

# 材料的生物腐蚀与防护

CAILIAO DE SHENGWU FUSHI YU FANGHU

吴进怡 柴柯 编著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 材料的生物腐蚀与防护

吴进怡 柴 柯 编著

冶金工业出版社

2012

## 内 容 提 要

本书介绍了材料生物腐蚀的研究进展、机理、研究方法及不同环境下材料微生物腐蚀及防护方法；详细分析了在海洋环境中碳钢的微生物腐蚀及其力学性能的影响；最后介绍了金属在海洋环境中的生物污损及防护。

本书可作为从事生物腐蚀、涂料领域的工程设计人员、科研人员和管理人员的参考书，也可作为高等院校、科研院所材料腐蚀与防护专业的研究生教材及本科相关方向的毕业设计指导用书。

### 图书在版编目(CIP)数据

材料的生物腐蚀与防护/吴进怡,柴柯编著. —北京:  
冶金工业出版社, 2012. 6

ISBN 978-7-5024-6033-4

I. ①材… II. ①吴… ②柴… III. ①材料—生物  
腐蚀—防腐 IV. ①TB304

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 208580 号

出 版 人 曹胜利

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjcs@cnmip.com.cn

责任编辑 杨盈园 美术编辑 彭子赫 版式设计 葛新霞

责任校对 李 娜 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-6033-4

三河市双峰印刷装订有限公司印刷; 冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销  
2012 年 6 月第 1 版, 2012 年 6 月第 1 次印刷

850mm × 1168mm 1/32; 8.625 印张; 230 千字; 265 页

28.00 元

冶金工业出版社投稿电话:(010)64027932 投稿邮箱:tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话:(010)64044283 传真:(010)64027893

冶金书店 地址:北京东四西大街 46 号(100010) 电话:(010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

# 前 言

材料与介质接触的表面往往会因生物附着而形成生物膜。由生物膜内微生物的存在和其生命活动而引起的腐蚀称为微生物腐蚀 (microbially influenced corrosion, MIC)。当金属表面存在微生物膜时, 金属表面/微生物膜界面的 pH 值、溶解氧浓度、有机物和无机物的种类和浓度都与本体溶液有很大差别, 生物膜内的反应会引起金属的腐蚀破坏, 导致金属表面状态、局部微环境、材料/介质的界面特性等发生变化, 从而影响腐蚀速度。细菌的存在既可能造成点蚀、缝隙腐蚀和合金选择性腐蚀等局部腐蚀, 也可能使宏观腐蚀率提高, 还会造成高分子材料的老化。但菌膜隔绝空气的作用也可能阻碍材料的吸氧腐蚀。细菌对材料腐蚀的加速或抑制作用决定于菌群的组成和浓度。宏观生物也会产生污损和腐蚀。本书首先介绍了材料生物腐蚀的机理、研究方法及不同环境下的微生物腐蚀及防护方法, 然后详细分析了碳钢在热带海洋环境中的微生物腐蚀及对材料力学性能的影响; 最后介绍了金属在海洋环境中的生物污损及防护。

