

卫星单组元肼发动机堵塞失效分析

刘瀛龙, 付拓取, 陈 君, 陈 健
(北京控制工程研究所, 北京 100190)

摘 要: 某型单组元肼发动机在整星 AIT 阶段进行专项测试检查时发现产品无喷气。针对该问题进行了故障定位、试验检测和分析。分析结果表明, 导致该故障的原因是产品经历的环境在产品内部建立了缝隙腐蚀和电偶腐蚀的条件。在长期的腐蚀效应下, 生成的腐蚀产物将流体通道堵塞。

关键词: 单组元肼发动机; 缝隙腐蚀; 电偶腐蚀; 堵塞

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2015) 05-0067-05

Analysis of blockage failure for monopropellant hydrazine engine in satellite

LIU Yinglong, FU Tuoqu, CHEN Jun, CHEN Jian
(Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100190, China)

Abstract: There was no gas exhausted from a monopropellant hydrazine engine, which was found when it was tested during AIT. The fault location, testing and analysis for this failure were carried out. The analysis results show that the reason of the failure is the environment where the thruster suffered from the crevice corrosion and the galvanic corrosion. The corrosion product which was generated by the long-term corrosion obstructed the fluid channel.

Keywords: monopropellant hydrazine engine; crevice corrosion; galvanic corrosion; blockage

0 引言

单组元肼发动机广泛应用于卫星、飞船等航天器, 主要用于航天器的姿态调整、位置保持或轨道机动, 是航天器控制系统的重要执行部件。

单组元肼发动机如图 1 所示。其工作原理是电磁阀打开后, 一定压力的液态推进剂流入到发

动机催化床, 在催化剂的作用下, 推进剂在催化床内发生化学分解反应, 释放化学能, 生成高温高压的燃气, 最终经过拉瓦尔喷管将燃气加速至超音速排出发动机, 产生推力。

导致单组元肼发动机失效的常见模式为流体泄漏和流体通道堵塞。特别是对于航天器用小推力单组元肼发动机, 其内部流道尺寸较小, 对多

收稿日期: 2015-06-02; 修回日期: 2015-07-15

作者简介: 刘瀛龙 (1984—), 男, 工程师, 研究领域为空间单组元发动机

余物等可以造成流体通道堵塞的因素更为敏感。

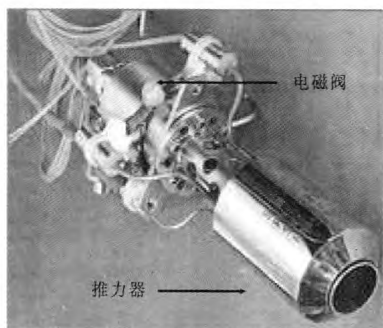


图 1 单组元肼发动机

Fig. 1 Monopropellant hydrazine engine

某型单组元肼发动机在整星 AIT 阶段进行专项测试检查时,通过整星发出打开电磁阀指令并通气情况下,测试仪器发现该发动机未喷气。

通过初步排查,排除了其他可能因素,将问题定位在该台发动机流体通道被堵死。

1 故障定位

通过对发动机流体通道被堵死的可能原因进行分析,从产品的出口、入口和内部流道三个方面,列出了以下 5 个需要排查定位的点:

- 1) 喷管喉部被堵死;
- 2) 电磁阀入口被堵死;
- 3) 电磁阀与推力器连接处流道被堵死;
- 4) 电磁阀内部流道被堵死;
- 5) 推力器内部流道被堵死。

1.1 喷管喉部排查

产品在整星初步排查后,拆除了喷管出口检测工装,采用照明设备对喷管喉部进行了检查,喷管喉部洁净无多余物,未被堵死,可以排除该项疑点。

1.2 电磁阀入口排查

将故障发动机与整星管路拆开,在光线充足的条件下对电磁阀入口进行了检查,电磁阀入口洁净无多余物,未被堵死,可以排除该项疑点。

1.3 电磁阀与推力器连接处排查

将故障发动机从整星拆下后,在万级洁净间将发动机的电磁阀和推力器拆开,在 10 倍显微镜下进行了检查,电磁阀出口和推力器入口均洁净无多余物,未被堵死,可以排除该项疑点。

