

论坛三十：耐蚀材料与腐蚀控制论坛

分论坛主席：毛新平 韩恩厚

30-01

典型轧制复合板在海洋大气及工业煤气腐蚀环境腐蚀特性

焦四海¹ 闫博¹ 郝英敏¹

宝山钢铁股份有限公司中央研究院

为应对高腐蚀环境服役要求，宝钢开发了系列不锈钢、钛及钛合金、镍基合金等系列轧制复合板、冷热轧卷及棒材和钢筋等。为了评价这些轧制复合材料的实际防腐效果，针对南海岛礁大气环境选取了 304L、316、2205 和钛复层轧制复合板，以及针对工业煤气环境，304L、316 和 2205 轧制复合板，并采用不同的切口防护措施，通过挂片进行了实际环境的耐蚀性试验。初步试验结果表明，总体上所有复层材料的轧制复合板均展现了良好的耐蚀性，但不同的复层材料和处理状态，耐蚀效果稍有不同；采用适当的切口防护措施，可以很好地对复合板的切口进行保护。

关键词：轧制复合材料，海洋大气环境，工业煤气环境，耐蚀性

30-02

析出相和产物膜协同作用改善镁合金耐蚀性研究

宋影伟^{*}，常福春，韩恩厚

(中国科学院金属研究所核用材料与安全评价重点实验室，沈阳，110016)

^{*}通讯作者：ywsong@imr.ac.cn

镁合金化学性质活泼，且在空气中自然形成的氧化膜疏松多孔，导致其耐蚀性较差。已有大量研究通过添加合金元素改善镁合金的耐蚀性，但由于这些合金元素在镁中的固溶度有限，会以第二相的形式析出，导致其发生严重的微电偶腐蚀。稀土镁合金中的稀土是十分活泼的元素，与镁的电极电位相当，且稀土氧化物的 PB 大于 1。可见，可以通过调控稀土镁合金的微观结构减缓微电偶腐蚀，并提高氧化膜的保护性，两者协同作用提高镁合金的耐蚀性。因此，本文通过热处理调控 Mg-Gd-Y-Nd 稀土镁合金中的析出相，使其细小、均匀、连续分布，在腐蚀介质中发生了均匀、较弱的微电偶腐蚀，并形成了致密的保护膜，使镁合金在长期的腐蚀过程中都呈现均匀腐蚀形态，耐蚀性有明显的提升。

关键词：镁合金；微电偶腐蚀；产物膜；耐蚀性

30-03

纳米防护容器的分子设计与制备技术

胡吉明

浙江大学化学系，杭州 310058

纳米容器技术是现今防护涂层领域中应用的最新成果。缓蚀剂在加入涂层前预先负载入多孔的纳米容器中，有助于提高缓蚀剂与涂层间的相容性、减缓缓蚀剂的释放、降低缓蚀剂分子被光降解的风险等。负载缓蚀剂的纳米容器为涂层提供化学缓蚀作用，涂层的防护性能大幅度提高。但是，由于自身的微纳多孔结构，传统的纳米容器绝大多数没有物理阻挡性能且亲水，这使得纳米容器技术仅能为涂层提供化学缓蚀，而缺乏物理阻挡作用，很大程度上限制了该技术的大规模应用。

本报告基于上述背景，介绍本课题组近年来围绕提升纳米容器的物理阻挡性能而开展的

相关研究。主要围绕两个方面开展研究：一是将具有优异物理阻挡性能的二维纳米材料与纳米容器相复合，设计得到兼具物理阻挡性能和化学缓蚀性能的“双功能”复合纳米容器；二是首次提出“超疏水纳米容器”的概念，设计得到性能优异的双功能纳米容器。针对前者，关键是新型制备技术的开发。本报告分别介绍基于二维石墨烯纳米片表面的电沉积纳米容器技术和在二维 LDH 表面的原位生长 MOFs 纳米容器技术；针对后者，技术关键是对被疏水化纳米容器的分子设计。本报告介绍了基于 MOFs 纳米容器分子级别疏水化的策略。

