

中文引用格式:何绍祥,薛松,刘书魁,等. 低本底实验腔的结构安全性分析[J]. 中国安全科学学报,2024,34(11):146-152.

英文引用格式:HE Shaoxiang, XUE Song, LIU Shukui, et al. Structural safety analysis of low background experimental cavity[J]. China Safety Science Journal,2024,34(11):146-152.

## 低本底实验腔的结构安全性分析\*

何绍祥<sup>1</sup>, 薛松<sup>1</sup>教授, 刘书魁<sup>2</sup>特聘副研究员, 许明龙<sup>1</sup>, 邓瑞<sup>1</sup>, 李泽农<sup>1</sup>

(1 西南科技大学 制造科学与工程学院, 四川 绵阳 621010; 2 四川大学 物理学院, 四川 成都 610065)

中图分类号: X944.4

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.11.0188

**【摘要】** 为保障低本底实验腔的正常运行,预防腔体发生坍塌,利用 Abaqus 软件对实验腔开展结构安全性分析。首先,基于有限元方法建立实验腔简化模型;然后,对其进行极限工况下的静载荷响应分析、地震波载荷响应模拟分析,以及基于线性稳定性理论、弧长法的屈曲分析;最后,计算不同厚度下无氧铜段的应力响应情况和屈曲临界载荷,确定实验腔允许的极限壁厚。结果表明:在受静压时,实验腔最薄弱区域为无氧铜段顶部和圆封头过渡处,发生屈曲的临界载荷为 0.307 MPa,允许的极限壁厚为 5.1 mm;该低本底实验腔的结构能满足极限工况下的使用需求,验证了实验腔设计的合理性。

**【关键词】** 低本底实验腔; 结构安全性分析; 屈曲分析; 临界载荷; 极限壁厚

### Structural safety analysis of low background experimental cavity

HE Shaoxiang<sup>1</sup>, XUE Song<sup>1</sup>, LIU Shukui<sup>2</sup>, XU Minglong<sup>1</sup>, DENG Rui<sup>1</sup>, LI Zenong<sup>1</sup>

(1 School of Manufacturing Science and Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China; 2 College of Physics, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

**Abstract:** In order to ensure the normal operation of the low-background experimental chamber and prevent structural collapse, a structural safety analysis was conducted using Abaqus software. Initially, a simplified model of the experimental chamber was established based on the finite element method. This was followed by static load response analysis under extreme conditions, seismic load response simulations, and buckling analyses. Finally, the stress response and buckling critical loads of the oxygen-free copper sections with varying thicknesses were calculated to determine the permissible limit wall thickness of the experimental chamber. The results indicated that, under static pressure, the weakest regions of the chamber were the top of the oxygen-free copper section and the transition area of the circular end cap, with a critical buckling load of 0.307 MPa and a permissible limit wall thickness of 5.1 mm.

**Keywords:** low background experimental cavity; structural safety analysis; earthquake response simulation; buckling analysis; limit wall thickness

## 0 引言

低本底实验腔是暗物质探测、稀有衰变现象等

重要领域中的关键装置,如 XENON<sup>[1]</sup>、KamLAND<sup>[2]</sup>和 LUX-ZEPLIN<sup>[3]</sup>等试验都依赖低本底实验腔来提高探测能力,它能够提升试验的灵敏度和精确度,确

保数据的可靠性,这不仅为基础物理研究提供坚实的支持,同时为探索物理学中的未知领域创造了可能性。然而,低本底实验腔通常需要在高真空、极低温、强磁场等极端条件下运行,这使得其结构安全性分析显得尤为重要。

