热沉结构管接头的应力计算与实验验证

庞贺伟 孟宪红 张 行

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘 要: 由于大型空间环境铝热沉设备 KM6 承受周期性的应力,使空间实验室结构存在安全问题,因此选择 T 型、L 型两类典型热沉构件,运用大型计算软件 PATRAN,NASTRAN 对构件在压力谱与温度谱共同作用情况下进行应力分析,得到关键部位的应力. 采用实验方法确定了热沉各连接部位的应力,并把有限元计算结果和实验结果进行比较. 结果表明:有限元计算的结果与实验测量结果基本一致,从而可以采用计算方法确定空间实验室的工作应力,进行其结构的安全性预报.

关 键 词: 空间实验室; 热沉; 应力

中图分类号: O 39

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)01-0070-04

Numerical calculation and experimental verification of stress at joint between two pipes of thermal shrouds

Pang Hewei Meng Xianhong Zhang Xing

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The large special environmental equipment KM6 is subjected to repetitive stress. In order to assure the safely of space laboratories, two kinds types of thermal shroud structures with T and L shape were chosen and the stress analysis was carried out by use of PATRAN & NASTRAN software under stress and temperature spectrums. The stress of critical part was determined. After that, the stress of the same parts was also obtained from experiments, and the results obtained by theoretical calculations and experiments were compared. The results obtained by the finite element method are approximately accordant to that obtained by experiment, and thus the work stress considering the effect of temperature can be determined by numerical method and then the safety of the thermal shroud structures can be predicted accordingly.

Key words: space laboratory; shroud; stress

空间实验室承担着极其重要的空间科学研究任务,其结构必须具有足够的安全性,以保证空间科学实验任务的完成. 目前,美国、俄罗斯、法国、英国等发达国家均建立空间飞行器的环境模拟实验室. 根据党中央、国务院批准的在本世纪初发射载人飞船的计划,我国也建造了中国的大型空间环境铝热沉设备(模拟空间冷黑环境的设备)KM6. 这些大型空间实验室的建立以及全尺寸实验耗资巨大[1],为此,对空间实验室结构使用安全问题研究必然成为我国空间技术研究的一个重要方向. 为了解决安全性问题,首先应该准确确定热沉设备的危险部位与应力,本文运用理论计算与实验两种方法来解决这一重要的问题.

1 热沉的工作载荷与典型构件

热沉构件不可避免地要受到压力谱和温度谱的共同作用,即这种构件在实验过程中,要面临加载、卸载,降温、升温的过程[2]. 具体的说,压力是在 0～0.5 MPa 之间变化(因为要模拟准真空的太空环境);温度是在－196～50℃之间变化. 因

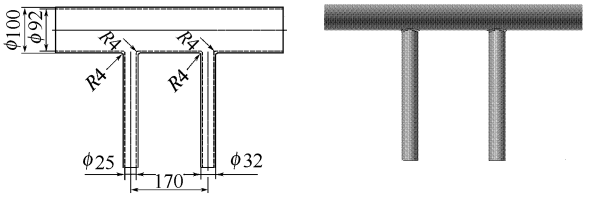
收稿日期: 2008-02-20

作者简介: 庞贺伟(1961－),男,辽宁凌源人,博士生,panghewei@cast.cn.

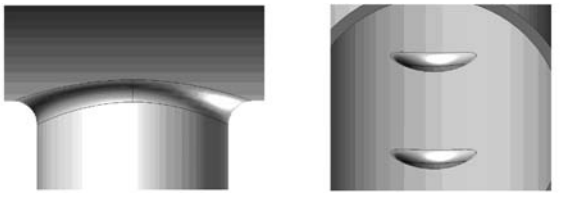
此,确定压力谱和温度谱共同产生的热沉工作应力是判定热沉能否安全工作的一个重要内容.