本书是作者在研究时所发表文章和申请专利的基础上, 经总结并参阅了大量参考文献后编写而成。

本书可作为从事生物腐蚀、石油化工、电厂、海洋设计、

涂料等领域的工程设计人员、研究人员和管理人员的参考书，也可作为高等院校、科研院所材料腐蚀与防护专业的研究生教材及本科相关方向的毕业设计指导用书。

由于作者水平有限，书中出现的不妥之处，恳请读者批评指正。

**作者**

2012年3月

# 目 录

<b>1 材料的微生物污损与防护</b> .....	1
1.1 微生物腐蚀 .....	1
1.1.1 微生物腐蚀的研究进展 .....	1
1.1.2 微生物对材料腐蚀的作用 .....	4
1.1.3 微生物对材料局部腐蚀的作用 .....	7
1.1.4 微生物腐蚀机制 .....	9
1.2 几种典型微生物对碳钢腐蚀的机理 .....	12
1.2.1 硫酸盐还原菌 .....	12
1.2.2 硫氧化菌 .....	16
1.2.3 腐生菌 .....	16
1.2.4 铁细菌 .....	16
1.3 微生物腐蚀的研究方法 .....	17
1.3.1 传统生物学技术研究法 .....	17
1.3.2 现代生物学技术研究方法 .....	40
1.3.3 金属表面观察方法 .....	49
1.3.4 化学研究方法 .....	49
1.3.5 电化学研究方法 .....	60
1.3.6 表面分析方法 .....	63
1.3.7 微电极分析技术 .....	80
1.4 金属在海洋环境微生物腐蚀 .....	80
1.4.1 金属在海洋环境微生物腐蚀概况 .....	80
1.4.2 海水中微生物腐蚀的防护 .....	83
1.4.3 抗菌金属材料 .....	86
1.5 金属在石油工业领域的微生物腐蚀 .....	87

1.5.1	金属在石油工业领域的微生物腐蚀现状	87
1.5.2	金属在石油方面的微生物的防治方法	88
1.6	材料在土壤中的微生物腐蚀	90
1.6.1	材料在土壤中的微生物腐蚀状况	90
1.6.2	材料在土壤中的微生物腐蚀防护方法	92
1.7	混凝土的微生物腐蚀	93
1.7.1	混凝土的微生物腐蚀状况	93
1.7.2	材料在混凝土中的微生物腐蚀机理	95
1.7.3	腐蚀的影响因素	96
1.7.4	微生物腐蚀的预防	97
1.8	循环冷却水中的微生物腐蚀	97
1.8.1	循环冷却水中的微生物所产生的危害	97
1.8.2	引起危害的主要微生物	100
1.9	口腔中金属材料的微生物腐蚀	104
1.10	高分子材料的微生物腐蚀	106
1.10.1	微生物对高分子的破坏机制	106
1.10.2	微生物腐蚀的防护和预防	108
1.11	霉菌污损与防护	108
1.11.1	霉菌对人类健康的危害	109
1.11.2	霉菌对涂层及高分子的破坏	109
1.11.3	真菌对舰船和飞机的破坏	110
1.11.4	防霉剂	111
1.12	长效复合纳米抗菌抗霉添加剂	115
<b>2</b>	<b>热带海洋气候下海水中微生物对 25 钢腐蚀</b>	
	<b>行为的影响</b>	<b>121</b>
2.1	试验材料和试样	121
2.2	海洋环境模拟	121
2.3	测试及分析方法	122
2.3.1	平均腐蚀速率测定	122

2.3.2	腐蚀表面分析 .....	123
2.3.3	腐蚀产物中微生物组成鉴定 .....	123
2.4	微生物对 25 钢腐蚀行为的影响 .....	125
2.4.1	平均腐蚀速率 .....	125
2.4.2	腐蚀表面分析 .....	127
2.4.3	微生物分析 .....	135
2.4.4	微生物腐蚀机理 .....	138
<b>3</b>	<b>热带海洋气候下海水中微生物腐蚀对 25 钢力学性能的影响 .....</b>	<b>142</b>
3.1	试验材料和试样 .....	142
3.2	海洋环境模拟 .....	142
3.3	测试及分析方法 .....	142
3.3.1	力学性能测定 .....	142
3.3.2	拉伸断口形貌分析 .....	143
3.4	微生物腐蚀对 25 钢力学性能的影响 .....	143
3.4.1	拉伸性能 .....	143
3.4.2	拉伸断口形貌分析 .....	144
3.4.3	冲击性能 .....	145
3.4.4	海水中微生物腐蚀对 25 钢力学性能的影响原理 .....	146
<b>4</b>	<b>热带海洋环境下海水中微生物对 45 钢腐蚀行为的单因素影响 .....</b>	<b>149</b>
4.1	实验方法 .....	149
4.2	微生物对 45 钢腐蚀行为的单因素影响 .....	149
4.2.1	平均腐蚀速率 .....	149
4.2.2	腐蚀产物及表面形貌分析 .....	151
4.2.3	微生物分析 .....	154
4.3	腐蚀机理 .....	155



