

甲烷扩散火焰空间拟序结构三维运动研究

黄群星, 王 飞, 严建华, 岑可法

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

摘 要: 提出了基于高速立体视觉的湍流火焰三维运动特性分析方法, 该方法首先利用双视角立体镜, 使单个 CCD 靶面同时获得两个不同角度的火焰图像, 通过标定得到摄像机参数, 最后基于双目视觉理论的三维重建方法获得火焰内部漩涡结构的三维分布及其扩散速度。通过实验重建了甲烷预混火焰中漩涡结构的三维分布及速度场, 计算结果表明, 由于燃烧速度的径向分布不均匀以及气流受热的膨胀作用, 使得火焰面在靠近边界处向外弯曲。

关 键 词: 湍流火焰; 拟序结构; 双视角立体镜

中图分类号: O643.2 文献标识码: A

引 言

湍流流动中拟序结构的发现以及其在流动中所起作用的许多后续研究引起了人们极大的关注。近年来的研究表明, 湍流火焰内部的大尺度涡结构通过对流扭曲加剧了火焰锋面的褶皱程度, 对火焰的传播效率和速率产生影响。此外, 流场中的拟序结构对燃烧中污染物的生成等方面也有重要作用, 因此对湍流火焰燃烧过程中拟序结构的研究具有重要意义^[1~3]。湍流流动和拟序结构本质上都是三维的, 大尺度涡结构往往存在横向的扭曲、拉伸和变形。由于测量技术的限制, 目前对湍流火焰内部大尺度涡结构的分布和演变过程的研究主要以二维或三维断面内的粒子数字图像测速(DPIV)技术平面激光诱导荧光(PLIF)方法为主^[4~9]。鉴于上述情况, 提出基于双视角镜头的高速立体视觉系统, 利用双视角镜头的作用使得一台高速摄像机 CCD 靶面同时获得不同角度的火焰图像, 通过匹配立体图像对应点以及利用双目视觉原理获得火焰三维结构分布以及坐标的时序变化, 为湍流火焰三维结构的研究提供了有效的、可视化定量的测试手段。

1 实验原理

根据双目视觉投影成像原理^[6], 为得到火焰空

间三维结构必须得到两个以上不同视角的图像, 因此本文提出了基于平行镜片组的双视角镜头, 其光路模型如图 1 所示, 通过两组成 α 角的平行镜片, 巧妙地实现了在一个 CCD 成像元件上同时得到目标两个侧面的图像。双视角镜头的核心是平行镜片组反射角度 α 的选择, 因为不同的角度决定了镜头的观察视角范围以及可分辨的投影方向的径向深度。图 2 显示了采用 45° 角本生灯湍流火焰的双视角图像。

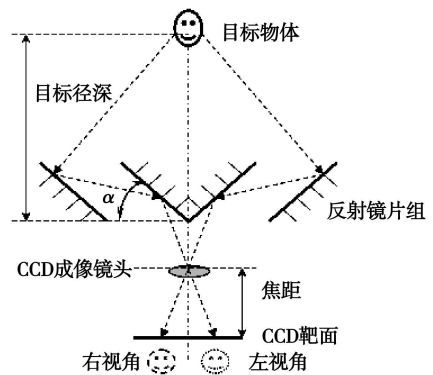


图 1 光路模型



图 2 本生灯火焰立体图像

1.1 三维信息提取

双目视觉理论的本质是使用双摄像机建立双摄

收稿日期: 2007-06-13; 修订日期: 2008-04-18

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(60534030); 国家自然科学基金面上基金资助项目(50606031)

