



微生物抑制金属腐蚀机理的研究进展

田园¹ 裴学政¹ 朱晓丽^{1,2} José Alberto Alvarado García³ 李佳星¹ 赵晨阳¹
梁丽华^{*1,2}

1 西北大学城市与环境学院 陕西 西安 710127

2 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室 陕西 西安 710127

3 Chemical Engineering Department, Benemeritous University Autonomous of Puebla, Puebla 72570, México

摘要: 传统金属防腐方法成本较高或者容易产生次生环境问题。微生物防腐蚀是一项新的绿色防腐技术,随着越来越多抗腐蚀微生物的发现,以及有益菌膜研究的开展,研究者们发现了微生物抑制金属腐蚀的众多机理,本文对此进行了归纳总结。微生物可以通过生物驱除、分泌腐蚀抑制剂、生成胞外多聚物、降低溶解氧、形成生物膜屏障、分泌生物表面活性剂、噬菌体控制、非生物膜屏障等过程控制和减缓金属腐蚀。金属的微生物腐蚀抑制作用通常不是由单一机制引起的,而是多种机制共同作用的结果。深入理解微生物抑制金属腐蚀的机理,有利于为减缓金属腐蚀行为提供借鉴。

关键词: 金属腐蚀, 有益菌膜, 微生物抑制腐蚀

Microbial inhibition of metal corrosion: a review

TIAN Yuan¹ PEI Xue-Zheng¹ ZHU Xiao-Li^{1,2} José Alberto Alvarado García³
LI Jia-Xing¹ ZHAO Chen-Yang¹ LIANG Li-Hua^{*1,2}

1 College of Urban and Environmental Science, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127, China

2 Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an, Shaanxi 710127, China

3 Chemical Engineering Department, Benemeritous University Autonomous of Puebla, Puebla 72570, México

Abstract: Traditional anti-corrosion methods are costly or may cause secondary pollution. Microbiologically influenced corrosion inhibition (MICI) is a new green anti-corrosion technology. With the discovery of variety anti-corrosion microorganisms and the development of the studies on beneficial bacterial films, many mechanisms of microbial inhibition of metal corrosion have been found. Microorganisms can inhibit or slow down metal corrosion by biocompetitive exclusion, secretion of corrosion inhibitors, generation of extracellular polymeric substances, reduction of dissolved oxygen, formation of biofilm barriers, secretion of biosurfactants, phage control, non-biofilm barriers and other processes. Microbial corrosion inhibition of metal is usually not caused by a single mechanism but rather a

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (51401165); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2014JM2-2018)

***Corresponding author:** E-mail: lianglh@nwu.edu.cn

Received: 31-12-2019; **Accepted:** 29-04-2020; **Published online:** 21-05-2020

基金项目: 国家自然科学基金(51401165); 陕西省自然科学基金(2014JM2-2018)

***通信作者:** E-mail: lianglh@nwu.edu.cn

收稿日期: 2019-12-31; **接受日期:** 2020-04-29; **网络首发日期:** 2020-05-21

combination of different mechanisms. In-depth study of its inhibition mechanism is helpful to understand how to slow down the corrosion behavior of metals.

Keywords: Metal corrosion, Beneficial bacterial films, Microbial inhibition of corrosion

微生物腐蚀 (microbiologically influenced corrosion, MIC)是指附着在材料(包括金属及非金属)表面的生物膜中微生物的生命活动导致或促进材料的腐蚀或破坏^[1]。美国每年因 MIC 造成约 600 亿美元损失, MIC 在中国造成的损失超过 4 000 亿元人民币^[2]。在石油、天然气输送管道行业, MIC 所造成的损失占比达到 15%–30%, 金属材料的 MIC 约占总金属材料腐蚀的 20%^[3]。

实际上, 随着一些抗腐蚀微生物的发现以及有益细菌膜(beneficial bacterial biofilms, BBB)研究的开展, 人们逐渐认识到微生物不仅会加速金属腐蚀, 在某些条件下, 许多微生物还有抑制金属腐蚀的能力, 其抑制效率甚至远远好于某些防腐涂层, 相比使用杀菌剂等其他传统防腐技术, BBB被认为是一种最有前景、有效且环境友好的防腐技术^[4]。多项研究表明生物膜的形成可以抑制金属腐蚀的发生^[5-7]。微生物种类繁多, 培养方法简单, 可以大量繁殖, 而且许多微生物对环境和人体无害, 因此, 通过微生物抑制金属腐蚀无疑是未来腐蚀防护的重要手段。自1987年Iverson^[8]首先发现细菌可以抑制淡水及海水中铜的腐蚀以来, 研究者们陆续发现了几种微生物抑制金属腐蚀的机理。

1 生物驱除

硫酸盐还原菌(sulfate-reducing bacteria, SRB)广泛存在于海水、河水、土壤、地下管道以及油气井等缺氧环境中^[9]。在油田回注水中, 高浓度的硫酸根离子能引起SRB的大量繁殖, 致使管道腐蚀加速, 产生H₂S、FeS堵塞管道和地层, 并严重腐蚀注水管线和钻采设备, 油田的正常生产受到危害, 造成巨大经济损失^[10]。由于微生物群落可以释放多种信号分子相互“沟通”, 从而形成协同或竞争代