<b>5</b>	<b>海水中弧菌对 45 钢腐蚀行为及力学性能的影响</b>	<b>158</b>
5.1	试验材料和试样	158
5.2	微生物来源和培养	159
5.3	试验介质	159
5.4	测试及分析方法	159
5.5	海水中弧菌对 45 钢腐蚀行为及力学性能的影响	160
5.5.1	弧菌海水中弧菌生长	160
5.5.2	腐蚀产物中弧菌生长	161
5.5.3	平均腐蚀速率	161
5.5.4	表面分析	162
5.5.5	力学性能	165
5.5.6	机理分析	166
<b>6</b>	<b>海水中假单胞菌对 45 钢腐蚀行为及力学性能的影响</b>	<b>169</b>
6.1	试验材料和试样	169
6.2	微生物来源和培养	169
6.3	试验介质	170
6.4	测试及分析方法	170
6.5	假单胞菌对 45 钢腐蚀行为及力学性能的影响	171
6.5.1	腐蚀产物中微生物的生长变化	171
6.5.2	平均腐蚀速率	172
6.5.3	表面分析	173
6.5.4	力学性能	176
6.5.5	影响机制	176
<b>7</b>	<b>金属在海洋环境中的污损及防护</b>	<b>179</b>
7.1	概述	179
7.2	我国海洋环境宏观生物污损	180
7.3	国外藤壶幼体附着研究进展	183

7.3.1	物理因素对藤壶附着的影响 .....	185
7.3.2	化学因素对藤壶附着的影响 .....	187
7.3.3	生物因素对藤壶附着的影响 .....	188
7.4	宏观生物附着对金属腐蚀行为的影响 .....	190
7.5	海洋生物污损的防治 .....	192
7.5.1	机械防污损法 .....	192
7.5.2	防污涂料 .....	193
7.5.3	自抛光防污涂料 .....	194
7.5.4	新型防污高分子材料 .....	194
7.5.5	具有微观相分离结构的防污涂料 .....	196
7.5.6	电流防污损技术 .....	197
7.5.7	可溶性硅酸盐为主防污剂的无毒防污涂料 .....	199
7.5.8	生物防污剂涂料 .....	200
7.5.9	仿生涂料 .....	202
附录	.....	204
附录 1	工业循环冷却水中硫酸盐还原菌的测定	
	MPN 法 .....	204
附录 2	工业循环冷却水中菌藻的测定方法 .....	214
附录 3	抗菌涂料 .....	225
附录 4	金属材料在表面海水中常规暴露腐蚀	
	试验方法 .....	240
参考文献	.....	251

# 1 材料的微生物污损与防护

## 1.1 微生物腐蚀

由材料表面生物膜内的微生物生命活动引起或促进材料的腐蚀和破坏称为微生物腐蚀（MIC）。微生物腐蚀并非其本身对金属的侵蚀作用，而是微生物生命活动的结果。微生物附着在金属表面一段时间后会形成一层生物膜，生物膜内微生物的新陈代谢活动使得生物膜内的环境与本体溶液不同，包括电解质组成、浓度、温度、pH 值、溶解氧等，从而影响了材料表面的阴、阳极分布和阴、阳极反应过程，导致材料腐蚀速度的变化和局部腐蚀的产生。

