

# 大加速度场中层流扩散火焰流场的数值计算

董智广<sup>1</sup>, 吴晋湘<sup>2</sup>, 董智慧<sup>3</sup>, 刘志凯<sup>2</sup>

(1. 河北工程学院 城市建设系, 河北 邯郸 056038; 2. 河北工业大学 热动力系, 天津 300130; 3. 邯郸市规划设计院, 河北 邯郸 056002)

**摘要:**通过对大加速度场中层流燃烧室流场的数值计算,建立了大加速度场中二维层流燃烧的数学模型,对控制方程组进行离散,采用 SIMPLE 算法和交错网格设计并调试程序。在调试成功的程序上对甲烷和空气在大加速度场中的扩散燃烧过程进行了数值模拟。计算结果表明,沿燃烧室轴线方向的均匀大加速度场会对扩散火焰的速度场和温度场等产生明显影响。一方面使得燃料与空气的扩散混合过程得到强化,扩散火焰的形状变短变粗,火焰面温度升高,因而能够提高其燃烧速度;另一方面,由于浮力作用驱动高温气流的流动方向与燃料射流的方向相反,将形成一种不稳定的流场结构,并同时诱发燃烧过程的不稳定。

**关键词:**大加速度场; 燃烧; 数值模拟

中图分类号 O643.21 文献标识码: A

## 1 引言

在地面发生的燃烧过程总是处于数值为 1 g 的重力场中,由于燃烧火焰内部的温度梯度,使体积力的作用产生浮力效应,这种效应会对燃烧过程及火焰面形状产生影响。当前,有关重力和微重力条件下的燃烧过程及机理的研究,已成为研究体积力下的燃烧过程的热点<sup>[1~3]</sup>,而对大于 1 g 的体积力作用下的燃烧过程的研究却很少。过去的燃烧理论研究中,往往把重力等体积力忽略掉,但在有些实际过程中,大于 1 g 的大加速度场所产生的体积力可能会对燃烧过程产生较大的影响<sup>[3~4]</sup>。所以开展大加速度场中燃烧过程的分析,应具有同样重要的意义。

然而,以前对于大加速度场中燃烧过程的研究报道却并不多见。早期比较有代表性的工作如 G D Lewis 等人,他们通过从中部旋转一个封闭长管,在管中产生一个离心力场,并测量管中的预混气体的火焰传播速度<sup>[5]</sup>。吴晋湘等人通过求解带有加速度项的一维层流预混火焰传播方程发现<sup>[6]</sup>,只有在加

速度大于 10<sup>6</sup> g 时才会对火焰面结构及火焰传播速度产生影响,在文献[5]的实验中导致体积力影响提前的因素可能是因为火焰面的失稳。同时文献[7]、文献[8]还报道了大加速度场影响燃烧过程熄火规律的实验研究结果。Sivashinsky 等人对旋转燃气中离心力和复合向心加速度对火焰传播过程及稳定性的影响进行了理论分析,创立了描绘自由空间旋转气体火焰传播的自相似解<sup>[9]</sup>。M. Arai、H. Sato 等试验研究了变重力场对扩散火焰稳定性及其摇曳运动的影响及与 Fr 数的关联<sup>[10]</sup>。而对大加速度场中燃烧过程的数值模拟更是鲜见报道,文献[11]通过数值模拟讨论了大加速度场对层流预混火焰的影响。为了进一步研究体积力对燃烧过程及火焰面形状的影响,本文对在燃烧室中附加均匀大加速度场的层流扩散火焰燃烧过程进行了数值模拟研究,以了解大加速度场对火焰结构及燃烧过程的影响,丰富和发展这一领域的研究工作。

## 2 理论模型的建立

根据流体力学及燃烧物理学的研究,可列出带有化学反应的流动的基本守恒方程:

$$\text{连续方程: } \frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \vec{v} = 0$$

$$\text{扩散方程: } \rho \frac{Df_s}{Dt} = \nabla \cdot (\rho D_s \nabla f_s) - w_s$$

$$\text{动量守恒方程: } \rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \nabla \cdot \vec{p} + \sum_s \rho_s \vec{F}_s$$

