

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.24.006

供水管网中金属管材的微生物腐蚀机理及防护研究

吴霖璟, 朱延平, 韩小蒙, 高峰, 舒诗湖
(东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620)

摘要: 我国城市供水管网建设初期大多数采用水泥管、镀锌钢管和灰口铸铁管,近年来在供水管网改造工程中均采用了新型金属管材,如球墨铸铁、不锈钢等。研究表明,当金属供水管道长期运输含卤素离子(主要为氯离子)的生活用水时,微生物腐蚀(MIC)现象难以避免和防控。目前,MIC的机理研究在学术界尚未形成统一的认识,主流观点认为胞外电子传递机制(EET)在MIC中扮演了重要角色,该机制可以简述为附着于管壁的特定电活性微生物膜以直接电子传递方式或间接电子传递方式导致管道发生MIC。针对近年来金属供水管网的MIC问题,概述了三类防护方法,包括主流的化学灭菌剂与增效剂联用方法、处于实验阶段的新型纳米材料抗菌剂方法以及抗菌不锈钢管的研发,以为供水管网中新型金属管材的推广应用提供借鉴。

关键词: 供水管网; 金属管材; 微生物腐蚀

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)24-0034-06

Research on Microbial Influenced Corrosion Mechanism and Protection of Metal Pipe in Water Supply Pipe Network

WU Lin-jing, ZHU Yan-ping, HAN Xiao-meng, GAO Feng, SHU Shi-hu
(College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: In the early stages of urban water supply pipe network construction in China, cement, galvanized steel and gray cast iron were the most commonly used materials in related projects. However, novel metal pipe materials such as ductile iron and stainless steel have been increasingly adopted in water supply pipe renovation projects in recent years. Research indicates that microbial influenced corrosion (MIC) poses a significant challenge to prevent or control when metal water supply pipelines transport domestic water containing chronically high levels of halogen ions (mainly chloride ions). The academic community has yet to establish a unified theory regarding the mechanism of MIC. The prevailing view suggests that the extracellular electron transfer mechanism (EET) plays an important role in MIC. This involves the specific electroactive biological membrane attached to the tube wall results in MIC, which is caused by direct electron transfer or indirect electron transfer. In response to the MIC issue with metal pipes, this study systematically summarizes three types of protection methods, including mainstream method of combining chemical sterilization and synergist, experimental novel sterilization methods with nanomaterials and the development of antibacterial stainless steel pipes. The aim is to

基金项目: 上海市科委社发重点项目(19DZ1204401)

通信作者: 舒诗湖 E-mail: ssh314@126.com

provide reference and guidance in the promotion and application of metal water supply pipe networks.

Key words: water supply pipe network; metal pipe; microbial influenced corrosion

随着生活水平和水质标准的不断提高,供水企业对管材耐腐蚀性和抗压性的要求更加严格。美国国家卫生基金标准 ANSI/NSF61—1997a 和 2003 年版美国国际标准委员会水管和住宅标准中都涉及“优先选用球墨铸铁和不锈钢作为饮用供水管道管材”的相关规定。英国、德国、荷兰、日本、韩国、新加坡等国家现已要求饮用水系统的管道和系统部件必须符合上述标准。我国不锈钢产品的应用正处于上升阶段,武汉、重庆、厦门、珠海等地水务集团已经开始使用薄壁不锈钢产品,其他地区也均开始推广该产品应用。然而,这类金属管材运行时,会对饮用水水质产生不耐氯(氯腐蚀)和微生物腐蚀(MIC)等风险,从而造成严重的经济损失。

MIC 是由微生物的代谢活动引起的管道腐蚀或对原本管道腐蚀程度的进一步加剧。前者绝大部分表现为局部腐蚀,后者主要加剧了管道的电偶腐蚀、环境敏感断裂和磨损腐蚀等。基于目前金属管材在国内外供水管网领域的日益普及,针对该类管道在实际运营中存在的 MIC 问题,从生物电化学和生物能量学的角度,概述微生物腐蚀金属管道过程和相关的防护研究进展,以为供水管道的改造升级提供借鉴。

