

TRN' CN8701116

CNIC-00035

SIP-0014

中国核科技报告

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

8mm回旋管用超导磁体系统的研制



中國核情報中心

China Nuclear Information Centre

CNIC-00035

SIP-0014

8mm回旋管用超导 磁体系统的研制

朱学武 程本培 陈 健 蒲 钊

李月珍 张居仁 李秀英 刘健民 王魁武

(西南物理研究所, 四川)

中国核情报中心

北京·1987

摘 要

本文描述了一个8mm回旋管用的超导磁体系统的研制。它的主磁场线圈中心轴磁场达到2.14T，均匀区长度为14.5cm，均匀度 $\pm 3.84\%$ ，利用超导开关可以闭环运行。副磁场均匀区长度为4.5cm，均匀度 $\pm 1.43\%$ 。杜瓦具有台阶型室温通道，上端直径74mm，下端直径140mm。杜瓦是直筒型的，装有超导磁体时液氮蒸发量为4L/h。

关键词 回旋管 超导磁体系统

DEVELOPMENT OF A SUPERCONDUCTING MAGNET SYSTEM FOR THE 8mm GYROTRONE TUBE

Zhu Xuewu Cheng Benpei Chen Jian

Pu Men Li Yuezheng Zhang Juren

Li Xiuying Liu Jianmin Wang Kuiwu

(Southwestern Institute of Physics, Sichuan)

ABSTRACT

Development of a superconducting magnet system for the 8mm gyrotrone tube is described in this paper. Magnetic field at the axis of its main field coil has reached 2.14 T. Length of uniform region is 14.5 cm. Degree of uniformity is $\pm 3.84\%$. It could be operated in persistent mode by means of superconducting switch. Length of uniform region of the secondary field coil is 4.5 cm. Degree of uniformity is $\pm 1.43\%$. Dewar vessel has a home temperature bore in step mode. The upper section diameter is 74 mm and the lower section is 140 mm. The average liquid helium boil-off rate of dewar vessel with superconducting magnet is 4 L/h.

一、引言

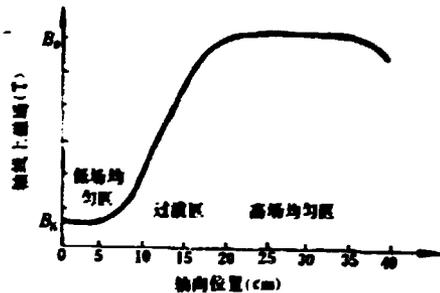
利用电子回旋共振加热 (ECRH) 等离子体是聚变研究的课题之一。近年来, 由于回旋管的出现, 在毫米波段已可产生几百千瓦以至兆瓦级的大功率微波源, 使得有可能利用 ECRH 提高等离子体温度实现聚变点火。

回旋管可分成两大部分: 管子本身及磁场线圈。磁场线圈又分为主磁场线圈与副磁场线圈。毫米波回旋管的主磁场线圈需要数特斯拉的高稳定度均匀场, 采用超导磁体能很好地满足要求。我们为成都电讯工程学院高能电子学研究所研制了 8mm 回旋管用的超导磁体系统。它由超导磁体和具有室温通道的液氮杜瓦两部分组成。

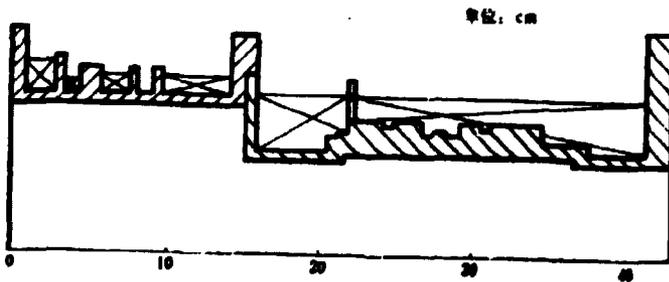
二、磁体的设计和制作

该回旋管所要求的轴线磁场分布见图一。高场均匀区宽度为 14cm, 磁场 B_0 要求 1.4T, 均匀度要求 $\pm 0.1\%$ 。低场均匀区宽度为 4cm, 磁场 $B_x = \left(\frac{1}{6} \sim \frac{1}{15}\right) B_0$, 均匀度为 1%。

