

微生物腐蚀：材料科学与微生物学交叉应用的新视角

吴俊豪 金敏

东北大学生命科学与健康学院，辽宁 沈阳 110169

摘要：材料科学与微生物学的交叉融合为多领域提供了新研究视角。材料表面理化性质显著影响微生物附着生长，基于此，微生物可通过生物矿化合成碳酸钙、硅酸盐等无机材料，及多糖、纤维素等高生物相容性有机聚合物，在医药、环保与废物管理中颇具价值。微生物诱导腐蚀（MIC）是工业材料科学的关键难题。其由微生物活动引发，通过在材料表面形成生物被膜改变局部化学环境，加速腐蚀进程，全球每年因 MIC 造成的设备维修、生产中断及环境污染处置等经济损失巨大。在 MIC 研究中，开路电位、线性极化电阻等非破坏性电化学技术，以及扫描电子显微镜结合能量色散光谱仪等表面分析技术至关重要。针对传统抗腐蚀方法的缺陷，新型基于活体生物被膜的防治技术通过抑制腐蚀性微生物生长并形成保护层，兼具环保与成本优势。跨学科合作对发展高效 MIC 防治策略、提升材料使用寿命意义重大。

关键字：微生物腐蚀（MIC）；生物被膜（BF）；电化学技术；腐蚀防治；材料科学；微生物学

DOI: 10.63887/jerp.2025.1.5.10

1 引言

材料科学在微生物学方面的应用非常广泛。材料表面的物理化学性质会显著影响微生物的附着和生长^[1]。通过研究这些相互作用，科学家们可以更好地了解微生物在不同环境中的行为。

微生物可以通过生物矿化过程合成各种无机材料，如碳酸钙、硅酸盐等。某些微生物还具有合成有机聚合物的能力，如多糖和纤维素，这些物质往往相比于人工合成材料具有更高的生物相容性和生物可及性。在医药领域，利用这些微生物合成的生物相容材料可能会促进新药的开发和疾病治疗方法的革新。例如，细菌纤维素被应用于医疗敷料，在人类表皮角质形成细胞和真皮成纤维细胞的修复中显示了巨大的潜力^[2]。微生物在环境保护和废物管理方面的作用同样不可小觑。某些微生物能够降解塑料和其他合成材料，这对于缓解环境污染和提高废物处理效率具有重大意义。深入研究这些微生物的降解机制，可以促进生物降解材料的开发，从而提供更环保的解决方案^[3]。

显然，材料科学与微生物学的进步是相辅相成的，材料科学与微生物学之间的交叉合作正开辟着前所未有的研究和应用前景。这种结合为我们提供了一种全

新的视角，来理解和利用微生物在自然界和工业应用中的作用。在工业材料科学中，微生物诱导的腐蚀是一个重要问题。了解微生物如何与金属材料相互作用，对于延长这些材料的使用寿命至关重要。

2 微生物腐蚀（Microbiologically influenced corrosion, MIC）

2.1 微生物腐蚀的发生

金属腐蚀是自然且难以避免的过程，全球每年30%-40%的钢铁因腐蚀报废，约三分之一无法回收，给钢铁产业带来巨大损失。严重腐蚀还会引发设备损坏、有毒物质泄漏、火灾爆炸等事故，威胁生命、环境与社会安全。微生物诱导腐蚀（MIC）由微生物活动引发，可作用于各类金属与非金属材料。微生物在材料表面形成生物被膜（BF），改变局部化学环境，加速腐蚀。以硫酸盐还原菌（SRB）为例，其产生的硫化氢等腐蚀性化合物与金属反应，造成严重腐蚀。MIC 多发生于金属与水或土壤接触的环境，在海洋、工业和城市基础设施中普遍存在。因此，研究腐蚀损伤及 MIC 副产物的作用机制至关重要^[4]。

