

加旋流化床颗粒扬析规律的试验研究

刘坤磊 金保升 赵长遂 徐益谦

(东南大学热能工程研究所)

[摘要]利用流化床旋下飞灰作为试验物料,在一截面为0.285米×0.285米,高为6米,热输入为0.3 MW的加旋流化床试验装置上,系统地研究了加旋流化床颗粒扬析规律。试验结果发现,加旋流化床中颗粒扬析速率常数远低于普通鼓泡床,但飞灰在矩形截面加旋流化床内的扬析特性与玻璃珠在圆形截面加旋流化床内的扬析特性存在很大差别,在相同的颗粒粒度和操作条件下,前者较后者大得多,加旋流化床悬浮空间的二次风的分离特性和旋风分离器有一定差别。

关键词 流化床锅炉 煤 颗粒 扬析速率

分类号 TK229.66

1 前言

自M. Leva 1951年^[1]系统地进行鼓泡流化床内颗粒扬析试验以来,许多学者已对这一气固流的特性进行了广泛的试验研究,给出了不同的机理解释,提出了各自的影响因素及综合回归方程式。比较一致的结论为气体速度,颗粒粒径是影响颗粒扬析的主要因素,颗粒扬析速率常数 $k \sim u_g^{1-7}$ 及 $k \sim d_p^{1-2}$ ^[2,3],即气体速度越高,颗粒粒径越细,颗粒扬析速率常数越大。但对于加旋流化床——这种新型的,有别于普通鼓泡流化床的燃烧技术,其扬析试验及其机理分析目前进行得还很少。对于二次风对颗粒扬析规律的影响还缺乏详尽的认识,尤其对矩形截面及较高温度下的扬析试验至今还未见报道。而颗粒扬析速率常数的大小又直接决定颗粒床内停留时间的长短,进而决定颗粒床内燃尽

程度。鉴于此,本文对燃烧过程的主要影响因素,如二次风量、喷射角度、射流速度、二次风射入形式、主气流温度、速度和颗粒直径对颗粒扬析的影响进行了较为全面的试验研究。

2 试验物料及试验方法

考虑到流化床燃煤锅炉中,飞灰可燃物损失的主要粒径范围在0.1~0.3 mm,其中碳含量最高的颗粒粒径为0.1~0.18 mm。小于0.066 mm的颗粒因所需的燃尽时间较短,绝大部分燃烧较完全;而大于0.5 mm的颗粒则因炉内停留时间较长,燃烧也较充分。本次扬析试验中采用0~0.315 mm的宽筛分流化床旋下飞灰,试验前后进行筛分分析,将宽筛分飞灰分为六个连续的粒径区间(0~0.09,0.09~0.125,0.125~0.16,0.16~0.20,0.20~0.255,0.255~0.315 mm),

