



·高功率微波技术专辑·

用于高功率微波器件的传导冷高温磁体研制*

徐 策¹, 刘 辉¹, 刘建华¹, 戴银明¹, 陈顺中¹, 程军胜¹,
王秋良¹, 霍少飞², 史彦超², 黄慧杰²

(1. 中国科学院电工研究所 应用超导重点实验室, 北京 100190; 2. 西北核技术研究所 先进高功率微波技术重点实验室, 西安 710024)

摘 要: 为了利于高功率微波系统的紧凑化和小型化, 降低系统能耗, 对产生引导磁场的超导磁体系统进行了研究设计。超导磁体使用稀土钡铜氧化物线饼组成。低温系统采用 4 台小型风冷式斯特林制冷机对超导磁体冷却。为了适用于车载环境并降低漏热, 采用了一种非金属材料的新锥体结构作为磁体的承载结构, 并通过仿真分析了一般的车载环境下的磁体结构承载情况。整个高温超导磁体工作温区为 40~50 K, 达到目标场时的通电电流为 77.49 A, 均匀区场强达到 4 T。整个系统能耗较传统技术降低 80%。通过实验测试出高温超导磁体的温度运行上限为 48.9 K。

关键词: 高功率微波; 稀土钡铜氧材料高温超导磁体; 传导冷却; 车载

中图分类号: TN128

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202436.230334

Development of conduction-cold high temperature superconducting magnet for high power microwave devices

Xu Ce¹, Liu Hui¹, Liu Jianhua¹, Dai Yinming¹, Chen Shunzhong¹, Cheng Junsheng¹,
Wang Qiuliang¹, Huo Shaofei², Shi Yanchao², Huang Huijie²

(1. Key Laboratory of Applied Superconductivity, Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Key Laboratory of Advanced High Power Microwave Technology, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: To compact and miniaturize the high-power microwave system and reduce the energy consumption of the magnet system, the superconducting magnet which generates the guiding magnetic field is studied and designed. The magnet is composed of rare earth barium copper oxide coil pancakes. In the cryogenic system, four air-cooled Stirling cryocoolers are used to cool down the superconducting magnet. To be suitable for vehicle environments and reduce the heat leakage, a new cone bearing structure of non-metallic material is adopted as the load-bearing structure of the magnet. And the load-bearing situation of the magnet structure under the general vehicle environment is analyzed by the simulation. The superconducting magnetic field in the uniform region reaches 4 T when the current is 77.49 A in the range of 40-50 K. The energy consumption of the whole system is 80% lower than the traditional technology. The experimental results show that the upper temperature limit of the high temperature superconducting magnet (HTS) is 48.9 K.

Key words: high power microwave, rare earth barium copper oxide high-temperature superconducting magnet, conduction-cooled, vehicle environments

高功率微波 (HPM) 通常是指微波峰值超过 100 MW, 频率在 1 GHz 到 300 GHz 之间的相干电磁辐射^[1-2]。在高功率微波产生技术中, 发展出无磁场引导器件、低磁场引导器件以及高磁场引导器件^[3]。目前, 无磁场引导的 HPM 器件易于小型化且能量消耗小, 但在电子束约束上品质差, 效率低; 有磁场引导 HPM 器件对电子束有更好约束, 能够实现长时间的重复频率工作^[4]。但引导磁场系统的复杂性极大限制高功率微波技术的实用化^[4-5]。高功率微波系统的紧凑化和小型化是高功率微波技术走出实验室的关键一步^[6]。在能耗和体积上, 永磁磁体引导器件比超导磁体引导器件更有优势, 这主要是因为传统的螺旋管磁体和超导磁体存在着能耗巨大和体积庞大的弊端^[7-8]。

* 收稿日期: 2023-06-15; 修订日期: 2023-12-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFB3804000)

联系方式: 徐 策, xc@mail.iee.ac.cn。

但从电磁兼容方面考虑, HPM 技术需要高的功率。对于这一目标, 部分技术是提高 HPM 器件的转换效率^[9], 部分技术是提高引导磁场的场强, 这主要是引导磁场场强的大小会对相对论返波管的脉宽和功率等参数产生重要影响^[10]。因此, 发展低能耗、紧凑型超导磁体系统对高功率微波系统实用化具有重要意义。

对于引导高功率微波产生器的强磁场磁体, 大体分为永磁磁体、脉冲磁体和超导磁体。其中, 脉冲磁场会随着场强的不断增加, 线圈电流增大, 励磁系统庞大^[11]。永磁体在紧凑化和小型化上应该更具有优势, 比如, 采用钕铁硼磁体产生 0.3 T 磁场封装为相对论磁控管^[12]。但是永磁体在磁场强度大小以及调节上存在弊端, 需要 HPM 产生器自身性能的提升。超导磁体则可以通过改变电流以及线圈匝数, 使磁体产生符合要求的磁场。但, 超导磁体需要低温的工作环境下, 比如低温超导磁体, 工作在 4.2 K 温度下。达到 4.2 K 温度, 大多采用制冷机或者液氮冷却的方式。液氮冷却必定导致系统庞大, 且不易运输, 需要专业的充罐操作^[13], 增加系统的运行成本。2011 年, 中国工程物理研究院研制的 X 段相对论返回管, 引导磁场便是液氮冷却超导磁体, 提供场强 5 T, 装置相对复杂^[14]。相比液氮冷却, 传导冷磁体相对体积小、结构简单、操作方便、具有更高的适用性。常规的传导冷制冷机分为 GM (Gifford-Mcmahon) 制冷机和斯特林制冷机。两者相比较 GM 制冷机比斯特林制冷机效率更高, 目前 GM 制冷机也是超导引导磁场冷却系统常采用的制冷机, 比如, 西北核技术研究所研制的频率 9.75 GHz 的高功率微波系统便采用了 GM 传导冷超导磁体, 提供 4 T 磁场^[15]。不过 GM 制冷机配备压缩机、冷水机等一套设备, 系统功耗相对较高。斯特林制冷机系统可以是 GM 制冷机系统能耗的 1/20, 甚至更低。但斯特林制冷机无法提供 4.2 K 的工作温度。

