

# 无损检测技术在姿控发动机 总装中的应用探析

易 霞

(西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 阐述了目视检测、射线照相检测、泄漏检测等三种无损检测技术在姿控发动机上的应用情况。重点介绍了泄漏检测技术, 针对发动机的结构特点、不同系统的性能要求及总装接头连接处各种密封形式在装配测试中分别采用了浸泡法、皂泡法及氦质谱简易包封积累法等不同泄漏检测技术。经过对几种泄漏检测方法的对比分析, 得出了针对不同的系统性能要求, 需要采用不同的泄漏检测方法来满足设计要求的结论。

**关键词:** 目视检测; 射线照相检测; 泄漏检测; 浸泡法; 皂泡法; 氦质谱检漏法

**中图分类号:** V439.7

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2009) 05-0050-06

## Study on NDT technology used in the general assembly of attitude control engines

Yi Xia

(Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** This paper presents the applications of three nondestructive testing techniques, i.e. visual examination, radiographic inspection, and leak detection in attitude control engines. The focus of the paper is on leak detection technology. According to structural features of the engine, performance requirements of different systems and various joint seal forms for general assembly, different leak detection methods such as immersion method, soap bubble method and simple accumulative envelope method by helium mass spectrometry are used in assembly testing. Based on the comparative analysis of the three mentioned leak detection methods, it is concluded that different leak detection methods should be adopted to satisfy performance requirements of different systems.

**Key words:** visual examination; radiographic inspection; leak detection; immersion method; soap bubble method; helium mass spectrometer leak detection method

收稿日期: 2009-04-28; 修回日期: 2009-05-19。

作者简介: 易霞 (1974—), 女, 工程师, 研究领域为姿控发动机装配。

## 0 引言

姿控发动机作为弹体的心脏部位，在国防中起着举足轻重的作用。要保证发动机的装配质量，需对组成发动机的各零、组件进行相关检测。在发动机总装中采用目视检测、射线照相检测及泄漏检测等无损检测方法来保证发动机总装中零、组件质量及发动机装配完成后的整机质量。

## 1 姿控发动机装配中常用的无损检测技术及应用探析

无损检测（缩写为 NDT），就是研发和应用各种技术方法，以不损害被检对象未来用途和功能的方式，为探测、定位、测量和评价缺陷，评估完整性、性能和成分，测量几何特征，而对材料和零（部）件所进行的检验、检查和测试。

对姿控发动机的零、组件检测及发动机系统性能检测均要求在不损害被检对象未来用途和功能的条件下进行。因此，姿控发动机装配过程中，所采用的检测方法均为无损检测方法。通常来讲，应用于姿控发动机上的无损检测方法主要有以下几种，即：目视检测（VT）、射线照相检测（RT）及泄漏检测（LT）。

### 1.1 目视检测技术

目视检测（VT）是仅用人的肉眼与各种低倍简易放大装置相结合对工件表面进行直接观察的检测方法。其中放大装置包括放大镜、袖珍显微镜和内窥镜。目视检测的优点是：快速、方便、直观。其局限是：只能检测表面缺陷，必要时需对表面进行清理。

对于姿控发动机组件而言，装配前，首先要对其进行清洗、吹干。然后对其外观进行目视检查、这样做的主要目的是：防止多余物，同时防止零、组件表面存在超出技术文件范围的划伤、压伤。因为对于整个姿控发动机系统而言，多余物及组件表面存在的超出技术文件范围的划伤、压伤极有可能会对整个发动机系统造成致命性的

破坏。因此，装配前，对于零、组件的外观必须进行肉眼目视检查。肉眼目视检查不可达到的地方，需借助内窥镜来进行检查。在姿控发动机装配过程中，利用内窥镜进行检查的零、组件主要是通的内腔和导管的内腔。对于导管而言，则需进行两次内窥镜检查。首先，在管子下完料后，未进行弯曲前，进行直管状态下的内窥镜检查，主要检查管材内壁有无材料缺陷。在管子弯曲、焊接完成后成为导管，正式装于发动机上之前，对导管内腔进行内窥镜检查，主要是检查导管内腔有无多余物。

目视检测特别是内窥镜检测需要注意的是：

（1）应对被检物体表面进行必要的清理工作，通常情况直管状态下的内窥镜检查是安排在管子下完料、酸洗后进行，弯管状态下的内窥镜检查安排在导管清洗、吹除干净后进行。通的内窥镜检查安排在清洗、吹除干净后，装配前对其进行内窥镜检查；

