

钛合金内衬薄壁腔体结构与性能研究

焦纪强^{1,2} 蒙峻^{2*} 谢文君² 郭方准¹

1.大连交通大学机械工程学院,大连,116028

2.中国科学院近代物理研究所,兰州,730000

摘要: 二极磁铁真空管道是强流重离子加速器装置增强器的关键设备,为了降低涡流效应、减小磁铁气隙及降低真空管道加工难度,采用厚度为0.3 mm的不锈钢包裹3D打印钛合金内衬骨架制作薄壁腔体。通过仿真模拟对内衬骨架进行结构优化设计,制作薄壁腔体进行变形量测试和高温烘烤强度测试。完成了3D打印钛合金出气性能评价、薄壁腔体镀Ti-Zr-V薄膜前后极限真空测试和涡流发热对真空性能影响的研究。研究表明,内衬骨架厚度为4 mm、宽度为11 mm、间距为15 mm时,不锈钢和钛合金应力小于强度极限;拱形高度为0.5 mm的内衬骨架实测变形量为0.78 mm,经过35次250 °C高温烘烤后结构稳定;TC4钛合金材料的出气性能和薄壁腔体的极限真空性能满足设计指标要求。

关键词: 强流重离子加速器装置;钛合金内衬薄壁腔体;3D打印;结构优化;真空特性

中图分类号: TH114;TL56

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.02.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Structure Design and Performance Study of Titanium Alloy-lined Thin-wall Chambers

JIAO Jiqiang^{1,2} MENG Jun^{2*} XIE Wenjun² Guo Fangzhun¹

1.College of Mechanical Engineering,Dalian Jiaotong University,Dalian,Liaoning,116028

2.Institute of Modern Physics,Chinese Academy of Science,Lanzhou,730000

Abstract: The dipole magnet vacuum pipeline was critical equipment for the booster ring of HIAF. In order to attenuate the eddy current effect, reduce the gap of magnet, and decrease the difficulty of vacuum pipeline machining, the 3D-printed titanium alloy-lined ring wrapped in stainless steel with a thickness of 0.3 mm was created for fabricating a thin-wall chamber. The structural optimization of the titanium alloy-lined ring was carried out through simulation, and thin-wall chambers were fabricated for deformation testing and high-temperature baking testing. Evaluation of the outgassing performance of 3D-printed titanium alloy was completed. Ultimate vacuum tests were conducted before and after coating thin-wall chamber with Ti-Zr-V films, and a study of the effect of eddy current on vacuum performance was carried out. The results show that the stresses of stainless steel and titanium alloy are below the strength limit when the thickness of the titanium alloy-lined ring is as 4 mm, the width is as 11 mm and the spacing is as 15 mm. The deformation of the ring, with an arch height of 0.5 mm, is measured to be 0.78 mm, and the structure remained stable after 35 rounds of high-temperature baking at 250 °C. The outgassing performance of TC4 titanium alloy and the ultimate vacuum performance of the thin-wall chamber meet the design criteria.

Key words: high intensity heavy-ion accelerator facility(HIAF); titanium alloy-lined thin-wall chamber; 3D-printing; structure optimization; vacuum performance

0 引言

强流重离子加速器装置项目(high intensity heavy-ion accelerator facility, HIAF)是国家“十二五”重大科学工程之一,装置建成后,将提供高

流强、高功率、高能量的束流用于原子核结构、核聚变机制和原子物理学等方面的研究^[1-4]。增强环(booster ring, BRing)是HIAF的主加速器设备,周长为569.1 m,共分布48台快脉冲二极磁铁。快速变化的磁场使真空管道产生涡流发热,缩短了束流寿命^[5]。真空管道采用陶瓷结构或厚度为0.3 mm的不锈钢结构是减少涡流发热的重要方法^[6-7]。

收稿日期:2024-04-01

基金项目:“十二五”国家重大科技基础设施“强流重离子加速器装置”项目(117200HIAF);国家重点研发计划(Y91O310201)