为了满足上述磁场分布的要求, 先用正则化方法获得若干组电流分布, 然后将理想电流分布离散化得到初步的设计方案, 再用矩形截面线圈公式重新计算和调整设计, 在场形、强度和均匀性方面获得较为理想的结果。^[1] 最后设计成的线圈结构见图二, 其具体参数见表一。表中 a , 为线圈内径, b , 为线圈外径, c , 为线圈宽度, Z_0 为线圈中心的轴向坐标, i , 为电流方向。线圈 1 至 4 组成副磁场线圈, 线圈 6 至 16 组成主磁场线圈。主磁场线圈共 30553 匝, 电感计算值为 53H, 副磁场线圈共 6264 匝。



图一 回旋管轴线磁场分布图



图二 回旋管磁体结构图

磁体采用了外径0.42mm, 内芯直径0.25mm的包铜单芯NbTi线, 铜超比为1.8:1, 外面涂漆绝缘。线圈骨架的材料选用环氧酚醛布板, 用低温胶粘接。采用非金属材料作骨架可靠地解决了绕组对骨架的绝缘问题, 同时也减轻了整个磁体的重量, 减小了液氮预冷量。整个超导磁体由4根超导导线串接绕成, 层间视情况填涂冷膜或氧化铝箔。绕制成的磁体重30kg, 其中超导导线重21.5kg, 线圈骨架重5.4kg, 紧固结构重3kg。

表一 回旋管磁体参数

线圈序号	$a_i(\text{cm})$	$b_i(\text{cm})$	$c_i(\text{cm})$	$Z_i(\text{cm})$	t_i
1	9.2	11.05	0.7425	1.25	1
2	9.2	10.5	0.9	5.5	1
3	9.2	9.9	0.45	3.0	-1
4	9.2	10.6	2.9925	11.0	-1
6	5.9	9.75	2.34	17.9425	1
7	6.9	9.75	0.9675	21.25	1
8	7.9	9.65	6.21	28.8	1
9	6.75	9.65	0.9675	35.9775	1
10	5.9	9.65	1.89	38.835	1
11	6.9	7.9	1.485	28.6	1
12	7.2	7.9	0.36	25.0	1
13	7.8	7.9	0.45	31.7	1
14	6.9	7.0	0.45	28.6	-1
16	6.8	6.85	0.36	20.6425	1

为了获得高稳定度的磁场, 主磁场线圈采用闭环工作方法。研制了一个超导开关(SS)和一个超导动力开关(PS)。在线圈励磁时, PS保持超导态, SS为常态; 闭环运行时, SS也为超导态。超导开关与超导动力开关都是热控式的, 用外包CuNi的NbTi单芯线无感绕成。

磁体的保护采用并联电阻法, 桥路法和部分补偿法作为猝灭信号的探测手段。研制了本磁体用的一套超导磁体闭合工作控制器^[2]。

三、杜瓦的设计和制造

配合该超导磁体和回旋管设计和制造了一个具有室温通道的液氮杜瓦。为了满足回旋管研究中对磁体变化的要求, 杜瓦设计成直筒型的。室温通道是台阶型的, 上部直径74mm,

下部直径140mm。

杜瓦的总体结构见图三。液氮容器1，直径为350mm，深度为1673mm，装入超导磁体后磁体上方可盛40余升液氮供试验。外壳2，直径552mm，高1800mm。其它尚有顶法兰3、辐射屏组件4、电流引线5等。设计中较困难的是靠近室温通道的内夹层8。根据室温通道的直径及磁体内径的要求，液氮容器的内筒直径为108mm，内夹层绝热空间的间隔只有14mm。

