

高温流化床中埋管传热 控制热阻的试验研究

阎维平 (华北电力学院)

〔摘要〕本文给出并分析了高温流化床中水平埋管的表面温度及粉末床料对埋管外侧传热系数影响的实验结果。结果表明,传热系数与表面温度密切相关,但相关程度取决于颗粒粒径及筛分范围。填加粉末床料使传热系数增大,但增大的幅度也与控制热阻有关。

关键词 高温流化床 埋管传热系数 表面温度 颗粒粒径

分类号 TK226.66

1 前言

在流化床技术的发展中,最重要的课题之一是流化床埋管传热的研究。现有文献已报导了大量的试验研究结果,建立了各种各样的传热机理模型以及推荐了不少的传热系数经验关系式。但比较这些经验关系式可发现,所估计的传热系数的差别之大有时是惊人的。虽然大多数实际运行的流化床都是在高温下工作的,但是,由于试验条件的恶劣难度,绝大多数的试验研究都是在常温流化床中进行的。所有的经验关系式的定性温度都取为床温,无一考虑到传热表面对传热系数的影响。因而,由于各个研究者的试验条件不同会导致表面温度的差异,以及所采用的整理试验数据的方法不同,这些因素很可能是造成以往经验关系相差很大的主要因素之一。另外,在实际流化床过程中,床料常为宽筛分,粉末床料常占一定的比例,对流化床内传热的控制热阻的影响很大。所以,采用表面

温度不同的换热埋管及添加不同比例的粉末进行这方面的试验研究,对深入了解埋管传热处理其控制热阻是有益的。

2 试验方法

试验是在截面直径为188 mm的不锈钢筒体制成的高温流化床中进行的。床体外部包有保温层,上部有截面扩大的悬浮段,出口布置有旋风分离器。布风板为多孔板式,由6 mm厚不锈钢板加工770个直径1 mm,间距6 mm的小孔制成,开孔面积为2.2%;空截面速度为1 m/s时的压降为3000 Pa。空气由一台罗茨风机提供,床温在250℃以下时由电热装置加热流化床空气得到;250℃到700℃由在风室中直接燃烧丙烷气体而得到。

埋管传热系数是在准稳态条件下,由测定厚壁水平埋管的径向热流而获得。为了获得不同的传热表面温度,采用测量段为不同

收稿日期 1993-11-11

本文联系人 阎维平 男 39 副教授 071003 河北保定

材质的两种埋管,分别为不锈钢和铜。因为二者导热系数的差别,在管内工质流动条件相同时,表面温度可相差 100 ℃左右,足以验证表面温度的影响。传热表面温度由径向所测得的两点温度外推而得。埋管传热测量段为

60 mm 长,由轴向水流冷却,埋管结构见图 1。埋管水平置于床中心,与布风板距离为 150 mm,沿床层高度布置六只热电偶以测定床温。

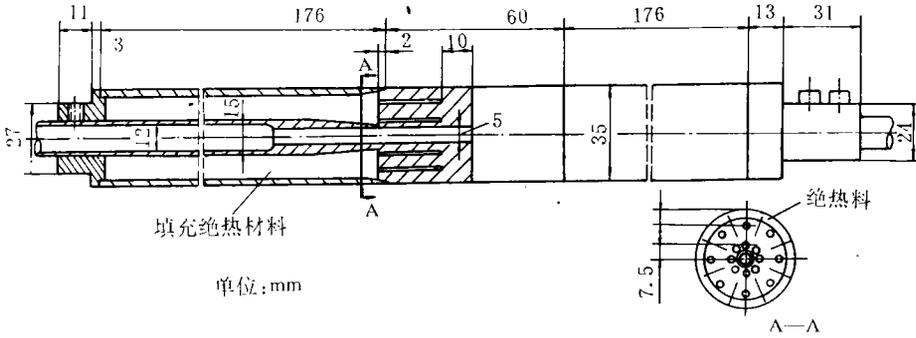


图 1 传热埋管结构示意图

试验中使用四种不同平均粒径和筛分宽度的石英砂床料,并用下式确定其平均直径。

$$\bar{d}_p = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}}$$

有关床料的性质在表 1 综合给出。

表 1 床料数据

平均粒径 mm	筛分范围 mm	密度 kg/m ³
1.43	-2.36+0.85	2630
0.62	-0.85+0.425	2650
0.57	-1.4+0.3	2620
0.095	-0.15+0.064	

