

改进堵孔法在主燃烧室上的试验研究*

常峰, 程明, 林宏军, 张成凯

(中国航发沈阳发动机研究所, 辽宁沈阳 110015)

摘要: 为了简化主燃烧室流量分配的试验方法, 对传统堵孔法进行了改进, 提出了一种采用参考压力损失与进口空气流量来建立流量特性曲线, 之后通过求解线性方程组获得燃烧室流量分配比例的方法。通过在一扇形燃烧室上进行流量分配试验, 验证了改进方法的可行性。研究表明: 采用改进的堵孔法压力测点数最少为2个, 能够有效减少试验测点和试验测量仪器的数量, 不同测点位置测量获得的孔流量分配比例基本一致, 在1%~4%参考压力损失范围内, 不同参考压力损失对流量分配比例基本无影响, 改进堵孔法测得的流量分配比例在试验参考压力损失范围内误差不超过4%。

关键词: 主燃烧室; 流量分配; 堵孔法; 参考压力损失; 流量特性曲线

中图分类号: V231.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2020) 04-0875-06

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.190282

Experimental Study on Improved Hole Plugging Method of Combustor

CHANG Feng, CHENG Ming, LIN Hong-jun, ZHANG Cheng-kai

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to simplify the test method of combustor flow distribution, traditional hole plugging method was improved. The reference pressure loss and the inlet air mass flow were used to establish the flow characteristic curves. Then linear equations were used to obtain the flow distribution of the combustor. The feasibility of the improved method was verified by flow distribution test on a multi-sector combustor. The results show that the improved hole plugging method can effectively reduce the number of test points which is at least 2 point and test instruments. The flow distributions obtained at different test points are basically the same. In the range of 1%~4% reference pressure loss, the different reference pressure losses have little effect on the flow distribution ratio. Thus, the error of the flow distribution result measured by the improved hole plugging method does not exceed 4% within the test reference pressure loss range.

Key words: Combustor; Flow distribution; Hole plugging method; Reference pressure loss; Flow characteristic curve

1 引言

在航空发动机燃烧室中, 对更高温升和更低排放的追求, 需要新的燃烧组织技术来满足温升和排

放性能指标, 而调整火焰筒上不同进气孔的流量分配比例是实现燃烧组织的关键^[1-6], 典型的GE公司的TAPS(双环预混旋流器)燃烧室^[7]为了满足CAEP/6(航空环境保护委员会第6次)的低排放标准, 头部旋

* 收稿日期: 2019-05-05; 修订日期: 2019-07-25。

基金项目: 国家自然科学基金(91641205)。

通讯作者: 常峰, 硕士, 工程师, 研究领域为主燃烧室设计。E-mail: changfeng061647@163.com

引用格式: 常峰, 程明, 林宏军, 等. 改进堵孔法在主燃烧室上的试验研究[J]. 推进技术, 2020, 41(4): 875-880. (CHANG Feng, CHENG Ming, LIN Hong-jun, et al. Experimental Study on Improved Hole Plugging Method of Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(4): 875-880.)

流器的空气流量比例由CFM56发动机燃烧室的30%提高到70%,而主燃孔和掺混孔流量比例由45%降低到0%,在设计阶段可以借助CFD计算来获得新设计燃烧室的流量分配关系^[8-10],但是CFD方式计算是对一种理想模型的计算,实际燃烧室试验件的流量分配数据因为加工误差和加工精度问题,和CFD结果存在差异,加工试验件的流量分配需要通过试验方法来获取加工燃烧室的流量分配关系。

常用的流量分配试验方法有环腔截面流量法和孔的流量特性曲线法(堵孔法)^[11]。由于环腔截面法采用前后的截面环腔流量相减来求孔的流量分配关系,存在较大的误差,实际使用较少。国内外学者^[12-17]多采用金如山^[11]提出的堵孔法进行燃烧室的流量分配试验研究。何敏等^[12]为获得某一地面燃气轮机燃烧室的流量分配,设计了专门的流量分配试验件,在火焰筒进气孔前后布置40多个静压测试点,采用堵孔法进行流量分配试验,由于压力测点较多,为了防止漏气,采用专门的胶带进行密封,试验结果表明不同测点位置获得的流量分配比例关系不同。徐丽等^[9]为了研究有效截面法、流阻法以及数值计算流量分配比例的精度,利用专门流量分配试验件,采用堵孔法进行了大孔流量分配试验研究,验证了不同方法的计算精度。莫礼孝^[13]对某环形燃烧室利用堵孔法开展冷热态试验研究,研究表明燃烧热释放对流量分配的影响较小,可以忽略不计。

