

超导电流传输线导体等效弹性模量的预测

王建青¹, 刘利斌², 武松涛³, 邵延君¹, 刘永姜¹

(1. 中北大学 机械工程与自动化学院, 山西 太原 030051;

2. 济宁职业技术学院, 山东 济宁 272037;

3. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要:国际热核聚变实验堆(ITER)超导电流传输线导体的内部电缆体由超导体股线和纯铜股线经多级绞绕后复合而成,相对柔软。在传统复合材料理论的基础上,对 ITER 超导电流传输线导体等效弹性模量进行理论预测:预测一,只考虑电缆体外的不锈钢导管、双绝缘和双屏蔽层;预测二,忽略柔性电缆体的影响,但考虑其内部氦管;预测三,假设电缆体呈各向同性,弹性模量取 1~10 GPa;预测四,利用均匀化理论分析电缆体的等效弹性模量,复合材料损伤理论分析超导电缆与中心氦管之间、电缆复合体和不锈钢导管之间界面情况。预测值与参考实验值进行比较证实,预测四较符合实际情况,电缆体对整个超导电流传输线导体等效弹性模量的影响较小。

关键词:国际热核聚变实验堆;超导电流传输线;复合材料;等效弹性模量

中图分类号:TL631.24

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)09-0851-05

Predictions of Equivalent Modulus of Superconducting Busbar

WANG Jian-qing¹, LIU Li-bin², WU Song-tao³,

SHAO Yan-jun¹, LIU Yong-jiang¹

(1. College of Mechanical Engineering and Automatization, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Jining Vocational Technology College, Jining 272037, China;

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

Abstract: The cable body of the superconducting busbar conductor for ITER by the multistage twist of the superconductivity strand and the pure copper strand is quite soft. How to process it affects the equivalent prediction of the entire conductor performance. According to the traditional composite theory, the following several predictions were carried: only consider the functions of the stainless steel conduit outside the cable body, the double insulation and the double shielding layer; the influence of the flexible cable body is neglect, so only consider the function of its internal helium tube; the material nature of the cable body is assumed the isotropism, which the elasticity modulus is 1-10 GPa (here taking 2 GPa); combining the homogenization theory with the composite damage theory. Finally, the equivalent elasticity modulus and the reference experimental moduli were compared. The result of the last prediction is relatively reasonable and

the influence of the cable body to the superconducting busbar conductor is very small.

Key words: ITER; superconducting busbar; composite; equivalent elasticity modulus

在国际热核聚变实验堆(ITER)装置中,超导电流传输线导体是超导磁体系统工作时的电流通道,其内部导体采用 4.5 K 超临界氦冷却的 NbTi 管装电缆超导体(CICC)。CICC 导体具有冷却周界大、超导稳定性好、结构自支撑强、绝缘工艺性好等特点^[1]。CICC 导体的结构特点是采用绞缆工艺把超导体股线制成在空间充分易位的多级子缆,中间有螺旋状半开的不锈钢氦管,一并装入不锈钢导管中。超临界氦流过中心冷却管的同时,进入股线之间的间隙,使超导体股线充分冷却。

在超导电流传输线导体结构设计时,须考虑降温、升温过程中超导电流传输线导体的变形量和相连线圈末端位移量对超导电流传输线导体的影响,因此,需掌握超导电流传输线导体的材料性能。根据超导电流传输线导体横截面(图 1)的结构特点,内部电缆体由超导体股线和纯铜股线经多级绞缆复合而成。氦管、电缆体、不锈钢导管、双绝缘层和双屏蔽层构成层状复合材料结构。本工作在传统复合材料理论的基础上,对 ITER 超导电流传输线导体等效弹性模量进行预测。

1 基于传统复合材料理论的预测

根据传统复合材料力学理论^[2-3],层状复合材料的弹性模量 E_c 为:

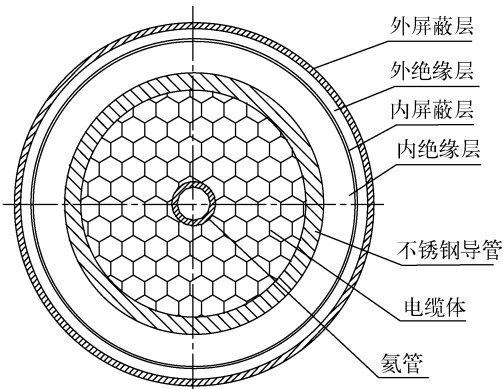


图 1 超导电流传输线导体横截面图

Fig. 1 Cross section of superconducting busbar conductor

$$E_c = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (1)$$

式中: V_f 为纤维在复合材料中所占的体积比; E_f 为纤维的弹性模量; E_m 为基体的弹性模量。

对泊松比相近的组成材料,其纤维方向的等效热膨胀系数 α_c 为:

$$\alpha_c = \frac{E_f}{E_c} \alpha_f V_f + \frac{E_m}{E_c} \alpha_m (1 - V_f) \quad (2)$$

式中: α_f 为增强纤维的热膨胀系数; α_m 为基体的热膨胀系数。

根据质量守恒原则可知:

$$\rho = \frac{m}{V} = \sum_i \rho_i V_i \quad (3)$$

式中: ρ 为等效密度; m 为总质量; V 为总体积; V_i 为 i 组分体积比; ρ_i 为 i 组分密度。

根据超导电流传输线导体结构,将其分解为 8 级复合:第 1 级复合为由 NbTi 超导丝与 Cu 稳定基体复合而成的超导体股线;第 2 级复合为由超导体股线与纯铜股线经多级绞缆复合而成的电缆体;第 3 级复合为由电缆体与中心 316LN 不锈钢氦管复合而成的电缆复合体;第 4 级复合为由电缆复合体与 316LN 不锈钢导管复合而成的 CICC 超导体;第 5 级复合为由 CICC 超导体与环氧基热固性玻璃钢 G10 内绝缘层复合而成的绝缘 CICC 超导体;第 6 级复合为由绝缘 CICC 超导体与 316LN 不锈钢内屏蔽层复合而成的屏蔽 CICC 超导体;第 7 级复合是由屏蔽 CICC 超导体与环氧基热固性玻璃钢 G10 外绝缘层复合而成的绝缘增强型 CICC 超导体;第 8 级复合是由绝缘增强型 CICC 超导体与 316LN 不锈钢外屏蔽层复合而成的超导电流传输线导体。各组分的密度为: Cu, 8 900 kg/m³; NbTi, 5 860 kg/m³; 316LN, 7 900 kg/m³; G10, 1 800 kg/m³。表 1 列出了各种组分在液氦温度下的材料性质。

带孔隙的超导电缆相对柔软,其不同的处理方法将影响整个导体性能的等效预测。以下分别对 3 种处理方法进行预测。

1) 不考虑电缆体及其内部的氦管,只考虑电缆体外的不锈钢导管、双绝缘和双屏蔽层的作用,预测结果列于表 2 (V_{void} 为孔隙所占体积

比, V_m 为基体所占体积比)。

表 1 各种组分在液氦温度下的材料性质
Table 1 Material qualities of various components under liquid helium temperature

材料	弹性模量/GPa	泊松比	热膨胀系数/%
Cu	138	0.338	-0.295
NbTi	82	0.333	-0.188
316LN	207	0.282	-0.306
G10	35.9	0.3	-0.713

表 2 超导电流传输线导体等效弹性模量预测一
Table 2 Predictions of equivalent modulus of superconducting busbar I

复合级数	V_{void}	V_f	V_m	等效弹性模量/ GPa
第 1 级复合				
第 2 级复合				
第 3 级复合				
第 4 级复合				
第 5 级复合		0.29	0.71	85.5
第 6 级复合		0.97	0.03	89.2
第 7 级复合		0.79	0.21	78.0
第 8 级复合		0.9	0.1	90.9

2) 认为柔性电缆体的影响可忽略,但考虑其内部氦管的作用,预测结果列于表 3 中的预测二。

3) 假设电缆体的材料性质呈各向同性,弹性模量取值为 1~10 GPa^[4](为使预测结果更接近实验值,弹性模量取 2 GPa),预测结果列于表 3 中的预测三。

2 基于均匀化理论与复合材料损伤理论的预测

电缆体由超导体和纯铜股线经多级绞缆后复合而成,在宏观上呈均质结构,可看成由许多具有细观尺度的单胞(5 根超导体与 2.9 根纯铜股线构成的子缆)在空间上周期性重复堆积而成。对可用均质的宏观结构和非均质的、且具有周期性分布特点的细观结构来描述的复合材料,其等效材料常数的分析与预测问题可转化为细观均匀化问题和宏观均匀化问题。这两个均匀化的问题可采用成熟的、基于连续介质理论的有限元来求解^[5-6]。

