

# 火箭发动机涡轮泵端面密封性能稳定性研究

白东安 段增斌 张翠儒

(西安航天动力研究所)

**摘要** 对一种发动机密封性能检查中出现的氧化剂泵端面密封泄漏率严重超标现象进行了深入分析以及模拟试验验证,提出了涡轮泵装配环节控制端面密封性能稳定性的措施,并进行了发动机热试车验证。

**关键词** 涡轮泵 端面密封 密封性能 稳定性研究

**分类号** V421.4 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2010) 01-0026-05

## 1 引言

对一种发动机气密性复测过程中,曾发现试验台压力表下降现象,进一步检查发现涡轮泵氧化剂泵端面密封的泄漏率严重超标。为确保发动机涡轮泵的工作可靠性,必须查明密封性能不稳定造成泄漏率超标的原因。

本文对发动机氧化剂泵端面密封漏率超标问题从端面密封结构方面以及密封性能稳定性影响因素方面所进行的大量模拟验证试验工作进行了总结,在此基础上进行了发动机热试车验证。对涡轮泵装配环节影响密封稳定性的因素进行了研究,提出了控制端面密封性能稳定性的保障措施。

## 2 涡轮泵端面密封结构简介

涡轮泵氧化剂泵端面密封如图 1 所示,端面密封由动环部件和静环组件组成。动环部件包括动环、密封圈和衬套(序号 1、2、3)。静环组件包括密封壳体(序号 8)、弹簧(序号 6)、静环座(序号 5)、石墨环(序号 4)和密封圈(序号 7)。不工作时由动环和静环组成的摩擦副在弹簧作用下保持贴合状态,工作时主要依靠介质形成的压力使摩擦副贴紧达到可靠密封。

图 2 是氧化剂泵端面密封动环和燃料泵动环在涡轮泵轴上的装配位置。从图中看到,右端燃料泵端面密封动环与轴肩之间仅装一个调整垫,而处于左

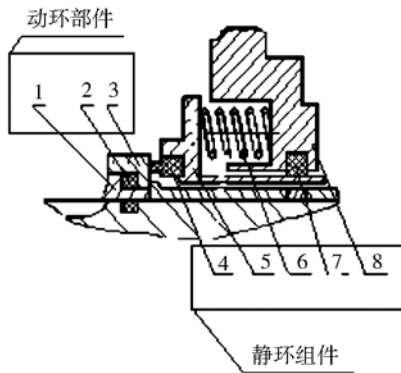


图 1 涡轮泵端面密封结构示意图

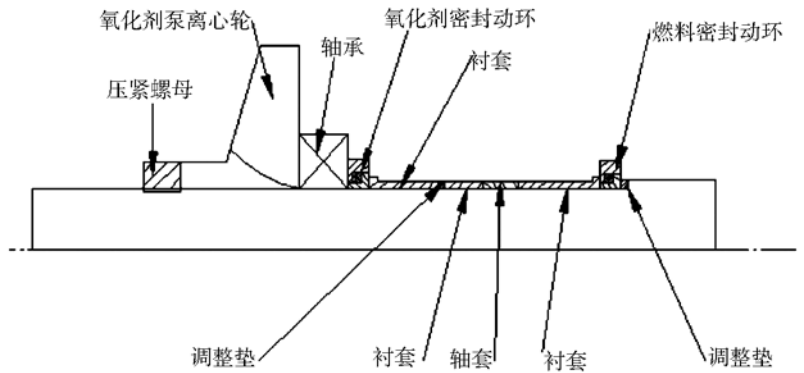


图 2 泵动环装配位置示意图

来稿日期:2009-08-13;修回日期:2010-01-29。

作者简介:白东安(1966.05-),男,硕士,研究员,主要从事火箭发动机涡轮泵研制工作。

端的氧化剂泵端面密封动环与轴肩之间装有轴套或垫片共计 7 个。

### 3 端面密封漏率变化试验验证与分析

#### 3.1 端面密封质量情况分析

发动机装配完毕氧化剂泵密封漏率为 6 泡/min。在复测中发现氧化剂泵端面密封漏率严重超标问题后,对涡轮泵进行了气密检查试验研究和分解检查工作。经过多次气密试验,结果表明,氧化剂泵端面密封漏率又恢复到了总装时的水平。

