

## 一、专业实践训练整体情况

实践单位名称	中国科学院等离子体物理研究所	
实践单位地点	安徽省合肥市蜀山区蜀山湖路 350 号	
实践岗位名称	磁体研制	
专业实践训练时间	集中进行	2021 年 05 月 01 日开始 至 2022 年 04 月 30 日结束
		专业实践训练累计 364 天（单位考核前），其中项目研究天数 180 天（单位考核前）
<p><b>（1）基本概况（含实践单位简介、实习实践内容等）</b></p> <p>中科院等离子体物理研究所主要从事高温等离子体物理、磁约束核聚变工程技术及相关高技术研究 and 开发，以探索、开发、解决人类无限而清洁的新能源为最终目的。</p> <p>实践项目是为超导电机绕制装配超导磁体，并对其性能进行测试。</p>		
<p><b>（2）项目研究概述（含项目名称、项目来源、项目经费、主要研究目标和技术难点等）</b></p> <p>HTS COIL FOR AN ELECTRICAL MACHINE. 该项目来源于 GREEN 实验室，经费来自 ANR-法国国家研究署。主要研究目标是设计制造一个用 Re-BCO 超导带绕制而成的超导磁体。技术难点在于该磁体由 12 个双饼线圈组成，线圈支架由 G11 或 G10 制成，使用金属绝缘带，无浸渍。</p>		

(3) 项目开展情况（含项目研究内容、研究方案及技术路线，研究团队分工、本人承担任务及完成情况，存在问题与改进建议等，不少于 500 字。）

•线圈支架必须由 G11 或 G10 制成，并包括将其连接至低温恒温器的元件。这些构件的细节将在施工期间规定。

•稍后将指定电气输出的位置

•线圈应由 12 个 Re BCO 双煎饼组成。每个双煎饼通过一个铜环彼此隔开，从而使线圈热化。

•为金属绝缘线圈，无浸渍。

•如图所示，铜垫圈由 3 个铜元件连接。这些构件的细节，如螺纹，将在施工期间指定。

•这些铜元件必须具有螺纹孔，以便插入冷却系统。

•在项目期间，尺寸可能会略有修改，小于 5%。

•运行裕度（用户电流/临界电流）必须为 80%。

•线圈必须在机械上能够承受电磁力。

•线圈的重量必须尽可能低，同时考虑电气、磁性、热和机械约束。

•临界电流和最大电流斜坡率将由供应商规定。将提供 77 K 下的测试报告。

研制方案为先绕制 12 个双饼超导线圈，对单个线圈进行性能测试并满足要求后，将 12 个超导线圈装配为 1 个磁体，再对整个磁体进行性能测试。

团队分为设计、绕制、装配、测试四组。

本人承担的任务是线圈绕制、装配与测试。

目前项目进度为已完成 8 个超导线圈绕制与测试。

在研制过程中发现的问题是超导线圈在测试时由于低温，超导带材与 G10 骨架会发生收缩，在回温的过程中，会导致线圈变形甚至拖散。

改进建议是在回温的过程中尽量慢，使线圈不会拖散变形。

研制目标为装配后的磁体的  $I_c$  与  $n$  值符合要求。

## 二、专业实践训练收获

### (一) 围绕考核评价指标体系，举例说明以下收获（不少于 800 字）

1. 高温超导磁体的性能 高温超导磁体的性能主要由其 E-I 特性（磁体的临界电流  $I_c$  和  $n$  值）来表现， $E_0$  是为了定义超导体临界电流  $I_c$  而取的一个特殊电场值，一般情况下

取  $E_0 = 1 \mu V / cm$ ； $I_c$  则是当超导体两端电场为  $E_0$  时所通过的电流大小，即为临界电流； $I$  为超导体的传输电流； $n$  为电阻转变陡度指数，临界电流特性曲线拐点的陡度越大， $n$  值就越大。临界电流  $I_c$  可以通过实验得到， $n$  值则需要通过软件将实验数据进行拟合得到。对于超导体的测试方法采用四引线法，该方法适用于低值电阻的测量，是国际通用的标准测量方法。测试平台包括测试电源，控制与采集系统，低温环境三部分。通过搭建临界电流测试平台，测试超导磁体的性能。测试过程为将超导磁体放置入液氮环境，接入电源后，以恒定的升流速率将电流增加至目标电流，然后恒定维持一段时间，然后再以稳定的降流速率将电流降低为 0。

2. 磁体绕制能力 超导线圈设计为双饼，超导带材与哈氏合金带并绕的绕制工艺。哈氏合金带用以提高超导线圈的机械性能。设计一种绕制机构，能够使绕线机同时将两种带材一起绕制在超导线圈骨架上。设计绕线机上的张力控制，保证在绕制过程中超导带材维持在恒定的张力。超导带材保持恒定的张力，可以确保超导线圈中带材的疏密程度一致，保证磁场的均匀性。通过超导接头焊接工装，保证超导带材接头焊接的效率与成功率。由于超导带材长度有限，超导线圈中会存在超导接头，因此超导接头的机械性能和电阻直接影响到超导线圈的机械性能与 E-I 特性。对超导接头进行试制，通过对比焊接参数与接头测试结果，确定超导接头焊接工艺。

