

超导涡流制动装置液氦容器设计及分析

戴文华^{1,2}, 奚维斌^{1,2}, 卫靖^{2†}, 方超², 杜双松², 宋云涛^{1,2}

1. 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

2. 中国科学技术大学, 合肥 230026

收稿日期: 2023-05-30; 接收日期: 2023-08-07

【摘要】 液氦容器是浸泡式超导涡流制动装置稳定运行不可或缺的部件, 其漏热损耗和结构强度关系着内部超导磁体能否安全稳定的工作. 针对超导涡流制动装置的液氦容器的各类漏热进行了分析计算, 详细讨论了超导线圈励磁过程中对不同壁厚的液氦容器产生的涡流损耗, 并采用 Ansys 有限元分析软件对不同壁厚液氦容器的强度进行了计算, 结合漏热及强度计算结果获得了最优的液氦容器壁厚参数. 结果表明 4 mm 壁厚下的液氦容器总漏热在励磁速度为 90 A/s 时可达 1.87 W, 液氦容器在各类综合力作用下的最大应力为 393 MPa, 最大变形为 2.2 mm, 可满足所选材料的漏热及强度需求, 为超导涡流制动器装置总体设计提供了有力保证.

关键词: 液氦容器, 漏热, ANSYS, 强度

PACS: 74.25.fc, 85.25.-j, 85.25.Am.

DOI: 10.13380/j.ltpl.2023.04.004

Design and Analysis for the Cryogenic Vessel of the Superconductive Eddy Current Brake

DAI Wenhua^{1,2}, XI Weibin¹, WEI Jing^{1†},

FANG Chao¹, DU Shuangsong¹, SONG Yuntao^{1,2}

1. *Institute of Plasma Physics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031;*

2. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026*

Received date: 2023-05-30; accepted date: 2023-08-07

【Abstract】 The cryogenic vessel is an essential part of the superconducting eddy current brake immersed in liquid helium. Its heat leakage and structural strength determined the safety of the internal superconducting magnet. The heat leakage of the cryogenic vessel of the superconducting eddy current brake was calculated, the eddy current loss was detailed studied based on the different thickness. The strength of the cryogenic vessel was analyzed by the finite element analysis software. The best thickness parameter was obtained considering the heat leakage and strength. The results showed that the total heat leakage of the cryogenic vessel was 1.87 W at 90 A/s, and the maximum stress of the cryogenic vessel under various comprehensive forces was 393 MPa, and the maximum deformation was 2.2 mm, both heat leakage and the strength could meet the requirements of the chosen material.

Keywords: Cryogenic Vessel, Heat Leakage, ANSYS, Strength

PACS: 74.25.fc, 85.25.-j, 85.25.Am.

DOI: 10.13380/j.ltpl.2023.04.004

[†] jingw@ipp.ac.cn

Reference method: DAI Wenhua, XI Weibin, WEI Jing, FANG Chao, DU Shuangsong, SONG Yuntao, Low. Temp. Phys. Lett. **45**, 0219 (2023)

1 引言

列车制动作为高速铁路关键技术之一,不仅影响着列车正常运行的发车频率而且关系着列车运行安全乃至乘客的生命财产安全^[1]. 线性涡流制动是一种伴随着制动技术扩展而诞生的不依赖于轮轨间摩擦系数的非黏着制动技术^[2]. 现阶段涡流制动大多采用永磁铁或电磁铁为励磁磁极,其中永磁铁的优势在于采用非励磁线圈、无需外部供电、热负荷小、运行成本低,缺点在于产生的磁场强度有限,可产生 1.35 T ^[3]、制动力调节能力差、并且在非工作状态时仍有磁性. 而目前常规的电磁铁均采用铜线缠绕铁芯的形式,在通电情况下产生可控磁场,其相较于永磁铁更易于控制、电流的可调节性好,产生的磁场强度较永磁体大,约 1.8 T ^[4, 5],因此电磁铁涡流制动已逐渐成为涡流制动技术发展的重要分支并成功在国外的实验线上得到应用^[6].

