

EAST PFCs 气流烘烤设计及流体与传热计算

万小刚¹, 姚达毛¹, 李映斌²

(1. 中科院等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031; 2. 苏州热工研究院, 江苏 苏州 215004)

摘要:根据聚变反应对真空度的要求, 在 EAST 超导托卡马克装置中采用气流烘烤技术来实现对 PFCs 的真空烘烤。对 PFCs 烘烤进行了原理设计, 对介质气体的参数进行了选择, 分析并计算了烘烤时 PFCs 内部气体流动和传热状况, 最后给出了模拟结果。

关键词:PFCs; 真空烘烤; 计算流体; 传热

中图分类号:TL631, TK124 **文献标识码:**A **文章编号:**0258-0918(2006)02-0113-05

Design and thermal-hydraulic calculation for EAST PFCs' baking

WAN Xiao-gang¹, YAO Da-mao¹, LI Ying-bin²

(1. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Science, Hefei of Anhui Prov. 230031, China;

2. Suzhou Nuclear Power Research Institute, Suzhou of Jiangsu Prov. 215004, China)

Abstract: According to the vacuum requirements for fusion in a tokamak device, we adopted a kind of gas flow baking technique in EAST. This paper presented the sketch design for EAST PFCs' baking, selected the specifications for the working gas, calculated the hydraulic and thermal conditions in PFCs under baking, and simulated the results.

Key words: PFCs; vacuum baking; CFD; heat transfer

EAST(Experimental Advanced Superconducting Tokamak)超导托卡马克是中国目前正在建造的一个全超导磁约束核聚变实验装置。真空室是 EAST 装置的核心部件, 也是聚变反应发生的场所, 它是一个截面为 D 型的环形双层不锈钢结构, 由 16 段拼焊而成。其内部沿环向和角向布满石墨瓦, 石墨瓦的背面与铜热沉相连, 从而构成真空室内部部件, 也称面向

等离子体部件, 简称 PFCs (Plasma Facing Components), 其截面形状和位置如图 1 所示。在进行等离子体放电实验时, 等离子体将在真空室内部形成一个截面为近似钝角三角形的环形磁流体, 而 PFCs 则从外面将磁流体包围住。

根据聚变反应条件要求, EAST 真空室设计极限真空度高达 1.3×10^{-5} Pa。同时, 由于在常温下材料大都吸附了大量气体和杂质, 为

收稿日期: 2005-10-08; 修回日期: 2005-12-22

作者简介: 万小刚(1974—), 男, 安徽肥东人, 硕士研究生, 从事热系统设计与分析研究

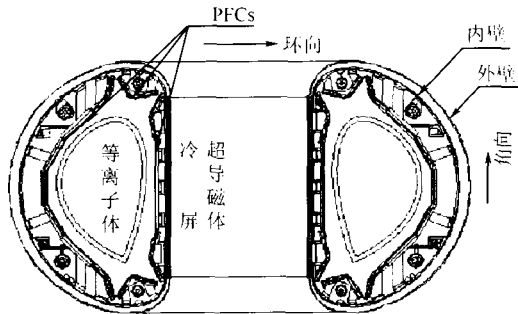


图 1 EAST 真空室及内部部件剖面图

Fig. 1 Section of EAST vacuum room and inter parts

此需要在实验前对真空室本体及其内部部件进行真空烘烤,以使得聚变反应能在一个清洁的超高真空环境顺利进行。特别在真空室内部,由于 PFCs 吸附气体和杂质质量较大,需要用更高的温度加以烘烤,EAST 工程设计时确定 PFCs 要烘烤到 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1],所以需要对 PFCs 进行真空烘烤设计,并最终建造一套烘烤系统。

1 PFCs 真空烘烤设计

等离子体在进行放电时,其中心温度高达 1 亿 K 以上,虽然等离子体的温度由内到外呈指数下降^[2],但边缘等离子体仍然有很高的温度。石墨瓦直接面向高温等离子体,将要承载很大的热负荷,所以要通过与石墨瓦背面紧密连接的热沉来吸收并转移大量热量,从而避免装置遭到高温毁坏。所以我们将 PFCs 冷却结构和烘烤结构同时加以考虑来设计。

