

CFETR TF Dummy 线圈 VPI 系统设计

薛健健^{1,2}, 吴杰峰¹, 文伟^{1†}, 武玉¹, 闫朝辉^{1,2}, 俞小伍¹, 商明明³

1. 中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031, 中国;

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026, 中国;

3. 合肥聚能电物理高技术开发有限公司, 合肥 230031, 中国

收稿日期: 2023-05-11; 接收日期: 2023-05-31

【摘要】 TF 线圈为大型“D”形轮廓, 由高、中、低场线圈通过套装和堆叠而成, 需要分别对高中低场线圈进行绝缘处理, 套装后填充高中低场之间的间隙(10 mm~120 mm), 包绕对地绝缘后, 再对间隙填充层进行绝缘处理. 为了充分验证绕组制造的工艺, 采用一个以中场绕组尺寸的 Dummy 绕组进行真空压力浸渍(Vacuum Pressure Impregnation, VPI)完成线圈绝缘. 针对 VPI 过程中真空环境、外部压力、固化温度、时间控制等方面的技术难点, 完成 TF Dummy 线圈 VPI 系统设计. 采用 CATIA 软件对 Dummy 线圈 VPI 系统进行建模, 合理设计子系统, 有效缩短 VPI 过程的时间, 保证绝缘质量. 通过每个子系统的理论分析计算, 更精确地选择 VPI 系统配备的设备型号, CFETR TF Dummy 线圈 VPI 系统的设计和工艺的验证对后续 TF 线圈制造至关重要.

关键词: CFETR, TF 线圈, VPI 系统, 分析计算

PACS: 02.60.Cb, 61.82.Ms, 74.70.-b

DOI: 10.13380/j.ltpl.2023.03.004

Design of CFETR TF Dummy Coil VPI System

XUE Jianjian^{1,2}, WU Jiefeng¹, WEN Wei^{1†}, WU Yu¹,

YAN Zhaohui^{1,2}, YU Xiaowu¹, SHANG Mingming³

1. Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Hefei Juneng Electrophysics High Technology Development Co., Ltd. Hefei 2300031, China

Received date: 2023-05-11; accepted date: 2023-05-31

【Abstract】 TF coil is gigantic “D” shaped, composed by high, medium and low field coil, via embedding and stacking. It is necessary to insulate the high, medium and low field coils respectively, fill the gap between high, medium and low fields (10mm~120mm) after embedding, wrap the ground insulation, and then insulate the gap filling layer. In order to fully validate the manufacturing process of the winding, a Dummy winding with a mid field winding size was used for vacuum pressure impregnation (VPI) to complete the coil insulation. To address technical difficulties such as vacuum environment, external pressure, curing temperature, and time control in the VPI process, a TF Dummy coil VPI system design has been completed. Using CATIA software to model the Dummy coil VPI system, designing subsystems reasonably, effectively improving the VPI process time and ensuring insulation quality. Through theoretical analysis and calculation of each subsystem, it is crucial to more accurately

* 聚变堆主机关键系统综合设施项目(编号:2018-000052-73-01-001228)资助的课题.

† wenwei@ipp.ac.cn

select the equipment model equipped with the VPI system. The design of the CFETR TF Dummy coil VPI system and the verification of related processes are crucial for subsequent TF coil manufacturing.

Keywords: CFETR, TF Coil, VPI system, Analysis and calculation

PACS: 02.60.Cb, 61.82.Ms, 74.70.-b

DOI: 10.13380/j.ltpl.2023.03.004

Reference method: XUE Jianjian, WU Jiefeng, WEN Wei, WU Yu, YAN Zhaohui, YU Xiaowu, SHANG Mingming, Low. Temp. Phys. Lett. **45**, 0148 (2023)

1 引言

中国聚变工程试验堆 (China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR) 是我国自主设计和研制的新一代磁约束聚变装置, 在全面消化吸收国际热核聚变实验堆 (ITER) 相关技术的基础上, 预先开展下一代超导聚变堆研究的重大项目^[1]. 环向场 TF (Toroidal Field, TF) 线圈是 CFETR 平台的重要组成部分.

