

# 空间斯特林发电机热头结构设计及分析

霍英杰 张安 张学林

(兰州空间技术物理研究所,真空低温技术与物理重点实验室,兰州 730000)

**文 摘** 空间斯特林发电机热头在工作中要承受严酷的高温高压的工况,为了保证其长寿命和高效换热等要求,需要对斯特林发电机热头的材料、结构等方面进行分析和优化设计。本文初步介绍了空间斯特林发电机热头结构设计的要求和准则,分析了热头结构设计的难点和关键点及解决途径。采用有限元分析方法,开展了斯特林发电样机热头的温度和压力综合应力分析和热头结构的优化设计。加工完成的热头结构的工作性能满足斯特林发电样机的要求,初步验证了设计方法和途径的正确性。

**关键词** 空间,斯特林发电机,热头,结构,设计,分析

中图分类号:TK172

DOI:10.3969/j.issn.1007-2330.2015.01.002

## Structure Design and Analysis for Heater Head of Space-Borne Stirling Converter

HUO Yingjie ZHANG An ZHANG Xuelin

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

**Abstract** The running conditions of the space-borne Stirling converter is rigorous, such as high temperature and pressure from inner working fluid. To ensure long longevity and high efficiency heat transfer of the heater head, the materials, structure and so on are need to be analyzed and optimized. In this paper, the structure design principle, analysis, demands for the heater head of space-borne Stirling converter are introduced. The difficulty of the heater head structure is also analyzed in this paper. The heater head optimistic design combined with stress analysis produced by both temperature and pressure were carried out with the aid of commercial finite element method, the final heater head structure design was completed and fabricated, the hardware was integrated on the Stirling engine, the heater head performance is satisfied with the experiment demands.

**Key words** Space-borne, Stirling converter, Heater head, Structure, Design, Analysis

### 0 引言

空间放射性同位素电源系统具有功率大、寿命长、不受光照影响的特点,是深空探测、登月等空间任务的必然选择,电源系统一般通过静态或动态热电转换装置将放射性同位素热能转换为电能。其中放射性同位素温差发电器 RTG 的设计与制造已日臻完善,并在空间得到大量的应用,但这种热电转换系统在温度比为 1.5~2.0 时,热电转换效率<8%,能量密度低,而且不适合于大功率电源的需求。

利用斯特林循环将热能转换为电能的核热驱动

斯特林发电的电源系统 SRG 由于效率高、结构简单、质量轻、启动快和振动小、噪声低等优点,从 20 世纪 80 年代起得到 NASA 持续关注和支持,其结构如图 1 所示。相对于 RTG、Multi-Mission RTG 等技术具有高效(30%)、高比功率的特点,在相同的功率输出时,比 RTG 系统的质量轻,所需的放射性同位素燃料的量减少了将近 3/4,在质量和成本上具有优势, NASA 已将其作为未来深空探测、月球登陆和星际飞行等任务的先进电源系统进行重点研究开发,经过 20 多年的发展,即将空间飞行验证。同时该项技术

收稿日期:2014-12-11

作者简介:霍英杰,1972 年出生,高级工程师,主要从事空间斯特林制冷技术和高效换能技术的研究工作。E-mail:huoyingjie@163.com

还能够应用于空间和地面的聚焦式太阳能发电系统,在新能源领域也有广泛的用途。

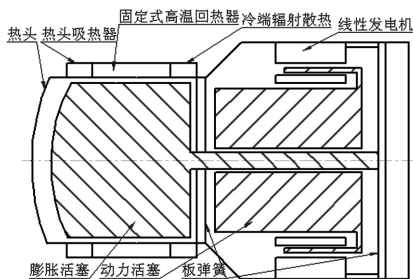


图1 斯特林发电机

Fig.1 Stirling convertor

国内在空间斯特林发电机研究方面刚刚起步,可供参考的经验和数据不多,尤其在斯特林发电机结构件——热头方面的研究甚少,本文在借鉴国内外相关研究的基础上,通过探讨热头设计方法、设计准则及结构分析等问题,归纳了笔者在空间斯特林发电机热头结构设计中的工作。

## 1 空间斯特林发电机热头结构设计

热头是斯特林发电机重要的能量传输部件,由于热头冷热端存在较大的温差,同时热头内部高压工质在工作时产生高频压力脉动,为了减小热端和冷端之间的轴向热传导损失,热头一般采用薄壁结构,因此热头薄壁结构同时要承受冷热端温差产生的较高热应力,工质静压力和工质气体的脉动压变应力,尤其在热头高温端,这些应力还同时伴随着 600℃ 以上的高温,作为空间应用,其结构还要求长寿命和高可靠,以上因素和要求互相作用,有些甚至互相矛盾,如热力学薄壁结构与力学设计要求,这些均对热头的设计带来巨大的挑战。需要在设计中综合考虑以上因素,进行结构的优化。

