

# 世界各超导托卡马克装置冷屏结构的设计

吉爱红

(南京航空航天大学机电学院, 210016)

廖子英 武松涛

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥, 230031)

**摘要:** 简要介绍了应用于磁约束热核聚变实验研究的超导托卡马克装置, 重点叙述了当前世界上各超导托卡马克装置的重要部件—冷屏的结构设计情况。

**关键词:** 超导托卡马克 冷屏 传热

## 1 引言

能源是社会发展的基础。由于社会经济的发展, 能源消耗量逐年增加, 世界将面临严重的能源短缺。聚变能是人类未来最理想的能源, 其物理基础是氢原子的两种同位素, 氘和氚发生核聚变反应。要把聚变时放出的能量作为能源, 必须对剧烈的聚变反应加以控制, 因而称为受控核聚变。实现受控热核聚变的主要途径有磁约束和惯性约束两种。托卡马克装置是研究磁约束核聚变的一个重要实验手段, 由于核聚变能源开发对全人类来说是一个很重要的开发课题, 世界各国都投入了大量的财力、人力, 致力于等离子体和核聚变的研究。自从 1968 年前苏联物理学家阿齐莫维奇 (Artsimovich) 领导的 T-3 和 TM-3 托卡马克装置实验获得成功以来, 世界上已先后建立了上百个大小不等的托卡马克装置。目前, 托卡马克聚变实验研究的重点, 已由常规托卡马克转到超导托卡马克 (Superconducting Tokamak) 上来, 以开展未来稳态先进托卡马克聚变堆的

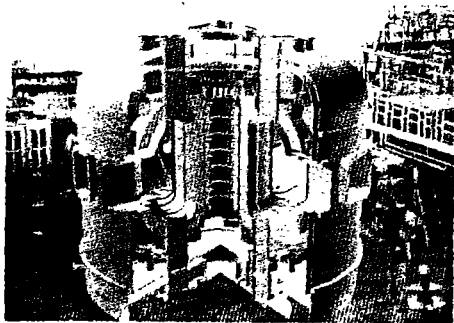


图 1 HT-7U 超导托卡马克装置



图 2 HT-7 氮屏

工程技术及物理基础的实验研究。图 1 是中科院等离子体物理研究所研制的 HT-7U 超导托卡马克装置。

超导托卡马克装置中, 超导体材料一般为 NbTi 或 Nb<sub>3</sub>Sn。其采用浸泡冷却或迫流冷却方式, 冷却介质为液氮, 工程温度在 4.5K 左右。为减少超导磁体低温系统运行费用, 必须尽可能降低 4.5K 左右温区的热负荷。低温磁体系统静态热负荷主要由导热、对流和辐射三种热量传递方式传入。对于低温超导装置, 由于其高真空条件和特殊的支撑结构, 固体导热和残余气体导热一般都较小, 因此辐射热是低温超导装置中最主要的一种热负荷。为有效减少超导托卡马克装置中超导磁体的热负荷, 一般在超导磁体与真空室及超导磁体与外真空杜瓦之间均设置有冷屏, 冷屏由液氮或冷氦气冷却。下面分别介绍世界上主要的超导托卡马克装置的冷屏结构。

## 2 HT-7 超导托卡马克

HT-7(Hefei Tokamak-7)是我国第一台超导托卡马克核聚变实验装置,1994 年底在中科院等离子体物理研究所建成,从 1995 年投入试运行至今,已取得了多项工程上和物理上的重要成果。HT-7 冷屏的主要作用是屏蔽内真空室和外真空室表面对超导磁体系统的热辐射,以确保超导磁体能工作在液氮温区。同时,它还起电磁屏蔽的作用,以减少由于极向磁场变化对超导磁体产生的影响。图 2 为 HT-7 冷屏的结构图。内、外冷屏采用 15mm 厚的紫铜制成,总重 7.2 吨,内、外氮屏环体分别由 8 个 1/8 段组成,为便于装配,外氮屏的各个环段,都可以上下分开。内、外氮屏环体分设于超导纵场磁体的内、外两侧,对纵场结构的所有表面形成全封闭的屏蔽。在内、外氮屏环体外表面上开有槽,用以埋设 $\varnothing 10 \times 1$ mm 的冷却铜管。氮屏环体上共设有 24 条冷却通道,采用并联供冷以保证温度的均匀性。氮屏的工作温度为 75K-85K,在氮屏环体和窗口段共设置了 32 个测温元件,用以监测各段环体和窗口段的温度。为防止引起环流,在大环方向设有 8 道绝缘隔缝,并在环体赤道面内侧也设置了绝缘隔缝。为减小不同温区部件的热辐射,在氮屏所有内外表面都贴有铝箔。氮屏环体在组装后形成一个强度很好的刚性环体,是超导磁体系统的支撑。

