

某涡轴发动机起动不成功分析

蔡建兵¹, 李建华¹, 钟建平¹, 王 旭¹, 龙继平²

(1. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002;

2. 中国航空工业集团公司 中国南方航空工业(集团)有限公司, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 对某型发动机外场起动不成功试验数据进行分析, 并通过燃油喷嘴低油压雾化试验及整机起动时的温度场测量验证, 确认燃油喷嘴喷口积炭后, 燃油喷嘴喷雾锥角减少, 燃油雾化质量恶化, 直接影响到发动机起动时火焰联焰的可靠性, 对发动机起动性能产生较大影响。涡流器插入深度对涡流器出口喷雾的部件研究试验结果显示: 插入深度对涡流器出口喷雾无影响; 整机模拟外场使用结果表明: 发动机在不大于 30% 功率的低状态长期使用, 离心式燃油喷嘴容易出现积炭。

关 键 词: 燃油喷嘴; 喷嘴积炭; 燃油喷雾; 火焰联焰; 模拟外场

中图分类号: V233.7

文献标志码: A

Analysis of a turboshaft engine starting failure

CAI Jian-bing¹, LI Jian-hua¹, ZHONG Jian-ping¹,
WANG Xu¹, LONG Ji-ping²

(1. China Aviation Powerplant Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;

2. China National South Aviation Industry (Group) Company Limited,
Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: The test data of an engine outfield starting failure were analyzed. Also, the temperature field during startup was measured and the low oil pressure spray test of fuel jet nozzle was conducted. Finally the fuel jet nozzle carbon deposits were validated to decrease the fuel nozzle spray cone angle and deteriorate the quality of fuel spray, affecting the reliability of the cross ignition directly in engine starting and yielding a great impact on engine starting performance. The parts test results show that the insert depth of swirler has no effect on swirler outlet spray. The utilization results of engine simulation outfield show that when the engine is operated for a long time under low state of power not greater than 30%, the centrifugal-type fuel jet nozzle is prone to carbon deposits.

Key words: fuel jet nozzle; jet nozzle carbon deposits; fuel spray; cross ignition; simulated outfield

航空燃气涡轴发动机的起动是一个非常复杂的物理过程, 涉及到气体热力学、燃烧学、自动控制、传热学及材料学等多门学科。影响发动机快速可靠起动的因素有很多, 其中燃油雾化质量的好

坏是保证发动机快速可靠起动的关键因素。在发动机燃油喷嘴类型及结构尺寸确定的情况下, 燃油燃烧与燃油雾化质量密切相关, 雾状油珠越细、表面积越大, 越有利于充分燃烧^[1-3]。

本文通过分析某涡轴发动机外场使用中出现的起动不成功数据初步判断,经部件及整机试验验证,确认了发动机起动不成功的原因;对燃油喷嘴喷口积炭的机理进行了初步研究,并提出发动机外场使用维护建议。

1 某涡轴发动机起动工作过程

燃气发生器转速 n_g (实际转速相对设计转速的比值)由静止状态提高到地面慢车状态,这一过程称为涡轴发动机起动过程.某型涡轴发动机采用起动发电机起动,起动过程分为以下 4 个阶段^[4]:

1) 飞行员按下起动按钮后,起动发电机带动燃气发生器转子转动,同时点火系统投入工作、开始打火.一定时间(一般设置为 20 s)后,点火系统停止打火.

2) 当 n_g 达到一定转速时,燃油与控制系统按给定的燃油流量向发动机提供燃油.

3) 燃烧室着火后,燃气涡轮投入做功,与起动发电机共同带动燃气发生器转动并使其加速.

4) 起动发电机按给定的时间(一般设置为 25 s)带动燃气发生器转子达到一定转速后脱开.此后,单独由燃气涡轮带动压气机及其他附件转动并使发动机加速至地面慢车状态.

2 试验现象及数据初步分析

某涡轴发动机在海平面、大气温度为 -2°C 条件下冷机起动时,出现起动不成功现象,但同型其他发动机均成功起动至地面慢车状态.

