

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版
“十三五”国家重点出版物出版规划项目

仿生材料开发及其在海洋生物 污损腐蚀防护中的应用

王鹏 张盾 邱日 编著



科学出版社

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书·典藏版

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

仿生材料开发及其在海洋生物 污损腐蚀防护中的应用

王鹏 张盾 邱日 编著

科学出版社

内 容 简 介

作者以仿生材料开发及其在海洋生物污损腐蚀防护中的应用为主题,综合了国内外相关研究进展以及作者多年工作积累,经悉心整理总结成本书。本书介绍了海洋生物污损过程与机制,总结了生物防污机制及影响因素。在此基础上,重点介绍了四种仿生材料(仿鲨鱼皮表面、仿鲸豚皮表面、仿猪笼草超滑表面、仿荷叶超疏水表面)的制备技术、防污性能与机制,并指出了仿生材料在目前研究和应用中存在的问题及未来发展的方向。

本书主要适用于海洋相关科研院所,以及海洋工程、海洋资源开发、化工、能源等企业中海洋腐蚀与防护科研工作者,也可供高等院校相关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国腐蚀状况及控制战略研究丛书:典藏版/侯保荣主编. —北京:科学出版社, 2018.1

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-056255-5

I. ①中… II. ①侯… III. ①腐蚀-调查研究-中国 IV. ①TG17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 002936 号

责任编辑:李明楠 李丽娇/责任校对:王晓茜

责任印制:张 伟/封面设计:铭轩堂

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 1 月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2018 年 1 月第一次印刷 印张: 11 3/4

字数: 237 000

定价: 3200.00 元(全 32 册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

顾问委员会

主任委员：徐匡迪 丁仲礼

委员（按姓氏笔画排序）：

丁一汇	丁仲礼	王景全	李 阳	李鹤林	张 偲
金翔龙	周守为	周克崧	周 廉	郑皆连	郝吉明
胡正寰	柯 伟	侯立安	聂建国	徐匡迪	翁宇庆
高从堦	曹楚南	曾恒一	缪昌文	薛群基	魏复盛

“中国腐蚀状况及控制战略研究”丛书

总编辑委员会

总 主 编：侯保荣

副总主编：徐滨士 张建云 徐惠彬 李晓刚

编 委（按姓氏笔画排序）：

马士德	马化雄	马秀敏	王福会	尹成先	朱锡昶
任小波	任振铎	刘小辉	刘建华	许立坤	孙虎元
孙明先	杜 敏	杜翠薇	李少香	李伟华	李言涛
李金桂	李济克	李晓刚	杨朝晖	张劲泉	张建云
张经磊	张 盾	张洪翔	陈卓元	欧 莉	岳清瑞
赵 君	胡少伟	段继周	侯保荣	宫声凯	桂泰江
徐玮辰	徐惠彬	徐滨士	高云虎	郭公玉	黄彦良
常 炜	葛红花	韩 冰	雷 波	魏世丞	

丛 书 序

腐蚀是材料表面或界面之间发生化学、电化学或其他反应造成材料本身损坏或恶化的现象,从而导致材料的破坏和设施功能的失效,会引起工程设施的结构损伤,缩短使用寿命,还可能导致油气等危险品泄漏,引发灾难性事故,污染环境,对人民生命财产安全造成重大威胁。

由于材料,特别是金属材料的广泛应用,腐蚀问题几乎涉及各行各业。因而腐蚀防护关系到一个国家或地区的众多行业和部门,如基础设施工程、传统及新能源设备、交通运输工具、工业装备和给排水系统等。各类设施的腐蚀安全问题直接关系到国家经济的发展,是共性问题,是公益性问题。有学者提出,腐蚀像地震、火灾、污染一样危害严重。腐蚀防护的安全责任重于泰山!

