

某型航空涡轴发动机吞砂试验研究

陈 岭, 刘知理, 刘引峰

(中国航发湖南动力机械研究所, 湖南株洲 412002)

摘要: 沙尘环境是航空发动机事故中常见且重要的诱发环境, 因此, 吞砂试验是新型发动机摸底和定型的重要试验项目。根据 GJB 242-1987 相关要求, 通过设计投砂装置模拟真实沙尘环境, 对某型航空涡轴发动机进行地面吞砂试验。试验结果表明: 随着吞砂时间的增加, 发动机功率衰减, 耗油率增加, 燃气涡轮出口总温有所提高; 发动机性能在吞砂前 2 h 变化速率较快, 随吞砂时间增加变化速率放缓。

关键词: 吞砂试验; 涡轴发动机; 投砂装置; 发动机性能; 航空发动机

中图分类号: V241.06

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.06.015

Study on Sandswallow Test of an Aviation Turboshaft Engine

CHEN Ling, LIU Zhi-li, LIU Yin-feng

(AECC Hunan Powerplant Research Institute, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: Sand dust environment is a common and important induced environment in aeroengine accidents. Therefore, sandswallow test is an important test project for knowing the real situation and finalizing the design of new engine. According to the requirements of GJB 242-1987, a sand swallow test was carried out on the ground of an aviation turboshaft engine by designing a sand throwing device to simulate the real sand dust environment. The test results show that with the increase of sand swallowing time, the engine power decreases, the fuel consumption rate increases, and the total temperature of gas turbine outlet increases. The engine performance changed rapidly 2 hours before sand swallowing, and slowed down with the increase of sand swallowing time.

Key words: sandswallow test; turboshaft engine; sand throwing device; engine performance; aeroengine

0 引言

直升机在起降或低空飞行时, 受旋翼“下洗流”的影响, 地面颗粒被大量吹起并悬浮于空气中, 使发动机处于沙尘包围中, 沙尘易被发动机吸入, 造成发动机内部流道磨损, 引起其性能恶化、寿命衰减、甚至影响飞行安全^[1]。GJB242-1987 规定, 吞砂试验是新型发动机摸底和定型的重要试验项目之一。

早在 30 年前, 美国 GE 和英国 RR 等公司进行了 TF34、CF-6 和奥林巴斯 593 等型号发动机的吞砂试验研究^[2]。如 M. G. Dunn 等利用 2 台 IF33 涡扇发动机和 J57 涡轮喷气发动机, 在不同设计试验装置模拟的尘埃环境下进行试验, 测得试验后压比、燃气涡轮排气温度和耗油率均恶化, 在高海拔情况下容易发

生喘振和熄火。近年 Sebastien Wylie 等^[3]对典型的高压涡轮叶片冷却气掺入火山灰, 利用试验确定了灰样阈值温度、颗粒大小分布、叶片金属温度、灰样成分及冷却膜孔内的压比; Adel Ghenaïet^[4]对涡轮发动机风扇吸收的颗粒进行建模, 大量的粒子在前缘和后缘和压力面附近撞击, 导致从根到尖的前缘和后缘受到明显侵蚀, 高侵蚀区域占据近 3/4 的叶片高度。

国内开展发动机吞砂环境试验起步较晚, 主要研究成果为沙尘环境对粒子分离器的影响规律。李洁琼^[5]通过所设计的 3 维可调粒子分离器模型进行系统的性能试验研究, 获得主流流量、压比、进口马赫数、轴向位置、径向位置、粒子分离器型面、粒径大小和粒子浓度变化对分离效率的影响规律。近年来也开展了一系列发动机吞砂试验, 如马昌^[6]介绍了 1 种吞砂试验

收稿日期: 2018-01-21 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 陈岭(1987), 男, 硕士, 从事航空发动机整机试验工作; E-mail: 258194226@qq.com。

引用格式: 陈岭, 刘知理, 刘引峰. 某型航空涡轴发动机吞砂试验研究[J]. 航空发动机, 2018, 44(6): 79-82. CHEN Ling, LIU Zhili, LIU Yin-feng. Study on sandswallow test of an aviation turboshaft engine[J]. Aeroengine, 2018, 44(6): 79-82.

