

高温超导磁约束等离子体推进器杜瓦系统的 应力和应变分析

薛圣泉, 许春雷, 叶斌, 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: 高温超导磁约束等离子体推进器利用磁场的作用, 将高温等离子体的能量转化为推进器的推力, 对于杜瓦系统的结构有着较高的要求。文中主要介绍了杜瓦系统的基本结构, 并利用 ANSYS 软件分析了杜瓦系统的应力和应变, 说明了高温超导磁约束等离子体推进器杜瓦系统的设计满足应力及应变要求。

关键词: 高温超导; 杜瓦系统; 磁约束等离子体推进器; 应力和应变分析

The stress and strain analysis of the cryostat of magnetically confined plasma thruster using high temperature superconducting magnets

Xue Shengquan, Xu Chunlei, Ye Bin, Wang Liangbin

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

Abstract: The magnetically confined plasma thruster using high temperature superconducting (HTS) magnets turns the high temperature plasma's energy into thrust force by magnetic field. It has higher requirements for the structure of the cryostat. In this paper, we mainly introduced the basic structure of the cryostat and analyzed stress and strain of cryostat with ANSYS software. Results show that the design of the cryostat can meet the requirement of stress and strain.

Keywords: High temperature superconducting, Cryostat, Magnetically confined plasma thruster, Stress and strain analyses

1 引言

在 20 世纪 80 年代初, 可变比冲磁等离子体火箭 (VASIMR) 的概念被美国麻省理工学院提出后, 由于这种先进高功率电推进方式, 具有高比冲、比冲可变等特点, 可以缩短飞行时间、更好地完成深空探测和载人火星探测等任务要求, 美国又相继进行了一系列的研究和试验。VASIMR 在性能和机构上有了很大的改进。由于超导线圈不存在电流发热问题, 产生的磁感应强度要比铜线圈、永磁体更高, 重量更轻的特点而被用来作为磁约束的磁场源^[1]。高温超导磁约束等离子体推进器和等离子体火箭有相同的原理, 是利用一定的装置, 使推进的气体被电离、产生等离子体, 进而利用中间的磁单元放大和磁喷嘴的作用, 将等离子体形成流体按一定方向喷射出去作为推动火箭的动力。这种全新的火箭技术能适时调整等离子

体流, 从而保持最佳的推进效率。这种技术用于宇航工程可以极大地提高航行的速度, 与化学火箭相比, 从地球飞到火星的时间大大减少^[2]。

上个世纪 80 年代初之前, 超导磁体大多是浸泡在液氦中才能有效地工作, 之后, 传统的液氦浸泡式冷却改用制冷机直接冷却超导磁体的想法和概念设计由 M. O. Hoening 提出^[3], 传导冷却超导磁体试验和研制还只是停留在实验室里。实用化传导冷却磁体系统在上世纪 90 年代被成功研制出来^[4]。我们在最初的地面试验阶段也是采用了 NbTi 低温超导导线绕制的四个浸泡冷却磁体来提供磁场, 虽然能实现闭路循环运行, 但是低温容器的漏热引起的液氦蒸发消耗带来了危险和运行成本高等问题, 所以我们将低温超导磁体换成了 Bi2223/Ag 带材绕制的高温超导磁体, 并采用传导冷却方式, 结构紧凑、高效、安全、方便, 有利于实现超导器件与低温装置一体化^[5]。针对磁约

