

空间站高温材料科学实验系统真空室设计与分析*

崔晓杰 孙晋川 康昌玺
段福伟 张富华 马彦坤

(兰州空间技术物理研究所 兰州 730000)

摘要 中国空间站高温材料科学实验系统能够在轨进行多种材料的微重力高温加热实验,其关键组件真空室是可实现密封的压力容器,为实验插件提供机械、真空、氮气、废气排放、供电、控制、冷却等接口,支持实验插件完成相关功能。本文依据承压范围、漏率等设计技术指标进行真空室的结构设计和力学分析。真空室采用分段式结构,由方形真空室、密封门、圆形真空室、安装支架等组件依次连接组成,连接结构处使用密封圈。通过真空室的承压分析、模态分析、随机响应分析和力学试验,校核了真空室的强度、刚度及随机振动响应特性,验证了真空室设计的安全性和可靠性,其能够满足发射及在轨工作要求。

关键词 真空室,微重力,压力容器,力学分析

中图分类号 V524.7

Vacuum Chamber Design and Analysis of the Space Station High Temperature Material Science Experimental System

CUI Xiaojie SUN Jinchuan KANG Changxi
DUAN Fuwei ZHANG Fuhua MA Yankun

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000)

Abstract The Chinese Space Station High Temperature Material Science Experiment System is capable of conducting microgravity high temperature heating experiments of multiple materials types in orbit. The vacuum chamber, one of the key components, is a pressure vessel that can be sealed. It is equipped with interfaces for the experiment inserts such as mechanical, vacuum, nitrogen, exhaust gas emission, power supply, control and cooling. In this paper, the structure design and analysis of the vacu-

* 中国载人航天工程计划材料科学实验系统项目资助

2022-03-19 收到原稿, 2022-10-24 收到修定稿

E-mail: cuixiaojie2000@163.com

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

um chamber is based on the technical indicators such as pressure-bearing range and leakage rate. The vacuum chamber adopts a sectional structure, which consists of a square vacuum chamber assembly, a sealed door assembly, a circular vacuum chamber assembly, a mounting bracket, *etc.* Seals are used at the connection positions. The strength, stiffness and random vibration response of the vacuum chamber structure were checked through pressure analysis, modal analysis, random response analysis and mechanical vibration test. The results verified the safety and reliability of the vacuum chamber design, which can meet the launch and in-orbit operational requirements.

Key words Vacuum chamber, Microgravity, Pressure vessel, Mechanical analysis

0 引言

材料科学主要研究物质结构、属性与加工过程之间的关系。在地面上,这些关系受地球环境的强烈影响。外层空间可为材料科学研究提供特殊的实验环境,包括空间微重力环境、超高真空环境、超洁净环境和辐射环境等。在空间微重力条件下,浮力对流、沉淀、流体静力学压力等因素的影响变得很弱或者消失,同时微重力环境可以消除材料容器对最终数据的污染和影响,使得“无容器”成为可能,为从事材料科学研究提供更有利的环境。通过空间实验研究有望攻克在地面材料制备中无法解决的难题,揭示材料的微观机理和内在本质,发现新的科学现象,丰富和发展材料科学理论,从而指导地面材料制备和生产,改善材料性能,促进地面相关材料产业的发展。因此,空间材料科学已成为一个非常重要的学科领域^[1-4]。

相比传统方法通过落塔、落井、抛物线飞行飞机获得短暂的微重力时间,空间站在轨期间能够提供长期稳定的实验环境,完成地基微重力装置不能实现的诸多实验。国际空间站(International Space Station, ISS)是迄今国际上最大的载人航天工程,代表了载人航天技术发展的最新成就。在ISS的科学研究活动中,美国航空航天局(NASA)的命运号实验舱(Destiny)、欧空局(ESA)的哥伦布实验舱(Columbus)、日本宇宙事业开发机构(JAXA)的希望号实验舱(Kibo)均安装了空间材料科学实验装置,开展了空间材料科学及相关交叉学科的科学实验研究工作。俄罗斯空间局研制的一台名为MEP-01的多区真空炉将在2023年后安装于国际空间站俄罗斯舱段中,用于空间材料科学实验^[5-8]。中国自1987年以来,陆续研制多种空间材料科学实验装置,先后安装在返回式卫星、神舟飞船和天宫二号空间实验室里,利用这

些装置完成了一系列空间微重力材料科学实验。从载人航天工程一期的多工位晶体生长炉到实践十号多功能材料合成炉和天宫二号空间综合材料实验炉,均依据科学需求设计了真空室,其为圆柱形结构,具有体积小、重量轻、内部空间利用率高和分段密封成型的特点。

中国载人空间站计划设计安装高温材料科学实验柜,开展微重力高温材料实验研究。高温材料科学实验柜由柜体和科学实验系统两部分组成。根据科学实验需求和对该实验系统的工程总体设计要求,科学实验系统需要真空室为科学实验提供真空环境和内部机械接口。真空室是科学实验系统进行高温材料实验的密闭空间,属于压力容器,其设计在满足质量和体积要求的前提下,应充分考虑密封性能、力学性能以及人机工效性能。

