

微生物污垢检测技术的特点、现状与发展趋势

于大禹 门 洪 穆胜伟 杨善让*

(东北电力大学 节能与测控技术研究中心 吉林 132012)

摘 要: 微生物污垢是工业冷却水污垢的重要组成部分。在适宜条件下,引起污垢的微生物迅速繁殖,不但会显著增大污垢热阻、流动阻力和腐蚀速率,甚至还会堵塞流道而引发停机故障。本文介绍了微生物污垢的概念,阐述了微生物污垢检测技术研究中的地位、作用和特点,归纳了目前已知的微生物污垢的形成过程及其主要影响因素,着重分析了目前国内外应用较广的微生物污垢检测方法、优缺点及其最新研究动态,展望了微生物污垢检测技术未来的发展趋势。

关键词: 循环冷却水, 微生物污垢, 检测技术, 发展趋势

Characteristic, Status and Development Trends of Detection Technology for Microbial Fouling

YU Da-Yu MEN Hong MU Sheng-Wei YANG Shan-Rang*

(Research Central on Energy-saving and Measurement & Control technology, Northeast Dianli University, Jilin 132012)

Abstract: Microbial fouling is important one of fouling in industrial circulating cooling water system. In suitable conditions, microorganisms that caused the forming of fouling could reproduce rapidly, which would increase evidently fouling resistance, flow resistance and corrosion rate, so much as block water current path to result in running failure of equipments. This paper introduces the concept of microbial fouling, and illuminates the status, function and characteristic of detection technology research for microbial fouling. The present known forming processes of microbial fouling and their important impact factors are summed up. The commonly used monitoring methods at home and abroad, their merits and defects, and also the latest research developments are analyzed especially in the paper. At last, the authors point out the development trends of detection technology for microbial fouling.

Keywords: Circulating cooling water, Microbial fouling, Detection technology, Development trend

在工业生产过程以及日常生活当中,微生物污垢是一个既常见,又非常棘手的问题。作为工业冷却水污垢的重要组成部分,微生物污垢存在于一切工业冷却水中。只要条件合适,微生物就会附着于容器或流道壁面栖息下来并不断繁殖,而且某些微生物还增殖很快,以至于不但会显著增大壁面的污

垢热阻、流(动)阻(力)和腐蚀速率,甚至还会堵塞流道而引发停机故障^[1-3],至少也会减小传热效果,增加流阻,威胁设备安全。

更为令人关注的是我国水资源极为短缺,人均淡水资源占有量只有世界人均占有量的 28%。不仅如此,我国水资源的浪费十分严重:我国单位国民

生产总值(GDP)的耗水量是美国的 15 倍, 日本的 31 倍^[4]。这些耗水量的最大一部分是冷却水, 它占整个工业用水总量的 90%^[5]。因此, 设法提高冷却水的利用效率, 增大敞开式循环冷却水系统浓缩倍数^[6], 减小排污量是减小工业耗水量的关键所在。而这些措施均与污垢及其检测技术密切相关。但污垢, 特别是微生物污垢的形成是一个十分复杂的过程, 人们至今还缺乏对其形成机制的深入认识, 其基础理论涉及多个学科交叉, 可定量测量的描述参数严重不足, 所涉及的各学科发展水平参差不齐, 都给微生物污垢特性参数预测设置了多重障碍, 而且这种局面短期内还难以改观。

另一方面, 针对社会和经济发展的需要, 我国政府提出了“十一五”期间, 单位国内生产总值能耗要降低 20%, 主要污染物排放总量要减少 10% 的约束性指标, 石油、化工、钢铁、火电、有色冶金等高能耗行业普遍发动了“节能降耗”攻坚战, 主攻目标多指向其工艺过程中的换热设备和输送设备污垢。这种迫切的应用需求, 为我国的污垢研究提供了难得的机遇; 加之现代检测技术和计算机技术的高速发展又为污垢检测手段的更新换代提供了巨大空间, 设法就地(原位)实时检测微生物污垢特性的思路就顺理成章地成了污垢特性研究的热点之一。

