

# 流化床中焚烧有机废液的热力特性分析

别如山, 杨励丹, 刘文铁, 周 定

(哈尔滨工业大学 能源学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 建立了以煤为辅助燃料, 有机废液在流化床中焚烧密相区及稀相区的热平衡方程, 在此基础上计算获得废液在密相区的焚烧量占总处理量的份额, 密相区焚烧温度, 炉膛出口空气过剩系数以及预热空气温度对辅助燃料耗量及炉膛出口温度的影响关系曲线。计算结果表明: 废液在密相区焚烧量占总焚烧量的 70% 时, 可使密相区温度与炉膛出口温度基本一致; 密相区温度宜控制在 850 °C ~ 900 °C, 可节省辅助燃料; 炉膛出口空气过剩系数宜控制在 1.7 以内, 同时尽可能提高预热空气温度。此结果为流化床焚烧炉的设计与运行提供理论依据。

**关键词:** 有机废液; 流化床; 焚烧炉; 辅助燃料量

中图分类号: TK229.91, TK229.6<sup>+</sup> 文献标识码: A

## 1 前言

高浓度有毒有害有机废液目前在发达国家中普遍采用焚烧方法加以处理<sup>[1-2]</sup>。由于流化床焚烧炉具有焚烧效率高, 环保性能好, 运行成本低, 操作方便, 运行稳定等优点, 所以被广泛应用于有机废液的焚烧处理。焚烧法是将废液中有毒有害物质经高温分解为无害物质后排入大气的方法, 具有良好的社会效益和环境效益。

由于有机废液的热值较低, 所含的热值不足以提供废液的蒸发和燃烧所需的热量。因此常需添加辅助燃料。在国外, 辅助燃料一般为燃油或燃气, 但运行费用高, 国内用户一般难以承受, 根据目前我国国情, 作者提出了以煤为辅助燃料, 开发的流化床废液焚烧炉已成功应用于河南省平顶山尼龙 6.6 盐

厂。

## 2 密相燃烧区的热平衡

### 2.1 辅助燃料用于加热废液的热量

废液焚烧炉一般不布置受热面, 废液经雾化后可同时喷入密相区和稀相区内焚烧。图 1 为流化床焚烧室内密相区和稀相区的热平衡框图。根据图 1 可列出辅助燃料用于加热废液的热量为:

$$\Delta Q_m = B(Q_{\text{net}}^m + i_m) - Q_{3\text{ft}}^m - Q_{4\text{ft}}^m - Q_{5\text{ft}}^m - Q_{6\text{ft}}^m + B_j k_1 \alpha_{\text{ft}} I_{\text{km}}^0 - B_j^* I_{\text{ftm}}'' \quad (1)$$

其中,  $Q_{\text{net}}^m$  为辅助燃料的低位发热值,  $B$  为辅助燃料消耗量,  $B_j$  为计算燃料消耗量,  $B_j^*$  为辅助燃料在密相区的计算燃料消耗量,  $I_{\text{ftm}}''$  为密相区出口每公斤