2.2 MIC 造成经济损失

MIC 在全球范围内造成了巨大的经济损失，仅在

2019年,全球为控制和消除水系统中的生物被膜的成本就高达1170亿美元;而在所有机械和土木工程的相关设施上,因MIC造成的损失更是超过27000亿美元,涵盖了设备维修成本、生产中断和环境污染的处置费用^[5]。MIC对全球设施破坏是广泛的,而防治腐蚀的成本也是极其高昂的。我们必须认识到MIC的严重性和普遍性。为了防治MIC,我们需要微生物学、材料科学、化学和环境工程等学科的交叉应用。

2.3 MIC的研究技术

实时监测BF生长对金属材料的影响,获得有关微生物对工业系统影响的信息是一个需要研究的关键点。非破坏性电化学技术,如开路电位(OCP)、线性极化电阻(LPR)、电化学阻抗谱(EIS),以及通过扫描电子显微镜(SEM)和能量色散光谱仪(EDS)对BF、金属表面和腐蚀产物的元素组成进行形态学和元素研究,为分析BF生长对这些系统电化学性质的影响提供了可行性^[6]。

3 BF的形成对MIC的影响

3.1 BF促进MIC的发生

Angélica等以1020号碳钢为研究对象,在油田注水环境中分析了SRB在碳钢表面形成BF的过程,通过电化学测试、SEM和等技术手段来评估和观察BF的形成对碳钢的腐蚀影响。结果表明,BF的形成导致OCP明显负移,从-591.54 mV下降到-704.04 mV,表明了显著的电化学性质变化。在BF形成的前14小时内,腐蚀速率急剧增加到17.73 mpy,而在接下来的时间里,腐蚀速率维持在14.11-14.65 mpy的较高水平。在BF形成的48小时后,EIS显示了从电荷转移过程向扩散过程的转变,反映了BF对腐蚀过程的影响。同时,LPR在BF形成的前48小时降至最低值74.95 $\Omega \cdot \text{cm}^2$,进一步证实了腐蚀过程的加速。SEM和EDS分析揭示了碳钢表面形成了由SRB主导的BF和特定的腐蚀产物结构。研究指出,在油田注水环境中,BF的形成对碳钢腐蚀产生了促进作用。

3.2 MIC防治技术的选择须因地制宜

Vitor Liduino等探究了印加电流阴极保护下^[7],不同电位(-800、-900、-1000 mV Ag/AgCl)对海洋环

境中AISI 1020钢受SRB介导腐蚀的抑制效果。实验将未保护与阴极保护钢样在海水中暴露7天,通过MPN计数分析微生物定殖情况。结果显示:未保护钢表面微生物定殖量显著高于阴极保护组,但不同保护电位下的生物被膜数量无明显差异。值得注意的是,随阴极保护电位降低,产氢酶阳性SRB数量增加,其中-1000 mV组的腐蚀坑数量与深度均显著高于-800 mV组及未保护组。该研究颠覆了"SRB在厌氧环境更活跃"的传统认知,证实高溶解氧条件下SRB介导的腐蚀更为严重。同时发现,虽阴极保护能有效减少金属表面微生物附着量,但-1000 mV电位会刺激SRB产氢酶活性,即使微生物数量少也可能引发严重坑蚀。研究表明,在高SRB密度的海洋环境中,-1000 mV电位不适用于MIC防护,甚至可能加剧钢材退化,强调实施腐蚀防治技术前需针对具体MIC案例开展个性化研究。

3.3 一种基于活体BF的新型MIC防治技术

传统抗腐蚀方法(材料涂层、表面处理、耐腐蚀材料等)存在成本高、适用性局限或环境不友好等缺陷,而近年兴起的活体生物膜(BF)腐蚀防治技术展现出创新突破。该技术通过微生物形成的BF去除腐蚀性阴极介质(如氧气),抑制腐蚀微生物生长并在金属表面构建保护层,将原本促进腐蚀的BF转化为防护工具,具备成本低、适用广、操作简便及环境友好等优势。