### 1.1 热头结构设计的难点

(1)在工作过程中,热头同时要承受冷热端温差产生的热应力,内部工质压力以及工质气体在循环中产生的高频交变脉动压力,力学设计分析必须综合考虑多方面的应力影响;

(2)在结构设计中为了减小冷热端传热温差造成的热损失,热头筒体采用薄壁结构,需在减少导热损失和提高抗弯强度之间进行优化;

(3)热头结构工艺设计和密封结构设计的可靠性;

(4)高温热源对冷端热辐射和传导效应的防护;

(5)高热流密度传热结构设计。

### 1.2 热头结构设计的关注点

#### 1.2.1 热头材料的选用分析

热头长期工作在高温环境中,加热温度一般在 650 ~ 800℃,是长时间承受高温和高压持续载荷的气密结构,必须考虑由此产生的材料随时间积累的非弹性疲劳-蠕变,材料在高温下低沸点成分的挥发造成的气密性降低等。因此热头结构对于材料性能和抗蠕变特性要求较高,在设计过程尽量选用成熟的、经过较多应用验证和可获得的耐高温结构材料。在选用材料时把握以下原则:

(1) 抗蠕变性能;

(2) 可加工性;

(3) 材质致密,防氩工质的泄漏;

(4) 长期高温工作的稳定性和材料兼容性;

(5) 易于实现焊接密封结构;

(6) 延展性和刚性(便于加工,处理和抗外界物体撞击能力)。

根据文献[1]调研,作为一般原则,受热部件应采用在高温下具有高强度的材料制成,典型的是含有 18% Cr 和 8% Ni 的耐热合金,如耐热不锈钢,国产对应的牌号有 0Cr17Ni12Mo2,相当于美标 316L,这种材料容易获得,加工性好,可以用于斯特林发电机样机的早期研制阶段,本设计采用 316L 材料。在更高要求的情况下,还可选择高温性能更好的材料,如耐热合金 Inconel718,这种材料曾应用于美国空间用斯特林发电机技术演示验证样机上和 Sunpower 公司斯特林发电机工程样机上,累计工作寿命在 40 kh 以上。此外美国 Oak Ridge National Lab 一直在进行 Inconel718 长寿命高温性能测试,根据其试验推算,在 100 kh 的 650℃ 高温使用周期中,材料内部高沸点组分 Cr 的质量损失为 0.8 mg/cm<sup>2</sup>[2],对应的零件表面损耗层厚度为 10 μm,所以在高温使用过程中材料的真空质量损失也可以不考虑。表 1 为两种材料的物理性能。

表 1 热头材料性能表<sup>1)</sup>

Tab.1 Mechanical performance of candidate materials for heater head

材料	熔点 /℃	$R_m$ /MPa	$R_{P0.2}$ /MPa	$R_{P1.0}$ /MPa	$A_5$ /%	HB
Inconel718	1260 ~ 1340	965	860	200	10	≤363
316L	1371 ~ 1399	520	205	60	40	≤165

注:1)材料性能摘自 ASKZN。

#### 1.2.2 热头承压壳体应力条件要求

热头为薄壁结构件,其内部热端容积为膨胀腔,根据文献[2]的介绍,热头结构在内部工质压力、温度梯度和发射负载作用下的综合应力不应超过材料在工作温度下的屈服应力,同时在 2 倍的工作压力下

压力腔体不应当破裂。

### 1.2.3 抗蠕变设计要求

由于非弹性疲劳引起的蠕变而导致的压力容器在低于静态强度极限时破裂。蠕变强度与温度相关,而且在大多数的情况下仅仅关注材料在高温时的变化。虽然蠕变能够在任何温度下发生,但是蠕变效应通常在温度高于 40% 金属熔化温度时能够观测到<sup>[3]</sup>。典型性而言,在斯特林发电机中工作温度高于这一标准的部件为热头,该部件的主要壳体应力不应超过材料在该温度和服役时间下的蠕变破裂应力。即使在低于要求的防止破裂的蠕变危害的情况下,蠕变变形造成的无效容积的增加对于斯特林循环的性能有不利的影响。所以,应当限制热头壳体应力低于工作温度和工作时间下的材料的蠕变应力<sup>[4]</sup>。

