

有限元法在辐射制冷器热分析中的应用

尉海霞,朱建炳,潘雁频,王小军
(兰州物理研究所,甘肃 兰州 730000)

摘 要: 辐射制冷器主要为红外探测器提供合适的低温工作条件,是星载红外遥感探测系统的重要组成部分。建立了 W 型辐射制冷器的有限元模型。利用 ANSYS 分析软件对辐射制冷器热变形进行了分析,提出了减小 2 个冷头相对位移的措施,为辐射制冷器的优化设计和红外相机的光学补偿提供了理论依据。

关键词: 辐射制冷器; 热分析; 有限元分析

中图分类号:TB65;O241.82

文献标识码:A

文章编号:1006-7086(2006)02-0091-04

APPLICATION OF THE FINITE ELEMENT ANALYSIS IN THERMAL ANALYSIS OF RADIANT COOLER

WEI Hai-xia, ZHU Jian-bing, PAN Yan-pin, WANG Xiao-jun
(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Radiant cooler mostly provides cryogenic working condition for the infrared detector. It is an important part of space infrared remote sensing detect system. The finite element analysis model of W radiant cooler has been set up. Thermal transmutation analysis of radiant cooler is done by ANSYS analysis software. The measure for minimizing two cold head comparatively displacement is introduced. As a result of analysis, it offer a theory reference for the optimal design of radiant cooler and optics compensate of infrared camera.

Key words: radiant cooler; thermal analysis; finite element analysis

1 引 言

辐射制冷器是根据辐射热交换的原理,利用宇宙真空低温环境,通过高效辐射器不断向冷黑空间辐射热量同时尽可能屏蔽外部热流,从而达到降温制冷的一种被动式制冷系统,主要为红外相机的多元红外探测器列阵正常工作提供所需的低温工作环境和安装位置。在“资源一号”卫星红外多光谱扫描仪中,由于采用 3 个红外谱段分两路进光,要求通过整体划线和地面调焦达到高精度配准的 2 个冷焦面,在辐射制冷器正常工作降温后冷焦面平面度变化不大于 $1/3$ 像元。然而受质量的限制,辐射制冷器大部分采用铝合金板材由铣成带筋的薄壁件构成。发射入轨后,辐射制冷器开始降温,这与地面调焦时仅仅冷却安装探测器的一、二级杜瓦有很大的差异。薄壁结构件由于热胀冷缩产生较大的热应力而变形,使得已经具备良好的配准精度的冷焦面受到辐射制冷器结构件热变形的影响,造成安装红外探测器的 2 个杜瓦冷头产生位移而偏离光路,使得某些谱段红外探测器成像质量下降,甚至无法与光路配准而失效^[1]。

采用有限元分析法对辐射制冷器进行热应力分析,是解决工程实际的有效方法之一,可以建立与实际结构相一致的有限元模型进行热分析和结构分析。作者采用 ANSYS 有限元分析软件对 W 辐射制冷器进行热变形分析,分析的结果可以为辐射制冷器的结构优化设计和红外相机光路预估补偿提供依据。

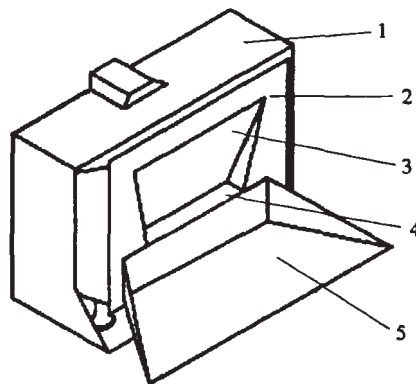
收稿日期:2006-03-23.