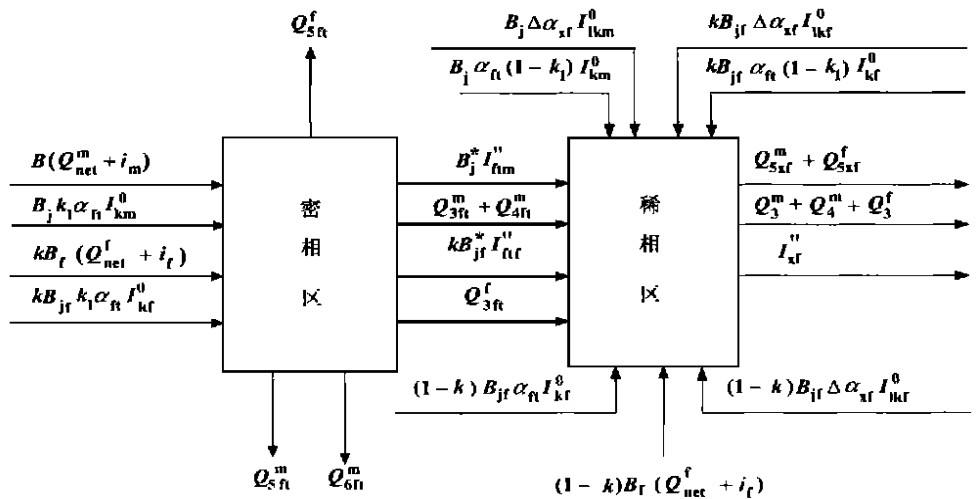


图 1 流化床焚烧室热平衡框图

辅助燃料完全燃烧产生的烟气所具有的焓值, 按常规流化床锅炉热力计算方法计算,  $k_1$  为一次风份额, 角标 m 代表辅助燃料煤。

按常规流化床锅炉热力计算方法<sup>[3]</sup>, 将式(1)经整理得:

$$\Delta Q_m = B_j [ Q_1^m - \frac{100 - q_{4f}^m}{100 - q_4} I''_{ftm} ] \quad (2)$$

$$Q_1^m = Q_r \frac{\delta^m (100 - q_3^m - q_4^m) - q_{5f}^m - q_{6f}^m}{100 - q_4^m} + k_1 \alpha_{ft} I_{km}^0 \quad (3)$$

$$Q_r = Q_{net}^m + i_m \quad (4)$$

式中  $q_3^m, q_4^m$  为辅助燃料在焚烧室出口的气体不完全燃烧损失和固体不完全燃烧损失,  $q_{3f}^m, q_{4f}^m$  为辅助燃料在密相区的气体不完全燃烧损失和固体不完全燃烧损失,  $q_{5f}^m, q_{6f}^m$  为煤在密相区的散热损失和灰渣热损失,  $\delta^m$  为煤在密相区的燃烧份额,  $i_m$  为煤的物理热,  $\alpha_{ft}$  为密相区的名义空气过剩系数,  $I_{km}^0$  为煤的理论空气焓, 所有这些参数按常规流化床锅炉热力计算方法计算或选取。

## 2.2 废液在密相区燃烧达到密相区燃烧温度时所需的热量

一般来说, 由于废液含灰量很低, 且废液中可燃物质较易燃烧, 所以, 固体不完全燃烧损失可以忽略不计, 即  $q_4^f = 0, q_{4f}^f = 0$ 。由图1可知, 废液在密相区燃烧达到密相区燃烧温度时, 所需的热量由下式表示。

$$\Delta Q_f = kB_{jf} I''_{ftf} - [ kB_f (Q_{net}^f + i_f) - Q_{3f}^f - Q_{5f}^f + kB_{jf} k_1 \alpha_{ft} I_{kf}^0 ] \quad (5)$$

式中  $k$  表示送入密相区焚烧的废液量占总量  $B_f$  的比,  $Q_{net}^f$  为废液的低位发热值, 由两部分组成即

$$Q_{net}^f = \frac{100 - W_{ar}}{100} Q_{net}^r - 25.12 W_{ar} \quad (6)$$

其中  $W_{ar}(\%)$  为废液含水率,  $Q_{net}^r$  为1公斤废液中可燃基的低位发热值(kJ/kg), 可根据废液的化学需氧量(COD) 计算得到<sup>[4]</sup>。

定义  $q_{3f}^f = \frac{100 Q_{3f}^f}{kB_f (\frac{100 - W_{ar}}{100} Q_{net}^r + i_f)} \%$ ;

$$q_{5f}^f = \frac{100 Q_{5f}^f}{kB_f (\frac{100 - W_{ar}}{100} Q_{net}^r + i_f)} \% \quad (7)$$

根据煤在密相区燃烧份额的定义, 可定义废液中可燃成份在密相区的燃烧份额为:

$$\delta^f = \frac{100 - (q_{3f}^f + q_{4f}^f)}{100 - (q_3^f + q_4^f)} = \frac{100 - q_{3f}^f}{100 - q_3^f} \quad (8)$$

