

循环流化床流体动力学研究进展

朱廷钰, 肖云汉

(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘 要: 论述了国内外在循环流化床流体动力学研究领域的进展, 对循环流态化颗粒流动问题、颗粒聚集及传热以及循环流态化数学模型等热点问题进行了重点回顾, 并指出了当前循环流化床流体动力学研究的一些新动向。

关键词: 进展; 流体动力学; 循环流化床; 数学模型

中图分类号: O351.2 文献标识码: A

符号表

A—床层截面积 m^2 ; D, d—直径 m ;
 V—体积流量 m^3/s ; G—固体颗粒流量 kg/s ;
 g—重力加速度 m/s^2 ; u—速度 m/s ;
 ε—空隙率

下 标

CB—循环流化床 g—气体
 P—颗粒; S—固体颗粒;
 t—终端 tr—最小循环流态化;
 μ—稀相气力输送; FD—快速流态化到密相气
 TF—湍动流态化到快速 力输送;
 流态化;

1 引言

循环流化床作为一种新型气—固相反应设备, 应用于石油化工、冶金、能源等许多领域。循环流化床一般在数倍甚至数十倍于颗粒终端速度的表观气速下操作, 可通过调节颗粒的循环速率, 保持适宜的固相浓度和良好的接触状况, 是一种典型的高效无气泡流态化操作。与传统流态化技术相比, 它具有如下优点^[1-8]: (1) 床层密度较大, 气体返混小, 易建立温度及浓度梯度, 提高了两相接触效率; (2) 可处理粘湿性物料; (3) 无气泡、高效气固接触, 使反应器易于放大; (4) 通过回收循环带出的细粉可调整颗粒在床中的停留时间, 提高颗粒转化率; (5) 单位面积上气体通量高, 原料及设备利用率高, 生产能力大且能耗小、投资少、维修费用低; (6) 热量传递剧烈, 有利于化学反应的控制。

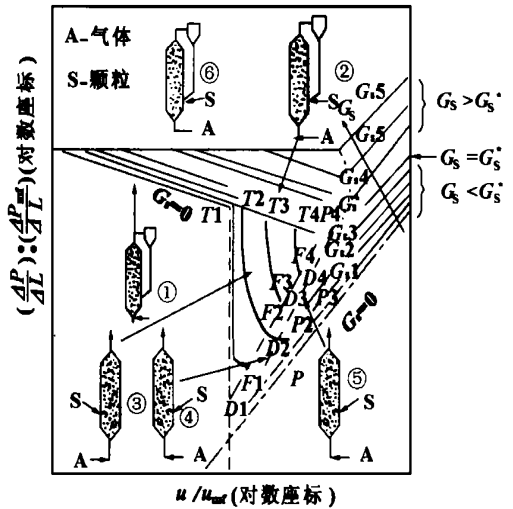
从发表的文献看, 研究热点主要集中于三个方

面: (1) 颗粒流动问题; (2) 传热及颗粒团聚问题; (3) 循环流态化数学模型。

2 颗粒流动问题

2.1 循环流态化形成条件

循环流态化是在介于密相流态化和垂直气力输送的气速和床密度范围内操作的。Horio^[9] 绘制了垂直气固流动系统的流型变化(见图 1)。



①—传统密相流态化(鼓泡流态化或湍动流态化); ②—循环密相流态化(一般情况下, 需要颗粒强制循环); ③—快速流态化(一般情况下, 颗粒可自然循环); ④—密相气力输送(一般情况下, 颗粒可自然循环); ⑤—稀相气力输送(一般情况下, 颗粒可自然循环); ⑥—循环鼓泡流态化(一般情况下, 需要颗粒强制循环)

图 1 垂直气固流动系统的流型变化

一般, 形成循环流态化需满足三个条件:

(1) 满足非噎塞系统条件。噎塞现象是指垂直气固流动系统中, 由气力输送状态降低操作气速时, 可能发生的突然过渡到密相流态化的一种非稳态操作。目前常用的三个定量判据见表 1。

收稿日期: 1999-11-24; 修订日期: 2000-07-07

基金项目: 中国科学院重大特别支持基金资助项目(KY95T-03-04)

