

ITER 中子屏蔽模块的模式分析与谱分析研究

陈 科 徐书成 殷 磊

合肥工业大学, 合肥, 230009

摘要:为避免真空室屏蔽层受地震的影响,根据 ITER 中子屏蔽层结构对其中子屏蔽单元模块进行了单点响应谱分析,将中子屏蔽结构的模态分析结果与法国某地的加速度谱进行了模态叠加。分析发现,应力极值在许可应力范围之内。

关键词:ITER 中子屏蔽单元模块;模态分析;单点响应谱分析;地震载荷

中图分类号:TH113.1

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.09.003

Research on Modal Analysis and Spectrum Analysis of Neutron Shielding Module for ITER

Chen Ke Xu Shucheng Yin Lei

Hefei University of Technology, Hefei, 230009

Abstract:Single-point response spectrum analysis of neutron shielding module was done to check out structural design scheme under earthquake load. Modal analysis of neutrion shielding module of ITER vacuum vessel was built. By modal superposition with acceleration spectrum of ITER final location in France, security against earthquake load of this structure was analyzed. The results show the validity of this structural design of this neutron shielding of vacuum vessel.

Key words:international thermonuclear experimental reactor(ITER) neutron shielding module; modal analysis; single-point response spectrum analysis; earthquake load

0 引言

国际热核聚变反应堆(ITER)是为进一步深入研究核聚变反应而正在设计建造的一个重要平台。ITER 真空室是反应堆主要结构之一,它是一个由双层不锈钢高真空组件组成的 360° 环形结构系统。在真空室双层壳体之间,约 60% 的空间被中子屏蔽单元模块所填充,总称中子屏蔽层。它的主要作用是屏蔽堆芯等离子体在核聚变反应过程中产生的中子流和伽玛射线,防止其穿透真空室,对总装置的其他部件尤其是磁体部件产生辐射^[1]。中子屏蔽层在核反应系统中具有重要的作用,其结构的安全性、可靠性及机械性能等十分重要。中子屏蔽层的受力情况较为复杂,除了受自身的重力作用外,设备安装地区地震等突发事件也会对其机械结构产生影响。研究人员在中子屏蔽层结构的静力分析方面做了大量的研究,但没有充分考虑地震因素产生的影响,为了确保系统的安全和稳定运行,不出现机械结构的破坏,不带来灾难性的影响,因此在设计阶段还需充分考虑地震载荷的影响。

1 中子屏蔽单元模块的模态分析

1.1 中子屏蔽层的设计

如图 1 所示,真空中子屏蔽模块是由数目不等、厚度为 40 mm、形状相似的屏蔽单元块和螺栓、螺母、托架、垫圈等附件连接而成的。装配体通过 3 个 M30 固定螺栓与筋板连接^[2]。本文选取其中一个扇区的一个非铁磁性的屏蔽单元模块为代表进行分析,研究中子屏蔽层的变形情况。等离子体发生聚变反应时,中子屏蔽层除受到自身的重力、温度、电磁力等载荷外,还可能受到地震的影响,故需对屏蔽单元模块进行模态分析,获得其模态信息,如屏蔽单元模块的固有频率等动力学参数,并进行谱分析与模态叠加分析,从而研究地震对中子屏蔽层的影响。

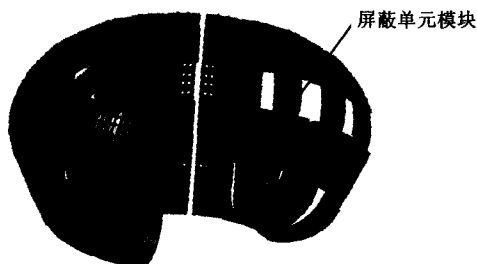


图 1 中子屏蔽层的结构图

1.2 中子屏蔽单元模块模型

建立屏蔽单元模块有限元分析模型时,在不

影响其本身强度、刚度和计算精度的前提下将模型进行适当简化。本模型中,单元块的圆角及倒角等结构要素已去除。分析时,首先在三维建模软件CATIA中建立中子屏蔽单元模块的三维几何模型,然后将模型导入有限元分析软件ANSYS中的WORKBENCH模块进行网格划分,之后在ANSYS经典模式下进行模态分析。

1.2.1 材料属性

本屏蔽单元模块材料为SS304B4,筋板的材料为SS316L(N)-IG,螺栓、螺钉、螺母、垫圈的材料是氮强化奥氏体不锈钢XM-19^[3],各接触面间的摩擦因数为0.25。各材料属性如表1所示。