* 高校博士点专项基金资助

收稿日期 1993-10-11 收修改稿 1993-11-27

本文联系人 刘坤磊 男 29 讲师 210018 南京

并将每一区间的颗粒当作单粒径处理,用平均粒径 d_p 表示。床料采用1~4 mm流化床炉渣和飞灰有一定粒度间隔,以减少试验误差。

试验采用连续进料稳定性操作方法,扬析速率常数按下式计算

$$K = \frac{F_0 \eta}{W_f \cdot \xi_1} \quad (1/s)$$

在进行热态扬析试验时,启动油燃烧室,调整燃油量,使得床内温度达到工况规定值之后,测取各参数,仍按上式计算。

3 试验设备

加旋流化床扬析试验台结构如图1所示。

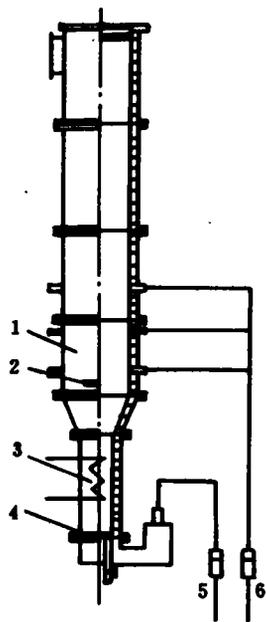


图1 加旋流化床试验装置

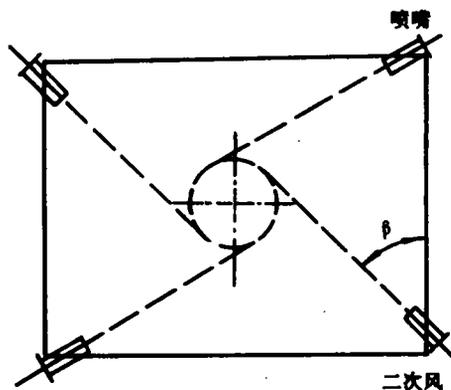
1. 悬浮空间 2. 侧向二次风口 3. 沸腾段 4. 布风板 5. 一次风 6. 加旋二次风

4 试验结果与分析

在相同的气体速度下,由于冷态试验中,

试验装置总高6米,其中悬浮空间高4.3米,横截面为0.40米×0.52米。三排12只加旋二次风喷嘴按四角切圆方式设置安装在悬浮空间(考虑到流化床燃烧时,悬浮空间温度分布及颗粒浓度分布的特点,基于添加二次风对悬浮燃烧有利的条件,选取最下排二次风的位置距布风板2米,每排二次风口的间距为0.5米),热态燃烧试验证明了这组位置布置非常合理,各排喷射角度 β ,喷嘴直径 d_2 ,二次风量 Q_2 均可单独调节。

在距扩张段上沿0.06 m处安置一个150 mm×0.5 mm扁平侧向平射二次风喷嘴,其二次风率可单独调节。



造成颗粒扬析所需的气体质量流量远比热态时大得多,二次风速又受悬浮空间横截面尺寸和风机压头的制约,因此按现有的设备条

件本文的各工况选用的二次风率较低(0 ~ 12%)。热态燃烧时,二次风量 / 一次风量为 25/75。

另外,根据前人的试验结果,影响颗粒的扬析的主要因素是悬浮空间的气体动力特性。在试验过程中,气流速度和气流温度以悬浮段入口处参数为基准。

4.1 二次风量的影响

保持总风量不变,改变一、二次风配比,可以发现,随着二次风量的增加,旋涡强度增大,其分离能力增强,受旋涡二次风影响而形成的颗粒内循环及悬浮层颗粒运动也都增强。另外,二次风量增大,则一次风量减小,由床层飞溅出的颗粒不论其数量还是其动能都减小,从而使得二次风更易于将其分离,延长其床内停留时间,两者作用结果如图 2 所示,文献[4]通过理论计算验证了这一结果。

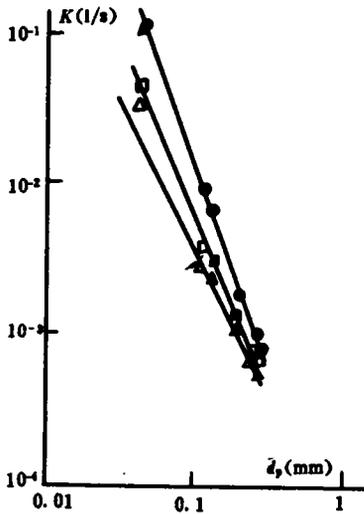


图 2 二次风率对颗粒扬析速率常数的影响

- $Q_2 = 21 \text{ m}^3/\text{h}$
- $Q_2 = 46 \text{ m}^3/\text{h}$ $u_g = 1.01 \sim 1.02 \text{ m/s}$
- △ $Q_2 = 60 \text{ m}^3/\text{h}$ $t_g = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

4.2 喷射角度的影响

考虑到四角射流形成切圆的实际直径

和设计时假想直径之间存在差别——实际直径通常较假想直径大,在不改变二次风量的条件下,减小二次风喷射角度,能够有效减小涡核区尺寸,使得更多的颗粒进入强旋区,从而降低颗粒扬析速率常数,试验结果如图 3 所示。该图表示了单投下排二次风时颗粒扬析速率常数与喷射角度的关系曲线。

