

天然道地植物所含成分选择复配成分是实现成功复配的关键。例如，在光果甘草中含有光甘草定、甘草素、甘草酸三种功效成分[5]。实验数据表明，无论甘草酸还是甘草素单独和光甘草定复配都不能达到协同增效（图1）。然而，同时复配光甘草定、甘草素、甘草酸三种功效成分，会使原料的美白功效得到显著性改善，实现协同增效的目的。

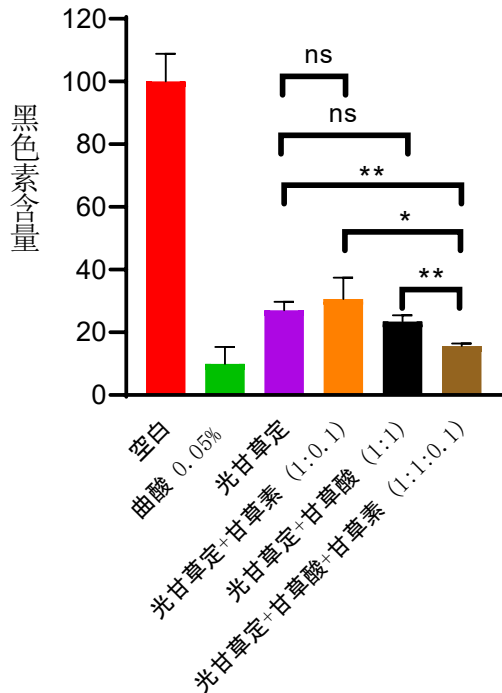


图1. 光甘草定、甘草酸、甘草素复配的美白协同功效。

5 道地药材质的天然（野生）比例

在逆境中，道地植物不断抵抗恶劣的生存环境，促进了次生代谢产物的合成和积累，优化了有效成分的比例，进而提升功效。例如，研究发现干旱的条件会激活甘草 EMP 途径和 TCA 循环，从而激活抗氧化酶体系并增加黄酮类化合物的积累。在千万年的自然筛选中，那些进化中通过偶然突变产生功效物质比例最优的植物，在逆境压力中，会得到

更好的生存机会；而比例欠佳的植物，在同样生存环境下，相较最优比例的突变株，会生长缓慢而被进化选择压力淘汰。为此，道地天然（野生）植物中的功效成分比例，是自然选择对自然环境的最优解，也是发挥最佳功效的比例。

近年来，很多道地植物采用人工种植的方法进行获取。人工条件下生长的植物，相较天然（野生）植物，所经历的生存环境不尽相同。导致各个成分之间的比例可能发生变化。例如，野生的人参中，往往人参皂苷的种类比较丰富且含量普遍较高，并含有稀有人参皂苷，而人工种植的人参无论在人参皂苷的含量还是种类都远逊色于野生参。为此，植物提取成分的复配应遵循其在道地植物中的天然（野生）比例。

6 结语

本文针对植物提取原料成分的未来发展趋势，提出理论性指导原则：首先，须优选道地的植物进行原料的提取。其次，须从道地植物中提取出高纯度的单体成分。这些成分拥有清晰明确的分子结构，其功效可以通过严谨的科学实验进行验证。然后，须参照道地植物中的成分组合，选择几种核心单体成分，进行复配以实现协同增效。最后，应参照单体成分在道地药材中的天然（野生）比例进行复配。

参考文献

- [1] 黄璐琦, 陈美兰, 肖培根. (2004) 中药材道地性研究的现代生物学基础及模式假说, 中国中药杂志 29, 494-496.
- [2] Guo Q, Wu S, Liang W, et al. (2022) Glabrol impurity exacerbates glabridin toxicity in zebrafish embryos by increasing myofibril disorganization, *Journal of ethnopharmacology* 287, 114963.
- [3] Yokota T, Nishio H, Kubota Y, et al. (1998) The inhibitory effect of glabridin from licorice extracts on melanogenesis and inflammation, *Pigment cell research* 11, 355-361.
- [4] 季宇彬, 耿欣, 汲晨峰. (2007) 红景天研究进展, 天津中医药 24, 66-68.
- [5] Li C, Li T, Zhu M, et al. (2021) Pharmacological properties of glabridin (a flavonoid extracted from licorice): A comprehensive review, *Journal of Functional Foods* 85, 104638.

