

可控活化热氛围燃烧器温度场的模拟

冯 威¹, 吴志军², 邓 俊¹, 李理光²

(1. 上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200030; 2. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘 要:在试验的基础上,利用仿真计算的方法对可控活化热氛围燃烧器的温度场进行了研究,探讨了中央射流、中央射流速度、协流温度及协流速度对燃烧器温度场的影响,找出了此燃烧器温度场的稳定区域,该结果对试验的设计具有一定指导意义。

关键词:动力机械工程;活化热氛围;燃烧器;温度场;模拟

中图分类号:TK4216 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2007)03-0513-05

Numerical simulation of temperature field in controllable active thermo-atmosphere combustor

Feng Wei¹, Wu Zhi-jun², Deng Jun¹, Li Li-guang²

(1. Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China; 2. School of Automotive, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Based on the available experimental results, a simulation study on the temperature field of a controllable active thermo-atmosphere combustor was presented with a non-reacting central jet issuing into a vitiated co-flow. The influences of the co-flow velocity, the co-flow temperature, and the jet issuing velocity on the thermal atmosphere have been evaluated. The results are useful for the optimization of experimental scheme design.

Key words: power machinery engineering; active thermo-atmosphere; combustor; temperature field; simulation

湍流和燃烧的非线性耦合使湍流燃烧成为当今工程研究领域中最复杂的问题之一。活化热氛围燃烧器的应用使湍流化学动力学从复杂的回流中解耦出来,给稳定机理的研究提供了更便捷的方法^[1]。国际上已经有一些学者先后利用可控活化热氛围燃烧器来研究湍流燃烧。剑桥大学的 E. Mastorakos 等人对氢气在热氛围中的自燃进行了试验和计算,通过检测 OH 找出了起升高度的变化规律。燃烧模型采用条件矩封闭模型,结

果与实验吻合很好,同时揭示了自燃带结构^[2]。加州大学 Berkeley 分校先后利用可控活化热氛围燃烧器对 H₂/N₂ 湍流喷射火焰进行了实验研究和数值分析^[3]以及对低温下的甲烷喷雾燃烧进行了实验研究^[4]。澳大利亚悉尼大学燃烧实验室在该燃烧器所提供的活化热氛围内研究了不同气体的喷射起升火焰^[5]。此外, Cornell 大学的 Renfeng Richard Cao 用联合 PDF 方法对中央射流为氢气氮气混合气在可控活化热氛围中的燃烧

收稿日期:2006-04-29.

基金项目:“973”国家重点基础研究发展计划项目(2001CB209201);国家自然科学基金资助项目(50676055).

作者简介:冯威(1979-),女,博士研究生.研究方向:发动机燃烧优化. E-mail: fengweiava@sjtu.edu.cn

通讯联系人:李理光(1962-),男,教授,博士生导师.研究方向:内燃机燃烧与排放控制,代用燃料.

E-mail: liguang@mail.tongji.edu.cn

现象进行了数值模拟^[6]。

国内的上海交通大学设计开发了新型的可控活化热氛围燃烧器,利用该燃烧器所提供的 700 K~1500 K 的热氛围,可以研究均质气体燃料混合气和均质液体燃料混合气的自燃着火规律和影响其稳定燃烧的主要因素,进而为实际发动机的均质压燃的控制提供理论依据^[7-10]。

作者通过仿真计算对可控活化热氛围燃烧器在不同条件下的热氛围温度场进行了研究,找出了燃烧器正常工作的极限范围,并将模拟结果与文献[10]的实验结果进行了对比。

1 模型及其理论基础

作者应用商业流体软件 Star-CD 对温度场进行模拟。采用有限体积法对燃烧器上方取无限大空间建模,四周采用压力边界,设中央射流和协流两个入口边界,上方为出口边界。燃烧器正上方 150 mm 内为关心的区域,网格较密,粗化其他部分以减少运算时间。图 1 为计算网格模型。