KM6 铝热沉管路庞大、结构复杂,但大多数都是类似的结构.根据固体力学知识,结构的危险部位在具有高度应力集中的连接位置附近.通过全面分析,本文选择以下两类典型结构进行了应力的理论分析与实验分析:一类位于总管与支管的连接位置,为不同直径管的相贯连接即 T 型连接.另一类位于上、下侧液氮总管与热沉壁上导管的连接处,为相同直径管的直角连接即 L 型连接.对于焊缝热影响区的点,因为焊缝处不平整,无法贴片,则在能满足贴片工艺的条件下尽量靠近焊缝.本文首先分析了 T 型连接:外径为 ϕ100 的粗管与外径为 ϕ32 的细管连接结构,管厚度均为 4 mm.实际中管是通过焊接连接,焊接点附近存在过渡圆角,在此将过渡圆角定义为与管厚相同,即管接处里外过渡倒角均为 $R=4$ mm.主要结构及连接处倒角如图 1、图 2 所示.

然后进行了 L 型连接部位的应力分析[3].

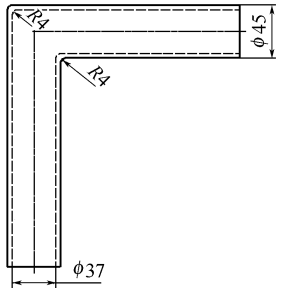


a　结构尺寸　　b　几何体

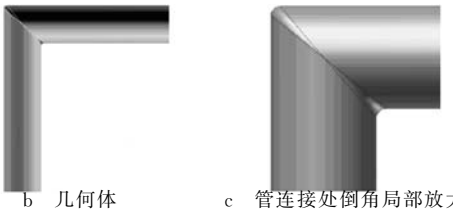


c　管连接处倒角局部放大　　d　管连接处内部倒角局部放大

图 1　不同直径管的相贯连接(T 型连接)及连接处倒角过渡



a　结构尺寸



b　几何体　　c　管连接处倒角局部放大

图 2　相同直径管的直角连接(L 型连接)及连接处倒角过渡

2　热沉构件应力计算及收敛性验证

2.1　热沉构件应力计算

使用 PATRAN 建模,利用有限元分析,对于上面介绍的热沉内部两种典型结构进行了应力分析[4-5].本文选择实测实验的最终状态作为计算的边界条件,即载荷 0.5 MPa,温度 −188 ℃(85 K).在有限元分析中,其边界条件为:主管一端固支,另一端 x,y 向约束,z 向自由,支管自由.

温区主体结构为粗管和细管连接,结构除了承受内压外,端部承受载荷,在此将等效载荷施加于模型截面上,设粗、细管外径分别为 D_1,d_1,内径分别为 D_2,d_2,粗管、细管载荷大小分别为

$$P=\frac{F}{S}=\frac{\Delta P\ \frac{\pi}{4}D_2^2}{\frac{\pi}{4}(D_1^2-D_2^2)}=2.7552\ \text{MPa}$$

$$p=\frac{F}{s}=\frac{\Delta p\ \frac{\pi}{4}d_2^2}{\frac{\pi}{4}(d_1^2-d_2^2)}=0.7832\ \text{MPa}$$

式中,F 为压力;S,s 为粗管、细管截面积.粗管轴向应力为 σ_z,径向应力即为 σ_y.

图 3～图 6 分别给出了 T 型连接和 L 型连接管外部和管内部的应力云图.



图 3　T 型连接管外部 Mises 应力云图

2.2　收敛性验证

由应力云图可知在连接处,存在明显的应力集中.究其原因,是因为连接处曲率半径很小,从而导致集中应力的产生,这也是空间结构在设计中需着重考虑的因素之一.一般情况下,这一位置是最容易失效的,因而在进行有限元计算时将其作为应力收敛性验证的重点.采取的方法为对管连接处进行网格细化,即对图 1c、图 1d、图 2c 中管内外连接处网格细化.本文以逐渐增加连接处节点个数 n 来实现.