关键词：防护涂层；纳米容器；缓蚀剂；分子设计；制备方法

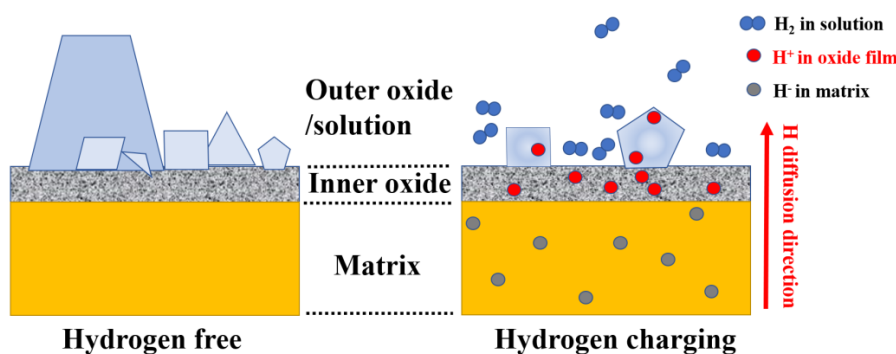
30-04

固溶氢作用下镍基合金在高温水中腐蚀行为研究

徐健，郭琦

中山大学，深圳，528406，中国

压水堆核电站一回路中通过添加氢以维持环境的还原性并抑制水的辐解。作为尺寸最小的原子，氢可扩散至材料内部，以不同的形式存在，对材料在高温水中的氧化过程起到不同的作用。目前关于充氢对高温水中氧化过程作用的研究主要集中在镍基合金上，而氧化过程与镍、铬、铁、氧和氢之间的相互作用有关，这些元素组成了一个非常复杂的系统。为了从根本上理解这一过程，研究氢对镍基合金基本元素氧化膜的影响是很重要的。本研究采用双暴露氧化实验，在高温水中对 690 合金以及其主要组成元素 Ni、Cr 进行了内部充氢氧化实验，并利用扫描电子显微镜、拉曼光谱和透射电子显微镜对浸泡后氧化膜的形貌、成分和厚度进行了详细表征。研究发现，除了充氢后 Cr 的内部氧化物发生了非晶化外，充氢没有改变其他材料表面氧化膜的晶格结构。但是内部充氢不同程度地降低了氧化膜的厚度。Ni 的内层氧化膜和外层氧化膜的厚度均显著减小，而 Cr 表面氧化膜仅略微减小。对于 690 合金，其外层氧化膜表现得像 Ni，内层则与 Cr 的氧化行为类似。尽管不同位置的氢在氧化中可能起到相反的作用，但在内部连续充氢的实验过程中，溶液中的氢起主导作用，其不仅影响氧化物的热稳定性，而且会阻碍外层氧化物的沉淀/沉积。结合混合导电模型，对内部充氢的作用机理进行了详细讨论。



内部充氢对 690 合金在高温水中氧化膜影响的示意图

30-05

海洋钢结构用纳米粉末防腐涂层研究

王震宇，吕晓明，张良昌，韩恩厚

广东腐蚀科学与技术创新研究院，广州，510535，中国

海洋建筑钢结构长期处于高盐雾、高湿热、强辐射、海浪冲击、海生物侵蚀等严酷腐蚀环境中，极易发生腐蚀，造成巨大经济损失和安全问题。本文针对海洋钢结构的高防腐等级要求，设计和研究高性能纳米改性防腐粉末涂层的关键技术。研究发现，利用表面修饰技术

和邦定分散技术,可以解决纳米粒子在粉末涂料类高粘度聚合物中的难分散问题。通过交流阻抗测试发现,一定含量的纳米 SiO₂ 与 ZnO 协同改进提高了酚醛环氧粉末涂料的耐腐蚀性能;纳米氮化硼改性酚醛环氧粉末涂料比纯酚醛环氧粉末涂料具有更高的低频阻抗;随着浸泡时间分别延长至 1000h 和 2770h,两种纳米改性涂层的低频阻抗基本没有下降,说明 SiO₂/ZnO、氮化硼纳米材料显著提高涂层的长期防腐性能。

关键词: 海洋钢结构;防腐型粉末涂层;纳米改性

30-06

铝基涂层耐铅铋腐蚀行为及其机理研究

匡文军 a, 王文 a, 朱召光 b, 谭季波 b, 黄锦阳 c, 鲁金涛 c

a, 西安交通大学

b, 中国科学院金属研究所

c, 西安热工研究院有限公司

铅铋共晶是第四代液态金属先进反应堆的重要冷却剂,具有广泛的应用前景。然而液态铅铋对设备材料的强腐蚀性是目前制约该堆型推广应用的关键问题。本研究针对典型结构材料在液态铅铋环境下的腐蚀问题开展研究,首先基于热扩散工艺在 T91 合金和 316 不锈钢表面制备了铝化物涂层,然后研究了两种材料制备表面涂层前后在 550 °C 不同氧浓度液态铅铋环境中的腐蚀行为,发现铝基涂层在铅铋环境中具有良好的稳定性,并且可以显著提高基体材料在较宽氧浓度范围内的抗腐蚀性能。分析发现涂层表面在液态铅铋中能够稳定形成具有良好保护性的氧化铝膜,通过热力学计算发现涂层的主要相结构生成氧化铝所需的平衡氧分压很低。该涂层工艺对提升典型结构材料在液态铅铋中的腐蚀抗力效果显著,具有很好的应用前景。