分解氧化剂泵端面密封,检查动环和静环的密封面、弹簧质量等无异常。对可能影响密封稳定性的涡轮泵轴的垂直度、轴套垂直度、密封壳体、泵壳体垂直度等进行检查确认,均正常,证明产品无质量问题。

#### 3.2 端面密封泄漏模式分析

根据端面密封漏率出厂后出现的漏率变化现象分析,造成漏率变化的原因可能是发动机端面密封的摩擦副因在运输、充放气等环节出现了微变,产生了  $\mu\text{m}$  级的缝隙,造成密封漏率严重超标。从端面密封结构分析,引起摩擦副贴合微变的原因有结构因素和诱发因素。

第一个方面为端面密封结构因素,主要为:

(1)弹簧:弹簧为弹性元件,压缩量随外力变化而变化,能够引起静环组件的浮动;

(2)胶圈:静环外套用以密封的胶圈(图 1 序号 7)为一个软支点,使得静环组件具有摆动的趋势;

(3)静环组件:为防止静环组件在工作中随动环旋转,用两个螺栓穿过静环组件法兰上的两个定位孔,拧紧在密封壳体上,静环组件在径向存在微小自由度;

(4)动环部件:动环部件由图 3 的动环直径,轴向由衬套尺寸 H1 与动环配合尺寸 H 相配合,但尺寸不相等,在气密性检查时充气 and 放气过程中会轴向微量位移,此位移使得动环在气密性检查充气和

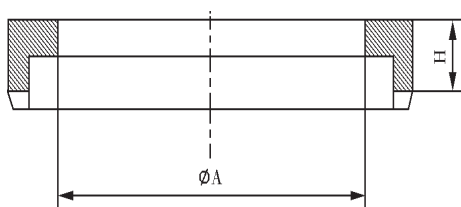


图 3 动环



图 4 动环衬套

放气过程中处于变化状态。

通过分析计算,掌握的摩擦副状态变化情况大致如下:

在涡轮泵装配过程中进行 0.6MPa 气密检查时,分析计算,充 0.6MPa(表压)压缩空气对动环的作用力约 500N,需克服压缩空气对静环组件的力、弹簧力以及胶圈的摩擦力的合力约 300N,因受到轴上调整套的限位,动环向着静环方向微量位移。由于气体外力大于摩擦力,使得氧化剂端面密封动环和静环摩擦副贴合良好,保证检查漏率结果为 6 泡/min。

端面密封气密检查放气后,弹簧推动动环向相反的方向等量回移。这时摩擦副贴合压紧状态较气密性检查时的状态已经发生了变化。

为了解动环被推动所需的外力,对装配好的动环部件进行了位移与力的关系试验,结果见表 1。

表 1 动环位移与力关系试验结果

序号	位移量(mm)	外加力(N)
1	0.04	29
2	0.14	33
3	0.24	31
4	0.34	34
5	0.44	44
6	0.5	71
7	0.52	98

试验表明,动环微量位移需加的外力大于 71N。另外分析计算弹簧推动动环位移后,弹簧力为 80N,与动环位移的力相差很小。因而在动环回移时,弹簧力和摩擦力处于临界平衡状态,在外界诱发因素的影响下容易出现摩擦副的微变,对密封稳定性不利。