前两种为窄筛分床料,后一种为宽筛分,粉末床料仅作为添加用。最小流化速度是在不同的床温以不同的初始混合状态下,根据实测的床层压降和流化速度关系图确定的。

最小床层空隙率由不同温度下测定的最小流化速度带入尔贡(Ergun)方程间接求出。静止床层高度大约为 200 mm。

为测定传热系数,在测量段的 8 个扇形面上沿径向安装 16 个镍铬—镍铝热电偶,热电偶保护套外径为 1.5 mm,嵌入深 20 mm 的孔眼中,端部填有高导热率胶以保证良好接触。在温度较低,特别是在铜埋管的情况下,试验结果的精确度受限于所能测到的径向温度差。最小只有 4 ℃。所有测温热电偶与带有冷端补偿的数据采集器联接、测量、监视、数据处理及显示打印均由一台微机控制,每 60 秒对所有温度测点快速扫描一次,并由计算机贮存、处理。为了减小测量误差以及传热表面受气泡和颗粒交替复盖而使温度波动的影响。一般至少取 10 分钟内的 10 次采集数据计算结果的平均值。粉末床料的添加均采用预混的方式,但存在着粉末携带损失的问题,特别是在大颗粒床料中添加粉末时较为严重,试验中,记录旋风分离器下收集的粉

末重量,并依此计算试验前后的准确的粉末比例,若粉末损失过多,则试验无效。

3 试验结果及分析

为便于整理试验数据,并可与以往的经验关系式相比较,本文全部采用埋管外侧最大传热系数随床温变化的关系来整理试验结果。最大传热系数是由传热系数一流化速度曲线的最大值确定的,其典型结果见图2。图3~图6给出试验测得的三种粒径的颗粒在不同粉末比例下的两种埋管的外侧最大传热

系数随床温变化的规律,图7为两种不同埋管的表面温度差值随床温变化的规律,数据取自粒径为0.62mm的流化床中的试验结果,其它情况大同小异。

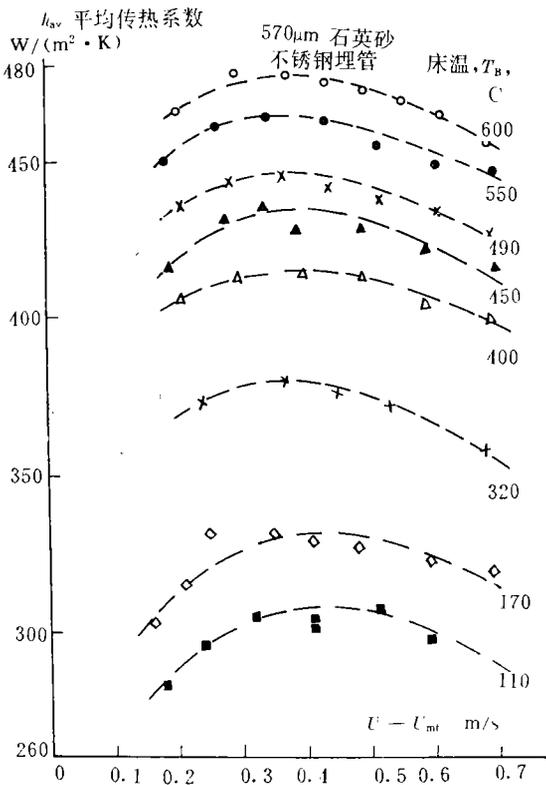


图2 确定埋管最大传热系数的典型实例(不锈钢埋管)