### 1.2.4 热头工艺设计要求

为了减少热头轴向的热传导损失,热头结构的厚度一般为 0.5 ~ 1 mm,其形位精度要求较高,但由于所采用的材料加工和焊接性能好,所以热头采用筒体和封头分体加工,最后焊接成整体的方式,这样在加工精度的实现性方面带来好处,便于加工,从而能够在结构优化过程中兼顾热头加工成形和焊接密封的工艺可实现性。

### 1.2.5 热头高热流密度换热设计

斯特林发电机热头为热量输入端,热流密度大(本设计约 20.37 W/cm<sup>2</sup>),工质在热头膨胀腔体内高速交变流动,工质与热头壁的热交换时间极短,热头换热结构影响热输入效率,直接影响到系统的热效率。根据传热机理,采用的主要技术途径是增大有效换热面积、提高换热强度和减少热阻。

采用放射性同位素热源的空间斯特林发电机,热头与热源直接耦合,在初步设计阶段,热头结构采用平头方式,采用模拟热源与斯特林发电机耦合,热耦合采用间接接触热传导的方式,为了减小接触热阻,对热头与模拟热源的导热接触表面粗糙度和平面度要有较高设计要求,同时为保证接触面有足够大的接触面积,在接触面之间填充耐高温界面材料,根据导热热阻的影响因素分析,导热热阻与接触面间的压紧程度成正比,但斯特林发电机热头为薄壁结构,过大的压紧力会导致其变形,从而影响其正常运行,采用在斯特林制冷机热耦合上应用过的柔性导热带方式,使热源与斯特林发电机热头同时实现柔性软连接,这样既保证了导热带两端连接部位的较小传热热阻,同时避免了热头受过大的预紧力,尤其适应发射力学负载,使热头结构不会由于热源和热头热端面的相对位

宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2015 年 第 1 期

移而受到较大的侧向力。

### 1.3 结构设计仿真方法的应用

由于斯特林发电机热头有复杂的外形和负载特征,可以采用有限元分析获得零件上的应力分析,FEA 的好处是设计优化,比如最小质量等能够自动得到,使用 3D 设计软件创建基本几何特征、使用有限元仿真分析软件进行网格化、添加负载,求解和根据设计准则进行评估等完整的设计过程,同时使用标准的 FEA 工作,比如网格敏感性研究、以保证分析结果的准确性。在条件许可的情况下,需要开展 2 倍工作压力的爆破压力试验和 1.5 倍最大工作压力的验证试验校验设计和分析结果,以保证在如此高的压力时无永久变形的发生。

为了提高斯特林发电机热头抗弯强度,同时有效减小轴向导热损失,提高系统效率,采用变截面的热头结构,与传统的等截面结构相比,设计成形难度较大,但对系统的性能提高有益。在进行变截面热头结构设计时,首先建立热头的有限元分析模型,热头是一个压力腔,而且一端受热,一端受冷,工质气体在冷热端之间循环,提供产生机械功的压力波,由于内部压力,热头存在着环向和轴向的应力,冷热端温度梯度产生弯曲应力,热头为回转体,在大多数情况下采用 2D 对称模型分析,但是考虑到发射负载,则采用 3D 模型。热分析模型为温度相关材料,因此需要非线性的迭代求解器,边界条件包括在换热器上的温度和热流值。

结构分析模型也使用温度相关材料模型<sup>[5]</sup>,应用从热分析结果得到的节点温度作为边界条件,额外的边界条件包括压力负载,位移状况和任何需要仿真的条件如发射负载,建立结构模型用来确定热头寿命期内不同条件下的应力特点,调用在材料选用研究中得到的材料物理参数,根据热头的工作参数确定边界条件,计算分析热头结构的应力分布特点,依照以上确定的设计准则对其仿真分析和优化设计,确定其结构设计参数。

### 2 热头结构优化设计结果

为了初步验证材料选择、应力分析和结构优化等工作的有效性,进一步优化设计工作奠定基础,在发电机热头的初步设计中进行了简化,分析计算所设定的边界条件为:热头内表面压力为 4 MPa,压力指向垂直于热头内表面。热头热端温度为 923 K,高温段轴向长度为 10 mm,冷端为 363 K,低温段轴向长度为 10 mm,假定在两个温度段的温度均分别为热头热端温度和冷端温度。热头底面法兰在  $x$ 、 $y$  和  $z$  方向

