

利用面阵 CCD 进行火焰温度分布测量(II)

——三维截面温度场的测量

卫成业¹, 严建华², 商敏儿¹, 岑可法²

(1. 广东省电信科学技术研究院, 广东 广州 510630; 2. 浙江大学 热能所, 浙江 杭州 310027)

摘要:利用 CCD(电荷耦合器件)进行火焰截面温度分布测量的测试系统,作了简化处理建立了实用的模型。对遗传算法略改进后,用以求解所建立的模型以重建出待测的火焰截面温度分布。最后对遗传算法的数值性质进行了分析,并在油煤混烧试验台上进行了试验,给出了测试结果。

关键词:CCD 温度测量; 遗传算法

中图分类号:TK311 文献标识码:A

符号

$I_{\lambda, r}(s)$ —— s 处的辐射强度; $K_{\lambda}(s)$ —— s 处的辐射吸收系数; $I_{\lambda, b}(s)$ —— s 处的介质温度所对应的黑体辐射强度; m ——射线 r 穿过的网格数; L ——射线总数; $A_{r, j}$ ——辐射接受信号方程组的系数,与辐射减弱系数 K 的分布相关; f_v ——粒子系体积份额; C ——辐射减弱系数拟合公式中的一个与 T 无关的常数,可由实验标定得。

1 引言

和二维投影温度场的测量相比(从研究燃烧机理和进行燃烧诊断的角度),反映火焰截面(断面),内部三维温度分布的截面温度场的测量显得更有意义。文献[1~3]在这一领域有所涉足,但它们只是针对实验室的小型火炬给出了自己的测量模型、重建算法和对特定的测试系统从物理原理上进行了建模与分析,而没给出可行的算法。针对基于 CCD 的火焰截面温度测试系统,文献[4~5]深入地进行了一些探讨,提出了简化后的实用模型并给出了相应的数学解法。但在数值模拟计算和实验室的实际测试计算中发现,这两篇文献中提出的解法都有不如人意之处。它们对于网格划分比较粗,即未知数数目较少的情况,可能是行之有效的;但当未知数数目增多时,就会碰到以下一些问题:(1)文献[4]是将待求解的问题视为一个非线性优化问题,再用一些传

统的优化问题的求解方法(比如复形调优法等)进行求解。但传统的非线性问题的解法,在未知数空间维数较高的时候会发生“指数爆炸”的现象,如何将一些求解低维非线性优化问题行之有效的方法推广以求解高维的非线性优化问题至今在数学上尚未得到解决。(2)非线性优化问题的求解是依赖于初值的,传统的一些解法常常只是搜索到距离初值最“近”的一个解,而合适初值的选取又缺乏一定的指导原则;(3)文献[5]是用逐步迭代的方法将待求解的非线性问题线性化,进而借鉴 CT 中的 ART 方法(Algebra Reconstruction Technique, 代数重建技术)迭代求解^[6]。这种嵌套迭代的求解方法:收敛性得不到保证;ART 的迭代算法依赖于初值;通过对系数矩阵的分析知道,系数矩阵是一个条件数比较大的矩阵,根据数值分析的理论,这样解得结果的数值稳定性较差^[7]。

遗传算法是模仿自然生物进化思想的一种全局优化算法^[8],它将“适者生存”的达尔文进化理论引入串结构,并且在串之间进行有组织但又随机的信息交换。伴随着算法的进行,优良的品质被逐渐保留并加以组合,从而不断产生出更佳的个体,对于优化问题而言,就是不断地接近全局最优解。遗传算法具有计算简单、功能强及鲁棒性的优点,而且它对于搜索空间和寻优函数不需要任何限制性的假设^[9]。鉴于此,作者将遗传算法略作改进后求解温度场重建问题,并取得了较好的效果。

2 系统建模

2.1 物理模型

在火焰截面温度场的测量系统中,使用的检测元件是响应范围在可见光波段的普通面阵 CCD,故辐射特征区在红外区域的气体组分的影响忽略不

计;另外,煤粉锅炉的颗粒的粒径很小,其散射作用可以忽略^[10]。在这种假设前提下,考察一条射线 r , 得到其辐射传递方程:

$$\frac{dI_{\lambda,r}(s)}{ds} = -K_{\lambda}(s)I_{\lambda,r}(s) + K_{\lambda}(s)I_{\lambda,br}(s) \quad (1)$$

