

管内在线防垢及强化传热的实验研究

肖宏亮 朱冬生 谭盈科
(华南理工大学化学工程研究所)

[摘要] 以饱和 CaCO_3 为物料,研究加热器管内移动弹簧的防垢、强化传热性能和结构参数以及操作变量的相互影响。文中对防垢和强化传热的机理进行了探讨和实验研究,给出了强化传热和防垢的理论依据。

关键词 加热器 插入物 结垢 强化传热

分类号 TK172; TK124

0 引言

在工业生产工艺过程中,换热设备的传热表面均存在不同程度的结垢现象,特别是涉及蒸发工艺的加热过程,如制糖、制盐、造纸等工业过程,在采用外循环的多效蒸发工艺中,列管式加热器表面的污垢主要成分为 CaCO_3 等,由于工艺过程限制,又不宜采用化学药品清洗污垢,多采用停车机械清洗方法,既延误生产,又耗费大量的人力物力。

目前,在线机械清洗方法有:1.海绵胶球在线清洗技术^[1];2.流化床在线清洗技术^[2];3.自动刷洗系统。此外,移动的螺旋弹簧插入物在线清洗技术,是一项新兴技术,在欧美石油化工界已投入应用^[3],效果较显著。

本文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,以探讨弹簧的结构参数、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。

1 实验部分

1.1 实验装置和流程

泵将配制好的 CaCO_3 溶液在贮罐加热到 57°C 后送入试验段,实验加热后再冷却返回贮罐。试验段采用铜管 $\Phi 22 \times 1.5$,长 2.5m,直接用盐浴变压器大

电流低电压加热法进行实验。

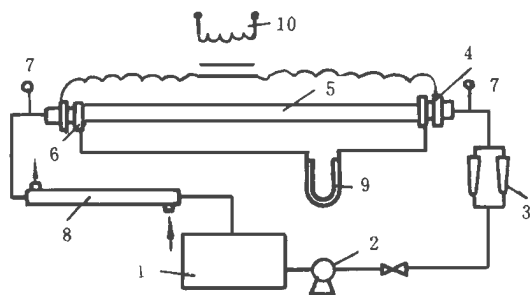


图 1 实验装置

1.储槽 2.泵 3.流量计 4.电热两极 5.实验管
6.测压点 7.温度测点 8.冷却套管 9.压差计

1.2 实验条件

弹簧线径、外径、螺距各取三参数正交设计,构成 9 条不同参数的实验弹簧。编号 1# - 9# 为 9 个试验管号,无插入物的光管为 0#。

系统操作压力: $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$

溶液温度: $57^\circ\text{C} (\pm 1^\circ\text{C})$

溶液配方: $\text{CaCl}_2 - 1.3\text{g/l}$, $\text{CaCl} - 1.35\text{g/l}$,
 $\text{NaHCO}_3 - 1.23\text{g/l}$

流体速度: $0.64 - 1.5\text{m/s}$

1.3 试验方案和数据测定

试验中流体温度用电加热器实施自动控制和调节,流体流速用 2 个阀门进行控制。加热表面温度通过变压器进行调节。为更好地进行数据处理,先进行

* 广东省科委青年科学基金项目资助课题

收稿日期 1995-03-27 修改定稿 1997-06-07

本文联系人 朱冬生 男 1964年生 副教授 博士生 510641 广州

光管的清水实验,验证实验台的数据采集系统,再进行9种弹簧插入物的防垢和强化传热实验。试验中流体的温度用热电偶测出,实验管表面结垢系数通过控制加热壁面恒定功率和所测温度变化计算出来。

2 实验结果和讨论

2.1 流速影响

把各种参数的弹簧插入物 # - 9# 分别置于传热管内进行实验。试验测出流速 1 m/s 与 1.5 m/s 时管内壁结垢值和无插入物的光管进行对比分析。

试验过程中发现,1.0 m/s 流速情况下,仅有少数几组插入物在管程有轻微的移动;在 1.5 m/s 流速下,各组弹簧插入物在管内均有明显的移动。

考察各种装有移动弹簧插入物条件下的传热膜系数与时间的曲线,发现在开始加入盐类之前,曲线保持平坦,此时,弹簧插入物提高管内传热膜系数的现象十分明显。在加入盐类以后,绝大多数传热膜系数与时间曲线陡降(个别略有升高),而后逐渐趋于平坦,达到稳定值,趋于稳定的时间一般 4-5 小时。

