



# 循环冷却水系统中微生物的结垢特性

李倩玮<sup>1</sup>, 彭 然<sup>1</sup>, 王雨竹<sup>1</sup>, 刘道庆<sup>2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)化学工程与环境学院, 重质油国家重点实验室, 北京 102249;

2. 北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

**[摘要]** 由生长在循环冷却水系统管道中的特异性细菌分泌的胞外聚合物(EPS)与循环冷却水的相互作用是导致工业循环冷却水系统产生生物污垢的主要原因。利用高通量生物测序分析循环冷却水系统中生物黏泥的优势菌种,以优势菌种分泌的EPS为研究对象,将其与矿物悬液混合进行平衡吸附实验。在传统化学分析的基础上,运用XRD、Raman、EDS、SEM等现代仪器分析技术,研究EPS与循环冷却水中离子经生化反应形成的矿物,以及EPS在主要矿物表面的吸附行为,以期减少微生物污垢腐蚀提供重要的理论和实验依据。结果表明:循环冷却水中的微生物在高营养水平培养条件下,放线菌纲将逐渐成为冷却水中的优势菌;在与循环冷却水pH大致相同的偏中性(pH=7.78)环境下,EPS中的多糖(EPS-C)和蛋白质(EPS-N)更倾向于吸附在Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面,但EPS中的核酸(EPS-P)更易吸附在SiO<sub>2</sub>表面;EPS在矿物表面的吸附为物理吸附。

**[关键词]** 结垢;腐蚀;微生物;胞外聚合物;循环冷却水系统

**[中图分类号]** TQ085;X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)10-0077-07

## Fouling characteristics of microorganisms in circulating cooling water system

LI Qianwei<sup>1</sup>, PENG Ran<sup>1</sup>, WANG Yuzhu<sup>1</sup>, LIU Daoqing<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, College of Chemical Engineering and Environment, China

University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China; 2. College of Environmental Sciences

and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** Some specific bacteria can grow in the industrial circulating cooling water piping and secrete extracellular polymeric substances(EPS). The interaction between EPS and circulating cooling water is the main cause of biological fouling in industrial circulating cooling water system. High-throughput biological sequencing was used to analyze the dominant bacteria of biological slime in the circulating cooling water system. EPS secreted by the dominant strains in slime was investigated, the equilibrium adsorption experiment was carried out by mixing EPS with mineral suspension. Based on the traditional chemical analysis, modern analytical technologies including XRD, Raman, EDS and SEM were applied to investigate the minerals formed by biochemical reaction between EPS and ions in circulating cooling water, and the adsorption behavior of EPS on the surface of main minerals. It provided an important theoretical and experimental basis for reducing microbial fouling corrosion. The results showed that when the microorganisms were incubated in circulating cooling water containing a higher concentration of nutrient, Actinomycetes gradually became the dominant bacteria in cooling water. In a neutral environment(pH=7.78) with roughly same pH of circulating cooling water, polysaccharides(EPS-C) and protein(EPS-N) in EPS were more likely to adsorb on Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> surface, while nucleic acid(EPS-P) was more likely to adsorb on SiO<sub>2</sub> surface. The adsorption of EPS on mineral surface was physical adsorption.

**Key words:** fouling; corrosion; microorganism; extracellular polymeric substances; circulating cooling water system

在循环冷却水系统中,腐蚀、结垢和生物黏泥一般是同时存在的,生物黏泥还会对换热设备的腐蚀

和结垢产生影响<sup>[1]</sup>。微生物污垢广泛存在于各种与水长期接触的设备表面及内部,微生物污垢是指微

**[基金项目]** 国家自然科学基金项目(U20A20146)

生物胞外产生的代谢物或黏液通过黏结无机物、灰尘、沙子等无机杂质或生物残骸形成的一层类似膜状的淤泥态沉积物,并附着在固体表面<sup>[2]</sup>。工业循环冷却水中能使管道内壁产生污垢及引起金属壁面腐蚀的微生物主要有铁细菌、硫酸盐还原菌和黏液细菌<sup>[3-5]</sup>。有研究表明,铁细菌和硫酸盐还原菌混合后会出现协同生长的现象,原因是铁细菌有很强的微生物污染能力,而硫酸盐还原菌对胞外聚合物(EPS)具有高分泌率<sup>[6]</sup>。