其中, $K_{\lambda}(s)$ 为 s 处的辐射吸收系数, $I_{\lambda,r}(s)$ 为 s 处的辐射强度, $I_{\lambda,br}(s)$ 为 s 处的介质温度所对应的黑体辐射强度,可由 Planck 辐射定律算得。

将测量区域离散化成 $G = MN$ 的矩形区域,并假设在每一个矩形元中其温度 T_i 与辐射吸收系数 K_i 是均匀的。故可对式(1)在能束经过的每一个矩形元内局部积分,得到一个递推关系式:

$$I_{\lambda,r}(s+ds) = I_{\lambda,r}(s)e^{-K_{\lambda}(s) \cdot ds} + I_{\lambda,br}(s) \cdot (1 - e^{-K_{\lambda}(s) \cdot ds}) \quad (2)$$

根据这个局部积分迭代关系式,对射线 r ,从壁面上的对应点开始(此处的辐射强度值是初始辐射强度值 $I_{\lambda,r,0}$,它是我们在求解时已知的边界条件之一,由背景——对炉膛而言,应是水冷壁——温度算得),反复递推到 CCD 接受点为止(此处的辐射强度值为面阵 CCD 检测到的辐射强度 $I_{\lambda,r,E}$,可由面阵 CCD 获得的照度直接获得^[11])。最后,得到测试系统的模型:

$$P_r = I_{\lambda,r,0} e^{-\sum_{i=1}^m k_{\lambda,r,i} S_{r,i}} + \sum_{j=0}^m I_{\lambda,r,j} (1 - e^{-k_{\lambda,r,j} S_{r,j}}) e^{-\sum_{i=j+1}^m k_{\lambda,r,i} S_{r,i}} \quad (r = 1, 2, 3, \dots, L) \quad (3)$$

其中, m 为射线 r 穿过的网格数, L 为射线总数。上式中,等式右边的第一项是由于炉膛壁面辐射引起的。和炉内的高温区域相比,炉膛壁面的温度较低,其辐射能量也比较小,在实际计算中,常常将其忽略,模拟计算的结果表明:这样简化处理带来的误差不到 1%。因此式(3)可以简写成:

$$P_r = \sum_{j=0}^m A_{r,j} I_{\lambda,r,j} \quad (r = 1, 2, 3, \dots, L) \quad (4)$$

其中, $A_{r,j}$ 是与辐射减弱系数 K 的分布有关的系数, $I_{\lambda,r,j}$ 则是可由待测温度分布根据 Planck 定律确定的物理量。

2.2 简化模型

如何由测得的 $\{I_{r,e}\} (r = 1, 2, \dots, L)$ 反演得到 $\{T_i\}$ 及 $\{K_i\} (i = 1, 2, \dots, G)$ 分布?这是一个非线性问题,其未知数空间的维数是 $2G$ 。为了方便求解,首先应进行降维。我们根据煤粉粒子系的辐射特性将 K_{λ} 假设为 T 的单值函数,从而将未知数空间的维数

降为 G 。理论依据如下:

文献[12]指出,粒子的全波长辐射吸收系数 K 与粒径分布参数 (R_{90}, p) 、辐射源温度 T 和粒子系体积份额 f_v 有关,并可拟合如下函数形式: $K = ap^b R_{90}^c T^d f_v$ 。并进一步由试验结果得出结论:在温度范围 $(300 \text{ } ^\circ\text{C} \sim 1700 \text{ } ^\circ\text{C})$ 内,拟合误差小于 $\pm 15\%$, $d \approx 0.03$ 。因此,我们认为:

$$K \propto T^{0.03} \quad (5)$$

其中,符号 \propto 表示“正比于”。上式中的 K 是全波长的辐射吸收系数,而我们感兴趣的是单波长的辐射吸收系数 K_{λ} ,前者是后者的积分平均值。有:

$$K = \frac{1}{Q^4} \int_0^{+\infty} K_{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda \propto T^{0.03} \Rightarrow \int_0^{+\infty} K_{\lambda} \frac{\lambda^{-5}}{e^{C_2/(\lambda T)}} d\lambda \propto T^{4.03} \quad (6)$$

