



· 综述 ·

## 功能性渔用材料的研究现状与展望

张凤仪<sup>1,2</sup>, 石建高<sup>2\*</sup>, 张健<sup>1</sup>, 张文阳<sup>2</sup>, 李亚婕<sup>1,2</sup>, 赵亮<sup>3</sup>,  
曹贻儒<sup>3</sup>, 吕昌麟<sup>1,2</sup>, 王淑婷<sup>2,4</sup>

- (1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306;
- 2. 中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海 200090;
- 3. 山东南山智尚科技股份有限公司, 山东 烟台 265700;
- 4. 上海理工大学材料与化学学院, 上海 200093)

**摘要:** 随着新材料技术的不断革新和现代渔业的高质量发展, 功能性渔用材料迎来了新的挑战, 同时也给现代渔业高质量发展带来新的机遇。功能性渔用材料在蓝色粮仓建设、渔业生态环境保护及绿色水产品供给等方面发挥了重要作用。为研发综合性能更加优越的功能性渔用材料, 本文概述了近年来功能性渔用材料的研究现状, 分析了防污材料、可降解材料、发光材料、抗菌材料等功能性渔用材料的应用进展以及现阶段存在的问题与不足, 并展望了今后的发展趋势, 以期功能性渔用材料的快速崛起和产业化应用等提供参考。

**关键词:** 功能性渔用材料; 防污材料; 可降解材料; 发光材料; 抗菌材料; 深远海网箱; 养殖围栏; 捕捞渔具

中图分类号: S 971

文献标志码: A

现代渔业高质量发展的同时, 人们对于渔用材料的要求也在不断提高, 传统渔业材料已不能满足人们的需求。目前, 一些防污材料及可降解材料在渔业上已被应用, 如具有防污功能的金属合金网衣、可降解鱼类聚集装置(FAD)材料等已经在渔业上应用, 其加工工艺不断革新、综合性能日趋提升。除防污材料、可降解材料外, 其他功能性材料如发光材料、抗菌材料、智能材料等, 也逐渐展示出应用于渔业领域的巨大潜力。功能性渔业材料的研发推动新材料领域的变革, 上述新材料的研发及产业化应用都是目前渔用材料领

域的研究热点。

### 1 几类重要的防污材料

网箱、扇贝笼、围栏(亦称围网)等养殖设施设置在海中一段时间后, 其网衣会附着污损生物。污损生物会影响养殖设施网衣内外的水体交换, 又毒化养殖环境、滞留有害微生物, 这将导致养殖品种疾病多发甚至死亡, 从而给水产养殖业造成重大损失。渔网防污问题以及防污技术升级已引发广泛关注<sup>[1-3]</sup>。目前应用比较广泛的防污材料主要有自抛光防污材料、低表面能防

收稿日期: 2023-07-07 修回日期: 2023-10-18

资助项目: 国家自然科学基金(31872611); 企业委托项目—生态型可降解人工集鱼装置(FAD)的研究; 工信部高技术船舶科研项目([2019]360); 企业委托项目—高强裂膜纤维等纤维产品的开发及应用示范

第一作者: 张凤仪, 从事网箱、围栏养殖、渔具及渔具材料研究, E-mail: 821762353@qq.com

通信作者: 石建高(照片), 从事深远海网箱、养殖围栏、渔具及渔具材料等研究, E-mail:

jiangaoshi666@163.com



污材料、纳米复合防污材料和金属网衣防污材料等<sup>[1]</sup>。

### 1.1 防污材料的分类及应用

**自抛光防污材料** 将由防污剂、高分子树脂、溶剂、填料、助剂等部分构成的防污涂料涂覆在普通渔网材料上即可制备具有防污功能的材料, 这是目前防止海洋生物附着渔网的有效措施之一。自抛光防污涂料主要通过在海水中水解释放出毒料实现防污性能, 可以保证在使用周期内防污性能持久、高效。三丁基锡 (TBT) 丙烯酸酯类共聚物基自抛光防污涂料有强杀菌性能, 在 1958 年由 Montermoso 等<sup>[4]</sup> 首次提出, TBT 可以使树脂同时具备自抛光及防污性能, 但 TBT 的强毒性严重污染海洋环境, 由此研发出更为环保的无锡防污涂料 (TF-SPC) 并在性能上进一步升级。但 TF-SPC 中的氧化亚铜并不是完全无毒, 为解决这一问题人们进行了新的尝试, Dong 等<sup>[5]</sup> 制备了一系列 BIT 丙烯酸酯防污树脂, 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。孙保库等<sup>[6]</sup> 开发了一种基于丙烯酸酯树脂的无铜自抛光防污涂料, 经浅海浸泡实验发现, 溶蚀速率与浸泡时间基本呈线性关系, 即防污涂料抛光速率是可以进行调控的, 防污效果的长效性、稳定性得到保障。

**低表面能防污材料** 低表面能防污材料因其涂层表面具有很低的表面能, 导致污损生物在外力作用下很难黏附在渔网等物体表面, 易于脱落。低表面能防污材料表面涂料无毒, 完全不含防污剂。目前低表面能防污涂料主要有两大类: 有机硅低表面能防污涂料和有机氟低表面能防污涂料<sup>[7-8]</sup>。于世长等<sup>[9]</sup> 按比例将有机硅树脂与含端羟基的硅油混合, 制备出一种低表面能的防污涂料。研究表明该涂层具有良好的防污性。Zhang 等<sup>[10]</sup> 合成了纳米二氧化钛/氟丙烯酸低表面能疏水防污涂料, 研究表明添加表面修饰的纳米二氧化钛可以显著提高涂层的防污性能, 研究结果为海洋防污材料的制备提供了一种无毒、环保的替代方法。

**纳米复合防污材料** 纳米材料具有可以改善传统材料诸多性能的优点。应用微胶囊技术<sup>[11]</sup>, 用水溶性树脂材料包被纳米级防污剂配制在涂料中, 微胶囊在海水中通过缓慢溶解释放防污剂从而达到防污效果。李善文等<sup>[12]</sup> 以纳米二氧化钛为