根据外场录取的数据,飞行员按下起动按钮 25 s 后, n_g 最高仅至 37%,这时起动发电机脱开,由于燃气涡轮功不足以带动压气机及其他附件转动, n_g 下掉至 33%,飞行员关车.发动机起动不成功的试验曲线见图 1,由图 1 及以往正常起动曲线相比,可得到以下结论:

1) 起动不成功发动机的着火时间为 5 s 左右,着火转速为 20%左右,与其他起动正常发动机一致,这表明起动发电机带转能力、发动机的阻力矩特性与其他起动正常发动机相当.同时也表明发动机点火系统工作正常.

2) 发动机着火 4 s 后,涡轮级间燃气温度 t_{445} (燃气实际温度相对起飞状态温度的比值)上升较慢(上升速率为 $30^\circ\text{C}/\text{s}$),随后, t_{445} 上升较快(上升速率达到 $100^\circ\text{C}/\text{s}$ 左右).其他起动正常发动机点火后 t_{445} 急剧上升(上升速率达到 $100^\circ\text{C}/\text{s}$ 左右).

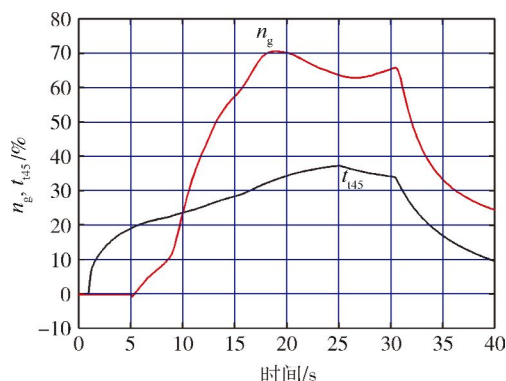


图 1 发动机起动不成功试验曲线

Fig. 1 Test curve of engine starting failure

试验后,采用内窥镜对起动不成功发动机及另外两台起动成功发动机(编号为 1066 和 1070)的离心式燃油喷嘴进行了检查,结果如下:

1) 起动不成功发动机的绝大部分燃油喷嘴喷口表面均有积炭,喷口积炭最严重的喷嘴见图 2.

2) 其他两台发动机的部分燃油喷嘴喷口表面稍有积炭,喷口积炭的喷嘴分别见图 3、图 4.

由此可初步认为,起动不成功发动机着火后, t_{445} 上升缓慢,燃气涡轮做功能力不强, n_g 上升缓慢.当起动时间达到起动发电机给定的带转时间后,起动发电机脱开,由于 n_g 只达到 37%,偏低(发动机正常起动时,起动发电机脱开时对应的 n_g 为 50%左右),此时燃气涡轮功不足以带动压气机及发动机附件转动,转速下掉,出现起动不成功. t_{445} 上升缓慢则可能与发动机着火后,燃油喷嘴喷出的燃油雾化质量不好导致火焰联焰滞后有关^[5].

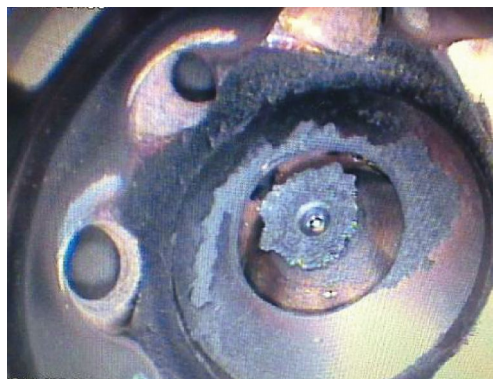


图 2 起动不成功发动机燃油喷嘴积炭图

Fig. 2 Picture of fuel jet nozzle carbon deposits on engine with starting failure

