

传导冷却磁分离用高温超导磁体的杜瓦设计

周 超 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

随着环境污染的加重, 具有高梯度磁场的高温超导磁分离系统作为一种新型高效便捷的污水处理系统得到发展和应用. 本文主要介绍了制冷机传导冷却高温超导磁体的便于装卸杜瓦的设计, 利用 ANSYS 软件分析了杜瓦的应力和形变, 分析了漏热、温度分布和对磁体的冷却情况, 使高温超导磁体在磁分离系统中满足要求并保持正常运行.

关键词: 磁分离, 传导冷却, 可装卸杜瓦

PACC: 0702M, 740Q 0730

DESIGN OF CRYOSTAT FOR CONDUCTION-COOLED HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING MAGNET IN MAGNETIC SEPARATION SYSTEM*

ZHOU Chao WANG Liangbin

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

With environmental pollution getting worse, high temperature superconducting (HTS) high gradient magnetic separation system, as a new high-efficient and convenient wastewater treatment system, has been developed and applied. In this paper, we mainly introduce the design of a removable cryostat for conduction-cooled high temperature superconducting magnet with cryocooler, analyze stress and deformation of cryostat with ANSYS software, and analyze situations of thermal leakage, temperature distribution, and magnet cooling, in order to make sure that HTS magnet runs normally and meets the requirement of the magnetic separation system.

Keywords Magnetic separation, Conduction-cooled, Removable cryostat

PACC: 0702M, 740Q 0730

1 引 言

由于传统的低温超导磁体使用低温液体进行冷却, 结构比较复杂, 在运行过程中要不断的补充低

温液体, 致使操作比较繁琐, 运行成本也较高. 低温液体, 尤其液氮的价格是比较昂贵的, 我国氮资源紧缺, 液氮价格持续上升. 这些因素严重阻碍着超导磁体技术的普及和以超导磁体技术为基础的相关技术应用的^[1]. 早在上个世纪的 80 年代初, M.

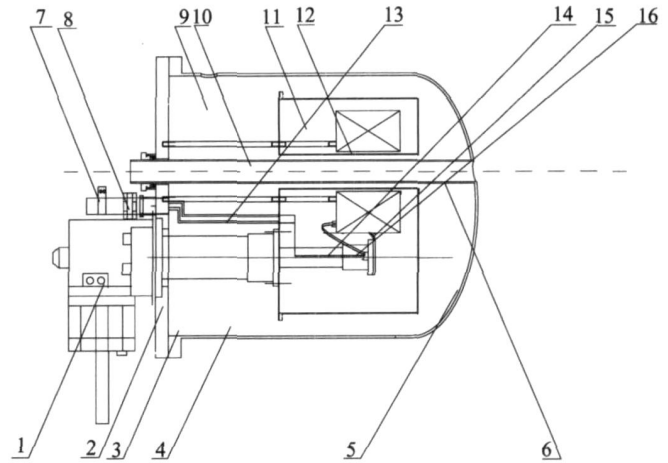
O. Hoenig 就提出了不用液氦而用制冷机冷却 Nb-Sn 超导磁体的设想和概念设计^[2], 但实用化的传导冷却超导磁体系统的成功研制是在 90 年代^[3]. 随着超导技术和制冷技术的发展以及对高磁场的需要, 结构简单、操作简便、由制冷机进行冷却的超导磁体技术日益受到关注. 再加上小型制冷机技术的突破和高温超导电流引线的出现, 近年来传导冷却超导磁体技术得到了快速发展, 目前在很多应用领域, 例如超导磁分离污水处理应用、研究在磁场下的材料合成和化学反应、研究磁场对生物细胞的影响以及军事研究等.