要求 $K_{\lambda} \propto T^{4.03} \times (e^{C_2/(\lambda T)})^{-1}$ 几乎处处成立(“几乎处处成立”的含义是指除了一些零测度集外,处处成立)。因此,我们近似认为:

$$K_{\lambda} = CT^{4.03} \cdot (e^{C_2/(\lambda T)})^{-1} \quad (7)$$

其中, C 是一个与 T 无关的常数,可由实验标定得。

这样,出现在式(4)中的 $A_{r,j}$ 就成了仅由温度分布 $T = [T_1, T_2, \dots, T_G]^T$ 确定的系数,从而可以得到简化的测量系统模型:

$$P_r = \sum_{j=0}^m A_{r,j}(T) I_{\lambda,r,j}(T) \quad (r = 1, 2, 3, \dots, L) \quad (8)$$

3 求解算法

3.1 已有的求解算法

针对简化后的测试系统模型,常见的求解算法有两种:(1)线性化后用 ART 方法求解;(2)直接用复形调优法等传统的优化方法求解。

3.1.1 迭代的 ART 方法

迭代的 ART 方法^[5]的原理是假定一组温度分布 $T^{(0)}$,由式(8)可确定辐射减弱系数分布 $K^{(0)}$,这样就可以计算式(4)中的系数 $A_{r,j}$,从而得到由 L 个线性方程组成的线性方程组,对其用 ART 技术进行求解得到 $T^{(1)}$,再重复上述过程,如此迭代进行,其迭代计算的次序为:

$$T^{(0)} \Rightarrow K^{(0)} \Rightarrow T^{(1)} \Rightarrow K^{(1)} \Rightarrow \dots \Rightarrow T^{(i)} \Rightarrow K^{(i)} \Rightarrow T^{(i+1)} \Rightarrow \dots$$

其中, $\langle 1 \rangle$: 根据 $T^{(i)}$ 确定 $K^{(i)}$,由式(8)算得;

(2): 根据 $K(i)$ 确定 $T(i+1)$, 是通过求解式(4) 代表的方程组得到。因此, 一般有:

$$P_r = \sum_{j=0}^m A_{r,j} (K^{(i)}) I_{\lambda,r,j} (T^{(i+1)}) \quad (9)$$

如果迭代的结果是收敛的, 即有: $\lim_{i \rightarrow +\infty} K^{(i)} = \kappa$,

$\lim_{i \rightarrow +\infty} T^{(i)} = \tau$, 则对式(10) 两边求极限得:

$$P_r = \sum_{j=0}^m A_{r,j} (\kappa) I_{\lambda,r,j} (\tau) \quad (10)$$

则 τ 即为重建出的温度分布。

这种迭代型的 ART 重建方法的最大缺陷是当未知数数目较多时, 迭代方法的收敛性得不到保证, 其收敛性和收敛结果都依赖于初值。另外, 通过考察系数矩阵的数值分析特性发现: 这是一个条件数很大的矩阵, 对其直接求解的数值稳定性比较差。

3.1.2 优化模型

由式(9) 提出测试系统的最小二乘优化模型:

$$\sum_{r=1}^L [P_r - \sum_{j=0}^m A_{r,j} (T) I_{\lambda,r,j} (T)]^2 \quad (11)$$

这样, 模型转化为求解式(12) 表示的非线性优化问题。文献[4] 在这方面进行了尝试, 用复形调优法求解优化问题, 并针对油煤混烧试验台的火焰进行了实际测量。数值模拟计算的结果表明: 在网格划分较粗、未知数数目不多的情况下, 复形调优法能够搜索到比较理想的结果, 但在未知数数目增多的情况下, 这种传统的非线性解法会碰到指数爆炸和局部极小两个问题。我们需要另外寻求一种有效的算法。