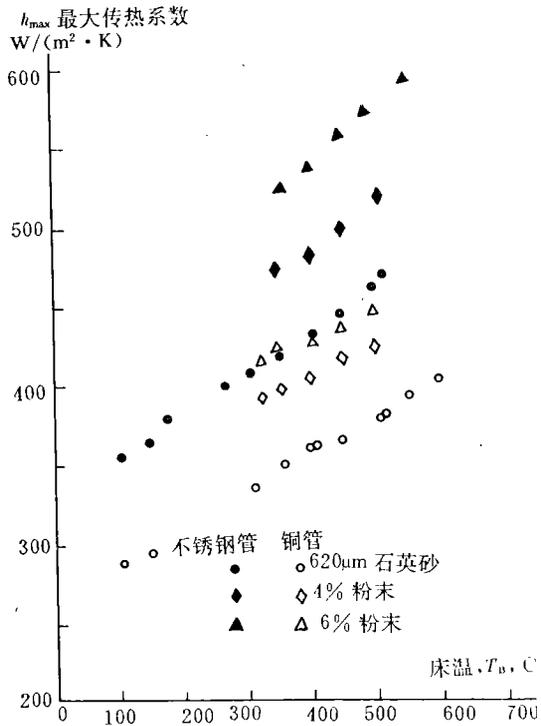


图3 不同粉末(95 μm)比例时两种埋管的最大传热系数比较(基本床料为620 μm石英砂,粉末比例分别为4%和6%)

试验结果表明,表面温度对埋管外侧传热的影响程度取决于床料的粒径及颗粒的筛分范围。在平均粒径为0.62mm的窄筛分床料流化床中,不锈钢埋管的传热系数明显大于铜埋管的传热系数(图3),这可解释为前者表面温度大大高于后者(图7),从而导致紧邻表面处较高的气体导热率,降低了表面传热热阻。而在平均粒为0.57mm的宽筛分

床料的流化床的传热试验中惊奇地发现,在床温为 550℃左右时,尽管不锈钢埋管与铜埋管的表面温度之差约达 200℃,二者的传热系数的值却很接近(图 4)。这一结果可以证明,对于宽筛分床料的流化床来说,在紧邻表面处通常起传热控制作用的气体导热率并

大或窄筛分的颗粒,其热时间常数比停留时间要大。颗粒内的温度几乎可以忽略,表面温度只能影响到紧邻表面附近的流化颗粒。而对粒径较小或宽筛分颗粒,其时间常数比它们在表面的停留时间小得多。表面温度的影响范围大大向床内发展。因此,传热过程由乳化相的热物性所控制。以往人们对流化床中浸埋表面传热的两大类模型—单颗粒模型和乳化团模型适用范围的分析也间接地说明了这一点。

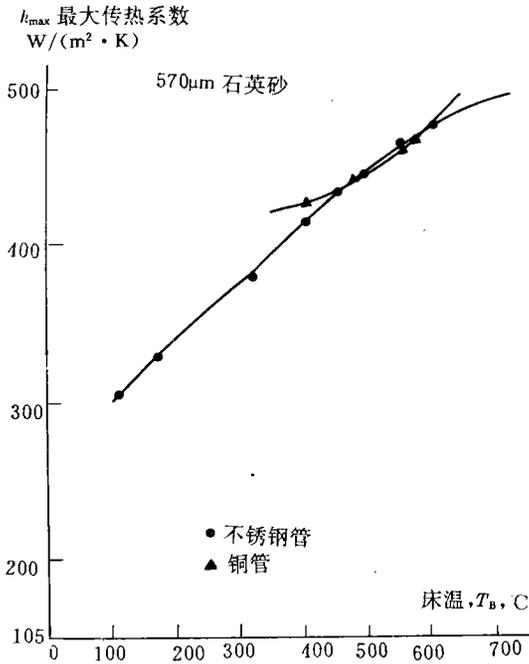


图 4 在宽筛分床料中(570 μm)两种埋管的最大传热系数比较

不重要。说明传热过程的控制热阻不在邻近表面处,乳化相的热物性要重要得多。面对窄筛分床料的流化床来说,传热的主要热阻是在换热表面和紧邻表面的颗粒之间。文献^[1]认为,流化颗粒与浸没受热面间传热过程的控制热阻取决于颗粒本身的热时间常数与颗粒在表面处停留时间的相对大小。对粒径较