为了引起更多节能工作者对这一研究方向的关注, 本文简要介绍了微生物污垢的内涵和微生物污垢检测技术研究中的地位、作用和特点, 总结了目前已知的微生物污垢的形成过程及其主要影响因素, 着重分析了目前国内外应用比较广泛的检测方法及其最新研究动态, 探讨了今后一段时间微生物污垢检测技术的发展趋势。

1 微生物污垢检测技术的地位、作用和特点

微生物污垢, 通常是指由真菌、细菌、藻类等微生物及其排泄物附着于容器或流道壁面并栖息、繁殖而形成的生物黏膜(biofilm)或有机物膜(organic film)^[7]。它实际上是一种由嵌入到细胞体外介质内的各种微生物聚集而成的高度水化的膜层(含水 70%~95%), 是有机体(包括微生物和大的生物体如海绵体等)的沉积和积累^[1], 是水系统中不希望发生的微生物膜^[5]。

微生物污垢检测技术在整个污垢研究中的地位

和作用:

(1) 条件适合时, 微生物污垢是冷却水中增长速度最快的一种污垢, 对设备安全性威胁也最大。尤其是其中的一些能引起金属壁面腐蚀的微生物, 如: 铁细菌、硫酸盐还原菌(SRB)、硫氧化菌、黏液形成菌、硝化菌及反硝化菌等, 常是污垢热阻和流阻增长的主要原因, 同时也是腐蚀速率增大的缘由之一。据已观察到的现象推测, 这些微生物中的一种或几种很可能还和点蚀密切相关(尚待检测数据验证)。而点蚀是一种最令人头痛的局部腐蚀形态, 其危害性很大(容易导致金属壁面腐蚀穿孔而停机), 形成初期进展较缓(约需数月或数年), 一旦形成则发展很快, 蚀点位置随机性大、可测性差(蚀点表面常覆盖有腐蚀产物, 不易观测)。

(2) 由上可见, 与冷却水的其它几种污垢相比, 微生物污垢对设备的安全、经济性威胁最大, 其形成机制研究也亟待开展, 面对应用和理论研究的三重需求, 目前的最佳选择似应是借助于现代检测技术和计算机技术, 大力开展微生物污垢检测技术及其应用基础研究, 以提供机制研究和对策评价所急需的逼真度高的数据。

微生物污垢的预测和对策研究的发展, 又给微生物检测技术提出了如下要求:

(1) 目前, 一般工业微生物检测项目多限于离线进行的微生物数量的测定(总数或生长量)和微生物形态的观察、识别; 而冷却水微生物污垢检测技术则需提供更多的定性及定量描述水微生物特性的参数, 如微生物的生理生化指标、繁殖规律(和养分的种类、浓度、流动速度、壁面状况等参数的关联)及对金属的附着规律等, 在此基础上还需要进一步检测微生物数量及繁殖对工艺过程参数影响的定量分析方法和工具, 需要提供科学、可靠评价各种各样的污垢对策的方法和手段。

(2) 微生物污垢组份和冷却水水体中的微生物群落关联度很高, 而天然水体既有其固有的微生物, 又和所流过地域的土壤、环境等条件有关, 更有甚者, 这种关联还是时间的强函数。因此, 为获得逼真度高的微生物污垢特性数据, 检测手段必须是就地、在线、实时、连续监测, 这是目前微生物检测技术中尚待发展的。

采用“虚拟仪器”^[8]技术, 来满足微生物污垢的复杂测试要求, 而且, 为适应微生物污垢数据引用

的广泛性, 还可将虚拟仪器进一步与网络相连接(网络化虚拟仪器), 实现数据发布、共享, 甚至远程测控功能, 这是微生物污垢检测技术的一个亟待开发的发展目标。

2 微生物污垢的形成过程及其影响因素

2.1 微生物污垢形成过程

循环冷却水系统中一般常见的污垢类型有析晶污垢、颗粒污垢、腐蚀污垢、生物污垢等四类, 但新近颁布的ISH ESDU淡水污垢用户指南却列入了化学反应污垢^[1], 其缘由还有待进一步研究。尽管各类污垢形成过程的影响因素不尽相同, 但是所有这几类污垢, 包括微生物污垢的形成过程都包括以下5个阶段^[7]:

(1) 起始阶段。从壁面与污染流体接触起到形成可观测到污垢的一段时间称为起始阶段。顺便指出, 以前有人将起始阶段和诱导期视为同一概念, 但实际上两者是有区别的。

(2) 输运阶段(传质阶段)。输运阶段是污垢形成过程中研究得最为充分的一个阶段。

(3) 附着阶段。这是污垢组分粒子被输运到壁面并最终附着在壁面上的阶段。

(4) 剥蚀阶段。剥蚀也称剥落, 它是沉积在壁面上的污垢组分重新脱离壁面或受流体冲击而被带走的过程。对剥蚀机制的研究还很不充分, 目前只知道污垢组分基本上是以离子、颗粒或大块或片状的形式脱离表面^[9]。

(5) 老化阶段。污垢的老化从其一附着到壁面就已开始。微生物污垢的老化即意味着微生物的衰亡, 但衰亡的微生物仍然会对影响壁面的换热、流动和腐蚀产生影响。

Melo和Bott描述了微生物污垢形成的具体过程^[10], 大致包括以下几个步骤: 1) 大分子物质吸附在管道或设备上; 2) 大量微生物迁移到吸附层表面; 3) 大量细胞或成簇的微生物吸附到固体表面; 4) 部分细胞可能从表面迁移出去; 5) 微生物群与设备表面建立强有力的吸附关系; 6) 大量营养物质运送到管道表面, 同时一部分微生物随着养料一起流走; 7) 细菌进行新陈代谢, 并大量生长繁殖; 8) 当达到一定数量和厚度, 部分会脱落。

但微生物污垢在形成的过程中, 绝不是单一的一个一个地按步骤进行, 它的形成是一个复杂的过

程, 由于物理、化学等因素影响, 有些步骤是同时进行的。

2.2 影响微生物污垢形成的因素

不同种类污垢的形成都受各种因素的影响, 微生物污垢也不例外。微生物污垢的形成是一个动态的过程, 包括微生物的附着、生长、脱落及死亡。在水系统中, 各种微生物杂乱无章的混居在一起^[11], 构成了一个由各种菌类、有机物和无机物组成的复杂系统^[12]。污垢的形成是质量交换、热量交换和动量交换的动态综合, 是多种十分复杂过程的同时作用, 而且还涉及到化学动力学、胶体化学以及表面科学等知识。因而影响微生物形成的因素很多, 如水体组份、温度、水流与壁面的温度梯度、水流速度、水体营养物质状况以及管道表面情况等^[9]。

温度对微生物的活性有很大影响, 经过研究发现大部分细菌在环境温度为40℃时活性最强, 繁殖也最快。对能够引起微生物污垢的大肠杆菌的研究显示, 温度从30℃增加到35℃时, 生物膜的厚度增加了近80%^[10]。管道表面情况如管道材料和光滑粗糙程度也极大地影响污垢形成, 国内外一部分学者对此进行了研究, 当然, 水质情况也是重要的影响因素。

3 微生物污垢监测技术的现状和特点

由于微生物污垢在我们的日常生活及工业生产过程中广泛存在, 考虑到它的危害, 各国研究者对其进行了一系列的探索性研究, 无论是进行理论分析及模型研究, 还是对微生物污垢的预测、监测以及对策研究, 都取得了一定的阶段性研究成果。

