

基于文献计量法的海洋防污涂料研究现状与热点分析

袁舟, 高方方, 左慧丹, 晏景新, 贾贤补, 石浩洋
(武警士官学校, 杭州 310023)

摘要: 选取 Web of Science 数据库, 以海洋防污涂料为主题进行搜索, 时间截取 2015—2025 年, 共检索核心期刊文献 529 篇, 采用文献计量学方法对其进行定量分析。结果表明: 海洋防污涂料研究已经引起全球的关注, 我国在该领域也加大了政策支持和增加科研经费投入, 主要集中在攻关智能涂层、仿生材料等前沿方向, 欧美国家更看重智能响应、生物酶解等方向。研究中材料科学占据主导, 如对防污涂料表面特性优化、黏附机制探究等, 但也有环境科学、生物学等多学科交叉融合的影子, 如抗菌性能提升及环保型涂料研发等。未来, 预计该领域会在智能化、环保化方向持续深化, 跨学科融合将进一步加深。同时, 为加速科研成果转化, 进一步拓展国际合作。

关键词: Web of Science; 海洋防污涂料; 文献计量法; 可视化分析

中图分类号: TQ637 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)09-0047-06

Research Status and Hotspot Analysis of Marine Antifouling Coatings Based on Bibliometric Methods

YUAN Zhou, GAO Fang-fang, ZUO Hui-dan, YAN Jing-xin, JIA Xian-bu, SHI Hao-yang
(NCO, Academy of PAP, Hangzhou 310023, China)

Abstract: The Web of Science database was selected to conduct a search on the theme of marine antifouling coatings, with a time frame spanning from 2015 to 2025. A total of 529 core journal articles were retrieved and subjected to quantitative analysis using bibliometric methods. The results reveal that research on marine antifouling coatings has garnered global attention. In China, increased policy support and research funding have been directed toward this field, with a focus on cutting-edge advancements such as smart coatings and biomimetic materials, while Europe and the United States prioritize areas like intelligent responsive systems and bio-enzymatic degradation. Materials science dominates the research landscape, exemplified by studies on optimizing surface properties of antifouling coatings and exploring adhesion mechanisms. However, interdisciplinary integration with environmental science, biology, and other fields is also evident, particularly in enhancing antibacterial performance and developing eco-friendly coatings. Moving forward, the field is expected to deepen its focus on intelligent and environmentally sustainable solutions, with further interdisciplinary collaboration. Additionally, expanding international cooperation will be crucial to accelerate the translation of scientific discoveries into practical applications.

Key words: Web of Science; marine antifouling coatings; bibliometrics; visualization analysis

0 引言

海洋生物污损是指海洋微生物、动物和植物在水

下设施设备或船舶水线以下表面黏附聚集现象, 在生活中常见藤壶大面积黏附在船体表面, 生物污损对海洋经济带来较大的损失, 因此各国竞相在该领域投入人力财力进行研究, 发展新型防污技术, 提高海洋经济效益, 为了深入掌握近年来海洋防污技术的研究动态与应用进展, 本文通过文献计量法对当前防污技术研

收稿日期: 2025-05-16

作者简介: 袁舟(1989—), 男, 硕士, 副教授, 主要从事材料应用方面的研究工作。E-mail: 841990900@qq.com。

究成果进行可视化分析和总结,并对未来的研究方向进行了展望。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

聚焦海洋防污涂料现状,并对相关热点展开分析。为确保可靠性,研究选择 Web of Science 数据库中的文献作为样本进行分析。将检索主题设定为 antifouling coating 或 anti-fouling paint 或 marine biofouling control 或 fouling-release coating 或 self-polishing coating 或 environment friendly antifoul, 限定检索时间跨度为 2015—2025 年,通过筛选检索结果,剔除一些低效信息,如与主题关联不强的会议纪要、报纸等,最终选取 529 篇 SCI 核心期刊,并以“Tab delimited file”的格式进行导出,文献检索时间为 2025 年 4 月 16 日。

1.2 研究方法

相比于定性分析,定量研究可靠性更强。文献计量法强调量化分析,擅长以数据说明内在联系,既利用数学方法,又涵盖了统计学特点^[1],优势比较明显。鉴于此,本文选取文献计量法展开研究,采用 VOSviewer 软件^[2]对海洋防污涂料的研究现状与热点进行可视化分析,对检索文献的发文量、作者、国家、机构、学科以及研究热点等多维度数据进行分析整理,并借助 origin 软件绘制部分图表。