作者简介: 朱廷钰(1971—)男, 上海人, 中国科学院博士后

表 1 非噎塞系统的条件

文 献	关联式	理论依据
Yousfi and Gau ^[10]	$u_{tr}^2/gd_p < 140$	不均匀性理论
Yang ^[11]	$u_{tr}^2/gD < 0.123$	气泡稳定性理论
Smith ^[12]	$[u_{tr}^{\epsilon^{n-1}}n(1-\epsilon)] / (gd)^{1/2} < 0.41$	连续波理论

(2) 操作气速及颗粒循环速率应大于最小循环流态化条件, 即: $U_g > U_{tr}, G_s > G_{str}$ 。

Matsen^[13] 认为 $U_{tr} = 5.73U_b, G_{str} = 0.0865 \rho_p U_b$,

李佑楚等提出 $U_{tr} = (3.5 - 4.0)U_b$, Subbarao^[14] 认为

当形成循环流态化时, 气体与絮状物之间的相对速度将等于絮状物的终端速度, 并得到: $U_{tr} = U_t [(\rho_p - \rho_g) / 1.8 \rho_g]^{0.5}$

(3) 对一定的颗粒循环速率 $G_s (G_{sr} < G_s < G_s^*)$, 操作气速满足 $U_{TF} \leq U_g \leq U_{pt}$, 其中当 $U_{TF} \leq U_g \leq U_{FD}$ 时, 床层为循环流态化, 当 $U_{F0} \leq U_g \leq U_{pt}$ 时, 床层为密相气力输送。

白丁荣等总结了转变速度 U_{FD} 的关联式如表 2^[15]。

表 2 转变速度 U_{FD} 的关联式

文 献	关联式	备 注
李佑楚等 ^[2]	$\epsilon_{FD} = (\epsilon_a + \epsilon^*)_{FD} / 2$ 或 $Z_i = 0$	
白丁荣等 ^[16]	$u_{FD} = 26.58 \left[G_s / \rho_g \right] + 1.0875 \left[(\rho_p - \rho_g) / \rho_g \right]^{0.425} \left[d_p / D \right]^{0.173} \left[(\rho_p - \rho_g) / \rho_g \right]^{0.426} / d_p^{1/3} - 0.2217$	由文献 2, 12] 数据整理而得
毕晓涛等 ^[17]	$u_{FD} = 3.21 \left[G_s / \rho_g \right]^{0.425} \left[d_p / D \right]^{0.173} \left[(\rho_p - \rho_g) / \rho_g \right]^{0.426}$	传热法
Yang ^[18]	$u_{FD} / u_t = \epsilon^q, q = -33.2 + 1.18 Re_t$	由文献 19] 噎塞数据而得
Yang et al ^[19]	$(u_{FD} d_p \rho_p / \mu) = 1.172 \left[\left(G_s / \rho_p \sqrt{gd_p} \right) + 1 \right]^{1.968} Ar^{0.356}$	孔隙率脉动法
李静海 ^[20]	$W_{st} = G_s g$	理论模型

白丁荣等^[21]、Knowlton^[22] 还由试验分别得到了 U_{pt} 的经验关联式为:

$$U_{pt} = 0.508 \sqrt{gd_p} \left[\left(G_s D / \mu \right) \left(\rho_p - \rho_g / \rho_g \right) \right]^{0.138} \left(D / d_p \right)^{0.471}$$

$$U_{pt} = 69.7 \sqrt{gd_p} \left(\rho_p / \rho_g \right)^{0.273} \left(G_s d_p / \mu \right)^{0.147} \left(d_p / D \right)^{0.272}$$