如图 1 所示, CFETR TF 线圈为“D”形轮廓, 外形尺寸约为 19.5 m (长) * 11.5 m (宽) * 1.1 m (高), 包含 2 个低场线圈 (LFC)、1 个中场线圈 (MFC) 和 1 个高场线圈 (HFC)^[2]. 在整个 TF 线圈制造过程中需要 6 次 VPI, 包含子线圈的 4 次 VPI、套装后的 WP 绕组 VPI、WP (线圈)-Case (线圈盒) 间隙 VPI. 每次 VPI 的好坏直接影响线圈绝缘质量, 为了更好的保证绝缘质量, 通过 1 个 Dummy 线圈制造完成 VPI 系统的设计和相关工艺的验证. 表 1 为 TF 子线圈及 Dummy 线圈的基本参数.

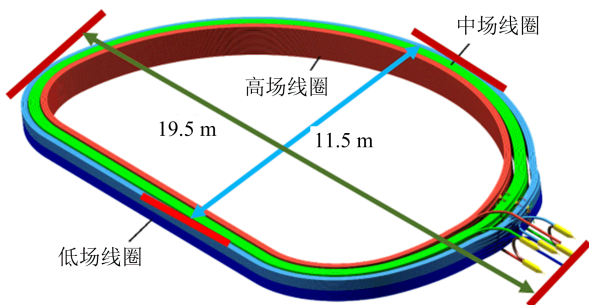


图 1 CFETR TF 线圈.

表 1 高、中、低场、Dummy 线圈基本参数.

类型	数量	层/匝数	导体长度/m	质量/t
低场	1	12 * 3	1700	50
中场	1	14 * 5	3150	95
高场	1	16 * 3	2070	65
Dummy 线圈	1	4 * 5	1031	27

2 Dummy 线圈 VPI 系统设计

Dummy 线圈 VPI 系统主要包括 VPI 模具^[3]、真空系统、内外部加热系统、注胶系统和混胶脱气设备, 如图 2 所示. 本文主要介绍了真空抽气机组的选

型设计、内部加热的电流计算、VPI 温控曲线、注胶系统的设计和混胶脱气设备的组成.

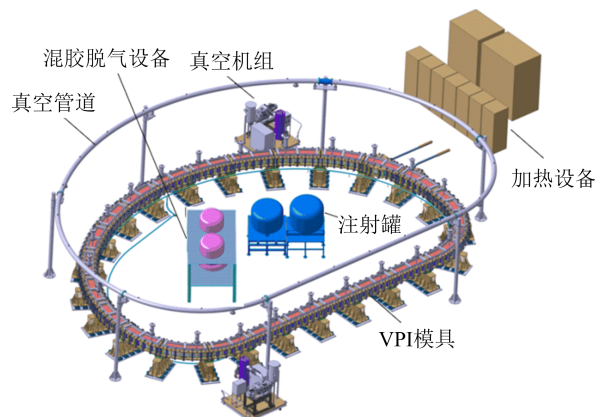


图 2 Dummy 线圈 VPI 系统.

2.1 真空系统

根据 Dummy 线圈 VPI 系统真空度要求, 内模在密封焊接后, 真空度优于 10^{-1} Pa 才能满足线圈在脱气过程中的工作环境, 真空系统的搭建主要包含抽气设备、管道、阀门等真空元件. 根据内模产生的气体量、工作压力、极限真空及抽气时间等参数, 选配主泵的类型, 确定管路及选择真空元件. 查阅真空设计手册, 根据真空室要求的工作压力 P_g , 真空室的总气体量 Q , 计算泵的有效抽速^[4]:

$$S = \frac{Q}{P_g} \quad (1)$$

式(1)中 Q 为真空室的总气体量. Q 通常由三部分组成, 即

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (2)$$

式(2)中 Q_1 为真空室工作过程中产生的气体量; Q_2 为真空室及真空元件气体量; Q_3 为真空室总漏气量.

在低真空下, 内模的漏气量很小可以忽略时, 其压力 P_i 降到 P 所需要的抽气时间 t :

$$t = 2.3 \frac{V}{S} \lg \frac{P_i}{P} \quad (3)$$

式(3)中 t 为抽气时间 (s); S 为泵的有效抽速 (L/s); V 为真空设备容积 (L); P 为经 t 时间抽气后的压力 (Pa); P_i 为设备开始抽气时的压力 (Pa).

内模要求的工作压力为 10^{-1} Pa, 已知内模容积为 4145 L, 不锈钢 1 h 后的出气率为 2.3×10^{-5} Pa · L/(s · cm²)^[5], 内模的表面积为 113.9 m², 代入公

式计算,有效抽速为 263 L/s,抽气时间为 410 s.