结合以上条件, 本文的主要工作是将高温超导磁体用为 HPM 产生技术的引导磁场。我们发现在提供相同磁场强度下, 高温超导磁体比低温超导磁体更紧凑, 低温系统更易实现小型化。为了验证低能耗, 紧凑化小型化的高温超导磁体引导磁场系统的可行性。本文研制了一台基于稀土钡铜氧化物 (REBCO) 超导带材的传导冷高温超导磁体, 采用了 4 台风冷式斯特林制冷机。同时为了验证磁体的可使用性, 设计新型锥形支撑结构替换传统的跑道拉杆结构。本文详细介绍了磁体的电磁设计, 低温设计以及实验结果。

1 磁体设计及制造

本文高温超导磁体的设计与制造, 既要满足目标磁场强度的需求, 也要满足使用环境的要求。因此, 磁体设计时充分考虑工作温区下, 受磁场场强影响下的线材临界电流; 磁体结构设计时充分考虑了磁体的适用环境, 能够满足磁体的车载运输要求, 在磁体结构上预留了与大承载结构的接口。

1.1 电磁设计

超导磁体的电磁设计是一个求逆解的过程, 本文超导磁体的设计是采用一种线性规划和非线性规划的混合优化设计方法。首先通过线性规划算法快速计算出满足磁场约束条件的电流分布图, 再通过非线性规划算法将计算出的非零电流簇离散化为线圈, 确定磁体线圈位置, 并搜索出满足磁场等在内的约束条件下的超导磁体结构^[16-17]。根据磁体的基本设计概念以及高功率微波系统所需的磁场位形要求, 整个磁体设计为内外两层结构, 其中内层线圈为主磁体, 共有 7 个线圈模块, 外线圈层为补偿线圈, 分别由两个线圈模块组成。补偿线圈主要起到了磁场位形调整的作用。如图 1 所示, 内外层磁体的组成与位置关系。

在磁体设计过程中, 根据 REBCO 带材的 I_c - B - θ - T 特性, 可以设计并预测超导磁体励磁的上限温度。主要依据是磁场强度, 磁场角度以及工作温度等因素对带材 I_c 值的影响。目前, REBCO 磁体设计多采用垂直场分量作为 I_c 值评估变量。表 1 为 REBCO 带材在 40 K 和 50 K 垂直场下对应的 I_c 值 (该值由上海超导科技有限公司提供)。通过电磁设计, 在孔径, 磁场强度以及位形曲线的约束下, 磁体达到目标磁场强度的运行电流为 77.49 A。根据磁体设计的负载运行点的电流值, 可以得出在 40 K 温度下磁体的电磁裕度 (以某一温度下, 线材的工作电流值与线材的临界电流做比, 没有达到 100% 的电流余量被称为电磁裕度) 为 33.48%, 在 50 K 温度下磁体的电磁裕度为 13.9%。

在磁体实际制造过程中, 采用了垂直场下的 I_c 值来校验电磁裕度, 实际工程中, 还应综合考虑不同磁场强度下

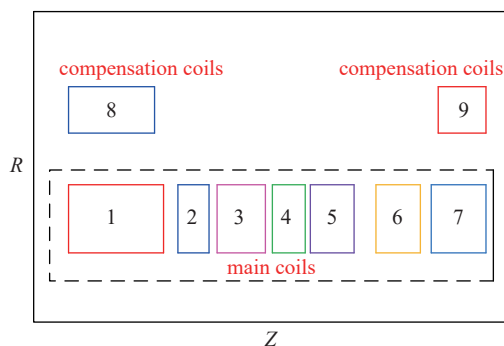


Fig. 1 Composition and position of the HTS magnet modules

图 1 内外层磁体的组成与位置关系

表 1 REBCO 带材在 40 K 和 50 K 垂直场下对应的 I_c 值Table 1 The I_c - B - θ - T characteristics curve of REBCO strip at 40 K and 50 K in vertical fields

temperature/K	I_c/A														
	0	0.5 T	1.0 T	1.5 T	2.0 T	2.5 T	3.0 T	3.5 T	4.0 T	4.5 T	5.0 T	5.5 T	6.0 T	6.5 T	7.0 T
40	399.0	241.8	190.2	170.1	153.6	140.4	129.3	122.1	112.5	105.9	99.0	93.0	87.6	83.4	78.6
50	296.7	168.6	135.9	120.0	106.2	96.0	88.8	81.9	75.6	69.6	64.5	60.0	56.1	51.6	48.6

