

ITER中国实验包层在等离子主破裂下的电磁耦合评估

高椿明¹, 秦臻¹, 陈颜静²

(1. 电子科技大学光电信息学院 成都 610054; 2. 核工业西南物理研究院 成都 610041)

【摘要】应用ANSYS有限元软件模拟了ITER等离子体电流的两种主破裂事故和中国固态实验包层所处的物理环境,研究了电磁瞬态变化对TBM结构设计的影响,并得到了感生涡流以及磁场与涡流相互作用产生的电磁力的变化趋势。同时通过多物理场耦合计算,得到了TBM的结构应力、形变位移以及由于感生涡流引起的焦耳热效应分析。结果表明,等离子体电流的线性和指数衰减在TBM上产生的最大等效应力与温升都符合安全设计要求。此外,敏感性分析表明,改变包层后板的支撑套筒长度可降低最大等效应力,可为包层的安全设计提供参考数据。

关键词 耦合计算; 感生涡流; 电磁安全; 等离子主破裂; 温升; 实验包层模块

中图分类号 O53

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.05.007

Electromagnetic Coupling Evaluations on ITER Chinese TBM under Plasma Major Disruptions

GAO Chun-ming¹, QIN Zhen¹, and CHEN Yan-jing²

(1. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

2. Southwestern Instituted of Physics Chengdu 610041)

Abstract In order to study the influence of electromagnetic (EM) transients on the structural design of test breeder module (TBM), two plasma major disruptions in ITER and the physical environment of Chinese solid breeder TBM for EM field analysis are simulated by ANSYS finite element software. The eddy currents induced by EM transients and the trend of Lorentz forces caused by the interactions of magnetic field and the eddy currents are evaluated. Meanwhile, the structure stress, displacement of deformation, and the Joule heating effect caused by eddy currents on TBM are obtained by coupling calculation of multi-physical field. The results show that the maximum equivalent stresses and the temperature rises produced by the linear and exponent disruption are satisfied with the requirements of safety design. Moreover, the sensitivity analysis indicates that the maximum equivalent stress can be reduced by changing the length of cartridge, which provides reference for safety design of TBM.

Key words coupling calculation; eddy currents; electromagnetic safety; plasma disruption; temperature rise; test breeder module (TBM)

1 电磁分析

氦冷固态陶瓷实验包层模块(helium-cooled ceramic breeder test blanket module, HCCB TBM)是我国在ITER上验证未来聚变堆包层的唯一设计概念,也是被ITER所有参与方认为最有可能在未来DEMO聚变堆包层设计中实现应用的方案^[1-2]。因此对HCCB TBM的广泛研究,其中包括中子学分析、热工水力分析以及为减少结构材料产生的波纹度对HCCB TBM的影响的优化^[3]都推动了其结构的更新设计。如图1所示,更新后的HCCB TBM的结构参数

为670 mm(径向)×484 mm(环向)×1 660 mm(极向),主要由U型第一壁、上(下)盖板、2×6个增殖子模块、加强隔板构成的包层盒和带框架的后板组成,其最大的特点是能方便地通过改变子模块的个数以适应ITER窗口尺寸的变化^[4-5]。

在以托卡马克为代表的磁约束聚变装置中,由于存在各种磁流体的不稳定性,其等离子破裂现象严重,这种严重的事件在等离子体物理中称为大破裂(major disruption, MD)。如果在ITER运行阶段中发生等离子体电流的大破裂,会导致面对等离子体的导体部件产生巨大的感生涡流,而感生涡流与外界

收稿日期: 2012-11-28; 修回日期: 2013-05-16

基金项目: 四川省青年基金人才培养计划(2011JQ0025); 国家自然科学基金(50506006, 61107078)

