



基于 ANSYS 的 ITER 边校正场线圈电磁-结构分析

刘万远^{①②*}, 吴维越^①, 杜双松^①, 郝俊川^①

① 中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031;

② 中国空空导弹研究院, 洛阳 471009

* E-mail: liuwanyuan@126.com

收稿日期: 2011-06-18; 接受日期: 2011-09-15

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(批准号: 2007ID205)和国家科技计划 ITER 计划专项(国内配套研究)(批准号: 2008GB101000)资助项目

摘要 针对国际热核聚变实验堆(ITER)磁体系统中不含铁磁性物质的特点, 提出了不含空气单元的电磁分析方法, 得出了边校正场线圈(SCC)上磁场及电磁力的分布, 为结构分析奠定了基础. 考虑到 SCC 总体结构的复杂性, 进行了简化的整体模型分析. 针对应力最大部位, 采用子模型技术进行局部结构分析. 得到了线圈盒、铠甲以及绝缘层的应力分布, 为 SCC 设计改进及生产提供了可靠的理论依据.

关键词

有限元分析

电磁

结构

ITER

边校正场线圈

国际热核聚变实验堆(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)计划是由七方参与的国际合作项目, 目标是验证聚变能和平利用的科学和工程的可行性, 目前的设计已基本完成, 开始进入生产阶段^[1, 2]. ITER 装置主机是由超导磁体系统、真空室、冷屏和外真空杜瓦等几部分组成. 超导磁体系统是其核心部件, 由中心螺管(CS)线圈系统、纵场(TF)线圈系统、极向场(PF)线圈系统和校正场线圈(CC)系统组成, 如图 1 所示, 所有线圈均采用管内电缆导体(CICC)结构以确保其足够的工作能力. 18个校正场线圈根据其所处位置分为三组: 顶校正场线圈(TCC), 边校正场线圈(SCC)和底校正场线圈(BCC), 用来补偿由于制造误差、安装误差、接头以及引线等引起的磁场形态误差, SCC 也用于等离子体电阻壁模式扰动的反馈控制.

ITER 装置在运行过程中, PF, CS 以及等离子体电流是不断变化的, 导致了校正场线圈磁场力也是

不断变化的. 相对于 BCC 和 TCC, SCC 尺寸更大, 且呈空间三维, 故对其强度分析就显得非常必要. 由于 SCC 系统结构复杂, 在进行电磁分析之后, 首先进行简化的整体结构分析, 而后针对应力最大部位进行局部结构分析, 并对其中的关键部件进行了应力评估.

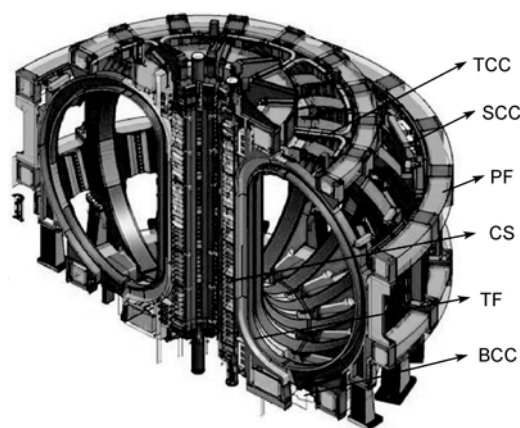


图 1 ITER 超导磁体系统

中文版发表信息: 刘万远, 吴维越, 杜双松, 等. 基于 ANSYS 的 ITER 边校正场线圈电磁-结构分析. 中国科学: 技术科学, 2012, 42: 481-485, doi: 10.1360/092011-716