但是,常规线圈的电磁涡流制动采用带有绝缘层的导线作为励磁电流载体,在长期运行过程中线圈通电所产生的热量可能对绝缘产生损坏,从而限制了制动力的上限,甚至会影响制动磁体的安全运行. 而超导涡流制动器是在常规线圈的电磁涡流制动基础上,采用超导线圈替换原有的常规导体线圈,在不依赖铁芯的情况下,由超导线圈产生的大磁场在轨道上产生感应涡流,从而产生制动力. 一方面超导磁体产生的磁场是由工作于低温的超导线圈通电产生,不会产生热量,另一方面超导磁体可产生不依赖于内部铁芯的强磁场,减少磁体自身的重量.

虽然超导技术在高速列车制动领域鲜有报道,但其应用于高速列车的驱动与悬浮已有先例,1966年美国发明的 LTS 磁悬浮列车采用工作在液氮温区(4.2 K)的 Nb-Ti 线超导磁体与轨道相互作用实现悬浮、导向和驱动^[7]. 而且相关学者也研究了与超导密不可分的低温技术在列车上的应用,日本的中岛洋介绍了在日本宫崎试验线上使用的低温系统组成,并阐述了列车在运行过程中的制冷情况^[8]. F. Dong 等通过模拟和试验,提出了改善冷却性能的策略,并成功延长了低温能量保存时间至 8.83 小时^[9].

由于超导磁体工作于临界温度以下,一般将超导磁体置于低温杜瓦中,采用低温介质冷却超导磁体,目前主流的冷却方式有三种:1)无制冷机下液氮

浸泡式冷却,该种方式下液氮由于漏热挥发需及时补充;2)制冷机传导式冷却,该种冷却方式将制冷机冷头直接接触超导磁体,由于没有冷却介质的储备,因此稳定性差;3)制冷机液氮再冷凝式冷却,该种冷却方式将前两种方式结合,能够持续稳定的提供液氮低温环境,但与浸泡式冷却相同,需要一定容积的液氮容器来存储液氮介质. 超导涡流制动器采用制冷机液氮再冷凝式冷却,液氮容器是其低温系统中必不可少的部件. 本研究以超导涡流制动装置液氮容器为研究对象,对液氮容器及其支撑结构进行了设计,并采用 Ansys 有限元软件对所设计的液氮容器进行了漏热分析和强度计算,获得了最优的壁厚参数.

2 液氮容器的设计及要求

由于安装的空间位置限制,超导涡流制动器的液氮容器及支撑结构设计如图 1 所示,液氮容器由长 1000 mm ,宽 156 mm ,高 71 mm 不锈钢盒组成,容器内部一字排列 6 个直径 140 mm 的超导线圈,液氮容器侧面通过绝热支撑与外部的杜瓦进行连接,在距离液氮容器外侧 11 mm 处采用 1 mm 厚铜板进行冷屏设计,隔断外杜瓦部件对液氮容器的直接热辐射.

液氮容器在工作过程中主要受超导线圈与轨道间相互作用的电磁力,自身重力及内部压力作用. 通过电磁计算,线圈在励磁电流为 180 A 时可产生 4.6 T 的磁场强度,在运动过程中最大可产生 10 kN 的水平制动力和 30 kN 的竖直方向的吸引力,制动过程中励磁时间不大于 2 s . 液氮容器及内部线圈自重 34 kg . 液氮容器在正常工作时,液氮由于漏热产生的挥发通过所连接的制冷头实现热平衡,设计在产生 0.2 MPa 时,与液氮容器连接的爆破阀工作.

3 液氮容器漏热计算及强度分析

液氮容器工作中的漏热主要包括励磁过程中产生的涡流损耗,由连接支撑、电流引线和测量线产生的传导漏热,由冷屏对液氮容器的辐射漏热,以及残余气体的漏热,相对其他漏热,残余气体的漏热影响较小^[10],在此不做讨论.