逐步将连接处节点个数由 $n=6$ 逐渐增加到

$n=30$，给出对应的 Mises 应力的变化情况，见图7、图8. 计算结果表明：随着管连接处n的增加，

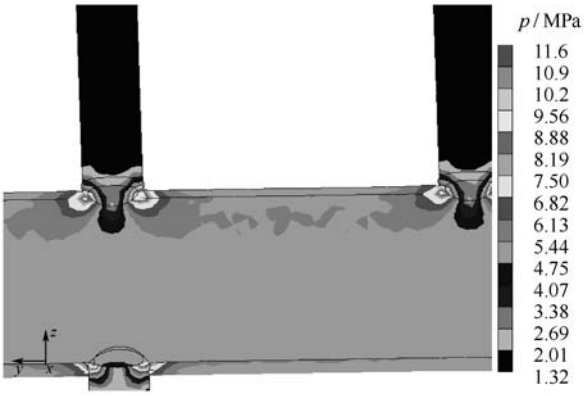


图4 T型连接管内部 Mises 应力云图

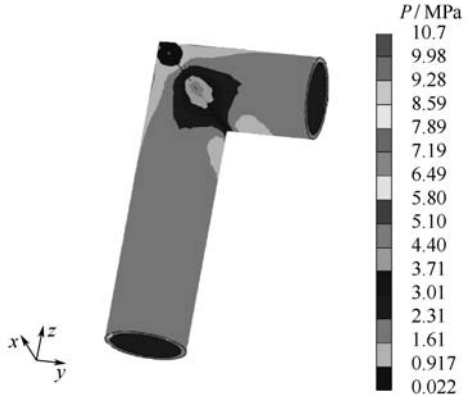


图5 L型连接管外部 Mises 应力云图

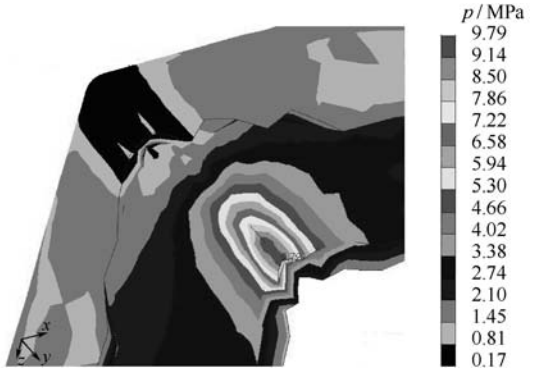


图6 L型连接管内部 Mises 应力云图

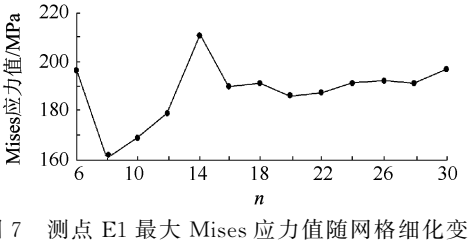


图7 测点 E1 最大 Mises 应力值随网格细化变化曲线

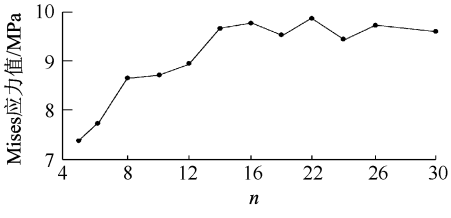


图8 测点 E7 最大 Mises 应力值随网格细化变化曲线

应力值起初浮动较大，后来趋于收敛. 其他各向应力的变化趋势类似. 本文认为在连接处 $n=30$ 时应力收敛，收敛时的应力值为计算最终值.

3 实验确定热沉管接头的应力

为了验证计算应力的精确性并考察载荷与温度变化对应力产生的影响，本文采用实验方法确定了热沉各连接部位的应力与计算应力比较. 实验方法为电测法测量热沉关键部位在低温环境的变形，再计算相应的应力. 测量原理图见图9.

