



循环冷却水微生物调节水质机理研究进展

王 宇, 王天平, 叶春松

(武汉大学动力与机械学院, 能源化学工程系, 湖北武汉 430072)

[摘要] 微生物调节水质(WQCM)方法是将特定微生物菌剂加入循环冷却水中, 利用多种功能菌新陈代谢的协同作用调节循环冷却水水质的一种新颖的循环冷却水处理方法, 目前正处于深入研究和初步应用阶段。循环冷却水 WQCM 方法的关键是阐明微生物功能菌调节循环冷却水水质的作用机理及协同机制。介绍了目前循环冷却水 WQCM 的应用现状; 归纳了 WQCM 防垢、防腐、防生物黏泥以及浓排水降污的作用机理; 指出了当前 WQCM 机理研究存在的问题, 展望了 WQCM 方法未来的研究方向和应用前景。

[关键词] 循环冷却水; 微生物功能菌; 调节水质; 作用机理

[中图分类号] TM621.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)02-0060-07

Advance on mechanism of water quality conditioning for recirculating cooling water by microorganisms

WANG Yu, WANG Tianping, YE Chunsong

(Department of Energy Chemistry Engineering, School of Power and
Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Water quality conditioning by microorganisms (WQCM) method is used for recirculating water treatment through adding specific microbial agents and utilizing the synergistic effects of functional strains metabolism. WQCM is a new-type recirculating cooling water treatment method, which is in the period of in-depth research and primary application. The critical issues of WQCM method for recirculating cooling water are to clarify the mechanisms of water quality conditioning and their synergistic effects by microbial functional strains. This paper recommended the current application of WQCM for recirculating cooling water, summarized the mechanisms of WQCM about anti-scale, anti-corrosion, anti-biofouling, and reducing pollutants in concentrated drainage, pointed out the research problems of WQCM mechanism, and looked ahead to the research direction and application prospect of WQCM method.

Key words: recirculating cooling water; microbial functional strain; water quality conditioning; mechanism

循环冷却水系统存在的主要问题有结垢、腐蚀和生物黏泥滋生等, 国内外传统的处理方法是向循环冷却水中加入阻垢剂、缓蚀剂、杀菌灭藻剂等化学药剂处理。化学处理法是具有良好的防垢、防腐和防生物黏泥的处理方法, 广泛应用于电力、化工、石油等工业循环冷却水系统^[1-2]。然而, 随着国家《水污染防治行动计划》的颁布, 各地政府对包括工业浓排水在内的水污染排放提出了更为严格的要求^[3]。因此, 循环冷却水浓排水有可能出现 COD、NH₃-N、TP、浊度等超标的问题。

为解决浓排水水质超标的问题, 近十年来, 研究者们尝试了一种利用微生物对循环冷却水进行水质调节处理的方法——微生物调节水质(Water quality conditioning by microorganisms, WQCM)方法。循环冷却水 WQCM 方法旨在通过加入微生物菌剂, 利用微生物功能菌的新陈代谢作用解决循环冷却水系统的结垢、腐蚀和生物黏泥滋生的传统问题, 同时解决浓排水污染物超标的问题。

循环冷却水 WQCM 方法取得了较好的应用效果, 但其作用机理尚未获得明确的认知和共识。

笔者针对循环冷却水 WQCM 方法的应用现状,着重论述了功能菌在调节循环冷却水水质过程中防垢、防腐、防生物黏泥、浓排水降污的作用机理和存在问题,展望了 WQCM 方法的发展方向和 application 前景。

1 WQCM 方法应用现状

截至目前,一些企业尝试运用 WQCM 方法处理工业循环冷却水,其应用效果汇总于表 1。在 WQCM 方法处理循环冷却水期间,铜、碳钢和不锈

钢金属材料的腐蚀速率符合国家标准,异养菌总数低于国家标准限定值,生物黏泥和藻类生长得到抑制。相比化学法处理,浓排水的 COD、NH₃-N、TP、浊度和悬浮物等也有所下降。WQCM 方法用于循环冷却水处理取得了较好的应用效果。然而,上述应用报道的循环冷却水系统的浓缩倍率存在明显差异,浓排水降污的效果也不尽相同,这可能是由加入的微生物菌剂中功能菌的种类及其作用方式不同导致的。因此,明确功能菌的作用机理对循环冷却水 WQCM 方法的应用十分重要。