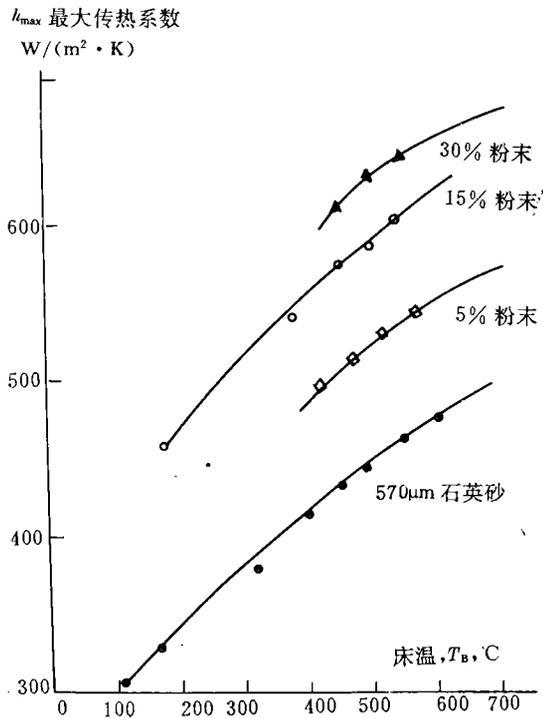


图 5 不同粉末比例对最大传热系数的影响(不锈钢管)(基本床料为 570 μm 砂,粉末比例分别为 5%, 15%, 30%)

企图进一步验证图 4 所示的宽筛分床料的试验结果,又进行了窄筛分床料(0.62 mm)流化床中添加粉末床料(4%~6%)的传热试验,期望随着筛分增宽,传热的控制热阻

由紧邻表面处移向床内,因而两不同埋管的传热系数应趋于接近。但试验结果并没有达到期望的情况(图 3)。这也许可以归结于两种床料的筛分分布不同,对平均粒径为 0.57 mm 的颗粒是连续分布,而后者是明显的二元不连续分布,但有待于进一步的试验研究加以证实。

随床温的升高两种埋管的传热系数的差值也应依表面温度变化的趋势而增加。对此还无令人信服的解释。

变化添加粉末床料的比例对不同粒径及筛分范围床料的埋管传热系数的影响可见图 3~图 6。在所有几种试验的情况下,无论何种埋管,传热系数总是随粉末比例的增加而增大。可以预料,在大颗粒或窄筛分床中添加一定量的细小颗粒会导致床层空隙率的减小,因为可以认为细小颗粒充填在大颗粒之

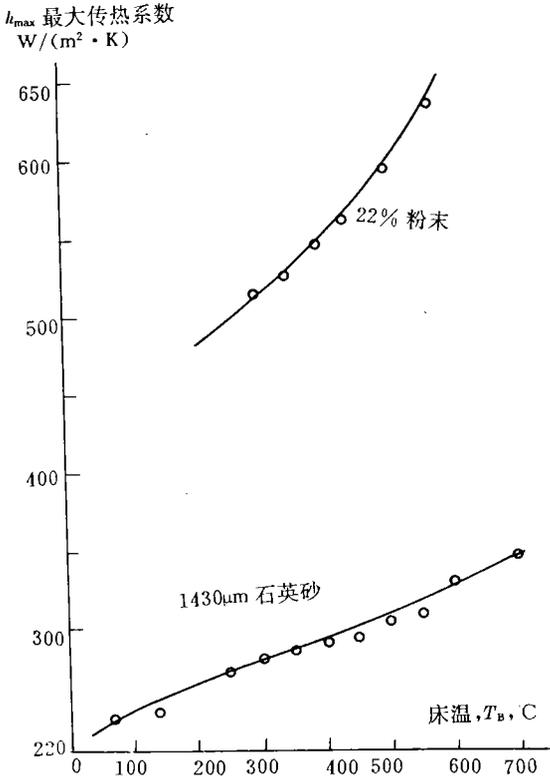


图 6 在大颗粒(D组,1430 μ m)流化床中添加 22% 的粉末(由不锈钢管得到)

应当注意,对两种不同埋管来说,其表面温度随床温变化的规律明显不同(见图 7)。这显然是取决于材料本身的热物性不同。而传热系数随床温的变化关系却很相似(图 3~图 6)。可以认为:如果气体导热率是紧邻传热表面处控制传热过程的唯一因素。那末