我国在腐蚀防护领域的发展水平总体上仍落后于发达国家,它不仅表现在防腐蚀技术方面,更表现在防腐蚀意识和有关的法律法规方面。例如,对于很多国外的房屋,政府主管部门依法要求业主定期维护,最简单的方法就是在房屋表面进行刷漆防蚀处理。既可以由房屋拥有者,也可以由业主出资委托专业维护人员进行防护工作。由于防护得当,许多使用上百年的房屋依然完好、美观。反观我国的现状,首先是人们的腐蚀防护意识淡薄,对腐蚀的危害认识不清,从设计到维护都缺乏对腐蚀安全问题的考虑;其次是国家和各地区缺乏与维护相关的法律与机制,缺少腐蚀防护方面的监督与投资。这些原因就导致了我国在腐蚀防护领域的发展总体上相对落后的局面。

中国工程院“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目工作的开展是当务之急,在我国经济快速发展的阶段显得尤为重要。借此机会,可以摸清我国腐蚀问题究竟造成了多少损失,我国的设计师、工程师和非专业人士对腐蚀防护了解多少,如何通过技术规程和相关法规来加强腐蚀防护意识。

项目组将提交完整的调查报告并公布科学的调查结果,提出切实可行的防腐蚀方案和措施。这将有效地促进我国在腐蚀防护领域的发展,不仅有利于提高人们的腐蚀防护意识,也有利于防腐技术的进步,并从国家层面上把腐蚀防护工作的地位提升到一个新的高度。另外,中国工程院是我国最高的工程咨询机构,没有直属的科研单位,因此可以比较超脱和客观地对我国的工程技术问题进行评估。把这样一个项目交给中国工程院,是值得国家和民众信任的。

这套丛书的出版发行,是该重大咨询项目的一个重点。据我所知,国内很多领域的知名专家学者都参与到丛书的写作与出版工作中,因此这套丛书可以说涉及

了我国生产制造领域的各个方面,应该是针对我国腐蚀防护工作的一套非常全面的丛书。我相信它能够各领域的防腐蚀工作者提供参考,用理论和实例指导我国的腐蚀防护工作,同时我也希望腐蚀防护专业的研究生甚至本科生都可以阅读这套丛书,这是开阔视野的好机会,因为丛书中提供的案例是在教科书上难以学到的。因此,这套丛书的出版是利国利民、利于我国可持续发展的大事情,我衷心希望它能得到业内人士的认可,并为我国的腐蚀防护工作取得长足发展贡献力量。

徐匡迪

2015年9月

丛书前言

众所周知,腐蚀问题是世界各国共同面临的问题,凡是使用材料的地方,都不同程度地存在腐蚀问题。腐蚀过程主要是金属的氧化溶解,一旦发生便不可逆转。据统计估算,全世界每 90 秒钟就有一吨钢铁变成铁锈。腐蚀悄无声息地进行着破坏,不仅会缩短构筑物的使用寿命,还会增加维修和维护的成本,造成停工损失,甚至会引起建筑物结构坍塌、有毒介质泄漏或火灾、爆炸等重大事故。

腐蚀引起的损失是巨大的,对人力、物力和自然资源都会造成不必要的浪费,不利于经济的可持续发展。震惊世界的“11·22”黄岛中石化输油管道爆炸事故造成损失 7.5 亿元人民币,但是把防腐蚀工作做好可能只需要 100 万元,同时避免灾难的发生。针对腐蚀问题的危害性和普遍性,世界上很多国家都对各自的腐蚀问题做过调查,结果显示,腐蚀问题所造成的经济损失是触目惊心的,腐蚀每年造成损失远远大于自然灾害和其他各类事故造成损失的总和。我国腐蚀防护技术的发展起步较晚,目前迫切需要进行全面的腐蚀调查研究,摸清我国的腐蚀状况,掌握材料的腐蚀数据和有关规律,提出有效的腐蚀防护策略和建议。随着我国经济社会的快速发展和“一带一路”战略的实施,国家将加大对基础设施、交通运输、能源、生产制造及水资源利用等领域的投入,这更需要我们充分及时地了解材料的腐蚀状况,保证重大设施的耐久性和安全性,避免事故的发生。

为此,中国工程院设立“我国腐蚀状况及控制战略研究”重大咨询项目,这是一件利国利民的大事。该项目的开展,有助于提高人们的腐蚀防护意识,为中央、地方政府及企业提供可行的意见和建议,为国家制定相关的政策、法规,为行业制定相关标准及规范提供科学依据,为我国腐蚀防护技术和产业发展提供技术支持和理论指导。