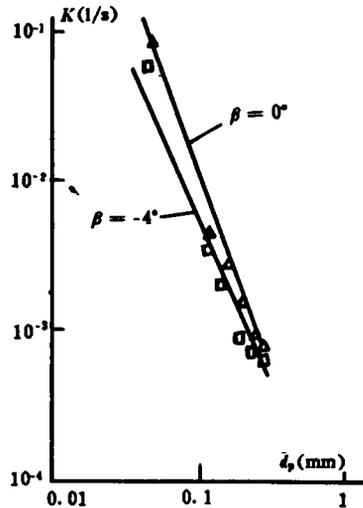


图 3 喷射角度对颗粒扬析速率常数的影响
 $R_{21} = 34 \text{ m}^3/\text{h}, u_g = 1.01 \sim 1.02 \text{ m/s}, t_g = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

4.3 喷嘴直径的影响

在相同二次风量下,减小喷嘴直径,即提高二次风射流速度,从而提高其刚度,增大其射程,使得旋涡实际切圆直径减小。此外,提高二次风射流速度又能提高旋涡强度,强化旋涡流场的分离作用,降低颗粒扬析速率常数,结果如图 4 所示。

比较图 3 和图 4 可以发现,减小喷嘴直径的作用效果较减小喷射角度显著。

4.4 二次风射入形式的影响

一定比例的二次风,从不同的位置喷入,其作用效果差异很大。文献[5]从控制 NO_x 角度出发,从中心喷入二次风,其燃烧效

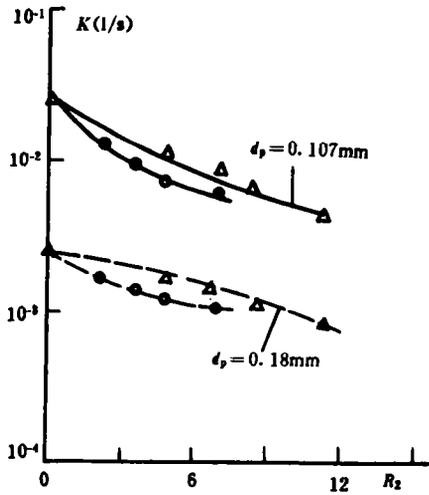


图 4 二次风喷嘴直径对颗粒扬析速率常数的影响
 $u_k = 1.20 \sim 1.23 \text{ m/s}$, $t_k = 30 \text{ }^\circ\text{C}$
 $\blacktriangle d_2 = 10 \text{ mm}$, $\circ d_2 = 7 \text{ mm}$

验结果如图 6 所示。由于侧向二次风的加入，细颗粒($\bar{d}_p = 0.045 \text{ mm}$)的扬析速率常数降低了 60% 以上，粗颗粒($\bar{d}_p = 0.225 \text{ mm}$)的扬析速率常数降低了 50%。

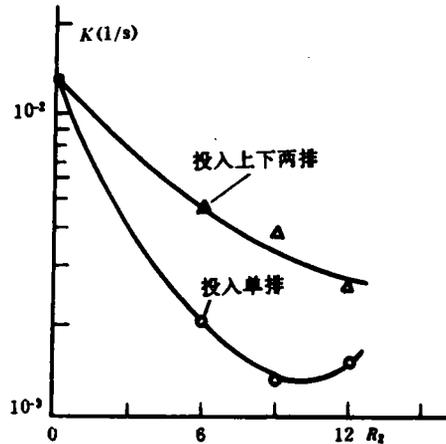


图 5 二次风投入位置对颗粒扬析速率常数的影响
 $Q_{23} = 22 \text{ m}^3/\text{h}$, $U_k = 1.01 \sim 1.02 \text{ m/s}$
 $d_p = 0.107 \text{ mm}$, $t_k = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

率变差,此时的二次风不仅不能延长颗粒在床内的停留时间,反而加大了中心区气流轴向速度,造成扬析速率常数增大。

图 5 给出了在相同二次风量条件下,单投下排和投中、下两排二次风的试验结果,两排喷嘴直径和喷射角度相同。由图可见,两者的扬析速率常数最大相差 3.0 倍。

考虑到旋涡流化床悬浮空间强旋流场有一个涡核区存在,从鼓泡床面向上流动的大量颗粒,除了一部分受到强旋流场的影响,产生分离作用以外,还有相当大的一部分则以较快的轴向速度通过涡核区向上流动,未受旋流的作用,因而扬析量得不到更加有效的控制。为此作者提出在下排旋涡二次风喷嘴下方的适当距离处,从炉墙侧面射入一股扁平高速二次风,迫使位于涡核区下方随气流向上运动的颗粒改变其运动轨迹,向这股扁平风的对侧偏移并上升进入二次风强旋区,进一步延长细颗粒在床内的停留时间,试

