

CO₂ 稀释对乙烯/空气扩散火焰烟尘形成和温度场的影响

顾中铸

(南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042)

摘 要: 应用漫射光二维视线衰减技术 (diffuse 2D-LOSA) 检测二氧化碳稀释的乙烯-空气层流扩散火焰中烟尘体积浓度及其温度分布规律。研究发现: 当以适量的 CO₂ 稀释燃料后, 大大抑制了火焰中烟尘的产生, 而对温度场影响很小。在火焰中间高度附近存在一个最大烟尘浓度值, 所对应的位置随 CO₂ 浓度的增加而升高。在火焰底部和顶部, 几乎没有烟尘产生。CO₂ 添加到燃料中来抑制烟尘产生主要依靠稀释效应和直接化学反应, 其中直接化学反应比稀释效应的作用更大。

关 键 词: 烟尘形成; 二氧化碳; 层流扩散火焰; 光学诊断

中图分类号: X511 文献标识码: A

引 言

废气再循环 (EGR) 是一种有效的减少烟尘排放方法。废气的主要组分是 CO₂、N₂ 和气态水, 研究这些气体各自稀释燃料后对烟尘形成的影响对于分析 EGR 过程烟尘的形成机理具有重要的意义。火焰烟尘的形成是一个复杂的过程, 导致烟尘形成的整个机理至今仍有待探索。有关 CO₂ 稀释对燃烧过程烟尘的影响研究, 国内尚未见报道, 美国、加拿大等虽然做过一些研究, 但由于测试手段的限制, 结果难免有局限性。一些专家认为, 在层流扩散火焰中添加 CO₂ 对烟尘形成的影响主要是来自热力方面的, 而不是由于化学变化的原因^[1]。另外一些专家则认为 CO₂ 添加到燃料侧或空气侧都能引起明显的化学变化, 从而抑制烟尘的形成^[2]。

另外一种减少烟尘排放的方法是采用尾气净化技术, 如静电捕集技术 (ESP)。无论是研究 EGR 过程烟尘的形成机理还是 ESP 中烟尘的荷电、迁移与捕集特性, 关键在于是否能准确地测得烟尘浓度以及烟尘温度。二维视线衰减技术是目前国际上最先

进的实时测量高温烟气中烟尘温度和浓度方法, 具有灵敏度高、抗干扰能力强等特点。本研究应用漫射光二维视线衰减技术 (diffuse 2D-LOSA) 分析测试燃料侧添加 CO₂ 的乙烯/空气扩散火焰中烟尘的浓度场与温度场分布特性及其变化规律, 探讨 CO₂ 稀释抑制烟尘形成的机理。

1 实验方法

试验是在加拿大国家科学院 (NRC) 的燃烧试验台上完成的, 燃烧器的燃料喷嘴是出口直径为 $\phi 3.06$ mm 的不锈钢管, 空气喷嘴是内径为 $\phi 25$ mm 的同轴渐缩管。二者均内置蜂窝状金属体 (80 孔 / 英寸), 以提高气流流动的稳定性, 并在喷嘴出口处, 形成一个圆台形速度场。

在 CO₂ 稀释实验中, 空气流量为 25 L/m³ 乙烯流量为 20 mL/m³ 燃料混合物中 CO₂ 浓度分别为 10%、20%、30%、40%、50% 和 60%。

二维视线衰减技术用来检测烟尘浓度以及其温度。在这项光学测量技术中, 烟尘气溶胶的透光率可以通过介质沿着一条直线 (弦) 进行测量。在波长为 λ 时通过弦的透光率为:

$$I_{\lambda} = \frac{I_0}{I_0} \exp(-\int_{-\infty}^{\infty} k_{\lambda}^g ds) \quad (1)$$

式中: I_0 —通过衰减介质前的光强; I_{λ} —通过衰减介质后的光强; k_{λ}^g —当地光衰减系数。

烟尘体积浓度 f 为:

$$f = \frac{k_{\lambda}^g \lambda}{6\pi (1 + \rho_{sa}) E(m)_{\lambda}} \quad (2)$$

式中: $E(m)_{\lambda}$ —烟尘吸收功, J/ρ_{sa} —分散系数与吸收系数之比, 某些气溶胶 ρ_{sa} 为零。

收稿日期: 2010-06-04 修订日期: 2010-06-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50778090); 江苏省政府留学基金资助项目 (JS2006-024)

