

# 传导冷却型2T匀场超导磁体设计与分析

宋迎春 杨英福

东软医疗系统股份有限公司 辽宁 沈阳 110167

**摘要:** 磁体设计与分析是一个复杂而综合的任务,它涉及多个学科领域的知识和技术。传导冷却型2T匀场超导磁体的设计与分析包括线圈结构设计、绕组设计、材料选择等多个方面。为了实现匀场磁场的产生,我们采用了螺管线圈的设计,并使用高强度无氧铜作为线圈的骨架材料,本文旨在提供传导冷却型2T匀场超导磁体的初步方案和指导,优化超导磁体的性能。

**关键词:** 超导磁体; 匀场磁体; 传导冷却

**引言:** 传导冷却型2T匀场超导磁体是一种重要的实验设备,广泛应用于科学研究、医学成像和工程应用等领域。其能够产生较高的磁场强度并具备较好的磁场均匀性,为相关研究和应用提供了强有力的支持。因此本文需要对该种超导磁体的构造与设计进行分析,以优化其性能。

## 1 传导冷却型超导磁体特点

传导冷却型超导磁体能够产生高磁场强度,通常超过几个特斯拉(T)。这种高磁场强度使得传导冷却型超导磁体在许多应用领域中具有重要的作用,如核磁共振成像、粒子加速器、等离子体物理研究等。

传导冷却型超导磁体需要在较低的温度(约4.2K)下运行。通过维持超导材料在超导态,降低电阻及热损耗,可实现高效率的能量传输和高稳定性。同时为了保持超导材料在超导态,传导冷却型超导磁体需要进行强力冷却。通常使用液氮或其他低温冷却剂将超导材料冷却到其临界温度以下。

传导冷却型超导磁体中的超导线材具有高电流密度,能够在较小的空间内传输大电流。这种高电流密度使得传导冷却型超导磁体具有更高的能量密度和更小的尺寸。由于超导材料的低电阻特性,传导冷却型超导磁体在工作过程中能量损耗较少,能够实现更高的能量效率。

## 2 传导冷却型2T匀场超导磁体的设计分析

### 2.1 超导磁体匀场线圈设计

#### 2.1.1 材料选择

在传导冷却型2T匀场超导磁体的设计中,超导磁体线圈的材料需要选择超导材料。同时,磁体工作温度为4.2K,综合考虑磁体设计的性能需求,需要选择相对较低的制备成本以及较高的机械强度和耐久性的材料。

基于以上要求,可以考虑选择NbTi作为匀场线圈材料。NbTi具有较高的临界温度和临界电流密度,在中等磁

场下表现良好,并且制备成本相对较低。此外,NbTi也具有较高的机械强度,能够承受设计中的应力和振动<sup>[1]</sup>。

虽然Nb3Sn具有更高的临界温度和临界电流密度,适用于高磁场条件,但其制备成本较高,并且对机械应力和磁场扰动非常敏感。在这个特定的设计场景下,NbTi是更合适的选择。

#### 2.1.2 结构设计

根据实际应用需求和设计要求,确定磁体的参数,如磁场强度、稳定性要求、尺寸限制等。选择合适的线圈类型,常见的线圈结构包括扁平螺管线圈、圆柱螺管线圈等。选择线圈类型时需要考虑磁场均匀性、制造成本和工程可行性等因素。在本文的设计中,我们选择使用螺管线圈(solenoidcoil)作为匀场线圈。螺管线圈是较常用的设计选择,可以产生均匀的磁场。

假设我们需要设计一个直径为30厘米的匀场线圈。根据设计要求,线圈的有效长度为60厘米。根据匀场线圈的尺寸和设计磁场强度(2T),我们可以计算出所需的匝数。假设每匝线圈的直径为0.5毫米,绕线密度为500匝/米。则总匝数为:

总匝数 = (线圈长度/每匝线圈长度) \* (线圈周长/每匝线圈直径) = (0.6米/0.001米) \* (0.3米\* $\pi$ /0.0005米)  $\approx$  113,097匝

