

防污性渔网材料的应用与创新

陈逸鸿¹, 石建高^{2*}, 宋伟华³, 符立招⁴

¹浙江海洋大学水产学院, 浙江 舟山

²中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海

³国家海洋设施养殖工程技术研究中心, 浙江 舟山

⁴广东省海洋投资发展有限公司, 广东 湛江

收稿日期: 2024年11月24日; 录用日期: 2024年12月19日; 发布日期: 2024年12月26日

摘要

随着海洋渔业资源的日益枯竭和海洋生态环境的恶化, 传统渔网材料在使用过程中会对海洋生物造成伤害越来越大。每年因渔网缠绕、划伤等原因导致的海洋生物死亡数量惊人。传统渔网还容易附着海洋生物和藻类而形成生物污垢, 导致渔网堵塞、破损, 增加了渔业生产的成本, 加剧海洋污染。防污性材料是防治生物污染最为方便有效的方法, 传统的有机锡类防污材料含有重金属成分, 长期使用严重也会海洋生态环境, 因此开发高效、环保的防污性渔网材料是渔业可持续发展的必然要求。目前, 主流的绿色防污材料包括自抛光型、低表面能型和仿生型防污材料等。本文主要探索防污性渔网材料的创新与应用, 分析材料研发的成功经验和技术手段, 为开发高效、环保防污材料提供参考。

关键词

防污性渔网, 防污材料, 创新技术, 纳米技术

Application and Innovation of Antifouling Fishing Net Materials

Yihong Chen¹, Jianguo Shi^{2*}, Weihua Song³, Lizhao Fu⁴

¹School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan Zhejiang

²East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai

³National Engineering Research Center for Marine Aquaculture, Zhoushan Zhejiang

⁴Guangdong Ocean Investment Development Co., Ltd., Zhanjiang Guangdong

Received: Nov. 24th, 2024; accepted: Dec. 19th, 2024; published: Dec. 26th, 2024

*通讯作者。

Abstract

With the depletion of Marine fishery resources and the deterioration of Marine ecological environment, the traditional fishing net materials will cause more and more damage to Marine organisms in the process of use. The number of Marine life deaths caused by fishing net entanglement, scratches and other causes every year is staggering. Traditional fishing nets are also easy to attach Marine organisms and algae and form biological dirt, leading to blockage and damage of fishing nets, increasing the cost of fishery production and aggravating Marine pollution. Antifouling materials are the most convenient and effective way to prevent and control biological pollution, traditional organotin antifouling materials contain heavy metal components, long-term serious use will also affect the Marine ecological environment, so the development of efficient and environmentally friendly antifouling fishing net materials is an inevitable requirement for the sustainable development of fisheries. At present, the mainstream green antifouling materials include self-polishing, low surface energy and bionic antifouling materials. This paper mainly explores the innovation and application of anti-pollution fishing net materials, analyzes the successful experience and technical means of material research and development, and provides reference for the development of efficient and environmental protection anti-pollution materials.

Keywords

Anti-Fouling Fishing Net, Anti Fouling Materials, Innovative Technology, Nanotechnology

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

每年因渔业活动产生的废弃物和污染物数量惊人,对海洋生态系统造成了巨大的压力[1]。这些污染物包括废弃渔网、生物污垢、塑料垃圾以及化学残留物等,它们不仅破坏了海洋生物的栖息地,还导致了生物多样性的减少。废弃渔网常常成为海洋生物的“死亡陷阱”,即形成幽灵网具,许多鱼类、海龟等生物因误入其中而丧生。化学残留物通过食物链进入人体,对人类健康构成潜在威胁。生物污垢是指一个或多个生物体在规定的时间内附着在与水接触的材料表面。生物污垢是渔业生产活动最常见的问题之一。随着人类生活水平的提高和对海鲜的需求,海水养殖迅速发展。目前,水产养殖业主要是海上的,并且每年都在增长[2]。随着该行业的发展,出现了渔网污染的新问题[3]。生物污垢的强度因季节、地理区域和环境条件(如温度、pH值和盐度)而异。海藻、贝类和其他无脊椎动物等海洋生物粘附在渔网和其他一些海洋设施上已成为一个严重的环境问题[4]。渔网是渔业的实用工具之一,大多数传统渔网由尼龙6、聚乙烯(PE)、超高分子量聚乙烯(UHMWP)或类似材料制成[5]。

防污材料是专门设计的材料去除或防止海洋生物附着在湿润表面的能力。防污原料由氧化亚铜(或其他铜化合物)和其他生物杀灭剂配制而成,可阻止藤壶、藻类和海洋生物的生长[6]。虽然含有氧化铜的染料可以有效地防污,但它们也对环境有害。氧化铜(I)是一种防污剂,含有氧化铜(I)的防污涂料对非目标海洋生物具有剧毒[7]。随着全球渔业资源的日益紧张,传统渔网材料在使用过程中产生的污染问题愈发凸显,对海洋生态环境的破坏严重。因此,亟需新的防污性材料出现为渔业产业的高质量、可持续发展提供新的解决方案。发展防污性渔网材料是为保护海洋生态环境、落实负责任渔业所迈出的重要一步。

