

# 燃气发生器固定连接结构可靠性改进设计

秦新华<sup>1</sup>, 叶力华<sup>1</sup>, 周塞塞<sup>1</sup>, 何战学<sup>2</sup>

(1. 西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100; 2. 西安航天发动机厂, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 为满足某火箭发动机燃气发生器固定连接结构长期贮存和长时间高温环境下可靠工作的要求, 在保证原固定连接结构形式不变的前提条件下提出了改进设计方案。新的方案采用不锈钢耐酸钢和高温合金钢替换原普通碳钢, 同时采用了新的焊接工艺方法。为了验证新卡箍连接强度和动态特性, 进行了模态分析和动应力/动应变理论计算、强度破坏和振动试验。最后通过地面热试车和飞行试验对改进设计方案进行了验证, 结果表明新的卡箍提高了结构连接可靠性, 完全满足发动机使用要求。

**关键词:** 液体火箭发动机; 燃气发生器; 固定连接结构; 改进设计

**中图分类号:** V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2014) 06-0031-06

## Reliability improvement of fixed connection structure of gas generator

QIN Xin-hua<sup>1</sup>, YE Li-hua<sup>1</sup>, ZHOU Sai-sai<sup>1</sup>, HE Zhan-xue<sup>2</sup>

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

2. Xi'an Space Engine Factory, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** To meet the long-term storage and working reliably requirements of liquid rocket engine gas generator fixed connection structure under high temperature environment for a long time, an improved design scheme under the prerequisite condition that the original fixed connection structure is not changed is presented in this paper. The acid-resistant stainless steel and high temperature alloys are used to replace the original plain carbon steel materials, and the new welding procedure is adopted in the new scheme. In order to verify the intensity and dynamic characteristic of the new clamps, the modal analysis, dynamic stress-strain theoretical calculation, strength damage experiment and vibration test were also performed. The new design scheme was verified in the ground hot commissioning and flight test. The results indicate that the new clamp has improved the reliability of the connection structure and satisfied the new use requirements of liquid rocket engine completely.

**Keywords:** liquid rocket engine; gas generator; fixed connection structure; improved design

收稿日期: 2014-08-13; 修回日期: 2014-09-26

基金项目: 中国航天科技集团公司支撑项目(2012JY11)

作者简介: 秦新华 (1966—), 男, 高级工程师, 研究领域为火箭发动机总体设计

## 0 引言

长征系列某型号火箭飞行中高空发动机涡轮泵泄出管路系统固定连接功能失效,管路发生异常抖动,严重影响了火箭飞行试验任务的顺利完成。为了防止在该型号发动机工作中发生相同的故障模式,针对燃气发生器固定连接结构开展了可靠性改进设计。

卡箍作为燃气发生器固定连接结构组件,一端箍在燃气发生器身部,另一端通过支板连接后安装固定在涡轮泵上,在发动机工作中起着减小振动,保证燃气发生器安全可靠稳定工作的功能。燃气发生器与涡轮泵是发动机的两个最主要的振源,燃气发生器工作中振动加速度可达 60 g 左右,因此其固定连接结构工作中承受了较高的动应力,相应地对燃气发生器固定连接结构组件工作可靠性提出了较高要求。发动机工作中如果燃气发生器卡箍固定连接不可靠,固定连接功能失效,燃气发生器可能由于不能承受较大的振幅而遭到破坏,最终给飞行试验任务造成星箭俱损的严重后果。

原燃气发生器卡箍采用的普通碳钢高温工作时材料性能下降,连接强度安全裕度降低;焊接采用了气焊和电弧焊,焊接中存在受热不均容易出现裂纹、夹杂等缺陷,接头焊接质量和卡箍连接强度不易得到保证;零部件表面镀锌、镀隔和阳极化后在生产、周转、存放和装配使用中容易出现磕碰伤,表面镀覆层损伤后基体金属产生锈蚀,不能满足星箭高密度发射任务长期贮存要求;高温工作环境条件下存在锌镉脆断隐患;卡箍箍带内衬采用航空非金属橡胶板,不能满足燃气发生器固定连接功能要求,因此必须通过改进设计提高固定连接的可靠性。