根据之前的讨论,我们选择使用NbTi作为匀场线圈的材料。由于我们选择的是传导冷却型超导磁体,需要通过热传导方式冷却线圈。我们需要确定冷头的冷凝余量、热传导率等参数,以确保匀场线圈在设计温度下工作正常。

根据磁体要求和线圈类型,绘制线圈的布局图。布局图需要考虑线圈层数、线圈的几何形状和尺寸以及线圈间的绝缘间隙等。根据实际制造要求,完善线圈的细节设计,包括线圈固定方式、绝缘材料的选择和布置,

以及线圈的冷却系统设计等。

匀场线圈的设计和分析是一个复杂的过程,需要综合考虑磁体的要求、导体材料、线圈结构和制造工艺等因素。通过科学的设计和分析,可以提高磁体的性能和稳定性,满足实际应用的需求。

### 2.1.3 绕组设计

在传导冷却型2T匀场超导磁体的设计中,线圈绕组的设计是非常重要的。螺管线圈的绕线方向通常是沿着线圈轴向的方向进行。这样可以产生均匀且对称的磁场。为了实现匀场效果,匝数应该按照一定规律分布。螺管线圈通常由多个匝段(turnsegment)组成,每个匝段之间通过绕线引出线进行连接<sup>[3]</sup>。正确的匝段连接是确保线圈性能的关键。可以采用引出线穿过线圈的方法,或者使用特殊的连接器进行匝段间的连接。

在线圈绕组设计过程中,还需要考虑线圈尺寸、材料特性、制冷系统等因素。本文选择了NbTi作为主要超导材料,并且使用主线圈绕组加上下两组辅助线圈绕组的方式。在设计过程中,主线圈绕组匝数为1000匝。按照超导磁体网格化分布截面进行分析,其中主线圈沿z轴方向绕制,圆柱体的半径为 $R = 25$ 厘米。绕线方向沿z轴方向进行,即螺旋从线圈底部开始向上(或向下)绕制。使得相邻两匝的电流方向相反。这样可以减小散场效应,提高磁场均匀度。

上下两个辅助线圈绕组匝数分别有500匝,辅助线圈的圆柱体半径可以与主线圈相同,即 $R = 25$ 厘米。辅助线圈可以采用与主线圈相同的绕线方向沿z轴方向进行。

## 2.2 匀场超导磁体结构设计

### 2.2.1 超导基底材料选择

在传导冷却型2T匀场超导磁体的设计中,选择合适的基底材料对超导磁体的性能和可靠性至关重要。超导磁体自身需要在低温、强磁场的环境下工作,为保障其运行安全稳定,在采用NbTi作为主要材料之外,还需要使用导热率较好的材料作为基体来传输热量,维持超导磁体的稳定性。

Cu(铜)是一种优良的导电材料,具有较低的电阻率和较高的导电性能。在超导磁体中,Cu可以作为电流引线,承载超导线圈中的大电流,从而减小电流引线带来的能量损耗。而且具有较高的热传导系数,可以有效地将超导磁体产生的热量传导到制冷系统中。这有助于保持超导磁体的温度稳定,并提高其制冷效率。

需要注意的是,Cu作为基底材料也存在一些局限性。Cu的热膨胀系数与超导材料NbTi存在差异,因此在设计过程中需要考虑热膨胀不匹配带来的问题,并采取

适当的补偿措施。选择Cu作为传导冷却型2T匀场超导磁体的基底材料,是基于其优良的导电性、热传导性能、可加工性和抗氧化性强等特点,以满足超导磁体性能和可靠性要求。

### 2.2.2 机械结构设计

在传导冷却型2T匀场超导磁体的机械结构设计中,线圈骨架的设计是非常重要的。由于超导磁体需要承受低温环境影响,同时自身也要具备较好的机械力学。因此在材料选择方面,需要考虑高强度钢或铝合金,以满足线圈骨架的强度和稳定性要求。经过对机械性能以及低温的考虑,可以使用高导无氧铜作为主要的骨架材料,结合304不锈钢制造加强层。

