

环形线圈热处理设备技术要求

(以下仅为初步技术要求，最终以招标文件为准)

目 录

1、背景简介	3
1.1、线圈组成.....	3
1.2、基本概念.....	3
1.3、线圈制造流程	4
1.4、绕组参数.....	5
1.5、子单元参数	6
1.6、热处理系统组成.....	6
2. 技术要求	7
2.1 总体技术要求	7
2.2 炉体技术要求	8
2.3 加热系统技术要求	8
2.4 真空及氩气保护系统技术要求.....	9
2.5 热处理炉装料支撑平台要求	11
2.6 接口要求.....	12
2.7 信息采集控制与仪器仪表	12
2.8 自动控制系统技术要求.....	13

1、背景简介

1.1、环形线圈组成

磁体系统由 7 个线圈组成，其形状均为圆环形，如图 1 所示。

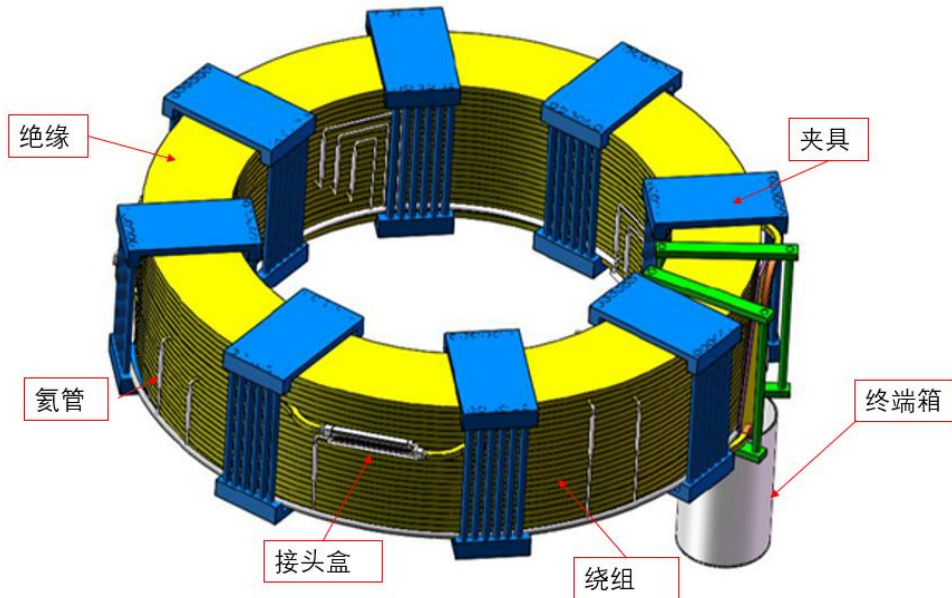


图 1 线圈示意图

环形线圈（以下简称为线圈）由绕组、接头、氦管、终端箱和工装夹具等组成。绕组为线圈的核心部件，由超导缆绕制而成。绕组采用了两种材料的超导缆，分别为 NbTi 和 Nb₃Sn。Nb₃Sn 超导材料对应力应变敏感，线圈将采用“先绕制后反应”的技术来完成线圈制造，即线圈在绕制完成后必须经过热处理才能发生固态扩散反应形成 A15 型 Nb₃Sn 超导相，从而产生超导电性。Nb₃Sn 体系超导相的形成强烈依赖于热处理过程，热处理是线圈制造的关键步骤。其中，线圈 2、3、4、5 为 NbTi 导体，不需要热处理，线圈 1、6 和 7 为 Nb₃Sn 导体，需要进行热处理，下文所述的线圈均指线圈 1、6 和 7。