本文基于中国空间站高温材料实验系统在真空室设计方面提出的基本思路和已开展的具体设计,根据该实验系统的科学需求以及中国在神舟飞船和天宫二号空间实验室上的高温材料实验炉设计研制现状,结合国际空间站相关高温材料实验装置特点分析,通过仿真分析和动力学试验验证了其有效性。研究成果可为未来中国在轨开展长时间空间材料科学实验相关高温实验系统设计提供参考。

1 真空室设计输入与设计思路

所设计的高温材料科学实验系统(HTMS)的基本科学需求是,能够在空间综合实验环境下开展金属合金、半导体材料、纳米和介孔材料、亚稳材料和特种玻璃、无机功能材料和新型特种功能材料等多种类别材料的熔体生长和凝固科学实验,具有材料物性、界面形态、温场分布以及实验过程实时观察等实验参

数的测量和反馈功能。

高温材料科学实验系统安装在高温材料科学实验柜(High Temperature Materials Rack, HTMR)中,如图1所示。HTMS所包含的高温材料实验分为基于容纳大尺寸样品盒在真空室模组块(子系统)中进行的操作和高温实验,以及基于X射线投射成像模组块(子系统)的小样品高温操作实验。这里所开展的工作是基于容纳大尺寸样品盒进行操作和高温实验的真空室模组块设计。该真空室主要包括高温炉模块、批量样品管理模块、控制模块或子系统等,各子系统/模组块的空间布局如图2所示。

对于空间站使用的高温材料科学实验系统的真空室设计,除了保障对真空室能承受的真空度要求之

外,与通常设计用于地面的真空室相比,还需考虑以下两方面内容:一是真空室模组块在空间站上标准实验柜的有限空间里应能够方便进行模块化插拔与更换,同时还要考虑最大组部件的三维外包络尺寸能够通过实验舱的对接通道;二是在航天员更换模组件和样品单元操作及维修的人机功效方面具有安全性、可靠性和操作舒适性。

真空室是 HTMR 科学实验系统的核心组件之一。其基本设计思路是,实验样品和高温炉安装在真空室内部,可自动完成样品进样和高温加热实验,兼具一定测量功能。真空室可为实验样品盒提供标准机械接口及气、冷却、供电、信号等资源,支持实验样品盒在真空室密闭环境中进行不同样品的梯度、等温或区熔等多种温场条件下的加热实验。真空室前面布置密封门,为航天员在轨更换实验样品盒提供了操作通道。密封门尺寸为 475 mm×236 mm,要求其操作简单、密封可靠、可在轨进行 100 次开合操作而不降低性能。密封门开启后,在内部可见光环境下航天员需可视更换实验样品。实验过程中密封门和真空室外壳体温度不超过 40℃。依据实验需求可在轨对批量样品管理模块和高温炉模块进行模块化更换,真空室设计的技术指标见表1。

按上述基本设计输入及空间站环境资源条件约束,对真空室的设计应考虑如下几方面问题:(1)真空室外部整体上的设计既要考虑便于安装到柜体上,又要便于整体移出柜外进行组部件更换或维修操作;(2)内连外接的设计既要考虑水电气的通畅与密封,又要考虑接拆操作简单与安全可靠;(3)真空室的热设计既要考虑内部高温炉热环境设计需求,又要考虑舱内对真空室外表温度的约束;(4)实验期间真空室内接排水气和机电操作不应应对微重力环境产生明显的干扰;(5)在考虑真空室选材和轻量化设计的同时,应能够经受严苛的力学环境试验考核。

2 结构设计

高温柜科学实验系统真空室由批量样品管理单元真空室和高温炉单元真空室组成。批量样品管理单元真空室主要为批量样品管理机构提供机械接口和真空环境,高温炉单元真空室主要为高温炉体及内部传动机构提供机械接口和真空环境。批量样品管理单元真空室和高温炉单元真空室相通,通过圆形法

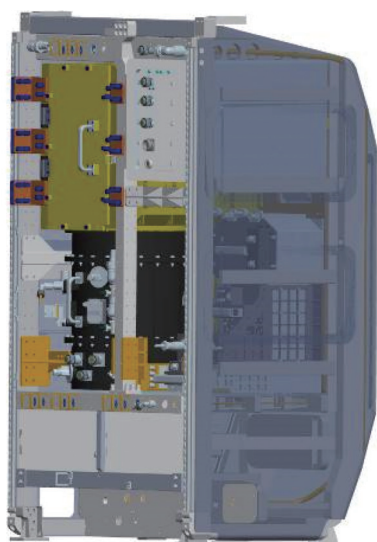


图1 空间站高温科学实验柜结构

Fig. 1 Structural diagram of space station high temperature materials experiment rack