作者简介: 顾中铸 (1963-), 男, 安徽肥西人, 南京师范大学教授, 工学博士。

在本实验中, τ_λ 并不是由 I_0 和 I 直接得出, 而是由 4 种连续的单一色度物理量得出, 这 4 个物理量分别为 I_{LAMP} (没有衰减介质下的光强) I_{DARK} (没有衰减介质和光照下的光强) $I_{transmission}$ (有光照以及衰减介质下的光强) $I_{emission}$ (有衰减介质无光照下的光强) I_0 则:

$$\tau_\lambda = \frac{I_{transmission} - I_{emission}}{I_{LAMP} - I_{DARK}} \quad (3)$$

算出 τ_λ 后可以反推得 $k_\lambda^{(g)}$, 进而很容易得到烟尘浓度。已知烟尘浓度, 颗粒光发射强度以及检测光的波长即可计算得到烟尘温度值。不同 CO₂ 浓度下所形成的火焰图像由一台数码摄像机进行监控。

本研究所涉及的光学测量系统以及燃烧器的细节参见文献 [3~5]。

2 实验结果与讨论

2.1 实验结果

2.1.1 烟尘浓度的测量

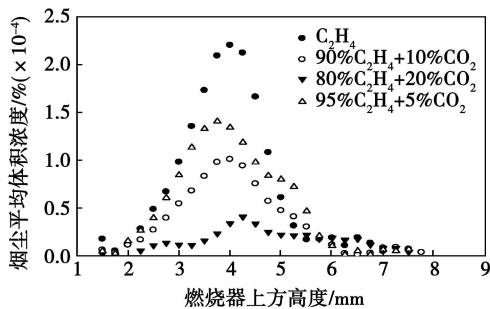


图 1 CO₂ 稀释前后不同高度平均烟尘浓度的变化

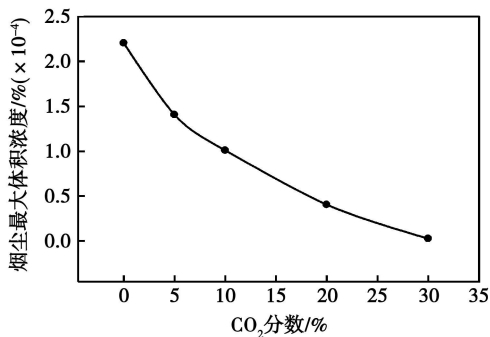
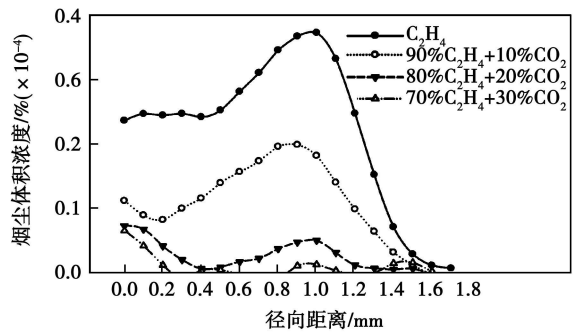
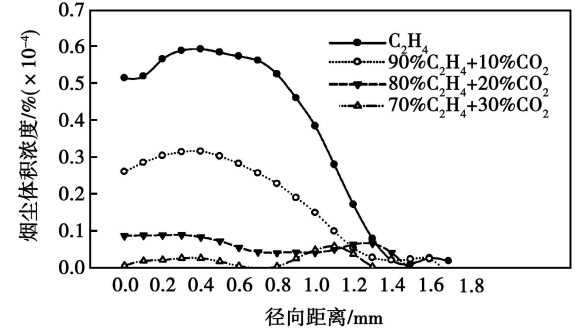