改性剂合成低表面能海洋防污涂料, 对合成的防污涂料进行了海上挂板实验, 结果发现, 加入的纳米二氧化钛可以使涂料的污损生物附着量大大减少, 防污效果明显提高。Chen 等<sup>[13]</sup> 采用改性丙烯酸树脂、纳米二氧化硅等制备了新型低表面能无毒海洋防污涂料, 污损生物难以黏附, 在高速流体动力下容易清除。Feng 等<sup>[14]</sup> 通过电沉积和硬脂酸改性在碳钢上制备了纳米锌涂层, 具有防腐蚀、防生物污染和自清洁功能的超疏水表面, 增强了防污性能。Ashraf 等<sup>[15]</sup> 采用微波辅助技术在聚酰胺渔网材料上合成了亲水性纳米氧化铜聚乙二醇甲基丙烯酸酯水凝胶; 进行 90 d 河口暴露实验, 与对照样相比, 其污染密度显著降低; 这项研究强调了纳米氧化铜聚乙二醇甲基丙烯酸酯水凝胶可以用来防止网箱等水产养殖设施的污损。

**金属网衣防污材料** 铜合金等特种金属材料能够抑制细菌及水生生物的生长。由上述具有抑菌功能金属材料制备的金属合金网衣可防止或抑制网衣附着物生长<sup>[16]</sup>。我国目前已在深水网箱、深远海网箱、大型生态养殖围栏等养殖装备上试用金属合金网衣技术, 并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。2009 年至今, 中国水产科学研究院东海水产研究所石建高研究员等<sup>[1-3, 16-17]</sup> 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。2020 年 5 月, 由马尾造船承建的“海峡 1 号”单柱式半潜深海渔场在福鼎海完成浮卸与系泊安装; “海峡 1 号”箱体采用铜合金网衣, 以解决深远海养殖网衣的污损问题<sup>[3, 16-17]</sup>。此外, 中国水产科学研究院东海水产研究所石建高等<sup>[2-3]</sup> 联合青岛浩赛机械有限公司开展了高清合金网衣在网箱等领域上的应用。目前主要使用铜合金网衣网箱等装备养殖经济价值高的鱼类, 例如大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 等<sup>[1-3, 17]</sup>。

### 1.2 防污材料发展趋势

目前自抛光防污材料在环境友好型树脂及防污剂方面的开发取得很大进步, 且具有广阔的前景, 面临的主要问题是制备涂料的成本高、防污期效短等。展望未来自抛光防污材料的发展趋势: 研制防污机制多元化的自抛光涂料, 弥补单一类

型防污涂料的不足, 朝着绿色环保、工艺简化、强化性能、增加防污期等方向发展<sup>[18]</sup>。低表面能防污材料也有一定局限性, 海水中的许多表面活性物质能够改变涂膜表面的状态, 例如生物代谢产物、油污及洗涤剂等, 涂覆表面张力增大, 低表面能防污涂料的功效就会消失; 重涂性不好, 与底漆的配套性较差; 用低表面能涂料处理的养殖网具需要进行定期的清理, 一旦污损生物在养殖网具生长并长大就很难清除掉<sup>[19]</sup>; 此外, 低表面能涂料开发和研制的费用比较昂贵, 有待进一步优化发展<sup>[20]</sup>。纳米复合防污材料是近年来研发出的新型材料, 相对于传统的防污材料来说对环境更加友好, 但是技术还不成熟, 实际研发和应用过程中技术难度大; 它对于技术的精准性要求高, 需要进一步改良发展, 以进行更广泛的推广应用。金属合金网衣防污效果虽然长效, 但是初始投资成本高、单位面积重量过大、网衣运输及装配不易等缺陷仍难克服, 限制其在普通网箱等传统养殖装备上大规模应用, 如今亟须大幅度降低价格、创造适合恶劣海况的金属合金网衣网箱结构等, 从而推动金属合金网衣在网箱及大型生态养殖围栏等养殖装备设施上的广泛应用。

以上防污材料大多处于改良发展阶段, 有应用范围窄、技术难度大、初始投资大、部分技术相对不够成熟等局限性, 但是对于发展绿色无污染、环保、长效的防污材料具有积极的推动作用。

## 2 可降解材料

渔业的不断发展使得人们对于海洋资源的需求量不断扩大, 对渔网的要求更高。渔用材料由稳定性强的化工原料加工合成, 其使用寿命、耐磨性等都有很高的提升, 但同时在废弃后很难被自然界分解, 这就造成环境污染。近年来, 废弃渔具困死海洋生物事件屡被报道。因此, 研制和开发可降解性渔用材料是降低“幽灵捕捞”、“白色污染”的有效途径。

### 2.1 几种重要渔用可降解材料

**聚乳酸 (PLA)** PLA 是一种新型的绿色环保材料, 这种材料具有良好的可生物降解性, 可在微生物作用下完全转化为二氧化碳和水, 即无害化降解, 对环境保护具有重要意义, 属于环境友好材料。PLA 具有强度高、耐热性好、光泽度高等良好性能, 广泛应用于医疗、医学、纺织等

领域, 也是绿色安全的渔用材料。陈晓蕾等<sup>[21]</sup>在研究光照和温度对 PLA/MMT 渔用单丝在海水中降解性能的影响时发现, 调整 MMT 含量、分散程度、环境温度、酸碱度等因素可初步实现 PLA 可降解渔用单丝在海水中降解速率的可控性。闵明华等<sup>[22]</sup>在采用熔融纺丝工艺制备渔用改性 PLA 纤维时添加了双官能团有机化改性纳米蒙脱土 (nano-MMT), 研究结果表明, 纳米蒙脱土可提高 PLA 纤维的结晶速率以及结晶度。热失重曲线表明, 纳米蒙脱土加速了 PLA 的热失重, 热稳定性下降会导致 PLA 纤维在海底、渔具之间摩擦时对热的敏感性增加, 造成 PLA 纤维表面发生摩擦热软化和黏着疲劳, 从而在一定程度上加快其降解<sup>[23]</sup>。Chen 等<sup>[24]</sup>发现一种有前景的聚合物共混物 (记为 PLA/PLGA), 在海水中表现出温和的降解速率, 并于 9 个月后完全降解。其中 PLA 用作聚酯基质, 聚乳酸-羟基乙酸共聚物 (PLGA) 作为额外的降解促进剂。PLGA 的水解首先发生并产生酸性端基, 而酸性端基又能有效地促进 PLA 的降解, 通过进一步改变 PLGA 含量, 从而实现共混聚合物在海水中降解速率的可控, 同时还保留了 PLA 良好的力学性能。舒爱艳等<sup>[25]</sup>通过渔场捕捞实验对比分析了 PLA 刺网与聚酰胺 (PA) 刺网的物理性能及捕捞效率。结果表明, 尽管 PLA 刺网的捕捞效率不如 PA 刺网, 但其在减轻“幽灵捕捞”、“白色污染”等方面具有明显优势。