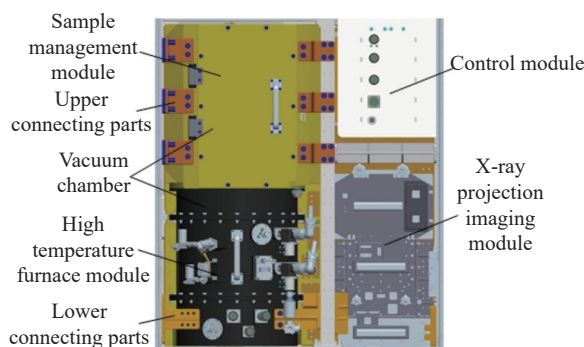


图2 高温材料科学实验系统空间布局关系

Fig. 2 Spatial layout of the high temperature materials science experimental system

表 1 真空室设计指标
Table 1 Vacuum chamber design specifications

初始压力	压力控制范围: $\leq 1 \text{ atm}$ (绝对压力)
通用功能	为实验插件提供机械、电、气、液接口, 具有相应的散热功能, 满足航天员换样的人机工效功能
漏率	$\leq 5 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (氦检)
真空室最大变形(插件接口安装面)	真空情况下最大变形量 $\leq 3 \text{ mm}$
基频	$> 70 \text{ Hz}$

兰连接。设计时, 批量样品管理单元真空室为方形结构, 内部尺寸为 $533 \text{ mm} \times 533 \text{ mm} \times 515 \text{ mm}$, 高温炉单元真空室为圆形结构, 定义筒体内径为 414 mm , 实验允许气压 $\leq 1 \text{ atm}$ ($1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$)。高温实验期间, 高温加热区域集中在高温炉单元的中央较小区域, 且高温炉使用隔热材料进行保温隔热处理。热量传递对真空室壁面影响较小, 并且真空室内部配置了严格的温度监测系统, 因此真空室外筒壁最高温度不超过 40°C 。

圆形真空室当承受一定外压时, 圆形筒体的厚度为^[9]

$$S_0 = 1.25 \cdot D_B \left(\frac{p}{E_t} \cdot \frac{L}{D_B} \right)^{0.4}. \quad (1)$$

式中, S_0 为筒体的最小壁厚; D_B 为筒体内径; p 为外压设计压力, 取 0.12 MPa ; E_t 为材料的弹性模量, 材料选用铝合金 2 A12, 其值取 71000 MPa ; L 为筒体计算长度。高温炉真空室由三段圆形真空室组成。通过对三段真空室单独计算, 真空室筒体有效厚度分别为 1.56 mm , 2.36 mm 和 1.77 mm 。考虑安全裕度, 圆形真空室筒体厚度设计为 3 mm 。

批量样品管理单元真空室内部安装样品转位机构, 依照转位机构外形尺寸, 批量样品管理单元真空室设计为方形结构。真空室由平板焊接成型。方形真空室材料选用防锈铝 5 A06, 该材料强度高, 具有一定耐磨性, 且密度低于合金钢等, 常用于航空航天领域。

方形真空室在承受一定外压时, 方形平板的厚度为^[9]

$$S_0 = \frac{K_1 0.224b}{\sqrt{[\sigma]_w}}. \quad (2)$$

弯曲时许用应力

$$[\sigma]_w = \frac{\sigma_b}{n_b}. \quad (3)$$

设计外压下真空室壳体的计算应力为

$$\sigma = \frac{0.5b^2p}{(S-C)^2} \leq 0.9\sigma_s. \quad (4)$$

式中, σ_b 为材料的抗拉强度; n_b 为抗拉强度下材料安全系数, 取 3.0 ; b 为强筋中心间距; K_1 为依据外压确定的系数, 外压 0.12 MPa 时, 为 1.2 ; 通过计算得出真空室有效厚度 $S_0 = 3.3 \text{ mm}$, 考虑安全裕度, 真空室厚度设计为 5 mm 。真空室最大试验应力 $\sigma = 50.1 \leq 0.9\sigma_s = 288 \text{ MPa}$, 满足真空室最大外压使用要求。

真空室结构采用分段式设计, 包括批量样品管理单元密封门组件, 方形真空室组件, 圆形上段、中段和下段的真空室组件, 以及真空室安装支架(见图 3)。高温炉圆形真空室后面有安装支架组件, 主要用于高温炉真空室组件的支撑及接口安装。为保证真空室结构整体的密封性, 在各组件连接面之间加工密封槽, 槽内安装试 5171 丁腈橡胶密封圈(见图 4)。由于航天员需在轨开启密封门进行试验样品换样操作和模块更新, 因此对密封门处密封圈和批量样品管理单元真空室与高温炉单元真空室连接面处密封圈进行硫化处理, 确保航天员操作时密封圈在轨不脱出。

