

55-59

HT-7U 大型超导托卡马克装置极向场  
CS 线圈的强度分析

曹云露, 吴维越, 翁佩德, 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

0414.4

TM303.1

**摘要:**从结构的观点出发, 将CS线圈作为一个由复合材料组成的厚壁筒来考虑, 详尽地计算了在各种载荷条件下CS的应力及应变。计算结果表明, CS在轴向预紧力下径向自支撑和绝缘层的强度均满足设计要求。

**关键词:**托卡马克; 磁体; 应力; 应变; 复合材料

**中图分类号:** O441.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7038(1999)04-0055-05

CS线圈 极向场

## 1 HT-7U 的极向场及中心螺管

正在中科院等离子体物理研究所设计建造的 HT-7U 是新一代全超导托卡马克, 它是在原 HT-7 装置的基础上升级换代的新装置。HT-7U 托卡马克装置本体包括极向场 (Poloidal Field 简称 PF)、纵场 (Toroidal Field 简称 TF)、真空室及其内部部件、冷屏、外真空杜瓦等主要部件。

HT-7U 装置极向场结构由六对超导线圈组成, 其中三对线圈构成中心螺管 (Central Solenoid 简称 CS 见图 1), 另外三对构成外部线圈。全部极向场线圈导体采用超临界氦冷却的 CIC 导体 (Cable-In-Conduit Conductor 简称 CICC)。

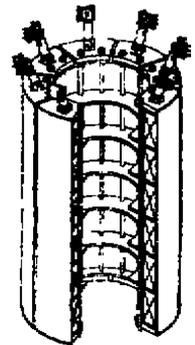


图1 HT-7U  
中心螺管

## 2 CS 的电动力载荷

## 2.1 CS 组件的预紧力

极向场系统工作时, 脉冲放电一次以秒计, 共分为八个时间点 (极值点), 计有六个电源系统分别给各对线圈供电, 它们分别对应于 OH、V1~V5 时刻。极向场线圈在放电的不同时刻所受的电动力均不相同, 计算结果表明, CS 上的最大电动力产生于欧姆加热场 (OH) 工作时刻, 作用于 CS 上下两端的一

• 收稿日期: 1999-06-29

作者简介: 曹云露 (1957-), 男, 安徽省淮南人, 副教授, 在读工学博士。现主要从事 HT-7U 极向场系统的结构分析和设计工作。内容涉及机械、电磁、真空、低温、材料、超导等诸方面。

对线圈上,其径向和轴向的值分别为  $F_{rb}=5\ 497.86\ \text{kN}$  和  $F_{ab}=-5\ 833.70\ \text{kN}$ 。CS 的最大轴向压缩力产生于 V5 工作时刻,最大轴向拆分力产生于 V4 工作时刻,其值分别为  $F_{r1}=-909\ \text{MN}$  和  $F_{s1}=247.49\ \text{kN}$ 。

CS 中的六节线圈径向无约束,轴向由上下支撑板及中间紧箍环经 16 个 M42 的长螺柱预紧装卡形成一个装配组件。为保证装置在运行期间 CS 组件能正常工作,其轴向预载取最大压缩力,即  $F_{rp}=F_{r1}=-9.09\ \text{MN}$ 。

## 2.2 电动力产生的应力

HT-7U 装置极向场系统的设计以等离子体双零位形为基础,通过改变电流大小及方向也可作单零运行。由于线圈是对称布置且系统在双零运行时电流值已达最大,故单零运行时极向场各线圈中的电动力将不会大于双零运行时的电动力。因此,在计算 CS 由电动力产生的应力时,将 CS 组件整体作为受对称载荷作用的厚壁圆筒来考虑。

由于 CS 两端的一对线圈所受的径向电动力最大,故取其作为 CS 组件的径向电动力;而 CS 组件所受的轴向电动力则取为 V5 工作时刻的最大轴向压缩合力。

$$\sigma_r = P_i \frac{K^2/(k^2-1)}{K^2-1}$$

$$\sigma_\theta = P_i \frac{K^2/(k^2+1)}{K^2-1}$$

$$\sigma_z = F_{rp}/S$$

式中:  $P_i$  为内压,取 CS 的最大径向电动力;  $K$  为  $R_o/R_i$ ,  $R_i$  为内半径、 $R_o$  为外半径,注角 i 表示内侧、o 表示外侧;  $k$  为  $r/R_i$ ,  $r$  为所求点之半径;  $S$  为 CS 线圈轴向受力表面积。

最大应力产生于线圈的内侧,其三向应力为:

$$\sigma_r = 4.075\ \text{MPa}$$

$$\sigma_\theta = 11.918\ \text{MPa}$$

$$\sigma_z = 10.170\ \text{MPa}$$

## 2.3 电动力引起的变形

因 CS 线圈是由 CICC 导体、Epoxy S-glass 等多种材料复合而成(表 1、图 2),所以,线圈的等效弹性模量  $E_{\text{eff}}$  和泊松比  $\nu_{\text{eff}}$  需按微观力学的复合律来计算。

