



中国材料大会 2025

暨新材料科研仪器与设备展

7月5-8日, 2025
福建 厦门

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

主办单位

中国材料研究学会

会议网址: <https://cmc2025.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

D39-01

高性能非晶涂层在海洋环境中的腐蚀与污损行为及其机制

柳林*¹

1. 华中科技大学

长久以来，材料和装备的海洋腐蚀和微生物污损一直是世界各国，特别是沿海国家海洋工程领域所面临的重大问题。如何提高海洋装备及构件的使用性能、延长其服役寿命，已成为海洋工业亟待解决的关键问题。发展高性能防护涂层是解决材料和工程装备海洋腐蚀和污损的最简单、最直接的途径之一。近年来发展起来的铁基非晶涂层因其具有原子排列无序的结构特点，呈现出卓越的抗海洋腐蚀性能而备受关注。本报告将介绍华中科技大学非晶态材料研究室近年来在铁基非晶涂层及其在海洋防腐、防污方面的研究进展。包括：非晶涂层的成分设计、制备技术、结构特征以及海洋环境中的腐蚀行为。而针对海洋微生物污损问题，本报告将重点介绍非晶涂层的表面改性以及纹理化非晶涂层设计和防污剂复合技术，以实现非晶涂层的防腐防污一体化。最后，报告将展示 Fe 基非晶涂层在海洋工程领域的一些应用实例。

D39-02

水动力部件材料空蚀损伤的多因子耦合机制与性能评价研究

吴忠*¹，秦真波¹

1. 天津大学

空蚀是水动力部件常见的损伤形式，威胁着舰船等的安全运行。开展金属材料空蚀损伤机制研究并准确评价材料耐空蚀性能，对水动力部件的长周期安全可靠服役具有重要的现实意义。通过探究空蚀进程中材料组织结构及力学强度的动态演化规律，揭示空蚀力-热作用耦合下的材料形变硬化机理；阐明影响材料空蚀损伤的力学强度因子和腐蚀因子，建立空蚀损伤动力学模型；获得表征耐空蚀性能的材料学物化特性新指标，形成材料耐空蚀性能评价的统一标准，为耐空蚀材料的制备提供指导。

D39-03

低阻力与低黏附涂层材料

曾志翔*¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

表面分子结构设计可调控固/液之间的相互作用而实现界面低阻力与低黏附，其在船体减阻防污、防腐防结冰、防腐等领域具有重要应用前景。本人及所在团队近些年工作主要集中于功能性低阻力与低黏附涂层材料体系设计及应用探索。研究团队从固体表面与液体之间的黏附、排斥、阻隔与透过行为相关性等关键科学问题出发，探究了涂层材料的表面特性对固液界面动态作用力及对微区液滴的束缚行为，发展具有多源仿生结构与滑移特征的新型功能涂层材料，为巨轮提供低成本高效节能减排技术。此外，低阻力与低黏附也在电子器件超高压防护及高效核电冷源防御系统防污防油领域发挥了重要作用。

