

# 50kA 超导变压器初级绕组设计制作及低温通电实验

任志斌, 于敏, 刘华军, 施毅, 龙凤, 武玉, 陈敬林

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

**摘要:** 主要讨论了超导变压器初级绕组的设计、绕制以及低温通电实验, 初级绕组主要采用 2942 匝 NbTi 超导线绕制, 并经过真空压力浸渍而成。利用 Ansys 软件分析了其磁场分布。采用 LHe 浸泡式制冷, 最大电流可达 190A, 中心场约为 2T。

**关键词:** 超导磁体; 失超保护; 超导变压器

## The design and test of superconducting transformer primary coil

Ren Zhibin, Yu Min, Liu Huajun, Shi Yi, Long Feng, Wu Yu, Chen Jinglin

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** This paper focused on the design and manufacture of superconducting transformer primary coil. The primary coil was twisted by 2942 turns multi-filamentary NbTi wire. The coil was immersed in liquid helium. The maximum current was 190A and the centre field was about 2T. The software Ansys was used to analyze the distribution of the magnet field.

**Keywords:** Superconducting magnet, Quench protection, superconducting transformer

## 1 前言

随着超导技术在大型超导储能电站、核聚变反应堆、大型高能物理加速器磁体等方面的广泛应用<sup>[1,2]</sup>, 管内电缆导体 (Cable-in-Conduit Conductor, CICC)<sup>[3]</sup> 以其在机械结构、绝缘性能、磁体绕制工艺及运行安全性等方面的优势, 成为大型超导磁体的首选导体。国际上大型超导磁体所采用的都是先进、高性能 CICC 超导体。建立能够满足大尺寸、大电流、高背场要求的、可以对高性能 CICC 超导体开展全面低温性能测试的实验系统, 可以提高我国在 CICC 导体方面的实验研究水平。中国科学院等离子体物理研究所目前正在建设用于测试 ITER 矫正场线圈的测试装置, 该装置拟采用超导变压器装置来代替传统的电源装置。本文讨论该变压器初级绕组的设计制作及降温通电实验。

## 2 测试装置介绍

整个 CICC 导体测试装置系统包括背景磁体、超导变压器、低温杜瓦、低温连接管道、失超保

护及采集系统等。图 1 为该测试装置示意图。背景磁体由 4 个独立的同轴磁体线圈组成, 磁体总的电感为 5.99H。4.2K 运行温度下可产生中心场 7T, 储能 3MJ<sup>[4,5]</sup>。为避免使用庞大而昂贵的直流电源以及电流引线装置, 测试装置采用超导变压器来代替传统的电源系统。超导变压器设计最高可产生 50kA 的电流。在建的超导变压器线圈采用两个同轴的超导线圈绕制而成, 内层的是初级绕组。次级绕组采用 CICC 导体, 由 441 根 NbTi 超导线通过 4 级绞制而成, 共有 4 匝。通过初级回路的磁通变化在次级回路中感应出所需的电流。整个测试装置包含两套杜瓦: 背景磁体杜瓦及超导变压器杜瓦。两套杜瓦都有独立的液氮池, 冷屏与液氮池直接连接以减小辐射, 降低 He 的损耗。一台 500W @ 4.5K 制冷机用来提供超导磁体及 CICC 导体所需的 4.2K 低温环境。

## 3 初级绕组设计制作

### 3.1 初级绕制的设计

为了便于测试导体的安装, 超导变压器线圈采用两个同轴的超导线圈绕制而成, 里面的初

收稿日期: 2010-02-04

基金项目: 中国科学院重大科研装备 (Yz200726) 资助。

作者简介: 任志斌 (1963-), 男, 工程师, 主要研究方向为低温超导。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

级绕组,采用单根超导线绕制的螺旋管磁体,外面的次级绕组采用 CICC (Cable in Conduit Conductor, 管内电缆导体)结构铠甲导体绕制。通过

