

燃烧室刚性总管燃油流量特性设计改进

王良¹, 陈彬¹, 肖海¹, 邱思槐¹, 李沫²

(1. 中国航发湖南动力机械研究所, 湖南株洲 412002; 2. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 哈尔滨 150066)

摘要:为了解决小型航空发动机燃烧室刚性总管燃油流量偏小、燃油流量不均匀度偏大的问题,采用故障树分析、3 维数值模拟与理论分析相结合的方法,对燃油总管的设计、选材过程以及加工工艺进行了研究,对可能产生问题的底事件逐一分析。结果表明:燃油总管流量偏小的主要原因是总管内壁粗糙度较高和焊料渗入总管内部并粘结在总管管壁上;燃油总管流量不均匀度偏大的主要原因是焊接装配方式不合理和焊接工艺选取不当。对燃油总管出油管与总管管体的配合型面加以改进,并采用冷焊工艺焊接总管的各部分后进行试验验证,改进后的燃油总管流量特性与设计值之间的误差小于 5%,总管流量不均匀性的分布与仿真计算结果规律相近,满足设计要求。

关键词:燃油总管;燃油流量;设计改进;数值模拟;故障分析;燃烧室;小型航空发动机

中图分类号:V231.2

文献标识码:A

doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2025.01.011

Design Improvement of a Combustion Chamber Rigid Fuel Manifold Flow Characteristics

WANG Liang¹, CHEN Bin¹, XIAO Hai¹, QIU Si-huai¹, LI Mo²

(1. AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou Hunan 412002, China;

2. AECC Harbin Dong'an Engine Co., Ltd., Harbin 150066, China)

Abstract: In order to solve the problem of lower flow-rate and larger flow-rate unevenness of a rigid fuel manifold used for the combustion chamber of a small gas turbine engine, the fault tree analysis, 3D numerical simulation, and theoretical analysis were used to investigate each basic event that may cause the problem, including the design, material selection process, and manufacture process of the manifold. The results show that the reasons for the low flow-rate of the fuel manifold are the high roughness of the manifold inner wall and the infiltration of solder into the manifold and its adhesion to the inner wall; the reasons for the larger flow-rate unevenness are the improper selection of welding method and welding process. The mating surface profiles between the outflow pipes and the fuel manifold main body were improved, a cold welding process was applied between all parts of the fuel manifold and verification tests were conducted. The error between the flow characteristics of the improved fuel manifold and the design value is less than 5%, and the flow-rate unevenness distribution of the fuel manifold is similar to the simulation results, meeting the design requirements.

Key words: fuel manifold; fuel flow-rate; design improvement; numerical simulation; fault analysis; combustion chamber; small aeroengine

0 引言

小型和微型航空发动机通常采用环形直流蒸发管燃烧室和刚性燃油总管,其中刚性燃油总管由环状管体、入油管和多根出油管组成,通过多根出油管与火焰筒上多个蒸发管的组合实现燃油的配给、雾化、油气混合和蒸发^[1]。

国内外学者对小型发动机蒸发管燃烧室的工作

性能开展了试验^[2-3]、仿真^[4-5]研究,并对燃烧室的性能进行了优化^[6]。针对燃烧室中不同构型的蒸发管,如直管型^[7-9]、 Γ 型^[10]和 T 型^[11]蒸发管开展了燃油雾化、蒸发性能的仿真或试验研究。但是对影响蒸发管燃烧室性能的关键零件燃油总管的研究却较少,主要偏向于总管内燃油的流动传热特性研究^[12],而较少关注加工对总管性能的影响。德国的 Fuchs 等^[13]通过对小型蒸发管燃烧室的多次试制和试验发现,燃油总管不均

收稿日期:2023-08-29 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:王良(1992),男,硕士,工程师。

引用格式:王良,陈彬,肖海,等.燃烧室刚性总管燃油流量特性设计改进[J].航空发动机,2025,51(1):77-83.WANG Liang, CHEN Bin, XIAO Hai, et al. Design improvement of a combustion chamber rigid fuel manifold flow characteristics[J]. Aeroengine, 2025, 51(1): 77-83.