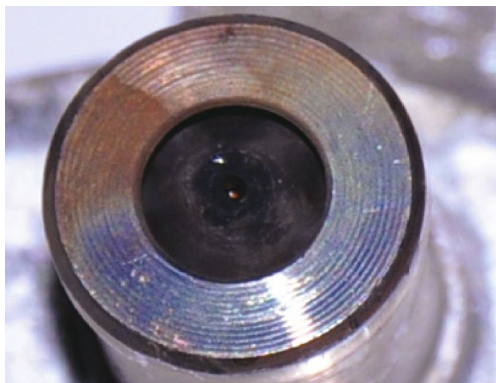


图3 1066号发动机起动燃油喷嘴积炭图
Fig. 3 Picture of fuel jet nozzle carbon deposits on
1066 # engine

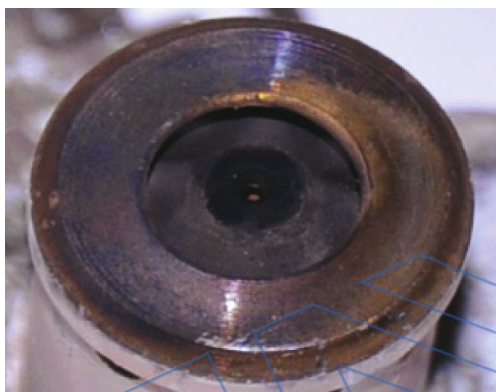


图4 1070号发动机起动燃油喷嘴积炭图
Fig. 4 Picture of fuel jet nozzle carbon deposits on
1070 # engine

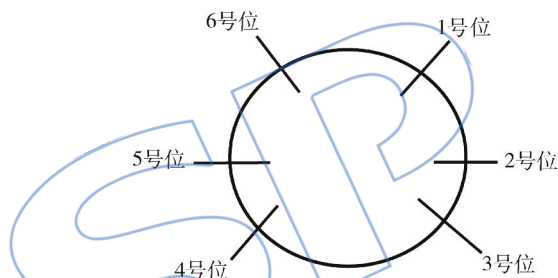


图5 单支热电偶布置
Fig. 5 Single thermocouple layout

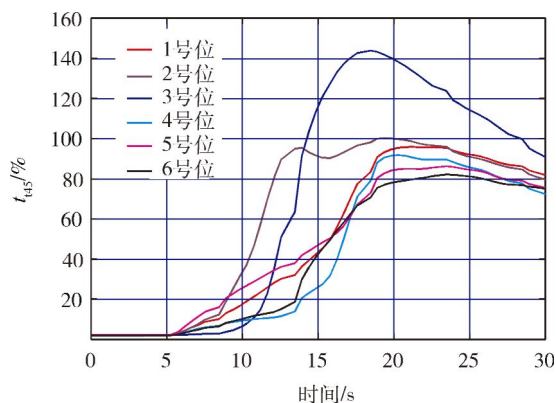


图6 燃油喷嘴未清洗时的燃气温度分布曲线
Fig. 6 Gas temperature distribution curve without
cleaning fuel jet nozzle

3 试验验证及结果分析

3.1 整机温度场测量

为验证燃油喷嘴喷口积炭对发动机起动性能是否有影响,将起动不成功发动机的燃油喷嘴拆下,未经任何处理,换装至该型号另一台发动机(编号为1018)上进行验证,燃油喷嘴装机顺序与原起动不成功发动机的相同.为检查发动机起动时的温度场情况,采用6支单支热电偶测量涡轮级间等环面燃气温度场,热电偶布置(顺气流方向看)见图5.1018号发动机在台架状态、大气温度为 3°C 条件下完成了验证试验,起动中,发动机最高 n_g 至36%,因起动发电机脱开后 n_g 出现下掉,车台操作人员控制发动机停车.发动机在起动中的 t_{t45} 温度分布曲线见图6.

1018号发动机换装起动不成功,由图6可得到以下结论:

1) 发动机着火后,1号、2号、3号和5号热电

偶测得的燃气温度急剧上升.

曲线中,3号位的燃气温度最高,分析认为,发动机点火时,靠近3号位(附近有点火电嘴)的燃油喷嘴最先被点燃,同时燃烧室上部的燃油喷嘴由于燃油总管填充时间差的原因,喷嘴喷出的燃油以颗粒状形式滴入燃烧室下部并参加燃烧,使得3号位的燃气温度最高.

