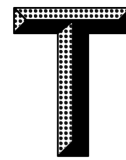


ICS 29.080
CCS K 30



团 体 标 准

T/CI 1164.1—2025

磁约束核聚变超导磁体绝缘制造系统 技术要求 第1部分：总则

Technical requirements for insulation manufacturing systems of superconducting
magnet in magnetic confinement fusion—Part 1: General principles

2025-09-01 发布

2025-09-01 实施

中国国际科技促进会 发布
中国标准出版社 出版

目 次

前言	III
引言	IV
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 系统组成	1
5 技术要求	2
5.1 基本要求	2
5.2 真空抽气系统	2
5.3 树脂制备系统	3
5.4 VPI模具系统	3
5.5 注胶系统	4
5.6 打压系统	4
5.7 加热及保温系统	4
5.8 控制及数据采集系统	5
6 安装调试	5
7 系统测试验证	6
7.1 测试验证目的	6
7.2 测试方法	6
7.3 测试内容及指标内容	6
7.4 测试验证流程	6
7.5 结果处理	6
7.6 持续改进	6
8 安全要求	7

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 T/CI 1164《磁约束核聚变超导磁体绝缘制造系统》的第1部分。T/CI 1164 已经发布了以下部分：

——第1部分：总则；

——第2部分：磁约束核聚变环向场磁体线圈绝缘制造工艺规范。

本文件由合肥综合性国家科学中心能源研究院（安徽省能源实验室）提出。

本文件由中国国际科技促进会归口。

本文件起草单位：合肥综合性国家科学中心能源研究院（安徽省能源实验室）、合肥曦合超导科技有限公司、中国科学院合肥物质科学研究院、合肥国际应用超导中心、合肥聚能电物理高技术开发有限公司。

本文件主要起草人：周超、闫朝辉、何建、文伟、俞小伍、武玉、彭黎明、汪凯雄、刘志顺、史磊、段旭、张思雨、王冬虎、薛圣泉、张舒庆。

引 言

本文件的发布机构请注意,声明符合本文件时,可能涉及(第5章)一种聚变用铠装超导线圈 VPI 树脂精确计量系统及方法(ZL202310878917.0)、(第5章)核聚变极向场线圈 VPI 模具尺寸精密控制系统及方法(ZL202411737751.1)、(第5章)一种核聚变超导磁体热压罐 VPI 闭环加热系统及方法(ZL202411818462.4)相关的三项专利的使用。

本文件的发布机构对于该专利的真实性、有效性和范围无任何立场。

该专利持有人已向本文件的发布机构承诺,他愿意同任何申请人在合理且无歧视的条款和条件下,就专利授权许可进行谈判。该专利持有人的声明已在本文件的发布机构备案。相关信息可以通过以下联系方式获得:

专利持有人姓名:闫朝辉,地址:合肥综合性国家科学中心能源研究院(安徽省能源实验室):安徽省合肥市庐阳区三国城路80号,中国科学院合肥物质科学研究院:安徽省合肥市蜀山区蜀山湖路350号,电子邮箱:iehcns@ie.ah.cn;yanzhaohui@ipp.ac.cn。

请注意除上述专利外,本文件的某些内容仍可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

T/CI 1164《磁约束核聚变超导磁体绝缘制造系统》拟由两个部分构成。

- 第1部分:总则。目的在于为磁约束核聚变超导磁体绝缘制造系统提供基础性、通用性的规定和指导,明确系统组成、技术要求,安装调试、系统测试验证及安全要求需遵循统一的标准和规范。
- 第2部分:磁约束核聚变环向场磁体线圈绝缘制造工艺规范。目的在于针对磁约束核聚变环向场磁体线圈绝缘制造的操作注意事项、具体工艺流程,绝缘测试验证、工艺过程报告等制定详细的技术规范和操作指南。

磁约束核聚变超导磁体绝缘制造系统

技术要求 第1部分:总则

1 范围

本文件规定了磁约束核聚变超导磁体绝缘制造系统的系统组成、技术要求、安装调试、系统测试验证及安全要求。

本文件适用于磁约束核聚变超导磁体绝缘制造系统的设计。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 4960.9—2013 核科学技术术语 第9部分:磁约束核聚变

GB/T 32218—2015 真空技术 真空系统漏率测试方法

3 术语和定义

GB/T 4960.9—2013界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

核聚变 **nuclear fusion**

轻元素的原子核聚合在一起形成较重元素的原子核并释放出能量的核反应。

注:最易实现的核聚变是在氢的两个同位素(氘和氚)之间的反应。氘-氚核聚变反应所释放的大部分能量是由高速中子所带走的。其余的能量则归于反应中产生的 α 粒子(氦核 ^4He)。