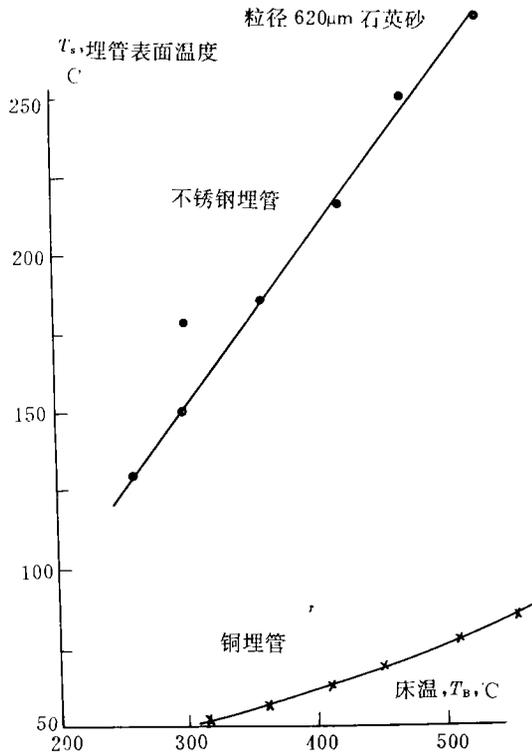


图 7 埋管表面温度随床温变化的规律

间。结果粉末颗粒会削弱相同气流的湍流强度,从而可能减小相间气体对流传热分量(按 Botterill 分析的传热机理⁽²⁾);同时,添加粉末颗粒的另一个结果是由于床层空隙率的减小

而增加了乳化相的导热率,从而增大了颗粒对流传热分量,在紧邻换热表面处,由于粉末颗粒的填充,气体间隙大大减小,固体颗粒的导热率又比气体高得多,所以表面处的热阻也会大大减小,因此,在同等的床层运行条件下,添加粉末床料会得到较高的热流量。

比较图 5 和图 6 的试验结果发现,当粉末比例大约为 20% 时,对床料平均粒径为 1.43 mm 的流化床来说,尽管粉末颗粒会大大削弱相间湍流强度而减小相间气体对流传热分量(对于 Geldart D 组颗粒,此分量占相当的比例^[3])。传热系数仍增大达 50% 左右;而对平均粒径为 0.57 mm 的床料仅增加约 25%。与 0.57 mm 的床料相反,在 1.43 mm 床料流化床中埋管传热由表面热阻控制,所以传热系数的增加可部分地归于表面热阻的减小;由此又导致乳化相重要性的增加,因此还部分地归于乳化相热阻减小的结果,而对 0.57 mm 颗粒来说,由前面分析可得,埋管传热过程是由乳化相的热物性控制的(图 4),所以传热系数的增加主要归于乳化相热阻的减小,故增加幅度要小得多。

试验中存在粉末颗粒携带损失问题,特别是在粒径为 1.43 mm 流化床中添加粉末的试验过程中,有些试验甚至由于大量粉末的损失而无法进行。但令人惊奇的是,当 1.43 mm 床料中粉末比例增加至 30% 时,粉末携带损失的速度在长达 5~7 小时的连续试验中逐渐降低,很快稳定在 22% 左右而不再明显降低;而当粉末颗粒的比例分别为 20% 和 10% 时,粉末在流化床升温过程中就很快损失至(1~3)%。这一结果好象与 Guha 等人^[4]的试验研究一致;他们发现,当粉末在床内达到某一平衡时,携带停止,可以认为粉末此时均匀地填充在大颗粒之间,并达到某一饱和状态,限制了粉末颗粒的运动范围。

4 结 语

目前,由试验数据整理传热系数或计算埋管传热量的常用方法有两种,两种方法都基于定义式 $Q = hF\Delta T$, 差别在于所定义的温差不同,一种是 $\Delta T = T_b - T_w$ 即床温与壁温之差,另一种是 $\Delta T = T_b - T_f$, 即床温与工质平均温度之差;相应地,前者的 h 为流化床层与管外侧间的换热系数,后者的 h 为总传热系数,国内在流化床锅炉埋管传热计算中采用后一方法。