不同场角对线材 I_c 值的影响。这主要是工艺调制后的超导带材对磁场角度依赖的差异^[18], 并且在整个磁体不同位置产生的磁场角度以及磁场强度也是不同的, 因此采用垂直场预测的励磁限度是相对保守的。当发现这个问题后, 可以在实际磁体制造过程中, 将测试性能较好的双饼线圈排放在 I_c 值要求高的位置, 实现磁体线饼性能的精确排位。图 2 为 4 T 超导磁体的磁场分布, 在电流达到 77.49 A 时, 最大磁场强度达到 4.58 T。

1.2 磁体制造

根据电磁方案, 整个超导磁体由 9 个线圈模块组成, 分为内外两层磁体。所有线圈模块采用 REBCO 线材进行绕制, 绕制好的双饼线圈固定在承载骨架上, 承载骨架也相应分为内外双层。整个线圈模块必须严格保证机械位置以满足中心孔处磁场位形的要求。要保证线圈模块的位置精度, 首先, 单个双饼线圈的厚度必须保证。一般双饼线圈的厚度是双饼线圈本身的厚度加双饼之间隔板的厚度, 做好双饼之间的绝缘, 垫补 0.2 mm 的绝缘隔板。其次, 保证多个线圈模块之间的位置关系, 在双饼线圈之间放置导冷铜块, 既能保证位置精度又可以作为线饼模块间的导冷。最终, 通过骨架两端固定装置对整体线饼施加预紧力, 并不断调整饼间绝缘垫片厚度, 保证整体的结构尺寸。

在对线饼施加预紧力时, 还面临着另一个问题, 那就是安装空间的问题。在前文中提到过, 超导磁体系统追求的两个目标是低能耗和紧凑化。在紧凑化设计的过程中, 自然会限制结构尺寸的大小, 在本系统中磁体的轴向尺寸便有严格的限制。一般施加预紧力的轴向固定装置是安装在承载骨架上, 只需要加长承载骨架的尺寸并配备螺纹, 固定装置旋紧在承载骨架上便可, 这样线圈与骨架结合为一个整体。但尺寸的限制使得固定装置无法添加。如果缺少固定装置, 线饼模块则无法固定为一个整体, 同时预紧力无法施加。

为了解除上述限制, 在承载骨架外层加装调节装置, 利用调节结构对承载骨架端板施加压力, 将线圈尺寸调节到目标值, 在未拆装调节装置的基础上, 利用激光焊接工艺将端板与承载骨架焊接为一个整体。一切工序完成后, 再将调节装置去除。这样既解决了尺寸的限制, 也能够保证预紧力的施加。图 3 所示为外层骨架与工装骨架。

调节装置的作用机理是通过调整螺栓施加转矩, 施加的力透过上受力板施加到下受力板上, 通过下受力板对双饼线圈施加轴向预紧力, 每个调整螺钉施加的轴向预紧力在 6~8 N/m 之间。内层骨架采用同样的工艺, 将焊接好的内外磁体组装到一起, 再利用激光焊接工艺将内外磁体焊接为一个整体。组装好的超导磁体进行石蜡浸渍工艺, 石蜡浸渍可以提高线饼之间的导热能力, 以及减小线材的应力分布。

