

烘烤工况下 ITER 中子屏蔽螺栓预紧力研究

郑红梅¹, 王成锋¹, 刘素梅², 冯昌乐²

(1 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2 中科院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要:国际热核实验反应堆 ITER 计划是一项大型国际研究合作项目。中子屏蔽组件位于真空室内、外壳之间,其作用是屏蔽中子流、降低环向磁场波纹度。文中以中子屏蔽组件为研究对象,研究在烘烤温度下预紧力对其力学性能的影响。运用 ANSYS 软件对中子屏蔽组件进行非线性有限元计算,对比分析了在不同预紧力下螺栓的变形和结构的应力响应。研究表明,为了增强连接的紧密性,在保证结构完整性和螺栓强度的前提下充分利用螺栓的预紧力,应将预紧力产生的预紧应力控制在材料屈服应力的 60% 左右。

关键词:中子屏蔽;螺栓;预紧力烘烤

Study on in-wall shielding blocks of ITER in the baking conditions

Zheng Hongmei¹, Wang Chengfeng¹, Liu Sumei², Feng Changle²

(1. Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) is a larger international cooperation project. The IWS (In-wall shielding) blocks of ITER were located between the inner shell and outer shell of vacuum vessel (VV) with the function of providing neutron shielding and reducing toroidal magnetic field percent ripple. Taking in-wall shielding blocks as the object, this paper studied the impact of the pre-tightening force on its mechanical property under the baking temperature. The nonlinear finite element calculation of the IWS blocks was done by ANSYS. The bolt deformation and stress response of the structure were analyzed based on the comparison between different bolt pre-tightening forces. The study shows that in order to increase tightness of connection and take full use of the pre-tightening force of bolts with the prerequisite of ensuring structural integrity and the bolt intensity, the pre-applied stress caused by the pre-tightening force should be controlled around 60% of the yield stress of the material.

Keywords: In-wall shielding blocks, Bolt, Pre-tightening force, Baking

1 前言

ITER(国际热核聚变反应堆)是一项国际研究,其目的是展示聚变能发电在科学和技术上的可行性。ITER 真空室是该实验反应堆主体结构之一,为双层不锈钢高真空组件组成的 360° 环形结构系统,其中包含 9 个 40° 扇形结构^[1]。真空室的主要功能是为等离子体提供一个高真空环境和主要的限制边界^[2]。真空室双层壳体之间填充的所有屏蔽插件以及相关的支撑结构组成的环形空间结构体称为中子屏蔽^[3],其主要作用是用来屏蔽核聚变反应过程中产生的中子辐射,中子屏蔽组件(以下称组件)是中子屏蔽结构的基础

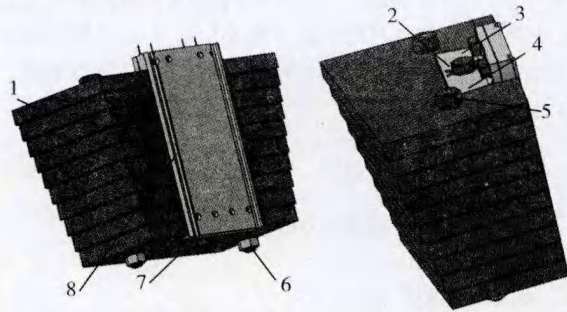
部件^[4]。屏蔽组件的结构如图 1 所示,屏蔽组件由目不等的屏蔽板组成,屏蔽板通过 M30 的螺栓(以下称螺栓)和垫片连接在一起,并用 M20 螺钉(以下称螺钉)和托架固定在筋板上。根据中子屏蔽组件装配实际情况,屏蔽板将通过 M30 螺栓和垫片预先装配在一起,屏蔽板受到螺栓预紧力的作用。预紧是为了增强联接的可靠性和紧密性^[5],以防止受载后屏蔽板间出现缝隙或相对滑移。为了排除真空室内的杂质和气体,需在真空室内部进行 200℃ 的升温烘烤^[6]。烘烤是从 20℃ 的室温逐渐加热到 200℃,该过程中,预紧力作用下的屏蔽块受烘烤温度的影响产生热应力,而热应力过大会使结构发生塑性变形或断裂^[7]。组

收稿日期:2012-12-27

基金项目:国际科技合作重点项目计划“ITER 真空室中子屏蔽结构设计与分析及工程图制作(4200000119)”。

作者简介:郑红梅(1966-),女,教授,博士,主要研究方向:机械设计与产品开发、传感器及测试技术。

件中螺栓和被连接件选用两种不同的材料,由于螺栓材料的热膨胀系数小于被连接件材料,在升温过程中将产生较大的附加应力^[8]。因此为了保证连接所需的预紧力而又不使螺栓连接过载,在装配时要控制预紧力。本文研究了烘烤工况下螺栓预紧力对结构强度的影响,从而为预紧力的确定提供依据。