目前,针对低本底实验腔的结构安全性分析研究较少,现有研究大多集中在类似的薄壁容器的结构稳定性方面。例如:何绍栋等<sup>[4]</sup>利用 ANSYS Workbench 软件,分析了某大型真空容器在 0.1 MPa 外压力和重力条件下的应力、位移和屈曲指标。苏靖伟等<sup>[5]</sup>采用 ANSYS 有限元分析软件,分析了 LNG 内罐在外压作用下的稳定性。段成红等<sup>[6]</sup>研究了几何影响因素和材料参数对含矩形大开孔的薄壁圆柱壳结构临界失稳载荷及屈曲行为的影响。夏津等<sup>[7]</sup>基于 Abaqus 有限元软件对一薄壁同心圆筒进行了屈曲分析及优化设计。陈志平等<sup>[8]</sup>引入初始缺陷,对轴压薄壁圆柱壳体进行了屈曲分析。

上述研究大多仅对结构本身稳定性进行了分析,未对受静载荷和地震等地质因素的影响进行全面的计算分析。

文中研究的实验腔主要用于无中微子双 $\beta$ 衰变等稀有事例的前沿物理试验探索,为确保极低本底条件,部分腔体需浸没于高纯液氮中,且实验腔整体需安置于地底深处。因此,除考虑外压引发的结构坍塌风险外,还需关注如地震等地质灾害的影响。一旦实验腔发生结构失效,可能引发液氮泄漏或腔体崩溃,导致不可逆的试验损失,并对人员生命和财产安全构成严重威胁<sup>[9-10]</sup>。鉴于此,笔者拟根据其设计参数和工况条件,利用 Abaqus 分析软件,对实验腔作全面的结构安全性分析,确保装置在各种工况条件下的安全性和稳定性,并据此确定实验腔的极限壁厚,以期能够为类似工况和容器的结构安全性分析与结构设计提供参考。

## 1 实验腔设计和分析要求

低本底实验腔整体高度约 5 m,分为 2 段,上端为长约 2 m 的不锈钢连接段,下端为长度约 3 m 的无氧铜段,上下 2 段采用法兰连接。实验腔内径约 550 mm,壁厚约 6 mm。材料分别为 SUS304 不锈钢和 TU1 级无氧铜,材料性能参数见表 1,根据尺寸建立简化模型如图 1 所示。

在极限工况下,实验腔无氧铜段浸泡在高纯液氮中,内部为真空,实验腔受净外压 0.2 MPa;因其

表 1 实验腔主要材料性能

Table 1 Main material properties of experimental cavity

材料性能	无氧铜	SUS304
密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	8.94	7.93
抗拉强度/MPa	196	520
屈服强度/MPa	81	205
弹性模量/GPa	115	194.02
泊松比	0.34	0.3

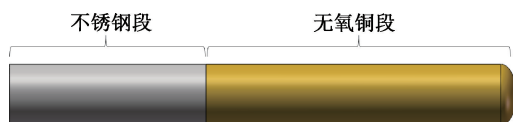


图 1 整体简化模型

Fig. 1 Overall simplified model

壁厚较薄,需对其进行静压受力分析。其次,考虑到可能发生的地震类自然灾害,为在长期运行中确保设备和人员的安全,需对实验腔整体承受地震载荷的情况进行模拟分析。最后,考虑到实验腔为薄壁受压结构,也存在发生屈曲的风险,因此,还有必要对其进行屈曲分析,计算其能承受的临界压力<sup>[11]</sup>。

## 2 实验腔的结构安全性分析

### 2.1 实验腔结构安全性分析的计算原理

#### 2.1.1 地震波载荷响应模拟分析

采用隐式动力学方法求解,该方法基于动力学平衡方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{F}(t) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为质量矩阵,kg; $\mathbf{C}$ 为阻尼矩阵,(N·s)/m; $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵,N/m; $\ddot{\mathbf{u}}(t)$ 为加速度,m/s<sup>2</sup>; $\dot{\mathbf{u}}(t)$ 为速度,m/s; $\mathbf{u}(t)$ 为位移,m; $\mathbf{F}(t)$ 为外力向量,N。