Li等探究三种海洋细菌(*T. mesophilum* D-6、*T. litoreum* W-4、*Bacillus* sp. Y-6)形成的BF对X80碳钢的防护效果^[8]。实验显示,无菌介质中X80腐蚀率为 9.9×10^{-2} mm/a,而在*T. mesophilum* D-6培养基中腐蚀率降至一半;BF厚度分别为33.2、25.4和21.7 μm ,其中*T. mesophilum* D-6组的极化电阻(R_p)值在14天培养期内显著高于无BF系统,其腐蚀电流密度(i_{corr})仅为 $0.39 \pm 0.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。腐蚀坑深度数据进一步佐证防护效果:无BF介质中平均最大腐蚀坑深度为 $5.8 \pm 1.5 \mu\text{m}$,而三种细菌BF作用下分别降至 2.7 ± 0.7 、 3.6 ± 0.8 和 $3.9 \pm 1.0 \mu\text{m}$,证实*T. mesophilum* D-6的防护性能最优。

BF中胞外聚合物(EPS)占比50%-90%,是防护

的关键基质。研究发现^[9], EPS 浓度随 BF 成熟度增加而上升, 其含量与腐蚀防护效果直接相关。例如, *T. mesophilum* D-6 产生的外源性多糖可显著提升 Rp 值, 而外源性蛋白无明显防护作用。该技术通过微生物代谢活动与 EPS 基质协同, 为金属腐蚀防护提供了绿色高效的新路径。

4 结论

材料科学与微生物学的结合为理解和应对 MIC 提供了新的视角和方法。微生物在材料表面的附着和生

长受到其物理化学性质的显著影响, 而这些相互作用对于开发新药、治疗方法以及环境保护和废物管理具有重要意义。MIC 不仅在全球范围内造成了巨大的经济损失, 还对设施和环境安全构成威胁。通过应用非破坏性电化学技术, 我们可以更深入地了解 and 监测这些微生物的腐蚀行为。此外, 创新的防治方法, 特别是基于活体生物被膜的新型腐蚀防治技术, 展现了在环保和成本效益方面的巨大潜力。因此, 跨学科合作, 尤其是微生物学和材料科学的结合, 对于发展更有效的 MIC 防治策略和提高材料的使用寿命至关重要。

参考文献

- [1]Carniello V, Peterson B W, van der Mei H. C, et al. Physico-chemistry from initial bacterial adhesion to surface-programmed biofilm growth[J]. *Advances in colloid and interface science*. 2018, 261: 1-14
- [2]Wahid F, Huang L, Zhao X, et al. Bacterial cellulose and its potential for biomedical applications[J]. *Biotechnology Advances*. 2021, 53: 107856.
- [3]Adetunji C O, Anani O A. Plastic-Eating microorganisms: Recent biotechnological techniques for recycling of plastic[M]. *Microbial Rejuvenation of Polluted Environment, Microorganisms for Sustainability*. 2021, 1(25): 353-372.
- [4]Giorgi-pérez A M, Arboleda-Ordoñez A M, Villamizar-suárez W, et al. Biofilm formation and its effects on microbiologically influenced corrosion of carbon steel in oilfield injection water via electrochemical techniques and scanning electron microscopy[J]. *Bioelectrochemistry*. 2021, 141: 107868.
- [5]Cámara M, Green W, Macphee C E, et al. Economic significance of biofilms: a multidisciplinary and cross-sectoral challenge[J]. *npj Biofilms and Microbiomes*. 2022, 8(1): 42.
- [6]Jack T R. Biological Corrosion Failures[M]. *Analysis and Prevention*. 2002: 881-898.
- [7]Liduino V, Galvão M, Brasil S, et al. SRB-mediated corrosion of marine submerged AISI 1020 steel under impressed current cathodic protection[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2021, 202: 111701.
- [8]Li Z, Zhou J, Yuan X, et al. Marine biofilms with significant corrosion inhibition performance by secreting extracellular polymeric substances[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2021, 13: 47272-47282
- [9]Hussain M, Wilcox M H, White P J. The slime of coagulase-negative staphylococci: Biochemistry and relation to adherence[J]. *FEMS Microbiology Letters*, 1993, 104(3-4): 191-208.