护。然而,涂层服役过程中难免产生微孔和微裂纹缺陷,腐蚀介质通过这些缺陷持续向涂层内部渗透,导致涂层下的金属基体发生局部腐蚀。但是传统的聚合物涂层仅局限于提供被动的物理阻隔作用,自身无法主动抑制腐蚀发展,同时涂层下的局部腐蚀具有很高的隐蔽性,维修人员也很难及时发现并进行干预。因此,赋予聚合物涂层智能刺激-反馈特性,使其具备主动腐蚀预警和修复功能具有重要意义。

在涂层内引入负载活性剂(预警剂或缓蚀剂)的纳米容器是构建腐蚀自预警和自修复涂层的重要方法。理想情况下,负载活性物质的纳米容器应尽可能分布于涂层/金属界面,以便及时感知腐蚀发生并抑制腐蚀扩展。然而,涂层制备过程中纳米容器往往随机分布于涂层内部,而非集中在涂层/金属界面,可能导致某些区域的腐蚀损伤无法有效检测和修复。

针对这一问题,本文首先通过自上而下的方法制备了以磁性 Fe_3O_4 纳米球为核、多孔ZIF-8骨架为壳的磁控纳米容器,然后通过真空浸渍工艺将1,10-菲啰啉(Phen)封装在ZIF-8外壳中。将磁控纳米容器添加到涂层中,在外加磁场的作用下使其定向迁移至涂层/金属界面,得到了磁控腐蚀自预警和自修复双功能一体化涂层。结果表明,制备的 $\text{Fe}_3\text{O}_4@\text{ZIF-8}$ 纳米容器形貌规整、尺寸均一、具有良好的单分散性和较强的饱和磁化强度,并且ZIF-8内部成功负载了Phen,负载量约为9%。纳米容器具有明显的pH刺激-响应特性,在酸性条件下能够显著提高Phen的释放速度和释放量。在外磁场调控下,纳米容器能够均匀分布于涂层/金属界面,有效解决了纳米容器在涂层内部分布不均的问题。带有人工划痕的磁控涂层在盐雾腐蚀0.5h后缺陷处即可显现出明显的红色,并且24h后仍未产生锈蚀现象,而且在海水中浸泡9d后,低频阻抗模量仍高于 $10^6\Omega\cdot\text{cm}^2$,相比于非磁控涂层展现出了更加迅速、精准的腐蚀预警和修复效果。

碳纤维增强复合涂层的界面强化设计及抗冲蚀机制

吴英豪*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

针对海上风电和海洋工程装备在浪花飞溅区面临的耦合损伤失效问题,采用纤维增强复合涂层解决传统重防腐涂层力学性能差和界面失效等共性科学问题,借助界面啮合强化和化学键合的协同作用来提升纤维/树脂的界面性能,通过界面剪切强度、耐高压测试以及在抗冲刷性能测试,结合第一性原理计算验证,揭示了碳纳米球与纤维之间超强界面结合的作用机制及抗冲刷机制,最终实现防护涂层满足在浪花飞溅区长寿命安全服役的需求。

共价有机框架单晶的制备及其在海洋新材料领域的应用前景

梁琳*

兰州大学

共价有机框架^[1] (COFs) 作为一类新型的多孔晶体材料,通过有机分子作为砌块,经由共价键连接形成,具有高度的结构可调性和稳定性。这些特性使得 COFs 在吸附、分离、传感等领域展现出广泛的应用前景^[2]。我们成功合成了首个具有非嵌套结构的单晶 COF 材料 LZU-306。LZU-306 通过四苯乙烯 (TPE) 与金刚烷 (ADA) 基团的共价组装而成,其非嵌套结构为功能基团提供了明确的矩阵隔离平台,使我们能够深入研究 TPE 作为聚集诱导发光单元的内在动力学特性。此外, LZU-306 的高空体积 (达 80%) 为其在吸附和分离领域的应用提供了广阔的空间。我们将该材料应用至水中污染物的监测,得益于材料高的孔隙率和 TPE 的功能化,能够实现多种有机污染物的荧光监测以及移除^[3]。为了深入研究 COFs 的构效关系,我们进一步发展了高效构筑单晶 COFs 材料的方法。采用 $\text{CF}_3\text{COOH}/\text{CF}_3\text{CH}_2\text{NH}_2$ 的合成体系,实现了大尺寸单晶 COFs 的快速合成,极大地提高了单晶 COFs 的生长速率。快速且高质量单晶生长使得通过实验室单晶-X 射线衍射直接解析其复杂结构成为可能,我们揭示了 COFs 在原子级别的复杂结构特性、构象演变、主客体相互作用和动态性质,为 COFs 材料的设计和优化提供了有力的技术支持,同时也为研究 COFs 多孔结构在实际应用中的构效关系提供了研究范式。

