

文章编号: 1000-8055(2010)04-0794-06

单涡/贫油驻涡燃烧室的出口温度分布试验

孔祥雷, 樊未军, 邢 菲, 张荣春, 宋玄进
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 采用试验方法对单涡贫油驻涡燃烧室的出口温度分布的影响因素进行了研究, 通过分析试验数据得到如下结论: ①凹腔气量对出口温度分布影响较大. 随着凹腔气量的增加, 出口温度分布系数(OTDF)先增加后减小, 与掺混射流的穿透深度有关. ②燃油掺混温度对出口温度分布的影响也较大. 当燃油掺混温度较小时, 出口温度分布系数较低. 随着燃油掺混温度增加, 出口温度分布系数随之先增加后减小. ③燃油供油量对出口温度分布也有重要影响. 当燃油量增加时, 出口温度分布系数随之先增加后减小.

关 键 词: 驻涡; 单涡; 贫油; 凹腔供气; 出口温度分布系数

中图分类号: V231.2

文献标识码: A

Experimental study on outlet temperature distribution in single vortex/lean oil trapped vortex combustor

KONG Xiang-lei, FAN Wei-jun, XING Fei,
ZHANG Rong-chun, SONG Xu-an-jin
(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The influential factors of outlet temperature distribution in single vortex/lean oil trapped vortex combustor were studied experimentally. Some results were obtained by analyzing the experimental data: (1) Cavity gas amount has great effect on outlet temperature distribution. Outlet temperature distribution factor (OTDF) firstly increases and then decreases with the growing cavity gas amount. This is related with the penetration depth of mixing jet. (2) Fuel mixing temperature also has great effect on outlet temperature distribution. When the fuel mixing temperature is low, OTDF is low. Also, OTDF firstly increases and then decreases with the higher fuel temperature. (3) Fuel amount also has important effect on outlet temperature distribution. When fuel amount becomes larger, OTDF firstly increases and then decreases.

Key words: trapped vortex; single vortex; lean oil; cavity gas supply;
outlet temperature distribution factor (OTDF)

常规航空发动机的燃烧室中, 是利用头部旋流器产生回流区来稳定火焰. 回流区的形成产生了低速的流场并且使得燃油和气体的混合更充分, 为稳定燃烧提供了必要条件. 随着航空燃气轮机的发展, 燃烧室头部和燃油喷管的结构变得越

发复杂. 在这样的背景下, Hsu K Y 等人于 1995 年提出了驻涡燃烧室的概念^[1]. 驻涡燃烧室是一种简单、紧凑的燃烧室, 它在低费用、低排放方面都具有巨大的潜力. 其基本原理是利用凹腔形成旋流, 燃烧发生在凹腔旋流区从而点燃主流燃气,

收稿日期: 2009-03-30; 修订日期: 2009-07-28

作者简介: 孔祥雷(1985-), 男, 山东济宁人, 硕士生, 主要从事航空发动机燃烧室研究.

以达到稳定火焰的目的.

驻涡燃烧室发展较快,美国驻涡燃烧室的研究到目前为止已经到了第四代^[2-4].从最初的凹腔设置在中部到更接近实际工程应用的带有气膜冷却孔并且凹腔设置在外围的第四代驻涡燃烧室,大量研究表明驻涡燃烧室具有较好的贫油熄火极限以及良好的高空再点火能力.驻涡燃烧室有单涡和双涡两种进气形式^[3-4].单涡一般采用后体顶部进气,双涡一般采用前体顶部供油,后体中部进气.目前,对于双涡驻涡燃烧室方面的研究较多^[5-7],而对于单涡驻涡燃烧室的研究相对较少.本文针对某用于级间燃烧的单涡驻涡燃烧室的出口温度分布特性进行了试验,通过对试验结果的分析得出了出口温度分布系数(outlet temperature distribution factor,简称 OTDF)随着各种变量的变化特性.燃烧室出口温度分布系数是衡量出口温度分布好坏的重要标志.它定义为燃烧室出口界面内最高燃气总温与燃气平均总温之差与燃烧室温升的比值,即(其中 T_{t4max} 为出口截面最高温度, T_{t4} 和 T_{t3} 分别为燃烧室出、进口平均温度)

