

对管式换热器黏液形成菌生物污垢特性的实验研究

徐志明,王宇航,沈艺雯,王景涛

(东北电力大学 能源与动力工程学院,吉林 吉林 132012)

摘 要: 为了探讨黏液形成菌在管式换热器中的污垢特性,以某电厂循环冷却塔底黏泥中分离纯化后得出的黏液形成菌为研究对象,利用污垢动态模拟实验系统,采用对比实验的研究方法得到了不同入口温度、流速及体积浓度条件下黏液形成菌在不锈钢光管换热器中的污垢特性。结果表明:黏液形成菌的结垢过程存在诱导期。随着入口温度的升高,诱导期缩短,污垢热阻达到渐近值所需时间减少。在实验温度范围内,入口温度为 30 ℃ 时污垢热阻渐近值最大,35 ℃ 时次之,25 ℃ 时最小;随着流速的增加,污垢热阻达到渐近值所需时间减少,污垢热阻渐近值减小;随着体积浓度的增加,诱导期会延长,结垢速率加快,污垢热阻渐近值增大。

关 键 词: 管式换热器;污垢特性;黏液形成菌;生物膜;酶

中图分类号: TK172 文献标识码: A
DOI: 10. 16146/j. cnki. rndlge. 2016. 09. 007

引 言

换热设备被广泛应用于工业生产和日常生活的各个领域之中。换热设备污垢问题一直是亟待解决的工业难题之一。换热设备污垢的产生很大一部分原因是由循环冷却水系统中存在的致垢微生物引起的。生物污垢是由细菌、藻类等微生物及其排泄物沉积于固体表面并生长、繁殖而形成的生物粘膜或有机膜^[1]。生物污垢的产生不仅会影响换热器传热效率,并与厌氧菌如硫酸盐还原菌等相互协同促进,诱导金属表面发生结垢甚至腐蚀^[2],还严重威胁设备运行安全,造成能源的不必要浪费和巨大的经济损失。因此越来越多的专家学者们对换热设备的生物污垢问题逐渐展开了多方面的研究。

Melo 等研究了冷却水系统中微生物在换热设备的表面上形成生物膜的机理以及工质速度、温度以及其它外界条件对生物膜的增长及稳定性的影响^[3]; Zacarias 等进一步发现^[4],生物膜整体被微生

物、胞外聚合物(EPS)及其它一些物质所填充,其内部具有明显的空隙和各种通道,膜内空隙和通道彼此相互连接,是营养物质、信息传递等现象发生的场所; Tian 研究了北京奥运村污水中钙离子和致垢微生物之间的相互作用,发现钙离子对生物膜的形成过程有明显的影晌^[5],得出了在微生物污垢的不同形成阶段内钙离子有着不同影响及作用的结论;许萍对市政再生水补水的电厂循环冷却水系统微生物进行分析^[6],发现钙镁等金属离子会促进致垢细菌在金属材料表面的生长繁殖,根据调得出冷却循环水系统运行中因微生物引起的问题约占一半的结论;于大禹等简述了微生物污垢检测技术研究中的地位、作用和特点^[7-9],总结了微生物污垢的形成过程的特征及其主要的影响因素,同时分析了目前国内被广泛应用的微生物污垢检测技术、各种方法的优缺点及其目前最新的研究技术动态,然后对未来的微生物污垢检测技术的发展趋势及动向提出了一种展望;随后利用了实验的方法研究了一些典型微生物污垢的特性及污垢形成的影响因素,通过灰色关联的数学方法分析了对应的水质参数与微生物污垢相关联的权重比例,最后讨论了水质参数的变化与污垢热阻之间的内在联系,为以后制定除垢、抑垢等对策提供了理论支持。武霖等人通过静置实验的方法来研究 Ni - P 化学镀改性换热面上黏液形成菌微生物污垢的特性^[10]; 咎成等研究了城镇二级出水中温度及流速对板式换热器内结垢特性的影响^[11],得到了温度对于以微生物污垢为主的混合污垢形成的影响呈单调性的结论;杨倩鹏等针对微生物污垢形貌多样的特点^[12],提出了一个形状因子的概念,研究了形状因子与受力之间的关系,简化了污垢形状与受力的关联分析;徐志明等分别研究了板式换

