

掺混孔位置及排布对火焰筒流场影响研究

李彩云 张卓娅 罗 谦 陈长国

中国航空发动机集团有限公司湖南动力机械研究所 湖南 株洲 412002

摘 要: 为研究掺混孔位置及排布对火焰筒内流场的影响,采用PIV测试技术进行了不同火焰筒掺混孔轴向位置及排布方式下的流场测试,并对测试结果进行了分析。结果表明:双排掺混孔方案的整体射流基本对称,回流区的流场形态基本一致,均可在主燃区内形成饱满的回流区;随着掺混孔位置后移,火焰筒内环对流场的截断作用先减弱后增强,回流区的涡旋结构也呈现先减弱后增强的趋势;单排掺混孔方案的大孔射流差异较大,掺混孔的射流呈不对称分布,掺混射流显著偏向主流方向,而内环射流更加靠近头部。

关键词: 火焰筒;掺混孔;位置;排布;回流区;流场

1 引言

航空发动机燃烧室的火焰筒是高温高压燃气生成的关键部件,其内部流场特性直接影响燃烧效率、排放性能及壁面冷却效果。掺混孔作为火焰筒的重要结构,其位置、尺寸和排列方式对燃烧室内流场结构、温度分布及污染物排放具有决定性影响。国内外学者通过实验、数值模拟和理论分析等方法,对掺混孔位置优化及其对流场的影响进行了广泛研究。

李志强^[1]等人采用大涡模拟(LES)研究了不同掺混孔排布对燃烧室出口温度场的影响,发现周向非均匀分布的掺混孔可显著改善燃烧均匀性。王磊^[2]等人利用PIV(粒子图像测速)技术测量了掺混孔轴向位置变化对回流区的影响,发现掺混孔位于火焰筒中部时,可形成更稳定的回流区,增强燃烧稳定性。张靖周^[3]等人通过大涡模拟方法研究了不同轴向位置掺混孔对燃烧室出口温度场的影响,发现将掺混孔布置在火焰筒中后部(距头部约0.6~0.7倍火焰筒长度)可显著改善出口温度分布。王锁芳^[4]等人采用PIV实验技术测量了不同轴向间距掺混孔的流场结构,结果表明当两排掺混孔间距为3~4倍孔径时,流场掺混效果最佳。

Lefebvre^[5]等人通过全环燃烧室实验发现,掺混孔位置变化会显著改变出口温度分布,并提出基于流量系数的优化准则,使燃烧室寿命提高约10%。Mongia^[6]等人采用LES方法研究了掺混孔射流与主流的相互作用,发现掺混孔位于旋流器下游1.5倍直径处时掺混效果最佳,可减少NO_x排放约8%。Schulz^[7]等人利用TR-PIV技术捕捉了不同掺混孔布局下的瞬态流场,发现掺混孔位置影响涡结构的演化,合理的布置可增强湍流掺混,提高燃烧效率。

本文采用PIV测试技术对火焰筒掺混孔位置及排布对

回流区流场影响进行测试分析,为工程应用提供技术和理论参考。

2 研究对象和试验方法

研究对象

本文研究的流场试验件如图1所示,其火焰筒头部结构不变,仅改变筒体组件中火焰筒外环和火焰筒内环的掺混孔轴向位置和排布方式,实现不同掺混孔设计。共设计了5组不同掺混孔方案的火焰筒,其中掺混孔距导流板的轴向距离为 L ,火焰筒外环掺混孔直径为 D ,火焰筒内环掺混孔直径为 d ,不同方案试验件的详细参数见表1。

图像速度场仪(PIV)测试系统由光源系统、图像采集系统、位移机构、同步控制及图像处理软件等组成。按图1所示录取X1、Y1、Y2截面的燃烧室单头部冷态流场。

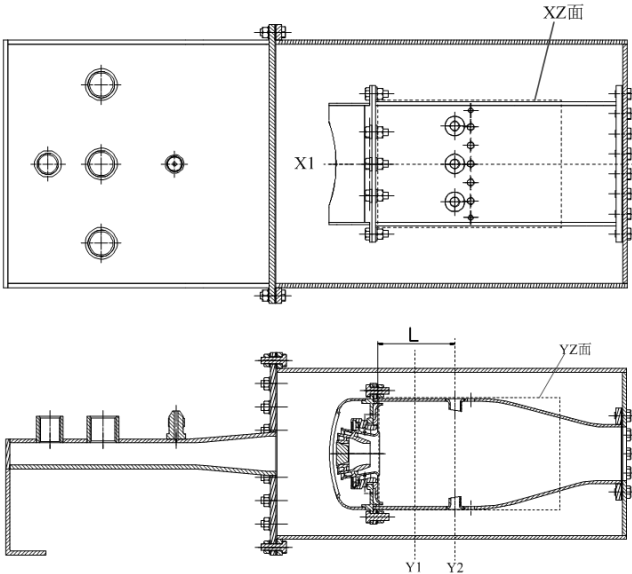


图1 试验件及测量截面示意图

表1 试验工况

Case	火焰筒状态
1	两排掺混孔, 第一排为掺混斗, L
2	两排掺混孔, 第一排为掺混斗, $0.86L$
3	两排掺混孔间距, 第一排为掺混斗, $1.14L$
4	单排掺混孔 (内外环3孔均布 $D/d = 1.1$), $1.09L$
5	单排掺混孔 (内外环孔径均为一大四小, $D/d = 1.1$), $1.09L$