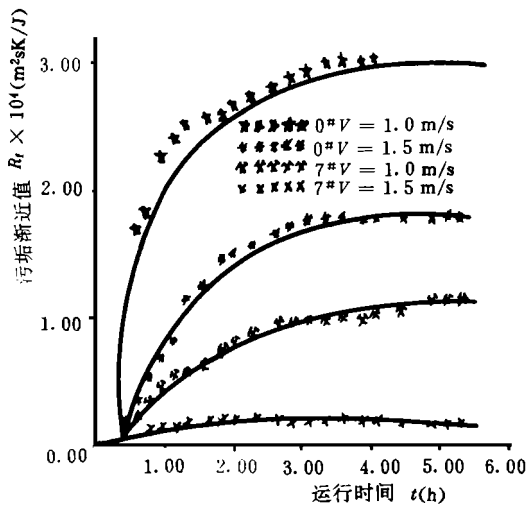


图 2 6# 和 7# 管污垢渐近值 R_f 和运行时间的关系

对比装有插入物的传热管和光管在加入盐类后的传热管内污垢热阻值随时间的变化可知,低流速下,光管和装有插入物的传热管内污垢热阻急剧上升,1-2 小时后,趋向平稳,4-5 小时后才达到稳定状态。高流速下,光管也有较大的升幅,装有插入物的

管内污垢热阻只有轻微的上浮,表现出较好的抗垢性能(参见图 2)。说明弹簧插入物具有较好的强化传热和在线清洗特性。

2.2 弹簧结构参数的影响

选取流速为 1.5 m/s 的情况,对弹簧结构参数:弹簧长度,弹簧线直径,弹簧外直径,螺距等进行防垢效率的对比分析。参见表 1

表 1 管内弹簧插入物参数防垢效率正交分析

试验插入物管号 #	弹簧长度 L	弹簧线直径 d	弹簧外直径 D	弹簧螺距 S	防垢效率
1#	L_1	d_1	D_3	S_2	73.7
2#	L_2	d_1	D_1	S_1	78.2
3#	L_3	d_1	D_2	S_3	83.2
4#	L_1	d_2	D_2	S_1	91.6
5#	L_2	d_2	D_3	S_3	89.9
6#	L_3	d_2	D_1	S_2	95.6
7#	L_1	d_3	D_1	S_3	96.6
8#	L_2	d_3	D_2	S_2	100.0
9#	L_3	d_3	D_3	S_1	93.3
I	2.52	2.35	2.60	2.63	I + II + III 总和 7.92
II	2.68	2.77	2.75	2.69	
III	2.72	2.80	2.57	2.60	
极差 R	.20	.45	.18	.09	

注: 1. 流速 1.5 m/s; 2. 设 8# 插入物防垢效率为 100%

从表 1 可知,就防垢效率而言,弹簧线直径是最重要的因素,其次是弹簧长度,弹簧外直径和螺距。应用正交表分析各单项因素知,适当增大线直径,加大弹簧长度对减少结垢有利。分析各单项因素,比较各个位级之和 I、II、III 的大小可知,适当增大弹簧线直径 d ,即 ($d > d_3$),加长弹簧长度 ($L > L_3$) 对减少结垢有利。本实验中所选取的 9 种型号弹簧插入物中,8# 插入物的因素 ($L_2 d_3 D_2 S_2$) 属于最优范围,拥有数量最多的有利条件,因而总的防垢效果在本实验的 9 种型号中属最好的。从中还可知,弹簧结构参数有待进一步优化。

2.3 移动插入物减少结垢的机理分析

从试验结果可见,本实验所用的弹簧插入物均能不同程度地减少结垢(与光管相比)。减少结垢的原因分析如下: (1) 在恒热流率条件下,插入物的采用,在提高管内传热膜系数的同时,降低了管壁面的温度,降低了污垢生成的速率,减少了污垢热阻。(2) 由于弹簧组件同壁面连续接触产生机械撞击,使壁

面污垢剥落,因而减少了污垢。

利用光滑管内的结垢模型,推导壁面温度对结垢过程的机理模型,较好地解释了弹簧插入物的作

用机理。在 1 m/s 流速的条件下,装置各种弹簧插入物的传热管,最终污垢近值高于 1.5 m/s 流速时的渐近值。

表 2 各种情况下污垢渐近值及防垢效率

管内状态	光管	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
流速 $1.0 \text{ m/s } R_{f1}$	3.0	2.35	2.44	2.30	1.41	1.10	1.58	1.13	1.71	1.37
与光管相比污垢减少百分比/%	/	21.7	18.7	23.3	53.0	63.3	47.3	62.3	76.3	71.0
流速 $1.5 \text{ m/s } R_{f2}$	1.79	1.47	1.39	1.30	1.15	1.18	1.08	1.14	-1.05	1.12
与光管相比污垢减少百分比/%	/	73.7	78.2	83.2	91.6	89.9	95.5	86.6	102	93.3

注: 1. $R_{f1} \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ s K} / \text{J}$ 2. R_{f2} 为表观污垢渐近值。

表 2 列出了各种条件下,装有插入物的传热管内的污垢渐近值。表中所列实验结果表明:

(1) 所采用的各种参数的弹簧插入物,在实验条件下均能不同程度地减少结垢;

(2) 流速增大时,弹簧插入物的移动(振动)性能加强,管内的结垢也进一步减少;