收稿日期: 2015 - 12 - 23; 修订日期: 2016 - 04 - 08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51476025)

作者简介: 徐志明(1959 -),男,吉林九台人,东北电力大学教授。

通讯作者: 王宇航(1990 -),男,黑龙江七台河人,东北电力大学硕士研究生。

热器中铁细菌和黏液形成菌在不同的运行工况下各自的污垢特性^[13-14]。

关于生物污垢的研究已越来越受到人们的重视,但对于管式换热器内的黏液形成菌结垢规律研究还较少。本文以循环冷却水中典型微生物黏液形成菌为研究对象,通过改变实验运行工况来研究其在不锈钢光管内的污垢特性,为生物污垢的预测及制定有效的防垢、抑垢和除垢对策提供了一定理论依据。

1 实验内容

1.1 实验系统简介

实验系统由工质循环流动系统,冷却流动系统和数据采集系统三部分组成如图 1 所示:

工质循环流动系统:循环工质由于重力而自发地由高位水箱流过实验管路进入下方低位水箱,再

经由循环水泵做功抽取工质从由下至上注入高位水箱,如此往复循环。为了保证工质在实验循环中流速一定,需要在高位水箱上装一根溢流管以维持工质液面高度不变。实验管路中的循环工质在有 3 kW 的加热棒的恒温水浴槽中进行换热;

冷却流动系统:冷却系统负责将循环工质多余的热量带走,保证循环工质能以实验要求允许的温度从高位水箱流进实验管路内;

数据采集系统:测量水浴温度的温度传感器为 T 型热电偶。除了采集水浴温度的这两个温度传感器外,其余热电阻均为两根实验管路对应分别布置,每根实验管路两端均装有 PT100 型热电阻,以便采集实验管路进出口温度。所有测量的信号都经由数据采集卡在工控计算机中进行储存、计算和处理。整个实验系统自动化程度较高,可以 24 h 在线监控。