谢^[11], 因此, 研究者们采用生物驱除(biocompetitive exclusion, BE)策略来抑制SRB^[12]。方法之一是向环境中添加反硝化细菌(denitrifying bacteria, DNB)繁殖所需要的硝酸盐或亚硝酸盐, 使得DNB在与SRB生存竞争中处于优势。因为NO₃⁻还原释放的能量比SO₄²⁻高, 且DNB需要的氧化还原电位(oxidation-reduction potential, ORP)高于SRB, 因此优先发生的是硝酸盐还原反应^[13]。DNB占优势, 因而抑制了H₂S的产生和SRB的繁殖, 减少了SRB对腐蚀的影响^[14]。Pillay等^[15]从腐蚀的碳钢和不锈钢上分离到40株DNB, 分别测试它们在加入硝酸钠后对碳钢和不锈钢的腐蚀影响, 发现大部分菌株可以抑制碳钢的腐蚀, 但对不锈钢却可能抑制腐蚀, 也可能毫无作用。有研究显示在混菌培养系统中, 脱氮硫杆菌(*Thiobacillus denitrificans*, TDN)通过其反硝化过程产生的代谢产物而改变SRB的生长环境, 从而抑制SRB生长, 并减少H₂S的产生^[16]。Sandbeck等^[17]报道TDN能将SRB产生的还原性硫化物氧化成SO₄²⁻, 阻止FeS和H₂S产生, 既控制了SRB引起的腐蚀, 又解除了因FeS造成的堵塞。张冰等^[18]有针对性地开发了可以促进反硝化细菌生长的DN-1001型反硝化药剂, 且在室内对所研制反硝化药剂进行了对比评价和适应性评价, 实验结果表明, DN-1001型反硝化药剂加药浓度为400 mg/L时, 能够有效抑制SRB生长并抑制其产生硫化物。

有研究显示铁还原细菌(iron reducing bacteria, IRB)也可以驱除SRB^[19]。4种不同属的IRB(假单胞菌、微球菌、节杆菌和弧菌)能够在非无菌工业系统中通过抑制SRB而降低MIC, 这些生物不仅能够去除腐蚀产物, 还能保护金属免受进一步腐蚀^[20]。Jayaraman等^[21]测试了有假单胞菌*Pseudomonas fragi* K和SRB时SAE1018钢的腐蚀, 结果表明

P. fragi K表现出对SRB的抑制能力,可降低SRB引起的微生物腐蚀。

2 分泌腐蚀抑制剂

微生物可以通过分泌腐蚀抑制剂来减缓金属腐蚀,根据腐蚀抑制机理的不同可分为缓蚀剂氨基酸类和抗菌素短杆菌肽等。

目前对氨基酸类减缓金属腐蚀的原理研究较多,具体有以下过程:铁、铜等金属的最外层轨道未完全充满,能够接受N、O、P、S原子中的孤对电子,含 π 电子的有机化合物中的电子也可以填充其空轨道^[22];同时,Fe、Cu等原子中的电子又能够进入有机化合物中的空轨道形成反馈键,两者形成配位键而发生化学吸附^[23];天冬氨酸($C_4H_7NO_4$)、谷氨酸($C_5H_9NO_4$)、组氨酸($C_6H_9N_3O_2$)、蛋氨酸($C_5H_{11}O_2NS$)、色氨酸($C_{11}H_{12}N_2O_2$)、甘氨酸($C_2H_5NO_2$)等氨基酸都含有N、O等原子,这些原子均含有电负性很强的孤对电子,可以给Fe、Cu等的空轨道提供电子,通过化学吸附形成自组装膜(self-assembled monolayers, SAMs),从而可以保护金属^[24-25];自组装膜是构膜分子通过分子间及其与基底材料间的化学作用而自发形成的一种热力学稳定、排列规则的分子膜,将有机物分子在金属表面形成致密、有序的自组装膜,可以阻止腐蚀介质对金属的腐蚀^[26]。

聚天冬氨酸是天然存在的聚氨基酸之一,也是目前研究较多的一种无公害、无毒的新型绿色阻垢缓蚀剂^[27],能与铁、铜、钙、镁等多种离子形成螯合物附着在金属表面,从而阻止金属腐蚀^[28]。Örnek等发现枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)分泌的聚天冬氨酸可以有效减少铝2024的点蚀^[29],也可以抑制金属铜在LB培养基和人工海水中的腐蚀^[30]。Zhao等^[31]研究了用聚天冬氨酸制备的涂层对镁合金的形貌和耐蚀性影响,结果表明用聚天冬氨酸制备的涂层由许多均匀的海胆状微球组成,涂覆后合金的耐蚀性能显著提高,且该涂层可以逐渐被生物降解。

谷氨酸是一种酸性氨基酸,其分子结构中同时含有一个氨基和两个羧基^[32],相对低分子量的聚谷氨酸具有较好的阻垢、缓蚀性能^[33]。Örnek等^[29]研究发现,地衣芽孢杆菌(*Bacillus licheniformis*)分泌的聚谷氨酸可使铝2024的腐蚀速率减缓90%。枯草芽孢杆菌NX-2 (*Bacillus subtilis* NX-2)经发酵产生的聚谷氨酸(γ -polyglutamic acid, γ -PGA)是一种可生物降解的水溶性聚氨基酸,聚谷氨酸与钨酸盐经过复配后的最佳缓蚀率高达96.23%^[33]。郑红艾等^[34]研究了辛酰谷氨酸、丝氨酸和苏氨酸等氨基酸类物质在0.5 mol/L HCl溶液中对金属铜的缓蚀作用,结果表明1 mmol/L的辛酰谷氨酸对铜的缓蚀效果最好。