1.1 PFC 的典型结构

为了实现对 PFCs 冷却,同时尽可能小地占用真空室内部的宝贵空间,我们考虑在 PFCs 的铜热沉上直接加工冷却通道,而 VENTEC 深孔钻系统正好可以提供长达 1 m 以上细长长孔的加工。具体的冷却结构是这样的:在厚度为 20 mm 的热沉上沿纵向加工较深的盲孔,直径为 12mm,端面用堵头端封住,然后在深孔的垂直方向钻孔,用连接管将回路连通,形成冷却回路^[3]。图 2 为处于真空室内侧直线段处的 PFC 结构(PFCs 在环向分也分成 16 段),后面的计算和分析都是建立在这个典型结构上。

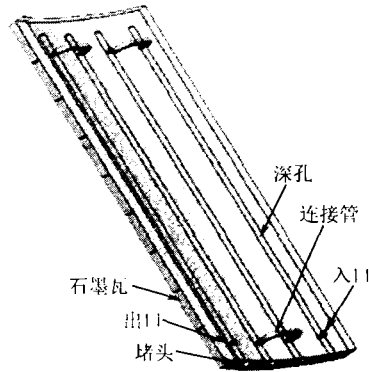


图 2 EAST PFC 典型结构

Fig. 2 Model frame of EAST PFC

1.2 EAST PFCs 烘烤原理设计

针对托卡马克装置的真空烘烤,在国际上采用的方案很多,其中采用气流烘烤技术装置主要有:D III-D、KSTAR、SST-1 等,并已经在这方面作了一定的研究^[4-6]。我们在 EAST 装置上也尝试采用该项技术来烘烤 PFCs,即通过在 PFCs 的冷却通道内通入高温氮气流来实现对 PFCs 的烘烤。系统主要由风机和氮气加热、冷却装置等构成,见图 3。

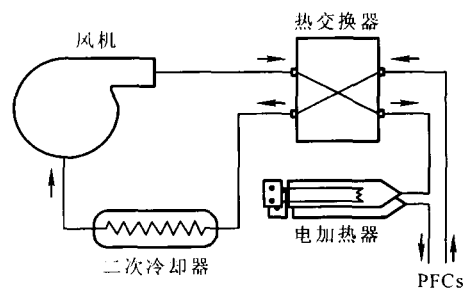


图 3 氮气烘烤系统简图

Fig. 3 Figure of nitrogen roasting system

根据设计的烘烤原理,需要对烘烤中的流体参数进行选择和设计。综合考虑气体在压缩状态下有较大的换热流量和 PFCs 管路系统的绝对安全、可靠性,我们确定 5 个大气压作为管路气体压力安全上限值。参考管道设计手册对 PFCs 内气体的流速作出选择,初定气体流速为: $U=20\text{ m/s}$ 。

氮气作为工作气体,其密度、比热、黏度等

参数受温度和压力影响较大,表 1 给出了氮气在 350 °C、0.5 MPa 工作条件下的物性参数。

表 1 350 °C、0.5 MPa 下氮气的物性参数
Table 1 nitrogen character at 350 °C、0.5 MPa

| 分类 | 物性参数 |
|----------------------------------------------------------------|--------|
| 密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | 2.73 |
| 比热 $C_p / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$ | 1.08 |
| 黏度 $\nu \times 10^6 / (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ | 55.79 |
| 导热系数 $k / (\text{W} \cdot \text{mK}^{-1})$ | 0.0476 |

2 PFCs 烘烤结构中的流体与传热计算

2.1 建立 PFCs 传热模型

正确地建立 PFCs 在整个烘烤过程中的传热模型,对下面的热分析计算至关重要。由于在正常烘烤条件下,超导托卡马克装置尚未开始降温,即装置处于室温中,所以可以将冷屏以外的部件设置为室温;同时需要说明的是,烘烤期间真空室内部不存在高温等离子体,这将给计算带来方便。

通过对气体导热原理的研究,得到气体导热系数有如下关系式:

$$k \propto nc\lambda^{[7]}$$

由于托卡马克装置真空室以及冷屏内部都具有较高的真空度,残余气体单位体积内的分子数量 n 很小,在分子自由程 λ 和平均速度 c 数值一定的条件下,残余气体的导热系数 k 很小,所以可以忽略气体的导热;同时,由于在均匀烘烤过程中所有 PFCs 的石墨瓦温度基本保持相同,可以认为它们之间不存在热量的交换,所以面对等离子体区域的石墨瓦一侧可当作绝热壁来处理。由此得到图 4 的传热模型。

