

某型液体发动机高空环境局部失效和改进分析

唐亮, 杨蓉, 吴勋, 马海亮, 秦绪山

(第二炮兵装备研究院, 北京 100085)

摘要: 通过对某型液体发动机高空环境下局部产品失效问题进行分析, 得出了产品失效原因和形成过程。按照不同的需求, 针对性地提出了改进措施, 提高了发动机高空环境下工作的可靠性和环境适应性, 通过实际飞行试验予以验证。

关键词: 液体发动机; 失效; 改进

中图分类号: V216.2; V216.5⁺7 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)01-0083-03

Failure Analysis and Improvement of a Liquid Rocket Engine Subassembly in High Altitude Environment

TANG Liang, YANG Rong, WU Xun, MA Hai-liang, QIN Xu-shan

(The Equipment Research Institute of PLA's Second Artillery, Beijing 100085, China)

Abstract: The causation and the forming process of local failure of a liquid rocket engine subassembly in high altitude environment was analyzed. Countermeasures for different requirement were put forward to improve the reliability and environmental worthiness of liquid rocket engine in high altitude environment, and the countermeasures were validated by actual experimental flight.

Key words: liquid rocket engine; failure; improvement

在某型液体发动机(高空工作, 由发动机主机和游机组成)参加飞行过程中, 高空工作的发动机主机靠近某推进剂主导管下端一侧的涡轮泵泵漏管在发动机整机工作一段时间后出现了抖动现象, 且持续时间长达一百多秒。最后泵漏管所用紧固装置(卡箍、螺栓、螺母)出现了脱落。

在发动机飞行强振动环境下, 紧固装置松动与脱落导致泵漏管剧烈抖动, 可能会对发动机的稳定工作造成很大的影响, 甚至影响飞行, 为飞行可靠性

带来较大的隐患。因此有必要对此类故障问题进行分析研究, 并进行适当处理。

1 原因分析

1.1 泵漏管及紧固装置

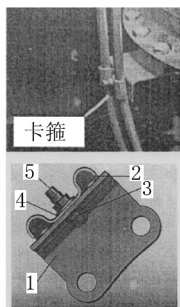
在此型号液体发动机中, 为保证涡轮泵的密封和安全, 在氧化剂泵和燃料泵两端同时采用弹簧式

收稿日期: 2012-08-15

作者简介: 唐亮(1980—), 男, 汉族, 湖南岳阳人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为液体发动机的设计与使用。

端面密封和双唇式密封,并在两密封间对称设置泄漏管嘴,然后在燃料泵和氧化剂泵漏管嘴分别引出两根泵漏管,将端面密封在工作期间可能泄漏的介质中,可将泄漏物质经泄漏管嘴排出到发动机外。泵漏管在发动机上能够引导可能泄漏的介质,对发动机的工作性能无影响。

泵漏管的紧固装置为卡箍,如图1所示,卡箍材料为钢08F表面镀锌,螺栓材料为30CrMnSiA表面镀锌,螺母材料为30CrMnSiA表面镀镉。



1. 支板; 2. 双卡箍; 3. 螺栓; 4. 垫片; 5. 自锁螺母

图1 泵漏管紧固装置

Fig. 1 Clamp device of pump leakage pipe

1.2 原因分析

此型号液体发动机工作时处于高空环境,外界大气压可以忽略,游机推力室喷管的羽流具有较大扩散角。发动机主机泵漏管卡箍处于游机推力室羽流冲击的区域中,并且发动机蒸发器中高温涡轮废气通过热传导也会将高温传递到泵漏管卡箍上。羽流和高温涡轮气体传热的综合作用使运载器飞行过程中泵漏管卡箍实际温度比地面热试车高。发动机游机喷管羽流场泵漏管所处位置温度随时间变化曲线如图2所示。

发动机泵漏管卡箍部位紧固螺栓和螺母材料均为30CrMnSiA,螺栓表面镀锌、螺母表面镀镉处理。在游机燃气羽流中,泵漏管下端卡箍在发动机整机工作一段时间后温度超过一定的范围(600~700℃),远高于30CrMnSiA材料镀锌(镉)紧固件的使用温度范围(小于230℃)。

由于失效产品已无法获取,因此无法提供失效产品断口形貌等证据。通过初步分析,此台发动机泵漏管卡箍及紧固件出现问题的原因如下。

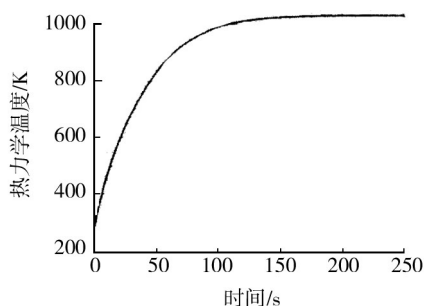


图2 温度计算曲线

Fig. 2 Temperature calculation curve

1) 在真空高温环境下,泵漏管卡箍上的自锁螺母材料强度降低,塑性增加,可能导致自锁螺母的锁紧力降低,螺母松出,卡箍对泵漏管约束作用降低,泵漏管开始异常抖动。在较长时间的真空高温振动环境作用下,螺母持续松出,最终导致螺母松脱。