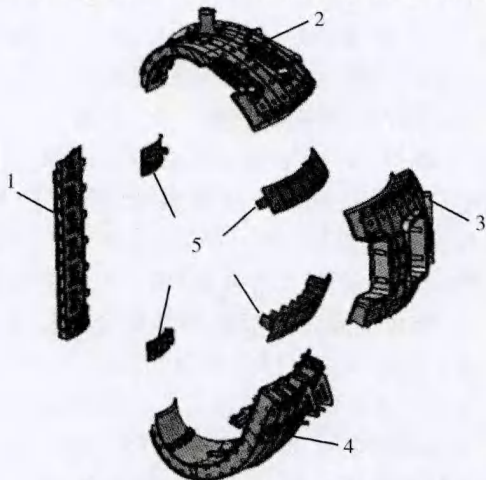
1. 屏蔽板;2. 中间螺栓;3. M20 螺钉;4. 上托架;5. 提升螺栓;6. 螺母;7. 下托架;8. 筋板

图1 屏蔽组件的结构

Fig. 1 The structure of IWS

2 螺栓的结构设计

如图2所示,ITER 真空室的每一个40°的扇区分为4个PS段和一个接缝区,其中PS₁为in-board区域,PS₂、PS₃和PS₄为outboard区域。屏蔽组件所处的位置中子通量密度较低,因此可以



1. PS₁;2. PS₂;3. PS₃;4. PS₄;5. 接缝区

图2 一个屏蔽扇区的结构

Fig. 2 The structure of one shielded sector

用螺栓来连接屏蔽板。在中子屏蔽组件中,M30螺栓有两种类型:中间螺栓和两侧的提升螺栓。

中子屏蔽处在一个真空环境中,为了在装配时排出装配体中的空气,在螺栓上开有排气槽。考虑到运输和装配,在两侧的提升螺栓头部加工有螺纹孔,工具通过两个螺纹孔来提升组件。在in-board区域,受到空间的限制,两侧提升螺栓的螺栓头高19mm,上面加工有10mm深的M20螺纹孔;在outboard区域,螺栓头高29mm,上面加工有20mm深的M24螺纹孔。螺栓的长度根据组件所处的位置来确定。螺栓所采用的材料是氮强化高猛奥氏体不锈钢XM19,该材料在高温环境中具有非常好的机械性能^[9]。

3 螺栓预紧力的计算

根据磁体结构设计标准^[10],在室温下,初始预应力应满足:

$$S_{as} \leq 1.5 S_{m2} \quad (1)$$

其中, $S_{m2} = 0.5 S_y^{RT}$; $S_{as} = \sqrt{(S_m + S_b)^2 + 4 \times S_T^2}$;
 $S_m = \frac{F_p}{A}$; $S_b = \frac{M_b}{I} \times \frac{d}{2}$; $S_T = \frac{M_T}{W_T}$; $M_T = F_p \times d \times K_f$;
 S_{as} :初始预应力; S_{m2} :装配温度下的极限应力;
 S_y^{RT} :室温下的屈服应力; S_m :薄膜应力; S_b :弯曲应力; M_b :弯矩; S_T :扭转切应力; M_T :扭矩; W_T :扭转截面系数; F_p :预紧力; d :螺栓公称直径。

由于结构所受的弯矩作用很小,可以忽略不计,因此假设 $M_b = 0$ 。由以上公式可得:

$$F_p \leq \frac{0.75 \pi d^2 S_y^{RT}}{4 \sqrt{1 + 64 K_f^2}} \quad (2)$$

其中, K_f 为经验值,在0.12到0.15之间取值,本文取0.14。在室温下,XM19的屈服应力为380MPa。由式(2)可计算出最大的预紧力为134100N。

4 有限元模型的建立与分析

4.1 实体模型的建立

为了缩小求解规模,在不影响计算精度的前提下,对模型进行合理的简化:

(1)在ANSYS中建立接触分析有限元模型,由于只需考虑结合面的接触情况,为节省计算时间,建模时忽略对分析结果影响不大的螺纹结构。

(2)忽略屏蔽组件中分布着的键槽、倒角、垫片及螺栓联接孔等各种局部小结构。

4.2 材料属性

模型由三种材料组成,屏蔽板的材料为

SS304B4,上、下托架和筋板的材料为 SS316L(N) - 1G, M30 螺栓、M20 螺钉、螺母和垫片材料为 XM19。材料的属性见表 1。

表 1 三种材料在不同温度下的属性

Tab. 1 Physical parameters of 316L(N) - 1G, SS304B4, XM19

	SS316L(N) - 1G			SS304B4			XM19		
温度/℃	20	110	200	20	110	200	20	110	200
弹性模量 E/GPa	200	193	185	199	196	180	195	190	183
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	7930	7919	7858	7820	7788	7746	7880	7880	7880
泊松比	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
摩擦系数 μ	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
热膨胀系数 α/K^{-1}	15.3	15.9	16.6	16.6	17.0	17.5	14.72	15.42	16.05
	e-6	e-6	e-9	e-9	e-9	e-6	e-6	e-6	e-6

4.3 网格划分

有限元模型的网格划分采用有 20 节点的 solid186 单元,该单元每个节点有 X、Y 和 Z 三个方向的自由度。为了反映结构的真实连接情况,在主要结构件之间的接触面上设置了接触对。托架和屏蔽板、螺栓和止动垫片、托架和筋板的接触面定义为有摩擦接触,摩擦系数为 0.25。螺钉和筋板、螺栓和螺母、螺栓和下托架的接触面定义为绑定接触。接触单元和目标单元选用面接触的 contal174 单元和 targel170 单元。划分网格后得到的有限元模型如图 3 所示。整个模型共有 63597 个单元,310714 个节点。

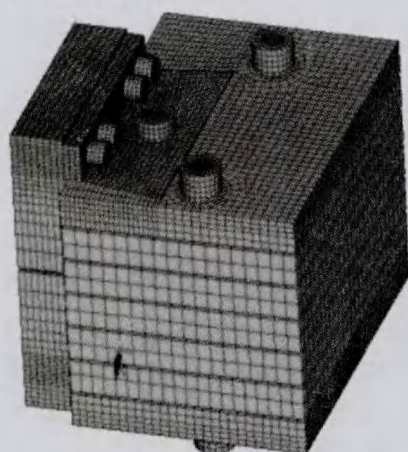


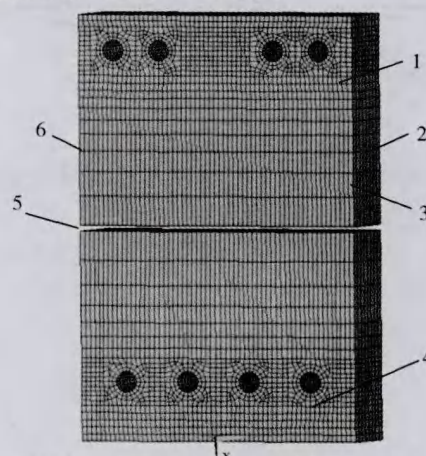
图 3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

4.4 边界条件

屏蔽组件在装入真空室之前先进行预装配,将两侧的提升螺栓和屏蔽块组装在一起。在真空

室中用螺钉将上下托架固定在筋板上。为了反映真实情况,应该避免 M30 螺栓的预紧力在 M20 螺钉上产生附加弯矩。把筋板分成两半,先计算预紧力单独作用时产生的 X 方向的位移。模型加载图 4 所示的边界条件,在螺栓中用预紧力单元模拟预紧力的作用,求解后得到上筋板下表面所有节点 X 方向的平均位移。将此平均位移加载到上筋板下表面所有节点的 X 方向。分析所用的边界条件,即为图 4 所示的边界条件加上预紧力单独作用产生的平均位移。



1. 上筋板;2. 侧面 $UZ=0$;3. 侧边 $UY=0$;4. 下筋板;
5. 上表面 $UX=0$;6. 侧边 $UY=0$

图 4 边界条件

Fig. 4 Boundary conditions

4.5 工作载荷

屏蔽组件在烘烤工况下的载荷有:(1)重力;(2)M30 螺栓和 M20 螺钉的预紧力;(3)200℃ 的温度载荷(环境温度为 20℃)。

本文主要研究的是 M30 螺栓的预紧力对结构的影响,因此 M20 螺钉的预紧力给一设定值。为了对比分析不同预紧力对屏蔽组件力学性能的影响,选择预紧力 0N、25975N、51950N、77925N、103900N、111450N、119000N、126550N 和 134100N 分别加载求解。