D39-04

晶界调控对低密度钢表面氧化膜演化与耐蚀性的影响

杨光¹，董超芳*¹，王存宇²，曹文全²

1. 北京科技大学新材料技术研究院

2. 钢铁研究总院有限公司

在“双碳”战略和绿色制造背景下，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。然而在服役过程中易受到复杂腐蚀环境的侵蚀，进而影响其服役寿命与结构可靠性。本文系统研究了不同固溶温度（950 °C、1050 °C、1150 °C）对 Fe-Mn-Al-C 低密度钢的微观组织演化及其耐蚀性能的影响，重点揭示了晶界调控与表面氧化膜形成之间的协同关系。实验发现，固溶处理在不改变奥氏体相稳定性的基础上显著改变了晶粒尺寸和晶界密度，其中 950 °C 处理样品（S950）晶粒最细、晶界密度最高，退火孪晶界和高角度晶界密集分布。电化学测试显示，S950 样品具有最高的阻抗模值和最低的腐蚀电流密度，长期浸泡试验中腐蚀速率亦最低，仅为 $0.124 \text{ g m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。进一步通过 XPS 和 AES 等手段分析氧化膜的成分和结构，结果表明，S950 样品表面形成了均匀致密、以 Al_2O_3 为主的氧化膜，膜层厚度达 25.2 nm，Al 含量高且分布均匀，缺陷密度最低。相比之下，S1050 和 S1150 样品因晶界数量减少，氧化膜成核不足，生成的膜层中 Al 含量下降，Fe 和 Mn 氧化物比例增加，膜厚减薄且结构疏松，腐蚀介质易通过膜缺陷进入基体，导致耐蚀性能下降。本研究从晶界密度影响氧化膜成核与 Al 优先氧化机制出发，提出了通过调控晶粒与晶界结构提升低密度钢耐蚀性的思路，为该类高强轻质钢在腐蚀敏感环境下的工程应用提供了理论基础与实验支持。

D39-05

衬底偏置对 PDCMS 制备非晶高熵合金薄膜的腐蚀及力学性能的影响

党世增¹，张尚洲*¹，任萍¹，贺笑春¹

1. 烟台大学

近年来，随着高熵合金（HEAs）研究的不断深入，其独特的多主元素组成和高熵效应使得合金体系在结构调控与性能优化方面展现出巨大潜力。随着研究的不断深入，利用非平衡磁控溅射技术，在特定工艺条件下获得具有非晶结构的高熵合金薄膜（HEAF）成为可能。在本项工作中，通过脉冲直流磁控溅射（PDCMS）制备 NbTiZrCrCu HEAF，研究衬底偏置电压（0 V 至 -200 V）对 NbTiZrCrCu HEAF 结构和性能的影响。研究表明，在 -150 V 衬底偏置下，获得的 NbTiZrCrCu HEAF 表现出极佳的耐腐蚀性，自腐蚀电流密度低至 $1.9 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。同时，通过微观结构的改善，其硬度提升至 23.6 GPa，相较无衬底偏置电压的样品提高了 11.6%。此外，Cu 元素的引入显著抑制铜绿假单胞菌（*Pseudomonas aeruginosa*, MCCC 1A00099）的生长，抗菌率超过 85%，有效降低了微生物引起的腐蚀（MIC）风险。为高熵合金薄膜在海洋装备等极端环境下的防护应用提供新思路 and 理论依据。

D39-06

ZnO 基阻变薄膜体系设计与阻变耐蚀协同机理研究

薛菲¹，程玉峰*¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

设计制备制备了 ZnO 基阻变薄膜体系。对薄膜的表面形貌、成分、结构、半导体类型和氧空位浓度进行观察和分析。通过密度泛函理论（DFT）计算了表面吸附能、氧空位形成能、异质结结合能和扩散势垒能。通过电化学测试研究了薄膜的耐腐蚀性和阻态转变行为。通过研究基体/保护膜/溶液界面特性、膜层对侵蚀性离子的选择性，分析氧空位/界面势垒对 O^{2-} 传输规律，阐明保护膜的阻变转换与腐蚀抑制协同作用机制。最后，结合理论计算、模拟加速实验与实海挂片试验，揭示该膜层的长期腐蚀行为及演化规律，建立阻变型保护膜体系性能调控及阻变-耐蚀耦合机制。

D39-07

基于 NbC 析出强化的耐腐蚀抗氢脆高熵合金设计与研究

陈恒¹，毛飞雄¹，王立平*¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

面心立方 (FCC) 高熵合金是发展最为全面、应用前景最广阔的一类高熵合金, 但较低的耐腐蚀和抗氢脆性能极大地限制了其在海洋等极端环境中的工程应用。本工作基于热力学相图计算并配合热机械处理工艺, 设计制备出 NbC (~0.3 at%) 析出强化的 CoCrFeNi 高熵合金。TEM 和 TDS 结果表明纳米尺寸 (~4.8 nm) NbC 析出相的存在不仅可以强烈钉扎位错, 还可以阻碍形变过程中氢原子向晶界等局部位置富集, 从而降低了合金的氢脆敏感性 (~15%)。同时, XPS 和 AES 结果表明固溶在基体中 Nb 元素还能以 Nb₂O₅ 的形式存在于钝化膜中, 从而起到了提升耐点蚀性能的作用。本工作为析出强化型耐腐蚀抗氢脆高熵合金提供了理论基础与数据支撑, 有助于提升高熵合金在极端环境中的综合使用性能。