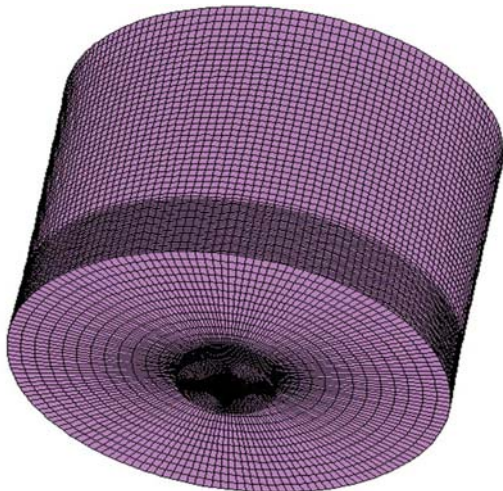


图 1 计算网格模型

Fig. 1 The meshed model of simulation

采用 $k-\epsilon$ 高雷诺数方程:

$$k = 1.5(vI)^2$$
$$\epsilon = C_{\mu}^{0.75} (k^{1.5}/l)$$

式中: v 为入口速度; I 为湍流强度; C 取 0.09; k 为湍流动能; l 为湍流混合长度,比进口高度小一个数量级; ϵ 为脉动能耗散率。

2 模型的验证

协流采用当量比为 0.3 的氢气/空气预混合气燃烧产物,其平均温度约为 1190 K;中央射流采用流速 150 m/s 的空气。在此条件下对燃烧器

进行计算,并将计算结果与试验结果进行对比。其中试验结果取自文献[10]。图 2 为不同高度径向温度变化的试验结果与计算结果的对比图。其中点线为试验结果,虚线为计算结果。

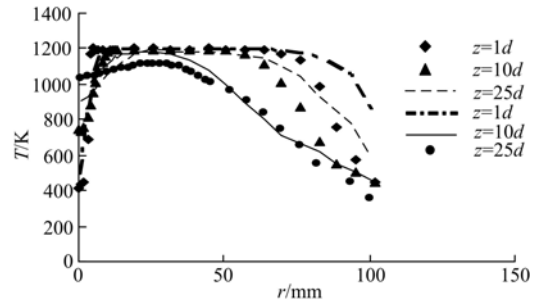


图 2 试验结果与计算结果对比

Fig. 2 The comparison of experimental data and simulation data

从图中可以看出,试验与计算结果吻合良好,尤其在 $z = 25d$ 处吻合最好。在 $z = 1d$ 和 $z = 10d$ 处,计算结果的温度稳定范围比实验结果要大。这是因为计算中无法考虑所有的热量损失,这样的结果是合理的,也是可以接受的。所以,可认为模型是正确的。

3 计算结果及分析

3.1 中央射流速度对温度场的影响

可控活化热氛围燃烧器的燃烧盘可以在其上方产生比较均匀的温度场。图 3 是无中央喷嘴的时候,通入当量比为 0.2 的氢气/空气预混合气,速度为 0.88 m/s 时的温度场云图。可见,这时在燃烧盘上方存在均匀的梯形温度场。当中央喷嘴喷出气体时,温度场云图上出现了明显的收口,如图 4 所示。可见,中央射流对温度场会产生一定程度的影响。

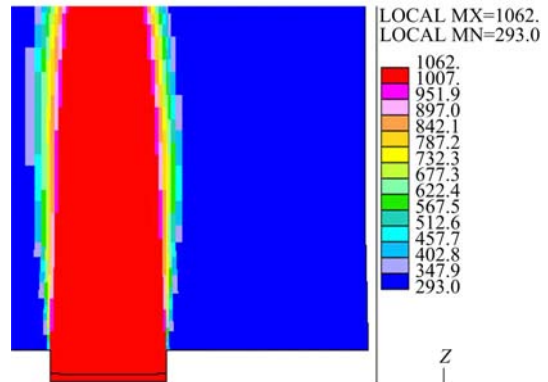


图 3 热氛围的温度场

Fig. 3 The temperature field of the co-flow

本小节分析了燃烧盘前通入当量比为 0.3 的氢气/空气预混合气,即协流温度为 1190 K 时,中央射流的速度对燃烧器温度场的影响。

图 4 中红色区域温度为 1126~1190 °C,可以认为这一区域是温度稳定区域,其顶点距喷嘴口 115 mm,可以认为在此条件下,热氛围在从喷嘴

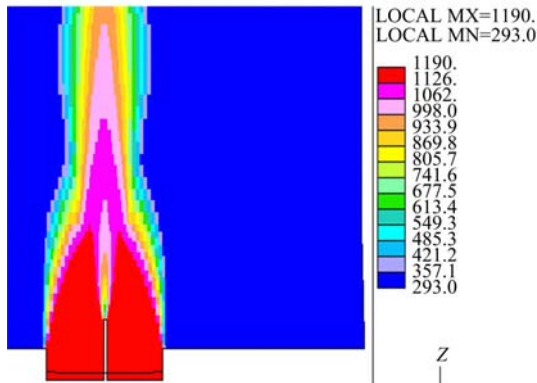


图 4 中央射流速度为 150m/s 时的温度场
Fig. 4 The temperature field when the velocity of the central jet is 150m/s