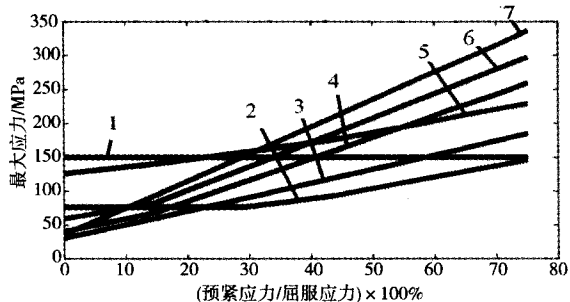
5 计算结果分析

表 2 不同预紧力下螺栓的最大应力

Tab. 2 Maximum stress under different pre-tightening forces

预紧力/N	0	25975	51950	77925	103900	111450	119000	126550	134100
螺栓最大应力/MPa	36	93	151	209	268	284	301	318	336
最大伸长量/mm	1.287	1.282	1.278	1.274	1.277	1.287	1.299	1.310	1.322

分析图 5 可知,预紧力是影响屏蔽组件应力的主要因素之一,屏蔽组件各结构件的最大应力随着预紧力的增加而增加。预紧力对螺栓和下托架的影响最大,与螺栓和下托架的最大应力呈线性递增关系。因此,应该合理地选择螺栓的预紧力,避免螺栓和下托架的最大应力超过许用应力。



1. M20 螺钉; 2. 上托架; 3. 屏蔽板; 4. 止动垫圈; 5. 垫片; 6. 下托架; 7. M30 螺栓

图 5 螺栓预紧力与各结构件最大应力关系曲线

Fig. 5 The curve of the pre-tightening force and the maximum stress

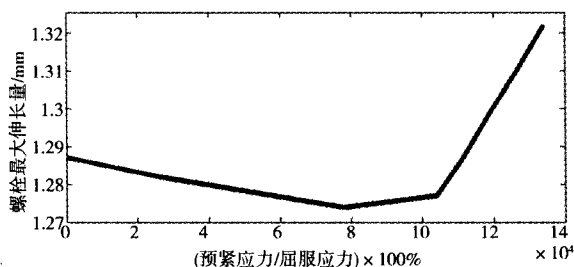


图 6 螺栓预紧力与螺栓最大伸长量关系曲线

Fig. 6 The curve of the pre-tightening force and bolt maximum elongation

随着预紧力的逐渐增大, M20 螺钉的最大应力变

不同预紧力下螺栓最大应力以及螺栓最大伸长量如表 2 所示。将不同预紧力下,螺栓预紧力和屏蔽组件各结构件最大应力的关系进行拟合,螺栓预紧力和螺栓最大伸长量的关系进行拟合。把螺栓预紧力换算为预紧应力,并和 20℃ 下 M30 螺栓材料屈服应力进行对比,图 5 为该比值和各结构件的最大应力的关系曲线,图 6 为该比值与螺栓最大伸长量的关系曲线。

化很小,说明螺栓预紧力没有在螺钉上产生附加弯矩,边界条件的加载符合真实情况。由图 6 可知,没有预紧力时,螺栓在热载荷和重力的影响下发生变形。当预紧应力小于屈服应力的 45% 时,螺母尚未拧紧,螺栓由于受到预紧力的作用而抵消了部分因重力和热应力作用引起的变形。当预紧应力大于屈服应力的 45% 时,螺母开始拧紧,螺栓在预紧力的作用下变形。当预紧应力大于屈服应力的 60% 时,由于预紧力过大,螺栓的伸长量急剧增加。因此,为保证屏蔽组件结构的完整性,充分利用螺栓预紧力,应该将预紧应力控制在螺栓材料屈服应力的 60% 左右。根据 ASME 评定准则,由图 5 可知,当预紧应力为材料屈服应力的 60% 时,屏蔽组件各结构件的最大应力强度均在许用应力允许范围之内,结构满足受力要求。

6 结束语

本文以屏蔽组件为研究对象,应用 ANSYS 软件对中子屏蔽组件进行非线性有限元计算。通过计算烘烤工况下一系列不同预紧力,得到了预紧力与各结构件最大应力、预紧力与螺栓最大变形之间的关系曲线,为屏蔽组件装配时预紧力的控制提供了可靠的参考依据。通过分析,得到以下结论:

(1) 螺栓预紧力是影响屏蔽组件应力的主要因素之一,螺栓和下托架受预紧力的影响最大,为保证结构不被破坏,应该控制预紧力的大小。

(下转 68 页)

表3 设计工况下不同蒸发温度制冷系统性能分析

Tab.3 Refrigeration system performance analysis under two different evaporating temperature