并且有  $B_{jf} = B_f \frac{100 - q_4^f}{100} = B_f$ ;

$$B_{jf}^* = B_f \frac{100 - q_{4f}^f}{100} = B_f \quad (9)$$

将式(6) ~ 式(9) 代入式(5) 得

$$\Delta Q_f = kB_f [ I''_{ftf} + 25.12 W_{ar} - Q_1^f ] \quad (10)$$

其中  $Q_1^f = Q_r^f \frac{\delta^f (100 - q_3^f) - q_{5f}^f}{100} + k_1 \alpha_{ft} I_{kf}^0 \quad (11)$

$$Q_r^f = \frac{100 - W_{ar}}{100} Q_{net}^r + i_f \quad (12)$$

$i_f$  为废液的物理热;  $\delta^f$  为废液中可燃成份在密相区的燃烧份额, 其实验结果为 0.7 ~ 0.8, 工程上还缺乏应用数据, 本文计算中取值为 0.75,  $q_3^f$  为废液在焚烧室出口的气体不完全燃烧损失,  $q_{5f}^f$  为废液在密相区的散热损失, 可参考燃煤的  $q_3^m, q_{5f}^m$  取值选取。  $I_{kf}^0$  为废液的理论空气焓, 按废液的理论空气量计算。废液的理论空气量  $V_{f, O_2}^0$ , 三原子气体体积  $V_{f, RO_2}^f$ , 氮气体积  $V_{f, N_2}^f$  和水蒸气体积  $V_{f, H_2O}^f$  由废液中元素分析  $C_{ar}, H_{ar}, O_{ar}, N_{ar}, S_{ar}$  和  $W_{ar}$  按常规方法计算, 在进行废液焚烧炉设计之前, 废液中可燃成份由用户提供。公式(10) 中的  $I''_{ftf}$  为密相区温度下每公斤废液完全燃烧产生的烟气所具有的焓值, 按下式计算。

$$I''_{ftf} = (c_{RO_2} V_{RO_2}^f + c_{N_2} V_{N_2}^f + c_{H_2O} V_{H_2O}^f + (k_1 \alpha_{ft} - 1) c_k V_f^0) \theta_{ft} \quad (13)$$

其中  $c_{RO_2}, c_{N_2}, c_{H_2O}, c_k$  分别为三原子气体、氮气、水蒸气和空气在密相区温度下 ( $\theta_{ft}$ ) 的比热。因此, 从密相区总体热平衡看, 则有  $\Delta Q_m = \Delta Q_f$ , 即:

$$B_j [ Q_1^m - \frac{100 - q_{4f}^m}{100 - q_4} I''_{ftm} ] = kB_f [ I''_{ftf} + 25.12 W_{ar} - Q_1^f ] \quad (14)$$

令  $M = \frac{B}{B_f}$  为每公斤废液焚烧所需的燃料消耗量, 将

公式  $B = \frac{100}{100 - q_4} B_j$  代入式(14) 得

$$M = \frac{k (I''_{ftf} + 25.12 W_{ar} - Q_1^f)}{Q_1^m - \frac{100 - q_{4f}^m}{100 - q_4} I''_{ftm}} \cdot \frac{100}{100 - q_4} \quad (15)$$

需要指出的是, 公式(6) 将汽化潜热  $25.12 W_{ar}$  从低位热值中分离出来, 是因为废液中的水分全部在密相区内蒸发。如果公式(12) 为  $Q_r^f = Q_{net}^f + i_f$ , 那么从公式(11) 及公式(10) 可以看出, 由于废液在密相区燃烧份额的存在, 废液中水的汽化潜热将不是全部从密相区获得。

### 3 稀相燃烧区的热平衡

#### 3.1 辅助燃料煤燃烧带入稀相区热量

由稀相区热平衡框图可知,辅助燃料煤燃烧带入稀相区的热量经化简得:

$$Q_{sf}^m = B_f \left[ \frac{100 - q_{4f}^m}{100 - q_4^m} I_{fm}'' + Q_r \frac{(1 - \delta^m)(100 - q_3^m - q_4^m) - q_{5xf}^m}{100 - q_4^m} + \Delta\alpha_{xf} I_{km}^0 + \alpha_{ft}(1 - k_1) I_{km}^0 \right] \quad (16)$$

其中  $\Delta\alpha_{xf}$  为稀相区的漏风系数,一般取 0.1,  $q_{5xf}^m$  为对应于煤在稀相区的散热损失,  $\alpha_{ft}(1 - k_1) I_{km}^0$  为对应于煤燃烧的二次风带入稀相区的热量。