1 SCC 的结构设计

SCC 是由超导绕组、绝缘层、线圈盒、冷却管道、支撑及支撑梁组成, 如图 2 所示. 超导绕组是由包绕绝缘的 20 匝 CICC 导体以 4×5 的矩阵排列并经真空压力浸渍工艺而成; CICC 导体是由 300 根 NbTi/Cu 股线经过四级绞缆工艺形成. 每匝 CICC 导体外面包裹有 0.92 mm 厚的匝间绝缘; 在其两边各加一个厚度为 0.25 mm 的玻璃丝绳的挡边带填充圆角空隙; 之后平包一层厚度为 0.09 mm 厚的玻璃丝布. 并间绝缘为 1 mm 厚的玻璃丝布, 对地绝缘为 10 mm, 分两次包绕, 第一次为 4 mm, 第二次为 6 mm. 316LN 不锈钢线圈盒采用双 L 形结构, 以便于线圈的装配. SCC 线圈有两个主动冷却回路, 布置在线圈盒的外侧, 以确保 SCC 线圈充分的冷却. 整个 SCC 线圈共有 21 个支撑, 其中左右直线段各有 5 个支撑, 上圆弧段和下圆弧段分别有 5 个和 6 个支撑. 直线段通过支撑直接和 TF 线圈盒连接, 上下圆弧段通过支撑和支撑梁与 TF 线圈盒连接.

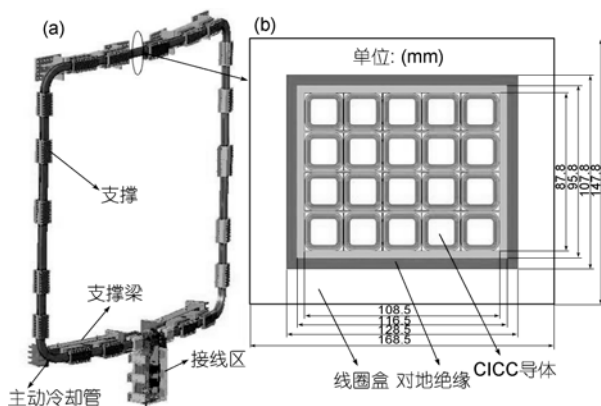
ITER 装置中采用 ASME 的应力评定准则, 许用应力 S_m 的采用

$$S_m = \min(2S_y/3, S_u/3). \quad (1)$$

S_y 为 0.2% 屈服应力, S_u 为极限应力. 线圈盒和 CICC 导体铠甲材料为 316LN, 工作温度为 4.5 K, 此温度下的 0.2% 屈服应力为 700 MPa, 极限应力为 1200 MPa, 故其许用应力强度为 400 MPa^[3]. 此时的应力评定准则如下.