作者简介: 高椿明(1973-), 男, 博士, 教授, 主要从事光声光热及电磁场仿真方面的研究。

磁场的相互作用产生的电磁力和力矩会带来很大的机械应力, 使得这些部件变形甚至是破裂损坏。本文研究的TBM就是一个放置于ITER真空室内的导体部件, 其结构设计能否克服这种事故带来的电磁载荷的影响, 对于ITER装置的安全运行和TBM实验非常重要, 也是ITER在H-H阶段进行电磁测试的重要内容之一^[6]。因此, 本文基于等离子体的两种主破裂(MD)引起的电磁瞬变事故, 借助ANSYS有限元软件, 对中国HCCB TBM的承载能力做了电磁安全计算评估, 并利用主破裂每一个时刻产生的电磁载荷与耦合计算分析结合, 进一步地从结构耦合分析和热工水力分析的角度全面研究评估HCCB TBM的电磁安全性能。

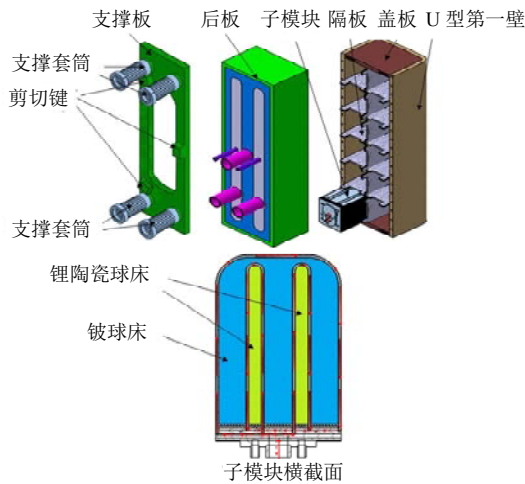


图1 更新的HCCB TBM设计图

由于电磁分析模型中磁场完全由涡流产生, 所以磁场强度可通过毕奥-撒伐尔定律获得:

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\mathbf{l} \times \mathbf{e}_r}{r^2} \quad (1)$$

式中, $d\mathbf{B}$ 为电流元 $Id\mathbf{l}$ 在空间点产生的磁场矢量; μ_0 为真空磁导率; r 为电流元到空间点的距离; \mathbf{e}_r 为电流元的切线方向。

根据叠加原理, 可从式(1)获得磁场分布为:

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_v \frac{\mathbf{J}_s \times \mathbf{r}}{r^3} dv \quad (2)$$

式中, \mathbf{J}_s 是微元体积的电流密度矢量。

最后, 通过对体积求积分得到电磁力为:

$$\mathbf{F} = \int_v (\mathbf{J}_s \times \mathbf{B}) dv \quad (3)$$

1.1 有限元模型、假设条件与边界条件

ITER装置包括18个环向场线圈, 6个极向场线圈, 6个中心螺线管及18个校正场线圈。由于校正场线圈的作用是补偿ITER内部线圈安装误差、制造误差、变形误差以及其他误差引起的磁场分布误差^[7], 对TBM的影响有限, 因此简化模型中没有考虑校正

场线圈。此外, ITER实际用于放置TBM的实验窗口如图2所示, 其中只有PortA、PortB、PortC三个赤道窗口可用, 每个窗口可放置两个TBM, 中国和印度共享PortC窗口。为方便建模计算以及缺乏印方TBM设计资料, 因此假设ITER由9份PortC部分组成的周期对称模型, 且每个窗口均放置CN HCCB TBM, 其具体有限元模型如图3所示, 图3a中的灰色透明部分为空气模型。为保证1/9模型能够耦合周期对称边界条件, 将模型低扇面($\varphi = -20^\circ$)和高扇面($\varphi = 20^\circ$)划分了相同的面网格, 再划分体网格。同时平行磁通量边界条件加载在中心轴(径向和环向为零的轴)上。为了获得精确的分析结果, 无限远边界条件也加载在了模型的外表面^[8]。