2 结果与分析

2.1 发文量

发文量是衡量一个研究领域活跃程度的重要指标,其不同时间段的数量及变化能够清晰地反映学科的发展态势。整理筛选得到的 529 篇文献,以年为单位进行划分,发现从 2015 年到 2025 年,有关海洋防污涂料的文献研究数量总体呈现稳中有升趋势(见图 1),这有力说明海洋防污领域已广泛走入全球科研的视野,引起重点关注。锚定时间进一步分析,2015—2019 年,海洋防污涂料的研究呈现出平稳增长的态势;而到了 2020—2024 年,发文量出现了小幅增长,究其原因可能是实施了全球“绿色协议”等区域性法规,其实施在一定程度上推动了防污技术纳入可持续发展议程。同时,纳米材料^[3]、仿生技术、自修复涂层^[4]等跨学科领域的创新性突破,也为海洋防污涂料深入研究注入了希望。

2.2 主要发文作者

发文作者是研究领域的中坚力量,为直观反映科研核心的合作发展情况,基于 VOSviewer 软件构建其合作网络共现图谱。通过统计 529 篇文献的发表作者,发现这些文献共涉及到 2 446 位作者,说明越来越多

研究学者将目光转向了海洋防污涂料研究领域。为深入摸清发文作者的内在联系,研究利用 VOSviewer 软件进一步分析,将 6 定为最小阈值,得到 28 条检索数据。如图 2 所示,这 28 位作者构成的相对稳定的合作团体数目为 7,且连接项集最大数目为 8。通过分析发文作者分布,发现其优势在于 7 个合作团体内部稳固成熟,各核心作者学术联系紧密,一定程度上反映了该领域研究思路与方法的阶段性成熟,相较之前取得了长远进步。但也有不足,如研究力量过于集中,可能会导致研究领域过度依赖某些核心群体,不利于该研究领域的持续创新发展等。

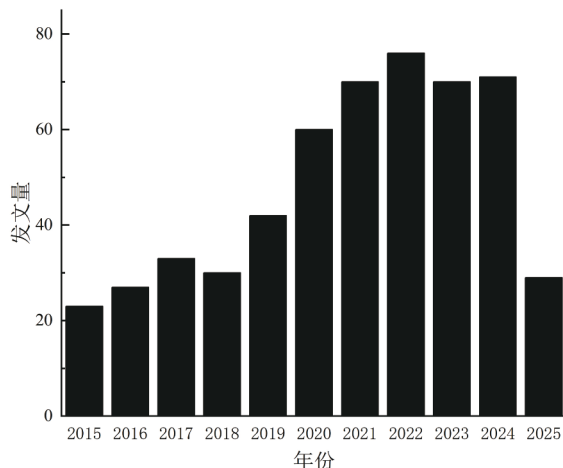


图 1 2015—2025 年海洋防污涂料研究的年度发文量

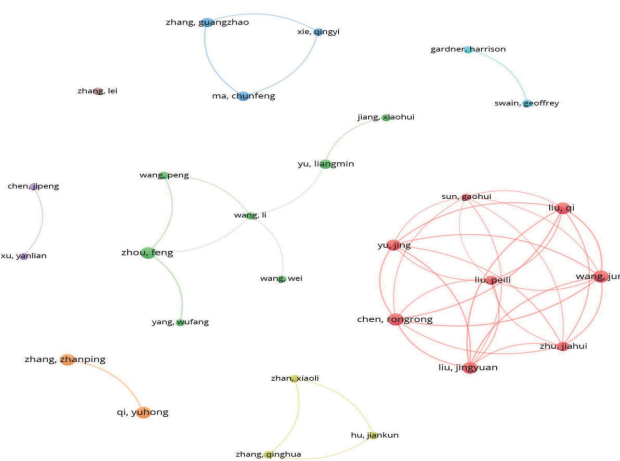


图 2 海洋防污涂料研究作者合作关系网络

此外,对排名前十的发文作者进行罗列(见图 3),发现均来自中国,这与中国推行的“海洋强国”战略^[5]以及“十四五”海洋科技创新专项等政策息息相关。正是有了这样的宏观政策支持,海洋防污领域才取得了较大的技术突破,与之相随的是中国在该领域强劲的话语权与引领力。