$$\lambda_{otdf} = \frac{T_{t4max} - T_{t4}}{T_{t4} - T_{t3}}.$$

1 试验系统

1.1 试验件

实验用的燃烧室凹腔结构如图 1 所示,试验件分为主流通道和凹腔两个部分.凹腔内空气由主流 A,燃油掺混气 C 以及 B, D 凹腔进气三部分组成, E 为燃烧后的掺混气.驻涡区供油方式采用蒸发管,安装于 C 处,燃油从总管引出后首先在燃烧室外与气体进行混合加热以达到初步雾化的目的,然后由蒸发管喷入凹腔,其中燃油掺混气体是由电加热器供给.提前加热的目的是增加燃油与高温气体的掺混,以达到更好的蒸发效果和油

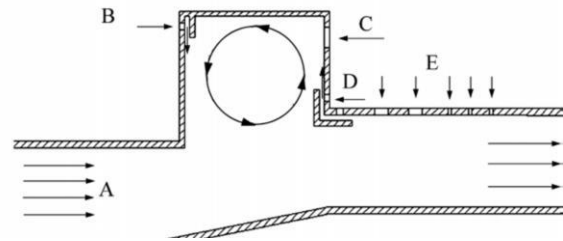


图 1 驻涡燃烧室试验件侧面图

Fig. 1 Side profile of trapped vortex combustor test piece

气混合. B 向和 D 向的凹腔进气为冲击气膜冷却,起到冷却壁面的作用. C 处的燃油掺混气与凹腔内的空气有效的混合并燃烧形成火焰区.在凹腔试验件外壳上安装点火嘴座和观察窗,用来点火和观察试验件.

1.2 试验件燃烧室总体结构

由于单涡驻涡燃烧室的相关文献和研究资料很少,设计时可参考资料较少,凹腔主要结构尺寸比例参考了二元驻涡燃烧室并进行了数值模拟计算确定了凹腔的结构尺寸,结构如图 2 所示.燃烧室总体长度尺寸为 467 mm,凹腔内径 $\phi 186$ mm,凹腔宽度 51 mm,进气圆筒内径 $\phi 110$ mm,稳定段前段外径 57 mm,排气圆筒内径 $\phi 129$ mm,稳定段后段外径 76 mm.为了便于拆卸检查,燃烧室由几个组合件用螺栓组装而成,各个组合件自身焊接成一体.燃烧室各结构材料均为 1Cr18Ni9Ti.空气由主流、凹腔供气和燃油掺混气三处通道引入,凹腔供气由外环空气单独提供,凹腔供气采用了四个接头.燃油在燃烧室外与掺混气掺混后再由蒸发管引入凹腔.凹腔内供油方式选择了蒸发管供油方式,全周共布置了 8 个蒸发管,蒸发管雾化效果较好有利于燃烧.凹腔的圆周壁面上布置了石英玻璃观察窗以及两个点火电嘴位置.在燃烧室的进口和出口分别安装了 3 个测量靶安装座用于安装温度和压力测量靶.

1.3 试验系统

试验的系统如图 3 所示,试验使用的燃料为航空煤油.燃料通过质量流量计计量流量.主流进气量使用电动阀调节,根据孔板流量计计算主流气量.凹腔进气量使用手动球阀调节,采用浮子流量计测量流量.掺混进气通过电加热器加热后进入燃烧室.

喷入凹腔的燃油通过安放在凹腔底部的点火电嘴点燃,点火电嘴的点火频率为 2~ 3 Hz,能量为 6 J.通过安装在测量安装座上的温度测量靶和压力测量靶测量温度和压力,利用接在燃烧室出口的 Testo 360 烟气分析仪对尾气进行分析.