随着环境污染的加重, 高温超导磁分离系统作为一种新型高效便捷的污水处理回收系统得到发展和应用. 高温超导磁分离技术是一种新型的污水处理技术, 利用高梯度磁场对经过磁种磁化的污水进行处理, 分离出被磁化的污染物, 以达到净化的目的, 与传统的处理方法相比具有工艺简便、设备紧凑、占地面积小、处理效率高、处理成本低等优点. 日本在 2004 年已经研制出磁分离系统用于造纸厂的污水处理^[4]. 鉴于传导冷却的超导磁体系统的发展, 低漏热和结构简单的杜瓦日益显得重要. 本文针对污水处理中磁分离系统的需求, 设计了传导冷却用的杜瓦容器, 利用 GM 制冷机一级冷头冷却铜冷屏, 二级冷头冷却高温超导磁体 (B 2223 / Ag), 使之处于 20K 低温下, 通以 100A 的电流, 以达到磁分离要求的中心场 3T 的高梯度磁场, 用传导冷却的方式替代低温液体冷却, 极大简化了结构, 实现了高真空, 减少了漏热, 解脱了对低温液体的依赖和高成本运行的不足, 并设计成可拆卸的结构, 维护方便, 制备、加工、安装过程易于操作, 适于规模生产.

2 结构设计

本文设计的便于装卸的传导冷却超导磁体杜瓦系统, 包括筒体, 偏心室温孔, 铜冷屏, 真空阀门, 环氧支撑杆, 导冷减震件, 三元复合电流引线, 多层绝热材料等. 设计结构图如图 1, 工作时杜瓦容器处于卧放的状态. 杜瓦容器设计成偏心结构, 结构紧凑, 磁体冷却效果好.

高温超导磁体用 B 2223 / Ag 带材绕制而成, 共有 9 个双饼, 采用真空浸环氧固化, 所以各层间导热效果差, 故双饼之间垫紫铜片. 考虑到磁体的热导性能, 本设计中, 磁体中双饼间的铜导冷片外与圆周方向均布四个紫铜片焊接再与二级冷头之间用四组



1. 制冷机; 2 上法兰; 3 下法兰; 4 筒体; 5 标准椭圆封头; 6 室温孔; 7. 电流引线开关; 8 真空插座; 9 真空抽口; 10. 环氧杆; 11. 冷屏; 12 高温超导磁体; 13 铜电流引线; 14 高温超导电流引线; 15 导冷辫; 16 铜电流引线

图 1 杜瓦容器、制冷机和高温超导磁体结构图

软无氧铜导冷编织带连接, 既增加导冷效果, 减少冷头与磁体之间的温差, 又减少制冷机震动引起的磁体震动而引起的磁体产热和温度升高. 理论上, 磁场在制冷机和高温超导电流引线的附近的场强越小越好, 可是这样会增加杜瓦的尺寸, 而且增加磁体与制冷机冷头间的热阻. 这是一对矛盾, 故设计时我们合理布置高温超导电流引线, 减少不利影响, 选取优化的尺寸和结构布局.

冷屏与制冷机一级冷头间软连接, 处于 77K 左右的温度下. 铜冷屏壳体整体开一贯穿整个上半部的槽, 以减少励磁以及运行时电流变化引起的磁场变化产生的涡流电流以及涡流热, 其中磁场集中分布的内壁圆周均布 4 个宽度为 2mm 的槽. 铜冷屏内孔处绝热材料在 20 层左右, 外壳处 80~100 层. 多层绝热材料由铝箔和纤维网组成, 铝箔上打孔, 使得两铝箔之间的气体得以方便抽出, 缩短抽空时间提高系统真空度. 从理论上说, 当真空度高于 10^{-2} Pa 时, 则可消除剩余气体自然对流换热, 但实际上, 由于使用了多层绝热材料, 多层绝热材料内的真实真空度比表观真空度要低 50~100 倍. 所以, 容器的抽气过程最主要的可归结为多层绝热材料的除气^[5], 并且在冷屏上装吸附材料, 如活性炭 (在低温下吸附效果更好), 制冷机同时起到了低温泵的作用, 使真空度更高, 辐射漏热更少.

