CRAFT TF Dummy 线圈 VPI 模具设计与分析

薛健健[1,2],吴杰峰[1],文伟[1†],闫朝辉[1,2],俞小伍[1],何建[1,2],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;

2. 中国科学技术大学,合肥 230026;

3. 合肥聚能电物理高技术开发有限公司,合肥 230031

收稿日期:2022-12-05;接收日期:2023-01-13

【摘要】 环向场(Toroidal Field, TF)线圈是聚变堆主机关键系统综合研究设施(CRAFT)的重要组成部分,由CICC(Cable in Conduit Conductor)导体完成线圈绕制,通过真空压力浸渍(Vacuum Pressure Impregnation, VPI)完成线圈绝缘处理.在树脂浸渍线圈绝缘层,随后进行较长时间的高温固化,以完全固化整个绝缘层的树脂.在浸渍和固化过程中,VPI模具不仅承受线圈本身的载荷,还要承受大气压力、内部打压、热变形等.为了保证线圈绝缘质量,采用CATIA软件对VPI模具进行3D建模,并对VPI模具进行了Ansys Workbench有限元软件分析与校核.分析表明,VPI模具的设计合理,为工程设计提供了理论和实践依据.

关键词:CRAFT;TF线圈;VPI模具;分析

PACS: TL62+2;TQ051.4

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.06.003

Design and Analysis of VPI Mould for CRAFT TF Dummy Coil

XUE Jianjian[1,2], WU Jiefeng[1], WEN Wei[1†], YAN Zhaohui[1,2],
YU Xiaowu[1], HE Jian[1,2], SHANG Mingming[3]

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., Heifei* 2300031, *China*

Received date: 2022-12-05; accepted date: 2023-01-13

【**Abstract**】 Toroidal Field (TF) coils are an important part of the comprehensive research facility for fusion technology (CRAFT), which is wound by CICC conductors and insulated by Vacuum Pressure Impregnation (VPI). Immerse the insulation layer of the coil in the resin, and then conduct high temperature curing for a long time to completely cure the resin of the entire insulation layer. During impregnation and curing, VPI mould not only bears the load of the coil itself, but also bears atmospheric pressure, internal pressure, thermal deformation, *etc*. In order to ensure the insulation quality of the coil, CATIA software is used for 3D modeling of VPI mould, and Ansys Workbench finite element software is used for analysis and verification of VPI mould. The analysis shows that the VPI mould design is reasonable, which provides a theoretical and practical basis for engineering design.

Keywords: CRAFT, TF coil, VPI mould, Analysis

PACS: TL62+2;TQ051.4

† wenwei@ipp.ac.cn

DOI: 10.13380/j.ltpl.2022.06.003

Reference method: XUE Jianjian, WU Jiefeng, WEN Wei, YAN Zhaohui, YU Xiaowu, HE Jian, SHANG Mingming, Low. Temp. Phys. Lett. **44**, 0403 (2022)

1 引　　言

聚变堆主机关键系统综合研究设施(Comprehensive Research Facility for Fusion Technology, CRAFT)是我国《国家重大科技基础设施建设"十三五"规划》中优先部署的大科学装置之一,旨在解决与验证聚变堆主机建设相关的核心科学和技术问题,确保中国聚变工程试验堆(China Fusion Engineering Test Reactor, CFETR)主机设计和建设的整体性能,增强可靠性与安全性[1]. 环向场(Toroidal Field, TF)线圈是 CRAFT 平台的重要组成部分.

为了验证 TF 线圈绕制、接头制造、热处理、匝间绝缘包绕及 VPI 等制造过程所有设备、工艺和技术,在正式线圈生产前,通过 1 个 Dummy 线圈制造完成相关工艺的验证工作. 表 1 为 TF 子线圈及 Dummy 线圈的基本参数.

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

CRAFT TF Dummy 线圈由 2 个"2(层) * 5(匝)"的中场绕组通过 1 个内部接头串联成 1 个"4(层) * 5(匝)"的中场线圈,Dummy 线圈具有 2 个外部接头、3 个氦管和 1 个 Tail 结构. Dummy 线圈为"D"形轮廓[2],外形尺寸约为 19.5 m(长) * 11.5 m(宽),线圈整体截面为 337.6 mm * 266.8 mm,重量约为 27 t,如图 1 所示.