1.2、基本概念

(1) 匝与饼

在导体绕制后，其单根导体称之为匝，同一水平高度的多匝导体称之为饼，如图 2 所示。

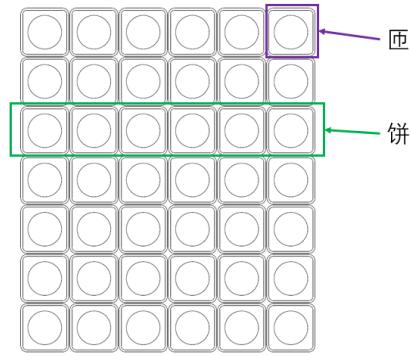
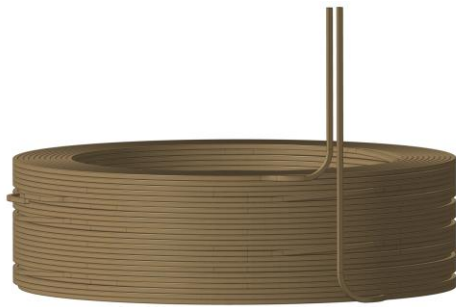


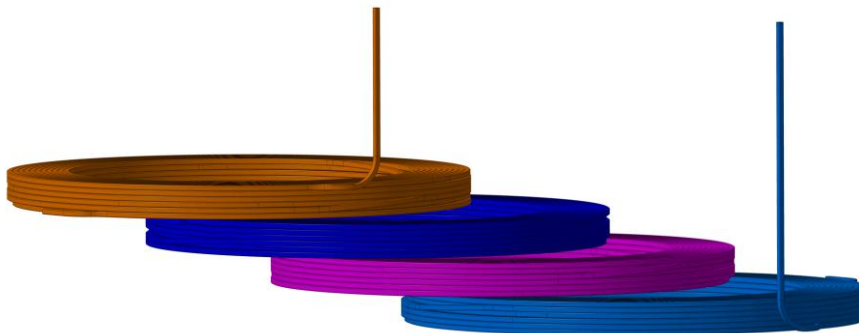
图 2 匝与饼示意图

(3) 子单元

在导体绕制后，从第一饼（或最后一饼）起连续相邻的多饼（四饼或六饼）导体构成了绕组的子单元，完整的绕组由多个子单元堆叠而成，绕组热处理的对象为若干子单元。以线圈 7 绕组为例，子单元与绕组的关系如图 3 所示。



a) 线圈 7 绕组



b) 线圈 7 绕组的 4 个子单元

图 3 绕组与热处理子单元（以线圈 7 为例）

1.3、线圈制造流程

完整的 Nb₃Sn 导体线圈需经过绕制、氮管制造、热处理、匝间绝缘、多饼堆叠、接头制造、对地绝缘包绕、VPI（真空压力浸渍）、终端管路装配和冷测试等

多个工艺和检测，如图 4 所示。

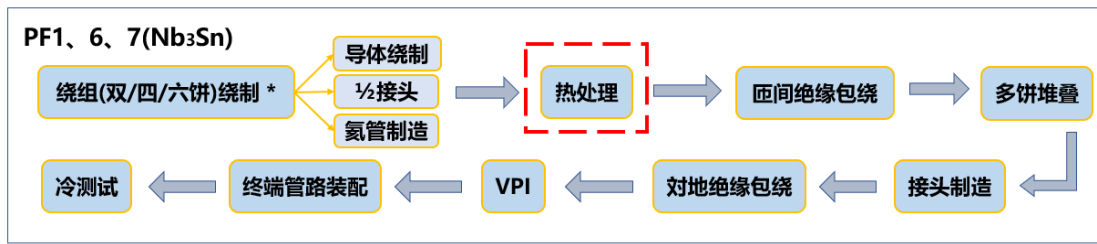


图 4 线圈制造流程

热处理在绕组绕制、1/2 接头和氮管制造之后，热处理对象为绕组子单元，主要包括多饼绕组、1/2 接头和氮管，具体见图 5，预包绕绝缘带的位置用 SUS304 代替，厚度约为 5 mm。

