

文章编号: 1000-8055 (2009) 12-2666-05

火焰射流在横向气流中喷射特性的试验

高 伟, 林宇震, 张 弛

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院

航空发动机气动热力科技重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 研究了火焰射流垂直喷射到横向气流中的喷射特性. 试验在常温常压下进行, 研究了横向主流和射流流动参数对火焰射流穿透深度和温度特性的影响规律, 得到了火焰射流温度分布随主流速度的变化规律及射流透入深度与动量比之间的经验关系式. 研究表明, 沿着射流轨迹方向射流温度逐渐降低, 射流边界变宽. 火焰射流的穿透深度随动量比的增大而增大. 在相同的动量比下, 火焰射流的穿透深度比常温射流的穿透深度大.

关 键 词: 火焰射流; 横向主流; 穿透特性; 温度特性

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Experimental study of the characteristics of flame jet in crossflow

GAO Wei, LIN Yuzhen, ZHANG Chi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engines,
School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics,
Beijing 100191, China)

Abstract: The characteristics of flame jet into crossflow were experimentally investigated. The influences of the parameters of jet and main flow on jet penetration depth and temperature characteristics were studied under atmospheric pressure and temperature. The temperature field of jet flame and an expression of jet penetration depth were attained. Results show that the temperature of the flame jet decreases and boundary of the jet is widened along the jet trajectory. The penetration depth of jet flame increases with increasing ratio of jet and main flow's momentum. And, the penetration depth of jet flame was larger than cool jet under the same ratio of momentum.

Key words: flame jet; crossflow; penetration characteristics;
temperature characteristics

火炬点火方式应用于航空发动机上有利于发动机的高空再点火, 应用在碳氢燃料超燃冲压发动机中, 不会引起燃烧室的压力波动^[1]; 另外, 其在火箭发动机上也有相当广泛的应用^[2]. 由于火炬点火方式在航空航天方面的广泛应用, 有必要对其性能进行深入的研究. 影响火炬点火性能的主要参数是点火器出口高温燃气在主流中的穿透深度特性和温度分布特性. 通常火炬点火器的火焰射流方向和燃烧室的主流方向是垂直的, 所以对火炬点火特性的研究实质上就成为对火焰射流在横向主流中的穿透特性的研究. 本文对火焰射流垂直喷射入横向主流中的射流轨迹和温度分布

收稿日期: 2008-11-18; 修订日期: 2009-02-11

作者简介: 高伟 (1981 -), 男, 陕西汉中, 博士生, 主要从事航空发动机燃烧方面的研究.

特性进行了试验研究。

国内外许多的学者对横向气流中的射流喷射特性进行了大量的研究,得出了许多有实用价值的结论。金如山等^[3]对垂直射流喷射到横向气流中的穿透特性做了深入的研究,得到了射流与主流在广泛动量比范围内的射流在主流中的穿透深度和射流轨迹。王海军等^[4]对热射流与主流速度比在 0.01~1.5 情况下的垂直射流在横向主流近壁区的温度变化情况进行了试验研究。J. Tso^[5]等对亚声速的热射流垂直喷射进入横向亚声速主流中做了数值模拟,得到了射流的速度场及温度场分布。以上研究者均对垂直射流在横向主流中的穿透特性做了研究,但射流与主流的温差较小,而且均不是火焰射流,未考虑到射流与主流的大密度差可能对射流喷射特性产生的影响。I. G. Boxx^[6], Ahsan R. Choudhuri^[7]等对气态燃料火焰射流在横向主流中的特性做了研究,其主要集中在浮升力对火焰射流的形状和射流结构的影响,而未关注射流在主流中的射流轨迹特性。

大量针对垂直射流喷射到横向主流中的研究结果表明,射流在主流的冲击下会形成一对对称的涡,该对涡具有一对称面,对射流特性的研究大多是针对该对称面上各流动参数^[3,5,8]。射流与主流相撞会产生湍流,其只会影响射流特性参数在该对称面上的变化规律,却不能改变该对称面在空间中的位置^[3,8]。本文对火焰射流在横向主流中的喷射特性进行的试验研究也是针对射流对称面的,得到了火焰射流的温度分布特性及射流轨迹与流动参数之间的关系,并将其穿透深度特性与常温射流的穿透特性进行了对比。