3 结果与讨论

3.1 掺混孔位置的影响

图2为不同掺混孔轴向距离 L 下火焰筒内回流区流场图, 由图可知, 双排掺混孔方案的整体射流基本对称, 回流区的流场形态基本一致, 均可在主燃区内形成饱满的回流区; 双排掺混孔方案的大孔射流基本对称, 回流区的流场形态基本一致, 均始于涡流器出口, 终于大掺

混孔截断处。随着掺混孔位置后移, 火焰筒内环对流场的截断作用先减弱后增强, 回流区的涡旋结构也呈现先减弱后增强的趋势。这是因为火焰筒头部结构不变, 故由涡流器形成的气体速度空间滞止区相同, 而掺混孔引入的空气以高速射流形式穿透火焰筒内气流, 通过剪切作用产生强烈湍流混合, 从而实现流体间的动量与能量交换。当掺混孔轴向位置靠前时 ($0.86L$), 高速射流位置在滞止区中后部, 此时流体间的动量交换更为剧烈, 导致回流区整体偏小; 随着掺混孔轴向位置后移, 高速射流位置逐渐移动到滞止区边界 (L) 和滞止区后 ($1.14L$)。当射流位置为滞止区边界时, 射流与主流气体自然混合往下游流动, 在PIV流场中显示为掺混孔射流截断作用减弱; 当射流位置为滞止区后时, 射流截断主流气体, PIV流场中显示出明显的动量交换。

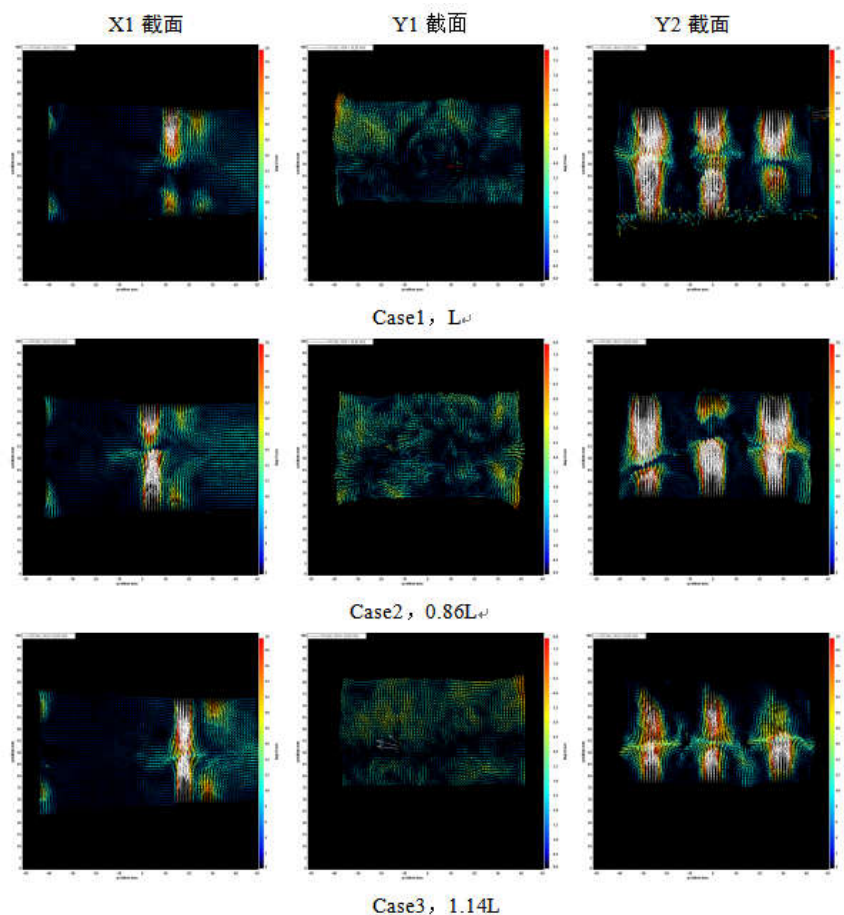


图2 不同掺混孔轴向位置下火焰筒内流场

3.2 掺混孔排布的影响

图3不同掺混孔排布方式下的火焰筒回流区流场图, 由图可知, 与case1-case3相比, 单排掺混孔设计方式火

焰筒内大孔射流呈不对称性。Case4外环射流出现尾迹涡, 内环射流更加靠近头部。这是因为单排掺混孔设计下的掺混射流强度较大, 内外环射流掺混, 剪切作用增

强，导致破碎的小涡旋结构随主流向后移动。case5的内环射流强度差异较大，内环射流强度显著大于外环掺混孔，这是因为火焰筒内环掺混孔孔径较小，根据质量守恒和伯努利原理，小孔因流通面积小，在相同压差下，射

