

ITER 真空室中子屏蔽组件的热—静力学有限元分析*

THERMO-STATIC FEM ANALYSIS FOR NEUTRON SHIELDING COMPONENT OF ITER VACUUM VESSEL

刘常乐** 郁杰 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

LIU ChangLe YU Jie WU SongTao

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

摘要 根据 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)真空室中子屏蔽组件的设计概念和结构特点,应用有限元分析软件 ANSYS 对结构组件进行静力学分析和热—结构耦合分析。有限元计算结果表明,等离子体中心破灭事件(central disruption 27msec—CD27ms)下的巨大瞬间电磁载荷对其产生的应力与变形远小于真空室温度环境造成的应力影响,尤其在接触应力计算上表现最为明显。因此,根据强度分析的结果重新对中子屏蔽组件的结构方案进行修改,分析结果表明改进后的结构更加合理。

关键词 ITER 真空室 CD27ms 中子屏蔽组件 结构分析 有限元方法

中图分类号 TL626 TH123.3

Abstract Neutron shielding components design concept and structure features of ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor) vacuum vessel were briefly introduced. Static and thermo-structure coupling analyses were performed based on FEM(finite element method) software ANSYS, respectively. The calculation results show that the level of the stresses induced by electronic-magnetic loads is much less than that induced by thermal environment of the vacuum vessel, especially in the case of the contact stress calculation. A new improved structure scheme has been put forward according to the analysis results, and it seems the improve structure is more reasonable.

Key words ITER vacuum vessel; CD27ms; Neutron shielding component; Structure analysis; Finite element method

Corresponding author: LIU ChangLe, E-mail: liuchangle@ipp.ac.cn, Tel: +86-551-5593269

The project supported by the National 973 Program—the Key Program of International Technological Cooperation (No. 2004CB720704).

Manuscript received 20050422, in revised form 20050624.

1 引言

国际热核聚变反应堆计划 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)是目前正在进行的国际合作项目。它的目的是为了人类进一步验证和平、安全利用核能提供一个坚实的技术平台^[1]。ITER 真空室结构为一个环形、双层不锈钢高真空组件组成的一个 360°环形结构系统。在双层壳体之间 60%的空间里填充了大量结构相似的中子屏蔽组件,组成真空室中子屏蔽结构,其总重量约 1 733 吨。中子屏蔽组件是 ITER 真空室屏蔽结构的基础部件,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辐射。以一个组件平均 50 kg 计算,整个屏蔽结构约由 34 660 个基本组件组装而成。中子屏蔽组件除了受到

自身重力的作用外,还要经受 CD27ms(central disruption 27msec)事件,即堆芯等离子体破灭事件。此时真空室等离子体电流在 27 毫秒内从 15 mA 下降到零,并产生涡流^[2]。由涡流引起的电磁载荷会对真空室及其部件产生很大冲击。另外,当前热接触问题的研究已涉及到材料表面特性、温度、受载环境等多种因素,使问题的分析呈现耦合特性^[3]。根据中子屏蔽组件的结构及安装特点,屏蔽单元与垫圈、支撑筋板之间都将有不同范围的接触,且处于真空室特殊的工况环境下,因此计算热接触问题显得十分重要。下面结合中子屏蔽组件的设计概念,在 CD27ms 下静力学分析的基础上,结合温度环境下结构的强度性能进行深入的分析研究,并根据有限元(finite element method, FEM)计算结果对组件结构提出更为合理的改进模型。