目前,CICC 导体(图 3)已完成试制,其精度达到设计指标,并一次通过检漏、打压等工序。

表 1 CS 线圈导体的有关设计参数

超导材料	导体类型	导管材料	导管壁厚 (mm)	导体尺寸 (mm)	外圆角 (mm)	空隙率	铜超比
NbTi/Cu	CICC, 迫流	316LN	1.5	17.5×17.5	3.5	0.376	1.38

线圈的等效弹性模量  $E_{\text{eff}}$  和泊松比  $\nu_{\text{eff}}$  通过三级复合来计算。

第一级复合为超导缆中 NbTi 和 Cu 的复合:

$$E_{cable} = (E_{Cu}\eta_{Cu} + E_{NbTi}\eta_{NbTi})(1 - \eta_{void})$$

$$\nu_{cable} = (\nu_{Cu}\eta_{Cu} + \nu_{NbTi}\eta_{NbTi})(1 - \eta_{void})$$

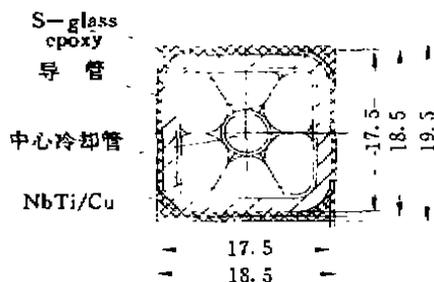


图2 CICC 导体及绝缘

图3 试制的 CICC 导体截面

第二级复合为 CICC 中 Cable 和 Conduit 的复合:

$$E_{cicc} = E_{cable}\eta_{cable} + E_{316LN}\eta_{316LN}$$

$$\nu_{cicc} = \nu_{cable}\eta_{cable} + \nu_{316LN}\eta_{316LN}$$

第三级复合为线圈中 CICC 与以 epoxy 为基体的 S-glass 的复合, 由此计算出线圈的等效弹性模量和泊松比:

$$E_{eff} = E_{cicc}\eta_{cicc} + E_{S-glass}\eta_{S-glass}$$

$$\nu_{eff} = \nu_{cicc}\eta_{cicc} + \nu_{S-glass}\eta_{S-glass}$$

线圈的等效极限应力  $\sigma_{eff}$  同  $E_{eff}$  和  $\nu_{eff}$  一样也按三级复合计算:

$$\sigma_{cable} = (\sigma_{Cu}\eta_{Cu} + \sigma_{NbTi}\eta_{NbTi})(1 - \eta_{void})$$

$$\sigma_{cicc} = \sigma_{cable}\eta_{cable} + \sigma_{316LN}\eta_{316LN}$$

$$\sigma_{eff} = \sigma_{cicc}\eta_{cicc} + \sigma_{S-glass}\eta_{S-glass}$$

式中:  $E$  为弹性模量;  $\nu$  为泊松比;  $\sigma$  为应力,  $\eta$  为体积率; 下标 Cu 为铜, NbTi 为铌钛, void 为空隙, cable 为超导缆, 316LN 为不锈钢, S-glass 为 S 玻璃环氧, eff 为等效。

将线圈作为一个复合材料体, 按各材料组分在线圈中所占的比例(表 2)进行计算, 各种材料的弹性常数及强度值均以液氮温度(4.2K)下的数值(表 3)代入, 据此求出各级复合材料的弹性常数和等效极限应力(表 4)。

表2 Cable 的空隙率和各级复合材料的体积率

第一级复合			第二级复合		第三级复合	
$\eta_{Cu}$	$\eta_{NbTi}$	$\eta_{void}$	$\eta_{cable}$	$\eta_{316LN}$	$\eta_{cicc}$	$\eta_{S-glass}$
0.719 9	0.280 1	0.376 0	9.600 5	0.300 6	0.819 8	0.180 2

由电动力载荷引起的 CS 线圈的径向位移  $U_{re}$  和轴向位移  $U_{ax}$  按下式计算:

$$U_{re} = \frac{R_i(1 + \nu_{eff})}{E_{eff}(K^2 - 1)} [(1 - 2\nu_{eff})k + K^2/k] P_i$$

$$U_{ax} = \frac{\sigma_{ax}}{E_{eff}} l$$

式中,  $l$  为 CS 组件的轴向高度。

计算结果为:  $U_{re}=0.065$  mm,  $U_{re}=0.276$  mm

表3 液氮温度下的材料性质

材 料	弹性模量 $E$ (GPa)	泊松比 $\nu$	屈服强度 $\sigma_s$ (MPa)	抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)
Cu	138	0.338	275	—
NbTi	82	0.333	980	—
316LN	207	0.282	860	—
S-glass epoxy	62	0.210	—	1 500

表4 各级复合材料的弹性常数和等效极限应力

第一级复合			第二级复合			第三级复合		
$E_{cable}$ (GPa)	$\nu_{cable}$	$\sigma_{cable}$ (MPa)	$E_{CICC}$ (GPa)	$\nu_{CICC}$	$\sigma_{CICC}$ (MPa)	$E_{eff}$ (GPa)	$\nu_{eff}$	$\sigma_{eff}$ (MPa)
76.324	0.21	295	108.056	0.21	436	99.757	0.21	627