时间离散采用 Newmark-beta 法:

$$\dot{\mathbf{u}}_{n+1} = \dot{\mathbf{u}}_n + \Delta T((1 - \gamma)\ddot{\mathbf{u}}_n + \gamma\ddot{\mathbf{u}}_{n+1}) \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_{n+1} = \mathbf{u}_n + \Delta T\dot{\mathbf{u}}_n + \frac{\Delta T^2}{2}((1 - 2\beta)\ddot{\mathbf{u}}_n + 2\beta\ddot{\mathbf{u}}_{n+1}) \quad (3)$$

式中: $\dot{\mathbf{u}}_{n+1}$ 和 $\dot{\mathbf{u}}_n$ 为速度向量,m/s; $\Delta T$ 为时间步长,s。

采用 Newton-Raphson 法迭代求解非线性方程:

$$\mathbf{R} + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}_{n+1}^{(i)} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}_{n+1}^{(i)} + \mathbf{K}\mathbf{u}_{n+1}^{(i)} - \mathbf{F}_{n+1} \quad (4)$$

$$\Delta\ddot{\mathbf{u}} = -\mathbf{J}^{-1}\mathbf{R} \quad (5)$$

式中: $i$ 为迭代步数; $\ddot{\mathbf{u}}_{n+1}$ 和 $\dot{\mathbf{u}}_n$ 为加速度向量,m/s<sup>2</sup>; $\gamma$ 和 $\beta$ 为控制参数; $\mathbf{F}_{n+1}$ 为在第 $n+1$ 步施加的外力向量,N; $\Delta\ddot{\mathbf{u}}$ 为加速度增量向量,m/s<sup>2</sup>; $\mathbf{J}$ 为雅可比矩阵,N/(m/s<sup>2</sup>); $\mathbf{R}$ 为残差,N。

迭代过程持续进行到残差  $R$  满足收敛条件:

$$\|R\| < \epsilon \quad (6)$$

式中  $\epsilon$  为预设的收敛容限,  $N$ 。

### 2.1.2 屈曲分析

线性屈曲分析是以微小弯曲变形为前提条件, 在小变形下挠曲线性微分方程近似为:

$$\frac{d^2w}{dx^2} = \frac{M}{EI} \quad (7)$$

式中:  $w$  为挠度,  $m$ ;  $x$  为沿梁轴的横向坐标,  $m$ ;  $M$  为弯矩,  $N \cdot m$ ;  $E$  为弹性模量,  $Pa$ ;  $I$  为截面惯性矩,  $m^4$ 。

当外力产生的弯矩  $M$  达到临界值时, 有:

$$\begin{aligned} \frac{d^2w}{dx^2} &= -\frac{Pw}{EI} \Rightarrow \frac{d^2w}{dx^2} + \frac{Pw}{EI} = 0 \\ \Rightarrow \frac{d^2w}{dx^2} + k^2w &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

结合边界条件, 即可解得临界载荷  $P_{cr}$  为

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2} \quad (9)$$

式中:  $P$  为作用在结构上的集中载荷,  $N$ ;  $k$  为挠率系数;  $l$  有效长度,  $m$ 。

综上, 确定评定计算所用模型和计算方法, 见表 2。

表 2 计算模型和方法

Table 2 Computational model and method

分析情况	分析对象	网格	分析方法
外压模拟	无氧铜段	Shell	静力学
地震模拟	整体	Solid	隐式动力学
屈曲分析	无氧铜段	Shell	线性/非线性分析

## 2.2 屈曲分析的数值模型验证

为确保结构安全性分析中屈曲分析计算原理的可行性和计算结果的准确性, 参考多个案例的数值模型和计算方法, 对比研究对象发生结构失稳的临界压力计算值和试验值, 结果见表 3。可以看到, 案例 1—案例 3 的分析结果误差均在 10% 以内, 平均误差仅为 6.78%, 说明采用弧长法进行失稳临界载荷计算精度较高, 计算原理和数值模型可靠。

表 3 现有仿真和试验对比

Table 3 Comparison of existing simulations and experiments

案例	1 <sup>[12]</sup>	2 <sup>[13]</sup>	3 <sup>[14]</sup>
计算平台	Abaqus	Abaqus	Ansys
模型	圆筒壳体	圆筒壳体	圆筒壳体
计算方法	弧长法	弧长法	弧长法