### 聚己二酸-对苯二甲酸-丁二醇酯 (PBAT)

PBAT 不仅具有断裂伸长率高、韧性强、便于规模化生产等优异性能, 更重要的一点是其属于可完全生物降解材料, 且具有良好的力学性能。研究表明 PBAT 的力学性能与聚乙烯 (PE) 相当, 是目前研究成熟、最受欢迎的石油基可降解材料<sup>[26]</sup>。周耀文等<sup>[27]</sup>以碳酸钙作为填充剂改性 PBAT 材料并添加其他助剂共混制备复合材料, 结果表明, 当碳酸钙的添加量为 30% 时共混材料能够保持较好的力学性能且成本较低。PBAT 可以为 PLA 增韧, PLA 可以为 PBAT 补强, 但 PBAT 与 PLA 的相容性差, 添加合适的改性剂也是目前研究热点。李红娟等<sup>[28]</sup>将 PLA 与 PBAT 熔融共混, 并添加聚丁二酸丁二醇酯 (PBS) 改性, 结果表明 PBAT/PLA 复合材料的拉伸强度等随 PLA 含量的增加而明显提升, PBS 可以改善 PLA/PBS/PBAT 共混物的相容性。史鹏伟等<sup>[29]</sup>研究了高环氧基功能聚合物 (HPC-3510P) 作为增容剂对 PBAT/PLA



系列复合材料综合性能的影响, 结果表明 0.3% 质量分数的 HPC-3510P 即可明显提高这些复合材料的加工稳定性、力学性能等。

**聚己内酯 (PCL)** PCL 是由  $\epsilon$ -己内酯通过催化剂催化开环聚合制备的脂肪族聚酯<sup>[30]</sup>。PCL 结构中重复单元 C-C 键以及 C-O 键运动性强, 基于这一结构特点, PCL 的柔韧性及生物降解性都较优。PCL 在室温状态下呈现橡胶态, 熔点比较低, 容易热塑成型<sup>[31]</sup>, 具有良好的生物相容性。Lu 等<sup>[32]</sup> 设置不同盐度和细菌的水体研究微生物和盐类对生物降解 PCL 降解过程的影响。实验表明, 微生物和盐都对降解过程产生影响, PCL 在天然海水中降解速率最快。Guzman-Sielicka 等<sup>[33]</sup> 研究了来自波罗海的 2 种海水 (有和没有微生物) 中聚合物的降解过程, 所选聚合物材料为热塑性淀粉或碳酸钙改性的 PCL, 直接与未改性的 PCL 进行对比。实验表明, 在每个实验中, 被测聚合物样品都发生了降解。与没有添加微生物的海水系统相比, 该过程在有微生物的海水中更有效。海水实验表明, 用碳酸钙修饰 PCL 不但不会促进降解过程, 在某些情况下反而会抑制其降解。

## 2.2 可降解材料的发展趋势

可降解材料目前仍存在很多问题, 如 PLA 面临的生产技术难题有高精度高质量丙交酯原料受制, 且应用方面因其质地脆、韧性差、降解速率慢且控制难度大、生产成本高等存在困难; PBAT 结晶性差、熔体强度低、黏度较大、价格高昂等问题, 限制了其更为广泛的应用; PCL 材料存在使用上限温度低、降解速度较慢、力学强度不够等问题。采用共混、共聚、交联等物理或化学途径对可降解材料进行改性, 使之具备多重物理化学性质、降低生产成本、拓宽可降解材料的应用范围, 有望催生可降解材料市场的快速发展, 为我国治理“白色污染”开辟出一条新的途径。国家对于“限塑令”的执行力度不断加大, 意味着可降解领域拥有广阔的发展前景, 必将成为未来材料产业发展的热门领域。在渔用领域方面, 可降解材料可以大幅改善因“幽灵捕捞”造成的海洋生态环境被破坏、船舶航行受阻、海洋生物受伤或死亡等危害, 实现可持续发展。2024 年 5 月 13—18 日, 基于欧盟的提案, 印度洋金枪鱼委员会 (IOTC) 通过了有史以来在所有大洋中对漂流 FAD 采取的最严格的管理框架。其中包括 (1) 立

即禁止使用完全不可生物降解的漂流 FAD; (2) 计划到 2030 年逐步淘汰漂流 FADs 中的不可生物降解部件, 全面采用可降解 FAD 等。可降解 FAD 研发与应用因此非常重要与必要。近年来, 中国水产科学研究院东海水产研究所石建高研究员课题组联合中水集团远洋股份有限公司等单位开展了 FAD 及蟹笼等可降解渔具的研发、实验或产业化应用, “一种环保型聚拢吞拿鱼工具”、“隐蔽式集聚鲭鱼的装置”及“一种条带式聚集大洋性鱼类的设施”等可降解渔具专利获得授权与应用, 推动了我国可降解渔具的技术升级<sup>[34]</sup>。伴随渔用可降解材料研究的进一步深入及生产加工技术的进一步提高, 可降解材料有望在捕捞渔具与渔业设施等领域得到广泛应用。

## 3 发光材料

在不可再生资源日益枯竭及环境危机等问题愈发严峻的今天, 发光材料因其能够吸收能量并转化为光辐射的特性而备受瞩目。发光材料具有能耗少、可持续利用等优点, 是一种新型材料。目前发光材料的应用范围的不断拓宽, 在渔业上也应用广泛, 例如巢湖市鼎盛渔具有限公司制备了一种用于编织渔网的尼龙发光纤维, 其中的荧光粉成分能在夜间发光, 编织成渔网, 捕鱼效率高, 还可以在湖泊内制成警戒绳。Karlsen 等<sup>[35]</sup> 测试了一种新开发的发光网 (VISIONET) 是否可以改变拖网作业中 6 种商业重要物种的垂直行为, 结果发现, 低强度的光足以改变鱼类和后背螯虾属 (*Metanephrops*) 的垂直分布, 将物种垂直分离到不同的隔室, 有利于对不同大小的物种进行不同的选择性, 并可以提高渔获物的质量。