3.1 国外研究现状

Yasunori Tanaki^[13]等人最近提出了通过检测乳酸消耗率来监测微生物的方法, 他们认为通过简单的三磷酸腺苷(ATP)测量不能反映细菌的数量, 因为水系统中的细菌包括悬浮的和固定的(微生物垢)两类, 测量的ATP主要表征悬浮的那部分, 因此, 不能作为衡量微生物污垢多少的参数。通过在培养基中加入葡萄糖、乳糖、氨基乙酸、色氨酸、乙酸、乳酸、 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} , 经过测量, 乳酸和葡萄糖比其他四种有机成分消耗率要高很多, 而且乳酸是最高的, 相比之下 NH_4^+ 、 SO_4^{2-} 变化很少。其中葡萄糖作为微生物的碳源被消耗, 乳酸和它的脂类则能被大量的生物降解, 由于乳酸的消耗值能很好地反映生

物膜的形成,因此,被选作检验微生物活性的最好的指标。

Meesters Van KPH等人^[14]提出了用一种生物膜过滤器来处理冷却水系统和热交换器中的微生物污垢的方法。通过搭建一个实验室规模的平台,模拟实际中水循环过程,并在循环系统中设置一个固定的生物膜过滤器。实验过程中采用一套未设置生物膜过滤器的系统进行对比实验,在相同的条件下进行测试。通过实验发现,经过过滤,水中的细菌数量和微生物ATP浓度降低了 30~40 倍,同化有机碳数量降低了一半,系统中管道壁、热交换器、冷却塔鞍部的微生物生长必需的蛋白质等有机质量明显减少。结果证明,此方法既可有效地提高热交换效率,又能减少氯化处理频率和耗氯量。其简易实验装置如下图 1 所示。

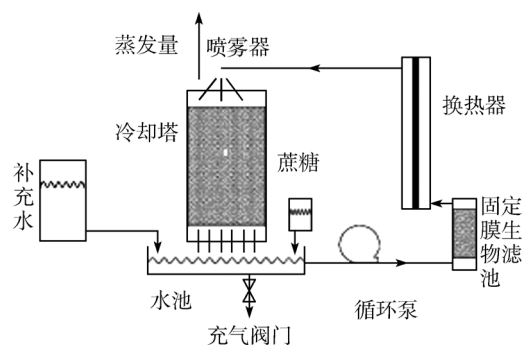


图 1 装有生物膜过滤器的实验台循环水系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the bench-scale recirculating cooling system with fixed-film biofilter

Reipa Vytas等^[15]提出一种利用石英晶体微平衡和光反射长期监测微生物污垢生长过程的方法,通过改变石英晶体的谐振频率,改变电阻变化量/频率变化量($\Delta R/\Delta f$)的值,更便于比较生物反应器的运行,同时显示出生物膜结构的变化,光学方法通过测量白光反射系数来测生物膜的厚度,并作为石英晶体微平衡(QCM)技术的辅助手段。研究得出的结论证明QCM能够长期监测生物膜的各个生长阶段。在正常的水条件下只要不是特别混浊、包括有浮游生物都不干扰测量结果,而且具有在线、无破坏的优点。

Joachim Klahre等人^[16]提出了一种实时、在线的差分浊度法监测微生物污垢系统,如图 2 所示。在一个造纸厂进行了相关实验,在一个管道不远处设

置两个探头,一个定期清洗,另一个放置不动,管道壁上设置两个窗口,使光线可以照射进去,并安装传感器和信号处理单元。通过传感器测量由于微生物污垢引起的光线吸收产生的变化,传出的不同信号反映了微生物污垢的生长趋势。由于干净和有污垢的窗口吸收的光线不同,浊度的净增量反映微生物污垢的生长态势。研究中同时进行了粘泥平板测量和自动压降法监测,粘泥平板测量的缺点是不能连续测量,而差分浊度测量具有实时、在线、对环境无损害等优点,还可以在电磁干扰、振荡、高温、潮湿等环境下工作,这种方法既可以用于实验室研究也可以在线监测。但这种方法有个缺点,它的光学系统对颜色变化很敏感,由于水系统中存在各种酸性或碱性化学物质,导致了颜色的变化会对差分浊度测量(DTM)产生影响,通过改变光源的性质可以克服以上缺点,但无疑会增加成本。