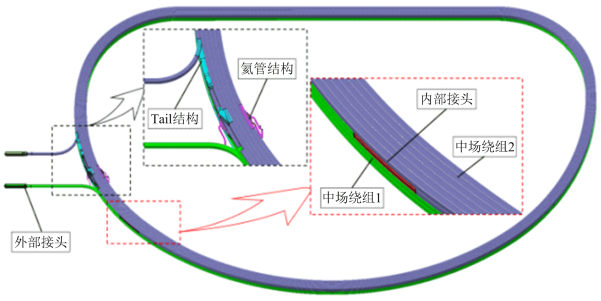


图 1　CRAFT TF Dummy 线圈

2 Dummy 线圈 VPI 模具设计

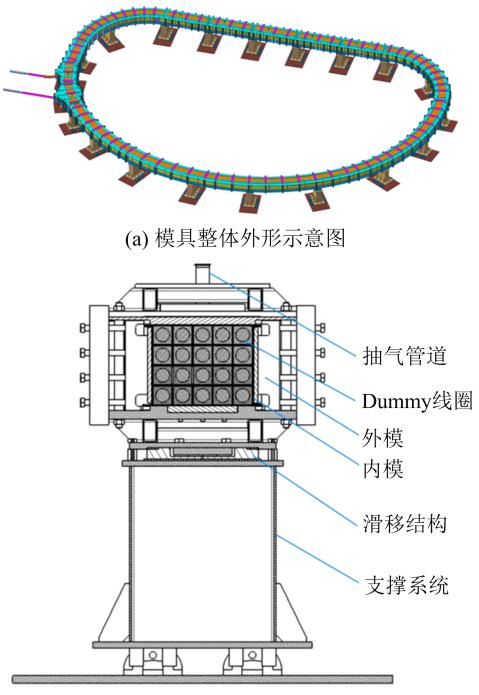
2.1 VPI 模具结构设计

VPI 模具的设计以 Dummy 线圈尺寸控制为驱动,同时模具结构设计考虑了影响 VPI 工艺过程的主要因素:完成匝间绝缘包绕的子线圈在模具内的安装、定位、真空密封、焊接空间、加压及 VPI 固化后的脱模;模具装配完成后真空与耐压强度等[3]. 模具的设计参数如表 2 所示.

表 2　VPI 模具设计参数

外形/m	设计压力/MPa	设计温度/℃	真空度/Pa
17.1 * 11.3	0.4	150	<10

VPI 模具结构设计主要包含内模、外模、支撑系统、抽气管道、冒胶口等. 内模采用 2 mm 304 不锈钢板焊接成型,外模为 Q235 碳钢结构件,外模环向分段数量 24 件,各结构件串联成一个整体. 抽气管道为线圈绝缘材料进行脱气,确保内模无残余气体. 影响 VPI 工艺过程的关键因素是真空和压力,模具在工作中必须可靠密封,避免超导磁体内部会出现气泡、分层、越层裂纹、界面分离等缺陷,影响超导磁体的电气性能和绝缘强度[4]. Dummy 线圈 VPI 模具结构如图 2 所示.



(a) 模具整体外形示意图

(b) 模具结构截面示意图

图 2　VPI 模具结构

2.2 模具侧壁力学分析

树脂浸渍整个线圈绝缘层后，内模注入 0.4 MPa 的压力，模具侧壁必须具有足够的厚度以承受内部压力，避免 VPI 模具因强度不足产生塑性变形甚至破裂；或因刚度不足产生大的弹性变形，引起成型零部件在其接触或配合表面出现较大的间隙，降低固化后线圈的尺寸精度.

根据材料力学有关理论，侧壁受到弯曲应力，最大应力发生在侧壁长边中点处. 强度计算公式：

$$\sigma_{\max}=\frac{PL^2}{2t^2} \tag{1}$$

式(1)中：

$\sigma_{\max}$ —最大应力，MPa；

P —注射压力，MPa；

L —材侧壁长边长度，mm；

t—侧壁厚度，mm.

长边的弯曲变形量为：

$$f_{\max}=\frac{PL^4}{32Et^3} \tag{2}$$

式(2)中：

E —弹性模量，MPa；

f_{max}—最大挠度，mm；

2.3 模具的热性能分析

考虑到 VPI 模具为碳钢材料、内部导体材料为不锈钢及超导铜材质，材料的热性能如热膨胀系数和热传导系数对线圈的尺寸准确性及性能会产生一定的影响，热膨胀系数决定模具、线圈的收缩程度及最终尺寸[5]，热传导系数控制模具的加热速率(影响到树脂加热到固化温度时的速率)、冷却速率(将模具内部热量及固化反应热量移出模具的速率)，其关系式为：

$$X_M=X_P[1+(a_M)(T_{\text{gel}}-T_{\text{room}})-S_{\text{resin}}] \tag{3}$$

式(3)中：

X_M —模具的设计尺寸，mm；

X_P —注线圈的设计尺寸，mm；

S_{resin} —树脂的收缩率，mm；

a_M —模具的热膨胀系数，mm；

a_P —线圈的热膨胀系数；

T_{gel} —树脂的固化温度，℃；

T_{room} —环境温度，℃.

