

涡轴发动机吞砂试验

岳洋 杜玉庆 刘知理 袁先圣

中国航发湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002

[摘要] 本篇文章对某不带粒子分离器的涡轴发动机开展了吞砂试验, 对砂粒要求、投砂装置及试验方法进行了研究, 得到了砂粒成分的比例及一套可均匀投砂、速度可控的投砂装置。通过试验, 验证了该型发动机在沙尘环境下的工作能力以及投砂装置和试验方法的合理可行。通过对比吞砂试验前后的性能参数及试验后的分解检查情况, 得到了吞砂试验对涡轴发动机整机性能及部件的影响规律, 同时也为后续基于此发动机为平台的新型防砂设备的设计提供了数据支持。

[关键词] 涡轴发动机; 吞砂; 试验; 性能

DOI: 10.33142/aem.v3i5.4226

中图分类号: V235.12

文献标识码: A

Sand Swallowing Test of Turboshaft Engine

YUE Yang, DU Yuqing, LIU Zhili, YUAN Xiansheng

AECC Hunan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou, Hunan, 412002, China

Abstract: In this paper, the sand swallowing test of a turboshaft engine without particle separator is carried out. The sand requirements, sand feeding device and test method are studied. The proportion of sand composition and a set of sand feeding device with uniform sand feeding and controllable speed are obtained. Through the test, the working capacity of the engine in the sand and dust environment and the rationality and feasibility of the sand feeding device and test method are verified. By comparing the performance parameters before and after the sand swallowing test and the decomposition inspection after the test, the influence law of the sand swallowing test on the performance and components of the turboshaft engine is obtained, which also provides data support for the design of new sand control equipment based on this engine platform.

Keywords: turboshaft engine; swallowing sand; test; performance

引言

我国地域辽阔, 地质构造、地表组成及气候水文条件都很复杂。在作战、运输、救护等情况下, 陆地交通难以通行, 固定翼飞机不具备起飞降落条件时, 直升机就成为抵达目标地点的唯一选择。沙尘飞扬的高度恰好是直升机常见的飞行高度, 此时作为直升机动力装置的涡轴发动机, 沙尘就会进入流道, 会对发动机的性能及安全性产生影响。因此, 无论是对现有发动机吞砂能力考核, 还是对将来研制新型防砂设备, 开展涡轴发动机吞砂试验都是非常重要且必要的^[1-2]。本文针对某型不带粒子分离器的涡轴发动机开展吞砂试验研究, 验证了试验方法和试验设备的可行性, 得出吞砂对该型发动机性能影响规律, 同时也为基于此发动机为平台的新型防砂设备的设计提供了数据支持。

1 吞砂试验

1.1 投砂要求

根据国家军用标准 GJB1171-1991 的划分, 将军用直升机的沙尘环境, 按其浓度分成 5 级, 其中最恶劣的 5 级沙尘环境对应直升机在沙漠地区低空飞行时造成的 4000-10000mg/m³ 的空气中沙尘浓度^[3]。我国除了中、东部地区沙尘环境在 3 级以下, 其他西部、东南及东北地区的戈壁沙漠、高原荒漠、沙滩沙丘的沙尘环境多在 4 级以上。

本次试验采用最恶劣的 5 级沙尘环境为试验环境, 投砂量为:

$$a_1/1.293 \times a_2 = 100 \text{ kg/h}$$

式中:

a_1 —吞砂试验时的发动机流量, 单位: kg/h;

1.293—标准天空气密度, 单位: kg/m³;

a_2 —沙尘浓度, 单位: kg/m³。

根据 JSSG-2007A《航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机通用规范指南》中建议涡轴发动机应吞咽细砂与粗砂的时间比例为 1:0.926, 吞咽细砂时的发动机状态对应流量较吞咽粗砂时高 3.8%^[4], 计算得到吞咽细砂和粗砂总量的比例为 1:0.892,

即 100kg/h 的沙尘中含细砂为 53.9kg/h、粗砂为 48.1kg/h。本次试验同时模拟现有粒子分离器的沙尘分离效果，现有粒子分离器对细砂的分离效率为 67%，对粗砂的分离效率为 88%，由此可以算出，分离后的细砂速率为 17.8kg/h，粗砂为 5.8kg/h，因此，最终确定该发动机试验时的吞砂速率为 23.6kg/h，细砂、粗砂的混合比例为 75.5%：24.5%。