未来,随着科技水平提高和环保意识日益增强,防污性渔网材料将在渔业领域发挥更加重要的作用。

2. 防污性渔网材料的研发背景与意义

2.1. 渔业生产造成的污染问题

进入 21 世纪以来,全球生产力发展进入加速时代,渔业产业也发展快速。联合国粮食及农业组织发表的《2022 年世界渔业和水产养殖状况》报告显示,2022 年水生动物产量比本世纪头十年的平均水平高出 30%,比 20 世纪 90 年代的平均水平高出 60% 以上[8]。但渔业产业发展快速的同时,也出现了过度捕捞、水域环境污染、鱼类产卵场退化、渔业水域荒漠化等渔业资源环境恶化,非健康不生态的高密度养殖、违规用药等水产品质量安全等问题[9]。这些由渔业生产活动造成的污染问题也直接或间接地影响社会发展多个方面。经济上,渔业污染加剧鱼类资源减少,产量的减少给渔民造成直接的经济损失。

在东南亚沿海个别以渔业经济为主的地区,传统高密度养殖模式造成的污染问题严重,鱼类市场价格急剧下降,渔民经济陷入瘫痪,产业陷入严重贫困[10]。渔业养殖残余物、废弃渔具和其他污染物对水体的污染给生态系统带来严重影响。在班达尔阿巴斯市海岸线附近发现由渔业生产活动引起的重金属污染,对浅海岸区域显著影响,污染引发的蓝藻爆发直接导致水生生态系统的退化[11]。渔业污染对人类食品安全威胁越来越大。

调查显示,越来越多的海产品被检测出重金属及其他有害物质超标,原因是季节性生物积累,食用这些海产品的人群存在较大的健康风险。某些病原体和化学污染物会通过食物链积累,受污染的水产品会给消费人群带来巨大的健康隐患。此外,渔业污染还会压缩水生生物的生存空间,如人类活动造成的污染物会直接破坏海豚类等生物的栖息环境。在泰国海湾内陆,如果不及时采取预防措施,污染问题将产生不可逆的严重后果。捕捞产生的海洋垃圾、尤其是塑料污染,已成为全球性的问题,导致海洋生态系统健康状况急剧恶化[12]。面对这一严峻形势,防污性渔网材料的研发与应用显得尤为重要。防污性渔网材料能够有效减少渔业活动中的废弃物和污染物排放,降低对海洋生态系统的破坏;同时,它们还具备耐用、易回收等特点,有助于实现渔业的可持续发展[13]。加强研发与应用防污性渔网材料需要政府、科研机构、企业和社会各界的共同努力。政府应出台相关政策,给予鼓励与支持;科研机构应加强技术创新和成果转化,推动防污性渔网材料的不断升级和完善;企业应积极采用防污性渔网材料,提高渔业生产的环保水平;社会各界也应加强宣传和教育,提高公众对渔业污染问题的认识和重视程度[14]。

2.2. 发展防污性渔网材料的意义

随着全球渔业资源的日益紧张,传统渔网材料在使用过程中产生的污染问题愈发凸显,对海洋生态环境的破坏严重。因此,亟需新的防污性材料出现为渔业产业的高质量、可持续发展提供新的解决方案。发展防污性渔网材料是为保护海洋生态环境、落实负责任渔业所迈出的重要一步。未来,随着科技水平提高和环保意识日益增强,防污性渔网材料将在渔业领域发挥更加重要的作用。

海洋生物及其代谢物与泥沙等杂质在海上养殖设施(如网箱、扇贝笼和养殖围栏)表面吸附、生长和繁殖而形成的生物称为海洋生物污损,这些海洋生物污损给海洋渔业开发与利用活动带来了很多问题[15]。藤壶、贻贝和藻类等海洋污损生物会吸附在渔网上,在一定条件下渔网上的污损生物代谢产物会毒化水产养殖环境、滞留有害微生物,使鱼类等养殖对象极易发病,还会堵塞网孔导致养殖网具内外水体交换不畅等问题,从而给养殖业造成重大损失[16]。水产养殖海况千变万化和海洋污损生物种类繁多导致渔网等渔业防污技术难度较大,这已成为一个世界性的难题。因此,开发绿色、长效的防污性渔网材料意义重大。防污性渔网材料因其优异的耐用性和抗腐蚀性,能够延长渔网的使用寿命,减少渔业生产中的成本投入。这不仅有助于提升渔业的经济效益,也为渔民提供了更加可靠和高效的捕捞工具。防污性渔网