1 试验系统

影响单股垂直射流喷射特性的因素主要包括两个方面:射流孔的形状和尺寸^[3];射流和主流的物理参数和流动参数^[3]。本文主要研究射流及主流的流动参数对射流喷射特性的影响规律。

试验在常温常压下进行,试验系统如图 1 所示。试验段分主流腔和环腔,主流和环腔分别供气。火焰射流发生器位于环腔中,环腔的空气进入火焰射流发生器的预燃室与燃油混合后点燃,火焰射流从火焰射流发生器的喷口喷入主流腔。主流腔两侧开有观察窗,用照相机和热像仪测量火焰射流在主流中的穿透深度和温度分布特性。火焰射流发生器喷口处布置一精密热电偶,测量此

处温度用以标定热像仪测量值。主流腔的流速可通过置于主流腔进口处的水排测得压差计算得出。火焰射流发生器喷口处射流的流速及密度通过测量该处温度及环腔的流量计算得到。

主流腔和环腔是两个矩形通道,它们之间用隔板隔开。火焰射流发生器的喷口尺寸是固定的,直径为 8 mm,喷口的长径比为 3.0。主流腔横截面尺寸为 80 mm × 80 mm。试验段如图 2 所示。

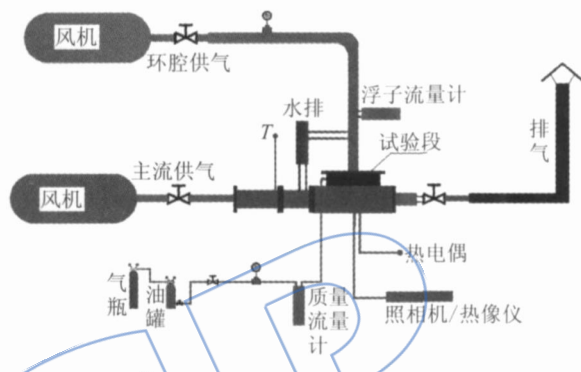


图 1 试验系统图

Fig. 1 Test rig system

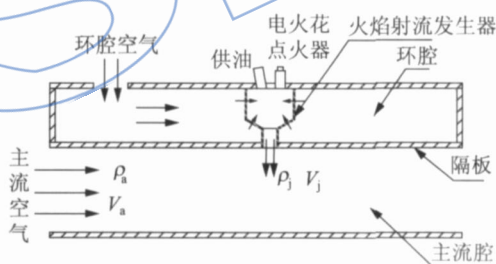


图 2 试验段结构图

Fig. 2 Flame jet penetration test rig

试验中采用 ThermaCAM P60 型红外热像仪对火焰射流的温度场进行非接触式测量,用精密热电偶对其进行温度修正,测温误差范围为 $\pm 2\%$ 。红外热像仪距离试验段观察窗的距离为 500 mm,用其对每一工况拍多张照片,用图像处理软件读出温度场数据,通过程序处理可得到射流温度场的分布及温度中心轨迹线。

以下的图表中, x 为自射流出口下游的距离, y 为射流温度中心轨迹透入深度, L 为射流轨迹方向的长度, d_j 为火焰射流发生器喷口的直径, J 为无量纲参数动量比 $\frac{\rho_j u_j^2}{\rho_a u_a^2}$ 。下标 j 表示射流参数,下标 a 表示主流的参数。本试验中,射流与主流的流动参数如表 1 所示,其中火焰射流的参数均指火焰射流发生器喷口处的参数。

表 1 试验中射流与主流的流动参数
Table1 Operation condition range

	p/MPa	T/K	$V_a/(\text{m/s})$	$J=\left(\frac{\rho_a u_j^2}{\rho_a u_a^2}\right)$
主流	0.1	288	20~50	1~11
火焰射流	0.1	1200	80~160	

2 试验结果及分析

2.1 火焰射流的温度特性

温度特性是指射流在空间中的温度分布特征.影响温度特性的因素有主流的流动参数,火焰射流的流动参数及火焰射流的初始温度等.本文主要研究主流速度对火焰射流温度分布特性的影响规律.