展望未来, COFs 在海洋新材料领域有望展现出巨大的应用潜力。其高度可调的功能性、优异的稳定性和独特的孔隙结构,使得 COFs 成为海洋环境监测和资源回收的理想材料。特别是在实时监测海洋污染、选择性捕获和分离稀有金属离子、以及有机污染物去除等方面, COFs 有望为海洋环境的保护和可持续利用提供新的解决方案。

参考文献:

[1] S. Y. Ding, W. Wang, Covalent organic frameworks (COFs): from design to applications. *Chem. Soc. Rev.*, **2013**, 42, 548.

[2] L. Liang, Y. Qiu, W. D. Wang, J. Han, Y. Luo, W. Yu, G. L. Yin, Z. P. Wang, L. Zhang, J. Ni, J. Niu, J. Sun*, T. Ma*, W. Wang*, Non-interpenetrated single-crystal covalent organic frameworks. *Angew. Chem. Int. Ed.*, **2020**, 59, 17991.

[3] J. Han, J. Feng, J. Kang, J.-M. Chen, X.-Y. Du, S.-Y. Ding, L. Liang*, W. Wang*. Fast growth of single-crystal covalent organic frameworks for laboratory x-ray diffraction, *Science*, **2024**, 383, 1014.

光热自修复涂层的制备及防污抗菌应用

冯荟蒙*

中国海洋大学

光热自修复复合材料作为一种可以实时远程精确控制的材料,但在海洋环境的应用受到越来越多的关注。本研究通过对 BiOI 原位硫化合成 BiOI@Bi₂S₃ 纳米复合材料,将聚氨酯与 BiOI@Bi₂S₃ 杂化合成了高效光热循环自修复抗菌涂层。界面硫化调控构建的 BiOI@Bi₂S₃ 异质结将光热效率提高了 38%,利用密度

泛函理论模拟分析了 BiOI 硫化后产生的多重电子转移路径, 提高了光生载流子的界面迁移率, 产生了更多的热量。BiOI@Bi₂S₃/PU 在近红外光下辐照 300 s 内迅速升温 50.2℃, 通过触发聚氨酯涂层的氢键恢复涂层的防护性能。BiOI@Bi₂S₃ 的光催化和光热性能使涂层的抗菌率达到 99%。经过 5 次划痕和自修复循环试验, 涂层修复效率仍达 80%以上, 可保证涂层多次循环的自修复防护性能。这项工作为设计具有光热抗菌和自修复性能的涂层提供了启发式视角。

高耐氯镁合金腐蚀产物膜研究

陈毓洋、应韬、曾小勤*

上海交通大学

传统镁合金材料耐腐蚀性能会随着环境中氯离子浓度的提高严重下降。为了实现镁合金在更加苛刻腐蚀环境中服役, 本文制备了一种对氯离子不敏感的 Mg-Nd-Zr 合金, 不同于纯镁, 其在 3.5wt.%或 10wt.%的氯化钠溶液中表现出稳定的耐腐蚀性能。本文将飞行时间二次离子质谱(ToF-SIMS)与俄歇电子谱(AES)结合, 对腐蚀表面膜内氯离子扩散情况进行表征, 其结果显示氯离子在不同合金的腐蚀表面膜中的扩散程度表现出很明显的区别, 进而造成合金的耐氯性不同。后续结合 X 射线光电子能谱(XPS)和密度泛函理论(DFT)分析表明, Nd 和 Zr 元素的引入引起了空位钝化以及膜内部化学键合的变化, 进而提高了氯离子的扩散能垒, 使得有害离子难以穿越膜层接触基体造成严重的腐蚀。