为满足质量轻型化设计要求, 在保证真空室力学性能前提下, 批量样品管理模块真空室壳体掏铰加强筋, 安装支架也通过掏铰板厚减轻重量。真空室体积在满足内部组件正常安装和运行的同时, 外轮廓最大包络尺寸应满足实验舱对接通道的尺寸约束。真空室外形尺寸为 $580 \text{ mm} \times 595 \text{ mm} \times 1120 \text{ mm}$ 。批量样品管理模块真空室背面和安装支架通过松不脱螺钉与柜体连接, 真空室前端通过上下转接件与柜体侧面和中立柱连接, 保证真空室在发射阶段满足抗力学环境的性能, 上下转接件安装形式如图 2 所示。为满足对批量样品管理模块和高温炉模块进行在轨更换的人机工效要求, 批量样品管理模块真空室和高温炉模块真空室之间通过松不脱螺钉连接, 航天员在轨操作时, 首先将真空室整体从柜体拆除, 然后将批量样品管理模块和高温炉模块拆解分离, 将需要更换的模块与原模块定位后连接。两模块之间通过不对称布置

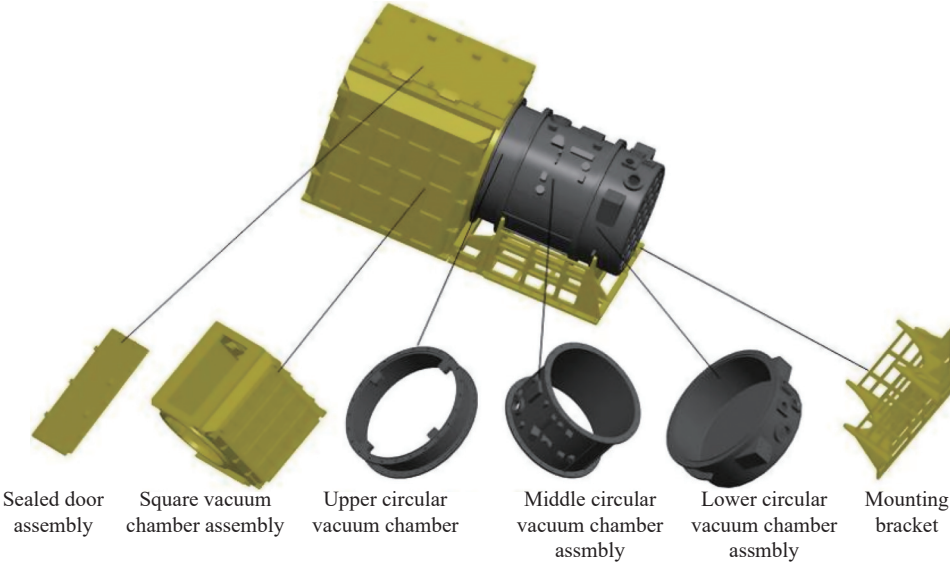


图 3 真空室及其主要模组结构

Fig. 3 Structural diagram of the vacuum chamber and its main modules

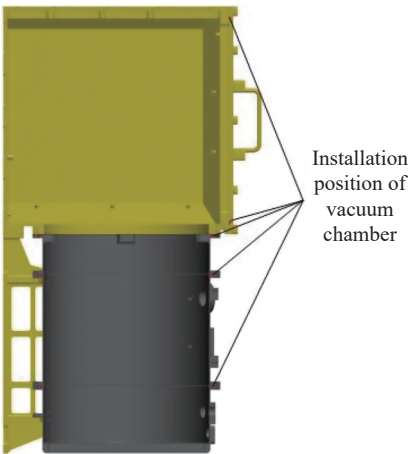


图 4 真空室密封设计

Fig. 4 Schematic diagram of vacuum chamber seal design

的 2 个销钉和位置刻线定位对中, 保证批量样品管理模块中样品可顺利插入高温炉模块的加热炉膛。批量样品管理模块和高温炉模块定位方式如图 5 所示。

高温炉圆形真空室组件上布置了气、液冷、电、信号等 12 个接口, HTMR 科学试验系统通过接口实现如下功能: (1)为真空室提供真空环境; (2)接入排气净化子系统构成回路, 完成高温加热实验气体过滤净化; (3)实现真空室内部设备的供电及控制, 并实时监控内部状态; (4)从高温科学实验柜引入一路液冷为实验插件冷板提供冷却介质, 液冷工质是质量百分

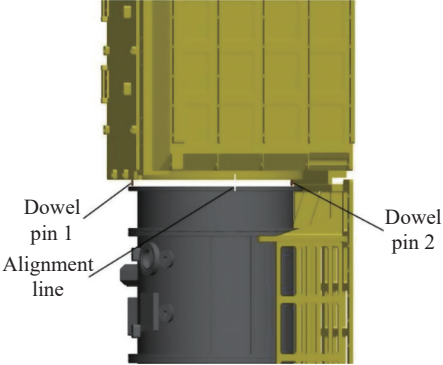


图 5 模块对中定位设计

Fig. 5 Schematic diagram of centralization design of two modules

比为 35% 的乙二醇-水溶液。各连接器的位置及编号如图 6 所示, 表 2 给出了各接口类型及对应功能。

3 分析验证

3.1 真空室承压分析

利用 ANSYS 进行真空室静态承压分析, 批量样品管理单元真空室结构选用 5 A06 铝合金, 高温炉单元真空室结构选用 2 A12 铝合金。表 3 列出材料的性能参数。将真空室外表面设置为压力面。图 7 给出真空室外部压力为 0.12 MPa 工况的应力分析结果, 图 8~10 给出真空室外部压力为 0.12 MPa 工况的变形分析结果。真空室承压为 0.12 MPa 时, 最大