沙尘粒径及分布：按照国家军用标准 GJB242-1987 中规定的粗砂和 JSSG-2007A 中规定的细砂进行吞砂试验，具体构成见表 1-2^[4-5]。其中粒度大小单位为微米，数量为小于左列尺寸的颗粒按质量百分数。

表 1 试验粗砂粒度比例表

粒度大小	含量 (%)
~1000	100
~900	98~99
~600	93~97
~400	82~86
~200	46~50
~125	18~22
~75	3~7

表 2 试验细砂粒度比例表

粒度大小	含量 (%)
~1000	100
~500	85~90
~250	70~75
~125	50~55
~75	25~30

1.2 试验装置

吞砂试验采用自主研发的投砂装置。投砂装置主要由变频电机、电气柜、减速器、联接轴、2 个独立且相同的计量器、转换开关、送砂橡胶管、气动混合器、分配器、投砂导流盆、环形管、喷嘴等部件组成，该装置具备连续向发动机进口投砂的能力。

计量器是沙尘的计量及投放装置，能较稳定的输出定量沙尘，且能进行调节。试验时通过螺旋拨盘将沙尘逐渐拨入拨盘中心沙尘排出孔，源源不断的将沙尘排出，电机和减速器则是推进螺杆的动力源。

试验前，将投砂装置在车台安装到位后，对投砂装置进行调试，主要来校核投砂器工作的稳定性与沙尘流量的准确性，根据试验要求，调试投砂装置，确定投砂速度。吞砂试验前，投砂装置应进行封严、电机转速等方面的检查工作。

试验时，开启压缩空气，打开投砂开关，沙尘在气动混合器中与压缩空气充分混合后经分配器进入环形管，从均匀分布的喷嘴喷出，并在反射器的作用下进一步充分与发动机进气混合，最终进入发动机的进气口前端而被吞入发动机内部，原理图如图 1 所示。

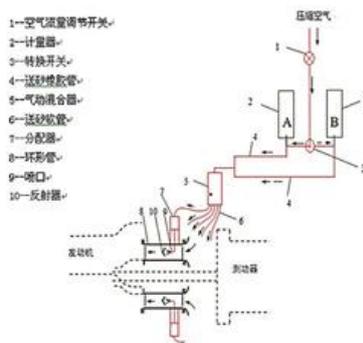


图 1 投砂装置原理图

1.3 试验程序

试验过程中要求投砂装置应连续均匀投砂，试验前将投砂装置调节到位，以保证投砂速度。试验过程中按照下面的试验图谱进行吞砂试验，在发动机稳定运行至某状态开启投砂，投砂时间 3min，吞砂试验前后分别进行校准和再校准试验。