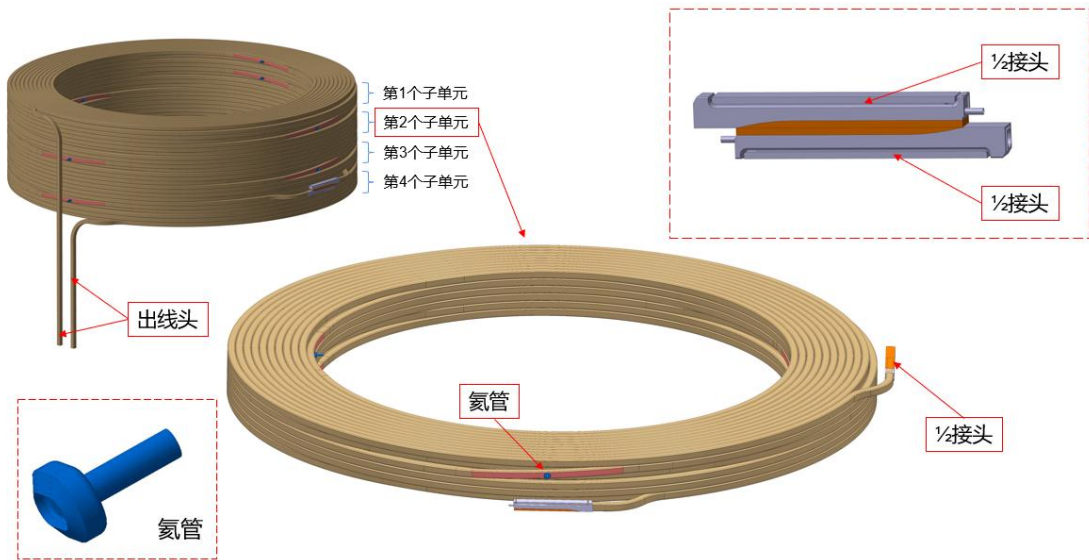


图 5 子单元结构组成

1.4、绕组参数

绕组结构、尺寸和重量参考表 1 和图 6。

表 1. 绕组结构、尺寸和重量

绕组	外径	内径	绕组高度	结构	匝数	饼数	重量/t	总高度
	φ2/m	φ1/m	h/m					H/m
1	4.9566	3.3714	0.7926	四饼	16	16	45.19	2.2926
6	6.2162	5.0198	1.1814	四饼	12	24	68.59	2.6814
7	4.0228	2.5732	1.3254	六饼	13	24	47.62	2.8254

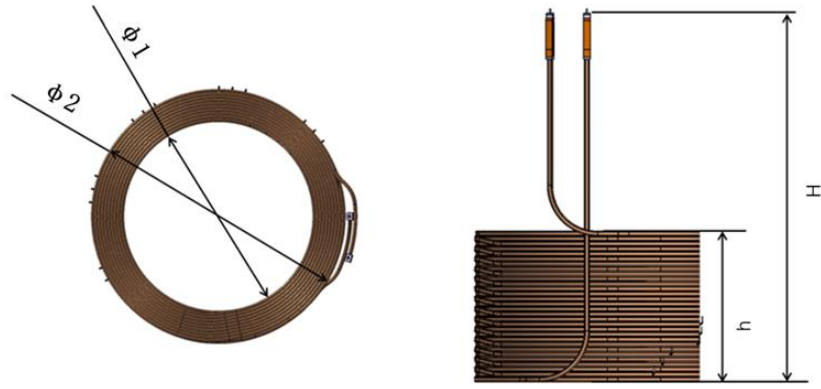
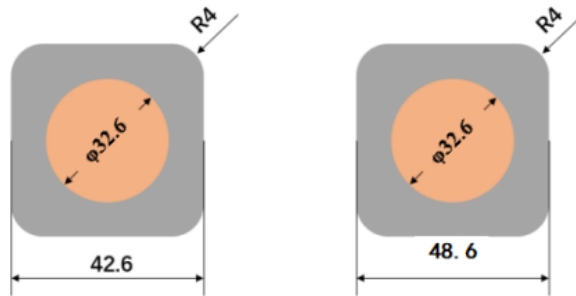


