

# 流化床气固传热特性的实验研究

(中南工业大学) 艾元方

(华中理工大学) 戴天红 陈长栋 高胜斌 钱壬章

**[摘要]** 通过对流化床气固传热特性的简单分析,依据稳态工况活动段区气体温度分布求取了有效传热系数。实验结果和传统经验式数值吻合,从而论证气固传热特性分析的合理性及计算流化床气固有效传热系数的可行性,为研究流化床气固传热特性提供参考。

**关键词** 流化床 温度分布 气固传热特性  
有效传热系数

**中图分类号** TK124

## 1 前言

流化床良好的混合特性促成了气体与颗粒间良好的传热与传质特性。在流化床传热分析中,由于高速率传热和气固急剧混合,气固温差很小,普遍认为气固传热系数很大,以致于忽略传热热阻。而在有些场合(如颗粒的系统的加热与冷却、热气体速冷以得到有用的反应中间物、流态化干燥、新型并列双室流化床煤气化系统等)就要定量地知道气固传热特性。实际上只是在床层入口处存在气体温度梯度,其余部分是均温的,也就是说在入口处附近传热系数非常大,完成所有的热交换,随后衰减,超过此区域热交换为零。目前,对流化床气固传热的研究报道很少,因此依据实验对流化床气固传热特性加以认识非常必要。

气固流化床内气体与颗粒的两相流动与传热十分复杂,二者之间相互联系,相互影响。目前只能通过半经验半理论的方法或通过实验建立传热准则数之间的关系。文献[2]指出不同的实验条件、数据测量和整理方法导致了 $Nu$ 数非常分散,其数据有上千倍的差异。在非稳态和稳态研究方法中常用的是非稳态法,其实验易于实现,整理出的表观传热系数忽略了气固传热只在入口处附近区域这一事实,认为气固传热在整个床层内发生,数值偏低,反映不了气固传热的实质。稳态法研究获取数据极其艰难,文献[2]只是提供求取有效传热系数的理论途径。文献

[4]定义了有效传热高度,只从理论上揭示气固传热的定性规律,没有充足的实验数据来论证。利用稳态工况活动段区气体温度分布求取反映气固传热特性的有效传热系数的研究报道更是少见,本文在新型并列双室流化床煤气化炉的燃烧床中,连续地注入冷颗粒和卸出热颗粒以保持热稳定状态,测出分布板附近一薄层气体的温度分布来求取有效传热系数,用实验的方法来揭示流化床气固传热特性。

## 2 流化床气固传热特性的简单分析

### 2.1 对气固流化床床层的分析

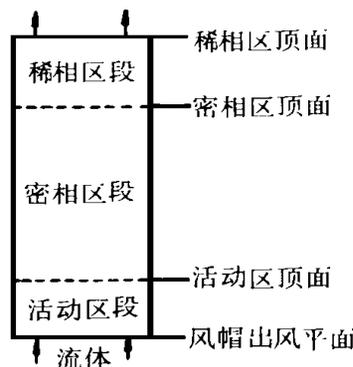


图1 床层分区示意

正确分析气固流化床(床内无埋管)气固传热特性极其重要。本文把床层分为活动段区、密相区和稀相区三个区域(图1)。在稀相区, $T_i$ 变化大,主要是气固和床壁的热交换,气固间的热交换极小,不作本文的研究对象;

在密相区,不计床壁的散热,颗粒急剧混合, $T_s = T_i = T_w$ ,无传热温差;在活动段区(其高度为 $H_a$ ),颗粒往返速度大,忽略其显热变化,表面温度恒定,气固与床壁对流换热相对小而忽略,只是气固间的对流换热。气固传热只发生在此区,反映该区平均气固传热效果的气固传热系数叫做有效气固传热系数。