3.2 遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithm, GA) 是模拟生物进化理论的一种复杂非线性优化问题求解方法, 它是由一个解群和一组作用于解群的遗传操作算子集合组成的迭代计算过程。由于其原理简单、只需问题的正演公式、不用求解目标函数的导数、不要求有好的初值而只需给定参数的大致范围以及算法的鲁棒性等一系列优点, 被认为是一种普遍有效的优化算法^[13]。用遗传算法求解优化问题, 通常要进行以下几个遗传操作: (1) 编码: 要对待求的优化变量进行编码, 常见的编码方法是将数值用二进制表示; (2) 计算适配值; (3) 复制: 采用“轮盘赌”的方法, 复制个体到下一代, 显然适配值大的个体获得复制的机会也较多; (4) 交叉: 选取两个父体, 用随机数产生交叉点以进行交叉操作, 产生新的个体进入下一代; (5) 变异: 按较小的概率变异(随机的选取一位取反), 以突破局部极小的限制; (6) 解码: 在进化完成

后, 要将最后进化得到的“基因串”解码, 从而得到原问题的解。

针对我们待求解的特定的问题, 对标准的遗传算法, 在以下几个方面进行了改进: (1) 由于未知数较多, 在编码操作中, 如果仍旧使用二进制编码会造成生成的“基因串”过长的现象, 给后面的复制、交叉等操作带来不便, 因此采用十进制进行编码。这样既可以避免基因码过长的问题, 又使编码和解码操作更加直观和简单。(2) 采用十进制编码, 复制和交叉操作不受影响, 但是变异操作的规则要进行相应的变动。我们设计的变异规则如下: 如果变异位的当前数值为 X , 则在 $[-X, 0] \cup (0, 9-X]$ 之间产生一个随机数 r , 而用 $X+r$ 成为变异后的数值。(3) 交叉的方法不采用单点交叉(因为单点交叉, 只交换“基因串”的两部分, 会使大部分变量都没有更新的机会), 而是按照一定的规则产生掩码, 用掩码去控制交叉过程。(4) 适配值的计算采用文献[9] 介绍的排序法。

3.3 数值模拟计算及结果比较

为了验证所提出的重建算法, 我们进行了数值模拟计算: 即随机假定一个原始温度场, 根据辐射传递方程可得到 CCD 获取的辐射强度值, 再根据得到的辐射强度值反演计算温度场。最后将结果温度场和原始温度场进行比较, 就可验证重建算法的精度和效率。另外, 我们还通过细划网格的方法, 来检验所采用的重建算法是否适合求解高维非线性问题; 同时, 通过在测量值上叠加一定数量的干扰, 来检验重建方法的数值稳定性。

图 1 显示了网格数目变化时, 采用迭代 ART 法和复形调优法以及遗传算法重建的最大偏差的绝对值变化趋势(前两者的重建结果依赖于初值。所以在实际模拟计算中, 变动不同初值进行计算并选择最佳的一组结果。为了更好地显示温度范围, 纵坐标使用对数坐标)。从结果看来: 在网格数目较少($G=M \times N$ 少于 50) 的情况下, 三种方法均能获得比较满意的重建效果(当然, 前两者要选择合适的初值), 整个区域的最大绝对误差不超过 50°C ; 但是当网格数目增多时, 前两种迭代方法的误差明显增大, 而遗传算法始终表现出了良好的性质, 即使在网格划分为 20×20 的情况下, 其最大偏差也不会超过 80°C 。图 2 表示的是在网格划分较少(7×7) 的情况下, 在 CCD 获取的辐射强度值上叠加一个随机干扰(至多为 5%), 反演结果的比较。从结果看来: 迭代 ART 方法是“病态”的, 测量值的一点偏差会对其重建结果产