#### 3.2 废液燃烧带入稀相区的热量

废液燃烧带入稀相区的热量,加上密相区燃烧的废液的二次风带入稀相区的热量  $kB_f \alpha_{ft}(1 - k_1) I_{kf}^0$  和漏风焓  $kB_{jf} \Delta\alpha_{xf} I_{kf}^0$ , 加上稀相区焚烧的废液的热量  $(1 - k)B_f(Q_{net}^f + i_f)$ , 相应的风焓  $(1 - k)B_{jf} \alpha_{ft} I_{kf}^0$  和漏风焓  $(1 - k)B_{jf} \Delta\alpha_{xf} I_{kf}^0$ , 经化简为:

$$Q_{sf}^f = B_f \left[ k I_{ff}'' + Q_r^f \frac{k(1 - \delta^f)(100 - q_3^f) + (k - 1)q_3^f - q_{5xf}^f}{100} + \Delta\alpha_{xf} I_{kf}^0 + (1 - k)(Q_{net}^f + i_f) + \alpha_{ft}(1 - k k_1) I_{kf}^0 \right] \quad (17)$$

$$\text{其中 } q_3^f = \frac{100 Q_3^f}{B_f Q_r^f} \% ; q_{5xf}^f = \frac{100 Q_{5xf}^f}{B_f Q_r^f} \% \quad (18)$$

$I_{kf}^0$  为按废液理论空气量计算的冷空气焓,  $q_{5xf}^f$  为对应于废液在稀相区的散热损失,取  $q_{5xf}^f = q_{5xf}^m$ , 其值按常规锅炉选取。则稀相区出口烟气焓  $I_{xf}''$  (kJ/kg) 为:

$$I_{xf}'' = \frac{Q_{sf}^m + Q_{sf}^f}{B_j + B_f} \quad (19)$$

由此热量可求出稀相区出口温度  $\theta_{xf}''$  (°C)。

### 4 辅助燃料量与热力参数的关系

#### 4.1 辅助燃料量与废液在密相区焚烧量占总废液量之比的关系

密相区温度为 900 °C, 以山东良庄二类烟煤为辅助燃料<sup>[5]</sup> ( $Q_{net}^m = 17\,693.4$  kJ/kg), 计算得到的辅助燃料量与废液在密相区焚烧量占总量的比 ( $k$ ) 之间的关系如图 2(a) 所示。可见,随着  $k$  的增加,辅助燃料量呈直线上升,这从公式(15)可以得出,并且废液的热值高,辅助燃料量就少。同时也看出,尽管两种废液热值相差一半,但辅助燃料量增加不多。原因是一方面两者热值都很低;另一方面,废液含水率

很高,从而热量大部分用于水分的蒸发。这两种废液来源于平顶山尼龙 6.6 盐厂,元素分析如表 1 所示。

表 1 己二酸、己二胺废液元素分析

废液名称	C <sub>ar</sub>	H <sub>ar</sub>	O <sub>ar</sub>	N <sub>ar</sub>	S <sub>ar</sub>	A <sub>ar</sub>	W <sub>ar</sub>	$Q_{net}^f / \text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
己二酸废液	10.74	1.45	11.84	0	0	1.97	74	1 623
己二胺废液	11.16	2.31	0	3.56	0	0.97	82	3 278

稀相区出口温度与  $k$  的关系见图 2(b), 可见,随着废液在密相区焚烧比例的增加,稀相区出口温度逐渐升高。这是由于辅助燃料量的增加和稀相区焚烧废液量的减少所致。当  $k = 1$  时,稀相区出口温度高出密相区温度 100 °C 左右,这与实际情况比较吻合。如果让稀相区出口温度也在 900 °C 左右或稍高一些。那么废液在密相区焚烧量应占废液总量的 70% 左右。从图中也可看出,尽管两种废液热值相差较多,但出口温度由于辅助燃料量的增加而趋于一致。