电缆体与中心材质为 316LN 不锈钢的氦管和外部的不锈钢导管之间的似联结非联结的状态,采用复合材料损伤力学中的界面脱胶模型处理,认为是完全脱胶状态。

首先,利用均匀化理论计算电缆体的等效弹性模量^[7-9],根据宏观应力张量 $\sigma_{ij}^H = E_{ijkl}^H \cdot \frac{\partial \mu_k^{(0)}}{\partial x_l}$ (H 表示均匀化等效变量, μ 为位移, i, j, k, l 取值范围均为 1、2、3),复合材料等效弹性性能可由其正交各向异性弹性体的本构关系确定,即:

表 3 超导电流传输线导体等效弹性模量预测二、三

Table 3 Predictions of equivalent modulus of superconducting busbar II and III

复合级数	V_{void}	V_f	V_m	等效模量/GPa	
				预测二	预测三
第 1 级复合		0.2	Cu:0.8		
第 2 级复合	0.34	0.417 7	Cu:0.242		2.0
第 3 级复合		0.983 0	0.017 0	3.5	5.5
第 4 级复合		0.761 0	0.239 0	52.2	53.7
第 5 级复合		0.634 6	0.365 4	46.2	47.2
第 6 级复合		0.986 6	0.013 4	48.4	49.3
第 7 级复合		0.877 8	0.122 2	46.8	47.7
第 8 级复合		0.939 8	0.060 2	56.5	57.3

$$\{\sigma\} = [K] \cdot \{\varepsilon\} \quad (4)$$

$$\text{其中, } \{\sigma\} = \begin{pmatrix} \langle\sigma_x\rangle \\ \langle\sigma_y\rangle \\ \langle\sigma_z\rangle \end{pmatrix}, [K] = \begin{pmatrix} E_{xx}^* & E_{xy}^* & E_{xz}^* \\ E_{yx}^* & E_{yy}^* & E_{yz}^* \\ E_{zx}^* & E_{zy}^* & E_{zz}^* \end{pmatrix},$$

$$\{\varepsilon\} = \begin{pmatrix} \langle\varepsilon_x\rangle \\ \langle\varepsilon_y\rangle \\ \langle\varepsilon_z\rangle \end{pmatrix}.$$

式中: $\langle\sigma_x\rangle$ 、 $\langle\sigma_y\rangle$ 和 $\langle\sigma_z\rangle$ 为 3 个方向的等效平均应力; $\langle\varepsilon_x\rangle$ 、 $\langle\varepsilon_y\rangle$ 和 $\langle\varepsilon_z\rangle$ 为 3 个方向的等效平均应变; $[K]$ 中各元素为表征正交各向异性体弹性特征的等效弹性模量系数。

对 $[K]$ 求逆, 可得:

$$\begin{pmatrix} \langle\varepsilon_x\rangle \\ \langle\varepsilon_y\rangle \\ \langle\varepsilon_z\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_{xx}^*} & -\frac{\nu_{yx}^*}{E_{yy}^*} & -\frac{\nu_{zx}^*}{E_{zz}^*} \\ -\frac{\nu_{xy}^*}{E_{xx}^*} & \frac{1}{E_{yy}^*} & -\frac{\nu_{zy}^*}{E_{zz}^*} \\ -\frac{\nu_{xz}^*}{E_{xx}^*} & \frac{\nu_{yz}^*}{E_{yy}^*} & \frac{1}{E_{zz}^*} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \langle\sigma_x\rangle \\ \langle\sigma_y\rangle \\ \langle\sigma_z\rangle \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: E_{xx}^* 、 E_{yy}^* 和 E_{zz}^* 为 3 个方向的等效杨氏模量; ν_{yx}^* 、 ν_{xy}^* 和 ν_{zx}^* 为 3 个方向的等效泊松比系数。