D39-08

多相疏冰材料的设计与性能

侯向辉^{*1}, 杨德雨¹, 费杰¹, 李贺军¹

1. 西北工业大学

装备表面覆冰在现代工业中常常影响运行效率, 甚至引发严重安全事故。采用疏冰涂层或表面是减轻工程结冰危害的有效途径, 现已发展出超疏水涂层、超润滑表面、弹性体涂层、类液体刷及低界面韧性等多种疏冰材料体系。然而现有疏冰材料在耐久性方面, 尤其是机械耐久性方面尚有很大不足, 严重制约其实际应用。多相材料设计为构建高耐久疏冰材料提供了新的思路, 本工作探讨了多相疏冰材料的材料微观结构设计, 相关的防冰、除冰机制, 及其在被动防除冰中的应用潜力。

D39-09

复杂海洋环境下金属材料服役性能研究及钛钢复合材料研制

蒋旭洲^{*1,2}、左蒋思之^{1,2}、田子豪¹、李梦莎^{1,2}、罗健锐³、彭婷¹、乐砥柱³、李宁博³、任胜达³、王硕³、俞宏英^{2,3}、孙冬柏^{1,2}

1. 中山大学材料科学与工程学院

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室 (珠海)

3. 中山大学材料学院

随着国家海洋强国战略的部署和推进, 金属材料作为海工装备的主要材料, 面临深海、极地等复杂海洋环境的挑战。团队依托“深海勇士号”载人深潜器、南极长城站/中山站、“珠海云”智能型无人系统母船等科研平台, 以碳钢、不锈钢和钛合金等常用海工金属材料为研究对象, 系统开展了深海、极地和跨海域腐蚀行为研究。团队先后两次搭载“深海勇士号”载人深潜器, 分别在我国南海 2502.5 m、3404.0 m 和 4240.5 m 的海底开展了长达 277 天的曝露试验, 并利用机械臂将样品插入海底沉积物之中, 以同时进行深海海水与沉积物两种环境中的腐蚀试验, 揭示了深海极端环境中多种金属材料耐蚀性的退化机制。团队依托中国南极长城站、中山站科研平台, 分别开展了长达 987 天、1071 天的长时曝露试验, 结合长城站与中山站的完整气象数据, 阐明冻融循环、高紫外强度等特殊环境因素与材料微观组织结构演化之间的关联关系, 并进一步厘清多种金属材料在极地环境下耐蚀性显著劣化的原因。团队基于“珠海云”智能型无人系统母船, 开展黄海-东海-南海跨海域自主航行腐蚀试验, 采用 CTD 设备获取深远海的海水及参数, 并对多种金属材料进行电化学测试, 结合灰色关联度分析揭示了温度、盐度、溶氧量等关键参数对材料腐蚀行为的差异化影响。上述系统性的实海试验研究, 为深海装备选材、极地工程防护和跨海域腐蚀预测提供了重要科学依据。为进一步降本增效, 团队“以钛为甲”发展了钛钢热机复合技术, 研发了新型钛钢复合材料, 并进行了大尺寸样品的试制, 为降低钛及钛合金的应用成本提供了新思路, 将为其在海洋工程装备中大规模应用铺平道路。