### 3.1 常见渔用发光材料

发光材料主要分为 2 大类: 主动发光材料和被动发光材料。目前, 应用最为普遍的化学反应荧光材料属于主动发光材料, 光亮强度高且能够持续发光。放射性荧光材料也属于主动发光材料, 虽然发光时间长, 但其毒性和环境污染使其利用范围受限<sup>[36]</sup>。被动发光材料因体系内能量在外界能量碰撞下变得活跃从而发光, 其中有机电致发光材料受到广泛关注, 具有成本低廉、体积小、质量相对较小、响应时间短、成膜性优良等特点。光致发光材料及电致发光材料也属于被动发光材料。不同的发光材料发光性能各异、致光因素也

各有不同, 应用在多个领域<sup>[37]</sup>。

**稀土发光材料** 我国在世界稀土市场占有率举足轻重的地位, 是稀土生产大国, 稀土储量、产量、出口量都十分可观。目前稀土新材料的开发和应用仍存在极大发展空间, 相较于发达国家仍有一定差距, 因此应利用我国的稀土资源优势大力发展稀土发光材料。

当前渔业上使用最多的发光材料是稀土铝酸铈发光聚合物复合材料, 通常在深海或是黑暗条件下进行水下作业时极为困难, 而由这种材料制备的发光纤维投入海洋使用可以有效解决这一难题。例如以长余辉稀土铝酸盐发光材料制备的稀土夜光纤维可以吸收可见光并储存在纤维中, 在黑暗环境下持续发光, 色彩多样且环保高效, 成为海洋新材料发展方向之一。将稀土铝酸铈添加到 PP、PE 或 PET 原料中可用于发光纤维和发光无纺布的制备; 将稀土铝酸铈添加到 PMMA 和 PU 中可用于功能性涂层的制备, 多用于深海水下作业和深海水下工程纤维领域。

**纳米稀土发光材料** 纳米稀土发光材料的基质粒子尺寸范围在 1~100 nm, 受纳米粒子本身具备的量子尺寸效应、小尺寸效应、表面效应、宏观量子隧道效应等影响, 稀土发光材料的纳米化可以给稀土发光材料赋予奇特的物理和化学特性<sup>[38]</sup>。中国水产科学研究院东海水产研究所采用纳米稀土发光材料改性聚乙烯, 制备出具有发光功能的聚乙烯单丝。用单丝制成蟹笼、张网, 可实现对三疣梭子蟹 (*Portunus trituberculatus*)、小黄鱼 (*Larimichthys polyactis*)、白带鱼 (*Trichiurus leporurus*) 等经济渔获的高效选择性诱捕。马梦姣<sup>[39]</sup>采用静电纺丝技术制备了成纤聚合物聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 纳米稀土发光纤维, 荧光光谱结果表明制备的纳米发光纤维具有良好的荧光性能。

### 3.2 发光材料的发展趋势

发光材料极有希望在渔业上创造出更大的价值, 例如相比于聚酯缆绳, 高强聚乙烯缆绳的刚度更高, 自重和直径也更小, 更容易运输和安装<sup>[40-42]</sup>。在深海使用时, 如果高强聚乙烯纤维具有发光特性, 那么将会对其在水下工作的效率有更大的帮助<sup>[43-44]</sup>。再如, 利用水下灌浆处理海底管道悬跨的作业问题时, 若灌浆袋能够在水下发光, 则有利于配合灌浆设备的使用, 更准确定位或观察灌浆袋的具体施工状况<sup>[45]</sup>。

目前, 中国对于稀土发光材料的开发与世界水平仍有较大差距, 要改善我国稀土发光材料自主创新能力的欠缺, 创造出有自主知识产权的新技术、新产业。在以下方面开展深入研究: 完善稀土发光材料理论体系; 探索稀土发光材料新的制备方法; 开拓稀土发光材料的新应用。对于纳米稀土发光材料来说, 要聚焦于对纳米稀土发光材料表面修饰的研究, 表面缺陷是影响发光效率的重要原因, 对表面修饰的深入研究有望改善纳米粒子与其他物质之间的相容性。从长远的眼光来看, 提高发光材料的性能, 研制具有更强适应性和更优性能的发光材料, 进一步提高其发光稳定性和发光时间, 降低其生产成本, 扩大其应用范围, 是当前需要重点解决的问题。

## 4 抗菌材料

目前抗菌材料的研究与应用受到渔业、纺织和医学等领域的高度重视。渔业上海洋生物污损问题是目前网具材料使用中的一大难题, 不仅会妨碍海洋渔业资源的开发利用及海事活动, 还会造成严重的经济损失。就目前来看, 抗菌材料是对抗海洋生物污损问题的方法之一。抗菌材料中的化学成分对有害微生物高度敏感, 能够通过物理反应、化学反应来抑制或杀死细菌<sup>[46]</sup>, 因而在渔业上的研发、试验或应用热度持续升高。抗菌材料主要分为无机抗菌材料 (IMA)、有机抗菌材料 (OAM) 和复合型抗菌材料 (HAM) 三大类。

### 4.1 抗菌材料的分类及应用

**无机抗菌材料** 无机抗菌材料是以无机材料作为载体, 同银、锌、铜等具有抗菌活性的金属离子、氧化物或光催化材料复合而成<sup>[47]</sup>。无机抗菌材料具有耐热性强、安全度高、抗菌谱广、效果稳定等优点。无机抗菌材料可以分为金属离子型无机抗菌材料、光催化型无机抗菌材料和复合型无机抗菌材料等。

金属离子型无机抗菌材料指将银、铜、锌等具有抗菌能力的金属离子及其盐化物作为主要抗菌成分。Copcica 等<sup>[48]</sup>以天然斜发沸石作为载体, 制备银斜发沸石, 研究对大肠杆菌 (*Escherichia coli*) 和金黄色葡萄球菌 (*Staphylococcus aureus*) 的抑制作用。结果表明其对这 2 种致病菌都有很强的抑制效果。光催化型无机抗菌材料主要是含有二氧化钛物质的材料, 能够通过光照产生羟基自