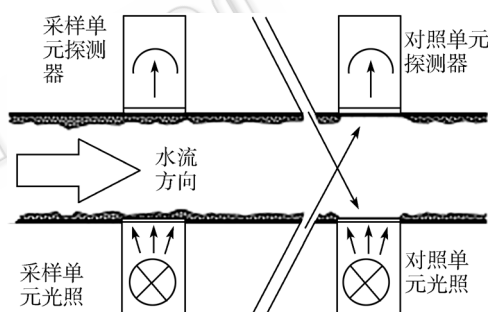


图 2 差分浊度测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of differential turbidity measurement system

Betsey Pitts等^[17]根据实验提出了用颜色对比法来确定管道表面的污垢量,在实验中用一个白色圆盘做颜色对比基准,用色度计对同一个圆盘成垢后进行颜色测量,测量发现细菌数量的对数和颜色改变量的对数呈现很强的线性关系。但该方法不能用于污垢形成的早期,细菌密度不能小于 10^5 CFU/cm²,并且由于消毒剂会改变细胞及环境的颜色,在生物杀灭剂用前和用后不能使用。

Vrouwenvelder JS等^[18]提出了一种膜污染模拟器来研究微生物污垢的方法,经过和螺旋式膜等其他生物膜对比,在各种参数像压力降等数据上表现出了相同的功能,这套装置的优点是尺寸小,容易操作,需水和化学药品量少,所以总的成本较低。

Min Young Jung和Cheol Sang Kim等人用石英

晶体纳米平衡法研究了生物污垢的开始形成阶段, 他们用 6 种金属、3 种细菌分别做了实验, 实验结果表明由于表面材料界面活性不同, 几种细菌在不同表面结垢的情况都不相同, 同时也证明了这种方法是一个有效的定量监测技术^[19]。Hannu Hell 等也在不同的水流和营养条件下用厚度剪切方式的石英谐振器对微生物污垢的生长做了研究^[20]。

Elmira Kujundzic^[21]等提出了用超声波来监测初期微生物污垢的形成, 并在具有高分子聚合体的表面做了实验研究, 结果表明通过超声波测量与用扫描电子显微镜观察的一致, 结论是超声波监测高分子表面的生物膜生长有足够的灵敏度, 并被建议用于其它表面微生物污垢的监测。

另外, Melo 着重评述了影响微生物污垢的各参数方面的研究进展, 特别是表面材料、流速和无机物粒子对微生物污垢的影响^[22]。De Beer 和 Stoodley^[23]研究了厌氧黏膜的结构与输运之间的关系, 他们认为黏膜是由分布在由水通道(water channels)分隔开的、随机散落于表面的、局域化的细胞和生物聚合体簇上的生物物质构成。Zhao Q、Müller-Steinhagen H 与 Pichette Catherine 等对管道表面自由能以及材料对生物垢形成的影响上做了研究^[24,25]。

Bott 等^[26]利用近红外线通过生物黏膜的吸收系数不同, 在实验室和现场分别进行了微生物污垢的监测研究。Tamachkiorowa 和 Flemming^[27]利用光纤反射光强度的变化进行了水系统生物黏膜厚度的测量, 但这种传感器对初始阶段少量污垢的形成反应不够灵敏。

3.2 国内研究状况

国内在污垢研究方面起步比较晚, 同时国内在污垢在线监测、监测原理的研究、监测手段等方面落后于发达国家。进入 20 世纪 90 年代以后, 借助于计算机应用技术和其他相关学科的发展, 包括传感器技术、材料、光纤、红外线、超声波以及人工智能算法等, 通过国际合作研究, 在污垢预测、监测和对策 3 个发展方向上都有所进展。

但大多数研究都集中在混合污垢方面, 提出了一些理论模型和监测模型, 而针对微生物污垢的研究则非常少。其中刘天庆等^[28,29]从固体材料表面性质入手, 探讨了材料的表面粗糙度、表面自由能以及材料与微生物污垢之间的界面能对其形成的影响,

