

换热设备的清洗和防垢技术

朱冬生 卜穗安 谭盈科

(华南理工大学化学工程研究所, 510641)

一、前言

污垢的导热性差, 是钢的 $1/30\sim 1/50$, 结垢不仅是造成换热器传热效率降低和流体输送动力增加的主要原因, 而且在换热器的设计中, 因考虑到污垢热阻的存在而不得不需要更大的换热面积, 从而增加了材料的消耗。由于污垢生成的机理复杂, 许多强化传热元件的结垢机理尚不明确, 而使其应用受到较大的限制, 因此把强化传热和有效防垢两方面有机地结合起来进行实验研究, 获得一种既可强化传热又可以防垢的新技术, 是新型防垢强化传热元件研究的发展方向。

二、结垢机理与强化传热

结垢是一个非常复杂的问题, 从基本原因分析, 它可能涉及非稳态的热量、质量与动量的传递, 还与反应动力学、各种盐类的溶解性及腐蚀等方面的问题有关。一般来说, 结垢类型可分为以下几个过程: (1) 诱导过程; (2) 污垢微粒向传热表面的迁移过程; (3) 污垢微粒在传热表面的吸附过程; (4) 污垢附着物硬化过程; (5) 污垢脱落过程。而实际上污垢脱落过程从污垢刚刚开始形成时就已经发生, 因此污垢形成的过程就是污垢沉积速率与污垢脱除速率之间相互竞争的结果, 这一原理最早由Kern和Seaton^[1]提出, 近年来先后建立的各种结垢模型都是以此为基础的。

由上所述可见, 结垢过程主要由流体传质过程和换热表面的吸附过程两个步骤组成。Melo和Pinheiro(1986)^[2]用水—高岭土悬浮液为物料进行实验, 对这两个步骤进行了研究, 得出如下结论: 在低雷诺数区, 由于沉积物在换热表面的吸附速率较快, 结垢过程受传质过程控制, 污垢层的厚度随着雷诺数的增大而增加; 在高雷诺区, 吸附作用成为控制步骤, 当雷诺数增大时, 污垢沉积量减少。

因此对于湍流工况下流体的结垢, 可以通过增加流体的湍动程度, 增大流体对污垢层的剪切作用力使污垢层脱落。而增加流体湍动程度也会减少传热边界层中滞流底层厚度, 从而减少对流传热热阻, 提高对流传热系数。故要同时达到防垢、清垢和强化流体传热的目的, 可以通过增加流体湍流度的方式来实现, 这样把防垢除垢和强化传热结合来的技术, 在理论上是可行的。

三、清洗和防垢技术

现将国内外常用的几种清洗和抗垢技术及其特点概述如下:

1. 海绵胶球在线清洗系统^[3]

海绵胶球清洗系统是在设备的进料中加入一定数量和大小海绵胶球或尼龙刷子, 随流体一起流过管线。由于海绵胶球或刷子具有一定硬度, 当与管壁面摩擦、碰撞时, 将壁面上的污垢刮落随流体一起被带

*广东省科委青年科学基金项目资助课题

走。这一清洗方法可有效地将松软的沉积物如微生物污垢清除,而且可以通过观察海绵胶球上粘附的污垢量的多少来了解清洗情况,其压降损失也较小。这一系统在能源工业中已经使用30多年,被认为是一种有效的在线清洗污垢的方法。但是这一系统对硬的污垢层如盐类的结垢清洗效果不佳,而且操作复杂、费用昂贵。对这种系统也很难从理论上推断其在指定工况下清洗污垢效果的好坏,而要通过实践才能检验。文献^[4]总结了世界各地的装置中采用这种清洗系统的实际效果,分析了对各种类型结垢的适用情况和局限性,指出海绵胶球对各种强化传热管污垢的清洗效果良好,为了提高海绵球除垢的效果,人们研制出各种新型的海绵胶球,文献^[4]介绍了一种新型磨料海绵胶球Polishing Ball(PBS)。特别适用于对生物污垢的清除,具有较好的效果。