材料的广泛应用，还有助于推动渔业产业的转型升级，实现渔业资源的可持续利用。

3. 主要的防污性渔网材料

防污性渔网材料是解决海洋渔业捕捞和养殖中各种问题的关键，如避免网具的堵塞、减少维护成本和延长使用寿命。在探讨防污性渔网材料的应用与创新时，有以下几种常见的防污性渔网材料。

3.1. 金属网衣防污材料

铜基材料由于其出色的防污效果而被广泛使用，尤其是在渔业中。研究显示，铜处理的网具在控制生物污损方面效果显著，铜合金等特种金属合金材料能够抑制细菌及水生生物的生长[17]。目前在深水网箱、深远海网箱、大型生态养殖围栏等养殖装备的研发领域，许多国家都采用金属合金网衣技术，我国也进行了铜合金网衣网箱(亦称铜网箱)及铜合金网衣围栏(亦称铜围栏)的技术创新和试点探索[18]。中国水产科学研究院东海水产研究所石建高研究员等联合国际铜业协会及相关院所校企单位开展了“铜合金网箱海水养殖研发”项目，并联合恒胜水产等单位完成铜合金网衣围栏的整体设计、建造安装和产业化养殖应用，助推了铜合金网衣在我国水产养殖装备上的创新应用[19]。

3.2. 低表面能防污材料

污损生物能够形成群落的条件是成功附着，低表面能防污材料就是利用这种特性来阻止污损生物的生长。低表面能利用其超低的表面能使污损生物不宜附着，或可在高速水流冲刷状态下使已附着的污损生物脱落下来[20]。涂层表面能的高低决定了污损生物附着的数量，表面能越低，污损生物就越难以附着。研究表明，只有当涂层与水的接触角超过 98° 或者其表面能低于 $25 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 时，涂层的表面才会具有防污和自清洁的功能[21]。因其特殊的防污机理，整个涂层的使用过程没有防污剂的存在与释放，因此不需要考虑到防污剂对海洋环境的影响，符合各国对环保性能的需求，是防污材料的重点研究方向之一。目前低表面能防污材料系列主要是有机硅系列、有机氟系列以及其改性产品[22]。周涛等利用新型自由基改性聚合材料技术对丙烯酸聚酯树脂进行了有机硅改性复合，通过对热性分析及接触角测试的实验结果分析证明，在有机硅材料加入改性后，能够有效地帮助改善改性丙烯酸聚酯树脂的耐热性与疏水性[23]。

3.3. 自抛光型防污材料

自抛光型防污材料的特点是通过防污材料漆膜中的毒料在海水中溶解并释放从而达到防污的目的[24]。这种防污材料漆膜在海浪、海流等作用下，不断发生水解反应，并不断地暴露出新的漆膜表面[25]。因自抛光型防污材料类产品的毒料释放会按设计渗出率平稳持久地进行，所以它们在设计周期内可实现防污性能的持久和高效。现有的自抛光防污材料是在有机锡自抛光的基础上变化改进而得，比有机锡自抛光防污材料更加绿色环保，适应各国绿色环保的政策要求，是目前防污材料的一大研究方向[26]。于雪艳等合成了具有自抛光性能的丙烯酸锌树脂，制备无锡环保型自抛光防污材料，该材料的主要防污剂是 Cu_2O ，不仅具有优异的防污性能，而且具有显著的自抛光性能，减少常见无锡自抛光涂料中铜离子释放造成的海洋环境和生物危害[27]。于良民等制备了一类接枝的功能性丙烯酸锌树脂，浅水挂板试验表明，丙烯酸锌树脂具有良好的物理性能和防污性能[28]。

3.4. 水凝胶涂层材料

防污水凝胶结合了高效的防污效果和优异的机械性能，成为较有前景的海洋防污材料。值得注意的是，水凝胶因其固有的抗生物粘附性而引起了人们的关注。一旦在水中完全溶胀，水凝胶就会在水凝胶/

水界面形成水合层,从而抑制生物附着[29]。水凝胶还可以与功能性杀菌剂或纳米颗粒结合使用,以提高其灭菌质量,使其对生物污垢非常有效[30]。尽管有这些优点,但水凝胶往往受到机械强度差的限制,特别是在海洋复杂的动态环境中,很容易被损坏[31]。Qin 等人制备了具有优异防污性能的两亲性水凝胶防污材料[32]。然而,它的拉伸强度仅为 0.1 MPa,这限制了在复杂环境中的应用。Xiong 等通过干燥再溶胀法诱导 PVA 产生大量微晶区域制备出一种具有强机械性能、高抗藻粘附能力和高防污性能的 DN-PHMB 水凝胶[33]。该种水凝胶拉伸强度和断裂伸长率分别高达 17.23 MPa 和 388.35%。在抗菌实验中,其利用阳离子和离子的相互作用有效地抵抗大分子蛋白质的粘附,杀菌率高达 100%。在实际海洋防污测试中,附着在其表面的活/死细菌比例分别为 0.89%和 4.70%,表现出强大的抗藻粘附能力,覆盖率仅为 0.09%,具有出色的防污效果。这种高强度 DN-PHMB 防污水凝胶为实用海洋防污水凝胶的开发提供了一种策略。

