

红外整流罩纯热应力分析

江宏, 林宇

(昆明物理研究所, 云南 昆明 650223)

摘要: 高速红外制导战术导弹飞行时, 气动热 (q_w) 剧烈, q_w 作用于导弹红外整流罩上, 产生的热应力 $\sigma_{\text{热}}$ 是导致整流罩热炸裂的主要因素。针对此问题, 在导弹整流罩早期研制阶段, 对于整流罩选材和能否进行下一步约束状态研究模拟整流罩固结导弹金属壳体实际工作状态, 提出一种简单快捷的判别方法, 红外整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析。将自由状态整流罩受到温度梯度 ∇T 引起的 $\sigma_{\text{纯热}}$ 从叠加位移约束 W_T 引起更大的 $\sigma_{\text{热}}$ 中剥离出来, 抛开 W_T 的影响, 单独分析较小的 $\sigma_{\text{纯热}}$, 进一步抓住引起整流罩热炸裂的主导因素。结合双色透波需求, 以硫化锌 ZnS 红外整流罩为例, 进行 $\sigma_{\text{纯热}}$ 仿真分析, ZnS 材料强度极限 σ_{max} 大于 $\sigma_{\text{纯热}}$, 判定整流罩可以进入约束状态研究。经约束 W_T 的 $\sigma_{\text{热}}$ 试验验证, 整流罩未炸裂, 佐证此方法为整流罩选材提供一种快捷判断。

关键词: 纯热应力; 快速力学判据; 自由状态, 红外整流罩

中图分类号: TN214; TJ762 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2021)03-0292-07

Infrared Dome Pure Thermal Stress Analysis

JIANG Hong, LIN Yu

(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

Abstract: When supersonic infrared guided tactical missiles fly, the infrared dome of the missile is affected by the intense aerodynamic heat. The thermal stress generated by heat is the main factor causes thermal cracking of the dome. In response to this problem, in the early development stage of the missile dome, a simple and quick method to select the dome material and whether the next restraint state can be studied is to simulate the actual working state of the solidified missile metal shell of the dome, infrared dome pure thermal stress analysis. The pure heat caused by the temperature gradient ∇T of the free state dome is separated from the larger heat caused by the superimposed displacement constraint, the smaller pure heat is analyzed separately. The leading factor causing the thermal explosion of the dome is analyzed. Combining the dual-color infrared transmission requirements, taking the zinc sulfide infrared dome as an example, the pure heat simulation is analyzed. The strength limit of ZnS material is greater than pure heat, and the dome can enter the constrained state. In the thermal test the dome did not burst, which proves that this method can be used for the selection of dome materials.

Key words: pure thermal stress, fast force judgement, freedom status, infrared dome

0 引言

随着红外制导弹速度和射程的不断提高, 加之其钝头外形^[1], 靠近红外整流罩表面的来流高马赫数空气, 特别是附面层部分受到摩擦和阻滞, 产生大量热气流, 这些热气流以对流换热形式进入红外整流罩结构, 使结构受热, 即气动加热 q_w ^[2]。 q_w 对整流罩结构有很大影响, 当其加热产生的热应力 $\sigma_{\text{热}}$ 超过整流罩

强度时, 整流罩强度极限 σ_{max} 失效 (炸裂)。这就是所谓“热障”问题^[3]。由于热障问题的主动因素是 $\sigma_{\text{热}}$, 因此, 为了缓解“热障”, 针对整流罩 $\sigma_{\text{热}}$ 展开分析, 给设计提供必要的力学参考。

目前, 有多种关于极端环境下整流罩热应力 $\sigma_{\text{热}}$ 冲击研究。兵器 209 所红外整流罩材料尖晶石 spinel 试片热震冲击^[4], 航空 014 基地的蓝宝石 sapphire 红外整流罩热应力冲击^[5], 长春光机所的氟化镁

收稿日期: 2020-12-07; 修订日期: 2021-01-31.

作者简介: 江宏 (1980-), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 光电系统工程, E-mail: 2790379510@qq.com.

通信作者: 林宇 (1972-), 男, 研究员级高级工程师, 博士生导师, 主要从事光电领域方面的研究, E-mail: lwlinyu@163.com.

(magnesium fluoride) 共形整流罩热应力分析^[6], 上海交大与航天八院半球形氟化镁红外整流罩的电弧风洞试验分区与热应力分析^[1], 美国雷神公司 (Raytheon Company) 的红外导弹整流罩驻点气动热 q_w 简化分析^[7], 美国约翰·霍普金斯大学应用物理实验室 (Johns Hopkins APL) 的蓝宝石 sapphire 红外导弹整流罩 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 驻点气动热 q_w 试验研究^[8], 美国雷神公司的红外导弹整流罩气动热 q_w 冲击综合品质因素分析^[9], 然而, 关于红外整流罩自由状态纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 的分析, 报道较少。