作者简介: 黄群星(1977-)男, 江苏宜兴人, 浙江大学讲师。

像机坐标系模拟人的双眼。图 3 给出了基于该理论的空间目标点深度信息的计算模型。

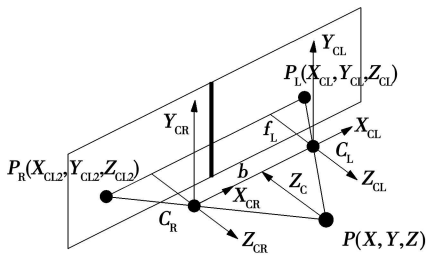


图 3 空间点三维信息计算示意图

在左摄像机坐标系 CL 下, P, P_L, P_R 3 点构成一个三角形, 由几何关系可以得到空间点 P 的深度信息:

$$Z = bf_L / (d - b) \quad (1)$$

式中: b —双摄像机坐标系原点之间的相对距离; d —立体图像对应点的视差; f_L —左摄像机坐标系对应的焦距^[7]。获得空间目标的深度信息即其 Z 轴坐标值后, 根据射影几何的知识, 通过摄像机模型归一化坐标能够计算得到空间目标在 X 轴和 Y 轴的坐标值^[6]。

实际证明, 使用双视角镜头和单个 CCD 摄像机能够较好的模拟双摄像机、构建虚拟的双摄像机坐标系, 因此上述空间点三维坐标的计算方法对本试验系统仍然适用。

1.2 三维速度模型

由式(1)可知, 要计算湍流火焰三维坐标, 首先要获得两个不同视角图像中同一湍流火焰的视差, 即需要匹配火焰立体图像中的对应点。拍摄的扩散火焰是气体燃料不完全燃烧后产生的碳烟颗粒的高温自发辐射在可见光波段的辐射投影值, 其数学模型为:

$$q_{\lambda, \text{det}} = \int_{\Omega < \Omega_{\max}} \epsilon_{\lambda} I_{\lambda, n}(r, -s) \cos \theta d \Omega$$

$$= 2\pi \int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \epsilon_{\lambda} I_{\lambda, n}(r, -s) \cos \theta \sin \theta d \theta \quad (2)$$

式中: $\theta_{\min}, \theta_{\max}$ —双视角镜头的视场角范围。由于火焰是半透明物质, 两个视角图像中具有相同色彩特征的特征点并不一定是同一空间位置点的投影, 针对这种情况, 提出使用局部快速傅立叶变换, 将目标窗口与诊断窗口的火焰局部图像转换到频率空间进行相关度分析。在对诊断窗口内的图像进行相关度计算时, 取窗口内的离散像素点的 RGB 值作为该点的特征值, 即:

$$f(m, n) = R_{0 \sim 255} + G_{0 \sim 255} + B_{0 \sim 255} \quad (3)$$

式中: (m, n) —诊断窗口内像素点的索引号; R, G, B —该像素点的红绿蓝 3 灰度分量。图 4 为利用傅立叶变换匹配火焰立体图像的流程。

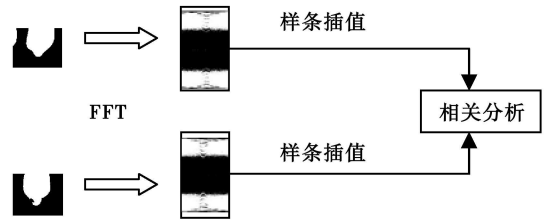


图 4 火焰快速傅立叶变换匹配流程

具体方法是: 火焰立体图像经过快速傅立叶变换后, 在火焰左视角图像上提取目标窗口, 在右视角图像诊断窗口内滑动, 同时作相关性分析, 相关度的计算方法为:

$$R(x, y) = \frac{\sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} f(m_1, n_1) \cdot f(m_1+x, m_1+y)}{\sqrt{\sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} f^2(m_1, n_1) \sum_{m_2=-\infty}^{\infty} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} f^2(m_2, n_2)}} \quad (4)$$