1 金属供水管网中的微生物腐蚀研究进展

过去通常认为微生物不会直接对金属造成腐蚀,而是由金属表面氧浓度差和微生物的代谢产物引起腐蚀。但近年来的饥饿实验证实微生物会为了获得生存能量而直接腐蚀金属,因此,为了进一步解释这种现象,新的 MIC 机理从生物能量学和生物电化学角度出发,认为微生物为捕获电子(金属表面)将会进行胞外电子传递(EET)。

1.1 常见微生物及其腐蚀特性

在供水管网系统中,管道金属表面通常由固着细胞、胞外聚合物和两类最常见细菌的腐蚀产物组成,这两类最常见的细菌分别指厌氧型硫酸盐还原菌(SRB)和好氧型铁氧化菌(IOB)。Liu 等^[1]发现 IOB 和 SRB 的混合培养比纯菌株 IOB 或纯菌株 SRB 更容易,表明这两类菌可协同生长并加剧腐蚀。目前,关于供水管网中常见的微生物种类及腐蚀特性

研究主要集中在细菌上,具体如表 1 所示。但是真菌也是造成管道腐蚀的重要微生物,Cojocar 等^[2]和 Lugauskas 等^[3]发现真菌与铜、碳钢、不锈钢和铝等多种金属的 MIC 点蚀有关。这是因为真菌生物膜可以消耗氧气,有利于厌氧微生物(如 SRB)的生长;同时,某些真菌(如黑曲霉)可以直接对镁合金造成 MIC 点蚀。此外,真菌还能降解产生有机酸的碳氢化合物,导致管道环境 pH 降低。

表 1 金属供水管网中常见的细菌及其腐蚀特性

Tab.1 Common bacteria and their corrosion characteristics in metal water supply pipe network

细菌种类	腐蚀特性
SRB	在缺氧环境中,硫酸盐分布广泛,SRB 能够将氧化有机物过程中获得的电子传递给硫酸盐,并从中获得能量来维持自身生长,因此,SRB 对腐蚀的影响程度最大
IOB	可将 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} ,并在细胞外沉积氢氧化铁,还可为 SRB 提供适合的无氧生长环境
锰氧化微生物(MOB)	可以将其他金属作为电子供体,从而引起腐蚀
硝酸盐还原菌(NRB)	NRB 在土壤 MIC 研究中与 SRB 一样重要,它能在铁氧化与微生物的双重催化下,通过硝酸盐还原反应加剧对金属的腐蚀
产酸菌(APB)	缺氧状态下,APB 在发酵过程中产酸从而腐蚀金属管壁

1.2 胞外电子传递机制

在供水管网 MIC 过程中,微生物一方面将可溶性化合物(O_2 、硝酸盐、硫酸盐等)作为电子受体,另一方面“某些”微生物可以通过 EET 机制对固体电子受体进行呼吸,而通常 EET 在该过程中承担更重要的角色。EET 的具体形成原因可概括为如下 3 点:一是生物呼吸作用;二是生物同向性,即其中一种微生物可以直接将电子转移至另一种微生物上,无需中间产物如 H_2 ;三是细胞间信息电子传递。目前,主流研究认为 EET 方式分为基于特定蛋白质结构(如 c 型细胞色素)和导电纳米线的直接电子传输,以及利用氧化还原活性化学介质(电子载体)间接促进电子传输的介导电子传输^[4-6],具体见表 2。

此外,还有其他的 EET 方式,如 Turick 等^[7]研究发现 *Shewanella algae* BrY 可将不溶性矿物氧化物作为电子受体,使电子从细胞表面转移到矿物表

面,其中黑色素充当了电子载体。尽管目前对EET机制的划分探讨尚无定论,但随着近年来电化学腐蚀测量技术的发展,尤其在腐蚀失重和点蚀方面累积了大量有效的瞬态数据,这将有助于进行更深入的MIC机理研究、管道腐蚀管理和腐蚀风险评估。

