

# 活性焦传热系数的测定

傅月梅, 刘 静, 唐夕山

(上海克硫环保科技股份有限公司, 上海 201203)

**摘要:**为研究活性焦传热性能,把床层径向传热简化为径向有效导热,将轴向传热看成轴向有效导热和流体流动传热 2 项组成,自制传热系数测定装置,改变扰流气体流速,测定床层轴向和径向温度分布,利用 Matlab 软件,采用正交配置法进行数据处理,通过赋予初值,采用最优化方法求解模型偏微分方程,得出径向有效导热系数  $K_{er}$  及壁给热系数  $H_w$ 。试验结果表明:活性焦有效导热系数约为  $1.39 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,壁给热系数随着颗粒雷诺数的增加而增加。试验测定的壁给热系数与低传热系数材料的壁给热系数经验公式较吻合。

**关键词:**活性焦;有效导热系数;壁给热系数;正交配置;扰流气体

中图分类号:X701.3 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2015)02-0056-03

## Measurement of heat transfer coefficient of activated coke

FU Yuemei, LIU Jing, TANG Xishan

(Shanghai Clear Environmental Protection Technology Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

**Abstract:** In order to improve heat transfer coefficient of activated coke, the radial heat transfer on bed was simplified as effective radial thermal conductivity, the axial heat transfer was considered as two parts which were axial effective heat transfer, fluid flow and heat transfer. The distribution of temperature on axial and radial of bed was determined by changing turbulent flow gas velocity. Radial thermal conductivity and wall heat transfer coefficient were obtained by applying the orthogonal collocation method in giving the initial value. The optimization method was used to solve the model of partial differential equation with Matlab software. The results showed that, the effective thermal conductivity of activated coke was  $1.39 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , the wall heat transfer coefficient rose with the raise of particle Reynolds number. The wall heat transfer coefficient which was determined through test was in agreement with the empirical formula of low heat transfer coefficient material.

**Key words:** activated coke; effective thermal conductivity; wall heat transfer coefficient; orthogonal collocation; turbulent flow gas

## 0 引 言

传热系数是固定床反应器设计及优化的基础数据,对工业反应器操作条件和生产能力的确定、反应器的稳定性、固定床催化剂的设计都至关重要。国内外研究者对传热系数做了大量的研究<sup>[1-12]</sup>,范兆馨等<sup>[1]</sup>测定壁冷式固定床中环形乙烯基乙酸酯合成催化剂床层轴向和径向温度分布,采用拟均相二维模型,采用正交配置法求解模型得到有效导热系数及壁给热系数经验公式;刘玉兰等<sup>[12]</sup>采用稳态法

和非稳态法参数估值法测定了气体静止时氧化铁系催化剂、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和玻璃珠等填充的固定床有效导热系数,但由于传热机理的复杂性及工程的差异性,至今可提供工业应用的传热数据尚不可靠。笔者提出一种适用于干法脱硫技术的传热系数测定方法。解吸塔是活性焦干法烟气脱硫的核心设备,提高解吸塔的传热性能,是进行设备传热强化、节能降耗和提高脱硫技术性能的重要方面。为研究传热性能,进行了活性焦有效导热系数和壁给热系数的研究,以期得到试验规律,对工程设计提供理论指导。

收稿日期:2014-12-15;责任编辑:孙淑君 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2015.02.012

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA060803)

作者简介:傅月梅(1981—),女,江苏常熟人,工程师,硕士,主要从事活性焦干法净化技术工艺研究。E-mail:fuyuemei@aliyun.com

引用格式:傅月梅,刘 静,唐夕山.活性焦传热系数的测定[J].洁净煤技术,2015,21(2):56-58,63.

FU Yuemei, LIU Jing, TANG Xishan. Measurement of heat transfer coefficient of activated coke[J]. Clean Coal Technology, 2015, 21(2):56-58, 63.