[来源:GB/T 4960.9—2013,2.1.109,有修改]

3.2

超导磁体 **superconducting magnet**

低温下用具有高转变温度和临界磁场特别高的第二类超导体制成线圈的一种电磁体。

3.3

爆聚 **implosion**

在固化过程中发生的不可控聚合反应,引起膨胀、变形、分解或燃烧的现象。

3.4

真空压力浸渍 **vacuum pressure impregnation; VPI**

在真空条件下,将特定的液体(如水银、合金、树脂或清漆等)浸入到未熔化的铸件或多孔材料中,利用压力控制液体的渗透深度和速度,完成特定的工艺过程。

4 系统组成

磁约束核聚变超导磁体绝缘制造系统包括:

——真空抽气系统;

- 树脂制备系统；
- VPI模具系统；
- 注胶系统；
- 打压系统；
- 加热及保温系统；
- 控制及数据采集系统。

5 技术要求

5.1 基本要求

- 5.1.1 超导磁体绝缘制造系统应提出明确的场地要求,如占地宜不小于4倍线圈的最大轮廓面积、行车吊装能力不小于1.5倍的磁体重量、厂房具有工业冷却水、具备工业三相电、地面承载不小于10 t/m²等。
- 5.1.2 应按绝缘制造系统车间布局进行设备及工艺的总体设计。
- 5.1.3 对于绕组及绕组的所有各项操作,均不应使超导线圈的轮廓和截面发生变化。
- 5.1.4 模具材质选用与导体材料接近的不锈钢材料,模具材料和导体材料选用不同时,应考虑磁体加热固化过程不同材质热膨胀系数对线圈的影响。
- 5.1.5 所有部件的设计应便于整体装配起吊及运输,部件吊耳、吊环设计位置应满足起吊时自平衡。
- 5.1.6 所有焊接组件应控制变形量并应进行消应力处理,确保焊接组件尺寸的稳定性。
- 5.1.7 所有设备操作空间合理,常规操作中应尽量减少人员登高或俯身作业。
- 5.1.8 系统运行过程中,运行产生的噪声不应高于70 dB。
- 5.1.9 所有设备运行时或所有工序不应产生粉尘或碎屑,尤其是金属碎屑。
- 5.1.10 与绕组、导体直接接触的材料均为无磁材料,且不应损伤铠甲及已包绕的绝缘材料。
- 5.1.11 与绕组绝缘直接接触的材料均应为G10或其他不污染绝缘的非金属材料。
- 5.1.12 设备运动机构均应无油或有油脂屏蔽结构,无漏油现象发生。
- 5.1.13 所有机械系统应在出现故障或失去动力时可立即自锁。
- 5.1.14 电气控制系统具有断电数据自动储存功能,且复电后可继续运行。
- 5.1.15 所有设备在交付时任何地方不应残留污染物质。
- 5.1.16 每套设备应包含独立电控开关柜及设备间线缆、线槽。
- 5.1.17 所有动力源、运动执行机构均不应为液压结构。
- 5.1.18 超导磁体加热固化应考虑考虑VPI有感加热产生的磁场对各设备的影响。
- 5.1.19 所有化学物品应明确标识并分类存放,确保操作人员的安全以及环境的保护。
- 5.1.20 化学物品的存储区域应具备通风设施,避免有害气体的积聚。

5.2 真空抽气系统

- 5.2.1 真空系统由真空主管路、真空机组、阀门、波纹管等组成。
- 5.2.2 真空系统所有管路、部件、阀门、快接、螺栓等材质均为不锈钢材质。
- 5.2.3 真空机组主泵抽速应根据超导磁体绝缘系统总体体积进行核算。
- 5.2.4 真空机组应配备前置过滤器,具有玻璃丝过滤功能。
- 5.2.5 真空机组应配备冷阱及水冷油气过滤装置,用于对树脂蒸汽进行冷凝。
- 5.2.6 真空机组具备可靠的防止油污污染主泵措施。
- 5.2.7 真空机组通过带有固定螺杆的波纹管连接至真空主管路,由主管路分至各个模具。
- 5.2.8 所有真空管路中波纹管应为正压波纹管,用于波纹管连接的密封圈为正压圈。