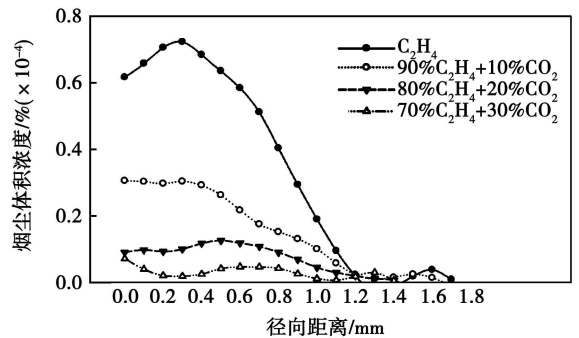
图 2 CO₂ 稀释浓度对乙烯火焰烟尘产生的影响



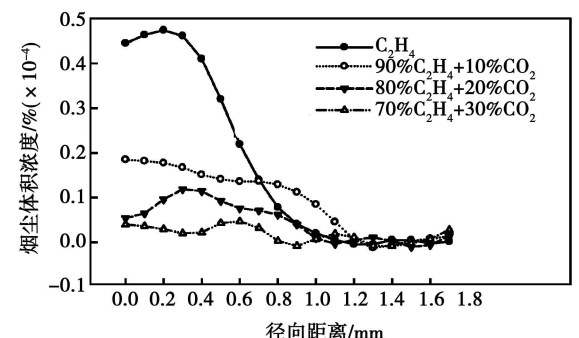
(a) H=3.5 mm



(b) H=4.0 mm



(c) H=4.5 mm



(d) H=5.0 mm

图 3 0%、10%、20% 和 30% CO₂ 稀释浓度时, 不同高度烟尘浓度径向变化

在乙烯中添加 CO₂ 后火焰烟尘浓度沿轴向的分布规律如图 1 所示, 最大烟尘浓度随燃料中 CO₂ 浓度的改变而变化的情况如图 2 所示, 当添加的

CO₂浓度分别为 0%、10%、20%和 30%时,不同燃烧器高度下烟尘浓度沿径向分布与变化规律如图 3 所示。在实验中,所考察火焰的烟尘浓度值非常小(最低可达 $0.1\% \times 10^{-4}$ 以下),二次重复测量结果相差低于 1%,这表明 diffuse2D-IOSA 技术具有高灵敏度和稳定性。从图 1 和图 2 可以看出,添加 CO₂对火焰烟尘的有着明显的抑制作用。烟尘浓度随火焰高度的变化曲线在添加不同量 CO₂的情况下均有相似的形状,与 GULDER应用激光消光法所测得的实验结果非常符合^[6],这也从另外一个方面表明,应用 diffuse2D-IOSA 技术对高温低烟尘火焰中烟尘浓度的检测结果是可靠的。从图 1 和图 3 可知,烟尘主要集中在火焰的中间区域,底部和顶部区域中的烟尘可以忽略。从图 1 可看出,在靠近火焰中间高度的位置烟气浓度达到峰值,而峰值所在的火焰高度随 CO₂浓度的增加而升高。从图 3 中可看出,随着添加 CO₂浓度的改变,在不同火焰位置,烟尘浓度沿径向大致呈相同的变化规律:在火焰内外侧之间某一位置,烟尘浓度达最大值 S_{max} 且 CO₂浓度越高, S_{max} 越小,而在外侧烟尘浓度趋于零。

2.1.2 烟气温度的测量

乙炔火焰以及有 CO₂稀释的乙炔火焰的温度分布如图 4 所示。乙炔火焰与 10% CO₂稀释的乙炔火焰的平均温度差为 27.8 K(约 1.6%),而乙炔火焰与 20% CO₂稀释的乙炔火焰的平均温差为 28.7 K(约 1.6%)。这一结果表明在乙炔火焰中添加 CO₂对温度的影响并不是很大,这与在用 CARS 法测量乙炔火焰温度的实验中添加 H₂和 H₂对温度的影响是相类似的^[9]。在靠近火焰中间区域的位置达到温度的峰值,与烟气浓度峰值的位置是基本一致,这表明温度与烟尘形成有着紧密的联系。

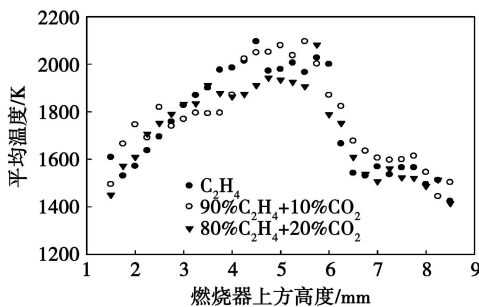


图 4 CO₂稀释前后烟尘平均温度轴向分布

2.1.3 火焰图像的检测

添加不同量 CO₂时对应的火焰图像如图 5 所

示。从图像上看,添加 CO₂对形成火焰的高度以及直径并没有明显的影响。这表明添加 CO₂对烟尘在火焰中的停留时间几乎没有影响。

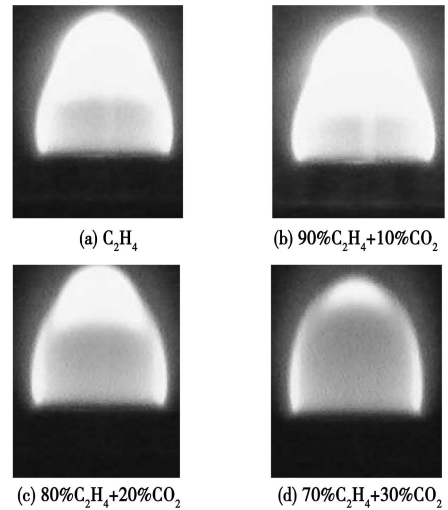


图 5 0%~30% CO₂稀释时火焰图象变化(乙炔流量 20 mL/min,空气流量 25 L/min)