几乎所有常用材料都会产生由微生物引起的腐蚀。据统计，在金属材料、建筑材料等由微生物引起的腐蚀破坏就占到 20%。根据 2003 年发表的中国腐蚀调查报告，我国年腐蚀损失约占国民生产总值的 5%，腐蚀所造成的经济损失约为每年 5000 亿元人民币，其中微生物腐蚀损失巨大。与海洋微生物附着有关材料破坏占到涉海材料总量的 70% ~ 80%，每年因微生物腐蚀造成的损失约为 30 亿 ~ 50 亿美元，如海上油田气、水系统、深水泵、循环冷却系统、海上采油平台、海底输送管线、海底采矿设备、海上栈桥、码头等一系列装置都发现受到 MIC 的危害，这使材料的使用寿命和应用范围都受到了很大的影响和限制。

### 1.1.1 微生物腐蚀的研究进展

微生物腐蚀研究主要是海洋微生物腐蚀、土壤微生物腐蚀、石油管道微生物腐蚀、冷却水微生物腐蚀等几方面。

1891 年由加勒特（Garrett）首次报道了微生物腐蚀的例子，

即细菌代谢产物的铅电缆腐蚀。约 20 年后，盖恩斯 (Gaines) 认为硫酸盐还原菌 (SRB)、硫氧化细菌和铁细菌是导致土壤中金属腐蚀的部分原因。但真正引起科技界重视的是沃利尔根·库恩尔 (Wolyogen Kunr) 等人在 1934 年提出阴极氢去极化理论之后才开始的，他们假设 SRB 能够吸附金属表面的氢从而促进了金属的腐蚀。1949 年，巴特林 (Butlin) 和弗农 (Vernon) 在微生物腐蚀领域提出了一些经典的概念。自此，关于金属和非金属材料在各种环境下的 MIC 报道不断增加。微生物腐蚀存在的广泛性和腐蚀的严重性，引起了国际工程界专家们的关注。自 20 世纪 30 年代中期美国建立拉奎海水腐蚀实验站以来，许多国家也先后建立了实验站，进行材料海水腐蚀实验研究，其中欧洲 7 个研究所联合进行了一项高合金不锈钢上的海洋微生物膜的性质和作用的研究计划。

目前国内外对微生物腐蚀的作用及腐蚀机理已有一定的研究，研究内容主要集中在实海挂样和单种细菌的腐蚀方面。实海挂样的研究结果与实际情况较为接近，但受多种因素影响，包括海水理化指标、海水流速、气泡冲击、宏观生物等，很难由其判断微生物的单因素影响程度；单种细菌的腐蚀研究可以在一定程度上揭示各种细菌对腐蚀过程的影响以及微生物腐蚀过程的机制。目前，关于单种细菌对材料腐蚀的影响，已经有了较多的报道。

单种细菌腐蚀中研究较多的为 SRB 所引起的腐蚀。SRB 是一种对多种金属的腐蚀有重要影响的细菌。研究发现，SRB 对铜的毒性有一定的适应性，且对铜的腐蚀产物主要为  $\text{Cu}_2\text{S}$ ；在存在 SRB 的介质中 N-80 钢的腐蚀速度约为无 SRB 活性时的 6 倍以上；1Cr13 不锈钢在 SRB 菌泥中的自然腐蚀速度与在灭菌泥中比较，两者相差 5.1 倍，说明海泥中 SRB 增大了 1Cr13 不锈钢的腐蚀速率；304 不锈钢在无菌海水和加入 SRB 的海水中的腐蚀行为表明，SRB 参与了不锈钢的电化学腐蚀，加速了腐蚀速度，破坏了不锈钢的钝化层，诱导了不锈钢点蚀的发生；在