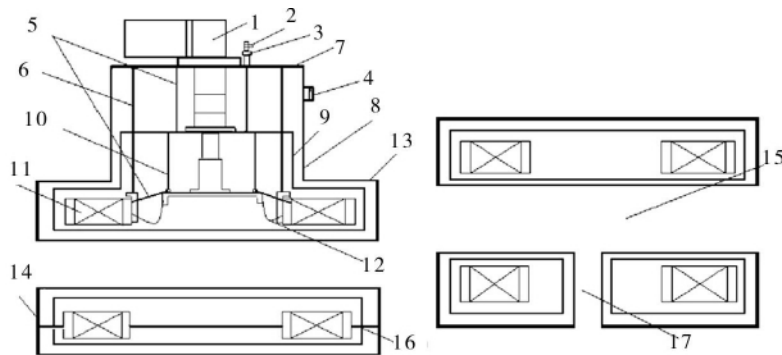
收稿日期: 2011-07-14

作者简介: 薛圣泉 (1986 -) 男, 硕士生, 主要研究方向为低温与超导电工技术。

束等离子体推进器的系统要求,我们设计了传导冷却用的杜瓦容器(磁约束等离子体推进器的一部分)杜瓦中的铜冷屏用 GM 制冷机的一级冷头来冷却,处于 77K 温度下,两个高温超导磁体 (Bi2223/Ag) 用 GM 制冷机的二级冷头来冷却,处于 20K 低温下,每个磁体通以 100A 的电流,来达到磁约束要求的中心场 0.5T。本文主要运用 ANSYS 软件对杜瓦、铜冷屏和环氧杆的机械应力与应变进行了分析。

2 杜瓦的基本结构

已经设计好的高温超导磁约束等离子体推进器的杜瓦系统包括: 不锈钢筒体,室温孔,等离子体天线孔,铜冷屏,环氧支撑杆,三元复合电流引线,多层绝热材料等。设计结构图如图 1,放置杜瓦容器时使竖筒为竖直状态,卧筒为水平状态。



1. 制冷机; 2. 电流引线接头; 3. 真空插座; 4. 真空抽口; 5. 铜电流引线; 6. 环氧吊杆; 7. 杜瓦上盖板; 8. 杜瓦竖筒; 9. 铜冷屏; 10. 高温超导电流引线; 11. 高温超导磁体; 12. 导冷辫; 13. 杜瓦横卧筒; 14. 杜瓦侧盖板; 15. 室温孔; 16. 环氧支撑杆; 17. 天线孔

图 1 杜瓦系统结构图

Fig. 1 The drawing of cryostat structure

用 Bi2223 银合金带材制造的高温超导电流引线具有热导率低、较长使用寿命、安装的简便以及引线两端和其他金属材料的低接触电阻的优势^[6]。所以我们选用银合金基 Bi2223 带材制做高温超导电流引线,即:铜 - Bi2223 高温超导带材 - 铜三元复合电流引线。高温超导磁体用 Bi2223/Ag 带材绕制并环氧树脂真空浸渍的双饼而制成,共两个磁体,每个磁体都有 10 个双饼,在双饼之间垫紫铜片,增强导热效果,在双饼与铜片之间垫上一层环氧片来绝缘。每个磁体的盖板上都有四组无氧铜导冷辫与二级冷头软连接,增强了导冷效果。两个磁体用两根环氧杆吊装在杜瓦上盖板和六根环氧杆支撑在杜瓦侧盖板上。两个磁体、一级冷头、二级冷头、铜冷屏以及电流引线都用绝热材料包裹。制冷机和杜瓦上盖板用螺栓连接,连接处再使用橡皮垫片,一级冷头和铜冷屏上盖板用螺栓连接。

高温超导磁约束等离子体推进器的杜瓦系统各个部分尺寸是根据杜瓦设计的要求而定的,具体设计尺寸如表 1:

表 1 杜瓦系统的尺寸参数

Tab. 1 The dimension parameters of cryostat

参数	杜瓦 /mm	铜冷屏 /mm	环氧吊杆 /mm	环氧支撑 杆/mm
竖筒外直径	438	332		
横卧筒外直径	522	434		
筒体厚度	4	1		
天线孔外直径	108	150		
室温孔外直径	127	197		
天线孔厚度	2	1		
室温孔厚度	2	1		
上盖板厚度	14	3		
侧盖板厚度	14	1		
杆直径			8	8
杆长度			350	80

