

磁约束等离子体推进器高温超导磁体系统的电磁计算

黄廷庆 汪良斌

中国科学院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所, 合肥 230031

【摘要】 在地面实验中磁约束等离子体推进器磁体系统是靠四个 NbTi 低温超导磁体提供磁场, 现在设计依靠 G-M 制冷机传导制冷的由 Bi2223 超导带材绕制成的四个高温超导磁体替代以前的四个低温超导磁体. 本文利用 ANSYS 有限元分析软件进行电磁计算, 得出高温超导磁体的参数.

关键词: 磁约束等离子体推进器, 高温超导磁体, 电磁计算

PACC: 5275D, 7470, 7490

THE ELECTROMAGNETIC COMPUTATION OF HTS MAGNETS IN THE MAGNETIC CONFINEMENT PLASMA THRUSTER

HUANG Ting-qing WANG Liang-bin

Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031

【Abstract】 The magnetic field was provided by four NbTi LTS magnets in the magnetic confinement plasma thruster in the ground experiments. Now, four conduction-cooled HTS magnets made by superconducting Bi-2223/Ag tapes are designed to replace four NbTi LTS magnets. Based on the ANSYS electromagnetic computation method, we calculate and find the parameters of the HTS magnets.

Keywords: Magnetic confinement plasma thruster, HTS magnets, electromagnetic computation

PACC: 5275D, 7470, 7490

1 引言

化学火箭可能仍将是地面进入轨道的优良工具, 但到达其它星球就需要新技术了. 随着人类不断的进行深空探索, 发展新型火箭推进已成为新的需求. 目前新型火箭推进技术主要有: 电推进、核能推进两大类. 而电推进又有很多种. 电火箭发动机是利用电能加速工质, 形成高速射流而产生推力的火箭发动机. 虽然电推进具有很高的比冲, 但由于它产生的推力很小, 只能担负空间推进任务, 不可能用于从地面起飞的运载火箭. 空间电推进系统根据所用的

能源, 可分为太阳电推进和核电推进两种. 太阳电推进是指用太阳帆板把太阳能转换成电火箭发动机所需电能的各种电推进系统. 核电推进是将核能转化为电火箭发动机所需的电能的推进系统. 磁约束等离子体推进器属于电推进方式. 磁约束等离子体推进器比冲可达 30000s, 远高于化学火箭的比冲, 利用比冲可变的特性, 通过推力和比冲的优化, 实现推进器运行轨迹的优化, 从而可以缩短火箭飞行时间^[1]. 例如飞到火星, 化学火箭需十个月, 而磁约束等离子体推进器只需四个多月^[2].

由于高温超导带材生产技术的发展, 高温超导 Bi2223/Ag 带材的临界电流密度得到了极大的提

高. 高温超导 Bi2223/Ag 带材性能的提高, 使得高温超导线圈已接近实际应用水平, 于是各种高温超导磁体相继被设计和生产出来. 与浸泡冷却低温超导磁体相比, 制冷机传导冷却的高温超导磁体运行温度高, 低温系统简单而紧凑, 运行费用低并避免使用液氦带来的问题. 由于小型制冷机技术的突破和高温超导电流引线的出现, 近十年来传导冷却超导磁体技术得到了较快发展. 目前在很多领域, 传导冷却磁体已经或正在取代浸泡冷却磁体^[3].

2 单个高温超导磁体的电磁分析

磁约束等离子体推进器磁体系统由四个 NbTi 低温超导螺旋管磁体^[4]组成, 现在设计依靠 G-M 制冷机传导冷却的四个高温超导磁体替代以前的四个 NbTi 低温超导磁体, 这样地面阶段的实验可以不需液氦制冷, 而用 G-M 制冷机代替制冷, 以节省使用液氦的费用. 高温超导磁体将使用高温超导 Bi2223/Ag 带材绕制. Bi2223/Ag 带材将选用住友公司的产品, 其参数为宽 4.3mm, 厚 0.28mm, 77K 自场下的临界电流为 160A. 住友公司提供的超导带材的短样曲线如图 1, 2 所示.

