

水蒸汽发生器氧系统故障分析及健康监测

窦双庆¹, 王宏亮¹, 王 军², 张慧君¹

(1. 西安航天动力试验技术研究所 陕西 西安 710100; 2. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 氧供应系统是水蒸汽发生器装置的重要组成部分, 氧供应系统的状态对水蒸汽发生器装置工作可靠性有很大影响。从发生器氧系统故障案例入手, 重点分析了水蒸汽发生器氧气系统冷态调试与热试车的数据, 定位了由于氧系统状态异常导致水蒸汽发生器发生故障的原因, 提出了保障发生器氧系统健康状态的监测方法与保障措施。分析表明, 为确保氧系统健康状态, 应重点关注调试时氧气压力变化独立性以及热试车压力曲线与历次试车状态的一致性。

关键词: 水蒸汽发生器; 氧系统; 故障分析; 健康监测

中图分类号: V433-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 06-0095-05

Fault analysis and health monitoring of oxygen system for water vapor generator

DOU Shuangqing¹, WANG Hongliang¹, WANG Jun², ZHANG HuiJun¹

(1. Xi'an Aerospace Propulsion Test Technology Institute, Xi'an 710100, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: As the key component of the water vapor generator, the oxygen supply system's health status has a great influence on the working stability of the generator. Based on analysis of several failure cases of oxygen system, the test and experiment data of the oxygen supply system for the generator is studied emphatically. The reason for the failures of the generator due to the oxygen system worked abnormally is analyzed, and some health monitoring methods and safeguard measures are proposed to improve the stability of the oxygen supply system. The experimental results indicate that, in order to effectively ensure the health status of oxygen supply system, the oxygen pressure variation independence during the debugging process, and coincidence of previous data during the experimental process and pressure curves in heat run need to be concerned.

Keywords: water vapor generator; oxygen system; fault analysis; health monitoring

收稿日期: 2015-11-26; 修回日期: 2016-04-01

作者简介: 窦双庆 (1969—), 女, 高级工程师, 研究领域为液体火箭发动机试验测量与控制

0 引言

水蒸汽发生器主要由发生器、点火器、点火器酒精供应系统、点火器氧气供应系统、发生器酒精供应系统、发生器液氧供应系统、软化水供应系统、吹除系统及蒸汽输送系统等几部分组成。发生器采用前后分区燃烧组织方式，头部主要为液氧和酒精燃烧，产生高温燃气，后半区引入软化水，与高温燃气进行掺混，产生蒸汽供给喷射系统^[1-5]。

故障数据分析是设备健康状态的基础，有利于深入开展故障预防、故障检测和故障修复，因此研究人员将重点集中在故障数据的分析研究上^[6-11]，针对不同的故障现象有针对性实施健康管理方法，以保证设备的可靠工作状态。

水蒸汽发生器装置对高空模拟试验系统至关重要，因此发生器健康状态分析具有重要的研究意义和应用价值。本文重点针对水蒸汽发生器氧系统出现的故障和试验数据进行分析，提出改进措施、预防方案，以保证发生器的健康工作。

1 发生器氧系统单向阀组成

发生器由火炬点火器、喷注器、燃烧室和混合室等几部分构成。工作原理为利用液氧酒精燃烧产生高温燃气，然后将水注入，使水蒸发形成高温水蒸汽。液氧酒精通过火炬点火器点燃，喷注器中心是火炬点火器。

