

航空发动机串油故障分析研究

张占纲^{1,2} 郭绍辉¹ 宋兰琪² 陈立波²

(1 石油大学(北京)重质油加工国家重点实验室,北京 102249)

(2 北京航空工程技术研究中心,北京 100076)

文 摘 阐述了航空发动机串油故障的特征,从理论上分析了该类故障的机理和对机械系统的危害,指出可以通过黏度、闪点等切实可行的实验方法进行准确分析和诊断,并指明了对此类故障的预防和应对措施。

关键词 航空发动机,故障,串油

Analysis of Abnormal Serial Connection of Different Oil System in Aero-Engine

Zhang Zhangang^{1,2} Guo Shaohui¹ Song Lanqi² Chen Libo²

(1 National Key Laboratory of Heavy Oil, University of Petroleum, Beijing 102249)

(2 Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076)

Abstract The feature and mechanism of the affection of abnormal serial connection of different oil system are described in detail, and some measures are also proposed to diagnose this type of failure and to prevent accidents relevant to abnormal serial connection.

Key words Aero-Engine, Failure, Serial connection

1 前言

航空发动机包括燃油、润滑、液压三大油路系统。正常工作时,各油路系统之间相互独立,功能各异。当发动机某些部件(如燃油油换热器,系统间密封器件等)出现异常时,会发生串油故障。常见的有润滑系统混入喷气燃料、液压油等。

串油会导致机械部件润滑不良、严重磨损、使用寿命缩短,以及可靠性和工作效率降低,甚至会造成飞行事故,威胁飞行安全。因此,通过有效手段及时诊断、预报航空发动机串油故障对保证飞行安全、提高飞机可靠性有着重要的意义。

2 常见的串油故障特征

2.1 润滑油箱油量变化异常

润滑油会随着发动机的使用逐渐消耗。由于润滑系统相对于其他油液系统是独立的,所以润滑油减少到一定量还要补充新润滑油。当发动机隔离不同系统油液的密封部件或燃油油换热器失效时,系统之间便会发生串油。润滑系统压力较其它系统压力低,所以其他系统的油液会进入润滑系统,使得润滑油量异常上涨,发动机运行一段时间后润滑油量的指示反而恢复正常,停车一段时间润滑油量又显示异常。串油越厉害,润滑油量变化越明显。

2.2 油液气味有变化

由于喷气燃料的气味十分特别,所以当润滑系统混入喷气燃料时,一般都能嗅到明显的喷气燃料气味;油液在摇晃时会出现大量细腻的气泡(如

收稿日期:2004-07-10;修回日期:2005-03-07

作者简介:张占纲,1974年出生,博士研究生,主要从事油液监控及其应用研究工作

啤酒沫般),与正常油液相比有显著区别。液压油和润滑油气味都很小,难以此方式鉴别。

2.3 机械工作异常

三种油液的理化性能差别较大,发生串油时,被污染油品的性能受到严重影响,无法满足发动机使用的要求,会造成机械部件工作状态恶劣,发生诸如发动机振动大、有杂音、润滑系统压力升高、润滑油温度过高等现象,严重时会出现异常磨损、卡滞、抱轴等现象,导致故障甚至灾难性事故发生。

3 串油引发故障机理

润滑油在发动机上所起的作用是润滑、冷却、防锈、清洁和密封。为了满足机械正常运转的特殊要求,每种润滑油均具有特定的物理化学性质,并根据需要添加了诸如抗氧化剂、清净分散剂、极压剂、抗磨剂等多种添加剂,而且不同的发动机所用的润滑油牌号和性能可能也有很大区别。一旦发生串油故障,润滑油受到污染,其各项理化性能受到影响,会使润滑油无法继续满足发动机的使用要求。

航空发动机中,一般是喷气燃料或液压油串入润滑系统中,所以发生串油后直接受影响的是机械部件的润滑。

3.1 对润滑油黏度的影响

在航空发动机中,要求润滑油必须具有一定的黏度,以在摩擦表面附近形成一层润滑油膜,将两个摩擦金属表面分开,不直接接触。相对运动时,润滑油分子之间的摩擦代替了金属表面之间的摩擦。润滑油分子之间的摩擦系数很小(0.001~0.08),大大小于金属干摩擦系数(0.1~0.9),从而减小摩擦,降低磨损。

针对发动机轴承和齿轮负载、运行状况和环境的不同,各发动机使用润滑油种类和所需的黏度也各异。根据工作条件不同和润滑状况不同,一般分为流体动压润滑、弹性流体动压润滑、边界润滑和混合润滑。

3.1.1 流体动压润滑

摩擦面相互运动使收敛形缝隙中的黏性液体产生压力,用以平衡外部载荷,并使液体形成足够厚的油膜将两摩擦表面完全隔开,这种润滑即流体动压润滑。收敛形油膜产生的压力即油楔力。此类润滑主要出现在面接触的轴承中,如滑动轴承。