2.2 床层结构不均匀性研究

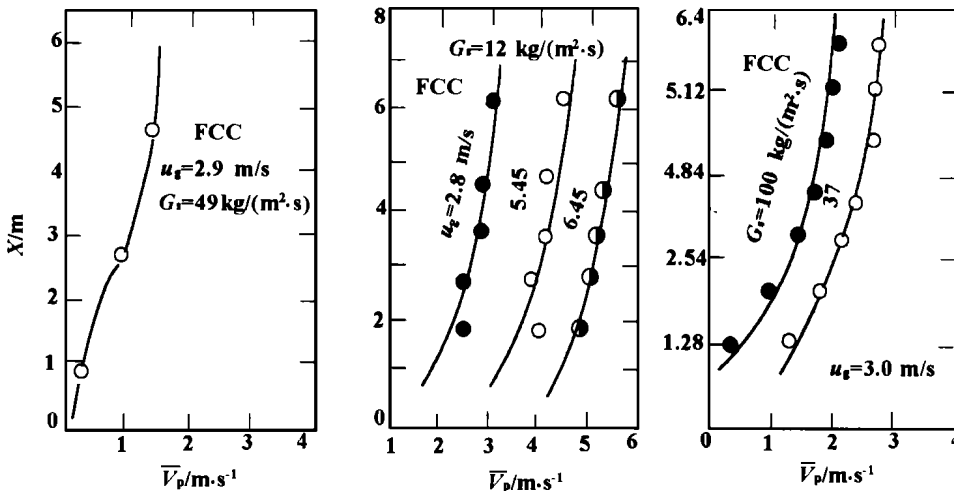


图 2 截面平均颗粒速度的轴向分布

分布处于均匀。在循环流态化条件下操作时, 床中颗粒

浓度沿轴向变化很大, 呈上稀下浓的分布^[20], 稀浓两区间的拐点位置, 随气速增大或颗粒循环速率减小而降低, 它是气速、颗粒循环速率、床层颗粒量、出入口结构、床高、床径的函数。

颗粒径向分布一般认为呈抛物线分布, 而且主要是截面平均颗粒浓度的函数。在一定的颗粒循环速率下, 床层截面呈明显的中心稀、壁面浓的密度分布状态。当气速一定时,

颗粒循环速率增大, 床层截面密度分布趋于均匀。

2.3 床内颗粒速度

在循环流化床中, 颗粒运动的基本特征是与气体之间具有很高的滑落速度, 并在轴向产生大量返混。

Weinstein^[23] 通过实验发现, 作为颗粒储存及循环使用的慢床的床层高度会影响循环流化床中的浓度分布。增大慢床固体储量, 浓相份额增大, 稀浓两区间的拐点位置上移。文献^[24] 的研究已证明, 仅当循环流态化处于浓相气力输送状态下操作时, 轴向浓度

滑落速度为气速、颗粒循环速率以及气固物性的函数, 在一定的颗粒循环速率下, 滑落速度随气速增大而增大。Yerushalmi 曾提出计算滑落速度的一个半经验公式: $U_{slip} = U_g / \epsilon - U_s = U_t \epsilon^n \sqrt{1 + \Delta P_k / \Delta P_{gr}}$, 详细介绍见文献 [25]。截面平均颗粒速度可以由颗粒速度径向分布积分得到, 也可由截面平均孔隙率得到。图 2^[26] 表示了截面平均颗粒速度的轴向分布。

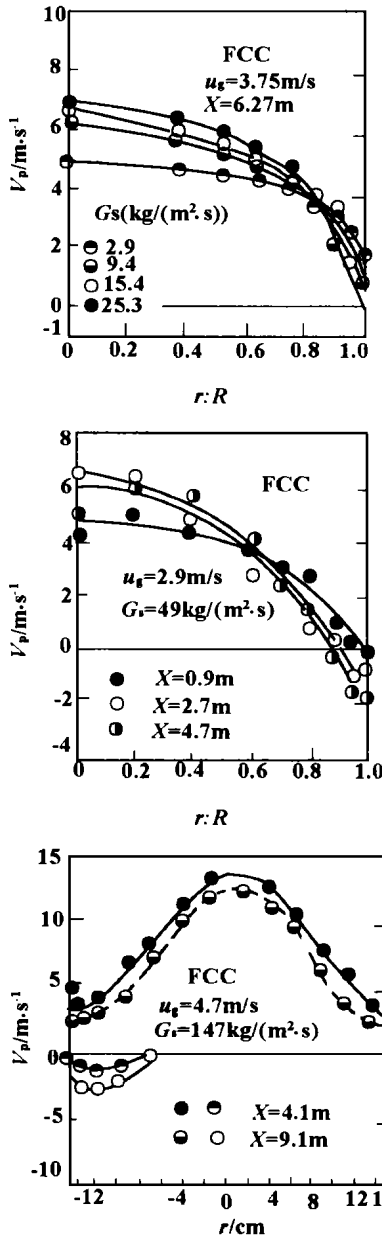


图 3 颗粒速度的径向分布

由于颗粒的湍动、返混以及运动的随机性, 在床层径向绝大部分区域内, 都可能测到颗粒的正负向速度。但在床层中心处, 颗粒主要向上运动, 其时均速度可达表观气速的 2 ~ 5 倍; 边壁区颗粒速度较小, 在循环流态化条件下, 颗粒向下速度约为 1 ~ 2 m/s。图 3^[26] 表示了颗粒速度的径向分布。