D39-10

残余奥氏体和析出相对高氮马氏体不锈钢在海洋环境中耐蚀性能研究

付小倩¹、董超芳^{*1}、纪毓成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

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。为了满足高氮钢在不同服役环境要求，回火处理对于降低其脆性、改善其加工性能至关重要。然而，回火处理引起的组织改变也对其耐蚀性产生很大影响。因此，本研究结合第一性原理计算以及各种电化学测试方法探讨了不同回火温度对高氮马氏体不锈钢析出行为和耐蚀性的影响。研究表明，低温回火时残余奥氏体体积分数较高，最高可达 30.5%。随着回火温度升高，富铬氮化物 (M_2N) 从基体中析出，残余奥氏体含量逐渐降低，耐点蚀性能下降。通过 DFT 计算，结果表明马氏体、残余奥氏体、 $M_{23}C_6$ 以及 M_2N 的功函分别为 3.97、4.60、4.53 和 5.34，析出相作为腐蚀发生的阴极位点，与基体之间形成电偶腐蚀效应加速基体局部腐蚀溶解。结合 AFM 测试可知，残余奥氏体的存在能使 M_2N 与基体之间的伏特电势差最大降低 15.55mV。此外，Cr 的消耗导致 $M_{23}C_6$ 碳化物和 M_2N 氮化物周围形成贫铬区，阻碍了钝化膜的形成，并成为界面腐蚀的通道。

D39-11

深海碳纤维复合材料耐压壳结构与极限状态评估

姜旭¹，于昌利*¹，曾源¹，杨硕¹

1. 哈尔滨工业大学（威海）

随着深潜器在海防和资源勘探中的应用不断拓展，其耐压壳在深海高压环境下的安全性和轻量化需求日益突出。围绕深海工程中复合材料耐压壳极限强度精准预测的关键需求，本研究依据复合材料渐进损伤理论，提出了一种高效的极限强度预测方法。通过对 T700 碳纤维/环氧树脂圆柱耐压壳开展静水压破坏试验，获取其极限强度数据，并深入分析损伤形式与应变响应规律。在此基础上，考虑初始缺陷构建极限强度数值预报模型，经对比，预测结果与试验数据吻合度良好。进一步开展参数化研究，定量揭示径长比和径厚比对极限强度的影响规律，据此提出复合材料圆柱耐压壳极限强度经验公式，为复合材料耐压壳结构与工程应用提供关键理论依据与技术支持。

D39-12

MoS₂ 涂层潮湿环境服役稳定性理论研究

郝宇*¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

固体润滑涂层的环境敏感性是制约其发展和应用的关键问题，其中涉及丰富的原子和电子级动态相互作用过程，非常需要高精度量子力学理论模拟方法来准确揭示材料宏观性能背后的微观本质，从而更好地改性和设计材料。MoS₂ 固体润滑涂层作为目前最好的航空航天润滑材料之一，虽然具有优异的真空润滑性能，其服役行为非常容易受到周围环境尤其是湿度的影响，对其储存以及近地近海运行造成巨大挑战。在本项工作中，我们针对 MoS₂ 在海洋大气潮湿环境下润滑性能急剧恶化并且会诱发电偶腐蚀的问题，深入开展了高精度第一性原理计算研究，发展了定量模拟电偶腐蚀反应活性的动力学极化曲线模型，以及适用于定量研究材料摩擦行为-环境因子动态相互作用的第一性原理分子动力学慢生长模拟方法。研究全面探索了 MoS₂ 各类点、线缺陷与氧气和水分子的作用机制，揭示了其边缘电化学活性所导致的电偶腐蚀加速机理，并进一步阐明了 15 种稀土元素掺杂 MoS₂ 表面的高电化学活性以及活性背后由 4f 电子轨道杂化所导致的吸附物选择性增强机理，从而深入揭示了 MoS₂ 涂层体系电偶腐蚀现象的本质。此外，研究验证了所提出慢生长模拟方法在揭示摩擦过程应力、温度、环境因子影响效应时的有效性，其可在量子力学尺度精准计算材料动摩擦力和摩擦系数，并实时考虑摩擦界面的动态演变。结合机器学习力场加速，未来有望更加深入地揭示大尺寸润滑体系动力学演变机制，为全面理解材料环境服役行为和构效关系奠定理论基础。