## 1 试验部分

### 1.1 试验模型

活性焦的再生过程可以近似视为固定床传热<sup>[1,3,5]</sup>过程,此类固定床的传热主要有轴向和径向2种传热途径。拟均相二维传热模型为目前描述此类传热过程最为合理的模型。该模型将气固二相视为统一体,称为拟均相。为了研究方便,将床内传热综合表示为有效导热方式,把床层径向传热简化为径向有效导热,把轴向传热看成轴向有效导热和流体流动传热2项组成。

$$GC_p \frac{\partial T}{\partial Z} = K_{er} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

气体进口温度及壁温恒定时,边界条件为

$$Z = 0 \text{ 时, } T = T_0 \quad (2)$$

$$r = 0 \text{ 时, } \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (3)$$

$$r = R \text{ 时, } -K_{er} \frac{\partial T}{\partial r} = H_w (T - T_w) \quad (4)$$

式中: $G$ 为气体流量,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $C_p$ 为气体热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$ 为气体温度,  $\text{K}$ ;  $Z$ 为轴向坐标,  $\text{m}$ ;  $r$ 为径向坐标,  $\text{m}$ ;  $T_0$ 为气体进口温度,  $\text{K}$ ;  $R$ 为床层半径,  $\text{m}$ ;  $T_w$ 为壁温,  $\text{K}$ ;  $K_{er}$ 为床层径向有效导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $H_w$ 为壁给热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

### 1.2 试验方法与装置

通过试验测定床层轴向及径向温度分布,利用 Matlab 软件,采用正交配置法<sup>[13-15]</sup>进行数据处理,通过赋予初值,采用最优化方法求解上述模型偏微分方程,得出径向有效导热系数  $K_{er}$  及壁给热系数  $H_w$ ,试验装置和流程如图1所示。

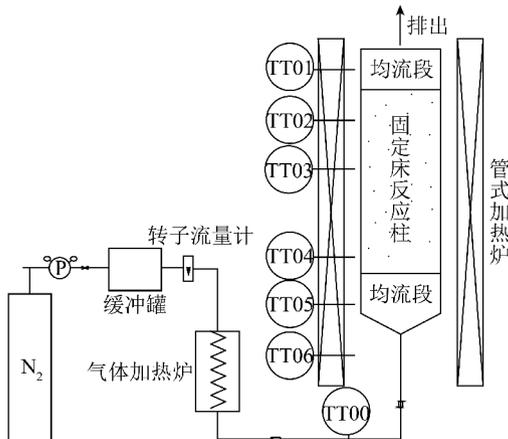


图1 传热系数测定装置

反应器用  $\phi 89 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 、长  $1600 \text{ mm}$  钢管制

成,反应系统由热氮气供给管线、加热系统以及固定床组成。其中试验段长度为  $1000 \text{ mm}$ ,装填活性焦,底部有多孔板支撑物料,底部均流段长  $400 \text{ mm}$ ,出口稳流段长  $200 \text{ mm}$ 。氮气经气体加热炉加热到一定温度进入固定床中,床层内稳定段的进口温度达到所需要的温度,并维持恒定状态,最后经管式加热炉加热,测取温度后放空。固定床自上而下测定5个测温面。为了使实测值与计算值相对应,选用正交配置点作为测温点,测温点(正交配置点)分别为  $0$ 、 $0.199$ 、 $0.445$ 、 $0.662$ 、 $0.834$ 、 $0.950$ 。床层沿轴向分为5个截面,高度分别为  $0$ 、 $150$ 、 $300$ 、 $500$ 、 $800 \text{ mm}$ 。在床层每个截面上正交配置点位置自下而上用3个米字架固定6个Pt热电阻,整个床层不同径向上的温度测定一次完成,不同轴向的温度分布测定通过热电偶的插入深度来调节,固定床温度测点分布如图2所示。

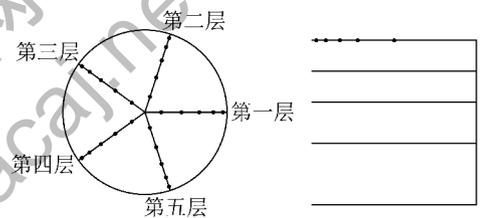


图2 固定床温度测点分布

所用的经验公式计算的壁给热系数为固定床壁面对整个床层的壁给热系数。低导热系数材料的壁给热系数经验公式<sup>[16]</sup>为

$$H_w \frac{d_i}{\lambda_f} = 65 \exp \left( - \frac{4d_v}{d_i} \right) \left( \frac{dt}{L} \right)^{0.2} \left( \frac{d_v G}{\mu_f} \right)^{0.4} \quad (5)$$