2) 4号位、6号位热电偶测得的燃气温度上升缓慢,4s后燃气温度才急剧上升.

试验结果表明,发动机着火4s后燃烧室内的火焰才联焰成功,燃油喷嘴喷口积炭对燃烧室内的火焰联焰有影响^[6-7].

3.2 部件试验

为检查喷口积炭的燃油喷嘴在低油压条件下的燃油雾化质量情况,燃油喷嘴在完成整机验证试验后未做清洗,接着在部件试验台上完成了低油压雾化试验.部件试验中,燃油喷嘴前的燃油相对压力分别为0.02,0.04,0.08 MPa和0.10 MPa,其中,燃油相对压力为0.08 MPa为发动机着火时对应的燃油喷嘴前燃油压力.完成上述试

验后,将燃油喷嘴喷口处的积炭清洗干净,在同一部件试验台按上述燃油相对压力重复进行了燃油喷嘴低油压雾化试验.燃油喷嘴在清洗前、后的雾

化试验结果见表 1,其中燃油喷嘴在相对压力为 0.08 MPa,清洗前后的雾化试验结果见图 7 和图 8.

表 1 燃油喷嘴低油压雾化试验

Table 1 Low pressure spray test of fuel jet nozzle

燃油喷嘴前的燃油相对压力/MPa	燃油喷嘴清洗前	燃油喷嘴清洗后
0.02	线状流油	有油泡,油泡直径约 $\phi 4$ mm
0.06	滴油,雾化质量差;靠外环一侧无油	油泡下部破裂(油泡上部形成伞状油雾锥)
0.08	燃油雾化质量差;靠外环一侧无油	油雾锥形成,雾化良好
0.10	燃油雾化质量差;靠外环 1/4 扇面无油	油雾锥形成,雾化良好



图 7 清洗前喷嘴在相对压力为 0.08 MPa 时的雾化结果

Fig. 7 Fuel nozzle spray test result at relative pressure of 0.08 MPa before cleaning fuel jet nozzle



图 8 清洗后喷嘴在相对压力为 0.08 MPa 时的雾化结果

Fig. 8 Fuel nozzle spray test result at relative pressure of 0.08 MPa after cleaning fuel jet nozzle

由表 1、图 7 及图 8 中的试验结果可知,燃油喷嘴喷口某处积炭后,破坏了喷嘴出口处伞状油

膜的形成,从而不能形成完整有效的伞状油膜,使得燃油雾化质量恶化^[8-9].

4 燃油喷嘴清洗后的整机试验验证

为检查燃油喷嘴喷口积炭清除后对发动机起动性能的影响情况,将喷口积炭得到清除的燃油喷嘴重新装至 1018 号发动机上进行验证试验,燃油喷嘴装机顺序与原起动不成功发动机相同.

1018 号发动机在台架状态、大气温度为 4℃、同一个试车台条件下完成了验证试验.试验中,仍采用上次试验的 6 支单支热电偶测量涡轮级间燃气温度场,发动机顺利起动至地面慢车状态.发动机在起动中的 t_{45} 温度分布曲线见图 9.

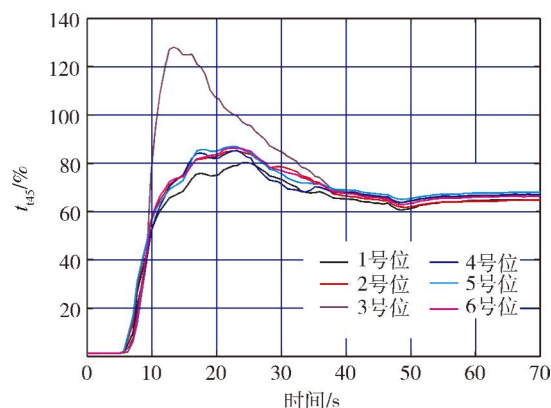


图 9 燃油喷嘴清洗后的燃气温度分布曲线

Fig. 9 Gas temperature distribution curve after cleaning fuel jet nozzle

试验结果表明,发动机着火后,所有 6 支单支热电偶测得的燃气温度均急剧上升,未再出现燃气温度上升缓慢的现象.