另外,组氨酸、蛋氨酸(甲硫氨酸)、色氨酸、甘氨酸等氨基酸的缓蚀效果也引起了研究者的注意。张哲等^[35-36]发现组氨酸衍生物、谷氨酸衍生物的N原子和O原子能够与304不锈钢的Fe原子形成化学键,发生化学吸附,形成自组装膜,从而起到缓蚀的作用。Goni等^[37]采用失重法和电化学法研究了含有酯官能团的生物氨基酸蛋氨酸的聚合物对软钢的缓蚀可行性,结果表明该物质通过化学吸附和物理吸附作用吸附在金属表面并形成一层薄膜,保护金属免受腐蚀。Abdel-Fatah等^[38]用动电位极化、电化学阻抗谱等测定了色氨酸、酪氨酸和丝氨酸对T22低合金钢的的腐蚀影响,结果表明腐蚀抑制效率为色氨酸>酪氨酸>丝氨酸。Dehdab等^[39]通过量子化学计算得出同样的结果,他们认为,色氨酸之所以比其他两种氨基酸的缓蚀效果强是因为形成的Fe-色氨酸配合物最稳定,色氨酸能更好地吸附在金属表面。赵勇等^[40]发现甘氨酸的加入可显著提高钢铁表面转化膜的耐蚀性。

氨基酸类物质不仅通过形成自组装膜来抑制金属腐蚀,一些微生物分泌的多肽类物质还可以作为抗菌素抑制腐蚀菌的活性。Jayaraman等^[41]使用基因工程菌*Bacillus subtilis*形成生物膜,其分泌的牛抗菌肽可以抑制碳钢及不锈钢上的SRB。

Korenblum等^[42]发现*Bacillus firmus*形成的抗菌素能够显著降低SRB的活性,减少SRB的细胞数量。比起使用高剂量的化学杀菌剂,利用生物膜内产生的抗菌素短杆菌肽抑制SRB的生长无疑是更好的选择。

3 生成胞外聚合物

在某些情况下,细菌的代谢产物如胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)可能足以发挥保护作用^[43]。EPS是由微生物,主要是细菌在一定环境下分泌于体外的高分子聚合物^[44],其主要成分为多糖、蛋白质及核酸等一些高分子物质^[45]。研究者^[46]发现蛋白质分子中的 $-C=O-$ 、 $-COO-$ 及多糖分子中的 $-C-OH-$ 、 $-CH_3-$ 、 $-CH_2-$ 、 $-COO-$ 等官能团与Fe(II/III)结合,逐渐形成“络合物-腐蚀产物”保护层,起到缓蚀的作用。Chongdar等^[47]发现*Pseudomonas cichorii*在低碳钢表面形成的Fe-EPS复合物是抗腐蚀作用的关键。Dong等^[48]分离出嗜热SRB的EPS并评估其对碳钢腐蚀的影响,研究发现EPS的保护效果与溶液(含有3% NaCl)中EPS的浓度有关,吸附于碳钢表面的EPS层可以通过阻隔氧气来保护碳钢减少腐蚀。许萍等^[49]研究发现在碳钢表面浸涂罗伊氏乳杆菌的代谢产物EPS能够使碳钢的平均腐蚀速率降低25.60%,罗伊氏乳杆菌EPS主要通过改变碳钢界面晶体间转化以及腐蚀产物稳定性,从而降低碳钢的腐蚀速率。

不同类型的EPS对金属腐蚀的抑制作用也可能不同。Bautista等^[50]从一株海洋好氧菌*Pseudomonas NCIMB 2021*中提取出松散结合(loosely bound, LB)的EPS(含更多的糖类)和紧密结合(tightly bound, TB)的EPS(高浓缩蛋白),再将它们和牛血清蛋白(bovine serum albumin, BSA)对比,研究了其在静态曝气人工海水中对70Cu-30Ni合金的电化学行为,发现没有生物分子时金属表面有较厚的两层氧化物层,外层是铜氧化物沉积层,

内层是镍氧化物层,有生物分子时金属表面有一层较薄的铜镍混合氧化物层,氧化物表面覆盖着一层主要由蛋白质组成的吸附有机物层,生物大分子的存在减慢了阳极反应, LB EPS比BAS抑制合金腐蚀的效果更好, TB EPS没有明显的效果。

Gubner等^[51]用3种不同类型的EPS(释放到培养基中的LB EPS、TB EPS和由连续培养的*Pseudomonas NCIMB 2021*产生的EPS)来处理AISI 304和316不锈钢,实验发现尽管程度不同,但所有的EPS都能够显著降低生物体在不锈钢表面的附着能力,从而减缓不锈钢的腐蚀作用,但表面疏水性和粗糙度的变化都不影响附着力的改变。