表1 各材料的属性

材料	密度(kg/m ³)	弹性模量(GPa)	泊松比
SS304B4	7820	190	0.3
SS316L(N)-IG	7932	186	0.3
XM-19	7880	195	0.3

1.2.2 网格的划分

高质量的网格是获得正确、高精度有限元计算的重要保证,为得到较高质量的网格,模型采用高阶三维20节点固体结构的solid 186单元(该单元可支持塑性、蠕性、大变形和大应变)。然后在WORKBENCH中采用自由划分的方式进行划分,建立接触对。得到的网格单元总数为43 020,节点总数为181 605。因为模态分析是纯粹的线性分析,而模型中存在接触非线性,所以要对局部非线性接触表面进行线性简化。接触对之间若无间隙存在,接触将在内部表现为黏结(Bonded)或不分离(No Separation);反之,非线性接触行为将是自由无约束的。图2所示为整个屏蔽单元模块的网格划分结果。



图2 模型的网格划分

1.2.3 边界条件

边界条件的正确施加是进行有限元分析和模态分析的关键,考虑到屏蔽单元模块的实际情况,实际安装中,M30螺栓的预紧力为103.9 kN,M20的预紧力为22.61 kN。在分析时,连接螺栓的预紧力会在上下托架上产生一个拉力,并在筋

板上产生一个弯矩;对于真实的设计模型装配过程来说,上托架和屏蔽模块先用连接螺栓固定在一起,然后通过3个M30的固定螺栓将上托架固定在筋板上。因此,连接螺栓对托架产生的拉力和对筋板的弯矩是不存在的。有限元分析中,为了解决这个问题,采用二次计算的方法,将筋板从中间断开,分成上下两部分(上筋板、下筋板)。第一步,计算连接螺栓的预紧力,即先约束下筋板X方向的自由度,在预紧力的作用下,上筋板会朝下筋板方向移动,将此移动位移(43.5 μm)求出。第二步,将第一步计算出的位移施加到上筋板的下表面。如图3所示,在筋板的右表面,约束其Z方向的位移;筋板中间分为上下两部分,约束筋板下部分的上表面,使其在X方向的位移为0,在筋板上部分的下表面,X方向的位移设为43.5 μm ,在图示的两条边线上使用全约束。该约束既可以限制筋板的自由膨胀,防止由于约束而产生的不必要的应力集中,又可以只限制刚体位移(但不限制屏蔽单元模块的变形)。由于装置运行在真空环境里,所以在此次分析的计算过程中,温度暂不考虑。

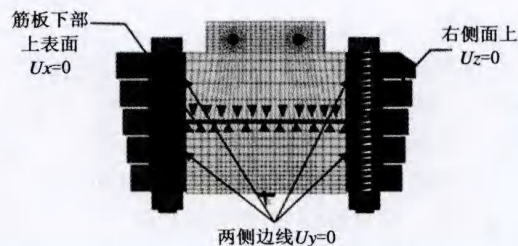


图3 模型上施加的边界条件

1.2.4 模态分析计算结果

在进行模态分析前,先对屏蔽单元模块施加的预紧力进行静力分析,然后选择Block Lanczos法进行模态分析,设置提取的模态数目为10,扩展模态数目为10,进行计算求解。

计算结果如表2所示,屏蔽单元模块的10阶固有频率的范围是245.867~1385 Hz,随着频率的提高,动态变形相对有所减小,这是由于高阶振型对结构的动力响应影响较小。此屏蔽单元模块的最大变形为10.346 mm,内部附件的最大变形为5.546 mm。低阶(1~5阶)振型屏蔽单元模块的最大变形为7.634 mm,高阶(6~10阶)振型的最大变形为10.346 mm。

一般来说,在螺栓与单元块间的位置会出现应力集中,由动力学原理可知,结构对地震响应最剧烈的频率主要发生在低频段^[4],因此选3阶的振型图进行分析。图4、图5分别为模型和部分

表 2 屏蔽单元模块与附件的 10 阶固有频率与变形量

阶数	频率(Hz)	模块变形量(mm)	附件变形量(mm)
1	246	4.06	2.947
2	266	4.785	3.386
3	497	5.795	4.658
4	574	3.644	3.188
5	641	7.634	4.065
6	999	8.738	5.504
7	1036	6.806	5.546
8	1132	6.75	4.556
9	1193	10.346	1.869
10	1385	10.058	1.239