基金项目:真空低温技术与物理国家级重点实验室基金(51475050204JW0811)资助。

作者简介:尉海霞(1980-),女,山西省大同市人,硕士生,从事空间制冷研究。

2 辐射制冷器结构模型

对于辐射制冷器来说,太阳、地球和航天器本身是其主要外热源。为了尽可能消除外热流对辐射制冷器的影响,不同的卫星轨道、不同安装位置,要有不同结构形式的辐射制冷器相适应。作者以应用于太阳同步轨道卫星的 W 型辐射制冷器为例进行分析。其结构特点是采用二级制冷方式。辐射制冷器的一级锥体、二级冷块、一级辐射板、地球屏构成字母 W 型排列,采用高强度、低热导的拉杆支撑和圆锥台支撑,以实现级间支撑。在锥体和地球屏的两侧,分别设置了左右侧锥和侧屏,既能阻止外热流的输入,又增加了整体刚性,其结构模型如图 1 所示。主要由二级组件、一级组件、外壳组件、防污罩组件、支撑及隔热系统、安装圈等组成。在辐射制冷器内部设有 2 个星地兼容的微型杜瓦。其中一级杜瓦直接与一级组件相联,主要为 2 个短波红外谱段提供 146 K 左右冷源和安装位置;二级杜瓦通过热开关与二级冷块相联,为 1 个长波红外谱段提供 100 K 左右冷源和安装位置^[1]。



1.安装圈 2.外壳组件 3.一级组件 4.二级组件;
5.地球屏。

图 1 W 型辐射制冷器结构模型

3 有限元热应力分析^[2]

3.1 有限元的热分析理论

稳态热分析的能量平衡方程用矩阵形式可表示为

$$[K]\{T\}=\{Q\}$$

式中 $[K]$ 为传导矩阵,包含导热系数、对流换热系数及辐射率和形状系数; $\{T\}$ 为节点温度向量; $\{Q\}$ 为节点热流率向量,包含热生成。ANSYS 利用模型几何参数、材料热性能参数以及所施加的边界条件,生成 $[K]$ 、 $\{T\}$ 以及 $\{Q\}$ 。

3.2 热应力耦合分析的主要步骤^[3]

(1) 首先进行辐射制冷器的热分析。可以使用热分析的所有功能,在空间条件下无对流产生,仅包括传导、辐射、表面效应单元等,进行稳态或者瞬态传热分析。

(2) 重新进入前处理,转换单元类型。转换单元类型必须考虑单元间的相容性。单元转换过程中需要注意相应的单元选项(主要是不同类型分析切换时,在新的环境中定义前面环境没有定义的单元属性),必要时通过手动设置。

(3) 设置结构分析中的材料属性以及前处理细节。需要定义的材料属性包括弹性模量、泊松比、热导率、热膨胀系数等参数;前处理细节包括节点耦合、约束方程等。

(4) 读入热分析结果,并将其作为载荷键入或者选择热分析的结果文件。

(5) 设置参考温度。

(6) 求解并查看分析结果。

3.3 有限元模型的建立

以 W 型辐射制冷器为研究对象,首先建立了辐射制冷器的几何模型。模型建立中采取了小尺寸结构,圆角结构在建模中被简化掉,并按照图纸的真实设计尺寸建立模型。这样简化的结果,使得模型建立方便而且计算精度较高。根据辐射制冷器的实际厚度分布,选择适当的实常数,在有加强筋处采取加厚的措施。一、二级冷块为 7.0 mm;锥壳侧板、侧锥、锥壳后盖为 5.0 mm;锥壳底板、锥壳后盖为 7.0 mm;一、二级杜瓦则为 6.0 mm。一、二级组件的材料为铝合金 LY12。分别输入其热导率、密度、弹性模量、泊松比、热膨胀系数。由于辐射制冷器的线度和厚度之比远大于 10:1,故选择其中的热分析中的壳单元 shell57 作为单元类型。shell57 具有 4 个节点,每个节点仅有 1 个自由度——温度。热分析结束后,转换 shell57 为结构单元 shell63。shell63 有弯曲和薄膜 2 种功能,包括应力刚化和大变形功能。该单元每个节点有 6 个自由度: x 、 y 、 z 方向的

平动和绕 x 、 y 、 z 轴的转动。把热分析得到的结果做为体载荷进行结构分析,从而得出热位移分布,从结果中可以获得热变形量。

根据辐射制冷器实际工作情况,热边界条件是一级组件处于 146 K 温度,二级组件处于 100 K 的温度;外壳组件处于 210 K 的温度,安装圈处于 293 K 的温度。二级组件通过 9 根(上面 6 根,下面 3 根)支撑带吊装在一级组件上,支撑带上还施加一定的预紧力。一、二级组件整体通过 4 个圆锥台型支撑用 4 个 M8、24 个 M3 螺钉与外壳组件相联。