（2）检测者应是具备检测资质的专业人员。

### 1.2 射线照相检测技术

射线照相检测（RT）是基于被检件对透入射线的不同吸收来检测零件内部缺陷的无损检测方法。射线照相检测的主要优点是：可检测工件内部的缺陷，结果直观，检测对象基本不受零件外廓尺寸的限制；主要局限是：三维结构二维成像，前后缺陷重叠；被检裂纹取向与射线束夹角不宜超过  $10^\circ$ ，否则将很难检出。

在姿控发动机装配中，射线照相检测技术主要应用于导管焊接接头焊缝内部质量的检测。姿控发动机所用导管大部分为钛合金导管，导管与其焊接接头所采用的焊接方法为全位置脉冲自动氩弧焊。设计文件要求焊缝按 QJ2865-97 I 级焊缝标准执行。对于导管焊接接头处焊缝外部质量，可以通过目视检测技术对其进行检查，对于焊缝的内部质量，目视检测是无法检查到的。通常情况下，采用射线照相检测技术中的 X 射线照相检测。通过二维成像，进行底片评定：即视影像形状、位置及黑度情况判定缺陷性质及位置，以便及时进行排除。

进行射线照相检测需要注意的是：

(1) 必须是具有该项检测资质的专业人员才能完成射线照相检测;

(2) 射线的辐射生物效应可对人体造成损伤, 必须采取妥善的防护措施;

(3) 被检裂纹取向与射线束夹角不宜超过 $10^\circ$ , 否则将很难检出。

### 1.3 泄漏检测技术

泄漏检测 (LT) 是基于密闭容器内外存在压差时流体 (气体或液体) 能够从漏道渗入或渗出的原理以检测容器或系统密封性的无损检测方法。

姿控发动机是由多个功能组件装配而成, 而功能组件结合部位往往是密封薄弱环节, 在该部位可能会存在泄漏。由于各组件内外表面具有较高的光洁度, 对于气体的吸附性及渗透性都很小, 因此, 姿控发动机上的组件材料自身所产生的泄漏几乎可以忽略不计, 经过试验发现, 产生泄漏的部位主要来源于导管的焊缝处、管路与各组件之间的连接密封处。

泄漏检测的方法有多种, 针对姿控发动机不同系统的性能参数要求, 在满足设计要求的情况下, 通常应用于姿控发动机上的泄漏检测方法有如下三种: 单根导管气泡检漏技术、发动机系统皂泡法检漏技术及氦质谱检漏技术。

#### 1.3.1 单根导管气泡检漏技术

姿控发动机所用导管均为钛合金或不锈钢导管, 对于导管的焊缝处, 在导管生产完毕后, 且在其装于发动机系统之前, 需对其焊缝处进行泄漏检测, 泄漏检测的主要方法采用气泡检漏法。

气泡检漏法的主要原理是: 当漏孔两侧存在压差时, 示漏气体就通过漏孔从高压侧向低压侧流动, 如果在低压侧有显示液体 (如水、氟油、酒精等), 漏孔处将有可能吹起一个个气泡, 从而显示出漏率大小及漏孔的位置。姿控发动机上的单根导管运用此方法进行检漏时, 示漏气体选用压缩空气或氮气, 显示液体选用水。操作方法如图1所示。

具体操作步骤是:

(1) 将被检导管装好堵盖或堵头等工艺装备, 连接充气管路, 向被检导管充气, 使其压力

上升到规定的数值;

(2) 缓缓地将被检导管放入水槽中;

(3) 仔细检查导管焊缝处, 观察是否有单个或成串气泡冒出。观察时间不宜太短, 现场工作中一般观察时间为1~3min左右, 不允许有单个气泡冒出。必要的时候, 可适当延长观察时间。

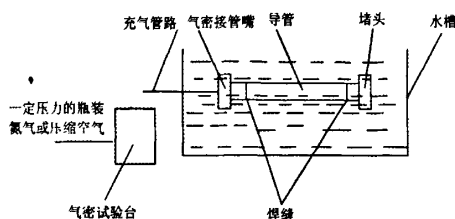


图1 单根导管在水中气泡法检漏示意图

Fig.1 Leak detection of single tube immersed in water by bubble emission

这种方法又称为充气加压气泡法, 是气泡检漏中浸泡法的一种。值得注意的是, 气泡检漏法是一种粗检漏法, 用于检测被检部位漏还是不漏, 一般不作定量要求。同时采用这种方法进行检漏, 所检出漏孔的漏率与气泡形成的直径、气泡形成的速率、充气种类及充入压力有关。通常来说, 规定显示液体为水, 示漏气体为压缩空气或瓶装氮气, 观察时间为2~3min左右, 不允许有单个气泡冒出, 这样, 所检测出的漏率约在 $10^{-4} \sim 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 左右。