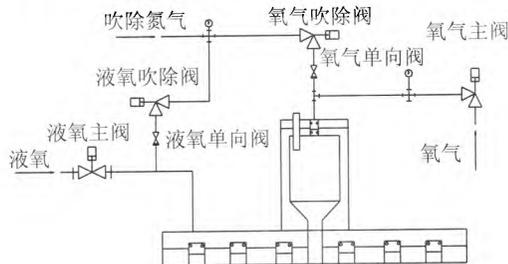


图1 氧系统单向阀组成

Fig. 1 One-way valves of oxygen supply system

单向阀起到将供应介质和吹除氮气隔离的作用。在发生器工作时，发生器喷前压力高于氮气吹除压力，单向阀处于关闭状态，供应介质无法

进入吹除管路。当单向阀失效尤其是氧路单项阀失效时，将产生较大的安全风险。发生器的氧系统单向阀系统组成如图1所示。

2 氧系统故障分析与健康监测方法

2.1 液氧吹除单向阀常开隐患

XX300次试验过程中，发生器最初显示启动正常，在60s左右发生器身部出现较大振动，125s液氧吹除管路接口处冒出大量白气，160s时氧气孔板前压力传感器被击穿，随后实施紧急关机。

此次试车发生器启动时的氧气压力 p_{yq1} ，点火酒精压力 p_{dj1} ，液氧压力 p_{ly1} 及酒精压力 p_{jl1} 在5s出现了剧烈振荡（如图2）。点火路的氧气压力 p_{yq1} ，点火酒精压力 p_{dj1} 发生波动的的时间早于发生器主路的软化水压力 p_{sq1} 、液氧压力 p_{ly1} 及酒精压力 p_{jl1} 波动，说明故障首先应出现在点火器内部，进而扩大到整个发生器。图2中可以看出，在60s左右氧气压力超出传感器量程（8MPa），导致传感器击穿损坏。在60s后点火酒精的压力曲线粗糙度也明显增大，发生器工作不稳定，最终在170s对发生器实施了紧急停车。

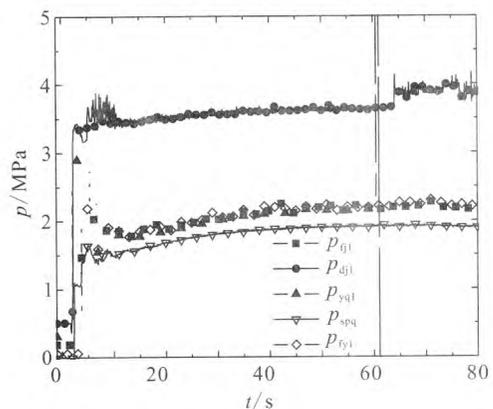


图2 发生器非正常启动相关参数压力曲线

Fig. 2 Abnormal start pressure curves of the generator

对发生器工作数据和录像进行分析后，认为发生本次事故的主要原因为液氧吹除路单向阀泄漏，导致液氧进入点火器的氧气吹除路后进入点火器，并经由点火导管吹入发生器，形成富氧环境，引起发生器头部富氧烧蚀。

为避免单向阀泄漏的情况再次发生, 对发生器阀门控制程序进行改进: 在发生器点火后, 关闭液氧路的吹除阀, 使吹除路处于关闭状态, 从而杜绝了燃气从液氧吹除单向阀进入发生器头部的可能性。依次类推, 对酒精路也采取了同样的措施, 同时避免了酒精路出现相同的故障。

2.2 氧气吹除阀常关的隐患

XX36 次试验在发生器 3 000 s 工作过程中蒸汽压力、温度数据正常, 关机段发生器身部出现较大振动, 试后分解检查发生器相应管路, 发现发生器氧气管路存在少量积碳。发生器关机段的压力曲线如图 3 中所示。液氧压力 p_{ly1} 下降正常, 但氧气压力 p_{yq1} 在关机后 1.46 s 出现 1.806 MPa 的压力峰值, 氧气压力维持 1.168 MPa 约 0.75 s, 分析认为此在关机段氧气管路内发生爆燃。

