

# 涡扇发动机燃烧室部件故障分析

设计所 张三多

**摘要** 针对高压涡轮导向叶片烧蚀现象,分析了燃烧室非正常工作导致的故障,找出了故障产生的原因,并提出了火焰后移判断、控制起动超温等排除燃烧室故障的技术措施。

**关键词** 喷嘴 燃烧 故障

## 1 前言

燃烧室是涡扇发动机的一个重要部件,它工作的优劣直接影响发动机的性能。它又是发动机主机中温度最高的一个部件,工作条件十分恶劣,因此,燃烧室部件故障相对其它部件故障要多,往往因燃烧室部件故障造成发动机的损坏。例如,某型涡扇发动机在厂内一次试车完成后,下台分解检查时发现高压2级涡轮导向器叶片1组3个叶片烧蚀,相邻两个叶片也有烧蚀点。此台发动机在试车台总计运转时间为28小时,其中95%以上状态运转时间仅7小时。

经冶金分析,叶片烧蚀是燃气短时局部超温,致使高压2级涡轮导向器叶片温度达1150℃或更高造成。

经进一步分解检查、分析发现,虽然烧蚀的是涡轮叶片,而问题根源在燃烧部件。是5号喷嘴油路严重堵塞,副喷口3个旋流槽中,有两个旋流槽出口被外来物堵住,致使实际流量比设计平均流量减少25%,副喷口雾化锥角偏斜 $7^{\circ}30'$ 。由于这个喷嘴喷油量过小,在起动点火时,不能顺利点火,引起点火滞后,而在停车时,也因为其喷油量过小,造成提前熄火,这个喷嘴与同台发动机的其余9个喷嘴工作不同步,使部分燃油没有在火焰筒中燃尽,在气流的吹动下,流向火焰筒下游的涡轮部件,遇到高温热源时继续燃烧,是高压2级涡轮导向器叶片烧蚀的直接原因,为典型的“挂油燃烧”。

因此,掌握喷嘴、火焰筒等燃烧室部件的工作原理,保正其加工质量,控制整个燃烧过程,使之正常工作是非常重要的。

## 2 喷嘴对燃烧室故障的影响

喷嘴所起的作用是把液态燃油初步分解,使之碎裂成很多的细小油滴,以一定的速度和流量送入燃烧室中的火焰筒,并在内与空气掺混均匀成为可燃的油气混合物,给下一步的燃烧反应作好物理准备工作。

### 2.1 喷嘴的技术要求

喷嘴要能满足以下几条使用要求

- (1) 根据发动机的工作状态,稳定、准确而可靠地把一定量的燃油输入燃烧室中。
- (2) 燃烧室工作状态在大范围内变化时,供油量也会在较宽的范围内变化,这时要求喷嘴仍能保证良好的雾化效果。
- (3) 具备一定的喷雾锥角,碎裂油滴和油气分布均匀,以利点火和燃烧。
- (4) 地面和高空起动时,要具备起码的雾化质量和较适当的浓度场。
- (5) 喷嘴要有一定刚性,不易变形。若喷嘴本身稍有安装不当,都会显著改变浓度场、温度场及点火性能等,所以喷嘴应保严格的定位装置。

### 2.2 喷嘴流量对火焰筒燃烧的影响

流量和喷雾锥角是喷嘴性能两大技术指标。

喷嘴流量由有效喷射面积和轴向分速度两个因素所决定的。

出厂检验只在某一给定的副油压下测量副油路流量,在另一给定的主副油压下测量双油路流量,还应将合格的喷嘴和供油总管组合起来进行流量试验,检验燃油总流量是否合格。

影响喷嘴流量的因素有:

- (1) 油压:油压高,则喷射速度增大,喷嘴流量也增大。

收稿日期:2003—4—2;修订日期:2003—4—11。

(2) 喷孔半径: 喷孔半径增大, 则流量将会增大, 用研磨喷孔孔径来控制合格的孔径值。

(3) 喷雾锥角: 喷雾锥角增大则流量系数下降, 如此时油压不变, 则喷嘴流量将减小。

(4) 喷嘴长度: 增大喷孔长度与喷口半径的比值, 则喷雾锥角减小, 流量系数和流量略有增加。

### 2.3 喷雾锥角对火焰筒燃烧的影响

喷雾锥角直接影响到燃油在燃烧室中的分布均匀性和雾化质量, 因而对燃烧效率影响很大。

每个喷嘴在出厂前要做喷雾锥角试验, 为了与设计锥角对比, 最好在喷口出口处测量喷雾锥角, 如果在距喷口轴向距离较大处测量锥角, 则所测角度偏小, 而工厂出厂检验都规定在距喷口一定距离处, 要用合格喷嘴实测标验, 作为批生产出厂检验的标准。