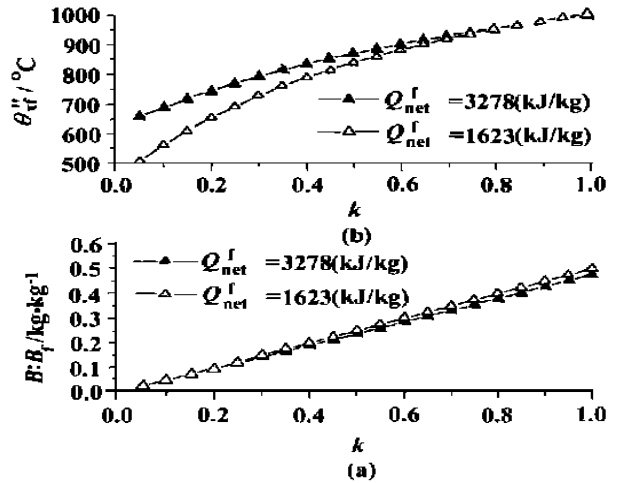


图 2 辅助燃料量及稀相区出口温度与  $k$  关系 ( $\theta_{ft} = 900$  °C,  $\alpha_{ft} = 1.3$ ,  $k_1 = 0.8$ ,  $\delta = 0.75$ )

#### 4.2 辅助燃料量与密相区焚烧温度的关系

辅助燃料量与密相区焚烧温度的关系如图 3(a) 所示。可见,随着密相区温度的增高,辅助燃料量增加迅速。图中的结果是按  $k = 0.7$  计算得到的。同时从图 3(b) 看出,稀相区出口温度也随着密相区温度的增加而增高。

#### 4.3 辅助燃料量与过剩空气系数 $\alpha_{ft}$ 的关系

过剩空气系数对辅助燃料量的影响如图 4(a) 所示。可见,当  $\alpha_{ft} < 1.6$  ( $\alpha_{xf}'' = 1.7$ ) 时,辅助燃料量随着  $\alpha_{ft}$  增加而缓慢增加;而当  $\alpha_{ft} > 1.7$  时,辅助燃料量随着  $\alpha_{ft}$  增加而迅速增加。这主要是因为辅助燃料燃烧所产生的热量被大量的加热空气带走。稀相

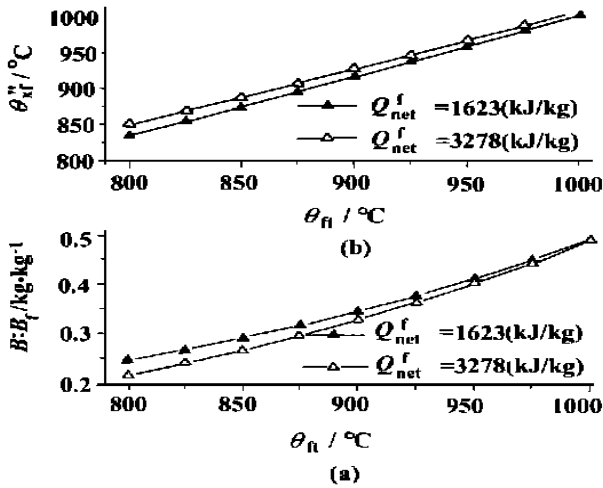


图3 辅助燃料量及稀相区出口温度与  $\theta_{ft}$  关系  
 ( $k = 0.7, \alpha_{ft} = 1.3, k_1 = 0.8, \delta = 0.75$ )

区出口温度随着  $\alpha_{ft}$  增加先逐渐降低之后又缓慢增加,如图 4(b) 所示。

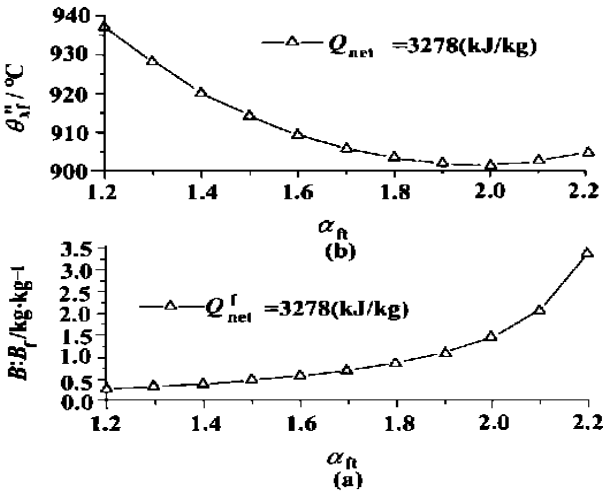


图4 辅助燃料量及稀相区出口温度与  $\alpha_{ft}$  关系  
 ( $\theta_{ft} = 900\text{ }^\circ\text{C}, k = 0.7, k_1 = 0.8, \delta = 0.75$ )