循环冷却水系统中微生物的大量滋生与污垢沉积将会引发一系列问题,如使设备的换热效率下降、能耗增加、维护管理费用增加、系统寿命缩短、系统运行成本提高等<sup>[3,7-8]</sup>。循环冷却水系统中某些特异性细菌会分泌EPS,EPS是一种生物大分子聚合物,对生物膜的形成以及生物膜对不同重金属离子的吸附起着非常重要的作用<sup>[9]</sup>。在成分构成方面,EPS中的蛋白质和多糖是决定微生物表面特性的关键物质,约占有机物总量的70%~80%<sup>[10]</sup>,此外还有少量脂类、核酸、腐殖质以及无机成分等,约占EPS总量的20%~30%<sup>[11]</sup>。在生物膜形成过程中,EPS主要参与微生物在金属表面的附着过程,从而影响金属表面生物膜的形成。关于微生物分泌的EPS对金属表面的作用,有国内外学者研究发现,微生物EPS能够加速金属腐蚀<sup>[12]</sup>,EPS与金属表面的接触可以改变腐蚀产物的化学性质及其形态,使腐蚀产物具有更强的腐蚀性。

许多国内学者对不同环境因素下微生物污垢的形成机制及影响因素进行了深入研究<sup>[3-4,7]</sup>。有学者发现微生物污垢的数量主要受 $\text{Ca}^{2+}$ 制约,其他金属阳离子也具有一定的制约作用。在实际的工业冷却水中, $\text{Ca}^{2+}$ 的质量浓度约为100~500 mg/L,已达到相当高的浓度。因此, $\text{Ca}^{2+}$ 对微生物的生长过程以及在设备表面发生的微生物结垢过程的影响十分显著<sup>[13-14]</sup>。

基于此,本研究拟通过提取循环冷却水中优势菌种的EPS,借助现代仪器分析研究EPS与循环冷却水中离子经生化反应所形成的矿物,以及EPS在主要矿物表面的吸附行为,以期减少微生物污垢腐蚀提供重要的理论和实验依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料与仪器

材料:二氧化硅( $\text{SiO}_2$ ),阿拉丁试剂(上海)有限公司;氧化铁( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ),上海麦克林生化科技有限公司;碳

酸钙( $\text{CaCO}_3$ ),探索试剂平台;BSA蛋白质标准液、Bradford试剂,生工生物工程(上海)股份有限公司。

仪器:多功能光吸收全波长酶标仪,美谷分子仪器(上海)有限公司;傅里叶变换红外光谱分析仪(FT-IR),80v型,德国;X射线衍射仪(XRD),bruker D8 Advance型,德国;场发射扫描电子显微镜分析系统成分探测系统(SWM),GeminiSEM300型,德国;激光显微拉曼光谱仪(Raman),Renishaw inVia plus型,英国;全自动石化水质分析仪,LabRAM HR Evolution型,德国。

### 1.2 生物黏泥的培养

生物黏泥的培养采用静态循环冷却水模拟实验方法,并进行对照培养实验。循环冷却水水样取自北京某石化企业循环冷却水系统。

对照组:在锥形瓶中加入500 mL循环水样,将A3碳钢挂片悬挂于锥形瓶中,使其充分浸泡于水中,将锥形瓶置于摇床中,在25℃、50 r/min的条件下培养。

实验组:在锥形瓶中加入500 mL循环水样,同时添加一定的营养物质,将A3碳钢挂片悬挂于锥形瓶中,使其充分浸泡于水中,将锥形瓶置于摇床中,在25℃、50 r/min的条件下培养微生物黏泥。同时,每隔24 h去除锥形瓶中80%的水,再添加补充水,补充水为添加了营养物质的自来水。主要营养物质包含碳源、氮源和磷源,实验选用葡萄糖为微生物碳源(葡萄糖:COD=1:1.067)、硫酸铵为氮源、磷酸氢二钠为磷源。补充水COD为150 mg/L、氨氮为10 mg/L、总磷为1 mg/L,满足《工业循环冷却水处理设计规范》(GB/T 50050—2017)要求。补充水的营养物水平为富营养水平,COD:N:P=150:10:1。

按上述高营养水平培养液及原水培养生物黏泥,每日测量高营养水平培养液及原水的pH,直至pH不再明显变化,得出不同营养条件下生物黏泥达到稳定附着期的所需时间,并通过高通量测序技术对比得出高营养水平培养条件下的优势菌种。将实验组培养出的生物黏泥风干后研磨成粉末进行EDS及XRD检测,分析矿化产物成分,选取其中3种特征矿物进行后续平衡吸附实验。