能量守恒方程:

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \sum_s \rho_s c_{p,s} \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \frac{Dp}{Dt} + \Phi + \sum_s h_s w_s + \sum_s \vec{V}_s \cdot \rho_s \vec{F}_s - \sum_s (\rho_s \vec{f}_s \vec{V}_s \cdot c_{p,s} \nabla T)$$

收稿日期: 2003-07-14; 修订日期: 2003-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59576019)

作者简介: 董智广(1973-),男,河北隆尧人,河北工程学院硕士。

其中:  $\rho$ —混合物密度,  $\rho = \sum_s \rho_s$ ;  $\rho_s$ —混合物中  $s$  组分密度;  $\vec{v}$ —混合物相对于静止坐标系的运动速度;  $\vec{V}_s$ — $s$  组分的扩散速度;  $\vec{D}_s$ — $s$  组分的扩散系数;  $w_s$ —单位体积内  $s$  组分的化学反应速率;  $f_s$ — $s$  组分的质量相对浓度,  $f_s = \frac{\rho_s}{\rho}$ ;  $F_s$ — $s$  组分上的体积力;  $\vec{p}$ —系统的表面应力张量;  $h_s$ — $s$  组分的焓,  $h_s = h_{0s} + \int_{T_0}^T c_{p,s} dT$ ;  $\Phi$ —粘性耗散功;  $c_{p,s}$ — $s$  组分的定压比热。

本文采用的是二维轴对称圆柱坐标系,在此坐标系下的基本控制方程为:

$$\text{连续方程: } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r\rho u) = 0$$

$$\text{动量方程: } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v \cdot u) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r\rho u \cdot u)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_{eff} \frac{\partial u}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r\Gamma_{eff} \frac{\partial u}{\partial x}) + \rho a + s_u$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v \cdot v) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r\rho u \cdot u) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \times$$

$$\frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_{eff} \frac{\partial v}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r\Gamma_{eff} \frac{\partial v}{\partial x}) + s_v$$

$$\text{扩散方程: } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v \cdot f_s) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r\rho u \cdot f_s)$$

$$= \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_f \frac{\partial f_s}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r\Gamma_f \frac{\partial f_s}{\partial x}) + s_f$$

$$\text{能量方程: } \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r\rho v \cdot h) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r\rho u \cdot h) = \frac{1}{r}$$

$$\frac{\partial}{\partial r}(r\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial r}) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r\Gamma_h \frac{\partial h}{\partial x}) + s_h$$

为便于差分方程的推导,将以上控制方程写成通用形式:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(r\rho u\Phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}(r\Gamma_\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x_j}) + S_\Phi +$$

$S_{c,\Phi}$

式中: 第一项是时间导数项, 第二项是对流项, 第三项是扩散项,  $S_\Phi$ ,  $S_{c,\Phi}$  分别是变量守恒方程写成上述形式后剩余源项、化学反应源项。

### 3 数值模拟方法

本文模拟的燃烧室是一个圆柱体,其燃烧室直径为 0.072 m, 燃烧室长度为 0.2 m。燃烧过程中的气体燃料为甲烷, 氧化剂为空气。燃料与空气的进口在燃烧室的中心轴处, 燃料进口直径为 0.004 m, 空气由燃料进口周围的同轴环形通道进入, 通道外径为

0.01 m。设定的大加速度场在燃烧室中为均匀值, 其方向与燃烧室的轴线一致。因此数值模拟对象可以认为是一个轴对称问题。

(1) 计算域为轴对称圆柱坐标系。径项和轴项网格都采用变步长划分方法。考虑到入口附近燃烧反应剧烈, 网格在此区域进行加密, 但在壁面附近没有加密。

(2) 控制方程的离散及求解方法, 按 SIMPLER 方法处理。控制通用形式离散后得到的代数方程为:

$$\Phi_p = \frac{a_E\Phi_E + a_W\Phi_W + a_N\Phi_N + a_S\Phi_S + S_b + S_\Phi}{a_E + a_W + a_N + a_S + a_P}$$