匀性对蒸发管燃烧室的燃烧效率、出口温度分布不均匀性有较大的影响,并初步分析发现影响燃油总管流量不均匀性的主要因素有进油管位置、出油管位置、插入深度;Czarnecki等^[14]通过试验发现小型发动机燃油总管对加工技能要求高,且需要精细把控加工过程;谭锃等^[15]针对微型涡喷发动机燃烧室的喷油环(即燃油总管)设计了不等径喷油针的结构方案,以补偿总管内流动压力损失对流量不均匀性的影响。

本文研究的小型涡轮喷气航空发动机燃油总管的进油管、环状管体和出油管采用分段焊接的方式连接,总管流量试验结果表明,总管的总燃油流量与设计值偏差大于90%,燃油总管出油管的流量分布不均匀度高达96%。针对该问题,本文进行了深入分析,并进行了设计改进及试验验证。

1 总管结构及试验情况

1.1 总管结构

燃油总管包括2根进油管、环状管体和16根出油管,各部分均为薄壁圆管,选材为0Cr18Ni9不锈钢标准管材,燃油总管结构形式如图1所示。燃油总管的外轮廓尺寸为209 mm,2根进油管长度均为260 mm,出油管长度为27.5 mm,总管各部分管径规格和流通面积参数见表1,分析流通参数可知燃油总管在总管进口处节流。

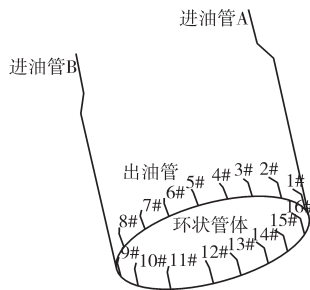


图1 燃油总管结构

表1 燃油总管各部分管径规格

位置	管径规格/mm	流通面积/mm ²
进油管入口段	2.50×0.25	6.28
进油管出口段	4.00×0.75	9.05
环状管体	5.0×0.5	12.57
出油管	1.26×0.21	8.87

燃油总管各部分的连接结构如图2所示。进油管入口段末端插入进油管出口段前端中,插入深度 $L_1=3$ mm,进油管出口段、出油管分别插入燃油总管的环状管体中,2种管体的设计插入深度 $L_2=L_3=0.5$ mm。

1.2 试验情况

1.2.1 试验方法

燃油总管性能试验在燃油总管试验器上进行,试

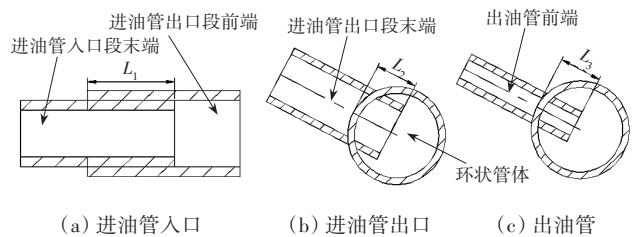


图2 燃油总管各部分连接结构

验器由总管试验平台、燃油系统、空气系统、抽风与油气分离系统、数据采集系统、电气控制系统等组成,可测量总管的燃油流量、不均匀度等参数,燃油总管试验器结构如图3所示。

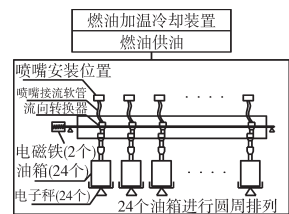


图3 燃油总管试验器结构

试验介质为RP-3航空煤油,试验温度为室温,燃油总管的2根进油管分别通过软管、三通与试验台上的供油管路连接,16根出油管与总管试验器上24个电子秤的油箱中任意的16个连接。

燃油总管流量分布不均匀度 δ_z 的计算式为

$$\delta_z = \frac{W_{f_{\max}} - W_{f_{\min}}}{W_{f_{\max}}} \quad (1)$$

式中: $W_{f_{\max}}$ 、 $W_{f_{\min}}$ 为16根出油管的最大、最小流量。

燃油总管流量特性的试验误差主要是电子秤的称量误差,对于本试验所采用的10 kg量程电子秤,其检定分度为 $e=1$ g,流量测量误差为 $\pm 0.01\%$ 。总管流量不均匀度的测量误差 δ_{δ_z} 由各出油管的最大流量测量误差 $\delta_{mi_{\max}}$ 和最小流量测量误差 $\delta_{mi_{\min}}$ 组成

$$\delta_{\delta_z} = \sqrt{\delta_{mi_{\max}}^2 + \delta_{mi_{\min}}^2} \quad (2)$$

在试验时通过控制电子秤的称量时间,确保最小流量电子秤上燃油总质量 $m_{\min} \geq 100$ g,从而使 $\delta_{mi_{\max}}$ 和 $\delta_{mi_{\min}}$ 小于1%,由此求得总管流量分布不均匀度的测量误差 $\delta_{\delta_z}=1.41\%$ 。