有 SRB 菌的培养基中，B10 合金的腐蚀电位剧烈负移，腐蚀速率显著增加，电子探针测量表明合金发生了镍和铁的选择性溶解，腐蚀形貌呈海绵状；SRB 对碳钢腐蚀也起到加速作用。氢化酶阴极去极化理论认为 SRB 本身含有一种氢化酶，它能利用在阴极区产生的氢将硫酸盐还原成  $H_2S$ ，因此，在厌氧电化学腐蚀过程中，它可以起到一种阴极去极化剂的作用，从而加速金属的腐蚀；细菌代谢产物去极化理论提出在厌氧情况下，SRB 对金属的腐蚀速度由于阴极产生  $H_2S$  而上升，并且因形成  $FeS$  而加速了阳极反应；Miller 认为 SRB 对钢铁腐蚀不仅是因为  $H_2S$  的侵蚀性，也是由于氢化酶活性和代谢产物促进阴极去极化作用；艾弗森（Iverson）认为在厌氧情况下，SRB 会产生挥发性磷化合物，与基体铁反应生成磷化铁从而导致金属腐蚀。

一系列的证据表明，铁细菌是导致钢铁材料微生物腐蚀的主要因素之一。研究发现核反应堆冷却水系统中的碳钢受到铁细菌的严重腐蚀后，表面形成了大量的结核，扫描电镜（SEM）观察显示这种结核是由鞘丝状的铁细菌与腐蚀产物结合在一起形成的，腐蚀产物主要是铁细菌腐蚀碳钢形成的铁氧化物；316L 不锈钢在含有铁细菌培养基和无菌培养基中腐蚀电位的比较表明，铁细菌导致了腐蚀电位的下降，造成 316L 不锈钢抗腐蚀性能的降低，使得不锈钢表面出现了点蚀；碳钢热交换器中冷却水和沉积物的化学分析及沉积物中细菌分离的结果显示，热交换器失效的原因是冷却水中铁细菌对碳钢的腐蚀；通过研究输油管道中的石油分解产物及腐蚀输油管道的微生物，穆瑟库玛（N. Muthukumar）等人发现铁细菌不但分解石油中的脂肪烃，而且还会腐蚀输油管道。铁细菌获取能量的方式是将亚铁离子氧化为高铁离子，继而高铁离子形成一种低密度的水合铁氧化物，大量的水合铁氧化物集聚在钢铁的表面，构成了结核，这样，铁细菌就创造了一种有助于自身生长的环境，这种环境同时也加速了钢铁的腐蚀，因此铁细菌自身的氧化能力和水合铁氧化物结核是钢铁腐蚀的关键因素。

硫杆菌是另一种能严重腐蚀金属材料的细菌。氧化亚铁硫杆菌对 A3 钢的腐蚀研究表明, 在氧化亚铁硫杆菌的影响下, A3 钢的腐蚀电流密度有了明显升高, SEM 观察显示, A3 钢在浸泡于氧化亚铁硫杆菌溶液中 7 天后, 表面出现了点蚀坑, 并且在浸泡时间达到 20 天时, 点蚀坑的深度增加了; 非电镀镍低碳钢板在纯培养的氧化亚铁硫杆菌溶液中浸泡后, 经显微观察发现涂层遭到了分解破坏, 钢板表面出现了点蚀坑, 运用失重法, 同时检测到了较高的腐蚀速率; 对水处理工厂储水罐钢材表面的大型锈色结节的分析揭示水中的硫杆菌使得钢材产生了强烈的锈蚀。常见的硫杆菌有氧化硫硫杆菌、排硫硫杆菌、氧化亚铁硫杆菌, 硫杆菌能将硫及硫化物氧化成硫酸, 造成金属材料的严重腐蚀。

假单胞菌和弧菌对金属材料的腐蚀也有一定研究, 但研究结果存在较大差异, 有研究结果表明假单胞菌和弧菌能加速碳钢的腐蚀, 还有研究表明假单胞菌和弧菌对金属有缓蚀作用。还有待对其进一步探索。