Preparation and Performance Study of Polymer Anti fouling Coating on Ship Titanium Alloy Surface

Yiming Hu¹²³ Longyu Zhou¹²³ Chen Hu¹² Haoqiang Zhu¹² Haitao Gao¹²

1. Hubei Nuclear Power Engineering Technology Research Center, Hubei, Wuhan, 430000, China

2. China Shipbuilding Industry Corporation Nuclear Safety and Emergency Technology Center, Hubei, Wuhan, 430000, China

3. Chinese People's Liberation Army Naval Engineering University, Hubei, Wuhan, 430000, China

Abstract

With the development of shipping industry, ships are often subjected to challenges such as biological fouling and corrosion during long-term service in complex marine environments, which severely affect structural safety and operational efficiency. Titanium alloys, with their excellent mechanical properties and corrosion resistance, are widely used in high-performance ship structures. However, their surfaces are prone to become attachment bases for marine organisms, necessitating protection through efficient anti-fouling coatings. High molecular anti-fouling coatings have gained extensive application in the maritime field due to their excellent interfacial regulation capabilities, environmental friendliness, and durability. This paper systematically reviews the material selection, structural design, preparation processes, and performance characterization of high molecular anti-fouling coatings on titanium alloy surfaces, while conducting in-depth analysis of their anti-fouling mechanisms and engineering applications. The study demonstrates that rationally designed high molecular anti-fouling coatings can significantly enhance the service life of ship hulls, showing promising application prospects.

Keywords

titanium alloy; polymer anti-fouling coating; ship antifouling; surface modification; performance study

船舶钛合金表面高分子防污涂层的制备与性能研究

胡一鸣¹²³ 周龙玉¹²³ 胡晨¹² 朱浩强¹² 高海涛¹²

1. 湖北省核动力工程技术研究中心, 中国·湖北 武汉 430000

2. 中国船舶集团有限公司核安全及应急技术中心, 中国·湖北 武汉 430000

3. 中国人民解放军海军工程大学, 中国·湖北 武汉 430000

摘要

随着航运业的发展, 船舶在复杂海洋环境中长期服役, 常遭遇生物污损与腐蚀等难题, 严重影响结构安全和运行效率。钛合金凭借优异的力学与耐腐蚀性能, 广泛应用于高性能船舶结构, 但其表面易成为海洋生物的附着基底, 需依赖高效防污涂层进行保护。高分子防污涂层因其良好的界面调控能力、环保性和耐久性, 在船舶领域获得广泛应用。本文系统梳理了钛合金表面高分子防污涂层的材料选择、结构设计、制备工艺与性能表征, 深入分析其防污机理及工程应用。研究表明, 合理设计的高分子防污涂层能够显著提升船体服役寿命, 具有良好的应用前景。

关键词

钛合金; 高分子防污涂层; 船舶防污; 表面改性; 性能研究

1 引言

钛合金因其高比强度、低密度和优异的耐蚀性, 在船舶、海洋工程及航空航天等领域得到了广泛应用, 尤其是在高端船舶制造领域, 钛合金结构大幅提升了船体的综合性能。然而, 复杂多变的海洋环境中, 生物污损问题普遍存在。海洋微生物、藻类及贝类等的附着不仅导致船体阻力增加、能耗升高, 还会加速钛合金表面的局部腐蚀, 严重缩短材料服役

寿命。传统有机锡类防污涂层虽有一定防污作用, 但其带来的环境污染日益严重, 已被逐步禁用。在此背景下, 绿色高效的高分子防污涂层成为当前研究的热点。高分子防污涂层例如丙烯酸胺类季铵盐抗菌涂层、环氧树脂季铵盐聚合涂层拥有较大的分子设计空间, 可通过聚氨酯柔性链段与环氧树脂刚性网络的互补作用, 构建兼具高强度与高韧性的三维网状结构, 攻克钛合金动态部件防污涂层易脱落、抗冲击性差的难题。部分高分子材料还具备自修复、耐老化、耐磨损等特性, 为船舶钛合金表面防护开辟了新路径。尽管已有多项研究进展, 界面兼容性、长期耐久性和工程化应用等关键问题仍待深入探讨。本文将系统研究高分子防污涂层的制备与

【作者简介】胡一鸣(1990-), 男, 中国湖北天门人, 硕士, 工程师, 从事船用材料研究。

性能,为高性能船舶表面防护提供理论依据与实践指导。

2 船舶表面污染与防护需求

2.1 钛合金在船舶领域的应用现状

当下阶段,钛合金其优良的物理及化学性能,成为现代高性能船舶结构不可或缺的材料。其密度低、强度高、耐腐蚀、抗疲劳等特点使其适用于水下结构、螺旋桨、舰体连接件等关键部位。在实际服役过程中,钛合金能够在高盐、高湿、高压的恶劣环境下长期稳定运行。然而,其表面活性高,极易吸附有机物和微生物,成为海洋生物附着的“温床”,导致生物污损问题突出。海洋生物附着于设备表面,生长繁殖速度极快,且附着十分牢固,难以清除,导致船舶阻力增加,降低航速、增加燃料消耗,同时会堵塞管道,降低换热效率,促成局部腐蚀和结构疲劳,造成舰船进坞维修费用增加、使用寿命缩短等损失。船舶涂层研究现状