1.4 电磁阀内部排查

将故障发动机的电磁阀和推力器分开后,对电磁阀套塑封袋单独进行 0.2 MPa 通气试验,试验过程中气体正常排出,并且无多余物吹出。

之后,对电磁阀进行了流量压降性能复测,测试结果符合电磁阀技术指标要求,并与电磁阀生产阶段的数据相吻合。因此,可排除该项疑点。

1.5 推力器内部排查

将故障发动机的电磁阀和推力器分开后,对推力器套塑封袋单独进行 0.2 MPa 通气试验,试验过程中无气体排出。将试验气体压力升高至 0.5 MPa,推力器依然无气体排除。

因此,故障发动机流体通道被堵死的位置可定为在推力器内部的流体通道处。

2 试验检测

为了得到推力器内部流体通道被堵死的具体原因,进行了进一步的试验检测分析。

推力器结构如图 2 所示。电磁阀与推力器分开后,对推力器进行了三维 CT 检查。通过对 CT 照片进行分析后发现,毛细管下游位置的流体通道中成像异常(图 3)。

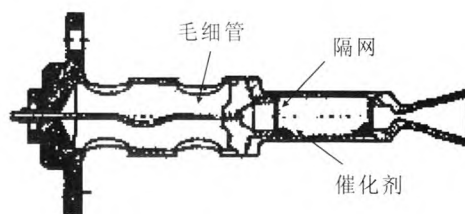


图 2 推力器结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of thruster

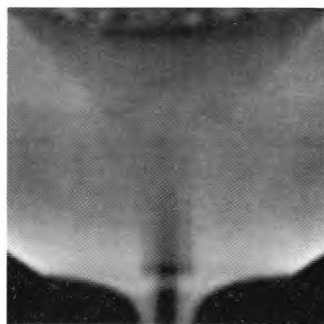


图 3 推力器 CT 照片

Fig. 3 CT picture of thruster

将推力器的喷注器与喷管分开, 分解后发现喷注器出口位置的溅网存在破损, 并有绿色、黄色和红色多余物, 多余物将喷注器仅有的一支毛细管孔口堵死, 如图 4 所示。

溅网在推力器中的作用是将催化剂与毛细管隔离, 并起到一定的推进剂雾化作用。从溅网的破损形貌上可初步判断推力器内部部分零件受到腐蚀。之后, 对腐蚀产物进行了扫描电镜分析和 XPS 分析。图 5 为扫描电镜照片。

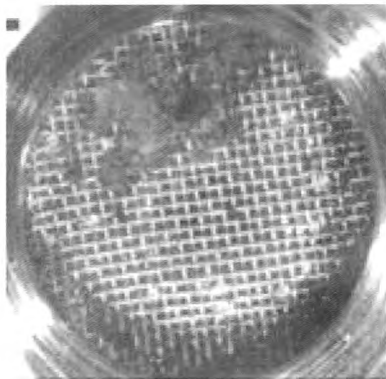


图 4 溅网破损形貌
Fig. 4 Breakage of diffuser



图 5 腐蚀产物扫描电镜照片
Fig. 5 SEM picture of corrosion products

从扫描电镜照片可以看出, 多余物表面粗糙, 呈泥纹形貌, 为溅网的金属网丝受到腐蚀破坏后生成的腐蚀产物。

故障发动机溅网所用材料为高温合金 GH3044, 其化学成份见表 1。

在腐蚀产物成份的扫描电镜结果中发现, 腐蚀产物的成份中, O 元素和 Cl 元素为网丝合金

化学成分以外的元素, O 元素含量在 20%~45%, Cl 元素的含量在 10%左右。

表 1 高温合金 GH3044 化学成份表
Tab. 1 Chemical compositions of GH3044

						%
C	≤0.1	Mo	≤1.5	Mn	≤0.5	
Cr	23.5-26.5	Al	≤0.5	Si	≤0.8	
Ni	余	Ti	0.3-0.7	P	≤0.013	
W	13-16	Fe	≤4	S	≤0.013	

在腐蚀产物的 XPS 分析结果中发现, O 元素和 Cl 元素均为 O^{2-} 和 Cl^- 的离子态, 并存在 Ni^{+2} , Fe^{+3} 等金属离子。从成分分析可知, 腐蚀产物为金属化合物状态, 绿色多余物为镍盐, 红色和黄色的为铁盐。