1.4 试验方法

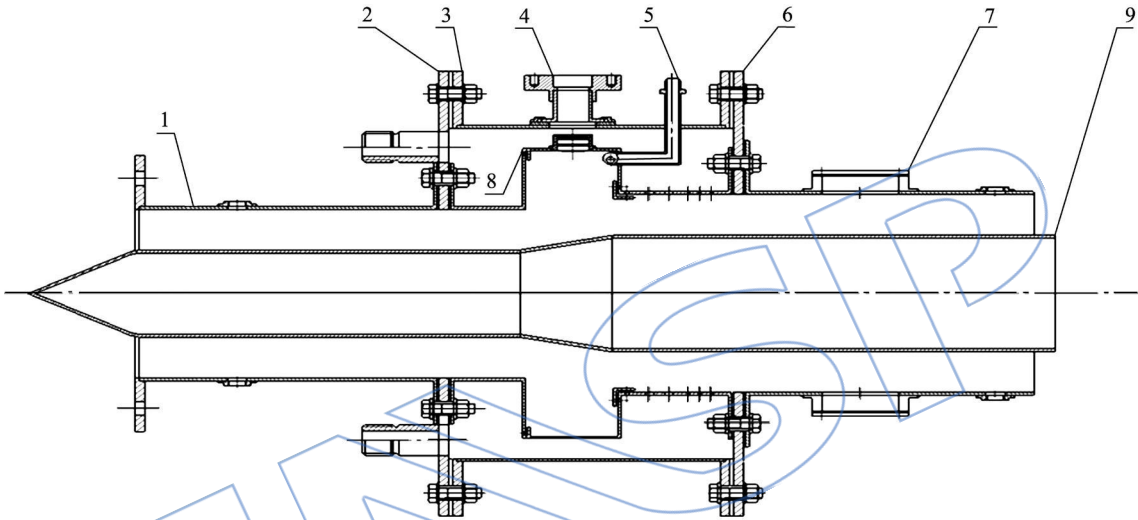
本文研究的是驻涡燃烧室的出口温度分布特性,试验中主要考虑的影响因素是燃烧室的燃油掺混气温度和主流供气量,燃油供给量.试验的具体操作过程是:主流气量 m_{main} 选定 5 个状态分别为: 687, 867, 1 164, 1 341, 1 480 g/s, 其对应的马赫数见表 1, 在某个上述固定的主流下,调整燃油掺

混温度分别为 303, 423, 573 K, 加热温度由加热器控制. 在每一个掺混温度下, 通过改变凹腔气量和燃油流量来得到不同的凹腔油气比下的燃烧室出口温度和燃烧效率. 凹腔气量 m_{cavity} 的选择点分别是 101 g/s 和 117 g/s, 燃油流量 f_{fuel} 由质量流量计控制, 相应的凹腔油气比 f_{cavity} 可由公式 $f_{cavity} = m_{fuel} / m_{cavity}$ 计算得出, 总油气比可以由公式 $f = m_{fuel} / (m_{cavity} + m_{main})$ 计算得出. 出口温度由温度测量耙得到, 测量点的径向尺寸距离圆心分别 29.8, 35.4, 41, 46.6, 52.2 mm. 位置如图 3 的 A-A 示图.

表 1 主流进气马赫数

Table 1 Mainstream inlet Mach number

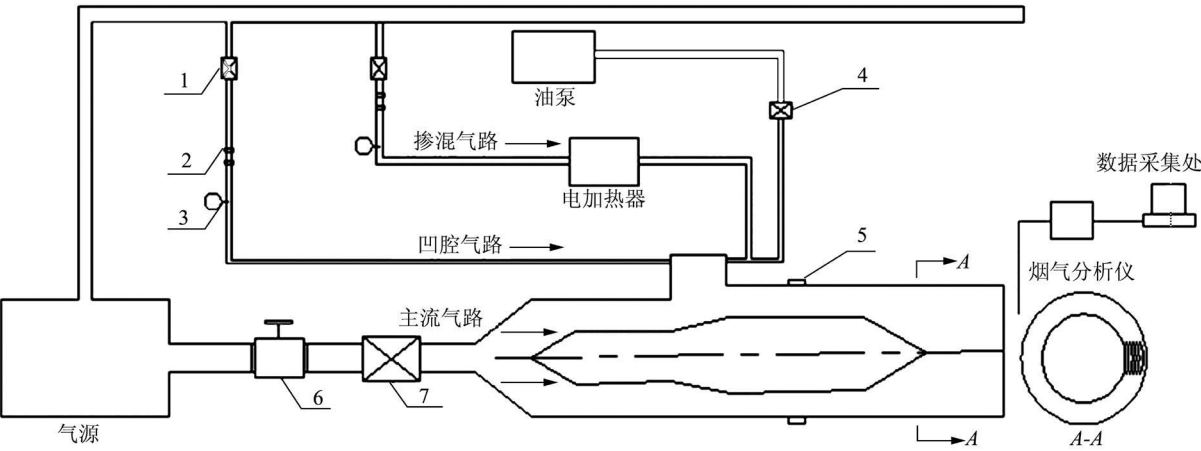
主流质量流量 $m_{main}/(g/s)$	主流马赫数 Ma_{main}
687	0.253
867	0.312
1164	0.393
1341	0.420
1480	0.437