* 20050422 收到初稿,20050624 收到修改稿。国家 973 项目—国际科技合作项目计划资助(2004CB720704)。

** 刘常乐,男,1972 年 8 月生,安徽合肥人,汉族。中国科学院等离子体物理研究所博士研究生,主要研究方向为核聚变装置设计与分析,CAD/CAM 应用研究。通信地址:安徽省合肥市 1126 邮政信箱,中科院等离子体物理研究所 1 室。

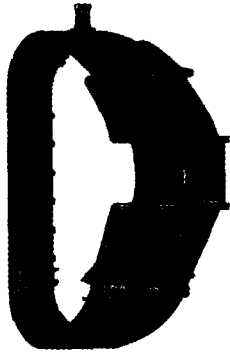


图 1 ITER 真空室 40°扇形模型

Fig.1 40° fan-shaped model of ITER vacuum vessel

2 中子屏蔽组件有限元计算

2.1 中子屏蔽组件有限元模型的建立

根据 ITER 真空室屏蔽结构的设计概念,中子屏蔽组件由数目不等的屏蔽单元通过联接螺柱、托架、垫圈等附件组装而成。屏蔽单元组件通过两个 M30 的安装螺钉安装在极向支撑上。最外侧屏蔽单元侧面与极向支撑相贴合,其余屏蔽单元侧面与极向支撑一侧面相距 5 mm。每个屏蔽单元的基本尺寸为 40 mm × 150 mm × 300 mm,数目 3 ~ 10 不等,且不同区域的中子屏蔽单元形态稍有差异,但基本结构相似。图 2 为两个中子屏蔽组件安装截面示意图。

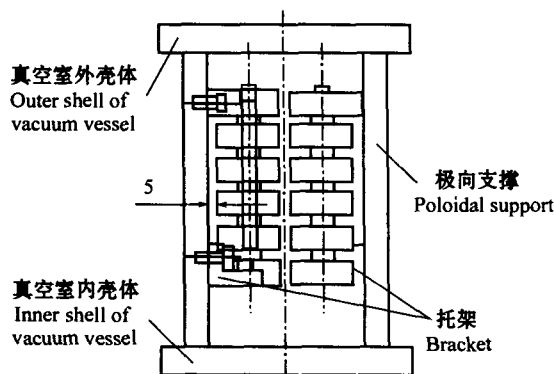


图 2 屏蔽组件安装截面示意图

Fig.2 Section sketch of the shielding components of installation

选取真空室内侧屏蔽结构区域一个典型的中子屏蔽组件进行计算分析。根据中子屏蔽组件的结构特点,在不影响其本身强度、刚度和计算精度的前提下将模型简化,利用有限元 modeling 方法建立中子屏蔽组件的有限元分析模型。

1)屏蔽组件材料属性^[4] 屏蔽单元,SS304B7,密度 7 709 kg/m³,弹性模量 190 GPa,泊松比 0.3,热膨胀系数 $16.52 \times 10^{-6} 1/K$,热传导率 15.5 W/(m·K)。螺钉、垫圈和极向支撑,SS316L(N) - IG,密度 7 932 kg/m³,弹性模量 186 GPa,泊松比 0.3,热膨胀系数 $16.4 \times 10^{-6} 1/K$,热传导率 15.08 W/(m·K)。摩擦接触

因数 0.15。

2)网格划分 有限元模型的网格划分采用有 8 个节点的四面体单元 solid 45。根据屏蔽组件的结构特点,最外侧屏蔽单元通过螺钉安装在支撑筋板上,且材料不同,为面一面接触,形成接触对。另外形成接触对的地方还有屏蔽单元和垫圈之间的贴合面。接触单元采用 contact173 单元,该接触单元为 4 节点的低阶四边形单元,适用于不带有中间节点的 3-D 实体单元表面。

为了计算方便且精度影响不大的情况下,网格划分方式采用 Smartsize 方式,精度等级为 6 级。安装螺钉、屏蔽单元之间的垫圈处网格划分较密,符合该处应力较集中的特点。静力学有限元计算模型共有节点 8 038 个,体单元 36 326 个。

3)静力学边界条件及载荷工况

①约束条件 最外侧屏蔽单元侧面、托架侧面 X 方向端面位移 $u_x = 0$;对两个安装螺钉处,a 最外侧屏蔽单元处,全约束 20 mm 伸出端圆周面;b 托架处,全约束离开托架侧面伸出长 20 mm 圆周面。

②载荷工况 重力 + 电磁力 (CD27ms)。其中电磁力,X 方向 - 825 kN,Y 方向 5 740 kN,Z 方向 414 kN。

2.2 应力分布计算

图 3 为静力学情况下应力与位移分布图。由静力学结果知,中子屏蔽组件最大 von Mises 应力 16.3 MPa,YZ 方向的最大剪切力为 6.83 MPa,最大变形量为 0.007 36 mm。最大应力值出现在螺钉根部。屏蔽单元与垫圈之间的最大接触应力为 9.01 MPa,XY 面最大剪切应力 1.29 MPa。静载荷条件下 SS316 最大许用应力 $[\sigma] = 147 \text{ MPa}$, $[\tau] = 73 \text{ MPa}$,所以静力学的结果符合设计标准。