图 6 绕组结构尺寸

超导缆截面尺寸如图 7 所示。其中，线圈 1、6 的导体铠甲厚度为 5 mm，线圈 7 的铠甲厚度为 8 mm。



a) 线圈 1、6 超导缆截面 b) 线圈 7 超导缆截尺寸

图 7 超导缆导体截面尺寸

1.5、子单元参数

表 2 绕组子单元结构及重量

绕组	结构	匝数	重量/t	长度/m	氮管数量
1	四饼	16	11.3	836.8	1
6	四饼	12	11.4	846.7	1
7	六饼	13	11.9	807.7	2

在热处理过程中，为了保证绕组外形尺寸，需要采用夹具对子单元进行固定。

1.6、热处理系统组成

热处理系统主要由电源系统、热处理炉体系统、热风循环系统、冷却循环系统、氩气保护系统、数据监测与控制系统等组成。其中，电源系统为热处理提供

电能；热处理炉体系统用于提供加热环境；热风循环系统用于炉内气体流速，增加换热效率；冷却循环系统用于冷却热电偶出口处的密封圈、热风机主轴等受热易失效部件；氩气保护系统（含抽真空置换）提供绕组内外的保护气体；数据监测与控制系统用于监测热处理过程中绕组的温度、保护气体的成分、气体流量压力等，并实现升降温功率、速率等。

热处理主要包含三个步骤，分别为热处理前期准备、热处理、评估与分析。各步骤的工作流程如图 8 所示。

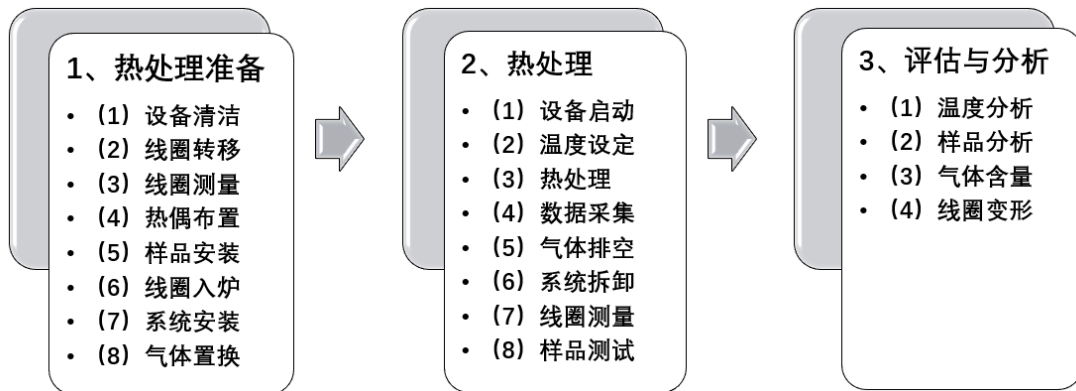


图 8 热处理过程工艺流程图

此外，通常在绕组上安装与绕组相同材质同批次的 Nb_3Sn 超导样品。超导样品由 Nb_3Sn 线材绕在一个小型骨架上，热处理后对其进行相关结果测试，作为评估热处理的依据之一，结构如图 9 所示。

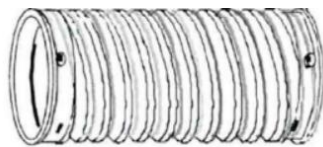


图 9 超导样品结构

2. 技术要求

2.1 总体技术要求

- 1) 炉体占地不超过 12 m（长）×12 m（宽）×10 m（高），车间内布置见 CAD 图纸；
- 2) 安装车间行车最大起重能力为 20 t，行车运行边界详见甲方提供的车间布局图纸；
- 4) 炉体最大装载能力不低于 40 吨；