### 2.2 对热电偶示数的处理

热电偶测点反映什么样的温度说法很多。气体

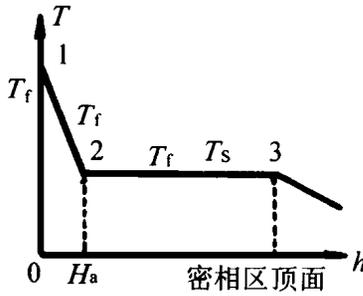


图 2 热偶示数和  $T_s$ 、 $T_s$  的关系图

温度可以通过裸露的热偶测得。颗粒则因直径太小,其温度只能间接地测量。常用方法有:崩塌床层 (collapsed bed, 忽然停止供应流化剂使测点接触颗粒);在床层密相区装裸露热偶;由排气

温度通过热平衡计算得到。肯定地说不同的方法导致不同的计算温差,使得计算结果无法对比<sup>[2]</sup>。实际上热偶测点示数介于  $T_i$  和  $T_s$  之间。本文只从与测点接触的几率大小来考虑;活动段区气体空隙率大,几乎接近于 1,颗粒体积含量相对很小,认为裸露热偶测点始终和气体接触,即测点示数反映气体温度  $T_i$ ;密相区颗粒体积含量远大于活动段区,认为颗粒接触测点的几率远大于气体,测点示数反映颗粒温度  $T_s$ 。在图 2 中线段 1-2-3 即为测点示数曲线

### 2.3 有效传热系数的理论推导

在进行活动段微元段能量平衡分析前对气固特性作如下假设:

- ① 颗粒流型呈返混型,整个床层颗粒温度相等;颗粒表面温度不变;颗粒物性不变;
- ② 气体流型为活塞型;气体及其成分为理想气体;考虑到气体导热系数很小,忽略气体在床层活动段区内的轴向导热。

在离风帽出口高  $x$  处取  $dx$  微元件,气体温度变化为  $dT_f$ , 它的热平衡关系式为:

$$-q_v C_{pv} T_f \cdot dT_f = h_{pfx} \tau_x F dx \cdot (T_i - T_p)$$

式中:  $T_i$ 、 $T_p$  为  $x$  处气体、颗粒温度,但  $T_p = \text{const}$ ,  $T_f$  为风帽出口处气体温度, K;

$q_v$  为气体体积流量,  $q_v = \text{const}$ ,  $\text{Nm}^3/\text{s}$ ;

$C_{pv} T_f$  为气体温度  $T_f$  时的定压体积比热,  $\text{W}/(\text{Nm}^3 \text{K})$ ;

$h_{pfx}$  为  $x$  处的局部气固传热系数,  $\text{W}/(\text{m}^2 \text{K})$ ;

$\tau_x$  为  $x$  处的局部颗粒比表面积,  $\tau_x = 6(1 - X) / (H_s d_p)$ ,  $\text{m}^2/\text{m}^3$ ;  $X$  为局部空隙率

$d_p$  为颗粒直径, m;  $H_s$  为颗粒球形度;

$F$  为床层横截面积,取  $\text{m}^2$ ;

鉴于目前尚无先进的测量技术获取活动段区  $X$  随  $x$  的变化规律,  $X$  暂且取活动段的平均空隙率,即

$\bar{X} = (1 + X_m) / 2$ ,  $X_m$  为密相区空隙率,  $h_{pfx}$  取该段内平均气固传热系数  $\bar{h}_{pfi}$ ,  $\bar{X}$  和  $\bar{h}_{pfi}$  与  $x$  无关;取  $C_{pv} T_f = a + b T_f + c T_f^2$ ,  $a, b, c$  是系数

$$\text{方程式简化为: } - \frac{q_v H_s d_p}{6F(1 - \bar{X})}$$

$$\frac{a + b T_f + c T_f^2}{T_i - T_p} \cdot dT_f = \bar{h}_{pfi} \cdot dx$$

边界条件:  $x = 0, T_f = T_f'$  积分:

$$- \frac{q_v H_s d_p}{6F(1 - \bar{X})} \cdot \left[ \frac{c}{2} T_f^2 + (c T_p + b) T_f + (c T_p^2 + b T_p + a) \log \frac{T_f - T_p}{T_f' - T_p} \right] = \bar{h}_{pfi} \cdot x$$

