

# 利用面阵 CCD 进行火焰温度分布测量(I)

## ——二维投影温度场的测量

卫成业<sup>1</sup>, 严建华<sup>2</sup>, 商敏儿<sup>2</sup>, 岑可法<sup>2</sup>

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

**摘 要:**介绍了利用彩色面阵 CCD 进行火焰投影温度测量的系统结构和基本原理, 并分析其主要的误差来源。针对这些误差源, 分别提出了各自的解决方案或校正算法, 最后进行了试验测量, 结果表明: 这种测温方法方便可行, 具有较高的精度。

**关键词:** CCD 温度测量; 比色测温法

中图分类号: TK311 文献标识码: A

### 符号说明

$R_c$ — CCD 输出中 R 通道的响应值	$G_c$ — CCD 输出中 G 通道的响应值
$B_c$ — CCD 输出中 B 通道的响应值	$\lambda$ — 测量波长
$\lambda_R$ — 获取的图像的 R 通道分光特性曲线峰值所对应的波长 (红色光波长)	$\lambda_G$ — 获取的图像的 G 通道分光特性曲线峰值所对应的波长 (绿色光波长)
$\lambda_B$ — 获取的图像的 B 通道分光特性曲线峰值所对应的波长 (蓝色光波长)	$T_r(\lambda)$ — 光学测试系统的 R 通道的分光特性函数
$T_b(\lambda)$ — 光学测试系统的 B 通道的分光特性函数	$T_g(\lambda)$ — 光学测试系统的 G 通道的分光特性函数
$K_G$ — G 通道的增益系数	$K_R$ — R 通道的增益系数
$K_B$ — B 通道的增益系数	$T$ — 温度
$E_T(\lambda)$ — 火焰单色辐射能	$\epsilon_R$ — 对应于 R 波长的火焰灰度值
$\epsilon(\lambda, T)$ — 火焰灰度值	$\epsilon_G$ — 对应于 G 波长的火焰灰度值
$\epsilon_G$ — 对应于 G 波长的火焰灰度值	$\epsilon_B$ — 对应于 B 波长的火焰灰度值
$T_{(A,B)}$ — 根据 A、B 两波长比色测温获得的比色温度值(A、B 为 R、G、B 中的任意两个)	

## 1 引言

高温火焰的温度分布直接反映了煤粉炉的燃烧状况, 对于电厂煤粉燃烧器燃烧诊断、在线分析有着重要的意义。火焰温度场的动态测量直接反映了燃烧工况的组织是否合理, 提供了判断燃烧稳定性和燃烧产物污染生成量的重要依据。

由于炉内过程的复杂性和火焰内部强烈的物理、化学反应, 传统的测温方法无法实现对火焰温度场的长期、分布式、无干扰的在线测量。在这种情况下,

光学非接触测温方法几乎成了唯一可行的测温方法。近几年, 随着计算机图像处理技术的发展和工业面阵 CCD 器件的广泛应用, 利用 CCD (Charge Coupled Devices, 电荷耦合器件) 摄取火焰图像进而计算出火焰温度分布成了一个新颖且有潜力的研究方向, 吸引了国内外广大学者的注意<sup>[1~5]</sup>。在本文和下一篇文章中, 作者将详述这项新型的测量技术, 并进行测量试验给出测试结果。

## 2 测量系统简介

利用面阵 CCD 进行温度分布测量的测试系统的原理图如图 1 所示。经计算处理, 得到火焰的温度场分布 (包括二维“投影”温度场和三维截面温度场分布)。

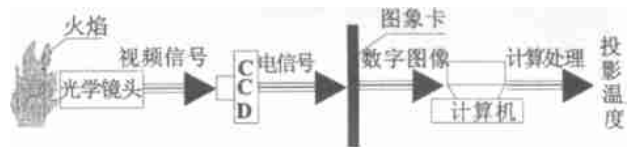


图 1 投影温度测试系统原理图

显然地, CCD 获取的图像是三维空间的投影, 是三维辐射在二维平面上的一种积分累计效应, 并不严格代表一个真正意义上的温度分布, 我们将之称为“投影温度场”。投影温度场在物理上并不代表空间真正的温度分布, 它反应的是沿测量光路空间温度分布的积分平均值 (在物理意义上, 它比较接近光学比色高温计测得的温度值), 但这并不表明它的测量是没有实际意义的。文献[6]就曾提出利用炉内火焰的投影温度作为中间被调量来参与入炉煤料量的控制, 以改善从入炉煤料量到蒸汽压力这样一个大滞后、大惯性的对象的动态特性。