续表 3

案例	1 <sup>[12]</sup>	2 <sup>[13]</sup>	3 <sup>[14]</sup>
临界载荷计算值/MPa	135.08	48.7	31.35
临界载荷试验值/MPa	139.39	53.4	28.7
误差/%	3.1	8.8	8.44
平均误差/%	6.78		

## 3 实验腔结构安全性数值模拟计算

### 3.1 极限工况下的静载荷响应分析

对无氧铜段顶端进行固定约束, 在其外表面施加 0.2 MPa 外压力。计算得到的应力云图如图 2 所示。可以看到, 应力主要集中在无氧铜段顶部和底部圆封头过渡处, 其中最大应力为 16.35 MPa。

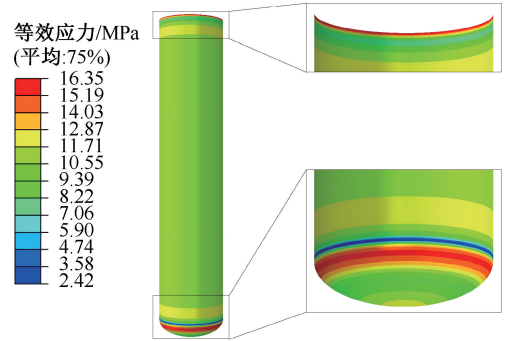


图 2 实验腔受静压力的应力云图

Fig. 2 Stress nephogram of experimental cavity under static pressure

### 3.2 地震波载荷响应模拟分析

根据工程要求, 实验腔拟能承受的地震要求如下: 设防烈度 8.0 级, 峰值加速度 0.3 g, 场地类别 11, 地震分组第 3 组, 地震特征周期 0.35 s。选取满足该要求的地震数据, 设置地震时长为 50 s, 冲击间隔为 0.02 s。约束除  $X$  轴方向外的自由度, 并在  $X$  轴方向上加载地震波, 模拟结构受地震影响, 研究实验腔在地震下的应力响应情况<sup>[15]</sup>。

根据所述边界条件可知应力会集中在实验腔顶部的  $X$  轴两侧, 即  $P_1$ 、 $P_2$  点(图 3)。

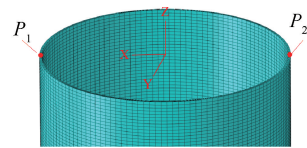


图 3 应力集中点

Fig. 3 Schematic diagram of stress extraction point

#### 3.2.1 网格无关性验证

网格的划分会直接影响计算时间和结果精度,

为了提高计算效率,在保证计算结果可靠的前提下尽量减少网格数量。因此,对该模型进行网格无关性验证。分别设置 14 万、28 万、62 万、155 万等 4 种网格数量方案,进行时长 1 s 的地震模拟,采用等效应力作为评价标准,提取 4 个模型  $P_1$  点的等效应力和峰值应力,结果如图 4、图 5 所示。