### 3 ITER 超导托卡马克

ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor)是由国际上四个重要聚变研究大国(美、日、欧共体和俄罗斯)从 1984 年开始便计划建造的国际聚变点火堆,其工程设计在 1998 年已经完成。

ITER 冷屏包括四种类型:(1)真空室冷屏:位于真空室和环形磁体之间,表面积约 2900m<sup>2</sup>;(2)外真空杜瓦冷屏:分布于杜瓦内壁上,表面积约 4040m<sup>2</sup>;(3)过渡段冷屏:位于真空室和外真空杜瓦的连接段等过渡段,表面积约 3650m<sup>2</sup>;(4)支撑冷屏:主要部件支撑冷屏,表面积相当小,约 430m<sup>2</sup>。

冷屏温度约 80~100K,冷却管中为压缩氦气。ITER 的冷却介质采用冷氦气而不是液氮,主要是基于以下几点考虑:(1)如果液氮泄漏,会冻结在超导线圈上,难以检测到。而且大泄漏也很容易结成危险的冰块;(2)考虑到 $\gamma$ 辐射将有可能在结霜的线圈上产生易爆的臭氧冰块;(3)还考虑到氮的活化作用,但这个问题并不十分突出;(4)热斑会引起液氮小块的沸腾,从而产生压力的峰值;(5)使用冷氦气作为冷却介质将能很可靠的从低温中心获得所需的压力、温度和流速。

为避免焊接时焊穿,冷却管主要选用壁厚为 2.5mm 的圆管,圆管的内径根据其长度来确定,以使冷氦气保持正常的压力降 0.1MPa。由于方管易于焊接,所以有些地方采用方管。但是方案不易弯曲,很难贴合在冷屏壁面上,因此大多采用可靠、方便、价格便宜的厚壁圆管。

ITER 冷屏将采用表面镀银(金为备用)方法减小冷屏表面的热辐射系数,从而降低冷屏系统的热负荷。

### 4 Tore Supra 超导托卡马克

法国的 Tore Supra 装置于 1988 年建成,是目前世界上运行最好的超导托卡马克装置。Tore Supra 冷屏分为内、外冷屏,分别位于真空室与超导磁体以及超导磁体与外真空杜瓦之间,将超导线圈包围,以屏蔽来自真空室和外真空杜瓦的热辐射。内冷屏的大半径为 2432.5mm,小半径为 1057.5mm;外冷屏的大半径为 2447.5mm,小半径为 1502.5mm。内、外冷屏成多面体,由 18 个角度为 20 度的楔形段组成。每部分包括两个横截面为圆形的圆筒,圆筒由绝缘隔板连接而成,为夹层结构,上下两夹层板的厚度各为 3mm,中间采用截面外壁形状为矩形(24×24mm),内壁形状为圆形( $\Phi 18$ mm)的不锈钢管作为冷却管道,冷却管总长为 2000m,管道间距约为 200mm。冷却介质为 80K 的冷氦气。内、外冷屏由六根支撑固定在超导磁体的基座上,支撑为管状,在支撑上敷设有冷却管,用来冷却超导磁体的基座支撑。内冷屏表面积 96m<sup>2</sup>,外冷屏表面积为 135m<sup>2</sup>。运行时,冷屏系统热负荷为 8.4kW。

### 5 SST-1 超导托卡马克

印度的 SST-1 是一台中型托卡马克装置,其纵场系统采用超导线圈,计划 2002 年建成。SST-1 冷屏用 85K 液氮冷却,液氮压力为 2.5bar。冷却管为圆管,内径为  $\Phi 9\text{mm}$ ,外径为  $\Phi 14\text{mm}$ 。冷却管道采用惰性气体保护钨极电弧焊方法焊接在板上,管间距离为 60mm,使冷却板的平均温度保持在 87K。真空室烘烤时,要求冷屏冷却管中液氮的流量为 1200 升/小时。冷屏由 16 个扇形段组成,每段包括屏蔽内真空室热负荷的 7 块冷却板和屏蔽外真空杜瓦热负荷的 4 块冷却板,冷却板呈圆筒状,板厚度 2mm,材料为 304L 不锈钢。

## 6 TPX 超导托卡马克

TPX(Tokamak Physics Experiment)是美国计划在普林顿建造的一个全超导托卡马克装置。虽然该项目已被美国能源部取消,但 TPX 已经完成了初步设计工作。TPX 的冷屏有三种结构:

1. 外真空杜瓦的内壁上有液氮冷板。
2. 外真空杜瓦壁和液氮冷板的径向间隙内采用多层绝热。
3. 外真空杜瓦上有水冷槽,以冷却外界传热。

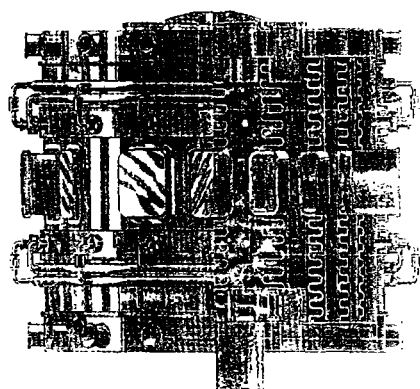


图 3 TPX 的外真空杜瓦和冷屏结构图

液氮冷板由光亮的铝箔板钎焊横截面为 D 形的冷却管制成,冷却管材料为合金铝,液氮冷板上将涂上光亮的黑漆。为防止液氮管泄露的发生,在外真空杜瓦外有备用的液氮冷板。图 3 为 TPX 外真空杜瓦(包括液氮屏)结构的剖视图。

## 7 结束语

以上介绍了当今世界上超导托卡马克装置的重要部件—冷屏的结构设计。这当中有的超导托卡马克装置正在运行,有的正在建设过程中,有的虽然建设项目已经取消,但是其装置各部件的设计经验,对我国正在建造过程中的 HT-7U 超导托卡马克装置却有重要的指导意义。聚变能的研究发展费用巨大,研究周期长,世界各国只有加强交流与合作,才能节省研究时间和资金,从而为早日实现聚变装置的商业点火发电,作出各自应有的贡献。

## 参 考 文 献

- [1] 朱士尧.核聚变原理.合肥:中国科技大学出版社
- [2] 翁佩德.HT-7 超导托卡马克装置.合肥:中国科学院等离子体物理研究所,1997,10
- [3] Vacuum Vessel, Radiation Shields, Tore Supra
- [4] Bourque R F, Design of Thermal Shields for ITER, DESIGN DESCRIPTION DOCUMENT(DDD) 2.7
- [5] Rajendra E Kumar, et al. Design of Vessel system and thermal radiation shields for SST-1, 20<sup>th</sup> Symposium on Fusion Technology, Marseille, Sept. 1998

(下转第 40 页后)

- [3] 刘伟,管伟,黄钧伟等.  $MgB_2$  超导体正常态热电势的研究. 低温物理学报, 2001, 23(4)
- [4] 张杰, 熊建林, 白海洋等. 常压和高压合成  $MgB_2$  的低温比热及两个超导能隙研究. 物理学报, 2002, (2)
- [5] Carbotte J P, Phy a review, Rev, Mod, Phys. 1990, 62:1027
- [6] Mc Millan W L, Transition Temperature of Strong-coupled super conductors, Phy. Rev. 1968, 67:33
- [7] 王洪涛, 张国芳, 沈静琴等. 超导体  $MgB_2$  的高温电阻率及热重-差热分析, 材料科学与工程, 2002, (3)
- [8] 谢旭, 沈庆飞, 冯庆荣等. 超导线和不同电极材料之间接触电阻的研究. 低温物理学报, 2001, 23(4)
- [9] 沈庆飞, 谢旭, 冯庆荣等.  $MgB_2$  的超导线 I-V 曲线的测量. 低温物理学报, 2002, 24(2)
- [10] 李慧玲, 阮可清, 李世燕等. 磁场下  $MgB_2$  的电导涨落效应, 低温物理学报, 2001, 23(4)
- [11] 尹道乐, 齐志, 许恒毅等.  $MgB_2$  及高温超导体的强电子-声子耦合和输运性质. 低温物理学报, 2001, 23(4)
- [12] 郭建栋, 徐晓林, 王昕等. Au 掺杂的  $Mg_{1-x}Au_xB_2$  超导体的合成. 低温物理学报, 2001, 23(4)

### Study on the Transport Properties of Superconductor $MgB_2$

Wang Hongtao, Zheng Suyan

(Department of Physics and Electronic Information Science, Wenzhou Normal College, 325027)

**Abstract:** This paper makes an analysis and study of the preparation process, boron isotope, the temperature dependent resistivity and thermopower effect of the fluctuation magnetoconductance, energy gap, hall effect, TG-DTA of the  $MgB_2$  superconductor. And the result of M-doped  $Mg_{1-x}M_xB_2$  superconductor by solid-state reaction was discussed. It was helpful for the further research in superconductivity process.

**Keywords:** Superconductor,  $MgB_2$ , Transport properties

作者简介: 王洪涛, 女, 1966 年生。讲师。主要从事超导体的研究工作。

(上接第 35 页后)

### Structural Design of Thermal Shields of Superconducting Tokamaks in the World

Ji Aihong

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016)

Liao Ziyang, Wu Songtao

(Institute of Plasma Physics, Academia Sinica, Hefei, 230031)

**Abstract:** The superconducting tokamak for experiment of magnet restricting nuclear fusion is briefly reviewed. The paper also introduces in detail the structural design of thermal shields of superconducting tokamaks in the world.

**Keywords:** Superconducting Tokamaks, Thermal shields, Transferring heat

作者简介: 吉爱红, 男, 1973 年生。讲师, 在职博士生。现在南京航空航天大学从事机械设计与理论的教学与科研工作。