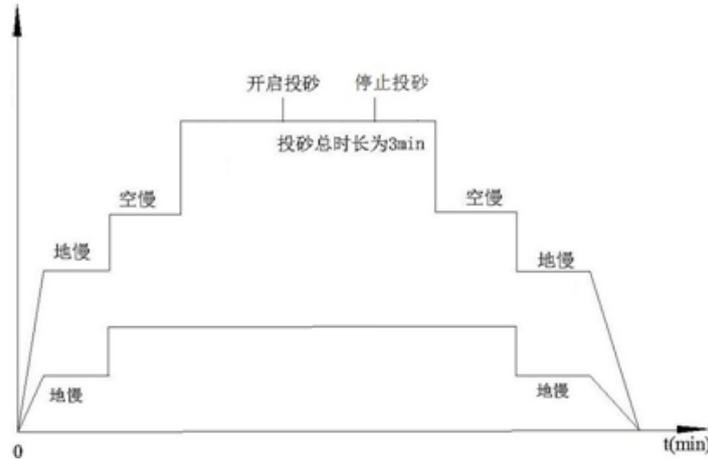


图2 吞砂试验图谱

吞砂试验过程中，发动机运行平稳，各项参数稳定，未出现突变现象。吞砂过程中，在尾喷管出口处出现闪亮颗粒，为粗砂粒经过高温灼烧后的现象，其余无异常。

2 吞砂对整机性能影响分析

在吞砂试验前后分别进行了校准试验和再校准试验，发动机性能对比如图所示。图 3 给出了吞砂试验前后，在相同进气条件下发动机实际功率与设计功率之比随燃气涡轮出口温度 T_{45} 的变化曲线图，可以看出吞砂试验后发动机功率大幅下降，在最大状态时发动机功率下降 14%。图 4 给出了吞砂试验前后发动机耗油率随燃气涡轮出口温度 T_{45} 的变化曲线图，可以看出吞砂试验后发动机耗油率显著升高，最大状态时发动机耗油率升高 5.6%。综上可知，吞砂试验后发动机性能明显下降。

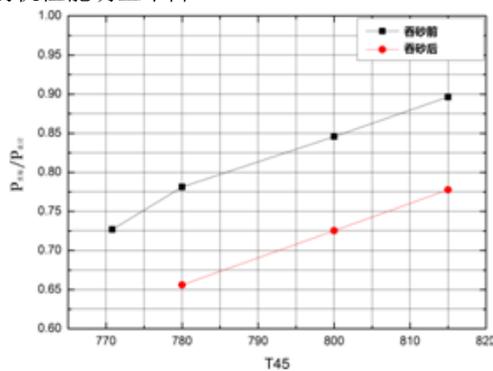


图3 吞砂前后功率对比曲线图

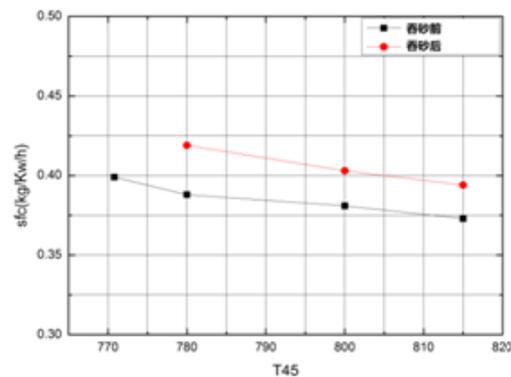


图4 吞砂前后耗油率对比图

3 吞砂对部件影响分析

试验后，对发动机进行了解体检查。

进气组件解体检查未见异常。

压气机组件解体检查后发现第一级转子前缘有外物碰击形成的毛刺，其余各级转子前尾缘及叶片叶身表面均可见沙尘冲蚀痕迹。离心叶轮分流叶片前缘在 80%叶高处可见冲蚀形成的凹陷。轴流机匣内流道面存在清晰冲蚀痕迹。精密计量显示压气机各级转子沿展向均有不同程度的磨损，整体呈现前缘区域较尾缘区域磨损严重、尖部较根部磨损严重的趋势；下表给出了压气机转子试验前后称重结果，结果显示压气机各级转子试验后均存在不同程度的质量损失。

表 3 压气机转子试验前后称重结果

	试验前 (g)	试验后 (g)	质量损失 (g)	质量损失百分比
轴流 1 级	2246.8	2230.4	16.4	0.730%
轴流 2 级	1001.1	993.3	7.8	0.779%
轴流 3 级	856.1	849.7	6.4	0.748%
离心叶轮	4321.3	4307.2	14.1	0.326%

图 5 和图 6 给出了吞砂前后不同折合转速下压气机效率和压比的对比曲线图。由图可知, 吞砂前后压比无明显变化, 效率明显降低, 结合上文给出的分解检查结果可知, 压气机整体未发生大的裂纹及断裂等现象, 吞砂后叶片前缘形成的毛刺使得气流攻角改变, 改变原有气流入射角度, 叶片表面的冲蚀痕迹加重叶片表面粗糙从而导致气流沿程损失的增加, 叶片表面附面层分离加重, 结合压气机本身逆压力梯度的特性, 分离会更加严重甚至会产生漩涡从而产生高熵区, 分离的加重也会对主流产生挤压使得出口分布不均匀; 叶尖的磨损会导致叶尖泄漏的增加。上述影响导致了效率的降低。