1.2.2 试验结果

燃油总管在不同供油压力下的流量及其分布不均匀度的试验结果与设计值对比如图4所示。从图中可见:(1)在相同燃油流量下,燃油总管供油压力比设计值高3.5~4.7倍;(2)在相同供油压力下,燃油总管的燃油流量仅为设计值的一半;(3)燃油总管不均匀度高达82%~96%,而为保证燃烧室周向温度差别尽量小,总管不均匀度的设计要求在10%左右。

基于总管燃油流量为2.5 kg/min状态的试验结果,

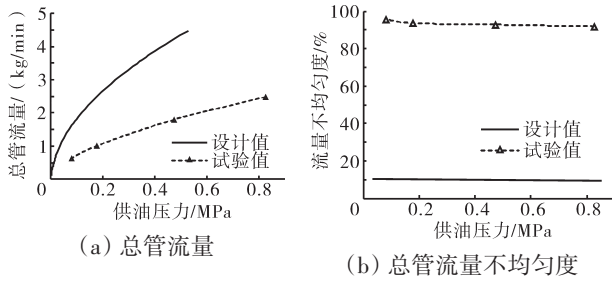


图 4 总管流量及其分布不均匀度试验结果与设计值对比

以 16 根出油管的平均流量为基准,绘制每根出油管流量相对于平均流量的相对偏差如图 5 所示。从图中可见,3#、11#和 16#位置出油管流量偏小,而 6#、14#等位置出油管流量偏大。

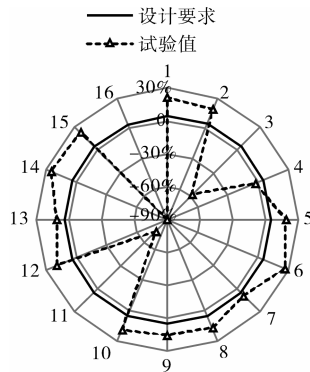
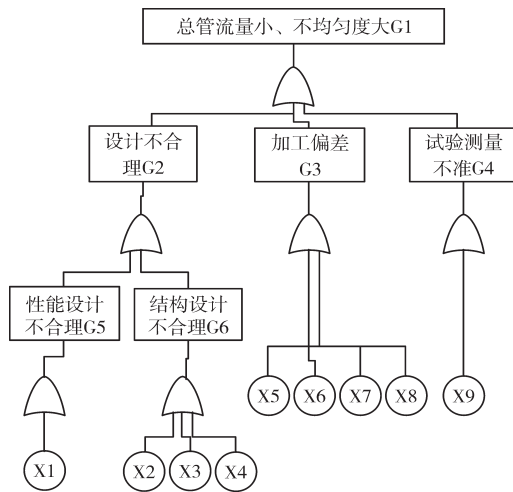


图 5 总管流量不均匀性

2 故障树建立与分析

2.1 故障树

根据故障现象及燃油总管的结构特征,采用演绎法逐层分解,建立燃油总管流量低、不均匀度大的故障树,如图 6 所示。



X1—总管各部分管径选取不当;X2—进出油管位置布置不合理;X3—总管各部分焊接装配方式不合理;X4—焊接工艺选取不合理;X5—焊接装配方式不规范;X6—总管内部表面质量差;X7—运输过程中总管变形;X8—焊料或异物渗入;X9—电子称量时间太短。

图 6 总管流量低、不均匀度大的故障树

2.2 故障分析

2.2.1 底事件 X1:总管各部分管径选取不当

导致燃油总管流量偏低的直接原因是总管各部分管径偏小。总管各部分管路采用标准规格的不锈钢管,根据 GB/T 3090-2020《不锈钢小直径无缝钢管》

和发动机总体对燃油总管的供油压力要求来设计,通常采用经验公式预估性能。为验证设计准确性,采用数值模拟方法,参照总管试验情况建立 3 维仿真模型,如图 7 所示。

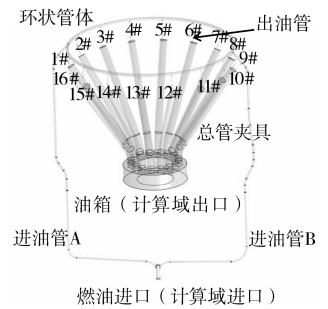
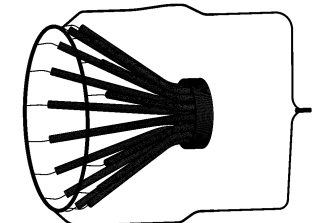
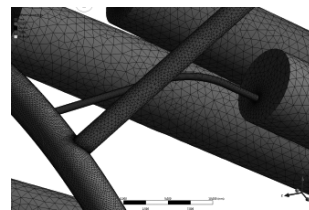