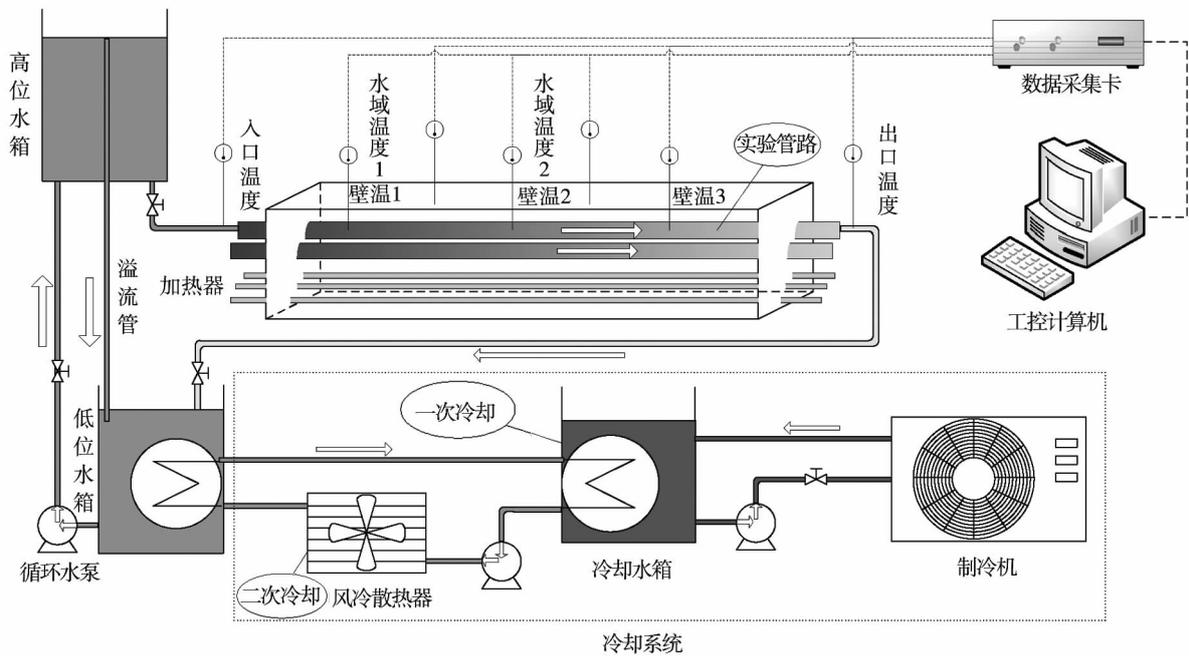


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test system

1.2 实验原理

单位时间内工质流经实验管段吸收的热量 Φ 可表示为:

$$\Phi = \rho \pi d^2 v c_p (t_{fo} - t_{fi}) / 4 \quad (1)$$

总传热系数表示为:

$$k = \Phi / (\pi d l \Delta t_m) \quad (2)$$

式中: C_p —一定压比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; t_{fo} 、 t_{fi} —管内工质的出口温度和进口温度, K ; Δt_m —对数平均温差, K ; d —管内径, m ; l —实验管长, m ; v —管内工质流速, m/s 。其中,根据《饱和水的热物理性质表》

选取 30 ℃ 水的密度和对应的比热容。

将式 (1) 代入式 (2) 中可得:

$$k = \frac{\rho d v c_p (t_{fo} - t_{fi})}{4l \Delta t_m} \quad (3)$$

其中对数平均温差 Δt_m :

$$\Delta t_m = \frac{(t_{sy} - t_{fi}) - (t_{sy} - t_{fo})}{\ln((t_{sy} - t_{fi}) / (t_{sy} - t_{fo}))} \quad (4)$$

式中: t_{sy} — 水域温度, K。

污垢热阻 R_f 的基本定义式可表达为:

$$R_f = \frac{1}{k} - \frac{1}{k_0} \quad (5)$$

式中: k_0 、 k — 清洁状态、有污垢状态下不锈钢管的总传热系数, $W / (m^2 \cdot K)$; k_0 — 清洁状态下未加入细菌前 1 h 左右的总传热系数的平均值, 为固定值。

1.3 细菌的培养

本实验所采用的黏液形成菌为国内某电厂循环冷却塔底黏泥中分离纯化出的, 经过提纯培养的黏液形成菌实物图如图 2 所示。实验所用的细菌培养基及用量如下表 1 所示。用酸或碱将上述培养基的 pH 值调节为 7.2 ± 0.2 , 用蒸汽压力灭菌锅在高于大气压 0.1 MPa、 $(121 \pm 1)^\circ\text{C}$ 的环境下灭菌 15 min, 冷却后经紫外线消毒, 在净化工作台内进行接种。之后在 $(29 \pm 1)^\circ\text{C}$ 温度下的生化培养箱中培养 72 h。

表 1 黏液形成菌培养基及用量

Tab.1 Culture medium and its dosage for slime-forming bacteria

药品名称	用量 / $g \cdot L^{-1}$
牛肉膏	3.0
蛋白胨	10.0
氯化钠	5.0

1.4 实验过程

实验开始时, 对实验工况进行调试, 用人工称重法来调整工质流速, 入口温度由风冷系统、变频器及水冷系统共同控制。待实验工况稳定后, 在低位水箱中加入培养好的黏液形成菌, 而后保持上下水箱的封闭状态, 以免受到其它因素影响。实验过程中的温度变化经数据采集系统由计算机记录, 在实验结束后, 对数据进行后期的处理。