式中的系数计算形式如下:

$$a_E = \max(0, d_e - \alpha |m_e|) + \max(0, -m_e)$$

$$a_W = \max(0, d_w - \alpha |m_w|) + \max(0, +m_w)$$

$$a_N = \max(0, d_n - \alpha |m_n|) + \max(0, -m_n)$$

$$a_S = \max(0, d_s - \alpha |m_s|) + \max(0, +m_s)$$

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S + S_P$$

式中:  $\alpha$ —差分格式开关, 本文计算采用混合格式, 即  $\alpha = 1/2$ ;  $d$ —扩散系数;  $m$  控制容积边界流能量系数。

(3) 模拟的燃烧过程的研究背景如文献[7]所述。由于燃烧室的旋转, 所产生的离心力和科氏力构成了其中的大加速度场。为保证计算速度和适应有限的存储空间, 在计算中忽略了离心力沿旋转径向的变化, 并且由于在转速较高时科氏力的值要小于离心力, 因此在计算中没有将其考虑到加速度场的源项中去。这样, 本文所模拟的就是均匀加速度场中的燃烧问题, 且燃料与空气进口的速度方向与加速度方向相同。

(4) 入口: 甲烷与空气的密度、温度参数分别为: 2.671 kg/m<sup>3</sup>, 289 K; 1.719 kg/m<sup>3</sup>, 810 K;

出口: 由于喷管出口燃气膨胀, 所有变量采用数值边界条件  $\frac{\partial\Phi}{\partial x} = 0$ ;

壁面: 绝热、无渗透、无滑移壁面, 即:  $\frac{\partial\Phi}{\partial x} = \frac{\partial\Phi}{\partial y} = 0, u = v = 0$ ;

对称轴: 所有变量的梯度在  $X, Y$  方向上等于零, 即:  $\frac{\partial\Phi}{\partial x} = \frac{\partial\Phi}{\partial y} = 0$ 。

### 4 计算结果及分析

大加速度场中燃烧流场与非大加速度场中流场的对比如图 1 和图 2 所示。图 1 为非大加速度场中

甲烷和空气燃烧的速度矢量图, 这是一个常规的扩

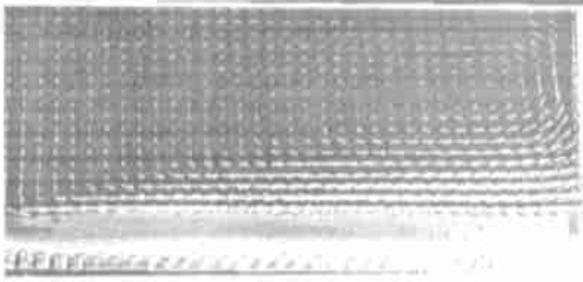


图 1 未加离心力时的速度矢量图( $u=0.6\text{ m/s}$ )

散火焰图。图 2(a)是  $a=50\text{ g}$  时甲烷和空气燃烧时的速度矢量图, 图 2(b)  $a=200\text{ g}$  时甲烷和空气燃烧时的速度矢量图。对比图 1 和图 2 可发现: 当没有旋转产生的离心力作用时, 也就是加速度场为  $0\text{ g}$  时, 在火炬的上方有一个逆时针方向的回流区; 而当有大加速度场作用时, 流场显著不同, 一方面在火炬上方仍维持一个逆时针方向的主回流区; 另一方面, 由于高温烟气所受的浮力与加速度场的方向相反, 驱动高温烟气向进口方向流动, 并从出口的轴线附

