

DOI: 10.7511/jslx20230210002

烧蚀型热防护系统概率设计与 可靠性评估方法研究

张睿¹, 祝文祥¹, 张澳², 侯望翌¹, 宋树丰¹,
刘许盼¹, 李晨光³, 赵月⁴, 张凯⁴, 姚建尧^{*1}

(1. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044; 2. 西安航天动力研究所, 西安 710100;
3. 航天材料及工艺研究所, 北京 100076; 4. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 为在保障热防护系统可靠性的前提下减轻重量, 本文建立考虑多源不确定性的烧蚀型热防护系统的概率设计和可靠性评估方法。采用有限元方法计算系统热响应, 通过试验测试与数值模型对比验证方法的有效性。并构建热防护系统的不确定性输入参数与目标输出的代理模型, 基于代理模型与蒙特卡洛方法进行热防护系统目标变量的概率特性分析。采用 Sobol 指标对不确定性参数进行灵敏度分析, 并以系统可靠性为指标进行概率设计。该方法针对来流、几何以及材料属性等多源不确定性进行热防护系统的概率设计与可靠性评估, 以二维平板模型为例, 计算热防护系统最高背温的概率特性以及不确定性参数的灵敏度, 得到了不同涂层厚度情况下系统的可靠性。结果表明, 与安全系数 $n=1.5$ 的设计相比, 概率设计减重达到 24%。

关键词: 烧蚀型热防护系统; 不确定性; 代理模型; 概率设计; 可靠性评估

中图分类号: V231.1; O213.2

文献标志码: A

文章编号: 1007-4708(2024)04-0762-07

1 引言

热防护系统是高超飞行器最为关键的子系统之一^[1,2], 其主要功能是在严酷的气动加热环境下保障系统的结构完整性和舱体内部的温度条件。因此, 热防护系统的安全性和可靠性对飞行任务的成功与否具有至关重要的作用。

航天飞行器选择的隔热方法主要取决于其进入大气层时的环境热流条件, 通常采用辐射式、吸热式和烧蚀式等^[3]。近年来, 高性能陶瓷瓦、陶瓷盖板式及金属式等隔热承载一体化热防护结构也得到了广泛的应用^[4]。其中, 烧蚀型隔热具有安全可靠、适应流场变化能力强等突出优势, 广泛应用于再入弹头、飞船返回舱以及其他飞行器大面积隔热等领域。烧蚀型热防护系统在工作过程中涉及到烧蚀、热解、传热等复杂的物理/化学变化过程, 是典型的多学科交叉问题。国内外学者对热防护材料烧蚀过程的数值仿真^[5-7]和试验方法^[8-11]进行

了深入的研究, 为烧蚀型热防护系统的设计奠定了坚实的基础。

在热防护系统的设计、加工制造和服役过程中, 总是不可避免地存在各类不确定性, 包括材料热物理性能和热化学性能的分散性、热防护系统几何偏差、弹道偏差、载荷环境不确定性、建模分析误差以及其他未知的不确定性等^[1,12]。为保障系统的安全性和可靠性, 传统的热防护系统设计方法中往往通过安全系数来考虑诸多不确定性对系统热响应的影响。然而单纯基于安全系数的设计方法并未区分不同类型的确定性对热响应分散性的贡献, 导致设计结果往往偏于保守; 同时, 由于未能识别对系统性能影响最为显著的设计参数或不确定变量, 在某些情况下会导致设计存在风险。

近年来, 随着材料性能、设计水平和计算能力的不断提升, 国内外学者和工程人员对热防护系统的概率设计分析和可靠性评估方法开展研究。美国 NASA 针对火星实验室 MSL (Mars Science La-

收稿日期: 2023-02-10; 修改稿收到日期: 2023-04-02.

基金项目: 基础研究项目群(514010103-202-2)资助项目.

作者简介: 姚建尧* (1981-), 男, 博士, 教授 (E-mail: yaojianyao@cqu.edu.cn).

引用本文: 张睿, 祝文祥, 张澳, 等. 烧蚀型热防护系统概率设计与可靠性评估方法研究[J]. 计算力学学报, 2024, 41(4): 762-768.
ZHANG Rui, ZHU Wen-xiang, ZHANG Ao, et al. Probabilistic design and reliability assessment methods for ablative thermal protection systems[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(4): 762-768.

boratory)的烧蚀型热防护系统的概率设计进行了研究^[12-14],考虑了再入火星大气层时弹道不确定性、气动热环境不确定性和材料属性不确定性等,提出了基于概率的热防护涂层厚度设计方法流程。数值模拟和分析结果表明,采用概率设计后,热防护系统的厚度可由2.29英寸降低为1.39英寸,降幅达到40%,收益非常可观。欧洲也有学者对考虑不确定性烧蚀分析^[15,16]与热防护系统设计^[17]开展研究。