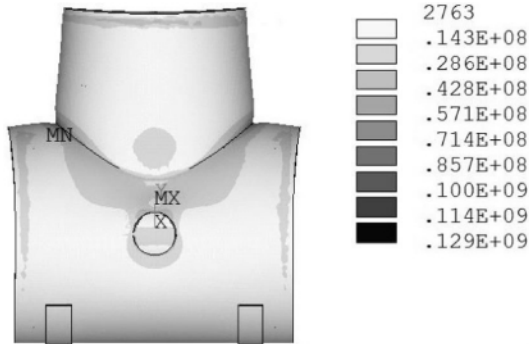
3 杜瓦系统的应力与应变分析

杜瓦受力除了大气压强、杜瓦本身和制冷机的重力外,还有内部磁体、环氧杆、铜冷屏等的重力(通过环氧杆传递到杜瓦盖板上)。根据杜瓦的材料(不锈钢 304)属性^[7]、环氧杆的材料属性^[8]和紫铜的材料属性^[9],以及杜瓦、环氧杆和紫铜的基本尺寸参数,环氧杆采用 SOLID45 单元类型,杜瓦和铜冷屏采用 SOLID92 单元类型,用 ANSYS 软件对杜瓦系统三维模型进行应力与应变模拟分析。分析结果如图 2、3 所示。