含铌奥氏体低密度钢固溶过程中组织演变及其对腐蚀行为的影响研究

杨光¹、董超芳*¹、王存宇²、曹文全²

1. 北京科技大学

2. 钢铁研究总院有限公司

在“节能减排”和“碳中和”的背景下, 钢的轻量化生产日益成为关注焦点。Fe-Mn-Al-C 系低密度钢因其较低的密度和优异的力学性能, 在汽车制造、航空航天以及海洋工程等领域具有广泛的应用前景。然而, 在实际使用中, 受环境腐蚀介质的影响, 产品的寿命和安全性可能受到威胁。因此, 除了力学性能外, 对低密度钢耐腐蚀性能的研究至关重要。本研究制备了 Fe-30Mn-8.9Al-0.9C-0.077Nb 低密度钢, 研究了在不同固溶温度(950℃、1050℃和 1150℃)下 Fe-Mn-Al-C 系低密度钢的微观组织演变以及低密度钢在 3.5 wt% NaCl 溶液中的腐蚀行为。结果显示, 未进行固溶处理的低密度钢晶粒尺寸不均匀, 表面残余应力较大, 易于诱发腐蚀; 而经过固溶处理后, 低密度钢组织均匀, 随着固溶温度的升高, 钢中 NbC 析出相含量减少, 但是在 1050℃和 1150℃固溶样品中仍观察到与未进行固溶处理样品相似的大尺寸 NbC 析出相, 大尺寸 NbC 析出相与钢基体之间容易发生电偶腐蚀, 加快腐蚀进程的同时破坏了腐蚀产物层; 而在 950℃固溶时, 钢中析出大量纳米级 NbC 析出相, 在晶粒长大过程中起到钉扎晶界的作用, 导致晶粒尺寸相较于 1050℃和 1150℃样品明显减小。在 950℃固溶的样品中得到了最高的腐蚀电位和最低的腐蚀电流密度, 这是因为析出相与钢基体之间的腐蚀微电偶效应减弱, 得到的腐蚀产物膜更加致密, 有效地阻碍了侵蚀性离子对基体钢的进一步腐蚀, 获得了低密度钢的耐蚀性与强韧性的良好结合。

ZIF-8 Modified Ce-Sol-gel Film on Rebar for Enhancing Corrosion Resistance

曾彦玮

中山大学

A New Perspective on the Mechanism of Swift Corrosion Perforation of Copper in Solutions Containing Sulfate-reducing Bacteria

钱慧璇

中山大学

海洋环境下回火温度对高氮马氏体不锈钢耐蚀性能的研究

付小倩¹、董超芳*¹、王存宇²、曹文全²

1. 北京科技大学
2. 钢铁研究总院

耐高温、耐腐蚀的高氮马氏体不锈钢轴承钢由于强度和硬度高、耐磨性好，因此被广泛应用于对耐腐蚀性要求较高的刀具、复杂的承载或传动零部件。然而，在淬火状态下，材料很脆，难以进一步加工。为了满足轴承钢在不同服役环境的要求，马氏体不锈钢通常在 200℃~700℃内回火，而回火过程中马氏体基体和第二相析出以及残余奥氏体组成的复杂微观结构为其带来较高的局部腐蚀风险。本文采用微观组织表征方法（SEM/EDS、TEM、XRD、EBSD）以及电化学测试方法和 AFM 测试来阐明回火温度对高氮马氏体不锈钢的析出行为和腐蚀的影响。研究表明，AFM 测试显示不同回火试样的第二相和基体之间伏特电位差存在较大差异，提高回火温度会降低残余奥氏体含量和耐点蚀性能。尤其是在 500℃下，由于氮化物的析出和粗化，导致其耐蚀性急剧下降。而在 550℃回火下由于 $M_{23}C_6$ 造成的贫铬区域充当腐蚀传播的通道，其晶间腐蚀最为敏感。

高强高导 Cu-Cr-Zr-RE 合金制备及性能研究

赵志龙、乔振兴、刘慧敏、敖敏*

内蒙古工业大学

我国信息化产业和高端制造装备行业的蓬勃发展对集成电路引线框架所需高性能铜合金的服役性能提出了更高的要求。针对铜合金力学性能和导电率之间的矛盾关系，如何进一步提高高性能铜合金的强度、导电率和服役可靠性是该类合金设计、研制、生产领域亟待解决的问题。本文将非真空熔炼和近液相线铸造方法相结合，采用热-力多级耦合工艺制备高性能 Cu-Cr-Zr-RE 合金。通过组织观察、性能测试以及腐蚀试验等先进表征方法研究了该合金微观组织-力学-导电-耐蚀性能之间的关系。结果表明，添加的稀土元素在 Cr 相周围富集，形成核-壳结构，阻碍 Cr 相生长，所添加的稀土元素以 CuRE 金属间化合物形式存在。同时，发现稀土元素的添加能够促进变形过程中纳米孪晶的生成，并进一步阐明了稀土添加对该合金耐蚀性能的影响机理。经过热-力多级耦合工艺后，所制备的 Cu-Cr-Zr-RE 合金抗拉强度可达 620~650MPa，屈服强度可达 600~650MPa，相对电导率可达 85~90%IACS，断后延伸率可达 6~10%。