中国散裂中子源同步加速器采用氧化铝陶瓷真空管道^[8-9],德国重离子研究中心 SIS100 采用厚度为 0.3 mm 的不锈钢薄壁加筋真空管道^[10],通过运行测试,两种结构均可有效降低涡流效应。但是,磁铁的交变电流使陶瓷真空管道产生振动,易断裂破坏;薄壁加筋真空管道占用磁铁气隙大、加工难度大、制造成本高。为了降低涡流效应、减小磁铁气隙及降低真空管道加工难度,本文首次提出采用厚度为 0.3 mm 的不锈钢包裹内衬骨架制作薄壁腔体,内衬骨架采用 3D 打印方法中的选择性激光熔化技术加工,材料选用比强度较高的 TC4 钛合金。本文开展钛合金内衬薄壁腔体内衬骨架结构优化设计,制作原理性样机进行试验验证,对 3D 打印的 TC4 钛合金样机进行真空性能研究。

1 薄壁腔体方案设计

钛合金内衬薄壁腔体由 316L 不锈钢薄壁管、TC4 钛合金内衬骨架和超高真空法兰组成,结构如图 1 所示。薄壁管由上薄壁管和下薄壁管两部分组成,上下薄壁管内部包裹等长度的钛合金内衬骨架,薄壁管和内衬骨架通过紧固模具保证两者贴合,最后完成上下薄壁管的焊接及超高真空法兰的焊接。

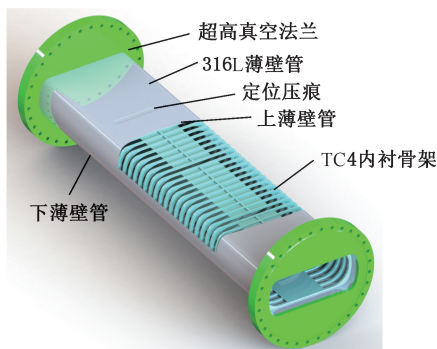


图 1 钛合金内衬薄壁腔体结构示意图

Fig.1 Schematic of titanium alloy-lined thin-wall chamber

薄壁管的厚度为 0.3 mm,上下面等间距分布深度为 0.7 mm 的定位压痕,以防止内衬骨架沿着纵向移动。内衬骨架截面形状为跑道型,11 根筋均匀排列,通过上下侧的拉杆固定 11 根筋,形成稳定的内衬骨架,考虑到涡流损耗发热效应,侧面位置无固定拉杆。内衬骨架上下面设置薄板结构,筋的内表面与薄板内表面平齐。考虑制造成本和加工周期,内衬骨架采用 3D 打印方法中的选择性激光熔化技术加工,所用原材料为 TC4 粉末,粒径为 20~63 μm ,其加工工艺参数见表 1,TC4 钛合金和 316L 不锈钢特性参数见表 2。

表 1 TC4 钛合金内衬骨架加工工艺参数

Tab.1 The parameters for SLM forming of TC4

扫描策略	Z 型条纹扫描
激光功率/W	300
扫描速度/($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	1100
扫描间距/mm	0.12
铺粉厚度/mm	0.06

表 2 TC4 和 316L 材料在常温工况下的特性

Tab.2 The main parameters of TC4 and 316L

参数	TC4	316L
抗拉强度/MPa	943	642
屈服强度/MPa	860	278
断后伸长率/%	18	58
断面收缩率/%	54	75
弹性模量/GPa	105	200
泊松比	0.33	0.31

2 内衬骨架结构仿真分析

2.1 内衬骨架参数分析

针对钛合金内衬薄壁腔体,通过 ANSYS Workbench 软件静态结构分析模块开展内衬骨架结构仿真。根据孔径要求,内衬骨架截面尺寸为 208 mm \times 87.4 mm,考虑 3D 打印工艺要求,内衬骨架长度为 205 mm,结构如图 2 所示。仿真过程中,为了提高计算效率,选择一个钛合金环单元。对钛合金环两端施加无摩擦约束,不锈钢薄壁管外表面施加 0.1 MPa 的压力,钛合金环和不锈钢之间的接触形式为摩擦接触。结构优化过程主要考虑厚度 t 、宽度 a 和间距 d 变化时对不锈钢应力、钛合金应力和变形的影响。