从报道的文献看来, 利用面阵 CCD 进行投影温

度测量的方法有两种: 参考点测温法<sup>[3]</sup> 和比色测温法<sup>[4~5]</sup>。前者需用高温热电偶实测一参考点的温度作为基准, 这会带来一些问题: (1) 不够方便; (2) 未能彻底摆脱接触式测温法的种种限制(需要用高温热电偶实测一个参考点的温度); (3) 参考点在图像上准确定位困难, 会带来测量误差; (4) 如果用这种测温方法进行现场测试, 一个基本要求就是系统安装完毕后, 光学镜头的光圈不可变动(否则就需要重新测量参考点温度并重新标定测温公式), 而在这现场测试中很难满足。和它相比, 比色测温法在方便性、可行性上更进一步, 但是精度不够高, 已有的一些校正方法存在或者不够通用, 或者太过复杂而影响了现场使用。本文作者在对比色测温原理进行理论研究和误差分析的基础上, 提出一种利用火焰图像三色信息的测温方法, 以下详细介绍。

### 3 CCD 原理

彩色面阵 CCD 摄像器件的色度学基础是 RGB 三基色说, 即根据人眼的视觉特征, 选择 R(红)、G(绿)、B(蓝)三种接近光谱单色的色源作为基色, 当它们按不同的比例叠加时, 就能模拟不同波长的单色光源法<sup>[7]</sup>。相应地, 由 CCD 获取的彩色火焰图像在计算机内是以像素为单位逐点存储的。每一点存储的信息量都包括了该点的 R、G、B 亮度值  $R_e$ 、 $G_e$ 、 $B_e$ 。在对 CCD 的分光特性作了窄带通的理想化假设之后(显然, 这样的近似处理是有误差的, 在本文后面的误差分析部分将进行分析), 可以得到如下关系:

$$\begin{cases} R_e = \int_{320}^{720} E_T(\lambda) T_r(\lambda) d\lambda = K_R E_T(\lambda_R) \\ G_e = \int_{320}^{720} E_T(\lambda) T_g(\lambda) d\lambda = K_G E_T(\lambda_G) \\ B_e = \int_{320}^{720} E_T(\lambda) T_b(\lambda) d\lambda = K_B E_T(\lambda_B) \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $E_T(\lambda_i)$  表示火焰对于  $\lambda = \lambda_i$  的单色辐射能( $i = R, G, B$ );  $\lambda_R, \lambda_G, \lambda_B$  表示获取的图像的 R、G、B 三通道分光特性曲线峰值所对应的波长, 根据 1931 年国际照明技术委员会 C.I.E 的标准, 分别取值为 700 nm、546.1 nm 和 435.8 nm;  $T_r(\lambda)$ 、 $T_g(\lambda)$ 、 $T_b(\lambda)$  分别表示光学测试系统的 R、G、B 通道的分光特性函数, 我们对其作了窄带宽的假设;  $K_R, K_G, K_B$  分别为 R、G、B 通道的增益系数, 可以试验标定得到。

### 4 比色测温法原理

在煤粉燃烧火焰辐射的波长范围 400 nm 到 750 nm 之间, 以及温度范围 3 000 K 以下, 普朗克辐射定律可由维恩辐射定律取代<sup>[8]</sup>:

$$E_T(\lambda) = C_1 \lambda^{-5} e^{-c_2/(\lambda T)} \cdot \epsilon(\lambda, T) \quad (2)$$

其中,  $E_T(\lambda)$  为火焰单色辐射能 ( $W/m^3$ ),  $\lambda$  为波长(m),  $T$  为温度(K),  $\epsilon(\lambda, T)$  是火焰灰度值(无量纲)。  $C_1 = 3.741\ 844 \times 10^{-16} (W \cdot m^2)$ ,  $C_2 = 0.014\ 388\ 33(m \cdot K)$ 。