表 1 循环冷却水 WQCM 方法的应用现状

Table 1 Application status of WQCM method for recirculating cooling water

微生物功能菌	防垢效果	防腐效果	防生物黏泥效果	降污效果	应用系统
乳酸菌、酵母菌、枯草菌、放线菌、丝状菌、光合菌、硝化菌等	浓缩倍率最高为 11.9	碳钢腐蚀速率为 0.045 mm/a;铜腐蚀速率为 0.001 8 mm/a	黏附速率符合国家标准	运行 4 周后 TP、TDS 和浊度持续下降	某循环冷却水系统 ^[4]
溶垢细菌、群体淬灭细菌、高效降解细菌和絮凝细菌等	浓缩倍率为 4.5~5.0	碳钢腐蚀速率为 0.063 9 mm/a	—	浊度为 1.5~6.2 NTU, COD 为 21~29 mg/L, 符合国家标准	神华宁煤煤化工工业分公司甲醇厂循环冷却水系统 ^[5-6]
纺锤形赖氨酸芽孢杆菌、球衣菌和乳杆菌等	浓缩倍率最高为 5.2;换热器管壁污垢明显减少	碳钢 30 d 内腐蚀速率符合国家标准,30 d 后超标;黄铜和不锈钢腐蚀速率符合国家标准	集水池壁上的藻类生长被抑制	浊度为 1 NTU 左右,低于往年同期平均值;TP 下降 97.2%	重庆某化肥公司硝酸生产装置循环冷却水系统 ^[7]
复合微生物菌群	浓缩倍率为 15~18;原有垢减少 0.2~0.3 mm	不锈钢腐蚀速率为 0.000 1 mm/a	异养菌总数为 2.8×10 ⁴ ~3.5×10 ⁴ mL ⁻¹ ;水塔盆边缘及内部支柱无大量绿藻滋生	—	鸡西二热电厂火电厂循环冷却水系统 ^[8]
蜡芽芽孢杆菌、苏云金芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌、乳酸球菌、干酪乳杆菌和红平红球菌等	相比化学法处理,换热管污垢热阻下降 0.6×10 ⁻⁴ m ² ·°C/W	相比化学法处理,碳钢腐蚀速率下降 22.5%,铜合金腐蚀速率下降 26.8%	异养菌总数为 7×10 ⁴ mL ⁻¹ ;生物黏泥量为 1.4 mL/m ³	相比化学法处理,浓排水中 TP、COD 和悬浮物下降	京津唐地区某火电厂循环冷却水系统 ^[9]
溶垢絮凝细菌、群体淬灭细菌、高效降解细菌等	浓缩倍率为 4~6;相比化学法处理,换热管污垢热阻下降	相比化学法处理,全铁和铜离子质量浓度上升,但符合国家标准	异养菌总数为 1×10 ⁵ mL ⁻¹ ,相比化学法处理下降	平均 COD 为 40.26 mg/L, TP 稳定在 0.3 mg/L 以下,相比化学法处理, COD、TP 下降	某循环冷却水系统 ^[10]

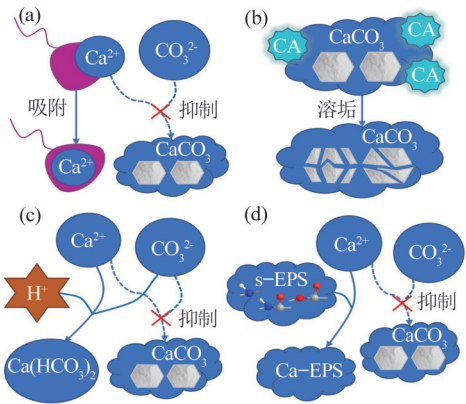
2 作用机理

WQCM 方法使用的微生物菌剂由不同种类的功能菌组成,如乳酸菌、酵母菌、放线菌、光合菌、硝化菌、芽孢杆菌、球衣菌等。功能菌的加入旨在解决循环冷却水系统存在的结垢、腐蚀、生物黏泥滋生等问题,同时降低浓排水中 COD、NH₃-N、TP、浊度、悬浮物及某些污染物(如硫化物)等。基于对循环冷却水 WQCM 方法的应用现状汇总,对 WQCM 方法所涉及的功能菌及其作用机理进行分析。

2.1 防垢机理

功能菌的防垢作用主要通过 4 种途径实现,机理见图 1。

(1)吸附钙镁离子:某些功能菌具有将环境中金



(a)吸附钙镁离子;(b)CA 溶垢;(c)产酸增溶;(d)EPS 络合增溶

图 1 功能菌防垢的作用机理

Fig. 1 Anti-scale mechanism of functional strains

属离子吸附到自身体内的能力,称为生物吸附。生物吸附涉及多种机理,如静电吸引、络合作用、范德华力等。吸附能力的强弱取决于金属与微生物细胞壁间的亲和力,由细胞壁上的羟基、羰基、羧基等官能团决定^[11]。功能菌可以将循环冷却水中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等结垢离子吸附到体内,防止碳酸盐垢的生成。E. FOSSO-KANKEU等^[12]开展了利用微生物吸附溶液中 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 的试验,*Bacillus subtilis*对 Ca^{2+} 的吸附率为14%,*Shewanella* sp.对 Mg^{2+} 的吸附率为8%,证明了理论的可行性。