杜瓦的结构材料主要选用1Cr18Ni9Ti不锈钢，绝热夹层采用焊接结构。

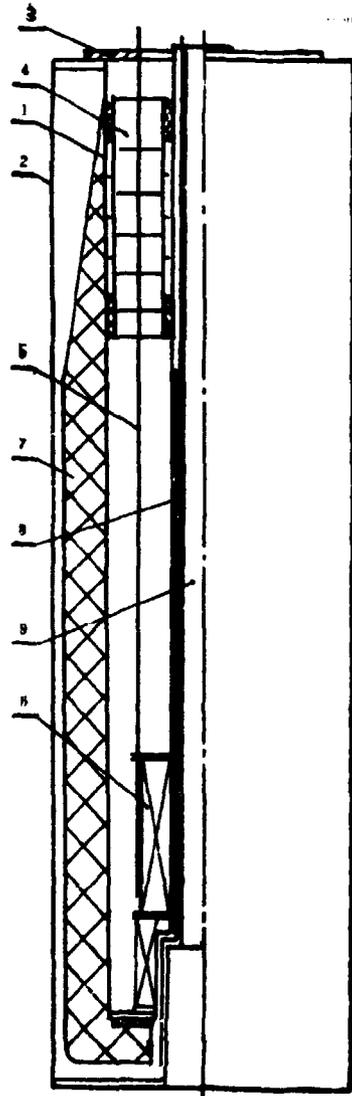
该杜瓦采用高真空多屏绝热。在液氮容器外面包20层铝箔、尼龙网相间的多屏绝热。在内夹层部分，曾通过膨胀合金过渡从液氮容器中上部引出36根 $\phi 2.5 \times 0.5\text{mm}$ 的紫铜管，焊到传导屏上，利用一部分氮回气冷却传导屏来屏蔽室温空间的热辐射。由于焊缝多，微小漏孔不易检出，引起了返工。修改后的设计用不锈钢管做成回气夹套来屏蔽热辐射。下端台阶部分则在回气夹套底焊上传导屏。在制造过程中用喷氮法和氦罩法检漏，严格把关。

四、超导磁体系统的实验结果

超导磁体与杜瓦组装以后，进行了试验。超导磁体回路接线原理图见图四。对超导磁体性能作了各种测试，其结果如下：

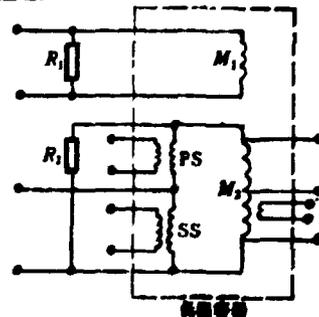
(一) 场形分布及磁场均匀度

在磁体电流达到15A和20A时，分别使主磁场线圈闭环运行，副磁场线圈由稳流电源维持供电，用砷化镓霍尔元件测量了磁体的轴向场分布如图五所示。由图可见，主磁场线圈轴向均匀区为21~35.5cm，长14.5cm，副磁场线圈轴向均匀区为1.5~6cm，长4.5cm。均匀区磁场相对精度与均匀度的实验值与计算值的比较在表2中给出。其中 \bar{B} 为磁场的算术平均值， γ 为精确度， γ/\bar{B} 为相对精度， $\Delta B/\bar{B}$ 为均匀度。结果是令人满意的。



