

# 环管燃烧室火焰筒空气流量试验

陈 帆, 武 越, 张恒昕, 杜昌昵  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 为确保环管型燃烧室火焰筒流量分布的均匀性, 要求单台火焰筒流量相对偏差  $\delta$  位于  $\pm 1.5\%$  之内。采用模拟压比法与相似理论, 建立了火焰筒空气流量特性对比试验的数学模型, 并对数据处理模型的误差传递进行分析, 得出现有模型存在一个不能对火焰筒真实特性进行判定的区间, 火焰筒入口空气压力偏差  $\Delta p_1$  是引起  $\delta$  误差的关键因素。为此, 设计了一种基于两级扩散、整流集气装置的空气流量试验系统, 并对一组 16 台火焰筒试验件进行了入口压力  $p_1$  为 20 kPa, 40 kPa, 60 kPa 及 80 kPa 下的空气流量试验研究。数据显示火焰筒入口压力偏差小于  $\pm 0.05$  kPa, 入口压力脉动相对值小于 0.25%, 产品特性参数  $C$  值的相对误差不大于  $\pm 0.01\%$ , 可以实现对火焰筒流量特性一致性的判定。

**关键词:** 环管燃烧室; 火焰筒; 流量特性; 对比试验

**中图分类号:** V434.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374(2019)04-0085-06

## Experimental on air flow in flame tube of cannular combustor

CHEN Fan, WU Yue, ZHANG Hengxin, DU Changni  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** In order to ensure the uniformity of flow distribution in the cannular combustor, the relative deviation  $\delta$  of the single flame tube flow is required to be within  $\pm 1.5\%$ . For this reason, a mathematical model for the comparison test of the air flow characteristics in flame tube was established by using simulated pressure ratio method and similarity theory. The error transfer analysis of the data processing model shows that there is an interval in the existing model that cannot determine the true characteristics of the flame tube, and the inlet air pressure deviation  $\Delta p_1$  of the flame tube is a key factor causing the  $\delta$  error. Furthermore, an air flow test system based on two-stage diffusion and rectifier gas collection device was designed, and the air flow experiments were carried out for a group of 16 flame tubes under the inlet pressure  $p_1$  of 20 kPa, 40 kPa, 60 kPa and 80 kPa, respectively. The results show that the inlet pressure deviation of flame tube is less than  $\pm 0.05$  kPa, the relative value of inlet pressure pulsation is less than 0.25%, and the relative error of product characteristic parameter  $C$  is not more than  $\pm 0.01\%$ , which could determine the consistency of flow characteristics for the flame tube.

**Keywords:** cannular combustor; flame tube; flow characteristics; comparative experiment

收稿日期: 2018-06-16; 修回日期: 2018-09-11

作者简介: 陈帆(1989—), 男, 硕士, 研究领域为液体火箭发动机介质试验技术

## 0 引言

作为航空发动机燃烧室的重要组件,火焰筒是组织燃烧的场所,是保证空气分股、燃烧充分、掺混均匀并使壁面得到有效冷却的关键部件,燃烧室的可靠性、经济性和寿命在很大程度上取决于火焰筒的可靠性和有效程度<sup>[1-2]</sup>。环管型燃烧室是一种常见的燃烧室形式,燃烧室内设置有多台火焰筒,火焰筒流量特性的一致性直接决定燃烧室出口燃气分布均匀性,从而影响发动机的性能与可靠性。因此,在火焰筒的研试、出厂鉴定、故障诊断等环节<sup>[3-6]</sup>,通常会进行空气流量试验,为保证火焰筒状态的一致性,确保发动机质量,要求同批次火焰筒在同一工况下流量相对偏差小于 $\pm(1.5 \sim 4)\%$ 。目前,国内外通常采用模拟压比、模拟马赫数的方法,选取可覆盖模拟区间的一系列工况点对火焰筒进行冷空气流量试验,通过相似理论将试验结果折算至标准状态进行比较<sup>[7-8]</sup>。但在数据折算中忽略了实际工况点偏差、流动损失等因素,影响了对火焰筒一致性的真实准确评估。

本文通过对现有火焰筒流量数学模型进行误差传递分析,获取产品入口压力偏差对试验结果的影响关系,设计一种基于两级扩散整流集气装置的空气流量试验系统,以实现入口压力的精确控制,提高试验效率与数据质量。