## 1 改进方案及分析

### 1.1 改进要求

燃气发生器卡箍改进首先应保证原结构形状、连接接口不发生改变,满足原结构总装装配设计和工艺要求的条件下,同时尽可能不改变原卡箍动力学特性或与其尽可能相近,通过材料替

换和取消电镀表面处理,消除锌镉脆断隐患,提高高温紧固连接性能和强度安全裕度;采用卡箍内衬衬垫解决高温工作中存在的薄弱环节,提高卡箍整体连接结构强度,满足高温环境条件下工作可靠性要求。

### 1.2 改进方案分析

#### 1.2.1 材料替换

燃气发生器卡箍使用的材料为 20 号钢、25 号钢和 30CrMnSiA 钢,高温工作环境条件下材料强度低。30CrMnSiA 钢制造卡箍卡箍箍带冲压容易产生裂纹,焊前需要预热焊后需要热处理,焊接工艺复杂,不能满足紧固连接的可靠要求。改进设计后的燃气发生器卡箍采用 1Cr18Ni9Ti、1Cr21Ni5T 等不锈钢和高温合金钢替换,可以满足箍带冲压加工工艺对于材料变形的要求。由于替换后的这些材料具有良好的耐热性及抗腐蚀性,可以避免焊接产生裂纹,消除焊接缺陷,焊接性能良好,加工工艺成熟,容易满足强度设计要求,提高卡箍高温环境条件下的紧固连接可靠性。采用不锈钢和高温合金钢材料替换后的卡箍具有可锻性、可冲压性、可焊性等良好的加工工艺性能,适应现代化工艺装备加工制造要求,满足星箭高密度发射任务发动机批量化生产要求。

采用不锈钢金属材料替换后可以取消卡箍表面镀锌镀隔等电镀化学工艺处理要求,消除原卡箍高温环境条件下存在的锌镉脆断隐患,提高卡箍表面质量。取消电镀后可以简化生产工序,降低生产制造和管理成本,减小环境污染,满足星箭高密度发射任务长期贮存要求。

不锈钢、高温合金钢与原碳钢均同为金属材料,材料弹性模量在 200~202 GPa 之间,差别不大,因材料替换对卡箍结构刚度等动态特性变化带来的影响很小。

#### 1.2.2 结构改进

在满足结构形状、连接接口不发生改变的前提下,通过论证确定了改进设计后卡箍结构的详细要求,保证协调一致结构连接可靠,满足发动机装配和高温环境条件下的使用要求。

1) 卡箍改进设计中,采用线性动力随机振动

理论进行计算和结果分析,确定卡箍工作载荷条件下的最大动应力和最大动应变,并针对这些结构薄弱环节之处和许用应力减小处的承力截面,综合考虑卡箍整体刚度和减振能力后进行加强,提高抗振能力,通过对比试验验证改进后卡箍结构强度和刚度裕度提高的程度。根据试验结果分析评估卡箍结构强度和刚度是否满足使用要求,根据结构强度和刚度裕度提高的大小,决定是否需要针对如承力结构加强等以进一步提高卡箍连接强度和刚度裕度。燃气发生器卡箍带原设计中选用了25CrMnSiA钢,新的卡箍设计选用了不锈钢耐酸钢1Cr18Ni9Ti材料替换。为保证改进设计后的卡箍连接强度不低于或高于原卡箍,在设计中增加了箍带厚度,新卡箍箍带厚度由原1.2 mm改为1.5 mm,保证新卡箍连接结构强度可靠。

2) 卡箍结构可靠性改进设计中,尽可能采用一体化机加或钣金加工替代目前卡箍过多的焊接,采用手工氩弧焊替代目前卡箍生产中采取的电弧焊或气焊等,通过采取更加合理可行的先进制造工艺,提高卡箍的加工质量和生产效率,达到卡箍改进设计目的。

3) 卡箍焊接结构件改进设计中综合考虑了卡箍工作部位、强度要求、焊接性、焊后变形大小、坡口加工难易程度等各方面因素进行优化设计。对于不同厚度的零件焊接,接头要求平滑过渡,由于对接接头焊接受力均匀,对重要的受力焊缝部位尽量采用对接接头。