D39-13**氮化硼纳米片增强金属基复合材料的界面调控和失效机理研究**王匀*¹、刘振强^{1,2}

1. 江苏大学
2. 常州工学院

海洋工程和航空航天装备关键构件在海洋腐蚀、重载和摩擦等极端服役环境下面临强韧失配、磨损和腐蚀失效等严峻挑战。课题组针对关键构件不同使用环境和失效形式，创新性地向金属基复合材料/涂层内引入氮化硼纳米片（BNNSs），并进行界面调控和材料失效机理研究。其中，利用 BNNSs/Ti 的可控界面反应调控复合材料纳米界面结构，使用机械球磨和浆料直写打印等工艺调控复合材料外部构型，基于电流辅助烧结制备出了系列力学性能和摩擦学性能优异的钛基复合材料。通过实验测试和表征系统研究了各类复合材料/涂层的微观组织、界面结构和服役性能的演化规律，结合形貌分析、数学模型和分子模拟等手段阐明了材料的失效机制，开拓了以 BNNSs 作为金属材料增强相的复合材料体系，为其它金属基复合材料及涂层的设计、制备和分析提供了理论指导。

D39-14**海洋环境下金刚石涂层的设计制备及应用研究**宋惠¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

近年来，深海资源开发利用活动日益频繁，深海装备关键密封部件在高压、强腐蚀等极端环境下服役，对其表面涂层防护技术提出了迫切需求。金刚石因其具备低摩擦、高耐磨以及优异的抗腐蚀性能，成为表面防护材料的理想选择。聚焦于陶瓷密封表面金刚石涂层的设计与制备，通过化学气相沉积（CVD）等先进技术，系统研究不同工艺参数对涂层微观结构、结合强度及摩擦性能的影响。揭示了陶瓷表面金刚石涂层在海水环境下摩擦性能的影响机理，明确了涂层成分、结构与性能之间的内在联系，进而提出科学合理的涂层设计准则，为深海装备关键密封部件的表面防护提供了理论依据与技术支持，对推动深海资源高效开发利用具有重要意义。

D39-15**涉海环境功能防护涂层设计与耦合损伤机理**任思明¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

临海发射、近海服役的高技术装备机械系统面临磨损、腐蚀、辐照、高温等多因素强耦合损伤问题，而传统的功能防护涂层均未考虑海洋复杂服役环境下的自适应与耐久性设计，严重制约新一代涉海装备的高安全与长寿命服役。本研究针对涉海机械关键部件面临的多因素耦合损伤难题，采用磁控溅射及多弧离子镀技术，设计构筑二硫属基及陶瓷基纳米多元多层结构功能防护涂层，实现涂层在高湿、高温、交变等苛刻工况下的低损伤的自适应；研究功能防护涂层在多因素交互作用下表/界面的损伤演化过程，阐明转移膜的组分结构与性能之间的映射关系，为海洋复杂环境高性能功能防护材料的设计提供技术支撑。

D39-16**碳化硅功能化氧化石墨烯-辣椒粉复合双涂层的制备及防腐防污性能研究**唐俊*¹

1. 湖南大学

在海洋环境中，无处不在的生物腐蚀（藻类等微生物附着在钢结构会产生更多的腐蚀液体或者加速有

机涂层的降解)则会加速腐蚀的进程,并且生物附着还会增加油耗,因此也必须考虑涂层的防污性能。现有的防污涂料存在对环境伤害大或防污效果不理想的问题。而且现有的单一的涂层难以适应如此复杂的服役环境,因此开发新型环保、高性能防腐防污有机涂层防护体系已成为海洋工程装备的技术核心和关键性课题。本文通过添加改性碳化硅来提升环氧底漆的抗渗透性能和机械性能来提高涂层的防腐性能,防污面漆则是采用含辣椒粉的环保型改性丙烯酸锌树脂,通过逐层涂覆制备出——碳化硅改性复合涂层-类辣椒素仿生涂层双涂层防腐防污体系。并通过测试得出该防护体系具有较优异的防腐防污性能。