4 降低溶解氧

好氧生物膜能够通过呼吸作用消耗金属表面的溶解氧,降低与金属表面接触的氧浓度^[52],从而减缓金属表面的溶解反应,达到抑制腐蚀的效果。

Jayaraman等^[53]认为好氧生物膜消耗氧气是抑制金属腐蚀的主要原因。在有氧条件下,底物降解后产生的能量被输至呼吸链,氧气的减少导致阴极部分反应速率下降,金属溶解速率也随之降低,与无菌对照组相比,含菌时溶解氧降低可使低碳钢质量损失减少96%^[3]。宋秀霞^[54]的研究表明海藻希瓦氏菌能够通过代谢活动消耗溶解氧,抑制试样的腐蚀。但张倩^[55]研究了封闭环境中硫代谢细菌(SRB和SOB)对不锈钢的腐蚀作用机理,发现有氧环境能够抑制SRB的代谢活动,有利于修复不锈钢钝化膜,与无氧环境相比有效减缓了不锈钢的腐蚀。

尽管大部分研究认为减少生物膜中的氧气有利于抑制金属腐蚀,但是细菌好氧呼吸和腐蚀的关系一直存有争议。一方面,氧气的减少降低了金属的溶解速度;另一方面,氧气的减少还有利于SRB的生长,使金属腐蚀速度增加。另外,细菌在好氧呼吸过程中也会产生 H_2O_2 ,而 H_2O_2 的氧化还原电

位比氧气还要高,从而会加速金属腐蚀^[56]。

5 形成生物膜屏障

生物膜除了呼吸作用主动消耗氧之外,有研究者认为生物膜也可以作为物理阻挡层,保护材料免受各种其他腐蚀剂如酸性化合物或氯离子的影响。Jayaraman等^[57]发现在含(成膜性能好的)恶臭假单胞菌(*Pseudomonas putida*)的LB培养基中碳钢腐蚀速度很小,但是在含(成膜性能差的)链霉菌(*Streptomyces lividans*)的LB培养基中碳钢的腐蚀速度和无菌时相似。Little等^[58]认为细菌生物膜可以抑制低碳钢、铜、铝和不锈钢的腐蚀,他们发现生物膜分泌的腐蚀产物形成了扩散屏障,阻挡了腐蚀介质与试片表面的接触,从而抑制金属腐蚀。王蕾等^[59]曾报道了芽孢杆菌属对金属的腐蚀影响,研究发现多数芽孢杆菌属菌株形成的生物膜是有益生物膜,能够用来抑制金属的腐蚀,并能有效抑制SRB诱发的腐蚀。SRB在金属保护中通常扮演有害的角色,但有研究者^[49]发现SRB能够在含有0.1 mol/L NaCl的近中性介质中保护钢免受氯化物侵蚀,这种意外的保护作用可能是由侵蚀性Cl⁻从金属表面分离引起的,即SRB生物膜可能充当被动扩散屏障。

6 分泌生物表面活性剂

Dagbert等^[60]研究了*Pseudomonas fluorescens*分泌表面活性剂对304不锈钢的腐蚀影响,生物表面活性剂可以迅速吸附在304不锈钢表面形成保护层,减缓不锈钢的腐蚀,由于生物表面活性剂较氧化物吸附速度快,因此他们推测,在以O₂为主要腐蚀性物质的介质中,生物表面活性剂可以减缓溶解氧的扩散传播。

7 噬菌体控制

利用噬菌体可以除去产生腐蚀的细菌,噬菌体可以溶解腐蚀细菌的细胞,分解胞外多聚物,还能破坏金属表面的生物膜。目前将噬菌体应用于金属

腐蚀抑制的研究较少,Mathews等^[61]使用靶向噬菌体生物防治技术改变微生物群落,以减少特定的产生硫化物的细菌,从而控制微生物诱导的混凝土腐蚀(microbiologically induced concrete corrosion, MICC)。

8 非生物膜屏障

微生物不仅可以通过形成生物膜屏障抑制金属腐蚀,不能形成生物膜的微生物也可以通过产生其他屏障减缓金属腐蚀。Dubiel等^[19]利用不能形成生物膜的突变株希瓦氏菌(*Shewanella oneidensis*),在厌氧条件下将Fe³⁺还原为Fe²⁺, Fe²⁺进入液相主体消耗了氧气,生成的产物附着在金属表面,形成一道屏障,从而加强了腐蚀防护。

一些微生物的存在可以改变金属表面钝化层的组成,使其更能耐受腐蚀。Volkland等^[62]发现如果溶液中存在足够量的磷酸盐,则红球菌(*Rhodococcus* sp.)属中菌株C125和恶臭假单胞菌Mt2(*Pseudomonas putida* Mt2)于好氧条件下,会在非合金钢上形成基底蛋白[Fe₃(PO₄)₂]膜,这种铁矿钝化了钢的表面,能够完全抑制腐蚀过程。

9 总结与展望

传统的防腐措施大多利用重金属或挥发性有机涂料,这些涂料虽然具有较好的防腐效果且易于应用,但同时具有危害人体健康和污染环境的潜在风险^[63]。MICI是一项新的绿色防腐技术,深入研究其抑制机理,有利于为提供更安全的生物腐蚀抑制剂奠定基础。但事实上,由于不同的微生物在不同环境中的生长代谢不同,以及环境中多种微生物相互作用的复杂性,导致即使是同一种微生物也会对于同种金属表现不同的腐蚀抑制机制^[64]。而且在实际情况中,微生物腐蚀抑制作用通常不是由单一机制引起的,而是多种机制共同作用的结果(图1),如生物驱除、微生物呼吸对氧气的消耗、形成自组装膜或“螯合物-腐蚀产物”保护层等,很难通过一种机理来解释微生物对金属腐蚀的抑制作用。