4) 卡箍箍带与支板焊接处焊缝热影响区在以往试车过程中常常发生断裂,新的卡箍设计改进中认真分析了以往试车中卡箍连接焊缝部位断裂的原因,改进后的卡箍焊缝尽量采用对称性设计,使焊缝布置与焊接顺序对称,焊接端部采取去除锐角,焊缝布局避开高应力区,避免焊缝过分密集与交叉和热影响区相距太近的影响。为使焊缝受力合理,焊缝位置的布置达到了减少焊接应力与变形的目的。通过将焊缝避开加工面,加工面应距焊缝远些,焊缝不在加工表面上,避免焊缝承受剪力和集中载荷。

5) 卡箍箍带与支板焊接部位处截面变化较大,过渡区较陡,圆角较小易引起较大的应力集

中,以往在发动机地面试车中卡箍承受动载,以及在高温条件下工作存在应力集中问题出现破坏,在卡箍设计改进和工艺焊接过程中,采取了减小焊接结构截面变化,延缓过渡区,增大圆角等设计和工艺改进措施,尽可能减小焊接造成的应力集中。

6) 由于卡箍在焊接后存在拉伸残余应力降低卡箍结构的连接强度,焊接后的变形可引起结构形状和尺寸精度等的变化,安装和使用容易带来附加应力,为此在设计中,采取控制结构尺寸公差、缩小公差范围、提高加工精度、要求焊后回火等措施减小焊接残余应力和变形。

7) 卡箍改进设计中,为提高卡箍高温环境条件下的工作能力,使用了金属橡胶垫替代原非金属橡胶板作为卡箍内衬衬垫。

在前期改进的方案论证中通过开展调研与情报的收集后,经各方专家的论证与分析后确定选择金属橡胶垫替代原卡箍非金属橡胶板内衬衬垫。航空非金属橡胶板属于天然橡胶类,使用温度-55~70℃,容易老化,易与臭氧、光等发生化学反应而产生老化,变硬变脆至逐步龟裂,其耐油、耐水和耐酸碱性能均较差,不耐油,耐溶剂性不好,不耐酸碱腐蚀。长期使用后强度亦会随时间而降低、弹性消失,性能变差,不能满足长期贮存和使用的需要。

金属橡胶垫使用了奥氏体型不锈钢耐热耐酸金属丝材经过螺旋成型拉长相互缠绕模压而成,两种金属丝材均含Cr,可在钢表面形成致密的保护膜,材料表面经强化处理耐腐蚀性能提高。不锈钢丝熔点远高于橡胶,使用金属橡胶垫作为卡箍内衬衬垫后,可以使卡箍具有耐高低温、耐交变温度、耐腐蚀,无老化现象可长期贮存等优点。使用金属橡胶垫制造的卡箍,保管贮存环境要求低,无保管期限要求,可以给发动机的装配、贮存和使用带来方便。

8) 燃气发生器卡箍设计改进中,连接紧固件采用了耐高温镀银自锁螺母代替普通自锁螺母,采用高温螺栓代替普通螺栓,普通垫圈改为不锈钢垫圈,可以提高卡箍高温环境工作条件下的工作能力。

9) 设计改进后的卡箍装配连接接口、结构与尺寸基本保持不变,卡箍连接结构整体没有发生改变,发动机主结构及工作环境与条件和使用要求没有改变,卡箍的装配要求与连接固定的方式按装配技术文件的规定也没有发生改变,分析后认为新设计改进后的卡箍结构动特性基本不会发生改变。

理论分析认为,新的卡箍结构的动特性基本不会改变,但为了充分考核改进后的新卡箍对被紧固连接件燃气发生器动特性的影响,可以通过开展新旧卡箍动态特性对比试验验证分析结果,这些动态特性对比试验包括模态分析试验与振动试验。