5.2.9 真空系统配备PID(比例-积分-微分)控制闭环自动真空度调节控制。

5.3 树脂制备系统

5.3.1 树脂制备系统具备树脂、固化剂、压力注射罐等罐体,各罐体具有压力、真空、加热和保温、称重及相关控制功能。

5.3.2 设备管路及罐体清洗系统,用于胶体使用完毕后,对设备管路及罐体进行清洗。

5.3.3 各罐体具备加热夹套,采用导热油加热,罐体外设保温层,罐体的工作温度可实时显示以及连续记录。

5.3.4 各罐体应有测温温度计,每个罐体温度调节应满足满罐树脂的最高加热温度要求。

5.3.5 各罐体设计可拆卸结构的罐盖,罐体与罐盖采用可重复利用的密封方式,便于检修和清洗。

5.3.6 各脱气罐具备真空接口、进料口、观察窗、称重设备,可实时显示液面高度、物料温度等参数,可通过观察窗观察液面气泡情况。

5.3.7 压力注射罐及其相关的各种辅助装置具备整体称重能力。

5.3.8 当混合脱气树脂、固化剂等罐体内真空度 ≤ 100 Pa。

5.3.9 应明确树脂制备系统的连续在线真空脱气处理能力。

5.3.10 压力注射罐体与静态混料器之间的连接应设置阀门及快接结构,便于拆卸和安装。

5.3.11 静态混料器、计量泵、阀门、管道设计应便于清洗和维护。

5.3.12 所有罐体内部与树脂接触的材料应采用不锈钢或非金属材料,所有提料、搅拌、转动部件,不应采用金属与金属直接啮合传动副,防止磨屑进入树脂内部。

5.3.13 真空系统应设置前置过滤器,具备树脂蒸汽的吸附和过滤功能。

5.3.14 控制系统各加热系统按照设定温度、真空度实现对各罐体的自动控制,具备各工序、工艺状态参数的可查询、记录和备份。

5.3.15 实时效能管理系统,监测各泵、阀、流量计等器件的工作状态、工作频率和时间,给予及时的维修、更换、清理建议提示,确保设备稳定可靠运行。

5.3.16 整个设备应设计清洗设备,提供清洗设备方案,以及对应的清洗设备。

5.3.17 设备占地面积,高度等限制信息应根据现场情况进行确认。

5.3.18 设备用电功率应根据各机组的额定运行功率进行确认并设置足够的冗余。

5.4 VPI模具系统

5.4.1 VPI模具以“绕组截面及轮廓尺寸”作为设计基准。

5.4.2 线圈复杂部位的VPI模具设计应满足线圈复杂部位绝缘处理工艺需求及保温材料的包裹要求。

5.4.3 VPI模具应具备加热元器件的安装接口。

5.4.4 VPI模具应根据线圈的特点,考虑VPI加热元器件的安装位置、数量及测温精度。

5.4.5 凡是与树脂、真空、压力、绕组、导体相接触或VPI模具内的金属材料均为不锈钢并按照真空部件要求进行真空级清洗。

5.4.6 VPI模具应满足线圈本身及特殊部位绝缘处理操作需求。

5.4.7 VPI模具的设计应便于安装、焊接和拆卸。

5.4.8 注胶口及冒胶口沿线圈轮廓周向、交叉错位均布。

5.4.9 VPI模具安装时,应考虑安装后整体的平面度、内外轮廓度、特殊部位位置度等因素。

5.4.10 VPI模具安装完毕后,应采用专门测量设备对模具的装配精度进行测量,测量过程应考虑温度对VPI模具的影响并出具测量报告。

5.4.11 为满足绕组截面尺寸要求,VPI模具应设计有高度方向及径向尺寸限位机构。

5.4.12 VPI模具所有部件的设计应便于起吊及运输,部件吊耳、吊环设计位置应满足起吊时自平衡要求。

5.4.13 所有焊接组件应控制焊接变形并应进行消应力处理,确保模具尺寸的稳定性。

5.4.14 氮管、绕组终端(含出线头、冷却管、高压线引出座)等复杂部位,应设计独立真空容器完成与VPI模具之间的密封处理。

5.4.15 VPI模具与底部支撑系统应设计有装配及测量基准,并设计线圈吊装夹具让位空间。

5.5 注胶系统

5.5.1 注胶系统及真空系统管路应按照线圈注胶PID原理图进行设计。

5.5.2 注胶系统所有金属管路及管件为不锈钢材质。

5.5.3 注胶系统所有管路均应按真空件要求进行清洗。

5.5.4 注胶系统快接法兰均采用快接法兰形式,且密封方式具备正压、负压两种工况要求。

5.5.5 注胶系统所有软管为PU材质。

5.5.6 注胶系统所有软管接口为插入式结构,且应有两只喉箍交错90°锁紧。

5.5.7 PID图中设置的真空规(含真空计)、压力变送器(含压力计)等接口,具备信号采集接口接入总控系统进行信号采集。

5.5.8 全量程真空规(含真空计,若真空规可直接输出信号至采集系统则可不含真空计)数量:8个。其中4个真空规位于注胶口侧,4个真空规位于冒胶口侧。真空规(含真空计)应送至第三方检测机构进行标定。