图 7 总管性能分析的仿真计算模型

对总管的仿真计算模型划分网格,在管路壁面附近、管路交接处、总管计算域进出口等关键区域进行网格加密,基准网格尺寸为 0.1~2.0 mm,网格数量为 620 万,基准网格划分结果如图 8 所示。在基准网格的基础上,分别对网格进行



(a) 总管网格划分



(b) 出油管网格



(c) 进口接头网格

图 8 基准网格划分结果

加密和加粗,获得 3 套网格,进行总管总流量的网格无关性分析,结果如图 9 所示。从图中可见,当网格数量多于 620 万时,总管流量基本不变。下文分析以 620 万网格划分尺度为准。

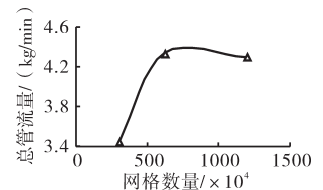


图 9 $\Delta P_i=0.53$ MPa 时网格无关性分析结果

采用商业软件中的分离、隐式、稳态求解器,Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型、标准壁面函数、2 阶迎风格式、SIMPLEC 算法求解。收敛标准为各方程残差小于 10^{-4} ,流量波动小于 1%。

仿真介质 RP-3 燃油密度为 779.6 kg/m^3 ,动力黏度为 $1.898 \times 10^{-3} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$ 。燃油总管入口边界为压力入口边界,入口压力按试验的供油压力给定,湍流强度为 5%,出口为压力出口,出口压力为大气压,总管进口和出口的水力直径按实际管径给定,壁面为无滑移绝热壁面。

总管流量特性仿真结果与设计值对比如图 10 所

示。总管流量不均匀性仿真结果与设计要求对比如图11所示。从图中可见,仿真计算得到在设计的总管各处管径下,总管流量与设计值的差别 $<5\%$,总管流量不均匀性比设计值还低,底事件X1可以被排除。

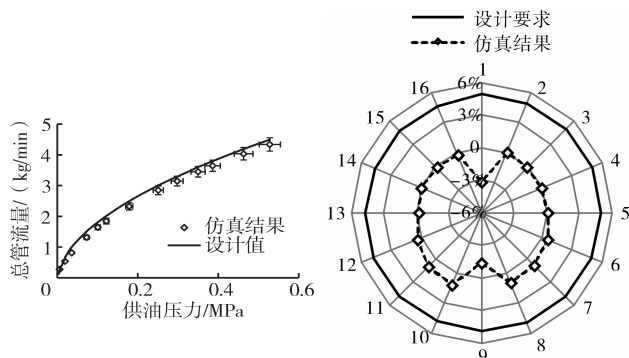


图10 总管流量特性曲线 图11 总管出油管流量偏差仿真结果 ($W_f=2.5 \text{ kg/min}$)

2.2.2 底事件X2:进、出油管位置布置不合理

由于燃油总管有2个进口和16个出口,不同位置总管出油管附近的流动情况不同,这可能影响总管上各个出油管的流量均匀性。但是从图11的仿真结果可以看出不同位置出油管的流量相差较小,不是造成总管不均匀度试验值过高的原因,底事件X2可以被排除。

2.2.3 底事件X3:总管各部分焊接装配方式不合理

燃油总管共有3类连接接口,都采用一根管道插入另一根管道并焊接固定的连接方式,其中进油管进口接口为单向连接,在进油管进口处节流,焊接装配方式对流量影响较小;进油管出口和出油管进口在环状管体上都属于三通连接形式,虽然节流在进油管出口和出油管进口,但是由于焊接装配方式不同,可能造成进油管出口和出油管进口与总管管体的装配情况各不相同或者与设计值偏差较大,既可能影响总管本身的总燃油流量,也可能影响燃油分布不均匀度。采用仿真的方法,对进油管出口和出油管进口在环状管体中因装配方式不合理而与设计值产生偏差的情况进行模拟,结果如图12所示。从图中可见,总管上进油管和出油管因装配方式不同而产生的偏差使总管流量减小15%,但是并未明显影响燃油分布不均匀度。由此可见底事件X3暂不能被排除。