## 1 试验原理及误差分析

### 1.1 试验原理

火焰筒结构如图1所示,试验时采用橡胶塞将火焰筒联焰管口、燃油入口封死,火焰筒安装于集气装置中,出口与大气环境相通,通过试验获取旋流器、主燃孔、掺混孔等火焰筒实际工作状态下的空气总流量。

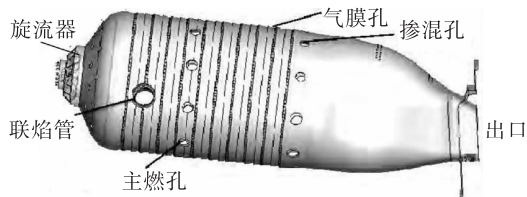


图1 火焰筒结构示意图

Fig. 1 Schematic of flame tube structure

压比模拟法:试验过程中,控制集气装置内压力(即火焰筒入口空气压力),使得火焰筒进、出口试验压比范围可覆盖实际工作压比。

马赫数模拟法:要求在试验中火焰筒出口马赫数与实际工作中该参数值近似相等,火焰筒出口马赫数

$$Ma = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left( \frac{T_2^*}{T_2} - 1 \right)} \quad (1)$$

式中: $k$ 为比热比; $T_2$ 为出口静温,K; $T_2^*$ 为出口总温,K。试验时认为火焰筒中气流为等熵绝热过程,任意截面的滞止参数相等,即出口总温 $T_2^*$ 与入口总温 $T_1^*$ ,入口总压 $p_1^*$ 与出口总压 $p_2^*$ 近似相等,集气装置内火焰筒入口截面测温点处气流流速很小,假设入口静温 $T_1$ 可认为与 $T_1^*$ 相等,可得

$$Ma = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left( \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)} \quad (2)$$

由式(2)可获得工作状态马赫数时火焰筒进、出口压比值 $p_1/p_2$ 。

综合上述方法,计算后选择火焰筒入口压力分别为20 kPa,40 kPa,60 kPa和80 kPa,每个工况点维持10 s,重复2次。

### 1.2 数据处理方法

由于每个火焰筒试验时间不尽相同,环境条件有所差异,为增强数据的可比性,将实际记录数据按照相似理论折算到标准状态(大气压为101.325 kPa,温度15℃)。

火焰筒入口工装截面处气流马赫数

$$Ma = \frac{V}{c} = \frac{q_m / (p_1 / RT_1)}{A_1 \sqrt{kRT_1}} = \frac{q_m \sqrt{RT_1}}{A_1 p_1 \sqrt{k}} \quad (3)$$

式中: $V$ 为出口速度, $c$ 为当地声速; $q_m$ 为空气流量; $R$ 为气体常数; $A_1$ 为测点 $p_1$ 和 $T_1$ 所在工装截面的截面积。试验压力滞止参数

$$p_1^* = (p_1 + p_a) \left( 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \right) \frac{k}{k-1} \quad (4)$$

式中 $p_a$ 为环境大气压。试验温度滞止参数

$$T_1^* = T_1 \left( 1 + \frac{k-1}{2} Ma^2 \right) \quad (5)$$

假设试验过程中气流为等熵绝热过程<sup>[9]</sup>,任意截面的滞止参数相等,均等于 $p_1^*, T_1^*$ 。

气体流量

$$q_m = AK \frac{p^*}{\sqrt{T^*}} q(\lambda) \quad (6)$$

式中:  $q(\lambda)$  为气动函数;  $A$  为火焰筒出口截面积。

根据速度因数  $\lambda$  与静压总压之比关系

$$\frac{p_a}{p^*} = \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right) \frac{k}{k-1} \quad (7)$$

$$q(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2\right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (8)$$

利用式(3)~式(8),即可通过试验实测值获得火焰筒实际出口截面积  $A$  与常数  $K$  的乘积  $C$ ,即

$$C = AK = q_m / \left[ \left( \frac{p_1^*}{\sqrt{T_1^*}} q(\lambda_1) \right) \right] \quad (9)$$

为使得数据具备可比性,将式(9)计算得到的  $C$  值与标准状态下计算获得的  $p_2^*$ ,  $T_2^*$  及  $q(\lambda_2)$  代入式(6),即可获得环境压力为 101 325 Pa,温度为 15 °C 时的流量值  $q_m^*$ 。