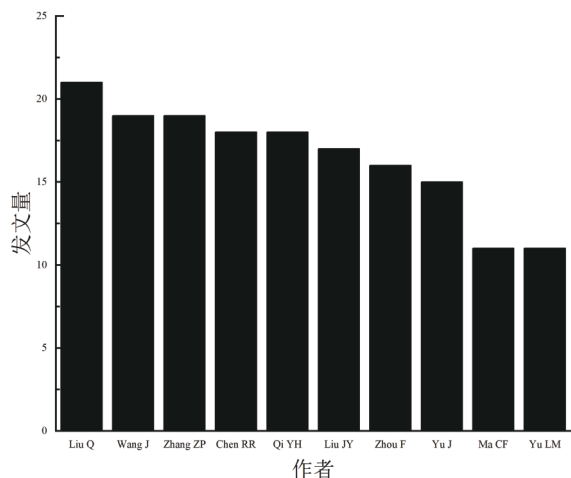


图 3 海洋防污涂料研究发文量前十的作者

2.3 主要发文国家

发文国家体现的是国家之间的研究力量、研究水平和研究活跃度。通常来说,一个国家发文数量与其投入的人力、物力和财力成正比,投入越多,发文数量也就越多。经统计,检索到的 529 篇文献共涉及到 56 个国家(地区),对排名前十的国家进行了整理,如图 4 所示,排名较靠前的是中、美、韩、印、英等国家,中国尤为突出,发文量断层式领先,这也印证了发文作者前十均为中国学者的检索结果。这表明中国在海洋防污涂料研究领域走在世界前列,不论是基础研究还是技术创新都拥有雄厚的实力,尤其在合成新型防污材料、生物防污技术等方面取得较大突破,其研究成果在世界范围影响深远,这离不开中国历年来海洋科技发展政策的施行,如在“十四五”规划中明确指出将环保性能列为未来海洋材料研发重点。鉴于此,许多高校和企业强强联手,攻关合作,创新研发了新技术、新材料。经调查,中国的研究集中在“智能涂层”^[6-7]和“仿生材料”等前沿方向。而研究文献涉及 56 个国家(地区),也从侧面说明海洋防污领域是一个世界级难题,需要全球通力合作,携手治理。

此外,对排名靠前的 10 个国家发文年限加以整理,如图 5 所示,发现印、英、韩发文较早,但技术路线相对传统、创新性不够,如印度曾长期研究含铜涂料^[8],韩国专注于寻找有毒有机锡材料的替代品^[9]。美、澳、荷、德发文时间次之,倾向于生物环保领域,如美国在 2018 年后重点开发生物降解涂料^[10](如利用酶分解污损生物),德国则创新了环保喷涂工艺(用二氧化碳代替化学溶剂)。而法、加、中发文最晚,但后劲有力、不容小觑,如中国凭借政策支持和资源集中的优势,直接跳过传统技术阶段,主攻石墨烯涂层^[11]、自修复材料等“高精尖”领域;加拿大则利用海洋生物研究优势,开发