$$\text{薄膜应力: } P_m \leq S_m = 400 \text{ MPa,}$$

$$\text{薄膜应力+弯曲应力: } P_m + P_b \leq 1.5S_m = 600 \text{ MPa.}$$



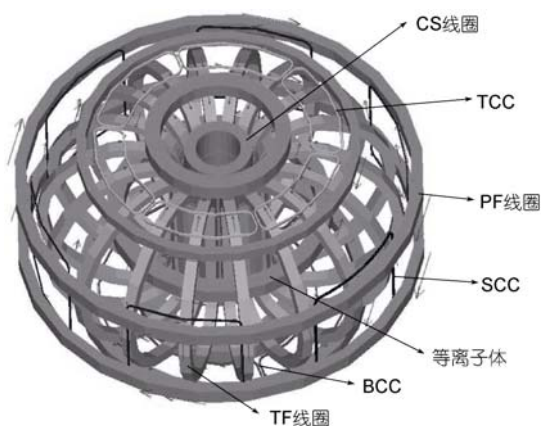


图3 电磁分析有限元模型

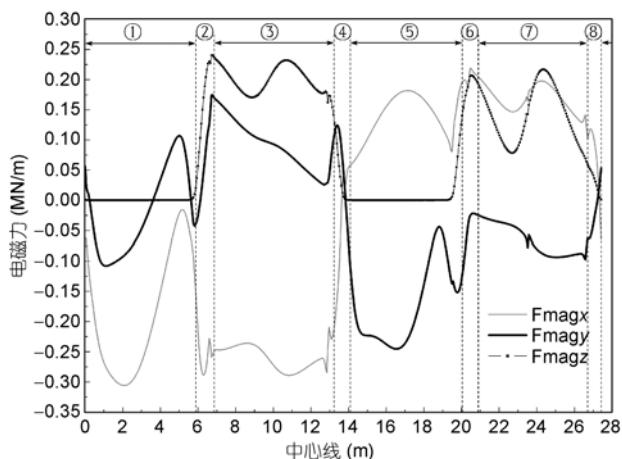


图4 沿SCC中心线电磁力分布

①右直线段; ②右上圆弧段; ③上圆弧段; ④左上圆弧段; ⑤左直线段; ⑥左下圆弧段; ⑦下圆弧段; ⑧右下圆弧段

3 SCC 整体结构分析

SCC 线圈工作过程中会受到电磁力、重力、热应力以及 TF 位移等的影响, 其中对其结构影响最大的是电磁力和 TF 位移, 电磁力由前面的电磁分析得出; TF 的位移根据文献[7]查得. 整体结构分析中, 为了简化计算模型, 将超导电缆看作一个整体, 其等效

材料属性由文献[8]给出. 模型如图 5, 超导电缆、对地绝缘、线圈盒以及支撑采用实体单元 SOLID185 建模, 支撑梁采用梁单元 BEAM188 建模, 梁单元与实体单元连接部分进行位移约束.

整个模型所涉及的材料有三种, 超导电缆、G10 及 316LN, 材料属性如表 1 所示. 其中 y 方向为沿着绝缘层的纤维的方向, x 和 z 为垂直于纤维的两个方向, x, y 和 z 符合右手定则.

从图 6 可以看出, 最大位移为 20.73 mm, 出现线圈的上圆弧段, 最大应力为 213 MPa, 出现在线圈盒左上圆弧部位. 通过图(a)看出, 左上圆弧段两侧位移差别较大, 位移不协调导致此处出现了最大应力. 绝缘材料受到的最大拉应力为 15.58 MPa, 最大压应力和剪应力分别为 13.12 和 6.36 MPa, 而 ITER 规定的绝缘材料的许用压缩应力和剪切应力分别为 400 和 45 MPa^[9], 满足强度要求. 对线圈盒应力进行线性化处理得出: 最大薄膜应力为 183.8 MPa, 最大总体应力为 213.6 MPa, 均满足 ITER 的设计标准.

4 SCC 局部结构分析

由于在整体结构分析中将超导绕组看作一个整体, 不能显示内部具体的应力分布, 为了校核超导电

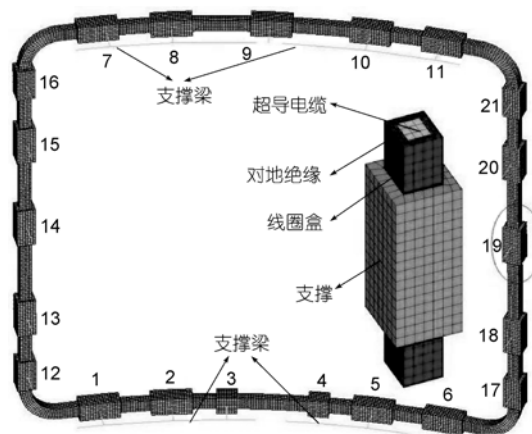


图5 整体结构分析模型

表1 整体结构分析所用材料属性

材料	各方向弹性模量 (GPa)			各方向泊松比			各方向剪切模量 (GPa)		
	x	y	z	xy	yz	xz	xy	yz	xz
超导电缆	23.10	64.8	23.4	0.39	0.32	0.11	13.30	11.30	3.19
G10	12	20	20	0.33	0.17	0.33	6	6	6
316LN	205	205	205	0.3	0.3	0.3	78.8	78.8	78.8