我国这方面的工作起步较晚, 在 20 世纪 50 年代中国科学院微生物所建立了微生物腐蚀研究课题, 对全国的腐蚀网站的微生物腐蚀情况进行调查, 分离和鉴定了一些硫酸盐还原菌、铁细菌的种类, 并且对防腐措施做了相关研究。80 年代以来, 国家设立了“材料海水腐蚀数据积累及其规律研究”项目, 至今已积累了 70 多种材料在典型海域内腐蚀数据四万多个, 并对这些数据进行了大量分析研究, 同时微生物腐蚀及污损生物引起局部腐蚀方面也开展了一些工作。

MIC 由于复杂多变的海生物因素难以控制和定量描述, 实验周期长且研究难度大, 基础研究方面相对较少, 对于微生物影响金属材料腐蚀程度、腐蚀机制等还缺乏系统深入的认识。

### 1.1.2 微生物对材料腐蚀的作用

微生物既有加速腐蚀作用, 又有缓蚀作用。微生物在金属

表面的生长繁殖能够影响其腐蚀速度和电化学反应的机理。按照当前的观点，主要是微生物的代谢产物或者说其分泌物直接影响着金属的腐蚀。文献中关于微生物与金属的相互作用主要以微生物加速腐蚀或微生物影响的缓蚀为主。大部分 MIC 是局部腐蚀，如孔蚀、缝隙腐蚀、沉积层下腐蚀、脱合金腐蚀，还能增强电偶腐蚀、环境敏感断裂和腐蚀磨蚀。也有很多关于生物膜腐蚀缓蚀的报道，大部分认为生物膜能够减缓均匀腐蚀。较均匀分布的生物膜由于形成界面传质障碍或表层有机体生命活动耗氧从而对一些材料起缓蚀作用。但自然附着生长的生物黏膜往往是结构复杂而且分布不均匀的，一些条件下降低均匀腐蚀速度，但却造成局部腐蚀破坏。

一个明显的矛盾是，生物膜内某些微生物能够引起局部腐蚀，而另一些微生物却缓蚀了均匀腐蚀。与灭菌条件比较，假单胞菌 *Pseudomonas* 和沙雷氏菌属 *Serratia* 能够增加铁和镍的腐蚀速度，但维德拉 (H. Videla) 等人的研究却显示假单胞菌 *Pseudomonas* 和沙雷氏菌属 *Serratia marcescens* 对铝及其合金在某些环境下具有保护作用。还有不同研究人员发表假单胞菌和弧菌在海水中对碳钢的腐蚀，但研究结果存在较大差异，有研究表明假单胞菌和弧菌能加速碳钢的腐蚀，还有研究表明假单胞菌和弧菌对金属有缓蚀作用。吴进怡研究小组经过研究发现研究结果的相反可能来自于腐蚀介质的选取。目前国内外海水单菌腐蚀研究所采用的腐蚀介质基本为海水培养基。培养基中大量的蛋白胨、牛肉膏、琼脂等营养物质对金属表面有强的缓蚀作用，可将碳钢的腐蚀速率下降 1~2 个数量级，而微生物腐蚀所增加的腐蚀速率只有几倍，腐蚀介质远离自然状态所带来的误差有可能是结果矛盾的主要原因。吴进怡研究小组对比同种细菌接种于海水培养基中和自然海水中的生长浓度，发现由于海水中的某些限制性因素，细菌在两种介质中的最高浓度实际上较为接近，如假单胞菌在两种介质中的最高浓度均可达  $10^{10}$  CFU/mL，只是细菌在海水培养基中达到浓度最大值的时间

稍短，因此，实验室模拟微生物腐蚀实验的实验方法还值得探讨。

SRB 生物膜与同等  $S^{2-}$  比较，具有较低的腐蚀性，降低了孔蚀电位。

所有黏附于金属表面的微生物都会产生高分子并在其上形成一凝胶基质层（简称 EPS），EPS 对金属的俘获作用已经被作为 MIC 的一个机理和腐蚀缓蚀而被报道，曼斯菲尔德（Mansfield）首先提出了“使用再生生物膜进行腐蚀控制（CCURB）”的概念和理论，即使用再生细菌控制腐蚀。一些微生物，能够分泌一些胞外聚物质，诸如多天（门）冬氨酰苯丙氨酸甲酯（polyaspartate）、 $\gamma$ -聚谷氨酸盐（ $\gamma$ -polyglutamate），黏附于金属表面，能够降低腐蚀电流密度。