如果在两个波长  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  不同时测得同一点发出的单色辐射能  $E_T(\lambda_1)$  和  $E_T(\lambda_2)$ , 则由两者比值可得该点的温度:

$$T = \frac{C_2(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1})}{\ln \frac{E_T(\lambda_1)}{E_T(\lambda_2)} - \ln \frac{\epsilon(\lambda_1, T)}{\epsilon(\lambda_2, T)} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad (3)$$

在火焰辐射的灰性假设<sup>[9]</sup> 意义下:

$$\frac{\partial \epsilon(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0 \quad (4)$$

有  $\epsilon(\lambda_1, T) = \epsilon(\lambda_2, T) = \epsilon_T$ , 故可得双色测温公式:

$$T = \frac{C_2(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1})}{\ln \frac{E_T(\lambda_1)}{E_T(\lambda_2)} - 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}} \quad (5)$$

如果取  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为 R、G、B 中的两个, 就可以根据相应的 CCD 的输出的 R、G、B 通道的信号值之比求得待测温度: (以 R、G 为例)

$$T_{(R,G)} = \frac{C_2(\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_G})}{\ln \frac{G_e}{R_e} + \ln \frac{K_R}{K_G} - 5 \ln \frac{\lambda_R}{\lambda_G}} \quad (6)$$

### 5 误差分析及校正方法讨论

以上推导得到了基于彩色面阵 CCD 的测量火焰投影温度分布的基本公式, 然而在实际测量中, 我们发现: 如果直接使用这个公式去进行投影温度的测量, 会有较大的测试误差, 造成测量误差的原因是多种多样的, 下面逐一进行分析。

#### 5.1 CCD 的原因造成的误差

由于 CCD 器件特性的原因以及普通的 CCD 设

计制造时为了适应人眼的视觉习惯而有所调整,可能给测量结果带来误差。

### 5.1.1 CCD 分光特性引起的误差

在前面 CCD 原理部分的介绍中,我们对其分光特性作了窄带通的假设,从而推导得到了式(1),这是我们利用 CCD 进行投影温度测量的基础。遗憾的是,CCD 分光特性的窄带通仅仅是一个假设,实际往往并不如此,这会不可避免地给我们的测量带来误差,需要采用一定的方法来校正。

针对这一问题,文献[10]提出了一个校正方法:对于分光特性已知的 CCD,假定一个温度  $T_A$ ,根据维恩定律计算得其辐射强度  $E_{T_A}(\lambda)$ ,进而求得此时 CCD 的 R, G, B 三通道的响应值  $R_e, G_e$  和  $B_e$ ,从而根据式(6)可以算得比色测温法测得的温度  $T_{(R,G)}$  和  $T_{(G,B)}$ ,让  $T_A$  在一定范围内变化。重复以上过程,从而可得  $T_{(R,G)} = f_1(T_A), T_{(G,B)} = f_2(T_A)$ ,因此有:

$$\begin{cases} T_A = f_1^{-1}(T_{(R,G)}) \\ T_A = f_2^{-1}(T_{(G,B)}) \end{cases} \quad (7)$$

这样,根据图像用比色测温公式得到  $T_{(R,G)}$  和  $T_{(R,B)}$  后,代入式(7),就可以得到真实温度  $T_A$ 。理论上分析,上述校正方法是可行的,但它必须建立在 CCD 的分光特性曲线已知的前提之上,而这在实际测量中很难办到。为此,需要另外寻求一种有效可行的校正方法。

在前面的分析过程中,我们知道,对于给定的假定温度  $T_A$ , CCD 的 R, G, B 三通道的响应值:  $R_e, G_e$  和  $B_e$  是确定的(尽管由于不知道 CCD 的分光特性,无法将具体的数值给出),而根据维恩定律,  $E_{T_A}(\lambda_R), E_{T_A}(\lambda_G)$  和  $E_{T_A}(\lambda_B)$  的数值也是确定且已知的。定义系数函数:

$$\begin{cases} f_R(T_A) = E_{T_A}(\lambda_R)/R_e \\ f_G(T_A) = E_{T_A}(\lambda_G)/G_e \\ f_B(T_A) = E_{T_A}(\lambda_B)/B_e \end{cases} \quad (8)$$