式中: $f(m_1, n_1), f(m_2, n_2)$ —诊断窗口和目标窗口内相应点的特征值; (x, y) —对应点之间的距离。

通过相关度的大小得到目标窗口在右视角图像内的坐标; 利用样条插值, 将计算结果精确提高到小数倍像素并利用极线约束条件对结果进行校正。

2 实验系统

图 5 为试验系统图, 气体火焰燃料为甲烷, 预混比例通过高精度气体流量计来控制, 成像元件采用美国 REDLAKE 公司生产的 Motion Xtra HG-100 K 系

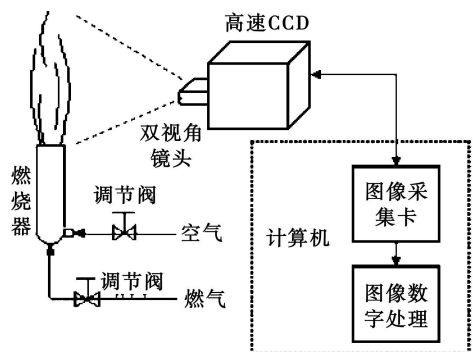


图 5 试验系统示意图

列高速面阵 CCD, 采样速率最高为 10 000 fps, 燃烧器喷嘴直径 10 mm, 摄像机镜头前加装 45° 双视角镜头。试验中, 相机参数的标定采用 Zhang 的自我标定方法^{7~8]}, 标定所用模板如图 6 所示。

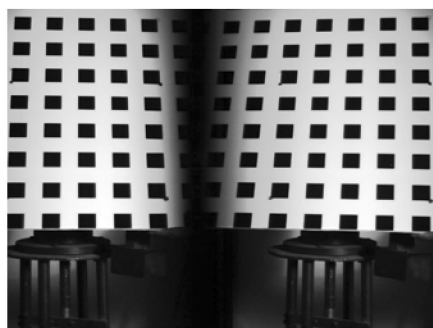


图 6 相机标定模板

3 试验结果及讨论

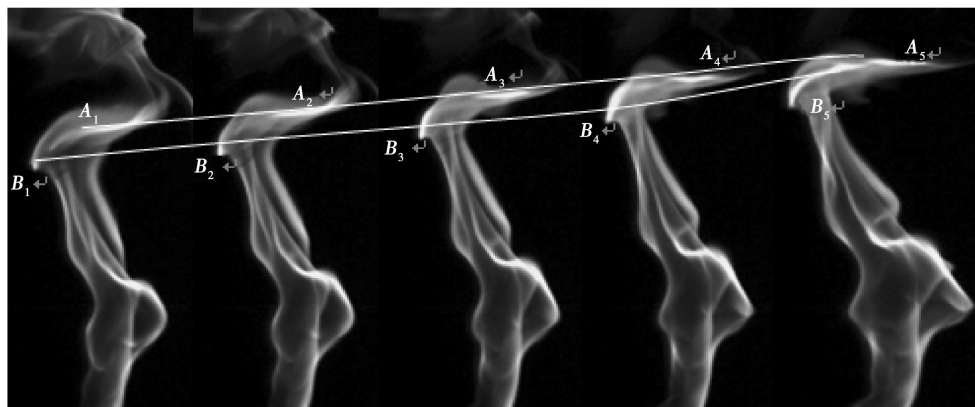


图 7 火焰漩涡连续图像(左视角), 采样速率 1 000 fps, 图像跨越时间 20 ms

对这一连续双视角图像中的两个火焰漩涡分别进行匹配计算后, 可以重建得到火焰漩涡在 1、2、3、4、5 时刻的空间三维结构, 结合漩涡的时序变化, 即可以获得其三维扩散速度场。漩涡空间结构的重建结果如图 8 所示, 图中(a)、(b)、(c)分别显示由 3 个不同视角对火焰漩涡的观察结果。比较图中标记的火焰漩涡和重建获得的火焰漩涡的三维结构, 可以明显看出空间中三维物体投影在二维图像平面上的结构与其本身实际结构具有很大的区别, 这也进一步证明了三维重建技术的重要性和必要性。