红外整流罩自由状态纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 的分析是一种根据热弹原理^[1-2], 为整流罩早期材料的选取和是否需要继续进行下一步整流罩约束状态的研究, 提供一种简单明了的快捷判断方法。虽然导弹飞行过程中, 整流罩处于与金属壳体的位移约束 W_T 约束状态, 并不存在自由状态的整流罩, 但是根据热弹原理^[1-2], 热应力 $\sigma_{\text{总热}}$ 分为两种, 一种是纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$, 另一种是热应力 $\sigma_{\text{总热}}$, $\sigma_{\text{总热}}$ 由于约束位移 W_T 的引入, 其值大于单纯由温度梯度 ∇T ^[1] 引起的 $\sigma_{\text{纯热}}$, 所以, 根据热应力 $\sigma_{\text{总热}}$ 的这个特性, 将 $\sigma_{\text{纯热}}$ 从热应力 $\sigma_{\text{总热}}$ 中剥离出来单独分析, 抛开 W_T 的影响。然后, 根据均匀温度场 T 均匀的 ∇T 最小, 结合 ∇T 与纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 成正比, 判断由 T 均匀引起的 $\sigma_{\text{纯热}}$ 最小, 因此, 以 T 均匀引起的 $\sigma_{\text{纯热}}$ 单独冲击自由状态整流罩, 可据此查看整流罩材料强度极限 σ_{max} 能否抵抗这种最小 $\sigma_{\text{纯热}}$, 如果能, 即 σ_{max} 大于 $\sigma_{\text{纯热}}$, 结合冯氏判据, 继续整流罩约束状态热应力 $\sigma_{\text{总热}}$ 研究; 否则, 更换 σ_{max} 更大的整流罩材料。显然, 由于不考虑 W_T 的影响, 抓住引起整流罩热炸裂的主动因素 ∇T , 所以, 红外整流罩 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析是导弹整流罩研制早期, 高效选材的一种快速力学判据 (Fast Force Judgement, FFJ)。而且, 这种方法还可用于导弹整流罩热炸裂故障诊断, 因为单从导弹整流罩热炸裂的结果看, 并不能分清是 $\sigma_{\text{总热}}$ 使得整流罩炸裂, 还是 $\sigma_{\text{纯热}}$ 令整流罩热炸裂。所以, 需要将 $\sigma_{\text{纯热}}$ 剥离出来单独分析, 分清楚究竟是单独 $\sigma_{\text{纯热}}$ 就导致整流罩炸裂, 还是叠加了位移约束 W_T 的 $\sigma_{\text{总热}}$ 所致。如果是 $\sigma_{\text{纯热}}$ 导致, 那就更换材料; 如果是 $\sigma_{\text{总热}}$, 可以调整位移约束 W_T , 为解决整流罩热炸裂提供一种办法。故, 该方法可用于诊断风洞试验中的整流罩是由于 $\sigma_{\text{纯热}}$ 导致热炸裂, 还是 $\sigma_{\text{总热}}$ 所致, 只要将均匀温度场 T 均匀 变更为试验所测的温度边界条件 T 风洞; 同理, 也可用于诊断挂飞导弹整流罩与试飞导弹整流罩的热炸裂原因, 根据诊断, 采取不同的解决方案。

此外, 针对整流罩 $\sigma_{\text{纯热}}$ 求解中, 由于其处于自由状态, 刚度矩阵 \mathbf{k} 奇异, 提出微约束 W_T 微法解决刚度

矩阵 \mathbf{k} 奇异。针对整流罩力学特征轴对称, 提出采用轴对称简化热弹方程描述整流罩 $\sigma_{\text{纯热}}$, 既突显整流罩力学特性、便于分析查看, 又节约计算资源。

1 纯热应力分析

红外整流罩纯热应力分析分为两个部分、两个关键点: 其一是整流罩材料的选择与几何外形尺寸的确定; 其二温度边界条件 T_T 的设置。一个关键点是弹性力学边界条件 W 的设置, 微约束 W_T 微法解决自由状态刚度矩阵 \mathbf{k} 奇异; 另一个关键点是纯应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析轴对称简化。

1.1 材料及几何外形尺寸

考虑到导弹红外双色制导以及抵抗气动力与气动热的需求, 整流罩材料需要较高的红外中波和长波透射率 τ 以及较高的材料强度极限 σ_{max} , 目前可供选择的典型材料有硫化锌 ZnS、硒化锌 ZnSe、CVD 金刚石, 其 2 mm 厚度的 τ 和 σ_{max} 如表 1 所示。

表 1 双色红外整流罩材料光学性能与力学性能 (厚度 2 mm)
Table 1 Double wavelength infrared dome material optical and force property

Material	Transmissivity τ	Ultimate strength σ_{max} /MPa
ZnS	Mediumwave: 72%, Longwave: 72% ^[10]	100 ^[11-12]
ZnSe	Medium wave: 74%, Long wave: 74% ^[10]	70 ^[11]
CVD Diamond	Medium wave: 71%, Long wave: 71% ^[11]	≥ 300 ^[11]