第二个方面为外界诱发因素,包括运输过程的振动冲击、气密性检查的充放气和发动机吊装放置过程等。将影响密封性能的各种因素绘制于图 5 中。

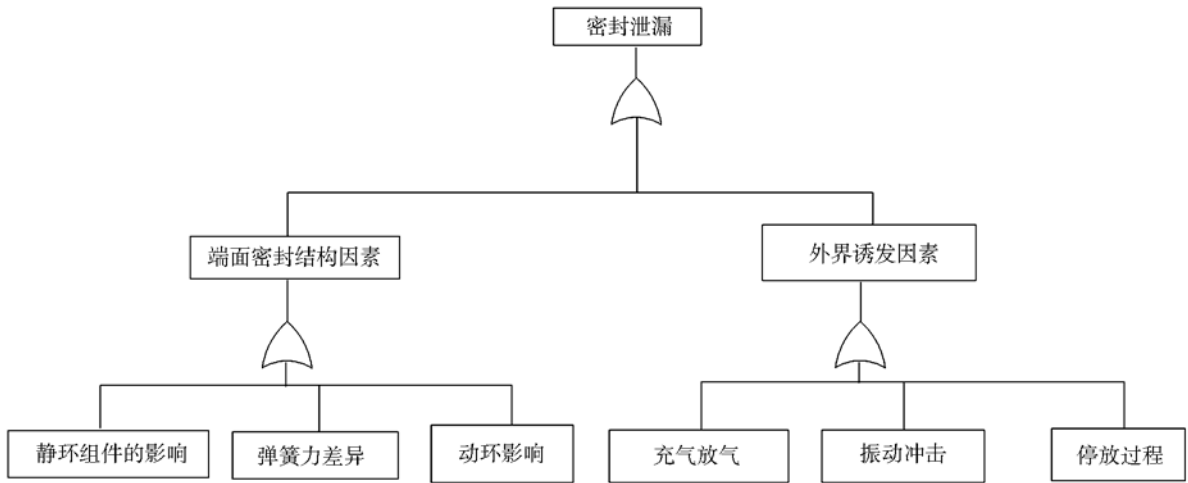


图 5 端面密封泄漏故障树

为验证以上因素对气密性检查的影响，用发动机涡轮泵和另外一台试验验证涡轮泵进行了动环和静环摩擦副贴合状态微变、弹簧偏置、模拟运输、充气放气等试验，情况如下。

### 3.3 试验验证

#### 3.3.1 发动机氧化剂泵漏率变化复现试验

按照上述端面密封弹簧力受力不均匀的影响因素分析，进行了模拟氧化剂端面密封摩擦副贴合状态发生微变的试验以及充气、放气、敲击和停放时间的影响试验等。模拟摩擦副贴合状态微变的试验结果，均表现为摩擦副贴合状态微变后漏率增大，而充气放气、敲击泵壳体、转动涡轮转子等使得漏率具有减少趋势，漏率变化与发动机氧化剂泵的漏率检查气泡数的变化过程相似，试验结果见图 6，基本复现了氧化剂泵的漏率变化过程。

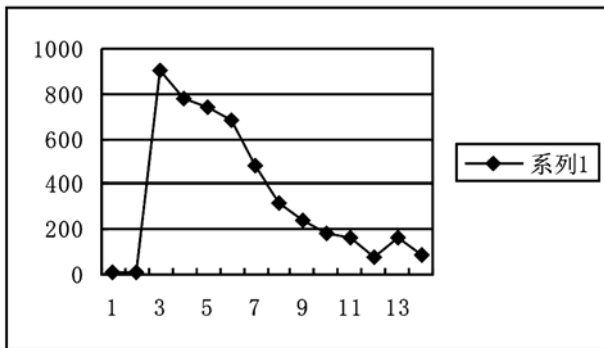


图 6 模拟试验情况

(纵坐标为漏率:泡/min,横坐标为充气放气检查次数)

#### 3.3.2 试验验证涡轮泵漏率变化复现试验

##### (1) 装配中各因素影响试验

为验证涡轮泵装配过程中涡轮泵多余物滚动检查、敲击转子、停放等因素对端面密封气密性的影响，另外装配了一台涡轮泵进行了相关试验。然后再次模拟摩擦副微变的影响，气密检查结果的变化见图 7。图中漏率没有变化过程是装配中各因素下的气密性试验结果，漏率突然增大是通过模拟摩擦副微变实现的，漏率减少是充、放气后的气密检查试验结果。