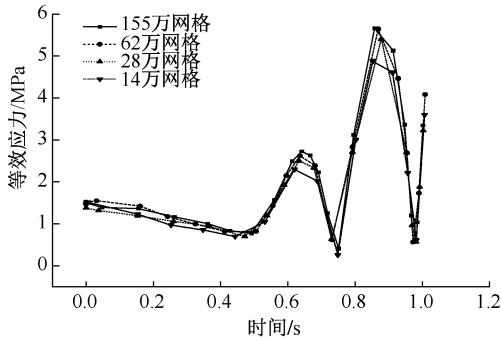


图 4 4 种网格方案的应力变化

Fig. 4 Stress variation of four grid schemes

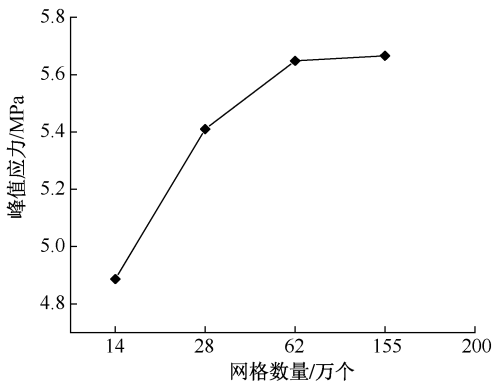


图 5 4 种网格方案的峰值应力

Fig. 5 Peak stress of four grid schemes

由图 5 可以看出,随着网格数量的增加,应力变化逐渐稳定,峰值应力也逐渐增大,但趋势在减缓,整体呈收敛趋势。当网格数量达到 62 万时趋于稳定,因此选择 62 万网格的模型进行后续计算。

### 3.2.2 模拟计算

计算并提取  $P_1$ 、 $P_2$  的应力结果并整理对比,结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,地震过程中  $P_1$  点的峰值等效应力较大,约为 103.05 MPa。

### 3.3 屈曲分析

Abaqus 内可以进行特征值屈曲分析和非线性屈曲分析,其中特征值分析为不需要考虑初始扰动的线性分析,该方法分析预测的临界载荷往往高于实际工程中结构实际能承受的最大载荷。为了工程安全,还需考虑结构几何非线性和材料非线性特性,对结构进行非线性屈曲分析,求解并准确捕捉极限

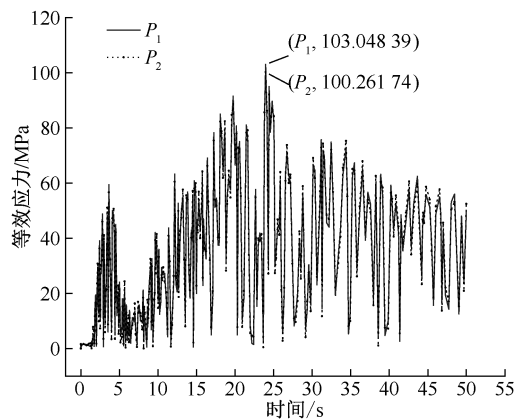


图 6 提取点的应力变化情况

Fig. 6 Variation of stress at extraction point

载荷点和后屈曲行为。虽然特征值屈曲分析的结果不准确,但其可作为非线性屈曲分析中施加外压载荷的参考,其屈曲模态形状可用作非线性屈曲分析所需的初始几何缺陷的参考<sup>[16]</sup>。

#### 3.3.1 特征值屈曲分析

对无氧铜段顶端进行固定,模拟法兰连接,对其外表面施加 0.2 MPa 压力,计算结果如图 7 所示。可以看到变形主要集中在圆筒部分中心位置,为侧向失稳,其一阶屈曲因子约为 3.967。由此可算得实验腔无氧铜段预估临界载荷<sup>[17]</sup>为  $P_{cr} = 0.2 \times 3.967 = 0.793$  MPa。

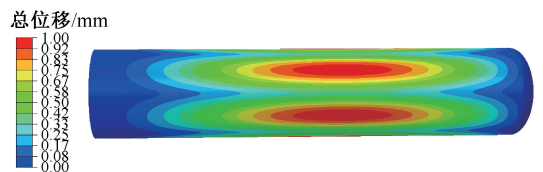


图 7 无氧铜段特征值屈曲分析应力云图

Fig. 7 Stress contour diagram of the eigenvalue buckling analysis of oxygen-free copper segment

#### 3.3.2 非线性屈曲分析

选择线性屈曲分析中一阶模态的整体变形量作为初始缺陷,比例因子取壳厚的 2%,即 0.12。采用弧长法对实验腔无氧铜段进行非线性屈曲分析。分析计算结果如图 8 所示。可以看到屈曲后实验腔无氧铜段上的最大等效应力已经超过其材料的屈服强度,材料已被破坏,结构也已经发生明显的变形,最大变形位置为无氧铜段靠近封头位置。