这套丛书包括了公路桥梁、港口码头、水利工程、建筑、能源、火电、船舶、轨道交通、汽车、海上平台及装备、海底管道等多个行业腐蚀防护领域专家学者的研究工作经验、成果以及实地考察的经典案例,是全面总结与记录目前我国各领域腐蚀防护技术水平和发展现状的宝贵资料。这套丛书的出版是该项目的一个重点,也是向腐蚀防护领域的从业者推广项目成果的最佳方式。我相信,这套丛书能够积极地影响和指导我国的腐蚀防护工作和未来的人才培养,促进腐蚀与防护科研成果的产业化,通过腐蚀防护技术的进步,推动我国在能源、交通、制造业等支柱产业上的长足发展。我也希望广大读者能够通过这套丛书,进一步关注我国腐蚀防护技术的发展,更好地了解 and 认识我国各个行业存在的腐蚀问题和防腐策略。

在此,非常感谢中国工程院的立项支持以及中国科学院海洋研究所等各课题承担单位在各个方面的协作,也衷心地感谢这套丛书的所有作者的辛勤工作以及科学出版社领导和相关工作人员的共同努力,这套丛书的顺利出版离不开每一位参与者的贡献与支持。

侯保荣

2015年9月

序

21 世纪是海洋的世纪。据统计,海洋中的生物资源占地球生物资源的 80%。海洋资源开发与利用成为我国乃至世界各国未来发展的必然趋势。

在海洋资源的开发利用过程中,海洋工程设施的生物污损仍是国际上尚未解决的问题。海洋生物污损不仅增加了船舶的航行阻力,增大了燃料消耗,还严重影响水下设备的功能,极大地妨碍了水下结构的安全有效运行,缩短了使用寿命。据不完全统计,全世界仅生物污损给各种水下工程设施和舰船设备造成的损失每年可达 2000 亿美元以上。

早在古罗马与古希腊时代,人类就已经开始寻找船体污损防护的方法。一直以来,毒剂型防污涂料始终是控制海洋生物污损的最有效的解决方案,但是其对海洋环境和生态系统有巨大的破坏作用。例如,公认的高效防污材料三丁基锡会在鱼类、贝类体内积累,导致遗传变异,而且还有可能进入食物链。为此,国际海事组织于 2001 年 10 月通过了国际协定,以控制船体防污中有害防污剂的应用。在此举的推动下,国内外研究机构已经将研究焦点集中到海洋生物污损发生发展过程中的基础性科学问题上,并在此基础上研发环境友好型防污材料。

自然界中的众多生物通过表皮特殊性质或机制实现对表面污损生物的防除,其方式环境友好,且具有广谱性和高效性。师法自然,仿照海洋生物防污方式阻止海洋污损生物附着也因此成为解决海洋生物污损问题的有效途径之一。随着人类环境保护意识的不断提高,开发绿色高效防污技术逐渐成为海洋污损防护领域研究的热点,仿生防污材料的开发也成为未来海洋污损防护技术开发的重点。

此书针对海洋环境生物污损问题,结合作者多年从事仿生材料开发及海洋污损防护研究的成果及国际基于仿生材料的海洋污损防护技术开发的最新进展编写而成,着重介绍了海洋生物的污损机制、我国海域污损生物的种类和分布特征及仿生材料的海洋生物污损防护机理。相信此书的出版,将会使人们对海洋环境生物污损过程及基于仿生材料的海洋生物污损防护技术开发的认识更为深刻,对相关研究具有借鉴作用,也对污损防护技术的开发和应用具有推动作用。

侯保荣

2016 年 8 月

前 言

我国海岸线绵长，海洋资源丰富。开发海洋资源对我国国民经济具有重大的战略意义。在海洋资源开发利用过程中，海洋生物污损问题是海洋工程材料面临的主要威胁之一。海洋生物污损问题会加速金属的腐蚀，增加船舶行进的阻力，造成海洋仪表失灵等。因此，高效的海洋生物污损防护技术开发与应用受到世界的广泛关注。随着人类环境保护意识的不断提高，绿色、高效的海洋污损防护技术开发逐渐成为海洋污损防护领域的研究热点，也是未来海洋污损防护技术开发的重点。