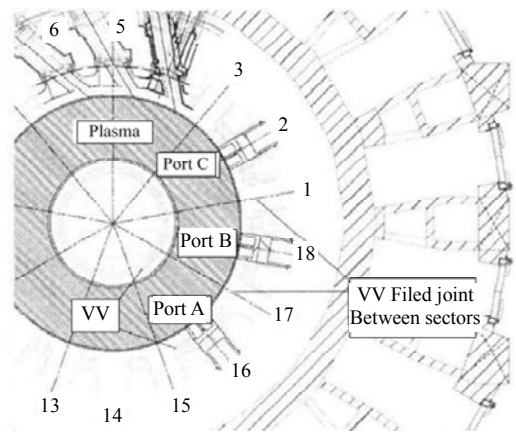


图2 ITER实验窗口图

1.2 网格单元及其划分

本文的有限元模型主要使用solid97单元和无限远infin111单元, 共生成722 902个单元。为减少单元退化造成的计算精度损失, 大多数单元(除部分空气单元)都采用六面体结构。

1.3 涡流、洛伦兹力及力矩

本文研究的等离子体电流主破裂(MD)具有两种衰减形式^[9-10]: 线性衰减和指数衰减。在计算线性衰减时, 共设置了52个子步(步长为1 ms)加载求解, 1~36步是等离子体衰减阶段, 37~52步是研究等离子体衰减到零后感生涡流的变化情况。如图4a所示, 感生涡流随着等离子体的不断衰减而增大, 在等离子体衰减为零时, 总的感生涡流达到最大值(4.73 MA·m⁻²)。在计算指数衰减时, 共设置了40个子步(步长2 ms)加载求解。如图4b所示, 由于指数衰减在前期衰减较快, 感生涡流在18 ms时就达到了最大值(4.56 MA·m⁻²), 而在后期感生涡流不再增加并逐渐下降。在两种形式的衰减中, x 方向的感生涡流密度都较大, 这表明磁场在极向方向的正方向变化较大。

在计算完等离子体破裂后，通过查看TBM上每个节点在笛卡尔坐标系下3个方向(x,y,z)的洛伦兹力，分别求和得出在这3个方向上总的净洛伦兹力及力矩^[11]，如图5所示。其中，力矩是以后板中心为原点，TBM上任意一点的洛伦兹力与该点到原点的向量的

矢量积。线性及指数破裂下的最大净洛伦兹力都在x方向，其值分别为31.9 kN和20.8 kN，因此TBM主要承受一个推离ITER中心的力。同时计算出的最大力矩也在x方向，分别为-225 kNm和-205 kNm，这表明TBM主要受到极向方向的扭转。