表2 胞外电子传递机制的分类

Tab.2 Types of extracellular electron transport mechanism

机制	类别	传递结构
直接传递	导电蛋白	基于特定蛋白质结构的氧化还原过程和长距离电子跳跃,重点是金属蛋白的作用,如多血红素细胞外电子传输通道
	导电纳米线	导电性的菌毛或鞭毛具有类似欧姆传导性质
间接传递	内源性电子载体 外源性电子载体	氧化还原活性化学介质及穿梭化合物

1.2.1 直接电子传递机制

在自然环境中,“某些”电活性微生物为生存会吸附在固体电极表面,形成群落结构更加复杂的电活性生物膜(EABs)。在直接电子转移机制中,微生物必须与“电极”之间存在物理接触,才可直接接收阴极表面的电子,起到电极氧化微生物的作用。与传统生物膜相比,EABs的最大特点是生物膜与胞外固态载体(铁氧化物等)存在直接的电子交换过程。

① 导电蛋白机制

在直接电子转移过程中不存在任何额外的电子受体或介质参与,若电子要从酶活性位点直接、有效地转移到电极上,其氧化还原中心必须位于接近蛋白质附着点。换句话说,在导电蛋白机制中只有充分缩短电极表面和蛋白质电子体之间的距离才能通过电子实现^[8]。许多电活性微生物通过一系列氧化还原活性蛋白质或细胞色素转移电子,这类物质通过相互作用形成EET路径,将胞内呼吸链与物质外部的氧化还原反应相结合。其中,细胞色素在电子传递过程中更为常见。例如,在地杆菌属中,*G. sulfurreducens*拥有111个编码c-Cyts的基因,含有两个以上血红素的有73个,其中一个的血红素组多达27个。

② 导电纳米线机制

最初,Strycharz-Glaven等^[9]在光合产氧蓝藻和嗜热产甲烷菌共同培养过程中确认了导电纳米线的存在,这表明纳米线可能是不同微生物系统中的

常见结构。导电纳米线机制是指微生物通过消耗一定能量自身合成具有导电性的菌毛,从而实现远距离电子传递。Malvankar等^[10]认为目前细菌纳米线导电特性的研究主要集中在两种金属还原菌上,即:*Geobacter sulfurreducens*和*Shewanella oneidensis*,而纳米线在这两种菌类中的功能截然不同。

a. *Shewanella oneidensis* 纳米导线。Malvankar等^[11]和Gorby等^[12]的研究表明,当一种菌株缺乏外表面细胞色素的基因时,MtrC和OmcA产生非导电丝。但有理论模型表明,*Shewanella oneidensis*纳米线进行电子传导的模式为细胞色素之间的电子跳跃,表现为*oneidensis* MR-1产生的纳米线沿着其长度呈现非线性电输运特性。未来研究应集中于单胞菌纳米线的实际组成、细胞色素的存在及其沿着纳米线电子跳跃的间距。

b. *Geobacter sulfurreducens* 纳米导线。对于该菌,Strycharz-Glaven等^[9]有多条证据证明硫还原泥土杆菌(*G. sulfurreducens*)菌毛的导电性不是由于菌毛相关细胞色素之间的电子跳跃引起的,而是细胞色素在菌毛富含芳香族的区域之间起到桥接电子转移的作用。El-Naggar等^[13]利用静电力显微镜观察单个菌毛蛋白的电子传递研究也表明,硫还原泥土杆菌纳米线的导电性不能归因于细胞色素。

1.2.2 间接电子传递机制

不同于直接电子传递机制,Glasser等^[14]发现某些EABs已经通过进化实现了间接电子传递。简单来说,就是某些具有氧化还原活性的化合物可作为“辅助因子”或“电子穿梭体(ES)”向细胞外不溶性受体输送电子,通常根据来源分为内源性电子载体和外源性电子载体。有研究已经证实电子载体通过加速胞外电子的传递来加剧金属管道的MIC。例如,Zhang等^[15]在研究硫酸盐还原菌*D. vulgaris*对304不锈钢腐蚀的影响时,通过添加外源性电子载体核黄素和黄素腺嘌呤二核苷酸,证实了这两种电子载体均能加速不锈钢样品的腐蚀。