2.2 PFCs 内部流体阻力计算

首先来计算雷诺数:

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu} = 20\ 400$$

显然流动处于紊流区。由此可以在莫迪图上^[8]很方便地得到管壁摩擦阻力系数:

$$f(Re, \frac{\Delta}{D}) \approx 0.4$$

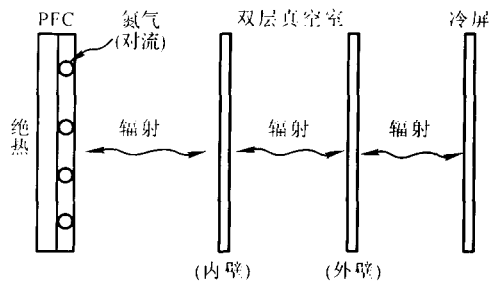


图 4 EAST PFC 在烘烤时的传热模型

Fig. 4 Heat transfer model of roasting EAST PFC

统计整个 PFC 流道管路的直段长度加弯头处的当量长度,计算得到气体在流道内的压力损失为:

$$\Delta P_{yl} = f \frac{l}{D} \frac{\rho U^2}{2} \approx 1.2 \times 10^4 \text{ Pa}$$

此压力损失的计算结果将给工程设计时风机的压头损失计算提供依据。

2.3 PFCs 烘烤传热计算

根据上面的传热模型,分别建立相邻部分之间的传热方程,然后通过热平衡来计算各部分在烘烤过程中能达到的温度。

2.3.1 PFCs 内部对流换热量计算

由 3.2 的计算结果得知 PFC 内部的换热为紊流对流换热,可根据文献[9]中提供的公式来进行换热计算换热量 Q_1 (后面的辐射计算公式也来自于文献[9])。

$$Nuf = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.3}$$

$$\alpha = \frac{\lambda Nuf}{D}$$

$$Q_1 = \alpha(T_N - T)F$$

2.3.2 铜板对真空室内壁辐射换热量计算

设不锈钢真空室内壁温度为 T_1 ,铜板平均温度 $T = 623 \text{ K}$,则辐射铜板向内壁辐射换能量为:

$$Q_2 = C(T^4 - T_1^4)F_1 / (1/\epsilon_1 + F_1/F_2(1/\epsilon_2 - 1))$$

2.3.3 真空室内壁对外壁的辐射换热量计算

设真空室外壁的温度为 T_2 ,则温度为 T_1 的内壁向外壁辐射换热量为:

$$Q_3 = C(T_1^4 - T_2^4)F_2 / (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1)$$

2.3.4 真空室外壁对冷屏的辐射换热量计算

已知冷屏温度为室温辐射换热量为:

$$Q_1 = C(T_2^4 - 293^4)F_3 / (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1)$$

2.3.5 建立热平衡方程求解平均温度

在稳态条件下,在上述四项换热之间建立热平衡,即: $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4$

根据已知初始条件和边界条件联立方程组求解得:

$$T_N = 625.3 \text{ K}(352.3 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$T_1 = 566.4 \text{ K}(293.4 \text{ }^\circ\text{C})$$

$$T_2 = 484.7 \text{ K}(211.7 \text{ }^\circ\text{C})$$

2.3.6 PFC 在烘烤时的辐射功率计算

在稳态传热过程中 350 °C 的热沉将在单位时间内向 293.4 °C 的真空室内壁辐射恒定的热量,由公式

$$q_{1,2} = C(T^4 - T_1^4) / (1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1)$$

计算出辐射功率约为 350 W/m²,所以辐射面积为 0.5 m² 的 PFC,其辐射功率将达到 175 W。

3 数值模拟与结论

对于 PFC 内部流场与温度分布目前还无法通过理论公式来计算,建立在有限差分基础上的计算流体科学,借助现代计算机工具却可以给出一个比较满意的结果。

计算标准的 $k-\epsilon$ 湍流模型属二方程模型, k 和 ϵ 都是由相应的输运微分方程确定的,模型直接将二阶相关量与时均量建立关系,并且采用了布西内斯克关于雷诺应力和平均速度梯度之间近似线性关系的论述。尤其适合于计算管道中的湍流流动,不仅对湍流有总体描述,并且考虑到了湍流的流动与扩散参数的输运效果,以及湍流的产生与破坏。