出模仿贝壳表面的防污涂层^[12]。时间变化体现了各国研究的“特色化”,集中反映了各国不同时间段关注点的差异。

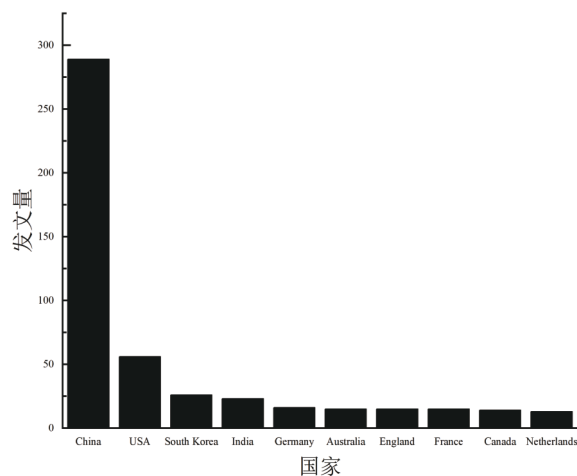


图 4 海洋防污涂料研究发文量前十的国家

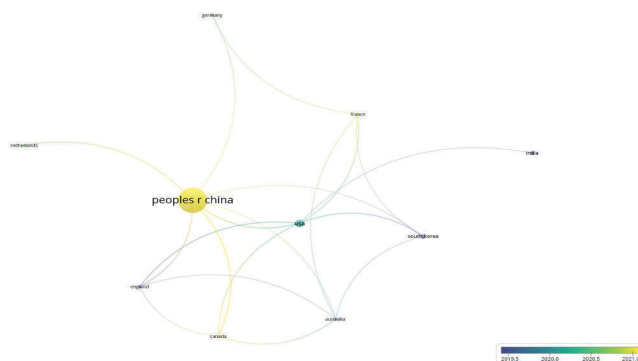


图 5 各国海洋防污涂料研究年限

2.4 主要发文机构

海洋防污涂料研究发文量超过 5 篇的机构分布如图 6 所示。

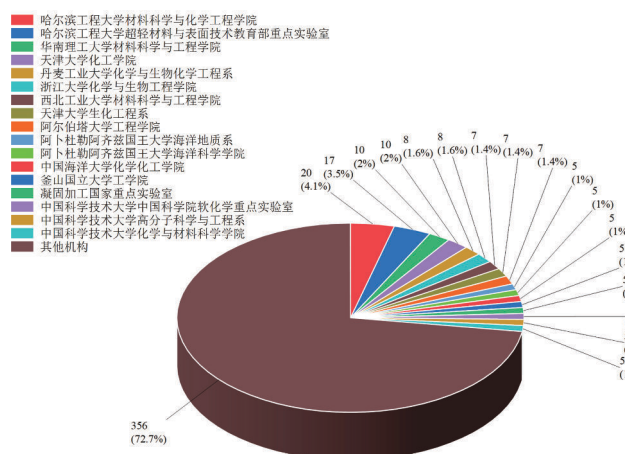


图 6 海洋防污涂料研究发文量超过 5 篇的机构分布

这一结果表明,我国机构在海洋防污涂料研究领域占据主导地位,尤其是哈尔滨工程大学的相关学院和实验室表现尤为突出。这主要是由于中国科研机构的支持和资金的大量投入,使他们能有效集中各项资源优势,在短时间内迅速开展相关研究。相比之下,在高发文量机构中,国外机构的占比相对较低,这可能与各国在海洋防污涂料资源配置策略和研究重点方向上的差异密切相关。展望未来,中国机构有望继续在该领域领先发展,并进一步发挥现有优势,巩固成果,提升科技创新能力。

此外,研究发现大量机构发表的论文不足5篇,这表明尽管对海洋防污涂料研究领域的总体关注度较高,但研究力量分布不均、研究不够深入。因此,各机构也可进一步拓展研究领域,特别是加强在新兴技术领域的探索,从而促进多元化的技术发展。未来随着国际合作的加强,将有效促进国内外机构的合作交流,对于促进知识共享和技术交流,全面推动全球海洋防污涂料研究具有重要意义。

2.5 学科分布

通过对 Web of Science 数据库进行主题检索,对结果中查询到的学科分布加以统计,发现共涉及到61个学科领域。如图7所示,发文量超过30篇的学科(同一文献可以划属于不同的学科)共12门,有两大学科发文量超过100篇,其中 Materials Science Multidisciplinary 学科发文量为149篇,占比13.1%, Materials Science Coatings Films 学科发文量为120篇,占比10.5%,而有49门学科单科发文量不足30篇,总发文量才281篇,占比24.6%。