① 内源性电子载体

目前关于内源性电子传递机制的了解尚不清晰,但可以肯定该类物质在EET中的重要性,这是因为内源性ES虽然在电子传递过程中消耗了一定的能量,但可反复利用,有助于进行呼吸代谢微生物的生长。内源性ES是由微生物产生并分泌到细胞外的具有电子传递功能的物质,主要包括一些微

生物的次级代谢产物。例如,DIRB(黄素、醌、吩嗪等)是广为人知的一类细胞自我分泌的可溶性小分子物质,在EET过程中起着电子穿梭的作用。近期与金属有关的MIC研究主要集中在以下两类细菌上:a. *Shewanella*。通过分泌的黄素单核苷酸和核黄素将电子传输给胞外固体金属氧化物,如赤铁矿、针铁矿和纤铁矿,这一过程促进了这种Fe(Ⅲ)氧化物的胞外还原进程;b. *Pseudomonas* sp.。该菌将吩嗪作为可溶性的氧化还原介质排出,由此将电子从外膜转移到氧化铁上。除了上述两种还原菌,Wang等^[16]发现4种天然的吩嗪,即绿菁、吩嗪-1-羧酸盐、吩嗪-1-羧酰胺和1-羟基吩嗪,也具有还原溶解性铁氧化物和赤铁矿的功能。

② 外源性电子载体

外源性ES根据来源分为自然产生和人工合成两种。由于供水管网管壁通常被土壤或水包裹,主要与腐殖质接触,因此,重点介绍腐殖质电化学特性及其ES介导的EET机制。腐殖质即天然有机质,主要包括腐殖酸(HAs)、胡敏素和富里酸,其中富里酸在水溶液中具有较强的酸性;腐殖酸可在水环境或土壤环境中促进MIC;而胡敏素有酸碱不溶性及大分子结构特性,被认为是土壤中的惰性物质。此外,腐殖酸的氧化还原特性易受醌、酚等官能团的影响,尤其是醌基团的影响较大。对于金属管网供水系统,Zhou等^[17]研究发现腐殖酸通常与铁、铜、铝等金属络合,促进土壤或水环境中不锈钢管的EET,通过实验比较了HAs和上述3种金属配合物在Fe(Ⅲ)的还原、电流产生和偶氮还原过程中的电子穿梭能力,结果为HA-Fe>HAs>HA-Cu>HA-Al。

2 供水管网中金属管材腐蚀的防护研究

2.1 常用化学抗菌剂

化学抗菌剂是缓解微生物腐蚀管道的传统方法,在生物降解性、安全性、成本效益以及细菌的耐药性方面表现优异。研究表明,将化学抗菌剂与抗菌增效剂联合使用对抑制生物膜的形成效果更好。Zilm等^[18]比较研究了单独使用杀菌剂以及杀菌剂和D-氨基酸混合条件下粪肠球菌生物膜的生长情况。结果发现,单独使用次氯酸钠等杀菌剂时,并没有明显抑制生物膜的生长,而共同使用杀菌剂和D-氨基酸时,则有效抑制了粪肠球菌生物膜的形成。但传统的化学抗菌剂对环境的污染及人体安

全不可忽视,因此对新型抗菌剂提出了更高要求。

2.2 纳米材料抗菌剂

Rasheed等^[19]认为理想的纳米材料抗菌剂必须对不同的水生微生物具有良好的抗菌性能,同时尽可能减小对环境的影响。SRB作为金属供水管网中最常见的一类腐蚀菌,最近发现多种纳米粒子(NPs)材料能有效抑制SRB的生长,这类材料可作为新型抗菌剂用于提升金属供水管道的耐腐蚀性能,具体内容^[19]见表3。在抗菌效果方面,NPs具有防腐和抗菌的功能,可防止细菌黏附在金属表面,是抑制MIC的理想涂层材料;在控制毒性方面,NPs结合金属或金属氧化物后,其毒性可以通过与一些天然聚合物的结合实现最小化,该过程不影响纳米材料的稳定性和功能性,还可以将具有不同单菌抗性的纳米材料相互结合,以提高综合的防腐性能。