应力出现在批量样品管理单元真空室的右侧板正中间位置,为 260.07 MPa。5 A06 铝合金的抗压强度为 340 MPa,2 A12 铝合金的抗压强度为 450 MPa,最大应力小于抗压强度。真空室的位移最大变形量在批量样品管理单元真空室后面板正中间的位置,为 3.11 mm,其余部位变形均小于 3 mm。其中左侧面板正中间位置的最大变形量为 1.11 mm,上面板正中

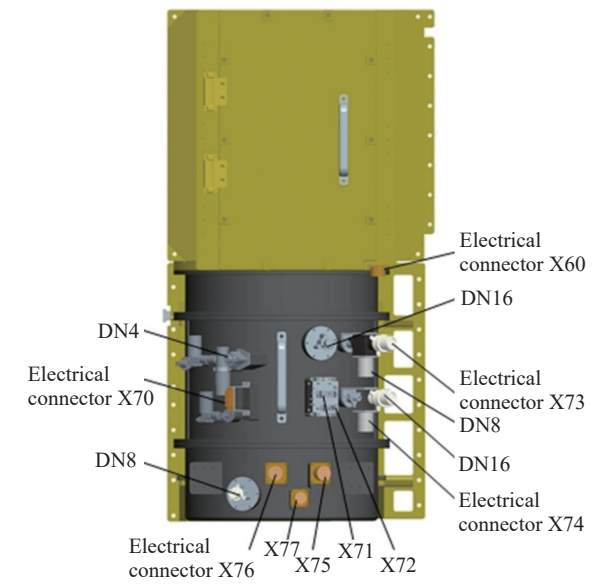


图 6 真空室水、气、电接口分布
Fig. 6 Schematic diagram of distribution of water, air and electrical interfaces in vacuum chamber

表 2 真空室接口类型及功能
Table 2 Interface type and function of vacuum chamber

编号	零件类型	功能
1	DN4	氮气
2	电连接器X70	氮气阀供电
3	DN8	冷却液出口
4	电连接器X76	机构控制
5	电连接器X77	磁场供电
6	电连接器X75	加热炉供电
7	电连接器X71	阀体控制器供电
8	电连接器X72	阀体信号
9	电连接器X74	真空阀供电
10	DN16	真空出口
11	DN8	冷却液入口
12	电连接器X73	废气阀供电
13	DN16	废气出口
14	电连接器X60	样品机构供电

间位置的最大变形量为 0.45 mm。真空室后面板内部不安装任何插件,且插件距离真空室后面板大于 8 mm,变形不影响内部机构工作。左侧面板和上面板安装样品提拉和转位机构,满足最大变形量 ≤ 3 mm的要求。由此可见,在真空室承压为 0.12 MPa 的工况下,真空室未失效。真空室内部压力 ≤ 1 atm 时,真空室安全系数 ≥ 1.2 ,说明其承压性能良好。

3.2 真空室模态与随机响应分析

真空室随柜体发射时经历较为复杂的振动环境,动力学分析能够校验真空室结构能否经受发射时的振动,预知设计缺陷。真空室动力学仿真使用 ANSYS 软件,通过模态分析计算真空室的固有频率,得到前 6 阶模态计算结果(见表 4)。真空室基频为 276.4 Hz,满足大于 74 Hz 的柜体要求,因而结构刚性较好,能够有效避免共振发生造成破坏。

当结构承受不可预知的连续载荷激励时,可以采用随机响应分析。表 5 给出了真空室分析时所施加载荷的加速度功率谱密度。真空室随机响应分析结果见图 11~13,分别给出 x, y, z 三个方向的真空室加速度响应云图和应力云图。从图中可以看出: x 方向最大加速度响应为 99.1 g ,位于方形真空室右侧面板,

表 3 材料参数
Table 3 Material parameters

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
5 A06	71	0.32	2800
2 A12	71	0.3	2760