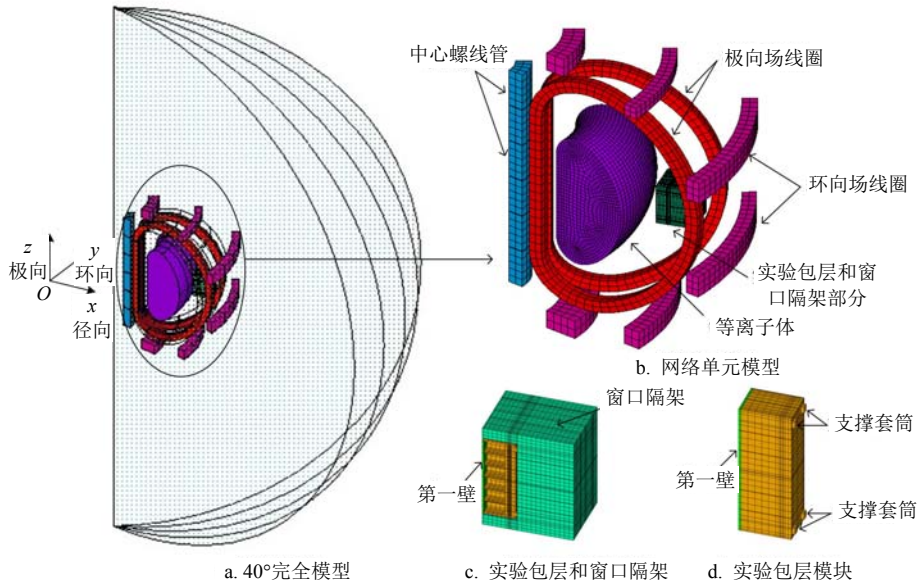
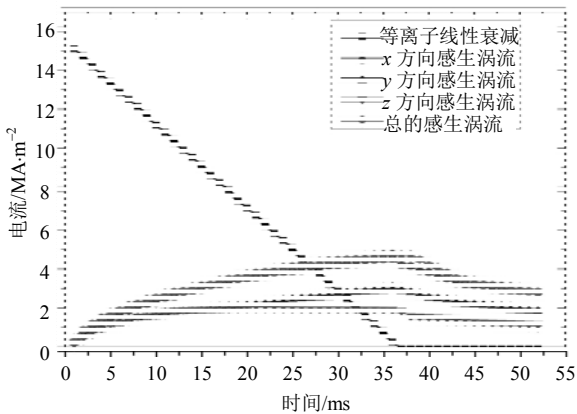
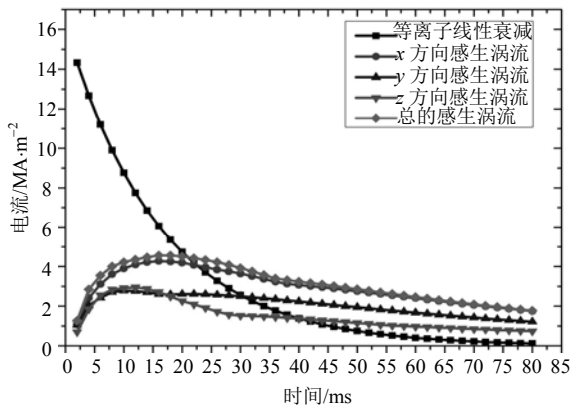