2) 在真空热环境、可能的大应力以及紧固件质量缺陷综合作用下导致锌、镉脆断,使得产品失效。

3) 紧固件产品由于电镀过程可能出现氢脆隐患,导致产品在较长时间的真空高温振动环境作用下失效。

通过进一步分析和对此种卡箍状态的产品进行地面热试车的历史数据统计分析,发现在地面热试车过程中监测到此处温度比较恰当,不会对卡箍和紧固件的性能产生影响,未出现失效现象。在真空高温环境条件下,由于紧固件产品使用30CrMnSiA材料并做镀锌/镀镉处理,氢脆敏感性增加到一定的程度后增加了产品脆断的趋势^[1];如果紧固件安装时的拧紧力矩不合适,在高温振动等作用下也将促使紧固件脆断。对于出现的失效现象,可能是综合作用的结果,使得泵漏管脱离卡箍约束,引起剧烈抖动,需要针对这些失效原因采取针对性的防范措施。

由于氢脆问题在某种意义上具有一些普遍性,在特殊领域内应用的某些产品尤其需要加强关注与防范。

1.3 氢脆现象及机理

1.3.1 氢脆现象

氢原子在金属中的扩散活化能比其它元素低

很多,活性比较自由,即使在固态金属中,氢原子也能侵入或逸出。这种由于扩散到金属中位错处的氢或金属氢化物生成所造成的材料脆化现象称为氢脆。

氢脆可以是由酸洗、电解、腐蚀反应所产生的氢所造成,也可以是因金属与氢接触而引起。运行在氢气环境中的钢材,由于环境中的氢分子在分解成原子或离子后,会吸附在金属表面,然后侵入金属并向其内部扩散,与金属进行交互作用。扩散入金属中的氢,会在钢中的各种微观缺陷(如位错、空位等)不均匀地应力应变,或在组织形态等部位发生聚集。在应力的作用下,位错处不仅产生了应力集中,而且导致氢的浓集,形成 H_2 或与钢中碳反应生成 CH_4 。这些气体聚集后可形成高压,当压力超过材料的破坏应力时就会产生裂纹,导致脆性开裂。零部件发生氢脆后存在严重的安全隐患,可能造成严重的安全事故。

1.3.2 氢脆产生的机理^[2]

目前关于金属氢脆的机理有很多,比较成熟的理论主要有高压氢气理论、氢表面吸附降低表面能理论、晶格脆性理论、氢与位错的交互作用理论等。

氢脆是多种机制相互作用的复杂过程,过程解释需要基于对裂纹前端行为原子尺度分辨的实验观察和原子水平的理论计算,这两方面的研究还有待提高。

1.4 泵漏管卡箍紧固件氢脆分析

以镀锌处理为例,在盛有镀锌液的渡槽中,经过清理和特殊预处理的待镀件为阴极,用镀覆金属制成阳极,两极分别与直流电源的正极和负极连接。镀锌液由含有镀覆金属的化合物、导电的盐类、缓冲剂、pH值调节剂和添加剂等的水溶液组成。通电后,镀锌液中的金属阳离子在电位差的作用下移动到阴极上形成镀层,阳极的金属形成金属离子进入镀锌液,以保持被镀覆的金属离子浓度。

根据氢脆现象产生的原因、机理与镀锌、镀镉原理^[3],采用30CrMnSiA材料的卡箍紧固件在进行镀锌、镀镉的过程中,有很大可能会存在氢脆隐患,导致紧固件产品在高空工作的强烈振动环境条件下出现失效。

2 后续处理

为保证泵漏管卡箍的连接可靠性,对泵漏管及紧固件采取一些必要的措施,这些措施可分为两个方面。一方面,对于急需使用的产品 and 不方便整改的产品,可采取临时保护措施,如对卡箍采取热防护措施,从里到外依次用高硅氧玻璃纤维布、高温型薄硅橡胶玻璃布包扎,并用合适尺寸的保险丝扎紧,可以有效阻隔游机喷管热流、热辐射及蒸发器的高温辐射热,并辅助防松,从而起到对卡箍的保护作用,保证紧固件在高温下的连接可靠性。另外一方面,对于后续的产品或可整改产品,将采用一些更为长久有效的措施,包括更改产品使用的材料和细化产品安装要求,例如将卡箍材料更改为1Cr18Ni9Ti,将紧固件由30CrMnSiA镀锌/镀镉材料更换为高温合金材料GH2036, GH2132,并规定螺母的拧紧力矩应在一定范围。

高温合金材料GH2036, GH2132在高温状态下的性能要优于30CrMnSiA材料。以高温合金GH2132为例,它是Fe-25Ni-15Cr基高温合金,加入Mo, Ti, Al及微量B综合强化,在650℃以下具有较高的屈服强度和持久、蠕变强度,并且具有较好的加工塑性和焊接强度。该合金可以生产各种形状的变形产品。

对于类似环境条件下的紧固件产品,例如动力系统管路上的部分紧固件,也存在类似的问题,可采取更换材料的方式予以改进。改进材料后的产品通过了后续数次飞行,验证了改进措施是合理可行的。

3 结语

对某型液体发动机高空环境工作条件下局部产品失效的现象和原因进行了分析,改进措施通过实际飞行验证是合理可行的,可有效提高产品的可靠性和环境适应性。

参考文献:

- [1] 刘昌奎,臧金鑫,张兵. 30CrMnSiA螺栓断裂原因分析[J]. 失效分析与预防, 2008, 3(2): 45—50.
- [2] 商红武,安茂忠,杨培霞. 电镀过程中氢脆的产生及其抑制措施[J]. 电镀与涂饰, 2008, 37(12): 9—12.
- [3] 李啸东,陈端杰. 表面处理过程中的典型氢脆现象[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(3): 125—126.