二硫化钼基材料电化学腐蚀微过程理论研究

郝宇*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

MoS₂基材料是航空航天、机械连接设备中重要的固体润滑材料，其在真空以及惰性气氛中具有优异的润滑性能，但是海洋等潮湿环境会使其服役性能迅速恶化，发生严重的老化现象。并且 MoS₂自身的失效还伴随有加速电偶腐蚀的现象。在本系列工作中，我们针对潮湿环境下电偶腐蚀阴极氧还原反应过程，利用第一性原理模拟方法，系统探索了 MoS₂基材料各类点、线本征缺陷以及外来元素掺杂的电化学反应活性，并深入揭示了性能演变背后的电子级起源，为材料改性和设计做出有效指导。在研究中，为了定量且准确地揭示 MoS₂电化学活性，开发了基于理论模拟的微动力学电流电势极化曲线模拟模型，其可精确计算材料表面在各电势下的电流密度，从而有效反映材料电化学活性。研究发现，在 MoS₂表面，即使有点缺陷存在，其依然表现为电化学惰性，具有很高的稳定性。与之相反，MoS₂边缘则表现出很高的电化学活性（过电势低达 0.66 V），是加速电偶腐蚀过程的主要原因。相关发现与众多实验现象相吻合，为 MoS₂改性设计提供了重要的理论依据。此外，外来掺杂元素如稀土金属等会指数级提高 MoS₂的表面电化学活性，在调控其性能的同时也会加剧电偶腐蚀风险。针对 MoS₂电化学行为演变，通过电子结构分析，我们提出了一种特殊的缺陷电子态配对机制，其会导致 MoS₂表面不同吸附物的选择性增强行为，是调控 MoS₂电化学活性的有效手段。

相关文献:

- [1] Yu Hao, Liping Wang*, Liang-Feng Huang*, **Nat. Commun.**, 2023, 14, 3256;
[2] Yu Hao, Tian-Yu Sun, Jin-Tao Ye, Liang-Feng Huang*, Li-Ping Wang*, **Adv. Mater.**, 2024, 36, 2312429;
[3] Yu Hao, Peng-Lai Gong, Li-Chun Xu*, Jibin Pu, Liping Wang, Liang-Feng Huang*, **ACS Appl. Mater. Interfaces**, 2019, 11, 46327 (Cover);
[4] Yu Hao, Tian-Yu Sun, and Liang-Feng Huang*, **Curr. Opin. Electrochem.** 2022, 34, 101008;
[5] Yu Hao, Li-Chun Xu*, Jibin Pu, Liping Wang, Liang-Feng Huang*. **Electrochim. Acta**, 2020, 338, 135865.

海洋环境仿生自修复防护涂层结构设计及其防腐机制研究

朱小波*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

有机高分子防护涂层是目前应用最广泛、最有效的工程与装备防腐策略之一。但在苛刻海洋环境长效服役过程中, 腐蚀性介质(如: H_2O , O_2 , Cl^- 等)会对高分子涂层产生很强的渗透性, 从而导致涂层的界面剥离并引发基材发生严重腐蚀。具有高纵横比的二维片层纳米填料, 如石墨烯、氮化硼以及层状双氢氧化物等薄片, 由于其优异的阻隔性能、良好的化学稳定性和抗氧化性能等, 可以有效延长腐蚀介质的扩散路径并改善有机高分子涂层的抗渗透性以增强其长效耐腐蚀性能。其中在二维片层材料改性新型重防腐涂层体系中, 二维片层材料在树脂中的定向排布与优化调控问题一直是该领域急需突破的核心技术。本研究通过表面离子化技术和二维纳米片/有机树脂之间分子间动态氢键作用力精细调控两种策略, 实现了二维纳米片在树脂中的定向排布, 开发了系列海洋环境长效防腐涂层和超强韧自修复涂层。

(1) 借助表面离子化技术实现二维纳米片在涂层内部的不同排列取向, 探究了纳米片长径比、排列取向对涂层耐腐蚀性能的影响量级和变化规律(高纵横比纳米片随机和平行排列涂层阻抗分别为纯涂层 83.5 倍和 221.7 倍); 通过实验/理论模型发现高纵横比纳米片平行排列含量为 0.5 wt% 时, 涂层抗渗透能力可提升 90% 以上。