#### 1.3.2 皂泡法检漏

对于姿控发动机而言, 将其整体浸入水中进行气泡法检漏是不可行的, 因为整机上的许多组件是禁水的, 在系统不要求定量检漏的情况下, 通常采用气泡检漏法中的皂泡法进行泄漏检测。

皂泡法的检漏原理与气泡法检漏原理相同, 即当漏孔两侧存在压差时, 示漏气体就通过漏孔从高压侧向低压侧流动, 如果在低压侧有显示液体, 漏孔处将有可能吹起一个个气泡, 从而显示出漏率大小及漏孔的位置。当显示液体为肥皂液时, 这种方法也就称为皂泡法。实际上, 它属于气泡检漏法的其中一种检漏方法。

具体的操作方法是: 通过配气系统向姿控发动机系统内充入一定压力的气体, 在各个连接部

位涂刷肥皂液，观察有无气泡产生。肥皂液是由中性肥皂（即其游离碱含量小于0.05%）与蒸馏水充分搅拌后配制而成的，配制肥皂液时，要求所配制的肥皂液应浓、稠，不宜太稀。在涂刷肥皂液时，要让肥皂液慢慢流到被检部位，防止肥皂液自身产生气泡而造成误判。

对于涂刷肥皂液的方法也可因结构的不同而做一些微小的变化。姿控发动机组件之间相互连接的密封结构主要有导管与相邻组件（即导管接头）的密封结构、组件与组件密封结构。组件与组件密封结构通常为橡胶O形圈的密封形式，橡胶O形圈受外力挤压轴向膨胀来实现密封。导管与相邻组件（即导管接头处）的密封结构分以下三种形式：即插入式接头加密封垫片的形式、球头喇叭口的形式及导管接头处密封垫片加橡胶O形圈的形式。

当导管与相邻组件（即导管接头处）的密封结构为插入式接头加密封垫片的形式时，此处的密封垫片材料为铝垫或F4材料，要求密封垫片及密封面具有较高的光洁度，不得出现划伤及划痕。装配时，导管接头不得出现偏斜，在外力的作用下，密封垫片塑性变形后，嵌入导向段的配合间隙中来实现密封。此种密封形式常用于有较高密封要求的部位。例如：姿控发动机的贮箱段或高压段。

当导管与相邻组件（即导管接头处）的密封结构为球头喇叭口的形式时，要求球头及喇叭口均需具有较高的光洁度。装配时，在外力作用下，球头产生塑性变形与喇叭口实现面接触，从而实现密封的。此种密封形式简单，应用较普遍，常用于对密封要求一般的部位。例如：姿控发动机低压段。

当密封结构为导管接头处密封垫片加橡胶O形圈的形式时，这里的密封垫片目前应用较多的为铜垫。在外力作用下，垫片产生塑性变形，同时，橡胶O形圈受外力挤压轴向膨胀，从而实现密封。由于这种密封结构为两道密封，因而密封稳妥、可靠，常用于姿控发动机高压段密封。

对于组件连接处，采用皂泡法检漏时要求将肥皂液涂满所有缝隙，即涂满一整圈。否则，漏

出的气体有可能从没有涂肥皂液的部位漏掉，容易造成漏检。

对于导管接头处，由于所有导管外套螺母均有气密检查孔，如果产生泄漏，气体必将先从气密孔中漏出。因此，对于导管接头处采用皂泡法检漏时，只需要将肥皂液涂于外套螺母的其中一个气密检查孔处，另一个气密检查孔用手堵住，便可进行皂泡法气密性泄漏检测。

进行皂泡法检漏时应注意：要先向系统内充入一定压力值的气体，然后稳压一段时间，再进行涂肥皂液法检漏，对于高压系统检漏时，应将发动机整机放入防爆间中进行，以保护操作者的安全性，同时，对于高压系统检漏，充气完成后，稳压的时间尽可能长一些，通常要求大于30min。进行皂泡法检漏时，实际操作中要求观察时间不少于30s，不允许有气泡产生。必要时，可适当延长观察时间。检漏完成后，应及时清理干净肥皂液。皂泡法检漏所使用的气体一般为压缩空气或瓶装氮气。一般采用这种方法所检测出的漏率范围在 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 左右。对于更高量级要求的泄漏检测，皂泡法是不太容易达到的。