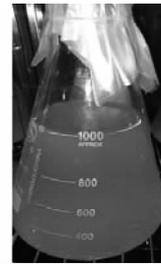


图 2 黏液形成菌实物图

Fig.2 Picture of slime-forming bacteria

2 实验结果与分析

2.1 入口温度对黏液形成菌污垢的影响

在水浴温度 50 ℃, 流速 0.4 m/s, 菌液体积浓度为实验用水的 1% (体积比 1:100) 的条件下, 改变工质入口温度, 进行 3 组对比实验。不同入口温度对黏液形成菌污垢特性影响的实验结果如图 3 所示: 三组实验均存在明显的诱导期, 诱导期结束后, 污垢热阻曲线快速增长, 一段时间后达到平稳。随着入口温度的升高, 诱导期时间缩短, 并且污垢热阻达到渐近值所需的时间减少。在实验温度范围内, 入口温度为 30 ℃ 时污垢热阻渐近值最大, 35 ℃ 时污垢热阻渐近值次之, 25 ℃ 时污垢热阻渐近值最小。

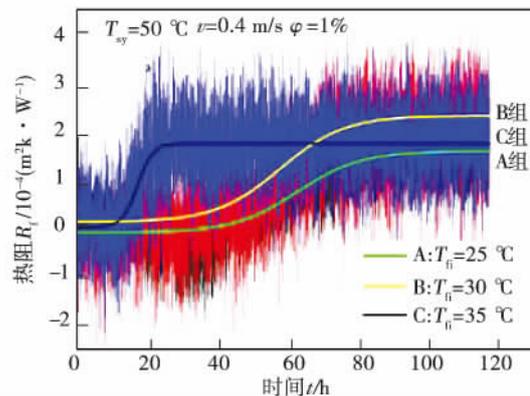


图 3 不同入口温度对黏液形成菌污垢特性影响

Fig.3 Effect of inlet temperature on slime-forming bacteria fouling characteristic

在生物膜形成的初期阶段, 细菌培养基内的大分子物质如蛋白质等吸附在润湿的表面上形成调试膜^[15]。这层调试膜不仅能改良换热面的表面能和粗糙度等, 还会破坏粘性层流底层, 增大局部换热系

数 这就是产生诱导期的原因^[16]。一般认为 ,诱导期是指在测量污垢热阻随时间变化规律时出现的污垢热阻小于或等于零的时间段^[11]。

升高的入口温度加强了蛋白质等大分子物质的布朗运动 ,提高其吸附于润湿换热面的几率 ,加速了调试膜的形成 ,为细菌的吸附创造了更多的机会和有利条件 ,因此黏液形成菌在换热表面附着的几率也随之增大 ,所以随着温度的升高诱导期缩短。温度影响细胞膜的流动性以及促使细胞新陈代谢反应的酶的活性 ,在一定范围内温度越高细胞膜的流动性和酶促反应速率越大 ,越有益于营养物质的输运以及细胞代谢产生废物的移出 ,黏液形成菌的生长繁殖速率加快 ,对应着的不锈钢管内生物膜增厚速率变快 ,污垢热阻达到平衡的时间缩短。一定范围内温度的升高有利于生物膜的增厚^[17] ,并综合上述可知 ,30 和 35 ℃时污垢热阻渐近值均大于 25 ℃时污垢热阻渐近值。但是持续的高温环境会使酶促反应速率从最开始的加快变为逐渐减慢(酶变性失活) ,微生物的生长繁殖速率降低 ,死亡率加快。所以 35 ℃时污垢热阻渐近值小于 30 ℃时的污垢热阻渐近值。

2.2 流速对黏液形成菌污垢的影响

在水浴温度 50 ℃ ,入口温度 30 ℃ ,菌液体积浓度为实验用水的 1% 的条件下 ,改变工质流速为 0.2 ,0.4 和 0.6 m/s ,进行 3 组对比实验。不同流速对黏液形成菌污垢特性影响的实验结果如图 4 所示: 三组实验均存在诱导期 ,随着流速的增大 ,污垢热阻达到渐近值的时间减少 ,并且污垢热阻渐近值变小。