2.2.4 底事件X4:焊接工艺选取不合理

目前燃油总管在进油管入口段接口、进油管出口段接口和出油管接口处均采用火焰钎焊的工艺焊接,火焰钎焊焊料直接与接口缝隙接触,可能在焊接过程

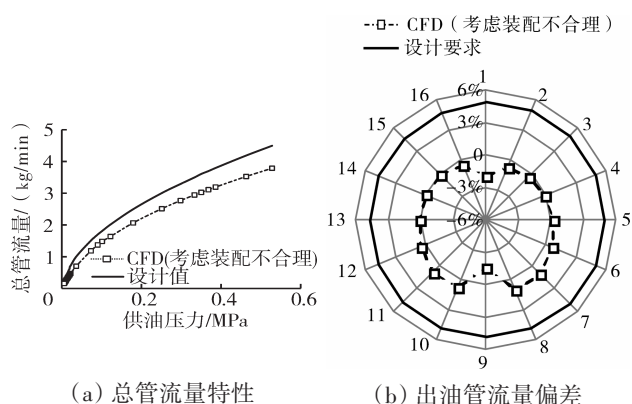


图12 考虑装配不合理时总管流量及出油管流量偏差仿真结果 ($W_f=2.5 \text{ kg/min}$)

中出现焊料向环状管体内渗入的情况,而焊料渗入后很难清洗干净,可能导致总管流量和均匀度发生变化。对试验的燃油总管进行剖切检查,结果如图13所示。从图中可见,采用火焰钎焊工艺加工的总管内表面多处还残留有难以处理的焊料,增加了流动的阻力。

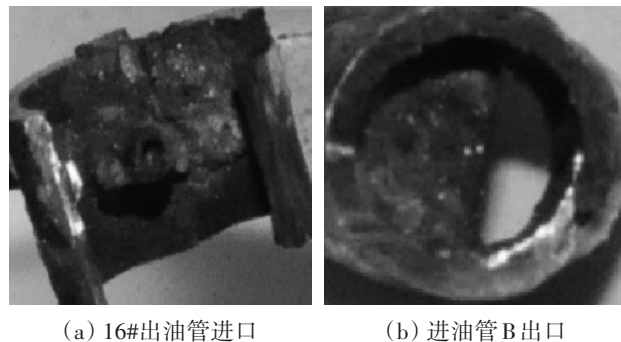


图13 总管剖切检查结果

采用数值仿真的方法对剖切检查所获取的总管各处装配方式的变化情况进行仿真,采用增加壁厚与沿程障碍物的方法模拟燃油总管对应位置焊料渗入的情况,结果如图14所示。从图中可见,仿真重现了

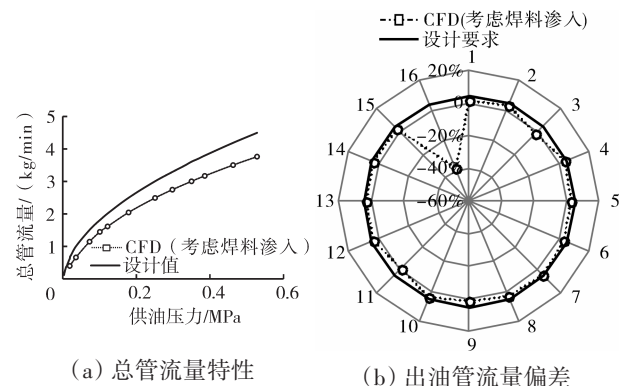


图14 考虑焊料渗入时总管流量特性及出油管流量偏差仿真结果 ($W_f=2.5 \text{ kg/min}$)

16#位置出油管油量偏小的问题,也证明焊料渗入会造成总管流量偏小。X4底事件不能被排除。

2.2.5 底事件 X5:焊接装配方式不规范

在总管剖切检查的过程中还发现,不同总管出油管、2根总管进油管在环状管体内的装配情况各自都有较大的差别,说明总管各部分的装配未被规范控制。这一方面是因为在设计时采取的控制总管插入深度的措施较少,另一方面是因为总管结构尺寸精细,设计成本低,难以精确控制。通过剖切观察并测量各处进油管出口、出油管进口在环状管体上的插入深度值,结果见表 2。从表中可见,进油管在环状管体中的插入深度比设计值深 2.0~2.5 mm,出油管的插入深度比设计值深 0.5~3.5 mm,3#和 11#出油管的插入深度横贯整个环状管体。结合底事件 X4 的分析和总管的试验结果可知,3#和 11#出油管流量不均匀度大,可能就是因为插入深度过深造成的。