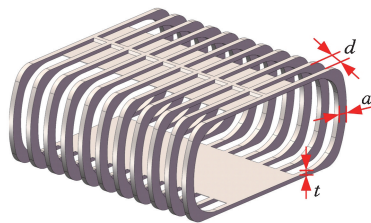


图 2 内衬骨架结构示意图

Fig.2 Schematic of titanium alloy-lined ring

初步设定内衬骨架的间距 d 为 15 mm,对不同厚度、不同宽度下薄壁腔体的应力和变形进行仿真计算,结果如图 3 所示。可以看出:①间距一定时,不锈钢和钛合金的应力随着厚度、宽度的增大呈减小趋势;当厚度增加至 4 mm 后,宽度继续增大时不锈钢和钛合金的应力基本保持不变。厚度为 4 mm、宽度为 11 mm 时,不锈钢和钛合金的最大等效应力分别为 114 MPa 和 192 MPa,满足强度要求。②薄壁腔体的变形随着厚度的增大逐渐减小;同一厚度下,宽度越大,薄壁腔体的变形越小。当厚度为 4 mm、宽度分别为 8 mm 和

11 mm 时,变形为 1.7 mm 和 1.36 mm,由此可以看出,内衬骨架宽度的增加会减小薄壁腔体的变形。

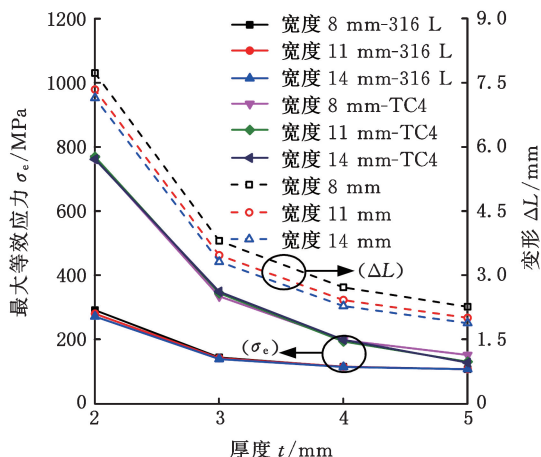


图 3 不同厚度、宽度下薄壁腔体的应力和变形

Fig.3 Stress and deformation of chamber under different thicknesses and widths

为了保证不锈钢和钛合金应力在强度极限范围以及薄壁腔体变形要求,考虑磁铁气隙、内衬骨架打印难度、烘烤套安装空间及薄壁腔体轻量化,选择厚度为 4 mm、宽度为 11 mm 的内衬骨架结构。针对该结构,通过优化间距来分析应力和变形,结果如图 4 所示。由图 4 可知,同一厚度下,随着间距的增加,不锈钢和钛合金应力、薄壁腔体的变形快速增加。当厚度为 4 mm、间距由 15 mm 增加至 20 mm 时,不锈钢的应力增加了 71 MPa,变形增大了 0.3 mm,考虑到不锈钢薄壁管应力安全余量和变形量,优选内衬骨架的间距为 15 mm。

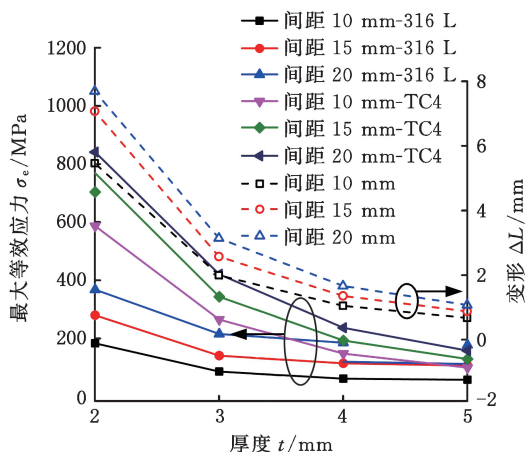


图 4 不同厚度、间距下薄壁腔体的应力和变形

Fig.4 Stress and deformation of chamber under different thicknesses and spacing

为了进一步减小钛合金内衬薄壁腔体的变形,提高内衬骨架的强度和结构稳定性,图 5 给出了内衬骨架上下增加薄板和细丝结构。通过仿真厚度为 0.5 mm 和 1 mm 的薄板结构以及