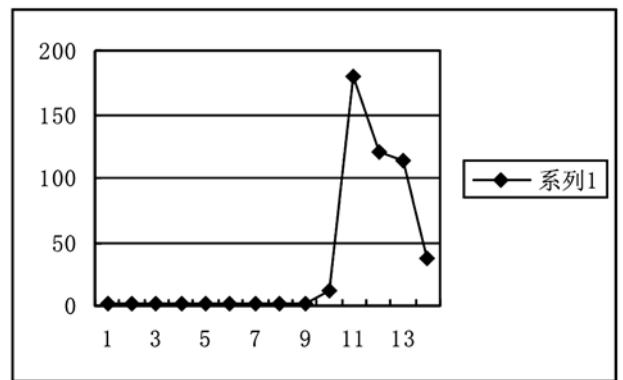


图 7 各因素影响气密试验结果

(纵坐标为漏率:泡/min,横坐标为充气放气检查次数)

##### (2) 弹簧装配偏置影响试验

根据端面密封结构，放置弹簧的密封壳体孔径比弹簧外径大一些，此间隙使得弹簧在运输振动、充气放气等过程中可能发生位置变化或偏斜。弹簧位置的变化也会使弹簧力分布不均，引起摩擦副贴合状态微变。

为考虑弹簧极限装配位置的影响，将端面密封的 8 个弹簧 4 个放置在孔的外侧，另外 4 个对称放

置在内侧,装配完毕进行试验,气密检查漏率走势见图 8。图中 3 次漏率突然增大是停放一段时间引起的,漏率减少是反复充气、放气、敲击和转动转子形成的。

### (3) 模拟运输试验

模拟运输试验按 QJ1183~1185-87 标准进行,模拟铁路和公路运输,气密检查结果的变化见图 9。试验结果表明,模拟运输试验后对气密检查结果有显著的影响。

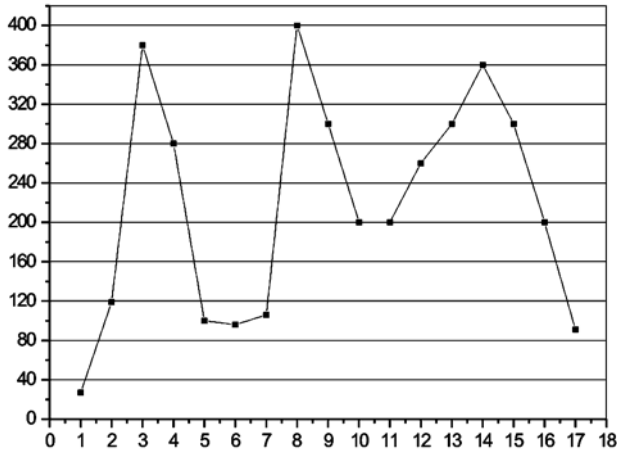


图 8 弹簧偏置影响试验结果

(注:纵坐标为漏率:泡/min,横坐标为充气放气检查次数)

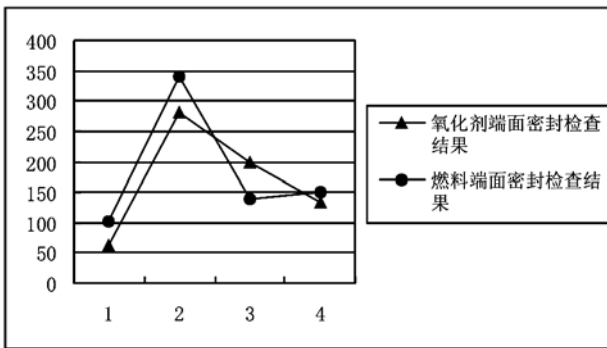


图 9 模拟运输试验气密检查结果

(注:纵坐标为漏率:泡/min,横坐标为充气放气检查次数)

### (4) 小结

端面密封摩擦副贴合状态微变试验表明,弹簧状态变化、多次充放气、敲击泵壳体、运输试验以及涡轮泵放置一段时间后进行气密检查等,密封的漏率均发生明显变化,过程基本复现了发动机氧化剂泵端面密封的漏率变化过程。