相较于同抽速的油封式机械泵,使用罗茨滑阀机组可获得 75% 甚至 90% 以上的节能效果. 根据实际真空经验,与主泵配套,结合经济技术指标等因素,选用 ZJP300 罗茨真空泵为主泵,配 2H-70A 滑阀真空泵作为前级泵. 大气抽到 10 Pa 时选择前级泵抽真空,极大缩短了抽气时间,在 10 Pa 左右选择罗茨真空泵抽真空,能够保持稳定的抽气效率.

2.2 内/外部加热系统

线圈 VPI 处理过程需要对线圈进行加热烘烤脱气和固化处理, Dummy 线圈的横截面比较大、传导的路径长,线圈耐压要求高,相应的对地绝缘、层间、匝间绝缘较厚,阻碍热传导,导致线圈横截面外围匝和中心匝温差大,对线圈 VPI 产生影响,甚至影响线圈绝缘性能. 为了保证线圈整体温度均匀性,采用内部绕组加热和外部模具加热保温的方式. 利用导体在常温下的电阻特性给线圈通入电流,以产生焦耳热的方式从 Dummy 线圈内部进行加热,其产生的焦耳热大小与导体的电流有直接关系^[6]. 导体本身制造精度高,电阻均匀性好,通电发热均匀. 使用加热电源对绕组导体通电流产生焦耳热,配合上位控制器,调节电流大小从而将线圈温度控制在 VPI 所需的温度^[7],如图 3 所示为 TF Dummy 线圈 VPI 系统加热温度曲线.

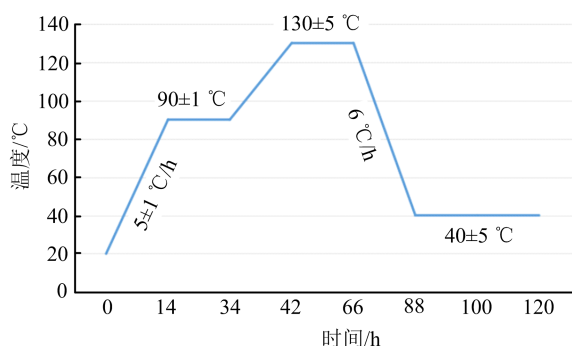


图 3 TF Dummy 线圈 VPI 系统加热温度曲线.

Dummy 线圈模具系统具备 20 °C 到 150 °C 升温 and 温度精度小于 ±5 °C 的设计要求,计算导体通电电流. 根据导体材料特性, Nb_3Sn 导体热容和电阻率分别为 20 kg/m 和 $4 \times 10^{-7} \Omega/\text{m}$, Dummy 线圈在 VPI 过程中的升温速率为 5 °C/h,推导出升温速率所需要的功率大小,从而得到加热所需电流的大小. 实施过程中通过监测线圈内部温度情况,运用

PID 算法实时控制电流大小,保证线圈温度按照设定的温度曲线升温. 导体产生的热量为

$$Q = cm\Delta T \quad (4)$$

式(4)中 Q 为热量(J); c 为比热容(J/kg · °C); ΔT 为单位温度(°C); m 为质量(kg).

传导电流将电能转换为热能的焦耳定律为

$$Q = I^2 R t \quad (5)$$

式(5)中 Q 为热量(J); I 为电流(A); R 为电阻(Ω); t 为时间(s).

导体按钢的比热容为 $0.46 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$, 带入公式计算,导体在加热过程中的电流为 565 A.

防止线圈表面的热量被模具带走,需要对模具额外加热,保证模具与线圈以相同的速率升温. 模具为碳钢件,只需在碳钢表面铺装加热均匀的铝加热板,使用温度计测量模具的温度,用 PID 算法来调整铝加热板的加热功率,从而保证模具与线圈以相同的温度曲线升温^[8]. 为保证线圈和模具上温度均匀,需要在模具外铺设保温被,保温被采用岩棉作为保温材料,耐高温帆布作为包覆材料,尽可能降低热量散失.

所有与地面支撑的支腿结构,采用“内置加热板+绝热 G10 板”进行隔热,确保类似位置漏热过大导致 VPI 模具温差超标,具体结构设计如图 4 所示.

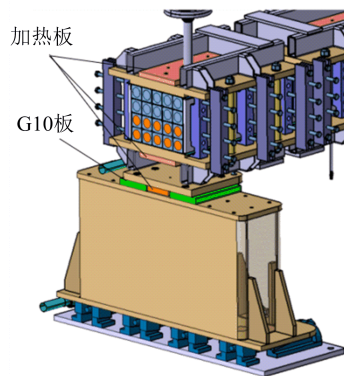


图 4 加热板布局.