左边用  $K T_i$  来代替,则  $K T_i = \bar{h}_{pfi} \cdot x$  显然对每个工况的  $K T_i - x$  曲线一元线性回归便可获得该工况的有效传热系数  $\bar{h}_{pfi}$ ,  $\bar{h}_{pfi}$  反映活动段内局部气固传热系数的总体效果。

### 3 实验装置及方法

气固传热实验是在煤气化炉<sup>[4]</sup>的燃烧床内进行的。两床只用无内热源的热惰性石英砂作工作床料,同时石英砂又是载热体,循环运行完成热量传递。颗粒在燃烧床中从高温烟气(兼作流化剂)吸热升温后,在辅助气作用下经气化床回料槽-L阀进入气体床,在气化床中和预热气体(兼作流化剂)热交换放热降温后,在同量辅助气作用下经燃烧床回料槽-L阀回到燃烧床完成一个循环。燃烧床中高温石英砂连续地从燃烧床溢流口溢出,同时气化床中同量低温石英砂从燃烧床回流口流回,达到双床稳定。流化气体和高温柴油烟气在稳压风室中充分混合后经布风板风帽进入床层(图3),与新加入的冷颗粒进行热交换。风帽为侧向水平风口型,开孔率为2.20%,床层横截面积为  $0.2 \times 0.18 \text{ m}^2$ 。所有测点(包括活动段区)温度感温件为  $\Phi 0.5 \text{ mm}$  的镍铬-镍硅 EU-2 型热电偶,温度信号采集使用美国 Hewlett-Packard 公司数据采集控制系统,保证测温准确性。石英砂平均筛分粒径  $d_p$  为  $0.442 \text{ mm}$ ,自然堆积密度  $700 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,实验静止床高  $600 \text{ mm}$ 。柴油为 0 轻柴油。

准确地获取风帽附近区域气体温度分布是稳态法研究有效传热系数的前提,本实验在燃烧床风帽附近区域布置了7个热电偶。方法是:把热偶分别装入陶瓷套管,取出一个风帽,先用细铁丝把热偶固定在风帽柱身上,并使7个测点参差不齐,密集于0-

2 cm 的范围内 (离出风口水平面高度分别为 0, 3, 6, 10, 12, 16, 20mm), 再按原来位置方向把风帽 (连同热偶束) 粘固在布风板上的耐火泥层中。热偶尾线从

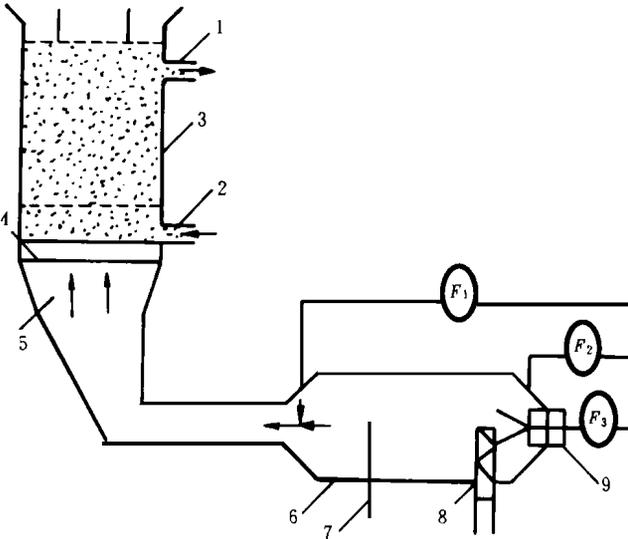


图 3 气固传热实验装置原理图

- 1 燃烧床溢流口 2 燃烧床回流 3 燃烧床本体
- 4 布风板及风帽 5 稳压风室 6 绝热燃烧器
- 7 燃烧温度测点 8 点火装置 9 油枪
- $F_1$  流化气体笛形管流量计  $F_2$  二次风笛形管流量计
- $F_3$  柴油玻璃转子流量计