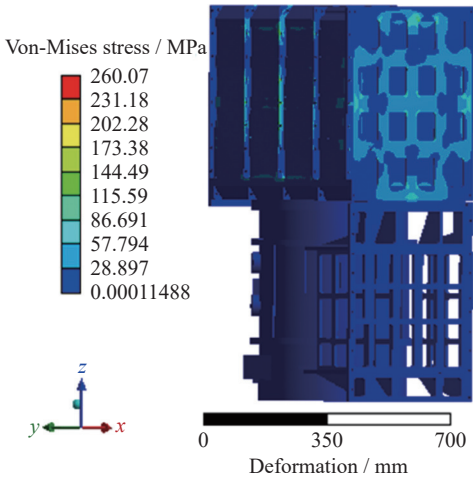


图 7 压力计算结果
Fig. 7 Calculation results for pressure

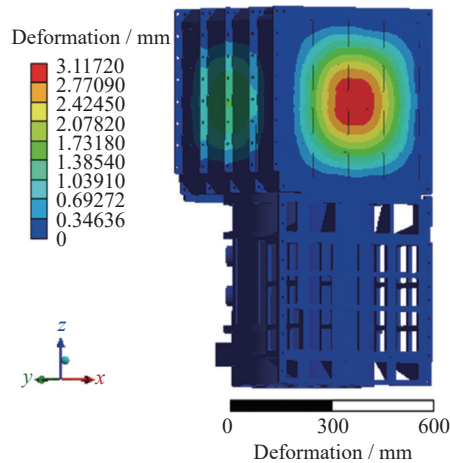


图 8 后面板变形分析结果
Fig. 8 Results of the back panel deformation analysis

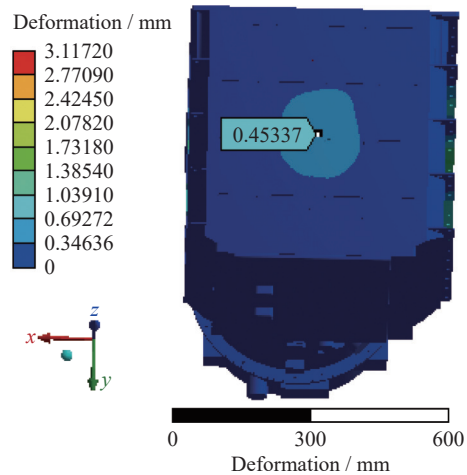


图 10 上面板变形分析结果
Fig. 10 Results of the top panel deformation analysis

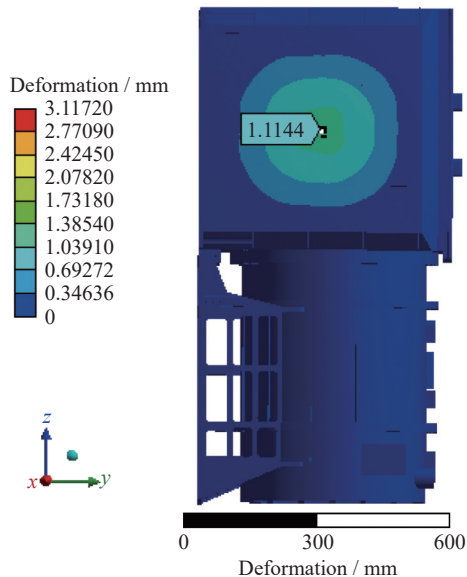


图 9 左侧板变形分析结果
Fig. 9 Results of the left panel deformation analysis

应力最大响应为 39.93 MPa, 位于方形真空室右侧面板中间位置; y 方向最大加速度响应为 27.3 g , 位于安装支架上, 应力最大响应为 23.4 MPa, 位于方形真空室后面板中心位置; z 方向最大加速度响应为 66.6 g , 位于方形真空室门右侧面板, 应力最大响应为 27.3 MPa, 位于方形真空室右侧面板中间位置。

综上所述, y 方向最大加速度响应放大倍数为 2.82, 小于 5, 满足刚度要求; x 和 z 方向方形真空室右侧面板板筋处加速度响应放大倍数分别为 10.22 和 6.88, 真空室其余位置放大倍数均小于 5, 需对响应较大的板筋位置进行优化设计。 x, y, z 方向的最大应力

表 4 前 6 阶固有频率
Table 4 First six natural frequencies

阶数	第1阶	第2阶	第3阶	第4阶	第5阶	第6阶
频率/Hz	276.4	357.8	409.2	467.9	567.5	574.1

表 5 加速度功率谱密度 (总均方根加速度值 9.6 g , 每向试验持续时间 180 s)

Table 5 Accelerated power spectral density (Root mean square acceleration value is 9.6 g . Duration of the experiment in each direction is 180 s)