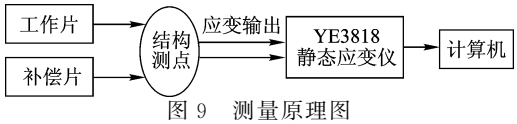


图9 测量原理图

为了获得准确的应力分布、方向，应变片采用应变花的方式，如图10所示. 应变花的 x，y 向分别沿着管子的轴向和圆周方向，测出应变值 ε_0，ε_{45}，ε_{90}，求得 ε_x，ε_y 与 γ_{xy}. 确定在变温（−196～+50℃）与加载（压差为0～0.5 MPa）过程中，热沉某些典型部位的应变变化情况.

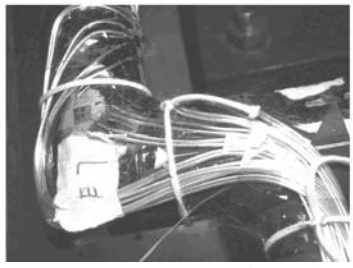


图10 测点 E7 及边界位置实拍图

为了得到温度变化过程对应力的影响[6]，对采用热电偶对粘贴应变片的热沉部位进行测温，测温点布点位置在应变片位置的附近. 测温点并入到试件测量系统，与试件数据一同测量，测量精度为±0.5℃，测量采样周期为60 s.

从应变测点的响应值来看，从开始抽真空时，各测点的应变就有变化，随着温度的逐渐降低，应变值也随着不断的变化. 在温度较快地变化时，应变也随之有一个急剧的变化. 实验测得 x，y 和45°方向应变值，分别记为 ε_x，ε_y 和 ε_{45}，得

$$\gamma_{xy}=\varepsilon_x+\varepsilon_y-2\varepsilon_{45} \tag{1}$$

则可得主应变为

$$\left.\begin{aligned}\varepsilon_{\max}&=\frac{1}{2}\left[\varepsilon_x+\varepsilon_y+\sqrt{(\varepsilon_x-\varepsilon_y)^2+\gamma_{xy}^2}\,\right]\\ \varepsilon_{\min}&=\frac{1}{2}\left[\varepsilon_x+\varepsilon_y-\sqrt{(\varepsilon_x-\varepsilon_y)^2+\gamma_{xy}^2}\,\right]\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

即可得 $\varepsilon_{\max}$ 的方位与轴向夹角：

$$\alpha_0=\arctan\left[-\frac{\gamma_{xy}}{2(\varepsilon_{\max}-\varepsilon_y)}\right] \tag{3}$$

进而得到主应力为

$$\left.\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{E}{2}\left(\frac{\varepsilon_x+\varepsilon_y}{1-u}+\frac{1}{1+u}\sqrt{(\varepsilon_x-\varepsilon_y)^2+\gamma_{xy}^2}\right)\\ \sigma_2 &= \frac{E}{2}\left(\frac{\varepsilon_x+\varepsilon_y}{1-u}-\frac{1}{1+u}\sqrt{(\varepsilon_x-\varepsilon_y)^2+\gamma_{xy}^2}\right)\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中,E 为弹性模量;u 为泊松比.

4　应力的计算结果与实验结果比较

在此,对热沉各典型连接部位进行有限元计算结果和实验结果的比较,具体的位置如图 11、图 12 所示,对应的测点编号为 E1～E9.

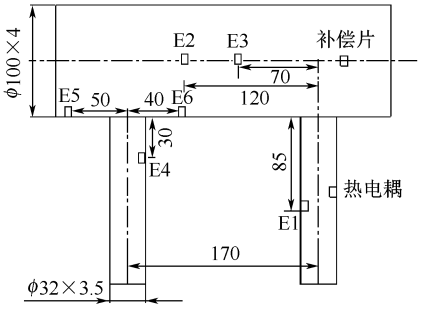


图 11　T 型连接各测点位位置图

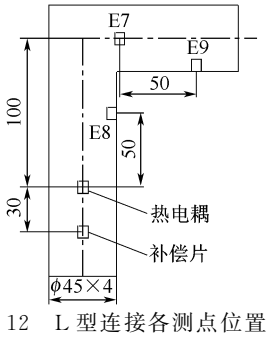


图 12　L 型连接各测点位置图

由于在实验过程中,无法实时测量管中气压的变化,因此在本文中只对实验过程的最终状态,即载荷 0.5 MPa,温度 －188℃(85 K)进行了分析,并与前面计算结果进行了对比.对比结果见表 1.

