

# 循环流化床传热研究的综述

董 凡 温 龙 (西安交通大学)

〔摘要〕 本文综述了关于循环流化床床内介质与受热面之间传热的主要研究成果,分析了循环床操作参数对传热的影响规律和各种传热计算关联式及其使用条件,并对研究中存在的问题和今后的研究方向提出了看法。

关键词 循环流化床 锅炉 传热 颗粒团

## 一、前 言

循环流化床(简称循环床)燃烧技术兼有煤粉燃烧和鼓泡床燃烧技术的长处,摒弃了鼓泡床扬析份额高、燃烧效率低、难于大型化等缺点,已经成为一种新型的锅炉燃烧技术。

1985年,西德Lurgi公司在Duisburg建成了蒸发量为270 t/h的第一台循环床锅炉并运行成功。从那时起,各个工业国家都在积极开发这项先进的锅炉燃烧技术,并相继投运了一些型式不同的循环床锅炉〔1〕。运行实践表明:循环锅炉具有燃烧效率高、燃烧筛分范围宽、负荷调节比大以及给煤点少、易于实现大型化等优点,是锅炉技术发展的重要方向之一。

然而,尽管循环锅炉得到了迅速发展,单机容量不断增大,但是在设计和运行方面还处于经验摸索阶段,各种数据仍很不完整,特别是对于循环床内介质(物料和气体)与受热面之间的传热(简称循环床传热)及其计算问题,现在仍然是众说纷纭。因此,有必要对循环床操作参数对传热的影响规律和现已提出的各种传热计算关联式及其使用条件作出系统分析,为进一步发展和在

工业上应用可靠的循环床传热计算方法奠定基础。

## 二、循环床的传热机理

循环床的传热机理非常复杂,由于实验手段的限制,对其认识仍停留在假说阶段,目前人们普遍接受的是颗粒团更新传热理论。

在较高的气速作用下,循环床床内物料在运动中聚合成许多颗粒团,而这些颗粒团又时而变形、时而分解、时而又聚合成新的颗粒团。因此,循环床床内介质可以看作是由颗粒团和含有少量分散颗粒的气相组成〔2〕。就整体而言,循环床床内介质的流动状态是由具有低颗粒浓度的上流核心区和具有高颗粒浓度的缓慢下流近壁区构成〔3,4〕。

循环床床内受热面则被气膜所覆盖着,当颗粒团与气膜接触时,其热量的传导和辐射两种方式通过气膜传给受热面;当气相与气膜接触时,其热量则以对流的方式传入受热面,与此同时,被气相隔开的颗粒团也与受热面进行着辐射换热。由于颗粒团运动的随机性,受热面上的颗粒团和气相不断更新并连续传热,构成了循环床的特殊传热方式〔5〕。因此,可以将循环床床内介质与受

收稿日期:1990-05-09

热面之间的传热系数  $h$  分解为三个分量：颗粒团对流换热系数  $h_{cc}$ 、气相对流换热系数  $h_{gc}$  以及辐射换热系数  $h_r$ ，即：

$$h = h_{cc}\delta_c + h_{gc}(1 - \delta_c) + h_r$$

在这三个分量中，颗粒团对流换热系数  $h_{cc}$  是介质传热系数  $h$  的主要部分，其数值主要取决于床内悬浮颗粒浓度  $\rho_{sp}$  以及物料平均直径  $d_p$ ；气相对流换热系数  $h_{gc}$  远小于  $h_{cc}$ ，因此常常被处理成单纯气体以表观气速流过受热面的对流换热系数；辐射换热系数  $h_r$  则用下式计算：

$$h_r = e_{bw}\sigma(T_{sp} + T_{sf})(T_{sp}^2 + T_{sf}^2)$$

$$e_{bw} = \frac{1}{\frac{1}{e_{sp}} + \frac{1}{e_{sf}} - 1}$$

通常将床内悬浮颗粒作为灰体处理，即：

$$e_{sp} \approx 0.5(1 + e_p)^{[6]}$$

### 三、循环床操作参数对传热的影响

循环床操作参数对传热的影响规律是设计及运行循环床所必要的理论依据。随着循环床技术的发展和工业应用的需要，一些研究者曾使用不同的实验方法和物料对这一问题进行研究。尽管由于循环床传热机制的复杂性和实验手段的限制，实验数据分散程度很大，但总的规律趋势基本一致，这些结论可供设计和运行循环床时参考。