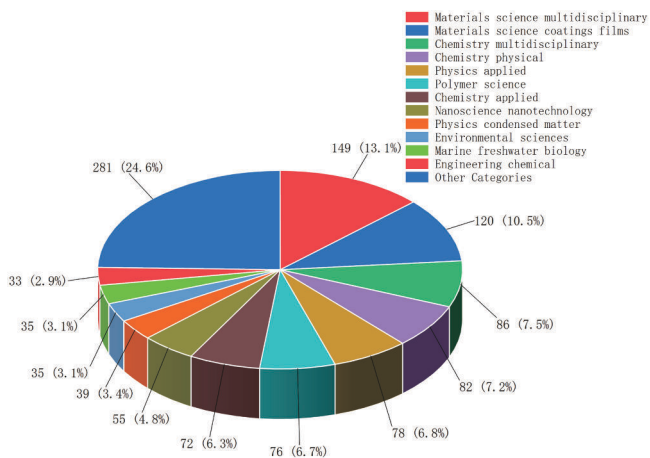


图7 海洋防污涂料研究学科分布

这些数据表明,海洋防污涂料的研究主要集中在材料科学领域,尤其是多学科材料科学和涂层薄膜领域,这两个学科的发文量显著偏高。研究海洋防污涂

料,本质上隶属于材料科学领域,涉及材料的合成、性能优化、耐久性以及与海洋环境的相互作用。由于技术互通,研究材料科学的学者对防污材料研发具有天然优势,因此该领域的发文量较高。Materials Science Multidisciplinary 庞大的发文量一定程度上反映了海洋防污涂料研究跨学科的特性,侧面证明了涂料研发既需要材料科学方面的知识,也要加强对化学、生物学、物理学等多学科知识^[13]的理解把握。这种多学科交叉融合的研究模式大大促进了不同领域学者的合作交流,有利于助推技术新发展、新跨越。Materials Science Coatings Films 的高发文量也证明了涂层薄膜技术^[14]在海洋防污涂料研究中发挥着重要作用,其直接关系到涂料的防污性能和实施效果。

可以预见,未来海洋防污涂料研究重心依然在材料科学领域。随着纳米技术、智能材料等前沿技术的不断进步,材料科学领域的研究也将持续深化,从而带动防污涂料性能的全面提升。此外,环保和可持续发展是海洋防污涂料研究一以贯之的追求,未来在研发防污涂料时除了提升其使用寿命和性能外,将更加注重环境友好性,以进一步维护海洋生态的平衡,实现人类与环境的可持续发展^[13,15]。

2.6 主要研究热点

关键词高度概括反映了文章的主旨内容,其统计情况能直观反映研究热点和发展态势。选取 Web of Science 数据库进行主题检索,2015—2025年间发表的关于海洋防污涂料主题的文献共提及了2641个关键词,将 VOSviewer 软件最小阈值设为13,检索到50个数据结果。如图8~10所示,除去如 antifouling coating、antifouling、coating、marine 之类的标题词以及重复性词语外,高频词汇分别是 surfaces、adhesion、performance、antibacterial、polyurethane、resistance、biofouling、fouling-release coatings 等。

Surfaces、adhesion、performance 之类的高频词表明防污涂料表面特性、黏附机制和性能优化得到了研究者的广泛关注。这可能是由于提升防污效果的重点在于改善涂料的表面光滑度、减除海洋生物的黏附能力以及增强其在海洋环境中的耐久性和稳定性。随着海洋生物污损问题的暴露,人们对其认识不断加深,也试图从生物角度寻求解决途径。Antibacterial、biofouling 之类高频词的出现,则体现了研究者对涂料抗菌性和环保性的关注,人们对海洋生态保护的需求也更加迫切。同时,对 polyurethane 等新型材料的研究,为海洋防污涂料发展提供了更为广阔的前景。

未来,全球会愈发重视海洋保护策略,环保型防污涂料的研发将受到更多关注。因此,研究过程除了提升

涂料的抗菌性能和抗污能力外,更要注重研发环境友好型防污产品和涂料配方。为达到更高效、更环保的目的,可以向与材料科学交叉融合的多学科寻求帮助,共同探索新型防污机制,如智能响应型涂料、仿生防污涂料等,以进一步减少对环境的干预。后期随着研究的深入,将会全面加强对涂料性能的综合评估,包括但不限于耐久性、经济性、施工便利性等多个方面,以适应不同场景需求。