为了确定发生屈曲的临界载荷,取后屈曲阶段第一个可视褶皱处变形最大的节点进行处理,提取该点的位移-外压载荷系数曲线如图 9 所示。由图 9 可知:当无氧铜段的外压载荷比例因子达到 3.679 92 时,结构发生屈曲,壁面内凹坍塌,失去承

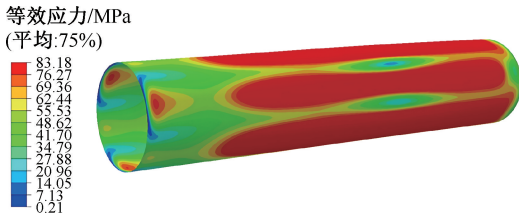


图 8 无氧铜段非线性屈曲分析应力云图

Fig. 8 Stress contour diagram of nonlinear buckling analysis of oxygen-free copper section

载能力。由此可进一步确定更接近真实情况的临界载荷为  $P_{cr} = 0.2 \times 3.680 \approx 0.736$  MPa。

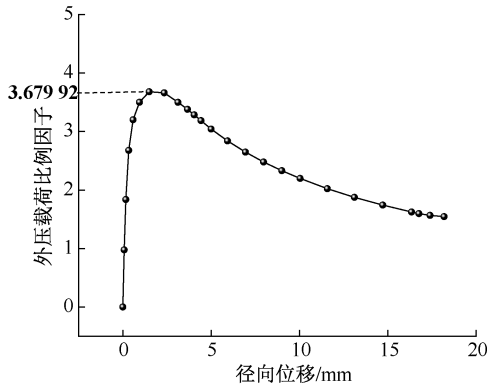


图 9 无氧铜段的径向位移-外压载荷比例因子

Fig. 9 Radial displacement-external pressure load ratio factor of oxygen-free copper section

### 3.3.3 确定许用外压

通过屈曲分析已得到实验腔无氧铜段的屈曲临界载荷  $P_{cr}$ 。该结果已经较为准确,但在实际工程应用中还要考虑结构与材料的实际不均匀性和其他不确定因素。所以为了确保结构的屈曲承载能力在安全范围内,需要引入设计系数<sup>[18]</sup>。根据《ASME 锅炉及压力容器规范》第 VIII 卷第 2 分册,对于在非线形屈曲中考虑几何非线性和材料非线性且明确地考虑了缺陷的结构,在仅考虑设计外压、静压力和自重的情况下,设计系数可以取  $\Phi_B = 2.4$ 。因此,许用外压为:

$$[P] = \frac{P_{cr}}{\Phi_B} = \frac{0.736}{2.4} \approx 0.307 \text{ MPa}$$

## 4 结构安全性评定与极限壁厚计算

### 4.1 结构安全性评定

根据《铜制压力容器标准》(JB/T4755—2006)中 4.5 章对许用应力的确定,材料许用应力取其抗拉强度的 1/3 和屈服强度的 2/3 的最小值,由此可得无氧铜的许用应力为 54 MPa,不锈钢的许用应力

为 136 MPa。以结构上最大应力和屈曲临界载荷是否满足许用应力和许用外压为依据,对前面的计算结果进行评定(表 4)。根据表 4 所示的评定结果,可以确定该低本底实验腔满足使用要求。

表 4 计算结果评定

Table 4 Calculation result evaluation			MPa
分析情况	最大等效应力/ 最大压力	许用应力/ 许用压力	是否合格
静压力模拟	16.35	54	是
地震模拟 $P_1$	77.29	136	是
地震模拟 $P_2$	75.20		是
无氧铜段	0.2	0.307	是

### 4.2 极限壁厚计算

对于如暗物质探测、双  $\beta$  衰变等稀有事例试验,实验腔材料内的长寿命放射性核素铀 238、钍 232 等是重要的本底来源之一,为提高试验的准确性须尽量减少实验腔壁厚以减少用材降低本底。因此,为尽可能满足极低本底需求,探究实验腔的极限壁厚很有必要。根据前面极限工况下的静载荷响应分析和屈曲分析过程,分别对不同厚度下实验腔铜段的应力响应情况和屈曲临界载荷进行计算,结果如图 10 所示。由图 10 可知:仅考虑静压力响应时极限壁厚可小至 1.71 mm,但结构在壁厚小于 5.1 mm 时就会发生屈曲,因此,无氧铜段的极限壁厚为 5.1 mm。