为了进一步减少流向磁体的漏热, 我们提出了铜-B 2223 高温超导带材-铜三元复合电流引线的设计. 电流引线常用的高温超导体有 B 2223, B 2212 取

向的 Y-123 体材及银和银合金基 Bi2223 带材。Bi 系临界温度高、热导率很低; 相比之下, Y 系的热导率较高, 但临界电流密度也较高, 因此在磁场较高的场合具有优势, 如 In agawa 等研制的 Y-123 棒在液氮温度和自场下的 J_c 高达 71700 A/cm^2 ^[6]。本设计系统中磁场强度不是很高, 再考虑到银合金基的热导较小, 故选用银合金基 Bi2223 带材。在结构上, 由于高温超导体材机械强度很差, 所以使用环氧树脂 (热导率很低, 且与 Bi2223 的冷收缩率 (293K ~ 20K) 相差不到 0.1%^[11]) 作补强材料。由于高温超导体的失超时电阻率很高, 温度上升很快, 使用不锈钢带等材料做成的旁路电阻与高温超导体并联, 起到失超时的分流作用, 避免高温超导电流引线烧毁。由美国超导公司生产的高温超导带在不同温度下临界电流与垂直、平行宽带面磁场磁场的关系 (可从美国超导公司网站获得) 可以看出, 高温超导电流引线随温度的下降, 临界电流密度增高, 所以高温超导电流引线采用变截面结构进一步降低漏热^[7], 并且比较可得出, 垂直宽带面的磁场引起的电流密度衰减大, 所以我们设计了可旋转的铜-Bi2223 高温超导带材接头, 以找到合适的位置使磁场在高温超导电流引线宽带面垂直方向的磁场强度最小。具体结构布置为, 一段铜引线一端与杜瓦外壳相连, 另一端与高温超导引线相连, 接点处通过氮化铝 (AlN) 垫片由冷屏冷却; 另一段铜引线一端与磁体引出线相连, 另一端与高温超导引线相连, 接点通过 AlN 垫片被二级冷头冷却, AlN 垫片作用是使得连接处既有好的热接触又有好的电绝缘性。制冷机一级冷头的温度在高温超导体的临界温度以上, 使得高温超导体工作在超导态, 其内没有焦耳热产生, 而且氧化物高温超导体具有很低的热导率 (Bi2223 体材在 77K ~ 4K 温区的平均热导率只有不锈钢的 1/3)^[8], 从而引线向二级冷头以及电流引线向超导磁体的漏热可以做到比气冷引线的十分之一以下 (总制冷功率已可降低至 1/5 以下)^[11]。

为了实现系统的可反复装卸, 使设计的杜瓦容器具有便于维修、改变优化内部结构布置, 以及故障排除等优势, 我们采取了一系列的设计方案: 制冷机与上法兰盖、一级冷头与冷屏、二级冷头与导冷件之间, 均采用螺栓连接, 使用橡皮垫片、软铜片等软连接方式, 减少震动噪声, 从而减少磁体震动引起的线圈涡流热。上法兰的连接件均采用可装卸连接方式, 如: 电流引线、室温孔密封采用威尔逊密封, 而测量信号引线采用可插拔式真空密封插座。铜冷屏和杜

瓦外壳的上盖板和筒体均采用螺栓连接, 方便装卸。

3 杜瓦的应力与形变分析

根据高温超导磁体的尺寸, 并通过理论计算, 计算出杜瓦系统的具体尺寸外杜瓦直径 400mm、壁厚 4mm, 室温孔直径 32mm, 铜冷屏直径 310mm、壁厚 1mm, 再利用 ANSYS 软件进行了应力与形变模拟, 具体模拟结果如图 2、3、4 所示。