2.2 实验结果分析

2.2.1 CO₂稀释抑制烟尘形成的机理分析

抑制烟尘形成的机理不仅与稀释效应和热效应有关,而且与化学效应密切相关^[2,6-7,9-10]。稀释效应是由于添加 CO₂降低了单位质量燃料气体混合物中碳的含量,因此减少了烟尘的生成量。添加稀释剂引起的火焰温度的变化即热效应,也将影响烟尘的生成。从实验数据来看如图 4 所示,添加一定量的 CO₂对温度的影响可以忽略不计,可见对于本研究热效应不是引起烟尘形成的主要因素。烟尘形成的化学效应主要包括氧化反应,多环芳烃(PAH)起始反应以及表面增长反应。一些研究者认为^[2,7],通过添加 CO₂来抑制烟尘形成的化学过程其实是增强烟尘氧化反应的一个过程。Guo H 等人的数学模拟结果进一步表明^[11],添加 CO₂从化学反应上抑制烟尘形成主要是由于氢原子浓度的减少,当 CO₂浓度增加时,氢的消耗量会增大,这是由于 $CO + OH \rightleftharpoons CO_2 + H$ 这就意味着在 CO₂稀释的火焰中氢浓度会降低,因此 PAH 初始反应和表面反应的速率也会降低,烟尘生成量减少。在火焰底部,富燃料且温度较低,烟尘缓慢形成,因此浓度很低;而到了火焰顶部,烟尘量较少的原因是在高温和富氧条件下大部分烟尘与 O₂反应而燃尽。火焰内侧尽管处于富燃料区,但温度较低^[4],烟尘产生量较

少; 火焰外侧尽管温度很高^[4], 但处于富氧区, 不利于烟尘产生; 而在火焰内外侧之间, 温度较高, 且处于富燃料区, 因此烟尘产生量较大, 并在某一位置在热效应和化学效应的共同作用下达到最大。

2.2.2 CO₂ 稀释对烟尘形成的定量分析

用 ARRHENIUS 类型的表达式, 在同向流动下的扩散火焰中烟尘浓度的最大值可表示为:

$$E_m \sim [X_F]^\alpha \times \tau \times \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

式中: X_F —燃料气体混合物中燃料的摩尔浓度; α —由烟尘形成速率所决定的次方数; τ —由火焰的可见高度和直径决定的特征持续时间; E —反应活化能; T —火焰温度, K 由实验数据推导出的 E 为 200 kJ/mol

综上所述, 添加 CO₂ 对火焰温度和火焰特征持续时间的影响可以忽略不计。所以式 (4) 可以修改为:

$$E_m = k \times X_F \quad (5)$$

式中: k —常数, 由燃料的成分所决定。从实验收集的数据可知, $k=24$, $\alpha=8.13$ 。这样可以得出烟尘浓度的最大理论值, 与实验数据吻合很好, 如图 6 所示。这里的 α 值远远大于用氮气, 氮气这类惰性气体稀释的火焰中的 α 值约为 $(0.3 \sim 1)^{[6]}$ 。由于在燃料中添加惰性气体来抑制烟尘的产生, 主要是通过稀释效应, 而直接化学反应的作用可以忽略。由此可以推断, 当 CO₂ 作为稀释剂添加到燃料侧时, 化学变化比稀释效应更能抑制烟尘形成。