由图可以看出, 试验过程中, 湍流火焰漩涡的结构在横向和斜向随时间的变化没有像径向高度随时间变化的规律性这么强, 但漩涡 B 的横向及斜向变化仍比较可观, 特别其斜向变化明显有一个向空间坐标系 Z 轴正方向的拉伸过程, 此即为浮力和空气

为了得到较为明亮的火焰, 以满足高速 CCD 短时间曝光所需的光通量, 即保持火焰中存有较多的碳颗粒, 试验截取氧气、甲烷气体流量均为 0.05 L/min 条件下, 湍流扩散火焰的一组连续双视角图像。图 7 所示为一组标记火焰漩涡 A、B 运动轨迹的左视角图像, 从中可以清晰地看到湍流火焰漩涡结构的扩散运动。图中火焰漩涡 A 在 1 时刻出现在燃烧火焰中心地带, 受浮力作用自 1 时刻起由火焰燃烧中心向火焰边缘方向运动, 5 时刻到达火焰边缘地带。由图可以看出, 漩涡 A 运动的同时伴随着火焰颗粒发散, 大尺度涡结构逐步破碎。火焰漩涡 B 在 1 时刻位于火焰燃烧表面, 自 1 时刻起向火焰燃烧中心运动, 5 时刻到达火焰中心地带。与漩涡 A 相反, 由于逐步进入火焰燃烧中心, 漩涡 B 内不断汇聚火焰燃烧颗粒, 自身结构不断膨胀, 到 5 时刻已与漩涡 A 初步融合。

卷吸共同作用的结果。很多燃烧颗粒受到卷吸作用进入火焰漩涡, 能量更多的集中相对狭长的区域内。

重建计算得到漩涡 A、B 在两幅连续图像之间的三维平均扩散速度如表 1 所示。从中可以看出, 火焰漩涡 A 的径向扩张速度随时间变化较为稳定; 斜向扩张速度随时间的变化相对比较稳定, 仅是在 2 时刻有一个突变, 说明漩涡 A 在 2 时刻与 3 时刻之间在空间坐标系 z 轴方向有一个较大的拉伸变化。从图 8(a)中也可以证明这一点; 漩涡 A 的横向扩张速度随时间的变化较为明显, 横向扩张速度在 1、3 时刻很小, 而在 2、4 时刻有明显的增加; 在横轴方向漩涡 A₃ 的长度明显较 A₂ 小, 而漩涡 A₅ 由于已经靠近燃烧火焰边缘, 相对于漩涡 A₄ 变化也较大, 因此可以看出重建得到的漩涡 A 的速度场与其实际的运动变化是吻合的。