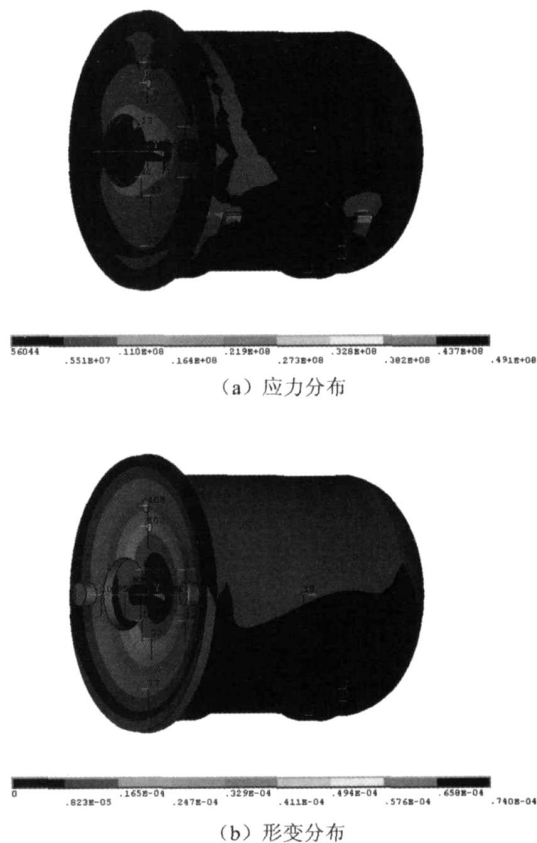


图 2 盖板、筒体、封头、室温孔部分 (材料不锈钢 304) 的 ANSYS 模拟结果

在应力方面, 不锈钢 304 的许用应力为 140 MPa 考虑附加厚度和表面腐蚀等因素, 取筒壁厚度为 4mm。在形变方面, 上法兰上装有多处密封器件, 为保证真空度, 取厚度为 18mm。从计算结果看, 最大应力值在外杜瓦和支撑件连接处只有 49 MPa 最大形变值在盖板中心处只有不到 0.074 mm , 符合材料应力、机械变形、密封等要求。

在应力方面, 紫铜许用应力为 108 MPa 考虑附加厚度, 取厚 1mm, 最大应力值只有 36.4 MPa 出现在支撑杆件和冷屏连接处, 符合设计机械应力要求。

在形变方面, 需要满足冷屏内孔在竖直方向上的形

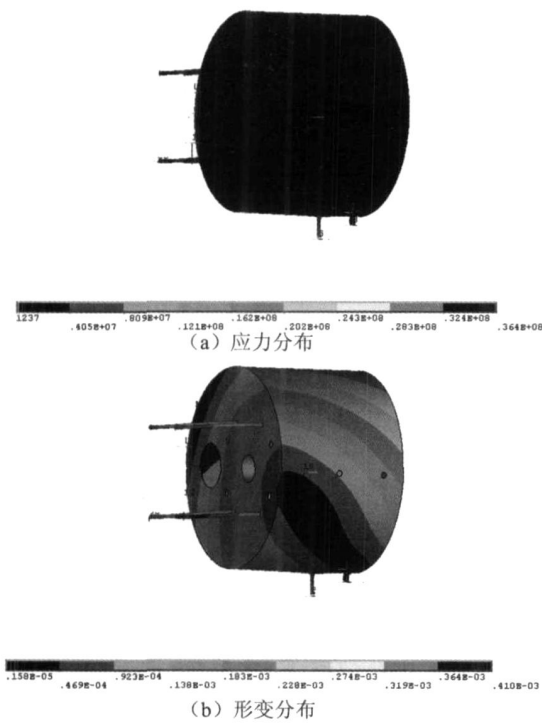


图 3 铜冷屏 ANSYS 模拟结果

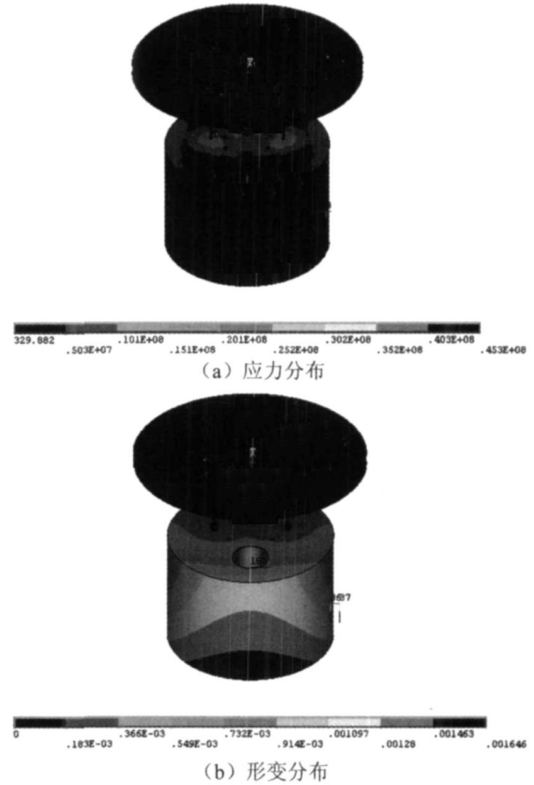
变不超过 0.5mm 的设计要求, 从图 3(b) 中看出最大形变值在 Cu 屏支撑点远端为 0.41mm, 符合机械变形、同轴度等要求, 防止形变引起的冷屏与室温孔或者磁体的搭接, 造成大的传导漏热使磁体失超的严重后果。