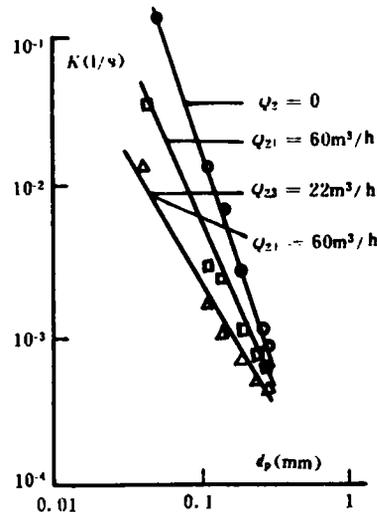


图 6 侧向二次风对扬析速率常数的影响
 $u_k = 1.01 \sim 1.02 \text{ m/s}$, $t_k = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

4.5 气流速度的影响

其它条件不变,仅改变气流速度 u_g ,得如图 7 所示的结果,无二次风时,扬析速率常数随气流速度迅速增大^[6]。二次风加入后,其变化趋势减弱。对于不同粒径,气流速度的影响规律不同。无二次风时,在相同的气流速度变化情况下,粒径越大,颗粒扬析速率常数的变化倍率越大。如 $\bar{d}_p = 0.107 \text{ mm}$ 的颗粒当 u_g 由 0.785 增大到 1.4 m/s 时, K 增大了 22 倍; $\bar{d}_p = 0.18 \text{ mm}$ 的颗粒则增大了 25 倍。有二次风时,其趋势正好相反,小粒径增加 12 倍,而大粒径只增加 11 倍,即二次风能有效地抑制气流速度对颗粒扬析的影响。

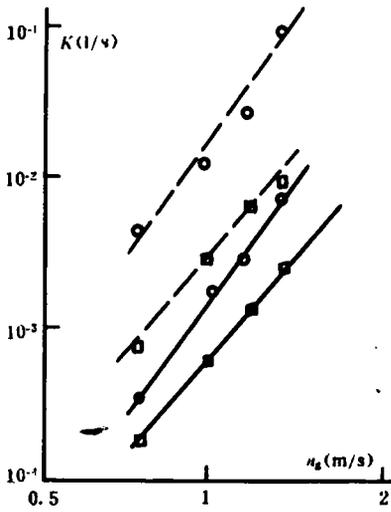


图 7 气流速度对颗粒扬析速率常数的影响

□ $Q_{21} = 40 \text{ m}^3/\text{h}, Q_{23} = 22 \text{ m}^3/\text{h}$
 ○ $Q_{21} = 0, \text{---} \bar{d}_p = 0.107 \text{ mm}$
 --- $\bar{d}_p = 0.18 \text{ mm}, t_g = 30 \text{ }^\circ\text{C}$

4.6 气流温度的影响

到目前为止,在普通鼓泡流化床上进行的这方面的试验还不多^[7],并且各自的试验结果相差较远,而在加旋流化床上的试验结果还没见报道。本文利用燃油产生高温烟气

加热试验物料的方法分别做了四种温度下的颗粒扬析试验结果如图 8 所示。

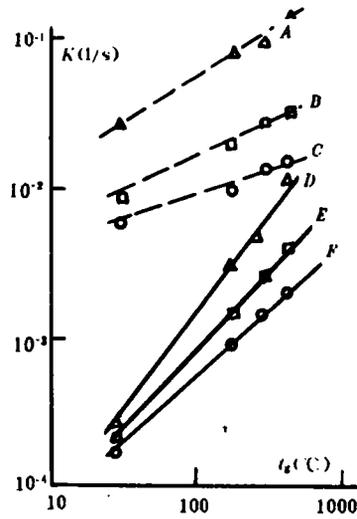


图 8 气流温度对颗粒扬析速率常数的影响

$u_g = 1.20 \sim 1.23 \text{ m/s}, \text{---} \bar{d}_p = 0.142 \text{ mm}$
 --- $\bar{d}_p = 0.107 \text{ mm}$
 A, D $Q_2 = 0$, B, E $Q_{21} = 40 \text{ m}^3/\text{h}$
 C, F $Q_{21} = 40 \text{ m}^3/\text{h}, Q_{23} = 22 \text{ m}^3/\text{h}$