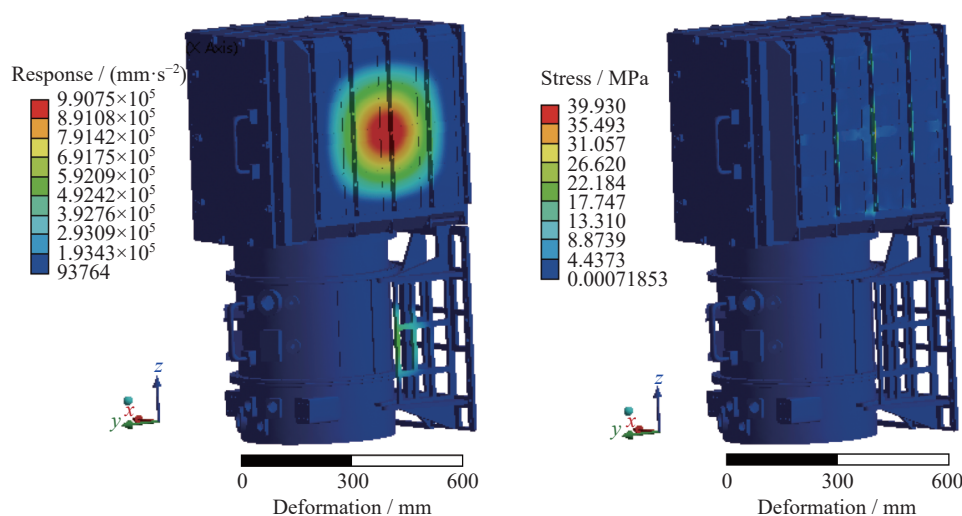
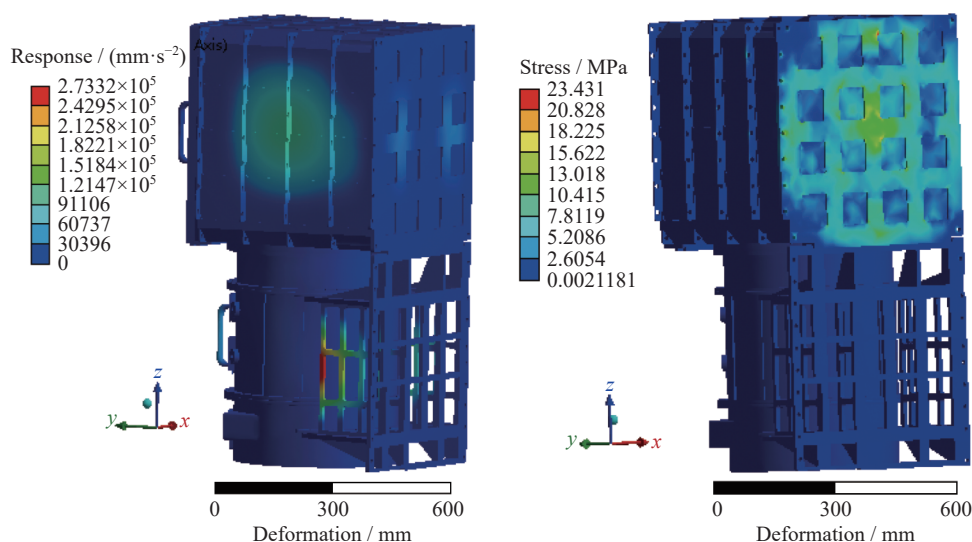
频率范围/Hz	功率谱密度
10~50	3 dB/oct ⁻¹
50~300	0.25 $g^2 \cdot \text{Hz}^{-1}$
300~2000	-12 dB/oct ⁻¹

响应分别为 39.93, 23.43, 27.32 MPa, 满足工程材料力学方面的要求, 即 3 倍均方根应力小于材料抗拉强度 (2 A12 铝合金为 450 MPa, 5 A06 铝合金为 340 MPa), 真空室强度足够。因此, 真空室能够承受发射振动, 满足发射工作要求。

3.3 动力学试验

如图 14 所示, 依据仿真结果对方形真空室面板中心进行结构加强优化设计后, 分别沿 x, y, z 三个方向对真空室进行正弦扫频振动试验、正弦振动试验和随机振动试验。

正弦扫频振动试验得到真空室单元的自然频率列于表 6。试验得到一阶自然频率为 247 Hz, 可以有效避免其在发射过程中与空间站上其他部组件发生共振。

图 11 x 方向随机响应分析结果Fig. 11 Results of x -directional random response analysis图 12 y 方向随机响应分析结果Fig. 12 Results of y -directional random response analysis

对真空室进行随机振动试验(频率为 10~2000 Hz), 其中 x 向在 255 Hz 处功率谱密度频率响应最大, 频率域内加速度总均方根值为 22.26 g , 放大倍率为 2.3; y 向在 247 Hz 处功率谱密度频率响应最大, 频率域内加速度总均方根值为 11.61 g , 放大倍率为 1.2; z 向在 294 Hz 处功率谱密度频率响应最大, 频率域内加速度总均方根值为 18.58 g , 放大倍率为 1.92。

经过动力学环境试验后, 对真空室进行外观检查, 未发现裂纹、变形等现象, 且真空室漏率满足要求, 内部机构运行正常, 说明真空室具有较好的密封性和结构强度及刚度。

4 结论

根据中国空间站高温材料科学实验柜技术要求, 结合空间高温材料科学实验系统的真空室设计主要特点, 开展了高温材料科学实验系统真空室的结构设计及力学分析。高温炉单元真空室壁厚为 3 mm, 批量样品管理单元真空室壁厚为 5 mm。真空室含有实验插件机械接口, 通过真空室外接口为实验插件接入系统提供真空、氮气、冷却、供电、控制等各类资源, 实现真空环境, 并通过密封门为航天员取样操作提供窗口, 依据实验需求在轨进行模块更换。利用