生灾难性的影响, 数值稳定性是差的; 而复形调优法和遗传算法都是数值稳定性很好的算法, 测量值的微小偏差对测量结果的影响不是很大。

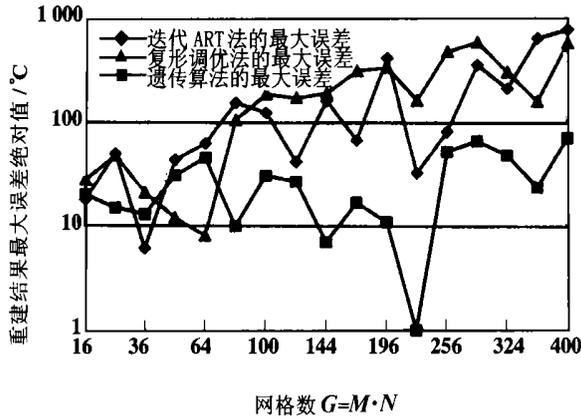


图 1 网格数目对不同算法重建结果的影响

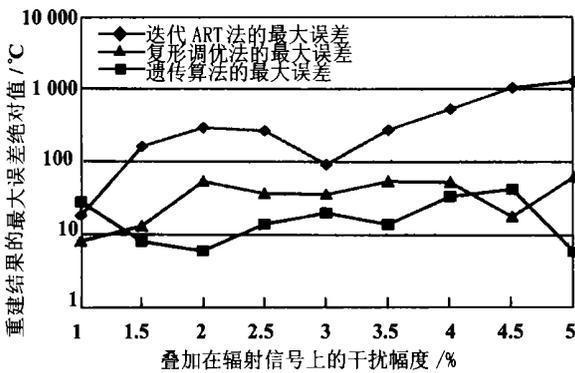


图 2 测量误差对不同算法重建结果的影响

此外, 通过对重建误差分布的研究我们发现, 误差的大致分布是中间低, 四周高, 这是因为穿过中间区域的射线数较多的缘故。这给了我们一个启发: 可以通过布置多个 CCD 对准我们所研究的区域, 这样穿过这一区域的射线数就多, 从而提高这一区域的测量精度。

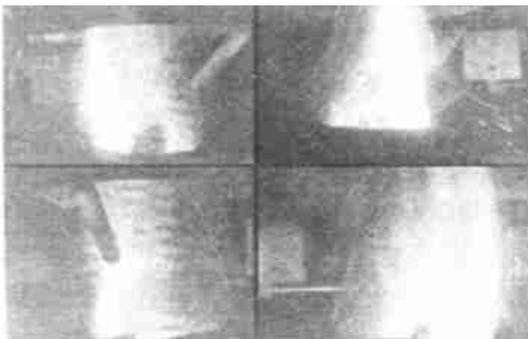


图 4 实际拍摄的油煤混烧火焰图像

4 测试结果

在实验室的油煤混烧实验炉上进行了测试。图 3 为测试系统简图: 四角布置的 CCD 拍摄油煤混烧火焰图像, 送入四画面分割器全成为一路图像信号, 通过 MV-V3A 图象卡量化后进入计算机, 在计算机内重建出待测的截面温度场。同时, 我们还在燃烧区域预先布置了高温热电偶以比较测量结果的准确度。

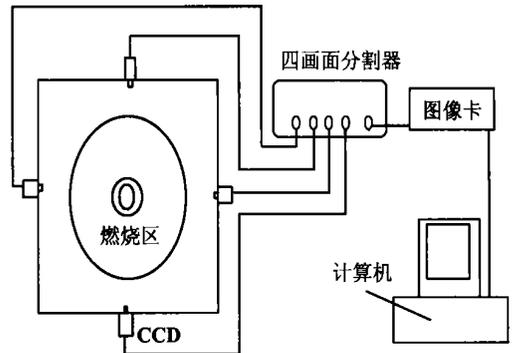


图 3 测试系统简图

图 4 为给粉量 12.96 kg/h 时实际摄得的火焰图像, 图 5 为根据其进行截面温度场重建的结果。从反演计算得到的温度场看, 火焰中的大部分区域温度在 700 K ~ 1 200 K 之间, 这是由于试验过程中的过量空气系数较大所致。在所设计的测试系统中, 为便于布置 CCD 探头, 从预热炉体到引风烟道之间是开放的, 导致大量的空气卷入燃烧火焰中, 降低了燃烧的温度水平。从试验现场的图像看, 火焰呈红色而不是高温火焰的亮白色, 这也说明了燃烧火焰的温度水平较低。在试验中利用一只铂铑-铂热电偶和一只镍铬-镍硅热电偶分别测量火焰中部