布风板检修段上引出, 最大限度地减少了热偶束对活动段区流场的干扰

## 4 实验结果和分析

### 4.1 温度曲线和热交换区

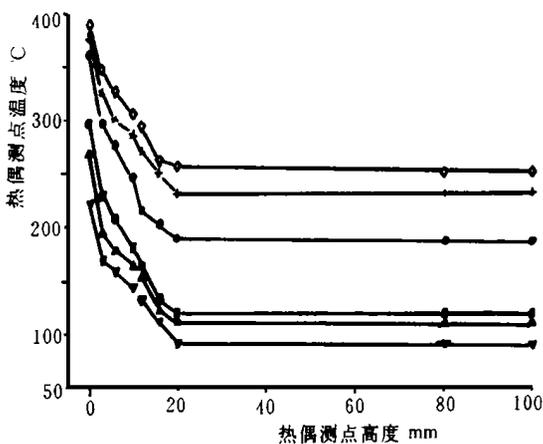


图 4 部分工况床层温度曲线图

图 4 是 30 组工况中的 6 组床层温度曲线。从图可看出, 床层温度 (气体温度) 只在布风板附近很小的范围内 (0-20 mm) 有变化 (高达几百度), 而其它区域几乎没有变化, 十分均匀。在此薄层内气体和颗粒进行热交换, 气固接触良好, 温度急剧下降。只有此薄层存在气体温度梯度, 于此气固完成所有热交换, 这就是活动段区; 在高于此区的床层尽管气固接触良好, 但因气固间无温差, 热交换为零。实验静止床高 600 mm, 属深床范围, 活动段区较为明显。文献 [3] 指出, 活动段高度很少超过颗粒直径的几十倍, 与床层膨胀高度相比要小得多, 其值依赖于流体速度颗粒大小和宽度外, 还依赖于床的几何特性、活动区域内颗粒的存在以及布风板的构造。实验曲线和它的结论一致, 从而证明了气固传热特性分析的正确性及有效传热系数理论推导的可靠事实。

### 4.2 有效传热系数的整理

图 5 是 30 组工况中 9 组有效传热系数整理曲线。从中可看出计算出的传热系数不是很大。尽管考虑气体组成及物性变化, 并且在 1 和密相区空隙率  $X_m$  中取二者平均值, 提高了结果的准确性, 但此平均值比实际的平均空隙率相差还很远,  $\bar{X}_m$  值小是  $\bar{h}_{pt}$  偏低的最主要因素。另外线段的斜率基本上由风帽出口处 2-4 个测点位置及其测取的温度决定 (这几点后, 温度曲线渐趋于水平, 温度梯度急剧衰减。) 因实际测点体积大, 位置高度读数偏高, 拉平了温度曲线, 降低了温度梯度, 结果也降低  $\bar{h}_{pt}$ 。

### 4.3 实验结果和传统经验式的比较

受操作范围限制, 实验工况的  $Re_p$  只能在 5-28 之间。目前尚无真实结果可对比, 只能和经验式<sup>[2]</sup>  $Nu_p = 0.03Re_p^{1.3}$  对照 (图 6)。

式中:  $Re_p$  是雷诺数,  $u_0 d_p / \nu$ ;  $\nu$  是气体运动粘度,  $m^2/s$ ;  $u_0$  是气体操作速度,  $m/s$ ;

$Nu_p$  是气固传热努谢尔特数,  $h_{pt} d_p / \lambda_g$ ;  $\lambda_g$  是气体导热系数,  $W/(m \cdot K)$ ;

可看出实验所得  $Nu_p$  与经验式误差不超过 30%, 和经验式反映的规律完全一致。这说明本文的传热特性分析是正确的, 30% 的误差是与实验手段的粗糙和传热方程式分析时所作的假设所带来的系统误差有关。