在划分网格时,根据辐射制冷器的实际结构,选择映射网格划分,将整个模型划为 4 节点单元。一、二级有限元模型图如图 2 所示。

3.4 热分析结果

辐射制冷器装配是在实验室环境温度下完成的,所有零部件处于同一温度,此时通过调整获得的一、二级杜瓦相对位置和平面度均满足设计要求。但是辐射制冷器正常工作降温以后,各级组件之间存在着巨大的温度梯度,然而同级各零件之间均采用了热刚性联接,几乎不存在明显的温度梯度,吊装一、二级组件的 9 根支撑带温度分布也几乎相同。通过分析获得此时一、二级组件温度场分布,如图 3 所示。

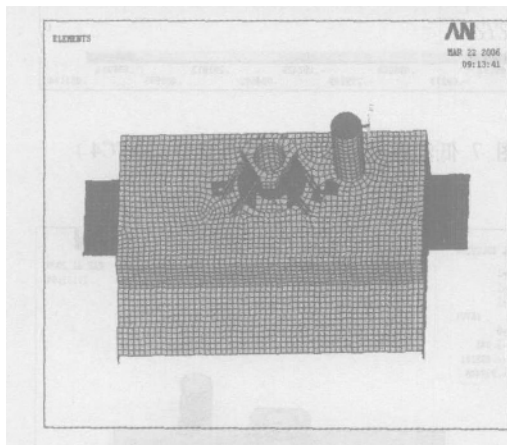


图 2 辐射制冷器一、二级有限元模型

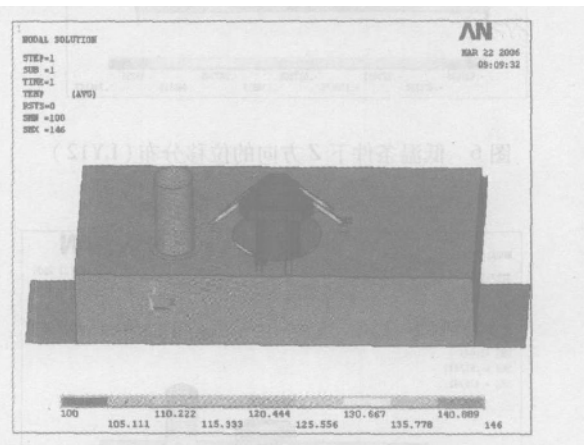


图 3 辐射制冷器一、二级温度场分布

从辐射制冷器的结构可以看出,一、二级杜瓦均联接在锥壳后盖上。锥壳组件的热变形是造成一、二级杜瓦产生相对位移的主要原因。利用 ANSYS 分析软件,对由 LY12 制成的一、二级组件进行的热变形分析结果如图 4~图 6 所示。从图中可以看出此时一、二级的相对位移较大,特别是 X 方向达到 0.152 8 mm,超出了设计要求,将对红外探测器的成像造成严重的影响。

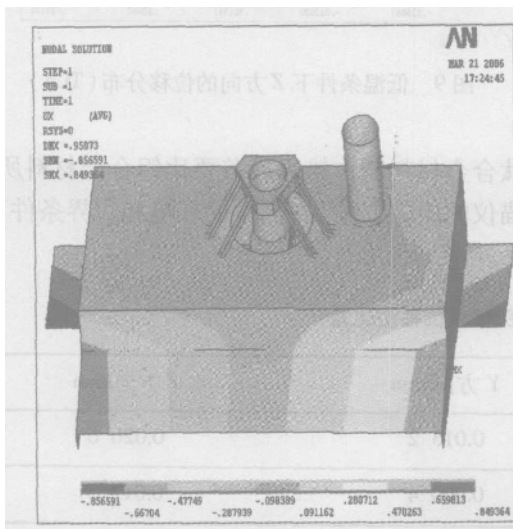


图 4 低温条件下 X 方向的位移分布 (LY12)