增大流速可以供给黏液形成菌更多的生长所必需的氧气和营养成分 ,同时移走新陈代谢所产生的废物 ,为黏液形成菌的生长繁殖提供了有利的生存环境 ,生物膜随之也快速增厚。较外层的生物膜由于壁面剪切力的作用易脱落 ,增加流速 ,会使生物膜生长与剥蚀快速达到动态平衡 ,因此污垢热阻达到渐近值的时间也会缩短。但是 ,生物膜在生长变厚的同时也会加大流阻 ,而较高的流速会产生更大的壁面剪切力 ,加重了剥蚀 ,不利于生物膜在换热壁面的粘附 ,同时也不利于膜内细菌的生长繁殖。当壁面剪切力开始起主导作用 ,工质流速增大对污垢剥蚀的影响大于生物膜的粘附及黏液形成菌产生的生物污垢沉积的影响时 ,流速越大污垢热阻渐近值反

而越小。

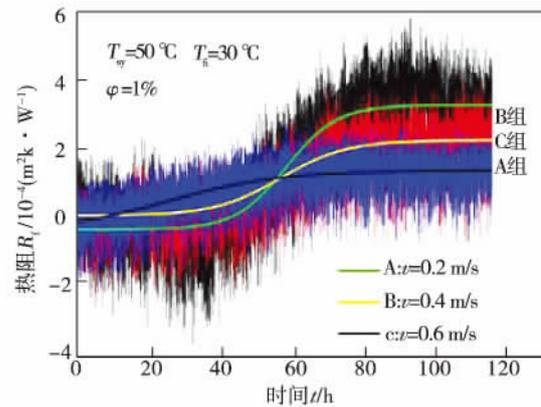


图 4 不同流速对黏液形成菌污垢特性影响
Fig. 4 Effect of flow velocity on slime-forming bacteria fouling characteristic

2.3 体积浓度对黏液形成菌污垢的影响

在水浴温度 50 ℃ ,入口温度 30 ℃ ,流速 0.4 m/s 的条件下 ,改变加入菌液的体积浓度为 0.5% ,1% 和 1.5% ,进行 3 组对比实验。不同体积浓度对黏液形成菌污垢特性影响的实验结果如图 5 所示: 3 组曲线均存在诱导期 ,随着体积浓度的增大 ,诱导期延长 ,结垢速率加快 ,污垢热阻渐近值增大。

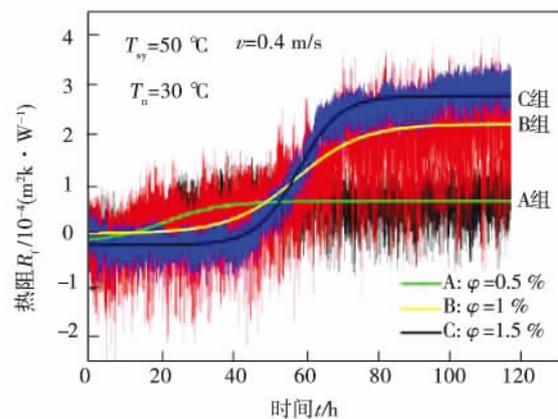


图 5 不同体积浓度对黏液形成菌污垢特性影响
Fig. 5 Effect of various volumetric concentrations on slime-forming bacteria fouling characteristic

当黏液形成菌进入一个新环境即实验管路中时 ,不会立即开始生长繁殖 ,而是先要有一段调整适应的时期。由于细菌会在生命活动过程中会分泌一种叫自体诱导物的特殊的化学信号分子 ,当化学信号分子浓度达到一定阈值时 ,细菌的群体感应系统