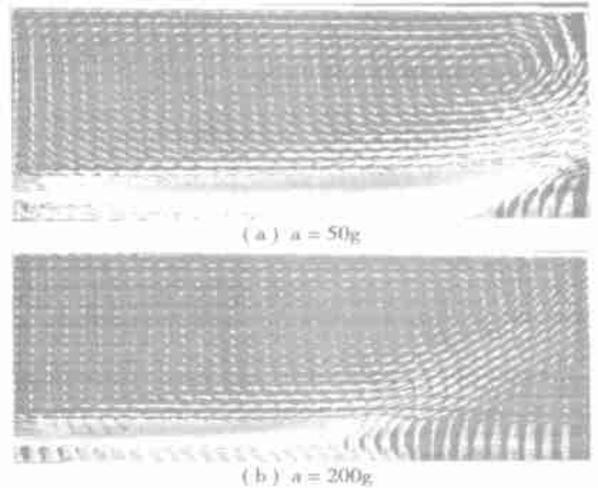


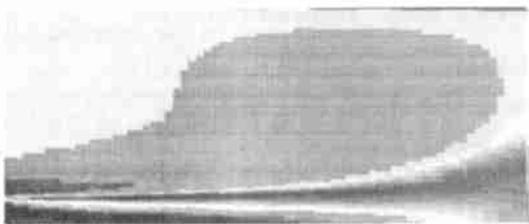
图 2 加离心力时的速度矢量图( $u=0.6\text{ m/s}, \alpha=1.03$ )

近引入了低温空气, 并形成了附回流区。附回流区导致了主流射流方向沿径向的偏折, 并使主回流区的强度较未加速度场的增大, 回流区中心左移。随着加速度场的增加, 附回流区的强度及影响范围也随之增大, 这显然强化了空气与燃料的扩散混合过程, 有利于提高扩散火焰的燃烧速度。

大加速度场中燃烧情况下的温度场与非大加速场中温度场对比如图 3 和图 4 所示。图 3 为非大加速度场中, 甲烷入口速度为  $0.6\text{ m/s}$  时, 甲烷和空气燃烧的温度场。图 4 为  $a=15\text{ g}$  和  $a=25\text{ g}$  时的温度场。对比图 3 和图 4 可发现: 加离心力时燃烧区的温度升高, 高温区变宽, 并且这种趋势随离心力场的增加而增加。分析流场后部对称轴附近的温度场还可以发现, 随着加速度的增加, 高温区前移, 说明扩散火焰有变短变粗的趋势。由于浮力作用驱动高温气流的流动方向与燃料射流方向相反, 形成一种不稳定的流场结构, 对比相关的文献[6]、文献[7]分析可知, 这将影响燃烧过程的稳定性。



图 3 未加离心力时的温度场



(a)  $a=15\text{ g}$



(b)  $a=25\text{ g}$

图 4 加离心力时的温度场

2.438E+03	2.490E+03	2.533E+03
2.303E+03	2.355E+03	2.398E+03
2.169E+03	2.221E+03	2.264E+03
2.034E+03	2.086E+03	2.129E+03
1.900E+03	1.952E+03	1.995E+03
1.765E+03	1.817E+03	1.860E+03
1.631E+03	1.683E+03	1.726E+03
1.496E+03	1.548E+03	1.591E+03
1.362E+03	1.414E+03	1.457E+03
1.227E+03	1.279E+03	1.322E+03
1.093E+03	1.145E+03	1.188E+03
9.584E+02	1.010E+03	1.053E+03
8.240E+02	8.760E+02	9.190E+02
6.895E+02	7.415E+02	7.845E+02

未加离心力  $a=15\text{ g}$   $a=25\text{ g}$

## 5 结 论

(1) 建立了描述大加速度场中二维层流燃烧过程的数学模型,对该模型应用控制容积法对该模型进行离散化,并对相关的扩散火焰燃烧过程进行了数值模拟研究。

(2) 由离心力产生的大加速度场确实会对气体燃料的层流扩散燃烧过程产生明显的影响,在大的浮力的作用下,会使主回流区的中心前移,并在火焰后端产生副回流区,其结构强化了空气与燃料的扩散混合过程,有利于提高燃烧速度。