中国学者和工程技术人员也对热防护系统的概率设计分析开展了系统性的研究。文献[1,2]分别以非烧蚀的刚性陶瓷和辐射式热防护系统为对象,在考虑材料属性分散性、系统厚度等不确定性的情况下,给出了热防护系统概率设计和可靠性评估的流程。邓诗圆等^[18]给出了基于重要抽样的热可靠性评估方法,有效解决了蒙特卡洛法对于低失效概率问题分析效率过低的问题。Zhang等^[19]基于Karhunen-Loève展开对气动热载荷的随机过程进行表征,在考虑热载荷、材料性能、几何参数等3类不确定性的情况下,建立了系统热响应预测的代理模型,并对多层式非烧蚀热防护系统进行了概率分析。

尽管近年来热防护系统的概率设计方法研究取得了长足的进步,但仍存在对不确定考虑不够全面和不确定性量化不够准确等问题,概率设计和可靠性评估的方法也需要进一步完善。

针对烧蚀型热防护系统的概率设计和可靠性评估问题,本文首先给出系统热响应预测的数值模型,并对其进行验证。在此基础上,给出基于代理模型的系统热响应概率分析流程和灵敏度分析方法,形成概率设计和可靠性评估方法。最后通过典型算例证明了本文方法的有效性。

2 烧蚀型热防护系统的数值建模及验证

2.1 烧蚀/传热有限元建模方法

炭化烧蚀材料在加热到一定温度时,发生热解反应生成热解气体,留下多孔的炭层,形成原始层、热解层和炭化层等多层结构如图1所示。热响应过程涉及热传导、热解反应和热解气体流动等耦合现象^[20]。

热传导方程可表示为

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} \right) + Q \quad (1)$$

式中 ρ 为材料密度, c_p 为材料比热, λ 为导热系数, Q 为热源项, t 为时间, T 为温度, \mathbf{n} 为方向。

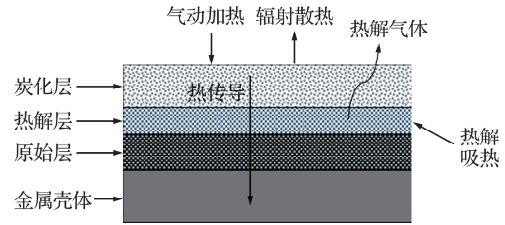


图1 热解烧蚀模型
Fig.1 Pyrolytic ablation model

热解状态下的材料参数,如热导率可视为从原始状态线性到炭化状态

$$\lambda = \lambda_v - \alpha (\lambda_v - \lambda_c) \quad (2)$$

下标 v 和 c 分别表示原始和炭化状态下的参数, α 为广义密度

$$\alpha = (\rho_v - \rho) / (\rho_v - \rho_c) \quad (3)$$

热解反应基于阿伦尼乌斯方程定义

$$\dot{\rho} = -A \rho_v^{1-N} (\rho - \rho_c)^N e^{-E/(RT)} \quad (4)$$

式中 A 为反应频率, E 为活化能, N 为反应阶数, R 为气体常数。材料热解反应对热源的影响如下

$$Q = -\dot{\rho} H_p \quad (5)$$

式中 H_p 为单位质量的热解热。

气体流动基于达西定律给出

$$\dot{m}^g = -K_p \nabla P \quad (6)$$

式中 \dot{m}^g 为气体质量流量, K_p 为气体扩散系数,热解气体流动对热源的影响如下

$$Q = -\dot{m}^g \nabla h^g \quad (7)$$

热解气体流入边界层还会起到热阻塞效应,减少的气动热流为

$$q_{n2} = \eta_2 \dot{m}^g (h_r - h_w) \quad (8)$$

式中 η_2 为热解气体的热阻塞因子, h_r 为边界层气体恢复焓, h_w 为气体壁面焓值。

本文对炭化烧蚀的热响应求解采用 SAMCEF-Thermal/Amaryliss 模块,基于有限元方法进行数值求解。

2.2 材料属性的测试方法及测试数据

本文依据标准 GB/T 22588-2008 测量热导率^[21];依据标准 GB 4472-84 测量密度^[22];依据标准 NB/SH/T 0632-2014 测定比热容^[23],测得相关数据列入表1。

表1 测试数据

Tab.1 Test data

参数	数值	
温度/℃	100	300
原始密度/kg·m ⁻³	507	
原始比热容/kJ·(kg·K) ⁻¹	1.7641	
原始热导率/W·(m·K) ⁻¹	0.093	0.101
炭化密度/kg·m ⁻³	305	
炭化比热容/kJ·(kg·K) ⁻¹	1.4698	
炭化热导率/W·(m·K) ⁻¹	0.069	0.088

2.3 数值模型的校验

通过硅橡胶涂层材料的平板烧蚀试验与数值模拟结果对比验证该数值模型的有效性。试验方法采用石英灯加热,涂层材料的厚度为 3 mm,壳体材料为 TC4,厚度均为 2 mm。试验时长为 833.5 s,给定热流载荷如图 2 所示。材料烧蚀前后状态如图 3 所示,烧蚀后产生约 0.5 mm~1 mm 的炭化层,且强度高、结合力好、无脱落现象,基于炭化层的性质在数值模型中不考虑表面烧蚀现象。