在安装的时候, 没有支架支撑, 冷屏、支撑杆及盖板的受力情况与正常工作时不同, 故特模拟了此情况下的应力和形变如图 4, 最大应力 45.3MPa 出现于上盖板, 最大形变 1.65mm 出现于冷屏远端, 满足材料应力和形变需求。

综上, 设计选取的尺寸, 从 ANSYS 模拟的应力和形变的结果看, 较好的满足了材料的应力要求和结构设计要求。

4 热设计

高温超导磁体在 20K 下磁场可达到要求, 故制冷机选取的是二级 GM 制冷机, 一级冷量 45W (77K), 二级冷量 6W (20K). 系统热源和传热路径如图 5 所示. 制冷机一级冷头的热负荷有: 辐射漏热, 支撑杆漏热, 剩余气体导热, 铜引线的传导热; 二级冷头的热负荷有: 辐射漏热, 拉杆漏热, 剩余气体导热, 高温超导电流引线及铜引线的传导热. 磁体通电时, 有焦耳热, 接触电阻发热, 涡流损耗发热等。

图 4 冷屏、支撑杆及盖板 ANSYS 模拟结果
(在安装时没有支架支撑, 在盖板端面处固定的情况)

磁体与冷屏间的辐射漏热 Q_1

$$Q_1 = F_{\sigma\varepsilon}(T_2^4 - T_1^4) \quad (1)$$

上式中, F 为磁体表面积 (m^2); σ 为波尔兹曼常数; ε 为磁体表面黑度, 取为 0.08; T_1 、 T_2 分别为磁体温度和冷屏温度 (K).

杜瓦与冷屏间的辐射漏热 Q_2

$$Q_2 = F_{2\varepsilon} [T_1^4 - T_2^4] / [1/\varepsilon_1 + (F_1/F_2)(1/\varepsilon_2 - 1)] \quad (2)$$

F_1 、 F_2 为杜瓦、冷屏表面积; T_1 、 T_2 为杜瓦、冷屏温度; ε_1 、 ε_2 为杜瓦、冷屏表面辐射系数, $\varepsilon_1 = 0.08$, $\varepsilon_2 = 0.029$. 公式对于球形夹层、圆筒形夹层均适用。

传导漏热 Q_3

$$Q_3 = \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \lambda(t) dt \quad (3)$$