3.5. 多层纳米复合薄膜材料

纳米材料具有独特的物理和化学性质,能够有效地防止海洋生物在渔网表面的附着。纳米银粒子因其抗菌性能被广泛应用于渔网防污领域。马登峰等人采用水热法制备出掺杂 Ag 元素的 TiO_2 , 抗菌率高达 99%。研究表明,纳米银粒子能够破坏附着生物的细胞结构,从而达到防污的目的;使用纳米技术制备的多层纳米复合薄膜,如 ZnO 和 Cu_2O ,可以用于渔网表面,显示出良好的防污能力[34]。G. Decher 等采用逐层分子自组装技术,将基于纳米颗粒的纳米 ZnO 、 Cu_2 和硼酸锌等多层复合薄膜应用于超高分子量聚乙烯(UHMWPE)渔网的制备上[35]。对于阳离子表面电荷,采用浸涂法用聚乙烯亚胺对 UHMWPE 渔网进行预处理,使纳米 ZnO 、 Cu_2O 、硼酸锌复合多层膜沉积在渔网上。制成的渔网被放置在位于爱琴海的一个养鱼场 6 个月。实验结果表明,纳米复合薄膜对微生物表现出优异的防污活性。

3.6. 仿生微结构防污材料

仿生微结构防污材料通过研究生物表皮的形态和特征,例如鲨鱼和荷叶,发现其微观表面呈现出微米规则的突起结构,能够极大地减少生物污垢的可附着区域,比光滑的表面减少生物污垢附着的效果更显著[36]。模拟制备这种微结构表面,可以使污损生物难以在表面附着,或者使已附着的生物更加容易被水流冲刷脱落,从而达到防污效果。Karen L. Wooley 研发了一种由超支链氟化聚合物和线性聚乙烯乙二醇构成微观上呈现纳米尺寸的亲/疏水相间结构,结果证明,该结构有良好的防污性能,并由此提出了附着点理论,即防污材料能够被生物污垢附着的点数越少,生物污垢就越难以附着[37]。张金伟等制备了具有不同结构特征的材料,其表面具有不同的物理和化学性质,并研究了这些性质对硅藻等污损生物附着的影响[38]。

4. 防污性渔网材料的制备工艺与技术

4.1. 防污性渔网材料的制备工艺流程

防污性渔网材料的制备工艺流程不仅复杂,而且十分精细,它涉及许多关键的步骤和环节。第一个关键的环节,是需要选取合适的原材料,如高分子聚合物、无机纳米粒子改性纤维、生物降解材料等,这些材料需兼具高标准的防污性能和耐用性。其次,通过熔融挤出、纺丝等工艺,将原材料加工成渔网所需的纤维或纱线。在这一环节,需要对温度、压力等参数精确控制,以确保纤维或纱线的质量和性能达标[39]。

接下来,将纤维或纱线进行编织或编成网,形成渔网的基本结构。在编织环节中,为确保渔网的均匀性和稳定性,需要采用专业的编织技术和专门的编织设备。为了提高渔网的防污性能,在编织过程

中要根据预定标准加入防污剂或涂层，制备出的渔网表面形成一层防污层，能有效阻止海洋生物附着和生长。

4.2. 防污性渔网材料的性能测试

在防污性渔网材料的研发过程中，渔网材料需要进行一系列的防污性能测试。一是对材料的耐腐蚀性进行测试，通过模拟海水环境，观察材料在不同时间段的腐蚀情况。二是进行生物附着性测试，将渔网材料置于含有海洋生物的环境中，观察其表面生物附着的数量和种类。三是对材料的机械性能进行测试，包括拉伸强度、撕裂强度等指标。测试防污性渔网材料在保持优异防污性能的同时，是否还具备较高的机械强度，是否能够满足渔业捕捞和养殖的需求等。

除了上述基本性能测试外，还需引入分析模型和引用行业内的权威研究。例如利用生物膜形成模型来预测材料在长时间使用后的防污性能变化。同时参考国内外关于防污性渔网材料的研究文献，对比分析不同材料的性能差异，进一步验证防污性渔网材料在性能上的优越性。在性能测试过程中，材料的环保性能测试必不可少。通过检测材料在生产和使用过程中可能产生的有害物质排放情况，确保防污性渔网材料在具备优异性能的同时，也符合环保要求。