为了区分,本文将金如山^[11]提出的堵孔法定义为传统堵孔试验方法,该方法通过孔前、孔后的压力差和流量的对应关系建立流量特性曲线,获得流量分配比例。通过以上研究者的研究分析可知,由于燃烧室火焰筒上孔的类型和数量多,采用传统堵孔试验方法进行流量分配试验时,需要布置大量的压力测点及测量仪器对孔前、孔后的压力进行测量,同时需要环腔引气装置来保持堵孔后燃烧室流动状态的影响。该方法在实际使用时需要设计专门的流量分配试验件来开展试验研究,而对于孔前、孔后压力的定义和测点位置的布置会因研究者的不同,造成相同试验件,流量分配试验结果间存在较大差别^[12,17]。上述原因直接限制了传统堵孔试验方法的使用范围,造成了对于加工的燃烧室往往不进行流量分配检查,只有当性能不满足要求时才补充流量分配试验的局面。

针对传统堵孔试验方法存在的问题,本文提出用参考压力损失代替孔前、孔后压差的测量,消除测点位置对试验结果的影响,同时,通过构建参考压力

损失与空气流量的流量特性曲线,利用求解线性方程组获取燃烧室流量分配关系,解决传统堵孔试验方法在燃烧室流量分配测试中的不足。

2 改进堵孔法

2.1 方法推导

如图1所示,为本文开展改进堵孔试验的某一扇形燃烧室试验件结构简图,试验件主要包括:进口气流整流段,扇形燃烧室(包括扩压器、机匣、燃油喷嘴、火焰筒等组件)。其中,机匣内火焰筒外所形成的空腔,在燃烧室中通常称为二股环腔。

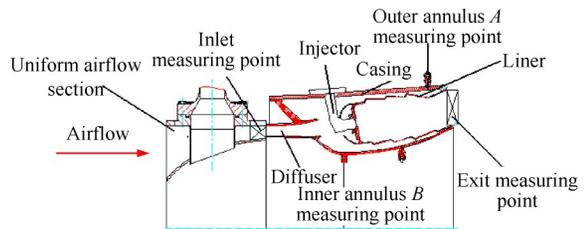


Fig. 1 Multi-sector combustor rig schematic map

在燃烧室中,燃烧室空气流量跟燃烧室的开孔面积以及压力损失直接相关,如公式(1)^[2]

$$q = \mu A \sqrt{2(p_{3.1} - p_4)\rho_{3.1}} \quad (1)$$

式中 q 为进入火焰筒的空气流量,kg/s; A 为火焰筒的总开孔面积, m^2 ; μ 为开孔的流量系数; $p_{3.1}$ 为火焰筒进口总压,Pa; p_4 为火焰筒出口静压,Pa; $\rho_{3.1}$ 为火焰筒进口空气密度, kg/m^3 。

对于几何结构一定的燃烧室,有效流通面积 μA 为确定值,在 $p_{3.1}$ 以及 $\rho_{3.1}$ 一定的条件下,流量只与压力损失相关。在堵掉一部分孔后,火焰筒的有效流通面积随之改变,如公式(2)

$$q_i = \mu A_i \sqrt{2(p_{3.1} - p_4)\rho_{3.1}} \quad (2)$$

式中 q_i 为堵孔后火焰筒空气流量,kg/s; μA_i 为堵孔后火焰筒有效流通面积, m^2 。

定义参考压力损失 δ 如公式(3)

$$\delta = \frac{p_{3x} - p_4}{p_{3x}} \quad (3)$$

式中 p_{3x} 为火焰筒外,二股环腔中任意位置的静压,在本文后续试验中,代表外环腔A测点处静压或内环腔B测点处静压或内外环腔静压平均值,Pa。

相同堵孔状态下,将公式(2)中 $p_{3.1} - p_4$ 用参考压力损失 δ 代替,如公式(4)。

$$q_i = \mu A_x \sqrt{2\delta p_{3x}\rho_{3.1}} \quad (4)$$

式中 μA_x 为采用参考压力损失求得的火焰筒有

效流通面积, m^2 。

由理想气体状态方式可得到公式(5)