A 、 L 是热传导体的横截面积和长度. T_1 、 T_2 为冷、热端温度. λ 为材料的热导率, 是温度的函数。

焦耳热 Q_4

$$Q_4 = I^2 \frac{A}{L} \int_{T_1}^{T_2} \rho(t) dt (T_2 - T_1) \quad (4)$$

A 、 L 是热传导体的横截面积和长度. T_1 、 T_2 为冷、热端温度. ρ 为材料的电阻率, 是温度的函数; I

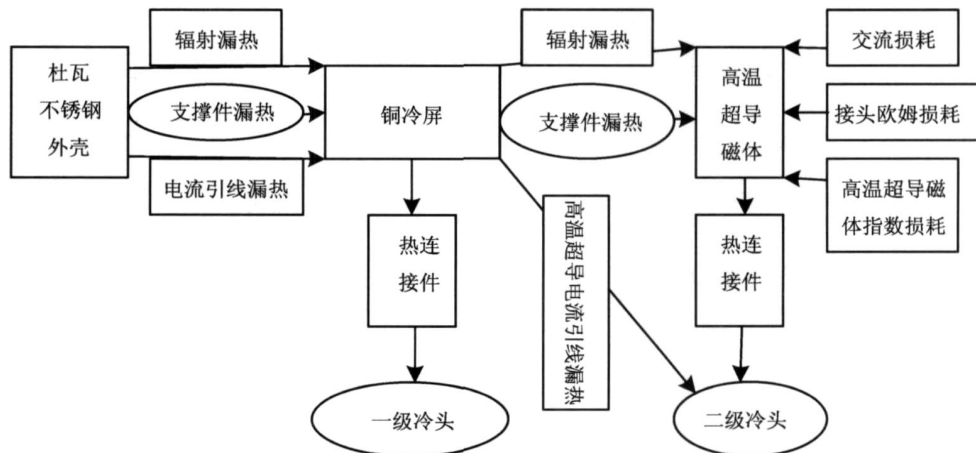


图 5 系统热源和传热路径

为通电电流。

连立公式 (3)、(4) 可以优化得到合适的电流引线的横截面积和长度, 以实现最小的热传导漏热和焦耳热。根据制冷机的制冷量, 我们设定: 一级冷屏设计温度为 7K, 二级冷屏设计温度为 20K。热计算结果列于表 1。

表 1 热计算结果

		0 A (不通电)	100 A
一级冷头	铜引线漏热	7.88W	15.76W
	支撑件漏热	0.6W	0.6W
	辐射漏热	3.12W	3.12W
	总计	11.6W	19.48W
二级冷头	Bi2223 / AgAu	0.23W	0.23W
	电流引线漏热	0.01W	0.01W
	支撑件漏热	0.02W	0.02W
	辐射漏热	0.02W	0.02W
	焦耳热 (线圈接头电阻)	0W	0.1W
	总计	0.26W	0.36W

在漏热和传热冷却计算中, 系统向冷屏漏热、磁体漏热小于所选制冷机一、二级冷头的制冷量, 能够实现冷屏工作在 77K 以下, Bi2223 高温超导磁体运行于 20K 以下, 满足使用要求。与低温超导线圈相比, 高温超导线圈的接头多 (特别是带材绕成饼式结构的情况), 运行温度比低温超导线圈高, 其接头欧姆损耗和指数损耗较大。为了使磁体与冷屏运行在尽可能低的温度, 应设法降低漏热和自身发热, 减小磁体、冷屏自身的和与冷头之间的热阻。本设计中的磁体, 在饼与饼之间插入紫铜片来提高线圈的径向传热性能, 以实现磁体温度均匀且接近冷头温度。在失超时能将热量尽快被制冷机带走, 在冷屏上

半部开贯通的槽, 冷屏上盖板与筒体螺栓连接处垫绝缘但热导好的材料, 减少涡流热, 并使冷屏整体的温度分布更均匀。采用变截面的三元复合高温超导电流引线, 进一步减少漏热, 等结构, 优化了传热结构, 对传导冷却低温系统的发展有一定作用。

5 结 论

通过理论分析表明, 本文设计的杜瓦在应力和形变上满足要求, 也达到了磁分离系统中磁体的要求。虽然以冷却磁分离系统用的高温超导磁体为目的, 可是杜瓦容器以传导冷却的方式, 结构简单, 便于装卸。传热结构布置合理, 特别是三元复合高温超导电流引线的设计, 使漏热控制在较低的水平, 保证了磁体温度低且分布均匀, 对今后进一步研制实用化、规模化的传导冷却超导磁体杜瓦容器有一定的有益作用。

[1] 雷沅忠, 王秋良, 低温与超导, 31(2003), No. 2
 [2] Hoening M O., IEEE Trans Magn., 19(3) (1983), 880
 [3] Watanabe K, et al., Japanese Journal of Applied Physics, 32(4A) (1993), L488
 [4] Yoshiyuki Kakihara, et al., IEEE Trans Appl Supercond., 14(2) (2004), 1565
 [5] 赵保志, 雷沅忠, 王秋良, 戴银明, 宋守森, 黄晖, 王晖, 真空, 42(2005), No. 2
 [6] Inagawa Y, Kakimoto K, Shiohara Y, Mat Sci & Eng., 53(1998), 86
 [7] Zeinets B Liu H K, Dou X, Supercond. Sci & Technol., 12(1999), 181.
 [8] Watanabe K, Motokawa M, IEEE Trans. Appl Supercond., 10(1) (2000), 489