30-07

金属材料海洋环境腐蚀试验观测研究进展

韩冰

钢研纳克检测技术股份有限公司 钢铁研究总院青岛海洋腐蚀研究所

金属材料海洋环境腐蚀试验观测研究,是通过不同的金属材料按标准制备成试样、构件或成品,在海洋环境中进行长期的现场试验和观测,对材料在海洋环境作用下发生的变化进行观测分析,获取腐蚀环境因素数据和材料腐蚀数据,通过数据处理和研究分析,获得材料在海洋环境中的腐蚀行为和规律。从而研究材料寿命与海洋环境和材料性能之间的关系,为综合评估材料质量和寿命提供参考依据,为海洋设施装备选材设计以及服役安全提供数据和技术支撑。

30-08

表面处理和改性技术在核燃料领域中的应用及展望

冯海宁 刘伟 李宗书 赵雨梦 孙婷玉 李宗书

中核北方核燃料元件有限公司

表面处理及改性技术是利用现代物理、化学、金属学和热处理等学科的边缘性新技术,通过改变材料的表面状态和性质,使之与芯部材料优化组合,实现预期性能目标的工艺方法,具有悠久的应用历史和广泛的应用领域。在全球气候变化背景和“双碳”目标下,核电作为一种高效、经济、可靠的清洁能源得到持续发展,核电技术不断演进,高性能燃料组件不断研发。在研究材料本身、开发新材料的同时,利用有效的表面处理及改性技术改善材料表面性能,实现材料优化组合,对于优化燃料组件性能质量,节约材料、能源和提高核电安全性

与经济性等方面具有十分重要的意义。本文围绕现阶段广泛应用于核燃料领域中的表面处理和改性技术进行了梳理和总结，重点对氧化、电镀、浆体涂覆和气相沉积等技术在核燃料领域的应用方向、目的和效果等方面进行了系统阐述，并对各技术应用现状的优缺点进行总结分析，在此基础上对后续核燃料领域的表面处理改性技术创新发展与应用提出了研究方向与建议。

30-09

天然气长输管道防腐抗菌自修复涂层的制备及性能研究

庾文丁

西安理工大学

当前我国天然气开采是采用注水采气，采出水未经严格处理，因此在产出水中会附带较多腐蚀性离子和硫酸盐还原菌（SRB）等，这些水和杂质都会引起管线腐蚀现象。因此迫切需要一种具有优异的防腐和抗菌性能的防护材料来减少腐蚀事故的发生。本文通过原位聚合法和化学改性制备了含有自修复和抗菌功能的丁香油/环氧树脂复合微胶囊的防腐抗菌自修复涂层。制备的复合微胶囊具有规则的表面，芯材包覆率在 65%左右，热稳定性相较于普通智能填料提升 30%左右，防腐抗菌涂层相对于原始涂层提升了 60%以上的耐腐蚀性能，具有 90%以上的抗细菌黏附性能，自修复效率提升了 70%以上。本涂层具有良好的自修复性能和损伤响应杀菌性能，将在天然气管道防腐领域具有良好的应用价值。

30-10

具有 S²⁻响应功能的 TCS-MSNs@TA-FeIII 纳米填料增强涂层抗微生物腐蚀性能

蒋君毅

西安理工大学材料学院

在易受微生物影响腐蚀(MIC)的环境中，传统涂层往往缺乏抗菌性能，导致防腐性能下降。将抗菌剂直接掺入涂层可能导致持续泄漏。在这项研究中，我们通过使用智能纳米填料 TCS-MSNs@TA-FeIII 来解决这一挑战，这种智能纳米填料以介孔二氧化硅纳米颗粒(MSNs)为核心，通过装载三氯生(TCS)并由单宁酸-Fe³⁺包覆形成。这些纳米填料对硫酸盐还原菌(SRB)代谢活动引起的 S²⁻ 浓度变化具有响应性，可以在 0.05 至 3 mM 的低 S²⁻ 浓度范围内控制 TCS 的释放。此外，我们将其整合到 SRB 环境中的水性环氧涂层中，评估了涂层的抗菌和防腐性能。结果表明，TCS-MSNs@TA-FeIII 涂层具有最高的阻抗模量($3.19 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$)、最低的腐蚀电流密度($2.04 \times 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$)和卓越的抗菌性能。该研究为开发具有持久 MIC 抑制能力的新型涂层提供了有价值的见解，同时也拓宽了有机涂层的潜在应用范围。

关键词：微生物腐蚀；抗菌性能；S²⁻响应；三氯生；硫酸盐还原细菌