蒸发温度/℃	压缩机耗功/(kJ/kg)	制冷量/(kJ/kg)	制冷系数 ε	蒸发器焓损/(kJ/kg)
2	28.50	142.71	5.02	8.49
3.5	26.75	144.46	5.40	7.36

5 小结

比较本变蒸发温度冷水机组系统与传统冷水机组系统,本系统的优势在于:

(1)蒸发器的蒸发温度与机组出水温度分离,制冷剂在不同的温度下周期性地变温蒸发,因而提高了机组的平均蒸发温度,提高了系统制冷效率。假定冷凝温度都为40℃,蒸发器最终出水温度都为7℃,冷水机组进出口水温差都为5℃时。本系统在理论上,一般可提高冷水机组制冷效率6%左右,且机组进出口水温温差越大节能效果越显著。

(2)可高效地产生更低温度的冷水,减缓了冷水机组出口水温下降而引起的效率降低,提高机组的综合能效比。大温差供回水有利于中央空调系统高效地实现空调负荷的分质处理,提高系

统除湿效率和运行输送效率。

(3)蒸发器制冷水过程与空调末端供回水过程分离,在蒸发器内水流量稳定不变的前提下,可方便地实现变流量供水。

为保证整个系统能够高效稳定运行,本变蒸发温度冷水机组系统采用一套PLC控制系统,实现启停、蒸发温度控制、各四通换向阀切换等功能的自动化,并能够自动检测参数,实时控制,其系统自动化控制有待进一步研究及优化。

参考文献

- [1] 陈育平,周根明. 变温热源制冷系统熵分析研究[J]. 华东船舶工业学院学报, 2002,16(6).
- [2] 曾冬琪. 定环境温度下冷库的氨蒸气压缩制冷系统的焓分析[J]. 制冷, 2008,27(4).
- [3] 沈维道,蒋智敏,童钧耕. 工程热力学(第三版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [4] 张进贤,黄虎,黄芳,等. 变蒸发温度下压缩机冷凝机组的性能实验研究[J]. 南京师范大学学报, 2011, 11(2).
- [5] 苏跃红,葛新石. 变温热源劳伦兹循环节能潜力的定量分析[J]. 低温工程, 1996(3):46-48.
- [6] 热力系统的熵分析[J]. 华侨大学学报自然科学版, 1993,14(10):14.
- [7] 核聚变与等离子体物理, 2005,25(2):99-104.
- [8] 刘常乐,武松涛,郁杰. 基于模块化设计的ITER真空室中子屏蔽结构组件数字化[J]. 机械设计与制造, 2008(2):49-51.
- [9] 李会勋,胡迎春,张建中. 利用ANSYS模拟螺栓预紧力的研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2006,25(1):57-59.
- [10] 王开松,冯昌乐,徐杨,等. 烘烤工况下的ITER中子屏蔽块整体结构分析[J]. 真空科学与技术学报, 2012,32(2):128-131.
- [11] Hao J, et al. Thermal-structural analysis for ITER in-wall shielding block, Fusion Eng. Des., doi:10.1016/j.fusengdes, 2012(2):113.
- [12] 张可丰,谢永诚,梁星筠,等. 异种材料典型螺纹联接件在预紧和热循环条件下的力学行为[J]. 原子能科学技术, 2008,42(增刊):715-720.
- [13] 邵珠振,等. ITER中子屏蔽结构的设计与分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2011,31(4):350-355.
- [14] ITER I O. Magnet Structural Design Criteria Part 3 [R]. ITER design Documents, 2012.
- [15] 刘常乐,武松涛,郁杰. ITER真空室中子屏蔽组件的结构动力学有限元分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2009,29(2):142-145.
- [16] Utin Yu, Chuyanov V, Elio F, et al. Design progress of the ITER vacuum vessel and ports[J]. Fusion Engineering and Design, 2005,75-79:571-575.
- [17] 刘常乐,武松涛,等. ITER真空室中子屏蔽设计[J].

(上接86页)

(2)随着预紧力的逐渐增大,M20螺钉的最大应力变化很小,说明螺栓预紧力没有在螺钉上产生附加弯矩,边界条件的加载符合真实情况。

(3)当预紧应力大于屈服应力的45%时,螺母开始拧紧,预紧应力大于屈服应力的60%时,螺栓变形和应力较大。因此为了充分利用预紧力的作用,保证屏蔽组件结构螺栓连接的紧密性,预装配时应将预紧力产生的预紧应力控制在材料屈服极限的60%左右。

参考文献