对于正交各向异性弹性的复合材料, 满足

$$\frac{\nu_{ij}^*}{E_{ii}^*} = \frac{\nu_{ji}^*}{E_{jj}^*}, (i, j = x, y, z, \text{ 且 } i \neq j), \text{ 即: } E_{xx}^* \cdot \nu_{yx}^* = E_{yy}^* \cdot \nu_{xy}^*, E_{yy}^* \cdot \nu_{zy}^* = E_{zz}^* \cdot \nu_{yz}^*, E_{zz}^* \cdot \nu_{zx}^* = E_{xx}^* \cdot \nu_{xz}^*,$$

把这些关系式代入式(5), 得出方程组为 (E_{xx}^* 、 E_{yy}^* 、 E_{zz}^* 分别简写为 E_x^* 、 E_y^* 和 E_z^*):

$$\begin{cases} \langle\varepsilon_x\rangle = \frac{1}{E_x^*} \langle\sigma_x\rangle - \frac{\nu_{xy}^*}{E_x^*} \langle\sigma_y\rangle - \frac{\nu_{xz}^*}{E_x^*} \langle\sigma_z\rangle \\ \langle\varepsilon_y\rangle = -\frac{\nu_{xy}^*}{E_x^*} \langle\sigma_x\rangle + \frac{1}{E_y^*} \langle\sigma_y\rangle - \frac{\nu_{yz}^*}{E_y^*} \langle\sigma_z\rangle \\ \langle\varepsilon_z\rangle = -\frac{\nu_{xz}^*}{E_x^*} \langle\sigma_x\rangle - \frac{\nu_{yz}^*}{E_y^*} \langle\sigma_y\rangle + \frac{1}{E_z^*} \langle\sigma_z\rangle \end{cases} \quad (6)$$

假设在复合材料的单胞上沿 x 方向上施加微小均匀位移 $\Delta\mu_x$, 则产生 x 向的等效平均应变 $\langle\varepsilon_x\rangle = \pm \frac{\Delta\mu_x}{e_x}$ ($2e_x$ 为单胞沿 x 方向上的长度)。由于复合材料单胞结构的复杂性, 难以用解析法分析求解等效平均应力。本工作采用三维有限元分析软件求出单向平均等效应变 $\langle\varepsilon_x\rangle$ 作用下单胞的应力分布, 并在所对应划分的有限元单元的体积上进行平均, 从而求得 x 向等效平均应力 $\langle\sigma_x\rangle$ 。同理, 求出在单向平均等效

应变 $\langle\varepsilon_y\rangle$ 和 $\langle\varepsilon_z\rangle$ 作用下的等效平均应力 $\langle\sigma_y\rangle$ 和 $\langle\sigma_z\rangle$ 。将平均等效应变和应力代入式(6), 可求出等效弹性系数 E_x^* 、 E_y^* 、 E_z^* 、 ν_{xy}^* 、 ν_{yz}^* 和 ν_{xz}^* 。

利用大型有限元软件 ANSYS 求解电缆体在两种边界条件下的应力分布(边界条件 1: 在 z 方向边界有微小单位变形 $\Delta\mu_z$, y 和 x 方向边界面的位移为零; 边界条件 2: 在 x 方向边界有微小单位变形 $\Delta\mu_x$, y 和 z 方向边界面的位移为零), 同时结合应力平均法求得各方向的等效平均应力, 从而获得该材料的等效弹性模量。计算结果为: E_x , 31.2 GPa; E_y , 31.1 GPa; E_z , 65.4 GPa (z 为沿纤维方向, x 和 y 为垂直于纤维方向)。

从损伤力学^[10]的角度出发, 分析超导电缆与中心氦管之间的似联结非联结的状态。可把它看成复合材料纤维与基体之间的脱胶状态, 即将 CICC 导体内部电缆整体视为 1 种内部有损伤的材料, 则:

$$\frac{E}{E_{\text{eff}}} = \frac{1}{1 + 2Q \frac{L_d}{L} \cdot \frac{E_f}{E_{\text{eff}}}} \quad (7)$$

式中: E_f 为纤维弹性模量, 65.4 GPa; E_{eff} 为无损伤时等效弹性模量, 5.5 GPa (3.5 GPa); L_d 为超导电缆长度; L 为脱胶长度 ($0 \leq L_d \leq L \leq 1$, 当 $L_d/L = 1$ 时, 认为电缆与内部氦管之间的联结相当于完全脱胶状态); $Q = (\text{氦管直径}/\text{电缆直径})^2$; 氦管直径为 8 mm, 电缆直径为 41 mm。