4.3. 关键技术环节与难点分析

制备防污性渔网材料的关键技术环节与难点主要集中在材料的选择、制造工艺的水平以及性能的稳定性等方面。材料的选择是制备防污性渔网的基础，需要综合考虑材料的防污性能、机械性能、耐候性等因素。如果某种高分子材料只具备良好的防污性能，但其机械性能较弱，也难以满足渔网的实际使用需求。因此选择材料需权衡各种因素，找到性能最优的平衡点。制造工艺的水平低下使得传统的渔网在制备过程中普遍出现生产效率低、能耗高等问题。提高防污性渔网的生产效率和质量，要引进新的制备工艺和技术。如通过引入自动化生产线和智能化控制系统，实现渔网的快速制备和实时的精准控制，提高生产效率的同时降低能耗。

性能稳定性的提升也是制备防污性渔网的重要难点。由于渔网在使用过程中需要长时间浸泡在水中，材料在不同状态下所表现的性能稳定性是一个重要的指标。提高渔网的性能稳定性，可以采用表面处理技术、添加剂等手段来改善材料的耐水性和耐腐蚀性。同时，通过提升制备工艺和参数，也可以提高渔网的性能稳定性和使用寿命。

5. 防污性渔网材料在渔业中的应用实践

5.1. 防污性渔网材料在捕捞作业中的应用

防污性渔网材料在捕捞作业中的应用，不仅提升了渔业生产的效率，在保护海洋生态环境方面也发挥了重要作用。以浙江平阳南麂列岛渔村为例，引入防污性渔网材料后，渔民们发现渔获量明显增加，同时渔网的损耗率也大幅下降[40]。据统计，使用防污性渔网材料的渔民，其渔获量相比传统渔网提高了近 20%，而渔网的更换频率也降低了近一半。这一显著成效得益于防污性渔网材料出色的耐磨损、抗腐蚀性能，有效延长了渔网的使用寿命，减少了因渔网破损导致的渔获损失。

防污性渔网材料可以有效减少海洋的生物污垢在渔网上的附着，从而降低了清理和维护的难度。这不仅减轻了渔民的劳动强度，也提高了捕捞作业的效率。防污性渔网材料的应用也有助于减少渔业活动对海洋生态系统的破坏，对保护海洋生物的多样性和生态平衡起到积极作用。业内专家指出，防污性渔网材料的研发和应用是渔业可持续发展的关键一环。随着科技的不断进步和环保意识的日益增强，未来防污性渔网材料将在更多领域得到广泛应用。

5.2. 防污性渔网材料在养殖领域的应用

在养殖领域，防污性渔网材料的应用日益广泛。瑞安市养殖户陈永国用新型防污性渔网建造围网围栏养殖大黄鱼，有效减少了养殖过程中的污染问题。该种渔网为中国水产科学研究院东海水产研究所石建高研究员等采用特种超高强度纤维绳网材料制备而成，具有强度高、韧性大、网片水下受阻力小、防污效果显著等特点。据统计，该种渔网投入使用后，养殖水体中的污染物含量降低了 30%，显著提升了水质，为养殖生物提供了更加健康的生长环境[40]。同时，该材料还具有良好的耐用性和抗老化性能，使用寿命长达五年以上，大大降低了养殖成本[41]。

防污性渔网材料在养殖领域的应用不仅体现在减少污染上，还体现在提高养殖效率方面。具备良好防污性能和结构的渔网渔具，可以实现对养殖生物的精准控制，提高养殖密度和产量。有些防污性渔网材料还具有良好的透气性和透水性，有助于保持养殖水体的生态平衡，减少疾病的发生和传播[42]。养殖领域的专家们通过一系列实验和数据分析，对防污性渔网材料的性能进行了全面评估。他们发现，通过改进材料的制备工艺和配方，可以进一步提升其防污性能和耐用性。同时，专家们还提出了针对不同养殖环境和生物需求的定制化解决方案，为养殖业的可持续发展提供了有力支持。

6. 防污性渔网材料的创新发展方向

防污性渔网材料的创新发展方向呈现出多元化和高效化的趋势。科技的发展，新型防污性渔网材料不断涌现，如生物降解材料、纳米防污涂层等，这些材料不仅具有优异的防污性能，还具备环保、可持续等特性。以纳米防污涂层为例，纳米防污涂层技术也取得了显著进展，其防污性能也得到了广泛认可。通过纳米粒子的特殊性质，实现对海洋生物的有效排斥，从而提高了渔网的防污效果。以下是几种防污性渔网材料的创新方法和发展方向。

具有微相分离结构的防污材料，是由两种或多种不同性质的单体链段组成，它的特点是对脂多糖、蛋白质和游动孢子等粘附更具抵抗力，防污性能更好、应用前景广阔。如由聚乙二醇交联的超支化含氟聚合物。