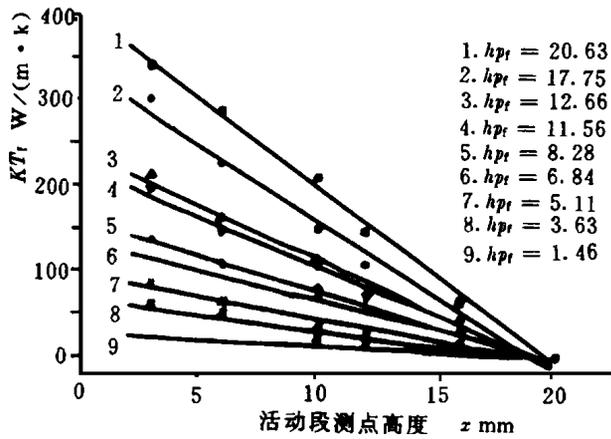


图5 9组工况有效传热系数整理图

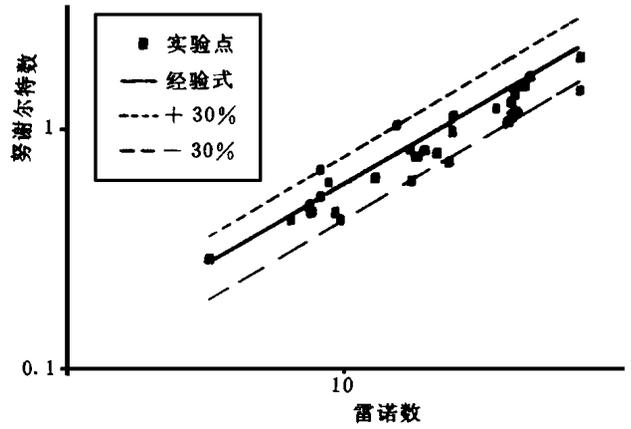


图6 30组实验结果与传统经验式的比较图

### 5 结论

(1)流化床床层温度除床层入口处的一很小区域外的密相区内温度十分均匀,气体温度的变化在很小的活动段高度(本文小于 20 mm)内完成,流化床气固传热就发生在此区域。

(2)可以对流化床气固传热特性进行简单的分析,并根据稳态工况活动段区气体温度分布求出反映气固传热特性的有效传热系数。本文 30组工况得出的有效传热系数在经验式的 0.7~ 1.3倍之间,规律和经验式一致,故本文的传热特性分析是正确的。

(3)要精确得到反映活动段内平均气固热效应的传热系数,必须用更先进的实验手段准确地测出活动段温度场和空隙率定量变化规律。

### 参考文献

- 1 Daizo Kunii, Octav e Levenspiel Fluidization Engineering, Butterworth\_ Heinemann, 1991
- 2 [日]国井大藏, [美] O.列文斯比尔等.流态化工程,石油化学工业出版社, 1977
- 3 [英]戴维森, J. F.哈里森编 D.流态化.北京: 科学出版社, 1981
- 4 杜一庆, 栗志等.气固流化床流体与颗粒的传热研究.锅炉技术, 1996(6)

作者简介 艾元方 男 1968年生 硕士,现在从事制冷空调专业教学科研工作.已发表论文 8篇. (通讯处: 410083 长沙市中南工业大学热能工程系)

(孙显辉 编)

### 新研制的低压汽轮机叶片

据“火力原子力发电”1999年 11月号报道,为改进装置的效率和可靠性,日本东芝电力公司新研制了低压汽轮机的长叶片。

末级叶片设计有连续的耦合结构,提供了明显的阻尼和模态抑制。在流道设计中应用了考虑到粘性的计算流体动力学。

末级和次末级中的叶片被设计成具有减震式叶片的连接结构,以便改进从干蒸汽到湿蒸汽过渡区域内针对腐蚀环境的可靠性。

详细介绍了该公司 660 860 914 1 016 1 067 1 219 mm一直到用于 1050MW 汽轮机组的 1 321 mm 长叶片的设计研制及其性能。

文章中也叙说了防蚀保护技术,如火焰硬化和自保护。(思娟 供稿)