初级回路的磁通变化在次级回路中感应出所需的电流。为了能够承载所测试大电流,次级线圈 CICC 导体由多级超导绞线制而成。

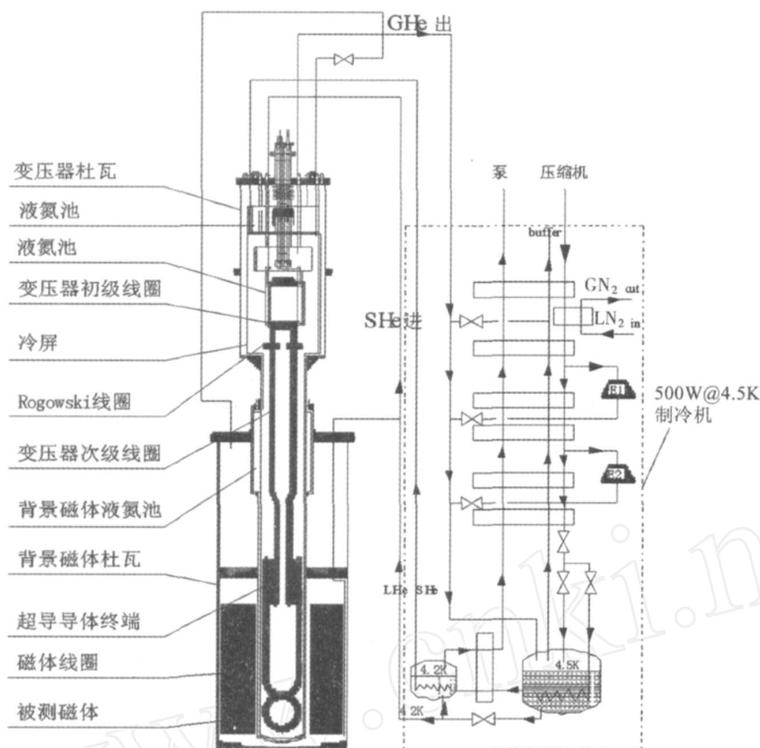


图 1 CICC 导体测试装置示意图

Fig 1 Test facility for CICC short sample measurement

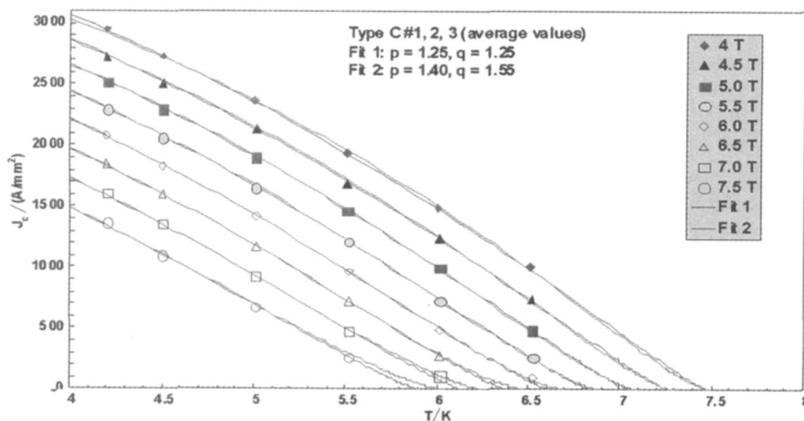


图 2 NbTi 超导线线的性能曲线

Fig 2 The properties of NbTi wire

超导变压器初级线圈选用 NbTi 超导材料。主要是基于下面的考虑:绕组上的最高磁场  $B_{max} < 2T$ ,处在 NbTi 超导材料使用范围内; NbTi 超导材料生产工艺比较成熟,性能比较稳定,不需要经

过热处理,制作工艺也较为简单;相对于  $Nb_3Sn$  而言, NbTi 价格比较便宜,且应力对 NbTi 线材性能的影响不大。所用 NbTi 的主要技术参数如表 1 所示。图 2 给出了该 NbTi 线的性能曲线图:在

4. 2K, 5T 情况下, 临界电流  $I_c = 550A$ ; 按照定标率<sup>[6]</sup>, 2T 情况下, 临界电流  $I_c = 970A$ , 考虑到绕制以后性能的退化, 2T 情况下, 按  $I_c = 900A$  计算, 则超导变压器线圈的温度裕度经计算为 3.47K。表 2 列出了磁体的主要技术参数。

表 1 超导线主要技术参数

Tab 1 The parameters of NbTi wire

项目	参数
超导线线径	0.87mm
超导细丝丝径	6 $\mu$ m
超导线中细丝数	8 910
扭距	10mm
铜超比	1.38
临界电流 4.2K/5T	>550A
RRR	>70