流出口速度更高；一大四小的掺混孔设计导致内环小孔射流剪切层不稳定，并与主流快速掺混；外环大孔射流速度低，易被主流偏转，掺混范围广，但强度弱。

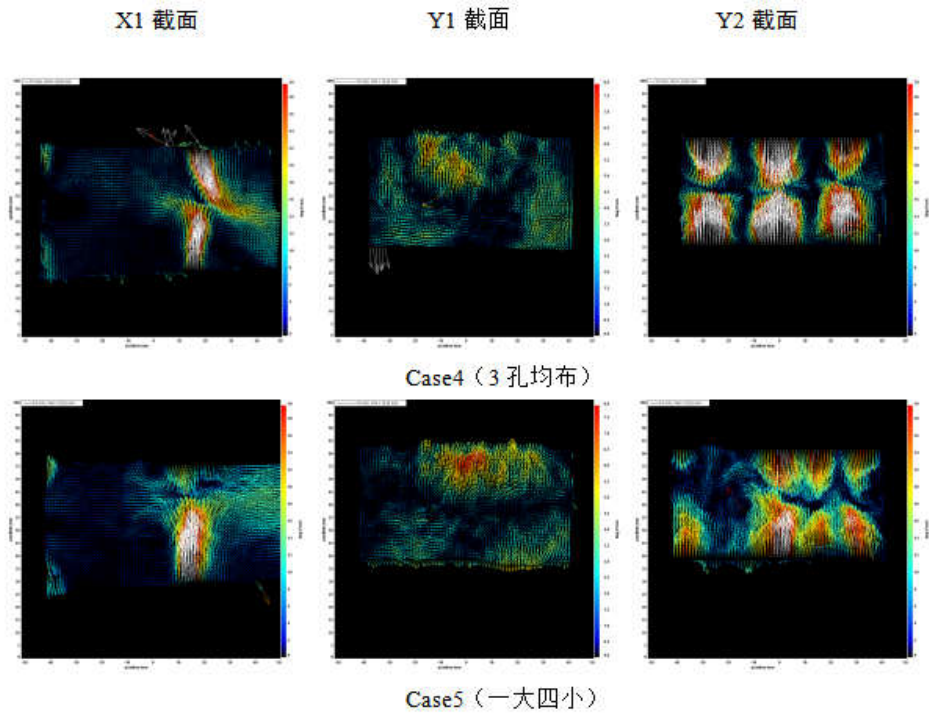


图3 不同掺混孔排布下火焰筒内流场

4 结论

本文采用PIV测试技术研究了火焰筒掺混孔轴向位置及排布对回流区流场的影响，得到如下结论：

- (1) 双排掺混孔方案的整体射流基本对称，回流区的流场形态基本一致，均可在主燃区内形成饱满的回流区；双排掺混孔方案的大孔射流基本对称，回流区的流场形态基本一致，均始于涡流器出口，终于大掺混孔截断处；
- (2) 随着掺混孔位置后移，火焰筒内环对流场的截断作用先减弱后增强，回流区的涡旋结构也呈现先减弱后增强的趋势；
- (3) 单排掺混孔方案的大孔射流差异较大，掺混孔的射流呈不对称分布，掺混射流显著偏向主流方向，而内环射流更加靠近头部。

参考文献

[1]李志强,等.火焰筒掺混孔布局对燃烧室出口温度场

的影响[J].航空动力学报,2020..
[2]王磊,等.基于PIV的掺混孔流场特性研究[J].推进技术,2019.
[3]张靖周,等.火焰筒掺混孔轴向位置对出口温度场的影响[J].航空动力学报,2021,36(5): 1021-1030.
[4]王锁芳,等.多排掺混孔轴向间距对燃烧室流场影响实验研究[J].推进技术,2020,41(3): 567-575.
[5]Lefebvre, A.H., et al. Gas Turbine Combustion[M]. CRC Press, 2018.
[6]Mongia, H.C. Recent progress in gas turbine combustion technology[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2019.
[7]Schulz, A., et al. TR-PIV analysis of dilution jet interaction in a combustor[J]. Experiments in Fluids, 2020.