## 4 发动机试车情况

对分解的发动机重新装配后,氧化剂泵端面密封检查漏率为 3 泡/min。此后进行了多次氧化剂泵

端面密封充气放气检查,将端面密封气密检查结果绘制成图 10,可以看出涡轮泵停放后进行气检的漏率变化趋势为:停放 40h 后漏率为 90 泡/min,反复充放气后漏率变为 12 泡/min。在发动机总装和试车前检查均为 4 泡/min。试验表明,该涡轮泵的气密检查在停放后是有变化的,反复的充气放气,漏率具有减少的趋势,基本复现了发动机气密检查漏率超标、恢复的过程。

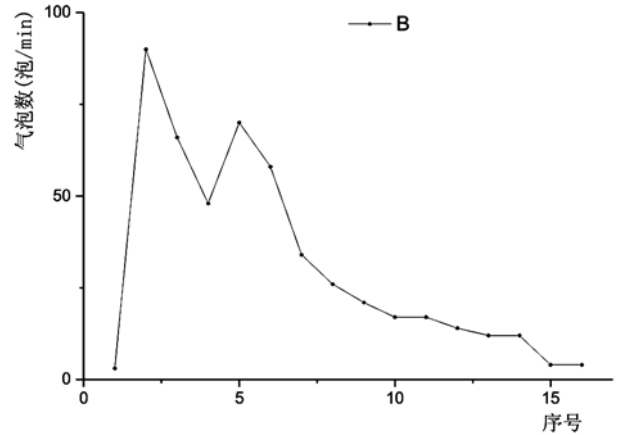


图 10 Y 端面密封气检变化情况

(纵坐标为漏率:泡/min,横坐标为充气放气检查次数)

发动机装配完成后进行了热试车,发动机试车中性能稳定,工作过程正常。通过录像观察氧化剂泵漏管没有出现漏气、漏液现象。

试车完毕对涡轮泵端面密封进行分解检查,端面密封石墨环和动环的密封表面光亮如初。对两个端面密封在气密夹具上进行气密检查,燃料泵端面密封漏率为 20 泡/min,氧化剂密封为 200 泡/min,说明试车结束后燃料泵端面密封仍处于合格范围,氧化剂泵密封漏率尽管超标,但不影响工作。试车表明,端面密封漏率变化现象,在工作中在介质压力作用下恢复到原有状态,不影响发动机涡轮泵的密封可靠性。

## 5 端面密封密性稳定性保障措施

为了提高端面密封性能的稳定性的,经过对涡轮泵装配过程(图 2)对摩擦副贴合状态有影响的因素分析,装配环节主要有几个主要方面,并建立漏率影响的故障树(见图 11),对这些影响因素进行控制可以提高端面密封装配的性能稳定性。