流体动压轴承又分为承受轴向载荷的推力轴

承,承受径向载荷的径向轴承,他们都有各自油膜承载能力^[1]。对于推力轴承的承载力 p :

$$p = UBL^2 C_w / h_2^2 \quad (1)$$

式中, C_w 为负载系数, h_2 为油楔最大高度, U 为轴承表面运动速度, η 为油品动力黏度, B 为油楔垂直于运动方向的尺寸, L 为进口口到油楔边缘距离。

对于径向轴承,实现良好润滑需一最小油膜厚度 h_{min} :

$$h_{min} = nd^2 L / [18.36p(L+d)] \quad (2)$$

式中, η 为油品动力黏度; d 为轴颈直径; n 为转速; p 为轴承上的单位载荷; h_0 为静止状态下轴径与轴承的最小间隙; L 为轴颈与轴承的配合长度。

由上述计算公式可以看出在流体动压润滑中,黏度对轴承的承载能力和润滑所需的油膜厚度有着及其重要的影响。

3.1.2 弹性流体动压润滑

在较高压力下,考虑到压力对零件弹性变形和润滑油黏度影响的润滑称之为弹性流体动压润滑。这主要存在于齿轮、滚动轴承等摩擦接触面较小的零件中。

最小油膜厚度 h_{min}

$$h_{min} = h_0 UR / q \quad (3)$$

式中, h_0 为最小油膜厚度系数,无因次,因润滑状态不同而不同; U 为表面运动速度; q 为单位长度上的压强; R 为两圆柱体的综合曲率半径。

膜厚比

$$= \frac{h_{min}}{\frac{1}{2}(h_{i1} + h_{i2})} \quad (4)$$

式中, h_{i1} 、 h_{i2} 分别表示两表面粗糙度的平方根偏差。式(4)中,当 $\lambda < 1$ 时,表面处于边界润滑状态,会出现擦伤、胶合及磨损;当 $1 < \lambda < 3$ 时,表面处于部分弹性流体动压润滑状态,工作表面发生擦伤与胶合的概率很大;当 $\lambda > 3$ 时工作表面完全处于弹性流体动压润滑状态,可以避免擦伤和胶合磨损。

通过对(1)至(4)式分析,我们可以清楚地看出,润滑油的润滑效果与黏度有着十分密切的关系。当黏度过小时就难以形成油膜,达不到理想的润滑

效果。而我们从下表 1^[2]中的数据可以比较出喷气燃料与广泛使用的润滑油的黏度差别。

表 1 喷气燃料与润滑油黏度对照表
Tab 1 Difference of viscosity between fuel and lubricating oils

油品	t/	/mm ² ·s ⁻¹
喷气燃料	20	1.25(1~2左右)
4109合成润滑油	40	不低于 14.5
HP8润滑油	50	不低于 8.3

一般油液的黏度随温度的上升而降低。无论 4109合成润滑油,还是 HP8 润滑油,混入煤油以后黏度势必会降低。表 2 为两例串油故障油样分析数据,反映了串油后黏度性能指标的变化情况。

表 2 润滑油混入喷气燃料实验数据
Tab 2 Experiment data of lubricating oils contaminated by fuel

油品牌号	样品	/mm ² ·s ⁻¹	t/
4109	采集油样	13.07	40
HP8	第一次采样	5.91	50
	第二次采样	5.67	50

由于润滑油中混入喷气燃料,其黏度大幅度降低³,难以形成理想的油膜厚度,使机械润滑不良,严重时甚至会丧失润滑效果,使摩擦副表面磨损加剧,摩擦增大。此时,可能发生如抱轴、磨穿、超温烧蚀、胶合等现象,使机械运动部件发生失效、使用寿命迅速缩短。比如,对于单转子发动机,一旦抱轴,即会发生主传动轴扭断等灾难性飞行事故;而对于双转子发动机而言,一旦润滑油失去润滑作用,双转子变成单转子,随之发生喘振、推力丧失,造成难以避免的重大飞行事故。如 1995 年 6 月某型飞机发生的“双变单”飞行事故就是由于润滑系统故障引起的^[4]。

液压油与润滑油的黏度差别相对喷气燃料来说较小。

3.2 对润滑油闪点的影响

润滑油的闪点是润滑油贮存、运输和使用的—个安全指标,同时也是润滑油的挥发性指标。闪点低的润滑油,挥发性高,易着火,安全性差。另外,新润滑油的挥发性高,在工作过程中容易蒸发损失,严

重时甚至引起润滑油黏度增大,影响油品的使用性能。

由于喷气燃料和液压油的闪点相对于润滑油来说低得多,见表 3。润滑油中混入喷气燃料或液压油对润滑油的闪点影响很大,两个故障油样分析数据见下表 4。

表 3 几种常见航空油液的闪点

Tab 3 Flashing point data of some different aero-oils

油 品	闪点 /	测试方法
15号液压油	不低于 82	闭口
HP - 8 润滑油	不低于 135	开口
10号液压油	不低于 92	开口
4109 润滑油	不低于 205	开口
喷气燃料 (RP - 3)	不低于 38	闭口