### 1.3.3 氮质谱检漏法

根据姿控发动机不同系统的泄漏检测要求，对于有些部位的检漏，不仅需要进行定位粗检漏，而且需要进行定量细检漏法，如姿控发动机气瓶高压系统及贮箱系统的检漏。皂泡法只能用于定位检漏，对于定量检漏，可以运用氮质谱检漏法来完成。

氮质谱检漏的方法有很多种，应用于姿控发动机上的检漏方法通常为氮质谱正压检漏法中的简易包封积累法。氮质谱检漏仪的吸枪在包封积累容积中获得从被检部位泄漏氮气，从而在氮质谱检漏仪上显示泄漏大小的方法则称之为氮质谱正压检漏法中的简易包封积累法。运用氮质谱正压检漏法进行泄漏检测时，首先要有比对装置。通过比对装置在氮质谱检漏仪上产生的信号值与被检查点在同一检漏仪上产生的信号值进行比对，可以给出被检漏点的漏率大小。它可以是一个已知漏率的并带有气室的装置，其使用时压力

与校准压力一致, 氦气浓度与被检系统一致。比对装置氦质谱检漏示意图如图2所示。

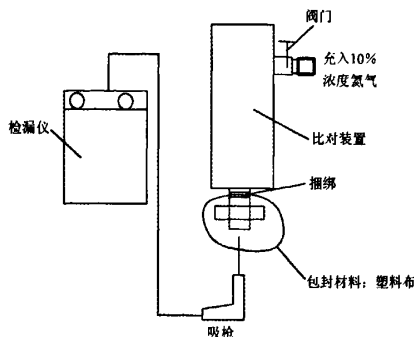


图2 比对装置氦质谱检漏示意图

Fig.2 Helium mass spectrometer leak detection with comparison device

同时, 进行氦质谱正压简易包封积累法时, 还需要确定它的积累时间, 通常情况下规定积累时间为10min左右。导管接头处的氦质谱检漏示意图如图3所示。

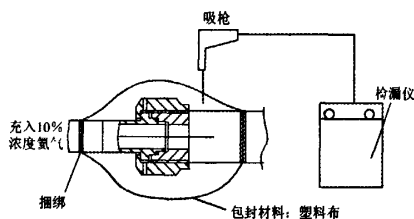


图3 导管接头处氦质谱检漏示意图

Fig.3 Helium mass spectrometer leak detection of tube fittings

其具体操作步骤为:

(1) 对被检部位 (主要是导管接头处) 用塑料布进行包覆;

(2) 对已知漏率为  $Q_0$  的比对装置用塑料布进行包覆, 积累10分钟后, 用氦质谱检漏仪的吸枪穿过塑料布进行检测, 记录仪器的净输出值  $\Delta I_0$ 。这里值得指出的是: 比对装置气室内含有与被检系统相同浓度的氦气。其混合气体的压力与正压比对标准漏孔校准时的压力一致;

(3) 向高压气瓶系统充入规定压力的混合气体, 此混合气体由氦气与压缩空气 (或瓶装氮气) 组成;

(4) 积累一定时间后, 用氦质谱检漏仪的吸枪穿过塑料布进行检测, 记录仪器的净输出值  $\Delta I$ ;

(5) 按以下公式进行计算:  $Q = Q_0 \cdot \Delta I / \Delta I_0$

式中,  $Q$  为被检部位实际漏率,  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ;  $Q_0$  为正压比对标准漏孔漏率,  $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ ;  $\Delta I_0$  为测量正压比对标准漏孔 (比对装置) 的净输出值;  $\Delta I_0 = I_1 - I_0$ ;  $\Delta I$  为测量被检部位的净输出值;  $\Delta I = I_2 - I_0$ ;  $I_1$  为测量比对装置的仪器显示值;  $I_2$  为测量被检部位的仪器显示值;  $I_0$  为环境本地值。

运用此方法进行检漏时, 应注意以下几点:

(1) 检漏工作场地温度为:  $20 \pm 5^\circ\text{C}$ , 相对湿度不大于80%;