设计适当的固定装置,用于将线圈固定在骨架上,以防止线圈在运行过程中的移动或振动。可以使用螺栓、夹具等固定装置,确保骨架和线圈之间的紧密连接。线圈的直径为30厘米的情况下。根据设计参数和强度需求,骨架的壁厚为2毫米,加强层的厚度为0.5毫米。骨架中预留适当的空间和通道,以容纳制冷剂的流动,并优化流动路径和接口<sup>[4]</sup>。并通过适当的排气方式将热量排出。

冷屏用于提供低温环境,通常采用低温制冷机或液氦冷却系统来降低温度至50K。冷屏的选材可以使用铜氧化物。为了支撑和固定冷屏,需要设计一个稳定的低温结构支撑系统。该系统通常由绝缘材料和支撑结构组成,以确保超导线圈和冷屏的位置和姿态稳定。

轴向吊杆一般选用强度较高的非金属材料进行制造,如GRP材料,原因在于GPR材料的漏热小,热损失小。一般情况下,使用3个均匀分布的轴向吊杆,使得磁体线圈的轴向部分能够保持稳定。拉杆应该均匀分布在超导磁体的轴向方向上。该部分轴向吊杆的直径为10mm,长度为200mm。这些参数可以根据具体的超导磁体尺寸和力学要求进行调整。

图为结构示意图。

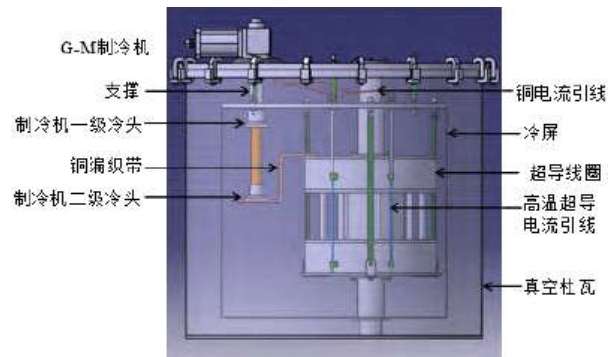


图1 传导冷却型2T匀场超导磁体结构示意图

### 2.2.3 低温系统校核

本文的低温结构为传统的二级低温结构，使用G-M制冷机制冷。需要对用于低温结构的材料进行特性分析。绝缘材料热膨胀系数( $\alpha$ ) =  $12 \times 10^{-6} K^{-1}$ ，导热系