(3) 8# 弹簧插入物在 1.5 m/s 的流速下用于在线清洗模拟试验,发现通入盐水后,传热膜系数轻微上升后,不再下降,其表观渐近值为 $-5 \times 10^{-6} (\text{m}^2 \text{ s K} / \text{J})$,表观防垢效率达到 102.3% ,污垢的热阻为负值,防垢效率大于 100% ,均是不可能的,其物理意义在于:该种弹簧插入物在 1.5 m/s 的流速下具有特别良好的防垢性能。即在防垢的同时在传热表面残留微量的污垢粒子,这些稀疏生成的污垢粒子增加了传热表面的粗糙度,减薄了流体边界层,增加了流体的湍流度,因而促进了传热。这段时期称之为污垢形成的诱导期。这种插入物的特点在于它能维持传热表面上的污垢形成始终处在诱导期以内。

控制结垢的有效方法之一就是使污垢形成过程始终维持在诱导期内,这样,传热膜系数不但不会下降,而且会有轻微的提高,对传热有利。8# 插入物在 1.5 m/s 流速下,实现了上述设想,得到了较满意的效果。

3 结论

(1) 在恒热流率的情况下,比较光管与分别装置有 9 种具有正交设计参数的移动弹簧插入物的传热管,发现装有移动弹簧的传热管的防垢性能均优于光管。

(2) 运用正交分析方法,在试验结果的基础上,发现弹簧各参数对于防垢和强化传热均有一定影响,其中弹簧线径,弹簧外直径和螺距的影响程序依次减弱,指出了提高弹簧插入物防垢和强化传热的研究方向。

(3) 通过移动弹簧插入物防垢和强化传热的机理分析,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。

参 考 文 献

- 1 Renftlin R G. Effectiveness of on-line sponge ball cleaning against typical condenser foulants. ASME public, PW R 1989, 6
- 2 Jochen St, Kollbach, Pahn W. Continuous cleaning of heat exchangers with recirculating fluidized bed. Heat Transfer Engineering, 1984, 3(4)
- 3 Stegelman A F et al. On line mechanical cleaning of heat exchangers. Hydrocarbon processing, Jan, 1983

count. By employing a finite-element flexibility matrix method the authors have drawn up a set of rigidity calculation procedures, providing the relationship between the momentary meshing rigidity variation rate and axial congruence during the axial gear meshing process. On the basis of the rigidity calculation and by utilizing the optimization concept of inner point penalty function method a full set of calculation procedures for gear shape modification was prepared and an in-depth study of the tooth profile modification of helical gears conducted. **Key words** momentary meshing rigidity, tooth profile modification, flexibility matrix, inner point penalty function

管内在线防垢及强化传热的实验研究 = **An Experimental Study of On-line Fouling Prevention Inside Tubes and the Intensification of Heat Transfer** [刊, 中] / Xiao Hongliang, Zhu Dongsheng, Tan Yingke (South China University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4), - 275~ 277

With saturated CaCO_3 serving as a material a study is conducted of the fouling prevention, heat transfer augmentation and structural parameters of a moving spring coil in a heater tube as well as the interrelated effects of operating variables. The paper discusses and presents the experimental study results of anti-fouling and heat transfer intensification mechanism with a theoretical basis for the said results being given, **Key words** heater, inserted object, scale-formation, intensified heat transfer

碳酸钙分解的试验研究 = **An Experimental Study on the Decomposition of Calcium Carbonate** [刊, 中] / Yu Zhaonan (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 278~ 280

By the use of a high-precision thermobalance an experimental study was performed of the decomposition of small particles of CaCO_3 , resulting in a clarification of the effect of particle size, heating rate and impurities on the decomposition of CaCO_3 . The mechanism of the above-cited decomposition was studied with an interpretation given for such phenomena, **Key words** calcium carbonate, decomposition, test

青山烟煤及其燃烧后飞灰中有机污染物分布的研究 = **An Investigation of the Distribution of Organic Pollutants from Qingshan Bituminous Coal and its Post-combustion Fly Ash** [刊, 中] / Xu Minghou, Yan Rong, Long Yuxuan, Hao Liang (Huazhong University of Science & Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4), - 281~ 284

With the help of a GC/MDS system determined from the extractive solutions of 7 hours, 16 hours and 24 hours the sort and content of such a variety of organic pollutants as aliphatic chains, benzene families and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), and obtained are the distribution characteristics of the organic pollutants of Qingshan bituminous coal and its fly ash products. The test results show that there are several kinds of organic pollutants, especially PAHs, in the raw coal itself. The different sorts and content of benzene families in the fly ash will increase while those of the PAHs decrease following the combustion of the raw coal. The rational organization of the combustion process can play a significant role in achieving a decrease in organic pollutants. **Key words** bituminous coal, combustion product, organic pollutants, measurement, distribution characteristics, fly ash

循环流化床气固两相间传热特性的实验研究 = **An Experimental Study of Gas/Solid Interphase Heat Transfer Characteristics of a Circulating Fluidized Bed** [刊, 中] / Zheng Shouzhong, Lu Feng, et al (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(4). - 285~ 288

On a small-sized test stand and by using a dual thermocouple temperature measuring method determined is the temperature of a fluidized-bed layer. The test results show that the gas/solid interphase heat transfer mainly takes place in the lower half portion of the circulating bed. The increase in gas apparent flow speed, the