图3 电磁分析模型

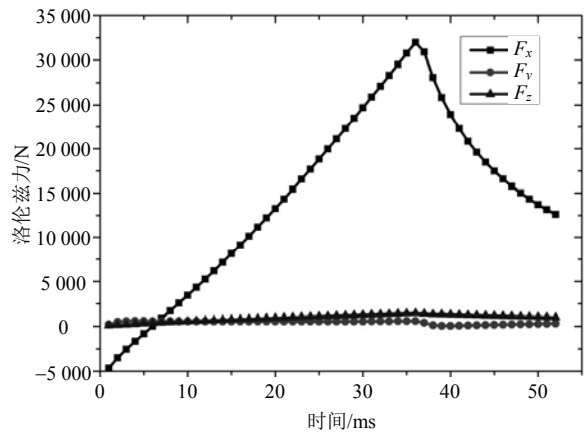


a. 等离子体线性衰减时TBM的感生涡流

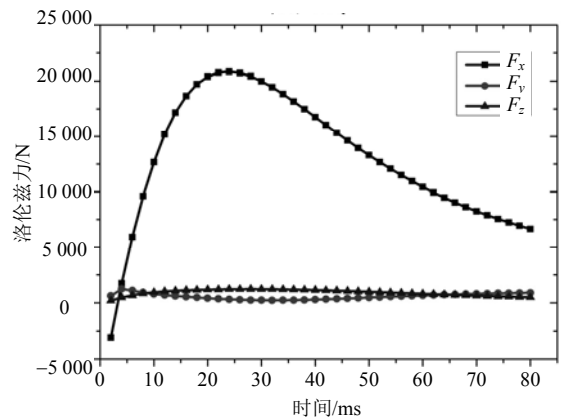


b. 等离子体指数衰减时TBM的感生涡流

图4 两种等离子体衰减时TBM上的感生涡流变化



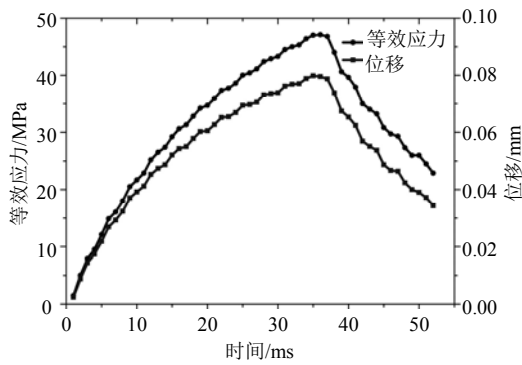
a. 等离子体线性衰减时TBM所受洛伦兹力变化曲线



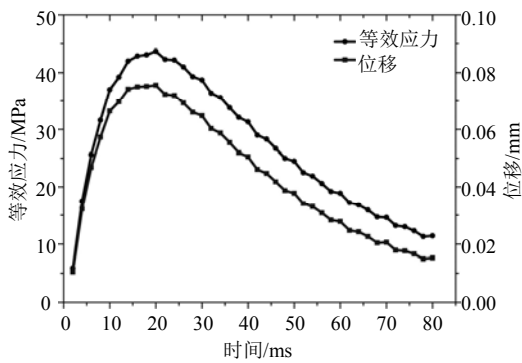
b. 等离子体指数衰减时TBM所受洛伦兹力变化曲线

图5 两种等离子体衰减时TBM所受洛伦兹力

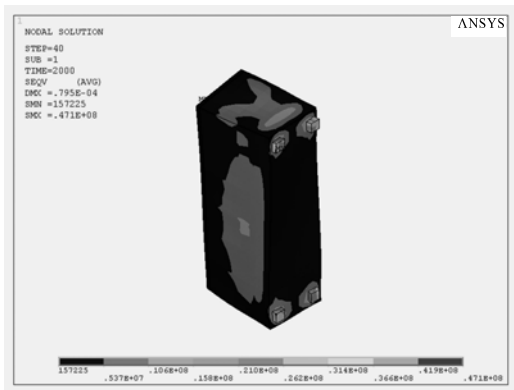
2 耦合分析



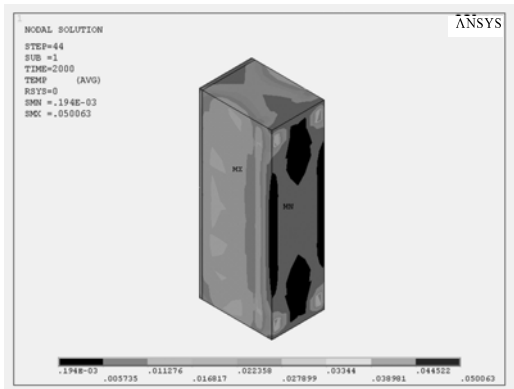
a. 线性衰减



b. 指数衰减



c. 实验包层与接口插件的最大等效应力分布云图



d. 时间包层的最大温升分布云图

图6 多物理场耦合分析结果

本文采用的序贯耦合分析是按顺序多次对不同

工程领域的相关场进行分析, 其结果相互作用得到总的工程问题的解。该方法在本文中的具体应用是把电磁分析的结果作为载荷加载到结构分析和热分析中。多物理场耦合分析结果如图6所示。

2.1 耦合结构分析

中国HCCB TBM的支撑系统由4个支撑套筒和3个剪切键组成。支撑套筒主要是用以承载TBM重量和克服沿径向的载荷, 而剪切键则是抵抗极向和环向的载荷。本文考虑在3个剪切键不起作用的极端环境下, 约束支撑套筒底面(固定x、y、z方向位移)的方法研究TBM的安全设计。同时为减少模型的复杂度, 结构分析中的4个支撑套筒都以相同底面积的正方体替换了支撑套筒的圆柱形模型, 如图6c所示。