2.3 热应力分析

2.3.1 热—结构耦合有限元模型

热—结构耦合的约束条件对于实体单元模型一般很难加载,因为既要约束固定端,又要任其自由膨胀或者收缩,因此考虑采用近似的约束方法对模型进行约束。由于最外侧屏蔽单元侧面与支撑筋板相贴合形成接触对,都会造成热应力的集中,因此可考虑将中子屏蔽组件安装到极向支撑上,让安装螺钉和极向支撑同时自由伸缩,由此建立热—结构有限元分析模型。图 4 所示为热—结构 FEM 分析模型及由接触单元形成的接触对。其中热实体单元选择 8 节点 solid70 进行网格划分,划分方式采用 Smartsize 自由方式,精度等级为 6 级。接触单元仍选择 contact73。中子屏蔽组件节点数 7 056,体单元 30 309。整个有限元模型节点数目 8 543,体单元数 36 668。

2.3.2 边界条件及载荷工况

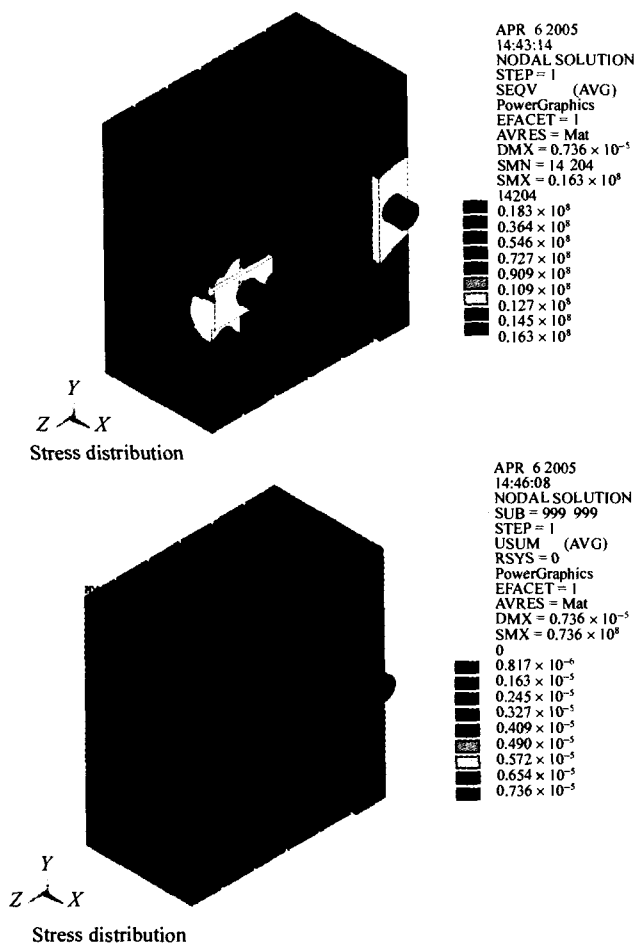


图 3 静力学等效应力和位移云图

Fig.3 Von Mises stresses and displacement distribution by static analysis

针对该热—结构有限元模型,采用约束支撑筋板 X 坐标方向的 4 个边线,这样整个有限单元体可以基本随温度自由膨胀,从而确保温度对应力与变形的充分影响。中子屏蔽组件所处的工况条件为,重力 + 电磁力 + 热载荷。

2.3.3 有限元计算

热—结构耦合应用间接法分析,先进行热分析,然后将求得的节点温度作为体载荷施加到结构应力分析中。在计算结果出来后,删除筋板的应力分布,保留中子屏蔽组件的应力分布和变形结果。其计算结果基本体现了温度载荷和结构静载荷条件耦合对中子屏蔽组件结构应力与变形的影响。

由热—结构耦合有限元分析结果知,最大热应力 286 MPa,出现在屏蔽单元与支撑筋板的接触面上。YZ 平面最大剪切应力 73.6 MPa,两个安装螺钉以及托架处的应力分布范围在 63.5 MPa ~ 191 MPa 之间,组件热膨胀最大变形为 0.395 mm。热载荷下屏蔽单元与垫圈之间的最大等效应力 131 MPa,XY 面的最大剪切应力为 14.7 MPa。等效应力与剪切应力最大值处靠近最外侧屏蔽单元处。图 5 为其应力与位移云图。