如表 1 所示, CVD 金刚石的综合指标是最好的, 但其制备大尺寸球形壳体较困难, 目前能够制备的球形壳体直径 $\phi 70$ mm, 直径超过 $\phi 120$ mm 大尺寸球形壳体制备未见报道, 而红外整流罩采用大尺寸球形壳体直径普遍超过 $\phi 120$ mm^[13], 故舍去 CVD 金刚石。比较 ZnS 与 ZnSe, 二者光学性能 τ 相似, 文献报道经过热处理后的厚度 5 mm 的 ZnS 中波与长波的平均透射率 $\tau_{\text{平均}}$ 达到 73%^[12], 厚度 6 mm 的 ZnS 中波 τ 值接近 70%, 长波 τ 值达到 72%^[13], 满足导弹红外成像制导需求^[10-11], 可以作为导弹整流罩材料。ZnS 力学性能 σ_{max} 较 ZnSe 好, 但其 100 MPa 的 σ_{max} 也不高, 难以抵抗较大应力 σ 的冲击, σ 由气动力 P 与气动热 q_w 产生。因此, 有必要分析其 P , 确定整流罩外形尺寸, 再根据气流速度 v 和整流罩外形尺寸得出气动热 q_w , 由 q_w 得出热应力 $\sigma_{\text{总热}}$, 由于 P 产生的气动应力 $\sigma_p \ll \sigma_{\text{总热}}$, σ_p 不作重点分析。综合分析光学双色透射率 τ , 力学材料强度极限 σ_{max} , 大尺寸半球壳体制备工艺三方面, 初步选择 ZnS 作为双色红外整流罩制备材料。

然后,根据气动力 P 和整流罩内部空间要求设置 ZnS 整流罩外形及尺寸,文献[14]指出,设定整流罩飞行速度 $V_{\text{飞行}} 1\sim 3\text{Ma}$ 、零攻角、高度 2.5 km,考虑整流罩必须满足 σ_{max} 大于 σ_p 和装载红外探测器转框的要求,将整流罩设置为直径 d 为 150 mm、厚度 b 为 6 mm 的半球壳体。如图 1 所示。

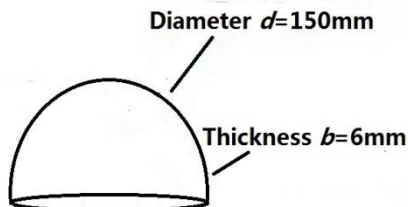


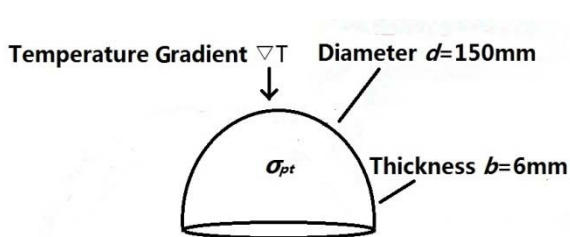
图 1 红外整流罩示意图

Fig.1 Infrared dome diagrammatic sketch

1.2 温度边界条件 T_T

整流罩根据气动力 P 设定几何外形尺寸,以此为基础,进一步分析导致整流罩炸裂的主要因素热应力 $\sigma_{\text{热}}$,为了抛开位移约束 W_T 影响,快速判断初选材料是否能用,又从热应力 $\sigma_{\text{热}}$ 剥离出主导因素纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 。单独分析自由状态下 $\sigma_{\text{纯热}}$,探索最小的 $\sigma_{\text{纯热}}$,找出既能覆盖红外探测器工作温区,同时产生的纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 最小 ($\sigma_{\text{纯热 min}}$) 的温度边界条件 T_T ,借此,以 $\sigma_{\text{纯热}}$ 中最小的 $\sigma_{\text{纯热 min}}$ 试探整流罩强度极限 σ_{max} ,查看整流罩强度极限 σ_{max} 是否大于 $\sigma_{\text{纯热 min}}$,据此判断材料的取舍。如果材料 σ_{max} 大于 $\sigma_{\text{纯热 min}}$,继续下一步约束研究;否则,换材料。整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 与热应力 $\sigma_{\text{纯热 min}}$ 示意图如图 2 所示。

考虑到整流罩由于受到气动加热 q_w 作用,其过高的温度产生的热辐射 γ 会导致红外探测器过饱和,严重时会导致盲,丧失探测功能,文献[15]指出:整流罩温度不能超过 450 K,否则会导致红外探测器过饱和。所以将整流罩最高温度设置为 450 K。根据文献[1]指出纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 由温度梯度 ∇T 决定,与之成正比,显然,温度均匀场的 $\sigma_{\text{纯热}}$ 是最小的,综合以上两点,将整流罩外壁面 $\Gamma_{\text{外壁}}$ 的温度边界条件 T_T 设置为 450 K 均匀场 $T_{\text{外均}}$ 。



同理,整流罩内壁面也设置为温度均匀场,由于整流罩密封,将其内壁面设置为室温 300 K,综合以上两点,整流罩内壁面 $\Gamma_{\text{内壁}}$ 温度边界条件 T_T 设置为 300 K 均匀场 $T_{\text{内均}}$ 。