详细的耦合过程: 首先将所有单元类型设置为0单元, TBM和支撑套筒的单元替换为SOLID45单元; 其次定义相关的物理材料参数, 其中由于在H-H阶段用于电磁测试时的EM-TBM中子模块增殖区内不添加或添加少量的增殖剂和倍增剂, 且小球形成的球床类似多孔介质, 不能形成较大的导体回路, 本文均用空气单元代替, 因此没有设置增殖剂与倍增剂的物理材料参数, 而其他结构部分(比如隔板、后板、第一壁等)的材料均为低活性铁素体钢, 因此可设置其杨氏模量(18.15 GPa), 密度(7 800 kg·m⁻³)和泊松比(0.3); 最后以约束支撑套筒底面作为边界条件。由于在敏感性比较分析中表明, 最大应力(采用冯米斯应力Von Mises Stress)和最大形变位移都随支撑套筒长度不同而不同, 因此最佳长度下的等效应力和形变位移数据将在2.2节中给出。

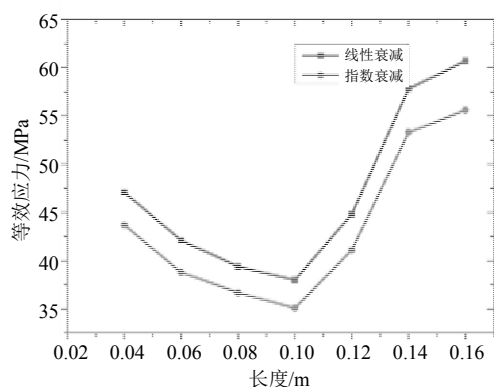
图6a、图6b和图6c所示为支撑套筒长度为0.04 m时耦合结构分析的结果。通过分析图6a和图6b可知, TBM受到的最大等效应力与最大形变位移都出现在等离子电流破裂的最危险时刻: 线性破裂36 ms处和指数破裂20 ms处。从图6c可知, 最大等效应力出现在TBM与支撑套筒的链接处。

2.2 敏感性比较分析

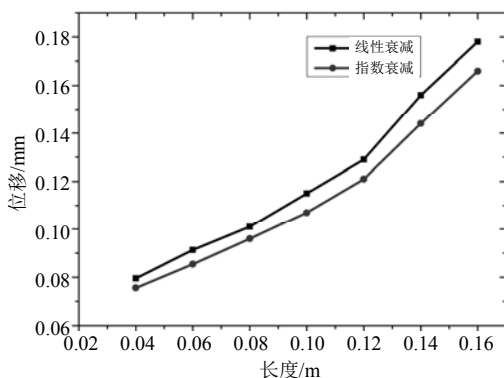
由于CN HCCB-TBM的设计没有完全确定, 所以还可以进一步通过耦合结构分析, 研究支撑套筒在不同长度下TBM所受应力的表现情况。

如图7a所示, 最大等效应力(Von Mises Stress)在不同长度下有最小值, 其值在线性破裂下为37.8 MPa、指数破裂下为35.1 MPa, 均小于CFL-1钢的应力许可值232 MPa(300 °C)^[12]。如图7b所示, 最大形变位移随长度增加而增加, 其最大值分别是0.178 mm和0.166 mm, 也均小于TBM与实验窗口壁的35 mm的