3.1 液氮容器的传导漏热

液氮容器的传导漏热主要是由其与外部杜瓦连

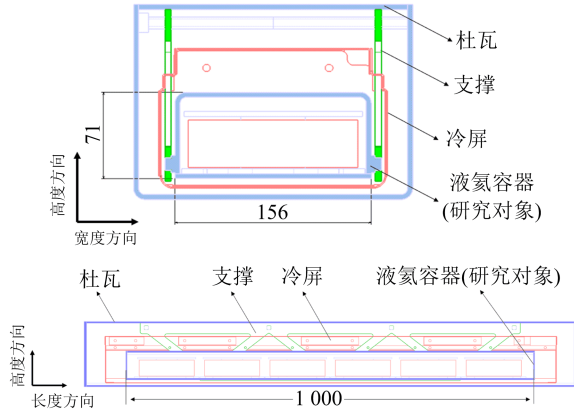


图1 超导涡流制动器液氮容器位置图.

接的绝热支撑漏热以及电流引线接头漏热组成,固体的传导漏热可由以下公式进行计算^[11]:

$$Q = \frac{\lambda A (T_2 - T_1)}{L} \quad (1)$$

式(1)中, λ 为介质的热传导率, A 为传导介质的截面积, T_2 为传导介质的热端温度, T_1 为传导介质的冷端温度, L 为传导介质的长度.由式可知,热传导漏热的大小与传导系数,传导部件的横截面积以及传导部件的长度有关.在低温系统的支撑设计中,为最大化的降低由支撑传导的热量,支撑材料可采用热传导率低的复合材料,超导涡流制动器的支撑结构除了需要支撑整个液氮容器部件外,还需要传递线圈产生的制动力和吸引力,因此采用成型性较好的G10材料.结合涡流制动系统的结构空间以及涡流制动的受力特点设计如图所示的支撑结构,支撑采用总长910 mm、宽141 mm的G10板材料,板厚5 mm,为最大程度减小支撑的传导漏热,在G10板上切割出适当大小的三角形孔,减少传导面积的同时增加热传导距离.

由于G10支撑结构复杂,且传导系数随温度的变化而变化,因此采用Ansys Workbench热分析模块对支撑的传导漏热进行分析,液氮容器设定温度为4 K,冷屏连接的孔接触面温度为77 K,杜瓦连接的支撑接触面温度为298 K,通过计算可得出其温度场分布结果如图2所示,计算得出液氮容器的支撑传导漏热 Q 支为0.25 W.

为减少低温超导磁体的传导漏热,超导磁体与常温引线间在冷屏内部采用高温超导电流引线进行电流传输,高温超导电流引线及测量线在超导磁体上产生的漏热在185 A电流设计下可达到的漏热可

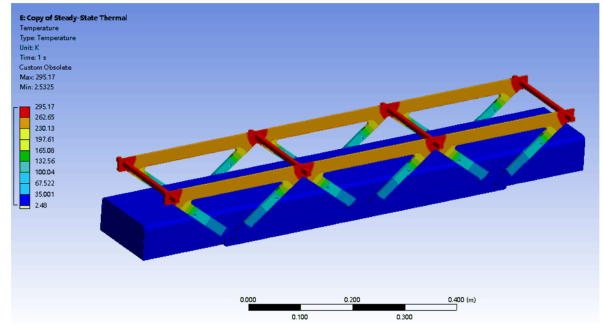


图2 液氮容器支撑温度分布图.

控制在0.05 W以内^[12].

3.2 液氮容器的辐射漏热

液氮容器外侧的冷屏部件能够有效的隔断外部杜瓦对液氮容器的热辐射,因此传递至液氮容器的辐射为冷屏对液氮容器的热辐射,热辐射可由以下公式计算^[13]

$$Q = \sigma \epsilon_r A_1 \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right] \quad (2)$$

式(2)中综合热辐射系数 ϵ_r 可通过下式计算

$$\epsilon_r = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_2} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right)} \quad (3)$$

式(3)中 σ 为黑体辐射常数,为 $5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, T_1 为液氮容器温度取值4 K, T_2 为冷屏温度取值77 K, ϵ_1 为液氮容器的热辐射系数,采用不锈钢材料,其在4 K下的热辐射系数为0.005, ϵ_2 为冷屏的热辐射系数,冷屏采用铜材料,依据文献^[14]其在77 K下的热辐射系数为0.029, A_1 为液氮容器的外表面面积,为 0.48 m^2 , A_2 为冷屏的辐射面积,为 0.49 m^2 ,经过计算得出冷屏对液氮容器的热辐射功率 Q 为0.0042 W.由计算结果可知,相对于传导漏热,该低温系统的辐射漏热影响较小.