3 Dummy 线圈 VPI 模具有限元分析

VPI 模具在工作态下，承受大气压力 0.1 MPa 和内部 0.4 MPa 压力. 其强度和刚性直接影响固化后线圈外形尺寸的精度，因此，VPI 模具的强度校核十分必要. 对 VPI 模具进行 Ansys Workbench 有限元仿真计算以验证模具的力学性能，取 24 段中的任意 1 段作为分析对象，采用四面体单元格对模具进行网格划分，其中内模网格密度设置为 4 mm，外模的网格密度设置为 20 mm，网格划分的单元数及节点数分别为 231394 和 802679. 模具使用的材料如表 3 所示. 安全系数选为 1.5，以计算各材料的许用应力.

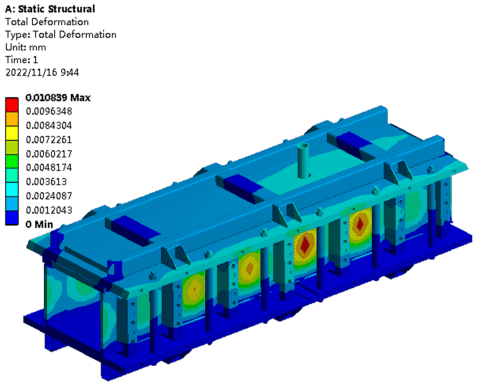
表 3 构件使用的材料和许用应力

构件名称	材料名称	屈服强度 /MPa	许用应力 /MPa
外模	Q235 碳钢	225	150

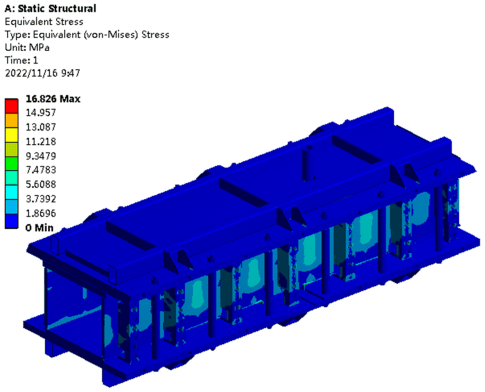
3.1 结构静力学分析

3.1.1 常温负压分析

为了确保线圈质量，模具在安装过程中必须确保内模密封，内模的焊接全部采用全焊透结构并对模具进行真空检漏. 对内模和抽气系统进行整体负压检漏，内模承受大气压力 0.1 MPa，模具整体添加重力加速度. 模具总体变形和等效应力云图如图 3 所示.



(a) 总体变形云图

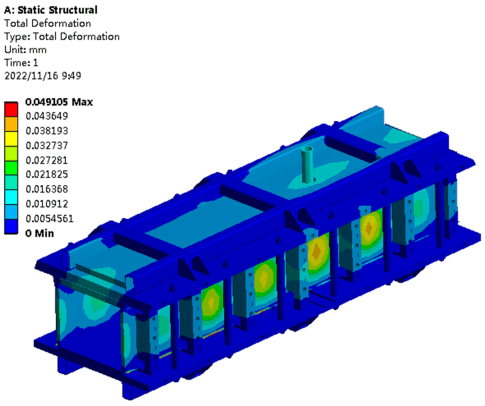


(b) 等效应力云图

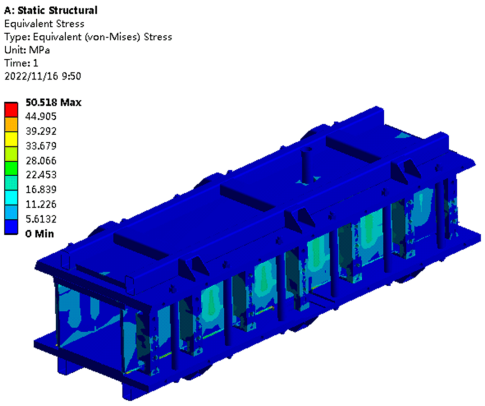
图 3 模具总体变形和等效应力云图

3.1.2　常温正压分析

线圈在浸渍完成后，需要施加 0.4 MPa 的正压力，因此内模在检漏完成后，还需要进行正压检漏. 模具总体变形和等效应力云图如图 4 所示.