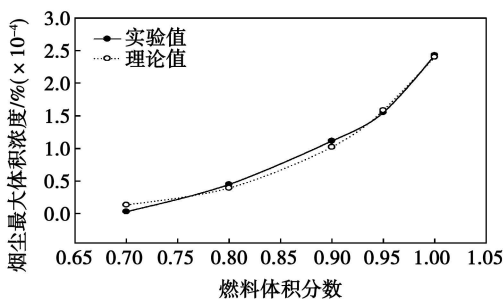


图 6 理论结果与实验值比较

3 结 论

研究了在燃料侧添加 CO₂ 对同向流动的乙烯/空气层流扩散火焰烟尘形成的影响。研究表明, 在高温低烟尘浓度的轴对称气氛下, 应用二维视线衰

减技术可以对烟尘浓度和烟尘温度进行快速准确的测量。实验数据表明, 在燃料侧添加 CO₂ 对抑制火焰的烟尘形成有着显著的效果。由于在火焰中添加 CO₂ 和不添加 CO₂ 这两种情况下, 火焰温度几乎没有差异, 因此当 CO₂ 作为稀释剂适量地添加到燃料中时, 热效应不是抑制烟尘浓度的因素。理论分析表明, 稀释效应与直接化学反应是 CO₂ 添加到燃料侧抑制烟尘形成的主要因素。而化学反应比稀释效应对抑制烟尘形成的作用要大。

参考文献:

- [1] SCHUG K P, MANHEIMER T, NAT Y Y, YACCARNO P, et al. Sooting behavior of gaseous hydrocarbon diffusion flames and the influence of additives. *J. Combust Sci Technol* 1980; 22: 235—250.
- [2] DUD X, AXELBAUM R L, LAW C K. The influence of carbon dioxide and oxygen as additives on soot formation in diffusion flame. *J. Proc Combust Inst* 1990; 23: 1501—1507.
- [3] THOMSON KEVIN A, JOHNSON MATTHEW R, SNELLING DAVID R, et al. Diffuse light two dimensional line of sight attenuation for soot concentration measurements. *J. Applied Optics* 2008; 47(5): 694—703.
- [4] THOMSON KEVIN A, GÜLDER OMER L, WECKMAN ELIZABETH J, et al. Soot concentration and temperature measurements in co-annular non-premixed CH₄/air laminar flames at pressures up to 4 MPa. *J. Combustion and Flame* 2005; 140: 222—232.
- [5] SNELLING DAVID R, THOMSON KEVIN A, SMALLWOOD GREGORY J. Two dimensional imaging of soot volume fraction in laminar diffusion flames. *J. Applied Optics* 1999; 38(12): 2478—2485.
- [6] GÜLDER O L, SNELLING D R, SAWCHUK R A. Influence of hydrogen addition to fuel on temperature field and soot formation in diffusion flames. *J. Proc Combust Inst* 1996; 26: 2351—2358.
- [7] MCLINTOCK I S. The effect of various diluents on soot production in laminar ethylene diffusion flames. *J. Combust Flame* 1962; 13: 217—229.
- [8] ANGRILLI Q, GEILINGER H, SIREBEL T, et al. Influence of exhaust gas recirculation on soot formation in diffusion flames. *J. Proc Combust Inst* 2000; 28: 2643—2649.
- [9] LIU F, GUO H, SMALLWOOD G J. The chemical effects of carbon dioxide as an additive in an ethylene diffusion flame in implications for soot and NO_x formation. *J. Combust Flame* 2001; 125: 778—791.
- [10] OH K C, SHIN H D. The effect of oxygen and carbon dioxide concentration on soot formation in non-premixed flames. *J. Fuel* 2006; 85: 615—627.
- [11] GUO HONGSHENG, SMALLWOOD GREGGORY J. A numerical study on the influence of CO₂ addition on soot formation in ethylene/air diffusion flame. *J. Combust Sci and Tech* 2008; 180

1695—1708.

[12] GÜLDER O L, SNELLING D R Influence of nitrogen dilution and flame temperature on soot formation in diffusion flames. *J. Combust Flame* 1993 92: 115—124.

[13] BALZELL W H, SAROFIM A F Optical constants of soot and their application to heat flux calculations. *J. Heat Transfer* 1969 91: 100—104.

[14] ROPER F G The prediction of laminar diffusion flame sizes. Part II. *J. Theoretical Model Combust Flame* 1977 29: 219—226.

[15] GREENBERG P S, KU J C Soot volume fraction imaging. *J. Appl Opt* 1997 36: 5514—5522.

[16] FRENKLACH M Reaction mechanism of soot formation in flames. *J. Phys Chem Chem Phys* 2002 4: 2028—2039.

[17] GLASSMAN I Sooting laminar diffusion flames: effects of dilution, additives, pressure and microgravity. *J. Proc Combust Inst* 1998 27: 1589—1596.