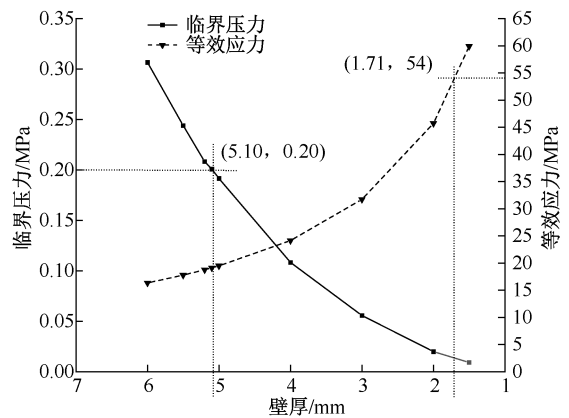


图 10 不同厚度下的最大临界压力/等效应力

Fig. 10 Maximum Critical pressure / equivalent stress at different thicknesses

## 5 结论

1) 结构安全性分析结果表明:该实验腔在极限工况、8.0 级地震下受力能满足要求,且其结构不会在试验工况下发生屈曲失稳。

2) 通过引入初始缺陷的后屈曲计算,确定实验腔铜段发生屈曲的临界外压载荷比例因子为 3.680,临界载荷为 0.307 MPa。

3) 极限工况下该尺寸的实验腔允许的极限壁厚为 5.1 mm。作为薄壁压力容器,其相较于材料破坏更容易发生结构失稳。

### 参 考 文 献

- [1] BAUDIS L. DARWIN/XLZD: a future xenon observatory for dark matter and other rare interactions [J]. Nuclear Physics B, 2024, 1003: DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2024.116473.
- [2] ABE S, ASAMI S, EIZUKA M, et al. KamLAND's search for correlated low-energy electron antineutrinos with astrophysical neutrinos from IceCube [J]. Astroparticle Physics, 2022, 143: DOI: 10.1016/j.astropartphys.2022.102758.
- [3] AKERIB D S. LUX, ZEPLIN and LUX-ZEPLIN: developments in liquid xenon detectors and the search for WIMP dark matter [J]. Nuclear Physics B, 2024, 1003: DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2024.116437.
- [4] 何绍栋, 王华新, 刘宝瑞, 等. 某大型真空容器结构稳定性分析与试验评价[J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(5):410-417.  
HE Shaodong, WANG Huaxin, LIU Baorui, et al. Structural stability analysis and test evaluation for large vacuum vessels [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2023, 43(5):410-417.
- [5] 苏靖伟, 李文杰, 朱光辉, 等. 考虑初始缺陷的 LNG 内罐稳定性分析[J]. 石油和化工设备, 2023, 26(12): 129-133.  
SU Jingwei, LI Wenjie, ZHU Guanghui, et al. Analysis of LNG inner tank stability considering initial defects [J]. Petro & Chemical Equipment, 2023, 26(12):129-133.
- [6] 段成红, 王志高, 罗翔鹏. 矩形大开孔外压薄壁圆柱壳结构稳定性研究[J]. 化工机械, 2024, 51(2):207-213, 236.  
DUAN Chenghong, WANG Zhigao, LUO Xiangpeng. Study on the stability of thin-walled cylindrical shell structure with large rectangular openings under external pressure [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2024, 51(2):207-213, 236.
- [7] 夏津, 许自然, 李微微, 等. 受内压薄壁圆筒结构非线性屈曲分析及优化设计[J]. 工业技术创新, 2023, 10(6): 28-35.  
XIA Jin, XU Ziran, LI Weiwei, et al. Nonlinear buckle analysis of thin-walled cylinder under inner pressure and optimization design [J]. Theory and Practice of New Industrialization, 2023, 10(6):28-35.
- [8] 陈志平, 焦鹏, 马赫, 等. 基于初始缺陷敏感性的轴压薄壁圆柱壳屈曲分析研究进展[J]. 机械工程学报, 2021, 57(22):114-129.  
CHEN Zhiping, JIAO Peng, MA He, et al. Advances in buckling analysis of axial compression loaded thin-walled cylindrical shells based on initial imperfection sensitivity [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(22): 114-129.
- [9] 杨繁, 王敏, 王国波, 等. 自由场地土体非线性地震响应研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(7):117-122.  
YANG Fan, WANG Min, WANG Guobo, et al. Research on nonlinear seismic responses of free-field soil [J]. China Safety Science Journal, 2014, 24(7):117-122.
- [10] 周子龙, 刘富, 王海泉, 等. 地震作用下采空区群围岩动力响应特征研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 110-115.  
ZHOU Zilong, LIU Fu, WANG Haiquan, et al. Dynamic response of surrounding rock of goaf group under seismic loading [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11):110-115.