3 循环流态化中的颗粒聚集及传热问题

循环流态化中的颗粒聚集主要是研究絮状物及其特征。所谓絮状物的概念是基于对床中气固两相间存在高滑落速度现象的解释而产生的。对絮状物行为的直接观察一般采用可视化技术^[2, 27~29]。其观察结果可提供有关絮状物形成、解体, 絮状物形状、大小及其变化的图象。颗粒絮状物一般有两种形态, 即丝束形絮状物和 U-形絮状物。前者一般在床层颗粒密度较稀时存在, 而且向上

运动。而后者一般多存在于床层颗粒密度较浓时, 如床层边壁区和床层下部, 而且运动方向向下。为了表达方便, 实际过程中常将循环流化床中气固流动等效为流体-絮状物两相运动, 该方法已成功应用于流体力学模型^[30~32]、传热^[33~35]等研究中。文献 [35] 详细论述了预测絮状物直径及其孔隙率并通过它们计算絮状物的终端速度及每个絮状物中所含颗粒个数。

随着循环流态化技术的发展, 传热过程愈来愈受重视。传热包括径向固体颗粒团的导热、分散相的对流传热和包括两相的辐射传热(图 4)。研究发现^[34] 在较低气速条件下, 传热系数主要是床内颗粒浓度的函数, 传热机制是以颗粒群与浸润换热面间的不稳定热传导为主。当气速较高和颗粒浓度较稀时, 气体对流和辐射热传导才起重要作用。对于宽筛分颗粒循环流态化技术的传热、带有化学反应过程的循环流态化传热等, 还有待于深入研究。

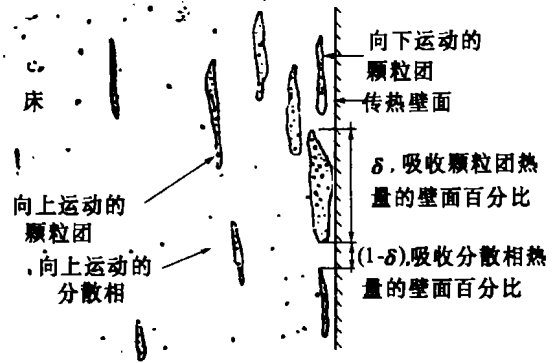


图 4 循环床中向壁面传热机理的示意图

4 循环流态化模型

这方面的探索正在积极进行中, 提出的诸多模型, 如: 絮状物扩散模型、一维加速运动模型、两通道模型、最小耗能多尺度模型、局部流动结构模型和整体流动结构模型等, 都仅能从一个侧面部分反应循环流态化过程的物理过程。其中应用较广泛的是局部流动结构模型和整体流动结构模型。局部流动结构模型以循环流化床内局部流动结构的不均匀性为基础, 主要描述絮状物相及稀相的相结构特征, 诸如各项的孔隙率、运动速度及两相间的存在比例等等。整体流动结构模型是以循环流化床内整体流动结构的不均匀性为基础, 主要描述床内孔隙率、颗粒速度及气体速度等空间分布形态及其操作条件、设备结构等的变化规律。图 5^[39] 简要地表示了循环流态化气固流动模型的分类及其基本构成。