1 主路通道组件; 2 气路通道前段组件; 3 空气通道组件; 4 点火嘴和观察窗座; 5 供油装置;
6 尾部通道组件; 7 测量耙安装座; 8 凹腔; 9 稳定段

图 2 单涡驻涡燃烧室结构图

Fig. 2 Structure diagram of the single trapped vortex combustor



1 阀门; 2 浮子流量计; 3 压力表; 4 质量流量计; 5 测量安装座; 6 电动阀; 7 孔板流量计

图 3 驻涡燃烧室试验系统图

Fig. 3 System diagram of the trapped vortex combustor

2 试验结果分析

驻涡燃烧室用于级间燃烧,而燃烧室的出口温度分布情况直接影响第一级涡轮导向叶片工作和工作叶片的寿命及可靠性,因此是燃烧室的重要性能指标之一.本文利用出口绝对温度沿径向距离的分布和出口温的分布系数(λ_{tdf})来反映该燃烧室的出口温度分布的质量.对于本实验的驻涡燃烧室而言, λ_{tdf} 值如果在 0.25~0.35 之间比较满足条件(对于中型以上发动机 λ_{tdf} 的值通常在 0.25~0.35 之间).

λ_{tdf} 由公式 $\lambda_{tdf} = \frac{T_{4max} - T_{t4}}{T_{t4} - T_{t3}}$ 计算,其中 T_{4max} 为温度场中最高温度; T_{t4} 为燃烧室出口平均温度; T_{t3} 为燃烧室平均进口温度.

2.1 凹腔气量对出口温度分布的影响

在主流流量 687 g/s 状态下,选定供油量为 3.4 g/s 并保持不变,在燃油温度为 423 K 和 573 K 下分析出口温度分布与凹腔气量的变化关系,所得变化关系如图 4 所示.从图中可以看出两种温度状态下,凹腔气量对出口温度分布的影响大致相同.即随着凹腔气量的增加,出口温度分布系数先增加后减小.主要原因是:当凹腔气量增加时,进入凹腔掺混段的掺混气量增加,从而导致掺混段的壁面冷却效果变好,靠近壁面附近的燃气温度相对较低,与出口中心流的气流温度有较大的温差,导致出口温度场变坏,出口温度分布系数增高.继续增加凹腔气量时,进入掺混段的掺混气量继续增加.掺混射流的穿透深度增加,有利于燃气

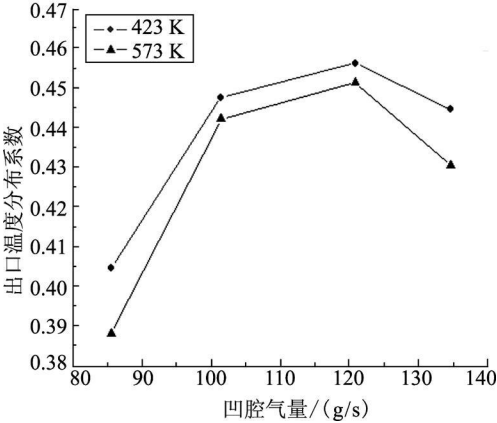


图 4 主流流量 687 g/s 时凹腔气量对出口温度分布的影响

Fig. 4 Cavity gas amount's influence on OTDF when the mainstream flow is 687 g/s

的掺混,导致出口温度分布场变好,出口温度分布系数反而减小.

2.2 燃油掺混温度对出口温度分布的影响

在主流气量为 687 g/s,燃油供油量为 3.4 g/s,研究燃油掺混温度对 λ_{tdf} 的影响,得到图 5 与图 6 所示变化关系.图 5 为两种凹腔气量下 λ_{tdf} 随燃油掺混温度的变化关系,图 6 为凹腔气量为 117 g/s 时出口径向温度值随燃油掺混温度的变化关系.