计算同组试件同工况的折合流量的平均值  $\bar{q}_m^*$ ,对于单个试件若满足流量相对偏差  $\delta$  位于  $\pm 1.5\%$  之内,则视为合格, $\delta$  值由下式计算获得

$$\delta = (q_m^* - \bar{q}_m^*) / \bar{q}_m^* \quad (10)$$

### 1.3 误差分析

由于数据折算时假设流动为绝热等熵过程,忽略了试件中的流动损失,真实状态下  $C$  值还包含流动损失系数  $\xi(p)^{[10]}$ ,因为试验过程中仅针对入口压力  $p_1$  进行调整, $\xi(p)$  值的变化仅与入口压力相关(试验数据显示,在额定工况区间内,该产品  $\xi(p)$  随压力的增加近似线性变大),而实际  $p_1$  值不可避免会与额定值存在偏差,当考虑  $p_1$  偏差时, $C$  值可表示为

$$C = \xi(p)AK \quad (11)$$

入口压力  $p_1$  的相对偏差与  $C$  值相对偏差的关系可通过试验获取, $C$  值相对偏差等于折合流量  $q_m^*$

的相对偏差,以一组 16 台为例, $\delta$  的相对偏差的分析如下

$$\bar{q}_m^* = \frac{(q_{m1}^* + q_{m2}^* + \cdots + q_{m16}^*)}{16} \quad (12)$$

由误差传递公式知,平均折合流量  $\bar{q}_m^*$  的绝对误差  $\Delta \bar{q}_m^*$  与折合流量的绝对误差  $\Delta q_m^*$  相等

$$\Delta \bar{q}_m^* = \pm \left\{ \left| \left( \frac{\partial \bar{q}_m^*}{\partial q_{m1}^*} \right) \Delta q_{m1}^* + \left| \left( \frac{\partial \bar{q}_m^*}{\partial q_{m2}^*} \right) \Delta q_{m2}^* + \cdots + \left| \left( \frac{\partial \bar{q}_m^*}{\partial q_{m16}^*} \right) \Delta q_{m16}^* \right| \right| \right\} = \Delta q_m^* \quad (13)$$

火焰筒合格与否的判定依据为单个试件的折合流量  $q_m^*$  与平均折合流量  $\bar{q}_m^*$  的相对偏差  $\delta$  在  $\pm 1.5\%$  的区间之内,即

$$\delta = (q_m^* - \bar{q}_m^*) / \bar{q}_m^* \quad (14)$$

由误差传递计算得到,单个试件折合流量相对偏差值  $\delta$  的绝对误差

$$\begin{aligned} \Delta \delta &= \pm \left\{ \left| \left( \frac{\partial \delta}{\partial q_m^*} \right) \Delta q_m^* \right| + \left| \left( \frac{\partial \delta}{\partial \bar{q}_m^*} \right) \Delta \bar{q}_m^* \right| \right\} = \\ &\pm \left[ \frac{|\bar{q}_m^*| |\Delta q_m^*| + q_m^* |\Delta \bar{q}_m^*|}{\bar{q}_m^{*2}} \right] = \\ &\pm \left[ \frac{|\Delta \bar{q}_m^*|}{\bar{q}_m^*} + \frac{q_m^*}{\bar{q}_m^*} \cdot \frac{|\Delta \bar{q}_m^*|}{\bar{q}_m^*} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

由于  $\bar{q}_m^*$  与  $q_m^*$  的差值远小于其绝对值,因此可以认为  $q_m^* / \bar{q}_m^* = 1$ ,即可得到

$$\Delta \delta = \pm 2 \frac{|\Delta \bar{q}_m^*|}{\bar{q}_m^*} = \pm 2 \frac{|\Delta C|}{C} \quad (16)$$

上述分析获得了入口压力偏差对试件折合流量相对偏差  $\delta$  的影响关系,记试件流量绝对误差  $\Delta \delta$  的绝对值为  $\tau$ ,对试件特性的判定如图 2 所示。