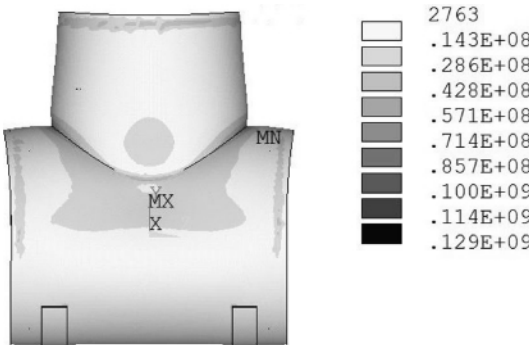
3.1 杜瓦的应力与应变分析

由于杜瓦形状的特殊性,我们分别从不同角度来截取了分析图片,这样方便我们更全面的观察应力和应变的分布。

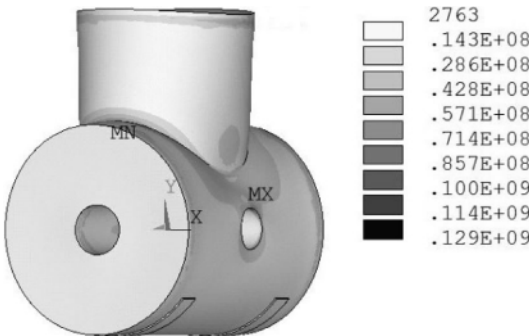
由图 2 中的 (a)、(b)、(d)、(f)、(g)、(i) 可



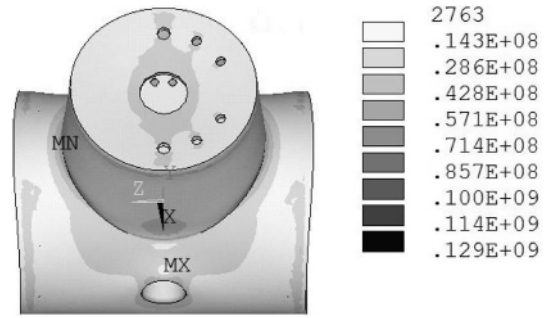
(a) 应力正视



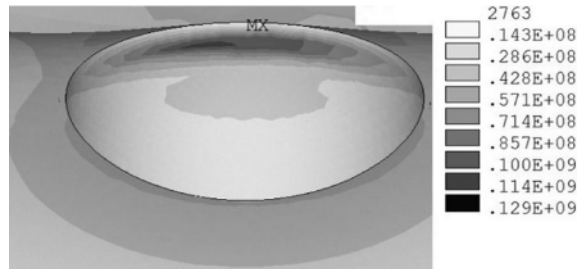
(b) 应力后视



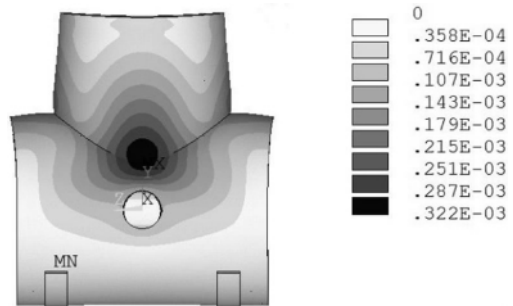
(c) 应力斜侧视



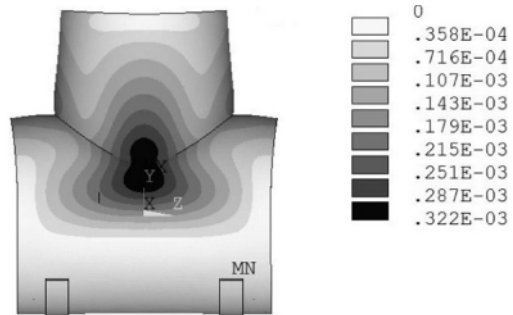
(d) 应力斜俯视



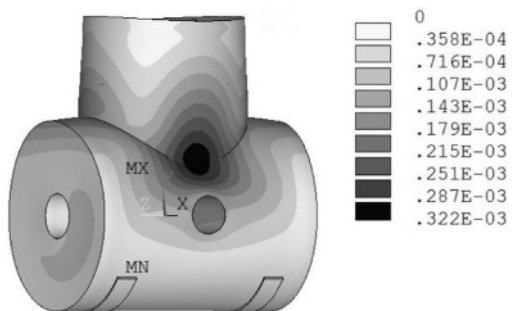
(e) 应力最大值处



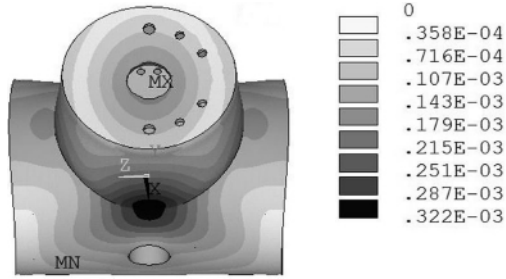
(f) 应变正视



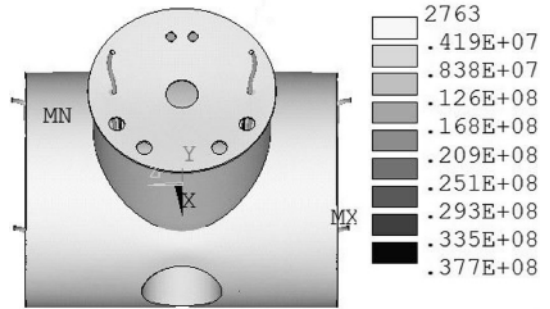
(g) 应变后视



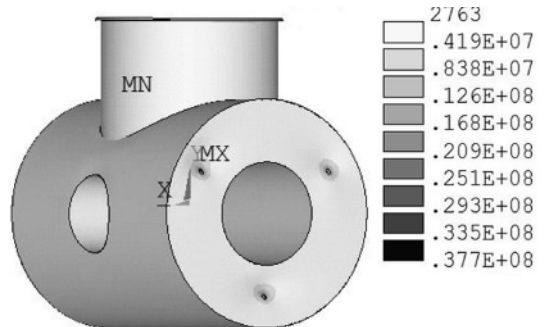
(h) 应变斜侧视