图 3 给出了火焰射流在主流中的温度分布图.高温的火焰射流从火焰射流发生器喷口喷出后,与主流发生强烈的热量及动量交换,部分热量被主流带走,沿着射流的轨迹方向温度不断降低直到和主流完全融合.射流附近的主流空气与射流的边缘快速掺混融合后温度升高,形成射流的新边界,使得射流沿着轨迹方向的边界逐渐变宽.从图中可以看出,随着主流速度的增加,火焰射流的高温区逐渐向主流方向偏转,射流的高温区在深度方向上变短.

图 4 给出了火焰射流温度中心线上温度沿射流温度中心线轨迹的变化规律.火焰射流温度中心线是指沿着火焰射流的任一横截面上温度最高点的连线.射流的温度沿着温度中心线轨迹逐渐降低,与温度中心线轨迹的长度几乎成线性关系.在相同的火焰射流喷射参数下,主流速度对火焰射流温度沿射流温度中心线轨迹的变化规律基本没有影响.

2.2 火焰射流的穿透特性

由于试验中采用热像仪测量火焰射流的温度场,所以文中以射流温度中心线轨迹作为穿透深度的定义.

图 5 是火焰射流温度中心线在主流中的轨迹.在相同的主流速度下,改变火焰射流的喷射速度得到不同的射流穿透深度曲线,曲线的横坐标和纵坐标是无量纲的位置坐标.如图 5,随着火焰射流流速的增加,射流的穿透深度增大.因为火焰

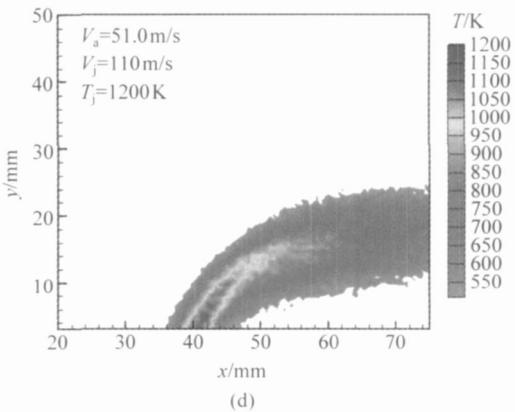
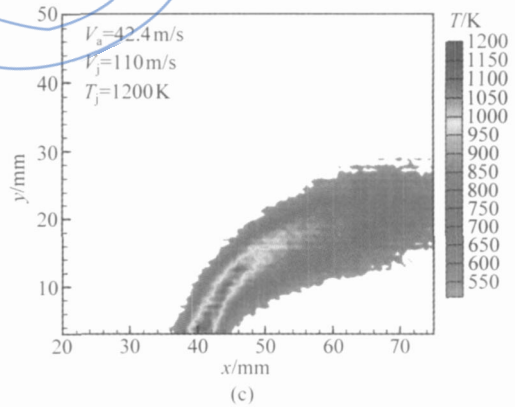
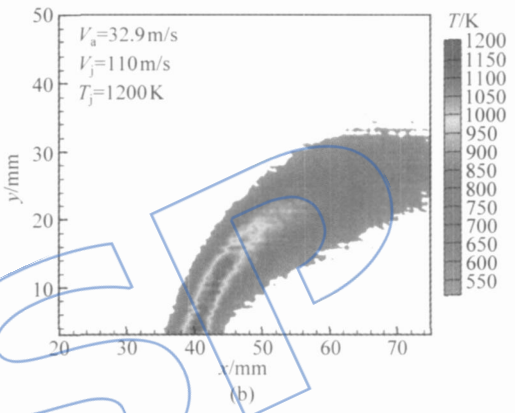
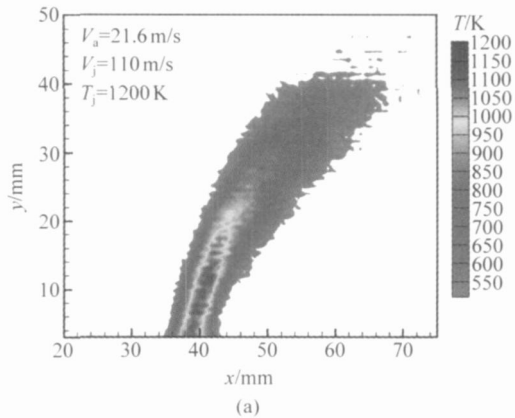