3.3 液氮容器的涡流损耗

依据法拉第电磁感应定律,穿过闭合电路的磁通量发生变化时,闭合电路中产生感应电流.超导线圈工作于不锈钢制成的液氮容器中,超导线圈在励磁过程中,产生的磁场逐渐增大,因此在周围的导电材料中感应出涡流,引起涡流损耗.励磁线圈在导电板中产生的涡流效应如图3所示.

在图3中,励磁线圈在通过导电板的磁通为

$$\phi = B * S \cos \theta \quad (4)$$

其中 B 为励磁线圈在导电板处产生的磁场强度, S 为磁力线穿过的面积, θ 为磁力线方向与穿过面的

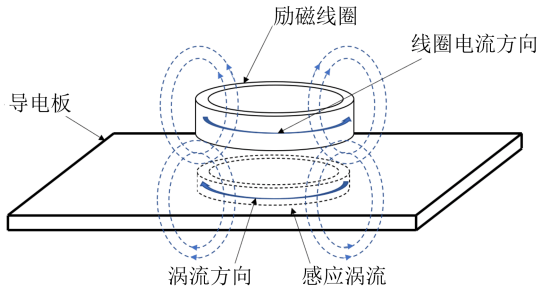


图3 涡流效应原理图。

夹角,由毕奥-萨伐尔定律可知励磁线圈在指定距离上产生的感应磁场与励磁电流的大小成正比,设其比例系数为 λ ,假设励磁线圈的电流以恒定速率 k 增长,磁场穿过导电板的面积半径为 r ,则 t 时刻的磁感应强度 B 可用 $k\lambda t$ 表示,则导电板上产生的感应电动势为

$$\xi = \frac{\partial \phi}{\partial t} = \pi k \lambda r^2 \cos \theta \quad (5)$$

线圈的励磁过程非周期变化,故可忽略集肤效应的影响,单位环形涡流元内的电阻为

$$dR = \frac{2\pi r \rho}{h dr} \quad (6)$$

单位涡流元的电流大小为

$$di = \frac{\xi}{dR} = \frac{k \lambda r \cos \theta h dr}{2\rho} \quad (7)$$

则涡流产生的损耗为

$$P = \int_0^{\frac{D}{2}} (di)^2 dR = \int_0^{\frac{D}{2}} \frac{k^2 \pi \lambda^2 r^3 h \cos \theta}{2\rho} dr \quad (8)$$

由式(8)可知由线圈励磁过程产生的涡流损耗与感应涡流的半径大小、涡流处的磁场大小、导电板的厚度以及线圈的励磁速率有关。当结构参数及选用材料一定后,涡流大小只与线圈的励磁速度相关。

超导涡流制动器在工作时,其制动力响应需在2 s内达到10 kN,即超导线圈的工作电流需在2 s内从0达到设计电流180 A。依据文献^[15],取4 K下不锈钢的电阻率为 $53.9 \mu\Omega \cdot \text{cm}$,采用电磁有限元分析软件Ansys Electronics Desktop分析计算了五种不同液氢容器壁厚下线圈90 A/s的励磁过程中液氢容器产生的涡流损耗,其结果如表1所示。

由毕奥-萨伐尔定律知,距离励磁电流源越近,产生的感应磁场越大,因此感生出的电涡流集中分布在液氢容器的底板区域及与线圈的骨架上,其在液氢容器的涡流分布如图4所示。

表1 不同液氢容器壁厚下的涡流损耗。

序号	液氢容器壁厚	涡流损耗 90 A/s
1	2 mm	1.14 W
2	3 mm	1.31 W
3	4 mm	1.51 W
4	5 mm	1.64 W
5	6 mm	1.82 W