图三 杜瓦总体结构图

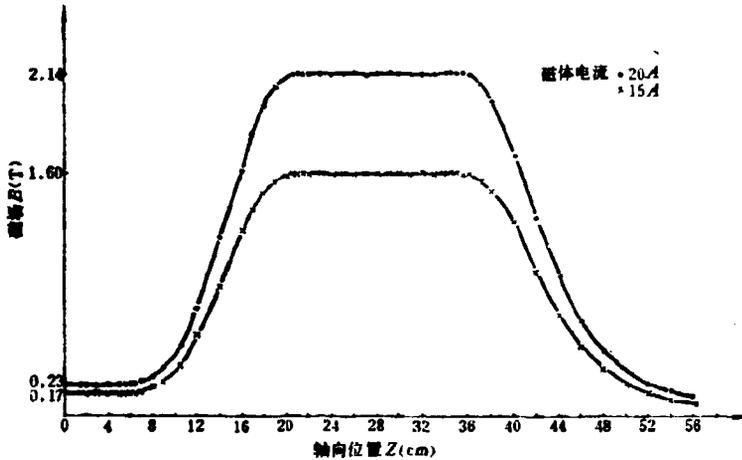
1.液氮容器，2.外壳，3.顶法兰，4.辐射屏组件，5.电流引线，6.超导磁体，7.多层绝热，8.内夹层，9.室温通道。



图四 超导磁体回路接线原理图

M_1 副磁场线圈， M_2 主磁场线圈， R_1 、 R_2 限能电阻，PS超导动力开关，SS超导开关。

(二) 磁体的闭环运行及磁场稳定度



图五 实测的回旋管磁体场形分布

表2 均匀区磁场的相对精度与均匀度

场区	磁体电流	γ/B	$\Delta B/B$
低场均匀区	$I_{\text{主}}=30\text{A}$	0.55%	$\pm 1.59\%$
	$I_{\text{副}}=15\text{A}$	0.66%	$\pm 1.42\%$
	$I_{\text{副}}=20\text{A}$	0.66%	$\pm 1.43\%$
高场均匀区	$I_{\text{主}}=30\text{A}$	0.81%	$\pm 1.79\%$
	$I_{\text{副}}=15\text{A}$	1.54%	$\pm 3.84\%$
	$I_{\text{副}}=20\text{A}$	1.38%	$\pm 3.49\%$

用前面提到的超导开关使主磁场线圈分别在 8.5A、15A 和 20A 的电流下实现了闭环运行，对应的高场均匀区磁场分别为 0.91T、1.60T 和 2.14T。在 15A 下闭环连续运行 2 小时，用霍尔元件观察磁场，没有见到衰减。稳定度满足 1% 的要求。

(三) 副磁场的可调性

我们将主、副磁场线圈均励磁到 15A，并将主磁场线圈闭环运行，副磁场线圈则以大约 2A/min 的速度将电流从 15A 降至 0.1A，后又升至 11A，再降到 0。在此过程中，主磁场线圈仍能稳定闭环运行。这就满足了回旋管实验要求副线圈磁场可调的要求。

杜瓦在带有 5 根 $\phi 10 \times 1\text{mm}$ 德银管电流引线和 13 根 $\phi 0.4$ 铜测量引线的情况下，测得液氮蒸发量为 4L/h。如果进一步改进液氮容器主回气和回气夹套支回气的气体流量分配，整个杜瓦的液氮蒸发量可以进一步降低。

五、结 论

研制了一个8mm回旋管用的超导磁体系统。其主磁场线圈中心轴磁场达到2.14T，均匀区长度为14.5cm，均匀度 $\pm 3.84\%$ ，副磁场线圈均匀区长为4.5cm，均匀度 $\pm 1.43\%$ ，磁场值可以调节。带有磁体供电、测量引线时，杜瓦的液氮蒸发量为4L/h。系统可以提供8mm回旋管连续试验8~10小时，满足使用要求。

本工作得到了李焕杏同志的支持。参加实验的还有师清菊、汤凯荣、程永红、孙坤哲、何遗桂、何晓玲等同志，在此表示感谢。

参 考 文 献

- 【1】 崔景旭，程本培，低温与超导，4，74（1983）。
- 【2】 李月珍，程本培，李秀英，低温物理，1，63（1984）。

CHINA NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY REPORT

China Nuclear Information Centre