口至其下游 115 mm 处均为稳定区域。定义从喷嘴口位置到红色区域最高位置为稳定区域高度,而内侧最高点到轴线的距离为稳定区域内部宽度。下文图中实线表示稳定区域高度曲线,虚线表示内部宽度曲线。

图 5 表示的是稳定区域高度与内部宽度随中央射流流速的变化情况。可以看到稳定区域的高度及内部宽度都随中央射流速度的增大而减小,稳定区域范围变小。当中央射流流速增加到 250 m/s 时,温度场只能在距喷嘴口 65 mm 的范围内保持稳定。这是因为,中央射流的速度越大,单位时间进入协流区的冷空气相对越多,对稳定区域的扰动也越大。相互作用后,减少了协流的热量,即整体热通量降低。

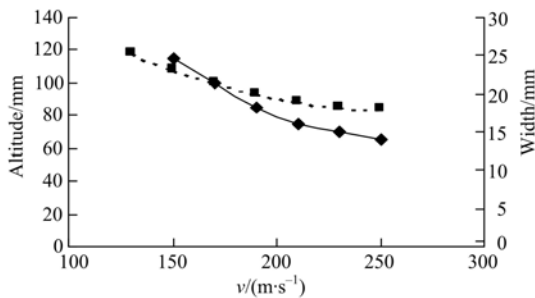


图 5 中央射流流速的变化对温度场稳定区域的影响
Fig. 5 The influence of the central jet velocity on the temperature field

3.2 协流温度对温度场的影响

中央射流的速度保持在 210 m/s 不变,协流温度的变化对温度场产生一定影响。从图 6 可以看出,当协流温度在 990~1390 K 内时,温度场稳定区域(温度靠近协流温度的区域)高度保持在 80 mm 不变。而当协流温度在 400~790 K 时,温度场稳定区域的高度保持在 85 mm 内。在协流温度在 400~1390 K 内时,稳定区域内部宽度一直保持在 20 mm 不变。可见,协流温度的变化对温度场稳定区域影响不大。协流温度越低,也就是越靠近中央射流温度时,温度场稳定区域范围会略有上升,但总体受协流温度变化影响不大。协流温度是由协流混合物的氢氧比率决定的,所以氢氧比率的降低只是降低了稳定区域的温度,不会影响到温度场稳定区域的范围。

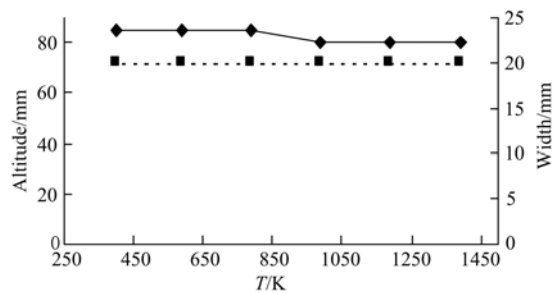


图 6 协流温度的变化对温度场稳定区域的影响
Fig. 6 The influence of the co-flow temperature on the temperature field

当协流温度低到与中央射流速度非常接近时,稳定区域范围大大增加。图 7 是协流温度为 300 K 时的温度场截面图。不同颜色表示的温差仅为 1.1 K。表明此时温度场区域非常广。图 8 是协流温度与中央射流温度相同时的温度场截面图。不同颜色表示的温差仅为 0.3 或 0.4 K。从

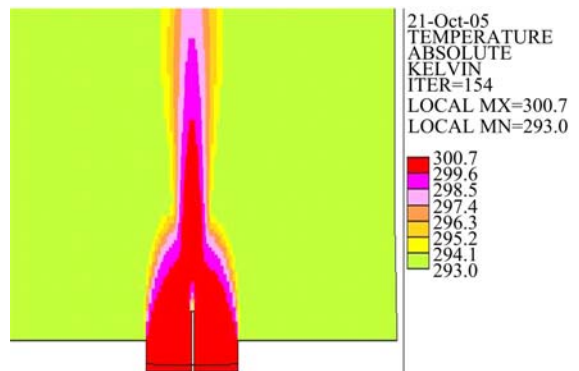


图 7 协流温度为 300 K 时的温度场截面图
Fig. 7 The section contour of temperature field as the co-flow temperature on 300 K