其中系数函数  $f^*$  ( $*$  = R, G, B) 包含了从火焰本身到摄像机的光路系统中辐射能的损失和衰减以及具体光学系统的作用等,是一个反应测量系统特性的综合参数。它是  $T_A$  的单值函数,而根据前面的讨论,  $T_A$  可以由  $(R_e, G_e, B_e)$  唯一确定,因此有:  $f^* = f^*(R_e, G_e, B_e)$  (具体的函数形式通过黑体炉标定获得);从而得到经过 CCD 带宽校正后的比色测温公式(仍以 R, G 为例):

$$T_{(R,G)} = \frac{C_2(\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_G})}{\ln \frac{G_e}{R_e} + \ln \frac{f_G(R_e, G_e, B_e)}{f_R(R_e, G_e, B_e)} - 5 \ln \frac{\lambda_R}{\lambda_G}} \quad (9)$$

### 5.1.2 CCD 图像中的光晕和拖影现象

光晕是指当物象中存在亮点时,重现图像中对应点的尺寸有增大现象,并且在其周围会出现一个弥散的区域<sup>[11]</sup>。这是由于光敏单元在光积分周期内积累的光生电荷超过势阱容量时,电荷向临近阱扩散引起。在实际测量中,往往要减小光圈或者在镜头前放置衰减片,使到达 CCD 靶面的图像亮度降低,避免光晕的产生。

图像的拖影则是在 CCD 采集的图像中的模糊现象,这是由于相对于火焰的脉动而言, CCD 的采集速率不够高引起的。解决的办法有两个:一是从硬件上考虑,设置电子快门,减少光积分时间以减弱拖影现象;二是从软件上解决,即对拍摄的火焰图像进行高通滤波预处理,尽量使拖影现象不致影响温度场测量结果。

### 5.1.3 自动增益控制(AGC)

普通 CCD 为增大摄像适应范围,不使输出电视信号太弱或太强,当 CCD 输入信号变化时, AGC 电路随之调节。AGC 调节影响了 CCD 的分光特性,对温度测量结果会带来负面影响。消除的方法是在实际测量时将工业 CCD 的 AGC ON/OFF 控制开关拨到 OFF 就可以了。

### 5.1.4 其它

CCD 还有其它一些特性会给测量结果带来误差,比如暗电流,制式转换中的误差等等。但它们的影响比较小,在测量中并不需要采用额外的方法进行补偿。

## 5.2 辐射特性引起的误差

基本比色测温公式的推导,是以火焰辐射的灰性为假设前提的。因此,火焰辐射的非线性会造成测量结果的偏差。文献[10]曾就这个问题展开讨论,认为可以通过解一个非线性方程组获得真实的火焰温度。在实际测量中,非线性方程组的求解并不简单,而且现有的一些迭代解法又比较耗时,从而影响了这一测量方法的在线使用。

事实上,这一问题可以从另外一个角度得到解决:根据 Hottel-Broughton 单色辐射率公式,文献[12]认为:

$$\frac{\epsilon_G^2}{\epsilon_R \epsilon_B} = 1.03 \Rightarrow \ln \frac{\epsilon_G}{\epsilon_R} = \ln \frac{\epsilon_B}{\epsilon_G} + \ln 1.03 \quad (10)$$

而根据比色测温原理, 不难推得:

$$\begin{cases} -C_2(\frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_G})(\frac{1}{T_z} - \frac{1}{T_{(R,G)}}) = \ln \frac{\epsilon_G}{\epsilon_R} \\ -C_2(\frac{1}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_B})(\frac{1}{T_z} - \frac{1}{T_{(G,B)}}) = \ln \frac{\epsilon_B}{\epsilon_G} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $T_z$  是经过校正后的测量温度。将式(10)代入式(11), 可得

$$T_z = \frac{C_2(\frac{2}{\lambda_G} - \frac{1}{\lambda_R} - \frac{1}{\lambda_B})}{\ln 1.03 + C_2(\frac{1/\lambda_G - 1/\lambda_B}{T_{(G,B)}} - \frac{1/\lambda_R - 1/\lambda_G}{T_{(R,G)}})} \quad (12)$$