表 2 不同位置进油管出口和出油管进口的插入深度

位置	插入深度/ mm	位置	插入深度/ mm
进油管 A 出口	3.0	出油管 4#~10#	1.0
进油管 B 出口	2.5	出油管 11#	4.0
出油管 1#~2#	1.0	出油管 12#~15#	1.0
出油管 3#	4.0	出油管 16#	2.5

采用数值仿真的方法,对部分总管出油管在环状管体中插入较深的情况进行模拟分析,各出油管的插入深度 < 4 mm 的情况按照对应计量结果处理,出油管插入深度达 4 mm 的方案按照出油管无法进油的方式处理。仿真结果如图 15 所示。从图中可见,考虑不同出油管插入深度不同后,仿真计算得到的总管不均匀性基本与试验值一致,底事件 X5 不能被排除。

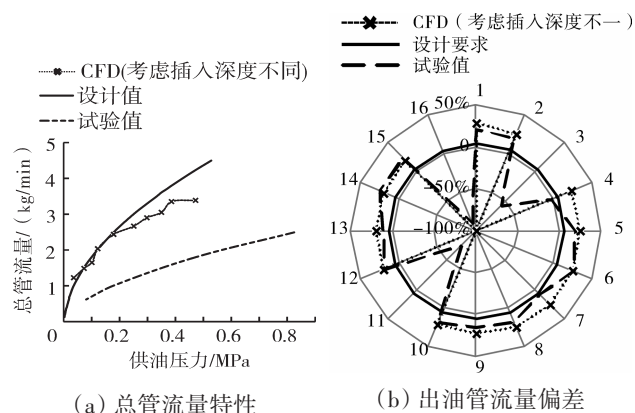


图 15 考虑插入深度不同时总管流量特性及出油管流量偏差仿真结果 ($W_f=2.5 \text{ kg/min}$)

2.2.6 底事件 X6:总管内表面质量差

总管流量低的另一个直接原因就是总管内壁粗糙,导致燃油流动性差。虽然国标要求标准管材可有不超过壁厚公差之半的轻微缺陷,但是考虑到焊料渗入对总管内壁造成的表面粗糙及型面的变化(图 13),总管内表面可能出现厚度为 0.3 mm 左右的焊料、毛刺等影响流动特性的异物。采用数值模拟的方法对燃油总管的流量特性进行仿真,结果如图 16 所示。从图中可见,考虑表面粗糙度后总管的流量与试验值基本一致,底事件 X6 不能被排除。

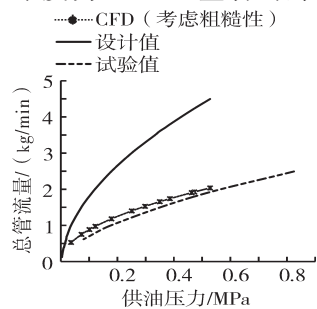


图 16 考虑内表面粗糙度时总管流量特性曲线仿真结果

2.2.7 底事件 X7:在运输/使用过程中总管变形

若总管发生严重变形,也可能会影响到总管的流量和不均匀性。但通过目视和游标卡尺对试验后的总管进行测量检查,未发现总管各处有明显的变形和尺寸变化,该底事件可以被排除。

2.2.8 底事件 X8:焊料或异物渗入

异物渗入本质上也是焊料渗入的一种,因为总管内部流道相对闭塞,在加工使用过程中难以避免焊料或异物的渗入,相关分析与底事件 X4 相同。底事件 X8 不能被排除。

2.2.9 底事件 X9:电子秤称量时间太短

总管尺寸小、供油压力低,当试验测量时间不够长,或者总管或试验台管路填充时间较长时,可能出现总管出口流量电子秤未能得到准确的流量数据现象。为此,在试验开始供油 1 min 后,开始测量燃油流量,称量前首先排空电子秤上油箱内的燃油,称量持续 5~10 min,供油压力越小称量时间越长。结果表明燃油总管的流量试验结果变化不大,该底事件可以被排除。

2.3 故障定位

通过对故障树底事件逐一排查分析,燃油总管流量偏小主要是因为总管管路的管壁粗糙、焊料渗入;总管流量不均匀度偏大主要是因为焊接装配方式不合理造成总管各处插入深度未统一、焊接工艺选取不当、焊接过程未严格控制造成焊料渗入管体导致局部