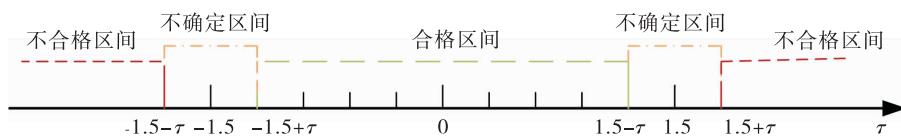


图2 产品特性判定分析

Fig. 2 Determination analysis of product feature

若忽略数据折算误差时,试件的相对流量偏差  $\delta$  在  $\pm 1.5\%$  的区间之内,认为产品合格。实际试验过程中,若试验测得的  $\delta$  值位于区间  $[(-1.5 + \tau)\%, (1.5 - \tau)\%]$ , 则试件  $\delta$  实际值必位于  $[-1.5\%, +1.5\%]$ , 试件合格。同理,当  $\delta$  位于  $[-\infty, -(1.5 + \tau)\%]$  与  $[(1.5 + \tau)\%, +\infty]$  时,考虑误差情况下,  $\delta$  实际值也必然位于  $[-\infty, -1.5\%]$  与  $[+1.5\%, +\infty]$ , 试件不合格; 当  $\delta$  位于  $[-(1.5 + \tau)\%, (-1.5 + \tau)\%]$  与  $[(1.5 - \tau)\%, (1.5 + \tau)\%]$  时,试件可能合格,亦可能不合格,此时若实际试验入口压力为正偏差,  $\delta$  位于  $[-(1.5 + \tau)\%, -1.5\%]$  时,可判断产品不合格(试验入口压力越靠近额定值时,实际流量将越小,与平均折合流量的偏差绝对值将越大); 若实际试验入口压力为正偏差,  $\delta$  位于  $[(1.5 - \tau)\%, 1.5\%]$  时,可判断产品合格(试验入口压力越靠近额定值时,实际流量约小,与平均折合流量的偏差绝对值将越小)。同理,若实际试验入口压力为负偏差,实测  $\delta$  位于  $[1.5\%, (1.5 + \tau)\%]$  时,可判断产品不合格; 实测  $\delta$  位于  $[-1.5\%, -(1.5 - \tau)\%]$  时,可判断产品不合格。下述两种情况无法对产品特性进行判定: ①当实际试验入口压力为负偏差,实测  $\delta$  位于  $[(1.5 - \tau)\%, 1.5\%]$ 、 $[-(1.5 + \tau)\%, -1.5\%]$ ; ②当实际试验入口压力为正偏差,实测  $\delta$  位于  $[-1.5\%, -(1.5 - \tau)\%]$ 、 $[1.5\%, (1.5 + \tau)\%]$  时。此时,需尽量缩小入口压力偏差值,对该试件重复试验。

对试验数据处理的误差分析表明: 提高试验系统入口压力精度可缩小不可判定区间, 提高试验效率和质量。

## 2 试验系统原理

系统原理如图 3 所示, 系统由气源、截止阀、流调阀、流量计、集气装置及管路组成。空气气源由不少于 8 个的容积  $4 \text{ m}^3$ 、压力不低于  $9 \text{ MPa}$  高压气瓶组成(设计压力  $35 \text{ MPa}$ ), 对于单个工况点试验气源每秒钟相对压降小于  $0.045\%$ , 可认为是恒压, 气源截止阀后设置气源压力测点。为对入口压力的精确控制, 空气通过两台电动流调阀进行粗调(TJ01)和精调(TJ02), 试验中先通过 TJ01 调节阀将集气装置内压力调至额定工况点附近, 然后通过 TJ02 调节阀将最终压力控制在要求范围之内。采用高压大容量气源可省去传统方案中流调阀前设置的减压器设备, 从而减少了诱发气流压力波动的

来源, 对提高入口压力稳定性及控制入口压力的精度具有积极意义。

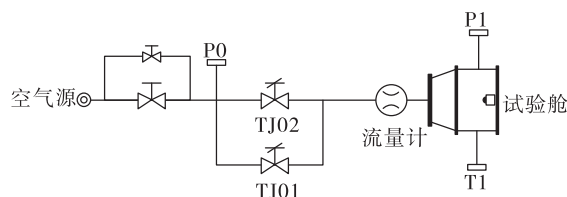


图 3 系统原理图

Fig. 3 Schematic of experimental system

流量调节阀通过电动执行机构调节阀芯开度, 阀门采用等百分比调节方式, 以保证在不同开度时具有相同的调节精度。集气装置结构原理如图 4 所示, 为提高产品入口区域流场压力的精度与稳定性, 根据相关资料结合本试验自身特点, 集气装置采用两级扩散整流方案, 由一级扩散段、二级扩散段、平直段、一级整流栅、二级整流栅及产品固定工装组成, 产品入口截面设置总温、总压测点, 对来流参数进行监测。