2 低温结构与热负荷分析

2.1 低温系统

高温 4 T 超导磁体系统结构图如图 4 所示, 整个低温系统包括真空杜瓦、冷屏、斯特林制冷机、导冷带以及测试系

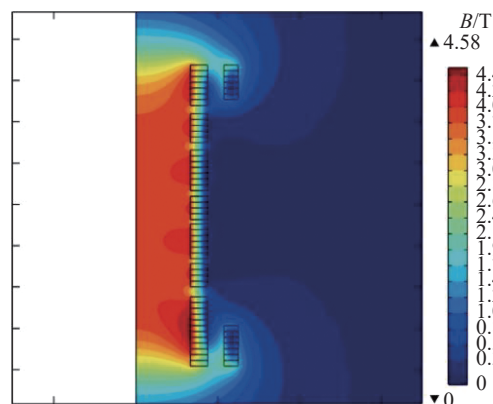


Fig. 2 Magnetic field distribution of the 4 T superconducting magnet

图 2 4 T 超导磁体磁场分布

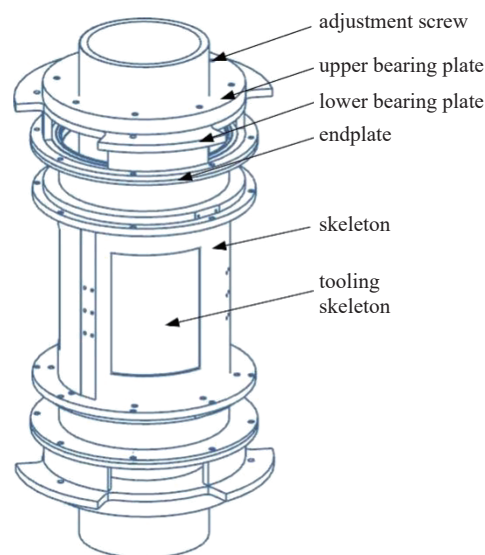


Fig. 3 Outer skeleton and tooling skeleton

图 3 外层骨架与工装骨架

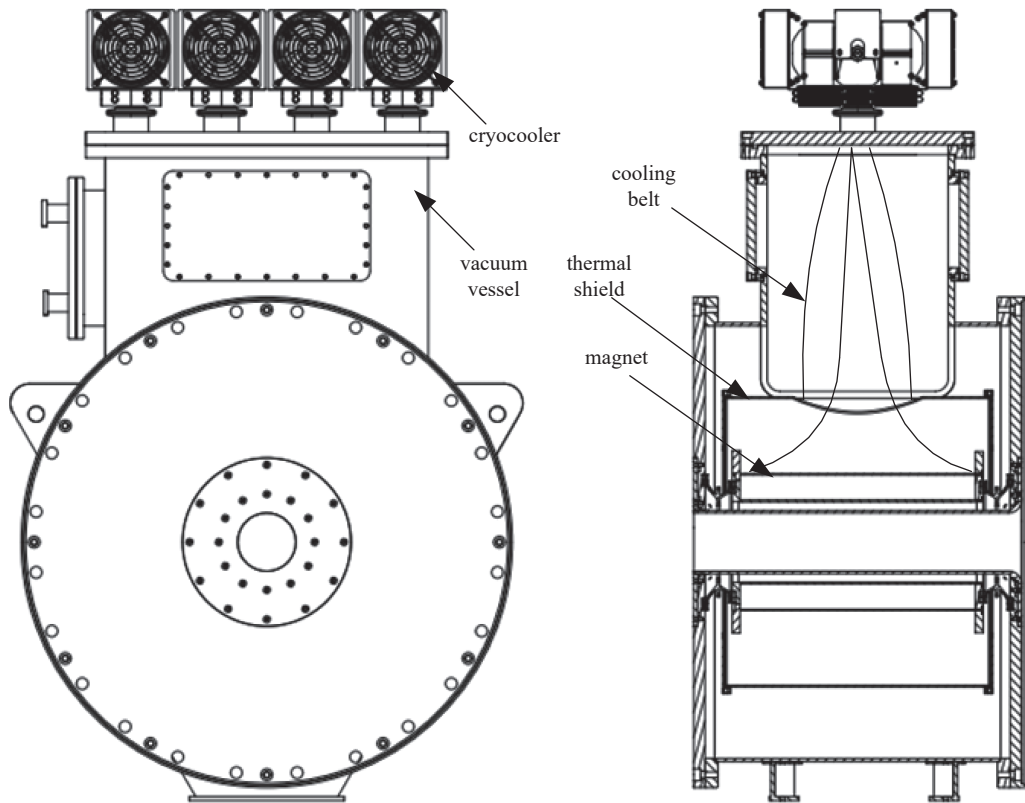


Fig. 4 Configuration of the 4 T superconducting magnet system

图4 4 T超导磁体系统结构示意图

统等。真空容器采用 304 不锈钢材料制作, 制作工艺上多采用焊接工艺, 真空容器制作过程中重点做好气密性工作。为了截断来自室温的辐射热量, 在磁体与真空容器之间设置冷屏结构。整个冷屏结构采用铝合金 1100 材料制成。磁体通过双锥结构(图 5)固结在杜瓦端板上。为了截断热量传输, 冷屏端板固结在双锥结构的中部结构上。为了减少漏热, 需要合理分配 40 K 温度和 77 K 温度之间的温度, 需要优化

x 与 y 的比值。比值优化的目标分为两部分, 一部分是双锥结构向 40 K 的漏热, 另一部分是 300 K 向冷屏的漏热, 综合两者漏热为最优值。经过结构优化, 结果表明 $x=25$ mm、 $y=20$ mm 时, 40 K 温区和 77 K 温区漏热效果最佳。

整个超导低温系统上端安装了 4 台风冷式斯特林制冷机, 制冷机的具体配置是根据热分析结果以及安装空间确定的, 其中两台 40 K 制冷功率较好的制冷机用于冷却磁体, 提供 5 W 左右的制冷功率; 另外两台 77 K 制冷机分别冷却冷屏和电流引线, 能够提供 31.6 W 左右的制冷功率。冷头与磁体以及冷屏之间的导冷结构采用软铜绞线, 磁体的电流引线采用一对复合式电流引线进行供电。复合式电流引线由上端的铜引线和 Bi-2333 管组成。铜引线固定在引线热沉上, 连接 77 K 制冷机, Bi-2333 管上端连接铜线, 下端连接磁体引出的铜引线。在 Bi-2333 管与磁体铜引线连接处接入 40 K 的导冷结构进行温度截断。

2.2 热负荷分析

在前面介绍低温系统组成时, 冷头数量的选择主要依据就是热负荷的分析。低温系统的热负荷决定了超导磁体的最终冷却温度。低温系统的热负荷主要分为静态热负荷和动态热负荷, 高温超导磁体的动态热负荷主要是磁体励磁时产生的热量, 与磁场强度以及励磁电流的变化率有关。励磁时磁体的发热主要表现在径向电阻以及接头的发热。由于径向电阻的存在, 当励磁速度较快时, 会导致磁体发热严重, 当励磁速度比较慢时, 磁体的发热几乎为零, 以 0.01 A/s 的励磁速率, 径向电阻的发热功率大约为 0.025 1 W。在本系统中使用接头共有 58 个, 设每个接头电阻为 $1 \times 10^{-7} \Omega$, 总接头电阻为 $5.8 \times 10^{-6} \Omega$ 。计算接头电阻的发热为 0.034 8 W。径向电阻以及接头的发热很难精确计算, 所以要按照工艺水平的最大值进行估算。相比于动态热负载, 静态热负荷是固定存在的, 受励磁过程的