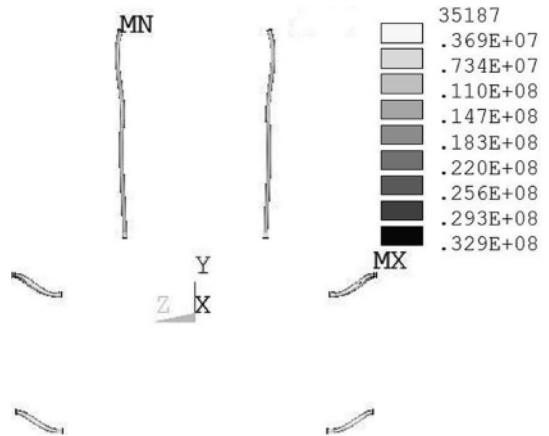
(i) 应变斜俯视



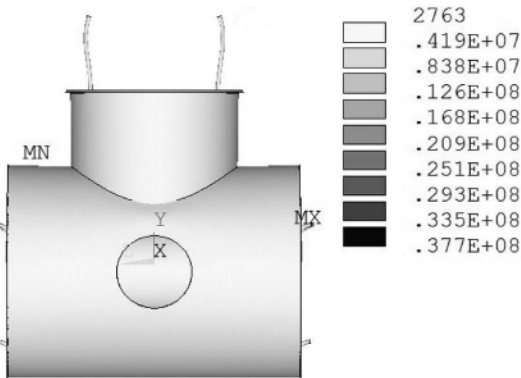
(c) 整体应力分布斜俯视



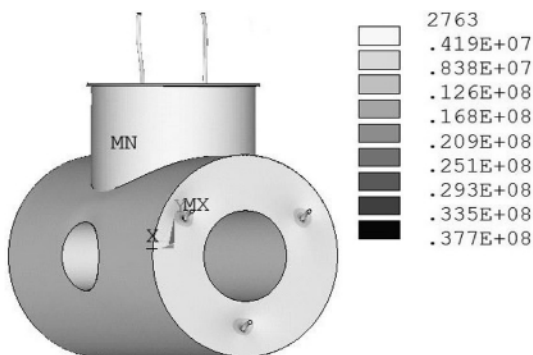
(d) 铜冷屏应力分布



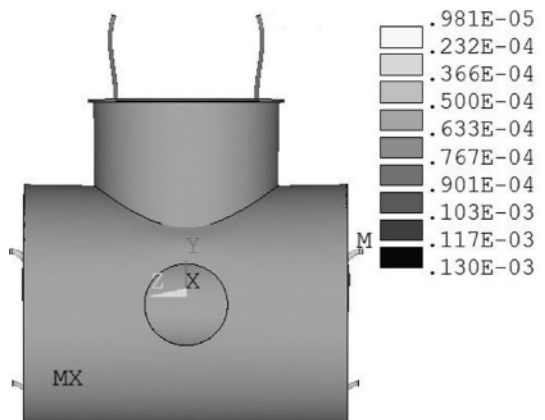
(e) 环氧杆应力分布



(a) 整体应力分布正视



(b) 整体应力分布侧视



(f) 整体应变分布正视

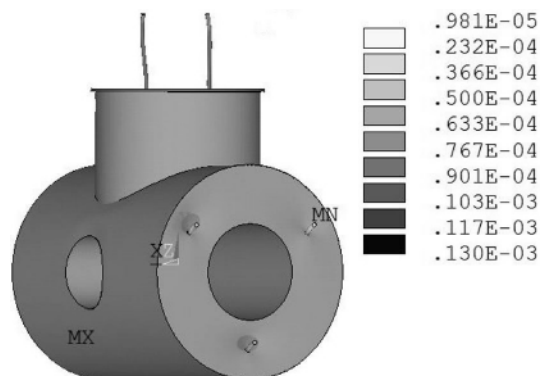
图 2 杜瓦的应力和应变分析结果

Fig.2 The stress and strain analysis of cryostat

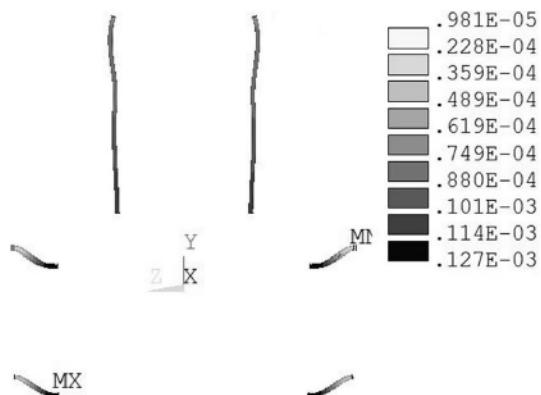
以看出应力和应变分布左右基本对称,前后因为天线孔的原因不是很对称。从图 2(c)、(h)中可以看到,侧盖板应力和应变都不大。由图(e)最大应力值出现在天线孔顶部,靠近天线孔和横卧筒交界处,最大值为 129MPa,低于不锈钢 304 的 140MPa 许用应力^[7]。由图 2(f)、(g)、(h)最大应变发生在竖筒和横卧筒交界的最低点附近,大小为 0.322mm,应变量较小。分析证明杜瓦的机械应力和应变满足设计要求。