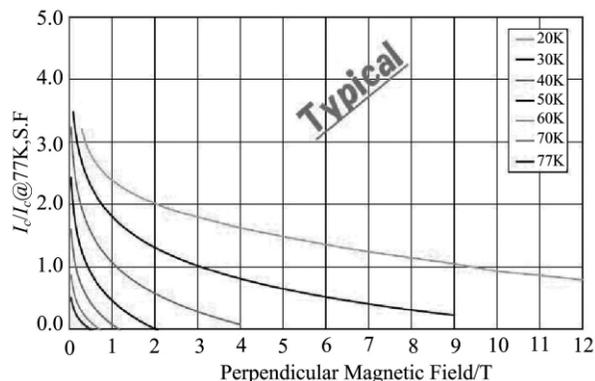


图 1 高温超导带材短样不同温度下的垂直场与临界电流的曲线

四个高温超导磁体共轴并按照一定的顺序放置. 高温超导磁体轴平面示意图 3, 从左到右分别为磁体 1, 2, 3, 4, 给出了四个高温超导磁体的间隔和半径尺寸, 图中标注的尺寸单位是 mm.

磁体的设计要求: 磁体 1, 2 中心磁场场强要求达到 0.5 特斯拉, 磁体 3, 4 中心磁场场强要求能达到 1.0 特斯拉; 四个磁体的内径和磁体长度均相同, 内径为 270mm, 长度要在 100mm 左右. 四个超导磁体间的间隔是根据杜瓦设计要求和加热、探测设备尺寸等确定的.

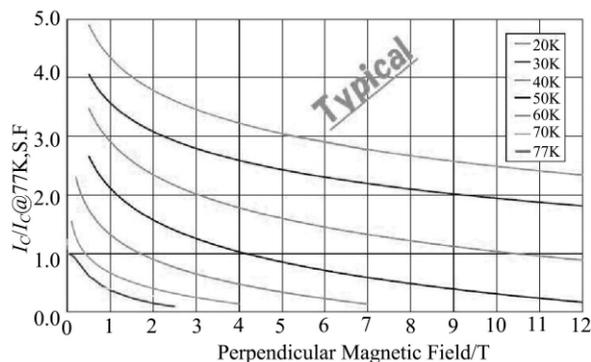


图 2 高温超导带材短样不同温度下的平行场与临界电流的曲线

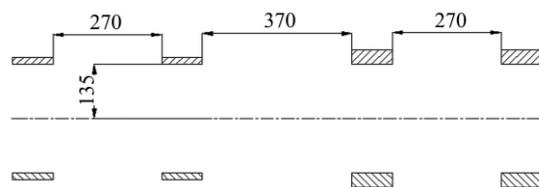


图 3 高温超导磁体系统的尺寸间隔

已建成的磁约束等离子体推进器平台的低温超导磁体的运行电流是 80A, 磁体内径为 197.78mm. 现在高温超导磁体的内径为 270mm, 所以确定超导磁体的工作电流为 100A. 选择住友的这种带材的主要原因是为了提高稳定运行电流上限, 这样在以后的实验中如果需要更高的磁场以获得新的磁场波形, 开展进一步的研究, 就可以直接提高工作电流以达到目的. 要求在温度 20K 时, 单个高温超导磁体在通工作电流 100A 后, 各个磁体中心轴线磁场也能分别达到 0.5 特斯拉, 1.0 特斯拉. 我们考虑使用一个 G-M 制冷机传导冷却两个尺寸参数相同的高温超导磁体. 由于高温超导磁体系统不是闭环运行, 通过四个电源分别给四个高温超导磁体同时供电, 所以对每个磁体可以施加不同的电流密度, 也意味着可以调整磁场波形. 设计使用 Bi2223/Ag 超导带材绕制成饼式线圈的高温超导磁体, 四个高温超导磁体由同一种带材绕制. 设计使用 0.2mm 厚环氧板来绝缘双饼, 两个双饼间的铜片厚 1mm, 一个磁体共 10 个双饼, 这样一个高温超导磁体的长度确定为 100.6mm. 利用 ANSYS 有限元分析软件对单个高温超导磁体进行电磁分析, 从而确定单个磁体的参数.