Fig. 5 Configuration of tapered structure

图5 双锥结构示意图

影响较小, 对低温系统产生相对稳定的热影响, 传导冷磁体的静态热负荷主要包括传导漏热和热辐射。其中, 传导热负荷 W_f 可根据热传导公式进行计算, 即

$$W_f = \int_{T_1}^{T_2} \frac{kA}{\partial l} dT \quad (1)$$

式中: K 为热导率, A 为截面积, T 为温度, l 为长度。

低温系统的辐射漏热主要来自于冷屏对磁体的辐射漏热, 以及真空杜瓦对冷屏的辐射漏热。为了进一步隔绝辐射漏热对低温系统的影响, 在超导磁体和冷屏表面都覆盖有多层绝热来减少辐射漏热。而辐射热负荷的计算和分析是非常复杂的, 在工程中一般采用经验公式进行计算^[13], 从杜瓦到冷屏的辐射热公式为

$$P_{r1} = \frac{2\zeta}{N+1} \sigma F A_1 (T_h^4 - T_1^4) (1 + N\alpha) + 0.382 A_1 (T_h - T_1) p \quad (2)$$

其中

$$F = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} \quad (3)$$

式中: ζ 为安全系数, 传导冷却取 5~8; N 为多层绝热层数; σ 为斯特藩-玻耳兹曼常数, $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; A_1 为冷屏表面积; A_2 为包围冷屏的真空杜瓦表面积; α 为多层绝热未覆盖率; T_h , T_1 分别为真空杜瓦和冷屏的温度; p 为剩余气体压强; ε_1 、 ε_2 分别为不锈钢和铝合金的发射率。

从冷屏到超导磁体的辐射热的工程计算公式为^[13]

$$P_{r2} = 2\zeta \times 10^4 A \left[\frac{1.22 \times 10^{-2} p (1 + N\alpha) \left(T_h^{\frac{1}{4}} - T_1^{\frac{1}{4}} \right)}{N+1} + 3.22 \times 10^{-14} \left(T_h^{\frac{17}{4}} - T_1^{\frac{17}{4}} \right) \right] \quad (4)$$

式中: A 为超导磁体表面。

公式中的参数应根据实际工艺进行选择。通过整理分析可以得出 4 T 高温超导磁体的热负载, 如表 2 所示。

表 2 低温系统热负荷
Table 2 Thermal load of the cryostat

temperature/K	heat leakage of supports/W	heat leakage of current leads/W	radiation/W	radial resistance/W	joint resistance/W	sum/W
40	2.0	0.3	0.1	0.025 1	0.034 8	2.46
77	5.2	8.0	15.0	\	\	28.00

从计算的漏热中, 40 K 温度下, 磁体的热负荷为 2.46 W, 低温系统选取的两台制冷机的功率参数完全能够满足需求。在 77 K 温度下, 总的热负荷为 28 W, 77 K 的两台制冷机冷却冷屏和电流引线的制冷机功率相加为 31.6 W, 满足需求。由于实用空间有限, 目前的制冷机冷量虽满足制冷功率要求, 但是相对预留裕度不足, 这也是系统需进一步改进的地方, 或选择更大制冷功率的冷头。

2.3 车载环境分析

在远距离集成车载运输和使用中, 超导磁体必须具备一定的静态和动态环境应用能力, 超导磁体不易出现较大的变形, 并且能够保证磁体冷孔与杜瓦温孔的同轴度的要求。因此结合车载运输振动, 对磁体进行了仿真校核, 以改进优化磁体结构。在 Hypemesh 中对磁体进行网格划分, 整体结构采用 8 节点六面体 solid185 单元, 部分为 mass21 单元, 共计单元数 61 851 个, 节点数 98 882 个。输入材料参数以及高速路谱的随机振动(满量级)激励, 分别分析了三个方向在高速路谱随机振动激励下的应力, 材料参数如表 3 所示, 应力云图如图 6 所示。

承载环境的仿真分析, 主要是为观测承载结构是否满足使用要求。从应力云图来看, 三个方向的应力点均未出现破坏状态, 支撑结构处部分位置应力相对集中, 可以进行一定的结构加强。同时将仿真结果比对组件的属性, 整体结构强度满足车载环境的使用。

在仿真中开展三个方向的高速公路谱随机振动激励下的振动(满量级)分析时, 还分别观测了磁体真空杜瓦轴线在振动下的偏差, 可以看出在公路运输随机振动载荷下磁体的冷孔轴线和室温孔轴线偏离较小, 未超出精度要求范围, 结果如表 4 所示。

表 3 磁体各零组件属性

Table 3 Material property of each component of magnet

No.	material	temperature/K	density/(g/cm ³)	Young's modulus@300 K/GPa	Poisson's ratio	coefficient of linear expansion/(10 ⁻⁵ K ⁻¹)
1	PAI	40~300	1.6	6.4	0.43	1.0
2	AISI 304	40/300	7.9	200.0	0.30	1.3
3	1 100 AL	80	2.7	70.0	0.30	1.5
4	T2 Cu	40	8.9	70.0	0.30	1.0