$$\rho_{3,1} = \frac{p_{3x}}{RT_3} \quad (5)$$

式中 R 为理想气体常数 $287.06J/(kg \cdot K)$; T_3 为燃烧室进口温度, K 。

由公式(4), (5)得到公式(6)

$$q_i = \mu A_x \sqrt{2\delta \frac{p_{3x}^2}{RT_3}} \quad (6)$$

相同流量下,公式(2)和(6)左边相同,等式右边由于参考压力损失的引入,选取的测量点位置不同,导致 $\mu A_x \neq \mu A_i$,按公式(6),在 p_{3x} 和 T_3 一定的条件下,对火焰筒上不同类型的孔分别进行堵孔试验,可获得参考压力损失与堵孔后火焰筒流量的特性曲线。假设将火焰筒上的所有孔分为 n 组,每次进行1组堵孔试验,可以分别获得 $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ 。每次堵孔试验流量比全开状态流量少了分组所堵孔的流量,当所有分组做完后,少的流量之和应为全开的流量 q ,即 n 次试验的总流量应为 $(n-1)q$,则在相同的参考压力损失下,公式(7)成立。

$$\frac{\sum_{i=1}^n q_i}{n-1} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu A_i}{n-1} \sqrt{2\delta \frac{p_{3x}^2}{RT_3}} = q \quad (7)$$

因此,可以用参考压力损失表征堵孔后有效流通面积,即能够表征各孔的流量分配比例。

2.2 流量分配试验过程

根据上述理论,对火焰筒上不同类型孔进行流量分配试验,可分为以下步骤:

(1) 试验状态的确定和保持

在不同的参考压力损失下,保持试验过程燃烧室进口温度、压力恒定,减少试验过程中由于气源设备长期工作带来温度压力波动误差。

(2) 火焰筒流量的测量和流量特性曲线的构建

火焰筒上所有孔全开状态下,调节进口空气流量,记录压力测点处静压和燃烧室出口静压,按公式(3)中的参考压力损失定义计算参考压力损失,根据参考压力损失与进口空气流量数据,绘制全开状态下,参考压力损失与进口空气流量的流量特性曲线,获得全开状态下,参考压力损失与流量的关系式 $q = f(\delta)$ 。

(3) 堵孔后火焰筒流量的测量和流量特性曲线的构建

将火焰筒上的所有孔分为 n 组,每次只堵一组进行试验,根据参考压力损失与进口空气流量数据,绘

制该组状态下的流量特性曲线,直到 n 组孔都进行完试验,根据流量特性曲线建立流量和参考压力损失的关系式 $q_i = f_i(\delta)$ 。

(4) 流量分配比例的计算

以 x_1, x_2, \dots, x_n 代表某参考压力损失 δ 下某组孔的流量,可建立如下方程组

$$\sum_{i=1}^n x_i - x_j = f_j(\delta) \quad (j=1, \dots, n) \quad (8)$$

式中, x_j 为第 j 次堵孔试验。

公式(8)为 n 元一次线性方程组,可以求出 x_1, x_2, \dots, x_n 。则第 i 组孔的流量分配比例 \bar{x}_i 为

$$\bar{x}_i = \frac{x_i}{\sum_{i=1}^n f_i(\delta)/(n-1)} \quad (9)$$

(5) 试验误差的评估

试验误差和试验适用性评估,通过公式(10)判定

$$\frac{\sum_{i=1}^n f_i(\delta)/(n-1)}{f(\delta)} = 1 \quad (10)$$

公式(10)说明,在参考压力损失 δ 下可以通过全部孔通气的流量和求解方程获得所有孔的流量之和之比来判定试验误差大小,误差 e 定义如公式(11)

$$e = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n f_i(\delta)/(n-1)}{f(\delta)} \quad (11)$$

3 试验验证及结果分析

3.1 试验设备

如图2所示,试验采用的扇形燃烧室为高温升燃烧室,该燃烧室为了满足温升的指标要求,在设计上采用了无主燃孔的方案,火焰筒的开孔主要包含头部旋流器进气孔、火焰筒壁面冷却孔和掺混孔,气流从这3类孔流入,分为头部空气、冷却空气和掺混空气,3类孔的流量分配比例设计值分别为54%,28%,18%。

