

整星热试验容器强度及稳定性分析设计

韩潇, 祁妍, 刘波涛

(北京卫星环境工程研究所, 北京 100094)

摘要: 空间环境模拟器真空容器结构设计必须考虑外压载荷和设备载荷, 进行详细的结构力学分析计算, 使其结构安全可靠。文章采用有限元方法计算分析了容器的强度和稳定性, 获得了复杂结构载荷下的应力和临界屈曲压力, 在此基础上对容器进行了强度和稳定性评价, 所得结果可为容器结构设计提供可靠的依据。

关键词: 航天器; 真空热试验; 真空容器; 稳定性分析

中图分类号: O242.21

文献标识码: A

文章编号: 1673-1379(2012)06-0674-03

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2012.06.016

0 引言

真空容器为空间环境模拟器的重要分系统, 在做热试验时, 其内部为高真空状态, 外部要承受1个大气压, 因此在设计时需要进行容器结构强度和稳定性分析计算。为了满足航天器真空热试验的需要, 容器中需要提供高真空、冷热交变等模拟环境, 同时在试验中又需要检测模拟环境参数以及航天器的相关参数, 为此在容器上开有许多功能孔, 而这些开孔势必会对容器的强度和稳定性造成一定的影响。如果容器补强措施不好, 则可能会因为稳定性的问题而影响容器的真空性能。因此, 真空容器的稳定性分析与设计至关重要。

本文介绍了真空容器结构强度和稳定性的设计理论与方法, 并采用有限元方法对大型空间环境模拟器真空容器的强度和稳定性进行了计算分析。

1 容器稳定性计算方法

真空容器的失稳包括局部失稳(如开孔)和整体失稳, 这2种失稳都会导致严重的后果。针对真空容器的稳定性分析, 有临界压力失稳计算方法和有限元分析方法。

1.1 临界压力失稳计算方法

基于薄壳筒体稳定性理论, 工程设计中常用 B. M. Pamm 近似计算方法即计算真空容器失稳临界压力, 其计算公式为^[1]

$$P_{cr} = \frac{2.6E\delta_e^2}{LD_0\sqrt{\frac{D_0}{\delta_e}}}, \quad (1)$$

式中: P_{cr} 为筒体临界压力, MPa; δ_e 为筒体有效厚度, mm; D_0 为筒体外直径, mm; L 为筒体计算长度, mm; E 为筒体材料弹性模量, MPa。

考虑到真空容器材料不均匀、制造误差以及安全系数等因素, 经推导得到基于稳定性算法的圆筒容器壁厚计算公式为

$$\delta_n = D_0 \left(\frac{3PL}{2.6ED_0} \right)^{0.4} + C, \quad (2)$$

式中: δ_n 为筒体壁厚, mm; P 为筒体设计压力, MPa; C 为附加厚度, mm。

附加厚度由钢材厚度负偏差和腐蚀裕量组成, 钢材厚度负偏差按照钢材标准选定, 腐蚀裕量根据真空容器部件的腐蚀、机械磨损、预期寿命等情况来确定。

1.2 有限元分析方法

工程设计中常用有限元法对容器进行强度和稳定性分析, 以确保真空容器设计可靠性。有限元法有各种类型的计算单元体模型, 可以利用这些计算单元体进行组合以计算几何形状复杂的真空容器, 包括加筋组合壳体结构、开有众多法兰接口的壳体结构等。因此, 有限元法是复杂的真空容器强度和稳定性计算分析的有效手段。