(2) 对比不同平行排列纳米片含量下涂层的腐蚀行为, 提出过多纳米片添加(>0.5 wt%)反而导致纳米片/树脂界面相容性差问题; 受天然生物结构启发改善膜/基、纳米片/树脂界面粘结力, 开发出海洋长效防腐涂层(阻抗 $>5.25 \times 10^{10} \Omega$, 中性盐雾 $>3000 \text{ h}$), 揭示了不同层数平行排列纳米片对涂层腐蚀性能的影响规律和防护机理。

(3) 精细调控二维纳米片/有机树脂分子间动态氢键作用, 利用蒸发诱导组装技术实现二维纳米片在涂层中的平行排列, 设计系列仿生室温快速自修复涂层(10.3 MPa, 室温 1 h 修复效率 89.3%)和环境适应性超强超韧室温自修复涂层(78.3 MPa, 室温 24 h 修复效率 88.6%), 平衡了传统自愈材料体系中高机械性能和室温自主愈合能力之间的矛盾。

极地海洋环境牺牲阳极电化学性能研究

张一晗*

中国船舶集团有限公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护全国重点实验室

随着全球极地科考事业深度不断扩展, 极地地区的经济、军事等战略地位凸显, 作为近北极国家, 我国气候生态环境和地区经济利益直接受北极自然环境状况的影响, 开发极地航道、开展极地科学考察对于我国具有重要的战略意义。受到南北极地区特殊的地理位置与极端气候条件制约, 极地环境复杂海域的探索研究极度依赖先进可靠的中高冰级极地船舶装备, 然而, 目前成熟应用于极地科考建设的大型破冰船装备一直存在船体阴极保护电位不当的问题。因此, 开展极地环境下阴极保护材料和船体腐蚀防护应用研究, 明确极地低温阳极材料活化溶解行为规律与机理, 对于建立极地低温环境电化学防腐技术和综合防腐设计方案有重大意义。

为探究极地海洋环境牺牲阳极服役行为规律，解决极地低温环境船体阴极保护问题，以常规 Al-Zn-In 牺牲阳极为基础，通过合金化设计实现多组分复合活化，提升新型极地海洋环境牺牲阳极电化学性能，开发极地低温环境用 Al-Zn-In-Mg-Ti-Ga-Mn 牺牲阳极材料，通过进行模拟服役环境电化学测试，同时开展完整周期的“雪龙号”实船极地航行试验，考察极端环境因素对牺牲阳极电化学性能的影响，采用高倍率扫描电镜等手段观测材料腐蚀产物特征和表面微观形貌，探明极地航行环境中阳极活化溶解行为机理。结果表明，在极端环境因素影响下阳极材料的活化溶解行为发生变化，海水环境中较高的溶解氧含量削弱了低温条件对离子运动的影响，阳极自腐蚀电流密度增大，阴极去极化反应加剧，阳极表面活化溶解和活性金属沉积过程速率提升，表面钝化膜的更新动态平衡得到有效维持。Al-Zn-In-Mg-Ti-Ga-Mn 阳极具备良好的船体保护电位，在极地海洋环境中表现出良好的阴极保护性能，部分研究成果为极地环境装备的安全服役提供了可靠的数据支持和理论指导。

MXene 增强环氧复合涂层的构建及其模拟深海环境下腐蚀防护行为

吴杨敏*

中国科学院宁波材料技术与工程研究所

针对深海严苛复杂环境中的共性和关键腐蚀问题，设计制备新型耐蚀涂层材料，延长海工装备和设施的腐蚀防护寿命，提升其运行可靠性，成为腐蚀防护领域的研究重点。涂覆有机涂层是众多腐蚀防护方法中一种行之有效且性价比比较高的重要手段。然而，有机涂层具有半透膜特性，极易导致涂层在短时间内丧失防腐能力。从填料/树脂界面强化机制出发，设计高性能有机涂层，是解决该问题的有效途径。作者利用二甲基亚砜、有机基三甲基苯基氢氧化铵等作为插层剂来获得薄层 $Ti_3C_2T_x$ 纳米片。随后，将纳米纤维素、丝素蛋白引入到 $Ti_3C_2T_x$ 表面，增强纳米填料的表面粗糙度，可显著提高填料与树脂基质之间的机械互锁，进一步提高复合涂层的腐蚀防护能力。借助模拟深海高压电化学测试系统、微区电化学等考察了复合涂层在 15/20 MPa 交变压力下的服役行为，揭示其在模拟深海环境下的动态损伤和防护机制，提出高性能防腐涂层的设计准则，这对深海工程基础构件的长效安全服役具有重要意义。