根据式(7)可得第 3 级复合弹性模量 $E = 2.9$ GPa (1.4 GPa)。

同理, 电缆复合体和不锈钢导管之间的似联结非联结的状态也可视为 1 种内部有损伤的材料。已知 $E_f = 2.9$ GPa (1.4 GPa); $E_{\text{eff}} = 53.7$ GPa (52.2 GPa); $0 \leq L_d/L \leq 1$, 取极端情况 1, 认为电缆复合体与外部不锈钢导管之间的联结相当于完全脱胶状态; 电缆直径为 41 mm, 不锈钢导管直径为 47 mm, 根据式(7)可得第 4 级复合弹性模量 $E = 49.6$ GPa (50.2 GPa), 超导电流传输线导体的等效弹性模量(预测四)列于表 4。

表 5 列出了上述几种观点计算的超导电流传输线的等效弹性模量与参考实验值的比较结果。可见, 预测四得到的结果与参考实验值最相近, 两者之间的相对偏差最小。

表 4 超导电流传输线导体等效弹性模量预测四

Table 4 Predictions of equivalent modulus of superconducting busbar IV

复合级数	体积比			等效弹性模量/GPa
	V_{void}	V_f	V_m	
第 1 级复合				
第 2 级复合				
第 3 级复合				2.9(1.4)
第 4 级复合				49.6(50.2)
第 5 级复合	0.634 6	0.365 4		44.6(45.0)
第 6 级复合	0.986 6	0.013 4		46.8(47.2)
第 7 级复合	0.877 8	0.122 2		45.5(45.8)
第 8 级复合	0.939 8	0.060 2		55.2(55.5)

同时,利用式(2)和(3)计算得到:超导电流传输线导体的等效热膨胀系数为-0.412%,考虑孔隙作用,等效密度为 4 504 kg/m³。

表 5 超导电流传输线导体等效弹性模量预测结果比较

Table 5 Comparison with several equivalent modulus results of superconducting busbar

参考实验值	等效弹性模量/GPa			
	预测一	预测二	预测三	预测四
53	90.9	56.5	57.3	55.2(55.5)
	(72%)	(6.6%)	(8.1%)	(4.2%)(4.7%)

注:括号内为预测值与参考实验值间的相对偏差

3 结论

本工作对超导电流传输线导体等效弹性模量进行了几种理论预测。通过对预测值与实验参考值的比较可知,在传统复合材料理论上,利用均匀化理论和复合材料损伤力学理论预测的超导电流传输线导体等效模量较为符合实际情况,为 55.2 GPa(55.5 GPa)。与 316LN 不锈钢、G10 绝缘材料相比,由超导体股线和纯铜股线经多级绞缆复合而成的电缆体对整个导体

性能影响很小。

参考文献:

- [1] Detailed description and specifications of ITER feeders[DB/CD]. [S. l.]: [s. n.], 2001.
- [2] 布赖恩·哈里斯. 工程复合材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] 范钦珊. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 368-385.
- [4] ITER International Team. Detailed description and specifications of ITER feeders[R]. [S. l.]: [s. n.], 2001.
- [5] HASSANI B, HINTON E. A review of homogenization and topology optimization I: Homogenization theory for media with periodic structure [J]. Computers and Structures, 1998, 69: 707-717.
- [6] HASSANI B, HINTON E. A review of homogenization and topology optimization II: Analytical and numerical solution of homogenization equations[J]. Computers and Structures, 1998, 69: 719-738.
- [7] 陈文革, 武松涛. 超导磁体等效材料参数的有限元预测[J]. 应用力学学报, 2003, 20(2): 83-87. CHEN Wenge, WU Songtao. Prediction of effective material parameters of superconducting magnet by finite element method [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2003, 20(2): 83-87(in Chinese).
- [8] SHEN L X, LI J. Effective moduli of composites reinforced by particle or fiber with an inhomogeneous interphase[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40: 1 393-1 409.
- [9] SUN W, TZENG J T. Effective mechanical properties of EM composite conductors: An analytical and finite element modeling approach[J]. Composite Structures, 2002, 58: 411-421.
- [10] 杨光松. 损伤力学与复合材料损伤[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.