由基和超氧负离子, 这一化学性质可以降低微生物繁殖能力从而达到抑菌目的。丁军等<sup>[49]</sup>的实验证明将二氧化钛与银离子、铜离子复合, 能够发挥相互补充的抑菌作用, 有明显抑菌功能。复合型无机抗菌材料是通过不同的抗菌材料(如石墨烯、二氧化钛、银纳米粒子等)组合成抗菌效果更加优异的复合材料。复合型无机抗菌材料的环境适应性及抗菌稳定性都得到进一步提高。史航<sup>[50]</sup>将纳米载银无机抗菌剂用于渔网材料制备网片, 海上挂片5个月后抗菌渔网材料污损生物附着面积相较于空白聚乙烯网材料显著降低, 说明抗菌性能有明显提高。Tang等<sup>[51]</sup>制备了具有不同AgNP/GO比率的GO-Ag纳米复合材料, 用于研究其对于大肠杆菌、金黄色葡萄球菌的抗菌活性。结果表明, 最佳比例的GO-Ag纳米复合材料在相当低的剂量下仍显示出协同增强的强大抗菌活性。

**有机抗菌材料** 有机抗菌材料相较于无机抗菌材料来说, 制备工艺更为成熟。有机抗菌材料根据来源不同可以分为天然有机抗菌材料(NOAM)、合成型有机抗菌材料(SOAM)。

天然有机抗菌材料是指通过分离、纯化等手段从动植物、微生物及其衍生物中提取的抗菌材料<sup>[52]</sup>。天然有机抗菌材料对环境影响甚微, 壳聚糖、纤维素改性材料等都被验证对细菌有良好的抑制效果。王向阳等<sup>[53]</sup>研究了壳聚糖对不同微生物抑制作用, 结果发现, 水溶性壳聚糖对乳酸菌的抑制效果最强, 对大肠杆菌的抑制效果最弱。许俊聪等<sup>[54]</sup>采用等离子技术并在氦气氛下改性壳聚糖材料, 以期改善壳聚糖材料的抗菌性能。进行抗菌实验后的结果表明, 改性后的壳聚糖材料对大肠杆菌的抗菌性能显著提高, 而对金黄色葡萄球菌来说抗菌性能则无明显变化。

合成型有机抗菌材料的抗菌机制主要是抗菌材料与微生物细胞膜表面阴离子结合, 进入细胞内部发挥抗菌作用。另一种方式是抗菌材料与—SH反应使微生物的蛋白质变性, 微生物细胞膜的合成受到抑制, 进而阻碍微生物正常的生长繁殖, 因此发挥抗菌效果。合成型有机抗菌材料是目前研究最为成熟并且应用最为广泛的抗菌材料之一, 主要有季铵盐系、醇醛酯醚酚系、双胍系等。王越等<sup>[55]</sup>采用熔融共混技术制备聚胍盐接枝改性聚丙烯/聚乙烯单丝, 抑菌实验结果显示, 聚胍盐接枝改性聚丙烯/聚乙烯共混单丝对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有明显的抑制作用; 由共混

单丝制备的聚胍盐改性聚乙烯渔网在海上挂片实验3个月后发现污损生物附着率显著降低。Wiarachai等<sup>[56]</sup>、Li等<sup>[57]</sup>制备了季铵化壳聚糖颗粒, 抑菌实验表明, 在中性PH下, 与天然壳聚糖颗粒相比, 季铵化壳聚糖颗粒对革兰氏阳性菌金黄色葡萄球菌表现出优异的抑菌性能, 只有部分电荷密度高、烷基取代基大的颗粒能够抑制革兰氏阴性细菌大肠杆菌的生长。Qiu等<sup>[58]</sup>通过熔融纺丝工艺将阳离子聚六亚甲基胍(PHMG)接枝到聚丙烯(PP)分子链上, 将不同含量的PP-g-PHMG与PP混合得到抗菌单丝。抗菌性能测试表明, 当PP-g-PHMG的含量为40 wt%时, 对大肠杆菌的抗菌率达99.69%。

**复合型抗菌材料** 无机纳米离子抗菌材料潜在的细胞毒性限制其应用范围, 天然有机抗菌材料也存在耐热性差、抗菌时效短等不足, 因此将二者结合的抗菌材料成为目前的研究重点。一类研究方向是将无机抗菌材料与有机抗菌材料结合, 即均采用抗菌材料; 另一类研究方向是将无机抗菌材料结合到纤维素上, 制备纤维素基抗菌材料。黄晓飞<sup>[59]</sup>首先制备了水溶性极佳的改性壳聚糖, 改性后的壳聚糖避免了只能在酸性条件下发挥抗菌作用的问题, 而后引入无机抗菌剂纳米银离子, 制备了复合纳米银抗菌剂, 这种壳聚糖载银材料不仅有优异的抗菌性能, 外层包被的壳聚糖又能显著降低细胞毒性, 兼备壳聚糖与纳米银的双重优点。陈浩<sup>[60]</sup>制备了纳米纤维素-聚乙烯胺-银抗菌凝胶和纳米纤维素-壳聚糖-银抗菌凝胶, 实验表明, 这两种抗菌凝胶对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制作用显著。

## 4.2 抗菌材料的发展趋势

目前无机抗菌材料领域仍存在一些问题还未得到解决, 例如材料的抗菌活性与生物兼容性的关系、在抗菌机制中物理方式的重要性、复合无机抗菌材料之间的稳定性等。有机抗菌材料也存在一些问题, 例如一般都具有较为强烈的毒性、耐热性不佳、过度使用容易产生毒性等。复合型抗菌材料的研究仍处于起步阶段, 研究尚未完善, 大规模、低成本的工业化生产的难题亟待解决。这促使我们去探索更多的表征测试方法、更新的制备技术。

开发研制绿色安全、抗菌长效、稳定安全且价格低廉的抗菌材料是今后研究的方向。我国的



抗菌材料产业属于新兴产业, 具有广阔的发展空间。将抗菌材料应用于养殖网箱、养殖围栏等渔业领域也显示出蓬勃的生机。

## 5 结语

世界各国对功能性材料的研究日趋活跃并试图形成技术垄断从而占领中国市场, 我国对于功能性材料的研究不足, 缺乏创新性, 亟待进一步改进、发展。功能性材料是重要基础材料, 与我国的远洋渔业、信息技术、生物技术、能源技术及国防建设等息息相关, 直接关系到我国的可持续发展政策。海洋作为可持续发展的重要基地, 是解决目前人口膨胀、资源短缺等问题的可靠途径。我国对海洋的开发和利用正处于快速发展期, 为更好地开发与利用海洋资源、体现渔业大国担当, 应用新材料对渔具进行更新、升级或替代也是一项重点。目前渔用材料处在稳步发展状态, 但功能仍较为单一, 发展功能渔用材料具有广阔的前景。将功能性材料与金枪鱼围网渔业、深远海网箱养殖业等现代渔业更紧密结合, 实现渔用材料技术的进一步跨越是今后渔用材料研究的重点方向。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