为固定约束,由于热头结构厚度较小,热头材料为316L,气缸结构安全系数取1.4。

### 2.1 热头端面结构设计

热头端面一般有两种,一种是平头结构,一种是穹顶,后者显然耐压性能要优于前者,初步的分析模型也证明了这点。但是作为初步设计,考虑到满足功能要求和便于加工,热头采用平头结构,首先通过分

析确定应力集中点并改进。分析结果如图2所示,从图中可以看出,采用穹顶结构的热头其在相同条件下,最大应力为96 MPa,而平头结构虽然采用了顶部的局部强化设计,但在热头底面法兰处最大应力达到647 MPa,热头端部平顶部位也有较大的应力集中,需进一步优化设计。

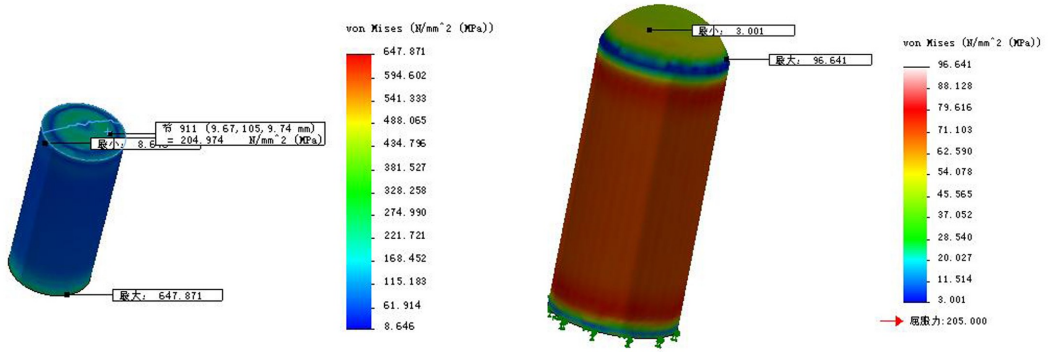


图2 热头端面结构分析  
Fig.2 Analysis for stirling convertor end

### 2.2 热头壁厚的设计分析

由于应力集中于热头端部,所以分别计算热头端部壁厚为1~3 mm时的情况,当厚度达到3 mm时,满足要求。分析如图3所示。分析表明其中环向( $x$ 方向)变形量随着节点高度的增加几乎不变,其值为零;竖直方向( $y$ 方向)变形量随着节点高度的增加而增加,最大变形量为1.23%。径向( $z$ 方向)随着节点高度的增加基本保持不变,其值为0.6%。 $x$ 方向节点受左右对称压力,因此变形量几乎为零。在 $y$ 方向上,由于热头底部固定约束,因此随着高度的增加,变形量越大。在 $z$ 方向,热头圆柱形段所受压力基本保持不变,而在热头端部局部应力过大,所以结构强化

的部位应当在热头端部,而在圆柱段则可以保持1 mm的均匀厚度。根据分析,平头热头端部厚度为3 mm时,在压力和温度综合应力作用下,热头端部强度能够满足安全设计要求,为了进一步提高安全设计余量,还需要对热头高温段结构进行优化设计,主要的措施就是变截面设计。从分析过程中可以得出,在热头底法兰各个方向为固定约束的情况下(实际状况),温度梯度产生的应力效果主要对热头底部法兰应力影响较大,针对这一问题,在设计中增加了热头底法兰厚度,因此在圆柱形阶段,节点变形量保持不变,所以结构强化的部位应当在热头端部,解决了底法兰应力较大的问题。

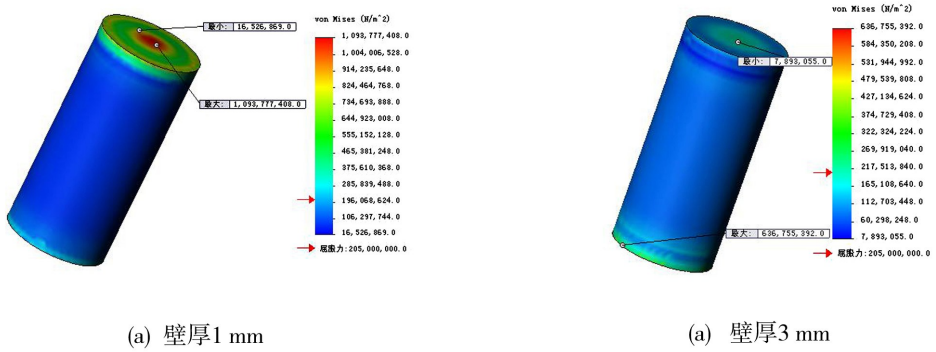


图3 热头端部壁厚分析结果  
Fig.3 Analysis results on different thickness of the stirling convertor end