本文专门利用有限元法^[2]对真空容器进行了

收稿日期: 2012-04-09; 修回日期: 2012-05-04

作者简介: 韩潇(1981—), 男, 硕士学位, 主要从事空间环境模拟技术研究。E-mail: hxcast@163.com。

分析计算,同时按照应力分类判据进行强度评价,力求使设计结果更加合理有效。

2 有限元法的计算分析与强度评价

2.1 应力分析与强度评价

基于 ANSYS 平台建立直径为 8 000 mm 的整星热试验真空容器有限元分析模型,容器由 8 个支座支撑,筒体上有 53 个接口法兰分别与真空、测控等其他系统连接。有限元计算时,容器结构主体采用 Shell63 壳单元,大门法兰、导轨等部件采用 Solid45 三维实体单元,所有的焊接、螺纹连接均按固接处理,网格划分采用手动与程序自动划分相结合的方式。通过对所建立的模型施加载荷后进行求解得到其应力分布云图(图 1)。除筒体法兰方筋与筒体连接处局部尖角有应力集中外,其他部位最大应力出现在 DN1320 接管法兰与筒体焊接部位的内壁圆角处,如图 2 所示。

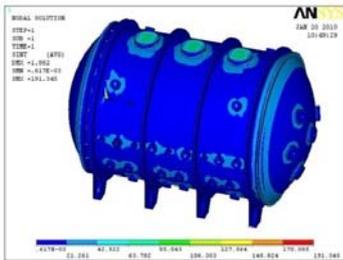


图 1 真空容器结构应力分布

Fig. 1 Stress distribution in the vacuum vessel

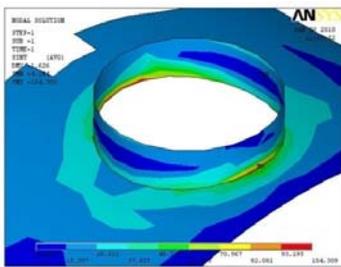


图 2 接管法兰部位应力分布

Fig. 2 Stress distribution in the flange

根据真空容器结构特征,其内应力一般分为一次应力、二次应力和峰值应力^[3]。一次应力是非自限应力,主要由外部压力和设备载荷引起,它由一次总体薄膜应力、一次弯曲应力及一次局部薄膜应力组成。二次应力是自限性应力,主要由外部条件约束及结构变形协调要求引起。峰值应力是自限性应力并且具有局部性特征,主要由局部结构不连续引起,它可能导致结构疲劳或脆性断裂。由于整星

热试验真空容器一般不作疲劳分析,因此将真空容器除峰值应力外的其他应力进行叠加组合,计算组合应力强度并进行校核评价。

计一次总体薄膜应力强度为 S_I ,一次局部薄膜应力强度为 S_{II} ,一次局部薄膜应力加一次弯曲应力的应力强度为 S_{III} ,一次弯曲应力、一次局部薄膜应力加二次应力的总应力强度为 S_{IV} , $S_I \sim S_{IV}$ 的数值应满足以下要求:

$$S_I \leq K S_m, S_{II} \leq 1.5 K S_m, \quad (3)$$

$$S_{III} \leq 1.5 K S_m, S_{IV} \leq 3 K S_m, \quad (4)$$

式中: K 为载荷组合系数; S_m 为材料设计应力强度,MPa。

当真空容器仅承受外压、自重、附属设备重量等载荷作用时,按照设计标准其载荷组合系数 K 取 1.0。真空容器材料为 0Cr18Ni9 不锈钢,因此其在使用温度下的设计应力强度 S_m 取 137 MPa。从获得的应力分布云图中提取容器重要部位的应力强度,选取应力评定线,对这些重要部位进行应力线性化处理校核,其校核评定结果如表 1 所示,其中由于局部区域一次总体薄膜应力包含在一次局部薄膜应力组成范围内,故只校核一次局部薄膜应力强度。

表 1 真空容器重要部位应力强度校核

Table 1 Stress intensity check for key parts of the vacuum vessel

校核部位	S_{II}/MPa	S_{IV}/MPa	校核结果
封头与筒体连接部位	71	146	满足
加强筋与筒体连接部位	54	103	
DN1320 接管法兰与筒体连接部位	127	192	
DN800 接管法兰与封头连接部位	73	152	

由应力强度校核可知,整星热试验真空容器在外压和自重等载荷作用下,各重要部位均处于应力强度安全范围内。

2.2 结构屈曲分析与校核

由于整星热试验真空容器上的开孔削弱了局部强度和刚度,影响整体稳定性,故需要对容器结构进行屈曲分析,以获得容器临界屈曲载荷及屈曲波形图,并判断结构整体的抗失稳能力。ANSYS 提供了 2 种分析结构屈曲载荷的方法,即特征值屈