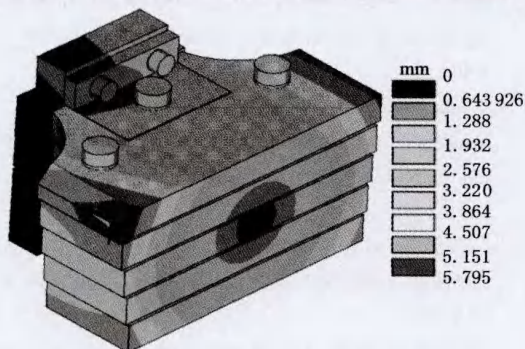


图 4 屏蔽单元模块附件的 3 阶振型图

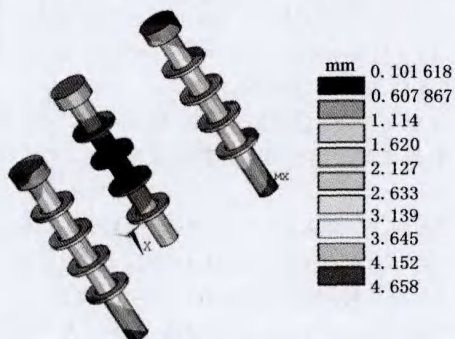


图 5 模型的 3 阶振型图

附件(连接螺栓与垫片)在 3 阶固有频率时相对应的振型图。

2 屏蔽单元模块的单点响应谱分析

谱分析主要应用于核电站的建筑物和部件、机载电子设备、任何承受地震或其他不规则载荷的结构或构件等,可分为时间历程分析和频域的谱分析,把模态分析结果和一个已知的谱联系起来计算位移和应力。本文的时间历程分析主要应用瞬态动力学分析。响应谱和动力设计分析的输入输出数据都比较明确,均是实际的最大值,是一种定量分析;随机振动分析是一种定性分析,只能表示输入输出数据在特定值时发生的可能^[5]。本文根据中子屏蔽单元模块的实际情况,选择定量分析的单点谱分析,以地震加速度作为谱的类型,在 X、Y、Z 方向进行谱值加载。

地震载荷是一种随时间变化的随机复杂载荷。地震载荷的性质和中子屏蔽结构的动力学特性决定了地震载荷对中子屏蔽结构的影响。地震动力载荷可以用随时间变化的位移、速度或加速度来描述。结构的固有频率和模态振型是谱分析所必须的数据,本文将地震谱中各阶频率下的加速度与屏蔽单元模块的模态分析结果相叠加,进行模态叠加计算^[6],研究地震载荷对屏蔽单元模块的响应。表 3 所示为 ITER 的最终选址地法国 Cadarache 的地震加速度频谱^[7]。在实际情况下,地震载荷作用在极向筋板上,将中子屏蔽模块安装固定于极向筋板。由于极向筋板的刚度远大于屏蔽块,故在分析中可以将极向筋板视为刚体,进行简化处理,认为作用在中子屏蔽模块上的动载荷等于作用在极向筋板上的地震载荷。

表 3 地震加速度频谱

模态阶数	频率(Hz)	加速度(m/s ²)
1	0.10	0.0108
2	0.25	0.1294
3	0.40	0.3018
4	1.00	1.1652
5	1.42	1.9198
6	2.00	2.9282
7	2.82	4.4669
8	3.98	5.7595
9	5.62	7.2255
10	7.94	7.2402

在模态分析的结果上再进行模态叠加与单点响应谱分析,求出屏蔽结构在地震响应时的最大变形和最大应力。分析中,分别在 X、Y、Z 方向上进行激励加载。表 4 所示为得到的地震谱响应分析的结果。

表 4 地震谱响应分析的结果

	最大响应应力(MPa)	最大变形(mm)
X 向	387	0.20
Y 向	362	0.13
Z 向	289	0.09

由表 4 可知,屏蔽单元模块在 X 方向上激励后的应力和变形最大,但其响应的应力极值与位移极值位于连接螺栓的上半部。螺栓的评定准则为

$$p_m + p_b + Q \leq 1.33 \times 0.9\sigma_y$$

其中, $p_m = 147$ MPa, $p_b = 150$ MPa, $Q = 90$ MPa。由 $p_m + p_b + Q = 387$ MPa $< 1.33 \times 0.9\sigma_y = 454$ MPa,并根据表 5 可知应力极值处在许可应力范围之内,从而证实该中子屏蔽层的结构设计是可靠的。