方法,介绍吞砂设备、试验用砂配比、试车程序等,并依据试验结果对试验方法进行评价。

虽然对吞砂试验有了一定的经验与技术积累,但还远远不够。本文针对军用航空发动机实际需求,根据 GJB 241、GJB 242 及相关资料,进行吞砂试验研究^[7-9]。

1 试验要求

国家军用标准 GJB242-1987 中要求涡轴发动机应进行吞砂试验。根据这一要求及《某型涡轴发动机型号规范》规定,本次试验用砂的粒度分配^[10-12]要求见表 1;发动机包括所有附件在内,在空气含砂尘浓度为 0.053 g/m^3 的地面环境下^[12],应能在规定的砂尘浓度及最大连续状态下工作至少 10 h,完成规定的试验,试验过程中发动机不能熄火和发生因喘振导致的停车;最后进行性能检查,换算到海平面、静止和标准大气条件下,最大连续状态功率损失不大于 10%,单位燃油消耗量增加不超过 7.5%;同时发动机能够完成功率变换。性能检查后将发动机进行足够的分解,以便进行检查,在试验中未出现损伤或者有害的擦伤,性能未恶化,燃气流路的零件未损坏,则认为满意完成试验。

表 1 砂尘的粒度分配

粒度尺寸 / μm	数量 /%	粒度尺寸 / μm	数量 /%
1000	100	200	46~50
900	98~99	125	18~22
600	93~97	75	3~7
400	82~86		

注:数量为小于粒度尺寸的颗粒质量分数。

2 试验设备

2.1 试验对象

试验对象为某型涡轴发动机,由粒子分离器、压气机、燃烧室、燃气涡轮、动力涡轮及附件传动机匣组件等组成。

2.2 投砂装置

投砂装置用于向发动机投放试验粗砂和试验细砂,模拟发动机在实际使用中吸入砂尘的状态,投砂装置主要由电机、混合器、分配器和环形管(包含喷口及反射器)等零部件组成,其结构如图 1、2 所示。

通过环形管上的隔壁、喷口和反射器使进入发动机进口截面的砂尘浓度和分散性均匀分布。投砂装置

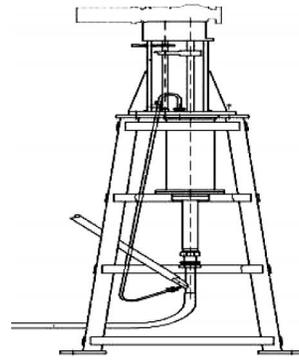


图 1 投砂装置

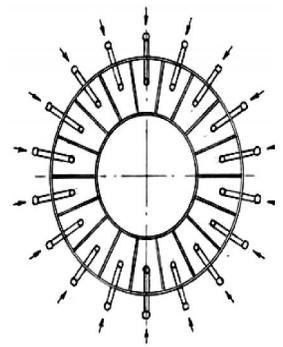


图 2 投砂环形喷管

使用高压气将砂尘打入发动机。设计时尽量模拟砂尘在真实环境中的状态,保证试验模拟环境和自然砂尘环境差异不大。投砂量取决于电机转速,电机通过减速器带动量筒丝杆,与气源输出压力大小无关。在试验过程中投砂装置电机工作转速恒定,设定电机转速后投砂流量保持不变。经验证:投砂量与丝杆转速成以下线性关系

$$G_n = 0.116N_x \quad (1)$$

$$N_d = 4N_x \quad (2)$$

式中: G_n 为投砂流量, g/s ; N_x 为丝杆转速, r/min ; N_d 为电机转速, r/min 。

因此,只要调节投砂装置电机转速,即可保证吞砂试验所需供砂量。

3 试验程序及用砂确定

3.1 试验程序

根据试验技术要求,先进行性能录取试验,然后进行吞砂试验,每小时为 1 个阶段,每 2 个阶段试验结束后依次进行孔探仪检查、发动机清洗及性能录取,每阶段试验程序如图 3 所示。

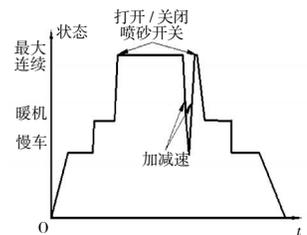


图 3 发动机试验程序

3.2 试验用砂量确定

根据当前大气压力 p , 温度及流量得到当前的空气密度 ρ ^[6-9]

$$\rho = 1.225 \times \frac{p}{101325} \times \frac{288.15}{273.15+T} \quad (3)$$

每次性能校准时实际测量空气流量为 W_{a1} , 则最大连续的体积流量为

$$q_v = \frac{W_{al}}{\rho} \quad (4)$$

吞砂流量为

$$m = q_v \times \text{砂浓度} \times 3600 \quad (5)$$

数据记录及计算结果见表 2。

表 2 试验用砂确定

参数	试验阶段				
	1~2	3~4	5~6	7~8	9~10
$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
$W_{al}/(\text{kg}/\text{s})$	W_{a1}	W_{a2}	W_{a3}	W_{a4}	W_{a5}
$q_v/(\text{m}^3/\text{s})$	4.09	3.92	3.88	3.87	3.83
$m/(\text{kg}/\text{h})$	0.781	0.748	0.740	0.741	0.730
实际加砂量/kg	1.578	1.487	1.498	1.486	1.465