这就是经过灰性校正以后的比色测温公式。

## 6 测试结果

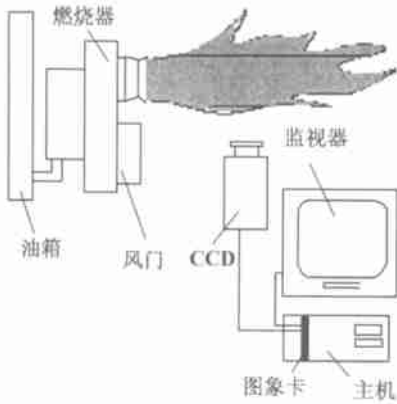


图 2 测试系统组成图

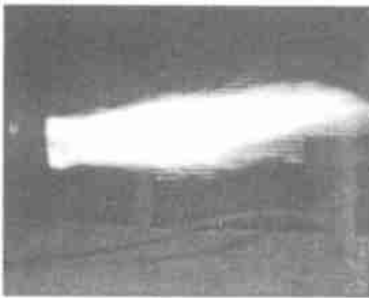


图 3 油火焰图像

最后, 我们在实验室的油煤混烧火炬上进行了投影温度场测试。测试系统的组成如图 2 所示: 利用 CCD 摄得油煤混烧火焰图像, 经过 MV-3A 图象卡对其量化后送入计算机进行计算, 得出其投影温度场。

图 3 为实际拍摄的一幅油雾在自由空间完全燃烧时的火焰图像, 由于燃烧情况较好, 所以火焰刚度较好。火焰图像的亮度和色彩有明显的层次感, 在燃烧

器出口处, 由于火焰在旋流导板的作用下与卷吸回来的高温燃烧烟气混合, 出现了涡旋, 因此颜色成暗红。中心区的亮度最高, 由火焰中心向外缘亮度逐步降低, 从色彩看, 中心火焰呈现出亮白色, 向外颜色由红色变为暗红。图 4 是对这幅油火焰用本文介绍的方法计算得到的投影温度场。从试验结果中可

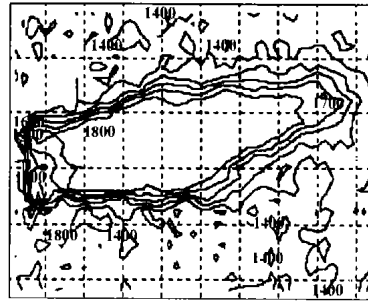


图 4 投影温度场计算结果

以看出: 火焰的温度范围为 1 200 ~ 1 800 K, 且温度的变化较为连续, 这与实际的情况是相符的。在火焰的根部, 由于流场出现卷吸, 其温度场也表现出一定的涡旋。另外, 我们还用双色高温计对火焰温度进行了实际测量并比较了所得结果(从物理意义上分析, 双色高温计测得的温度也应该是沿光路方向的积分平均值, 和投影温度的含义是一致的), 结果表明, 利用 CCD 的投影温度测量是有较高的精度的(两组测量值的最大偏差不超过 30 °C)。