图 8 为两种粒径颗粒在三种不同二次配比下的颗粒扬析速率常数随气流温度的变化曲线。由图可见,随着气流温度的升高,两种物料的扬析速率常数都明显增大,对粗颗粒更为明显。当 $Q_2 = 0$ 时,对于 $\bar{d}_p = 0.142 \text{ mm}$ 的颗粒, $k \sim t_g^{1.4}$,而对于 $\bar{d}_p = 0.107 \text{ mm}$ 的颗粒, $k \sim t_g^{0.6}$;随着二次风的加入,尽管颗粒扬析速率常数仍随气流温度的升高而增大,但其作用关系大为减弱,如对于 $\bar{d}_p = 0.18 \text{ mm}$ 的颗粒, $k \sim t_g$ 。

最后,我们研究了两种不同温度下,二次风作用效果的差别。由图 9 可见,随着温度的升高,二次风作用效果变好,这是因为在相同的二次风射流速度和气流速度下,随着床温的升高,一次风质量流率减小,相对而言,二次风率提高,故产生了如此结果。

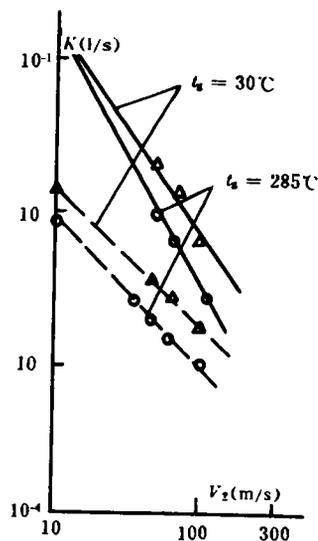


图9 不同温度下二次风射流速度对颗粒扬析速率常数的影响

— $\bar{d}_p = 0.045 \text{ mm}$, --- $\bar{d}_p = 0.142 \text{ mm}$

5 结论

1 加旋流化床的颗粒扬析与传统鼓泡床相比存在很大差别。二次风的加入,使得颗粒在床内运动轨迹发生变化,形成床内循环和高浓度悬浮层,颗粒在床内停留时间得以大大延长。

2 二次风对颗粒扬析速率常数的影响非常明显,一定比例的二次风应首先以单排形式喷入,同时调整二次风喷口直径和喷射角度,保证在悬浮段形成强旋流场。

3 扬析速率常数随流化速度的增大而迅速增大,但随着二次风的加入,两者的作用关系减弱。

4 温度对扬析的作用较为复杂,本文温度范围内的试验结果表明,随着床温的升高,扬析速率常数增大;在高温时,二次风形成切

圆的分离效果的最佳粒径范围为 $0.09 \sim 0.20 \text{ mm}$,这与鼓泡床飞灰热损失最大的粒径区间相吻合。

符号表

- K —颗粒扬析速率常数(1/s)
 F_0 —单位时间的给料量(kg/s)
 \bar{d}_p —颗粒平均粒径(mm)
 u_s —悬浮段气流速度(m/s)
 t_s —悬浮段气流温度($^{\circ}\text{C}$)
 d_2 —二次风喷嘴直径(mm)
 R_2 —二次风率($\frac{\text{二次风量}}{\text{二次风量} + \text{一次风量}}$)(%)
 Q_{21} —下排旋涡二次风量(m^3/h)
 Q_{22} —中排旋涡二次风量(m^3/h)
 Q_{23} —侧向二次风量 (m^3/h)
 W_r —扬析试验结束后床料中细料量(kg)
 β —二次风喷射角度 ($^{\circ}$)
 η_i —给料中第 i 粒度范围物料重量百分比
 ζ_i —床料中第 i 粒度范围物料重量百分比