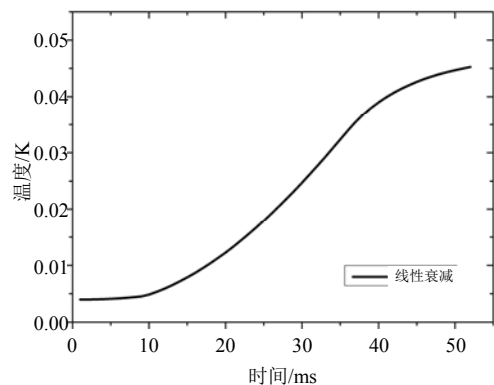
空气间隙, 因此目前的设计符合要求。



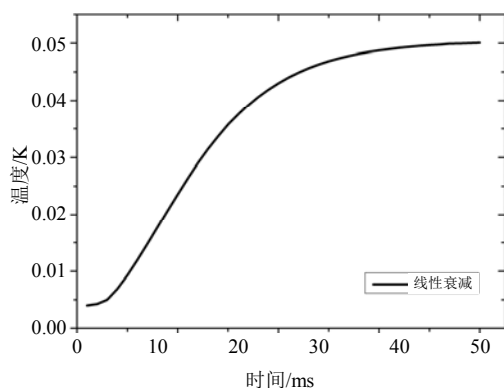
a. 等效应力随长度变化



b. 形变位移随长度变化



c. 等离子体线性衰减时TBM的温升



d. 等离子体指数衰减时TBM的温升

图7 敏感性分析与耦合热分析结果

考虑到更好的防止TBM在事故中扭动过大和

TBM内部管道受挤压破裂, 留给支撑套管的长度不应太长, 在0.15 m以下的范围内, 使得等效应力值最小的支撑套筒长度(0.1 m)是最合理的设计。

2.3 耦合热分析

为评估等离子破裂时产生的焦耳热效应对TBM冷却管道进出口温度的影响^[13-14], 采用了和2.1节类似的耦合分析方法, 不同的是只将TBM的单元类型替换为SOLID70单元, 并定义了耦合热分析的物理材料参数, 其中包括热导率(30.3 W/(m·K))、比热容(第一壁为600 J/(kg·K)), 包层其余部分为583 J/(kg·K))、密度(7 800 kg·m⁻³)和热膨胀系数(12.35 e⁻⁶/K)。

由于本文只关注因涡流产生的焦耳热效应对TBM的影响, 其中TBM的初始温度为0 K, 且没有考虑TBM与周边介质在界面上的热量交换, 所以线性衰减和指数衰减产生的温升均会在增加一段时间后趋于一个稳定值。为节省计算时间和计算量, 本文只计算了TBM温升变化较大的等离子体衰减阶段。图6d所示为线性衰减下TBM的最大温度分布云图, 从图中可知最高温度出现在第一壁, 最低温度出现在后板, 表明靠近等离子体一侧受影响较大。从图7c和图7d可知, 线性衰减导致的温升变化比指数衰减导致的温升变化慢, 但由于破裂时间太短, 两者的最大变化值为0.045 K和0.05 K。文献[13]中给出了在极端工况时第一壁, 盖板和隔架的最高温度分别为534 °C, 418 °C和396 °C, 而铁素体钢的最高的许用温度为550 °C, 因此最大的温升(0.045 K和0.05 K)不会为冷却系统带来额外负担, 可以在热工水力方面忽略此影响。

3 结论

本文研究了等离子体主破裂(MD)对CN HCCB TBM的电磁影响, 通过将电磁载荷加载到TBM上进行磁结构耦合分析、磁热耦合分析以及敏感性比较分析, 得到其线性指数衰减下的结论数据如下。

1) TBM上的最高涡流密度分别是4.73 MA·m⁻² (36 ms处)和4.56 MA·m⁻² (18 ms处)。

2) TBM上的最大净洛伦兹力分别是31.9 kN和20.8 kN, 并都沿x方向。同时最大的力矩也在x方向, 分别为-225 kNm和-205 kNm。因此TBM主要承受一个推离ITER中心的力和受到极向方向的扭转。

3) 支撑套筒长度在0.15 m下, TBM的等效应力(Von Mises Stress)和位移都远远小于CLF-1钢的应力允许值232 MPa(300 °C), 实验窗口壁的35 mm的空气间隙, 以及具有毫米量级的各个冷却管道, 并且

在支撑套管长度为0.1 m长时TBM有最小应力值。

4) 焦耳热效应导致的最大温升分别是0.045 K和0.05 K, 相比于实际的最高温度与材料容许值的差值是很小的, 可不用额外考虑其对ITER热工水力方面的影响。

综上所述, 这些结果表明目前的设计是符合要求的, 等离子体的线性和指数破裂对TBM的影响相差不多, 相比较而言, 前者影响稍大。最后, 对局部部件的敏感性分析可为设计的改进提供更多的工程设计参考。