2. 化学抗垢剂防止生物污垢

生物污垢是由未经处理的流体中微生物或有机物的生长而产生的。对于这种污垢,最有效的防治办法就是使用化学抗垢剂进行处理。最常用的化学抗垢剂是氯气,文献^[5]论述了含氯气20-75ppb的氯水对海底换热器上的生物污垢具有一定的清除效果,并建立了生物污垢的脱除速率与氯气消耗量之间的关系。但是由于氯气具有毒性,对环境造成污染,因此它的使用越来越受到限制。文献^[6]提出了一种取代氯气的化学抗垢剂——无机过氧化物,实验证明单独使用过氧化氢或将其与0.25ppm的铁离子辅助剂配合使用,对生物结垢具有相当好的控制作用,效果与氯气相同,而且毒性较小、容易分解,所以是一种较有前途的化学抗垢剂。

3. 流化床在线清洗技术

流化床在线清洗技术是利用在流化床中的固体颗粒对垂直管壳式换热器管壁上的污垢产生持续的摩擦作用来清除和防止污垢。

文献^[7]对这一技术有较详尽的论述,流化床微粒除了能减少和防止沉积物形成,还能促进低流速流体的传热。但采用这种技术时必须保证管材能经得住微粒的磨损及由磨损而引起的腐蚀,生产中通常使用不锈钢材料。

不论是在气体中还是在液体中添加固体颗粒的流化床,往往都要有添加固体粒子的装置及回收固体粒子的装置。如果固体粒子的存在是流体生产工艺中的产物,则可利用其有利于传热的特性,在通入换热器前保留这些粒子。如果固体粒子的硬度比换热器管子的硬度低些,则不会造成管壁的磨损,而且对防止管壁结垢有好处。

4. 具有良好抗垢性能的强化传热管

(1) 表面多孔管:虽然有些强化传热管的抗垢性能不如光滑管,但也有一些强化传热管,由于其特殊的表面构造,而具有比光滑管更好的抗垢性,如表面多孔管强化沸腾传热时就表现出较好的抗垢性。在相同的流体介质中,多孔管加热热流率是光滑管的两倍,运行时间长于光管情况下,表面结垢较少。关于这方面的研究郑康民^[8]曾以NaCl溶液和CaSO₄·H₂O溶液为工质进行实验来研究其抗垢机理,得出表面多孔管在沸腾工况下具有抗垢性能的原因是:(1)流体在孔隙间具有很高的循环速度,减少了物质聚积成垢的机会;(2)多孔层具有很多的毛细管特征从而保证管壁润湿防止局部的干涸和热点的产生。(3)由于高热流管表面的沸腾换热系数高,从而使壁温十分接近液体主体温度,使一些逆溶解性盐类在多孔表面的过饱和度比其在光滑管表面低,同时也减小了管表面上的聚合级分解作用。

(2) 轧槽管:螺旋槽管、横纹管、异型螺旋槽管都是通过特殊机床轧制而成的一种高效强化传热元件,通称轧槽管。在传热过程中可起双边强化传热作用,尤以能强化管内单相流体传热而著称。由于加工方便和

具有较显著的经济效益,其应用日益扩展,流体物性也趋复杂,有的在传热表面上产生污垢,为了在工业应用中解决这些问题,肖建国^[9]采用工业生产中常见的污垢成分 CaCO_3 ,配制成溶液,采用恒加热流率法,研究轧槽管和光管在相同工况下的抗垢性能与管参数和操作条件的关系,文献^[9]较系统地研究了轧槽管的抗垢性能。指出流体流速和传热表面温度对结垢过程的影响较大,流速高对结垢层的冲刷作用大,污垢层不稳定,传热系数亦有提高,同时由于流体界面温度的降低,也减少了污垢生成的机会。对于 CaCO_3 逆溶解性溶液来说,界面温度越高越易结垢,轧槽管的强化传热作用,使管壁传热系数提高,界面温度降低并造成强烈的扰流作用,使靠近壁面的 CaCO_3 溶液浓度与主体浓度差一致,由于这些原因使强化轧槽管的抗垢性能优于光管。实验中所有轧槽管的抗垢性能十分接近且略好于光管的抗垢性能。通过对各种轧槽管的对比实验证明:管参数相同时,其抗垢性顺序为:螺旋槽管>异型螺旋槽管>横纹管。

5. 管内弹簧插入物防垢技术

管内弹簧插入物作为管内强化传热元件在七、八十年代就有人进行了研究,它具有一定的强化传热效果,而且具有比其它管内插入物引起的流体阻力小的优点。其作为防垢和在线清洗技术被研究是近几年的事情。文献^[10]将这种弹簧插入物称为防垢—强化器,以突出其防垢和强化传热的双重作用,实验中的弹簧套在一条钢线上,并固定在钢线上,钢线两端连接着传动装置,在传动装置的带动下弹簧产生往复运动,从而清除管壁面的污垢。