[18] APPEL J, HOCKHORN H, FRENKLACH M Kinetic modeling of soot formation with detailed chemistry and physics. Laminar premixed flames of C₂ hydrocarbon. *J. Combust Flame* 2000 121: 122—134.

[19] TAIT N P, GREENHALGH D A, PLIF imaging of fuel fraction in practical devices and IH imaging of soot. *J. Ber Bunsenges Phys Chem* 1993 97: 1619—1625.

[20] HOWES W L, BUCHELLE D R Optical interferometry of inhomogeneous gases. *J. Opt Soc Am* 1966 56: 1517—1528.

[21] LIU F, GUOH Numerical modeling of soot formation and oxidation in laminar coflow non-smoking and smoking ethylene diffusion flames. *J. Combust Theory Model* 2003 7: 301—311.

(编辑 陈 滨)

新技术、新工艺

核电站汽轮机组排汽的内湿蒸气流动计算的研究

据《Теплоэнергетика》2010年9月号报道,提高汽轮机(特别是对于核电站)的单机功率要求增加末级排汽的面积,以便在高度真空的情况下保证蒸汽必要的通路并降低余速损失。借助于增加末级叶片高度、排汽口(即低压缸)数、以及在 АЭС(核电站)大功率(超过 1 000 MW)汽轮机情况下从高速(3 000~3 600 r/min)转变到低速(1 500~1 800 r/min)就能做到这一点。

在保持高经济性的前提下,与传统的解决办法比较,应用组合排汽,不用大幅度地增加叶片高度就能使排汽面积增加 30%~35%。

在这样的排汽和 3 个 ЦНД(低压缸)的情况下,如果达到足够高的真空和效率,单轴汽轮机的功率可达到 2 000 MW。

(吉桂明 摘译)

Energy & Power — 2011, 26(3). — 333 ~ 337

Against the backdrop of the application of high temperature air combustion technology in industrial boilers, a simulation study was performed of the high temperature air combustion characteristics of the single nozzle combustor of a concentric type axial swirling flow high temperature air burner. The Reynolds stress model (RSM) was used in the turbulent flow transmission equation and the PDF (Probability density function)-based combustion model featuring the β function was employed by the gas phase combustion model. The radiation heat exchange process was simulated by using a discrete coordinate method. The NO_x model is of the thermal type. With natural gas serving as the fuel, when the preheated air temperature is 1 273 K, the oxygen content of the air reaches 8%. Under the condition of the total excess air factor for combustion being 1.1, a numerical simulation calculation was conducted. The influence of such parameters as the swirling flow angle and the spiral extension length of the burner etc. on NO_x emissions, local temperature, oxygen concentration and CO concentration distribution etc. was investigated. The research results show that the swirling flow burner can further reduce the NO emissions and make the combustion more complete. When the spiral rib extension factor $R=2$, fuel/air speed ratio $a=1.09$ and the swirling flow angle $\theta=180^\circ$, the NO emissions concentration attains the minimum, the outlet NO molar fraction hits 12.9×10^{-6} and the outlet CO molar fraction reaches 29×10^{-6} . When the swirling flow angle $\theta=0$ (direct jet flow), the above mentioned fractions are 31.7×10^{-6} and 372×10^{-6} respectively. Key words: industrial boiler, high temperature air combustion, swirling flow burner

CO_2 稀释对乙烯/空气扩散火焰烟尘形成和温度场的影响 = Influence of CO_2 Dilution on Ethylene/air Diffusion Flame-caused Soot Formation and Its Temperature Field [刊, 汉] GU Zhong-zhu (College of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing, China, 210042) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 338 ~ 342

The diffuse light two-dimensional line of sight attenuation (2D-LOSA) technology was used to detect the volumetric concentration of the soot in the ethylene/air laminar flow diffusion flame diluted by carbon dioxide and its temperature distribution regularity. It has been found that when the fuel has been diluted by an appropriate amount of carbon dioxide, the production of soot in the flame can be greatly restrained with a very small influence on the temperature field. A maximum soot concentration will exist around the mid-height of the flame and its corresponding position will move up with an increase of the carbon dioxide concentration. At the bottom and top of the flame, almost no soot is produced. To add carbon dioxide to the fuel to contain the production of soot mainly depends on the dilution effect and direct chemical reactions, during which the latter play a role bigger than the former. Key words: soot formation, carbon dioxide, laminar flow diffusion flame, optical diagnosis

基于预测模型的模糊-PID控制试验研究 = Experimental Study of a Fuzzy-PID (Proportional, Integral and