## 参考文献 (References):

- [1] 石建高. 渔用网片与防污技术 [M]. 上海: 东华大学出版社, 2011.  
Shi J G. Fishing net and antifouling technology[M]. Shanghai: Donghua University Press, 2011 (in Chinese).
- [2] 石建高. 深远海生态围栏养殖技术 [M]. 北京: 海洋出版社, 2019.  
Shi J G. Agriculture technology of deep-sea ecological enclosure[M]. Beijing: China Ocean Press, 2019 (in Chinese).
- [3] 石建高, 周新基, 沈明. 深远海网箱养殖技术 [M]. 北京: 海洋出版社, 2019.  
Shi J G, Zhou X J, Shen M. Agriculture technology of deep-offshore cage[M]. Beijing: China Ocean Press, 2019 (in Chinese).
- [4] Monterroso J C, Andrews T M, Marinelli L P. Polymers of tributyltin acrylate esters[J]. *Journal of Polymer Science*, 1958, 32(125): 523-525.
- [5] Dong M, Liu L J, Wang D Z, *et al.* Synthesis and properties of self-polishing antifouling coatings based on bitacrylate resins[J]. *Coatings*, 2022, 12(7): 891.
- [6] 孙保库, 范会生, 潘学龙, 等. 基于丙烯酸酯树脂的无铜自抛光防污涂料研制 [J]. 表面技术, 2022, 51(1): 280-286 (in Chinese).  
Sun B K, Fan H S, Pan X L, *et al.* Development of copper-free self-polishing anti-fouling paints by using acrylate resin[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(1): 280-286 (in Chinese).
- [7] Lindner E. A low surface free energy approach in the control of marine biofouling[J]. *Biofouling*, 1992, 6(2): 193-205.
- [8] Thompson M F, Nagabhushanam R, Sarojini R, *et al.* Recent developments in biofouling control[M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1994.
- [9] 于世长, 张建明, 段咏欣, 等. 无毒低表面能有机硅树脂的合成及其涂料组合物制备 [J]. 涂料工业, 2015, 45(1): 33-38.  
Yu S C, Zhang J M, Duan Y X, *et al.* Synthesis of non-toxic and low surface energy silicone resin and its application in coating composition[J]. *Paint & Coatings Industry*, 2015, 45(1): 33-38 (in Chinese).
- [10] Zhang J X, Pan M X, Luo C B, *et al.* A novel composite paint (TiO<sub>2</sub>/fluorinated acrylic nanocomposite) for anti-fouling application in marine environments[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2016, 4(2): 2545-2555.
- [11] 梁治齐. 微胶囊技术及其应用 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1999.  
Liang Z Q. Microencapsulation technology and application [M]. Beijing: China Light Industry Press, 1999 (in Chinese).
- [12] 李善文, 陈美玲, 杨莉, 等. 环保友好纳米二氧化钛低表面能船舶防污涂料 [J]. 功能材料, 2008, 39(5): 853-856.  
Li S W, Chen M L, Yang L, *et al.* Preparation of environmentally benign low surface energy antifouling coatings with nano-titanium oxide powder on seagoing vessels[J]. *Journal of Functional Materials*, 2008, 39(5): 853-856 (in Chinese).
- [13] Chen M L, Qu Y Y, Yang L, *et al.* Structures and anti-fouling properties of low surface energy non-toxic anti-fouling coatings modified by nano-SiO<sub>2</sub> powder[J]. *Sci-*

- ence in China Series B: Chemistry, 2008, 51(9): 848-852.
- [14] Feng Y C, Chen S G, Frank Cheng Y. Stearic acid modified zinc nano-coatings with superhydrophobicity and enhanced antifouling performance[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 340: 55-65.
- [15] Ashraf P M, Edwin L. Nano copper oxide incorporated polyethylene glycol hydrogel: an efficient antifouling coating for cage fishing net[J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2016, 115: 39-48.
- [16] 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.  
Shi J G, Yu W W, Zhao K, *et al.* Progress in research of antifouling technology of offshore cage netting[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(3): 472-485 (in Chinese).
- [17] 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.  
Shi J G, Yu W W, Lu B C, *et al.* Development status and prospect of Chinese deep-sea cage[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2021, 45(6): 992-1005 (in Chinese).
- [18] 丁彤彤, 孙秀花, 高昌录. 自抛光防污涂料的研究进展 [J]. *现代化工*, 2021, 41(S1): 58-61,66.  
Ding T T, Sun X H, Gao C L. Research progress in self-polishing antifouling coatings[J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(S1): 58-61,66 (in Chinese).
- [19] 洪峰, 赵中华, 桂泰江. 仿生防污涂料的发展概况 [J]. *现代涂料与涂装*, 2002(5): 7-11.  
Hong F, Zhao Z H, Gui T J. Development situation of bionical anti-fouling paint[J]. *Modern Coatings and Coating*, 2002(5): 7-11 (in Chinese).
- [20] 桂泰江, 刘登良. 无锡自抛光防污涂料进展 [J]. *涂料工业*, 1994, (05): 36-38, 63.  
Gui T J, Liu D L. Development of tin-free SPC anti-fouling paint[J]. *Coatings and Applications*, 1995, 25(4): 6-9, 42 (in Chinese).
- [21] 陈晓蕾, 石建高, 王磊, 等. 聚乳酸/淀粉复合材料在海水中的降解性能 [J]. *海洋渔业*, 2009, 31(4): 420-425.  
Chen X L, Shi J G, Wang L, *et al.* Degradability of poly (lactic acid)/ starch composite in seawater[J]. *Marine Fisheries*, 2019, 31(4): 420-425. (in Chinese).
- [22] 闵明华, 陈晓蕾, 余雯雯, 等. 渔用纳米蒙脱土改性聚乳酸纤维制备及性能 [J]. *海洋渔业*, 2014, 36(6): 557-564.  
Min M H, Chen X L, Yu W W, *et al.* Preparation and properties of fishery polylactic acid fiber modified by nano-montmorillonite[J]. *Marine Fisheries*, 2014, 36(6): 557-564 (in Chinese).
- [23] 冯辉霞, 赵丹, 张国宏, 等. 聚乳酸/有机蒙脱土纳米复合材料的制备及结构表征 [J]. *塑料工业*, 2009, 37(2): 43-46.  
Feng H X, Zhao D, Zhang G H, *et al.* Preparation and characterization of polylactic acid/organic-montmorillonite nanocomposites[J]. *China Plastics Industry*, 2009, 37(2): 43-46 (in Chinese).
- [24] Chen G Y, Xu L, Zhang P P, *et al.* Seawater degradable triboelectric nanogenerators for blue energy[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2020, 5(9): 2000455.
- [25] 舒爱艳, 张敏, 余雯雯, 等. 可生物降解 PLA 刺网与传统 PA 刺网的物理性能和捕捞效率的比较分析 [J]. *海洋渔业*, 2021, 43(1): 93-103.  
Shu A Y, Zhang M, Yu W W, *et al.* Comparative analysis of physical performance and fishing efficiency between biodegradable PLA gill net and conventional PA gill net[J]. *Marine Fisheries*, 2021, 43(1): 93-103 (in Chinese).
- [26] 袁大辉, 孙玲. 可降解塑料现状及前景展望 [J]. *橡塑技术与装备*, 2022, 48(10): 1-5.  
Yuan D H, Sun L. Status and prospect of degradable plastics[J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2022, 48(10): 1-5 (in Chinese).
- [27] 周耀文, 秦增增, 姚利. PBAT/CaCO<sub>3</sub> 复合材料力学性能的研究 [J]. *盐科学与化工*, 2022, 51(8): 24-26.  
Zhou Y W, Qin Z Z, Yao L. Mechanical properties research of PBAT/CaCO<sub>3</sub> composite[J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2022, 51(8): 24-26 (in Chinese).
- [28] 李红娟, 段瑞海, 温光和, 等. PLA/PBAT/PBS 共混改性制备 [J]. *塑料*, 2022, 51(2): 29-33.  
Li H J, Duan R H, Wen G H, *et al.* Modified preparation of PLA/PBAT/PBS blends[J]. *Plastics*, 2022, 51(2): 29-33 (in Chinese).
- [29] 史鹏伟, 郭品强, 汤俊杰. 高环氧基功能聚合物对 PBAT/PLA 复合材料性能的影响 [J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(7): 140-146,153.  
Shi P W, Guo P Q, Tang J J. Influence of high epoxy groups functional polymer on the properties of PBAT/PLA composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(7): 140-146,153.



