# 潜艇发射筒保护盖力学性能分析

## 焦冀光<sup>1</sup>,杨春<sup>2</sup>,刘文一<sup>1</sup>

(1.91550部队 91 分队, 辽宁 大连 116023; 2.北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

文章编号: 1672-9242(2017)04-0087-04

#### **Mechanical Property of Submarine Launch Canister Protection Cover**

JIAO Ji-guang<sup>1</sup>, YANG Chun<sup>2</sup>, LIU Wen-yi<sup>2</sup>

(1. Unit 91 of PLA 91550, Dalian 116023, China; 2. Beijing Institute of Astronautical System Engineering, Beijing 100076, China)

**ABSTRACT: Objective** To study mechanical properties of submarine launch canister protection cover under deepwater pressure and temperature load. **Methods** Model for mechanical and temperature load of protection cover was established. Finite-element method was used to analyze the stress, deformation, temperature distribution and thermal structure under those loads. **Results** Under deep water pressure, the deformation was 0.977 cm to 1.47 cm, the stress was 1.22 MPa ~ 7.91 MPa. Under temperature load, the deformation of the protection cover is 0.92~1.38 cm and the stress was 0.272 kPa ~ 1.26 MPa. **Conclusion** The maximum deformation of protection cover was on centre portion in two working conditions, so the structural strength of centre portion should be reinforced, otherwise it would be damaged. **KEY WORDS:** launch canister; submarine; protection cover

某潜艇发射筒保护盖由非金属材料制成,可以对 发射筒内的雷弹起到保护作用。潜艇在水下执行巡航 任务时,水深产生的压力会对保护盖结构产生静压影 响;在水面上时,筒内外温度差会对保护盖的结构产 生影响<sup>[1]</sup>。为了研究这些载荷对非金属保护盖的影 响,文中建立了温度变化模型和热结构模型,采用有 限元技术计算了保护盖在这些载荷下的应力、变形和 温度分布情况。

## 1 保护盖模型

保护盖为圆柱形壳体,整体制造,用夹紧环夹紧 保护盖下端面法兰,固定在发射筒上,且法兰上下端 面有密封圈以保证发射筒的气、水密。图1为保护盖 的三维模型和有限元模型,使用 IsoMesh 划分器,划 分为 Quad4 型单元。这样划分的原因是便于控制网格 疏密,共划分了 25 994 个单元<sup>[2]</sup>。



图 1 保护盖的及其有限元模型

保护盖为非金属材料,其性能参数:密度为 1730 kg/m<sup>3</sup>, 泊松比为 0.495, 弹性模量为 290 MPa, 导热 系数为 0.57 W/(m·K), 热膨胀系数为 3.2×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>。

## 2 保护盖内外压差对保护盖的影响

为了满足装载在发射筒内的雷弹贮存需要,发射 筒内充有一定压力的气体,发射筒位于水下时,水深 会在发射筒保护盖内外产生一定的压差,若保护盖承 压能力差,则压差有可能使保护盖失稳或破坏保护 盖,使水进入发射筒,进而使雷弹失效<sup>[3]</sup>。

#### 2.1 保护盖稳定性分析模型

在有限元方法中,线形稳定性理论通过提取使线 性系统刚度矩阵奇异的特征值来获得结构的失稳载 荷,即失稳模态。线性稳定性分析的特点是变形为小 变形,单元应力必须是弹性的,载荷引起的内部单元 力分布是不变的<sup>[4]</sup>。离散后有限元模型的屈曲分析控 制方程为:

$$\boldsymbol{K}\boldsymbol{u} = \lambda \boldsymbol{K}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{u} \tag{1}$$

式中: K 为刚度矩阵;  $K_d$  为刚度微分矩阵;  $\lambda$  为特征值; u 为特征向量。

这个方程可简化为一种标准形式求解。采用 Lanczos 法对其实特征值求解,将式(1)改写为<sup>[5-6]</sup>:

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{u}(\boldsymbol{K}-\boldsymbol{\sigma}\boldsymbol{K}_{\mathrm{d}})^{-1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{u} = \frac{1}{\lambda-\boldsymbol{\sigma}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{u}$$
(2)  
法择初始进行年晨。

$$\begin{cases} r_{1} = (\mathbf{K} - \sigma \mathbf{K}_{d})^{-1} \mathbf{K}_{d} r_{1} \\ q_{1} = r_{1} / (r_{1}^{T} \mathbf{K}_{d} r_{1})^{1/2} \\ b_{1} = 0 \end{cases}$$

$$(3)$$

依次取 *j* = 1, 2, 3, ..., 直到出现收敛的迭代根, 迭代函数为:

$$r_{j+1} = (\mathbf{K} - \sigma \mathbf{K}_{d})^{-1} \mathbf{K}_{d} q_{j} - \alpha_{j} q_{j} - \beta_{j} q_{j} - 1$$
(4)  

$$\ddagger \mathbf{h}:$$

$$\alpha_{1} = q_{j}^{T} \boldsymbol{K}_{d} (\boldsymbol{K} - \boldsymbol{\sigma} \boldsymbol{K}_{d})^{-1} \boldsymbol{K}_{d} q_{j}$$

$$\beta_{j+1} = (r_{j+1}^{T} \boldsymbol{K}_{d} r_{j+1})^{1/2}$$

$$q_{j+1} = r_{j+1} / \beta_{j+1}$$

$$(5)$$

将 $a_i$ ,  $\beta_i$ 合并为一个变换矩阵 $T_i$ , 如式 (6):

$$\boldsymbol{T}_{j} = \begin{bmatrix} \alpha_{1} & \beta_{1} & & & \\ \beta_{2} & \alpha_{2} & \beta_{3} & & \\ & \bullet & \bullet & \bullet & \\ & & & \beta_{n-1} & \alpha_{m-1} & \beta_{j} \\ & & & & & \beta_{j} & \alpha_{j} \end{bmatrix}$$
(6)

设 $\theta$ 为特征方程 $T_{js}=s\theta$ 的特征值根,则式(2)的特征值为:

$$\lambda = \sigma \frac{\theta}{1 - \theta} \tag{7}$$

因此 λ 为使线性系统刚度矩阵奇异的特征值,即 为所求保护盖的的临界压力<sup>[7]</sup>。

#### 2.2 保护盖静力分析模型

对于结构材料,可以由 Kirchoff 应力张量  $t_{ij}$ 和 Green 应变张量  $\gamma_{ij}$ 来描述其应力应变状态,它们满足 以下关系式:

$$t_{ij} = \frac{\partial W}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \gamma_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_2} \frac{\partial I_2}{\partial \gamma_{ij}} + \frac{\partial W}{\partial I_3} \frac{\partial I_3}{\partial \gamma_{ij}}$$
(8)

式中:  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  为变形张量不变量; W 为应变 能密度函数<sup>[6]</sup>。根据计算所用 C/C 材料模型,可以推 导出其主应力  $t_1$ 和主伸长比  $\lambda_1$ 之间的关系为<sup>[8]</sup>:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{2}{\lambda_1} (\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2}) (\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_2^2 \frac{\partial W}{\partial I_2}) \\ t_2 = \frac{2}{\lambda_2} (\lambda_2^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2}) (\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_1^2 \frac{\partial W}{\partial I_2}) \end{cases}$$
(9)

#### 2.3 仿真计算及结果分析

计算了发射筒在水下时,保护盖在水静压下的受力情况,得到了形变和应力,如图2所示。



从计算结果来看,在深水静压的作用下,保护盖 出现了较大的形变和应力,形变大小在0.977~1.47 cm 范围内,形变最大的地方在保护盖几何中心。应力 大小在1.22~7.91 MPa 范围内,应力最大的地方在保 护盖中部和边缘位置,在边缘位置出现了应力集中 现象。

## 3 温度对保护盖的影响

#### 3.1 热结构分析模型

当结构的内部存在温度梯度的时候,温度的变化 必然会导致结构产生膨胀或者收缩的现象。当结构的 外部存在某些约束的时候,这些变形必然会受到抑制, 此时结构内部就会存在某种应力来抵抗这些变形,这 种由于结构的温度场引起的应力叫做热应力<sup>[9]</sup>。

当结构的内部存在热应力时,结构的总应力分为 两部分:结构机械应力以及热应力<sup>[10]</sup>。由于结构的小 变形假设,因此满足线性叠加原理,那么此时结构的

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \beta_{ij} (T - T_0) = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} + \beta_{ij} \Delta T$$
(10)  
对于结构的应变可以写成。