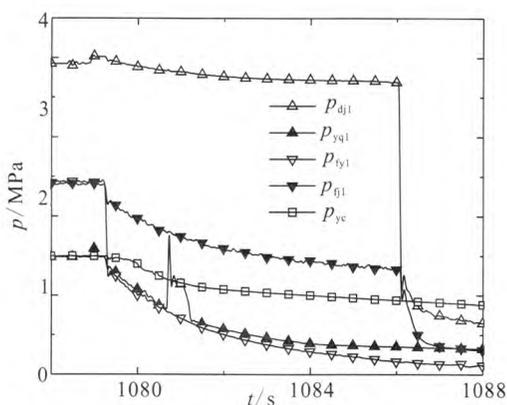


图 3 发生器关机段的压力曲线

Fig. 3 Pressure curves in cutoff duration of generator

结合以上分析, 将发生器阀门控制程序修改为: 使点火酒精氧气吹除路始终处于打开状态, 杜绝了在关机段管路残存酒精从液氧吹除单向阀进入氧气管路的可能性, 提高了发生器工作稳定性。

2.3 液氧吹除单向阀内漏

XX-011 次试验为 2 组发生器联合试验, 监视画面显示液氧管路附近有白色气体冒出, 发生器在 59 s 时实施紧急停车, 试后检查发现氧吹除管路外部有挂霜现象, 试验画面中出现的白色气体应来自液氧吹除管路。

该次试验发生器参数测量压力曲线见图 4, 气吹除路压力 p_{ycl} 在 13.6 s 出现了明显的波动, 其压力值并没有稳定在吹除系统的 1.50 MPa, 而是随液氧压力 p_{ly1} , 酒精压力 p_{jl} 持续上升至 2 MPa, 最终实施了紧急关机。结合试后吹除管路外部的挂霜现象和数据曲线分析, 认定导致本次事故的原因是液氧单向阀内漏, 液氧反向进入氧吹除路, 导致氧吹除路压力 p_{ycl} 和氧气路压力 p_{yq1} 升高。对该组发生器液氧吹除单向阀进行分解检查, 发现单向阀密封面发生鼓包, 导致密封失效, 造成液氧内漏。

为提高液氧吹除路的可靠性, 对发生器液氧吹除路进行工艺改造。将液氧吹除路的单向阀数量增加至 2 个, 且 2 个吹除单向阀串联连接。此方法可提高液氧吹出路的密封可靠性, 大大降低因单向阀不密封导致发生器事故的风险。

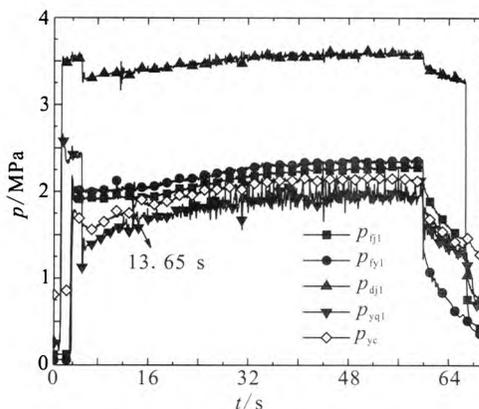


图 4 发生器相关参数压力曲线

Fig. 4 Relevant pressure curves of generator

2.4 液氧串腔

XX50 次试验为两组发生器联合工作, 其中一台发生器在程序启动至 14 s 左右时工作异常, 试验台对发生器系统实施了紧急关机。

调取 XX50 试验发生器液氧系统液流调试数据曲线如图 5。图 5 中显示发生故障的发生器液氧调试过程中, 液氧压力上升后, 氧气、酒精及点火酒精压力均出现了明显的上升。此现象说明该发生器内部的氧腔与燃料腔之间发生泄漏, 造成在热试过程中, 液氧进入到酒精腔, 导致发生器工作异常。