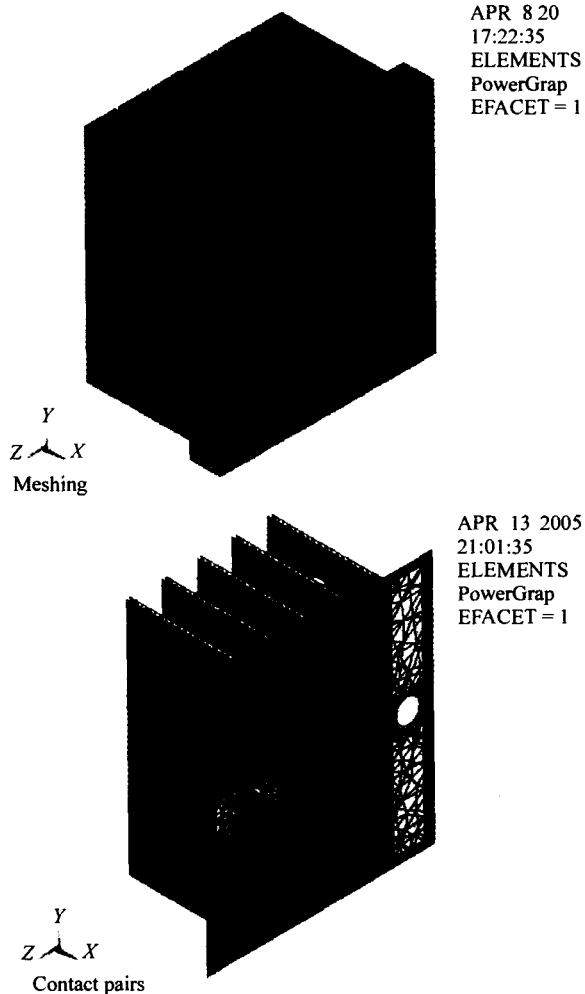


图 4 热—结构有限元分析模型及组件与支撑筋板、垫圈之间形成的接触对

Fig.4 Thermal-structure FEM and its contact pairs between the component and the support rib and spacers

根据 ITER 真空室屏蔽结构的强度设计准则^[5],对于 II 类载荷条件(重力、CD27ms 事件及温度载荷),屏蔽单元、支撑筋板和托架,等效应力 $< 2S_y$, S_y 为屈服强度,373 K 时 SS304B7 的 $S_y = 194\text{MPa}$, $2S_y = 388\text{MPa}$; SS316L 的 $S_y = 172\text{MPa}$, $2S_y = 344\text{MPa}$ 。

对于螺钉,等效应力 $< 3S_m$, S_m 为材料的薄膜应力强度,373 K 时 SS316L 的 $S_m = 147\text{MPa}$, $3S_m = 441\text{MPa}$ 。

因此,上述应力计算结果基本符合设计标准。

3 结果分析与结构的改进

中子屏蔽组件的有限元分析结果表明,CD27ms 事件下的瞬间电磁载荷对中子屏蔽组件的冲击仍然有限,而温度载荷则对结构的应力与变形影响很大。热载荷条件下安装螺钉处最大应力是静载荷条件的 17 倍左右,垫圈与屏蔽单元之间的接触应力也成倍增长,达到 131 MPa。这对垫圈的强度也提出了很高的要求。