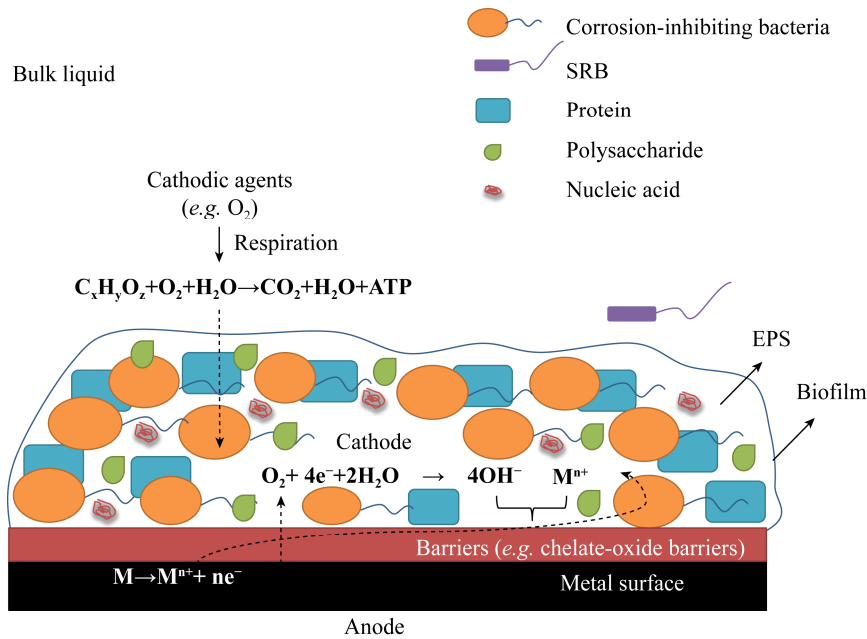


图 1 微生物抑制金属腐蚀的机理
Figure 1 Mechanism of microbial inhibition of metal corrosion

目前金属腐蚀抑制机理研究的难点是需要将腐蚀电化学、微生物学、热力学、有机化学、无机化学、材料学等理论结合起来,通过试验明确:(1) 微生物的生理生化特征及代谢过程与腐蚀抑制之间的关系。微生物的增殖速率、营养类型、呼吸类型、代谢产物都可能改变微生物在金属腐蚀中的角色。(2) 氧气在腐蚀抑制中的作用。氧气作为环境中的氧化剂、阴极反应的电子受体、好氧微生物维持生命的必要物质,使得在有微生物存在时,氧气与腐蚀的关系更错综复杂。(3) 生物膜的形成可促进腐蚀,也可抑制腐蚀,在起抑制作用时究竟是物理阻隔还是化学作用都值得探讨,如何将有益菌膜固定在金属表面也是实际应用的难点^[65],EPS甚至是某种氨基酸作为生物腐蚀抑制剂有无商业化的可能。(4) 微生物可能会导致环境因子和腐蚀产物发生改变,这种改变对腐蚀抑制是否有正面作用。

此外,由于实际废水成分复杂,研究者们多在理想实验条件下用自配的人工废水进行金属材料的防腐研究,并且 MICI 在实际应用中的安全性、

工程性和可控性研究不足^[66],尽管研究者们发现了多种具有腐蚀抑制作用的微生物并分析讨论了其相关抑制机理,但是截至目前,MICI 技术在实际场地中的应用较少,大规模应用 MICI 的商业产品很少,而 MICI 作为一种经济简便的抗 MIC 方法,拥有巨大的潜力和市场,商业化应用是其未来研究的方向^[3]。

REFERENCES

- [1] Huang Y, Liu SJ, Jiang CY. Microbiologically influenced corrosion and mechanisms[J]. Microbiology China, 2017, 44(7): 1699-1713 (in Chinese)
黄焯, 刘双江, 姜成英. 微生物腐蚀及腐蚀机理研究进展[J]. 微生物学通报, 2017, 44(7): 1699-1713
- [2] Xu DK. The preface of “Microbiologically influenced corrosion and its protection”[J]. Surface Technology, 2019, 48(7): 6,5 (in Chinese)
徐大可. “微生物腐蚀与防护”专题序言[J]. 表面技术, 2019, 48(7): 6,5
- [3] Kreysa G, Ota KI, Savinell RF. Encyclopedia of Applied Electrochemistry[M]. New York: Springer, 2014: 1290-1297
- [4] Videla HA, Herrera LK. Understanding microbial inhibition of corrosion. A comprehensive overview[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2009, 63(7): 896-900