2.3 注胶系统

注胶属于轻载荷工作,既要保证注胶的工艺过程,还要控制混料的时间和混合比例. 注胶系统主要包含储胶罐、注胶管路、注胶管和冒胶罐,在负压的环境下,打开储胶罐阀门,环氧树脂自动吸入到线圈内部进行注胶. 注胶口位于模具的内侧底部,共计 24 个,沿圆周均布. 冒胶口位于模具顶面外沿,共计 24 个,沿圆周方向均布. 注胶口及冒胶口均采用 304

不锈钢材质,注胶口直接与不锈钢板焊接,冒胶罐接口处设计法兰快接结构,反复使用,具体结构设计如图 5 所示.

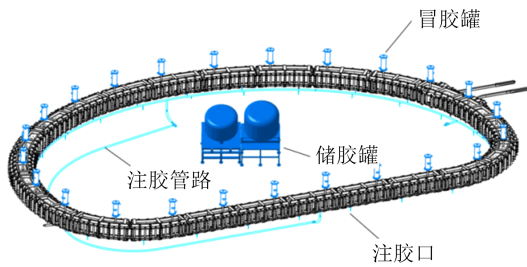


图 5 注胶系统.

2.4 混胶脱气设备

混胶脱气设备可对环氧树脂、固化剂在线真空脱气、定量计量、按设定混合比进行静态混合,设备具备连续真空灌注功能.树脂和固化剂通过真空吸料进入脱气罐内,由罐体夹套的传热介质加热,脱气罐内进行薄膜真空脱气.薄膜脱气后的树脂和固化剂分别存储在树脂脱气罐与固化剂脱气罐内,真空保存待用.树脂和固化剂输送泵分别向静态混料器内输送物料,通过输料泵控制混料比例,在静态混料器中进行混合,进入到压力注射罐.混胶脱气设备具体组成如表 2 所示.

3 结 论

本文根据 Dummy 线圈的结构特点和 VPI 绝缘条件,完成了 TF Dummy 线圈 VPI 系统的设计,

主要包括真空系统、内外部加热系统、注胶系统和混胶脱气设备.搭建真空系统,并选择 ZJP300 罗茨真空泵为主泵,配 2H-70A 滑阀真空泵作为前级泵.计算出 Dummy 线圈固化温度时导体的电流为 565 A,保证线圈温度按照设定的温度曲线升温,采用内部绕组加热和外部模具加热保温的方式.合理布置注胶管路和注胶口,有效缩短 VPI 过程的时间,确定混胶脱气设备的组成. CFETR TF Dummy 线圈 VPI 系统的设计和相关工艺的验证对后续 TF 线圈制造至关重要.

表 2 设备组成.

序号	名称	数量/套
1	树脂真空脱气罐	1
2	固化剂真空脱气罐	1
3	物料循环计量系统	2
4	真空系统	1
5	冷却系统	1
6	气动系统	1
7	静态混料系统	1
8	压力注射罐	1
9	加热系统	3
10	控制系统	1

参 考 文 献

- [1] 搜狐. 国家正式批复! 中国向“人类终极能源”进发! [EB/OL]. (2019-01-31). https://www.sohu.com/a/292627790_115479
- [2] 闫朝辉, 文伟, 何建, 李雪芹, 刘志宏, 武玉, 吴杰峰. 低温物理学报, **45** (2023), 22
- [3] 薛健健, 吴杰峰, 文伟, 闫朝辉, 俞小伍, 何建, 商明明. 低温物理学报, **44** (2022), 403
- [4] 达道安等. 真空设计手册[M]. 北京: 国防工业出版社, (2003)
- [5] 张以忱, 黄英. 真空材料[M]. 北京: 冶金工业出版社, (2005), 6-7.
- [6] 张之荣, 宋云涛, 吴欢, 邹春龙, 商明明, 胡兵, 沈光, 吴维越. 超导技术, **11** (2015), 39
- [7] 闫朝辉, 侯治龙, 谢宗泰, 唐靖宇, 朱自安, 文伟, 吴杰峰, 何建, 张涛涛. 超导技术, **3** (2021), 14
- [8] 吴欢, 张之荣, 宋云涛, 文伟, 张梦缘, 谢延玉, 沈光, 吴维越, 陆坤, 卫靖. 一种用于大型超导线圈绝缘真空压力浸渍加热装置[P]. 中国专利: 205075365, 2016-03-09.