从图 5 中不难发现燃油掺混温度对出口温度分布影响也较大.在两种凹腔气量下, λ_{tdf} 随着燃油掺混温度的变化关系呈现一致的变化关系.且同种燃油温度下凹腔气量为 117 g/s 时比凹腔气量为 101 g/s 时的温度分布要差,具体原因已经在上一段中作了说明.同一种凹腔气量下, λ_{tdf} 随着燃油掺混温度呈现先增加后减小的趋势.图 6 中,

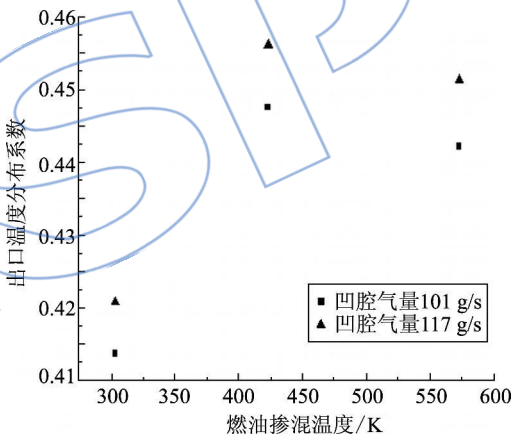


图 5 λ_{tdf} 相对于燃油掺混温度的变化
Fig. 5 Change of λ_{tdf} along with the fuel temperature

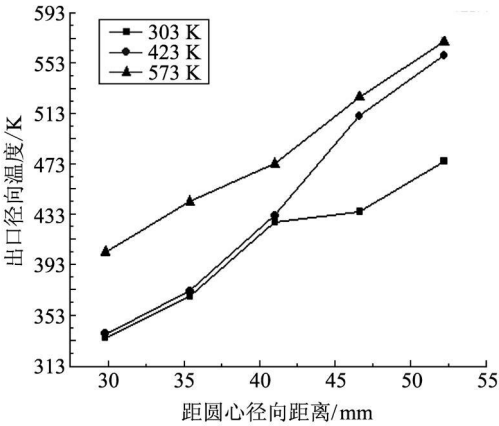


图 6 不同燃油温度下出口径向温度
Fig. 6 Radial temperature along with different fuel temperatures

可以明显看出燃油温度为 303 K 时与 573 K 时的温度分布要比温度为 423 K 时的温度分布要均匀,这与图 5 的变化关系是一致的。

在掺混温度较小的情况下 λ_{tdf} 较低且随着温度升高会有所增加,直到达到最大值.超过最大值而继续增加燃油掺混温度时,出口温度分布情况开始改善, λ_{tdf} 开始减小.造成这种现象的原因是:燃油在较小掺混温度时的总体蒸发量较小,油量较小导致燃烧温度不是很高,从而各点的绝对温差不是很大, λ_{tdf} 也就不大.较小温度下的温度增加对蒸发量改善不大,燃油在随气流进入凹腔之后,主要的雾化燃油集中在燃油喷嘴附近,造成掺混不均匀,从而导致出口温度场分布不均匀, λ_{tdf} 增高.当掺混温度较高时(越过转折点),燃油开始大量的蒸发,雾化效果明显改善,这种情况下,由于油量较大,此时会出现比较长的火焰,致使出口处的温度测量靶被火焰覆盖,所以此时测出的出口温度值高且均匀分布, λ_{tdf} 开始下降.

2.3 燃油供油量对出口温度分布系数的影响

在主流流量选定为 687 g/s 的情况下,分别在燃油掺混温度 423 K 和 303 K 时,研究燃油供油量的变化对出口温度分布的影响,其变化关系图示如图 7、图 8.从图中可以看出不同凹腔气量下出口温度分布系数随着燃油供油量的变化趋势大致相同.即当燃油量增加时,出口温度分布系数随之先增加后减小.造成这种现象的原因是:随着供