(2)CA溶垢:易哲等^[13]发现*Bacillus* sp.菌株会产生碳酸酐酶(CA),其可使循环冷却水中的碳酸钙垢由致密变疏松,最终起到溶垢效果。Jiangyu YE等^[14]通过试验证实了这一现象,向以碳酸钙为主的循环冷却水垢中加入CA,利用扫描电子显微镜(SEM)观察到经CA处理后的样品结构由致密变为疏松,表面和内部被溶蚀为细小的颗粒。

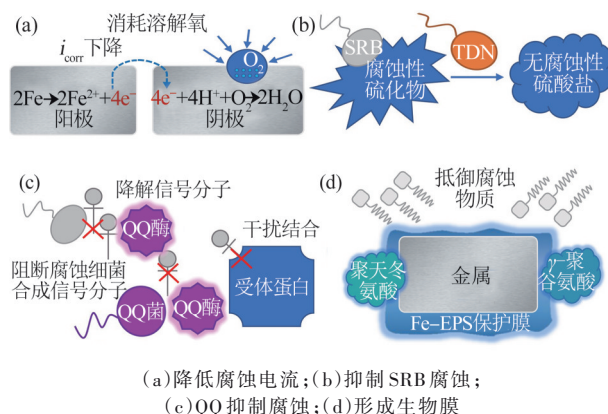
(3)产酸增溶:硝化菌、乳酸菌等功能菌的新陈代谢会产生酸性物质, H^+ 结合水中的 CO_3^{2-} 生成 HCO_3^- 。碳酸氢盐的溶解度比碳酸盐高,因此 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等结垢离子可稳定存在于循环冷却水中而不结垢析出。Chuanmin CHEN等^[15]利用城市中水做补水开展微生物菌剂用于循环冷却水处理试验,观察到系统pH由8.33持续下降至6.45,系统的极限浓缩倍率达到3.87,证明了功能菌产酸增溶的防垢理论。

(4)EPS络合增溶:胞外聚合物(EPS)是微生物分泌在细胞外的一些高分子聚合物,主要由多糖和蛋白质构成,还有少量的磷脂、腐殖酸、核酸等^[16]。某些功能菌会分泌可溶性胞外聚合物(s-EPS),s-EPS中某些官能团可以与 Ca^{2+} 结合生成稳定的Ca-EPS络合物,提升钙盐的溶解度,抑制碳酸钙垢的生成^[17]。Shunling LI等^[18]发现蜡样芽胞杆菌分泌的s-EPS具有阻垢缓蚀双重功效,在s-EPS质量浓度为80 mg/L时, CaCO_3 的阻垢率接近87.60%。利用傅里叶红外光谱(FTIR)发现,s-EPS中羧基、氨基和酰胺等带负电荷官能团通过吸附在 CaCO_3 活性生长中心或与 Ca^{2+} 结合,抑制了钙垢晶体的形成和生长。

2.2 防腐机理

功能菌的防腐作用主要通过4种途径实现,机理见图2。

(1)降低腐蚀电流:好氧微生物可通过呼吸作用



(a)降低腐蚀电流;(b)抑制SRB腐蚀;
(c)QQ抑制腐蚀;(d)形成生物膜

图2 功能菌防腐的作用机理

Fig. 2 Anti-corrosion mechanism of functional strains

消耗金属表面的溶解氧,降低氧的极限扩散电流密度(i_L),减小腐蚀电流密度(i_{corr}),因而金属的腐蚀速率降低。M. DUBIEL等^[19]通过测量电化学阻抗谱(EIS),发现*Shewanella oneidensis* MR-1的存在降低了316不锈钢的腐蚀速率。试验中发现加菌株组 i_L 下降,而这正是微生物呼吸降低了氧浓度引起的。由于吸氧腐蚀受氧的扩散过程控制,金属的 i_{corr} 等于 i_L ,故加菌株组 i_{corr} 较低。微生物的存在降低了金属的腐蚀速率。

(2)抑制SRB腐蚀:硫酸盐还原菌(SRB)是一种循环冷却水中常见的腐蚀性微生物,针对SRB的腐蚀行为,相关学者已经提出了阴极去极化理论、浓差电池理论、代谢产物腐蚀理论等机理^[20]。脱氮硫杆菌(TDN)的生长环境与SRB相似,TDN可将SRB产生的具有腐蚀性的硫化物转化为无腐蚀性的硫酸盐,抑制SRB对金属的腐蚀。苑海涛等^[21]研究TDN和SRB共存和SRB单独存在对X70钢的腐蚀情况,发现中性或弱碱性环境下TDN的存在减缓了SRB对钢的腐蚀。X射线能谱仪(EDS)的检测结果表明,TDN和SRB共存组腐蚀产物中硫化物原子分数为0.30%,低于SRB单独存在时的1.49%。证实了TDN可消耗SRB代谢产生的具有腐蚀性的硫化物,抑制了SRB对钢基体的腐蚀。