本书是作者在多年从事仿生材料开发及海洋污损防护研究的基础上，结合国际基于仿生材料的海洋污损防护技术开发的最新进展，经过不断总结、修改和创新编写而成的。本书共分6章，第1章介绍了海洋生物污损过程与机制，重点介绍了三类典型污损生物（细菌、硅藻和藤壶）的附着机制，以及我国不同海域污损生物的种类与分布；第2章着重介绍了自然界中典型生物的防污机制，并总结出污损生物附着的影响因素，为仿生防污材料的开发提供了基础；第3章介绍了仿鲨鱼皮表面在海洋生物污损防护中的应用，重点介绍了仿鲨鱼皮表面的制备方法及其防污性能与机制；第4章介绍了仿鲸豚皮表面在海洋生物污损防护中应用的理论基础、应用范例及防护机制；第5章介绍了仿猪笼草超滑表面在海洋污损防护中的应用，首先分析了仿猪笼草表面的制备原理及方法，并在此基础上，分析了仿生超滑表面对两种典型腐蚀污损生物（细菌和藻类）附着的影响；第6章介绍了仿荷叶超疏水表面在海洋生物污损防护中的应用，主要按照超疏水表面的理论模型介绍、制备技术及其在海洋生物污损防护中的应用这一思路进行阐述。

希望本书的出版能给海洋污损防护领域的研究人员及专业人员在研究和工作中提供借鉴，并推动海洋腐蚀污损防护的技术开发及学科发展。

本书的科研工作得到国家重点基础研究发展计划、国家自然科学基金、中国科学院“百人计划”项目和知识创新工程重要方向性项目、山东省自然科学基金及中国科学院海洋研究所“汇泉青年学者”支持项目等的资助，在此表示衷心感谢。

由于作者水平有限，本书难免存在不足和疏漏，恳请广大读者批评指正。

王 鹏 张 盾 邱 日

2016年8月

目 录

丛书序

丛书前言

序

前言

第1章 海洋生物污损过程与机制	1
1.1 海洋生物污损	1
1.1.1 海洋污损生物概况	1
1.1.2 海洋生物污损过程	2
1.2 典型污损生物附着过程与机制	4
1.2.1 细菌的附着机制	4
1.2.2 硅藻的附着过程与机制	5
1.2.3 藤壶的附着过程与机制	10
1.3 我国不同海域污损生物的组成与分布	13
1.3.1 我国不同海域微生物的组成与分布	13
1.3.2 我国海域海藻及大型生物的种类与分布	14
1.4 海洋生物污损的危害	19
1.5 现有的防污技术	20
1.5.1 物理防污法	20
1.5.2 化学防污法	21
1.5.3 生物学防污法	21
参考文献	22
第2章 生物防污机制及影响因素	24
2.1 自然界生物防污机制	24
2.1.1 藻类植物防污机制	24
2.1.2 红树植物防污机制	25
2.1.3 贝类防污机制	26
2.1.4 海绵防污机制	26
2.1.5 珊瑚防污机制	27
2.2 污损生物附着的影响机制	28
2.2.1 表面能	28

2.2.2 弹性模量	30
2.2.3 表面微观形貌	34
2.2.4 颜色	37
2.2.5 代谢产物	38
参考文献	39
第3章 仿鲨鱼皮表面在海洋生物污损防护中的应用	40
3.1 仿鲨鱼皮表面的微观形貌与特性	40
3.1.1 鲨鱼皮表面特征与特性	40
3.1.2 鲨鱼皮防污的理论基础	41
3.2 仿鲨鱼皮表面的设计与制备	42
3.2.1 仿鲨鱼皮表面的制备方法	42
3.2.2 不同制备方法的仿制精确度对比	48
3.3 仿鲨鱼皮表面的防污性能与机制	50
3.3.1 仿鲨鱼皮表面的防污性能	50
3.3.2 仿鲨鱼皮表面的防污机制	53
参考文献	76
第4章 仿鲸豚皮表面在海洋生物污损防护中的应用	77
4.1 鲸豚类动物表面特征与特性	77
4.2 鲸豚类动物表面防污损的理论依据	78
4.3 仿鲸豚皮表面的设计与制备及防污性能	79
4.3.1 本体材料	79
4.3.2 渗出材料	80
4.3.3 仿鲸豚皮材料的制备方法及相关防污损性能	81
4.4 仿鲸豚皮材料对海洋环境的影响	99
4.5 未来研究方向	100
参考文献	101
第5章 仿猪笼草超滑表面在海洋污损防护中的应用	103
5.1 猪笼草及其特性	103
5.1.1 猪笼草简介	103
5.1.2 猪笼草的超滑特性	103
5.2 仿生猪笼草表面的制备方法	104
5.2.1 仿生猪笼草表面的制备原理	104
5.2.2 仿生猪笼草表面的制备方法	105
5.3 仿生猪笼草表面的防污性能及机制	114