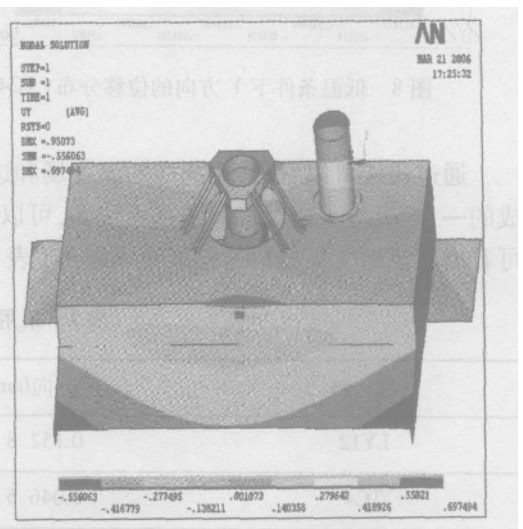


图 5 低温条件下 Y 方向的位移分布 (LY12)

为了减小一、二级冷头相对位移的变化量,将一级锥壳后盖改为热膨胀系数较小、稳定性较高的钛合金(TC4)材料后,再利用 ANSYS 软件对一、二级杜瓦的热相对位移进行分析,结果如图 7~图 9 所示。从上述分析结果可以获得采用不同材料的一、二级杜瓦在 X、Y、Z 3 个方向上的相对位移结果,如表 1 所列。

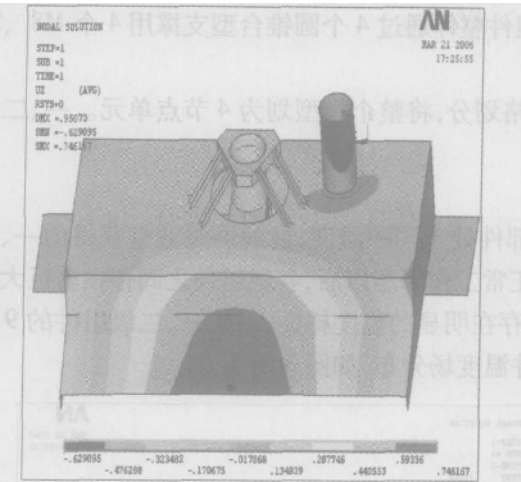


图 6 低温条件下 Z 方向的位移分布 (LY12)

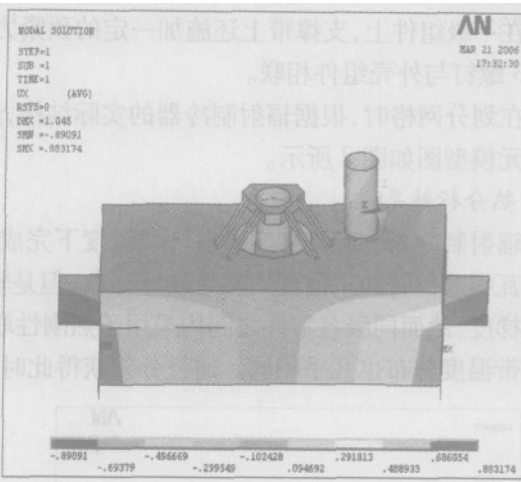


图 7 低温条件下 X 方向的位移分布 (TC4)

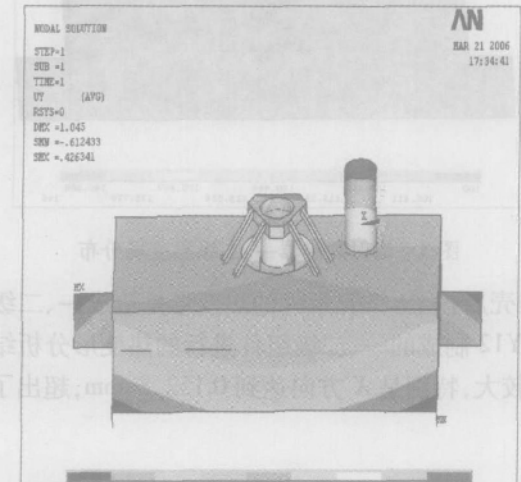


图 8 低温条件下 Y 方向的位移分布 (TC4)