(3)QQ抑制腐蚀:细菌群体感应(Quorum sensing, QS)是调控细菌群体行为的一种机制,当信号分子浓度到达某些阈值后,细菌会启动一系列基因转录表达并作出相关反应^[22]。群体感应淬灭(Quorum quenching, QQ)能抑制信号分子的合成和积累,干扰细菌QS的正常表达^[23]。具有QQ作用的功能菌称

为QQ菌,有些QQ菌可通过分泌QQ酶实现上述过程,例如 *Bacillus megaterium*^[24]、*Solibacillus silvestris*^[25]等;而有些QQ菌可自行降解信号分子,例如 *Agrobacterium* 和 *Pseudomonas* 等^[26]。QQ菌通过抑制腐蚀细菌QS系统的信号分子表达,干扰腐蚀细菌产生腐蚀物质,从而起到防腐效果。

(4)形成生物膜:某些功能菌会在金属表面形成生物膜,主要成分为EPS、吸附的营养物以及附着的微生物群落等。众多学者发现并研究了生物膜对金属腐蚀的抑制作用,目前普遍认为生物膜防腐的方式有2种,即分泌具有防腐性能的物质和形成生物保护膜^[27-28]。D. ÖRNEK等^[29]分别研究了 *Bacillus subtilis* WB600(分泌聚天冬氨酸)、*Bacillus licheniformis*(分泌 γ -聚谷氨酸)和 *Bacillus subtilis* WB600/pBE92(不分泌物质)3种菌株形成的生物膜对2024铝的腐蚀情况。试验发现前两者显著减缓了金属的点蚀,认为是由于聚天冬氨酸和 γ -聚谷氨酸含有的羧基团通过氢键、偶极-偶极作用和库仑作用整合或耦合金属-溶液界面上的铝离子或铝氧化物,从而对金属形成保护作用。S. CHONGDAR等^[30]发现碳钢在含有 *Pseudomonas cichorii* 的磷酸盐缓冲溶液中,由于表面生物膜的形成,腐蚀速率显著降低。FTIR检测结果证明了生物膜保护金属的主要原因是亚铁离子与EPS形成了Fe-EPS复合物保护层,阻碍了腐蚀反应的进行。M. S. SUMA等^[31]也得出了类似的结论。

2.3 防生物黏泥机理

功能菌的防生物黏泥作用主要通过4种途径实现,机理见图3。

(1)酶降解生物黏泥:枯草芽孢杆菌和解淀粉芽孢杆菌等会产生 α -淀粉酶、蛋白酶等生物酶,这些生物酶可以通过切割生物黏泥中多糖的 α -1,4糖苷键或水解蛋白质,最终将生物黏泥降解为小分子有机物或 CO_2 和 H_2O 等无机物。利用生物酶处理生物黏泥已得到广泛应用并取得了良好效果。张磊^[32]将 α -淀粉酶、溶菌酶、胰蛋白酶和木瓜蛋白酶组成的复配酶处理剂用于循环冷却水生物黏泥的剥离,黏泥剥离率最高达83.62%。

(2)竞争生态位:加入的功能菌可以形成优势菌群,通过对营养物底物的竞争作用,中断黏液形成菌和藻类的养分供给,抢占其生态位,在源头上抑制生

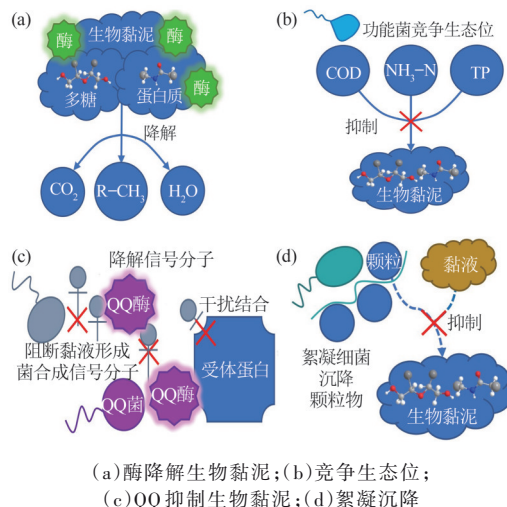


图3 功能菌防生物黏泥的作用机理

Fig. 3 Anti-biofouling mechanism of functional strains

物黏泥的生成。C. G. JÄGER等^[33]研究发现营养物的供给浓度对藻类生物生长至关重要,合理调控生物间对营养物的竞争关系是藻类控制需要重点考虑的手段。周晓云等^[34]利用由乳酸菌、芽孢杆菌、酵母菌、放线菌组成的菌群和其分泌的多种酶及酶活因子组成的微生物菌剂治理池塘藻类,加入后水体藻细胞浓度下降78.8%,叶绿素a质量浓度下降81.5%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 和COD质量浓度分别下降80.3%和65.3%,微生物菌剂抑制了藻类水华的形成和发展。