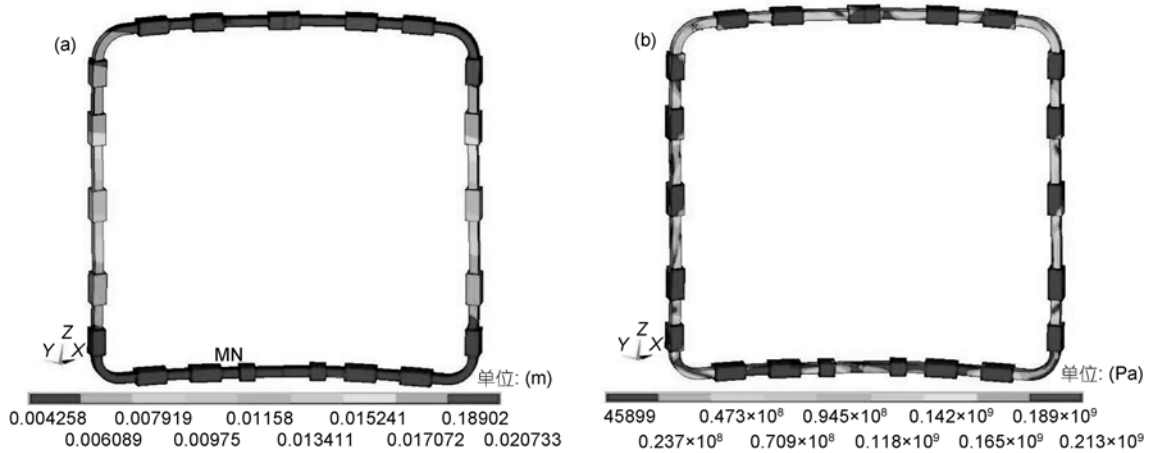


图 6 整体结构分析结果

(a) 整体模型的总体位移; (b) 整体模型的应力强度

缆内部的 CICC 导体铠甲及内部绝缘是否满足强度要求, 选择 SCC 左上圆弧进行局部结构分析. 在局部分析中, 将左上圆弧段进行详细的建模, 如图 7 所示, 其余部分仍采用简化的模型. 主要载荷仍是电磁力和 TF 位移. 局部结构分析采用 ANSYS 提供的子模型技术: 首先根据整体结构分析的结果, 利用切割边界插值求出的子模型中两个截面上的位移, 然后导入该段线圈上的电磁力求出应力分布.

局部结构分析中采用的材料属性有两种: 316LN 和 G10, 其材料属性如表 1 所示. 局部结构分析中包含了五种绝缘结构, 最大压应力和剪应力分别为 16.95 和 21.0 MPa, 而 ITER 规定的绝缘材料的许用压缩应力和剪切应力分别为 400 和 45 MPa^[9], 满足强度要求.