并对微生物与碳酸钙混合垢的形成过程进行了研究, 他们以水系统中细菌与碳酸钙形成的混合垢为研究对象, 应用显微摄像技术研究生物垢及混合垢在各种材料表面上的形成过程和规律, 分析混合垢层内细菌与碳酸钙颗粒的相互作用及混合垢的形成顺序; 采用三角波电磁场及表面涂层等方法抑制生物垢和混合垢; 理论研究方面如应用模糊数学和神经网络等模型来评价或预测混合垢的结垢量及诱导期等强非线性问题^[30]。

杨善让和门洪课题组对松花江中微生物生长和繁殖规律等特性进行了分析研究, 采用电阻抗法检测铁细菌和硫酸盐还原菌, 检测时间较最大可能计数法(MPN)明显缩短^[31]; 采用数字图像处理法代替目测计数, 用于黏液形成菌的检测, 显著提高了计数的准确性和快捷性; 基于松花江水中微生物的数量与污垢的关联性对微生物污垢预测模型进行了初步研究^[32]。

4 结束语

循环冷却水系统中微生物污垢的广泛存在, 给工业生产、生活和环境带来诸多危害, 也向广大的节能、环保工作者提出了严峻的挑战; 国家“十一五”节能降耗约束性目标的提出和各种激励措施的相继出台, 成为微生物污垢研究的强大推动力, 更为微生物污垢研究提供了难逢的机遇。综上所述, 本文提出以下几个值得关注的发展前景以供参考:

1) 基于实时检测数据的准确可行的微生物污垢预测或监测模型的研究已渐成当前应用基础研究的重点;

2) 基于微生物污垢形成机制的深入研究, 提供更多更确切的可测性强的定性或定量描述参数, 是亟待开展的理论研究方向;

3) 基于致垢微生物生长规律的深入研究, 探查它们对工艺过程参数的影响, 为对策开发提供理论依据, 是应用的急需;

4) 利用计算机应用技术和传感器技术的相关成果, 开发更多更可靠的、方便实用的离线或在线的现代检测仪器, 以尽快扭转目前高效微生物污垢检测手段奇缺的局面。

参 考 文 献

- [1] Pugh SJ, Hewitt GF, Muller-Steinhagen H. Fouling during the use of 'fresh' water as coolant--the development of a