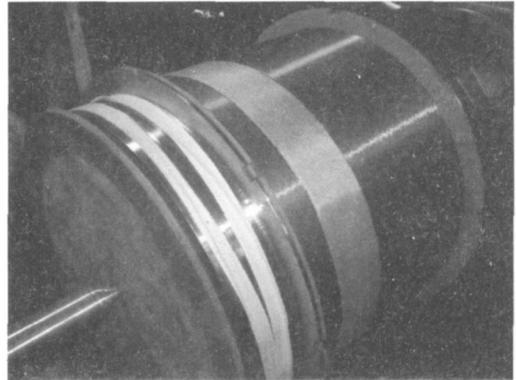
表 2 磁体的主要技术参数

Tab 2 The parameters of magnet

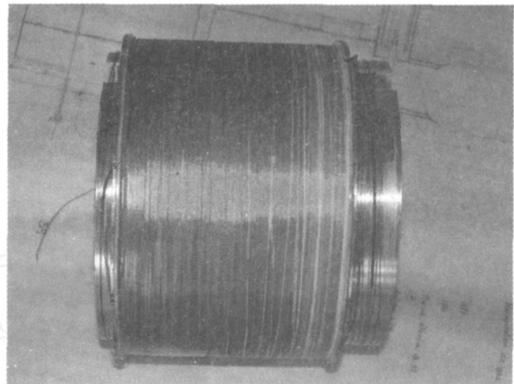
项目	参数
磁体内径	166 mm
磁体外径	294 mm
高度	190 mm
匝数	2 942
电感	2 H
导体	NbTi
制冷方式	浸泡 LHe 冷却
最大电流	150 A
$I_{op} / I_c$	0.214
磁场	<2.16T
温度裕度	3.47K

### 3.2 初级线圈的制作

考虑到磁场以及装配精度的要求, 线圈骨架采用 316L 不锈钢整体圆筒加工而成。线圈的骨架较大, 现有的磁体绕线机满足不了要求, 磁体的绕制工作是在一台车床 (型号: C620) 上进行的。图 3 为磁体绕制过程照片。绕制时, 超导线拉力设置为 4kg, 转速约为 15 ~ 30 匝 / 分钟。磁体共绕制了 15 层, 其组成共有 2 942 匝 NbTi 线圈。绕制后线圈在 1 000V 直流耐压测试下, 泄漏电流为零, 绝缘电阻为无穷大。磁体绕制后在磁体外表面进行了 3 层玻璃丝带半叠包。浸胶后, 再将整个磁体放入真空压力浸渍 (Vacuum Pressure Impregnation, VPI) 炉中进行固化。固化后的磁体如图 3 右图所示。



(a) 绕制时照片



(b) VPI 后次级照片

图 3 次级制作现场照片

Fig 3 Manufacturing of primary coil

## 4 低温通电实验

通电实验主要部件包括磁体电源、直流开关、

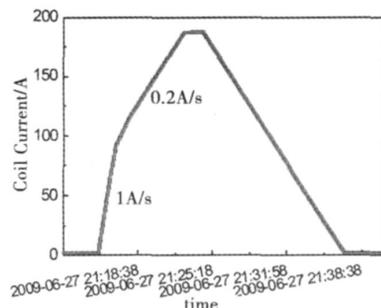


图 4 磁体的通电波形

Fig 4 Test result of primary coil

泄能电阻 (4) 及磁体。在 90A 以下, 通电速率为 1A/s; 大于 90A 后, 通电速率控制在 0.2A/s, 电流最大达到 190A。图 4 为磁体的通电实验波形。图 5 为 190A 时磁体磁场分布情况。