5.5.9 管路布局应便于检修、维护,且整齐有序,软管等支路管应集束后汇入总管。

5.6 打压系统

5.6.1 气体压力系统由储气罐、打压管路、气体流量调节阀等组成。

5.6.2 储气罐要求如下:

- a) 罐体材质为不锈钢;
- b) 工作压力:0.8 MPa;
- c) 进、出气口应有球阀控制开关且与外界连接为快接接口;
- d) 罐体上应配有安全阀、机械压力表、排污阀、球阀、气体流量调节阀等附件;
- e) 应有吊耳,方便吊装。

5.6.3 打压管路所需管材与注胶管路材质一样。

5.6.4 所有软管接口为插入式结构,且应有两只喉箍交错90°锁紧。

5.6.5 打压管路由储气罐出口连接至冒胶主管路进行分支,分支至每一个注胶冒口处。

5.7 加热及保温系统

5.7.1 与直流电源单元、外模加热单元实时通信,根据VPI工艺温度曲线给出相应控制参数。

5.7.2 监控画面能够友好显示所有采集数据,监控数据刷新周期小于1s,对压力数据显示做计算滤波处理,所有存储数据为采集原始数据。

5.7.3 工作电压及工作电流均可以根据线圈加热特性适时调整,电流调节精度优于0.03%。

5.7.4 异常断电具备负载泄能回路,保证负载及设备无瞬间高电压。

5.7.5 具备符合标准工业通信接口。

5.7.6 具备独立人机交互界面运行和远程参数给定运行功能。

5.7.7 控制系统配备UPS,断电保持时间不小于2h。

- 5.7.8 满足 24 h 连续工作 30 个工作日的工作周期,设计寿命不低于 5 年。
- 5.7.9 VPI 碳钢硬模具备保温被安装接口,在加热脱气及固化全流程 VPI 模具温度偏差不应超过 $\pm 7.5^{\circ}\text{C}$;

5.8 控制及数据采集系统

- 5.8.1 控制系统应具备自动和手动两种控制模式,其中自动为“一键启动”式控制。
- 5.8.2 控制界面应直观友好,操作人员简单培训即可上岗操作。
- 5.8.3 控制系统软、硬件均由制造方负责搭建与调试。
- 5.8.4 加热过程中升降温速率、加热功率可调。
- 5.8.5 加热系统应要具备供电、控制、采集、记录、存储、监视、报警、保护功能。
- 5.8.6 主要电气元器件应采用质量可靠的品牌产品。
- 5.8.7 控制系统应设计 UPS 电源,一旦出现断电,可给控制系统软、硬件供电,供电时长不应小于 2 h。
- 5.8.8 安全监测和防护系统要求如下。
- a) 加热元件故障时,可自动、手动切换至备用加热元件。
 - b) 配有检修、操作、防护等安全设施。
 - c) 电控柜安装人工急停按钮,当发生故障时,可随即停止工作。
 - d) 配备安全防护措施。
 - e) 当加热温度超过报警温度设定点时报警。
 - f) 电控系统开关量、动作间逻辑互锁,避免误操作造成设备损坏。
 - g) 各真空阀门系统等设备相关安全联锁。
 - h) 设备总电源缺相的警示与安全联锁。
 - i) 控制系统设有备用电源及切换装置。
 - j) 具备现场声光及远程报警,远程报警采取工控机远程控制界面形式实现。加热设备所有与温度、真空、压力、流量、时间、电压、电流等监测参数及控制参数均应接入总控系统。
- 5.8.9 控制系统满足现场供电工况,并具备足够的抗电磁干扰能力,控制机箱使用屏蔽机箱。
- 5.8.10 控制系统的计算机硬件配置应高于系统运行基本需求,系统运行不应出现卡顿现象。
- 5.8.11 登录界面应设计不同登录账户,能够区分不同操作人员的登录需求。
- 5.8.12 界面要求:要求系统界面简洁美观,系统操作方便,通过显示界面即可知道系统运行状态和系统参数状态。
- 5.8.13 系统搭建、培训及维护要求:完成软件编写后,应要到达现场完成软件配置安装和现场调试工作,并且提供软件培训服务。后期系统出现问题应要及时到场进行维护工作。
- 5.8.14 数据可视化功能:数据应提供实时数据曲线显示和历史曲线显示,显示时间区间跨度可自由配置。
- 5.8.15 控制及监测数据应具有记录、存储及导出功能,导出数据查阅的时间区间可以自由定义。
- 5.8.16 系统应具有设置参数报警功能,如果参数到达设定的报警阈值,系统应发出报警信号。