Bi2223/Ag 带材的临界电流在磁场下存在很大的各项异性^[5~8], 因此在设计超导磁体时应给予充分考虑. 由于高温超导带材的临界电流与磁场的方向有关系, 在计算用高温超导带材绕制的超导磁

体临界电流时分别考虑平行场和垂直场的影响.也就是分别找到磁体空间中最大平行场和最大垂直场的位置,比较它们对应相应磁场时的临界电流,取其小者作为磁体的临界电流.在计算时,已假定 20K 时,对应于磁场分布的临界电流大于设定的工作电流 100A,并留有一定的裕度.在磁体系统及空气建模时,由于高温超导磁体线圈为圆形对称,产生的电磁场在线圈的任一竖直截面上是相同的,空间电磁场又是轴对称的,而对于截面上的电磁场也是对称的,因此对单个高温超导磁体进行电磁分析时,磁体模型取截面的四分之一区域即可^[9].单个高温超导

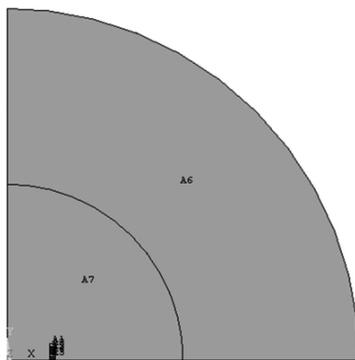


图 4 单个高温超导磁体模型

磁体和空气的模型如图 4 所示,图 4 中 A1、A2、A3、A4、A5 面域是磁体的五个双饼,A6 是远场空气域,A7 是近场空气域.假设在远场外已经几乎没有电磁场,远场区域里面的电磁场较小.对于网格密度有如下要求:线圈内的网格密度较高;离开线圈的距离越远,则电磁场的强度越来越低,所以要求网格密度也要从密到疏;在远场区域内,其电磁场已经较小,在这里面只要有稀疏的网格密度即可,轴线中心部分网格可以细化一下.图 5 是单个高温超导磁体和空气的模型的网格划分.图 6 是高温超导磁体的五个双饼,考虑到双饼之间是一个导冷铜片和两个环氧板,所以建立的模型中双饼之间空隙距离 1.4mm,A5 面域的下边距离 X 轴的距离为 0.7mm.设计的工作电流为 100A 即加载电流密度载荷 $j_c = 8.11 \times 10^7 \text{ A/m}^2$ 和适当的边界条件并求解等过程得到中心轴线的磁场分布,看其是否满足要求,在第一次计算中,已假定了磁体的参数.若计算结果不好,对磁体参数做相应调整,再计算,几次后就可以得到较好的结果.最终确定了 0.5 特斯拉高温超导磁体的外径为 304.16mm,双饼数 10,单饼匝数为 61 匝,1.0 特斯拉高温超导磁体的外径为 342.24mm,双饼数 10,单饼匝数为 129 匝.

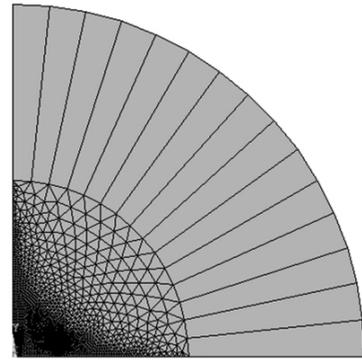


图 5 单个高温超导磁体模型的网格划分



图 6 图 2 中高温超导磁体的五个双饼



图 7 单个高温超导磁体的平行场分布云图

在 ANSYS 有限元软件中,磁体自身场的轴向分量即 Y 轴分量为平行场,径向分量即 X 轴分量为垂直场.一般,最大平行场在螺管磁体内表面的一点,最大垂直场在磁体两个端部的某一点^[10].从单个高温超导磁体模型的 ANSYS 分析计算结果来看,整个磁体最大平行场、最大垂直场的位置即 MX 所标示的位置基本符合上述的情况,如图 7、8 所示.