(2) 检漏工作场地不得有较大的空气流动, 场地应清洁, 不得有氦气污染; 当检漏场地的氦气污染源为发动机组件本身时, 应想办法将其排除, 以免影响检漏结果。例如: 进行姿控发动机控制气路气密性氦质谱检漏时, 由于安全阀存在着一定的安全泄漏量, 因此, 必然会影响到其周围管路的检测结果。通常, 为了保证检漏结果的正确性, 需要利用一个自制的专用工装装于安全阀上, 利用此工装将安全阀所泄漏出来的氦气引出工作场地;

(3) 检漏工作场地附近应无强磁干扰, 无较大的震动;

(4) 检漏仪打开后, 在对系统进行充氦气之前, 应先测出环境本地值  $I_0$ ;

(5) 检漏部位 (即导管接头处) 通常用塑料布进行包覆, 包覆的具体状态如图3所示。吸枪穿入塑料布进行检测, 对于姿控发动机而言通常规定反应时间为10s, 10s内记录仪器最大输出值, 即为实测值:  $I_2$ 。  $I_2$  与  $I_0$  的差值即为仪器的净输出值  $\Delta I$ ;

(6) 对于检漏不合格处, 即氦质谱检查量值偏大的部位, 通常的做法是: 先泄掉检漏系统的压力, 拆除包覆部位。对检漏不合格处进行故障排除。排故后重新对该部位进行包覆, 按要求重新进行氦质谱检漏;

(7) 对于姿控发动机的某些特殊部位, 应采取特殊方法进行包覆。例如: 某型号姿控发动机

上与气瓶接管嘴相连接的导管连接处。由于此处气瓶接管嘴与气瓶的连接方式为金属与非金属的连接方式。通常来讲,如果采用图3所示的传统包扎方法,会因为气瓶接管嘴自身根部结构的微渗漏,导致此处氦检值的失真。因此,针对此处的特殊结构,首先要做到的是将气瓶接管嘴根部用塑料布、胶布及保险丝进行单独捆扎,然后再对此处导管检测部位用传统方法进行包扎。这样做的目的主要是将外界影响源减小至最低,避免其影响检测结果。

### 3 结论

(1) 目视检测技术能够直观地检测出姿控发动机零、组件表面缺陷及内腔的多余物,有效地杜绝了姿控发动机功能件表面的磕、碰伤及内腔的多余物等质量问题带入总装发动机系统上。

(2) 射线照相技术能够有效地检测出焊接件焊缝内部质量缺陷,防止了导管焊接部位及其余焊接件的焊接缺陷带到总装发动机上。

(3) 泄漏检测技术可以准确地检测出单根导管焊缝泄漏,并进行系统泄漏后的定位及定量分析,通过泄漏检测保证了发动机系统联接件的密封完好性。

在姿控发动机总装中通过以上三种无损检测方法的应用,确保了姿控发动机总装过程中产品性能的完好性,更好地预防了姿控发动机装于弹体上后可能出现的诸多质量隐患。

#### 参考文献:

- [1] 吴孝俭, 闫荣鑫. 泄漏检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [2] 王自明. 无损检测综合知识[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 米连柯 H II. 液体火箭发动机试验研制的理论基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1978.
- [4] 黄立德. 发动机制造技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1985.
- [5] 袁晓峰, 许化龙, 徐志高. 液体火箭发动机诊断知识挖掘系统设计[M]. 火箭推进, 2008, 34(3): 44-48.

(编辑: 马 杰)

(上接第38页)

(2) 改变低压腔体积。适当增大低压腔体积可使气流在低压腔内的缓冲作用加大, 增大了抗干扰能力, 如在出口增设小容器。同时低压腔体积过大会导致压力滞后大, 加大了压力振荡和阀芯振动的相位差, 在一定的条件下可能使振幅增大而导致不稳定。

另外, 可以通过增加弹性元件刚度, 减小运动件质量以及改变管路系统都可以使减压阀的稳定性能提高, 要注意的是, 改变某些结构参数能使减压阀动态稳定性提高, 同时又会使静态偏差增大, 因此要全面综合考虑, 最终通过实验验证来确定。

#### 参考文献:

- [1] 尤裕荣, 曾维亮. 逆向卸荷式气体减压阀的动态特性仿真[J]. 火箭推进, 2006(3): 24-29.
- [2] 陈启智. 液体火箭发动机控制与动态特性理论[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993.
- [3] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析-MATLAB语言应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [4] 刘国球 主编. 液体火箭发动机原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [5] 刘红军, 张恩昭, 董锡鉴. 涡轮泵联动试验系统参数稳定性分析[J]. 推进技术, 1999(4): 32-35.

(编辑: 马 杰)