#### 4.4 辅助燃料量与预热空气温度的关系

预热空气温度  $t_k$  对辅助燃料量的影响如图 5(a) 所示。可见,随着空气温度的增加,辅助燃料量迅速减少,表明增加空气温度非常有利于辅助燃料量的降低。稀相区出口温度受空气温度的影响如图 5(b) 所示。可见,随着空气温度的增加,稀相区出口温度增加。

### 5 应用

此方法已应用于河南省平顶山尼龙 6.6 盐厂流化床废液焚烧炉的设计,运行结果表明,辅助燃料量

与焚烧温度、空气过剩系数、废液在密相区的焚烧量各参数的实测值与设计值基本吻合,说明此方法能够应用并指导流化床废液焚烧炉的设计。

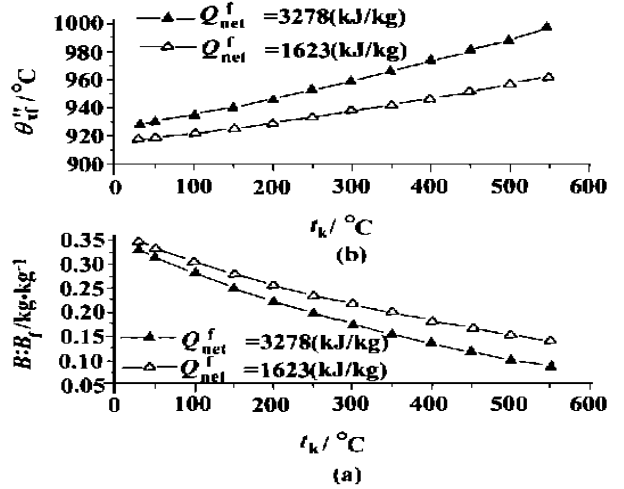


图5 辅助燃料量及稀相区出口温度与  $t_k$  关系  
 ( $\theta_{ft} = 900\text{ }^\circ\text{C}, k = 0.7, \alpha_{ft} = 1.3, k_1 = 0.8, \delta = 0.75$ )

### 6 结论

(1) 废液在密相区的焚烧量占总废液量的 70% 左右,可使密相区和稀相区温度基本一致;(2) 密相区燃烧温度增加,辅助燃料量迅速增加,所以,应根据废液焚烧的难易程度,确定合理的焚烧温度,以降低运行成本;(3) 当  $\alpha_{ft} > 1.7$  时,辅助燃料量随着  $\alpha_{ft}$  增加而迅速增加,所以,应控制好焚烧炉出口氧量在合理的范围内;(4) 空气温度的增加,非常有利于辅助燃料量的降低,所以,应尽可能提高热空气温度。国外利用耐热不锈钢空气预热器,布置于焚烧炉出口,可将空气加热至  $550\text{ }^\circ\text{C}$ ,最大限度地降低运行成本;(5) 运行实践表明,此方法能够应用于流化床废液焚烧炉的设计。

#### 参考文献:

[1] BECKER K B, WALL C J. Fluid bed incineration of wastes[J]. **Chem Eng Prog**, 1976, 72(10): 61-68.  
 [2] MULLEN J F. Consider fluid-bed incineration for hazardous waste destruction[J]. **Chemical Engineering Progress**, 1992, 88(6): 50-58.  
 [3] 赵明泉. 锅炉结构与 设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1987.  
 [4] 别如山, 陆慧林, 杨勋丹. 高浓度有机废液热值的探讨[J]. **上海环境科学**, 1998, 17(4): 35-37.  
 [5] 徐通模, 金定安, 温龙. 锅炉燃烧设备[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990.