5.3.1 超滑表面对藻类附着的影响及机制	114
5.3.2 超滑表面对细菌附着的影响及机制	119
5.3.3 超滑表面的耐蚀性能与机制	125
5.4 超滑表面的稳定性及影响因素	129
5.4.1 超滑表面的稳定性	129
5.4.2 超滑表面稳定性的影响因素	130
参考文献	133
第 6 章 仿荷叶超疏水表面在海洋生物污损防护中的应用	134
6.1 超疏水表面理论与理论模型	134
6.1.1 润湿性理论基础	134
6.1.2 真实表面润湿情况	135
6.1.3 超疏水表面	136
6.2 超疏水表面的制备技术	137
6.2.1 电化学沉积方法	137
6.2.2 化学气相沉积技术	147
6.2.3 阳极氧化法	156
6.2.4 其他方法	162
6.3 仿生超疏水表面在海洋生物污损防护中的应用	167
参考文献	170

第1章 海洋生物污损过程与机制

海洋生物污损是指海洋微生物、海洋植物、海洋动物等污损生物在浸水人工设施表面的附着、生长和繁殖，这是自人类从事海事活动以来就遇到的生物危害。生物污损不仅增加船舶的航行阻力，增大燃料消耗，还严重影响水下设备的功能，极大地妨碍了低水下结构的安全有效运行，缩短使用寿命。据不完全统计，全世界仅生物污损给各种水下工程设施和舰船设备造成的损失每年就可达 2000 亿美元以上。

我国将在未来很长一段时间内进行广泛的海洋资源开发和海上交通运输基础设施建设，涉及海洋石油平台、港口码头、军民船舶等领域。由于海水环境的生物活性特征，这些工程设施不可避免地遭受到海洋生物污损的影响。因此，认识海洋生物污损的发生发展规律，研究和发展海洋生物污损控制技术，不仅对我国具有重要的战略意义，还有很大的经济效益和社会效益。开发海洋生物污损防护技术，首先要深入理解海洋生物污损过程与机制。本章重点介绍海洋生物污损的种类及附着机制，我国海域污损生物种类及分布，生物污损的危害及常用的防护方法等。

1.1 海洋生物污损

1.1.1 海洋污损生物概况

据 WoRMS (World Register of Marine Species) 统计，全球海域中有效的物种数量超过 200 000 种。而在我国海域中海洋生物有 28 000 余种，其中可附着丛生在水下工程设施及船舰等海洋结构物表面并且能够导致其损坏或产生不利影响的动、植物和微生物被称为海洋污损生物，也称海洋附着生物。据统计，全世界海洋污损生物共 4000 余种，包括细菌、原生动物、大型真核生物等，其尺寸跨度范围由几微米至肉眼可见的几十厘米（图 1-1）。中国沿海已记录 614 种，其中最主要的类群是水螅、尤介虫、藻类、外肛动物、双壳类、藤壶、海鞘等^[1]。

根据国内外研究人员目前对海洋污损生物的调研，污损生物具有几个生态特点：①种类非常繁多，群落多样性丰富、形态复杂；②全年可附着，但具有明显的季节交替变化，夏、秋季附着生物的种类和生物量较大，春、冬季较少；③繁殖量大，生长速率快；④在形成生物群落的过程中多是几层彼此重叠附着；⑤在