墙报

TA22 在不同模拟工况下的腐蚀特性研究

白舒宇*, 张慧霞

中国船舶集团有限公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护全国重点实验室

钛及其合金是海洋工程及 JT 等装备最有前途的金属材质，被称为海洋金属，是重要的战略金属材料。本研究开展了 TA22 钛合金在不同流速下的冲刷腐蚀和交变压力工况（低频低应力）下的疲劳性能测试试验，试验结果表明在 5.4m/s 含砂海水冲刷条件下，发生轻微冲蚀，失重速率在 0.0022 mm/a ~ 0.0031mm/a 之间；在 10MPa 交变应力的空气和海水条件下经过 10 万次循环后，未见疲劳裂纹和腐蚀迹象。结果表明，在试验条件下，TA22 具有良好的耐冲刷腐蚀和耐腐蚀疲劳性能。...

强韧可修复的单组分聚脲防护材料

张志鹏, 马春风*, 张广照

华南理工大学

聚脲在海洋工程防护、土木工程防护和其他新兴领域受到越来越多的关注。然而，由于聚脲的聚合速率过快，为不同应用场景的需求来调控聚脲的机械性能仍是一个巨大的挑战。本文提出了一种脲基插入的策略以制备单组分强而韧、机械性能可调且可修复的聚脲分子设计策略。首先，将制备好的潜固化剂、异佛尔酮二异氰酸酯（IPDI）和 NCO 封端的预聚物（PPGTD）混合。由于 IPDI 和 PPGTD 中异氰酸酯基团的反应活性差异很大，IPDI 会先与解封产生的氨基发生反应，形成连续的脲基，然后将生成的脲基插入聚脲中。这种设计策略极大地提高了聚脲的强度（提高 500%）、储存模量（提高 532%）和

韧性（提高 281%）。此外，所制备的聚脲还具有优异的自愈性、抗冲击性、高透明度（>90%）和高介电常数（ ≈ 4.5 ）。因此，它可用作电子设备的保护膜和柔性基底。此外，聚脲还具有良好的多功能性，可与氧化铝陶瓷片层压复合形成抗冲击复合材料。这项研究为设计和制造海洋工程防护材料开辟了一条前景广阔的途径。

仅发表论文

铜合金-异种金属加速腐蚀规律研究及防污应用

马晓*、陈志强、王培、许凤玲、闫永贵、刘广义

海洋腐蚀与防护全国重点实验室，洛阳船舶材料研究所，青岛 266237

钛合金海水管路具有重量轻、耐蚀性好的优点，是船舶下一代海水管路系统主干材料。但钛合金具有较好的生物相容性，在海水环境中表面极易附着海生物，如不加以控制，海水管路将出现更加严重的污损问题。但部分舱底管路安装空间狭小、难以维护、难以施加电源，传统防污技术难以应用，因此，本文基于电偶加速腐蚀原理，研制了无需外部电源、免维护的钛合金海水管路防污装置，系统研究了不同面积比例的铜合金（B10/铝青铜/镍铝青铜/锡青铜/紫铜/黄铜）-异种金属（哈氏合金/碳纤维/316L 不锈钢/钛基金属氧化物）在海水中的加速腐蚀规律，结果表明，在同等面积比条件下，当防污装置阳极材料为紫铜，阴极材料为钛基金属氧化物时的电偶电流远大于其他偶对电偶电流，当紫铜/钛基氧化物面积比扩大至 1:4 时，耦合电流高达 $84.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，此时防污装置铜离子溶出速率可达 $58.89\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{d}$ 。在青岛海域对钛合金海水管路防污装置开展了为期 90 天（一个生物生长周期）的防污试验。试验结果表明，随着试验周期延长，钛合金空白管路污损程度逐步加剧，90 天后污损生物不断繁殖长大，管路内壁污损严重。采用防污装置的钛合金管路内部仅存在少量藤壶，参照 GB/T 5370-2007 对防污效果评分为 90 分，钛合金海水管路防污装置防污效果良好。

Correlation of microstructure, mechanical properties and corrosion behavior in a Ni34Co28Cr28Al10 multi-principal element alloy with outstanding corrosion resistance

刘诗宇

中国散裂中子源