#### 1. 悬浮颗粒浓度的影响

颗粒团对流换热系数远高于气相对流换热系数以及辐射换热系数，因此，床内介质传热系数与颗粒团与受热面接触的数量和频率成正比，即应与悬浮颗粒浓度成正比。实验结果表明，循环床悬浮颗粒浓度对传热性能的影响是非常显著的，床内介质传热系数随着悬浮颗粒浓度的增加而增大，见图1。

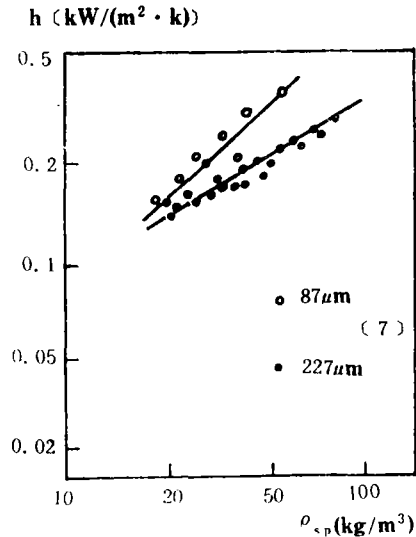


图1 悬浮颗粒浓度对介质传热系数的影响

#### 2. 表观气速的影响

在颗粒循环率一定的情况下，循环床床内介质的空隙率随表观气速的增加而增大，悬浮颗粒浓度则随表观气速的增加而下降，导致床内介质传热系数减小，见图2。

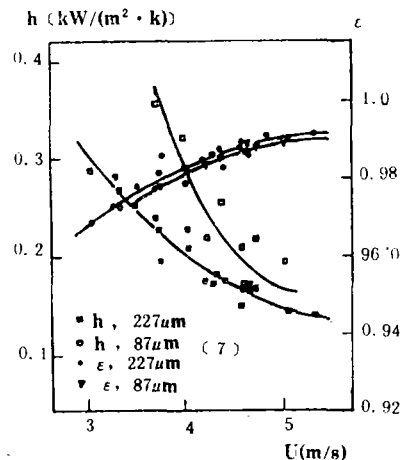


图2 表观气速对介质传热系数及空隙率的影响

#### 3. 颗粒循环率的影响

在悬浮颗粒浓度不变的情况下，不同的颗粒循环率将产生不同的颗粒速度，导致不同的介质传热系数。

Basu和 Nag<sup>[7]</sup> 深入分析了这种影响, 并指出在床内悬浮颗粒浓度不变的情况下, 当颗粒循环率增加 100% 时, 介质传热系数只增加 10% 左右。因此, 颗粒循环率对循环床传热性能的影响是不明显的。

#### 4. 物料平均粒径的影响

由于小颗粒具有较大的比表面积, 在同样的床内悬浮颗粒浓度条件下, 小颗粒对受热面的覆盖比率和接触频率都将高于大颗粒, 因此其传热效果要强于大颗粒。实验结果表明, 对于任何床内悬浮颗粒浓度和表观风速, 床内介质传热系数都随颗粒平均直径的增大而下降见图 3。