式中,  $\lambda_f$ 为气体导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $d_i$ 为反应柱尺寸,  $\text{m}$ ;  $d_v$ 为颗粒尺寸,  $\text{m}$ ;  $L$ 为反应柱有效高度,  $\text{m}$ ;  $\mu_f$ 为气体黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

## 2 结果与讨论

分别调整扰流气体流量  $Q$  为  $0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5$ 、 $2.0 \text{ m}^3/\text{h}$ ,调整条件、温度稳定至要求值,采集并记录各测温点的温度值,采用最优化方法求解得到传热参数,考察扰流气体流量的影响。 $T_w$ 为  $260 \text{ }^\circ\text{C}$ ,入口气体温度  $T_{in}$ 为  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,不同床层高度温度分布如图3所示。

根据图3不同床层高度的温度点数据,利用 Matlab 软件,采用正交配置法进行数据处理,赋予初值,采用最优化方法求解得出径向有效导热系数  $K_{er}$  及壁给热系数  $H_w$  见表1。

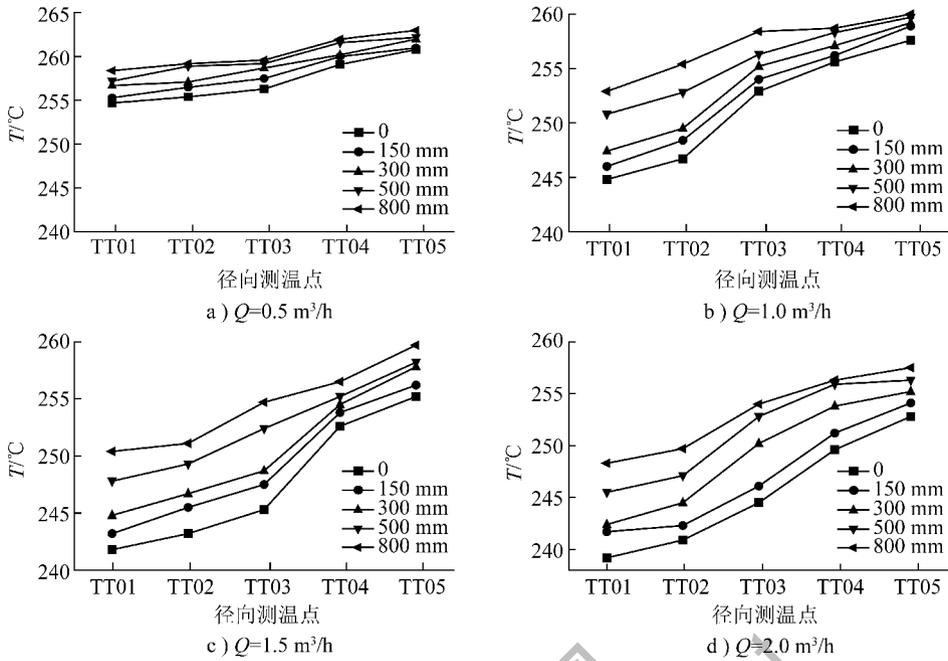


图3 不同床层高度温度分布

表1 不同流量条件下径向有效导热系数及壁给热系数

流量 $Q/$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	径向有效导热系数 $K_{er}/$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	壁给热系数 $H_w/$ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ )
0.5	1.3897	1.5089
1.0	1.3996	2.6593
1.5	1.3886	3.2756
2.0	1.3816	4.2397

从表1可知:活性焦材料的导热系数不会因为扰流气体的加入发生变化,壁给热系数随着扰流气体的加入,呈现递增趋势,在工程现场工况条件允许时可引入扰流气体,并选择合适的流速。

通过传热试验,得到固定床内活性焦的径向有效导热系数约为  $1.39 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,采用低导热系数材料的壁给热系数经验公式估算壁给热系数,结果如图4所示。