- 5) 加热方式为电加热;
- 6) 总功率根据被加热的负载情况由乙方确定, 并征得甲方同意;
- 7) 车间热处理区域地面为普通地面承载, 乙方提出地基承载需求;
- 8) 设备可连续工作 30 天, 任何系统不得出现故障;
- 9) 所有与绕组、真空、压力(气路)、水路等相关、接触的部件均为无磁不锈钢;
- 10) 满足线圈 1、6 和 7 绕组的热处理工作;
- 11) 满足同时进行至少 2 个绕组子单元的热处理;
- 12) 乙方提供炉内均温性的设计方案(例如, 加热元件、风机、氩气接口的数量和布置, 以及炉膛内和绕组内“微充微排”的流量控制等), 并出具与设计方案对应的数值模拟分析报告(含具体的绕组), 方案确认须征得甲方同意。

2.2 炉体技术要求

- 1) 炉体做绝热处理, 外表面温度不超过 60°C ;
- 2) 炉体如有检修地沟或者炉体架高等设计, 相关工作全由乙方负责设计并施工;
- 3) 炉膛可承受不低于 6 kPa 的压力(表压);
- 4) 热处理全过程, 炉内保持微正压;
- 5) 炉膛做气密性检测, 炉膛内充气 6 kPa , 稳压 4h, 炉膛压力降不超过 0.2 kPa ;
- 6) 炉体在合理的位置上须设有安全放气阀, 安全阀数量不少于 2 个;
- 7) 炉体在设计、加工、制造和安装的过程中应该充分考虑到炉内清洁度, 确保炉膛内没有灰尘、油污和其他污染物;
- 8) 热处理系统工作时, 炉门、风机、管道接口、热电偶窗口须全密封, 防止污染物、杂质气体进入炉膛;
- 9) 在炉体侧面设计爬梯或扶梯, 以便于操作人员到达炉顶进行相应的操作;
- 10) 炉堂均温区不小于 $\phi 6.6\text{ m}$ (直径) $\times 3.2\text{ m}$ (高), 在空载条件下, 均温区温度均匀性 $\Delta T \leq \pm 1^{\circ}\text{C}$, 且均温区应覆盖限位工装。

2.3 加热系统技术要求

- 1) 加热系统主要包括电源、加热元件等。
- 2) 线圈采用 ITER 级 Nb_3Sn 线材制造, 热处理制度如图 10 所示, 210°C 保温 50 小时+ 340°C 保温 25 小时+ 450°C 保温 25 小时+ 575°C 保温 100 小时+ 650°C 保温 100 小时+冷却至 500°C 后随炉冷却。