由于喷嘴喷孔与涡流器不同心, 喷口倒角不均匀, 加工面光洁度不够, 喷口椭圆或喷嘴组装质量不高, 工艺性能不良, 都会引起喷雾锥角各部位油量分配不均匀。喷嘴积炭, 局部堵塞喷孔也会导致喷油不均匀, 因而形成火焰筒局部过热、掉块、裂纹等。因此要求同一发动机的 10 个喷嘴喷油量尽量均匀。

关于喷嘴雾化质量, 工厂检验通常用肉眼观察油雾锥有无明显阴影(习惯叫“有道”), 发现阴影时, 研磨喷孔提高喷孔通道的光洁度, 一般都能排除。

从喷嘴工作原理来看, 增大喷孔切向分速或降低轴向分速, 都能影响喷雾锥角, 调试喷雾锥角时可以从以下几个因素来进行分析:

(1) 喷嘴几何特性参数, 喷口外半径偏大, 内半径偏小, 都能加大喷雾锥角。

(2) 喷孔半径, 扩大喷孔半径会加大喷雾锥角, 流量也会相应增加, 所以研磨扩孔时应同时考虑到角度与流量。

(3) 喷孔长度, 生产车间为了满足喷雾锥角, 有时采用研磨喷嘴端面缩小喷孔长度的措施是很有效的, 通过调整孔长与孔径之比来控制喷雾锥角。

(4) 供油压力, 理论上可以认为喷雾角只与几何特性参数有关, 而与油压无关。实际上油压在 1~2 公斤/厘米<sup>2</sup>(表压) 以下时, 油雾锥角不能展开, 这时燃油雾化质量和分布情况受粘性影响很

大。油压超过 2 公斤/厘米<sup>2</sup>(表压) 后喷雾锥角基本上能达到额定值。继续提高油压仍能增大锥角, 因此, 作锥角试验时, 必须按规定油压进行试验。

## 3 燃烧室故障分析

燃烧室是发动机主机中温度最高的部件, 所出现的一些故障大都与部件受热有关, 经分析有以下几种。

### 3.1 火焰筒过热

火焰筒直接和炽热燃气接触, 燃烧室工作不正常时, 最容易出现火焰筒壁面局部过热现象, 当金属壁面温度超过 1300℃ 时, 耐热合金晶粒显著增大, 形成晶界严重氧化, 金属强度剧烈下降, 出现燃烧、掉块。形成火焰筒壁面局部过热现象有以下几种原因:

(1) 喷嘴喷雾锥角过大, 超出允许公差范围, 则燃油燃烧集中在头部。

(2) 喷嘴安装不当, 油雾锥倾斜, 火焰偏斜, 燃油贴近壁面燃烧, 造成局部过热。

(3) 喷嘴孔径不圆, 加工不良, 以及喷孔积炭造成局部堵塞, 都会形成油雾锥偏斜、燃油分布不均等缺陷。雾锥中出现油柱(即“有道”), 会引起局部供油过多, 雾化不良。

(4) 个别喷嘴流量偏大, 超出规范允许误差, 则所对应的火焰筒处于较高热负荷下, 容易引起附近壁面局部烧伤。

(5) 局部气膜孔堵塞, 两个火焰筒之间的二股气流流阻过大, 气流不畅。亦会导致局部烧伤。

### 3.2 喷嘴积炭

喷嘴积炭严重时会造成局部堵塞喷口, 阻挡雾锥形成, 导致喷油雾化质量急剧恶化。燃油雾化不良及雾化质量不稳定将导致火焰筒点火困难和无规律性, 以及燃烧效率的降低, 有时燃油浓度场的不稳定会导致燃烧室出口燃气温度分布的不稳定和恶化, 严重时引起火焰筒和涡轮导向器及转子叶片的烧伤。

### 3.3 燃烧室出口燃气温度分布不稳定

引起燃烧室出口燃气温度不稳定的主要原因有以下几种:

(1) 燃油不干净或过滤不良, 造成喷嘴堵塞, 有可能使油雾锥角、雾化质量和喷油量发生变化, 导致个别火焰筒出口温度过高或过低, 或出现热

点。因而必须在车间试验、工厂试车及外场使用中保持油料干净并加强过滤。

(2) 压气机出口气流流场畸变,引起燃烧室内的空气量分配、燃烧区、掺混区射流穿透深度的变化,因而导致燃烧室出口燃气温度分布变化。

(3) 喷嘴积炭,喷油雾化质量差而不稳定,供油过多而雾化不良的局部区域就容易出现火焰后移,造成局部热点温度上升和燃气温度场不稳定等恶果。

(4) 火焰筒变形,进气斗、掺混孔位置变化,气膜孔流量有差异,将会引起气流结构变化。火焰筒内流场对燃油浓度场和燃气温度场的影响都很大,其变化也会引起燃烧室出口燃气温度的变化。

### 3.4 涡流器的影响

涡流器是火焰筒的重要组成部分,它所起的作用有三个:其一,在火焰筒内形成旋转气流,以造成火焰筒中心的低压回流区,而回流区中的热燃气就作为稳定火焰的点火源;第二,供给火焰筒头部一部分主燃空气;第三个作用就是改善雾化掺混。涡流器出口高速气流把油雾锥击碎,并把油滴带入火焰筒头部空间形成均匀的油气混合物,涡流器空气流量和安装对火焰筒头部气流结构影响很大,外半径大,内半径小,即涡流器入口面积大,则火焰筒内外压差小,进气射流穿透深度浅,外半径小,内半径大,安装角大,则涡流器出口射流自由膨胀,急剧扩张,减小击碎油雾锥并携带油滴均匀分布于头部空间的机会,导致燃烧效率下降和出口温度分布不均匀等恶果。

若火焰筒的涡流器之间流量相差太大,主燃区的余气系数相差较多,则各个火焰筒中的燃烧性能也有较大差别,这就可能导致个别火焰筒壁面过烧烧伤,在作试验时发现,当涡流器流量误差超出3%后,头部壁温上升50℃,热点最高壁温会上升100℃,因此,必须换掉流量太大或太小的涡流器,使各涡流器的流量误差保持在允许值内。

### 3.5 发动机起动超温

起动时,若涡轮出口温度过高或尾喷管大量喷火,即使这个过程为时很短,有时也会引起涡轮导向器和转子叶片的烧毁、裂纹、断裂等故障。需要说明,由于起动时,发动机各部件都是冷态,若突然猛烈加温,其效果则更为恶劣。

## 4 技术改进与预措施

通过上述分析可知,为防止发生燃烧室部件故障,须从以下几方面进行改进和预防:

### 4.1 提高零部件加工质量

严格控制喷嘴、火焰筒、涡流器等部件的加工质量,特别要提高喷嘴加工精度。加强零件制造整个过程中的全面监控,保证喷嘴生产车间试验器的洁净度,并定期检查。扩散机匣上喷嘴安装座的径向尺寸和角度必须在设计图要求的范围内。

### 4.2 厂内试车时控制火焰后移

工厂试车时,尽快判断出是否有火焰后移,以利尽早排除。在发动机厂内台架试车时,可根据台架试车中的几个参数:推力、耗油率、涡轮出口平均总温、高压轴转速、尾喷口直径来判断燃烧室是否出现了火焰后移。

当燃烧室出现火焰后移时,燃烧室效率达不到设计值,燃烧室出口燃气总温降低,涡轮功减小,有使高压轴转速下降趋势,要维持高压轴转速不变,就要放大尾喷口使涡轮背压降低以提高压比,结果涡轮进口总压及平均总温都有所下降。

出现火焰后移时,燃烧室出口燃气总温不是上升而是下降,并不是说燃烧室出口各点温度都下降了,而是指平均值下降了。出现火焰后移时,燃气温差大,热点和冷点都多,这时导向叶片和转子叶片碰到热点以致烧坏的可能性也增多了,燃气温度不均匀,则发动机一方面做功减小,另一方面又易烧坏涡轮叶片,即小状态时烧坏涡轮叶片。

因此,发动机在试车台试车中碰到涡轮进口总温高、耗油率大、推力小、高压轴转速有下降趋势时,必须放大尾喷口直径才能维持高压轴转速不变,同时,若放大尾喷口直径发现涡轮出口总温也随之下降,则有可能是燃烧室出现火焰后移,上述五个参数之间存在着有机联系,互相影响,互为因果,但产生这些现象的本质只有一个——火焰后移。