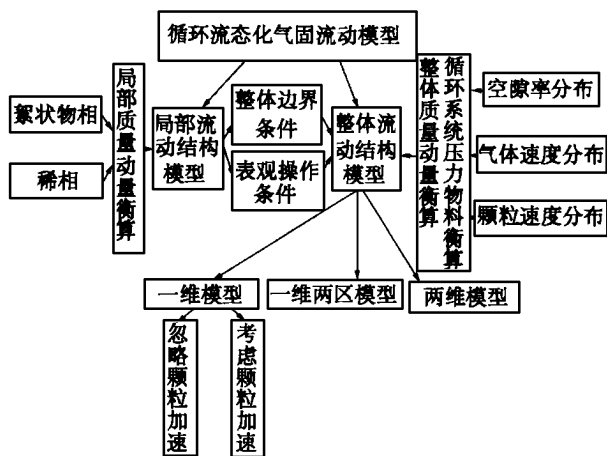


图 5 循环流态化气固流动模型分类及基本构成

5 结束语

在循环流态化的状态下,多相流的物理和化学特性极为复杂,其功能实现取决于气固物性、气体速度、操作温度、颗粒循环流率以及设备条件等诸多因素;实际应用中循环流化床中的反应还将受蒸发、传热、扩散和反应动力学等影响。近年来,这些影响因素和相互间的非线性关系仍处在探索和研究阶段。所以,循环流化床仍是一项发展中的技术,需要大量深入的工作才能充分展现这一先进技术的潜在优点。研究循环流化床流体动力学,揭示内在的基本规律,对于更深入的掌握循环流化床反应器特征和更好的应用它都具有十分重要的意义。

参考文献:

[1] YERUSHALMI J, AVIDAN A. High-velocity fluidization[M]. Chap. 7 in Fluidization, 2nd ed. (J F DAVIDSON, R CLIFT and D HARRISON, Eds.). London: Academic, 1985.

[2] 李佑楚, 陈丙瑜, 王凤鸣, 王永生, 郭慕孙. 快速流态化的流动[J]. 化工学报, 1979, (2): 144-151.

[3] LEWIS W K, GILLIL E R. Characteristics of the internally circulating fluidized bed boiler[J]. *Ind Eng Chem*, 1979, 41(6): 1104-1110.

[4] YERUSHALMI, CANKURT N T. High-velocity fluid beds[J]. *Chem Tech*, 1978, 8(9): 564-572.

[5] GAO Shi-qiu, ZHAO Guo-qing, QIN Shao-nan, et al. Solid circulating rate in fast fluidized bed[A]. Fluidization 91: Science and technology: conference papers fourth China-Japan symposium[C], China: Beijing 1991, 76-85.

[6] 李佑楚, 陈丙瑜, 王凤鸣 等. 快速流态化的研究[J]. 化工冶金, 1980, (4): 20.

[7] YANG Y L, JING Y, YU A Q, et al. The radial distribution of local particle velocity in a dilute circulating fluidized bed[M]. Circulating fluidized bed technology III, ed by P Basu et al, Moscow: Pergamon Press, 1991.

Press, 1991.

[8] GRACE J R. High-velocity fluidized bed reactor[J]. *Chem Eng Science*, 1990, 45(8): 1953-1966.

[9] HORIO M, MORISHITA K, TACHIBANA O. Study on hydrodynamic of circulating fluidized bed[A]. World Congress III of Chem Eng[C], Tokyo: World Scientific, 1980, 536-539.

[10] VAN DEEMTER J J. Mixing and contacting in gas-solid fluidized beds[M]. In: Fluidization (J R Grace and J M Matsen, Eds.), New York: Plenum, 1961.

[11] YANG W C. Circulating fluidized bed technology II[M], Basu P and Large J F eds. Moscow: Pergamon Press, 1988.

[12] SMITH T N. Limiting volume fractions in vertical pneumatic transport[J]. *Chem Eng Sci*, 1978, 33(6): 745-749.

[13] MAISEN J M. Mechanisms of choking and entrainment[J]. *Powder Technology*, 1982, 32(1): 21-33.

[14] SUBBARAO D, BASU P. A model for heat transfer in circulating fluidized bed[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1986, 29(8): 487.

[15] 白丁荣, 金涌, 俞芷青. 循环流态化(1)[J]. 化学反应工程与工艺, 1991, 7(2): 202-213.

[16] 白丁荣, 金涌, 姚文虎. 快速流态化技术进展[J]. 化学工程, 1987, (2): 38-46.

[17] 毕晓清, 金涌, 蒋大洲. 根据快速流化床床层与浸润表面间传热特性判别快速流态化向稀相输送的转变[J]. 化工学报, 1990, 41(5): 623-625.

[18] YANG W C. Mechanistic models for transitions between regimes of fluidization[J]. *AIChE J*, 1984, 30(6): 1025-1027.