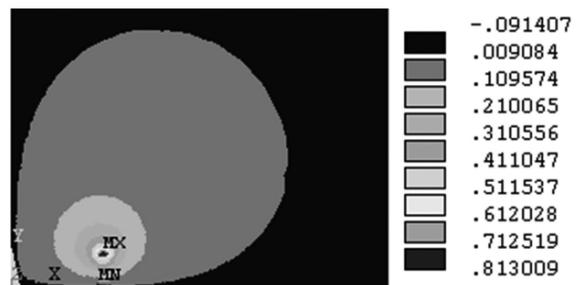


图 8 单个高温超导磁体的垂直场分布云图

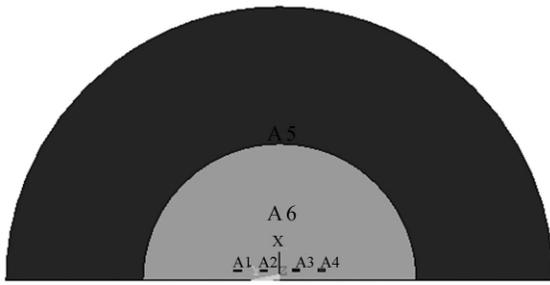


图 9 HTS 磁体系统模型

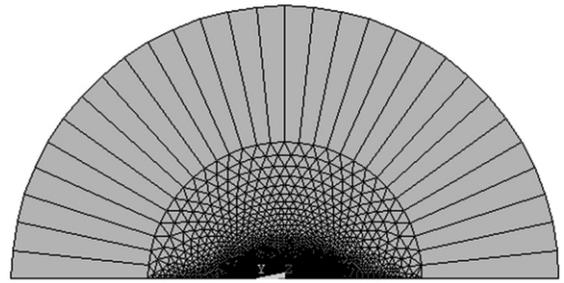


图 10 HTS 磁体系统模型划分的网格

3 推进器高温超导磁体系统的电磁分析

3.1 满足磁场分布要求的四个高温超导磁体的电流密度的计算

根据上面计算得出的磁体参数,再对四个磁体进行建模(图 9)、分配材料属性以及网格划分(图 10)。此时的计算是为了确定通入多大电流能使系统磁场满足要求。由于四个磁体磁场的互相叠加,所以导致每个磁体工作的电流不需 100A 就能满足系统要求。为了快速确定电流值,考虑将每个高温磁体采用一个矩形模型,而非图 4 中分立的双饼模型。然后,划分网格,细化轴线中心部分网格,加载适当的边界条件和电流密度载荷,然后求解,后处理阶段得到中心轴线磁场分布,看其是否符合要求。若计算结果不好,可调整四个高温超导磁体的电流密度,反复几次计算,就可以得到满足要求的结果。最终推进器高温超导磁体系统中四个磁体的参数如表 1 所示,高温超导磁体系统磁场的磁力线的分布如图 11 所示,高温超导磁体系统中心轴线磁场强度如图 12 所示,曲线有四个峰值,从左到右分别为磁体 1,2,3,4 的中心磁感应强度,满足磁体系统磁场分布的要求。

表 1 磁体参数

参数	磁体 1	磁体 2	磁体 3	磁体 4
内径/mm	270	270	270	270
外径/mm	304.16	304.16	342.24	342.24
磁体长度/mm	100.6	100.6	100.6	100.6
中心磁场/T	0.504	0.504	1.00	1.02
电流/A	94	88	94	95
电流密度/ $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$	6.67×10^7	6.25×10^7	6.67×10^7	6.74×10^7
单饼匝数	61	61	129	129
双饼数	10	10	10	10