## 2 理论计算分析

燃气发生器卡箍设计改进中,采用了线性动力随机振动理论进行了卡箍改进前后机械动应力对比计算和分析,得到了新旧卡箍连接强度的结构分布。

新旧卡箍线性随机振动应力计算,首先忽略燃气发生器燃料入口管、接管嘴、销及螺栓等结构连接件,将发生器内外壁等效为单层薄壁,以三维模型结构(如图1所示)作为基础采用有限元法,按面单元对燃气发生器壳体及其紧固连接进行单元划分后建模,采用了试车中测得的燃气发生器动力学振动环境载荷加速度功率谱密度(PSD谱)作为输入载荷,其方向沿燃气发生器轴向并强加于基础后进行计算。由于在线性动力分析中无法考虑卡箍与发生器外壁面的接触非线性,故计算中未计入接触影响。约束基础除沿发生器轴向平动自由度外所有平动、转动自由度,约束发生器支板螺栓孔所有平动自由度,约束丝杆螺栓孔的3个平动自由度。在求解计算过程中采用MSC.Patran作前后处理器,MSC.Nastran作求解器首先进行频率响应分析,其次进行随机振动分析。

新旧燃气发生器卡箍经过线性动力学分析和结构应力计算后,最大应力分别为104 MPa和107 MPa。计算结果表明:改进后的燃气发生器卡箍应力水平略有降低,变形量没有变化;最大

应力出现部位没有发生改变,均在支板与卡带连接处;最大变形部位没有发生改变,均在固定燃气发生器附近处。



图1 燃气发生器固定连接三维模型结构

Fig. 1 3-D model of fixed connection structure for gas generator

## 3 试验研究

### 3.1 模态试验

燃气发生器新旧卡箍的模态对比试验在燃气发生器工装和卡具上进行,安装连接固定依据边界等效原则,装配要求与发动机装配技术条件中规定的相一致,可以保证新旧卡箍边界约束条件与真实工作条件相近,模态试验结果真实可信。模态试验测试系统采用了B&K公司Pulse模态系统,分析频率范围为1 600 Hz,线数为3 200。试验中采用了移动传感器——三向加速度传感器,使用力锤对固定激励点进行敲击,依次测量各点响应后得到各点的频响函数,依靠传递函数和模态振型来识别模态。

燃气发生器卡箍模态试验后测得的各阶模态频率如表1所示。

通过燃气发生器卡箍模态对比试验,获取了结构的各阶模态频率及振型。新旧卡箍模态试验

结果表明: 燃气发生器新卡箍对发生器约束均略强于旧卡箍; 换上发生器新卡箍后, 有新的模态表现出来。新旧卡箍的更换对结构的某些模态影响较大, 对结构的某些模态的贡献很小。燃气发生器新旧卡箍刚度较小, 各阶模态变化较大, 振型有一定差异。由于新的卡箍刚度提高后模态有一定变化, 但是表现出的这些变化都是在旧卡箍模态和振型中曾经出现过的, 因此可以认为燃气发生器新卡箍可以满足发动机动力学环境条件下的工作要求。

表 1 燃气发生器新旧卡箍模态试验结果

Tab. 1 Modal experiment results of new and original clamps for gas generator

试件	模态频率/Hz
1# 旧卡箍	94, 122, 150, 201
2# 旧卡箍	94.5, 121, 150, 201
1# 新卡箍	92.8, 127, 157, 165, 201
2# 新卡箍	93.1, 127, 156, 163, 201

3.2 振动试验

新旧卡箍的振动试验采用地面试车测量得到的振动试验数据作为输入载荷, 通过振动试验系统 (如图 2 所示) 重现热试车工作条件下的振动环境, 检验新旧卡箍在发动机动力学环境条件下的适应性。新旧卡箍振动试验时间按 2 倍地面试车发动机工作的时间 ( $2\times600\text{ s}=1200\text{ s}$ ) 考验, 试验中进行了  $x$ 、 $y$  和  $z$  三个方向的振动考核。