- [11] JIANG Haiyan, JIA L P, YUE Qian, et al. Limits on light weakly interacting massive particles from the first 102.8 kg × day data of the CDEX-10 Experiment [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 120(24):DOI: 10.1103/PhysRevLett.120.241301.
- [12] 万福腾, 陈志平, 焦鹏, 等. 含初始几何缺陷薄壁圆柱壳屈曲载荷的数值模拟方法研究[J]. *压力容器*, 2017, 34(3):1-9.  
WAN Futeng, CHEN Zhiping, JIAO Peng, et al. Research on buckling load numerical method of cylindrical shells with initial imperfection [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2017, 34(3):1-9.
- [13] 葛玖浩, 李伟, 陈国明, 等. 基于 EN 13445 直接法的深海外压力容器稳定性研究和影响因素分析[J]. *压力容器*, 2015, 32(2):21-26,80.  
GE Jiuhao, LI Wei, CHEN Guoming, et al. Stability study for deep-sea external pressure vessel based on direct route method and influence factors analysis [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2015, 32(2):21-26,80.
- [14] 同志学, 郑飞, 解妙霞. 缺陷圆柱壳体外压屈曲的仿真分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2022, 54(7):64-69.  
TONG Zhixue, ZHENG Fei, XIE Miaoxia. Simulation analysis of buckling of defective cylindrical shell [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2022, 54(7):64-69.
- [15] 王涛, 陆群, 陆滨, 等. 装配式抗震支吊架地震模拟研究[J]. *价值工程*, 2023, 42(25):106-108.  
WANG Tao, LU Qun, LU Bin, et al. Research on seismic simulation of prefabricated seismic support and hanger [J]. *Value engineering*, 2023, 42(25):106-108.
- [16] 马晓飞, 于丽丽, 李玉根, 等. 有限元屈曲分析工程应用[J]. *工业锅炉*, 2023(5):29-35.  
MA Xiaofei, YU Lili, LI Yugen, et al. Engineering applications of finite element buckling analysis [J]. *Industrial Boilers*, 2023(5):29-35.
- [17] 杜坤, 左永德, 袁亮. 核电厂设备闸门外压极限承载特性研究[J]. *核动力工程*, 2020, 41(6):106-110.  
DU Kun, ZUO Yongde, YUAN Liang. Research of ultimate bearing characteristics for equipment hatch of nuclear power plant under external pressure [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2020, 41(6):106-110.
- [18] 范章, 左树春. 碟形封头在外压作用下的屈曲分析[J]. *压力容器*, 2014, 31(1):34-39,74.  
FAN Zhang, ZUO Shuchun. Buckling analysis of dished head under external pressure [J]. *Pressure Vessel Technology*, 2014, 31(1):34-39,74.

**作者简介:** 何绍祥 (1998—),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为机械结构设计与数值模拟。E-mail:969307717@qq.com。