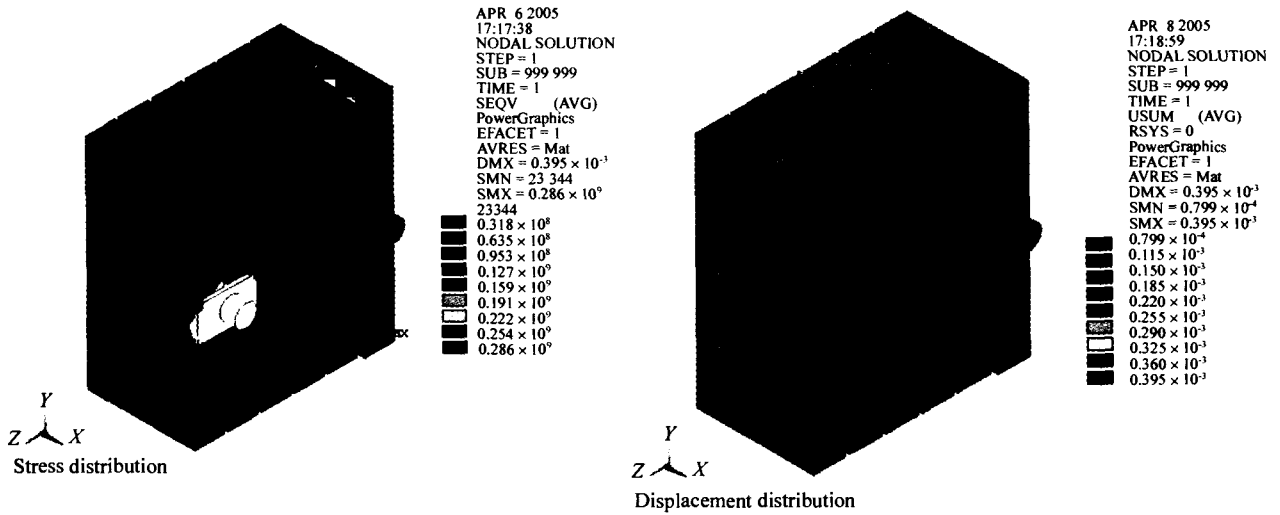


图 5 等效应力分布和位移云图

Fig.5 Von Mises stresses and displacement distribution

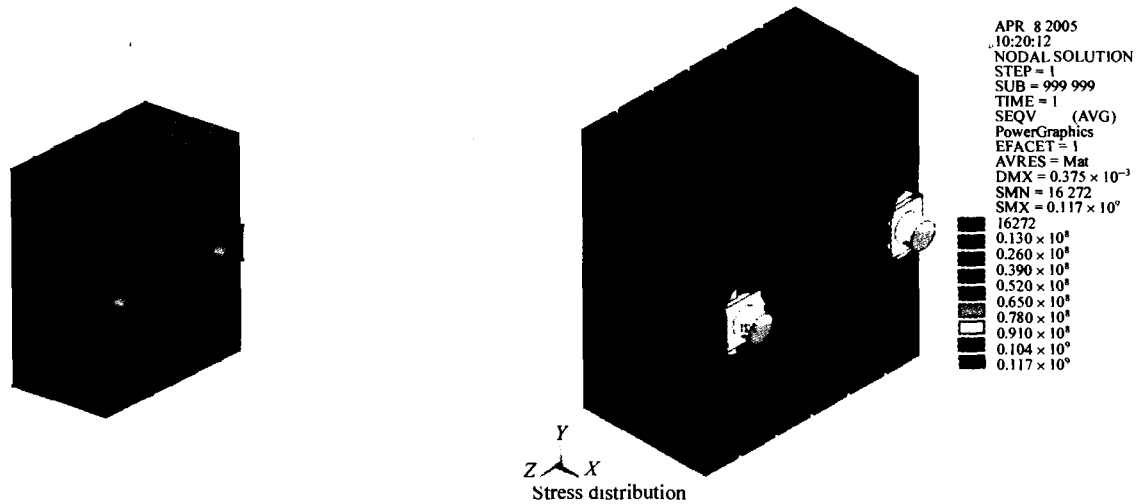


图 6 改进后的组件结构模型和热应力云图

Fig.6 Improved model and its von Mises stress distribution

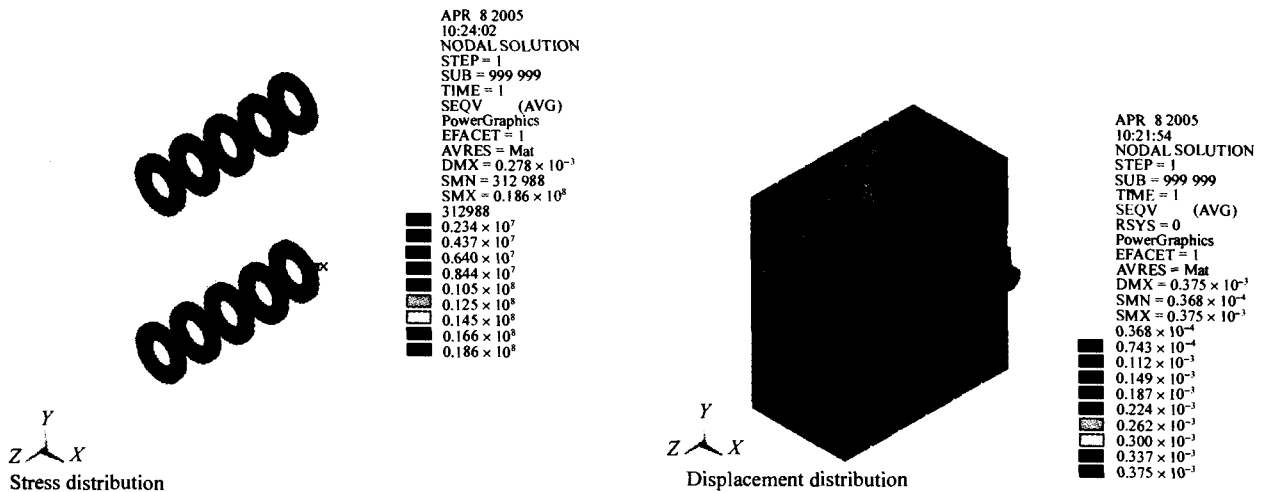


图 7 改进后的垫圈等效热应力和组件位移云图

Fig.7 Von Mises thermal stresses of spacers and displacement distribution of component in the improved structure

另外从热—结构耦合分析的结果看,温度载荷不仅造成屏蔽单元与垫圈之间产生较大的接触应力,还

造成屏蔽单元与支撑筋板之间也产生较大的接触应力,最高已达到286MPa。由于极向支撑筋板的两侧

表 1 改进结构的有限元分析结果

Tab.1 FEA results of the improved structure

位置 Location	静力学结果 Results of static analysis			热—结构耦合结果 Results of thermal- structure analysis		
	等效应力 剪切 Von Misses 应力		位移/mm Displacement	等效应力 剪切 Von Misses 应力		位移/mm Displacement
	stress/MPa	MPa		stress/MPa	MPa	
安装接触面 Contact surface of installation	25.3	6.52/ YZ	0.0156	117	20.3/ YZ	0.375
垫圈 Spacers	7.07	0.94/ XY	0.0119	18.6	1.49/ XY	0.278

都将安装中子屏蔽组件,真空室内侧屏蔽区域的一个长极向支撑左右两侧将要安装近 80 多个中子屏蔽组件,所以每一个中子屏蔽组件对支撑筋板产生的接触应力应该尽量小为宜。因此,可以考虑对中子屏蔽组件的具体结构进行进一步的修改。图 6 左图为结构修改后的模型,即最外侧屏蔽单元的侧面没有与支撑筋板完全接触,而是通过一个安装凸台与支撑筋板面贴合(为了制造方便,可以做一个 5 mm 的垫片替代凸台)。