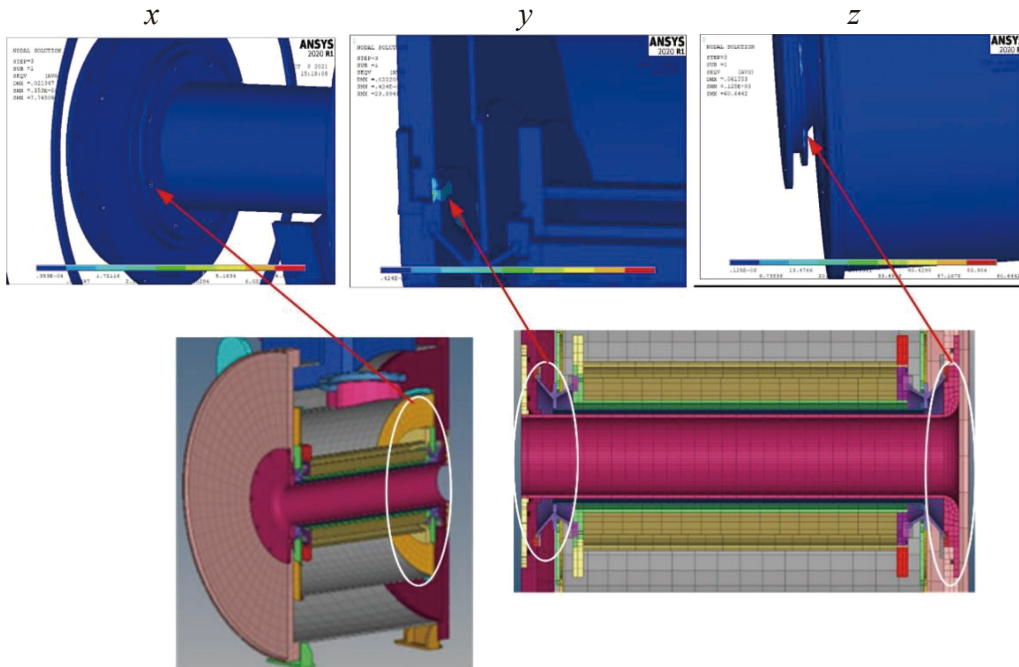


Fig. 6 Stress cloud of superconducting magnet

图 6 超导磁体应力云图

表 4 三个方向的高速路谱随机振动对磁体两端轴线影响

Table 4 Influence of random vibration of highway spectrum in three directions on the axis of magnet

	axiality	U_x /mm	U_y /mm	U_z /mm	U_{sum} /mm
y random vibration	p-axis deviation	4.64E-04	2.09E-02	2.08E-04	2.08E-02
	s-axis deviation	1.29E-03	2.02E-02	2.02E-04	2.03E-02
z random vibration	p-axis deviation	4.80E-05	-1.52E-04	2.53E-02	2.53E-02
	s-axis deviation	3.44E-04	1.80E-03	2.51E-02	2.52E-02
x random vibration	p-axis deviation	6.32E-03	2.34E-04	1.03E-05	6.32E-03
	s-axis deviation	6.39E-03	2.73E-04	9.90E-06	6.40E-03

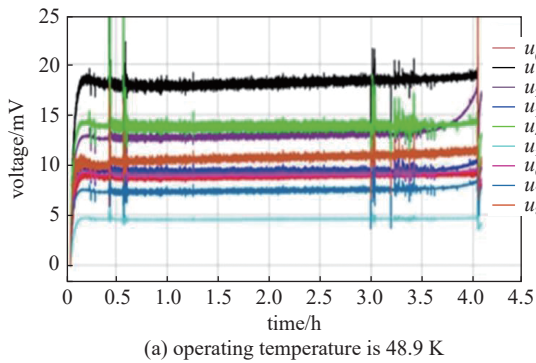
3 实 验

在 4 T 高温超导磁体系统制备完成后, 先后对低温系统和磁体系统进行性能测试。首先抽取真空杜瓦中的气体。当真空容器的真空度达到 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ Pa, 开启制冷机进行制冷。制冷机设定目标温度为 40 K, 经过 75.47 h 后, 冷头温度达到 45 K 左右, 磁体冷却到 48 K。图 7 为磁体各组件的冷却曲线。通过冷却结果来看, 磁体已经进入了可运行的温度范围, 其中 Bi-2223 的温度曲线表示的是 Bi-2223 管上端的温度变化, 一对电流引线的最低冷却温度分别为 71.8 K 和 75.7 K, 除了观测磁体温度外, 观测 Bi-2223 管温度的主要原因是防止引线失超导致磁体失超或者出现断电, 从目前的电流引线温度来看, 电流引线已经完全处于超导状态。从整体的冷却温度来看, 磁体的冷却温度以及电流引线的温度还是偏高些, 还有很大的提升空间。

在对磁体的冷却温度进行分析后, 可以确定磁体已经进入超导状态, 可以对磁体进行励磁实验。磁体达到目标磁场的励磁电流为 77.49 A, 电流斜坡速率设置为 0.005 A/s。在励磁过程中, 实时检测双饼线圈的两端电压以预测磁体是否出现失超的情况。电压检测划分为 9 个检测单元, 失超判定依据 $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 的失超判定定理^[19]。线饼