国外在舰船防污材料领域形成以无锡自抛光防污漆、低表面能防污涂料、可控溶解型防污漆为核心的成熟技术体系,并针对钛合金基材的特殊性开发了氧化钛基材料、季铵盐类抗菌涂层、环氧树脂季铵盐聚合涂层、生物衍生防污涂层及智能响应型防污涂层等多元化创新方向,通过分子级改性、天然活性物质利用及环境动态响应机制,显著提升钛合金通海系统的防污效能与适配性;国内防污技术长期以传统溶解型防污漆为主,虽在涂料防污、物理、电解、生物防污等领域开展探索,但针对船舶钛合金系统的专用防污研究较少,现有材料存在附着力不足、耐磨性差、环保性弱、有效期短等问题,尤其在环氧树脂季铵盐聚合涂层等新型材料上仅完成实验室小试,规模化应用与长期稳定性验证仍待突破。

2.2 防污涂层的关键性能需求

高效防污涂层不仅要具备优良的防生物附着能力,还应具备良好的附着力、耐腐蚀性、机械强度和长期稳定性。对于钛合金等高端船舶材料,防污涂层需适应多变的服役环境,如高盐雾、高紫外线、高流速冲刷等。此外,涂层应具备优异的环境友好性,避免重金属和有机锡等有害成分。理想的高分子防污涂层应兼具自清洁、自修复、耐老化等功能,以延长船体表面清洁周期,降低维护成本,提高经济与环境综合效益。

3 高分子防污涂层的设计与制备技术

3.1 高分子材料的选择与结构设计

高分子防污涂层材料的选择与结构设计是提升其综合性能的关键。优质防污涂层通常以表面能低、成膜性好、耐腐蚀和耐老化的高分子为基础。高分子季铵盐、季磷盐防污材料是目前研究的热点,通过带官能团单体的聚合反应或以接枝的方式,在分子链上引入抗菌官能团,再引入分子级季铵盐嵌入策略,开发环氧-聚氨酯复合交联工艺,合成新型高分子抗菌防污涂层,在实际应用过程中,能同时将多种防污剂进行复合,满足不同海域工况的要求,适用范围较广,

成本较低。有机硅聚合物如聚二甲基硅氧烷(PDMS)因其分子链柔顺、疏水性强、成膜致密,已成为船舶防污的主流材料。聚酯类、聚氨酯及其改性物也常被用于多层复合体系,以提升力学强度和韧性。结构设计上,通过分子主链的柔性调控、交联度调节和功能基团的引入,实现防污性能、附着力和耐久性的协同优化。近年来,嵌段共聚、接枝聚合、超分子自组装等策略,为防污涂层赋予了更强的分子可设计性,推动了其在复杂海洋

3.2 表面改性与界面粘结增强方法
为实现高分子防污涂层与钛合金基体的高效结合,必须采取科学的表面改性与界面粘结增强措施。钛合金表面在自然环境下极易生成一层致密的氧化膜,这虽提升了耐蚀性,但往往削弱了涂层的物理粘结。机械打磨、喷砂等物理方法能够粗化基体表面,提高涂层的机械锁合力;酸蚀、碱蚀等化学处理不仅去除表面杂质,还能引入活性位点,利于化学键合的形成。等离子体活化技术通过在表面引入极性基团,显著提升高分子链段的定向排列和粘结强度。此外,偶联剂如硅烷、磷酸酯等能够在钛合金与高分子之间搭建化学“桥梁”,进一步增强界面结合。近年来,层层自组装(LBL)、原位聚合和多功能接枝等新技术不断涌现,极大丰富了钛合金/高分子界面的结构调控手段,为提升防污涂层服役可靠性奠定了坚实基础。

3.3 防污涂层的制备工艺与优化

高分子防污涂层的制备工艺不仅决定了成膜均匀性,还影响其防污和耐久性能。刷涂、喷涂等传统工艺因施工便捷、适用范围广,常被用于船舶大面积防护。浸渍与旋涂则能实现薄膜致密、表面光滑,适合对表面质量要求较高的部件。制备过程中,涂层厚度的精准控制、交联剂的合理选用及固化温度的优化,对保证涂层致密度和与基体的界面粘结至关重要。实际工程应用中,为应对不同服役环境和结构复杂度,常通过分步涂覆、多层复合和梯度结构等方式提升涂层的功能集成度和服役寿命。近年来,数字化喷涂、自动化固化及智能工艺监控技术不断成熟,使高分子防污涂层的大规模制备和工程化应用成为可能,大大提升了制备效率与质量一致性,也为高端船舶制造的智能化转型提供了新支撑。

4 高分子防污涂层的性能表征与机理分析

4.1 防污性能的测试方法

防污性能的科学评估是高分子防污涂层研发与应用的基础环节。实验室内常采用静态浸泡实验,将涂覆样品长时间浸泡于人工海水或天然海水中,定期观察和统计生物附着物的数量与种类,以评估涂层对微生物、藻类及贝类等的抑制效果。动态流场防污试验则通过模拟船舶实际运行环境,检测涂层在流体剪切力作用下的防污能力,揭示其长期服役性能。除此之外,现场挂板试验是最贴近真实工况的方法,将试样悬挂于不同海域,周期性取样分析生物附着与涂层表面变化。为深入理解防污机制,还需结合接触角测量、表面能测试及摩擦系数测试等物理表征手段,系统分析涂层表面特性与生物附着行为之间的内在关系,为高分子防污材料的