(3)QQ抑制生物黏泥:QQ菌可以干扰黏液形成菌QS系统的正常表达,从源头上抑制黏液形成菌产生生物黏泥。S. FETZNER^[35]总结了常见的几种用于控制生物黏泥的QQ酶,例如内酯酶(Lactonases)、酰基转移酶(Acylases)、氧化还原酶(Oxidoreductases)等,这些酶通过分解信号分子,抑制黏液形成菌群体产生黏泥的信号表达。W. S. CHEONG等^[36]将 *Pseudomonas* sp. 1A1分泌的QQ酶加入膜生物反应器,膜表面的生物黏泥量显著降低。此外,S. DOBRETSOV等^[37]筛选出具有QQ能力的天然生物产物曲酸等,向培养基中加入曲酸后细菌密度和硅藻密度都明显下降,QQ也可用于硅藻的防治。

(4)絮凝沉降:能产生絮凝作用的功能菌称为絮凝细菌,目前发现的絮凝细菌有 *Cobetia* sp.、*Bacillus* sp.^[38]、*Streptomyces* sp.、*Cellulomonas* sp.^[39]等。絮凝细菌菌体表面荚膜和分泌的生物絮凝物中存在氨基、羟基、羧基等官能团,这些官能团可通过絮凝作

用将循环冷却水中的悬浮物、空气带入的灰尘等颗粒物凝聚并沉降下来,防止颗粒物与黏液形成菌产生的黏液混合形成生物黏泥^[40]。S. V. PATIL等^[41]研究了 *Azotobacter indicus* ATCC 9540 分泌的生物絮凝物的性能。试验结果表明,加入该生物絮凝物后工业废水中 BOD 降低了 38%~80%, COD 降低了 37%~79%, 悬浮物降低了 41%~68%, 絮凝细菌对水中有机物、颗粒物等污染物具有良好的去除性能。

2.4 降污机理

功能菌的降污作用主要通过功能菌的新陈代谢降低水的浊度、悬浮物、色度、COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 和硫化物等,实现循环冷却水系统浓排水的达标排放。功能菌的降污作用机理有 2 个方面:一是光合菌、芽孢杆菌、硝化菌等功能菌将污染物氧化分解为小分子的无机物或将其转化为自身所需的营养物质^[42];二是絮凝细菌通过分泌生物絮凝物吸附沉降水中的有机物、灰尘、颗粒物等,从而降低有机物、色度、浊度和悬浮物等^[43]。

利用微生物菌剂实现水质降污的处理方法,目前已成熟应用于河流治理、池塘水体净化、生活污水和工业废水处理等领域。邹文娟等^[44]利用光合菌和枯草芽孢杆菌的混合菌对生活污水进行处理,试验结果表明污水中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 下降 71.96%, $\text{NH}_3\text{-N}$ 下降 86.13%, COD 下降 58.73%, 溶解氧增加 87.75%, 微生物菌剂取得良好的降污效果。

3 问题与对策

目前对循环冷却水 WQCM 机理的解释,大部分是根据化学药剂作用机理或者微生物在水处理领域的作用机理推演而来,且只停留在宏观概念性的阐述,并没有深入到微观层面的研究。笔者总结了功能菌调节循环冷却水水质的作用机理,但仍存在以下问题需要解决。

一是需要注意功能菌防垢、防腐、防生物黏泥以及浓排水降污等作用的兼容性。对于产酸增溶防垢机理,功能菌产生的酸性物质是否会导致循环冷却水 pH 持续下降,增加金属腐蚀的风险。功能菌分泌的 EPS 具有络合增溶和形成生物膜的防垢防腐效果,但 EPS 的主要成分是大分子的多糖和蛋白质, EPS 是否会凝聚并附着在设备表面形成难去除的污垢,影响凝汽器等设备的换热效率。QQ 作用可以抑

制腐蚀细菌和黏液形成菌 QS 系统的信号分子表达,起到防腐和防生物黏泥的效果,但 QQ 菌的加入是否会同时影响其他功能菌产生的信号分子表达,阻碍其他功能菌调节水质的过程。这些问题需要结合循环冷却水系统实际运行情况进一步研究。