4 试验结果

按试验要求完成性能录取、校准、10 h 吞砂试验、孔探针检查、发动机清洗和发动机分解等相关工作,对吞砂前后的性能录取数据分析及分解数据整理如图 4~8 所示。

从图 4 中可见,发动机功率呈不断衰减趋势,在前 2 h 吞砂时功率衰减最快,最后 2 h 较为平缓,是因为在前 2 h 吞砂后压气机盘叶片前缘在吞砂时有磨损痕迹,呈锯齿

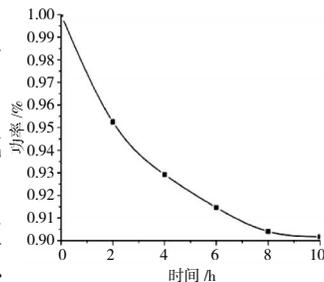


图 4 功率-吞砂时间变化曲线

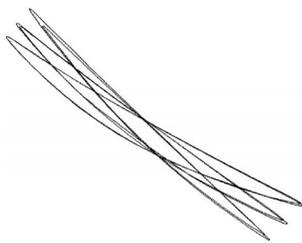


图 5 某级叶片吞砂前、后比较

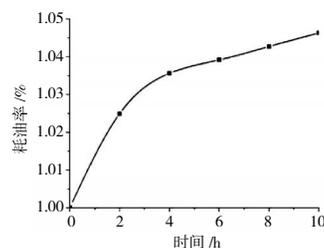


图 6 耗油率-吞砂时间变化曲线

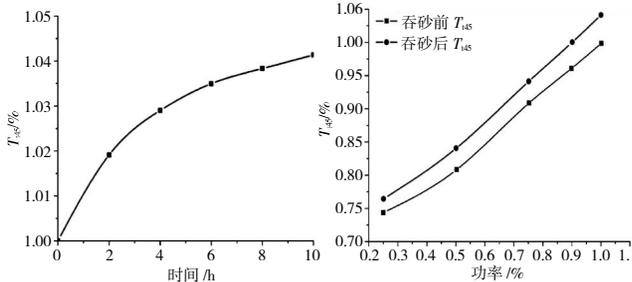


图 7 燃气涡轮出口总温-吞砂时间变化曲线

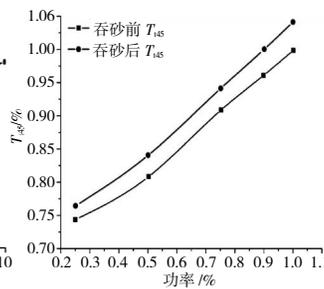


图 8 吞砂前后功率与燃气涡轮出口总温变化曲线

状,随吞砂时间的增加,盘叶尖前缘初磨损程度加大,且在部分位置出现小缺口^[13-14]。

从图 5 中可见叶片试验前、后磨损情况。黑色为试验前的轮廓线,红色为试验磨损后的轮廓线。这种变化改变了压气机气流攻角和气流通道面积;改变了压气机转、静子叶片间的间隙,导致压气机效率不断降低,流量减小,从而使功率降低^[15]。

从图 6 中可见,发动机的耗油率随吞砂时间的累计而升高,在吞砂前 2 h 耗油率快速升高,运行 4 h 后耗油率的升高速率较为稳定。吞砂 2 h 后发现火焰筒内、外环第 1 道气膜槽内壁有砂粒附着,内、外环主燃孔处(内壁)沿气流方向有吸附物,吞砂使燃烧室的燃烧效率及涡轮工作效率降低,导致耗油率升高。

从图 7 中可见,燃气涡轮出口总温在吞砂 2 h 增加较快,吞砂 4 h 以后增速较为平缓,吞砂累计 10 h 后发现,燃气涡轮叶片前缘有少量砂粒吸附,动力涡轮叶片前缘有发亮现象,叶尖轻微刮磨,工作叶片外流道有少量砂粒吸附,这是由于二氧化硅在高温下融化,一部分粘结在燃烧室上,另一部分随气流附着在涡轮叶片上,涡轮叶片气膜孔堵塞、冷却效果降低;结合图 6 中耗油率趋势可知,吞砂时间越长,燃气涡轮出口总温越高^[16]。