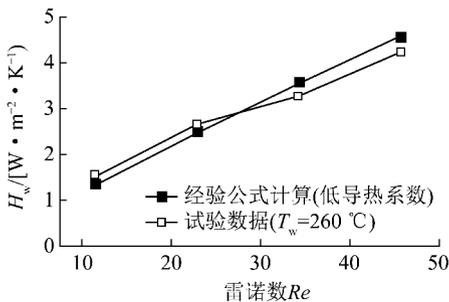


图4 活性焦壁给热系数

从图4可知,试验所得壁给热系数与低导热系数材料的经验公式计算值相近,定量估算结果符合良好。

### 3 结 论

1) 自制传热系数测定装置测量床层轴向及径向温度分布,选用正交配置点作为测温点,利用 Matlab 软件采用最优化方法求解固定传反应器传热模型偏微分方程,计算方便快捷,计算结果可靠。

2) 引入扰流气体后,活性焦床层的有效导热系数变化较小, $K_{er}$  约为  $1.39 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,壁给热系数  $H_w$  随着颗粒雷诺数的增加而增加。不同扰流气体条件下测定的壁给热系数与经验公式计算值相近。工程现场工况条件允许时可引入扰流气体,并选择合适的流速,用经验公式估算活性焦的壁给热系数。

3) 根据测得的有效导热系数  $K_{er}$  和壁给热系数  $H_w$  可确定传热面积和床层内径向温度分布,为再生塔优化设计计算提供理论参考。

#### 参考文献:

[1] 范兆馨,杨运信,朱炳辰,等. 环柱形催化剂当量直径及传热参数的测定[J]. 华东理工大学学报,2002,28(4):333-336.  
 [2] 张和煦. 固定床有效导热系数和壁膜传热系数的计算[J]. 化学工程,1982(1):46-53.

(下转第63页)

硫技术大多为少数国外大公司所垄断。随着国家环保政策的日益严厉,人们环保意识逐渐增强,燃煤脱硫技术研究成果不断涌现。我国的并流氨法工艺、双塔氨法工艺、多元醇复合溶液和复合醇胺溶液吸附工艺具有流程简单、脱硫率高等特点,并表现出良好的工业应用前景和可观的经济效益。未来应创新烟气脱硫原理,研发脱硫技术的多联产工艺或多级脱硫工艺,重点开发生产硫酸铵化肥和硫酸镁化肥等副产品的脱硫工艺,开发新的湿法和干法脱硫剂、催化剂或吸附剂,研究新型辅助脱硫技术,实现我国烟气脱硫技术的飞跃发展。

#### 参考文献:

[1] 孙玮. 氨法烟气脱硫装置及其工艺: 中国, 200410066557. 1 [P]. 2006-03-29.

[2] 杨叔衍, 刘新亚. 双塔式氨法脱硫工艺: 中国, 201010282630. 4 [P]. 2011-01-05.

[3] 魏雄辉, 邹美华, 于学春, 等. 多元醇复合溶液脱除气体中  $\text{SO}_x$  的方法: 中国, 201310682382. 6 [P]. 2014-03-12.

[4] 魏雄辉, 邹美华, 于学春, 等. 复合醇胺类溶液脱除气体中  $\text{SO}_x$  的方法: 中国, 201310481557. 7 [P]. 2014-01-08.

[5] 筱田直晴, 多谷淳, 鬼塚雅和, 等. 排烟脱硫方法: 中国, 87106325 [P]. 1988-06-15.

[6] Kobayashi Takafuru, Yasutake Akinori, Kurisaki Takashi. Flue gas desulfurization device: Japan, 10157478 [P]. 1991-12-21.

[7] 吴忠标, 莫建松, 程常杰, 等. 浓碱双碱法烟气脱硫工艺: 中国, 03141594. 6 [P]. 2004-02-18.

[8] 陈然振. 副产石膏的烟气脱硫技术及装置: 中国, 97108252. 9 [P]. 1999-04-14.

[9] 刘忠生. 一种烟气脱硫方法: 中国, 01114170. 0 [P]. 2003-01-29.

[10] 一之濑利光, 德田君代, 甲斐昭一, 等. 排气脱硫装置: 中国, 96107404. 3 [P]. 1997-02-05.

[11] Hakka Leo E. Removal and recovery of sulphur dioxide from gas streams: America, US5019361 [P]. 1991-05-28.

[12] 彭斯干, 廖康敏. 纯海水工业烟气脱硫方法: 中国, 99114641. 7 [P]. 2000-08-09.

[13] 彭斯干, 唐崇武. 曝气法海水烟气脱硫工艺及其曝气装置: 中国, 95119389. 9 [P]. 1996-11-06.