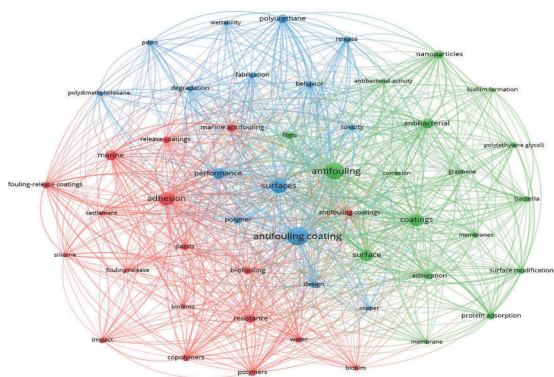


图8 海洋防污涂料研究关键词共现网络

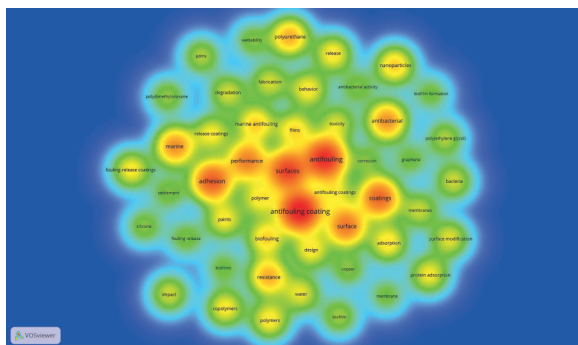


图9 海洋防污涂料研究关键词热点

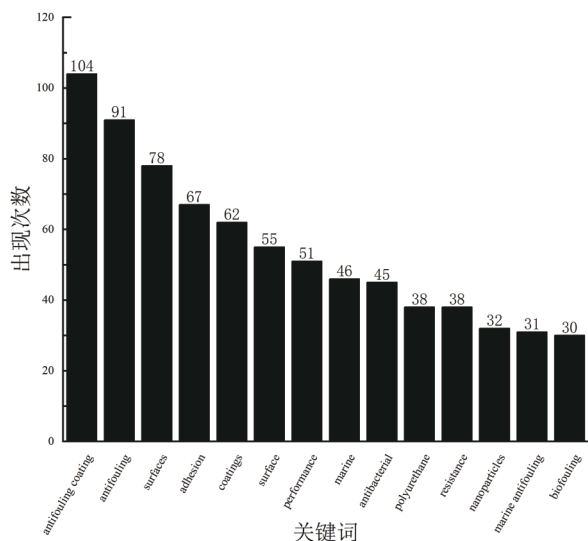


图10 海洋防污涂料研究关键词频率超过30次的统计

3 结论

3.1 研究趋势

3.1.1 中国引领全球研究格局的重构

近年来,中国在海洋防污涂料领域的科研影响力显著增强,其驱动力源于政策导向与产业需求的协同效应。以“海洋强国”战略为依托,叠加全球船舶制造业43%的产能占比,中国从技术跟随者跃升为创新引领者。研究路径已从传统防污材料转向智能涂层^[6-7]、仿生界面等前沿领域,并通过“政策引导-产业转化-学术突破”的三维联动模式,持续巩固其国际竞争优势。

3.1.2 跨学科融合推动技术范式变革

材料科学作为该研究领域的核心技术,对其研究占比高达23.6%,其进展直接决定防污技术的迭代方向。随着生态毒性风险与工程适配性问题的凸显,研究边界向环境科学、生物学等学科延伸,传统单一材料优化的局限性逐渐暴露。未来研究需以“高效性能-环境兼容-经济可行”的多目标协同为核心,构建跨学科融合的技术范式。

3.1.3 环保法规加速技术革新

国际海事组织(IMO)2023年生物杀灭剂新规及全球碳中和目标的推行,倒逼技术向低毒、可降解方向转型。抗菌涂层、生物基材料等新技术快速崛起,而依赖重金属/有机锡的传统体系正逐步退出历史舞台,标志着行业向绿色化、可持续化迈进。

3.1.4 区域技术路径差异化凸显

各国技术路线呈现显著地域特征:中国聚焦长效有机硅涂层的工程化应用;欧美以智能响应涂层、生物酶解技术为突破口,探索颠覆性创新;印度、巴西等新兴国家则挖掘天然防污剂^[10]的潜力。这种“差异化竞争、局部突破”的格局,反映了全球技术研发的多元性与互补性。

3.2 未来展望

3.2.1 跨学科协同催生技术新范式

未来技术发展将依赖三大交叉方向:一是材料科学将与人工智能^[7]深度结合,利用机器学习预测涂层分子结构,缩短研发周期。二是生物学与工程学跨界协同,通过借鉴海洋生物抗污机制,开发生态响应涂层。三是环境科学的深度介入有助于建立全生命周期评估体系,以准确把握防污效能与生态影响的平衡。

3.2.2 智能化与环保化双轨并进

智能涂层技术将加速发展,重点集中在光/热/pH响应型涂料研发上,实现防污剂的精准可控释放,减少环境负荷。绿色材料的研发与推广是大势所趋,推广生

物降解基材和低碳工艺(如超临界 CO₂ 喷涂技术^[17]),以积极响应全球碳中和目标。

3.2.3 颠覆性技术储备决定未来竞争力

颠覆性技术将占据未来技术制高点,必须发掘潜在的颠覆性技术领域如量子点光催化、噬菌体防污等并提前布局、抢占先机。同时为提升我们的竞争力,积极探索集防污-防冰-防腐多功能于一体的涂层技术,有力破解北极航道等新兴特殊场景应用难题,以进一步在全球高端市场站稳脚跟。