 $\varepsilon_{ii} = s_{iikll} \sigma_{kl} + \alpha_{ii} \Delta T \tag{11}$ 

式中:  $\sigma_{kl}$ 为结构的应力分量;  $\varepsilon_{ij}$ 为结构的应变分量;  $c_{ijkl}$ 为结构的刚度系数;  $s_{ijkl}$ 为结构的柔度系数;  $\beta_{ii}$ 为结构的热模量;  $\alpha_{ii}$ 为结构的热膨胀系数<sup>[12]</sup>。

#### 3.2 仿真计算及结果分析

潜艇在巡航时,在某些海域发射筒保护盖外表面 受到阳光照射而有较高的温度,保护盖内表面则由于 雷弹贮存温度需要而保持一定的温度。这样会在保护 盖外表面产生温度差,计算得到了保护盖的温度分布 和温度梯度分布,如图 3 所示。

从计算结果来看,在保护盖下圆弧处,温度变化 较大,因而出现了较大的温度梯度。保护盖在温度载 荷作用下,会出现变形,计算得到了保护盖在温度载 荷下的形变和应力,如图4所示。



图 4 保护盖在温度载荷下的形变与应力

从计算结果来看,保护盖在温度载荷下出现了较大的形变,形变大小在 0.92~1.38 cm 范围内,形变最大的地方在保护盖几何中心。应力大小在 2.72 kPa~1.26 MPa 范围内,应力最大的地方在保护盖根部位置,在根部位置出现了应力集中现象。

### 4 结论

1) 深水静压载荷作用下,保护盖出现了较大的

形变和应力,形变大小在 0.977~1.47 cm 范围内,形 变最大的地方在保护盖几何中心。应力大小在 1.22~7.91 MPa 范围内,应力最大的地方在保护盖中 部和边缘位置,在边缘位置出现了应力集中现象。

2)太阳直射时,保护盖内外温差较大。在保护 盖下圆弧处,温度变化较大,因而出现了较大的温度 梯度。

3)保护盖在温度载荷下出现了较大的形变,形 变大小在 0.92~1.38 cm 范围内,形变最大的地方在保 护盖几何中心。应力大小在 272 kPa~1.26 MPa 范围内,应力最大的地方在保护盖根部位置,在根部位置出现了应力集中现象。

4)水压和温度载荷作用下,保护盖最大形变均 在保护盖中部,因此这个部位需加强,以防其被破坏。

#### 参考文献:

- [1] 刘文一, 焦冀光. 固体发动机装药热安全性分析[J]. 装 备环境工程, 2016, 13(2): 129—131.
- [2] MIL-STD-810G, Department of Defense Test Method Standard—Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [3] 黄树涛,周旺,宋博,等. 扭转载荷作用下熔接涂层与 基体结合界面处应力特性仿真研究[J]. 表面技术, 2017,46(1):57—58.
- [4] 高帅,曹磊,张泉,等. 金属铝表面超疏水薄膜的构筑 及减摩特性[J]. 表面技术, 2016, 45(1):76-78.

- [5] 胡建朋,刘智勇,胡山山,等. 304 不锈钢在模拟深海 和浅海环境中的应力腐蚀行为[J].表面技术,2015, 44(3):9—11.
- [6] 赵建忠, 叶文, 田建海. 舰载环境对导弹武器装备可靠 性的影响分析及对策[J]. 质量与可靠性, 2014(2): 5—9.
- [7] 刘文一, 焦冀光. 舰载环境对固体发动机装药影响分析[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(6): 80—82.
- [8] 林琳, 张熙川, 叶涛. MIL-STD-810F 低温试验方法研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2010, 28(2): 5-8.
- [9] 刘文一, 焦冀光. 某飞行器复合材料薄壁加筋结构舱 段稳定性分析[J]. 舰船电子境工程, 2016, 36(2): 110— 113.
- [10] DEF STAN 00-35, General Specification for Aircraft Gas Turbine Engines[S].
- [11] 唐荻, 赵爱民, 武会宾, 等. 板带钢轧制新技术及品种 研发进展[J]. 钢铁, 2012, 47(11): 1-47.
- [12] 石文天, 刘玉德, 张永安, 等. 芳纶纤维复合材料切削 加工研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 31—32.