### 2.3 热头结构的变截面设计

经过综合分析比较,热头圆柱段应力水平较低,

壁厚为 1 mm 时能够满足要求,但在端面过渡角处应力集中严重,需要通过变截面的方式,将热头受热部位和端部的局部壁厚加大,使高温段在 10 mm 内,具有逐渐变化的厚度,以保证应力的均匀性,同时将尖角过渡设计成圆弧过渡,防止局部的应力集中。经过综合应力分析,工作温度下最大应力水平低于材料屈服应力,结构满足热头设计要求。此外为了冷端冷却的需要,将热头冷端法兰与冷却系统合二为一,设计了冷却套,可以在冷却套中通入冷却水保持冷端温度的稳定。热头最终结构优化设计如图 4 所示。

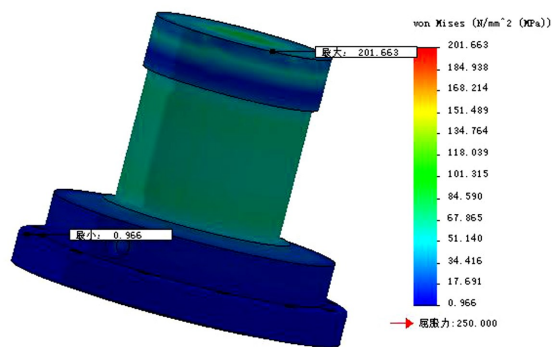


图 4 热头优化结构应力分析

Fig. 4 Stress analysis on heater head

### 3 实验初步验证结果

热头设计完成后,在加工过程中为了保证零件的形位公差要求,需经过多次热处理,消除热加工应力,加工完成后的热头如图 5 所示。



图 5 热头结构样件

Fig. 5 Sample heater head

在系统充入 4.0 MPa 高纯氦气,使用检漏仪检漏,漏率指标优于  $3 \times 10^{-7}$  Pa·m<sup>3</sup>/s,完全满足试验需要。在随后的斯特林发电机的试验工作中,在充入 4 MPa 工质气体后,热端温度在 650℃ 时工作正常,初

步验证了设计的正确性。在大气环境下,热头材料 316L 显示了较好的抗氧化能力,通过使用表明,这种材料在初期的斯特林发电机研究工作中可以正常使用,从成本、易获得性、加工性和焊接性方面完全能够满足实验室样机研究的需要。发电机在实验室进行了连续运行试验和测试,研制的斯特林发电机实现了自启动、动力学相位耦合、热机和直线发电机耦合等功能,开展了温度性能特性、漏率验证等实验工作,在实验过程中,热头的结构设计经受了发电机内部高压工质流体压应力及 873 ~ 333 K 冷热端温度应力的考验,较好地验证了设计的正确性。

### 4 结论

在实验样机的设计中,在参考国外设计经验的基础上,采用有限元方法进行了斯特林发电机热头不同结构的综合应力分析,初步确定了热头结构一般设计准则和实验要求,经过初步试验验证了本设计的正确性,但对于热头在高温下的长期运行的可靠性和稳定性还需通过试验加以验证,并根据实验结果,通过下一轮的优化设计进一步完善斯特林发电机热头的优化设计方法。

### 参考文献

- [1] Thieme L G, Schreiber J G. Supporting development for the stirling radioisotope generator and advanced stirling technology development at NASA GRC [R]. NASA/TM--2005-213409 (AIP Conf. Proc., 2005, 746:674-681).
- [2] Qiu Songgang, Augenblick J H. Structural and thermal analysis of infinia corporation [C]. 3<sup>rd</sup> International energy conversion engineering conference, 15-18 August, 2005, San Francisco, California. American Institute of Aeronautics and Astronautics Stirling Convertors, AIAA 2005-5655
- [3] Qiu S, Peterson A A. STC Stirling Power System Development [C]. Proceedings of the 1<sup>st</sup> IECEC, AIAA-6055
- [4] Halford G R, Shaw A, Arya V, et al. Structural analyses of stirling power convertor heater head for long-term reliability, durability, and performance [C]. Proceedings from Space Technology and Applications International Forum (STAIF 2002), El-Genk M, Albuquerque N M, eds. 3-6 February, 2002

(编辑 李洪泉)