- [5] Liu JL, Jia R, Zhou EZ, et al. Antimicrobial Cu-bearing 2205 duplex stainless steel against MIC by nitrate reducing *Pseudomonas aeruginosa* biofilm[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2018, 132: 132-138
- [6] Guo ZW, Liu T, Cheng YF, et al. Adhesion of *Bacillus subtilis* and *Pseudoalteromonas lipolytica* to steel in a seawater environment and their effects on corrosion[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2017, 157: 157-165
- [7] Qu Q, He Y, Wang L, et al. Corrosion behavior of cold rolled steel in artificial seawater in the presence of *Bacillus subtilis* C2[J]. Corrosion Science, 2015, 91: 321-329
- [8] Iverson WP. Microbial corrosion of metals[J]. Advances in Applied Microbiology, 1987, 32: 1-36
- [9] Liu L, Chen K, Liu J, et al. Investigation on SRB bacterial reproduction current status in waste water in Shengli Oilfield[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2019, 45(1): 47-48,66 (in Chinese)
刘丽, 陈凯, 刘瑾, 等. 胜利油田污水 SRB 菌繁殖现状调研[J]. 内蒙古石油化工, 2019, 45(1): 47-48,66
- [10] Zhu Q, Di GB, Lin JL. The development of biological inhibition techniques to SRB[J]. Petrochemical Industry Technology, 2019, 26(10): 99,89 (in Chinese)
朱倩, 底国彬, 林俊岭. SRB 生物抑制技术发展现状[J]. 石化技术, 2019, 26(10): 99,89
- [11] Xu P, Ren HY, Wang CZ, et al. Research progress on mixture microbial corrosion and analytical method on metal surface[J]. Surface Technology, 2019, 48(1): 216-224 (in Chinese)
许萍, 任恒阳, 汪长征, 等. 金属表面混合微生物腐蚀及分析方法研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 216-224
- [12] Videla HA, Herrera LK. Microbiologically influenced corrosion: looking to the future[J]. International Microbiology, 2005, 8(3): 169-180
- [13] Lv YL. Microbiologically induced corrosion of X80 pipeline steel in the dynamic oil produced water[D]. Wuhan: Master's Thesis of Huazhong University of Science and Technology, 2017 (in Chinese)
吕亚林. 动态油田产出水中 X80 钢微生物腐蚀机理[D]. 武汉: 华中科技大学硕士学位论文, 2017
- [14] Zeng L, Shuang S, Guo XP, et al. Erosion-corrosion of stainless steel at different locations of a 90° elbow[J]. Corrosion Science, 2016, 111: 72-83
- [15] Pillay C, Lin J. Metal corrosion by aerobic bacteria isolated from stimulated corrosion systems: effects of additional nitrate sources[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2013, 83: 158-165
- [16] She DY, Xie XZ, Wang RP, et al. Inhibition of *Thiobacillus denitrificans* on SRB growth[J]. Genomics and Applied Biology, 2013, 32(1): 65-69 (in Chinese)
余栋宇, 谢秀祯, 王锐萍, 等. 脱氮硫杆菌对硫酸盐还原菌生长的抑制作用[J]. 基因组学与应用生物学, 2013, 32(1): 65-69
- [17] Sandbeck KA, Hitzman DO. Proceeding of the fifth international conference on MEOR and related biotechnology for solving environmental problems[Z]. Bryand: United States Department of Energy, 1995: 311-319
- [18] Zhang B, Zhang Y, Niu YC, et al. Development of denitrification chemical formulation for oilfield surface system[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2017, 36(4): 27-28 (in Chinese)
张冰, 张雨, 牛永超, 等. 油田地面系统反硝化药剂配方的研制[J]. 油气田地面工程, 2017, 36(4): 27-28
- [19] Dubiel M, Hsu CH, Chien CC, et al. Microbial iron respiration can protect steel from corrosion[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, 68(3): 1440-1445
- [20] Potekhina JS, Sherisheva NG, Povetkina LP, et al. Role of microorganisms in corrosion inhibition of metals in aquatic habitats[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1999, 52(5): 639-646
- [21] Jayaraman A, Hallock PJ, Carson RM, et al. Inhibiting sulfate-reducing bacteria in biofilms on steel with antimicrobial peptides generated *in situ*[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1999, 52(2): 267-275
- [22] Olivares-Xometl O, Likhanova NV, Dominguez-Aguilar MA, et al. Synthesis and corrosion inhibition of α -amino acids alkylamides for mild steel in acidic environment[J]. Materials Chemistry and Physics, 2008, 110(2/3): 344-351
- [23] Zhang Z, Ni FS, Tian NC, et al. Inhibition performance of glutamic derivative self-assembled films on 316 stainless steel[J]. Materials Protection, 2015, 48(7): 26-29 (in Chinese)
张哲, 倪福松, 田宁椰, 等. 谷氨酸及其衍生物自组装 316 不锈钢的缓蚀性能[J]. 材料保护, 2015, 48(7): 26-29
- [24] El-Shafei AA, Moussa MNH, El-Far AA. Inhibitory effect of amino acids on Al pitting corrosion in 0.1M NaCl[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 1997, 27(9): 1075-1078
- [25] Amin MA, Khaled KF, Mohsen Q, et al. A study of the inhibition of iron corrosion in HCl solutions by some amino acids[J]. Corrosion Science, 2010, 52(5): 1684-1695
- [26] Li NN, Wu HY, Ye YP, et al. Anticorrosion action and adsorption mechanism of selfassembled monolayers of polyamidoamine schiff-base of PAMAM (1.0G)-salicylaldehyde on Q235 steel in hydrochloric acid solution[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(4): 413-420 (in Chinese)
李娜娜, 吴会云, 叶亚平, 等. 盐酸溶液中聚酰胺-胺树形分子-水杨醛席夫碱自组装膜对 Q235 碳钢的缓蚀作用及吸附机理[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(4): 413-420
- [27] Zhang BH, Sun H, Zhang C, et al. Study on scale inhibition performance of polyaspartic acid and PBTCA and their combined use effect[J]. Liaoning Chemical Industry, 2018,