3.2 高温超导磁体系统中磁体临界电流分析

在这个高温超导磁体系统中,设计高温超导磁

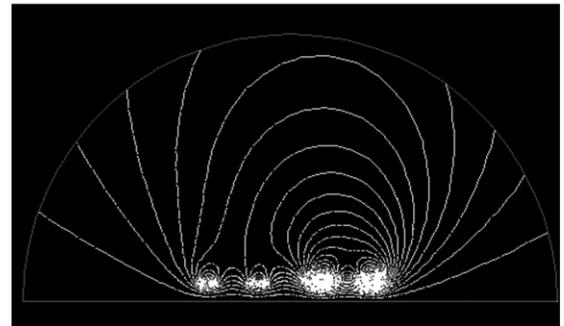


图 11 HTS 磁体系统磁力线分布

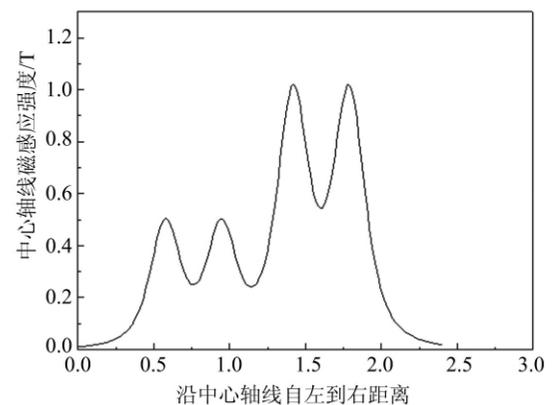


图 12 HTS 磁体系统中心轴线上磁感应强度

体全由同一种规格的带材绕制而成,因此,主要关注磁体 3,4 这两个 1.0 特斯拉的高温超导磁体的最大平行场和最大垂直场。磁体 3,4 对应于图 9 中面域 A3, A4。

3.2.1 磁体 3,4 的最大平行场

由于最大平行场在螺管磁体内表面的一点,因此利用 ANSYS 软件获得磁体系统的平行场分量分布云图,如图 13 所示。从图可以看出,最大平行场的位置即 MX 标示处,在磁体 4 内壁,因此沿磁体 4 内壁自左到右取一路径,从而获得磁体 4 内壁磁感应强度的 Y 轴分量即平行场的曲线图,如图 14 所示。磁体 4 内壁的最大平行场为 1.78 特斯拉,因此高温超导磁体系统最大平行场绝对值大小为 1.78 特斯拉。可对比设计使用的 Bi2223/Ag 超导带材的短样

曲线图 2,查知在 20K 时,平行场为 1.78 特斯拉时的临界电流 I_{c1} 约为 608A.

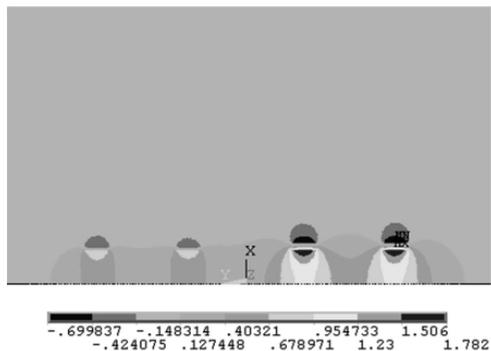


图 13 HTS 磁体系统的平行场分布云图

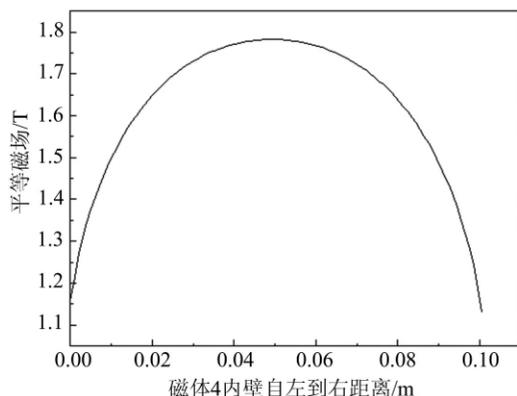


图 14 磁体 4 内壁的平行场

3.2.2 磁体 3,4 的最大垂直场

由于最大垂直场在磁体顶部或者底部的某一点,因此利用 ANSYS 软件获得磁体系统的垂直场分量分布云图,分别如图 15 所示.从图可以看出,最大垂直场绝对值的位置即 MX、MN 标示处,分别在磁体 3 左端和磁体 4 右端,因此沿磁体 3 左端和磁体 4 右端分别自下到上取一路径,从而获得磁体 3 左端和磁体 4 右端磁感应强度的 X 轴分量即垂直场的曲线图,如图 16 所示.磁体 3 左端和磁体 4 右端的最大垂直场绝对值分别为 1.23 特斯拉、1.26 特斯拉,因此高温超导磁体系统的最大垂直场绝对值位于磁体 4 右端,其绝对值为 1.26 特斯拉.可对比设计使用的 Bi2223/Ag 超导带材的短样曲线图 1,查知在 20K 时,垂直场为 1.26 特斯拉时的临界电流 I_{c2} 约为 352A.