### 1.3 生物黏泥中细菌EPS的制备

#### 1.3.1 生物黏泥中细菌的培养

经生物黏泥培养实验可知,生物黏泥约在开始培养后7 d左右达到稳定附着期,因此细菌富集培养时间

选定7 d为1个周期。在无菌条件下,用灼烧后的接种环取少量碳钢挂片上生长至稳定附着期的黏泥,接种于300 mL LB液体培养基中,在25℃、120 r/min条件下恒温振荡培养7 d,直至细菌产生大量EPS并达到生长稳定期。

### 1.3.2 细菌EPS的提取

将1.3.1章节培养得到的细菌与其分泌的EPS混合物分装于50 mL离心管中,在4℃、6 000 r/min条件下离心15 min;收集上清液,经4℃、12 000 r/min高速冷冻离心40 min去除细胞残体;将高速冷冻离心后的上清液与3倍体积的无水乙醇混合均匀后,静置于0~4℃冷藏48 h;待容器底部出现明显沉淀且上清液基本保持澄清后,弃去上清液,将沉淀与少量剩余上清液的混合物再次高速冷冻离心,收集沉淀,即为EPS粗提取物。

### 1.3.3 EPS的纯化

将EPS粗提取物用适量的超纯水溶解,并转移至透析袋(截流分子质量3 500 u)中,用密封夹密封后,将透析袋完全浸没在盛有超纯水的烧杯中透析;超纯水每天更换3次,去除乙醇等小分子杂质;3 d后将透析液转移到小玻璃烧杯中,冻干得到EPS纯化样品,密封后放置于干燥器中保存备用<sup>[15]</sup>。为确定成分组成,EPS冷冻干燥后的纯化样品采用激光显微拉曼光谱仪进行分析,激光波长为532 nm,波数范围为4 00~4 000  $\text{cm}^{-1}$ ,分辨率为4  $\text{cm}^{-1}$ 。

## 1.4 EPS在不同矿物表面的吸附实验

### 1.4.1 EPS母液及矿物悬液的配制

将3种不同矿物成分( $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 以及 $\text{SiO}_2$ )分别放入研钵中研磨,过100目(0.150 mm)筛后,以10 mmol/L的NaCl溶液为背景电解质,分别配制EPS母液和含不同矿物成分的矿物悬液,EPS母液质量浓度为0.5 g/L,矿物悬液质量浓度为1.25 g/L。用0.01 mol/L的NaOH和HCl溶液调节EPS母液和矿物悬液的pH,使其与原水pH(pH=7.78)大致相同,平衡过夜。在50 mL离心管中,分别加入20 mL EPS母液与20 mL含不同矿物成分的矿物悬液,EPS的最终质量浓度为0.25 g/L,矿物成分的最终质量浓度为0.625 g/L。

### 1.4.2 EPS与矿物的平衡吸附实验

将装有不同矿物成分与EPS混合液的离心管在室温为25℃、转速为180 r/min的条件下恒温振荡3 h至吸附平衡,再置于高速冷冻离心机中以4℃、

11 000 r/min条件离心40 min<sup>[15]</sup>。分离的上清液采用总有机碳分析仪测定TOC和TN,采用中性过硫酸钾消解-紫外分光光度法测定TP,以表征EPS中多糖(EPS-C)、蛋白质(EPS-N)和核酸(EPS-P)的含量。用原EPS中TOC、TN、TP减去平衡吸附离心后上清液中的残留量,即得到EPS-C、EPS-N和EPS-P在不同矿物成分表面的吸附量。用XRD表征自然风干后的沉淀以确认EPS-矿物复合体的矿物组成,再用SEM观察EPS与矿物的结合形态。

## 2 结果与讨论

### 2.1 生物黏泥的EDS分析

生物黏泥包括钢片上附着的黏泥及钢片黏泥与循环冷却水反应后形成的瓶底底泥。高营养条件下培养的生物黏泥的EDS结果见图1。其中,(a)为钢片上所挂黏泥;(b)为培养瓶瓶底黏泥。