- 47(11): 1083-1086,1089 (in Chinese)
张柏鸿, 孙辉, 张冲, 等. 聚天冬氨酸与 PBTCA 的阻垢性能及复合使用效果应用研究[J]. 辽宁化工, 2018, 47(11): 1083-1086,1089
- [28] Feng YL. Research progress of green asparagine as green water treatment agent[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43(10): 1,154 (in Chinese)
冯亚莉. 绿色水处理剂聚天冬氨酸的研究进展[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(10): 1,154
- [29] Örnek D, Jayaraman A, Syrett B, et al. Pitting corrosion inhibition of aluminum 2024 by *Bacillus* biofilms secreting polyaspartate or γ -polyglutamate[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 58(5): 651-657
- [30] Örnek D, Wood TK, Hsu CH, et al. Corrosion control using regenerative biofilms (CCURB) on brass in different media[J]. Corrosion Science, 2002, 44(10): 2291-2302
- [31] Zhao DD, Sun RX, Chen KZ. Influence of different chelating agents on corrosion performance of microstructured hydroxyapatite coatings on AZ91D magnesium alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2017, 32(1): 179-185
- [32] Gargaud M, Amils R, Quintanilla JC, et al. Encyclopedia of Astrobiology[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015: 992
- [33] Tong M. Study on scale and corrosion inhibition of green water treatment γ -PGA[D]. Nanjing: Master's Thesis of Nanjing University of Technology, 2006 (in Chinese)
佟盟. 绿色水处理剂聚谷氨酸阻垢、缓蚀性能的研究[D]. 南京: 南京工业大学硕士学位论文, 2006
- [34] Zheng HA, Zhang DQ, Xing J. Effect of amino acid compounds in inhibitor on copper in HCL solution[J]. Corrosion & Protection, 2007, 28(12): 607-609 (in Chinese)
郑红艾, 张大全, 邢婕. HCl 溶液中氨基酸类化合物对铜的缓蚀作用[J]. 腐蚀与防护, 2007, 28(12): 607-609
- [35] Zhang Z, Li XY, Tian NC, et al. Inhibition performance of histidine derivatives self-assembled films[J]. Corrosion & Protection, 2016, 37(9): 701-706,734 (in Chinese)
张哲, 李秀莹, 田宁郴, 等. 组氨酸衍生物自组装膜的缓蚀性能[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(9): 701-706,734
- [36] Zhang Z, Ni FS, Ruan L, et al. Self-assembled films glutamic acid and its derivatives on 304 stainless steel[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(12): 1202-1207 (in Chinese)
张哲, 倪福松, 阮乐, 等. 谷氨酸及其衍生物在 304 不锈钢表面的自组装膜[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(12): 1202-1207
- [37] Goni LKMO, Mazumder MAJ, Ali SA, et al. Biogenic amino acid methionine-based corrosion inhibitors of mild steel in acidic media[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2019, 26(4): 467-482
- [38] Abdel-Fatah HTM, Abdel-Samad HS, Hassan AAM, et al. Effect of variation of the structure of amino acids on inhibition of the corrosion of low-alloy steel in ammoniated citric acid solutions[J]. Research on Chemical Intermediates, 2014, 40(4): 1675-1690
- [39] Dehdab M, Shahraki M, Habibi-Khorassani SM. Theoretical study of inhibition efficiencies of some amino acids on corrosion of carbon steel in acidic media: green corrosion inhibitors[J]. Amino Acids, 2016, 48(1): 291-306
- [40] Zhao Y, Guo RG, Niu LQ, et al. Effects of DTAB and glycine on the corrosion resistance of potassium fluoerrite conversion coating on the surface of steel[J]. Surface Technology, 2014, 43(3): 15-19,30 (in Chinese)
赵勇, 郭瑞光, 牛林清, 等. DTAB 和甘氨酸对钢铁表面氟铁酸盐转化膜耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(3): 15-19,30
- [41] Jayaraman A, Mansfeld FB, Wood TK. Inhibiting sulfate-reducing bacteria in biofilms by expressing the antimicrobial peptides indolicidin and bactenecin[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 1999, 22(3): 167-175
- [42] Korenblum E, Sebastián GV, Paiva MM, et al. Action of antimicrobial substances produced by different oil reservoir *Bacillus* strains against biofilm formation[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2008, 79(1): 97-103
- [43] Jin JT, Wu GX, Zhang ZH, et al. Effect of extracellular polymeric substances on corrosion of cast iron in the reclaimed wastewater[J]. Bioresource Technology, 2014, 165: 162-165
- [44] Yang P, Kang DJ, Xie DY, et al. Extraction of extracellular polymeric substances from activated sludge by different combination of methods[J]. Water Purification Technology, 2016, 35(6): 88-92 (in Chinese)
杨飘, 康得军, 谢丹瑜, 等. 不同方法组合对活性污泥胞外聚合物的提取[J]. 净水技术, 2016, 35(6): 88-92
- [45] Wadood HZ, Rajasekar A, Ting YP, et al. Role of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* on corrosion behaviour of stainless steel[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2015, 40(7): 1825-1836
- [46] Xu P, Zhang S, Si S, et al. Corrosion mechanism of carbon steel induced by protein and polysaccharide-the main components of EPS[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(2): 176-184 (in Chinese)
许萍, 张硕, 司帅, 等. EPS 的主要成分-蛋白质、多糖抑制碳钢腐蚀机理研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(2): 176-184
- [47] Chongdar S, Gunasekaran G, Kumar P. Corrosion inhibition of mild steel by aerobic biofilm[J]. Electrochimica Acta, 2005, 50(24): 4655-4665
- [48] Dong ZH, Liu T, Liu HF. Influence of EPS isolated from thermophilic sulphate-reducing bacteria on carbon steel corrosion[J]. Biofouling: the Journal of Bioadhesion and