参考文献

- 1 Leva M. Elutriation of fines from fluidized system. Chem. Eng. Prog., 1951, 47(1): 39
- 2 Wen C Y and Hanshinger R F. Elutriation of solid particle from a dense phase fluidized bed. AIChE. J. 1960, 6(2): 220
- 3 Geldart D, et al. The effect of fines on entrainment from gas fluidized bed. Trans. of I. Chem. Eng., 1979, 57: 269
- 4 Yang G. Mathematical modeling and experimental study of gas/solid flows and combustion in the vortexing fluidized bed combustor freeboard. Ph. D. Dissertation, The Catholic University of America, Washington DC, 1989
- 5 Khan W U Z, et al. Simultaneous removal of NOx and SOx by limestone and ammonia during unstaged and staged fluidized bed combustor. Proc. of the 11th Int. Conf. on FBC, ASME. 1991
- 6 Zenz F A, et al. A theoretical-empirical approach to the mechanism of particle entrainment from fluidized beds. AIChE. J., 1958, 4(4)
- 7 George S E, et al. Entrainment of particles from a pilot scale fluidized bed. Can. J. Chem. Eng., 1981, 59: 279

Based on the measured data of a circulating fluidized bed combustion boiler of various capacity and previous study results, the authors propose an equation for calculating the distribution of pressure drop along the furnace height, thus making it possible to calculate the distribution of solid concentration along the bed height, which can serve as a direct basis for the furnace design. Key words: circulating fluidized bed boiler, pressure drop distribution, axial solid concentration

煤热解的反应动力学研究 = A Study on Coal Pyrolysis Reaction Dynamics [刊, 中] / Xu Yuenian (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -154-157

A great deal of experimental research work on coal pyrolysis was performed by using a TGA92 thermoanalyser of French make. The factors affecting coal pyrolysis were discussed. On the basis of the thermal analysis results the equation of coal pyrolysis dynamics and its relevant parameters were determined. finally, an in-depth exploratory study was conducted of the pyrolysis reaction rate, a key factor for the pyrolysis furnace productivity. Key words: thermogravimetry, derivative thermogravimetry, differential thermal analysis

CFBC 锅炉内多重内循环燃烧技术研究与应用 = The Research and Application of Multiple In-furnace Circulating Combustion Technology for a CFBC Boiler [刊, 中] / Jiang Xiumin, et al (Northeastern Institute of Electric Power Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -158-161, 185

The principle and structure of multiple in-furnace circulating combustion technology of a CFBC boiler comprising inner circulating combustion technology of furnace lower portion dense-phase region and circulating combustion technology of furnace upper portion rare-phase region are discussed in the present paper. The circulating fluidized bed boiler, based on the above-cited technology, has the following advantages: high efficiency, small space, low cost, light wear, low power consumption, stable and simple operation and a wide range of load adjustment capability as well as a high adaptability to the burning of various coals. In view of the foregoing it pertains to an ideal type of industrial circulating fluidized bed boiler. Its long-term operation has proved that the multiple in-furnace circulating combustion technology is ideally suited for industrial circulating fluidized bed boilers of small and low-height combustion space. Key words: CFBC boiler, combustion technology, circulating combustion, structural optimization

加旋流化床颗粒扬析规律的试验研究 = An Experimental Study of the Elutriation Mechanism of Vortexing Fluidized Bed Particles [刊, 中] / Liu Kunlei, Jin Baosheng, Zhao Changsui, et al (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -162-167

With the fly-ash falling off from a fluidized bed serving as test material a systematic study of the elutriation mechanism of fluidized bed particles was conducted on a vortexing fluidized bed test stand with a cross-section area of $0.285\text{m} \times 0.285\text{m}$, a height of 6 m and heat input of 0.3 MW. The test results have shown that the elutriation rate constant of the particles in the vortexing fluidized bed is considerably lower than that of a conventional bubble bed. However, there exists a great difference between the elutriation behavior of fly-ash in the vortexing fluidized bed of rectangular section and that of glass balls in a vortexing bed of circular section. Under the same particle size and operating conditions the former has a significantly greater elutriation constant than the latter. The separation characteristics of the secondary air in the vortexing fluidized bed suspension space is also somehow different from that in a cyclone separator. Key words: fluidized bed boiler, coal, particle, elutriation rate

关于齿轮磨合运转工况的研究 = A Study on the Running-in Operating Mode of Gears [刊, 中] / Zhao Jianping, Du Hongjia (Harbin Shipbuilding University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(3). -168-174