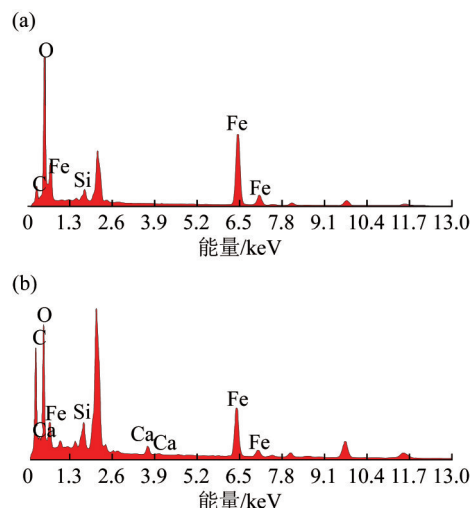


图1 平衡吸附前生物黏泥的EDS结果

Fig. 1 EDS results of biological slime before equilibrium adsorption

由图1可知,钢片黏泥中主要含有C、O、Fe、Si元素,底泥中主要含有C、O、Fe、Ca、Si元素。

### 2.2 生物黏泥的XRD分析

通过XRD确认高营养条件下培养的生物黏泥(钢片黏泥与瓶底底泥的混合物)中的矿物组成,结果见图2。

由黏泥的XRD谱图(图2)可知,生物黏泥中的矿物组成十分复杂,含有 $\text{CaCO}_3$ 矿物成分。结合EDS元素分析结果,最后选用实验黏泥中所含矿物成分 $\text{CaCO}_3$ 及循环冷却水中常见的2种矿物成分 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ <sup>[13,16]</sup>作为与EPS进行平衡吸附实验的矿物。



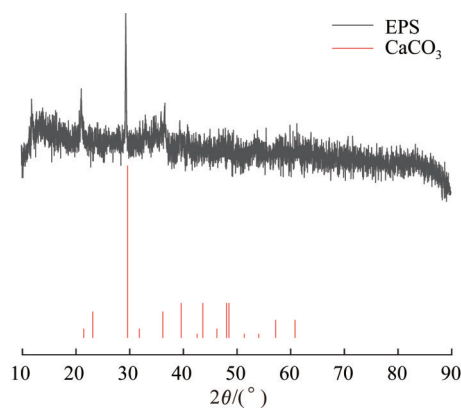


图2 生物黏泥 XRD 结果

Fig. 2 XRD results of biological slime

### 2.3 生物黏泥的微生物群落结构分析

将原水与高营养条件培养的生物黏泥分别进行高通量生物测序检测,得到原水与高营养循环冷却水中细菌纲水平群落结构组成图,相对丰度不足1%的细菌均归为Other,结果见图3。其中,A为未添加营养物质的原水培养水样,B为高营养条件培养水样,C为高营养条件培养的循环冷却水中的微生物黏泥。

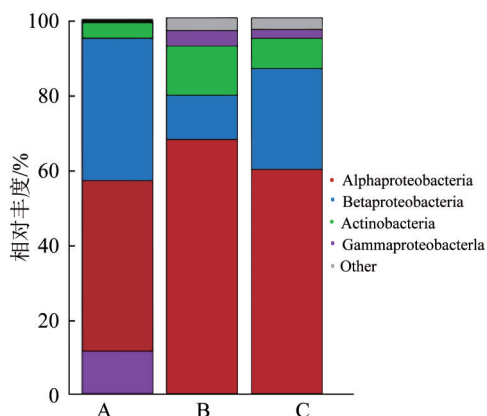


图3 循环冷却水中纲水平群落结构组成

Fig. 3 Microbial community in circulating cooling water on class level

由纲水平群落结构组成(图3)可知,原水培养水样中主要存在的微生物有 $\alpha$ -变形菌纲(Alphaproteobacteria, 45.63%)、 $\beta$ -变形菌纲(Betaproteobacteria, 38.16%)、 $\gamma$ -变形菌纲(Gammaproteobacteria, 11.57%)、放线菌纲(Actinobacteria, 4.35%);而高营养条件下培养的水样中主要存在的微生物有 $\alpha$ -变形菌纲(67.59%)、放线菌纲(13.09%)、 $\beta$ -变形菌纲(11.78%)、 $\gamma$ -变形菌纲(4.17%);高营养条件下培养的生物黏泥挂膜中主要存在的微生物与高营养水样相同,分别为 $\alpha$ -变形菌

纲(59.60%)、 $\beta$ -变形菌纲(26.87%)、放线菌纲(8.07%)、 $\gamma$ -变形菌纲(2.34%)。由以上数据可知,变形菌门是循环冷却水中最主要的优势菌<sup>[17]</sup>, $\alpha$ -变形菌纲无论在何种培养条件下都占据着优势地位,经高营养条件培养后放线菌纲逐渐成为冷却水中的优势菌。