在正常催化剂的 XPS 分析中同样发现了 Cl^- , 其来源于催化剂制备过程中的残留。发动机所用催化剂为 Al_2O_3 多孔介质载体上沉积活性金属 Ir, 其在工艺制备中需要氯铱酸 (H_2IrCl_6) 的酸性溶液作为前驱物, 后续有多道工序环节进行 Cl 元素的去除, 但成品中仍会存在 1%左右的 Cl 元素残留。

腐蚀产物中的 Cl 元素与催化剂中的 Cl 元素价态相同, 并且 Cl 元素没有其他来源。因此, 腐蚀产物中 Cl 元素来源于催化剂。

3 分析与讨论

从腐蚀学理论可知, 只有满足了腐蚀条件, 金属才会发生腐蚀。

在发动机所经历的过程中, 并未接触到强腐蚀性介质, 也未经历雨雪的直接冲淋, 全部过程均处于常规大气环境中, 期间存在相对湿度较大 ($\geq 70\%$) 的情况。

从发动机的经历中可以看出, 唯一的异常现象为发动机经历过相对湿度较大的环境。在相对湿度较大的环境中, 金属表面会对大气中的水份进行吸附, 形成液膜。不同物质或同一物质的不

同表面状态,对于大气中水分的吸附能力不同,形成液膜所需的相对湿度条件不同。金属表面形成液膜所需相对湿度的最低值称为临界相对湿度,空气中的相对湿度超过临界相对湿度后,金属表面便会形成液膜,

文献 [3-5] 中提到一般情况下金属的临界相对湿度在 70%左右,文献 [6] 中列出了几种常用金属的临界相对湿度,分别为: Fe65%, Cu70%, Ni70%和 Al76%。

另外,若在金属表面上沉积有固体颗粒物,也会促进金属的腐蚀,其促进作用主要体现在以下两个方面:一为固体颗粒的存在加速了气相中水汽的吸收,促进了腐蚀性电解液膜的形成而加速基体金属的腐蚀过程,其中吸湿性颗粒的存在尤为明显;另一方面则体现在电解液膜形成后,固体颗粒中若有离子参与了其中的阴极或阳极过程,将加速金属基体的腐蚀,尤以 Cl^- 为甚。

发动机溅网材料中的主要元素为 Ni, Ni 的临界相对湿度为 70%;从图 2 结构示意图中可知,颗粒状催化剂与溅网紧密接触,同样会加速水汽的吸收。因此,溅网材料的临界相对湿度在 70%左右,相对湿度超过此值便会在溅网表面形成液膜,如图 6 所示。

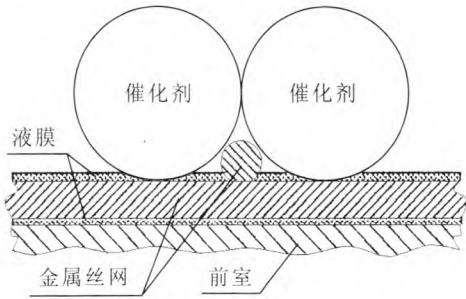


图 6 液膜示意图

Fig. 6 Schematic diagram of liquid membrane

从图 6 中可以看出,各部件间的接触方式使得接触点附近形成缝隙腐蚀的条件。所谓缝隙腐蚀是指由于金属与金属或金属与非金属之间形成特别小的缝隙,使得介质进入缝隙内并处于停滞状态,从而引起缝内金属加速腐蚀的现象。

例如将图 7 所示构件置于含有 Cl^- 离子的中

性水中 ($\text{pH}=7$),初始阶段在缝隙内外金属表面上进行着均匀的金属的溶解(阳极过程)和氧的去极化反应(还原过程):

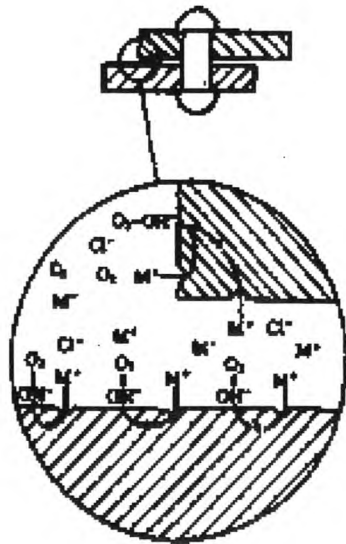
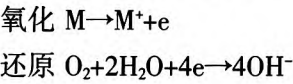