考虑到整流罩密封,将其内部空气设置为静止状态,所以整流罩内壁面与空气的热交换设为自然对流,自然对流系数 h ,由式(1)确定^[16]:

$$h = 1.24 \left(\frac{\Delta t}{r} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

根据这个公式,将 $\Delta t = 450 - 300 = 150^\circ\text{C}$, $r = 0.069 \text{ m}$,代入计算,得到自然对流换热系数 $h = 7.12 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 。

所以,整流罩温度边界条件:外壁面 $\Gamma_{\text{外壁}}$ 为 450 K 均匀场 $T_{\text{外均}}$,内壁面 $\Gamma_{\text{内壁}}$ 为 300 K 均匀场 $T_{\text{内均}}$,内壁面 $\Gamma_{\text{内壁}}$ 与空气的热交换设为自然对流,自然对流系数 $h = 7.12 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$,由于考虑的是径向温度梯度 ∇T ,整流罩端面 $\Gamma_{\text{端面}}$ 温度边界条件 T_T 与之垂直,故,不计端面 $\Gamma_{\text{端面}}$ 温度边界条件。

1.3 微约束

1.3.1 问题分析

对于整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 的分析,由于其处于自由状态,在采用有限元计算时,刚度矩阵 \mathbf{k} 奇异。针对这个问题,从弹性力学原理分析, \mathbf{k} 奇异是由于其离散的热弹方程 TE 本身在描述整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析时,整流罩处于自由状态,也就是说,没有弹性力学边界条件 W_T 的约束,热弹方程处于自由状态 L ,其解 δ 是通解 $\delta_{\text{通}}$,不是唯一的特解 $\delta_{\text{特}}$,反应在离散的有限元方程组上,就是刚度矩阵 \mathbf{k} 奇异。

1.3.2 解决方法

根据这个分析,提出一种有别于以往采用罚函数法,加大数 C 至奇异矩阵 \mathbf{A} 对角线元素,消除 \mathbf{A} 奇异^[17]从数学层面解决 \mathbf{A} 奇异的办法——微约束法,追本溯源, \mathbf{A} 具化为物理力学中的刚度矩阵 \mathbf{k} ,根据热弹力学原理,从物理层面解决 \mathbf{k} 奇异的问题。刚度矩

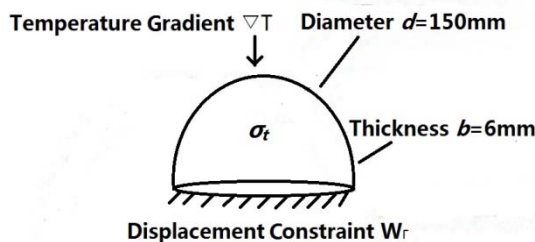


图 2 红外整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 与热应力 $\sigma_{\text{热}}$ 示意图

Fig.2 Infrared dome pure thermal stress and thermal stress diagrammatic sketch

阵 \mathbf{k} 奇异的本质原因是整流罩没有弹性力学边界条件 W_{Γ} 的约束, 要解决刚度矩阵 \mathbf{k} 奇异, 只有施加约束 W_{Γ} , 但是, 求解整流罩 $\sigma_{\text{纯热}}$ 又要求没有 W_{Γ} , 为了解决这个矛盾, 提出微约束法, 通过设置一个微小的弹性力学第一边界条件微位移约束 $W_{\Gamma\text{微}}$, 既满足弹性力学边界条件 F_{Γ} 的约束, 消除刚度矩阵 \mathbf{k} 奇异, 又保证求解整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 所必须的自由状态。即根据纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 是由于温度梯度 ∇T 引起的热膨胀 Δl 引起的, 那么根据牛顿第三定律作用力 F 与反作用力 $F_{\text{反}}$ 的互相作用在施力物体与受力物体上, 只要约束整流罩边界的施力物体置于膨胀 Δl 边缘, 此时, 受力物体整流罩的反作用力 $F_{\text{反}}$, 即 $\sigma_{\text{纯热}}$ 不能作用于施力物体, 那么, 施力物体自然不会约束整流罩, 只需将弹性力学边界条件位移约束 W 设置在整流罩受热膨胀 Δl 边缘, 由于计算误差, 位移约束 W 不可能正好等于 Δl 热膨胀, 会产生一个偏差位移 $W_{\text{偏差}}$, 这个偏差位移 $W_{\text{偏差}}$ 就是微位移约束 $W_{\Gamma\text{微}}$, 它巧妙的解决了求解整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 刚度矩阵奇异 \mathbf{k} 与自由状态之间的矛盾, 如图3所示。