1 mm×0.5 mm 和 2 mm×1 mm 的细丝结构,得到薄壁腔体变形结果,如图 6 所示,可以看出,与细丝结构相比,薄板结构可有效减小薄壁腔体的变形量。但是对比厚度为 0.5 mm 和 1 mm 薄板结构的变形量,结果基本一致,从内衬骨架轻量化和 3D 打印难易程度考虑,采用厚度为 0.5 mm 的薄板结构能够有效降低薄壁腔体变形,同时薄板结构能够降低束流阻抗^[11]。

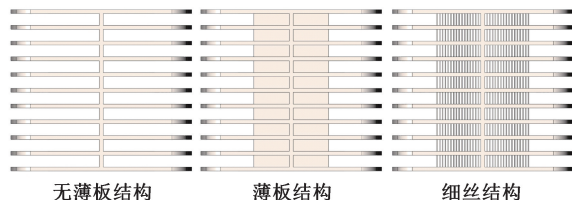


图 5 内衬骨架薄板和细丝结构示意图

Fig.5 Schematic of titanium alloy-lined plates and strips

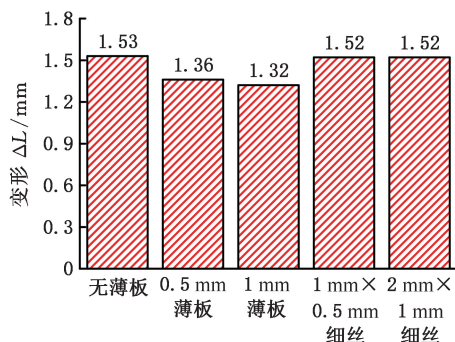


图 6 内衬骨架薄板结构变形结果

Fig.6 Deformation of titanium alloy-lined thin-wall chamber

结合上述内衬骨架结构参数优化结果,钛合金内衬薄壁腔体选用厚度为 4 mm、宽度为 11 mm 和间距为 15 mm 带有薄板结构的内衬骨架,仿真计算抽真空状态下的单边变形量为 1.36 mm。根据束流孔径要求,单边变形量小于或等于 1 mm 时可满足要求,因此,内衬骨架结构确定为拱形结构,拱形高度为 0.5 mm,内衬骨架的高度由 87.4 mm 变为 88.4 mm,抽真空后实际变形量为 0.86 mm,满足束流孔径要求。

2.2 热-结构耦合分析

钛合金内衬薄壁腔体需要承受 250 °C 在线高温烘烤以获得目标真空度,烘烤过程中保证不锈钢薄壁管的安全可靠是较为关键的问题。通过热-结构仿真计算得到薄壁腔体在 250 °C 和抽真空共同作用下的变形和不锈钢应力,如图 7 所示。由图 7 可知,薄壁腔体单边最大变形为 1.65 mm,比常温工况变形增加了约 0.29 mm;不锈钢应力为 135 MPa,远低于不锈钢 316L 的屈服强度极限,满足强度要求。