(QS 系统) 会启动菌体中相关基因的表达来调节自身去适应周围环境^[18]。因此随着黏液形成菌体积浓度的增加, 菌体数量增大, 化学信号分子浓度增大, QS 系统开启后, 越来越多的菌体通过基因表达来调节自身, 延长了对新环境的适应时期, 故诱导期也随之延长。在诱导期结束后, 由于循环工质内含有较高体积浓度的菌液, 细菌的生长繁殖会加速生物膜的形成及生长, 因此结垢速率变快。菌液体积浓度的增加不仅会导致生物膜较厚, 菌体数量的增多还势必会大量增加胞外聚合物(EPS) 致使热阻增大, 因此污垢热阻渐近值随菌液体积浓度的增大而增大。

3 结 论

本文研究结论有:

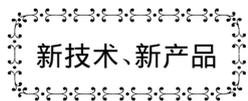
- (1) 黏液形成菌在结垢过程中存在诱导期;
- (2) 随着循环工质入口温度的升高, 诱导期缩短, 污垢热阻达到渐近值所需的时间减少。在实验范围内, 30℃ 时污垢热阻渐近值最大, 35℃ 时污垢热阻渐近值次之, 25℃ 时污垢热阻渐近值最小;
- (3) 随着流速的增大, 污垢热阻达到渐近值的时间减少, 污垢热阻渐近值变小;
- (4) 随着菌液体积浓度的增大, 诱导期延长, 结垢速率加快, 污垢热阻渐近值增大。

参考文献:

- [1] 杨善让, 徐志明, 孙灵芳. 换热设备污垢与对策[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2004.
YANG Shan-rang, XU Zhi-ming, SUN Ling-fang. Fouls on the heat exchange equipment items and their countermeasures[M]. Second Edition, Beijing: Science Publishing House, 2004.
- [2] 门洪, 安凌菲, 张平, 等. 基于模拟退火算法和支持向量机的黏液形成菌识别[J]. 化工自动化及仪表, 2011, 38(3): 323-326.
MEN Hong, AN Ling-fei, ZHANG Ping, et al. Identification of viscous liquid-formed bacteria based on the simulation annealing algorithm and supporting vector machine[J]. Automation and Instruments in Chemical Industry, 2011, 38(3): 323-326.
- [3] Melo L F, Bott T R. Biofouling in water systems[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1997, 14(4): 375-381.
- [4] Zacarias G D, Ferreira C P, Hernandez JXV. Porosity and tortuosity relations as revealed by a mathematical model of biofilm structure[J]. Journal of Theoretical Biology, 2005, 233(2): 245-251.
- [5] Lei Tian, Xiaodong Chen, Qianpeng Yang, et al. Effect of calcium ions on the evolution of biofouling by *Bacillus subtilis* in plate heat exchangers simulating the heat pump system used with treated sewage in the 2008 Olympic Village[J]. Colloids and Surfaces, 2012, 94: 309-316.
- [6] 许萍. 市政再生水补水的电厂循环冷却水系统微生物特征及控制技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
XU Ping. Microbiological characteristics of the municipal regeneration makeup water in the circulating water cooling system of a power plant[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [7] 于大禹, 门洪, 穆胜伟, 等. 微生物污垢检测技术的特点、现状与发展趋势[J]. 微生物学通报, 2008, 35(12): 1955-1960.
YU Da-yu, MEN Hong, MU Sheng-wei, et al. Features, status quo and development tendency of the microbial foul inspection and testing technology[J]. Journal of Microbiology, 2008, 35(12): 1955-1960.
- [8] 于大禹, 张静, 尹旭, 等. 循环冷却水管路微生物污垢形成的动态模拟[J]. 化工进展, 2010, 29(11): 2193-2197.
YU Da-yu, ZHANG Jing, YIN Xu, et al. Dynamic simulation of the formation of microbial fouls in circulating water cooling pipes[J]. Progress in Chemical Industry, 2010, 29(11): 2193-2197.
- [9] 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 Da-yu, YIN Xu, ZHANG Jing, et al. Factors affecting the formation of microbial fouls based on the simulation of a circulating water cooling device[J]. Journal of Chemical Industry, 2011, 62(12): 3503-3510.
- [10] 武霖, 姚响. Ni-P 化学镀层表面黏液形成菌微生物污垢特性[J]. 化工进展, 2015, 34(11): 4089-4095.
WU Lin, YAO Xiang. Characteristics of the microbial fouls formed from a viscous liquid on the surface of Ni-P chemically plated coat[J]. Progress in Chemical Industry, 2015, 34(11): 4089-4095.
- [11] 咎成, 史琳, 欧鸿飞. 温度及流速对板式换热器内城镇二级出水结垢特性的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2009, 49(2): 240-243.
ZAN Cheng, SHI Lin, OU Hong-fei. Effects of the temperature and flow speed on the fouling characteristics of town second-class drainage water inside plate type heat exchangers[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2009, 49(2): 240-243.
- [12] 杨倩鹏, 陈晓东, 田磊, 等. 微生物污垢的生长模型与受力分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2014, 54(2): 247