(3) 随着加速度场值的增加,浮力效应会显著改变燃烧流场的结构,使扩散火焰的形状变短变粗,并成为诱发燃烧过程的不稳定的因素。

### 参考文献:

- [1] 杜文锋,孔文俊.微重力蜡烛火焰特征数值模拟[J].燃烧科学与技术,2002,8(3):202-206.
- [2] PATNAIK G, KAILASANATH K, ORAN E S. Effect of Gravity on Flame Instabilities in premixed Gases[J]. *AIAA Journal*, 1991, 29(12): 2141-2148.
- [3] HAMINS A, HEITOR M, LIBBY P A. Gravitational effects on the structure and propagation of premixed flame[J]. *Acta Astronautica*, 1988, 17(5): 503-514.
- [4] DUROX D. Some effect of gravity on the behavior of premixed flames [J]. *Combustion and Flame*, 1990, 82: 66-74.
- [5] LEWIS G D, SMITH C E. Investigation of centrifugal force and Reynolds number effects on combustion processes [R]. AD - A013912, 1975.
- [6] 吴晋湘,王恩宇.大加速度场对层流预混火焰影响的理论计算[J].河北工业大学学报,1999,28(2):82-86.
- [7] WU JINXIANG, WANG ENYU. Influence of large acceleration field on flame shape and extinction[A]. *The second Asia-Pacific Conference on Combustion*[C]. Taiwan, 1999.
- [8] 吴晋湘,王恩宇.大加速度场中熄火试验的研究[J].工程热物理论,1999,20(6):754-757.
- [9] SIVASHINSKY G I, RAKIB Z, MATALON M, et al. Flame propagation in a rotating gas[J]. *Combust Sci and Tech*, 1998, 57: 37-53.
- [10] SATO H, AMAGAI K, ARAIM. Diffusion flames and their flickering motions related with froude numbers under various gravity levels [J]. *Combustion and Flame*, 2000, 123: 107-118.
- [11] 吴晋湘,郭雅萍.大加速度场中二维层流燃烧过程的数值模拟[J].燃烧科学与技术,2002,8(3):265-269.

## MT30 船舶燃气轮机试运转成功

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2003年3月号报道,MT30船舶燃气轮机在Roll-Royce公司试验台上试运转中达到了36MW全功率,首次试运转获得成功。

预期MT30型机将在2004年初可供商业应用。与同功率的发动机比较,MT30型机的比功可提高25%,它是Rolls-Royce公司从航空发动机技术改型得到的工业和船用发动机。

具有双转子高压比的燃气发生器,MT30型机可以配置有轴向进气室或紧凑设计的径向进气,8级可变几何的低压压气机和6级高压压气机被设计成轻型结构。

4级自由动力涡轮是从工业Trent改型得到的。轴承和支承是根据WR-21发动机设计的。

环形燃烧室类似于航空母型机,并且被设计成商业上可得到的符合DMA标准的馏出燃料,保证MT30型机满足所有当前预期的排放和排烟标准。发动机控制系统提供全部集成的报警、监测和控制功能,包括独立的发动机超速保护;全套设备被设计成无人舱运行,通过遥控进行控制和监测。

模块结构提供维护保障,模块可随时拆下和更换,从而代替了整个发动机的大修。因为各个模块已经过预先平衡,发动机不要求在现场平衡。设计的热端大修间隔为12000h,大修寿命为24000h。必要时,MT30型机可以在发动机冷却12h后进行更换。

Rolls-Royce指出,MT30型机所有潜在应用市场,如:高速渡船、旅游船、LNG(液化天然气)运输船、护卫舰、驱逐舰和航空母舰都要求更大的功率,以便促进更大、更快舰船的设计。

(吉桂明 供稿)

三维内肋螺旋管内强化换热实验= **Experimental Research on Intensified Heat Exchange in a Three-dimensional Internally Finned Helical Pipe** [刊, 汉] / LI Long-jian, XIN Ming-dao CUI Wen-zhi (Power Engineering Institute under the Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 270 ~ 273