图 8(a)线圈盒最大应力强度为 317 MPa, 出现在

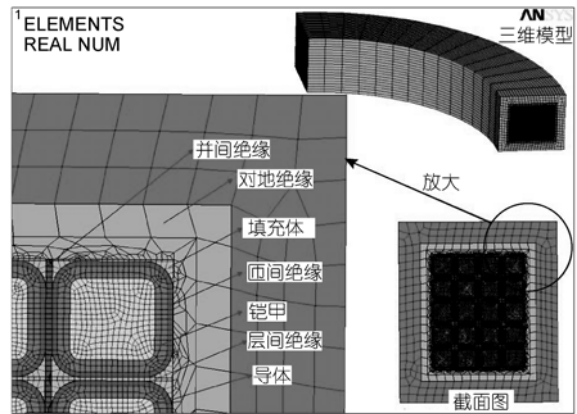


图 7 局部分析模型

拐角处, 与整体结构分析中最大应力 213 MPa 相比, 增加了 48.8%. 这主要是由电磁力增大的缘故: 局部

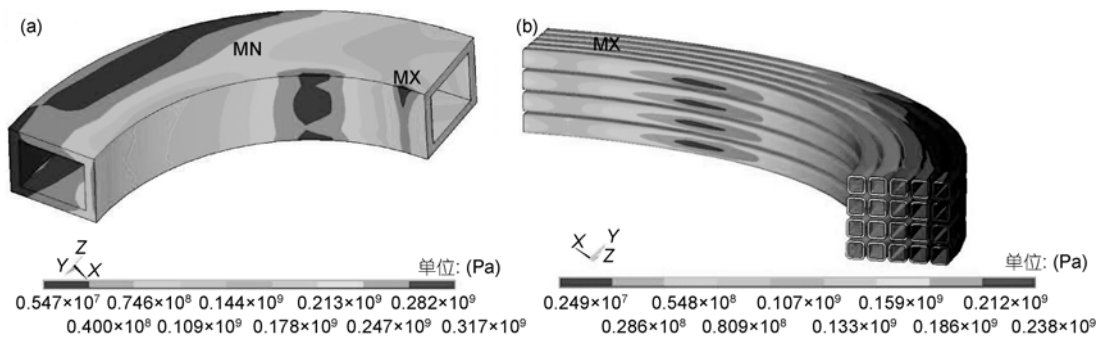


图 8 局部结构分析结果

(a) 线圈盒的应力强度; (b) CICC 导体铠甲的应力强度

结构电磁分析将电流施加在每匝 CICC 导体上, 而整体结构电磁分析中将电流施加在超导电缆上, 通电截面减小了 54.6%, 电流密度增加了 120.3%, 导致电磁力增大, 进而导致最大应力的增加. 对线圈盒应力线性化处理, 得出最大薄膜应力为 278.1 MPa, 最大总体应力为 300.6 MPa. 图 8(b)CICC 导体铠甲的最大应力为 238 MPa, 出现在铠甲的圆角部位, 其最大薄膜应力为 207.7 MPa, 最大总体应力为 229.1 MPa, 均满足 ITER 静态应力的标准.

5 结论

建立了不含空气单元的电磁分析模型, 并进行简化的整体结构分析以及局部结构分析, 获得了 SCC 位移和应力分布云图, 以及主要承载部件-线圈盒和导体铠甲的最大 Von Mises 应力值. 有限元分析结果不仅为设计改进提供了有价值的应力数据, 而且指出了 SCC 可能存在的危险区域. 根据 ASME 的评价标准, 所有部件均满足强度要求, 为 SCC 顺利地由设计阶段转向生产阶段提供了可靠的理论支持.

参考文献

- 1 Stephen D O. Fusion power: Looking to the future. *J Fusion Energy*, 2002, 21(1): 1-8
- 2 Holtkamp N. The status of the ITER design. *Fusion Eng Design*, 2009, 84(2-6): 98-105
- 3 Foussat A. Overview of the ITER correction coils designs. 21st International Conference on Magnet Technology, Hefei, 2009
- 4 孙明礼, 胡仁喜, 崔海蓉, 等. ANSYS10.0 电磁学有限元分析实例指导教程. 北京: 机械工业出版社, 2007. 3-5
- 5 Gyimesi M, Lavers D. Biot-Savart integration for bars and arcs. *IEEE Trans Magn*, 1993, 29: 2389-2390
- 6 Wu W Y, Liu X F, Du S S, et al. Preliminary electromagnetic analysis of correction coils for ITER. China-Japan CUP-CAS Symposium, Huangshan, China, 2008
- 7 Foussat A. TF displacement at CC coils supports during cooling down. CC FDR Meeting, Hefei, China, 2009
- 8 刘万远, 吴维越, 曾文彬, 等. ITER 校正场线圈等效材料属性有限元分析. *原子能科学技术*, 2010, 44: 745-749
- 9 刘万远. ITER 校正场 SCC 线圈结构设计及有限元分析. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2010