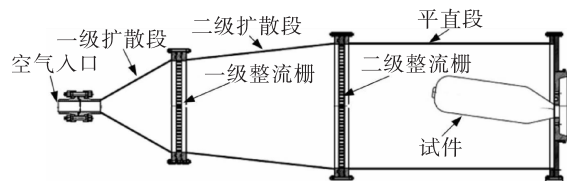


图 4 集气装置示意图

Fig. 4 Schematic of gas collecting device

为保证气流在平直段前得到较好的流场品质, 同时考虑扩散段整体长度, 采用两级扩散方案。根据相关文献<sup>[11-12]</sup>, 为缩短长度, 扩散角可取  $20^\circ \sim 30^\circ$ , 一级扩散段长度为  $360 \text{ mm}$ , 扩张角选择  $25^\circ$ 。一级扩散段末端设置一级整流栅, 将前端紊乱不均匀的气流稳定下来, 衰减或降低流场中可能存在的漩涡或截面处的压强梯度。通过一级扩散和整流后, 气流速度的方向和大小具有较好的均匀度, 为进一步改善和提高流场品质, 设置二级扩散段, 为降低流速、减少能量损失, 扩散角一般为  $5^\circ \sim 8^\circ$  之间, 二级扩散段扩散角选择  $7.5^\circ$ , 最大直径与平直段直径相等。

火焰筒流量试验过程中, 为确保集气装置平直段内空气流速较低且分布均匀, 气流总压与静压近似相等, 取平直段内平均气流速度  $< 5 \text{ m/s}$ , 结合该型火焰筒流量特性, 平直段直径  $D$  为  $600 \text{ mm}$ 。平

直段长度  $L$  与产品箱内安装状态下的轴向长度  $L_1$  和直径  $D$  有关,根据相关资料, $L = L_1 + 0.6D$ ,圆整后平直段长度取 1 000 mm。平直段距离出口端面 130 mm 处设置总压测点与总温测点。

一级扩散段出口与平直段入口处均安装孔板式整流栅。根据相关文献<sup>[13-14]</sup>,一般要求开孔比,即整流孔总面积  $A_k$  与截面面积  $A_2$  之比  $A_k/A_2 \approx 0.6 \sim 0.7$ 。但根据实际经验,为保证整流栅强度,开孔比不大于 0.6,单孔直径 8 mm,开孔比为 0.55,整流栅厚度 15 mm。

### 3 试验结果及分析

选取 16 台火焰筒作为一组开展空气流量试验,图 5 为入口压力 20 kPa、40 kPa、60 kPa 和 80 kPa 下试验数据。试验数据显示:试件入口压力均值与额定工况点的偏差位于  $\pm 0.05$  kPa 范围之内,入口压力脉动值随入口压力值的增大而增大,压力脉动相对值小于 0.25%,充分验证了系统入口压力的控制精度以及集气装置内气流品质。