### 2.4 拉曼光谱分析

冻干后的纯化EPS的拉曼光谱见图4。

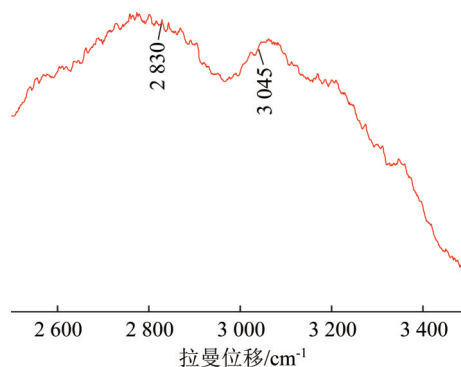


图4 EPS的拉曼光谱

Fig. 4 Raman of EPS

如图4所示,2830 cm<sup>-1</sup>处的振动峰对应蛋白质、糖类中—CH<sub>2</sub>的反对称伸缩振动,3045 cm<sup>-1</sup>处的振动峰对应的是N-乙酰基葡萄糖中—CH<sub>2</sub>的反对称伸缩振动<sup>[18]</sup>。2825~2941 cm<sup>-1</sup>处的振动峰与蛋白质和多糖有关。

### 2.5 EPS-矿物复合体的表面吸附量分析

EPS-C、EPS-N、EPS-P在3种不同矿物成分(CaCO<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>)表面的吸附量见表1。

表1 EPS-C、EPS-N、EPS-P在不同矿物表面的吸附量

Table 1 Adsorption capacity of EPS-C, EPS-N and EPS-P on different mineral surfaces

矿物复合体	EPS-C吸附量/ (mg·g <sup>-1</sup> )	EPS-N吸附量/ (mg·g <sup>-1</sup> )	EPS-P吸附量/ (mg·g <sup>-1</sup> )
EPS-CaCO <sub>3</sub>	11.64	3.96	21.51
EPS-Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.84	4.24	27.23
EPS-SiO <sub>2</sub>	4.48	1.12	31.08

由表1可知,在pH=7.78偏中性的酸碱度下,EPS-C和EPS-N在Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面的吸附量要明显高于SiO<sub>2</sub>,略高于CaCO<sub>3</sub>;但EPS-P则更易吸附在SiO<sub>2</sub>表面,其在SiO<sub>2</sub>表面的吸附量明显高于CaCO<sub>3</sub>,略高于Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;即EPS中的多糖和蛋白质更倾向于吸附在Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面,核酸则更易吸附在SiO<sub>2</sub>表面。EPS-P在Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面的吸附量要远大于EPS-C和EPS-N在Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表面的吸附量,这可能是由于磷酸盐基团与Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>间会形成络合物,促使EPS中磷酸化的大分子

在赤铁矿表面吸附,表明了含磷生物大分子在细菌黏附启动中的关键作用<sup>[15,19]</sup>。

## 2.6 EPS-矿物复合体的SEM-EDS分析

吸附平衡后,EPS-矿物复合体的SEM结果见图5。

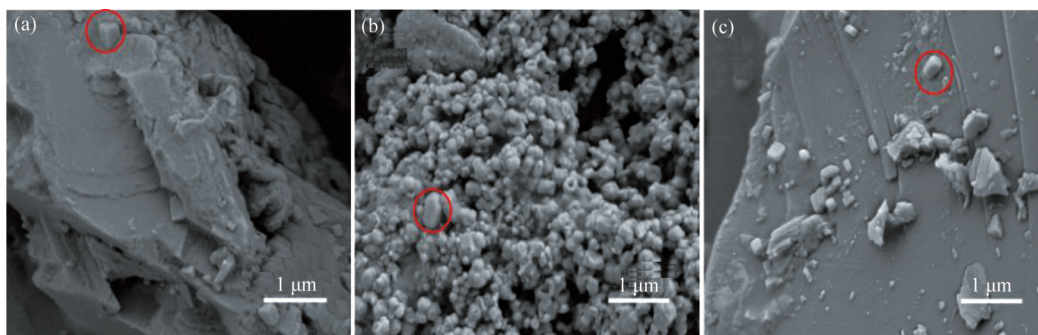


图5 EPS- $\text{CaCO}_3$ (a)、EPS- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (b)和EPS- $\text{SiO}_2$ (c)的SEM  
Fig. 5 SEM of EPS- $\text{CaCO}_3$ (a), EPS- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (b) and EPS- $\text{SiO}_2$ (c)

由图5可知,EPS与矿物成分进行平衡吸附实验后,有较为规则且圆润的椭球体附着在矿物表面,其中 $\text{CaCO}_3$ 与 $\text{SiO}_2$ 由于矿物颗粒较大,可以清晰地观察到椭球体附着在矿物较为平整的截面处;而 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粉末由于颗粒较小,仅能观察到椭球体颗粒附