数，设置边界条件3.5K，热流0.3W，根据上述条件对冷屏温度分布仿真及整个低温系统进行热传导分析。图为冷屏温度分布仿真及热传导结构ansys分析图。

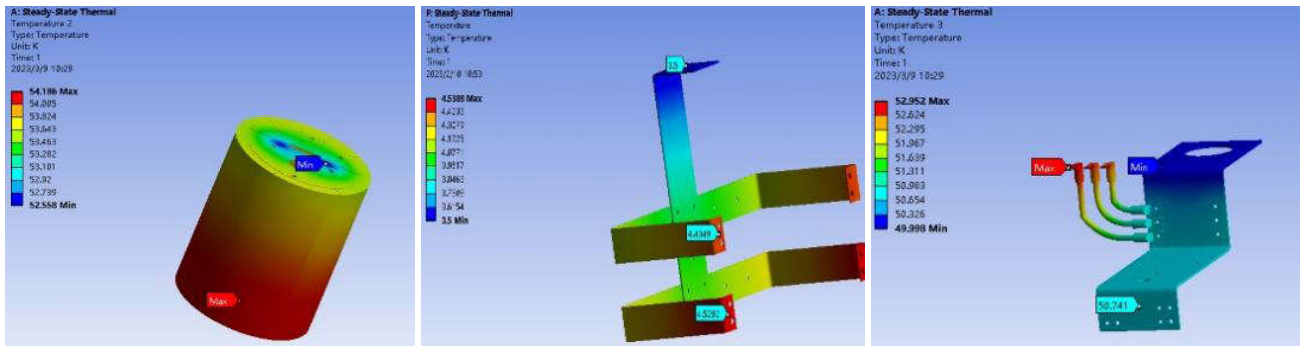


图2 冷屏温度分布及热传导结构ansys分析图

### 2.2.4 三维电磁分析

对于传导冷却型2T匀场超导磁体的三维电磁分析，可以使用磁标量位法进行模拟。在模拟过程中，可以使用Solid5单元进行线圈的网格划分。我们有一个传导冷却型2T匀场超导磁体，内径为40cm，外径为60cm，高度为80cm。我们希望对该磁体进行电磁分析，以评估其匀场性能。

首先，我们需要确定线圈的绕组方式和参数。假设我们采用螺管线圈(helicalcoil)的设计，螺管线圈的绕组半径为30cm，绕组层数为10层。

接下来，我们将使用高强度无氧铜作为线圈的骨架材料，并在加强层中使用304不锈钢。根据材料的特性，我们可以定义它们的电导率和磁导率。

然后，我们将进行模拟。在建立模型时，我们需要创建线圈的几何模型，并设置相应的尺寸和参数。我们选择使用Solid5单元进行线圈的网格划分，以确保模拟结果的准确性。最后，我们可以运行模拟并获取结果。通过分析模拟结果，我们可以评估传导冷却型2T匀场超导磁体的匀场性能，并对其设计进行优化，如图为三维电磁分析仿真情况。

根据仿真分析结果可知，超导磁体最大磁场可达2.23 T，发生在主线圈内侧，基本符合匀场超导磁体设计技术指标要求，二维仿真分析中线圈磁场分布和三维仿真分析基本相同，磁感应强度差别较小，最大磁感应强度误差为0.74%，说明二维仿真分析的结果合理。磁体机械结构电磁力数值较小，最大为372.45N，位于主线圈内侧，FMAGX和FMAGSUM两条曲线近似重合，磁体电磁力主要沿径向方向分布，主线圈外侧电磁力FMAGZ对称分布，在轴向方向相互抵消，上下两补偿线圈存在互斥的电磁力，主线圈和补偿线圈外侧电磁力FMAGY接近为零，对机械结构性能影响较小，保证超导磁体在液氮低温环境下稳定工作。

### 结语

综上所述，传导冷却型2T匀场超导磁体的设计与分析是一个具有挑战性和远大前景的领域。随着科学技术的进步和工程实践的积累，我们将不断探索新的设计方法和技术手段，推动该领域的发展，以提高传导冷却型2T匀场超导磁体的性能和可靠性，并为科学研究和工程应用提供更好的支持。

### 参考文献

[1]王吴凡,李俊杰,倪东升,程月.超导磁体预冷回热组件设计与动态模拟[J].低温与超导,2023,51(06):26-34.  
 [2]唐梦雨.传导冷却型2T匀场超导磁体设计与分析[D].安徽建筑大学,2022.  
 [3]唐梦雨,朱银锋,吴小四,郑旭,王传东.传导冷却型2T匀场超导磁体设计与分析[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2022,38(03):1-6.  
 [4]杨亦霖,丁先庚,李瑾.传导冷却型匀场超导磁体的研制[J].低温与超导,2020,48(10):45-48.

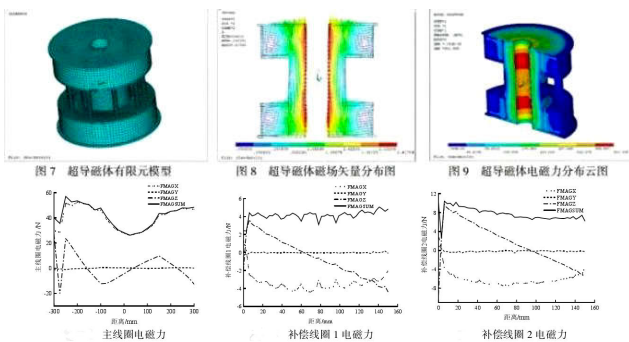


图3 三维电磁分析仿真分析图