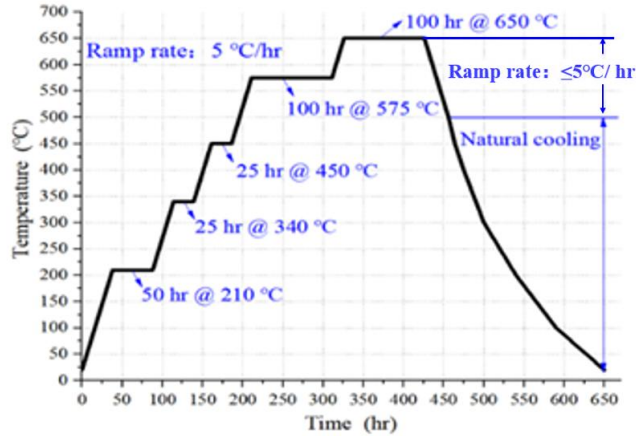


图 10 绕组热处理制度

- 3) 炉膛有效温度均匀区(含绕组在内)的升温速率为 5 °C/h (从室温升至 650°C);
- 4) 炉膛有效温度均匀区 (含绕组在内) 的最大降温速率不大于 5 °C/h (从 650°C 降至 500°C);
- 5) 热处理系统炉膛温度均匀性须满足:
 - a. 升温阶段:
 - 当炉温 < 450 °C 时, 绕组温度均匀性 $\Delta T \leq \pm 25$ °C;
 - 当炉温 ≥ 450 °C 时, 绕组温度均匀性 $\Delta T \leq \pm 20$ °C;
 - b. 保温阶段:
 - 210 °C、340 °C、450 °C、650 °C 保温平稳, 绕组温度均匀性 $\Delta T \leq \pm 5$ °C。
- 6) 热处理系统炉膛有效温度均匀区 (含绕组在内) 的升温速率在 0°C/h ~ 20°C/h 连续可调;
- 7) 炉体最高加热温度 750 °C;
- 8) 控温精度优于 ± 1.0 °C;
- 9) 热处理炉的加热元件合理布置, 且须冗余一套加热元件;
- 10) 乙方须额外提供不少于 2 套备用风机系统组件 (含电机、轴、叶轮等);
- 11) 加热系统须考虑因支撑料台、防变形工装、附属部件等带来的额外加热负载问题。

2.4 真空及氩气保护系统技术要求

在气体置换过程中, 炉体真空、正压可自动控制调节, 以实现为正压和真空的需求。

真空系统

- 1) 真空系统主要包括真空机组、真空管路、阀门、真空机、气体冷却装置、真空规、真空计等；
- 2) 若设备为真空炉，炉膛和导体须在 4 小时内真空度抽到 1 Pa，若设备为气氛炉，炉膛预抽真空至微负压，导体须在 4 小时内真空度抽到 1 Pa；
- 3) 热处理炉配备的真空泵为无油干式螺杆真空泵+罗茨泵机组，若设备为真空炉，可考虑增配其他泵型，泵组设计由乙方完成，需甲方同意；
- 4) 所有真空泵不得出现返油；
- 5) 其中 1 套机组故障，剩余机组仍能满足热处理需求；
- 6) 机组排气设在车间外部。

氩气保护系统

- 1) 氩气保护系统由液氩罐、换热器、氩气输送管路、阀门、压力变送器组成，保证热处理前的气体置换，以及热处理过程中高纯氩气的微充微排；
- 2) 在氩气进入炉体之前的管道中添加氩气纯化器，并对高纯氩气进行检测，确保满足表 2 中的参数要求；

表 2 高纯氩气要求

纯度	≥99.9995%
氧含量	< 0.1 ppm
水分	< 0.8 ppm
碳氢	/

- 3) 乙方负责液氩罐的设计、制造和安装，液氩罐满足热处理过程的使用要求，氩气罐设计和布置须甲方同意；
- 4) 炉堂内和绕组内气体置换的进气管路需要在炉膛内安装预热盘管；
- 5) 绕组内进气流量、压力可调，根据导体流阻预设适当的进气压力；
- 6) 对于炉堂的预留进、出气管道接口，其管径、数量和位置应参考均温性设计方案的数值模拟分析结果，由甲、乙方协商后确定；
- 7) 对于绕组子单元的预留进、出气管道接口，其管径、数量和位置应根据绕组子单元接头（或出线头）和氩管的情况确定，具体布置可参考图 11；