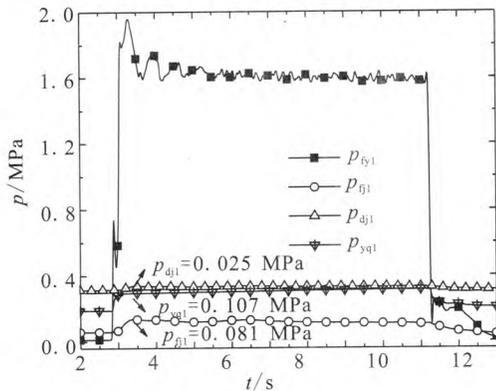


图5 发生器液氧冷调数据曲线

Fig. 5 LOX debugging data curves of generator before test

XX50-2次试验, 发生器喷注盘上顶约7.9 s左右出现漏火现象, 约13.5 s控制台实施紧急关机, 发生器工作压力曲线见图6。

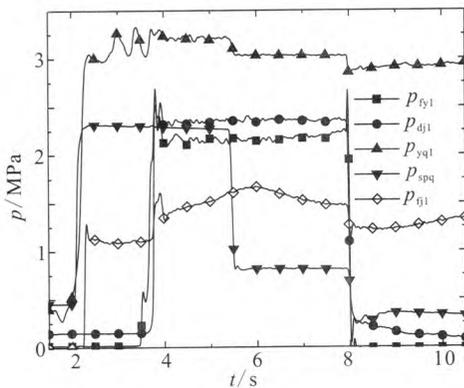


图6 XX50-2 发生器压力曲线

Fig. 6 Pressure curves of generator in XX50-2 test

事故发生后对发生器进行分解检查, 发现发生器的喷注器液氧腔与酒精腔的隔离中底钎焊缝开裂, 导致液氧进入酒精腔, 酒精腔压力急剧升高, 造成发生器上顶焊缝开裂。对发生器结构进行了相应的改进, 增加了喷注盘的隔离中底厚度。

经试验数据研究认为, 在发生器液氧系统调试数据分析过程中, 应重点关注氧气压力、酒精压力及点火酒精压力变化过程的独立性, 液氧调试时应只有氧压力升高, 酒精、点火酒精路的压力均应不变。同样在酒精系统调试时, 液氧、氧

气压力均应维持不变。如果发生器不进行冷态液流调试, 则可进行液氧腔的吹气增压试验, 同时监测酒精腔的压力变化情况, 确保无串腔现象, 以此检查发生器氧腔与酒精腔的密封隔离性。

通过液氧与酒精冷调试验数据分析, 可准确判断发生器氧腔与酒精腔的密封隔离性, 为提高发生器可靠工作提供了保障。

3 结论

从发生器的试车故障中发现, 氧系统的健康状况对发生器是否能正常工作至关重要, 氧系统所涉及到的单向阀门密封性、喷注器焊缝强度及供应管路连接密封性都对试验的顺利进行造成影响。因此, 在试验前, 需要针对氧系统进行预调试以及对过往数据充分对比分析以确保状态健康。

本文的研究工作为水蒸汽发生器的可靠工作和维护提供了数据分析支持, 通过对数据的准确分析保证了发生器的健康工作状态, 在水蒸汽发生器的使用寿命周期中发挥了重要的作用。试验数据分析健康监测的主要方法如下:

1) 发生器液氧系统调试数据分析中, 重点关注氧气压力、酒精压力及点火酒精压力的变化独立性, 液氧调试时应只有氧气压力出现变化, 而酒精、点火酒精路的压力均应不变;

2) 在试验前, 应进行液氧腔的吹气试验, 通过液氧腔与酒精腔压力变化独立性确保液氧腔与酒精腔无串腔现象, 排除发生器中底钎焊缝存在泄漏的可能;

3) 加强热试车数据与发生器冷调数据对比分析, 例如压力和管路充填时间的重复性的对比和相关性分析, 保障发生器的健康状态;

4) 分析发生器热试车压力曲线的正确性和历次试车状态的一致性, 发现异常现象并进行故障诊断, 以便采取相应措施提高发生器系统的工作可靠性。

参考文献:

- [1] 赵宏, 张海栋, 孙小丽, 等. 大流量火箭蒸汽发生器试验

- 研究[J]. 推进技术, 2013, 34(8): 1077-1081.
- [2] KRUSSEL G, SCHAFER K. Design development and evolution of an ethanol/LOX injection head for rocket steam generator high flow rate: AIAA-2003-5044 [R]. USA: AIAA, 2003.
- [3] ANDERSON R, PRONSKE CES K. Gas generator plant: a new kind of aero derivative[J]. Modern power systems, 2006 (3): 20-27.
- [4] ANSERSON R, BRANDT H, PRONSKE K, et al. Near-term potential for power generation from coal with zero atmospheric emissions [C]// Proceedings of the 27th International Technical Conference on Coal Utilization and Fuel Systems. Clearwater FL; [s.n.], 2002: 123-130.
- [5] 刘巍, 杨涛, 胡建新, 等. 气氧/酒精火炬式点火器试验[J]. 推进技术, 2008, 29(3): 269-272.
- [6] 李清廉, 李庆, 王振国. 氧气/醇类燃气发生器启动过程试验研究[J]. 火箭推进, 2010, 36(1): 13-18.
- LI Qinglian, LI Qing, WANG Zhenguo Experimental research of the start-up process of gaseous oxygen/ethanol gas generator[J]. Journal of rocket propulsion, 2010, 36(1): 13-18.
- [7] SCHAFER K, DOMMER M. Alcohol LOX steam generator test experience[C]// Proceedings of 2nd International Conference on Green Propellants for Space Propulsion. Sardinia, Italy: [s.n.], 2004: 21-28.
- [8] 郭敬, 孔凡超, 胡旭坤, 等. 蒸汽发生器泵压供水方式试验研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2011, (6): 57-60.
- [9] SAUNDERS G P, WAGNER D A. A3 subscale steam ejector performance testing: AIAA 2009-5100[R]. USA: AIAA, 2009.
- [10] SAUNDERS G.P, MULKEY C.A. Design and activation of a LOX/GH chemical steam generator: AIAA-2009-5007[R]. USA: AIAA, 2009.
- [11] SAUNDERS N G, RAINES N G, VARNER D G. Design, activation and operation of the J2-X subscale simulator (JSS) : AIAA-2009-5098[R]. USA: AIAA, 2009.

(编辑: 马杰)

(上接第88页)

5 结论

对发动机高空模拟试验系统传动轴进行了 ANSYS 强度与疲劳数值仿真分析与计算, 研究了传动轴强度和疲劳与位移之间的关系, 得出了传动轴设计准则; 研究、分析、和计算了储能气缸和氮气破空设备, 得出了储能气缸设计准则和氮气破空环管设计准则与使用规范。采用该规范设计的发动机高模试验系统满足发动机设计对发动机试验所提出的要求。通过该试验系统考核的发动机已成功地应用于发射卫星的运载火箭。

参考文献:

[1] 郭霄峰, 李耀华. 液体火箭发动机试验[M]. 北京: 宇航出

版社, 1991.

- [2] 刘伟, 高维成, 于广滨. ANSYS12.0 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010.
- [3] 张朝晖. ANSYS11.0 结构分析工程应用实例解析[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [4] 彭茂林, 杨自春, 曹跃云, 等. 涡轮叶片低周疲劳可靠性稳健设计优化研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 12(11): 54-61.
- [5] 范文学, 陈芙蓉, 解瑞军, 等. Q235B 钢对接焊接头振动 SN 曲线的分析[J]. 焊接学报, 2014, 12(8): 10-14.
- [6] 陈崧, 竺一峰, 胡嘉骏, 等. 船体结构 SN 曲线选取方法[J]. 舰船科学技术, 2014, 12(1): 22-26.
- [7] 李先锋, 杨建伟, 贾志绚, 等. 基于 Workbench 车辆减振器弹簧盘的疲劳分析 [J]. 北京: 建筑学院学报, 2012, 12(2): 53-55.
- [8] 刘仁佳, 陶性华, 徐国昌. 机械设计师手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.

(编辑: 王建喜)