[19] YANG G L, SUN J K. Transition of flow regime from turbulent to fast fluidization and from fast to dilute phase transport[A]. 4th China-Japan Conf on Fluidization[C], Beijing, 1991, 37-45.

[20] 李静海. 两相炉的尺度作用模拟和能量的最小方法[D]. 北京: 中科院化冶所, 1987.

[21] 白丁荣, 金涌, 俞芷青 等. 循环流化床操作特性的研究[J]. 化学反应工程与工艺, 1987, 3(1): 24-30.

[22] KNOWLTON T M, BACHORCHIN D M. Fluidization Technology[M], ed by Keatival D L, Washington: Hemisphere, 1976.

[23] WEINSTEIN H, SHAO M, SCHNITZLEIN M. Radial variation in solid density in high velocity fluidization, in CFB Technology[M], ed. By Basu P, Canada: Pergem Press, 1986.

[24] 骆仲决, 倪明江, 岑可法. 循环流化床流体动力学特性的实验研究[J]. 浙江大学学报, 1987, 21(6): 84-92.

[25] YERUSHALMI J, AVIDAN A. High-velocity fluidization. Chap. 7 in Fluidization[M], 2nd ed. (J F Davidson, R Clift and D Harrison, Eds.). London: Academic, 1985.

[26] 白丁荣, 金涌, 俞芷青 等. 快速流化床中平均滑落速度及絮状物的特性[J]. 化学工程, 1989, 17(6): 44-49.

[27] 巴苏 P. 循环流化床锅炉的设计与运行[M]. 弗鲁雷 S A 译. 北京: 科学出版社, 1994.

[28] LEWIS W K, GILLIL E R, BAUER W C. Characteristics of the internally circulating fluidized bed boiler[J]. *Ind Eng Chem*, 1949, 41(6): 1104-1171.

[29] YERUSHALMI J. Further studies of the regimes of fluidization[J]. *Power Technology*, 1979, 24: 187-205.

- [30] LI Y, KUANK M. The dynamics of fast fluidization[M]. in Fluidization. Ed by Grace J R Matsen J M. New York: Plenum Press, 1980.
- [31] LI J, TUNG Y, KNAUK M. Circulating fluidization bed technology[M], ed by Basu P, Large J F. Oxford: Pergamon Press, 1988.
- [32] IBRAHIM A K, MASARU Ishida. Simulation of spatio-temporal bubble behavior in a freely bubbling three-dimensional fluidized bed[J]. *J Chem Eng Japan*. 1987, 20(5):485-491.
- [33] ARASTOOFOR H, GIDASPOW D. Analysis of IGT pneumatic conveying data and fast fluidization using a thermohydrodynamic model[J]. *Powder Technology*. 1979, 22: 77-87.
- [34] BASU P, NAG P K. An investigation into heat transfer in circulating fluidized beds[J]. *Int J Heat Mass Transfer* 1987, 30(11): 2399-2409.
- [35] 陆慧林 杨励丹 鲍亦令 等. 循环流化床沿床层径向的传热[A]. 第五届全国流态化会议文集[C]. 北京: 清华大学出版社, 1990. 164-167.
- [36] 白丁荣 金 涌 俞芷青. 循环流态化(III)气固流动规律[J]. 化学反应工程与工艺, 1991, 7(4): 422-431.

(何静芳 编辑)

Aquarius 设计从排气回收用于蒸汽回注的水

据《Gas Turbine World》2000 年 3~4 月号报道, 乌克兰 Mashproekt(机器设计)科学生产联合体针对蒸汽回注式燃气轮机(STIG)开发出利用接触式水冷凝器的 Aquarius 动力装置设计。

该装置的净效果是使燃气轮机输出功率增加 50%~80%, 效率增加 25%~35%(相对值)。在宽广的环境温度范围内, 使饱和的燃气轮机排气凝结可以提供多达 100%水的回收。