(a) 总体变形云图



(b) 等效应力云图

图 4　模具总体变形和等效应力云图

Q235 碳钢在常温条件下的弹性模量为 200 GPa，泊松比 0.3，密度为 7.85 g/cm^3. 导入 Ansys Workbench 有限元软件计算. 两种工况下模具的最大总体变形为 0.049 mm，出现在内模侧壁中心. 最大等效应力为 50.518 MPa，小于许用应力 150 MPa，VPI 模具有限元分析结果满足设计要求.

3.2　热力学分析与优化

Dummy 线圈绝缘固化过程中，须对碳钢硬模和 Dummy 线圈在温度由环境温度上升到 135 ℃过程中的热膨胀系数不匹配进行热力学分析与校核. 采用线圈整体简化模型，对模型进行 Ansys Workbench 有限元仿真分析校核，根据校核结果，优化 Dummy 线圈 VPI 模具支撑系统结构设计. 采用四面体单元格对 Dummy 线圈进行网格划分，网格密度设置为 50 mm，网格划分的单元数及节点数分别为 111073 和 235430. 以直线段线圈设置绑定约束，添加重力加速度，环境温度设置为 135 ℃，316L 不锈钢热膨胀系数为 16.1E－6/℃，导热系数为 15.5 W/(m·℃)[6]. TF Dummy 线圈及 VPI 模具应变如下图 5 所示.

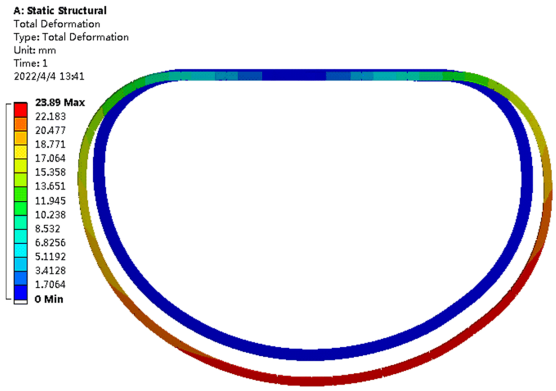


图 5　TF Dummy 线圈应变云图

由应变云图可以看出，整个 Dummy 线圈受热最大变形量为 23.89 mm，变形沿“D”形外圈均匀变化. 为了保证线圈固化后的尺寸精确，VPI 模具支撑系统与模具本身接触部位设计成隔热且可滑移结构，保证了整个模具在加热过程中位移变化，具体结构设计如下图 6 所示.

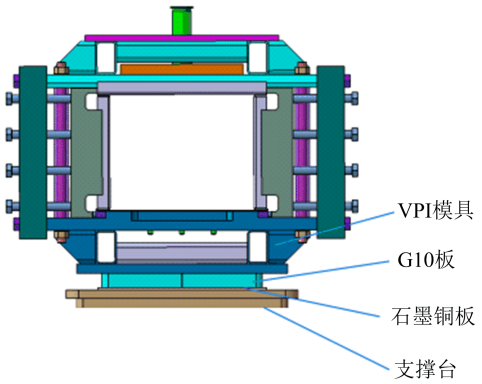


图 6　支撑系统滑移结果示意图

4　结论

根据 Dummy 线圈绝缘的结构特点，本文详细介绍了 TF Dummy 线圈 VPI 模具设计，并通过 Ansys Workbench 有限元仿真计算验证 VPI 模具在负压、正压、加热打压等过程的力学性能，结果表明，Dummy 线圈 VPI 模具设计满足技术要求，为 CRAFT TF 子线圈工程设计提供了计算依据.

致谢:本研究得到了聚变堆主机关键系统综合设施项目的支持,项目合同号为 2018-000052-73-01-001228.对此表示感谢!

参 考 文 献

[1] 傅培松, 曾钢, 卢宇, 陈俊凌,李建刚. 科技管理研究, **040** (2020), 223

[2] Z. H. Yan, J. F. Wu, W. Wen, Y. Wu, Z. H. Liu, J. He, J. Wen, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **31**(2021), 1

[3] 邹春龙. ITER 极向场超导磁体线圈绝缘关键技术研究[D]. 中国科学院大学,2016

[4] 祝宁,吴维越,陶玉明,张勇. 真空, **42**(2005), 55

[5] 李婧.复合材料液体模塑成型设备与工艺开发[D]. 吉林大学,2007

[6] A. Bursikov, S. Grigoriev, A. Konin, A. Mednikov, I. Rodin, V. Tanchuk, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **32**(2022), 1