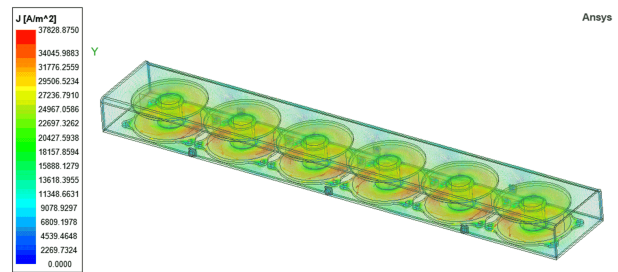


图4 液氢容器涡流分布图。

3.4 液氢容器的强度计算

在计算液氢漏热后,采用Ansys Workbench对所设计的结构进行强度分析,所使用316LN不锈钢材料的弹性模量为205 GPa,泊松比为0.3,在4 K下的屈服强度 σ_y 为800 MPa^[16],采用六面体网格对模型进行划分后其结果如图5所示,共计49612单元,328615个节点。依据液氢容器的实际工况,所设计的边界条件如下:1)约束G10支撑与杜瓦的接触面;2)对液氢容器及G10支撑加载由漏热分析产生的温度分布载荷,容器内部所有表面施加0.2 MPa的压力载荷,对液氢容器施加整体竖直向下的 10 m/s^2 的加速度载荷,线圈对其底部内表面产生的340 N的重力载荷;3)液氢容器底平面沿着液氢容器长度方向10 kN的制动力载荷和高度方向向下30 kN的吸引力的载荷。

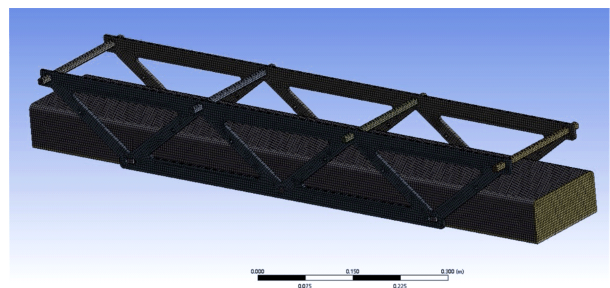


图5 结构分析网络划分。

对各个步骤的载荷进行静力学计算,并通过对液氮容器最大应力处进行线性化处理,得到不同壁厚条件下在最大应力点的一次薄膜应力及其与一次弯曲应力之和 $P_m + P_b$. 其结果如表 2 所示.

表 2 三种液氮容器壁厚下的涡流损耗.

序号	液氮容器壁厚	一次薄膜应力 P_m	一次薄膜应力与一次弯曲应力之和 $P_m + P_b$
1	2 mm	177 MPa	1143 MPa
2	3 mm	151 MPa	697 MPa
3	4 mm	104 MPa	393 MPa
4	5 mm	74 MPa	300 MPa
5	6 mm	34 MPa	146 MPa

依据文献^[16,17],磁体结构部件的应力设计接收标准为

$$P_m < 1.0 * K_m * S_m = \frac{2}{3} K_m * \sigma_y = 533 \text{ MPa} \quad (9)$$

$$P_m + P_b < 1.5 * K_m * S_m = K_m * \sigma_y = 800 \text{ MPa} \quad (10)$$

式(9)(10)中 S_m 为许用应力值,取值为三分之二的屈服强度 σ_y , K_m 取值为 1.0,依据表 2 可知,随着壁厚的增加,容器的强度明显增加,且所选壁厚的一次薄膜应力均能满足要求,但当液氮容器的壁厚为 2 mm 时,一次薄膜应力和一次弯曲应力之和超出了许用应力,壁厚在 3 mm 及以上结构下可满足要求,其中 3 mm 厚的应力与许用应力间的差值较近,适宜选取超过 3 mm 的壁厚. 4 mm 液氮容器在综合力作用下,其应力分布及变形如图 6(a, b)所示,液氮容器的最大应力为 393 MPa 作用于与 G10 支撑连接的约束区域,液氮容器的最大变形为 2.2 mm,产生于液氮容器端部.