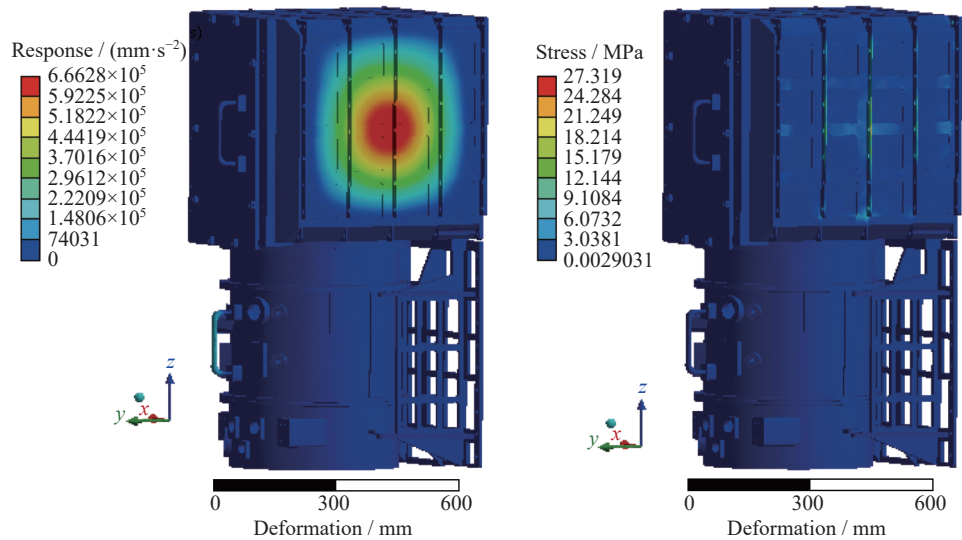


图 13 z 方向随机响应分析结果

Fig. 13 Results of z -directional random response analysis

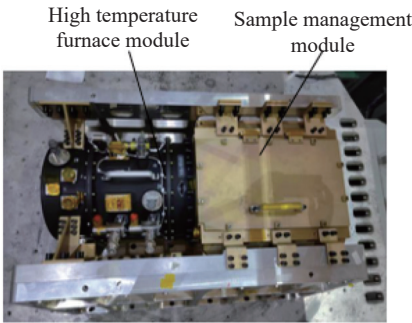


图 14 真空室力学振动试验

Fig. 14 Mechanical vibration test of vacuum chamber

表 6 真空室自然频率

Table 6 Natural frequency of vacuum chamber

振动方向	x	y	z
频率/Hz	255	247	294

ANSYS 软件对真空室进行了静态承压分析,结果表明在轨真空实验期间,真空室能够承受 1.2 倍额定工作压力,插件安装面变形满足小于 3 mm 的指标要求;对真空室进行了随机响应分析和力学振动试验,结果表明真空室整体结构刚度和强度满足要求,也验证了有限元分析结果的合理性。

参考文献

[1] REGEL L L. Materials Processing in Space[M]. New York: Consultants Bureau, 1990

[2] SU Huaipeng, ZHAO Zhenhao, SUN Yongjin, *et al.* Study on space science and technology of manned space station[J]. *Journal of Astronautics*, 2014, **35**(9): 985-991 (苏怀朋, 赵振昊, 孙永进, 等. 载人空间站空间科学应用研究[J]. *宇航学报*, 2014, **35**(9): 985-991)

[3] CUI Xiaojie, LU Dengbai, ZHANG Zhengjun. Design and implementation of experimental device of comprehensive materials science for space research[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017, **34**(2): 162-165 (崔晓杰, 陆登柏, 张正军. 空间综合材料科学实验装置的设计与实现[J]. *航天器环境工程*, 2017, **34**(2): 162-165)

[4] HU Wenrui. Physics in space[J]. *Physics*, 2008, **37**(9): 637-642 (胡文瑞. 空间的物理学[J]. *物理*, 2008, **37**(9): 637-642)

[5] PETTIGREW P J, KITCHEN L, DARBY C, *et al.* Design features and capabilities of the first materials science research rack (MSRR-1)[C]//2003 IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2003: 55-63

[6] 深澤智晴, 岡利春, 荒井康智, *et al.* Development of a gradient heating furnace and sample cartridges[J]. *International Journal of Microgravity Science and Application*, 2013, **30**(4): 165-168

[7] EGOROV A V, BARMIN I V, I G, *et al.* Universal multi-zone facility for space experiments onboard the ISS Russian segment[C]//First International Symposium on Microgravity Research & Applications in Physical Sciences and Biotechnology. Paris: European Space Agency, 2001: 1045-1051

[8] KHARANZHEVSKIY E V, GALENKO P K, RETTENMAYR M, *et al.* Amorphization and nanocrystal formation in a Pd-Ni-Cu-P alloy after cooling under different conditions[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A Physical and Engineering Sciences*, 2022, **380**(2217): 20200321. DOI: 10.1098/rsta.2020.0321

[9] DA Daoan. Vacuum Design Handbook[M]. 3rd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2006: 682-691 (达道安. 真空设计手册[M]. 3版. 北京: 国防工业出版社, 2006: 682-691)