参 考 文 献

- [1] 冯开明. ITER实验包层计划综述[J]. 核聚变与等离子体物理, 2006, 26(3): 161-169.
FENG Kai-ming. Overview of the ITER test blanket module program[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2006, 26(3): 161-169.
- [2] 刘松林, 柏云清, 陈红丽, 等. ITER氦增值实验包层设计研究进展[J]. 核科学与工程, 2009, 29(3): 266-272.
LIU Song-lin, BO Yun-qing, CHEN Hong-li, et al. Progress in design and study of ITER test blanket modules[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2009, 29(3): 266-272.
- [3] CHEN Yan-jing, FENG Kai-ming, GAO Chun-ming. Evaluations on reduction of the ITER TFC ripple generated by CN HCCB-TBM[J]. Fusion Engineering and Design, 2011, 86(9-11): 2273-2277.
- [4] FENG Kai-ming, PAN Chuan-hong, ZHANG Guo-shu, et al. Overview of Design and R&D of solid breeder TBM in China[J]. Fusion Engineering and Design, 2008, 83(7): 1149-1156.
- [5] FENG Kai-ming, PAN Chuan-hong, LUO T Y, et al. Progress on solid breeder TBM at SWIP[J]. Fusion Engineering and Design, 2010(85): 2132-2140.
- [6] BOCCACCINI L V, FISCHER U, KLEEFELDT K, et al. Strategy for the blanket testing in ITER[J]. Fusion Engineering and Design, 2002, 61-62: 423-429.
- [7] 崔向斌, 牛忠荣, 陈恩伟, 等. ITER校正场底部线圈结构的有限元分析[J]. 核聚变与等离子体物理, 2011, 31(1): 68-74.
CHUI Xiang-bin, NIU Zhong-rong, CHEN En-wei, et al. Finite element analysis of bottom correction coils structure for ITER[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2011, 31(1): 68-74.
- [8] DUCK H K, DONG K O, SUNIL P, et al. Eddy current induced electromagnetic loads on shield blankets during plasma disruptions in ITER: a benchmark exercise[J]. Fusion Engineering and Design, 2010(85): 1754-1758.
- [9] ROCCELLA R, BOCCACCINI L V, MEYDER R, et al. Assessment of EM loads on the EU HCPB TBM during plasma disruption and normal operating scenario including the ferromagnetic effect[J]. Fusion Engineering and Design, 2008(83): 1212-1216.
- [10] 曹文钢, 吴海龙, 许铁军, 等. ITER诊断插件电磁分析及其对结构的影响[J]. 核聚变与等离子体物理, 2011, 31(2): 167-171.
CAO Wen-gang, WU Hai-long, XU Tie-jun, et al. Electromagnetic analysis of diagnostic port plug and its influence to structure of ITER[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2011, 31(2): 167-171.
- [11] LIU Song-lin, LONG Peng-cheng, WANG Wei-hua, HUANG Wei-hua. Evaluation of electromagnetic forces on Chinese Dual Functional Lithium Lead Test Blanket Module in ITER[J]. Fusion Engineering and Design, 2010(85): 2176-2180.
- [12] WAN Ping-huai, NOBUTA Y-J, HINO T, et al. Helium retention and desorption behaviour of reduced activation ferritic/martensitic steel[J]. Plasma Science and Technology, 2009(2): 225-230.
- [13] 赵周, 冯开明, 张国书, 等. 中国ITER固态实验包层模块热工水力优化设计和分析[J]. 核科学与工程, 2009, 29(4): 299-307.
ZHAO Zhou, FENG Kai-ming, ZHANG Guo-shu, YUAN Tao. Thermal-hydraulic optimization design and analysis for the CH HCSB TBM of ITER[J]. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 2009, 29(4): 299-307.
- [14] 程超, 姚列明. ITER屏蔽模块的温度场和流场分析[J]. 真空电子技术, 2011(2): 37-39.
CHENG Chao, YAO Lie-ming. The Temperature and Flow Field Analysis of ITER Shield Module[J]. Vacuum Electronics, 2011(2): 37-39.

编辑 漆蓉