表 1　各测点电测法与有限元计算结果对照表

连接类型	测点位置	计算应力/MPa	实验应力/MPa	相对误差/%
T 型	E1	40.1	31.69	20.97
	E2	10.5	8.35	20.48
	E3	13.9	13.91	0.07
	E4	66.3	48.15	27.38
	E5	13.9	16.37	15.09
	E6	16.9	18.64	10.30
L 型	E7	5.18	2.91	43.82
	E8	2.66	20.33	86.92
	E9	2.02	20.33	90.06

从比较结果可以看出:在直管处,计算与实验结果符合很好,在焊缝处差别较大,如测点 E7.经分析原因可能在于:①温度补偿片是套在热沉上的,温度未能达到与热沉同步变化;②应力集中部位正好是焊缝的热影响区,其力学性质与母材有一定的差别;③焊缝造成了连接处的尺寸与形状的改变,而改变后的形状不规则,很难准确给出,因此计算是依照原始的管尺寸建模的.

5　结 束 语

本文运用大型计算软件 PATRAN 和 NASTRAN 对空间模拟环境设备 KM6 铝热沉的典型构件进行了在压力谱与温度谱共同作用时的应力分析,得到了关键部位的应力.同时,进行了压力谱与温度谱共同作用时的应变测量实验,对理论计算的结果进行了验证,为进一步研究热沉的典型构件的安全使用做了必要的准备.

参考文献(References)

[1] 邹定忠,刘敏,刘国青.新的大型空间环境模拟器热沉的研制[J].环模技术,1998,4(57):1－10
Zou Dingzhong, Liu Min, Liu Guoqing. Development of a thermal shroud attached to KM6 space simulator [J]. Environmental Technology, 1998,4(57): 1－10(in Chinese)

[2] 于涛,刘敏,邹定忠.航天器空间环境模拟器热沉热均匀性分析[J].中国空间科学技术,2006,12(6):37－41
Yu Tao,Liu Min,Zou Dingzhong. Thermal uniformity analysis for heat sink of space simulator[J]. Chinese Space Science and Technology, 2006,12(6):37－41(in Chinese)

[3] 李志华,李焕喜,徐惠彬,等.热障涂层的残余应力分析[J].北京航空航天大学学报,2004,30(3):272－275
Li Zhihua,Li Huanxi,Xu Huibin,et al. Residual stress analysis of thermal barrier coatings[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2004,30(3):272－275 (in Chinese)

[4] 宁磊,丁水汀,陶智,等.轴向通流多级旋转盘腔内的稳态换热特性[J].北京航空航天大学学报,2003,7(29):636－639
Ning Lei,Ding Shuiting,Tao Zhi,et al. Heat transfer in rotating cavity with axial through flow of cooling air [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 7(29):636－639(in Chinese)

[5] 张孟喜,黄瑾,贺小强.火荷载下沉管隧道结构的热-力耦合分析[J].土木工程学报,2007,3(40):83－87
Zhang Mengxi, Huang Jin,He Xiaoqiang. Coupling analysis of thermal field and stress field for immersed tunnels under fire load [J]. China Civil Engineering Journal, 2007,3(40): 83－87(in Chinese)

[6] 王素,倪春阳,朱心雄.功能梯度材料活塞三维温度场分析[J].北京航空航天大学学报,2005,12 (31):1229－1302
Wang Su,Ni Chunyang,Zhu Xinxiong. Temperature field analysis for heterogeneous material piston [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005,12 (31):1229－1302(in Chinese)

(责任编辑:刘登敏)