表5 应力极值评定

温度(℃)	拉伸强度 σ_u (MPa)	屈服强度 σ_y (MPa)
20	690	379

3 结语

通过有限元分析,得到了中子屏蔽单元模块结构模型的固有频率及其低阶振型。为进一步了解地震动载荷对 ITER 装置造成的影响,根据 ITER 最终选址地的地震谱数据,对 ITER 中子屏蔽单元模块进行了单点响应谱分析。将中子屏蔽单元模块模态分析的结果与该加速度谱叠加起来进行模态合并分析,研究了地震对结构的影响程度。得到的结果反映出中子屏蔽层在受到地震载荷的激励时,结构处于许用应力范围内,这说明此结构能够有效地满足结构抗震性的设计要求,为 ITER 装置后续设计提供了依据。

参考文献:

- [1] 刘常乐,武松涛,郁杰,等. ITER 真空室中子屏蔽设计[J]. 核聚变与等离子体物理, 2005, 25(2): 99-104.
- [2] Liu Changle, Wu Songtao, Yu Jie, et al. Design of ITER Vacuum Vessel Neutron Shielding Structure [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2005, 25(2): 99-104.
- [3] ITER I/O. Engineering Description. ITER Design Description Document 1.5 Magnet[R]. Hefei: Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [4] Barabash V. Summary of Vacuum Vessel Materials Data for Structural Analysis[R]. Hefei: Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, 2003.
- [5] 刘晶波. 结构动力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [6] 朱迎善. 谱分析及其在振动中的应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991.
- [7] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [8] Verrecchia M. Summary of Seismic Analyses of Tokamak[R]. Hefei: Institute of Plasma Physics Chinese Academy of Sciences, 2011.
- [9] Sha Yi, Bai Xiaobang, Li Jinlei, et al. Experimental Research on the Design and Performance of Single Screw Pump [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(5): 522-530.
- [10] Regener T, Reich M, Duerholt R, et al. Latest Positive Displacement Motor and Drill Bit Developments for Drilling Hard and Abrasive Formations [C]//SPE/IADC Drilling Conference, SPE-92542-MS. Amsterdam, 2005: 644-653.
- [11] 陈玉祥, 王霞, 周松, 等. 提高螺杆泵定子橡胶材料寿命的分析与研究[J]. 排灌机械, 2005, 23(4): 6-9.
- [12] Chen Yuxiang, Wang Xiang, Zhou Song, et al. Analyses on Improving the Life of the Screw Pump's Stator Rubber[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(4): 6-9.
- [13] 韩传军, 邱亚玲, 刘清友, 等. 螺杆钻具等壁厚衬套性能分析[J]. 西南石油大学学报, 2008, 30(4): 163-165.
- [14] Han Chuanjun, Qiu Yaling, Liu Qingyou, et al. Performance Analysis for Uniform Wall Thickness Bushing of PDM[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2008, 30(4): 163-165.
- [15] 王伟, 邓涛, 赵树高. 橡胶 Mooney-Rivlin 模型中材料常数的确定[J]. 特种橡胶制品, 2004, 25(4): 8-10.
- [16] Wang Wei, Deng Tao, Zhao Shugao. Determination for Material Constants of Rubber[J]. Special Purpose Rubber Products, 2004, 25(4): 8-10.
- [17] Charlton D J, Yang J, Teh K K. A Review of Methods to Characterize Rubber Elastic Behavior for Use in Finite Element Analysis[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1994, 67: 481-503.
- [18] Nicholson D W, Nelson N W. Finite-element Analysis in Design with Rubber[J]. Rubber Chemistry and Technology, 1990, 63: 368-406.
- [19] Korunovic N, Trajanovic M, Stojkovic M. FEA of Tyres Subjected to Static Loading[J]. Journal of Serbian Society for Computational Mechanics, 2007, 1(1): 87-98.

(编辑 苏卫国)

(编辑 张 洋)

作者简介: 陈 科, 男, 1965 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为现代设计理论和方法、并行设计、机械 CAD/CAM、数字化设计与制造。发表论文 80 余篇。徐书成(通信作者), 男, 1987 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院硕士研究生。殷 磊, 男, 1985 年生。合肥工业大学机械与汽车工程学院博士研究生。

作者简介: 石易坤, 男, 1984 年生。西南石油大学机电工程学院博士研究生。主要研究方向为螺杆钻具工作力学行为分析。杨启明, 男, 1948 年生。西南石油大学机电工程学院教授、博士研究生导师。祝敬华(通信作者), 男, 1978 年生。西南石油大学机电工程学院教授、博士。童 华, 女, 1979 年生。西南石油大学机电工程学院博士研究生。