最后,比较两个临界电流的大小 I_{c1} 和 I_{c2} ,取其小者作为整个高温超导磁体系统的临界电流,即 I_c 为 352A.高温超导磁体设计的安全因子取为 0.6,则确定运行电流的上限约为 211A.显然,确定高温超导磁体的工作电流为 100A 没有问题,考虑到将

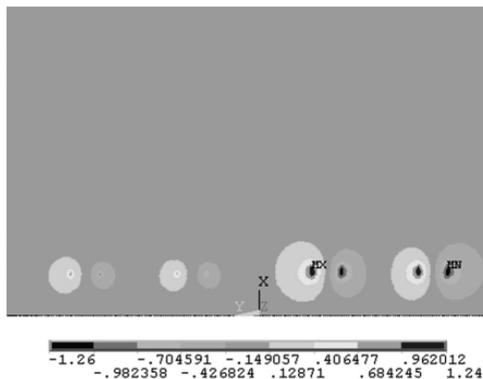


图 15 HTS 磁体系统的垂直场分布云图

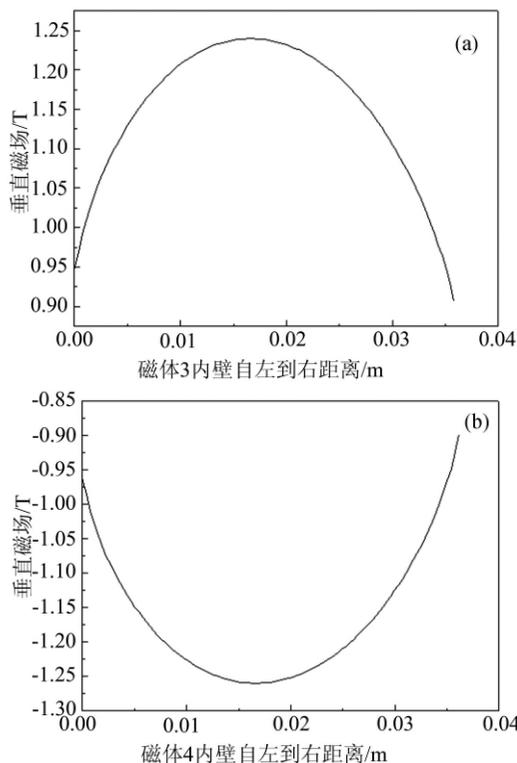


图 16 磁体 3 左端和磁体 4 右端的垂直场

来也许需要比现在所设计的磁感应强度更高的磁场,所以,留下了较大的稳定运行电流提高的空间,将运行电流确定为 100A.

4 结 论

通过 ANSYS 有限元软件计算得出了磁体系统中四个高温超导磁体的具体参数和施加的电流密度.分析了整个磁体系统中高温超导磁体的最大垂直场和最大平行场.一般来说,对同一规格带材绕制的高温超导磁体,垂直场的影响要更大一些.从而根据实际情况选择合适规格的高温超导带材来绕制磁体.利用传导冷却代替液氦浸泡制冷可以使低温

系统简单化,并节约磁约束等离子体推进器地面实验的费用.

参 考 文 献

- [1] 任军学,刘宇,王一白,火箭推进, **33** (3) (2007), 36~42.
- [2] Franklin R, Chang Diaz, *Scientific American*, **283**(2000): 90~97.
- [3] 雷沅忠,王秋良,低温与超导, **31** (1) (2003), 47~51.
- [4] NI Zhipeng, WANG Liangbin, CHEN Zhiyou, ZHANG Yong, WANG Futang, LI Jianguang, *Plasma Science & Technology*, **10** (2) (2008), 211.
- [5] Guo Min Zhang, Liang Zhen Lin, Li Ye Xiao, Yun Jia Yu, *Physica C*, **390** (2003), 321~324.
- [6] S. P. Ashworth, B. A. Glowacki, *Physica C*, **226** (1994), 159~164.
- [7] J. Lehtonen, A. Korpela, J. Pitel, P. Ková?, *Physica C*, **403** (2004), 139~144.
- [8] T. Kiss, H. Okamoto, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11** (2001), 3900~3903.
- [9] 孔明礼,胡仁喜,崔海蓉等, ANSYS10.0 电磁学有限元分析实例指导教程(机械工业出版社,北京,2007), 80~95.
- [10] 南和礼,超导磁体设计基础(国防工业出版社,北京,2007), 45~47.