6 安装调试

- 6.1 本阶段应完成所有绝缘制造设备的运输、现场安装调试和最终验收工作。
- 6.2 在每套绝缘制造设备安装与调试完毕后,符合第 5 章技术要求。
- 6.3 应基于首件模型磁体绝缘制造工作中,完成对设备操作人员的设备培训。
- 6.4 对设备制造过程发现或产生的问题,及时进行设备/工装升级、改造或设计修改工作。
- 6.5 绝缘制造设备验收完成后,应提供详细的设备保养手册、设备使用说明书等文件。

7 系统测试验证

7.1 测试验证目的

为确保本文件的技术要求具备可操作性、安全性和可靠性,应通过系统性验证对标准中关键条款进行实际测试与评估,验证内容包括:

- a) 系统功能完整性(如真空抽气、树脂制备、VPI工艺等);
- b) 技术参数达标性(如真空度 ≤ 100 Pa、噪声 ≤ 70 dB等);
- c) 安全防护有效性(如防爆聚、防漏油、电气安全等)。

7.2 测试方法

7.2.1 采用实验室测试与现场模拟运行相结合的方式:

7.2.2 实验室测试:针对单项技术指标(如真空系统密封性、树脂脱气效率等),依据GB/T 32218—2015进行量化检测。

7.2.3 模拟运行:搭建完整绝缘制造系统原型,按第5章要求执行全流程工艺(抽真空→注胶→固化),记录关键数据(温度、压力、时间等)。

7.3 测试内容及指标内容

测试内容及指标见表1。

表1 测试内容及指标

验证项目	验证依据	合格标准
真空系统密封性	GB/T 32218—2015	静态漏率 $\leq 1 \times 10^{-6}$ Pa·m ³ /s
树脂脱气	5.3.8	混合胶体气泡残留率 $< 0.1\%$ (显微镜观测)
加热系统温控精度	5.8.4	温度波动 ± 2 °C(PID控制)
噪声	5.1.8	实测值 ≤ 70 dB(距设备1 m处)
安全连锁功能	5.8.8	断电后UPS供电 ≥ 2 h,急停响应 < 0.5 s

7.4 测试验证流程

7.4.1 预验证:检查设备材质(不锈钢)、结构(无磁设计)是否符合5.1.10~5.1.12。

7.4.2 分项测试:依次验证真空系统、树脂制备系统等子模块功能。

7.4.3 集成测试:模拟完整VPI工艺,目视检测注胶均匀性,表面无干绝缘、裂纹、气孔等缺陷。

7.4.4 异常测试:人为触发断电、超温等故障,验证报警及保护系统。

7.5 结果处理

7.5.1 通过:形成验证报告,作为标准技术可行性的支撑文件。

7.5.2 未通过:分析原因并修订标准条款(如调整参数阈值或补充工艺要求)。

7.6 持续改进

建议每3年复验1次,结合新技术(如智能传感、新型树脂材料)更新验证方法。

8 安全要求

- 8.1 绝缘制造设备各工位应具有人员防触电安全防范措施。
 - 8.2 在作业过程中,人员应要在平台内部进行相应的操作,操作过程中,应确保操作人员不发生触电风险。
 - 8.3 为安全起见,VPI系统平台一层除人员通道外其他区域应用栅栏或其他结构进行隔断,防止人员进入。
 - 8.4 VPI底模平台应做可靠的防护,防止人员及物品坠落。
 - 8.5 危化品存储、使用及处理应符合国家相关安全规定,并设有专门的危化品存储区域,该区域应有明确的警示标识、防火措施及泄漏应急处理预案。
 - 8.6 在VPI底模平台周围,应设置明显的安全警示标识,用以提醒操作人员注意潜在的高空坠落风险。
 - 8.7 车间所有操作均须依照行吊操作规范与标准进行。
-

中国国际科技促进会
团体标准
磁约束核聚变超导磁体绝缘制造系统
技术要求 第1部分:总则
T/CI 1164.1—2025

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)

网址 www.spc.net.cn

总编室:(010)68533533 发行中心:(010)51780238

读者服务部:(010)68523946

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/16 印张 1 字数 19 千字
2025年12月第1版 2025年12月第1次印刷

*

书号:155066·5-17930 定价 38.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68510107



T/CI 1164.1—2025