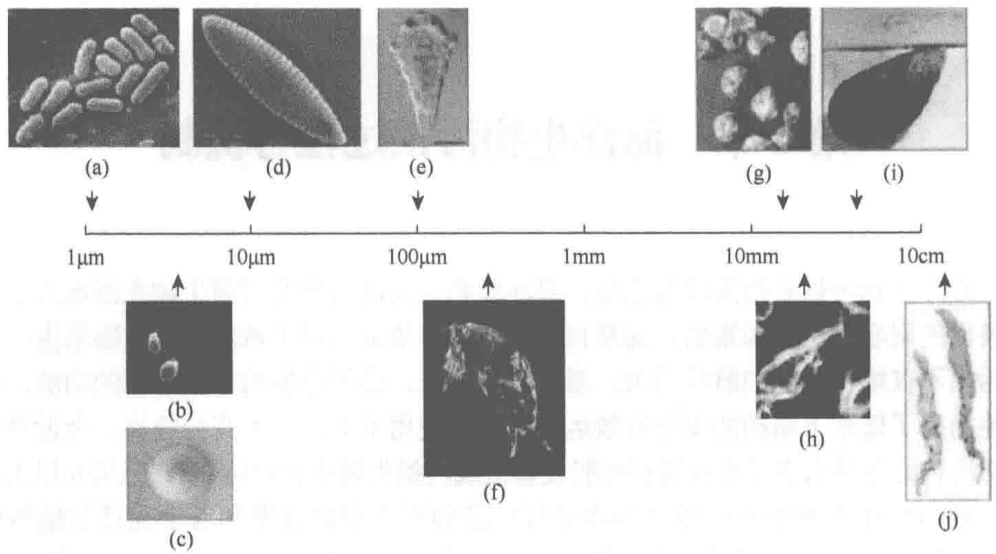


图 1-1 典型的海洋污损生物^[1]

(a) 细菌；(b) 浮游生物；(c) 石莼孢子；(d) 硅藻；(e) 多毛虫幼虫；(f) 托藤壶幼虫；(g) 藤壶；(h) 多毛虫；(i) 双壳贝类；(j) 石莼

海域空间里呈现垂直分层现象；⑥幼虫发育期较长的种类，可随海流被带到竞争压力小、营养丰富的地方附着，并迅速发展成优势种，如牡蛎、藤壶等^[1]。

1.1.2 海洋生物污损过程

如图 1-2 所示，通常来讲，海洋生物污损大致可以分为四个阶段：①有机分子吸附；②微生物吸附；③微生物膜的形成；④大型生物附着^[2, 3]。

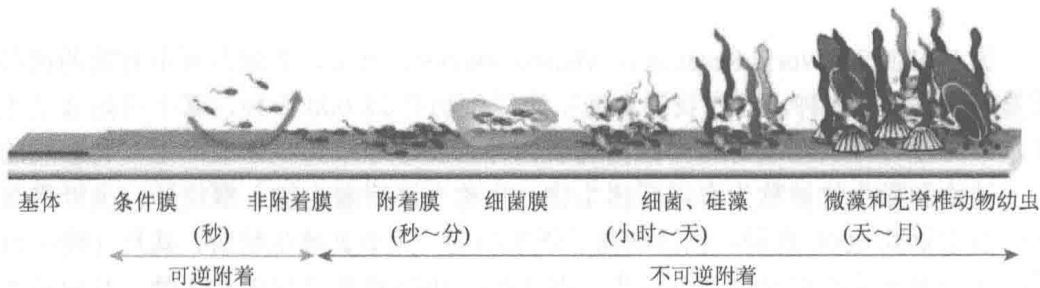


图 1-2 海洋生物污损过程示意图^[2]

1. 有机分子吸附

在基底浸入天然海水的几分钟内，由于布朗运动、静电吸附等作用，海水中

的一些有机分子,如糖类、蛋白质等,会在基底的表面发生吸附。而且,这些有机分子在基底的吸附为非均匀吸附,更倾向于形成一些颗粒或团聚体。这些有机分子可以改变基底表面的理化性质(如表面自由能等),使之有利于下一步微生物附着,并且吸附的有机分子可以为细菌提供营养。所以,该阶段又被称为条件膜(conditioning film)形成阶段。

2. 微生物吸附

在此后的几小时内,细菌和单细胞硅藻等海洋微生物依靠扩散、对流传送、重力作用、布朗运动等自然力及鞭毛运动等靠近基底表面,待进入基底表面附近区域时,借助于范德华力、静电引力和氢键相互作用等物理化学作用在基底表面发生快速的可逆吸附,随后发生基底表面与细胞表面上的黏附蛋白分子间缓慢的不可逆吸附^[2, 4]。