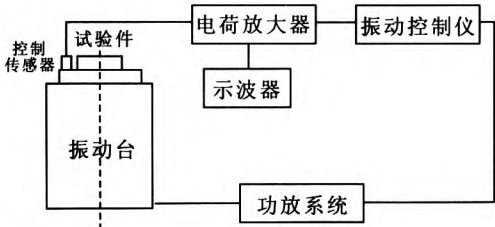


图 2 卡箍振动试验系统

Fig. 2 Vibration experiment system for clamps

新旧卡箍力学环境振动对比试验中卡箍的安装依据边界等效原则, 尽量模拟试件在发动机上的总装状态, 燃气发生器充水处于承压状态。试件在振动台上的安装如图 3 所示。

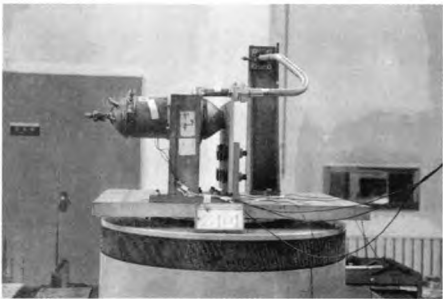


图 3 卡箍振动试验

Fig. 3 Vibration experiment of clamps

新旧卡箍力学环境振动对比试验输入采用了地面试车燃气发生器头部测点部位处测得的振动数据 (如表 2 所示)。在振动试验过程中控制点设置在试件与夹具的对接面上, 监测发生器头部振动测点, 以监测点达到试车量级为准调整振动的输入值, 通过监测燃气发生器头部响应 (RMS) 达到试车量级即可。

表 2 燃气发生器头部测点 RMS

Tab. 2 RMS of measuring point on head of gas generator

试验方向	轴向	径向	切向
频率范围/Hz	20~2 000	20~2 000	20~2 000
均方根加速度/g	28.25	13.5	26.6
旧卡箍试验时间/s	600		
新卡箍试验时间/s	600+600		

新旧卡箍轴向振动试验由于振动台能力所限, 发生器头部轴向响应 (RMS) 不能达到试车量级, 因此, 轴向振动试验按振动台的最大能力进行, 以监测发生器头部轴向响应 (RMS) 达到  $14\text{ g}$  即可。新旧卡箍在振动试验  $600\text{ s}$  后对卡箍进行检查, 外观及焊缝未见异常。按上述方法对

新状态卡箍 1# 件和 2# 件再次进行 600 s 试验, 试验结束后目视检查卡箍外观及焊缝未见异常, 振动试验后新卡箍结构均保持完好。振动试验结果表明新的卡箍满足发动机振动环境条件下的工作要求。

#### 4 地面热试车和飞行试验验证

改进后的燃气发生器卡箍经过了 600 s 地面试车考验。试车中燃气发生器卡箍工作环境温度在 200 ℃ 左右, 轴径切三个方向的振动加速度最高分别达 61.84 g, 54.49 g 和 60.4 g (按试车发动机工作稳定段 RMS 实测统计结果)。试车中发动机、涡轮泵和燃气发生器固定连接可靠无松动, 证明了新的卡箍在设计采取结构可靠性改进措施后提高了高温环境条件下长时间工作的可靠性, 达到了改进设计增长可靠性的目的。

2012 年 6 月 12 日长征系列某型号高空发动机采用了改进后的燃气发生器紧固连接结构进行了首次飞行试验验证, 新的燃气发生器卡箍满足发动机高温环境条件下的安全可靠使用要求。

#### 5 结束语

针对燃气发生器卡箍在高空发动机长期贮存和长时间真空高温工作环境条件下存在的薄弱环节, 通过采用材料替换、改变焊接方法、使用耐高温金属橡胶垫等一系列可靠性增长设计改进措施后, 对新旧卡箍进行了动应力和动应变的理论

计算和模态、振动对比试验分析, 新的卡箍经过了地面试车和飞行考验, 证明改进设计措施有效, 达到了发动机可靠性增长目的, 满足了发动机安全可靠的工作使用要求。

#### 参考文献:

- [1] 颜鸣皋, 刘伯操. 工程材料实用手册[M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [2] 夏有为, 李秀治. 机械工程师手册[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] 徐灏, 邱宣怀. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [4] 闻邦椿, 张义民. 机械设计手册[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [5] 单辉祖. 材料力学教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982.
- [6] 朱宁昌. 液体火箭发动机设计(上)[M]. 北京: 宇航出版社, 1994.
- [7] 刘国球. 液体火箭发动机原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [8] 洪延姬, 金星. 先进航天推进技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
- [9] 邓明, 金业壮. 航空发动机故障诊断[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2012.
- [10] 周正伐. 可靠性工程基础[M]. 北京: 宇航出版社, 2009.
- [11] 杨炳渊. 航天技术导论[M]. 北京: 宇航出版社, 2009.
- [12] 刘文延. 结构可靠性设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

(编辑: 王建喜)