3. 增强科研能力 通过在等离子体所三室开展高温超导磁体研制的项目实践，完成了高温超导磁体的线圈绕制、整体装配与性能测试，能够从项目实践中发现问题，解决问题，总结经验，提炼为科研积累。学会使用软件对数据进行拟合，通过拟合曲线对数据进行分析。单个双饼线圈的绕制已经完成，测试结果显示其性能符合要求。下一步将进行磁体整体装配与性能测试。

### (二) 取得成效

1. 超导线圈设计为双饼，超导带材与哈氏合金带并绕的绕制工艺。哈氏合金带用以提高超导线圈的机械性能。两种带材并绕时由于表面摩擦力不同，会导致绕制不同步，因此需要对两种带材施加相应的张力，保证两种带材同步绕在线圈骨架上。通过设计的绕制工装实现高温超导线圈的双饼并绕快速自动绕制，提高了超导线圈的绕制速度，保证了线圈绕制均匀可靠，减少了人工操作的影响。通过设计的焊接工装实现绕制过程中的超导接头快速可靠焊接，节约了焊接时间，提高了绕制效率，同时也保证了焊接成功率，减少了因焊接失败造成的超导带材浪费，节约了一部分生产成本。设计的磁体测试平台中的低温容器，降低了容器中与外界的热交换，减少了实验过程中的液氮消耗，降低了磁体测试实验成本。使用仿真软件对磁体通电进行模拟仿真，

计算获得载流能力，然后使用测试平台对结果进行验证。整个项目研制了12个双饼超导线圈，对其进行了性能测试，并将装配为一套高温超导磁体，使用搭建的测试平台验证其整体性能。

2. 本项目中与学位论文相关的有以下四部分：线圈绕制部分，工装设计部分，测试平台搭建部分，磁体性能测试部分。线圈绕制部分包括了绕线机原理与改造，绕制张力计算与测试，通过三维设计软件绘制绕线机模型，通过理论和数学计算得到张力数值，使用仿真软件对并绕带材进行模拟仿真分析其受力情况。工装设计部分包括绕制工装与接头焊接工装，通过三维设计软件绘制绕制工装模型，介绍了绕制流程，超导带材接头焊接工装部分介绍了超导带材接头焊接工艺，并使用测试平台对接头电阻进行测试，验证了超导带材接头工装焊接工艺的可靠性。测试平台部分介绍了平台构成，测试原理，测试设备与测试流程。性能测试部分使用仿真软件对磁体通电进行了模拟仿真，计算获得载流能力，然后使用测试平台对结果进行验证。在测试部分结尾介绍了单个超导线圈与装配完成的超导磁体的测试数据，使用origin对测试数据进行拟合得到通电期间的电流转变图，进而得出磁体的临界电流  $I_c$  和  $n$  值。最后测试结果表明所研制的高温超导磁体的性能符合要求。

**3. 在校期间主要研究成果【含产品与样机、专利（含申请）、著作、软件著作权、论文、标准、获奖、成果转化等】**

成果名称	类别[含产品与样机、专利（含申请）、著作、软件著作权、论文、标准、获奖、成果转化等]	发表时间/授权或申请时间等	刊物名称/专利授权或申请号等	本人排名/总人数	学校排名/总参与单位数
------	--	---------------	----------------	----------	-------------

**本人承诺**

在专业实践训练及考核报告撰写过程中，如实提供材料，严守学术道德、遵循学术规范。

签字：

2022年6月6日

### 三、考核评价

<p>校外合作 导师(或现 场导师)  评价</p>	<p>重点对研究生项目研究开展情况、职业素养、行业知识掌握、环境和岗位适应能力、工程实践能力、团队协作能力，以及通过技术创新、成果转化、解决工程实际问题等取得的经济和社会效益等方面的评价：</p> <p>该生在校外专业实践中，工作努力，态度认真，团结同事。能够在工作中发现问题，解决问题。能够将测试数据进行拟合与分析，得出结论。已完成的线圈绕制部分，是整个超导磁体的主要部件，打好了整个项目的基础。</p> <p>校外合作导师（或现场导师）签字： 2022年6月6日</p>
<p>校内导师  评价</p>	<p>重点对研究生科学素质、基础及专业知识掌握、技术创新能力、取得的研究成果、项目研究与学位论文撰写的相关程度等方面的评价：</p> <p>该生通过专业实践，掌握了超导磁体的线圈绕制技术，创新设计了绕制工装、焊接工装，对测试数据进行了拟合分析，对测试结果进行了判定。项目内容与学位论文关系相关程度较高，还需要在理论研究与创新方面再进行一系列挖掘。</p> <p>校内导师签字： 2022年 6月 6日</p>



#### 四、相关支撑材料

在校期间主要研究成果【含产品与样机、专利（含申请）、著作、软件著作权、论文、标准、获奖、成果转化等】证明材料原件扫描件，具体提交要求如下：

1. 产品与样机扫描件包含企业证明材料（含产品与样机功能及创新性介绍、社会经济效益、个人贡献说明及相关照片等）。

2. 授权专利扫描件包含专利证书授权页；未授权专利扫描件包含专利受理书扫描件和专利请求书扫描件。

3. 著作扫描件包含封面、封底和版权页。

4. 软件著作权扫描件包含著作权证书和登记申请表。

5. 论文扫描件包含封面、封底、目录和论文全文（含收录证明）。

6. 标准扫描件包含封面、版权页、发布公告、前言和目次。

7. 获奖扫描件包含显示单位和个人排名的获奖证书。

8. 成果转化扫描件包含企业证明材料（含成果技术说明、社会经济效益、个人贡献说明及相关照片等）。