[14] 小林敬古, 安武昭典, 栗崎隆, 等. 排烟脱硫装置和排烟脱硫设备以及排烟脱硫装置的运行方法: 中国, 200510075598. 1 [P]. 2006-01-04.

[15] 张颀, 张泽, 李雄浩. W型循环流态化的干法烟气脱硫方法: 中国, 03125273. 7 [P]. 2004-04-14.

[16] 范晓丹, 张襄楷. 应用于低浓度烟气脱硫的  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  复合膜: 中国, 200510014668. 2 [P]. 2006-03-01.

[17] 朱彤, 丁杰. 一种烟气脱硝(氮)脱硫剂: 中国, 03136387. 3 [P]. 2005-01-19.

[18] 程祖海, 余文峰. 一种激光烟气脱硫脱硝方法: 中国, 00114677. 7 [P]. 2002-01-16.

[19] 岳建华, 丁杰. 高温等离子体烟气脱硫剂: 中国, 00132191. 9 [P]. 2001-08-15.

[20] 岳建华, 丁杰. 高温等离子体烟气脱硫方法: 中国, 00132192. 7 [P]. 2001-08-15.

[21] 顾璠, 叶丹. 低温等离子体吸附催化烟气脱硫装置及其脱硫方法: 中国, 200410041453. 5 [P]. 2005-03-23.

[22] 黎英豪. 烟气电子化学干法脱硫装置: 中国, 95101395. 5 [P]. 1996-06-05.

[23] 张世超, 陈歆.  $\text{CuO}/\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  纳米可再生烟气脱硫剂及其制备方法: 中国, 200510087042. 4 [P]. 2006-02-01.

[24] 俞乔力, 权田. 电子束湿法烟气脱硫工艺: 中国, 01103123. 9 [P]. 2001-08-29.

[25] 张凡, 姚允升. 半干半湿烟气脱硫与处理方法及其系统: 中国, 01120584. 9 [P]. 2003-02-26.

[26] 卢长柱. 双回料循环流化床半干法脱硫工艺: 中国, 200610170813. 0 [P]. 2007-11-07.

(上接第 58 页)

[3] 刘吉, 刘有智. 固定床内传热参数的估算[J]. 华北工学院学报, 1998, 19(1): 26-29.

[4] 陈裕中, 陈锦文, 王金波. 固定床内传热参数的估计与分析[J]. 化学工程, 1992, 20(1): 12-25.

[5] 谭世韶. 固定床反应器的传热研究[J]. 太原工业大学学报, 1987(3): 41-50.

[6] 季永新. 固定床反应器的传热系数的计算[J]. 南京林业大学学报, 1992, 16(1): 81-85.

[7] 刘吉, 李玉安, 赵培. 固定床反应器传热参数的求取[J]. 高效化学工程学报, 1998, 12(1): 39-43.

[8] 叶长桑, 邢鼎生, 王中来. 应用正交配置法模拟固定床吸附过程[J]. 福州大学学报: 自然科学版, 2001, 29(1): 97-100.

[9] 赵薇. 固定床反应器有效导热系数的研究进展[J]. 小氮肥设计技术, 2002, 23(3): 1-6.

[10] 程振名, 袁渭康. 一个大范围适用的固定床传热参数估计方法[J]. 化学工业与工程, 1997, 14(1): 1-7.

[11] 濮家驹, 温蕴华, 史红勤. 固定床有效导热系数及壁给热系数的试验测定及其关联式[J]. 南京工业大学学报: 自然科学版, 1984(1): 24-35.

[12] 刘玉兰, 吴勇强, 徐志刚, 等. 固定床有效导热系数的研究[J]. 华东理工大学学报, 2004, 30(2): 130-134.

[13] 陈裕中, 王金波, 陈锦文. 用正交配置技术估计固定床内的传热参数[J]. 化工学报, 1990, 41(2): 219-225.

[14] 王中来, 李育伟, 叶长桑. 正交配置表的构造及其在吸附偏微分方程数值解中的应用[J]. 离子交换与吸附, 1998, 14(1): 59-67.

[15] 陈裕中, 赵福龙. 正交配置法及其在计算固定床反应器方面的应用[J]. 石油化工, 1984, 13(1): 58-69.

[16] 朱炳辰. 化学反应工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 154.