图 3 火焰射流温度分布图
Fig.3 Temperature distribution of jet flame

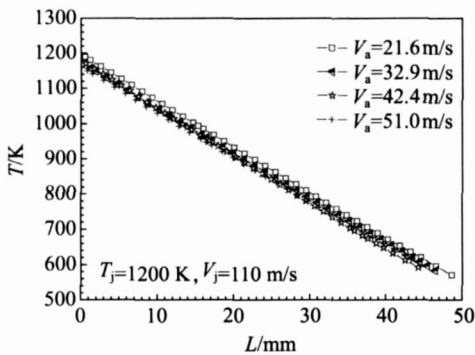


图 4 火焰射流温度沿射流轨迹的变化趋势
Fig. 4 Temperature distribution of the jet flame trajectory

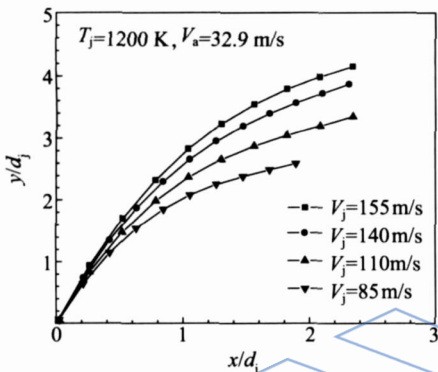


图 5 火焰射流速度对穿透深度的影响
Fig. 5 Influence of jet flame velocity on jet penetration

射流的温度不变,则密度不变,而其流速增加直接导致了其流量和动量的增加,增强了射流的刚性和对主流的冲击力,使得其在主流中的穿透深度增大。

保持火焰射流的流速不变,改变主流流速则射流穿透深度的变化规律如图 6 所示。从图中可以看出,随着主流速度的增加,火焰射流的穿透深度是减小的。增大主流流速,则主流作用于火焰射流的气动力增大,对火焰射流的冲击更强烈,射流的折转程度也更明显,导致其在垂直于主流方向上的穿透深度减小。

对上述试验数据进行归纳分析,本文将单孔火焰射流垂直喷射入横向主流的穿透深度拟合成与流动参数和射流孔尺寸相关的经验关系式。

$$\frac{y}{d_j} = 1.575 \left(\frac{\rho_j V_j^2}{\rho_a V_a^2} \right)^{0.327} \left(\frac{x}{d_j} \right)^{0.57} \left(1 \leq J \leq 11, 0 \leq \frac{x}{d_j} \leq 3 \right)$$

拟合公式的计算结果与本研究试验结果的对

比如图 7 所示。从图中可以看到,试验数据与公式计算数据误差均不超过 10%,两者吻合的较好。

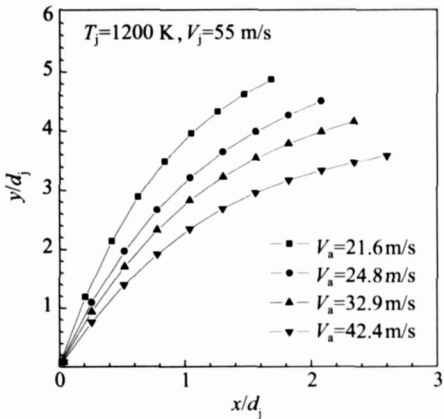


图 6 主流速度对穿透深度的影响
Fig. 6 Influence of main flow velocity on jet penetration

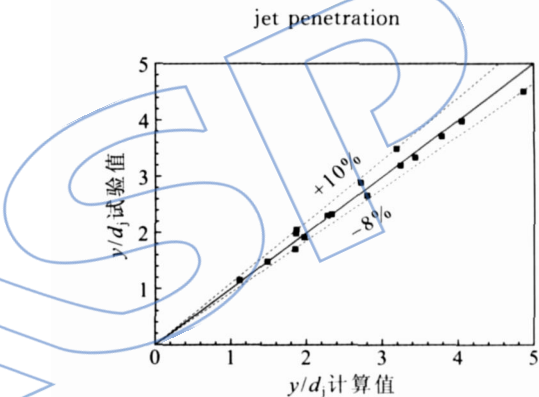


图 7 透入深度计算值与试验值的比较
Fig. 7 Comparison of jet flame penetration data between the computational and experimental results