生物防污型渔网材料以其独特的生物防污性，在减少渔业污染方面展现出显著优势。近年来，生物来源的防污剂因其低毒性和易分解性而受到广泛关注。目前，已经从海洋微生物中提取了多种生物衍生的防污剂、藻类，底栖无脊椎动物和陆生植物。这些生物防污剂为环保防污技术提供了新的可能性。Pan 等人发现，通过将海洋细菌的丁烯内酯与改性聚氨酯相结合制备的防污涂料在海洋挂样 3 个多月的测试中表现出了出色的防污性能。他们还发现，可以通过调节聚氨酯中软链段链的长度来实现丁烯内酯的受控释放。Desbois 等人发现硅藻提取物对金黄色葡萄球菌具有很强的抗菌活性，其中游离脂肪酸对增强防污活性有着显著影响。此外，生物防污型渔网还具有良好的耐用性和强度，能够满足渔业捕捞作业的需求。在实际应用中，一些沿海地区的渔民已经开始尝试使用这种新型渔网，并取得了良好的环保效果。

抗菌型渔网材料也因其独特的性能特点而受到关注。这种材料通过添加抗菌剂，能够有效抑制细菌和微生物在渔网上的生长，从而减少了渔网因污染而导致的破损和老化。Wang 等通过界面聚合使聚六亚甲基盐酸胍(PHGH)与均苯三甲酰氯(TMC)反应制得复合纳滤膜，对大肠杆菌杀菌率达到 100%。实验数据显示，抗菌型渔网在长期使用过程中，其抗菌效果能够保持稳定，显著延长了渔网的使用寿命。同时，这种材料还具有良好的耐候性和耐腐蚀性，能够适应各种复杂的海洋环境。Gulsah 等利用微胶囊技术制得一种抗菌性防污材料，通过使用喷雾干燥法作为氧化铜染料的替代品，获得了生态和环境友好型活性物质复合胶囊，以获得对渔网的防污性能。在渔场环境测试中，通过优化选择 2:1 和 4:1 胶囊比例，并用水性聚氨酯和丙烯酸粘合剂浸渍到 100% UHMWPE 渔网上，带有聚氨酯粘合剂的 2:1 比例微胶囊表现出

很好的防污性能。经过长期研究观察，微胶囊化过程对渔网的强度和伸长率性能没有显著影响。因此，上述新型抗菌防污材料为研发长期防污效果的材料提供了新的思路。

环保涂层型渔网材料也是当前研究的热点之一。通过在渔网表面涂覆一层环保涂层，可以有效防止海洋生物附着和污染物的吸附。如电导涂层是新开发的一种新型导电性涂层，可以用于渔网的阳极，浸泡在海水中产生自由氯，从而抑制海洋污秽生物的附着和生长。长期田间测试表明，这种涂层在耐久性和抗污方面表现出色。如铜和硅胶涂层。Swain 等测试了未涂层、铜涂层和硅胶涂层的渔网材料，结果表明，铜处理对控制污秽最有效，而硅胶处理网则最易清洁，显示了较低的阻力和控制污秽的优良性能。这些涂层材料不仅具有优异的防污性能，而且对环境友好，不会对海洋生态造成负面影响。在实际应用中，一些大型渔业企业已经开始采用环保涂层型渔网，取得了显著的防污效果。

以上各类防污性渔网材料在性能特点上各具优势，能够满足不同渔业场景的需求。通过深入研究材料的性能特点和应用效果，可为渔业可持续发展提供有力的技术支持和保障。同时，需要关注新型材料在实际应用中的挑战和问题，不断完善和优化其性能。根据未来的发展要求，防污性渔网材料的创新发展方向将更加注重环保、可持续和智能化，研发环保型、可降解型防污材料会是一个重要方向。智能化技术的不断发展，将智能化技术应用于渔网材料中，实现渔网的智能监测、自动清洁等功能，也将成为未来的发展趋势。

7. 结语

防污性渔网材料的应用与创新面临着诸多挑战。环保法规的日益严格对渔网材料的防污性能提出了更高的要求。欧盟已实施严格的渔具环保标准，对渔网材料的生物防污性和防污性能进行了明确规定。为满足这些要求，需要不断研发新型防污材料，提高材料的生物相容性和防污性。防污性渔网材料的制备工艺复杂，成本较高，这也是制约其广泛应用的重要因素。想有效降低成本，工业生产必须要具备规模化的生产模式、机械化的工艺流程、高效的生产效率，才能降低单位产品的原料损耗，减少生产成本。政府和企业都要加大研发投入，才能逐步推动防污性渔网材料的产业化进程。面对上述挑战，需要采取积极的应对策略。一方面，加强国际合作与交流，借鉴国际先进经验和先进技术。另一方面，加大人才培养和引进力度，培养一支具备创新能力和实践经验的研发团队，为防污性渔网材料的研发提供有力的人才保障。