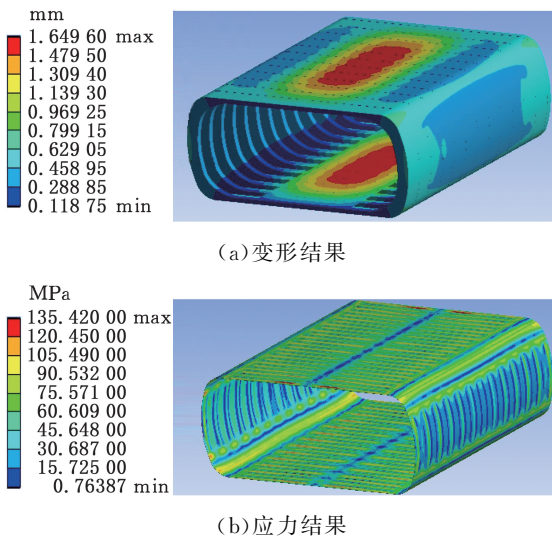


图 7 热-结构耦合作用下薄壁腔体变形和应力结果
Fig.7 Deformation and stress results of the chamber under thermal-structural coupled

2.3 薄壁腔体变形测试

为了评估 3D 打印钛合金环抽真空状态下的结构稳定性和变形情况,在满足薄壁腔体安全可靠性的前提下,制作了内衬骨架宽度为 8 mm 的无薄板结构和薄板结构及宽度为 11 mm 的薄板结构,如图 8 所示。通过三坐标仪对抽真空后薄壁腔体的变形进行了测量,测试结果表明,宽度为 8 mm 时,无薄板和 0.5 mm 薄板结构的变形量分别为 1.82 mm 和 1.65 mm,宽度为 11 mm 薄板结构的变形量为 1.28 mm,与仿真结果基本一致。与此同时,为了进一步评估钛合金内衬薄壁腔体在高温烘烤时的安全可靠,按照升温、250 °C 保温 48 h 和降温重复性过程,经过 35 次抽真空和破空循环测试,薄壁管和钛合金环均无屈服,结构稳定可靠,满足使用要求。

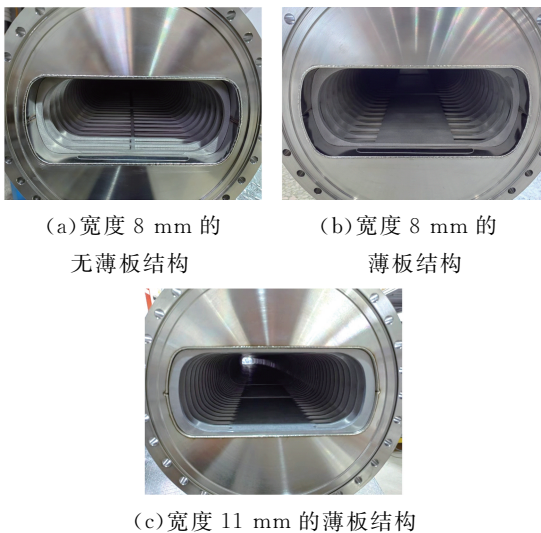


图 8 不同薄板结构的薄壁腔体

Fig.8 Thin-wall chamber with different plate structures

3 真空性能试验结果分析

3.1 TC4 出气性能试验

为了探究 3D 打印的 TC4 材料在真空条件下的出气特性,基于新型双通道出气率装置^[12]完成了出气性能试验。测试前对样品进行超声波清洗和 500 °C 高温除气。试验过程中对出气率装置进行 250 °C 高温烘烤及 36 h 保温。温度降至常温 48 h 后对样品进行升温,温度依次从 50 °C 升高至 210 °C,出气率试验和拟合结果如图 9 所示,回归系数 R^2 为 0.999 86,自变量和因变量之间的相关性较好,拟合结果与试验结果较吻合。由图 9 可以看出,随着温度的升高,TC4 出气率呈指数增加趋势。当温度分别为 50、110、210 °C 时,TC4 的出气率分别为 4.47×10^{-11} 、 8.06×10^{-11} 、 1.18×10^{-9} Pa·L/(s·cm²),证明采用 3D 打印工艺的 TC4 材料可满足出气性能要求。