曲分析和非线性屈曲分析^[4]。特征值屈曲分析主要用于分析理想弹性结构的稳定性,可以预测失稳载荷的上限,并利用特征值屈曲分析了解屈曲模态形状,作为非线性屈曲分析的初始几何缺陷。

真空容器经特征值屈曲分析,得到屈曲临界压力为 0.79 MPa,图 3 为容器结构整体屈曲波形,由图 3 可知,屈曲主要发生在筒体的后侧部位,加强筋之间的结构发生波浪状位移。

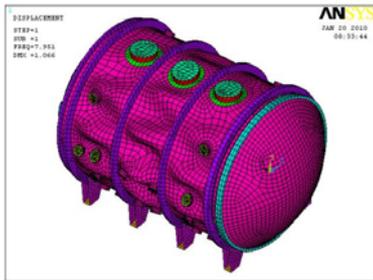


图 3 容器结构屈曲波形

Fig. 3 Flection wave shape of the vacuum vessel

特征值屈曲分析是一种简便的稳定性分析方法,但是屈曲失稳往往涉及几何非线性、材料非线性,甚至与边界条件非线性密切相关,因此又对真空容器结构进行了非线性屈曲分析。失稳一般是一种从对称状态转变为非对称状态的变形突变过程,根据特征值分析得到的屈曲模态,将对应的失稳模态变形乘以一个系数,使结构失去对称特性并具有初始缺陷,从而求得非线性屈曲解。

非线性屈曲波形如图 4 所示,得到屈曲临界压力为 0.81 MPa,比线性计算结果略高,计算结果表明仍然是容器直筒段稳定性较弱。考虑到航天器热试验

的重要性,真空容器稳定性安全系数取 3~5,因此该容器在外压作用下仍具有较好的抗失稳能力。

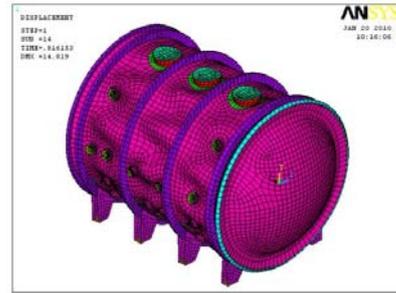


图 4 容器非线性屈曲波形图

Fig. 4 Non-linear flection wave shape of the vacuum vessel

3 结束语

采用有限元法计算分析了真空容器的结构强度和稳定性,获得了结构应力和临界屈曲压力,在此基础上对容器的应力和稳定性进行了分析评价,解决了传统计算方法很难对容器结构强度准确评价的难题,有助于确保整星热试验真空容器运行的可靠安全。

参考文献 (Reference)

- [1] 黄本诚, 陈金明. 空间真空环境与真空技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 24-25
- [2] Najafizadeh M M, Hasani A, Khazaeinejad P. Mechanical stability of functionally graded stiffened cylindrical shells[J]. Applied Mathematical Modeling, 2009, 33(2): 1151-1157
- [3] JB 4732—1995 钢制压力容器: 分析设计标准[S]
- [4] 余伟炜, 高炳军. ANSYS 在机械与化工装备中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006: 90

Strength and stability analysis of vacuum vessel for the spacecraft-level vacuum thermal test

Han Xiao, Qi Yan, Liu Botao

(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract: The vacuum vessel is the main part of a space environment simulator, to be used for the spacecraft-level vacuum thermal test. In view of safety and reliability, the loads (such as the external pressure and the deadweight) must be accurately calculated when the vacuum vessel is designed. The stability analysis based on the finite element method is carried out in order to acquire the stress and the critical instability pressure. By the estimation and the analysis for the stress intensity and the stability, reliable results can be obtained for the vacuum vessel's design and manufacture.

Key words: spacecraft; vacuum thermal test; vacuum vessel; stability analysis