(渠源 编辑)

simulation, power plant system

铸铁锅炉爆破压力的热态试验和理论分析 = **Hot-state Explosion Pressure Test of a Cast-iron Boiler and Its Theoretical Analysis** [刊, 汉] / LIU Wen-tie, HE Yu-rong, LI Zhi-hong (Energy Engineering College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), BAI Wu-yin (Shijiazhuang Baoshi Electronics Group Co., Shijiazhuang, Hebei Province, China, Post Code: 050061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 434 ~ 436

On the basis of the test results of a full-scale hot-state explosion test a calculation and analysis was conducted of the explosion pressure of the following: square-box test parts, nodular cast-iron boiler, grey cast-iron boiler and grey cast-iron boiler plates. As a result, obtained were the relevant safety factors recommended for selection. The tests and analysis indicate that the safe and reliable operation of cast-iron boilers can be assured. **Key words:** hot-state explosion test, cast-iron boiler, explosion pressure, safety factor

流化床中焚烧有机废液的热力特性分析 = **Thermodynamic Analysis of the Burning of Organic Waste Liquid in a Fluidized Bed Incinerator** [刊, 汉] / BIE Ru-shan, LI Bing-xi, LIU Wen-tie, LU Hui-lin, YANG Li-dan, ZHOU Ding (Energy Engineering College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 437 ~ 440

With coal serving as an auxiliary fuel heat balance equations were established for the burning of organic waste liquid in the dense-phase zone and rare-phase zone of a fluidized-bed incinerator. By solving for these equations determined were the following: 1. The ratio of waste liquid being incinerated in the dense-phase zone as calculated against the total incinerated quantity; 2. Characteristics curves showing the effect of the incineration temperature in the dense-phase zone, excess air factor at the furnace outlet and the preheating air temperature on the consumption of the auxiliary fuel and the furnace outlet temperature. The results of calculation indicate that with the ratio of the waste liquid incinerated in the dense-phase zone being kept at 70% of the total incinerated quantity the temperature in the dense-phase zone can be roughly maintained at the same level as that at the furnace outlet. Moreover, it is highly desirable to control the dense-phase zone temperature at 850 - 900 °C in order to reduce the consumption of auxiliary fuel and to limit the excess air factor at less than 1.7 in order to maximize the preheating air temperature. The above findings can serve as a theoretical basis for the design and operation of fluidized bed-based waste liquid incinerators. **Key words:** organic waste liquid, fluidized bed, incinerator, auxiliary fuel consumption

WDR 系列 0.35 ~ 1.4MW 电热锅炉及其设计 = **WDR Series 0.35 - 1.4 MW Electric Heating Boilers and Their Design** [刊, 汉] / CAO Xi-gong (Technology Center of Zhengzhou Boiler Works, Zhengzhou, Henan Province, China, Post Code: 450052) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 441 ~ 443

Electric heating boilers enjoy the following merits: no noise, no pollution, advanced technology, simple fabrication, compact construction, safe and high-efficiency operation, etc. A detailed account is given of the structural design and specific features of the WDR series 0.35 - 1.4 MW pressure-bearing electric heating hot-water boilers. **Key words:** electric heating, pressure-bearing hot water boiler, cylindrical body, heating surface, specific features

活性炭联合脱硫脱硝工艺 = **Activated Carbon-based Combined Desulfuration and Denitration Technology** [刊, 汉] / LUO Yong-gang, LI Da-ji, YANG Ya-ping (Research Institute of Thermal Energy Engineering under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2001, 16(4). — 444 ~ 446

Described is a kind of new technology featuring combined desulfuration and denitration. With the use of this technology it is possible to remove such a variety of items as  $SO_x$ ,  $NO_x$  and poisonous matter in flue gas like mercury, dioxin, etc. The merits, demerits and the development trend of the above-cited technology have also been presented. The information provided may serve as major reference data for the treatment of air pollution in China. **Key words:** desulfuration, denitration, activated carbon

火力抽水—蓄能发电 = **Thermal Power and Pumped Storage-based Electric Power Generation** [刊, 汉] / SHENG Jian-lun (Computer Department, Qingdao Architectural Engineering Institute, Qingdao, Shandong Province, China,