着在 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 颗粒的间隙。

因EPS- $\text{CaCO}_3$ 复合体有明显规则的椭球体颗粒附着在矿物较平整区域的表面,因此选择其矿物平整表面和凸起的附着物进行EDS测定,其他复合体选取凸起处进行EDS测定,结果见图6。

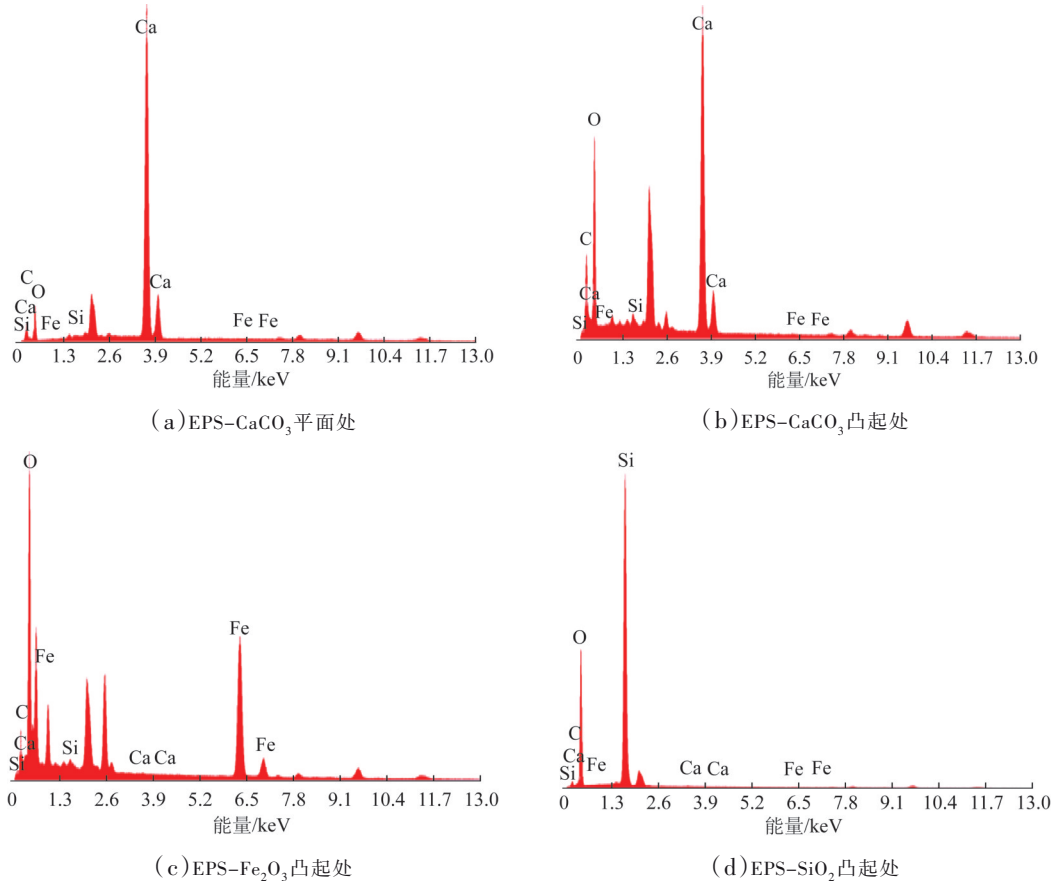


图6 EPS- $\text{CaCO}_3$ 、EPS- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 和EPS- $\text{SiO}_2$ 的EDS  
Fig. 6 EDS of EPS- $\text{CaCO}_3$ , EPS- $\text{Fe}_2\text{O}_3$  and EPS- $\text{SiO}_2$

根据EDS结果(图6)可知, EPS- $\text{CaCO}_3$ 复合体平面处主要含O、Ca、C元素,还含有微量的Si、Fe元素,即矿物平面处主要为 $\text{CaCO}_3$ 矿物成分[图6(a)];而凸起处的EDS结果与平面处并不完全相同,含有大量O元素,Ca元素含量少于O元素,此外还含有少部分C元素以及微量的Si、Fe元素[图6(b)],推测凸起处为生物材料,可能为EPS的椭球体,其与矿物成分的界限分明。EPS- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 复合体的主要元素为C、O、Fe[图6(c)], EPS- $\text{SiO}_2$ 复合体主要元素为C、O、Si[图6(d)],说明EPS中的多糖成分可能分散在了矿物表面。