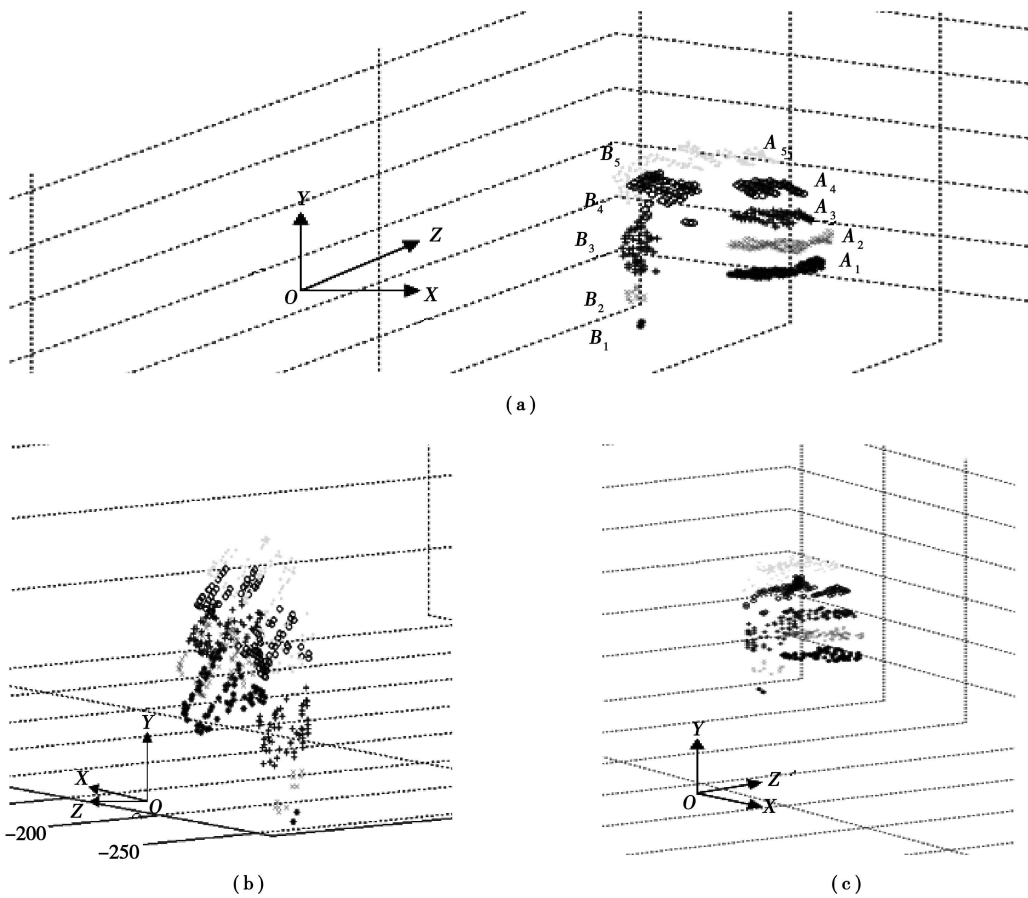


图 8 重建扩散火焰运动结果

表 1 火焰漩涡三维扩散速度

火焰漩涡位置	X 轴速度 $V_x/m^{\circ} s^{-1}$	Y 轴速度 $V_y/m^{\circ} s^{-1}$	Z 轴速度 $V_z/m^{\circ} s^{-1}$
A ₁ -A ₂	0.193	2.042	0.274
A ₂ -A ₃	1.315	1.587	1.314
A ₃ -A ₄	0.097	2.194	0.361
A ₄ -A ₅	2.477	1.948	0.361
B ₁ -B ₂	0.729	1.652	1.409
B ₂ -B ₃	1.062	3.808	6.230
B ₃ -B ₄	0.816	4.108	6.440
B ₄ -B ₅	2.126	2.710	1.104

漩涡 B 的横向扩张速度变化趋势与漩涡 A 相似, 径向扩张速度以及斜向扩张速度的变化说明了漩涡在燃烧火焰中心区域的运动是很剧烈的。

显然, 火焰漩涡的扩散是周期性行为, 燃烧火焰中心的火焰漩涡 A 发散后, 漩涡 B 进入燃烧火焰中心地带, 其扩散速度是由基本燃烧速度、火焰面积和反应区后炙热气体膨胀决定。随着火焰推进, 气体膨胀, 像活塞一样作用于部分未燃气体, 推动燃烧火焰中汇聚着能量的火焰漩涡向前移动, 从开始的相

位起, 火焰漩涡的结构逐渐变大, 被推举至流场远端后, 由于该区域湍流强度较大, 流动更加紊乱, 漩涡结构逐渐破碎, 不再出现与流场特征尺寸同量级的涡结构, 直至最后燃尽。