D39-17

氧掺杂对 CrNbTiZr 多主元涂层结构演变和耐腐蚀性能影响研究

范军^{1,2}、蒲吉斌*^{1,2}

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所
2. 海洋关键材料全国重点实验室

据统计,我国每年因海洋腐蚀造成的经济损失约 7000 亿元,约占当年 GDP 的 1.1%。涉海零部件表面涂层防护被公认为是一种经济高效的缓解材料腐蚀的解决方案。通过材料设计和结构调控获得一种高耐腐蚀、长寿命涂层材料成为现今腐蚀防护领域的研究重点。鉴于涂层耐腐蚀性能的优劣与钝化膜的质量密切相关,选择易钝化元素制备的涂层材料理论上具有优异的耐腐蚀性。然而,由于元素之间热动力学差异,容易形成元素偏聚区域,导致涂层服役过程中产生电偶腐蚀。针对这一问题,多主元合金高构型熵和非金属元素调控有望减少元素偏聚、获得致密钝化膜。本文通过多靶磁控共溅射制备包含易钝化元素 Cr、Nb、Ti、Zr 的多主元合金涂层,并在磁控溅射过程中通入不同 O₂ 含量调控各元素扩散动力学。结果表明,CrNbTiZrO_x (x=0, 1.13, 2.89) 涂层随 O 含量增加,由 BCC、非晶和 Cr₂Zr 逐渐向非晶结构转变,晶粒尺寸及体积分数分别由 65.73 nm、55.05%减少至 59.06 nm、14.01%,O 掺杂涂层在 3.5 wt.% NaCl 溶液环境中形成的钝化膜更加均匀致密,自腐蚀电流密度低至 10⁻⁹ A/cm² 量级。涂层性能的提升主要是 O 掺杂促使 TiNbZr (BCC) 和 Cr₂Zr 向富集 Nb、Ti 的非晶转变,Nb、Ti 向 Cr 富集区域扩散,使得涂层元素分布更加均匀。同时,涂层中引入 O, Ti 等易氧化元素优先预氧化,提升钝化膜形成速率,钝化膜更加致密。该研究为高耐腐蚀多主元合金涂层设计提供了方法参考。

D39-18

镍合金钝化膜缺陷动力学行为及氢杂质的强耦合机理

叶锦涛*¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

镍基合金表面原生钝化膜 (NiO) 决定了其抗腐蚀性能,而对于含氢 (H) 环境会显著加速合金氧化腐蚀这一重要现象,其背后 H-NiO 微观耦合机制尚未明确。本工作基于第一性原理计算,精确揭示了 H 杂质调控 NiO 本征缺陷动力学的微观机制。我们首先基于密度泛函线性响应理论,自洽计算了 NiO 中强关联电子相互势,并通过探讨 NiO 多种性质 (晶体结构、体弹模量、电子结构、光吸收谱、振动谱和热膨胀) 来严格论证强关联电子势的系统精确度。然后,我们用此精确的强关联电子势对 NiO 中本征空位缺陷的运动规律及 H 杂质的耦合作用进行探索,发现: (1) Ni 空位扩散速率远大于 O 空位,证实 Ni 合金氧化膜生长由 Ni 离子的外向扩散主导; (2) 在 Ni 空位团聚形成空位簇后, Ni 空位的扩散势垒会显著降低; (3) H 杂质会同时降低 Ni 空位形成能和增强空位团聚趋势,从而促进 Ni 空位扩散,加速 Ni 合金氧化。本工作首次从原子尺度上揭示了 H 导致 Ni 合金氧化加速的双重微观作用机制: H 杂质既通过降低空位形成能来增加缺陷浓度,又通过诱导空位团聚降低扩散势垒。该理论模型为设计抗氢蚀镍合金提供了原子尺度的基础原理依据。

D39-19

深海耐高压抗渗透防护涂层界面强化机制及工程应用

吴英豪*¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

重防腐涂料是保障海洋工程装备安全服役的关键材料，万米深海环境下多因素强耦合作用导致涂层与金属界面、填料与树脂界面出现开裂和剥离失效等共性问题，深海工程装备的长效防护面临着严峻的挑战，界面强韧化已成为防护涂层突破万米深海长寿命安全服役的关键问题。针对上述问题报告人开发了一维/二维协同杂化增强耐高压抗渗透涂层体系，突破了零维/一维/二维材料多级多界面强韧化技术，发展出界面啮合与化学键合、机械互锁与缓蚀协同增强的界面强化策略，研发的耐高压抗渗透复合涂层材料通过了实验室模拟万米深海高压验证，开展了从 2540 米到 10900 米全海深实海验证，考核后材料结构外观完好，与国内外同类产品对比效果显著，填补了我国防护涂层材料全海深腐蚀数据空白。实现在深海水文监测装备和万米深潜装备耐压球壳上的工程应用，满足我国深海工程装备对高性能长寿命耐高压抗渗透涂层的需求。