### 2.7 EPS-矿物复合体的XRD分析

利用XRD确认EPS与矿物吸附平衡后离心所得沉淀的矿物组成,结果见图7。

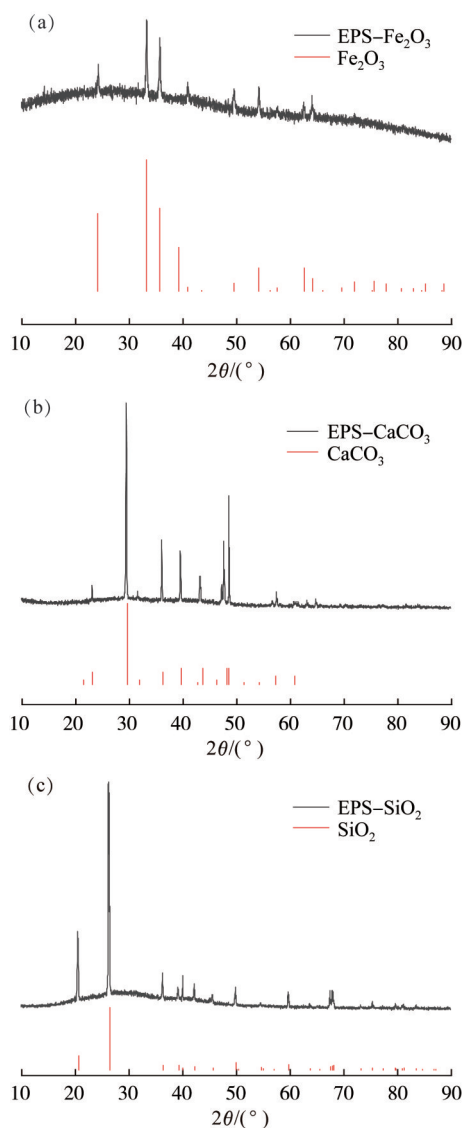


图7 EPS-矿物复合体XRD分析结果

Fig. 7 XRD analysis results of EPS-mineral compounds

由图7可知, EPS与不同矿物结合后并没有产生明显的新矿物,仅仅是发生物理结合,即EPS在矿物表面的吸附为物理吸附。

## 3 结论

(1)高通量测序实验结果表明,循环冷却水中的微生物在高营养条件下, $\alpha$ -变形菌纲占据着优势地位,放线菌纲也将逐渐成为优势菌。

(2)EPS与矿物的平衡吸附实验表明,在与循环冷却水pH大致相同的偏中性(pH=7.78)环境下,多糖组分和蛋白质组分更易吸附在 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 表面,但核酸组分更易吸附在 $\text{SiO}_2$ 表面。

(3)XRD、SEM和EDS分析结果表明, EPS与不同矿物成分吸附平衡后均未产生新的矿物,即EPS在矿物表面的吸附是物理吸附。

(4)循环冷却水系统中优势菌种的EPS中主要含有的蛋白质和多糖是决定微生物表面特性的关键物质,且不同组分对沉积污垢中常含的3种矿物组分具有不同的吸附特性。据此,后续研究可以有针对性地去去除更易使蛋白质及多糖组分发生黏附的矿物组分及形成该矿物组分的离子,以减少微生物污垢的沉积及腐蚀。

### 参考文献

- [1] 刘芳,张桂芝,夏璐,等. 操作条件对循环冷却水系统腐蚀和结垢的影响[J]. 化工进展, 2010, 29(4): 772-777.  
LIU Fang, ZHANG Guizhi, XIA Lu, et al. Effects of operating conditions on corrosion and fouling in circulating cooling water system[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2010, 29(4): 772-777.
- [2] CHEN Xiao, YANG Qirong, WU Ronghua, et al. Experimental study of the growth characteristics of microbial fouling on sewage heat exchanger surface[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 426-433.
- [3] 陆善忠, 窦从容. 工业循环冷却水中微生物的危害及控制[J]. 给水排水, 2004, 30(6): 46-48.  
LU Shanzhong, DOU Congrong. The harm and control of microbes in industrial recirculating cooling water[J]. Water and Wastewater Engineering, 2004, (6): 46-48.
- [4] 于大禹, 尹旭, 张静, 等. 基于模拟循环冷却装置的微生物污垢形成的影响因素[J]. 化工学报, 2011, 62(12): 3503-3510.  
YU Dayu, YIN Xu, ZHANG Jing, et al. Factors affecting microbial fouling formation in simulated recirculating cooling-water system[J]. CIESC Journal, 2011, 62(12): 3503-3510.
- [5] 黄元平, 武霖, 徐志明. 电厂换热设备微生物污垢沉积与腐蚀实验[J]. 热力发电, 2015, 44(6): 111-116.  
HUANG Yuanping, WU Lin, XU Zhiming. Experimental study on