- tion, 2022, 50(7): 140-146,153 (in Chinese).
- [30] 金琰, 蔡凡凡, 王立功, 等. 生物可降解塑料在不同环境条件下的降解研究进展 [J]. 生物工程学报, 2022, 38(5): 1784-1808.  
Jin Y, Cai F F, Wang L G, *et al.* Advance in the degradation of biodegradable plastics in different environments[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2022, 38(5): 1784-1808 (in Chinese).
- [31] Orash Mahmoud Salehi A, Heidari Keshel S, Sefat F, *et al.* Use of polycaprolactone in corneal tissue engineering: a review[J]. *Materials Today Communications*, 2021, 27: 102402.
- [32] Lu B, Wang G X, Huang D, *et al.* Comparison of PCL degradation in different aquatic environments: effects of bacteria and inorganic salts[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2018, 150: 133-139.
- [33] Guzman-Sielicka A, Janik H, Sielicki P. Degradation of polycaprolactone modified with TPS or CaCO<sub>3</sub> in biotic/abiotic seawater[J]. *Journal of Polymers and the Environment*, 2012, 20(2): 353-360.
- [34] 石建高. 捕捞渔具准入配套标准体系研究 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2017.  
Shi J G. Study on the standard system of fishing gear admittance[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2017 (in Chinese).
- [35] Karlsen J D, Melli V, Krag L A. Exploring new netting material for fishing: the low light level of a luminous netting negatively influences species separation in trawls[J]. *ICES Journal of Marine Science*, 2021, 78(8): 2818-2829.
- [36] Shih J Y, Lai S L, Cheng H T. Characteristics and applications of luminous fibers[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 368-370: 702-707.
- [37] 高晗, 迟祥, 宋晓雪, 等. 发光纤维的研究进展 [J]. 功能材料, 2021, 52(2): 2085-2097.  
Gao H, Chi X, Song X X, *et al.* Research progress of luminescent fibers[J]. Journal of Functional Materials, 2021, 52(2): 2085-2097 (in Chinese).
- [38] 杨应国, 胡小华, 袁曦明. 纳米稀土发光材料的研究与展望 [J]. 矿产保护与利用, 2005(5): 44-47.  
Yang Y G, Hu X H, Yuan X M. Research and development of nanosized rare-earth luminescent materials[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2005(5): 44-47 (in Chinese).
- [39] 马梦姣. 多功能 PET 纳米稀土发光纤维的制备及研究 [D]. 天津: 天津工业大学, 2018.  
Ma M J. Preparation and research of multi-functional PET nanoscale rare earth luminescent fibers[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2018 (in Chinese).
- [40] Bhat S S, Cermelli C A, Lo K H. Polyester mooring for ultra-deepwater applications[C]//Proceedings of the ASME 2002 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Oslo, Norway: Ocean, Offshore, and Arctic Engineering Division, 2002.
- [41] 黄维, 刘海笑. 新型深水系缆非线性动力特性研究进展 [J]. 海洋工程, 2009, 27(4): 140-144.  
Huang W, Liu H X. Research progress on dynamic non-linear properties of new type deep-water mooring lines[J]. The Ocean Engineering, 2009, 27(4): 140-144 (in Chinese).
- [42] Ji C Y, Yuan Z M, Chen M L. Study on a new mooring system integrating catenary with taut mooring[J]. *China Ocean Engineering*, 2011, 25(3): 427-440.
- [43] 连宇顺, 刘海笑. 海洋系泊工程中合成纤维系缆研究述评 [J]. 海洋工程, 2019, 37(1): 142-154.  
Lian Y S, Liu H X. Review of synthetic fiber ropes for deepwater moorings[J]. The Ocean Engineering, 2019, 37(1): 142-154 (in Chinese).
- [44] 桑巍, 佟寅. 高模量合成纤维缆绳在海洋调查绞车上的应用 [J]. 船舶, 2020, 31(6): 1-8.  
Sang W, Tong Y. Application of high modulus synthetic fiber ropes in oceanographic research winches[J]. Ship & Boat, 2020, 31(6): 1-8 (in Chinese).
- [45] 谢铜辉, 戚佩瑶, 胡绍峰, 等. 深海水下作业用稀土铝酸锶发光聚合物复合材料的研究进展 [J]. 化学工业与工程, 2022, 39(2): 61-68.  
Xie J H, Qi P Y, Hu S F, *et al.* Research progress of rare earth strontium aluminate luminescent polymer composites used in underwater operations[J]. Chemical Industry and Engineering, 2022, 39(2): 61-68 (in Chinese).
- [46] 陈美梅, 郭荣辉. 抗菌材料的研究进展 [J]. 成都纺织高等专科学校学报, 2019, 36(1): 153-157.  
Chen M M, Guo R H. Research progress of antibacterial materials[J]. Journal of Chengdu Textile College, 2019, 36(1): 153-157 (in Chinese).
- [47] 郭一婧, 张铭哲, 段昶晟, 等. 无机抗菌材料的抗菌性能研究与应用 [J]. 云南化工, 2020, 47(9): 18-20.  
Guo Y J, Zhang M Z, Duan C S, *et al.* Study and applic-