3. 微生物膜的形成

黏附在基底表面的微生物为使自己附着得更加牢固,开始分泌胞外多聚物,主要包括蛋白质、多糖、磷脂、糖蛋白等,这些物质之间依靠疏水相互作用、高价离子相互作用和弱的物理化学作用形成长期稳定的网状结构。生物膜的形成是微生物生存的一种普遍方式,其过程需要数天的时间。生物膜的存在可增强膜内生物对外界环境变化的抵抗力。例如,可以减弱基底表面杀菌剂的作用,同时也使营养物质难以扩散到外界环境中,也为后面的大型生物附着提供了便利。生物膜内微生物的生命代谢活动和代谢产物是造成材料腐蚀的重要方面^[2, 5]。

4. 大型生物附着

数周后,藤壶、贝类、硅藻、绿藻等一些大型海洋生物开始在基底表面生长。大型生物附着方式随生物种类的不同而有所不同,藤壶和石莼采用类似的附着方式,即先暂时附着在基底上,当发现适合生存的位置就立即生长发育并长期固着;贝类则是由胶原蛋白和亲水性多酚黏性蛋白组成的足丝附着于基体表面,海洋生物污损主要的罪魁祸首便是这些大型软体和硬质的污损生物。由于许多大型附着物如藤壶幼体均以硅藻为食,因此从时间顺序上,大型附着物的固着发生在生物膜形成后,当然这也并非绝对,有些研究者认为生物膜的形成与大型生物附着并没有直接的关系^[2]。

综上所述,海洋生物附着按照附着机理的性质可分为两类:一类为物理作用,

另一类为生化作用，如图 1-3 所示。物理作用主要包括布朗运动、静电作用、重力作用、水流驱动、范德华力等，其主要发生在条件膜的形成及微生物与固体表面的趋近过程。生化作用主要包括各种胞外多聚物的分泌、生物能量的消耗等，主要发生在微生物在固体表面上的重新定位与爬行、深度附着、分裂繁殖及后续大型生物的附着。由于物理作用及爬行是可逆的，因此大多数防污研究都主要集中在附着可逆的环节^[6]。

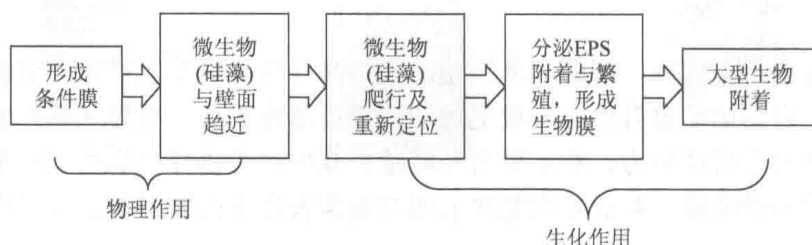


图 1-3 生物附着过程及其机理

1.2 典型污损生物附着过程与机制

1.2.1 细菌的附着机制

细菌的附着起始于静电、重力、水流等作用下浮游细胞与固体表面的作用。经历最初的可逆附着之后，细菌利用胞外多聚物暂时性地附着于固体材料表面。胞外多聚物主要由多聚糖组成。当细菌群落分泌出大量的胞外多聚物，生物膜就会逐渐形成（图 1-4）。生物膜通常由大量相似或同质的混合物种组成。当生物膜成熟之后，细胞就会从生物膜脱离。细菌由可逆附着向不可逆附着的转变是由称为“群体感应”的细胞密度依赖决定的。顾名思义，细菌可以通过识别群体中细

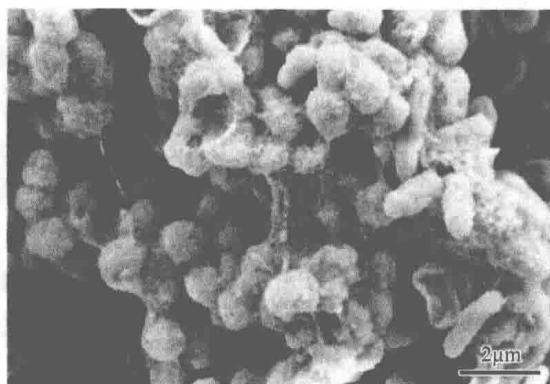


图 1-4 细菌生物膜形成过程中表面的胞外多聚物^[8]