4 结 论

通过双视角镜头构造了基于单摄像机 CCD 的湍流火焰面三维扩散速度重建平台, 实现了利用单个成像系统得到两个不同角度火焰图像, 该系统将现有的单相机图像分析系统扩展到了三维领域的研究。为了对不同视角中火焰结构进行识别, 本文提出使用局部快速傅立叶变换, 将目标窗口与诊断窗口的火焰局部图像转换到频率空间进行相关度分析的匹配方法来克服由于亮度不同所带来的匹配误差。最后, 利用该平台对湍流预混火焰内部漩涡的三维结构和运动速度进行了研究。通过两个不同视角湍流火焰图像的空间变化, 得到火焰漩涡的三维结构, 并通过坐标的时间序列变化, 获得 X、Y 和 Z 三个不同方向的扩散速度。

研究表明, 由于燃烧速度的径向分布不均匀, 气

流被加热后的膨胀作用,以及未燃气流本身的速度梯度(它实际上不是一个常数)使得燃烧波在靠近边界处是向外弯曲的。这弯曲的燃烧波就像球状火焰的一部分,使得火焰面积元发生扩张。这样,进入每一温度层的质量流量是不一样的,面积元的扩张程度与质量流量的增加成正比。由于火焰面被拉伸,因此就成为向未燃气体方向凸出的发散焰面。这时火焰面以发散方式向未燃气体传播,反应区向预热区的热量传递和活化中心传递也均以发散方式进行。

定量计算的结果表明,本文提出的方法可以作为三维湍流火焰内部拟序结构运动特性研究的一种定量分析测试手段。

参考文献:

[1] 蒋平,林川,郭印诚. 矩形射流流动和燃烧中拟序结构的

实验研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 703-706.

[2] 冯耀勋,赵黛青. 热辐射对富氧扩散燃烧火焰结构和氮氧化物生成的影响[J]. 热能动力工程, 2005, 20(3): 275-279.

[3] 杨勇,马卫民,杨宏旻. 湍流扩散火焰细微结构特性分析[J]. 燃烧科学与技术, 1999, 5(3): 283-287.

[4] 段俐. HPIV及其初步应用研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2000, 26(1): 83-86.

[5] PAN G, MENG H. Experimental study of turbulent mixing in a tee mixer using PIV and PLIF[J]. AIChE Journal, 2001, 47(12): 2653-2665.

[6] 马颂德,张正友. 计算机视觉[M]. 北京:科学出版社, 2003.

[7] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334.

[8] CLARKE T A, FRYER J G. The development of camera calibration methods and models[J]. Photogrammetric Record, 1998, 16(91): 51-66

(编辑 滨)

新设计、新机组

新型 SGT5-8000H 燃气轮机

《Gas Turbine World》2007年11-12月号报道, Siemens推出了该公司新研制的SGT5-8000H燃气轮机样机,并准备于2008年开始进行简单循环运行鉴定。

简单循环:以天然气作为燃料,在ISO条件下燃气轮机基本负荷额定输出功率超过340 MW,效率为39.5%。

余热锅炉:具有中间再热的直流三压锅炉,被设计用于600℃/2.2 MPa底部蒸汽循环。

排放:DLN(干式低NO_x)燃烧室在样机50%~100%负荷时将限制排放小于25 mg/kg。

联合循环:装置净额定输出功率超过530 MW并且效率超过60%,能够使输出功率降低50%,达到260 MW。

SGT5-8000H燃气轮机完全是空气冷却的,没有采用蒸汽冷却。4级涡轮使用了先进的材料,前3级动叶和静叶都是空气冷却叶片,并且在第一级和第二级叶片上涂敷了热障涂层。

50 Hz燃气轮机具有以19:1压比运行的13级压气机,包括进口导叶和前三列可转导叶,用于提高功率减半的能力,达到良好的部分负荷效率并易于启动。

单轴转子由两个轴承支承。一个联合的轴颈和推力轴承位于压气机进口一侧,一个轴颈轴承位于涡轮排气一侧。

对于简单循环运行,一台SG5-3000W水冷发电机通过直接与涡轮的输出轴连接由燃气轮机驱动。对于联合循环运行,发电机的另一端将通过一个SSS离合器由汽轮机驱动。

(吉桂明 供稿)

able change. The percentage of Hg^{2+} will increase from 14.71% to 39.54%, that of Hg^0 will decrease from 85.19% to 60.38% and that of Hg^{P} will drop from 0.10% to 0.08%. The chlorine in coal and NO_x , SO_2 , HCl , Cl_2 in the flue gas assume a positive correlation to the formation of oxidized mercury in the flue gas. **Key words:** coal-fired power plant, mercury morphological distribution, flue gas