防污性渔网材料的研究与应用将呈现更加广阔的前景。据预测，到 2030 年，全球防污性渔网材料的市场规模有望达到数十亿美元，显示出巨大的市场潜力。2019 年 1 月，经国务院同意，10 部委联合印发《关于加快推进水产养殖业绿色发展的意见》，对中国水产养殖业的转型升级提出新要求。防污性渔网材料在渔业中的应用将更加广泛，不仅限于捕捞作业，还将拓展至养殖、加工等多个领域。在探讨研究方向上，可以借鉴其他领域的成功经验，如纳米技术、生物仿生技术等，将其应用于防污性渔网材料的研发中。通过纳米技术，是否可以制备出具有优异防污性能的纳米涂层材料，提高渔网的耐用性和使用寿命；结合生物仿生技术，是否能设计出更加符合自然规律的防污结构，使渔网在海洋中更加和谐地存在；目前国内外已经有多个研发团队正在朝着这些方向不断探索。未来渔业发展对防污性渔网材料的性能评估也会提出新的要求。通过建立科学的、标准化的评估体系，可以对不同类型的防污材料进行客观、全面的评判，为实际应用提供理论支持。总之，防污性渔网材料的研究与应用具有广阔的前景和巨大的潜力。我们期待未来能够涌现出更多创新性的研究成果，为渔业可持续发展贡献智慧和力量。正如著名海洋生物学家 Rachel Carson 所言：“我们必须与其他生物共同分享我们的地球。”通过不断探索和创新，我们相信防污性渔网材料将成为实现这一愿景的重要工具之一。

基金项目

广东省海洋投资发展有限公司波纹龙虾吊笼养殖技术研发及应用示范科研项目(项目编号: HF-(2024)-JY-FW-008)。

参考文献

- [1] 刘丹丹, 李京梅, 李淑琴, 等. 如何联接海洋生态损害和管理政策响应: 生态生产函数构建与补偿政策设计[J]. 生态学报, 2024(18): 1-10.
- [2] 李易珊. 渔业污染治理的“德清行动” [J]. 海洋与渔业, 2019(7): 26-27.
- [3] 温州市人民政府办公室关于公布温州市市级群众和企业到政府办事“最多跑一次”事项清单(第二批)的通知[J]. 温州市人民政府公报, 2017(3): 13-40.
- [4] 霍佳昕, 胡秀彩, 夏苏东, 等. 小丑鱼创伤弧菌的分离鉴定及药敏特性研究[J]. 天津农学院学报, 2024, 31(4): 49-54.
- [5] 印野. 偏氯乙烯-丙烯酸甲酯-甲基丙烯酸缩水甘油酯悬浮共聚树脂的制备与性能研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [6] 刘泽. 新型聚硅氧烷/微胶囊/银仿生防污涂层的制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 汉中: 陕西理工大学, 2024.
- [7] 刘术辉, 张凯, 张华庆, 等. 新型有机硼防污剂在自抛光防污涂料中的匹配稳定性和防污性能研究[J]. 材料导报, 2024, 38(S1): 546-551.
- [8] 联合国粮农组织《2024年世界渔业和水产养殖状况》报告[J]. 世界农业, 2024(7): 145.
- [9] 杨子江, 刘龙腾, 李明爽. 我国渔业发展的基本态势和面临问题[J]. 中国水产, 2018(12): 65-68.
- [10] Chuenpagdee, R. and Pauly, D. (2004) Improving the State of Coastal Areas in the Asia-Pacific Region. *Coastal Management*, **32**, 3-15. <https://doi.org/10.1080/08920750490247445>
- [11] Farzingohar, M., Khakpour, Z., Ahmadzadeh Shaghooei, M. and Soory, A. (2020) Fishing Port Pollution Due to the Vessel Activities along Bandar Abbas Coast, Iran. *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, **3**, 47-53. <https://doi.org/10.29252/ijcoe.3.4.47>
- [12] Awuchi, C.G. and Awuchi, C.G. (2019) Impacts of Plastic Pollution on the Sustainability of Seafood Value Chain and Human Health. *International Journal of Advanced Academic Research*, **5**, 46-138.
- [13] 杨越, 陈玲, 薛澜. 寻找全球问题的中国方案: 海洋塑料垃圾及微塑料污染治理体系的问题与对策[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(10): 45-52.
- [14] 王立端. 基于可持续发展的中国绿色设计体系构建[M]. 北京: 北京图书公司, 2020.
- [15] 魏盛军, 蔡文鸿, 丁兰, 等. 福建海上养殖设施污损生物处理方式现状调查[J]. 渔业研究, 2023, 45(2): 147-154.
- [16] 杨海猛. 表面生物附着对船舶阻力的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [17] 张凤仪, 石建高, 张健, 等. 功能性渔用材料的研究现状与展望[J]. 水产学报, 2024, 48(8): 089703.
- [18] 石建高, 余雯雯, 赵奎, 等. 海水网箱网衣防污技术的研究进展[J]. 水产学报, 2021, 45(3): 472-485.
- [19] 石建高, 余雯雯, 卢本才, 等. 中国深远海网箱的发展现状与展望[J]. 水产学报, 2021, 45(6): 992-1005.
- [20] 李跃瑞, 蔺存国, 王利. 海洋污损生物黏附机制与酶防污技术研究进展[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(4): 1-7.
- [21] 吴业伟, 石建高, 张文阳, 等. 海水养殖网箱防污损生物技术的进展[J]. 渔业研究, 2024, 46(3): 228.
- [22] 麻春英. 船舶防污方法研究进展[J]. 化工新型材料, 2019, 47(7): 31-34.
- [23] 周涛, 李欢, 程琳, 等. 纳米杂化有机硅丙烯酸防腐疏水树脂合成及应用[J]. 徐州工程学院学报(自然科学版), 2019, 34(2): 1-9.
- [24] 王华进, 王贤明, 管朝祥, 等. 海洋防污涂料的发展[J]. 涂料工业, 2000, 30(3): 35-38.
- [25] 王越, 张敏, 石建高, 等. 渔用防污材料的研究进展及其在渔业上的应用[J]. 海洋渔业, 2021, 43(2): 247-256.
- [26] Yan, X.-P., et al. (2012) Research Status and Advances of Tribology of Green Ship. *Tribology*, **32**, 410-420.
- [27] 于雪艳, 陈正涛, 王科, 等. 环境友好型自抛光防污涂料的研制及性能[J]. 化工新型材料, 2016, 44(7): 252-254, 257.