由于本文与文献[3]均采用射流的温度中心线轨迹作为射流穿透深度的定义,将本文的火焰射流的穿透深度数据与文献[3]中常温射流的穿透数据进行比较,结果如图 8 所示。在本试验的动

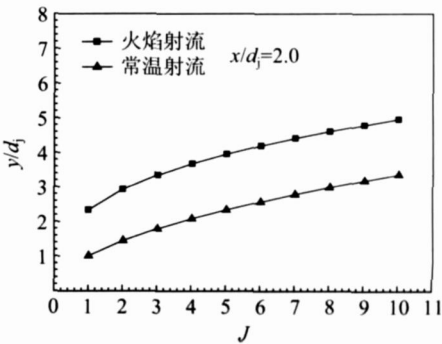


图 8 火焰射流与常温射流穿透深度的比较
Fig. 8 Comparison of penetration data between jet flame and cool jet

量比范围内,火焰射流的穿透深度大于相同动量比下常温射流的穿透深度.

3 结 论

本文对火焰射流在横向主流中的穿透特性和温度特性进行了试验研究,得到以下结论:

1) 沿着射流轨迹方向射流温度逐渐降低,射流边界变宽.在试验的研究参数范围内,主流速度对火焰射流温度沿射流轨迹的变化规律基本没有影响.

2) 火焰射流的速度增大,其在主流中的穿透深度增大;主流流速增大,火焰射流在主流中的穿透深度减小.

3) 对试验数据进行拟合得到了火焰射流穿透深度与动量比的经验关系式

$$\frac{y}{d_j} = 1.575 \left(\frac{\rho_j V_j^2}{\rho_a V_a^2} \right)^{0.327} \left(\frac{x}{d_j} \right)^{0.57} \left(1 \leq J \leq 11, 0 \leq \frac{x}{d_j} \leq 3 \right)$$

4) 在本试验的动量比范围及 $\frac{x}{d_j}$ 范围内,在相同的动量比下及 $\frac{x}{d_j}$ 下,火焰射流的穿透深度大于常温射流的穿透深度.

参考文献:

- [1] 丁猛,余勇,梁剑寒,等. 碳氢燃料超燃冲压发动机点火技术试验[J]. 推进技术, 2004, 25(6): 566-569.
DING Meng, YU Yong, LIANG Jianhan, et al. Experimental investigation of ignition technology in liquid hydrocarbon fueled scramjet combustor [J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(6): 566-569. (in Chinese)
- [2] 萨顿 G P, 比布拉兹 O. 火箭发动机基础[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 金如山. 燃烧室掺混空气射流透入深度的经验公式[R]. 北京: 北京航空学院科学研究报告, 1975.
- [4] 王海军, 卢冬华, 罗敏珊, 等. 热横向射流近壁区的温度变化研究[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(5): 459-462.
WANG Haijun, LU Donghua, LUO Minshan, et al. Study on near wall temperature variation of heated jet in crossflow [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(5): 459-462. (in Chinese)
- [5] Tso J, Margason R J. Developing region of a hot jet in a crossflow [R]. AIAA 96-0025.
- [6] Boxx I G, Idicheria C A, Clemens N T. An exploratory study of the effects of buoyancy on turbulent nonpremixed ethylene jet flames in crossflow [R]. AIAA 2003-1151.
- [7] Choudhuri A R, Gollahalli S R. Ambient pressure effects on the near burner structure of gas jet flames in crossflow [R]. AIAA-99-2787.
- [8] Lefebvre A H. Gas turbine combustor [M]. Philadelphia, USA: Taylor & Francis, 1998.