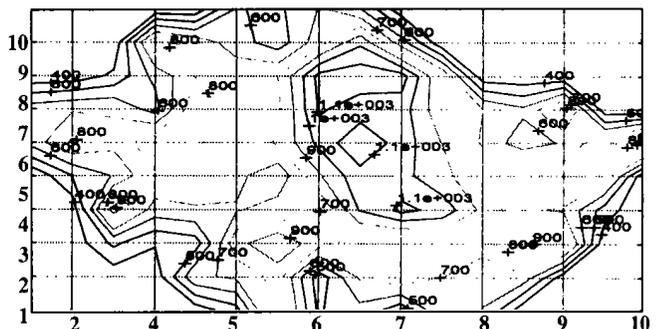


图 5 截面温度场重建结果

和火焰边缘区域的燃烧温度, 测量得到火焰中部最高温度达到 953 °C, 火焰边缘测量值为 219 °C, 此时图像的反演计算结果为火焰中部最高温度为 1 188 K, 边缘为 400 K 左右, 两者能够较好的吻合, 这也说明了我们的截面温度场重建测量方法是有一定精度的。

5 结论

本文分析了利用面阵 CCD 进行火焰截面温度测量的基本原理, 在对介质的辐射特性作了简化之间建立了模型并采用了遗传算法进行求解。对测试系统进行了数值模拟计算并在油煤混烧实验炉上进行了测试试验, 给出了计算和测量的结果。

参考文献:

- [1] WANG DEZHONG. Visualization and measurement of fuel spray by means of laser computed tomography, in *Modern Measuring Techniques For Multiphase Flows* [M]. Beijing: Southeast Univ Press, 1995.
- [2] SCHWARZ A. Multi-tomographic flame analysis with a schlieren appa-

ratu[s] J]. *Measurement Science and Technology*, 1996, 7(4): 406—413.

- [3] 周怀春. 基于辐射图象处理的炉膛燃烧三维温度检测原理及分析[J]. *中国电机工程学报*, 1997, 17(1): 1—4.
- [4] 薛飞. CCD 计测燃烧室断面温度场的原理研究[J]. *动力工程*, 1999, 19(5): 390—393.
- [5] 王飞. 运用代数迭代技术由火焰图像重建三维温度场[J]. *燃烧科学与技术*, 已录用.
- [6] 庆天戈. *CT 原理与算法* [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1992.
- [7] 林成森. *数值计算方法(下册)* [M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [8] 周金荣. 遗传算法的改进及其应用研究[J]. *控制与决策*, 1995, 10(3): 261—264.
- [9] 孙增圻. *智能控制理论与技术* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [10] FEISK J D, TIEN C L. Calculation of the emissivity of luminous flames[J]. *Combustion Science and Technology*, 1973, 7(3): 25—31.
- [11] 张晓舟. 面阵 CCD 用于目标亮度的测量[J]. *应用光学*, 1995, 16(6): 45—47.
- [12] 刘林华. 国产动力煤粉粒子系的辐射特性[J]. *动力工程*, 1998, 18(3): 65—69.
- [13] 伏岩松. 简单遗传算法的实现[J]. *微型计算机*, 1996, 16(4): 74—76.

(渠源 编辑)

(上接第 160 页)

进风管的有效长度之和; ξ 是与结构有关的经验系数。

$$le = (l + \pi/4\alpha)_{\text{尾管}} + (l + \pi/4d)_{\text{进风管}}$$

3.3 脉动燃烧与非脉动燃烧的比较

通过观察发现, 去掉一段尾管进行非脉动燃烧时, 烧柴油同脉动燃烧一样, 无烟; 烧渣油时有少量青烟, 火焰很长, 窜出管外; 烧沥青时有较大的黑烟, 火焰更长。不脉动时火焰的颜色都较暗, 脉动燃烧时火焰发白, 火焰缩短, 烧渣油和沥青时都无烟。脉动时燃烧段的小孔会窜出火苗, 从尾管观察, 火焰有明显的脉动迹象, 表明用脉动的办法烧渣油和沥青是可行的。

脉动燃烧有噪音, 试验台附近的噪音为 70 ~ 90 dB, 烧柴油的噪音比烧渣油沥青大, 油量大时噪音比油量小时大, 实际应用时有必要采取消音措施。

4 结论

整个试验测量系统比较简陋, 喷嘴的加工精度很差, 尾管长度不能连续调节, 加上脉动燃烧本身的复杂性, 使得数据缺乏精确性, 只能定性地描述得出以下结论:

(1) 脉动燃烧是一种高效清洁的燃烧方式, 可以干净彻底地燃烧渣油和沥青等难燃物质。

(2) 决定冷段长度的不是喷嘴到进风口的距离, 而是火焰前锋面最大直径处到进风口间的距离。冷段长度与总长之比要小于 1/4。

(3) 对于难燃物质如渣油沥青等, 其进风口截面积不能太小, 太小则发生向 1/4 波长管的过渡, 造成频率太低和燃烧不稳定。

参考文献:

- [1] 拉乌申巴赫. *振荡燃烧* [M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [2] ZINN B T. The reduction of nitrogen oxides emissions from coal burning nijke pulse combustion[A]. *Fall Tech. Meeting of the Combustion Inst. of U. S. A* [C]. Florida: 1990.
- [3] JUNE R R. The effect of sound on free convection heat transfer from a vertical flat plate[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1963, 8(2): 279.
- [4] 潘永康. *现代干燥技术* [M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [5] CHEN F L. Rijke-ZT pulse combustion technology lore coal[A]. *Energy and Enviroment Proceedings of the International Conference, ICEE*, 1996[C]. New York: Begell House Inc, 1996, 697—702.
- [6] SHI Z L. Investigation of a square nijke-type pulse combustor for coal [A]. *Third Asian-Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization* [C]. Hongkong: Univ of Tech Press, 1995.
- [7] BAI T. Combustion of liquid fuels in nijke type pulse combustor[D]. USA: Georgia Tech, 1992.

(渠源 编辑)

content rate of an incident flow cross-section, the shape and characteristic dimensions of a vortex-street generating entity, the direction of incident flow, etc. By utilizing the above-mentioned relation and on the basis of the measured two-phase vortex street frequency it is possible to use the vortex-street generating entity as a measuring element for the measurement of two-phase flow rates and components. **Key words:** gas-liquid mixture, Kaman vortex, Strouhal number, cylinder

切向炉内小分隔屏后涡量分布的实验研究= **Experimental Investigation of the Vorticity Distribution Behind the Small Partition Panel of a Tangentially Fired Furnace** [刊, 汉] / HE Bo-shu, CHEN Chang-he (State Key Lab of Coal Clean Combustion under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084), DIAO Yong-fa, XU Jin-yuan (Energy Source and Power Engineering Institute under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 154 ~ 158

A 6-wire vorticity probe was used for the first time to measure the velocity and vorticity distribution behind the partition panel of the cold model of a HG-2008-YM2 tangentially fired furnace. Parameters depicting the characteristics of turbulent flow have been obtained, which include turbulent flow intensity, skewness factor and flatness factor, etc. The presence of a partition panel has a significant effect on the velocity and vorticity field behind it. The test results indicate that a separation vortex has emerged behind the right half panel due to airfoil effects. **Key words:** tangentially fired furnace, partition panel, vorticity, skewness factor, flatness factor

柴油、渣油和沥青的脉动燃烧对比试验研究= **Contrast Experimental Research on the Pulsating Combustion of Diesel Oil, Residual Oil and Asphalt** [刊, 汉] / TU Jian-hua, CHEN Fu-lian, WANG Qin-yong (Energy Source and Power Engineering Research Institute under the Zhejiang Polytechnical University, Hangzhou, China, Post Code: 310014) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 159 ~ 160, 165

Contrast tests of pulsating combustion of diesel oil, residual oil and asphalt were conducted in a shape-changing Rijke pipe. It is discovered that easy-to-burn fuels can excite pulsation easily. By contrast, difficult-to-burn fuels are hard to excite pulsation owing to the delayed ignition of such fuels and it is necessary to lengthen the tail pipe in order to achieve a good pulsation. When the ratio of air feed area and combustion chamber cross-section area is reduced to a certain degree, the pulsation characteristics of such difficult-to-burn fuels (such as residual oils, etc.) will transit to those of 1/4 wave-length pipe. On the other hand, there is no change in pulsation characteristics for easy-to-burn fuels, such as diesel oils, etc. The tests indicate that valve-absent pulsation combustion technology makes it possible to realize clean and highly effective burning of such difficult-to-burn fuels as residual oils and asphalt, etc. This is of great significance for the utilization of difficult-to-burn fuels, such as residual oils, etc. **Key words:** pulsation combustion, residual oil, Rijke pipe