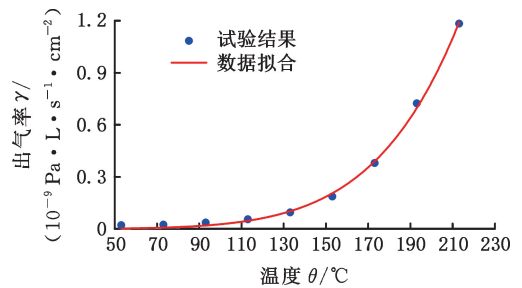


图 9 不同温度下 TC4 出气率试验结果

Fig.9 Test results of TC4 outgassing rate with temperature variation

为了评价 TC4 材料在不同温度下出气率试验结果的重复性和离散程度,完成了 3 组重复性测试,每次测试前对样品进行超声波清洗、高温除气及高温烘烤。当温度分别为 50、110、210 °C 时,TC4 出气率标准差分别为 1.9×10^{-12} 、 1.53×10^{-12} 和 7.19×10^{-11} Pa·L/(s·cm²),表明出气率测试结果具有较高的稳定性。

3.2 高温烘烤极限真空测试

薄壁腔体内部极限真空的分布对束流品质有重要影响,图 10 为极限真空度测试结构示意图。超高真空获得设备由抽速为 400 L/s 的分子泵机组、抽速为 360 L/s 的离子泵和抽速为 3000 L/s 的钛升华泵组成。采用 IE514 测量真空度,在两端测试罩分别设置 1 个测量点(A 和 E),薄壁腔体外弧均布设置 3 个测量点(B、C、D),用质谱计 QMG 220 测量气体成分的变化。为了提高钛合金内衬薄壁腔体真空度、降低内部压力梯度,采用弯弧磁控溅射镀膜装置^[13]对薄壁腔体镀 Ti-Zr-V 薄膜。该薄膜是一种非蒸散型吸气剂薄膜,高温

激活后对活性气体氢气具有较高的抽气能力。薄膜厚度为 $2.3 \mu\text{m}$, 抽速为 $0.4 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。

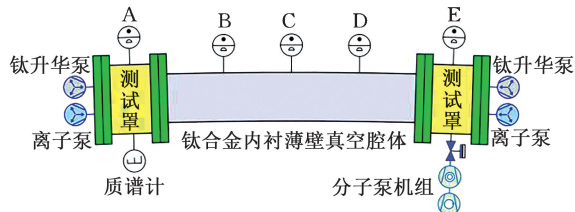


图 10 极限真空度测试结构示意图

Fig.10 Diagram of ultra-vacuum test system

对比不同烘烤温度下未镀膜的极限真空度和镀膜后极限真空度的变化, 结果如图 11 所示。可以看出, 随着烘烤温度的升高, 中间三个位置的真空度逐渐减小, 但是当烘烤温度从 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 升高至 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 同一测量位置的极限压力基本一致。

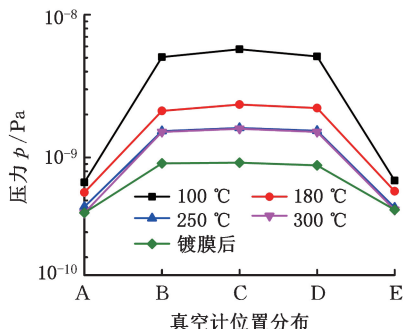


图 11 极限真空测试结果

Fig.11 Ultimate vacuum results of the thin-wall chamber

由此可以看出, 为了达到目标真空度, 实际烘烤过程的温度需为 $250 \text{ }^\circ\text{C}$; 通过对比镀膜前后极限真空度的变化, 镀膜后中间三个位置的真空度较镀膜之前有明显提高。镀膜前 C 点的真空度为 $1.41 \times 10^{-9} \text{ Pa}$, 镀膜后 C 点的真空度约为 $8.8 \times 10^{-10} \text{ Pa}$, 钛合金内衬薄壁腔体镀膜后有效改善了腔体内部的压力梯度。这主要是因为镀膜前薄壁腔体内部基底出气量较大, 由于薄壁腔体流动的限制, 仅通过两端的离子泵和钛升华泵无法将薄壁腔体内部的气体全部抽出。当薄壁腔体镀膜且高温激活后, 吸气剂薄膜主要与活性气体氢气发生化学反应并吸附到薄膜表面, 将薄壁腔体内部的放气源变成抽气表面, 氢气的浓度进一步降低, 真空度得到了提升。