- 252.
- YANG Qian-peng ,CHEN Xiao-dong ,TIAN Lei ,et al. Model for growth of microbial fouls and load-bearing analysis[J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition) ,2014 ,54(2) : 247 - 252.
- [13] 徐志明,贾玉婷,王丙林,等. 板式换热器铁细菌生物污垢特性的实验分析[J]. 化工学报, 2014 ,65(8) : 3178 - 3183.
- XU Zhi-ming ,JIA Yu-ting ,WANG Bing-lin ,et al. Experimental analysis of the characteristics of iron-bacteria bio-fouls in plate type heat exchangers[J]. Journal of Chemical Industry ,2014 ,65(8) : 3178 - 3183.
- [14] 徐志明,王景涛,贾玉婷,等. 板式换热器黏液形成菌生物污垢特性的实验研究[J]. 热科学与技术, 2015 ,14(1) : 19 - 25.
- XU Zhi-ming ,WANG Jing-tao ,JIA Yu-ting ,et al. Experimental analysis of the characteristics of bacteria bio-fouls formed from a viscous liquid in plate type heat exchangers[J]. Journal of Thermal Science and Technology ,2015 ,14(1) : 19 - 25.
- [15] Characklis W G. Microbial Fouling: A process analysis[C]. Somercles E F C ,Knudsen G. Fouling of Heat Transfer Equipment Proceedings of International Conference at Rensselaer Polytechnic Institute USA ,1976: 13 - 17.
- [16] 张艳辉. 微生物污垢诱导期及影响因素分析[D]. 吉林: 东北电力大学, 2011.
- ZHANG Yan-hui. Bio-foul induction period and analysis of its influencing factors[D]. Jilin: Northeast University of Electric Power ,2011.
- [17] 郭卓颖,齐枝花,魏博,等. 管材、营养元素和温度对模拟给水管网生物膜形成的影响[J]. 给水排水, 2010 ,36(11) : 161 - 164.
- WU Zhuo-ying ,QI Zhi-hua ,WEI Bo ,et al. Effects of the tube material ,nutrition elements and temperature on the simulation of the bio-film formation in the water supply pipe network [J]. Water Supply and Drainage ,2010 ,36(11) : 161 - 164.
- [18] Wai-Kean Goha ,Christopher R. Gardnera ,Kondapalli V. G. Chandra Sekharb ,et al. Synthesis ,quorum sensing inhibition and docking studies of 1 ,5-dihydropyrrol-2-ones [J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry ,2015 ,23(23) : 7366 - 7377.