- 'user guide'. ECI International Conference on HEAT EXCHANGER FOULING AND CLEANING-VII, Tomar, Portugal. July 01-06, 2007.
- [2] Bott TR. Fouling of Heat Exchangers. Netherlands: Elsevier Science B.V. 1995.
- [3] Hemming HC, Tamachkariowa A, Klahre J, *et al.* Monitoring of fouling and biofouling in technical systems. *Water Science and Technology*, 1998, **38**(8-9): 291-298.
- [4] 国家环境保护总局, 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 第四版(增补版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006, p.6.
- [5] 陈绍炎. 水化学. 北京: 水利电力出版社, 1995, p.4.
- [6] 周本省. 工业水处理技术. 北京: 化学工业出版社, 2000, p.34.
- [7] 杨善让, 徐志明, 孙灵芳. 换热设备的污垢与对策. 第二版. 北京: 科学出版社, 2004, p.15.
- [8] 秦树人. 虚拟仪器. 北京: 中国计量出版社, 2004, pp.3-14.
- [9] 陈晓文, 张早校, 陈二锋. 换热设备污垢监测及预测研究进展. *化工机械*, 2005, **32**(1): 60-64.
- [10] Melo LF, Bott TR. Biofouling in water systems. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1997, **14**(4): 375-381.
- [11] Characklis WG, Marshall KC. Biofilms: A basis for and interdisciplinary approach, in: W.G. Characklis, K.C. Marshall (Eds.), *Biofilms*. New York: Wiley-Interscience, 1990.
- [12] White DC, Kirkegaard RD, Palmer RJ, *et al.* The biofilm ecology of microbial biofouling, Biocide Resistance and Corrosion. *Royal Society of Chemistry*, 1999, 120-130.
- [13] Tanji Y, Nishihara T, Miyanaga K. Monitoring of biofilm in cooling water system by measuring lactic acid consumption rate. *Biochemical Engineering*, 2007, **35**(1): 81-86.
- [14] Meesters Van KPH, Groenestijn JW, Gerritse J. Biofouling reduction in recirculating cooling systems through biofiltration of process water. *Water Research*, 2003, **37**(3): 525-532.
- [15] Reipa V, Almeida J, Kenneth DC. Long-term monitoring of biofilm growth and disinfection using a quartz crystal microbalance and reflectance measurements. *Microbiological Methods*, 2006, **66**(3): 449-459.
- [16] Klahre J, Flemming HC. Monitoring of biofouling in papermill process waters. *Water Research*, 2000, **34**(14): 3657-3665.
- [17] Pittsa B, Hamilton MA, Gordon A, *et al.* Color measurement as a means of quantifying surface biofouling. *Microbiological Methods*, 1998, **34**(2): 143-149.
- [18] Vrouwenvelder JS, Bakker SM, Wessels LP, *et al.* The membrane fouling simulator as a new tool for biofouling control of spiral-wound membranes. *Desalination*, 2007, **204**(1-3): 170-174.
- [19] Jung MY, Kim CS, Leonard D, *et al.* A study of the onset of biofouling using quartz crystal nanobalance. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2006, **33**(1): 7-13.
- [20] Helle H, Vuorirant P, VaÈlimaÈki H, *et al.* Monitoring of biofilm growth with thickness-shear mode quartz resonators in different flow and nutrition conditions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2000, **71**(1-2): 47-54.
- [21] Kujundzic E, Fonseca AC, Evans EA, *et al.* Ultrasonic monitoring of early stage biofilm growth on polymeric surfaces. *Microbiological Methods*, 2007, **68**(3): 458-467.
- [22] 杨善让, 孙灵芳, 徐志明. 换热设备污垢研究的现状和展望. *化工进展*, 2004, **23**(10): 1091-1098.
- [23] De Beer D, Stoodley P. Relation between the structure of an aerobic biofilm and mass transport phenomena. *Water Sci Technol*, 1995, **32**(8): 11-18.
- [24] Zhao Q, Liua Y, Wanga C, *et al.* Effect of surface free energy on the adhesion of biofouling and crystalline fouling. *Chemical Engineering Science*, 2005, **60**(17): 4858-4865.
- [25] Pichette C, Zhang H, Davison W, *et al.* Preventing biofilm development on DGT devices using metals and antibiotic. *Talanta*, 2007, **72**(2): 716-722.
- [26] Bott TR. Monitoring Biofouling Mitigation Techniques. Proceedings of NHTC'00, Pittsburgh, Pennsylvania, 2000.
- [27] Tamachkariowa A, Flemming HC. Optical Fiber Sensor for Biofouling Monitoring. In: Bott TR, *et al.*, eds. Understanding Heat Exchanger Fouling and Its Mitigation. New York: Begell House Inc. 1999, 333-348.
- [28] 刘天庆, 于瑞红, 李香琴, 等. 材料表面性质影响生物垢形成的综合评价及预测. *环境科学学报*, 2001, **21**(4): 491-495.
- [29] 刘天庆, 李香琴, 王鸿灵, 等. 水系统中微生物与碳酸钙混合垢形成过程的研究. *高校化学工程学报*, 2002, **16**(3): 263-269.
- [30] 王鸿灵, 刘天庆, 李香琴, 等. 材料化学性质影响微生物污垢的神经网络分析. *化学工程*, 2003, **31**(6): 33-37.
- [31] Men H, Mu SW, Lu ZW, *et al.* Electrochemical impedance and digital image methods to detect microorganism. ECI International Conference on HEAT EXCHANGER FOULING AND CLEANING Tomar VII, Portugal. July 01-06, 2007.
- [32] Men H, Mu SW, Sun JP, *et al.* Predictive model of biofouling growth based on electrochemical method. 7th East Asian Conference On Chemical Sensors, Singapore. December 03-05, 2007.