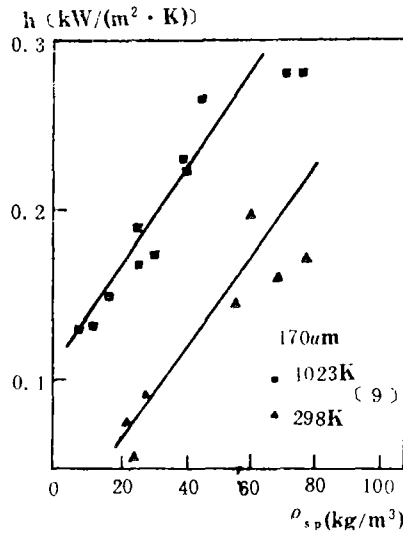


图 4 床内介质温度对传热系数的影响

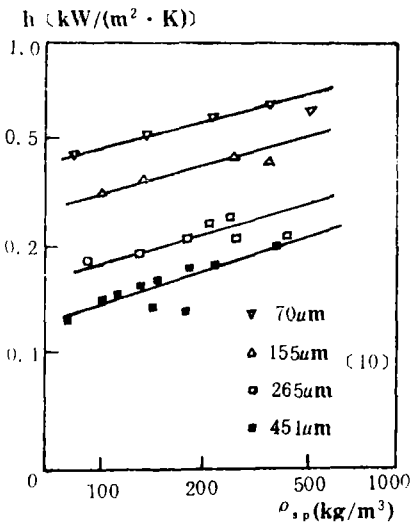


图 3 物料平均粒径对介质传热系数的影响

#### 5. 床内介质温度的影响

在通常情况下, 高温时的床内介质传热系数高于低温时, 其原因在于气体的热导率随温度的增加而增大, 并且, 在高温状态下, 颗粒团与受热面之间辐射换热量也增加了。因此床内介质传热系数随温度的增加有一定程度的增大, 见图 4。

### 四、循环床传热计算关联式及其使用条件

到目前为止, 还没有一种循环床传热计算公式可以适用于完整的工业实际操作参数范围。各个研究者都是根据自己的实验条件和操作参数范围用实验数据关联出循环传热计算公式, 甚至有的研究者由于实验数据不足或过于分散, 没能得出计算关联式, 仅仅给出了一些规律趋向。本文对循环床传热的主要研究成果进行了整理, 给出了各个研究报告所基于的实验条件和参数范围以及得出的计算关联式, 见表 1。

### 五、对循环床传热研究中存在的问题及今后的研究方向的看法

尽管循环床传热性能及其计算方法对于工业设计及运行是至关重要的。但是, 目前对其研究的深度和广度远远不够, 研究报告和实验数据较少, 并且大多数实验数据都得

表 1

研究 者	Basu & Nag [7]	Fraley et al [8]	Kobro & Brereson [9]	Mickley & Trilling [10]
实验台规格	直径 (m) 0.102 高度 (m) 5.5 高度 (m) 2.1	0.076 1.28	0.2 3.0	0.073 1.3 0.2
测点位置	径向 ( $\frac{r}{R}$ ) 1	0.6~0.8	1	0.17
物料特性	类型 砂 密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 2 650 平均粒径 ( $\mu\text{m}$ ) 87 227	玻璃微珠 2 650 37	砂 2 630 170 250	玻璃微珠 2 420 2 720 40 450
操作参数	压力 (MPa) 0.1 床温 (K) 303~321 表观气速 (m/s) 3.0~5.3 悬浮颗粒浓度 (kg/m <sup>2</sup> ) 22~97	0.1 294~304 0.0~2.8 119~477	0.1 298~1 123 6.0~12.0 26~87	0.1 320~380 0.0~2.5 48~0.40
实测介质传热系数 (kW/(m <sup>2</sup> ·k))	0.146~0.364	0.24~0.77	0.07~0.28	0.05~0.40
计算关联式	$h = \frac{\delta_c}{\frac{d_p}{10k_{ew}} + \left(\frac{\pi t_c}{4k_c C_c \rho_c}\right)^{0.5}} + (1 - \delta_c) \left[\frac{k_g}{d_p}\right] \left[\frac{C_p}{C_g}\right] \left[\frac{\rho_{sp}}{\rho_p}\right]^{0.3}$ $\left[\frac{U_T}{gd_p}\right]^{0.21} + e_{bw} \sigma$ $(T_{sp} + T_{cf})(T_{sp}^2 + T_{cf}^2)$	$h = 1.27 \times 10^{-5} C_p \rho_p \left(\frac{\rho_{sp} D}{\rho_p d_p}\right)^{0.518}$		$h = 0.029 \left(\frac{\rho_{sp} \rho_g U}{d_p}\right)^{0.263}$