D39-20**海洋高强韧自修复防护涂层设计及其修复-防腐机制研究**朱小波*¹

1. 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保障海洋工程装备安全服役的关键材料。但是有机树脂在成膜和长期服役过程中不可避免的会产生各种宏观/微观缺陷，涂层微/纳尺度损伤难以自主修复。本征型自修复涂层由于具有反复修复涂层损伤缺陷以恢复材料初始防护功能而备受青睐。然而，自修复涂层弱化学键存在导致材料机械性能差（机械强度 < 10 MPa），而具有高强度的自修复材料又需要外界光/热刺激实现修复功能，因此如何平衡自修复材料高机械强度和室温自修复能力之间矛盾是亟待解决的关键难题。本研究通过化学键改性二维片层/树脂界面有序交联排列策略，制备出系列高强韧室温自修复防腐涂层和多种环境快速自修复防腐涂层，提出了二维片层阻隔-修复-钝化防腐新思路。结果表明：平行排列纳米片改性自修复涂层吸水率和氧气渗透率较纯树脂分别降低 72% 和 99%，实现了涂层损伤修复与抗渗透长效防腐功能协同防护。

D39-21**海洋环境中多主元合金的钝化行为研究**魏亮*¹

1. 上海大学

随着国家对海洋的持续开发，对新型耐蚀合金的需求更加迫切。多主元（高熵）合金因其优异的综合性能，在海洋环境中具有潜在应用潜力。研究表明，CoCrFeNi 合金在含 Cl⁻ 环境中会形成一层纳米级别钝化膜，外层以氢氧化物为主，内层依次富集 Fe 氧化物和 Cr 氧化物。随极化电位增加，钝化膜厚度增加；外层膜特性和厚度不变，内层膜变厚-富 Fe 氧化物区域向外层膜靠近，富 Cr 氧化物区域向基体靠近。双层钝化使其拥有优异的耐点蚀性能。添加 Al 和 Ti 等沉淀强化元素后，合金耐点蚀性能显著降低，而通过成分和形变热处理工艺调控，改善基体相和纳米相表面钝化膜的保护性，可以提高沉淀强化多主元合金的耐点蚀性能。

D39-22**WB₂-C 非晶涂层力学及高温摩擦学性能研究**高臻荣*¹

1. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所

针对海洋环境飞机传动系统在高温干运转条件下面临的高温-磨损耦合损伤问题，使用磁控溅射技术制

备了 WB_2/C 非晶涂层，基于非晶碳相与 WB_2 之间的弱相互作用，成功制备出 WB_2/C 复合涂层。得益于非晶涂层对裂纹扩展的抑制作用，涂层的断裂韧性 $K_{Ic} > 6.5 \text{ MPa m}^{1/2}$ ；同时结合膜-基界面的成分梯度过渡设计，实现涂层具有超过 100 N 的超强膜-基结合强度；此外，薄膜具有优异的机械性能 ($H/E > 0.1$) 和高温热稳定性，同时，在高温剪切过程中原位生成的 WO_3/B_2O_3 的纳米晶颗粒与非晶碳形成的梯度转移膜，使涂层在 400 °C 高温下仍具有较低的摩擦系数和磨损率，有效解决了陶瓷防护涂层在高温环境下的高磨损与早期失效问题。