图 7 缝隙腐蚀初始阶段示意图

Fig. 7 Initial stage of crevice corrosion

当构件刚置于溶液时,缝隙内外的反应是同样进行的。在金属与溶液之间电荷保持均衡,金属溶解时产生的电子立即被氧还原消耗掉。但相对闭塞的缝隙构型使缝内溶液呈滞流状态,缝隙中的氧很快被消耗掉。由于氧的扩散迁移很困难,因此在缝隙内氧的还原反应被迫中止,此时,缝隙内微电池反应被制止了,氧还原反应全部在缝外金属表面进行,而缝内只发生金属溶解的阳极过程,缝内外形成了氧浓差电池,加之缝外大阴极和缝内小阳极的相对面积关系,加速了缝内金属的阳极溶解反应(图 8)。

缝内金属的阳极溶解过程不断产生大量金属阳离子,由于缝隙的相对闭塞性,限制了在缝内富集的金属阳离子向外迁移,缝内溶液中 M^{+} 过剩。为了保持电荷平衡,缝隙外部溶液中的 Cl^- 离子不断向缝内迁移,使缝内 Cl^- 离子浓度增大,导致金属氯化物浓度增加。同时缝隙内金属氯化物又被水解成氢氧化物和游离酸:

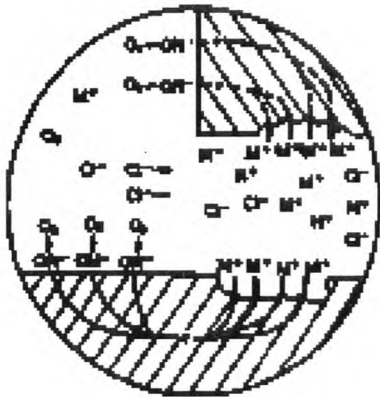
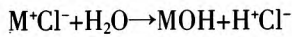


图 8 缝隙腐蚀发展阶段示意图

Fig. 8 Developmental stage of crevice corrosion

导致缝内 pH 值下降, 酸度增加。缝内这种低 pH 值高酸度环境, 更加速了金属的阳极溶解过程, 金属阳离子浓度提高, 这就又进一步造成了 Cl^- 离子向缝内迁移, 如此循环往复, 形成一个自催化过程, 使缝隙腐蚀过程随时间而加速和强化。

故障发动机的腐蚀过程正是上述存在自催化的缝隙腐蚀过程。随着腐蚀的不断加剧, M^+ 金属离子趋于饱和, 与 OH^- 和 Cl^- 离子不断结合析出形成含有固态金属氧化物 (金属氧化物由金属氢氧化物分解生成) 和金属氯化物的腐蚀产物。从化学反应过程可以看出, 腐蚀产物中的氧元素来源于发生还原反应的氧气, Cl^- 离子来源于催化剂, 其为了保持缝内溶液电荷平衡, 从催化剂中迁移至溶液中。

随着腐蚀产物的不断累积, 喷注器的毛细管被堵死, 最终导致故障发生。

与此同时, 故障发动机中所用的催化剂为 Al_2O_3 多孔介质载体上沉积活性金属 Ir, Ir 主要是以金属态存在。Ir 的化学性质极其稳定, 相对于溅网的合金成分, Ir 具备较高的电极电位, 其与溅网合金之间形成了电极电位差。该电极电位差导致催化剂和溅网之间建立了电偶腐蚀的条件,

在上述缝隙腐蚀的基础上, 电偶腐蚀起到了进一步促进作用。

4 解决措施

上文所述, 造成该发动机发生故障的原因在于产品经历了相对湿度 $\geq 70\%$ 的环境。因此, 对该问题的解决措施是从控制环境相对湿度入手, 主要有以下几个方面:

1) 在发动机生产、贮存和装星的各个环节, 严格控制相对湿度满足 $\leq 60\%$ 的要求。

2) 在发动机转运过程中, 严格执行包装箱中内置有效干燥剂的要求, 保持产品的局部环境干燥。

3) 对无法保证相对湿度有效测量和控制的特殊过程、特殊环节, 必须加强发动机局部相对湿度的临时控制措施, 在发动机喷管出口处绑缚带有有效干燥剂的袋子, 并尽量缩短时间。

4) 在整星安装后, 推进剂加注前, 从贮箱通过电磁阀向发动机通入干燥、纯净的氮气或氦气进行干燥吹除处理。再采用工装将发动机喷管出口处进行密封, 并再次充入干燥、纯净的氮气或氦气, 保持发动机内部干燥。之后关闭电磁阀并调整贮箱气体压力, 确保电磁阀密封副上下游处于正压差状态。

5) 在整星安装后, 可定期对发动机内部采取抽真空处理, 将可能存有的水份抽走, 保持发动机内部干燥。

5 结论

对某型单组元肼发动机在整星 AIT 阶段进行专项测试检查时发现产品无喷气的故障进行了深入的分析, 得出了导致该故障的原因是产品经历了相对湿度 $\geq 70\%$ 的环境, 在发动机内部形成液膜, 建立了缝隙腐蚀和电偶腐蚀的条件, 在长期的腐蚀效应下, 生成的腐蚀产物将毛细管内腔堵死。针对该问题, 从控制环境相对湿度方面, 提出了有效的解决措施, 通过改进过程控制, 提高产品的可靠性。

(下转第 94 页)

参考文献:

- [1] 陈志坚, 孟庆平, 李建. 表面张力贮箱推进剂管理装置的计算[J]. 上海航天, 2001(5): 23-32.
- [2] 李治, 沈赤兵, 周进. 通道式表面张力贮箱通道的计算和确定[J]. 推进技术, 2003, 24(3): 244-246.
- [3] DOMINICK S, TEGART J. Orbital test results of a vaned liquid acquisition device, AIAA 94-3027[R]. USA: AIAA, 1994.
- [4] HOPKINS M A, DOLVIN D J, PAUL D B, et al. Structure technology for future aerospace system, AIAA-1998-1869 [R]. USA: AIAA, 1998.
- [5] DAROOKA D K, JENSEN D W. Advanced space structure concepts and their development, AIAA-2001-1257 [R]. USA: AIAA, 2001.
- [6] 陈芙蓉, 霍立兴, 张玉凤. 电子束焊接技术在工业中的应用与发展[J]. 电子工艺技术. 2002, 23(2): 56-58.
- [7] 付鹏飞, 黄锐, 刘方军. TA12 钛合金电子束焊接组织性能及残余应力分析[J]. 焊接学报, 2008, (2): 82-84.
- [8] MLADENOV G, VUTOVA K, WOJCICKI S. Experimental investigation of the weld depth and thermal efficiency during electron beam welding [J]. Vacuum. 1998, 51(2): 231-233.
- [9] 杨彦涛, 王禹华, 张永洋. 氢对钛合金的影响[J]. 材料开发与应用, 2009, 1(24): 69-72.
- [10] CHEN S C, HUANG J C. Comparison of post-weld microstructures and mechanical properties of electron and laser-beam welded 8090Al-Li alloy lates [J]. Materials Transactions, 1999, 4(10): 1039-1078.

(编辑: 王建喜)

(上接第 71 页)

参考文献:

- [1] 周汉申. 单组元液体火箭发动机设计与研究 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 2009.
- [2] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005.
- [3] 杨德钧, 沈卓身. 金属腐蚀学[M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- [4] 刘秀晨, 安成强. 金属腐蚀学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [5] 孙跃, 胡津. 金属腐蚀与控制[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- [6] 赵麦群, 雷阿丽. 金属的腐蚀与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [7] 湛建阶, 陈朝辉. 胍类分解催化剂研究进展 [J]. 材料导报, 2007, 21(2): 62-66.
- [8] 皇甫淑君. 若干金属材料局部腐蚀新现象的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [9] 梁利花. 微液滴现象在大气腐蚀过程中的作用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [10] 牛绍蕊. 不锈钢的电化学腐蚀性能研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.

(编辑: 王建喜)