表 4 混入喷气燃料的润滑油实验数据

Tab 4 Experiment data of lubricating oils contaminated by fuel

油品牌号	样 品	测试方法	闪点 /
4109	采集油样	开口	159
HP8	第一次采样	开口	118
	第二次采样	开口	109

润滑油的闪点如果突然降低,很可能就是发生了串油故障。润滑油性能变差,部件发生剧烈的摩擦,产生大量的热,当温度超过混合后油液的闪点后容易引起火灾。

3.3 对其他理化性能的影响

由于混入其他的油品,润滑油的许多理化性能会发生改变,其中影响较大的还有氧化安定性。

4 串油故障诊断与分析方法

串油故障对航空发动机影响恶劣,所以必须采取一定措施及时预报此类故障,将故障破坏程度降低到最小程度。除对发动机参数和各系统工作状况及时检查外,切实可行的诊断方法有以下几种。

4.1 黏度分析

油品黏度分析操作简单,重复性好,实验样品用量少。通过与合格油品黏度对比,可以直接辨别黏度变化情况,确定是否发生串油,程度如何。

此方法对诊断润滑系统串入喷气燃料行之有效。由于液压油和润滑油的黏度相近,所以通过黏

度分析无法显著鉴别润滑系统和液压系统是否发生了串油。

4.2 闪点分析

由于喷气燃料、液压油与润滑油三者的闪点差别较大,发生串油故障后,混入喷气燃料或液压油的润滑油的闪点变化一般都很明显;所以闪点分析是辨别润滑系统是否串入液压油和喷气燃料的重要方法。

4.3 红外光谱分析

飞机上使用的喷气燃料大多为 RP-3,应用红外光谱检测润滑油中混入喷气燃料,主要是分析 RP-3 红外光谱的特征峰位置^[5]。由于喷气燃料、润滑油为碳氢化合物,应用红外分析有三方面的问题:

(1)在中红外上,喷气燃料含量高于 5%才能在红外谱图上反映出来;

(2)通常测定 RP-3 喷气燃料混入润滑油中推荐的峰位是 $800 \sim 700 \text{ cm}^{-1}$,通过对样品的实际分析,发现错过了一个主要的喷气燃料峰位 810 cm^{-1} ;

(3)喷气燃料峰位取得太宽,加之随着混入喷气燃料量的增加,润滑油量呈比例减少,测定喷气燃料读数变得不可靠。

为此,可通过改变标量参数值为两位小数稍稍提高测定喷气燃料的灵敏度,选择 $815 \sim 795 \text{ cm}^{-1}$ 喷气燃料峰位置,明显提高了测试灵敏度,实现了对喷气燃料污染检测的定量分析。

用红外光谱法难以鉴别润滑油与液压油的掺杂

程度。

5 结论与建议

发动机发生串油一般是由于密封部件失效或本身制造工艺有缺陷(如缩孔、砂眼等)造成的,在飞机使用中属常见故障。串油对发动机工作影响恶劣,会使得润滑油性能变差,而造成异常磨损,甚至酿成事故,威胁安全,应予高度重视。

建议和措施 (1)加强油液检查工作,及时准确预报串油故障;(2)提高飞机发动机维护人员的业务水平,使其具备基本的油液理化性能知识和分析鉴别能力;(3)提高发动机产品质量,加强出厂前的检验检查。

参考文献

- 1 翟玉生,李安,张金中.应用摩擦学.北京:石油大学出版社,1996:156~178
- 2 工程材料使用手册.北京:中国标准出版社,1989:369~436
- 3 林世雄.石油炼制工程.第二版上册.北京:石油工业出版社,1994:72
- 4 程言斌.对一起“双变单”故障的分析.飞行事故与失效分析,1998;(2):44
- 5 吴瑾光.近代傅立叶变换红外光谱技术及应用.北京:科学技术文献出版社,1994:703

(编辑 任涛)

石英陶瓷与低膨胀合金硅凝胶粘接技术

石英陶瓷材料与低膨胀合金的膨胀系数差异很大,在粘接过程中的内应力影响两者的粘接强度和耐久性。

本成果采用硅凝胶粘接低膨胀合金与石英陶瓷材料,采取减少内应力的方法,使其提高强度且耐高温。为避免使用常规胶粘剂,温度变化产生较大内应力导致石英陶瓷碎裂或胶层脱胶,选用高强度的柔性胶粘剂,并通过大间隙粘接,可以解决此难题。

特种硅凝胶,常温下黏度大。由于硅—氧原子交替排列的分子特性,在高温时黏度大,将胶先涂布在石英陶瓷上,厚度超过粘接间隙,在低膨胀合金上也涂满胶,将两个黏合面压在一起。特种硅凝胶涂布方便,性能稳定。在常温下,剪切强度为 5.18 MPa;在 200 °C 高温下,保温 5 min,剪切强度仍可达 3.22 MPa,胶层无脱离。

(上海无线电设备研究院,上海 200090)

·李连清·