### 3 CS 降温时的热载荷

超导线圈的工作温度为 4.2 K, 装置在从室温下降到液氮温度的过程中, 由于材料的收缩带来了诸如线圈尺寸变化及绝缘层应力等一系列问题。

众所周知, 填充在匝间用来固化超导线圈的绝缘材料在低温时会变脆。在拉压、尤其是在拉伸条件下, 存在某些小缺陷的材料容易产生脆裂, 从而局部地释放大量能量导致磁体失超。因此, 线圈中绝缘材料的强度就显得尤为重要。

#### 3.1 井间和匝间绝缘层上的应力

线圈在工作温度下, 由于绝缘材料与 CICC 导管之间的膨胀系数不同, 因而在井间绝缘层上产生径向拉应力和井间剪应力。有关的计算参数见表 5。

材 料	S-glass epoxy	316LN Epoxy
$10^2(L_{295}-L_{42})/L_{295}$	0.09	0.3 1.16

S-glass epoxy 与 316LN 的相对膨胀系数差  $\epsilon_d=0.3-0.09=0.21(\%)$ , 井间绝缘层由于降温引起的径向拉应力和剪应力为:

$$\sigma_p = E_{S-glass} \times \epsilon_d = 62\,000 \times 0.0021 = 130.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_p = \pi D \sigma_p / 2S = 341.885 \text{ kPa}$$

计算时按线圈外径  $D=1\,494$  mm 考虑。

匝间绝缘层由于降温引起的轴向拉应力和剪应力为:

$$\sigma_t = \sigma_p = 130.2 \text{ MPa}$$

$$\tau_t = S_1 \sigma_t / S_2 = 18.304 \text{ kPa}$$

式中:  $S_1$  为 CICC 导体匝间绝缘层截面积;  $S_2$  为 CS 第一匝裸缆外表面积。

计算时按线圈第一匝位置  $R=580$  mm 考虑。

### 3.2 降温引起的变形

由降温引起的 CS 线圈的径向位移  $U_{rw}$  按不锈钢考虑, 轴向位移  $U_{zw}$  按绝缘层和不锈钢分开考虑。

$$U_{rw} = D \times \epsilon_{316LN} = 1494 \times 0.003 = 4.482 \text{ mm}$$

$$U_{zw} = \delta_{S-glass} \times \epsilon_{S-glass} + \delta_{316LN} \times \epsilon_{316LN} = 500 \times 0.0009 + 2210 \times 0.003 = 7.08 \text{ mm}$$

式中:  $\delta$  为材料厚度。

## 4 结论

有关资料<sup>[3]</sup>表明, 在 4.2K 温度下 316LN 的  $\sigma_s = 860 \text{ MPa}$ , S-glass epoxy 的  $\sigma_b = 1500 \text{ MPa}$ , Epoxy 的粘结剪切强度  $\tau_b = 9.8 \text{ MPa}$ , 线圈复合体的等效极限应力  $\sigma_{eff} = 627 \text{ MPa}$ 。经与各项应力计算的叠加值相比较可知, 线圈受力在安全范围之内, 鉴于线圈内绝缘材料 Epoxy 粘结线匝的重要性, 建议使用强度更高且膨胀系数与 316LN 更为接近的胶粘剂。这样, 一方面可以增强线圈整体强度, 另一方面可以降低因材料膨胀系数差而引起的间拱和匝间应力。其具体数值需根据受力更为复杂的 TF 线圈来确定。

由于电动力引起的变形较小, 所以, 线圈的实际位移可以认为是降温引起的。CS 线圈的径向、轴向最大位移分别为  $U_{rw} = 4.482 \text{ mm}$ ,  $U_{zw} = 7.08 \text{ mm}$ , 这两个方向的位移量是最终确定 CS 与 TF 内拱之间径向间隙和 CS 支撑结构的依据。

### 参考文献:

- [1] B. Z. Li, et al., Conductor Fabrication for the HT-7U Model Coil. Fusion Technology, Proc. Symp. Marseille, 1988, Vol. 2, 775~778
- [2] Simon, N. J. and Reed, R. P., Design of 316LN-type alloys. Advances in Cryogenic Engineering Materials, Plenum, New York, 1988, Vol. 34, 165~172

## Analysis on the strength of the central solenoid coil for the HT-7U large superconducting Tokamak device

CAO Yun-lu, WU Wei-yue, WENG Pei-de, WU Song-tao

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences)

**Abstract:** The CS coil is considered from the structural viewpoint as a thick composite cylinder in this paper. The stress and strain induced by various loads of the CS are calculated in detail. According to the calculating results, under the axial pre-load the strength of the CS by self-supporting in the radial direction and the insulation layers are all satisfied to design requirements.

**Key words:** Tokamak; magnet; stress; strain; composite