杰亚罗曼（Jayaraman）等人认为腐蚀缓蚀是因为薄层活性生物膜的存在或其分泌的腐蚀缓蚀性化学物质使其具有缓蚀性。在好氧的包含有多种细菌的复杂培养基中，失重损失比无菌对照试样降低 2 ~ 15 倍。腐蚀缓蚀及其程度随细菌的种类和其生物膜的性质而变化，活性细菌在生物膜内的增加使缓蚀效果增加。

伊希瓦尔（Eashwar）等人综述了金属在海洋环境下变正即自然腐蚀电位（OCP）正移的一些文献。正移为微生物的代谢活动所控制，而不是因为微生物在生物膜内物理上的存在。正移的主要机制是微生物代谢产生的缓蚀物质增强了不锈钢的钝化。阳极极化曲线和循环伏安表明在电位正移的同时钝化电流降低，钝化区和临界孔蚀电位增加。不锈钢钝化膜的增强为含铁细胞（Siderophores）所协助。Siderophores 是细菌在近中性 pH 值下所分泌的铁络合剂。其他人也报道了 Siderophores 的缓蚀性能。

然而，许多研究者也发现，在 OCP 发生正移时，阴极电流密度增加。莫利卡（Mollica）和特里维斯（Trevis）的报道 OCP 从 30mV 增加到 450mV，阴极电流密度从  $10^{-9}$  ~  $10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup>，其



他人也有类似的结果。通常认为正移是由于细菌在金属表面的生长发展引起的。

实际上,研究者早已观察到许多好氧微生物在某些环境下能够降低腐蚀速度。不过,控制并利用生物膜对工业设施进行腐蚀缓蚀的想法是新的。但必须指出的是,导致腐蚀缓蚀的原因很复杂,大部分研究都是在富含培养基的介质中进行的,而培养基本身也可能起到缓蚀作用。利特尔(B. Little)等人认为,在生物膜被作为缓蚀物质前,还需要做进一步的研究工作。生物膜的形成是十分复杂的生物学/化学过程,还从未被成功的明晰化和模型化,它们对腐蚀的影响是很难预测和控制的。

其他环境因素对腐蚀速度也会产生影响。许立铭和刘宏芳等人对未接种与接种SRB的SRB的介质中 $\text{Fe}^{2+}$ 对A3钢的腐蚀影响进行了比较,发现当铁离子浓度较低时(小于50mg/L),SRB的存在对碳钢起保护作用,其腐蚀产物膜致密,阻碍了介质与铁的作用,而且生物膜中的细菌数少于介质中的菌量;当铁离子浓度较高时,SRB腐蚀产物膜厚且疏松,FeS成为腐蚀微电池的阴极,对碳钢的腐蚀起促进作用。

### 1.1.3 微生物对材料局部腐蚀的作用

美国的一些学者在研究厌氧菌生物膜下细菌腐蚀时发现,移去试片表面生成的生物膜和腐蚀产物后,点蚀电位移到活性区,在此种情况下随着生物膜的积累,就会发生点蚀。去除表面腐蚀产物,通过电子探针研究发现蚀孔中含有SRB和FeS晶体。据推测,点蚀的发生是合金基体的金相不均匀性引起的,其次才是SRB的作用。因此可以认为,生物膜下的SRB腐蚀被加速的机理可能有以下几个方面:

(1) 腐蚀速率被加速是通过阴极去极化,但又受通过腐蚀产物层的硫化氢气体的扩散所控制(浓差极化),与没有SRB存在时的腐蚀一样。

(2) 腐蚀速率被阴极去极化加速,但不受浓差极化限制。