3.5 液氮容器的最优参数选择

由上述漏热分析及强度计算结果可知,壁厚越大,其强度越好,但是产生的涡流损耗越多,液氮容器的总体漏热为

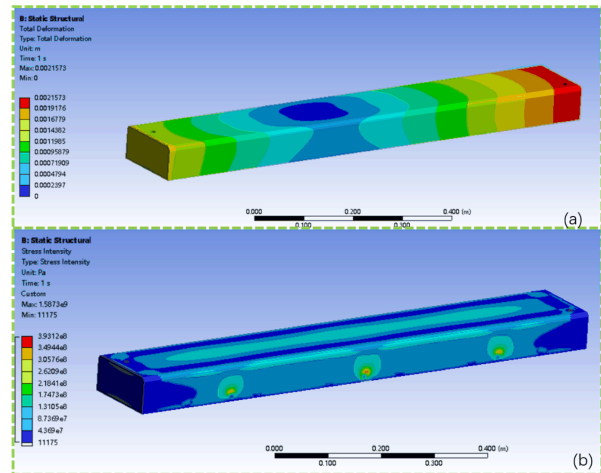


图 6 液氮容器的应力及变形(a)液氮容器所有载荷下的应力分布(b)液氮容器所有载荷下的变形.

$$Q_{\text{总}} = Q_{\text{漏}} + Q_{\text{支}} + Q_{\text{引}} + Q_{\text{辐}} \quad (11)$$

在壁厚为 2 mm、3 mm、4 mm、5 mm 及 6 mm 下的总漏热在 90 A/s 的励磁速度下分别为 1.50 W、1.67 W、1.87 W、2.0 W 和 2.18 W,由于目前商用化的低温制冷机在液氮温区的制冷量最高可达 2 W,因此综合考虑涡流损耗及结构强度,在所选的五组参数中,2 mm 壁厚强度超过极限,6 mm 的漏热满足不了要求,最适宜采用 4 mm 壁厚的液氮容器,在强度和漏热损耗上均能够满足要求且具备可观的安全裕度.

4 结 论

本研究以超导涡流制动器的液氮容器为研究对象,计算了液氮容器在低温下的各种漏热,并通过 Ansys Workbench 对所设计液氮容器进行了强度计算,获得了最优化的壁厚参数,结果表明超导涡流制动器液氮容器的壁厚为 4 mm 时在 90 A/s 的励磁速度下总漏热为 1.87 W,可满足制动机的工作需求,液氮容器在综合应力作用下的最大应力为 393 MPa,最大变形为 2.2 mm,可满足所选不锈钢的应力需求. 所选取的液氮容器壁厚参数合理可靠,能够为超导涡流制动装置中超导磁体的稳定运行提供一个安全可靠的低温环境.

参 考 文 献

- [1] 吴萌岭, 马天和, 田春, 杨俊, 陈茂林. 中国铁道科学, **40** (2019), 134
- [2] 李培署, 王凤洲. 铁道车辆, **56** (2018), 1
- [3] 温建民, 罗成. 电机与控制应用, **50** (2023), 36
- [4] 丁福焰, 吕宝佳, 顾磊磊. 铁道机车车辆, **32** (2012), 1
- [5] B. Kou, Y. Jin, H. Zhang, L. Zhang, H. Zhang, *IEEE Trans. Mag.*, **51** (2015), 8003404
- [6] M. Kunz, 变流技术与电力牵引, **2** (2005), 4
- [7] 王家素, 王素玉. 电气工程学报, **10** (2015), 1
- [8] K. Nagashima, 国外铁道机车与动车, **6** (2018), 28
- [9] F. Dong, Z. Huang, X. Xu, L. Hao, N. Shao, Z. Jin, *Energy*, **190** (2020), 116403
- [10] 胡锐, 丁开忠, 李蕾, 杜双松, 邹春龙, 张华辉, 冯昌乐. 低温工程, **1** (2021), 43
- [11] J. Ekin, *Phys. Today*, **5** (2007), 67
- [12] 高维浩, 硕士学位论文, 黑龙江: 哈尔滨工业大学 (2017)
- [13] 徐成海, 真空低温技术与设备 [M], 北京: 冶金工业出版社 (2007)
- [14] 阎守胜, 低温物理实验的原理与方法 [M], 北京: 科学出版社 (1985)
- [15] V. Barabash, *ITER-D-222TU5*, (2005)
- [16] F. Simon, *ITER-D_UDSB9Q*, (2017)
- [17] C. Jong, A. Alekseev, N. Mitchell, *ITER-D-2FMHHS*, (2012)