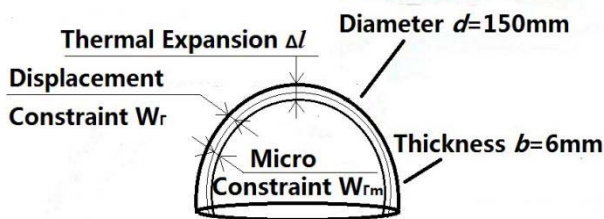


图3 微约束示意图

Fig.3 Micro constraint diagrammatic sketch

整流罩壁面位移约束 W 由式(2)确定^[18]:

$$W = \Delta l = -\alpha \Delta T r \quad (2)$$

式中: Δl 为膨胀量; α 为膨胀系数; ΔT 为温差; r 为整流罩内半径。

观察整流罩外表面 $\Gamma_{\text{外}}$, 即外壁面 $\Gamma_{\text{外壁}}$ 、内壁面 $\Gamma_{\text{内壁}}$ 、端面 $\Gamma_{\text{端}}$, 根据圣维南应力 σ 局部集中原理, $\Gamma_{\text{端}}$ 应力集中系数 ξ 最大, $\Gamma_{\text{外壁}}$ 则容易构成封闭力学结构, 影响整流罩自由状态, $\Gamma_{\text{内壁}}$ 应力集中系数 ξ 小且为开放力学结构, 在此处施加微约束, 最逼近整流罩自由状态, 所以, 选择 $\Gamma_{\text{内壁}}$ 为约束对象, 即弹性力学边界条件 W 的作用对象为 $\Gamma_{\text{内壁}}$ 。根据式(2), 将 $\alpha=6.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, $\Delta T=450-300=150\text{K}$, $r=0.069\text{m}$ 代入上式计算, 得出 $W=7.038 \times 10^{-5} \text{ m}$, 即 $\Gamma_{\text{内壁}}$ 的微约束为 $W_{\Gamma\text{微}}=7.038 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。

至此, 整流罩自由状态通过微约束法求解纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$, 同时, 又消除刚度矩阵 \mathbf{k} 奇异。微约束的对象是内壁面 $\Gamma_{\text{内壁}}$, 大小是 $W_{\Gamma\text{微}}=7.038 \times 10^{-5} \text{ m}$, 方向径

向 \bar{r} 。

1.4 轴对称

结合导弹研制早期工况零攻角设置要求, 参考上述整流罩几何外形及材料, 温度边界条件 T_{Γ} , 弹性力学边界条件位移约束 W 的设置。可以得出整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析关于整流罩子午面 ϕ 的轴对称, 包括几何外形半球壳体轴对称; 材料是均质 ZnS, 自然也是轴对称; 温度边界条件 T_{Γ} 轴对称; 弹性力学边界条件位移约束 W 轴对称, 所以, 为了抓住整流罩轴对称特性, 突显其轴对称力学特性, 给后续研究提供鲜明的力学参考, 同时, 也为了节约计算资源, 因此, 将三维整流罩纯热应力分析简化为轴对称, 由以下方程表述^[19]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\phi}}{r} + f_r &= 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\tau_{rz}}{r} + f_z &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中: σ_r 、 σ_z 、 σ_{ϕ} 为轴对称结构体径向、轴向、环向热应力; f_r 、 f_z 为径向、轴向体力, 由于结构体轴对称, 环向体力为0, 所以方程中没有环向平衡微分方程。

整流罩轴对称示意图如图4。

1.5 强度失效判据

根据冯氏应力判据, 破坏失效的发生条件是当应变能量达到其破坏值。这种情况下, 应变能量的等效应力在本文中定义如下^[20]:

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq [\sigma] \quad (4)$$

式中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 为主应力, Pa; $[\sigma]$ 为许用应力, MPa。针对 ZnS 红外整流罩, $[\sigma]$ 就是 ZnS 的材料强度极限 σ_{max} , 其值为 100 MPa。

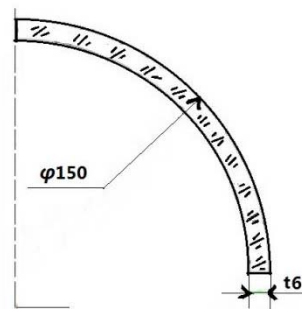


图4 整流罩轴对称示意图

Fig.4 The schematic diagram of dome axial sketch

在各向同性体之中, 应变与应力主向是重合的, 此时, 主应力与 σ_r 、 σ_z 、 σ_{ϕ} 与 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 是相等的^[19], 也就是说, 求出 σ_r 、 σ_z 、 σ_{ϕ} , 代入冯氏应力判据, 可以判断应力破坏失效。

2 物理模型

根据以上分析讨论,以 Ansys17 为纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析平台,采用 APDL (ANSYS Parameter Design Language) 语言编写红外整流罩纯热应力分析物理模型。据此,得到 ZnS 能否用于设定边界条件下整流罩的选材判据以及开展下一步约束研究的依据,同时,验证红外整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析是一种高效快捷的力学判断方法。

2.1 ZnS 热物性参数

温度场热导率 λ 是热弹计算中重要的物性参数, λ 描述物质导热能力的高低, λ 的确定非常重要,工程计算中用到的 λ 数值通过专门实验测定。ZnS 的热物性参数如表 2 所示。