### 4.3 控制发动机起动超温

由于燃烧室部件的以下几种故障,容易引起起动超温,特别是厂内试车时短时间内多次起动,更应严加预防,以避免起动超温而烧坏涡轮部件。

(1) 燃烧室中漏油系统不畅,起动时积油起火,火焰将拉至尾喷管,故多次起动不成功,必须检查放油。(下转第17页)

空间模型能直观地反映出模具的立体效果,对设计过程中存在的设计问题、设计缺陷可及时发现并进行修改,减少了设计失误;模具的数字模型能够直接用于数控编程,节省了编程人员重复造型的工作时间。“零件主模型”和模具模型作为共享信息源,通过网络技术可用于数控加工、性能及结构分析、检测。自定义特征库的建立亦可实现模具模块化设计。叶片精锻模具三维一体设计,显著地提高了设计质量和设计效率,降低了设计成本,使西航公司的叶片生产在设计和加工方面处于国内同行业技

术领先地位。

叶片精锻模具三维一体化设计,还可推广企业工程技术人员 CAD 的应用范围,提高工程技术人员 CAD 水平,实现了 CAD/CAM 的集成,简化了精锻模具设计与制造的流程。它不仅解决了实施 CAD/CAM 过程中的瓶颈问题,而且使 CAD/CAM/CAE/CAT 集成成为可能,叶片精锻模具三维一体化设计为企业走向 PDM 管理提供了大量的信息资源,打开了企业信息化生产的大门。

(接第 38 页)

(2) 点火电嘴工作失灵,不能及时点火,积油点燃后会使得火焰拉长到尾喷管中,所以当启动时间过长时,要首先检查启动系统是否正常。

(3) 启动过程中,喷嘴油压过低,雾化不良,火焰筒燃烧完全度低,同时火焰会拉长。

(4) 启动回油门锈蚀卡死,启动过程中不能自动回油,以致燃烧室供油量过多,因此要注意对回油门的维护保养。

(5) 启动电机电源不足,发动机带转转速太低,不易点火成功,一量点着,则积油燃烧引起涡轮出口总温超温。

(6) 火争筒联焰太慢,特别是冬季启动,这个问题更为严重(本文提到的这台发动机就属于这种情况),这时只有部分燃烧室投入工作,平均涡轮入口温度不够高,涡轮功率不足以使转子加速。与此

同时,已点燃的燃烧室受调节器和手推油门控制,逐步增加供油量,在空气量不足的情况下,更助长了富油火焰的拉长。更严重的是进入涡轮和尾喷管的气流是部分火焰筒所供应的已点燃的长火焰,和另一部分火焰筒所供应的新鲜油气混合气体,二者混合后更助长了在燃烧室后的发动机通道中猛烈燃烧,并向外喷火。因此,当发动机转速基本不变,涡轮出口温度直线上升,尾喷管喷出大量明火,必须检查原因,排除故障后方能再次启动。

综上所述,只要掌握了燃烧室部件各零组件的功能与特性,在加工、装配过程严格按设计要求,燃烧故障是可以避免。

#### 参考文献

- 1 黄兆祥:航空燃气轮机喷气发动机燃烧室·国防工业出版社,1979 年

## 国民经济产业层次如何划分

我国对三次产业的划分始于 1985 年。当时为了适应建立国民生产总值统计的需要,国家统计局向国务院提出了《关于建立第三产业统计的报告》,报告中首次规定了我国三次产业的划分范围。

随着社会经济的不断发展,我国的国民经济行业变化较大。为了及时准确地反映我国三次产业的发展状况,同时更好地进行国际比较,国家统计局在 2002 年修订的《国民经济行业分类》国家标准的基础上,对原三次产业的划分范围进行了调整,制定了新的《三次产业划分规定》。

目前国际上对三次产业的划分没有统一的标准。但多数国家和国际组织划分的三次产业范围大体是一致的。即将农、林、牧、渔业划为第一产业;将采矿业,制造业,电力、燃气及水的生产和供应业,以及建筑业划为第二产业;将其他行业划为了第三产业。

虽然多数国家划分的产业范围大体是一致的,但也有一些国家的划分与其他国家存在差异,如日本就将采矿业划入第一产业。因此,在进行国际比较时应该注意范围上的差别。(刘 铮)