- ation of inorganic antibacterial materials[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2020, 47(9): 18-20 (in Chinese).
- [48] Copcia V E, Luchian C, Dunca S, *et al.* Antibacterial activity of silver-modified natural clinoptilolite[J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46(22): 7121-7128.
- [49] 丁军, 吴泽, 单连伟. 银系 TiO<sub>2</sub> 光催化无机抗菌材料的制备及抗菌性能测试 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2014, 19(4): 75-78.
- Ding J, Wu Z, Shan L W. The preparation of Ag doped photocatalytic inorganic antibacterial materials and its antibacterial performance[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2014, 19(4): 75-78 (in Chinese).
- [50] 史航. 纳米抗菌剂改性渔用网具材料 [J]. *合成纤维*, 2006(8): 23-25.
- Shi H. Fishnet material containing nano inorganic antimicrobial agent[J]. *Synthetic Fiber in China*, 2006(8): 23-25 (in Chinese).
- [51] Tang J, Chen Q, Xu L G, *et al.* Graphene oxide-silver nanocomposite as a highly effective antibacterial agent with species-specific mechanisms[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(9): 3867-3874.
- [52] 束浩瀚, 潘磊庆, 屠康, 等. 抗菌材料在食品包装中的研究进展 [J]. *食品科学*, 2015, 36(5): 260-265.
- Shu H Y, Pan L Q, Tu K, *et al.* Advances in research on antibacterial materials in food packaging[J]. *Food Science*, 2015, 36(5): 260-265 (in Chinese).
- [53] 王向阳, 卢进彬, 潘炎, 等. 水溶性壳聚糖对 3 种微生物的抑制作用差异 [J]. *中国食品学报*, 2021, 21(11): 53-61.
- Wang X Y, Lu J B, Pan Y, *et al.* Difference of inhibition effects of water soluble chitosan on three kinds of microorganisms[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2021, 21(11): 53-61 (in Chinese).
- [54] 许俊聪, 黎耀元, 徐彩玲, 等. 氦气等离子体改性技术对壳聚糖材料结构与抗菌性能的影响 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(7): 110-118.
- Xu J C, Li Y Y, Xu C L, *et al.* Effect of helium plasma modified technology on the structure and antibacterial properties of chitosan materials[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(7): 110-118 (in Chinese).
- [55] 王越. 基于聚胍盐防污改性的渔用材料制备与性能研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2021.
- Wang Y. Preparation and properties of polyguanidine salt modified antifouling materials for fishing[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2021 (in Chinese).
- [56] Wiarachai O, Thongchul N, Kiatkamjornwong S, *et al.* Surface-quaternized chitosan particles as an alternative and effective organic antibacterial material[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2012, 92: 121-129.
- [57] Li M, Liu X, Liu N, *et al.* Effect of surface wettability on the antibacterial activity of nanocellulose-based material with quaternary ammonium groups[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 554: 122-128.
- [58] Qiu B W, Wang M, Yu W W, *et al.* Environmentally friendly and broad-spectrum antibacterial poly (hexamethylene guanidine)-modified polypropylene and its antifouling application[J]. *Polymers*, 2023, 15(6): 1521.
- [59] 黄晓飞. 壳聚糖基载银材料的制备及其抗菌性能的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- Huang X F. Chitosan-based silver composite materials for antibacterial applications[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018 (in Chinese).
- [60] 陈浩. 纳米纤维素抗菌材料的制备及应用 [D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2017.
- Chen H. Preparation and application of nanocellulose antibacterial materials[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2017 (in Chinese).

## Research status and prospect of functional fishery materials

ZHANG Fengyi<sup>1,2</sup>, SHI Jiangaο<sup>2\*</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>, ZHANG Wenyang<sup>2</sup>, LI Yajie<sup>1,2</sup>, ZHAO Liang<sup>3</sup>,  
CAO Yiru<sup>3</sup>, LÜ Changlin<sup>1,2</sup>, WANG Shuting<sup>2,4</sup>

(1. College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;

3. Shandong Nanshan Zhishang Technology Co., LTD., Yantai 265700, China;

4. School of Materials and Chemistry, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** With the continuous innovation of new material technology and the high-quality development of modern fisheries, functional fishing materials have ushered in new challenges, but also brought new opportunities to the high-quality development of modern fisheries. Functional fishing materials have played an essential role in the construction of blue granaries, the protection of the fishery ecological environment and the supply of green aquatic products. In order to develop functional fishing materials with better comprehensive performance, this paper summarizes the research status of functional fishing materials in recent years, analyzes the application progress of functional fishing materials such as antifouling materials, degradable materials, luminescent materials and antibacterial materials, as well as the existing problems and shortcomings at the present stage, and looks forward to the future development trend. In order to provide a reference for the rapid rise and industrial application of functional fishing materials.

**Key words:** functional fishing materials; antifouling materials; degradable materials; luminous materials; antibacterial materials; deep sea cage; breeding fence; fishing gear

**Corresponding author:** SHI Jiangaο. E-mail: [jiangaoshi666@163.com](mailto:jiangaoshi666@163.com)

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (31872611); Project Commissioned by Enterprise- Research on Ecological Degradable Artificial Fish Collecting Device (FAD); Ministry of Industry and Information Technology High Tech Ship Research Project ([2019] 360); Project Commissioned by Enterprise-Development and Application Demonstration of Fiber Products such as High-strength Membrane Split Fibers