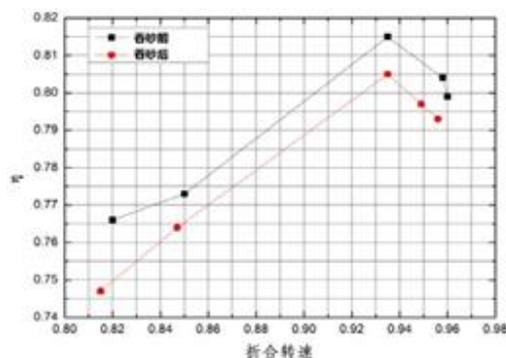


图 5 吞砂前后压气机效率对比曲线图

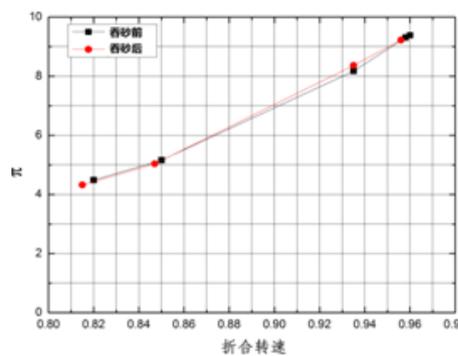


图 6 吞砂前后压气机压比对比曲线图

燃烧室组件分解检查后发现火焰筒头部部分导流板和外环涂层面有结焦物, 为砂尘烧结形成, 其余部位无异常。火焰筒上分布着主燃孔、中间孔、掺混孔和冷却孔, 砂尘烧结物及砂尘本身会对这些孔产生堵塞, 最终会导致燃烧室出口温度的恶化。涡轮组件分解检查后发现燃气涡轮和动力涡轮转静子叶片表面均附着砂尘, 涡轮叶片工作温度较高, 砂粒在高温燃气的作用下烧结在叶片表面; 该发动机燃气涡轮为气冷式叶片构成, 大量砂尘随着冷气进入各盘腔造成灰尘附着。叶片表面附着的砂尘会对涡轮叶片本身气动流场产生改变, 增加沿程损失, 有些气膜冷却孔也会被砂尘堵塞, 使得涡轮效率下降, 温度场恶化。附件传动组件分解检查未见异常。

综上所述, 对于该型涡轴发动机, 吞砂试验时砂尘全部进入流道, 砂尘对主流道与次流道均产生影响。在冷端部件, 对叶片影响最大, 而且影响范围沿轴向贯穿每一级压气机, 影响形式主要体现在对叶片的冲蚀及附着, 使得近壁面流场改变导致了效率的下降; 对热端部件冷却孔的堵塞, 使得温度场恶化, 最终导致发动机整体性能下降。吞砂试验未对该发动机造成结构强度的破坏, 对滑油系统未产生影响。

4 结论

本次试验成功的验证了该型发动机在一定砂尘环境下的工作能力; 该吞砂试验的成功, 表明了该吞砂试验装置和试验方案设计合理可行, 可在今后同类型试验中进行推广应用; 对于该型不带粒子分离器的涡轴发动机, 吞砂后发动机性能大幅下降, 对各主要部件进行分解检查与数据分析后得出, 主要原因在于砂尘全部进入流道, 对叶片的冲蚀及附着, 使得流场改变导致了效率的下降; 对热端部件冷却孔的堵塞, 使得温度场恶化, 吞砂后发动机偏离设计点运行, 对发动机寿命及安全产生危害。为后续基于此发动机为平台的新型防砂设备的设计提供了数据支持。

[参考文献]

- [1] 马志宏, 李金国, 张景飞. 军用装备砂尘环境试验技术[J]. 装备环境工程, 2007(2): 121.
- [2] 李霖. 直升机辅助动力装置吞砂试验装置设计及试验[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [3] 中华人民共和国国家军用标准. GJB1171-1991 军用直升机防砂尘要求[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1992.
- [4] 于宏军. 航空涡喷涡扇涡轴涡桨发动机通用规范指南[J]. 航空标准化与质量, 2014(1): 20-23.
- [5] 国防科学技术工业委员会. GJB242-87 航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范[S]. 北京: 工业出版社.

作者简介: 岳洋 (1986.6-), 男, 中国航发湖南动力机械研究所, 主管设计师, 工程师。