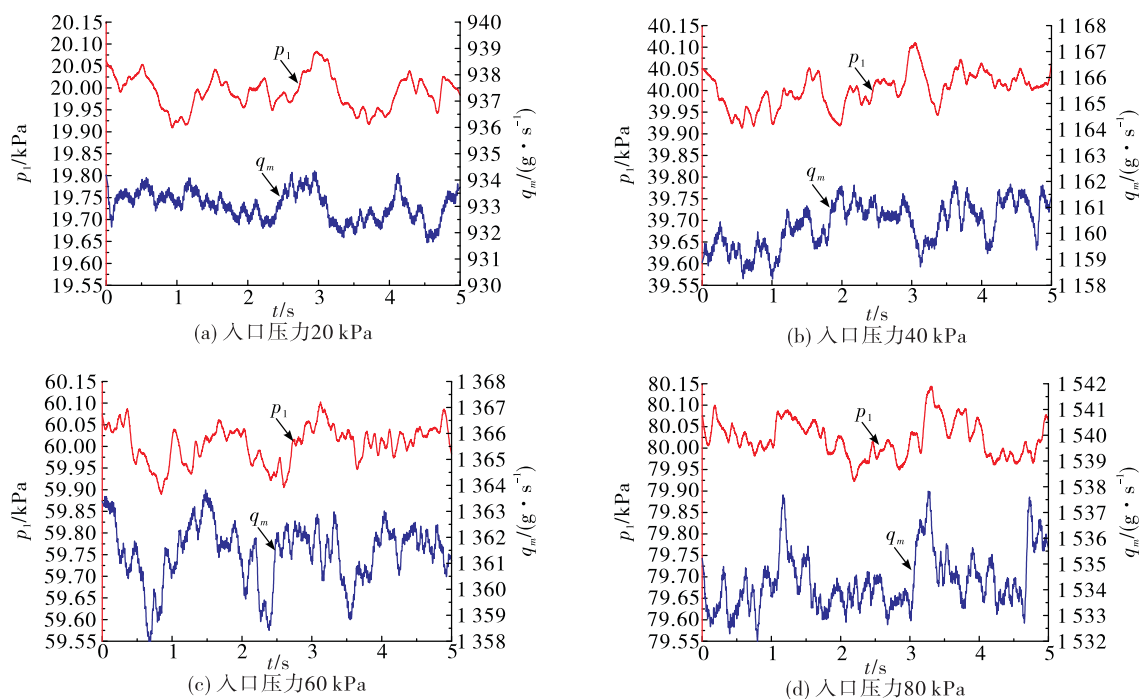


图 5 入口压力  $p_1$  与流量  $q_m$  曲线

Fig. 5 Curves of inlet pressure  $p_1$  and flow  $q_m$

图 6 为 16 台试件在额定工况点下  $C$  值的实测值,由图 6 可知,真实状态下  $C$  值位于 [167, 177] 的区间范围内,且随入口压力的升高而近似线性增大,当试件入口压力偏差为  $\pm 0.05$  kPa 时,  $C$  值的相对误差不大于  $\pm 0.01\%$ ,系统可实现对产品高效、准确的判定。

### 4 结论

通过上述研究,可以得到以下结论:

1) 对火焰筒流量试验现有数学模型的误差传递分析表明:受实际试验中流动损失的影响,试验模型存在不能对试件真实特性进行判定的区间,且试件入口压力偏差越大,该区间范围越宽。

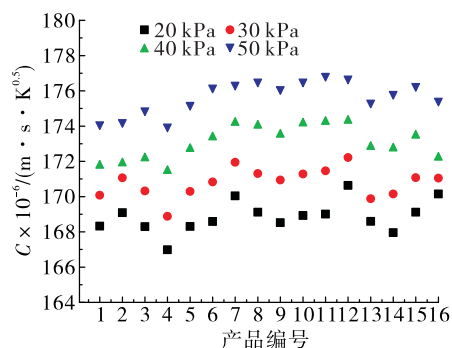


图 6 火焰筒不同入口压力下  $C$  值的变化

Fig. 6 Change of  $C$  value under different inlet pressure of flame tube

2) 所建立的火焰筒流量试验系统在额定工况范围内,对试件入口压力的控制精度可达  $\pm 0.05$  kPa,入口压力脉动相对值小于 0.25%。

3) 在现有系统控制精度下,  $C$  值的相对误差不大于  $\pm 0.01\%$ , 可实现对产品高效、准确的判定。

#### 参考文献:

- [1] 刘长福,邓明. 航空发动机结构分析[M]. 西安:西北工业大学出版社,2016.
- [2] 林宇震,许全宏,刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- [3] 党新宪. 双旋流环形燃烧室试验研究与数值模拟[D]. 南京:南京航空航天大学,2009.
- [4] 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):29-32,37.
- [5] 刘宁致,杨守波,刘静. 涡桨发动机火焰筒烧蚀故障分析与预防[J]. 失效分析与预防,2016,11(1):21-27.
- [6] 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.
- [7] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2005.
- [8] 黎明,吴二平,索建秦,等. 某型燃烧室火焰筒的性能对比试验[J]. 航空动力学报,2013,28(8):1689-1695.
- [9] 王新月. 气体动力学基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2004.
- [10] 唐滨滨,李长坤. 一种低速风洞大流量进气道试验系统研制[J]. 推进技术,2018,39(12):2839-2844.
- [11] 王勋年. 低速风洞试验[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [12] 屈晓力. 大型低速风洞开口试验段低频压力脉动抑制试验研究[C]//第十届全国流体力学学术会议论文集. 杭州:中国力学学会,2018.
- [13] 陈建华,李龙飞,周立新,等. 液氧/煤油补燃火箭发动机整流栅应用研究[J]. 火箭推进,2007,33(2):1-6.  
CHEN J H, LI L F, ZHOU L X, et al. Application of the perforated distribution plate in the LOX/kerosene staged combustion rocket engine[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2007, 33(2):1-6.
- [14] 孟军. 亚音速进气管制造工艺[J]. 火箭推进,2008,34(1):36-38.  
MENG J. Manufacturing technic of subsonic intake pipe for simulation test[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2008, 34(1):36-38.

(编辑:马 杰)