肖宏亮^[11]采用移动弹簧作为一种在线防垢和强化传热的技术,用 CaCO_3 饱和溶液模拟工业加热过程,进行热态试验,探讨了弹簧的结构参数、加热表面温度、流体流速等

变量对流动阻力、管内传热系数、和结垢性能的影响。他的研究发现在恒热流率的情况下,装有移动弹簧的传热管的抗垢性能和传热性能均优于光管。其中弹簧各参数对于防垢和强化传热均有一定影响,弹簧线径,弹簧外直径和螺距的影响程度依次减弱。他通过移动弹簧插入物防垢和强化传热的机理分析,这种在管内安装的弹簧,在流体流动的推动力作用下,产生连续不断的径向、轴向和环向振动,从而破坏流体流动的边界底层,加剧了流体的湍流程度,因此能有效地抑制污垢沉积,减少污垢热阻,增大传热系数,达到强化传热的目的,同时弹簧与管壁摩擦,使粘附在管壁上的污垢被清除,因此也可起到在线清洗的作用,由此可见其具有强化传热、防污和在线清洗的多重功效。指出弹簧在线防垢和强化传热过程中,流体的流速存在最低极限流速,高于此流速,弹簧受流体冲刷振动,使污垢形成过程始终维持在诱导期内,这样传热膜系数不会下降,而且有所提高。低于此流速,则不利于防垢及强化传热。

四、结 语

我们在结垢机理和传热强化机理的基础上分析了各种防垢技术和污垢清洗方法,现总结如下表:

从表中可以看出,化学清洗和一般机械清洗只能在停车状态下进行,胶球法和流化床法可以实现在线清洗,但只适合一定条件下使用。胶球法不是连续自动进行的,流化床法则对工艺和管壁冲刷大,分离困难,因此这几种方法都不可能使换热器在运行中长久、稳定地保持最佳传热状态。

强化传热管的应用则需通过实验和工业中试,才能在工业中应用。由于强化管对管壁边界层强烈的扰流作用,减少了污垢的吸附,降低了传热温差。在某些场合其抗垢性

清洗方法	适用条件	特 点	不 足	经 济 性
化学清洗	1. 各类换热器 2. 停车进行 3. 外加动力设备	清洗速度快、效果好	1. 清洗剂污染 2. 对设备腐蚀	清洗剂费用高, 非计划外停车经济损失大, 外加动力费
一般机械清洗	1. 各类换热器 2. 停车进行 3. 外加动力设备		费工、费时劳动强度大, 效果差, 对设备损伤大	花费人力、物力较大。外加动力费
胶球清洗	1. 列管换热器 2. 100°C 以下水系统 3. 外加动力设备	运行状态下可在线清洗	间断开泵清洗, 操作繁琐, 增加压降	一次性投资约占换热器的10%以上, 外加动力费
在线自动清洗	1. 列管换热器 2. 300°C 以下各种流体	运行状态下可在线自动清洗, 既除垢、防垢, 又强化传热	有一定压降	一次性投资大约占换热器的5%以下

优于光管, 延长了停车清洗的时间。如广东江门甘蔗化工厂1986年设计不锈钢螺纹管加热含有沉淀物的蔗汁, 在运行五个榨季结束后, 发现积垢量很小, 是光管的1/15~1/20, 同时节省设备投资20~30%^[12]。

在线自动清洗的管内弹簧技术既可连续自动除垢、清垢, 又具防垢和强化传热作用, 说明此项技术能同时适用于新设备和现有设备的改造, 无需改动设备主体结构, 也不增加阀门和管线, 不改变传热介质的流向, 但对操作条件有一定要求, 容易产生较大的压降, 同时对流速不能低于极限振动流速。特别适合解决300°C以下高粘度介质的污垢问题, 也可直接应用于改造和提高热交换器传热效率。但目前有关弹簧线径、螺距、簧径等参数和管内流速、流体压降的相互关系尚不十分明确, 仍处在实验和工业中试阶段。由于工业换热设备中管壳式换热器占比重最大, 特别是石化企业占90%的换热设备为列管式换热器, 因此该技术的应用前景十分广阔。如长岭炼油化工厂采用弹簧在