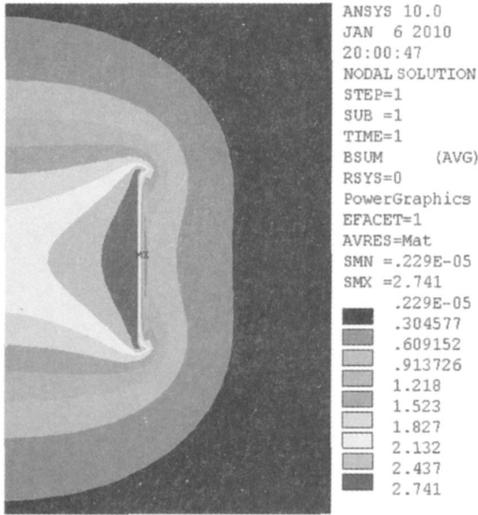


图 5 190A 时次级的磁场分布 (水平方向为径向方向、垂直方向为轴向方向)

Fig 5 Distribution of magnet field

### 5 总结

本文主要讨论了超导变压器初级绕组的设计

制作以及通电实验,磁体采用 NbTi 超导线绕制 15 层,共 2 942 匝,并经过 VPI 处理。通电电流可达 190A,且未出现失超。其中心磁场可达 2T;最高磁场可达 2.74T。该试验表明,超导变压器初级绕组的设计制作,完全符合设计目标要求。

### 参考文献

[1] Wu Y. A calculation of steady pressure drop and an analysis of HT - 7U CCC [J]. Plasma Sci Technol , 2002, 4(4): 1 395 - 1 398

[2] 张小斌,王莉,贾林祥. 北京正负电子对撞机重大改造工程中超导磁体电流引线设计 [J]. 原子能科学技术, 2006, 40(9): 579 - 583

[3] 蒋华伟,武松涛. CCC 超导体数字模拟设计 [J]. 低温与超导, 2005, 33(3): 34 - 37.

[4] 刘华军,武玉,施毅,等. 管内电缆导体测试装置 [J]. 低温物理, 2009, 31(5): 76 - 79.

[5] 刘华军,武玉,陈敬林,等. 7T 大口径 NbTi 超导磁体降温通电实验 [J]. 低温与超导, 2009, 37(3): 24 - 26

[6] 谭运飞. 管内电缆导体的研制及性能分析与研究 [D]. 合肥: 中国科学院博士论文, 2007.

(上接 16 页)

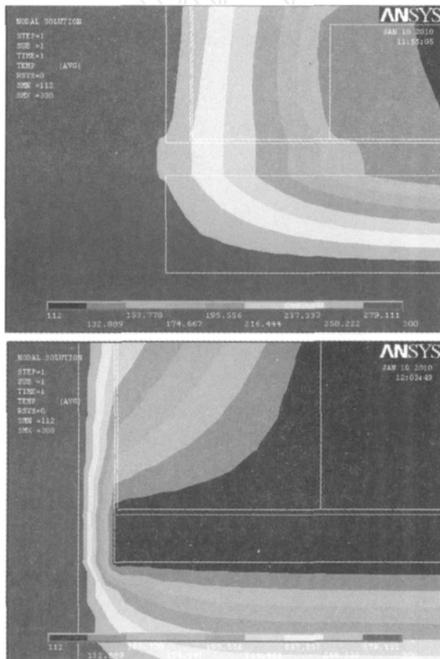


图 4 两种结构下角部的温度场分布

Fig 4 Temperature Distributions of the corner for different constructs

### 5 结论

本文采用 ANSYS 软件,对大型 LNG 储罐角保冷块附近的温度场分布进行了有限元分析。结果表明保持罐底、罐壁绝热结构交汇处的连续性非常重要。角保冷块应有足够的长度,以减少沿二次罐底的漏热量。

### 参考文献

[1] 全球 LNG 接收站统计 [J]. 国际石油经济, 2009(6): 69 - 72

[2] 彭京旗. 大型 LNG 低温储罐施工技术 [J]. 石油化工建设, 2005, 27(4): 12 - 14.

[3] 刘利. LNG 接收站的设计技术 [J]. 石油化工建设, 2005, 27(4): 8 - 11.

[4] 王红,白改玲,李艳辉,等. LNG 接收站流程模拟计算 [J]. 天然气工业, 2007, 27(11): 108 - 109.

[5] 章伟星,李科浚,周昊,等. 薄膜式 LNG 运输船温度场研究 [J]. 天然气工业, 2005, 25(10): 110 - 112

[6] 王正兴. 特种卧式低温容器径向支撑结构温度场的有限元分析 [J]. 低温工程, 2008(3): 42 - 44.