(刘 瑶 编辑)



新技术、新产品

MGT6100/6200 燃气轮机的压气机部分

据《Gas Turbine World》2014 ~ 2015 年年度手册报道 ,MGT6100/6200 燃气轮机共用具有总压比为 15: 并能产生大于 27.2 kg/s 空气流量的 11 级轴流压气机。

这是 1 台根据航空发动机部件设计的先进压气机 ,仅仅 11 级就能够产生多于 27.2 kg/s 的空气流量。

它十分紧凑、短小和刚性化 ,在压气机进口具有可调进口导叶 ,后面跟着三级可变几何导叶 ,以便控制空气流量并防止喘振。

对于周期的循环工作、变负荷和连续负荷运行 ,这个特性提供了平衡的发动机控制。在较低的负荷下 ,也可保持较高的排气温度 ,以便在联合生产和联合循环运行方式中保持余热锅炉良好的运行性能。

压气机转子组件是鼓形设计 ,由 3 个转子轮盘、前轮毂和后轮毂组合而成。

(吉桂明 摘译)

ing process of a water solution and pure water inside a vertical rectangular microchannel. Through comparison of the difference between the saturated flow and boiling heat exchange effectiveness and reliability of the water solution and pure water, the influence of the concentration on the heat exchange of the water solution was analyzed. It has been found that under the operating condition when $T_{in} = 368 \text{ K}$, $v = 0.5 \text{ m/s}$ and $q_w = 200 \text{ kW/m}^2$, the average value of the Nu number of the wall surface heated by the surfactant water solution along the flow direction in the saturated boiling stage will be higher than that of pure water. When $t = 60 \text{ ms}$, in the zone closing to the outlet of the flow passage, both wall surfaces heated by the water solution and pure water will be locally overheated but the highest overheated temperature corresponding to the water solution will be higher than that corresponding to pure water and the overheated surface areas will be relatively small. In a range from 0.256 mol/L to 0.769 mol/L , to increase the concentration of the water solution will enhance the saturated flow and boiling heat exchange effectiveness and the heat exchange of water solution at a concentration of 0.513 mol/L will be reliable. **Key words:** microchannel, surfactant water solution, flow boiling, saturated boiling, numerical simulation

管式换热器黏液形成菌生物污垢特性的实验研究 = **Experimental Study of the Bio-foul Characteristics of Bacteria Formed in Viscous Liquids Inside a Tubular Type Heat Exchanger** [刊, 汉] / XU Zhi-ming, WANG Yu-hang, SHEN Yi-wen, WANG Jing-tao (College of Energy Source and Power Engineering, Northeast University of Electric Power, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31 (9). - 39 ~ 44

To exploratorily investigate the foul characteristics of bacteria formed in viscous liquids inside a tubular type heat exchanger, with the bacteria formed in viscous liquids obtained from the slime at the bottom of the circulating cooling towers in a power plant after the separation and purification serving as the object of study, a foul dynamic simulation and test system was utilized and a contrast test research method was adopted to obtain the foul characteristics of bacteria formed in viscous liquids in a stainless steel bare tube heat exchanger under the condition of various inlet temperatures, flow speeds and volumetric concentrations. It has been found that there exists an induction period in the fouling process of bacteria formed in viscous liquids. With an increase of the temperature at the inlet, the induction period will become shortened and the time duration required by the foul thermal resistance to attain its asymptotic value reduced. In the range of the temperature tested, when the temperature at the inlet is $30 \text{ }^\circ\text{C}$, the asymptotic value of the foul thermal resistance will be maximum followed by the asymptotic value at $35 \text{ }^\circ\text{C}$ and minimum at $25 \text{ }^\circ\text{C}$. With an increase of the flow speed, the time duration required by the foul thermal resistance to attain its asymptotic value will become shortened and the asymptotic value of the foul thermal resistance will decrease. With an increase of the volumetric concentration, the induction period will become prolonged, the fouling speed rate will increase and the asymptotic value of the foul thermal resistance will become big. **Key words:** tubular type heat exchanger, foul characteristics, bacteria formed in viscous liquids, bio-film, enzyme

叶片副翼摆角对两段式翼型气动性能的影响 = **Influence of the Swaying Angle of the Flap of a Blade on the**