续表 1

研究 者	Mick & Trilling [10]	Kiang et al [11]	Chrysostome et al [12]	Subbaro & Basu [13]
实验台规格	直径 (m) 0.10 0.025 高度 (m) 2.5 1.9 高度 (m) 0.9 0.5	0.10 3.66 0.53, 1.3, 2.4, 3.1	0.50 5.0 —	0.10 5.0 0.22 1.6
测点位置	径向 ( $\frac{r}{R}$ ) 1	0	0, 0.33, 0.6	1
物料特性	类型 玻璃微珠 密度 (kg/m <sup>3</sup> ) 2440 2720 平均粒径 (μm) 70 450	催化剂 1700 53	硅 砂 2600 280	砂 2550 139 260
操作参数	压力 (MPa) 0.1 床温 (K) 420~510 表观气速 (m/s) 0.0~4.1 悬浮颗粒浓度 (kg/m <sup>3</sup> ) 49~540	0.1 — 0.0~4.9 22~49	0.1 1.073~1.173 2.0~5.0 —	0.1 300 26~105
实测介质传热系数 (kW/(m <sup>2</sup> ·K))	0.12~0.50	0.12~0.26	0.17~0.38	0.14~0.35
计算关联式	$h = 0.00834 \left( \frac{\rho_s \mu}{d_p^{0.466} \rho^{0.669}} \right)$	$N_w = A(1-\epsilon)^{a_1}$ $\left( \frac{C_p}{C_g} \right)^{a_2} \left( \frac{\rho_s \mu}{c_p} \right)^{a_3}$ $Re^{a_4} Pr^{a_5}$		$h = \left( \frac{4k_c C_c U^{1/3} W^{2/3} \rho_s \mu}{\pi D_b \rho_p^{2/3} (1-\epsilon_c)^{2/3}} \right)^{0.5}$ $\left[ 1 + \left( \frac{k_g \rho_g C_{p,g} (\epsilon - \epsilon_c)}{k_c C_c \rho_s \mu (1-\epsilon_c)} \right)^{0.5} \right]$

之于冷态小规模实验台,离工业实际相距甚远。而且,由于实验条件和参数范围不尽相同,各个研究者得出的计算关联式之间差异很大,有些甚至相互抵触。因此,在参考或使用这些计算关联式时,要注意分析其导出条件,以免得到谬误的结果。

然而,要建立有效的循环床传热模型和计算方法,必须在其物理机制上进行研究推导。尽管由于循环床床内介质流体动力学特性的复杂性以及实验手段的限制,人们目前还没有能力对循环床传热机理进行全面、透彻的认识,但是,随着科学技术的进步,终究是会搞清这些问题的。

## 六、结 论

1. 循环床床内介质传热系数随床内悬浮颗粒浓度的增加而增大,后者是影响循环床传热的最主要因素。

2. 当颗粒循环率不变时,循环床床内介质传热系数随表观气速的增加而下降。

3. 在悬浮颗粒浓度不变的条件下,颗粒循环率增加100%,循环床床内介质传热系数只增加10%左右。

4. 对于给定的悬浮颗粒浓度,较小粒径的物料使循环床具有较高的介质传热系数。

5. 在其它参数相同的条件下,高温时循环床床内介质传热系数要高于低温时。

6. 循环床的传热计算仍处于研究探索阶段,目前已得出的计算关联式由于受其实验条件和参数范围的限制,在工业应用上只能作为参考。因此,建立一个基于其物理机制的循环床传热数学模型及其计算方法是必要和迫切的。

## 符 号

$A, a_i$ ——常数

$C_c, C_g, C_p$ ——分别为颗粒团、气体、颗粒的比热容,  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