此外,将该清洗后的燃油喷嘴重新装至外场原起动不成功的发动机上,该发动机先后在大气温度为 $-2 \sim 38$ ℃ 条件下完成了起动,均顺利起

动至地面慢车状态,未再出现起动不成功现象。

5 燃油喷嘴喷口积炭机理初步研究

5.1 喷嘴插入涡流器深度对喷雾影响的部件

验证试验

采用与外场起动不成功发动机相同状态的单个燃油喷嘴和涡流器在部件试验台进行了喷嘴插入涡流器深度的雾化影响验证试验^[10-11],试验件燃油喷嘴号为10-5-21,涡流器号为06-1-34.试验中,燃油喷嘴前供油相对压力为0.2 MPa,燃油流

量为1.25 g/s,涡流器空气流量为2.47 g/s,喷嘴插入涡流器按3种深度:第1种是设计深度(取值为A);第2种是134%设计深度;第3种是66%设计深度。

试验结果表明:在3种插入深度下,涡流器出口喷雾情况一致,见图10;但3种状态下,燃油与助雾化气流所形成的油雾均会打在喷口端面上,附着喷口端面的燃油,在低状态燃烧不充分时,容易形成积炭^[12-13]。

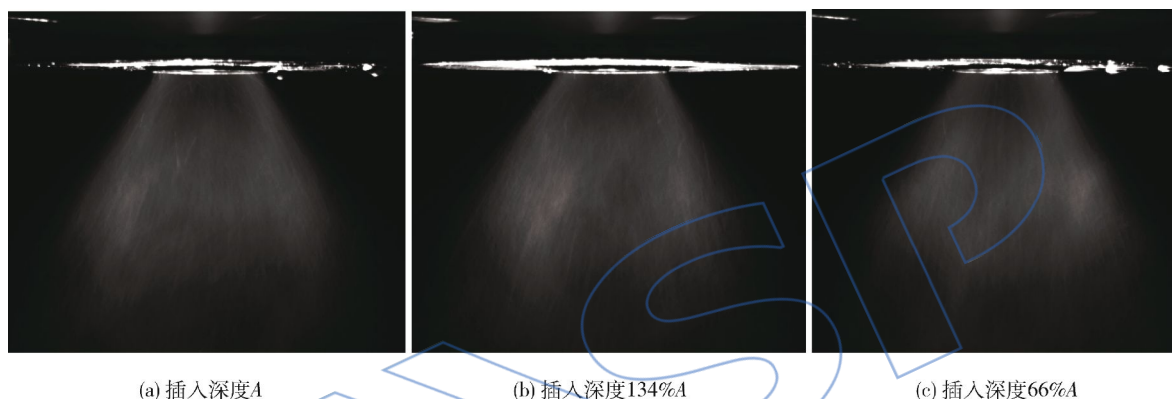


图10 燃油喷嘴不同插入深度的喷雾试验
Fig. 10 Spray test at different insert depths of fuel jet nozzle

5.2 发动机模拟外场使用状态的整机验证

为验证燃油喷嘴积炭形成的机理,采用了该型号另一台发动机(1024号)模拟外场使用谱进行了燃油喷嘴积炭验证试验.参照发动机在外场的使用方法,确定了积炭模拟验证试验程序:每阶段试验时间为1h,每阶段试验中,发动机分别在地面慢车状态(对应8%功率)工作5min,空中慢车状态(对应10%功率)工作5min,30%功率状态工作10min,20%功率状态工作15min,15%功率状态工作15min,空中慢车状态工作5min及地面慢车状态工作5min^[14-15]。

试验结果表明:发动机完成10个阶段试验后,喷口端面开始出现积炭;在此基础上又完成8个阶段试验后,喷口端面积炭严重,喷口端面的积炭与外场起动不成功发动机出现的积炭基本一致。