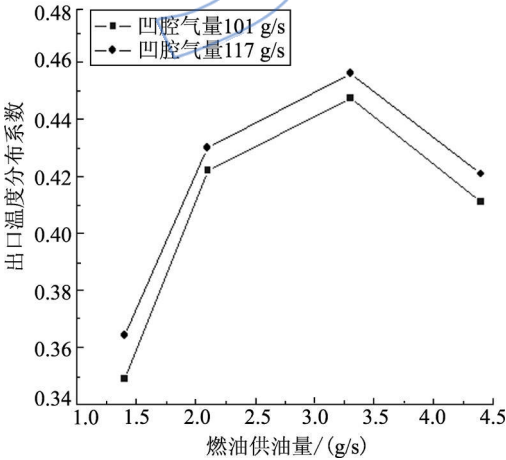


图 7 燃油掺混温度为 423 K 时供油量与出口温度分布的关系

Fig.7 Relationship of fuel amount and λ_{tdf} when the fuel temperature is 423 K

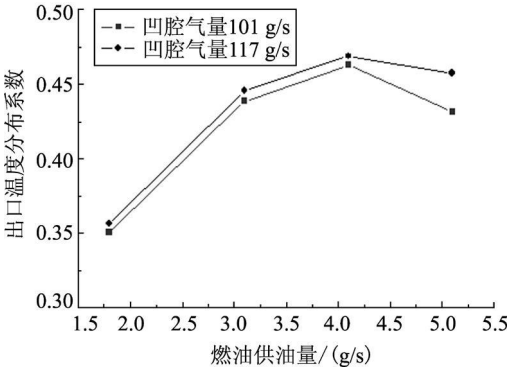


图 8 燃油掺混温度为 303 K 时供油量与出口温度分布的关系

Fig.8 Relationship of fuel amount and λ_{tdf} when the fuel temperature is 303 K

油量增加,蒸发管内的油气比增加,燃油混合气进入凹腔内不容易迅速的掺混均匀,容易出现局部富油的现象,使得凹腔燃烧室的燃烧温度出现局部过高,从而导致出口温度分布场不均匀,出口温度分布系数偏高.继续增加供油量时,由于油量较大,此时会出现比较长的火焰,致使出口处的温度测量靶暴露在火焰中,所以此时测出的出口温度值高且均匀分布.图 7 与图 8 为不同的燃油掺混温度下的图像,之所以变化曲线略有不同是因为掺混温度对燃油蒸发率的影响导致的.

3 结 论

本文通过对试验数据进行研究分析,得出了有关出口温度分布的如下规律:

- 1) 凹腔气量对出口温度分布影响较大,随着凹腔气量的增加, λ_{tdf} 先增加后减小,这与掺混射流的穿透深度有关.
- 2) 燃油掺混温度对出口温度分布的影响也不容忽视.当燃油掺混温度较小时, λ_{tdf} 较低.燃油掺混温度增加时, λ_{tdf} 随之先增加后减小.
- 3) 燃油供油量对出口温度分布也有重要影响.当燃油量增加时, λ_{tdf} 随之先增加后减小.

参考文献:

[1] Hsu K Y, Goss L P, Trump D D. Performance of a trapped vortex combustor[R]. AIAA 95-0810, 1995.

[2] Roquemore W M, Shouse D, Burrus D, et al. Trapped vortex combustor concept for gas turbine engines[C]//39th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, NV: AIAA, 2001, 0483.

[3] Hsu K Y, Goss L P, Roquemore W M. Characteristics of a trapped vortex combustor [J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(1): 57-65.

[4] 樊未军, 易琪, 严明, 等. 驻涡燃烧室凹腔双涡结构研究 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 66-70.
FAN Weijun, YI Qi, YAN Ming, et al. Research of double vortex structure in trapped vortex combustor[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2006, 26(9): 66-70. (in Chinese)

[5] Meyer T R, Brown M S, Fonov S, et al. Optical diagnostics and numerical characterization of a trapped vortex combustor[R]. AIAA 2002-3863, 2002.

[6] 邢菲, 张荣春, 樊未军, 等. 主流及掺混气温度对单涡/ 贫油驻涡燃烧室点火及熄火性能影响的试验[J]. 航空动力学报, 2008, 23(12): 2280-2285.
XING Fei, ZHANG Rongchun, FAN Weijun, et al. Experimental study on single/fuel lean trapped vortex combustor ignition and limit blow-out at different main air and mix air temperatures[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12): 2280-2285. (in Chinese)

[7] 侯晓春, 季鹤鸣, 李国庆, 等. 高性能航空燃气轮机燃烧技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
HOU Xiaochun, JI Heming, LI Guoqing, et al. Combustion technology of high performance aircraft gas turbine[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. (in Chinese)