Tests and measurements were performed to investigate the flow and heat transfer performance in a three-dimensional internally finned helical pipe with a curvature of 0.066 3 and measurement section length of 1.15 m. With water serving as a working medium tests were carried out in a spiral bare pipe and a three-dimensional internally finned pipe of two different structural dimensions. The range of Reynolds number is  $Re = 1\ 000\text{--}8\ 500$ . The test results indicate that a relatively high intensification of convection heat exchange can be achieved in the spiral pipe by the use of three-dimensional inner fins, which is accompanied by a moderate increase in flow resistance. In comparison with bare spiral pipes without fins the average intensification ratio of heat exchange for the two kinds of three-dimensional internally finned pipe within the range of measured flows can reach 1.71 and 2.03 respectively with the thermodynamic performance factor being assessed at 1.2 - 1.66. **Key words:** spiral tube, ribbed tube, intensified heat transfer

大加速度场中层流扩散火焰流场的数值计算= **Numerical Calculation of Laminar Flow Field of a Diffusion Flame in a High Acceleration Field** [刊, 汉] / DONG Zhi-guang (Department of Urban Construction, Hubei Engineering Institute, Handan, China, Post Code: 056038), WU Jin-xiang, LIU Zhi-kai (Department of Thermal Energy Engineering, Hubei Polytechnical University, Tianjin, China, Post Code: 300130), DONG Zhi-hui (Handan Municipal Planning Design Institute, Handan, China, Post Code: 056006) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 274 ~ 277

A numerical calculation method is proposed for calculating the laminar flow field of a combustor in a high acceleration field and a mathematical model for two-dimensional laminar flow combustion in the high acceleration field was set up. A control equation group was discretised. A SIMPLE algorithm and a staggered grid design were adopted and the relevant program was debugged. On the basis of the successfully debugged program a numerical simulation of the diffusion combustion process was performed of methane and air in the high acceleration field. The results of the calculation indicate that the uniform and high acceleration field along the axis of the combustor will exercise a significant influence on the velocity and temperature fields of the diffusion flame. On the one hand, it has intensified the diffusion/mixing process of the fuel and air, resulting in a length-reduction and thickening of the diffusion flame shape and a rise in flame surface temperature and thus enhancing its combustion speed. On the other hand, due to a floating force action the high-temperature air flow will assume a direction opposite to that of the fuel jet flow, which would produce a unstable flow field structure, triggering a unstable combustion process. **Key words:** high acceleration field, combustion, numerical simulation

微细微量螺旋加料器的试验研究= **Experimental Research on a Micro-particle and Micro-quantity Screw Feeder** [刊, 汉] / ZHANG Jie, GAO Tie-yu, HUI Shi-en (College of Energy & Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(3). — 278 ~ 280, 291

An experimental study of several types of self-designed micro-particle and micro-quantity solid-particle feeder has resulted in the identification of micro-quantity feeding rod types suitable for materials of different particle diameters. It is found that when carborundum particles have a Sauter mean diameter around 90  $\mu\text{m}$  the pressure screw-feeding rod can accommodate a minimum flow of 0.4 g/min. With the carborundum particles assuming a Sauter mean diameter of 40  $\mu\text{m}$  the two-wire relaxation screw feeder rod can attain a minimum flow rate of 0.6 g/min. A micro-particle and micro-quantity solid particle feeder featuring simple and reliable operation with an accurate quantification can be crucial for a uniform, continuous and stable feeding of powder during the experimental study of gas-solid two-phase flows. **Key words:** gas-solid two-phase flow, screw, feeding rod, relaxation, multi-wire

基于辐射能检测的智能燃烧进化优化系统研究= **A Study of the Optimization System of Radiation Energy Detection-based Intelligent Combustion Evolution** [刊, 汉] / MA Tao, XU Xiang-dong, WANG Xin-xin (Department of