$D$ ——循环床直径,  $\text{m}$

$D_b$ ——最大稳定气泡直径,  $\text{m}$

$d_p$ ——物料平均粒径,  $\text{m}$

$e_{b,w}, e_p, e_{sf}, e_{sp}$ ——分别为系统、颗粒、受热面、悬浮颗粒的黑度

$h, h_{cc}, h_{gc}, h_r$ ——分别为介质传热、颗粒团对流换热、气体对流换热、辐射换热的系数,  $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

$k_c, k_g$ ——分别为颗粒团、气体的热导率  $\text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$k_{ew}$ ——贴壁颗粒团的有效热导率,  $\text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$

$R$ ——循环床半径,  $\text{m}$

$r$ ——测点位置半径,  $\text{m}$

$T_{sf}, T_{sp}$ ——分别为受热面、悬浮颗粒的温度,  $\text{K}$

$t_c$ ——颗粒团与受热面接触时间,  $\text{s}$

$U, U_T$ ——分别为气体表观、颗粒终端速度,  $\text{m}/\text{s}$

$W$ ——颗粒质量流率,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

$\varepsilon, \varepsilon_c$ ——分别为介质、颗粒团的空隙率

$\rho_g, \rho_p$ ——分别为气体、颗粒的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\rho_{sp}$ ——悬浮颗粒质量浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$\delta_c$ ——颗粒团覆盖受热面面积分率

$\mu_g$ ——气体动力粘度系数,  $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$

$\sigma$ ——斯蒂芬-玻尔兹曼常数,  $5.67 \times 10^{-11} \text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

$Re$ ——雷诺数,  $\rho_g DU / \mu_g$

$\rho_r$ ——普朗特数,  $C_p \mu_g / k_g$

$N_u$ ——努谢尔特数,  $hd_p / k_g$

## 考 参 文 献

- [1] 刘德昌等. 循环床燃烧技术在欧洲共同体国家的研究发展. 动力工程, 1989, (5)
- [2] M. Kwauk et al. Fast fluidization at ICM, Fluidized Technology, Canada, 1986
- [3] .Wein 1. Radial variation in

- void fraction in a fast fluidized bed. Fluidization V, Engineering Foundation, 1986
- [4] L Monceaux et al. Particles mass flux profiles and flow regime characterization in a pilot-scale fast fluidized bed unit. Fluidization V, Engineering Foundation, 1986
- [5] J R Grace. Heat transfer in circulating fluidized beds. Circulating Fluidized Bed Technology, Pergamon Press, Canada, 1986
- [6] J R Grace. Handbook of multiphase system. Hemisphere, Washington, 1982
- [7] P Basu, P K Nag. An investigation into heat transfer in circulating fluidized beds. J. Heat Mass Transfer, Vol 30, 1987, (11)
- [8] L Fraley et al. Heat transfer coefficient in circulating bed reactor. ASME Paper 83-HT-92, Settle, 1983
- [9] H Kobro, C Brereton. Control and fuel flexibility of circulating fluidized bed. Circulating Fluidized Bed Technology. Pergamon Press, Canada 1986
- [10] H S Mickley, C A Trilling Heat transfer characteristics of fluidized bed. Ind Engng Chem, 41, 1949
- [11] K D Kiang et al. Heat transfer in fast fluidized beds. Fluidization Technology, Hemisphere. Washington DC, 1976
- [12] G M Chrysostome et al. Combustion and heat recovery. VDI Verlag Publisher, 1984
- [13] D Subbarao, P Basu. Heat transfer in circulating fluidized beds. Circulating Fluidized Bed Technology, Pergamon Press, Canada, 1986

## An Overview of Heat Transfer in a Circulating Fluidized Bed

Dong Peng, Wen Long

(Xian Jiaotong University)

### Abstract

This paper presents the main study results of the heat transfer between the media and the heating surfaces in a circulating fluidized bed (CFB), the results of analysis of the effects of the operating parameters of CFB on the heat transfer, various calculation correlations of heat transfer as well as their conditions of application. Also given are some viewpoints concerning the existing problems in CFB heat transfer research and the direction of future research efforts.

**Key words:** *circulating fluidized bed, boiler, heat transfer, cluster*

(渠源沂 编辑)