- microbial fouling and corrosion on heat exchangers surface in power plants[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(6): 111-116.
- [6] XU Zhiming, WANG Jingtao, JIA Yuting, et al. Experimental study on microbial fouling characteristics of the plate heat exchanger[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 150-157.
- [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] LIU Xiyang, GENG Mingxian, ZHOU Shiyu. Study on the scale and corrosion inhibitor of urban reclaimed water reused in circulating cooling water of power plant[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 227: 052061.
- [9] 刘梦. 发电厂循环冷却水系统中弗氏柠檬酸杆菌胞外聚合物对不锈钢作用机制的研究[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
- LIU Meng. The study on the mechanism of action of extracellular polymeric substances of citrobacter freundii on stainless steel in circulating cooling water system of power plant[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020.
- [10] BEECH I B, SUNNER J. Biocorrosion: Towards understanding interactions between biofilms and metals [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2004, 15(3): 181-186.
- [11] CAO Daqi, WANG Xin, WANG Qunhui, et al. Removal of heavy metal ions by ultrafiltration with recovery of extracellular polymer substances from excess sludge[J]. Journal of Membrane Science, 2020, 606: 118103.
- [12] JIN Juntao, WU Guangxue, ZHANG Zhenhua, et al. Effect of extracellular polymeric substances on corrosion of cast iron in the reclaimed wastewater [J]. Bioresource Technology, 2014, 165: 162-165.
- [13] 陈洋. 钙离子环境下板式换热器微生物特性的实验研究[D]. 吉林:东北电力大学, 2015.
- CHEN Yang. Plate heat exchanger fouling characteristics of micro-organisms on calcium ion environment[D]. Jilin: Northeast Dianli University, 2015.
- [14] 酆和生, 王崇, 张春原, 等. 污水回用时常见离子对细菌生长及控制的影响[J]. 工业水处理, 2002, 22(7): 24-27.
- LI Hesheng, WANG Dong, ZHANG Chunyuan, et al. Effect of common ions in effluent on bacteria growth and control in wastewater reuse[J]. Industrial Water Treatment, 2002, 22(7): 24-27.
- [15] 林迪. 细菌胞外聚合物在土壤矿物和纳米颗粒表面的吸附及其驱动团聚机制[D]. 武汉:华中农业大学, 2018.
- LIN Di. Adsorption and aggregation mechanisms between bacterial extracellular polymeric substances and soil minerals and nanoparticles [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [16] 李进, 黄忠源, 张万友, 等. 300 MW级火力发电机组循环冷却水阻垢缓蚀剂性能研究[J]. 工业水处理, 2014, 34(10): 17-21.
- LI Jin, HUANG Zhongyuan, ZHANG Wanyou, et al. Study on the capacities of scale and corrosion inhibitors used for the circulating cooling water in 300 MW thermal power generating units[J]. Industrial Water Treatment, 2014, 34(10): 17-21.
- [17] 王金美. 一. 工业循环冷却水系统中冷却水和生物膜微生物群落结构 二. 土壤中莠去津降解菌的分离和特性研究[D]. 南京:南京大学, 2013.
- WANG Jinmei. 1. Bacterial community structure in cooling water and biofilm in an industrial recirculating cooling water system. 2. Isolation and characterization of atrazine-degrading *Arthrobacter* sp. wjm3 from an agricultural soil[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [18] 周丹妮. 生物促生剂对好氧絮状污泥胞外聚合物性能的影响[D]. 西安:陕西科技大学, 2017.
- ZHOU Danni. The effects of bio-stimulant on extracellular polymeric substances performance of activated sludge [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2017.
- [19] PARIKH S J, MUKOME F N D, ZHANG Xiaoming. ATR-FTIR spectroscopic evidence for biomolecular phosphorus and carboxyl groups facilitating bacterial adhesion to iron oxides [J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2014, 119: 38-46.

[作者简介] 李倩玮(1987—), 博士, 副教授. E-mail: qianweili@cup.edu.cn。通讯作者: 刘道庆, 副研究员, 博士. E-mail: liudaoqing@pku.edu.cn。

[收稿日期] 2022-07-22(修改稿)