线清洗技术, 选用二台换热器进行对比试验, 从89年3月至90年8月进行了工业试验运行, 得出初步结论: ①加有弹簧插入物的在线清洗换热器比普通光管总传热系数提高32.8%; ②在不同流量下测试, 压降比光管换热器增加0.5~1.3%^[13]。

虽然该项技术有较广的适用范围, 但也受到研究条件和设备本身的限制。加上各种工业换热工质及工艺条件变化很大, 特别是换热界面的污垢系数难于测定, 难以总结出具有普遍意义的经验及设计公式。因此很需要进一步研究具有抗垢性能的强化传热技术, 以适应某些行业如制糖、制盐、制碱和化学工业的能耗降低和换热设备的更新换代的要求, 将热能回收利用的水平进一步提高。

参 考 文 献

- [1] Kern D., Seaton R., "Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling", Brit. Chem. Engin., Vol. 4, No. 5,

- pp.258-262, 1959.
- [2] Melo, L.F., Pinheiro, J.D., "Practical Fouling: Controlling Processes and Deposit Structure", The 8th Inter. Heat Transfer Conf., Vol. 6, pp. 2781-2786, San. Francisco, 1986.
- [3] R.G. Renffltin, "Effectiveness of on-line SPongE Ball Cleaning against Typical Condenser Foulants", ASME Publi., PWR-Vol.6, 1989.
- [4] T. Nosetani et al, "Biofouling Control of Titanium condenser Tubes by New-Type Abrasive Sponge Balls", 1989 National Heat Transfer Conf., HTD-Vol.108, Heat Transfer Equipment Fundamentals, Design, Applications and Operating Problems.
- [5] C. Panchal et al, "Biofouling Control for Marine Heat Exchangers Using Intermittent Chlorination", ASME Publi. HTD-Vol.35, 1984.
- [6] SUNAO IKUTA et al, "Inorganic Peroxides for Heat Exchanger Biofouling Control", the Jt. ASME/IEEE Power Generation Conference, Philadelphia, Pennsylvania-September 25-29, 1988.
- [7] Jochen St. Kollbach, W. Dahm, "Continuous Cleaning of Heat Exchangers with Recirculating Fluidized Bed", Heat Transfer Engineering, 1984, No.4, Vol.8.
- [8] 郑康民, "机械加工表面多孔管抗垢性能的研究", 华南理工大学硕士论文.
- [9] 肖建国, "强化传热管抗垢性能的研究", 华南理工大学硕士论文.
- [10] Yang, S.R., Zai, G.D., "Experimental Investigation on Cleaner/Augmenter in Tube Side of Surface Condensers", Proc. of the 2nd U.K. National Heat Transfer Conference, Vol.2, pp.653-662.
- [11] 肖宏亮, "管内移动弹簧插入物在线清洗及其传热与流阻特性的研究", 华南理工大学硕士论文.
- [12] 凌启酉, 《广东节能》2, 36 (1991)
- [13] 王海清等, "冷换设备在线自动清洗技术", SINOPEC第二届传热研究与换热设备开发交流会.

(上接第26页)

性变化小。聚合产物的颗粒分布对于催化剂颗粒呈较好的复现性。因而易于生产控制和推广使用。

3. 搅拌床和流化床乙烯气相聚合评价研究高效催化剂性能, 结果表明搅拌床乙烯气相聚合装置和工艺, 可以有效地评价研究高效催化剂。

4. 对气相聚合产物的测试分析证实, 均聚物为结晶度65.8~75.4%、熔为点139.6~141.5°C, 无支化度的高密度聚乙烯; 共聚物为结晶度38.7~48.2%、熔点为124.8~127.5°C的线性低密度聚乙烯, 其支化度可达到12%。表明催化剂有良好的共聚性能。

参 考 文 献

- [1] 王海华等, 高等学校化学学报, 1993, 6 (即将发表)
- [2] 王海华等, CN92111570, 9, 1992
- [3] 王海华等, 中山大学学报自然科学版, 1990, 29 (3), 78
- [4] N. Kashiwa; Polymer Bullitin, 1984, 12, 99
- [5] Q. Wu, H. H. Wang, et al; Makromol. Chem, Rapid, Common, 1992, 13, 357
- [6] 徐瑞夫, 高分子通讯, 1958, (4), 201
- [7] 莫志深, 合成纤维, 1981, (3), 52
- [8] T. Ysami, S. Takayama; Polym, J. 1984, 16 (10), 733