### 烧劣质燃料的燃气轮机前景看好

“Modern Power Systems”1997年 12月号报道,现代燃气轮机技术已开始渗入基于洁净煤和炼油厂残渣的电力生产市场。

IGCC(整体煤气化联合循环)和 PFBC(增压流化床燃烧)是促成燃气轮机向烧劣质燃料过渡的先驱。

此外,在今后十年内,地下煤的气化和 EFCC(外部燃烧联合循环)也可能成为燃气轮机的相关技术。

按照瑞士 IMTE公司的研究,上述全部技术很可能在要比以前预期的短得多的时间内出现。

(思娟 供稿)

流化床锅炉水冷绞龙冷渣器的试验研究 = **Experimental Study of a Water-cooled Spiral Conveyance Type Ash Slag Cooler for a Fluidized Bed Boiler** [刊,中]/Chen Hanping, Lu Jidong (Central China University of Science & Engineering) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 264~266

On the basis of the industrial operation and testing of a water-cooled spiral conveyance type ash slag cooler an analysis is conducted of the movement pattern of ash slag particles in the water-cooled spiral conveyer, and a formula for calculating the ash slag transport quantity given along with a heat transfer factor. Moreover, an analytical exploratory study of the ash slag transport and heat transfer characteristics has brought forth a number of useful conclusions and provided a major basis for the research and development, design improvement and wide application of such ash slag coolers. Key words water-cooled spiral conveyer, particle movement, ash slag transport, heat transfer characteristics

流化床气固传热特性的实验研究 = **Experimental Study of a Fluidized Bed Gas/Solid Heat Transfer Characteristics** [刊,中]/Ai Yuanfang, et al (Southern China Polytechnical University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 267~270

An effective heat transfer factor has been derived through a simple analysis of fluidized bed gas/solid heat transfer characteristics and on the basis of the gas temperature profile of a steady-state operating condition active region. The experimental results are in good agreement with traditional empirical values. This justifies the rationality of the gas/solid heat transfer characteristics analysis and the feasibility of calculating a fluidized bed gas/solid effective heat transfer factor, thus providing helpful guidance for the study of fluidized bed gas/solid heat transfer characteristics. Key words fluidized bed, temperature profile, gas/solid heat transfer characteristics, effective heat transfer factor

PG9171E燃机余热锅炉的改造设计 = **Modification Design of a Heat Recovery Boiler for PG9171E Gas Turbine** [刊,中]/Ye Jianfei, Zhang Xiaohong (Shenzhen Nanshan Cogeneration Power Co. Ltd.) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 271~273

This paper describes the modification design of a heat recovery boiler for a large-sized gas turbine. The design features low weight, small physical size, fine cost effectiveness, low cost and innovative technology. Derived from engineering practices these design approaches can serve as a guide during the design of heat recovery boilers for use on gas turbines. Key words gas turbine, heat recovery boiler, modification design

热力系统数学模型自由度分析 = **Degree of Freedom Analysis of a Mathematical Model for a Thermodynamic System** [刊,中]/Zhou Yuyang, Hu Niansu, Fan Tianjing (Wuhan University of Water Resources and Electrical Power) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 274~276, 279

By utilizing the conception of the degree of freedom the authors have performed a systemic analysis for a thermal power plant thermodynamic system, presenting a method for evaluating the degree of freedom of a physical stream unit model and structure model as well as for determining decision variables. The above-cited method can be employed for the numerical characteristics analysis of on-line flow sheet analog calculation. Key words thermodynamic system, degree of freedom, flow sheet simulation

旋流燃烧器壁温计算数学模型 = **A Mathematical Model for Calculating the Wall Temperature of a Swirl Burner** [刊,中]/Sun Zhigao, Zhang Yongfu (Southeastern University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 277~279

A brief description is given of a mathematical model for the axial wall temperature profile of a swirl burner. The use of this model allows one to evaluate the relationship between the burner outlet wall temperature and furnace temperature. The rationality of the mathematical model has been verified through a number of tests. Key words burner, wall temperature, radiation, mathematical model