图 8 中可以看出,中央射流喷出时受喷嘴口摩擦的作用,温度会略有升高。

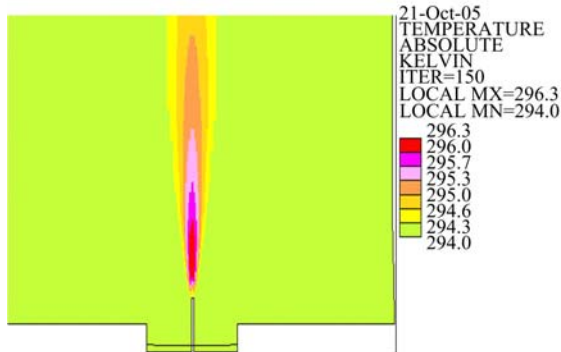


图 8 协流温度为 294 K 时的温度场截面图

Fig. 8 The section contour of temperature field as the co-flow temperature on 294 K

3.3 协流速度对温度场的影响

中央射流速度保持在 150 m/s,协流温度为 1190 K。从图 9 中可以看出,降低协流速度会使温度场的温度区域高度及内部宽度同时降低,整个范围变小。当协流速度降到 0.6 m/s 时,稳定区域高度降至 40 mm,宽度降至 14.3 mm。

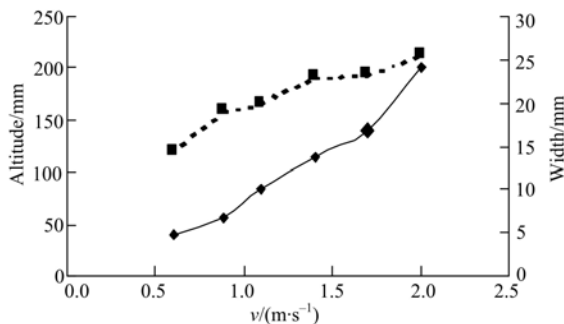


图 9 协流速度对温度场的影响

Fig. 9 The influence of the co-flow velocity on the temperature field

这是因为,其他条件不变,相同的中央射流冷空气量,协流速度越低进入热氛围中的热量就相对越低,即热通量越低。从而导致稳定区域范围更小。另外,协流速度越低,中央射流与协流的相对速度差值越大,产生的扰动越大,热氛围稳定区域受到的影响越大,范围也就越小。

3.4 各个因素综合影响

协流速度的加快会使温度场稳定区域扩大,而中央射流的速度加快却会使稳定区域的范围缩小。由于射流扩散火焰的起升高度与射流出口速度成线性关系,而与喷嘴直径等因素无关^[11],也就是加快中央射流速度会使自燃点位置增高,这样就需要更大的稳定区域范围。这时,协流的速

度不能太小,也就是二者不能同时减小。

由于协流温度对温度场稳定区域高度影响不大,这里分析了射流速度和协流速度对温度场共同作用的回归拟合曲面及方程。图 10 和图 11 是

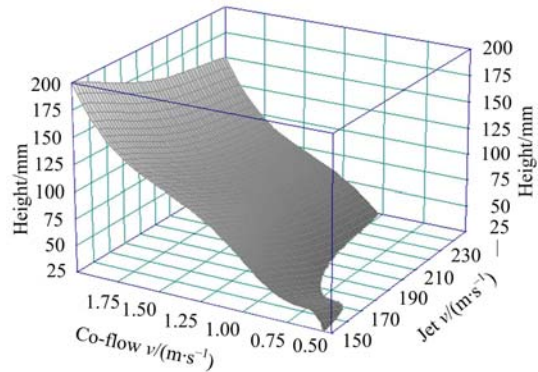


图 10 各因素对温度场稳定区域高度影响的回归拟合曲面

Fig. 10 The regression surface of the influence of different factors on the height of the uniform temperature field

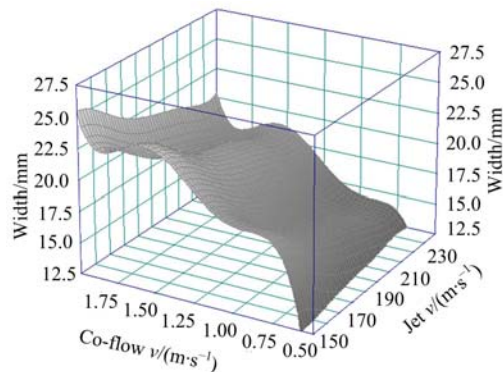


图 11 各因素对温度场稳定区域宽度影响的回归拟合曲面

Fig. 11 The regression surface of the influence of different factors on the width of the uniform temperature field