图 8 给出了吞砂前后发动机的性能的对,在同样的功率下,吞砂试验后发动机燃气涡轮出口总温比吞砂试验前约高 4.3%。

5 结论

按理论计算,10 h 吞砂试验应当吞砂 7480 g,实际为 7514 g,偏差为 34 g,约为 0.45%。

(1)对比吞砂前后,发动机功率衰减 9.9%,耗油率增加 4.6%,满足试验要求。验证了投砂装置的准确性及试验的可行性。

(2)发动机在吞砂试验中功率衰减、耗油率增加、燃气涡轮出口总温升高,在吞砂前 2 h 变化速率较快,随吞砂时间增加变化速率放缓。

(3)由于砂粒对发动机各部件均有一定磨损,磨损的速率与浓度无关,与总吞砂量相关。

目前尚无各部件吞砂性能衰减数据积累,本次试验的测量数据有限,对于各部件与全流道内的变化还需进一步探究。

参考文献:

- [1] 彭泽琰,刘刚. 航空燃气轮机原理:上册[M]. 北京:国防工业出版社,2000:66-68.
PENG Zeyan, LIU Gang. Principles of aviation gas turbine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000: 66-68. (in Chinese)
- [2] Dunn M G, Padova C, Moller G E. Performance deterioration of a turbofan and a turbojet engine upon exposure to a dust environment[J]. Gas Turbines Power, 1987, 109(3): 336-343.
- [3] Sebastien Wylie, Alexander Buckne. Reduction in flow parameter resulting from volcanic ash deposition in engine representative cooling passages[J]. Turbomach. 2017, 139(3): 1-13.
- [4] Adel Ghenaïet. Study of sand particle trajectories and erosion into the First compression stage of a turbofan [J]. Turbomach, 2012, 134(5): 1-19.
- [5] 李洁琼. 粒子分离器性能研究与排砂引射器优选设计[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
LI Jieqiong. Study on the performance of particle separators and optimum design of sand ejectors [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)
- [6] 马昌. 一种航空发动机吞砂试验方法[J]. 科学技术与工程, 2015(18): 239-240.
MA Chang. An aero-engine sand swallow test method [J]. Science Technology and Engineering, 2015(18): 239-240. (in Chinese)
- [7] 胡延青, 申秀丽. 航空发动机叶尖径向间隙研究进展综述[J]. 航空发动机, 2014, 40(1): 60-67.
HU Yanqing, SHEN Xiuli. Overview on aeroengine radial tip clearance [J]. Aeroengine, 2014, 40(1): 60-67. (in Chinese)
- [8] 国防科学技术工业委员会. GJB 242-87. 航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会. 1987: 14
National Defense Science and Technology Industry Committee GJB 242-87. Aviation turboprop and turboshaft engine general specification[S]. Beijing: Commission of Science Technology and Industry for National Defence. 1987: 14 (in Chinese)
- [9] 国防科学技术工业委员会. GJB 2026-94. 航空涡喷涡扇发动机吞砂试验要求[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会. 1994: 1-7
National Defense Science and Technology Industry Committee GJB 2026-94. Aviation turbojet turbofan engine sand swallow test requirements [S]. Beijing: Commission of Science Technology and Industry for National Defence. 1994: 1-7. (in Chinese)
- [10] Dunn M G, Baran B J. Operation of gas turbine engines in volcanic ash clouds[J]. Gas Turbines Power, 1996, 118(4): 724-731.
- [11] 吴彦灵. 国军标砂尘试验中的砂尘浓度[J]. 环境技术, 1999(04): 31-33.
WU Yanling. Dust concentration in the national military standard dust test[J]. Environmental Technology, 1999(04): 31-33. (in Chinese)
- [12] 马志宏, 李运泽. 砂尘环境试验设备中颗粒浓度场的实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2005(06): 884-887.
MA Zhi hong, LI Yunze. Experimental study of particle concentration field in dust environment test equipment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(06): 884-887. (in Chinese)
- [13] Gard H, Mathias R. Foreign object ingestion in turbojet engines[J]. SAE Technical Paper, 1956(5): 702-707.
- [14] Andrew Boulanger, Hardik Patel. Preliminary experimental investigation of initial onset of sand deposition in the turbine section of gas turbines[R]. ASME 2016 -GT-56059.
- [15] 季路成, 伊卫林, 唐方明, 等. 一种叶轮机端区叶片前缘边条修型方法: 中国, 201310739898.X[P]. 2013-12-26.
JI Lucheng, YI Weilin, TANG Fangming, et al. A leading edge strake method for turbomachinery blade in near endwall region: China, 201310739898.X[P]. 2013-12-26. (in Chinese)
- [16] 季路成, 伊卫林, 田勇, 等. 一种叶轮机叶片与端壁融合设计方法: 中国, ZL201010623606.2[P]. 2012-10-24.
JI Lucheng, YI Weilin, TIAN Yong, et al. A method of designing blended blade and endwall for turbomachinery: China, ZL201010623606.2[P]. 2012-10-24. (in Chinese)

(编辑: 刘 亮)