流通面积减小。

3 改进措施及验证

3.1 改进方法

通过燃油总管性能较差的故障定位情况,考虑到小型发动机对成本控制的要求,对燃油总管采取了如下设计改进措施。

(1)把火焰钎焊的工艺改为冷焊工艺,同时严格控制燃油总管加工过程,尽量避免毛刺、焊料渗入等影响管壁粗糙性。

(2)重新选取总管进油管 and 出油管管径,改进设计的燃油总管各部分管径规格见表3。适当增大进/出油管的节流管径,提高设计的冗余度以降低加工过程的影响。

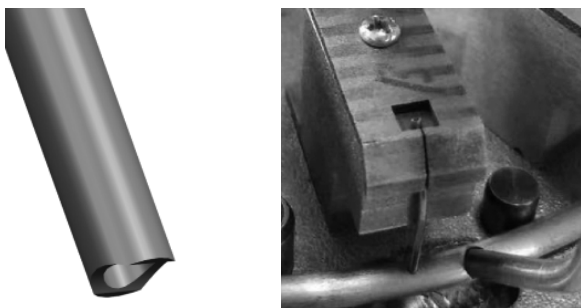
表3 改进设计的燃油总管各部分管径规格

位置	管径规格	流通面积/mm ²
进油管入口段	2.5×0.15	7.60
进油管出口段	3.6×0.60	9.05
环状管体	5.0×0.50	12.57
出油管	1.2×0.15	10.18

(3)优化焊接工装夹具,采用出油管高度定位的方法控制装配情况。

(4)对加工过程中的总管进行反复清洗、碱液浸泡、细金属丝捅塞等,尽量去除总管在焊接过程中出现的多余焊料。

(5)将总管进油管、出油管在总管管体上的配合面由直面改为圆弧面,通过采用曲面配合的方式防止出油管被管体堵塞,燃油总管改进设计如图17所示。



(a) 改进后的出油管/进油管 (b) 出油管焊接装配情况

图17 燃油总管改进设计

改进设计后,严格控制总管各部分的焊接过程,焊接加工前首先对各部分管体采用超声波清洗并进行防护防止异物进入,然后用砂纸对总管各部分接口

位置进行打磨,采用专用夹具对总管各处与总管管体的装配方式进行固定,以出油管上方为基准进行定位,采用助焊剂减少焊料的用量,并严格控制冷焊焊接过程以防止焊料渗入,焊接后及时去氧化皮打磨,并对总管各部分进行水煮和丙酮清洗。加工完成后开展总管堵塞试验,使烟气或者水从总管进油管吹入,检查总管各出油管烟气是否排除以及排量是否均匀。总管加工完成后封堵总管各处进出口以防止异物进入。

3.2 改进结果

改进后的总管流量特性、不同供油压差下的不均匀度和流量周向不均匀性试验结果与设计值和要求对比如图18、19所示。从图中可见,改进后的燃油总管流量特性与设计值之间的误差小于5%,不均匀度满足设计要求,总管流量不均匀性的分布与仿真计算结果规律相近。

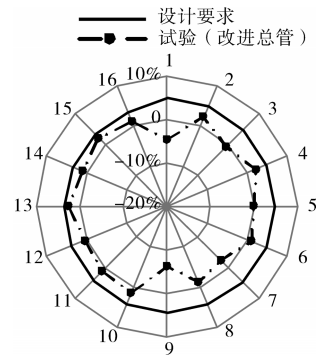


图18 改进的总管出油管流量偏差 ($W_f=2.8 \text{ kg/min}$)

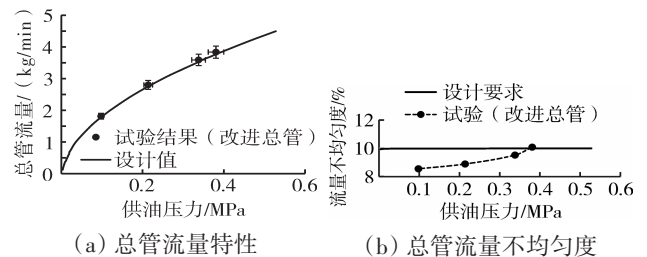


图19 改进的总管流量及其不均匀度特性试验结果与设计要求对比

4 结论

(1)总管燃油流量偏小的原因是管壁粗糙、焊料在整个管体内渗入和粘结管壁。

(2)燃油流量不均匀度偏大的原因是焊接装配方式不合理和焊料局部渗入管体造成堵塞。

(3)通过把总管进油管出口、出油管进口设计为圆弧配合面,并重新选取总管各部分的管径规格,改进焊接工艺,严格控制焊接加工过程,反复清洗并开展流通性检查,经试验验证,设计改进后的燃油总管性能满足设计要求。