3.2 铜冷屏和环氧杆的应力及应变分析

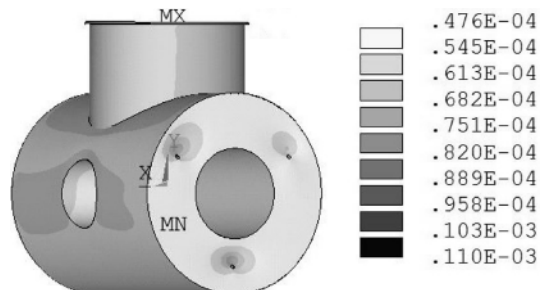
与分析杜瓦应力和应变一样,分别从不同角度截取分析图片,分析结果如图 3 所示。



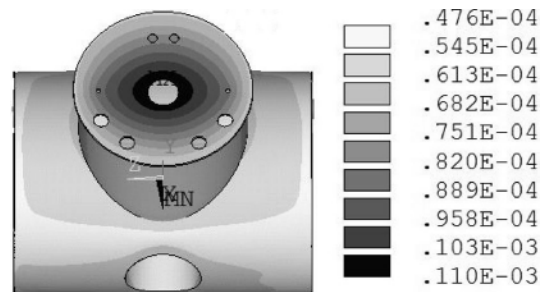
(g) 整体应变分布侧视



(h) 环氧杆应变分布



(i) 铜冷屏应变分布侧视



(j) 铜冷屏应变分布斜俯视

图3 铜冷屏和环氧杆应力和应变分析结果

Fig.3 The stress and strain analysis of copper cold shield and epoxy pole

从图3(a)、(b)、(c)、(d)和(e)中可以看出最大应力值37.7MPa出现在铜冷屏侧盖板

(与环氧支撑杆接触部位),而且环氧支撑杆的最大应力值也只有32.9MPa,满足材料应力的要求。由图3(f)、(g)、(h)、(i)和(j)可以看到环氧杆的最大应变为0.127mm,铜冷屏的最大应变也只有0.11mm,发生在冷屏上盖板(中心圆孔周围),符合材料的应变要求。

在完成理论设计和分析之后,经过机械加工,组装和焊接,现在高温超导磁约束等离子体推进器杜瓦系统已经研制成功。为了检验我们的理论分析的可靠性,进行了杜瓦系统抽真空实验,结果表明杜瓦系统满足机械应力和应变的要求。

4 结论

通过ANSYS模拟分析可得出以下几个结论:
 (1) 高温超导磁约束等离子体推进器杜瓦系统的结构设计在理论上满足应力和应变的要求。
 (2) 最近的抽真空实验已经证明杜瓦工作正常,支持了我们的理论设计。
 (3) 高温超导磁约束等离子体推进器杜瓦系统的研制成功,为进一步发展磁约束等离子体推进器起到积极的作用。

参考文献

- [1] 任学军,刘宇,王一白. 可变比冲磁等离子体火箭原理与研究进展[J]. 火箭推进,2007,33(3):36-42.
- [2] Franklin R,Chang Diaz An overview of the VASIMR engine: high power space propulsion with RF plasma generation and heating[C]. American Institute of Physics,2001.
- [3] Hoening M O,IEEE Trans. Magn.,1983,19(3):880.
- [4] Watanabe Hiroshiqe,Kitajima Sumio,Takayama Masakazu et al. Japanese Journal of Applied Physics,1993,32(4A):L488.
- [5] 雷元忠,王秋良. 传导冷却超导磁体系统的技术发展与应用[J]. 低温与超导,2003,31(1):47-60.
- [6] 张宏杰,宗军,励庆孚. Bi-2223带材制备的高温超导电流引线[J]. 低温与超导,2006,34(1):23-26.
- [7] 徐烈,方荣生,马庆芳. 低温容器:设计、制造与使用[M]. 北京:机械工业出版社,1984.
- [8] Kasen M B,McDonald G R,Beekman D H et al. 1980 Mechanical electrical and thermal characterization of G10Cr and G11Cr glass cloth/epoxy laminates between RT and 4 K Adv. Cryog. Eng. 26-235.
- [9] 沈福宁,张东捷,李仲达. 新编金属材料手册[M]. 北京:科学出版社,2003.