本文介绍了面阵 CCD 测温的原理和测量系统, 分析了其主要的误差来源。在实验室的燃油火焰上进行了测试, 取得了令人满意的结果。

### 参考文献:

- [1] CHOI M Y. Simultaneous optical measurement of soot volumn fraction and temperature in premixed flames[J]. *Combustion and Flame*, 1994, 99(3): 174-196.
- [2] 许柯夫. 数字图像处理技术在电厂锅炉燃烧监测中的应用研究[J]. *电力系统自动化*, 1995 19(4): 295-299.
- [3] 周怀春. 炉膛火焰温度场处理试验研究[J]. *中国电机工程学报* 1995, 15(5): 295-300.
- [4] 王飞, 薛飞, 马增益, 等. 运用彩色 CCD 测量火焰温度场的试验研究及误差分析[J]. *热能动力工程*, 1998, 13(2): 82-84.
- [5] 薛飞. 基于面阵 CCD 的火焰温度场测量方法研究[J]. *中国电机工程学报*, 1999, 19(1): 39-41.
- [6] 潘祖民. 动态矩阵控制算法及其在锅炉控制中的应用[J]. *华中理工大学学报*, 1990, 18(4): 101-105.
- [7] 孙肇敏. 应用电视[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1995.
- [8] 吴永生. 热工测量及仪表[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [9] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1987.
- [10] 卫成业. 运用彩色 CCD 测量火焰温度场的校正算法[J]. *中国电机工程学报*, 2000, 210(1): 70-74.
- [11] 蔡文贵. CCD 技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1992.
- [12] 马增益. 锅炉传热磨损及火焰温度场在线测量研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.

(何静芳 编辑)

汉] WANG Xin-xin, XU Xiang-dong (Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —51 ~ 54

In connection with the features of a fluidized bed boiler control system and the existing problems in its operation and management a study was conducted of the theory of a decoupled and generalized predictive control as well as multivariable parameter evaluation. A predictive control theory was selected to design the predictive instruction system of a fluidized bed boiler along with a simulation research of the predictive instruction system. Through the simulation study obtained was the parameter selection mechanism of the above-mentioned system. Meanwhile, the study results were applied with excellent results in engineering practice, e. g. in the design of a predictive instruction system for a factory in Laixi and the provision of guidance and training for worker's operation. As the design method of the system is applicable to all cases, it has also been employed in other similar systems. **Key words:** fluidized bed, predictive instruction system, decoupled and generalized predictive control

基于 SCNN 的转子热应力场的实现研究 = A Study of the Thermal Stress Field Based on SCNN (Structure-Controllable Neural Network) [刊, 汉] / GAO Jing-bo, ZHANG Jia-zhong, XIA Song-bo, et al (Aerospace College under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —55 ~ 57

Thermal stress constitutes a major parameter for monitoring the loss of steam turbine service life. To date, for the real-time calculation of thermal stresses employed in most cases is an analytical method. As the analytical method involves a simplification of the two-dimensional axial-symmetric heat conduction equation for a rotor, it will lead to some errors in evaluating the thermal stress. In view of this, by way of the intermediate calculation results of a finite element analysis for the thermal stress field the authors have utilized a SCNN (structure-controllable neural network) method to simulate the solution of an algebraic equation of integral rigidity matrix for the thermal stress field. By using the displacement of nodes thus obtained, one can identify the thermal stress field of a rotor. **Key words:** neural network, finite element, thermal stress field

利用面阵 CCD 进行火焰温度分布测量(I)——二维投影温度场的测量 = Measurements of Flame Temperature Distribution by the Use of a Colored Array CCD (Charge-coupled Device) (I) the Measurement of a Two-dimensional Projection Temperature Field [刊, 汉] / WEI Cheng-ye (Network Technology Research Department under the Guangdong Telecommunications Science & Technology Research Institute, Guangzhou, China, Post Code: 510630), YAN Jian-hua, SHANG Min-er, et al (Thermal Power Engineering Institute under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(1). —58 ~ 61

The make-up and basic principles of a flame temperature measuring system using colored array CCD (charge-coupled device) are described along with an analysis of its major error sources. To cope with these error sources, the authors have come up with respective resolution methods or correction algorithms. Finally, test measurements were made, which indicate that this measuring method is easy to use and features a relatively high precision. **Key words:** charge-coupled device, temperature measurement, calorimetric method of temperature measurement

移动颗粒层过滤除尘的数值模拟及实验对比 = Numerical Simulation and Experimental Contrast of the Dust Filtration of a Moving Granule Bed [刊, 汉] / YUAN Zhu-lin (Education Ministry Key Lab on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology under the southeastern University, Nanjing, China, Post code: 210096), XU Shi-sen, (Thermal Power Research Institute of National Electric Power Corporation, Xi'an, China, Post Code: 710032) //