表 1 显示其有限元分析的结果。其中静力学结果与前者相比变化不大,且符合设计准则;热—结构耦合分析结果优于前者,其中屏蔽单元与支撑筋板之间的最大接触应力下降了约 60%。另外,垫圈与屏蔽单元之间的接触应力也下降近 8 倍多,且大小分布比较均匀。改进后的结构较前者有较高的对称性,膨胀变形较为均匀。由此可见,改进后的结构更加符合设计

要求。图 6、7 显示改进后热—结构的耦合结果。

4 结论

1) 中子屏蔽组件的强度性能满足 CD27ms 事件下的瞬间电磁载荷冲击的要求。

2) 环境温度对结构的接触应力提升很快。这一点对中子屏蔽组件及支撑结构的材料强度性能都提出了更高的要求。

3) 中子屏蔽组件的结构形式在满足刚度条件及抗震性要求的情况下,应该尽量确保屏蔽单元的侧面不与支撑筋板全接触,避免造成接触应力过大对材料的强度性能产生不利的影响。

参考文献 (References)

- 1 Aymer R. Status of ITER. *Fusion Engineering and Design*, 2002, 61-62:5-12.
- 2 Spears W. Design description document 1.5 vacuum vessel. ITER G 15 DDD 4 01-06-25 R0.1, 2001. 194.
- 3 张洪武,廖爱华,张 昭.具有界面热阻的接触传热耦合问题的数值模拟. *机械强度*, 2004, 26(4):393-394.
ZHANG HongWu, LIAO AiHua, ZHANG Zhao. Numerical simulation for heat transfer and contact problems with a thermal-resistant constitutive model. *Journal of Mechanical Strength*, 2004, 26(4):393-394 (In Chinese).
- 4 Barabash V. Summary of vacuum vessel materials data for structure analysis. ITER G74 MA 15 04-05-07 R0.1, 2004. 1-36.
- 5 Sannazzaro G. VV Loads and design criteria. ITER G 15 MA 104 04-05-07R0.1, 2004. 23.