表3 可用于金属供水管网的纳米材料抗菌剂

Tab.3 Nano-material antibacterials used in water

抗菌剂名称	对SRB菌的抑制效果
Fe-NPs	0.5 g/L的Fe-NPs几乎完全抑制SRB的活性
Fe ₃ O ₄ -NPs	Fe ₃ O ₄ -NPs为100 mg/L时,硫化物的产生率降低到原来的11.8%,从而降低了细菌的腐蚀能力
Cu-NPs	600 μg/mL的Cu-NPs可在3 h内几乎完全抑制SRB的生长
CuO-NPs	CuO-NPs对SRB脱硫弧菌具有抑制作用,其最小抑菌浓度为100 μg/mL
TiO ₂ -NPs	TiO ₂ -NPs的光催化性能使得SRB在紫外光照射下的生长速率明显低于可见光和黑暗条件下的生长速率
Ag-NPs	Ag-NPs吸附在金属表面形成保护层,抑制了细菌的附着,从而抑制了腐蚀,浓度达到200 mg/mL时能够有效灭活SRB
几丁聚糖-ZnO-NPs复合材料(10%的ZnO-NPs)	几丁聚糖-ZnO-NPs为250 μg/mL时,可作为一种有效的缓蚀剂,用于抑制SRB对碳钢的腐蚀,其对SRB的抑制率>73%,对总有机碳的去除率达到43%

2.3 抗菌不锈钢的研发

大部分重金属具有较强的抗菌性,尤其通过添加Cu元素增强不锈钢抗菌性能的研究较早也较多。例如,Sun等^[20]和Hong等^[21]研究发现Cu离子具有很好的抗菌作用;Zhuang等^[22]和Sun等^[23]发现将Cu离子分别添加至316L、317L不锈钢管中能有效抑制生物膜的形成,具有良好的抗菌性能;Zhang等^[24]和Nan等^[25]在0Cr17和0Cr18Ni9不锈钢中分别添加Cu,成功研发了具有广谱抗菌作用的不锈钢。

尽管早有稀土应用于钢材的相关研究报道,但对其抗菌性的探究则出现较晚。现已发现稀土元素具有广谱抗菌效果,在不锈钢抗菌应用方面也积累了一定经验。例如,Liu等^[26]发现Cu的添加不能改善316L不锈钢对SRB的耐腐蚀性,但镧(La)和铈(Ce)有助于提高不锈钢的耐腐蚀性。Peng等^[27]通过在00Cr18Ni9不锈钢中添加0%~5%的Ce成功制备了含Ce的抗菌不锈钢,该种不锈钢在不经时效处理的情况下,对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌具有很好的抗菌性。Yuan等^[28]在316L不锈钢中添加了0.15%的La,实验证明含La的抗菌不锈钢能有效灭活大部分革兰氏阴性菌和阳性菌。Gao等^[29]研究发现添加块状镓(Ga)和硒(Se)可控制镁合金内抗菌物质的释放,从而起到抑制细菌的效果。

3 结论

① 在城市输配水环节,管道老化、锈蚀、细菌滋生等问题对居民饮用水安全提出严峻挑战,使得新型金属管材的应用成为供水管网升级改造的重要发展方向。相对传统管材而言,新型金属管材具有使用寿命长、卫生条件好、压力损失小、稳定性好、施工方便、环保可回收等一系列优势,但在长期输水过程中产生的MIC问题(主要为更难防控的局部腐蚀)一直是防控的重点和难点。