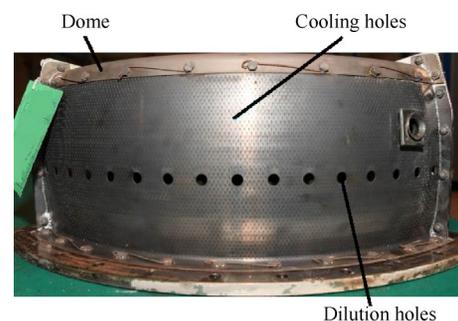


Fig. 2 A high temperature rise multi-sector combustor

在测点的位置上,燃烧室进口装有1支总压耙,获得燃烧室进口总压,1支3点热电偶,3点热电偶的平均值为进口总温,同时在进气段前装有孔板流量计对进入燃烧室的空气流量进行测量,在内外环腔上各有1处静压测点,对测点处静压进行测量,在出口测点有4处静压测点,取4处静压的平均值为出口静压,其中,温度传感器的测试精度误差为 $\pm 1.0\%$,压力传感器误差为 0.5% ,流量计误差为 $\pm 1.0\%$ 。

流量分配试验中可直接测量获得的参数有进口流量、进口总压、进口温度、内外环腔静压和火焰筒出口静压。

3.2 试验状态

图2试验件流量分配试验主要为获得头部旋流器空气、冷却空气、掺混空气的分配比例,因此试验中将开孔分为头部旋流器进气孔、火焰筒壁面冷却孔、掺混孔3组,进行堵孔试验。试验件进气温度采用间接加温方式,同时,试验件进口压力采用加压方式,在燃烧室中火焰筒的压力损失一般不大于 4% ^[18]。因此,试验状态选择如表1所示。

Table 1 Test conditions

T_{13}/K	$p_{13.1}/kPa$	δ
400	200	1%, 1.7%, 2.3%, 3%, 3.6%

3.3 流量分配比例试验结果分析

分别开展全开状态、堵火焰筒头部孔、堵冷却壁面孔和堵掺混孔下的流量分配试验,共开展4次试验。

如图3所示,以外环腔测点A计算参考压力损失,根据4次试验数据绘制基于参考压力损失的流量特性曲线。通过前文分析可知改进堵孔法主要通过获得流量特征曲线来求取流量分配关系,在试验中只要保证不同参考压力损失下的对应流量测量准确,而对具体参考压力损失值的控制要求降低,这样可以有效降低试验者的试验调节难度,从而降低了试验的复杂性。这也是图3中不同流量特性曲线上参考压力损失试验点与表1中试验状态点存在差异的原因。

图3中曲线采用二次曲线拟合形成,获得全开状态、堵火焰筒头部、堵冷却孔、堵掺混孔拟合公式分别如下

$$q = -1414.4\delta^2 + 160.31\delta + 1.1626 \quad (12)$$

$$q = -521.06\delta^2 + 66.906\delta + 0.5557 \quad (13)$$

$$q = -924.41\delta^2 + 109.31\delta + 0.7904 \quad (14)$$

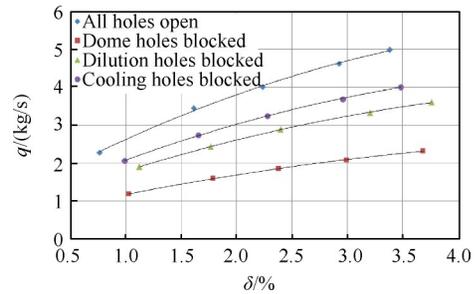


Fig. 3 Flow characteristic curve based on reference pressure loss

$$q = -1131.1\delta^2 + 127.91\delta + 0.9162 \quad (15)$$

公式(12)~(15)拟合决定系数均不小于0.999,说明拟合公式能够反应流量特性曲线。

通过拟合公式,按照公式(8),(9)计算获得不同参考压力损失下的流量分配。为了比较方便,选取表1中3种不同参考压力损失进行比较,整个参考压力损失范围内流量分配试验误差在后续图6中说明。图4为3种不同参考压力损失下的流量分配比例和设计值对比。