墙报

D39-P01

可海洋环境降解的聚对二氧环己酮基泡沫新材料

张杰¹、顾林楠¹、王芳¹、王玉忠*¹

1. 四川大学

高分子泡沫材料是现代海洋工程、船舶工业、渔业、能源开发等领域不可或缺的功能性材料，其核心价值在于能提供可控的浮力、高效的隔热、可靠的吸能缓冲，并有望延伸至生态修复、声学控制等多种应用。选择适用于严苛海洋环境的特定类型泡沫材料并考虑其长期性能和环保影响至关重要。目前，商业化高分子泡沫主要含聚苯乙烯、聚乙烯和聚氨酯等，其在海洋环境中难以降解，同时回检后也不易回收再利用。基于此，本课题设计制备了可在海洋环境中降解的聚对二氧环己酮 (poly(p-dioxanone), PPDO) 基高分子泡沫，该泡沫具有优异的压缩强度和压缩回弹性，分别可达 $3.98 \pm 0.92 \text{ MPa}$ 和 $93.21 \pm 1.66\%$ 。此外，与商业化的泡沫相比，该泡沫具有更为优异的环境降解性，同时还可高效回收为其可再聚合单体。

D39-P02

用于高效海水淡化的具有垂直通道结构的高度取向海藻酸钠复合纤维仿生蒸发器

陈耀阳¹、朱忆¹、彭佳²、林敏娟²、朱玉龙³、林凌*¹

1. 自然资源部第三海洋研究所

2. 福州大学

3. 上海海洋大学

随着全球淡水资源需求的日益增大，环保型海水淡化技术成为研究热点，其中具有盐排斥能力的太阳能蒸发器展示出巨大潜力，但该技术平衡盐排斥性与热损失方面仍面临重大挑战。本研究通过湿法纺丝和相分离调控，成功制备了具有垂直通道结构的高度取向海藻酸钠复合纤维 (SPS CFs)。该纤维可高效传输海水，并有效去除有机染料 ($> 6.00 \text{ mg g}^{-1}$) 和重金属离子 ($Cu^{2+} > 2.00 \text{ mg g}^{-1}$, $Zn^{2+} > 3.00 \text{ mg g}^{-1}$)。通过对 SPS CFs 进行局部疏水改性，成功开发了一种具有盐排斥功能和导热回收功能的三维“花状”太阳能蒸发器，其表现出相对较高的蒸发速率 ($\geq 0.99 \text{ kg m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 1 kW m^{-2} 红外光照强度)。此外，本研究设计了一种简单装置用于从海水中高效收集淡水，在户外应用中经过五个循环后，淡水收集速率超过 $5.80 \text{ kg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。这种受生物启发的光热装置为海水淡化和净化提供了一种可行的环境友好型替代方案，有望满足水资源短缺地区的淡水供应需求。

仅发表论文

D39-PO01

基于微射流制备改性石墨烯及其仿生层状防腐复合涂层

郑龙辉*¹、王娜²、吴立新¹

1. 中国科学院福建物质结构研究所

2. 福州大学

石墨烯因其优异的屏蔽性与抗渗透性，成为极具前景的防腐填料。然而，未改性石墨烯易发生团聚，导致涂层产生结构缺陷并加速电化学腐蚀。本研究通过将聚（N-异丙基丙烯酰胺）接枝至四苯基乙烯，开发出兼具剥离剂与改性剂功能的四苯基乙烯-聚（N-异丙基丙烯酰胺）。采用微射流工艺高效制备出低缺陷改性石墨烯（TPG），该材料由 2-3 层石墨烯片组成且具有优异的分散稳定性。为抑制涂层电化学腐蚀，通过旋涂法设计制备了具有环氧树脂(EP)与 TPG/EP 交替层状结构的类珍珠母仿生石墨烯涂层(B-TPG/EP)。测试结果表明，在 3.5 wt% NaCl 溶液中浸泡 42 天后，B-TPG1%/EP 复合涂层的阻抗值仍保持在 $1.04 \times 10^{11} \Omega \cdot \text{cm}^2$ ，较 TPG1%/EP 复合涂层高出两个数量级，较纯 EP 涂层高出八个数量级，展现出卓越的防腐性能。本研究不仅展示了一种工艺简单、高效制备改性石墨烯的新方法，同时基于仿生原理开发出具有长效防护性能的金属防腐涂层，具有重要的工业应用价值。