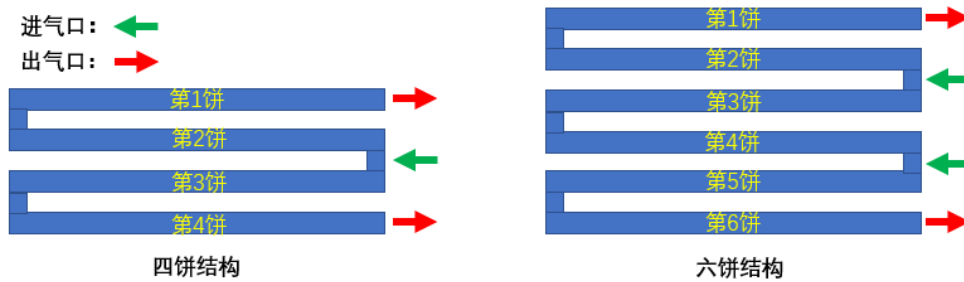


图 11 子单元的进、出气接口

- 8) 氩气排气口设在车间外部;
- 9) 在热处理工作区域配备氧/氩气浓度检测仪。

杂质气体含量要求

绕组将在氩气保护的可控气氛条件下进行热处理。在热处理过程中，应对绕组及炉内杂质气体含量进行实时检测，确保杂质气体含量满足如表 3 所示的技术要求。

表 3 热处理杂质气体含量技术要求

区域	O ₂ 含量 (ppm)	碳氢化合物 (ppm)	H ₂ O (ppm)
绕组内	<10	<1	<10
炉内	<30	无要求	<30

注：绕组内氧气及水含量瞬时达到 300 ppm 是可接受的，但不能超过 10 分钟，碳氢化合物会在升温 (<450℃) 的过程中产生，可通过增大气体流量短时带走。

2.5 热处理炉装料支撑平台要求

- 1) 材料、焊接、紧固件连接、零部件加工、构件组装及加工、安装等符合 GB 50755-2012《钢结构工程施工规范》，焊接工艺、焊接检验等符合 GB 50661-2011《钢结构焊接规范》;
- 3) 支撑平台承重能力不低于 30 吨，按照一般静载压力条件确定焊接难度等级;
- 4) 支撑平台空载下，上表面平面度不得大于 1.5 mm，焊接完成后需进行去应力处理;
- 5) 支撑平台负载下，上表面平面度不得大于 2.5 mm;
- 6) 支撑平台具有很强的刚度，热处理过程中发生的形变不得超过 1 mm(带负载，包括平面度);
- 7) 支撑平台及其附属部件的材料材质为无磁不锈钢;
- 8) 绕组子单元通过防变形工装固定在支撑平台上，并和支撑平台连接为整体，防变形工装与支撑平台采用螺栓连接;

- 9) 乙方需根据甲方提供的绕组子单元吊运夹具位置模型或图纸，完成防变形工装设计与制造工作，防变形工装满足所有线圈子单元要求，可提供一定的径向夹紧力，使得绕组子单元最大形变量不得超过 0.5 mm；
- 10) 防变形工装应确保绕组出线头和接头的最大形变量不得超过 0.2 mm；
- 11) 防变形工装根据甲方提供的绕组轮廓进行布置，防变形工装形成的圆形轮廓内、外轮廓度不大于 1.5mm，材质为无磁不锈钢；
- 12) 乙方需设计绕组出线头支撑、固定工装，防止绕组出线头在热处理过程中由于应力释放或重力作用发生形变，材质为无磁不锈钢；
- 13) 在热处理过程中，支撑平台在炉体内滑移不受阻；
- 14) 在满足绕组限形的功能基础上，防变形工装由乙方自主设计，并提热处理过程中支撑平台及防变形工装的数值模拟分析报告（含绕组），最终设计方案须得到甲方同意；
- 15) 支撑平台数量为 1 套。

2.6 接口要求

- 1) 循环冷却水由甲方提供，乙方须在炉体上预留冷却水接口，并向甲方提供具体的水温、水压、流量等参数；
- 2) 热电偶由甲方布置，线圈 1、6、7 分别每隔约 1.5 m、2 m、1.3 m 布置一组热电偶，每组热电偶的截面分布数量如图 12 所示，乙方须根据甲方要求在炉体上预留热不少于 300 只电偶接口，出线头位置至少布置 3 只热电偶。