② 围绕MIC问题,引入胞外电子传递机制对供水管网的微生物腐蚀机理做出新的诠释。传统观点认为管道MIC现象主要是由金属表面氧浓度差和微生物的代谢产物所致,而直接电子传递机制认为某些EABs可以直接与“电极”(如铁氧化物)接触并实现电子交换。根据EET过程的位置、起运输作用的物质和电子传递方式,该机制可细分为导电蛋白机制和导电纳米线机制。间接电子传递机制认为某些EABs可将具有氧化还原特性的“辅助”化合物作为间接电子传递的载体,根据载体来源又分为内源性电子载体和外源性电子载体。

③ 基于EET机制的腐蚀原理,总结和对比分析了目前研究和应用较多的防护措施,以期将来城镇供水工程和直饮水工程的建设和维护提供重要的理论指导和借鉴。应用较成熟的氧化性抗菌剂与增效剂联用的方法尽管在供水管网的抗菌效果方面表现优异,但不利于长期运行的设备和环境保护;新型纳米材料抗菌剂有效兼顾了联用方法的

优缺点,但还处于实验阶段;近期国际上研发的各类抗菌不锈钢管也是目前防护研究的热点之一。

参考文献:

- [1] LIU H W, FU C Y, GU T Y, *et al.* Corrosion behavior of carbon steel in the presence of sulfate reducing bacteria and iron oxidizing bacteria cultured in oilfield produced water [J]. *Corrosion Science*, 2015, 100: 484-495.
- [2] COJOCARU A, PRIOTEASA P, SZATMARI I, *et al.* EIS study on biocorrosion of some steels and copper in czapek dox medium containing *Aspergillus niger* fungus [J]. *Revista de Chimie*, 2016, 67(7): 1264-1270.
- [3] LUGAUSKAS A, BIKULČIUS G, BUČINSKIENĖ D, *et al.* Long-time corrosion of metals (steel and aluminium) and profiles of fungi on their surface in outdoor environments in Lithuania [J]. *CHEMIJA*, 2016, 27 (3): 135-142.
- [4] ZACHAROFF L, EL-NAGGAR M. Review article redox conduction in biofilms: from respiration to living electronics [J]. *Current Opinion in Electrochemistry*, 2017, 4: 182-189.
- [5] REGUERA G, MCCARTHY K D, MEHTA T, *et al.* Extracellular electron transfer via microbial nanowires [J]. *Nature*, 2005, 435: 1098-1101.
- [6] 马金莲, 马晨, 汤佳. 电子穿梭体介导的微生物胞外电子传递: 机制及应用 [J]. *化学进展*, 2015, 27 (12): 1833-1840.
MA Jinlian, MA Chen, TANG Jia. Mechanisms and applications of electron shuttle-mediated extracellular electron transfer [J]. *Progress in Chemistry*, 2015, 27 (12): 1833-1840(in Chinese).
- [7] TURICK C E, JR CACCAVO F, TISA L S. Electron transfer from *Shewanella algae* BrY to hydrous ferric oxide is mediated by cell-associated melanin [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2003, 220 (1): 99-104.
- [8] FORD N B, SHIN D W, GRAY H B, *et al.* Conformational dynamics of a fast folding cytochrome captured by time-resolved spectroscopy [J]. *Biophysical Journal*, 2014, 106(2): 473a.
- [9] STRYCHARZ-GLAVEN S M, SNIDER R M, GUISEPPI-ELTE A, *et al.* On the electrical conductivity of microbial nanowires and biofilms [J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(11): 4366-4379.
- [10] MALVANKAR N S, LOVLEY D R. Microbial