3.3 涡流发热对真空性能的影响测试

快脉冲二极磁铁磁场变化导致钛合金内衬薄壁腔体中产生涡流损耗, 该效应会引起薄壁腔体温度升高到 $96 \text{ }^\circ\text{C}$, 采取通风冷却措施可使薄壁腔体的温度维持在约 $56 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[14]。薄壁腔体温度升高会导致真空度恶化^[15], 为研究涡流发热效应对薄壁腔体真空性能的影响, 图 12 给出了温度为 25、

$56、96 \text{ }^\circ\text{C}$ 时薄壁腔体镀膜前后真空度的变化。结果表明, 温度升高时, 薄壁腔体压力逐渐增大, 当温度为 $56 \text{ }^\circ\text{C}$ 时 C 点的压力为 $2.35 \times 10^{-9} \text{ Pa}$, 温度为 $96 \text{ }^\circ\text{C}$ 时压力升至 $5.16 \times 10^{-9} \text{ Pa}$, 压力变化较为明显。因此, 在实际运行过程中, 需要采取冷却措施对钛合金内衬薄壁腔体进行冷却, 以减小压力, 笔者所在课题组目前正在采取液氮冷却形式对薄壁腔体进行降温研究。

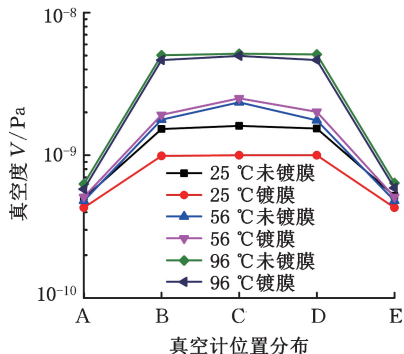


图 12 不同温度下薄壁腔体压力分布

Fig.12 Pressure distribution of thin-wall chamber at different temperatures

4 结论

1) 内衬骨架厚度为 4 mm 、宽度为 11 mm 、间距为 15 mm 及拱形高度为 0.5 mm 时, 不锈钢和钛合金的最大等效应力分别为 114 MPa 和 192 MPa , 满足强度要求。

2) 钛合金内衬薄壁腔体拱形 0.5 mm 的实际变形量为 0.78 mm , 该薄壁腔体经过 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 及 48 h 高温烘烤 35 次后, 薄壁腔体无变型破坏, 结构稳定。

3) 温度为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, TC4 的出气率为 $4.47 \times 10^{-11} \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$; 常温工况下, 薄壁腔体镀 Ti-Zr-V 薄膜后中间位置的极限真空度从 $1.41 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ 提高至 $8.8 \times 10^{-10} \text{ Pa}$, 钛合金内衬薄壁腔体真空性能优于设计指标, 可为同类薄壁腔体的应用提供经验。

参考文献:

[1] YANG Jiancheng, XIA Jiawen, XIAO Guoqing, et al. High Intensity Heavy Ion Accelerator Facility (HIAF) in China [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2013, 317:263-265.

[2] 唐靖宇, 周路平. 中国粒子加速器的发展现状和趋势[J]. 原子能科学技术, 2022, 56(9):1735-1746. TANG Jingyu, ZHOU Luping. Development Status