二是明确微生物间的相互作用关系。不同类型的功能菌混合后会发生相互作用,循环冷却水中的原有微生物与加入的功能菌也会发生相互作用,导致功能菌的代谢途径或代谢产物可能会改变,从而影响调节水质的效果和稳定性。此外,多种功能菌混合使用的作用机理是否与单一菌株发挥的作用一致,功能菌间发生协同作用或拮抗作用产生的代谢物是否会引发其他类型的水质污染,这些问题同样需要引起重视。

宏基因组测序和 16S 扩增子测序是常用的现代微生物基因技术,用于研究微生物群落结构、微生物与水环境、微生物与代谢物间的关联性,可以实现对功能菌代谢途径、代谢物功能作用的分析。现代表征技术方法可以研究硬垢、腐蚀产物、生物黏泥以及功能菌代谢产物等的微观形貌及组成成分,可用于功能菌作用机理的研究,常见的表征技术包括 SEM、FTIR、EDS、X 射线衍射(XRD)、原子力显微镜(AFM)等。循环冷却水 WQCM 方法可结合各种检测和分析技术手段,研究功能菌及其代谢物在调节循环冷却水水质过程中的作用机理,并得出能够互为印证的结论,为功能菌的筛选提供理论依据。

4 总结与展望

WQCM 是一种新型的循环冷却水处理方法,旨在解决循环冷却水系统的结垢、腐蚀、生物黏泥滋生等问题,同时满足浓排水水质排放标准的要求。目前 WQCM 方法尚处于研究的起步阶段,未来应结合环境生态学、分子生物学、微生物基因组学等多种学科,加强对功能菌生理、生化及代谢途径过程的研究,明确各菌株间相互作用关系和协同调节水质的作用机理,从而筛选出最适宜循环冷却水处理的功能菌组合。此外,现有的工业循环冷却水处理国家标准仅适用于化学药剂的使用,对于生物药剂的应用也需要建立相关技术标准和规范。随着生物法在各领域的成熟应用,相信不久的将来 WQCM 会成为循环冷却水处理的关键性方法。