6 结 论

1) 燃油喷嘴喷口积炭后,燃油喷嘴喷雾锥角减少,燃油雾化质量恶化,直接影响到发动机起动时火焰联焰的可靠性,对发动机起动性能产生较大影响。

2) 发动机在不大于30%功率的低状态长期使用,离心式燃油喷嘴容易出现积炭。

3) 针对发动机在外场使用中出现的喷口积炭现象,为确保发动机可靠使用,建议发动机在外场出现起动不成功现象后,用内窥镜检查燃油喷嘴喷口积炭情况,若喷口积炭较多,外场按使用维护手册中的规定程序清洗燃油喷嘴。

参考文献:

- [1] 彭泽琰,杜声同,郭秉衡.航空燃气轮机原理[M].北京:国防工业出版社,1989.
- [2] 廉筱纯,吴虎.航空发动机原理[M].西安:西北工业大学出版社,2005.
- [3] 金如山.航空燃气轮机燃烧室[M].北京:宇航出版社,1985.
- [4] 蔡建兵,尹泽勇,熊焰,等.一种确定燃气涡轮轴发动机起动最小所需扭矩的工程方法[J].航空动力学报,2005,20(5):736-739.
CAI Jianbing, YIN Zeyong, XIONG Yan, et al. An engineering method of determining turboshaft engine minimum required torque for starting[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 736-739. (in Chinese)
- [5] 陈锐,周彤,顾铭企.某型发动机主燃烧室积炭的排除[J].航空发动机,1996,22(3):16-20.

- CHEN Rui, ZHOU Tong, GU Mingqi. Elimating the coking of engine's main chamber[J]. Aeroengine, 1996, 22(3):16-20. (in Chinese)
- [6] 王旭全. 积炭对发动机性能的影响[J]. 黑龙江交通科技, 2008(5):75-76.
- WANG Xuquan. Carbon accumulation in the engine as well as its impact on the engine performance[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2008(5):75-76. (in Chinese)
- [7] 黄艳斐, 朱岳麟, 熊常健, 等. 航空发动机喷嘴结焦积炭的性质[J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37(6):753-756.
- HUANG Yanfei, ZHU Yuelin, XIONG Changjian, et al. Coking properties of aircraft engines' nozzles[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 37(6):753-756. (in Chinese)
- [8] 甘晓华. 航空燃气轮机燃油喷嘴技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [9] 杨立军, 葛明和, 张向阳, 等. 喷口长度对离心喷嘴雾化特性的影响[J]. 推进技术, 2005, 26(3):209-214.
- YANG Lijun, GE Minghe, ZHANG Xiangyang, et al. Effects of spout length on spray characteristic of swirl injector[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(3):209-214. (in Chinese)
- [10] 王宏明, 全中, 甘晓华. 燃油喷嘴对燃烧性能的控制研究[J]. 推进技术, 1991, 12(6):36-41.
- WANG Hongming, QUAN Zhong, GAN Xiaohua. An investigation on fuel nozzles on combustion performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 1991, 12(6):36-41. (in Chinese)
- [11] 陈俊, 吉洪湖, 张宝诚. 双路离心喷嘴雾化特性的试验[J]. 航空动力学报, 2010, 20(4):774-779.
- CHEN Jun, JI Honghu, ZHANG Baocheng. Experimental investigation of spray characteristics of a double line pressure-swirl atomizer[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 20(4):774-779. (in Chinese)
- [12] 刘红普, 唐建生. 发动机热浴现象对喷油器积炭的影响[J]. 农业装备与车辆工程, 2007, 45(6):41-43.
- LIU Hongpu, TANG Jiansheng. Effect of engine "hot-bath" phenomenon to carbon deposit of fuel injector[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2007, 45(6):41-43. (in Chinese)
- [13] 侯晓春, 季鹤鸣, 刘庆国. 高性能航空燃气轮机燃烧技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [14] Chen A Y, Dang L. Characterization of supercritical JP-7's heat transfer and coking properties[R]. AIAA-2002-0005, 2002.
- [15] Ren Y, Mahinpey N, Freitag N. Kinetic model for the combustion of coke derived at different coking temperatures[J]. Energy and Fuels, 2007, 21(1):82-87.