表 2 ZnS 热物性参数

Table 2 ZnS thermal properties of matter parameter

Elasticity	Coefficient of	Poisson	Thermal
E(GPa)	Linear expansion	Ration	conductivity
	α ($10^{-6}/K$)	μ	$\lambda(W/m\cdot K)$
96.46 ^[13]	6.8 ^[21]	0.3 ^[13]	17 ^[7]

2.2 计算与分析

根据红外整流罩的几何尺寸及外形、温度边界条件 T_{Γ} 、弹性力学边界条件 W 的讨论与分析,以及 ZnS 热物性参数的分析,得出 ZnS 红外整流罩物理模型,根据物理模型,以 Ansys17 为计算平台,采用 APDL 编程计算得出整流罩纯热应力,并展开分析。

1) 模型描述

几何尺寸及外形:直径 $\phi 150\text{mm}$,厚度 b 为 6mm 的半球形壳体;轴对称简化;

温度边界条件:外壁面 $\Gamma_{\text{外壁}}$ 为 450K 均匀场 $T_{\text{外均}}$,内壁面 300K 均匀场 $T_{\text{内均}}$,自然对流换热,换热系数 $h=7.12\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{C}$,端面不施加温度边界条件;轴对称简化;

弹性力学边界条件:微约束 $W_{\Gamma_{\text{微}}}$,内壁面 $\Gamma_{\text{内壁}}$ 位移约束 $W_{\Gamma_{\text{微}}}=7.038\times 10^{-5}\text{m}$,轴对称简化;

2) 力学分析单元与网格划分

有限元建模分析采用 Ansys17,选择 APDL 语言建模,并选择相应的轴对称热分析单元 PLANE55 进行求解,为确保应力计算符合有限元单元体内应力一致性,采用放射式划分,即内壁密实,外壁松弛。选择与热分析单元 PLANE55 对应的结构分析单元 PLANE42 计算纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 。

3) 结果与分析

根据上述有限元模型讨论分析,编写 APDL 程序制作出纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 有限元模型,求解、计算出温度

场 T 与纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$,其等温分布图 5 可知,在整流罩外壁面 $\Gamma_{\text{外壁}}$ 温度边界条件 $T_{\text{均匀}}=450\text{K}$ (180C)均布加载下,温度场 T 的温度梯度 ∇T 沿径向逐层递减分布, T 最低处为内壁面 $\Gamma_{\text{内壁}}$,温度 179.6C ,各层温度均匀分布。

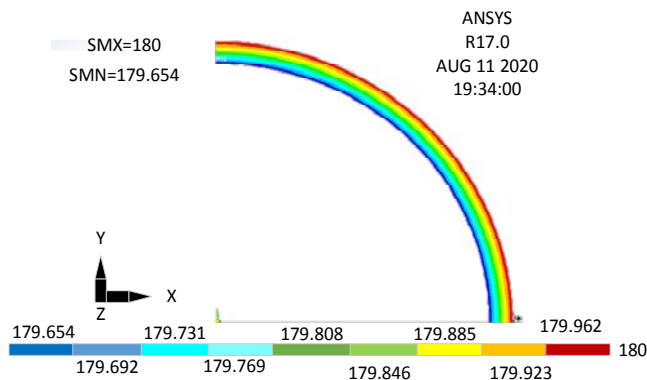


图 5 整流罩等温分布图

Fig.5 Dome isotherm to be distributed graph

纯热应力计算结果如图 6 所示,剔除轴对称设置引起的少数计算应力 $\sigma_{\text{计算}}$ 尖锐点,整流罩的 $\sigma_{\text{纯热}}$ 基本均布,纯热应力值 $\sigma_{\text{纯热}}$ 为 30MPa ,小于 ZnS 材料强度极限 σ_{max} 的 100MPa (根据 1.4,冯氏应力判据)。

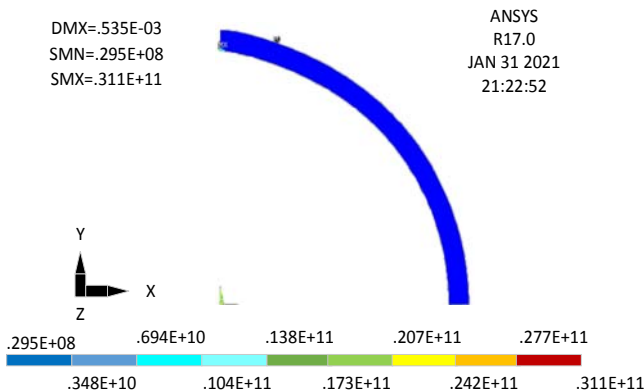


图 6 整流罩等应力分布图

Fig.6 Dome isostress to be distributed graph

综合上述模型热应力计算结果和分析,自由状态下的 ZnS 红外整流罩, 450K 温度载荷均布加载,不会导致整流罩炸裂 $\sigma_{\text{纯热}}$ 失效。也就是说,自由状态下的整流罩可以抗住最高温度 450K 、以及内外表面最大温差 150K 的热冲击。覆盖整流罩内红外探测器工况温差 150K 。