下面两个输运方程,一个是湍流的动能方程,另一个是湍流的能量耗散方程^[10]:

$$\rho U \frac{\partial k}{\partial x} + \rho V \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho \epsilon_m}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \rho \epsilon_m \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - \rho \epsilon$$

$$\rho U \frac{\partial \epsilon}{\partial x} + \rho V \frac{\partial \epsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho \epsilon_m}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial y} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \rho \epsilon_m \left(\frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

这个方程包括五个可调的常数,对较大范围的湍流均适用。通过设定边界条件,给出初始化条件就可以用此种方法来对 PFC 紊流换热过程进行数值模拟。

为了方便建模和计算,有必要将模型进行简化,即将折弯角度为 22.5° 的 PFC 展平,用一块与热沉等大的石墨代替多个块状石墨瓦。热边界条件和初始条件与上面的计算相同。下面给出了 PFC 在 350 °C 稳态烘烤时,其内部流场以及 PFC 上温度场分布的模拟结果。

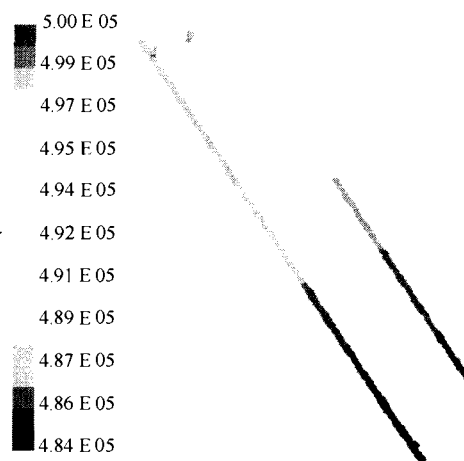


图 5 PFC 内部流场压力分布
Fig. 5 Pressure distributing of inter PFC

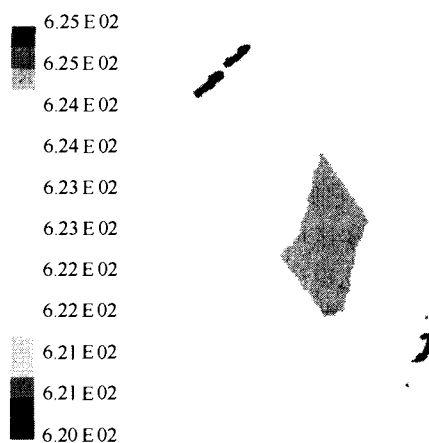


图 6 PFC 稳态温度场分布
Fig. 6 Reliable temperature distributing

图 5 和图 6 的模拟结果表明,流体在换热过程中出口有约 0.15×10^5 Pa 的压降,与本文 3.2 节近似计算的结果相符;同时,温差控制在 5°C 以内,说明在整个 PFC 上温度分布也比较均匀,满足烘烤设计要求。

参考文献:

- [1] 石秉仁. 磁约束聚变——原理与实践[M]. 北京:原子能出版社,1999:154-163.
- [2] Weng P D, et al. The engineering design of the HT-7U tokamak[J]. Fusion Engineering and Design, 2001, 58-59:851-855.
- [3] Yao Damao, et al. EAST(HT-7U) In-vessel Components Design. The 23rd Symposium on Fusion Technology (SOFT), 2004.
- [4] Anderson P M, et al. Optimized baking of the DIII-D vessel[C]. 18th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering, October 25-29, 1999.
- [5] Cho S, et al. Thermohydraulic design of the KSTAR vacuum vessel. Fusion Engineering and Design, 2001.
- [6] Paritosh Chaudhuri, et al. Design and thermal-hydraulic analysis of PFC baking for SST-1 Tokamak. Fusion Engineering and Design, 2001, 55:521-534.
- [7] Incropera F P, Dewitt D P. Fundamentals of Heat and Mass Transfer[M], 1996:20-25.
- [8] 景思睿,等编著. 流体力学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001:177-178.
- [9] 杨世铭,陶文铨,编著. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,1998.
- [10] 陶文铨,编著. 数值传热学[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988:431-439.