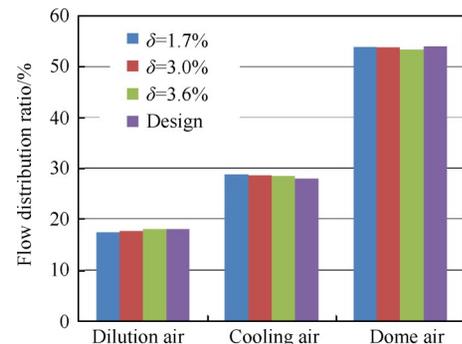


Fig. 4 Comparison of flow distribution under different reference pressure loss and design value

由图4可知,3种不同参考压力损失下的流量分配比例基本一致,说明参考压力损失的变化对流量分配比例影响较小。流量分配比例试验值与设计值相符,说明通过改进堵孔法能够获得该燃烧室的流量分配关系。

3.4 测点位置对流量分配比例的影响

分别以外环腔A测点、内环腔B测点以及外、内环腔A/B测点的平均值来计算参考压力损失,获得流量分配比例。

图5为参考压力损失为3.6%时,不同测点获得的流量分配比例。由图4可知,以不同测点获得的流量分配比例基本一致,说明参考点位置的选取对于流量分配试验影响较小,这与传统堵孔试验方法受测点位置影响较大^[11-12]不同。

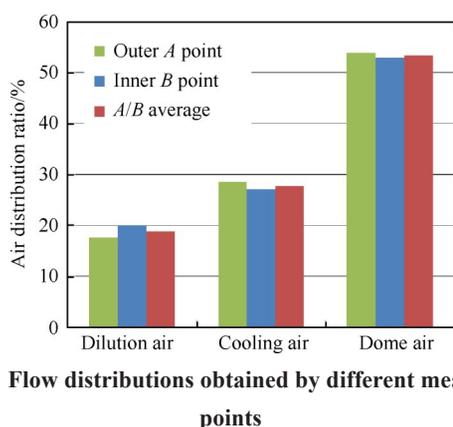


Fig. 5 Flow distributions obtained by different measuring points

图6为不同测点求取参考压力损失的流量分配试验误差。由图可见,所有试验状态的不同参考压力损失误差均小于4.0%,说明在整个特征曲线范围内求取的流量分配比例关系误差小于4.0%。在参考压力损失1.0%~3.0%内,随着参考压力损失的增大,试验误差均逐渐降低,分析认为在较小压力损失下误差相对较大主要因为较小损失下,火焰筒进气孔及内部流动未稳定导致。基于外环腔A测点的试验误差整体高于内环腔B测点的试验误差。同时,在试验参考压力损失范围内,基于外环腔A测点,流量分配试验最大与最小误差之差约为1.0%,而基于内环腔B测点,流量分配试验最大与最小误差之差约为2.0%,通过两测点的平均值,流量分配试验最大与最小误差之差约为1.0%,分析认为利用多点测量可以有效降低参考压力损失范围内的试验误差。

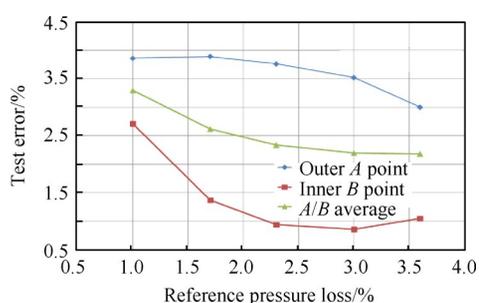


Fig. 6 Reference pressure loss and test error relationship

通过以上试验结果分析认为,采用参考压力损失来进行流量分配试验,误差较小的原因有:(a)每次堵掉的孔面积只占整个火焰筒开孔面积的一部分,堵掉孔面积越少对燃烧室内流动状态的改变越小,从而保证了测量的精度要求,分组越多,对流动状态影响越小,试验精度越高;(b)对于进口恒定温度、压力的要求,避免了试验过程中因气源长期工作引起的进口参数变动,保证了高的测量精度;(c)采用相同

的参考压力损失,避免不同孔前孔后压差测量带来的误差,提高了试验精度。

4 结论

通过理论分析以及试验方法,研究了采用改进堵孔法进行燃烧室流量分配试验的工程可行性,基于本文的研究得到以下结论:

(1)不同参考压力损失下获得的流量分配比例基本一致,参考压力损失的不同对燃烧室流量分配比例影响较小。

(2)以不同测点位置计算参考压力损失,获得的火焰筒流量分配比例基本一致,在参考压力损失1.0%~4.0%内,流量分配试验误差均不大于4.0%,测点位置不同对流量分配比例影响较小。