但是,由本文试验研究的结果可见,当 $\Delta T = T_b - T_f$ 相同时,由于管材不同而造成的壁温不同可以引起传热系数的明显变化,后一种方法不能考虑这一影响。当定义 $\Delta T = T_b - T_w$ 时,用壁温 T_w 考虑了各种因素的影响,整理所得的传热系数为管外侧的传热系数,所以在实际设计计算中所确定的受热面积或传热量也更合理。

此项工作是在英国伯明翰大学化工系的 J. Botterill 博士指导下完成,但所述的某些观点由本文作者负责。

参 考 文 献

- 1 Gloski D, Glickstan L R, Decker N. Thermal resistance at a surface in contact with fluidised bed particles. *Int J heat mass transfer*, 1984, 27:599~610
- 2 Botterill K S M. *Fluid bed heat transfer*. London: Academic Press, 1975
- 3 Botterill J S M. Factors affecting heat transfer between, gas-fluidised bed and immersed surfaces. *Powder Technology*. 1984, 39: 177~189
- 4 Guha S K, et al. Mechanisms of elutriation from fluidised beds. *Canadian J. of Chemical Engineering*, 1972, 50: 602~607

flow as well as horizontal tube diameter on the operating performance of the pneumatically controlled L valve slag removal mechanism. **Key Words**: *pressurized fluidized bed boiler, slag removal mechanism pneumatic control*

- △ **An Experimental Study of Embedded Tube Heat Transfer and Heat Resistance Control in a High-temperature Fluidized Bed**……Yan Weiping. (*North China Institute of Electric Power*) **Journal of Engineering for Thermal Energy & Power**, 1995, 10(1): 25~30

Presented and analysed in this paper is the surface temperature of a horizontally embedded tube in a high-temperature fluidized bed and the experimental result regarding the effect of power bed material on the embedded tube outer side heat transfer coefficient. It has been shown that the heat transfer factor is closely related to the surface temperature, but the degree of correlation depends on the particle diameter and sieve range adopted. The adding of powder bed material will lead to an increase in heat transfer coefficient, but the degree of increase is also related to the controlled heat resistance.

Key words: *high-temperature fluidized bed, embedded-tube heat transfer coefficient, surface temperature, particle diameter*

- △ **The Effect of Tertiary Air on In-furnace Thermal Load Distribution**……Guo Hongsheng, Xu Tongmo (*Xi'an Jiaotong University*) **Journal of Engineering for Thermal Energy & Power**, 1995, 10(1): 31~35

An experimental study has been conducted of the thermal load distribution in a tangentially fired boiler furnace with burners installed at the four corners of the boiler. The variation of the thermal load distribution is compared for cases with or without the use of tertiary air. With the help of a self-made radiation type heat-flux meter the test has been performed on a small-size hot-state simulation test rig with lean coal of Tongchuan serving as the test fuel. The test results have shown that the injection of tertiary air can lead to a quickening of the damping tempo of the infurnace thermal load along the furnace height. **Key words**: *radiation heat transfer, combustion*

- △ **The Study and Application of Self-forming Type Coal for Industrial Boilers**……Hui Shi'en (*Xi'an Jiaotong University*) **Journal of Engineering for Thermal Energy & Power**, 1995, 10(1): 36~40

With a view to solving the problem of an increasing amount of fine coal dust, fly ash and unburned coal siftings loss and serious atmospheric pollution the author has proposed the fabrication of a type of self-forming coal and its combustion mode. As a result of a great deal of experimental investigations the main factors affecting the self-forming coal without binding agents have been ascertained. The said coal has found wide applications in industrial production and undergone further experimental verification in its practical use. **Key words**: *industrial boiler, self-forming coal, study*

- △ **Some Comments on the Feedwater Deaeration of Small-sized Industrial Boilers**……Gao Yang (*Beijing Petro-Chemical Engineering Co*) **Journal of Engineering for Thermal Energy & Power**, 1995, 10(1): 41~44 **Key words**: *boiler, deaeration, thermal deaeration*

- △ **An Analytical Solution of Irreversible Aerodynamic Parameters of Variable Specific Heat**……Yu Qing, et al. (*Harbin Institute of Technology*) **Journal of Engineering for Thermal Energy & Power**, 1995, 10(1): 45~48