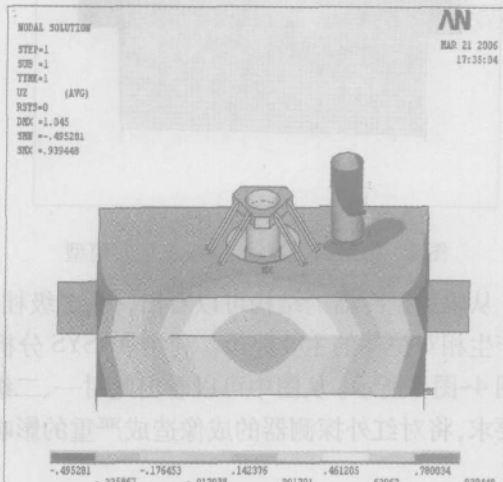


图 9 低温条件下 Z 方向的位移分布 (TC4)

通过比较可以看出,在同样的温度场和边界条件下,采用钛合金材料制作锥壳后盖要比铝合金材料所造成的一、二级冷头相对位移减小了很多,可以满足红外光谱扫描仪的成像要求。在同样的环境和边界条件下,可看出它比铝合金材料位移减小了很多(表 1)。

表 1 采用不同材料一、二级冷头相对位移变化量

材 料	X 方向/mm	Y 方向/mm	Z 方向/mm
LY12	0.152 8	0.013 2	0.020 6
TC4	0.046 5	0.000 4	0.012 5

(下转第 99 页)

为达到进一步减小 Q 的目的,除回气管道内表面须做黑化处理以外,液氦杜瓦其他结构的所有内外表面均应做镜面化处理,以提高反射率,降低吸收率。通过与不采用此种结构形式与工艺的大型低温冷凝泵的 LHe 杜瓦进行对比分析,在相同的工作条件下,采用此种结构形式与工艺的大型低温冷凝泵的 LHe 杜瓦 (100 L),其内部 LHe 的热负荷虽处于变化之中,但均低于前者,且最低时仅为前者的 1/5。

5 结 论

NBI 低温冷凝泵采用此种结构形式的 LHe 杜瓦,可使冷氦气的冷量得以充分有效的利用,达到降低输液过程中 LHe 损耗量和运行过程中 LHe 消耗率的目的。LHe 杜瓦内部的分隔结构,使得焊接在冷凝面上的圆管道内能建立并维持稳定的自然循环流动,从而使作为低温泵关键部件的冷凝面能得到有效冷却。采用此种 LHe 杜瓦结构的低温冷凝泵已应用于工程实践,实验表明其具有良好的工作性能^[2]。

参考文献:

- [1] 陈长琦,谢远来,欧阳峥嵘,等.用于中性束注入器的 4.2 K 液氦低温冷凝泵的设计[J].真空科学与技术,2003,(6): 400~403.
- [2] 欧阳峥嵘,谢远来,胡纯栋,等.中性束注入器低温冷凝泵性能测试[J].真空与低温,2004,10(4): 34~36.
- [3] 徐烈.真空绝热与贮运[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [4] 张华顺.离子源和大功率中性束源[M].北京:能源出版社,1987.
- [5] 姜万顺,达道安.贮槽式液氦冷凝泵的设计考虑及其性能测试[J].真空与低温,1986,5(2): 1~6.
- [6] PAVEL HANZELKA, JAN DUPÁK, VĚRA MUSILOVÁ. Small helium bath cryopump for electron optical devices[J]. Cryogenics, 2002, 42: 39~44.
- [7] 陈国邦.低温工程材料[M].杭州:浙江大学出版社,1998.

(上接第 94 页)

4 结 论

通过 ANSYS 有限元分析软件,对辐射制冷器的一、二级杜瓦在常温和低温条件下的相对位移进行了计算。采用不同材料制作锥壳后盖后,对一、二级杜瓦相对位移的影响进行了比较分析,认为主要原因是材料的热胀冷缩效应。减小杜瓦相对位移的主要措施是采用热膨胀系数小、稳定性高的材料,获得的计算结果可以为辐射制冷器设计提供依据。同时,通过与辐射制冷器冷头相对位移的实验测试结果相比对,经过修正后,可以为红外相机的光路预估补偿提供参考。

参考文献:

- [1] 潘雁频,茅年清,朱建炳,等.W 型辐射制冷器试验及其应用[J].真空与低温,2005,11(4): 205~209.
- [2] 李维特,黄保海,毕仲波.热应力理论分析及应用[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [3] 刘涛,杨凤鹏.精通 ANSYS[M].北京:清华大学出版社,1998.