参考文献:

- [1] 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,2016:55-281.
JIN Rushan, SUO Jianqin. Advanced gas turbine combustor[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016:55-281. (in Chinese)
- [2] 王启道,黄伟,丁国玉,等.某微型蒸发管燃烧室性能测试及数值研究[J].南华动力,2019(2):139-143.
WANG Qidao, HUANG Wei, DING Guoyu, et al. Performance test and numerical simulation on evaporator combustor for a micro-turbine engine[J]. Nanhua Aviation Power, 2019(2):139-143. (in Chinese)
- [3] Kim J, Kim H, Park P, et al. Performance test of metal 3D printed micro gas turbine engine combustor[J]. Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, 2019, 23(6):51-58.
- [4] 覃文隆,樊未军,张韬,等.微型涡喷发动机蒸发管性能测试及燃烧室数值模拟[J].航空动力学报,2012,27(4):861-867.
TAN Wenlong, FAN Weijun, ZHANG Tao, et al. Performance test of micro turbojet engine's evaporator and numerical simulation of the combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(4):861-867. (in Chinese)
- [5] 郭渊,蒋雪辉,郑严.微型涡轮喷气发动机蒸发管式燃烧室数值模拟[J].战术导弹技术,2011(1):115-119.
GUO Yuan, JIANG Xuehui, ZHENG Yan. Numerical simulation for the combustor with vaporizing tube of micro turbojet engine[J]. Tactical Missile Technology, 2011(1):115-119. (in Chinese)
- [6] 李超.微型蒸发管燃烧室燃油冲击雾化蒸发的分析方法研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
LI Chao. Study on the analysis method of fuel impingement atomization and evaporation in micro-evaporator combustor[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [7] 张群,黎超超,陈溯,等.微型燃烧室蒸发管燃油雾化和蒸发特性数值研究[J].航空发动机,2019,45(1):1-5.
ZHANG Qun, LI Chaochao, CHEN Su, et al. Numerical study on fuel atomization and evaporation characteristics of evaporative tubes in micro-combustor[J]. Aeroengine, 2019, 45(1):1-5. (in Chinese)
- [8] Olivier A J. An experimental and numerical investigation of vaporizer tubes associated with micro gas turbines[D]. South Africa: Stellenbosch University, 2015.
- [9] 熊庆荣,雷雨冰,黄国平,等.厘米级微型蒸发管式燃烧室性能实验研究[J].航空动力学报,2007,22(5):733-738.
XIONG Qingrong, LEI Yubing, HUANG Guoping, et al. Experimental research on a centimeter-scale micro combustor with vaporizing tube[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(5):733-738. (in Chinese)
- [10] 阮昌龙,许全宏,孙东文,等.蒸发管蒸发及雾化特性[J].航空动力学报,2012,27(10):2249-2253.
RUAN Changlong, XU Quanhong, SUN Dongwen, et al. Vaporization and spray characteristics of vaporizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(10):2249-2253. (in Chinese)
- [11] 朱菁,郭新华,林宇震,等.微小T型蒸发管蒸发率实验[J].航空动力学报,2007,22(8):1273-1278.
ZHU Jing, GUO Xinhua, LIN Yuzhen, et al. Experimental research on vaporization rate of micro T-vaporizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8):1273-1278. (in Chinese)
- [12] 高栋,李锋,尚守堂,等.航空发动机主燃烧室燃油总管流动换热特性研究[J].航空发动机,2015,41(6):22-27.
GAO Dong, LI Feng, SHANG Shoutang, et al. Investigation on flow and heat transfer characteristics of fuel manifold for aeroengine combustor[J]. Aeroengine, 2015, 41(6):22-27. (in Chinese)
- [13] Fuchs F, Vitus M, Nicolas N, et al. Challenges in designing very small jet engines - fuel distribution and atomization[C]//16th International Symposium on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery. Hawaii: ASME, 2016:1-8.
- [14] Czarnecki M O, Woloszyn M T. Preliminary research of microgasturbine injection ring[J]. Journal of KONES, 2010, 17(4):118-122.
- [15] 谭锬,王云,张飞,等.微型涡喷发动机喷油环优化设计[J].航空工程进展,2018,9(3):382-387.
TAN Kun, WANG Yun, ZHANG Fei, et al. Optimum design of injection ring for micro-turbojet engine[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2018, 9(3):382-387. (in Chinese)

(编辑:刘 静)