- nanowires for bioenergy applications [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2014, 27: 88–95.
- [11] MALVANKAR N S, LOVLEY D R. Microbial nanowires: a new paradigm for biological electron transfer and bioelectronics[J]. ChemSusChem, 2012, 5 (6): 1039–1046.
- [12] GORBY Y A, YANINA S S, MCLEAN J S, *et al.* Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(30):11358–11363.
- [13] EL-NAGGAR M Y, WANGER G, LEUNG K M, *et al.* Electrical transport along bacterial nanowires from *Shewanella oneidensis* MR-1 [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(42):18127–18131.
- [14] GLASSER N R, SAUNDERS S H, NEWMAN D K. The colorful world of extracellular electron shuttles [J]. Annual Review of Microbiology, 2017, 71(1):731–751.
- [15] ZHANG P Y, XU D K, LI Y C, *et al.* Electron mediators accelerate the microbiologically influenced corrosion of 304 stainless steel by the *Desulfovibrio vulgaris* biofilm [J]. Bioelectrochemistry, 2015, 101: 14–21.
- [16] WANG Y, NEWMAN D K. Redox reactions of phenazine antibiotics with ferric (hydr) oxides and molecular oxygen [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42 (7): 2380–2386.
- [17] ZHOU S G, CHEN S S, YUAN Y Y, *et al.* Influence of humic acid complexation with metal ions on extracellular electron transfer activity[J]. Scientific Reports, 2015, 5 (1): 17067.
- [18] ZILM P S, BUTNEJSKI V, ROSSI-FEDELE G, *et al.* D-amino acids reduce enterococcus faecalis biofilms in vitro and in the presence of antimicrobials used for root canal treatment[J]. PLoS One, 2017, 12(2):e0170670.
- [19] RASHEED P A, JABBAR K A, MACKEY H R, *et al.* Recent advancements of nanomaterials as coatings and biocides for the inhibition of sulfate reducing bacteria induced corrosion [J]. Current Opinion in Chemical Engineering, 2019, 25:35–42.
- [20] SUN D, SHAHZAD M B, LI M M, *et al.* Antimicrobial materials with medical applications [J]. Materials Technology: Advanced Performance Materials, 2014, 30(B2): B90–B95.
- [21] HONG D H, CAO G Z, QU J L, *et al.* Antibacterial activity of Cu₂O and Ag co-modified rice grains-like ZnO nanocomposites [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 34(12): 2359–2367.
- [22] ZHUANG Y F, ZHANG S Y, YANG K, *et al.* Antibacterial activity of copper-bearing 316L stainless steel for the prevention of implant-related infection [J]. Journal of Biomedical Materials Research, 2019, 22: 1–12.
- [23] SUN D, XU D, YANG C, *et al.* An investigation of the antibacterial ability and cytotoxicity of a novel Cu-bearing 317L stainless steel[J]. Science Report, 2016, 6(1): 1–13.
- [24] ZHANG D, REN L, ZHANG Y, *et al.* Antibacterial activity against porphyromonas gingivalis and biological characteristics of antibacterial stainless steel [J]. Colloids and Surfaces B–Biointerfaces, 2013, 105: 51–57.
- [25] NAN L, CHENG J L, YANG K. Antibacterial behavior of a Cu-bearing type 200 stainless steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2012, 28(11):1067–1070.
- [26] LIU H W, XU D K, YANG K, *et al.* Corrosion of antibacterial Cu-bearing 316L stainless steels in the presence of sulfate reducing bacteria [J]. Corrosion Science, 2018, 132: 46–55.
- [27] PENG Y Y, YIN Z M. Effect of scandium and zirconium on mechanical and exfoliation corrosion properties of Al–Mg–Mn alloys [J]. Journal of Rare Earths, 2006, 24 (2): 221–245.
- [28] YUAN J P, LI W, WANG C. Effect of the La alloying addition on the antibacterial capability of 316L stainless steel[J]. Materials Science & Engineering:C, 2013, 33 (1): 446–452.
- [29] GAO Z H, SONG M S, LIU R L, *et al.* Improving in vitro and in vivo antibacterial functionality of Mg alloys through micro-alloying with Sr and Ga [J]. Materials Science & Engineering:C, 2019, 104:109926.

作者简介:吴霖璟(1997–),女,福建福鼎人,硕士研究生,研究方向为饮用水安全保障技术。

E-mail:wlj6004@163.com

收稿日期:2020-07-19

修回日期:2020-07-31

(编辑:丁彩娟)