的检测结果如图 8 所示, 图 8(a)是工作在 48.9 K 温度下, 线饼电压变化, 图 8(b)是工作在 48.2 K 温度下, 线饼电压变化。

从图 8(a)的线饼电压变化曲线可以看出当温孔中心磁场达到 4.01 T 时, 各分段的电压出现缓慢增长。其中, 感应电压 u_2 的数值增长较为明显, 从 13 mV 逐渐增长到 18 mV。 u_2 测试的双饼线圈的数量为 8 个, 单个线饼的导线长度为 164 m, 还未达到失超电压, 但已出现了上升迹象。于是, 观测了达到目标电流后, 线饼电压恢复稳定时的电压数值, 如图 9 所示。从稳定后的电压数值来看, 其他的线饼平稳地趋于零, 小于 1.5 mV, 只有 u_2 的数值为 6.8 mV, 不过这 6.8 mV 未超过线饼 13.12 mV 的失超判据电压, 超导磁体仍有一定的电磁裕度。



(a) operating temperature is 48.9 K

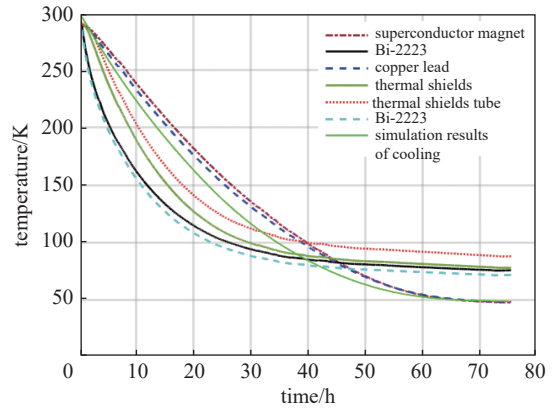
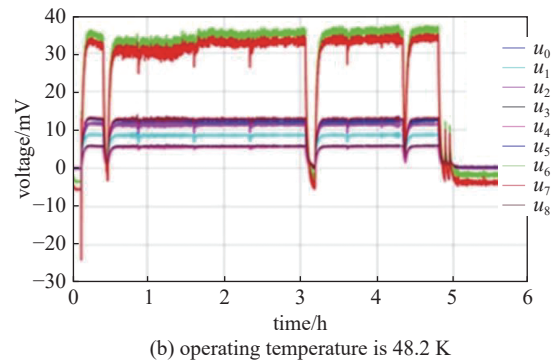


Fig. 7 Cooling curves of the various parts of the magnet structure

图 7 磁体各组件的冷却曲线



(b) operating temperature is 48.2 K

Fig. 8 Voltage of the coil pancakes during the excitation process

图 8 励磁过程中线圈电压变化

线饼出现电压上升, 说明超导磁体出现了电阻。根据实验现象观察, 导致这一现象的主要原因是励磁过程中的磁体温度上升。从实验结果可以看出, 当达到目标磁场时, 磁体的温度为 48.9 K 时, 线饼的线阻增加, 而在相同磁场强度下, 48.2 K 温度下运行的超导线材未出现明显的线阻。通过该实验可以判断磁体的运行温度应在 48.9 K 以内, 制冷机在设定温度目标时应参考此值。在这里也可以看出, 目前的制冷机性能还是有些不足, 虽然满足基本要求, 整个低温系统还有一定改进空间。

当磁场达到目标数值, 维持一段时间后, 对磁体系统的进行退磁。退磁初始速度为 0.005 A/s, 当电流降到 55 A 时, 保持恒流一端时间, 然后将退磁电流提高到 0.1 A/s, 直到降到初始值。整个励磁和退磁过程的磁场强度和电流变化如图 10 所示。

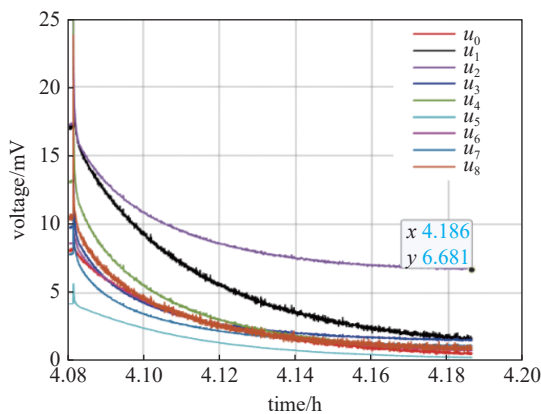


Fig. 9 Voltage of the coil pancakes during the excitation stabilized process at operating temperature 48.9 K