围绕其 UGT 简单循环燃气轮机, Mashproekt 已研制出一系列供输气管线, 电力生产应用的 Aquarius 动力装置。

Aquarius 动力装置的设计性能

燃气轮机动力装置	额定输出功率 kW	效率 %	空气流量 kg/s	蒸汽流量 kg/s	压比
UGT 10000	10 780	36.0	37.5	未利用	19.6
Aquarius 16	16 000	45.0	37.5	5.4	19.5
UGT 15000	17 500	35.0	71.4	未利用	19.6
Aquarius 25	25 000	43.0	64.5	8.1	17.9
UGT 25000	26 700	36.5	87.8	未利用	21.8
Aquarius 40	41 000	43.4	79.2	12.9	19.8

交钥匙工程的总承价格, 据说对于 16 MW 装置每 kW 装机功率为 430 美元, 对于 41 MW 装置每 kW 装机功率为 300 美元, 其投资费用比常规的蒸汽回注式燃气轮机装置的高 15%~20%。这主要是由于水回收系统附加的设备费用。两种装置的运行费用大致相同。

最初曾担心由于 NO_x 和水的化学反应在接触式水冷凝器中可能聚集氮气的酸性。但是, 这一点从来没有成为事实。

两台 Aquarius 装置的运行经验表明, 没有出现任何的水污染问题, 不需要任何专门的处理程序。

(思娟 供稿)

现代燃煤电站锅炉火焰检测综述 = **A Comprehensive Survey of Flame Detection Techniques Used in Modern Coal-fired Utility Boilers** [刊, 汉] / Hua Yan Ping, Zou Yu, Lu Zhen-zhong (Power Engineering Department, South-eastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 1 ~ 5

A comprehensive review is given of the flame detection techniques employed for modern coal-fired utility boilers, pinpointing some problems involved in their applications. Such problems include a small visual angle of the flame detection probe, a divergence between the static-state set values and actual operation dynamic ones, etc. The present paper focuses on some novel digital and image flame detection methods, which have emerged in recent years. The results of their practical application have confirmed their outstanding performance. After an assessment of their prospects for future development the authors have depicted a flame image detection system designed by them. **Key words:** utility boiler, furnace safety protection, flame detection, flame image, image flame detection

齿轮动态设计分析研究的现状及展望 = **Present Status and Future Prospects of the Analytic Research of Power Transmission Gear Dynamic Design** [刊, 汉] / Chang Shan, Wen Xue-you, Xu Zhen-zhong (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 6 ~ 10

A fairly comprehensive assessment is given of the present status of the analytic research on the dynamic design of power transmission gears both at home and abroad. In the light of the actual situation prevalent in China proposed in this paper are the major study objectives concerning the comprehensive transmission performance of gear units and the related key techniques. **Key words:** gear transmission, dynamic design, reliability design, modal experimental technique

循环流化床流体动力学研究进展 = **Recent Progress in the Study of Circulating Fluidized Bed Hydrodynamics** [刊, 汉] / Zhu Ting-yu, Xiao Yun-han (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 11 ~ 15
Discussed in this paper is the recent progress in the study both at home and abroad of circulating fluidized bed hydrodynamics. The overview has been focused on a variety of hot topics, such as the problem of circulating fluidized particle flow, particle agglomeration and heat transfer, and a circulating fluidization mathematical model, etc. In addition, some new development trends have been highlighted in the current study of circulating fluidized bed hydrodynamics. **Key words:** progress, hydrodynamics, circulating fluidized bed, mathematical model

城市固体废弃物的燃烧特性实验研究 = **Experimental Study of the Combustion Characteristics of Municipal Solid Waste** [刊, 汉] / Jiang Fan, Pan Zhong-gang, Jiang Shu-qin, Fang Jian-hua (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 16 ~ 18, 38

Through the use of thermogravimetry technology an experimental study was conducted of several typical components in city municipal solid waste, resulting in the determination of the combustion characteristics of mixed solid waste in a thermogravimeter. Furthermore, a fruitful discussion has been carried out regarding the mechanism of mixed burning of city solid waste. **Key words:** thermogravimetric analysis, municipal solid waste, combustion characteristics

W 型火焰锅炉冷态空气动力特性的测试研究 = **Experimental Study of the Cold-state Aerodynamic Characteristics of a W-shaped Flame Boiler** [刊, 汉] / Che Gang, Xu Tong-mo, Hui Shi-en (Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(1). — 19 ~ 22

A study on a cold-state model of aerodynamic characteristics was conducted of a W-shaped flame boiler equipped with a