利用面阵 CCD 进行火焰温度分布测量(II)——三维截面温度场的测量= **Measurement of Flame Temperature Distribution Using Array CCD (II) — Three-dimensional Cross-section Temperature Field Measurement** [刊, 汉] / WEI Chen-ye, YAN Jian-hua, SHANG Min-er, CEN Ke-fa (Thermal Power Engineering Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 161 ~ 165

A practical model is set up with the help of a simplified measurement/test system designed for measuring flame cross-section temperature distribution using array charge-coupled device. After the slight improvement of a genetic algorithm the latter is employed to solve the above model in order to reestablish the flame cross-section temperature distribution to be measured. Then, the numerical character of the genetic algorithm is analyzed and a test conducted on an oil/coal mixed

burning test rig. The measuring and test results are presented. **Key words:** charge-coupled device, temperature measurement, genetic algorithm

基于火焰图像处理的炉膛辐射能信号的检测及分析= **Flame Image Processing-based Detection and Analysis of Furnace Radiation Energy Signals** [刊, 汉] / ZHANG Shi-shuai, ZHOU Huai-chun (Power Engineering Department, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074), PENG Min, LIU Wu-lin (Central Testing Institute under the Hunan Provincial Electric Power Bureau, Changsha, China, Post Code: 410007) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 166 ~ 168, 182

An on-site detection test was conducted on a 300 MW coal-fired boiler of Xiangtan Power Plant by the use of a flame image processing-based detection system of furnace radiation-energy signals. In addition, an analysis has been performed on the relationship between the furnace radiation energy signals and the boiler main operating parameters. The results of the analysis indicate that the furnace radiation energy signals can to a certain extent not only forecast the actual output of the boiler, but also reflect the combustion conditions in the boiler. **Key words:** coal-fired boiler, flame image, furnace radiation energy, detection method

六角燃烧锅炉同心双切圆流场的数值模拟研究= **Numerical Simulation Study of the Concentric Double-tangential Circular Flow Field of a Hexagonal-fired Boiler** [刊, 汉] / ZHAO Yu-xiao, LI Rui-yang, WANG Shi-jun, QIN Yu-kun (Energy Source College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001), LU Wei (Thermal Energy Engineering Department, Harbin University of Science & Technology, Harbin, China, Post Code: 150040) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 169 ~ 171

By the use of a $k-\epsilon$ dual-equation turbulent flow model and a particle random trajectory model a numerical simulation is conducted of the burner-zone flow field of a boiler, which adopts wall-installed burners. The primary and secondary air jet flow of the upper layer burner has been arranged in the form of a concentric dual-tangential circle. Through an analysis of the variation of flow field characteristics the cause of slag formation on prototype heating surfaces is investigated and a method for resolving the issue sought out. **Key words:** $k-\epsilon$ dual equation turbulent flow model, particle random trajectory model, concentric dual-tangential circle

导热规律服从 $q \propto (\Delta T)^n$ 广义不可逆卡诺热机的最优性能= **Optimal Performance of a Generalized Irreversible Carnot Engine with Heat Conduction Law Subordinate to $Q^{\mu}(\Delta T)^n$** [刊, 汉] / ZHOU Sheng-bing, CHEN Lin-gen, SUN Feng-rui (No. 306 Teaching and Research Department under the Naval Engineering University, Wuhan, China, Post Code: 430033) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2002, 17(2). — 172 ~ 175, 179

Taking into account the thermal resistance losses between a working medium and heat source a constant term is used to express heat leakage loss and a constant factor term to express other irreversible items in a cycle plant with the exception of the heat resistance and heat leakage. As a result, set up is an irreversible Carnot engine model. On the basis of another kind of relatively universal heat conduction law, i. e., $Q^{\mu}(\Delta T)^n$ derived is the optimal characteristic relationship between the heat engine power and efficiency. Through detailed numerical calculations an analysis is performed of the effect on the optimal performance of a generalized irreversible heat engine by the heat leakage, internal irreversibility and heat conduction law. **Key words:** finite-time thermodynamics, heat engine, performance optimization

贴体坐标系下求解复杂几何域内的单相流动= **The Solution of a Single-Phase Flow in a Complicated Geomet-**