参考文献

- [1] BELAKHMIMA R A, DKHIRECHE N, TOUIR R, et al. Development of a multi-component SG with CTAB as corrosion, scale, and microorganism inhibitor for cooling water systems [J]. Materials Chemistry and Physics, 2015, 152: 85-94.
- [2] DKHIRECHE N, DAHAMI A, ROCHDI A, et al. Corrosion and scale inhibition of low carbon steel in cooling water system by 2-propargyl-5-*o*-hydroxyphenyltetrazole [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2013, 19(6): 1996-2003.
- [3] 杜昱, 丁西明, 孙月驰, 等. 《水污染防治行动计划》对水处理领域的影响[J]. 环境卫生工程, 2018, 26(2): 76-79.
DU Yu, DING Ximing, SUN Yuechi, et al. Impact of Water Pollution Prevention Action Plan on water treatment field [J]. Environmental Sanitation Engineering, 2018, 26(2): 76-79.
- [4] 李兴峰, 李芳军, 郭豪, 等. 一种新型循环冷却水系统生物处理技术[J]. 清洗世界, 2012, 28(2): 1-6.
LI Xingfeng, LI Fangjun, GUO Hao, et al. New technology of biological treatment for circulating cooling water system [J]. Cleaning World, 2012, 28(2): 1-6.
- [5] 杨加义, 赵立军, 张国敏, 等. 新型RJ生物药剂在循环水中的应用与分析[J]. 山东化工, 2016, 45(16): 202-207.
YANG Jiayi, ZHAO Lijun, ZHANG Guomin, et al. Application and analysis of RJ biological agent applied in circulating water [J]. Shandong Chemical Industry, 2016, 45(16): 202-207.
- [6] 井云环. 生物药剂在工业循环水处理中的应用[J]. 当代化工, 2016, 45(7): 1441-1445.
JING Yunhuan. Application of biological agents in treatment of industrial circulating water [J]. Contemporary Chemical Industry, 2016, 45(7): 1441-1445.
- [7] 易哲. 生物缓蚀阻垢制剂在循环冷却水处理中的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
YI Zhe. The research of bio-corrosion and scale inhibitor in the treatment of circulating cooling water [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [8] 贾勇. 生化处理技术提高火电厂循环水浓缩倍率应用研究[J]. 中国设备工程, 2019, 23: 158-160.
JIA Yong. Study on application of biochemical treatment technology for improving concentration ratio of circulating water in power plant [J]. China Plant Engineering, 2019, 23: 158-160.
- [9] 叶春松, 郝洪泽, 王天平, 等. 微生物菌剂处理循环冷却水的作用原理及其工业应用试验[J]. 环境工程, 2019, 37(8): 42-46.
YE Chunsong, HAO Hongduo, WANG Tianping, et al. Principle of circulating cooling water treated with microbial agents and its industrial test [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(8): 42-46.
- [10] 莫索克, 张利权, 于学斌, 等. 生物药剂在火电厂循环水系统中的工业化应用实践[J]. 能源科技, 2020, 18(6): 44-47.
MO Suoke, ZHANG Liquan, YU Xubin, et al. Industrial application of biological agents in circulating water system of thermal power plant [J]. Energy Technology, 2020, 18(6): 44-47.
- [11] BENI A A, ESMAEILI A. Biosorption, an efficient method for removing heavy metals from industrial effluents: A Review [J]. Environmental Technology & Innovation, 2020, 17: 100503.
- [12] FOSSO-KANKEU E, MULABA-BAFUBIANDI A F, MAMBA B B, et al. Mitigation of Ca, Fe, and Mg loads in surface waters around mining areas using indigenous microorganism strains [J]. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2009, 34(13/14/15/16): 825-829.
- [13] 易哲, 叶姜瑜, 李大荣, 等. 喀斯特地貌中碳酸酐酶微生物鉴定与特性研究[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2017, 31(8): 113-119.
YI Zhe, YE Jiangyu, LI Darong, et al. Identification and characterization of bacterium with carbonic anhydrase in karst landform [J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2017, 31(8): 113-119.
- [14] YE Jiangyu, DOU Jianjun, SHI Yuzhu. Dissolving scale experiment of microorganism with high-yield of carbonic anhydrase [J]. Journal of Computational & Theoretical Nanoscience, 2016, 13(5): 3316-3325.
- [15] CHEN Chuanmin, WANG Yu, LIU Songtao, et al. Research on the application of compound microorganism preparation in reusing urban reclaimed water in circulating cooling water system [J]. Water Science and Technology, 2019, 80(9): 1763-1773.
- [16] HONG P N, HONDA R, NOGUCHI M, et al. Optimum selection of extraction methods of extracellular polymeric substances in activated sludge for effective extraction of the target components [J]. Biochemical Engineering Journal, 2017, 127: 136-146.
- [17] SHENG Guoping, XU Juan, LI Weihua, et al. Quantification of the interactions between Ca^{2+} , Hg^{2+} and extracellular polymeric substances (EPS) of sludge [J]. Chemosphere, 2013, 93(7): 1436-1441.
- [18] LI Shunling, QU Qing, LI Lei, et al. *Bacillus cereus* s-EPS as a dual bio-functional corrosion and scale inhibitor in artificial seawater [J]. Water Research, 2019, 166: 115094.
- [19] DUBIEL M, HSU C H, CHIEN C C, et al. Microbial iron respiration can protect steel from corrosion [J]. Applied & Environmental Microbiology, 2002, 68(3): 1440-1445.
- [20] LÜ Meiyang, DU Min. A review: Microbiologically influenced corrosion and the effect of cathodic polarization on typical bacteria [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2018, 17(3): 431-446.
- [21] 苑海涛, 弓爱君, 李晓刚, 等. 脱氮硫杆菌生长特性及其对碳钢SRB腐蚀的防护作用研究[J]. 化学与生物工程, 2009, 26(5): 50-54.
YUAN Haitao, GONG Aijun, LI Xiaogao, et al. Study on growth characteristics of *Thiobacillus denitrificans* and its defence effect on the microbiological corrosion of carbon steel caused by SRB [J]. Chemistry & Bioengineering, 2009, 26(5): 50-54.