温度对 NO_2 差分吸收光谱特性影响的实验研究 = **Experimental Study of the Influence of Temperatures on NO_2 Differential Absorption Spectrum Characteristics** [刊, 汉] / SHAO Li-tang, TANG Guang-hua, XU Chuan-long, et al (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Power Generation and Combustion Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(4). — 404 ~ 407

When differential optical absorption spectroscopy is applied to monitor the flue gas emissions from a fixed pollution source, the flue gas temperature will exercise a relatively great impact on the NO_2 visible ultraviolet absorption characteristics. On a self-made test stand, an experimental study has been conducted of the differential absorption spectrum characteristics of NO_2 gas when its temperature falls in a range of 30 ~ 390 °C. The test results show that when the temperature is in a range of 30 ~ 150 °C, the differential absorption cross section will be subjected to a leap change in the presence of a temperature rise. However, its spectrum contour will be kept unchanged. When the temperature is in a range of 150 ~ 270 °C, a temperature rise will lead to a decrease of the differential spectrum peak value and an increase of the valley value. When the temperature is higher than 270 °C, a conspicuous change will occur to the fine configuration of the differential absorption spectrum and the number of peaks and valleys will increase. **Key words:** differential optical absorption spectroscopy (DOAS), nitrogen dioxide (NO_2), absorption cross section, influence of temperatures

甲烷扩散火焰空间拟序结构三维运动研究 = **A Study of the Three-dimensional Movement of a Coherent Structure in a Methane Diffusion Flame Space** [刊, 汉] / HUANG Qun-xing, WANG Fei, YAN Jian-hua, et al (National Key Laboratory on Clean Utilization of Energy Source, Zhejiang University, Hangzhou, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 408 ~ 412

An analytic method was presented for the three-dimensional movement characteristics of turbulent flames based on a high-speed stereoscopic visualization. The method in question first makes use of a stereoscope with dual viewing angles to enable a single CCD (charge coupled device) target surface acquiring simultaneously two flame images from different angles. Through a calibration, the parameters of a video camera can be obtained. Finally, a three-dimensional distribution of the vortex configuration in the flames and its diffusion speed can be determined by using the three-dimensional rebuilding method based on a two-eye visualization theory. Through experiments, reestablished were the three-dimensional distribution and velocity profile of the vortex configuration in a methane premixed flame. The calculation results show that due to the non-uniformity of the radial distribution of combustion speeds and the expansion action of gas flow when it is heated, the flame surface will be bent outwards near its boundary. **Key words:** turbulent flame, coherent structure, stereoscope with double viewing angles

二氧化碳气体辐射特性宽带 k 分布模型 = **A Wide-band k Distribution Model for Radiative Characteristics of Carbon Dioxide** [刊, 汉] / YIN Xue-mei, LIU Lin-hua, LI Bing-xi (College of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(4). — 413 ~ 416

A novel wide-band k distribution model was established. The spectrum radiative characteristic parameters of carbon dioxide were obtained from a high-temperature gas database HITEMP. A correlation formula was used to perform a fitting of the absorption coefficient of main carbon dioxide spectrum band. The model in question was used to calculate the radiative heat flux of the carbon dioxide. A comparison was made with a line-by-line calculation method, statistical narrow-band model, a narrow-band and a full-spectrum k distribution model. The results of the comparison show that for isothermal gases, the results obtained by using the wide-band k distribution model are in very good agreement with those obtained by using the line-by-line calculation method, even more accurate than those obtained by using the full-spectrum k