参考文献:

- [1] ZHOU F, GUO H C, HO Y S, et al. Scientometric analysis of geostatistics using multivariate methods [J]. *Scientometrics*, 2007, 73(3): 265-279.
- [2] JAN V E N, LUDO W. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping [J]. *Scientometrics*, 2010, 84(2): 523-538.
- [3] 葛世荣. 智能表面工程[J]. *中国表面工程*, 2024, 37(1): 1-17.
- [4] 姜丹, 黄国胜, 马力, 等. 仿生表面/涂层在金属腐蚀防护中的研究进展[J]. *表面技术*, 2022, 51(6): 180-193.
- [5] ZHI L, RUIJIE Y, FENG L. Management of maritime laws based on China's maritime power strategy [J]. *Journal of Coastal Research*, 2020(SI): 125-128.
- [6] CHEN X, ZHENG B, ZHOU S, et al. Development and application of intelligent coating technology: A review [J]. *Coatings*, 2024, 14(5): 597.
- [7] 沙伟华, 田永丰, 施颖波, 等. 浅谈人工智能在化学涂料领域的应用[J]. *现代涂料与涂装*, 2023, 26(10): 39-42.
- [8] LYASNIKOVA A V, MARKELOVA O A, LYASNIKOV V N, et al. Plasma-sprayed nanostructured composite coatings based on Cu-containing hydroxyapatite [J]. *Mechanics of Composite Materials*, 2016, 52(1): 109-112.
- [9] 刘刚, 王庭慰, 狄超. 有机锡催化剂对粉末涂料用聚酯树脂合成的影响[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2018, 40(4): 35-39.
- [10] CHEN H, ZHOU Z, ZHENG B, et al. Development and characterization of biodegradable water- and oil-resistant coatings based on derivatized cellulose, sodium alginate, and shellac for paper-based packaging [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2025, 303: 140490.
- [11] 王冰, 单晓晖, 杨秀, 等. 石墨烯基自修复防腐涂层的研究进展[J]. *涂料工业*, 2024, 54(10): 23-29.
- [12] PATRICK W, NICOLAS H, ANDREAS M, et al. A direct bio-combinatorial strategy toward next generation, mussel-glue inspired saltwater adhesives [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2014, 136(36): 12667-12674.
- [13] 王晓, 俞建, 李钦哲, 等. 船舶涂料研究进展[J]. *现代涂料与涂装*, 2024, 27(6): 31-35.
- [14] CHEON Y A, NAM J S, SON K S, et al. Development and analysis of graphene oxide thin film coating [J]. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-B*, 2015, 39(5): 463-469.
- [15] 杨建文, 王小军. 丙烯酸锌自抛光海洋防污涂料的研究进展[J]. *现代涂料与涂装*, 2024, 27(5): 22-25.
- [16] 王毅, 张盾. 天然产物防污剂研究进展[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2015, 35(1): 1-11.
- [17] NUNES A V M, DUARTE C M M. Dense CO₂ as a solute, co-solute or co-solvent in particle formation processes: A review [J]. *Materials*, 2011, 4(11): 2017-2041. ◆

(上接第 46 页)能、动量与冲量的介质动力学框架,提供了不可或缺的试验支撑和有力的理论验证。

6 结语

本文系统阐释了砂磨机中介质的运动机制与涂料的流变特性之间的耦合机制,但在多相体系中,颜填料颗粒-介质-涂料之间的耦合作用仍缺乏系统化建模。未来研究可引入计算流体动力学(CFD)与离散元法(DEM)等仿真手段,量化介质运动轨迹、冲击强度与能量耗散路径,构建具备预测能力的动力学模型;同时,通过在线流变仪实时采集涂料的流变数据,并通过传感器同步获取主轴转速、电机电流、物料温度、物料流速、冷却水温度与腔体压力等运行数据,结合动力学

模型与参数响应规律,实现对这些工艺参数的动态调节,构建具备自适应能力的智能砂磨机。这将有望改变传统砂磨工艺对经验优化的依赖,克服砂磨机工艺参数调节的滞后性,推动砂磨机技术迈向数据驱动的智能制造阶段。

参考文献:

- [1] A STROBEL, J SCHWENGER, S WITTPAHL, et al. Assessing the influence of viscosity and milling bead size on the stressing conditions in a stirred media mill by single particle probes [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2018, 136: 859-869. ◆