图 9 在运行温度 48.9 K 下励磁稳定过程中线圈电压

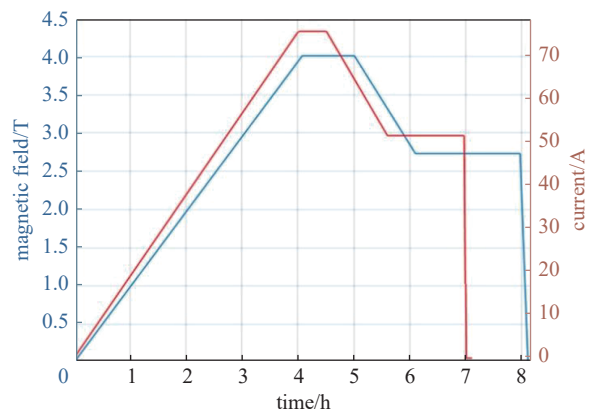


Fig. 10 Field strength and current changes during excitation and demagnetization

图 10 励磁和退磁过程中磁场强度和电流变化

4 结 论

本文整体介绍了用于高功率微波器件的传导冷高温超导磁体的研制技术。在制冷方式上采用了斯特林制冷机,磁体工作温区在 40~50 K 范围内,室温孔管中心磁场强度为 4 T。通过励磁实验验证了磁体的可靠性,磁体通电到 77.5 A,中心磁场强度达到 4.01 T,并测试出本磁体运行的上限温度为 48.9 K,整体能耗比传统技术降低了 80%,并且在目前的结构基础上可以进一步进行小型化的优化。但是从实验观测中,也可以看出低温系统的制冷功率存在不足的问题,低温系统具有优化空间。根据实验结果以及线饼电压监测,并可以进一步优化电磁设计方案。

参考文献:

- [1] Benford J N, Cooksey N J, Levine J S, et al. Techniques for high power microwave sources at high average power[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1993, 21(4): 388-392.
- [2] Benford J, Swegle J A, Schamiloglu E. High power microwaves [M]. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2007.
- [3] 周传明, 刘国治, 刘永贵, 等. 高功率微波源[M]. 北京: 原子能出版社, 2007. (Zhou Chuanming, Liu Guozhi, Liu Yonggui, et al. High-power microwave sources[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2007)
- [4] 王荟达. C 波段低磁场高效率相对论返波管研究[D]. 北京: 清华大学, 2021: 1-10. (Wang Huidao. Research on a C-band high-efficiency relativistic backward-wave oscillator with low-magnetic-field operation[D]. Beijing: Tsinghua University, 2021: 1-10)
- [5] 胡祥刚, 宋玮, 李兰凯, 等. 用于高功率微波器件的永磁体的设计和测试[J]. *强激光与粒子束*, 2016, 28: 033017. (Hu Xianggang, Song Wei, Li Lankai, et al. Design and test of permanent magnet used in high power microwave devices[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2016, 28: 033017)
- [6] 陈昌华, 刘国治. 相对论返波管导论[M]. 北京: 科学出版社, 2021. (Chen Changhua, Liu Gouzhi. Introduction to relativistic backward wave oscillator[M]. Beijing: Science Press, 2021).
- [7] Lemke R W, Clark M C, Marder B M. Theoretical and experimental investigation of a method for increasing the output power of a microwave tube based on the split-cavity oscillator[J]. *Journal of Applied Physics*, 1994, 75(10): 5423-5432.
- [8] Chen Shunzhong, Dai Yinming, Zhao Baozhi, et al. Development of an 8-T conduction-cooled superconducting magnet with 300-mm warm bore for material processing application[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2014, 24: 4701605.
- [9] Xiao R Z, Zhang X W, Zhang L J, et al. Efficient generation of multi-gigawatt power by a klystron-like relativistic backward wave oscillator[J]. *Laser and Particle Beams*, 2010, 28(3): 505-511.
- [10] 陈昌华, 刘国治, 宋志敏, 等. 引导磁场对相对论返波管微波功率的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(6): 745-748. (Chen Changhua, Liu Gouzhi, Song Zhimin, et al. Effects of axial guiding magnetic field on microwave power of relativistic backward oscillators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(6): 745-748)
- [11] 严余军. 永磁包装高效率相对论返波管设计与研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021: 1-10. (Yan Yujun. Design and research of high-efficiency relativistic backward wave oscillator for permanent magnet packaging[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021: 1-10)
- [12] Andreev D, Kuskov A, Schamiloglu E. Review of the relativistic magnetron[J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2019, 4: 067201.
- [13] 陈顺中, 王秋良, 孙万硕, 等. 3T 动物磁共振成像传导冷却超导磁体研究[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(4): 879-888. (Chen Shunzhong, Wang Qiuliang, Sun Wanshuo, et al. The study of a 3T conduction-cooled superconducting magnet for animal magnetic resonance imaging[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(4): 879-888)
- [14] Ma Qiaosheng, Li Zhenghong, Lu Chaozheng, et al. Efficient operation of an oversized backward-wave oscillator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2011, 39(5): 1201-1203.
- [15] Song W, Chen C H, Sun J, et al. Investigation of an improved relativistic backward wave oscillator in efficiency and power capacity[J]. *Physics of Plasmas*, 2012, 19: 103111.
- [16] Wang Qiuliang, Wang Chunzhong, Wang Hui, et al. Development of conduction-cooled superconducting magnet for baby imaging[J]. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010, 20(3): 726-731.
- [17] 倪志鹏, 王秋良, 严陆光. 短腔、自屏蔽磁共振成像超导磁体系统的混合优化设计方法[J]. *物理学报*, 2013, 62: 020701. (Ni Zhipeng, Wang Qiuliang, Yan Luguang. A hybrid optimization approach to design of compact self-shielded super conducting magnetic resonance imaging magnet system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62: 020701)
- [18] Zhang Zili, Zhou Benzhe, Liu Jianhua, et al. Engineering-based design and fabrication procedure for mid-temperature REBCO magnets accommodating the strong I_c anisotropy[J]. *Superconductivity*, 2022, 1: 100005.
- [19] Stavrev S, Grilli F, Dutoit B, et al. Comparison of numerical methods for modeling of superconductors[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2002, 38(2): 849-852.