### (1) 端面密封研磨质量

石墨环和动环的研磨质量是保证气密性的关

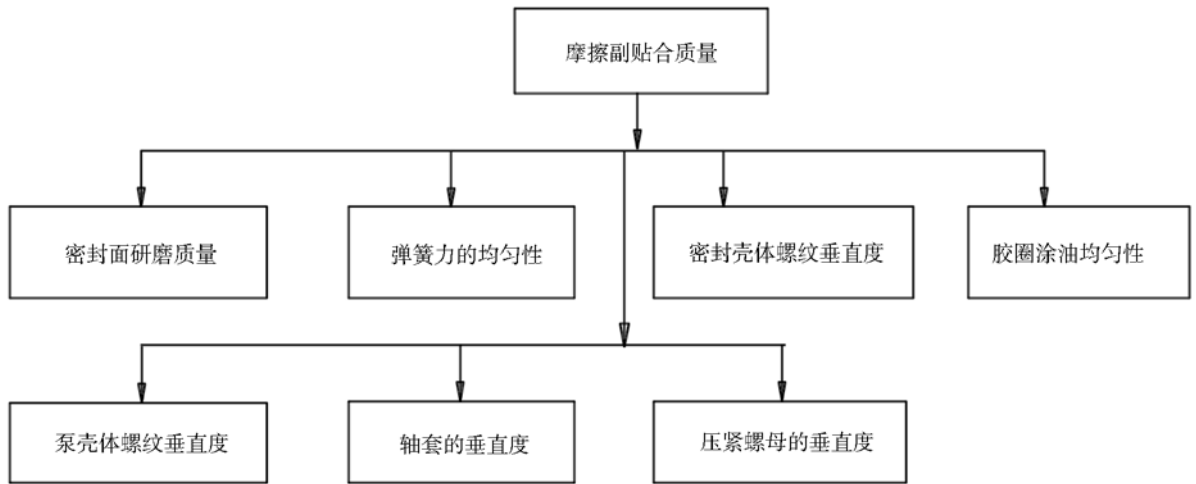


图 11 摩擦副贴合不均匀性的影响模式

键,研磨质量主要取决于研磨平板和研磨膏,应对研磨平板和研磨膏加严控制。石墨环研磨后应放置时效,所以不能现研现装,应提前精研好。研磨完毕按照技术要求检测光环并进行气密检查,石墨环和动环的光环在 2 个以内。只有动环和石墨环的密封面的质量得到保证,才能保证装配后贴合的均匀,满足涡轮泵装配验收的漏率的指标。

(2) 弹簧力的均匀性

弹簧的作用是在静止状态下压紧静环组件和动环,弹簧力的不均匀性影响到动环和石墨环的贴合状态,对气密性造成影响。因此在装配中应保证弹簧力的均匀性。要求在装配前应实测弹簧自由高度、压缩后的弹力,以便在装配中挑选弹力均匀的弹簧。

(3) 轴套垂直度

图 2 为氧化剂泵端面密封动环装配位置情况。端面密封动环装配后与轴的垂直度影响到与静环组件石墨环的贴合均匀性,进而直接影响气密检查结果。从图中看到,燃料泵端面密封的动环与轴肩之间仅装配一个调整垫,该垫平行度在 0.02mm 以内,因而装配后对于动环的垂直度影响小,在气密检查中几乎没有出现漏率变化的不稳定性现象。而氧化剂泵端面密封动环与轴肩之间装有轴套或垫片共计 7 个,平形度积累可能达到 0.08mm,这使得动环装配后相对于轴的不垂直度增大,影响到动环装配后与石墨环的贴合状态,造成了氧化剂端面密封气密检查很容易出现漏率变化的不稳定性。因而在装配中应先将氧化剂泵端面密封动环以下的轴套和垫片打

紧测量四点高度保证与轴的垂直度。实践表明,对氧化剂泵动环下轴套与轴的平行度进行有效控制可以保证漏率的稳定性,避免漏率超标。

(4) 密封壳体与泵壳体

密封壳体上与泵壳体连接的螺纹垂直度对于装配弹簧后的均匀性有一定的影响,应加严控制,以保证装配后密封壳体不会发生偏斜。端面密封壳体装配后,从氧化剂泵壳体大端面测量密封壳体装弹簧孔四点深度是否均匀。另外保证放置密封胶圈的槽内外径和宽度尺寸,使胶圈装配后的压缩均匀,进而使静环组件受到均匀的支撑力。

氧化剂泵壳体上装配密封壳体的螺纹垂直度对于装配密封壳体质量有一定的影响,应加严控制密封壳体与泵壳体之间的螺纹配合精度,保证螺纹的垂直度。

(5) 胶圈装配的控制

在胶圈上涂油膏应均匀,以减少胶圈装配后的摩擦阻力。

(6) 螺母压紧的垂直度

螺母压紧后与轴的垂直度对于动环的压紧后状态也有一定的影响,在装配中要进行测量,应使得装配后的四点高度误差保证在 0.02mm 以内。

近几年,通过对密封摩擦副的研磨质量、装配中轴套垂直度、弹簧力均匀性等方面进行严格控制,涡轮泵装配中气密性检查稳定性大幅提高,漏率超标问题得到了有效控制。

(下转第 36 页)