3 试验证明

根据 2.2 节 ZnS 整流罩物理模型纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析得出, $\sigma_{\text{纯热}}$ 小于 σ_{max} ,可以开展下一步约束状态研究,采用与 ZnS 整流罩物理模型相同外形尺寸与热物性

参数的整流罩实体,开展温度边界条件包络 300~450 K 的约束状态下热应力 $\sigma_{\text{热}}$ 冲击试验,试验结果表明整流罩并未产生热炸裂,即 $\sigma_{\text{热}}$ 小于 σ_{max} ,如图7所示。



图7 ZnS 整流罩约束 $\sigma_{\text{热}}$ 冲击实物图

Fig.7 ZnS Dome to be shocked by $\sigma_{\text{热}}$ object graph

根据热弹原理^[1-2], ZnS 红外整流罩自由状态的 $\sigma_{\text{纯热}}$ 小于其约束状态整流罩的 $\sigma_{\text{热}}$,结合试验结果 $\sigma_{\text{热}}$ 小于 σ_{max} ,根据不等式传递性,得出 $\sigma_{\text{纯热}}$ 小于 σ_{max} ,与模型计算结果 $\sigma_{\text{纯热}}$ 30MPa 小于 σ_{max} 100MPa 匹配,由此佐证了红外整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析的正确性。同时,也验证了红外整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析可为导弹整流罩早期选材研究提供一种快速判据。

4 结论

针对红外整流罩热炸裂 σ_{max} 失效,从其主要因素热应力 $\sigma_{\text{热}}$ 中剥离出纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析,抓住 $\sigma_{\text{纯热}}$ 在 $\sigma_{\text{热}}$ 中的主导性,高效、简单、快捷地指出初步选择的整流罩材料是否能用,是一种红外整流罩研制早期的快速力学判断方法。

1) ZnS 整流罩物理模型纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 为 30 MPa,小于其材料 ZnS 强度极限 $\sigma_{\text{max}}=100$ MPa,不必更换材料,可以开展下一步约束状态研究来模拟整流罩固结与导弹金属壳体的实际工作状态。在约束状态研究中,与模型相同的实体 ZnS 整流罩在 $\sigma_{\text{热}}$ 的冲击下,并不炸裂,即 $\sigma_{\text{热}}$ 小于 σ_{max} ,结合热弹原理 $\sigma_{\text{纯热}}$ 小于约束状态的 $\sigma_{\text{热}}$,根据不等式传递性,得出 $\sigma_{\text{纯热}}$ 小于 σ_{max} ,与模型计算结果 $\sigma_{\text{纯热}}$ 30 MPa 小于 σ_{max} 100 MPa 匹配,由此佐证了红外整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析的正确性。而且,30 MPa 的 $\sigma_{\text{纯热}}$ 与 100 MPa 的 $\sigma_{\text{纯热}}$ 相比较,占比 η 达到 30%,验证了 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析在整流罩早期研制中,可作为一种选材和开展下一步研究的快速力学判据。

2) 为了支撑纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析的快速判断,根据 $\sigma_{\text{纯热}}$ 由温度梯度 ∇T 决定且成正比的理论,提出采用 ∇T 最小的温度均匀场 $T_{\text{均匀}}$ 来试探整流罩材料强度极限 σ_{max} 的承受力,并且, $T_{\text{均匀}}$ 应覆盖红外探测器工作温区。

3) 从物理层面,提出微约束法解决整流罩自由状态求解纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 刚度矩阵 \mathbf{k} 奇异的问题,有别于

以往数学层面的罚函数大数矩阵法,更贴近力学边界条件。

4) 针对红外整流罩轴对称特性,根据弹性力学原理,提出以轴对称方式简化三维分析,既凸显整流罩力学分析的主要特质,又节约计算资源。

5) 红外整流罩纯热应力 $\sigma_{\text{纯热}}$ 分析还可以为后续的整流罩热炸裂提供故障诊断判据,也就是分清是 $\sigma_{\text{纯热}}$ 导致热炸裂,还是叠加位移约束 W_T 所致,方便采取不同的应对策略,做到有的放矢,减少无效工作。

参考文献:

- [1] 李建华,郭常宁,许泉,等. 红外空空导弹头罩热应力分析[J]. 强度与环境, 2012, 39(2): 46-52.
LI Jianhua, GUO Changning, XU Quan, et al. Thermal stress analysis for the dome of the infrared air-to-air missile[J]. *Structure & Environment Engineering*, 2012, 39(2): 46-52.
- [2] 徐建,蒋军亮,王琦,等. 头罩热试验中加热及加载技术的应用与研究[J]. 结构强度研究, 2009(4): 28-31.
XU Jian, JIANG Junliang, WANG Qi, et al. Application and research for the heating and loading technology in the dome thermal experiment[J]. *Structure and Strength Research*, 2009(4): 28-31.
- [3] 范绪箕. 高速飞行器热结构分析与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
FAN Xuji. *Thermal Structures Analysis and Applications of Highspeed Vehicles*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.
- [4] 赵红卫,侯天晋,朱斌. 尖晶石整流罩气动效应的试验研究[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 298-303.
ZHAO Hongwei, HOU Tianjin, ZHU Bin. Experimental research of aerodynamic effects of spinel domes[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 298-303.
- [5] 殷胜昔,楚建新. 蓝宝石整流罩与金属弹体新型的连接方法研究[J]. 航空精密制造技术, 2010, 46(1): 54-57.
YIN Shengxi, CHU Jianxin. Joining of sapphire dome and metal housing[J]. *Aviation Precision Manufacturing Technology*, 2010, 46(1): 54-57.
- [6] 姜振海. 超音速共形导引头整流罩热流固耦合[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
JIANG Zhenhai. Thermal-fluid-structure coupled analysis of the supersonic conformal dome[D]. Changchun: Institute of optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [7] Claude A. Klein. Infrared Missile Domes: Heat Flux and Thermal Shock[C]//*SPIE High Heat Flux Engineering II*, 1993, 1997: 150-169.
- [8] Jeffrey S. Lin, Louis B. Weckesser. Thermal Shock Capabilities of Infrared Dome Materials[J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1992,

- 13(3): 379-385.
- [9] Claude A. Klein. Infrared Missile Domes: Is there a Figure of Merit for Thermal Shock[C]//*SPIE Window and Dome Technologies and Materials III*, 1992, **1760**: 338-357.
- [10] 王曼霞, 赵稼祥. 国外红外材料的现状与展望[J]. *宇航材料工艺*, 1996, **3**: 1-7.
WANG Manxia, ZHAO Jiexiang. The Present Status and Further Development of IR Materials Abroad[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1996, **3**: 1-7.
- [11] 段萌, 张运强, 潘国庆. 超声速长波红外整流罩材料研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2016, **45**(12): 2883-2889.
DUAN Meng, ZHANG Yunqiang, PAN Guoqing. Research progress of supersonic LWIR dome Materials[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2016, **45**(12): 2883-2889.
- [12] 甘硕文, 杨勇, 廉伟艳, 等. 热压硫化锌后处理改性研究及其高温特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2015, **44**(8): 2435-2439.
GAN Shuowen, YANG Yong, LIAN Weiyan, et al. HP ZnS after Treatment Research and Its High Temperature Analysis[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, **44**(8): 2435-2439.
- [13] 余怀之. *红外光学材料* [M]. 第2版, 北京: 国防工业出版社, 2015.
YU Huaizhi. *Infrared Optical Material*[M]. 2nd Edition, Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [14] 张云, 王淑岩, 孔益善, 等. 超音速状态下整流罩红外窗口的选型问题研究[J]. *红外技术*, 1999, **21**(4): 786-790.
ZHANG Yun, WANG Shuyan, KONG Yishan, et al. Research for selected model problem of dome infrared window under the supersonic condition[J]. *Infrared Technology*, 1999, **21**(4): 786-790.
- [15] 张天, 魏群, 王超, 等. 氟化镁共形整流罩热障效应分析与试验[J]. *红外与激光工程*, 2016, **45**(2): 213-217.
ZHANG Tianyi, WEI Qun, WANG Chao, et al. Thermal barrier effect analysis of magnesium-fluoride conformal dome and the experimental validation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, **45**(2): 213-217.
- [16] 钱滨江, 伍贻文, 常家芳, 等. *简明传热手册*[M]. 北京: 高等教育出版社, 1983.
QIAN Bingjiang, WU Yiwen, CHANG Jiafang, et al. *Concise handbook for thermal*[M]. Beijing: Higher Education Press, 1983.
- [17] T. R. 钱德拉佩特拉, A. D. 贝莱冈度. 曾攀, 雷丽萍译. *工程中的有限元法*[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
Chandrupatla T R, Belegundu A D. ZENG Pang, Lei Liping, translate. *Introduction to Finite Elements in Engineering*[M]. Beijing: Machine Industry Press, 2014.
- [18] 洪晶. *固体的力学和热学性质*[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980: 40-44.
HONG Jing. *Mechanical and Thermal Property of Solid*[M]. Beijing: People's Education Press, 1980: 40-44.
- [19] 徐芝纶. *弹性力学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016: 224-230.
XU Zhilun. *Elasticity*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016: 224-230.
- [20] LIU Yuanchun, HE Yurong, YUAN Zigui, et al. Numerical and experimental study on thermal shock damage of CVD ZnS infrared window material[J]. *J. Alloys and Compounds*, 2014, **589**: 101-108.
- [21] 谢启明, 李奕威, 潘顺臣. 红外窗口和整流罩材料的发展和应用[J]. *红外技术*, 2012, **34**(10): 559-567.
XIE Qiming, LI Yiwei, PAN Shunchen. The Development and Applications of IR Windows and Domes Materials[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(10): 559-567.