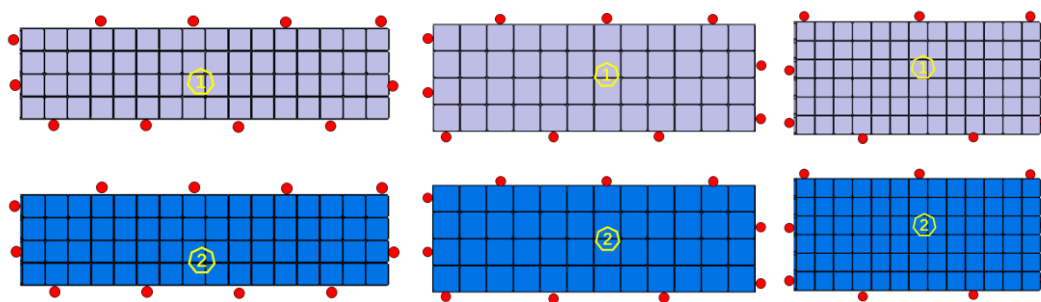


图 12 热电偶布置示意图（线圈 1/6/7 左至右）

2.7 信息采集控制与仪器仪表

- 1) 热处理过程中的数据应实时采集，采集信号见表 4，表中未确定的传感器数量由乙方提供，须甲方同意；

表 4 信息采集与仪表

序号	采集信号	数量	传感器	采集要求
1	炉内（导体）温度	300	N 型热电偶	实时采集
2	炉外温度	/	PT100	实时采集
3	进气压力	/	压力变送器	实时采集
4	出气压力	/	压力变送器	实时采集
5	炉内压力	/	压力变送器	实时采集
6	炉内真空度	/	真空计	/
7	绕组真空度	/	真空计	/
8	炉膛氩气流量	/	流量计	实时采集
9	线圈氩气流量	/	流量计	实时采集
10	氧含量	/	氧含量分析仪	实时采集
11	水含量	/	露点仪	实时采集
12	碳氢含量	/	碳氢分析仪	实时采集

2) 仪器仪表的选用须得到甲方认可。

2.8 自动控制系统技术要求

- 1) 控制界面应直观友好，操作人员简单培训即可上岗操作；
- 2) 控制系统软、硬件均由乙方负责搭建与调试；
- 3) 热处理过程中升降温速率、加热功率、风机频率可调；
- 4) 在热处理过程中，甲方可取工件上的热电偶作为炉体控温热电偶；
- 5) 电控系统需要具备供电、控制、采集、记录、存储、监视、报警保护功能；
- 6) 主要电气元器件须采用质量可靠的品牌产品，选型须得到甲方认可；
- 7) 控制系统须设计双 UPS 电源及切换装置。一旦出现断电，可给控制系统软、硬件供电，供电时长不得小于 1h；
- 8) 安全检测和自动报警系统要求：

加热元件故障时，可自动/手动切换至备用加热元件。

配有检修、操作、防护等安全设施。

配有自来水应急接口，如电源突然非正常断电，系统应保证水循环继续以小流量进行。

氩气流量与炉内压力可根据乙方需求进行设定，具备自动维持炉内气压的功能。当气压超过设定值时，系统能够自动卸压保护。

电控柜安装急停按钮，当发生故障时，可以随即停止工作。

配备炉门安全防护措施。

当炉内温度超过报警温度设定点时报警。

当冷却水压低于报警压力设定点时报警。

设备总电源缺相的警示。

设备总进水缺水的报警。

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。工作压力与加热系统，水压与加热系统设有互锁电路。

各真空阀门系统等设相关安全联锁。

设备总电源缺相的警示与安全联锁。

设备总进水缺水的报警与安全联锁。

具备现场声光及远程报警。

所有与温度、真空、压力、流量、时间、电压、电流等监测、检测和控制均需接入总控系统。

9) 控制系统满足现场工况，并具备足够的抗干扰能力；

10) 控制系统应配备不少于 4 台 24 寸以上的显示器，控制界面与监测界面功能分开，由乙方提供配置方案，需甲方同意；

11) 计算机硬件配制应高于系统运行基本需求，系统运行不得出现卡顿现象，数据存储硬盘不得小于 4 T；

12) 控制系统应配备数据导出接口，数量不少于 2 个；

13) 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。