- Biofilm Research, 2011, 27(5): 487-495
- [49] Xu P, Wei ZG, Wang J, et al. Inhibition of carbon steel corrosion behavior by extracellular polymeric substances of *Lactobacillus reuteri*[J]. Surface Technology, 2016, 45(3): 134-140 (in Chinese)
许萍, 魏智刚, 王婧, 等. 罗伊氏乳杆菌胞外聚合物抑制碳钢腐蚀行为[J]. 表面技术, 2016, 45(3): 134-140
- [50] Bautista BET, Wikieł AJ, Datsenko I, et al. Influence of extracellular polymeric substances (EPS) from *Pseudomonas* NCIMB 2021 on the corrosion behaviour of 70Cu-30Ni alloy in seawater[J]. Journal of Electroanalytical Chemistry, 2015, 737: 184-197
- [51] Gubner R, Beech IB. The effect of extracellular polymeric substances on the attachment of *Pseudomonas* NCIMB 2021 to AISI 304 and 316 stainless steel[J]. Biofouling: the Journal of Bioadhesion and Biofilm Research, 2000, 15(1/3): 25-36
- [52] Du XQ, Duan JZ, Zhai XF, et al. Corrosion behavior of 316L stainless steel influenced by iron-reducing bacteria *Shewanella algae* biofilms[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2013, 33(5): 363-370 (in Chinese)
杜向前, 段继周, 翟晓凡, 等. 铁还原细菌 *Shewanella algae* 生物膜对 316L 不锈钢腐蚀行为的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(5): 363-370
- [53] Jayaraman A, Earthman JC, Wood TK. Corrosion inhibition by aerobic biofilms on SAE 1018 steel[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 1997, 47(1): 62-68
- [54] Song XX. Effect of *Sulphate* reducing bacteria and *Shewanella algae* on corrosion of zinc sacrificial anode material[D]. Shanghai: Master's Thesis of Shanghai Ocean University, 2012 (in Chinese)
宋秀霞. 硫酸还原菌和海藻希瓦氏细菌对锌牺牲阳极材料的腐蚀影响研究[D]. 上海: 上海海洋大学硕士学位论文, 2012
- [55] Zhang Q. Study of corrosion behaviour induced by sulfur bacteria on the carbon steel and stainless steel[D]. Qingdao: Master's Thesis of Institute of Oceanology Chinese Academy of Sciences, 2013 (in Chinese)
张倩. 碳钢和不锈钢的硫代谢细菌腐蚀行为的研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所硕士学位论文, 2013
- [56] Zarasvand KA, Rai VR. Microorganisms: induction and inhibition of corrosion in metals[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 87: 66-74
- [57] Jayaraman A, Cheng ET, Earthman JC, et al. Importance of biofilm formation for corrosion inhibition of SAE 1018 steel by axenic aerobic biofilms[J]. Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, 1997, 18(6): 396-401
- [58] Little B, Ray R. A perspective on corrosion inhibition by biofilms[J]. Corrosion, 2002, 58(5): 424-428
- [59] Wang L, Qu Q, Li L. Review on microbiologically influenced corrosion by *Bacillus* genus[J]. Total Corrosion Control, 2013, 27(10): 55-60 (in Chinese)
王蕾, 屈庆, 李蕾. 芽孢杆菌属微生物腐蚀研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2013, 27(10): 55-60
- [60] Dagbert C, Meylheuc T, Bellon-Fontaine MN. Corrosion behaviour of AISI 304 stainless steel in presence of a biosurfactant produced by *Pseudomonas fluorescens*[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(24): 5221-5227
- [61] Mathews ER, Barnett D, Petrovski S, et al. Reviewing microbial electrical systems and bacteriophage biocontrol as targeted novel treatments for reducing hydrogen sulfide emissions in urban sewer systems[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2018, 17(4): 749-764
- [62] Volkland HP, Harms H, Müller B, et al. Bacterial phosphating of mild (unalloyed) steel[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2000, 66(10): 4389-4395
- [63] Karlsson J, Ytreberg E, Eklund B. Toxicity of anti-fouling paints for use on ships and leisure boats to non-target organisms representing three trophic levels[J]. Environmental Pollution, 2010, 158(3): 681-687
- [64] Shi XB, Yang CG, Yan W, et al. Microbiologically influenced corrosion of pipeline steels[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2019, 39(1): 9-17 (in Chinese)
史显波, 杨春光, 严伟, 等. 管线钢的微生物腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(1): 9-17
- [65] Zuo RJ. Biofilms: strategies for metal corrosion inhibition employing microorganisms[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2007, 76(6): 1245-1253
- [66] Xu P, Zhai YJ, Wang J, et al. Understanding biofilms in a new perspective — research progress on microbial anti-corrosion[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(4): 356-360 (in Chinese)
许萍, 翟羽佳, 王婧, 等. 从新的视角理解生物膜——微生物防腐研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(4): 356-360