(3)求取参考压力损失测点位置最少可采用两点,当试验误差相对较高时,采用多个测点平均值计算参考压力损失,能够有效地降低试验误差。

此外,利用改进堵孔法基于两点测量参考压力损失,求取了三旋流扇形燃烧室^[19]的流量分配,试验误差不大于3.6%,中心分级^[5]单头部的流量分配,试验误差不大于2.0%。由此可见,相对于传统的堵孔法,本文提出的改进堵孔法不需要专门流量分配试验件,试验测点和测试设备大幅减少,试验操作简单,并具有可靠的试验精度,可有效地用于主燃烧室产品流量检查和燃烧室不同设计阶段的流量分配比例的获取。

致谢:感谢国家自然科学基金资助。

参考文献

- [1] Bahr D W. Technology for the Design of High Temperature Rise Combustors[J]. *Journal of Propulsion*, 1987, 3(2): 179-186.
- [2] 金如山, 索建秦. 先进燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 航空工业出版社, 2016.
- [3] Kress E J, Taylor J R, Dodds W J, et al. Multiple Swirler Dome Combustor for High Temperature Rise Applications[R]. *AIAA 90-2159*.
- [4] 林宇震, 林阳, 张弛, 等. 先进燃烧室分级燃烧空气流量分配的探讨[J]. *航空动力学报*, 2010, 25(9): 26-30.
- [5] 常峰, 索建秦, 梁红侠, 等. 同心圆式主副模分区燃烧组织燃烧室数值研究[J]. *推进技术*, 2012, 33(5): 760-764. (CHANG Feng, SUO Jian-qin, LIANG Hong-xia, et al. Numerical Study of Co-Axial Pilot and Main Module Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 33(5): 760-764.)

- [6] 张斌全. 现代航空发动机燃烧室[M]. 北京:北京航空学院出版社, 1986.
- [7] Michael J F, Dong Thomsen, Rick Stickles , et al. Development of the GE Aviation Low Emissions TAPS Combustor for Next Generation Aircraft Engines [R]. AIAA 2012-0936.
- [8] 徐 丽, 张宝诚, 刘 凯. 燃烧室流量分配计算方法适用性研究[J]. 航空发动机, 2015, 41(4): 47-50.
- [9] 徐 丽, 孙丽艳. 某型发动机燃烧室流量分配计算方法[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 32(1): 14-31.
- [10] 汤 彬, 邢 菲, 邹建锋, 等. 驻涡燃烧室凹腔温度变化规律及气量分配[J]. 推进技术, 2011, 32(2): 182-187. (TANG Bin, XING Fei, ZOU Jian-feng, et al. Experimental and Numerical Study on Temperature Variation and Air Flow Distribution in Trapped Vortex Combustor[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(2): 182-187.)
- [11] 金如山. 航空燃气轮机燃烧室[M]. 北京:宇航出版社, 1988.
- [12] 何 敏, 刘云鹏, 颜应文. 地面燃气轮机单管燃烧室流量分配试验[J]. 航空动力学报, 2018, 33(4): 919-927.
- [13] 莫礼孝. 燃烧室冷、热态流量分配试验研究[J]. 航空动力学报, 1986, 1(2): 170-191.
- [14] 李 瀚, 索建秦, 梁红侠. 航空发动机燃烧室火焰筒设计验证方法研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(5): 29-33.
- [15] 金如山, 林正录. 喷气发动机环形燃烧室的空气流量分配试验研究[R]. 北京:北京航空学院科学研究报告, 1979.
- [16] 范作民, 巢志方. 燃烧室流量分配与总压损失的试验研究[J]. 工程热物理学报, 1980, 1(2): 185-194.
- [17] 郭 强, 陈代富, 贺孝涛. 某型航空发动机火焰筒流量对比试验研究[J]. 航空发动机, 2013, 39(3): 77-80.
- [18] Mellor A M. Design of Modern Turbine Combustors[M]. New York: Academic Press, 1990.
- [19] 莫 姐, 程 明, 张成凯, 等. 三旋流加装外套环对燃烧性能的影响[J]. 航空动力学报, 2016, 33(7): 1569-1574.

(编辑:张 贺)