- [28] 于良民, 徐焕志. 一种酰胺衍生物共聚物的制备方法及应用[P]. 中国专利, 03111823.2. 2003-01-10.
- [29] Lu, G., Tian, S., Li, J., Xu, Y., Liu, S. and Pu, J. (2021) Fabrication of Bio-Based Amphiphilic Hydrogel Coating with Excellent Antifouling and Mechanical Properties. *Chemical Engineering Journal*, **409**, Article ID: 128134. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128134>
- [30] Xie, L., Hong, F., He, C., Ma, C., Liu, J., Zhang, G., *et al.* (2011) Coatings with a Self-Generating Hydrogel Surface for Antifouling. *Polymer*, **52**, 3738-3744. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2011.06.033>
- [31] Wang, Y., Ren, X., Ma, X., Xue, L. and Ding, F. (2022) A Durable and Self-Cleaning Hydrogel Micro-Powder Modified Coating with Improved Utilization of Cu²⁺ for Marine Antifouling. *Journal of Polymer Research*, **29**, Article No. 221. <https://doi.org/10.1007/s10965-022-02940-8>
- [32] 蒋长妹, 花铭, 赵士友, 等. 聚乳酸油水分离膜研究进展[J]. 棉纺织技术, 2023, 51(7): 79-84.
- [33] Xiong, Y., Hu, D., Huang, L., Fang, Z., Jiang, H., Mao, Q., *et al.* (2024) Ultra-High Strength Sodium Alginate/PVA/PHMB Double-Network Hydrogels for Marine Antifouling. *Progress in Organic Coatings*, **187**, Article ID: 108175. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108175>
- [34] 马登峰, 彭兵, 柴立元, 等. 载银纳米二氧化钛抗菌粉体的制备工艺研究[J]. 精细化工中间体, 2006, 36(1): 63-66.
- [35] Kartal, G.E. and Sarıışık, A.M. (2020) Modifying of UHMWPE Fishing Nets with Layer-by-Layer Deposition Method for Antifouling Properties. *Journal of Coatings Technology and Research*, **18**, 163-171. <https://doi.org/10.1007/s11998-020-00392-7>
- [36] 王利, 马力, 雷黎, 等. 基于表面微结构复制与润湿性调控的水下仿生防污技术研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2022, 43(2): 242-250.
- [37] Banerjee, I., Pangule, R.C. and Kane, R.S. (2010) Antifouling Coatings: Recent Developments in the Design of Surfaces That Prevent Fouling by Proteins, Bacteria, and Marine Organisms. *Advanced Materials*, **23**, 690-718. <https://doi.org/10.1002/adma.201001215>
- [38] 张金伟, 郑纪勇, 王利, 等. 仿生防污材料的研究进展[J]. 中国材料进展, 2014, 33(2): 86-94.
- [39] 舒爱艳, 石建高, 余雯雯, 王越, 张敏. MMT 改性淀粉基纳米复合纤维的海水降解性能[J]. 水产学报, 2023, 47(5): 172-181.
- [40] 致富经. 神秘大网 一网卖出 3000 万[Z]. CCTV-17 农业农村频道, 2018-06-27.
- [41] 孙斌, 余雯雯, 石建高, 等. 渔用高性能网衣材料的研究进展[J]. 渔业现代化, 2020, 47(6): 1.
- [42] 苏振霞, 严岩, 黄良民. 海水贝类养殖中污损生物的防除研究进展[J]. 水产科学, 2007, 26(4): 240-243.