- [22] ANTUNES L C M, FERREIRA R B R, BUCKNER M M C, et al. Quorum sensing in bacterial virulence [J]. Microbiology, 2010, 156(8): 2271-2282.
- [23] HUANG Jinhui, SHI Yahui, ZENG Guangming, et al. Acyl-homoserine lactone-based quorum sensing and quorum quenching hold promise to determine the performance of biological wastewater treatments: An overview [J]. Chemosphere, 2016, 157: 137-151.
- [24] CHOWDHARY P K, KESHAVAN N, NGUYEN H Q, et al. *Bacillus megaterium* CYP102A1 oxidation of acyl homoserine lactones and acyl homoserines [J]. Biochemistry, 2007, 46(50): 14429-14437.
- [25] MOROHOSHI T, TOMINAGA Y, SOMEYA N, et al. Complete genome sequence and characterization of the *N*-acylhomoserine lactone-degrading gene of the potato leaf-associated *Solibacillus silvestris* [J]. Journal of Bioscience and Bioengineering, 2012, 113(1): 20-25.
- [26] MADDELA N R, SHENG Binbin, YUAN Shasha, et al. Roles of quorum sensing in biological wastewater treatment: A critical review [J]. Chemosphere, 2019, 221: 616-629.
- [27] 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.
- XU Ping, ZHAI Yujia, WANG Jing, et al. Understanding biofilm from a new perspective: Advances in microbial corrosion prevention [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(4): 356-360.
- [28] ZARASVAND K A, RAI V R. Microorganisms: Induction and inhibition of corrosion in metals [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2014, 87: 66-74.
- [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] CHONGDAR S, GUNASEKARAN G, KUMAR P. Corrosion inhibition of mild steel by aerobic biofilm [J]. Electrochimica Acta, 2005, 50(24): 4655-4665.
- [31] SUMA M S, BASHEER R, SREELEKSHMY B R, et al. *Pseudomonas putida* RSS biopassivation of mild steel for long term corrosion inhibition [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2019, 137: 59-67.
- [32] 张磊. 生物酶法处理工业循环水系统中生物粘泥的研究 [J]. 安徽化工, 2014, 40(3): 68-69.
- ZHANG Lei. Enzymatic treatment of industrial circulating water system in the research of biological sticky mud [J]. Anhui Chemical Industry, 2014, 40(3): 68-69.
- [33] JÄGER C G, HAGEMANN J, BORCHARDT D. Can nutrient pathways and biotic interactions control eutrophication in riverine ecosystems? Evidence from a model driven mesocosm experiment [J]. Water Research, 2017, 115: 162-171.
- [34] 周晓云, 黄瑞敏, 刘欣, 等. 生物制剂法治理藻类水华 [J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 1425-1429.
- ZHOU Xiaoyun, HUANG Ruimin, LIU Xin, et al. Control of algal bloom with immobilized biological catalyst [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2013, 7(4): 1425-1429.
- [35] FETZNER S. Quorum quenching enzymes [J]. Journal of Biotechnology, 2015, 201: 2-14.
- [36] CHEONG W S, KIM S R, OH H S, et al. Design of quorum quenching microbial vessel to enhance cell viability for biofouling control in MBR [J]. Journal of Microbiology & Biotechnology, 2013, 24(1): 97-105.
- [37] DOBRETISOV S, TEPLITSKI M, BAYER M, et al. Inhibition of marine biofouling by bacterial quorum sensing inhibitors [J]. Biofouling, 2011, 27(8): 893-905.
- [38] UGBENYEN A M, VINE N, SIMONIS J J, et al. Characterization of a bioflocculant produced from the consortium of three marine bacteria of the genera *Cobetia* and *Bacillus* and its application for wastewater treatment [J]. Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development, 2015, 5(1): 81-88.
- [39] NWODO U U, GREEN E, MABINYA L V, et al. Bioflocculant production by a consortium of *Streptomyces* and *Cellulomonas* species and media optimization via surface response model [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2014, 116: 257-264.
- [40] SALEHIZADEH H, YAN Ning, FARNOOD R. Recent advances in polysaccharide bio-based flocculants [J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(1): 92-119.
- [41] PATIL S V, PATIL C D, SALUNKE B K, et al. Studies on characterization of bioflocculant exopolysaccharide of *Azotobacter indicus* and its potential for wastewater treatment [J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2011, 163(4): 463-472.
- [42] 宋协法, 潘玉兰, 马真. 主要微生物在水质净化技术中的研究进展 [J]. 渔业现代化, 2014, 41(3): 36-42.
- SONG Xiefa, PAN Yulan, MA Zhen, et al. Review on the application of probiotics in aquaculture wastewater treatment [J]. Fishery Modernization, 2014, 41(3): 36-42.
- [43] 蒋宝军, 王飞虎, 李忠和, 等. 微生物絮凝剂的特征及研究现状 [J]. 东北农业科学, 2019, 44(5): 107-110.
- JIANG Baojun, WANG Feihu, LI Zhonghe, et al. Characteristics and research status of microbial flocculants [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2019, 44(5): 107-110.
- [44] 邹文娟, 许晓慧, 王国武, 等. 光合细菌和枯草芽孢杆菌在污水处理中的应用 [J]. 广东农业科学, 2010, 37(9): 199-201.
- ZOU Wenjuan, XU Xiaohui, WANG Guowu, et al. Application in sewage treatment of *Photosynthetic bacteria* and *Bacillus subtilis* [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2010, 37(9): 199-201.

[作者简介] 王宇(1995—), 博士研究生。电话: 15623699760, E-mail: wangyusz@whu.edu.cn。通讯作者: 叶春松, 博士, 教授。E-mail: csye@whu.edu.cn。

[收稿日期] 2021-11-23(修改稿)