- and Trend of Particle Accelerator in China [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(9):1735-1746.
- [3] 肖国青, 徐珊珊, 王思成. HIAF及CiADS项目进展与展望[J]. 原子核物理评论, 2017, 34(3):275-283.
- XIAO Guoqing, XU Hushan, WANG Sicheng. HIAF and CiADS National Research Facilities: Progress and Prospect [J]. Nuclear Physics Review, 2017, 34(3):275-283.
- [4] LUO Cheng, MENG Jun, YANG Jiancheng, et al. Study on the Performance of Titanium Alloy-lined Thin-walled Vacuum Chamber[J]. Vacuum, 2024, 221:112808.
- [5] LI Peng, YUAN Youjin, YANG Jiancheng, et al. Beam Loss Distribution Calculation and Collimation Efficiency Simulation of a Cooler Storage Ring in a Heavy Ion Research Facility [J]. Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams, 2014, 17(8):084201.
- [6] XU Shouyan, WANG Sheng. Study of Eddy Current Power Loss in an RCS Vacuum Chamber [J]. Chinese Physics C, 2012, 36(2):160-166.
- [7] 蒙峻, 杨伟顺, 罗成, 等. 大型重离子加速器真空系统及其挑战 [J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(9):826-834.
- MENG Jun, YANG Weishun, LUO Cheng, et al. The Vacuum System of Large Heavy-ion Accelerator Facility and Its Challenges [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2021, 41(9):826-834.
- [8] 余洁冰, 王广源, 康玲, 等. CSNS/RCS陶瓷真空盒热特性及振动研究 [J]. 原子能科学技术, 2021, 55(6):1147-1152.
- YU Jiebing, WANG Guangyuan, KANG Ling, et al. Thermal and Vibration Characteristics of CSNS/RCS Ceramic Vacuum Chamber [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(6):1147-1152.
- [9] 董海义, 宋洪, 李琦, 等. 中国散裂中子源(CSNS)真空系统研制 [J]. 真空, 2015, 52(4):1-6.
- DONG Haiyi, SONG Hong, LI Qi, et al. Research and Development of Vacuum System for China Spallation Neutron Source [J]. Vacuum, 2015, 52(4):1-6.
- [10] WILFERT S, KRAEMER A, KOLLMUS H, et al. Details of the Cryogenic Vacuum System of SIS100 at FAIR [C] // Abstracts of the 18th International of Vacuum Congress. Beijing, 2010:1450.
- [11] DU Shaohui, LIU Jie, ZHU Guangyu, et al. Measurement and Optimization of the Beam Coupling Impedance of a Novel 3D-printed Titanium Alloy Cage Inside the Thin-wall Vacuum Chamber [J]. Review of Science Instruments, 2023, 94(10):103308.
- [12] 刘建龙, 李长春, 马向利, 等. 一种材料出气率测试装置及方法:CN112683726A [P]. 2021-04-20.
- LIU Jianlong, LI Changchun, MA Xiangli, et al. A Material Outgassing Rate Test Device and Method:CN112683726A [P]. 2021-04-20.
- [13] 李长春, 罗成, 刘建龙, 等. 一种弯弧加速器内壁镀膜装置及其磁控溅射镀膜方法:CN111334770B [P]. 2021-10-22.
- LI Changchun, LUO Cheng, LIU Jianlong, et al. A Coating Device for Arc Accelerator Chamber and Magnetron Sputtering Coating Method: 202010263792 [P]. 2021-10-22.
- [14] CHEN Xiaoqiang, YANG Jiancheng, XIA Jiawen, et al. Study of Eddy Current Effect in BRing at HIAF [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 920:37-42.
- [15] 董自强. 强流重离子加速器动态真空效应模拟与实验研究 [D]. 兰州:中国科学院大学(中国科学院近代物理研究所), 2019.
- DONG Ziqiang. Simulation and Experimental Study on Dynamic Vacuum Effect of High Current Heavy Ion Accelerator [D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2019.

(编辑 陈 勇)

作者简介: 焦纪强, 男, 1990年生, 博士研究生。研究方向为高端真空设备结构设计与优化。蒙峻* (通信作者), 男, 1977年生, 正高级工程师、博士研究生导师。研究方向为大型真空系统研发、极高真空获得技术。E-mail: mengjun@impcas.ac.cn.

本文引用格式:

焦纪强, 蒙峻, 谢文君, 等. 钛合金内衬薄壁腔体结构设计与性能研究 [J]. 中国机械工程, 2025, 36(2):265-270.

JIAO Jiqiang, MENG Jun, XIE Wenjun, et al. Structure Design and Performance Study on Titanium Alloy-lined Thin-wall Chambers [J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(2):265-270.