各因素对温度场影响的变化曲面图。式(1)和式(2)给出了回归得到的线性方程。其中自变量 x 代表中央射流速度,自变量 y 代表协流速度。 z 和 w 分别代表稳定区域的高度和宽度。

$$z(x, y) = -1645.8515 + 38.145833x - 0.30491792x^2 + 0.0010416667x^3 - 13020833 \times 10^{-6}x^4 + 142.07396\ln y + 73.633186(\ln y)^2 + 409.82847(\ln y)^3 - 32.337596(\ln y)^4 + 868.4322(\ln y)^5 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \omega(x, y) = & -3358.1857 + 80.169272x - 0.8273073x^2 + \\ & 0.0041562501x^3 - 1.0442708 \times 10^{-5}x^4 + \\ & 1.0416667 \times 10^{-8}x^5 + 1212.3116y - \\ & 2064.322y^2 + 1702.3376y^3 - \\ & 677.1794y^4 + 104.13143y^5 \end{aligned} \quad (2)$$

4 结 论

(1)增大中央射流的速度以及减小协流速度都会使温度场稳定区域范围缩小,二者不能同时发生。但温度场稳定区域受协流速度的影响相对较大,当中央喷射燃料需要一个较高的进口速度时,可以通过增加协流速度以保证燃料在希望的稳定区域内自燃。

(2)协流温度对温度场稳定区域不会产生太大影响,即改变协流混和气的氢氧比率只改变温度场稳定区域的温度值,而不会影响稳定区域的范围。当协流温度与中央射流速度接近时,只有在喷嘴口处受湍流影响,温度有所上升,稳定区域可以保持在一个很大的范围。

(3)给出了多因素共同作用时的温度区域变化方程,可以随时找到任意条件下的稳定区域范围,对实验具有一定指导意义。

参考文献:

- [1] Mastorakos E, Markides C, Wright Y M. Hydrogen autoignition in a turbulent duct flow: experiments and modelling[C] // The 12th International Conference on Fluid Flow Technologies, Budapest, Hungary, 2003.
- [2] Brown C D, Wason K A, Lyons K M. Studies on lifted jet flames in co-flow: the stabilization mechanism in the near- and far-fields[J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 1999, 62: 249-273.
- [3] Cabra R. Simultaneous raman-reyleigh-LIF measurements and numerical modeling results of a lifted H_2/N_2 turbulent jet flame in a vitiated co-flow[C] // Spring Meeting of the US Sections of the Combustion Institute, Oakland, CA, WSS/CI 2001-28 (2001).
- [4] Cabra R Hamano, Chen Y, Dibble J Y R, et al. Ensemble diffraction measurements of spray combustion in a novel vitiated co-flow turbulent jet flame burner[C] // Spring Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute, Golden, CO, WSS/CI 00S-47(2000).
- [5] Wu Z, Starner S H, Bilger R W. Lift-off heights of turbulent H_2/N_2 jet flames in a vitiated co-flow[C] // 2003 Australian Symposium on Combustion & the 8th Australian Flames Days, Melbourne, Australia, 2003.
- [6] Renfeng Richard Cao, Stephen B Pope, Assaad R. Masri turbulent lifted flames in a vitiated co-flow investigated using joint PDF calculations[J]. *Combustion and Flame*, 2005, 142: 438-453.
- [7] Wu Zhi-jun, Assaad R Masri, Robert W Bilger. An experimental investigation of the turbulence structure of a lifted H_2/N_2 jet flame in a vitiated co-flow flow[J]. *Turbulence and Combustion*, 2006, 76(1): 61-81.
- [8] 吴志军, 邓俊, 冯威. 可控活化热氛围下喷射燃烧自燃的研究方法[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2006, 36(1): 36-41.
- Wu Zhi-jun, Deng Jun, Feng Wei. Research method for autoignition of fuel jet in controllable active thermo-atmosphere[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2006, 36(1): 36-41.
- [9] 邓俊, 吴志军, 李理光. 可控活化热氛围燃烧实验系统的研发[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2007, 37(2): 307-312.
- Deng Jun, Wu Zhi-jun, Li Li-guang. Development of experimental system of novel controllable active thermo-atmosphere combustor[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2007, 37(2): 307-312.
- [10] Wu Zhi-jun, Deng Jun, Li Li-guang. Study on characteristics of controllable active thermo-atmosphere of a vitiated co-flow combustor[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(7): 704-707.
- [11] Norbert Peters. *Turbulent Combustion*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 1-5.