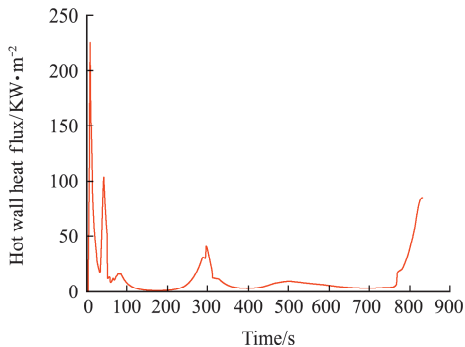


图 2 试验加载热流密度曲线
Fig. 2 Hot wall heat flux of test

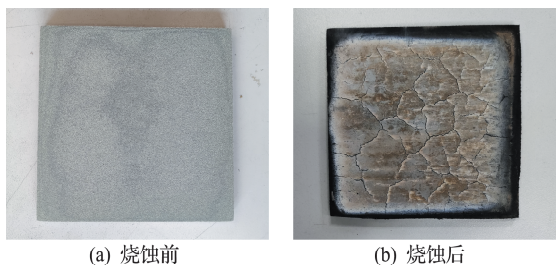


图 3 涂层材料烧蚀前后的状态
Fig. 3 State of coating material before and after ablation

如图 4 所示采用二维网格模型简化,材料属性基于上述测试方法和相关文献给出,部分参数值列入表 2 和表 3,底部设置为对流散热边界条件。试验与数值模型的背温结果如图 5 所示,可以看出,数值模拟与试验结果基本吻合,对数值计算与试验结果进行误差分析

$$e_2 = \|T_{sam} - T_{test}\|_2 / \|T_{test}\|_2 \quad (9)$$

式中 e_2 为 2 范数全局相对误差, T_{sam} 和 T_{test} 分别为数值仿真与试验结果向量,取 $t=1, 2, \dots, 833(s)$ 的温度值。得到相对误差不超过 5.6%,可证明该数值模型对炭化烧蚀热响应计算的有效性。

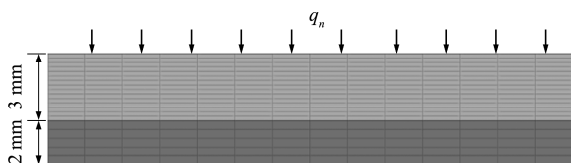


图 4 二维平板有限元网格模型
Fig. 4 2D plate finite element mesh model

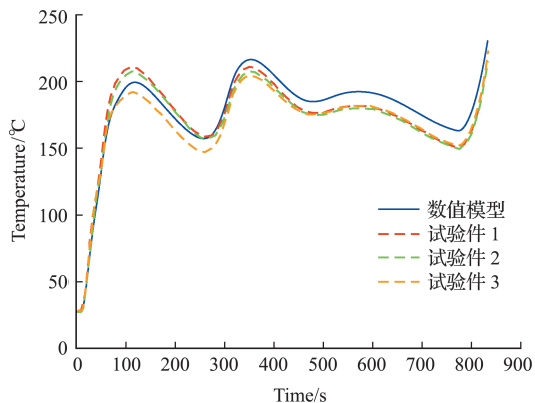


图 5 试验与数值模型背温结果
Fig. 5 Experimental and numerical model back temperature result

表 2 材料属性
Tab. 2 Material property

材料参数	数值
TC4 密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	4440
原始孔隙率	0.1
炭化孔隙率	0.7
反应阶数	2
反应频率/ s^{-1}	1832.24
活化能/ $\text{kJ} \cdot \text{kmol}^{-1}$	6.2e4
热解热/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	50
渗透率/ m^2	7.13e-13
热解气体摩尔质量/ $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$	40
动力学粘性系数/ $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$	0.0001
热解气体阻塞因子 η_2	0.5

表 3 材料属性
Tab. 3 Material property

温度/ $^{\circ}\text{C}$	TC4 热导率/ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	TC4 比热容/ $\text{kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$
20	6.8	0.611
100	7.4	0.624
200	8.7	0.653
300	9.8	0.674
400	10.3	0.691
500	11.8	0.703

3 烧蚀型热防护系统概率设计分析

针对来流条件、材料属性和几何尺寸等多源不确定性,基于代理模型、可靠性评估和灵敏度分析对烧蚀型热防护系统进行概率设计。

3.1 系统概率设计分析流程

本文基于代理模型的热防护系统概率设计分析流程如图 6 所示。

- (1) 初步设计所需的相关参数。
- (2) 对不确定性参数进行量化表征。
- (3) 进行气动热以及烧蚀热响应计算生成少量确定性样本。
- (4) 基于少量样本构建代理模型。

- (5) 代理模型精度校验。
- (6) 通过代理模型进行大量样本计算。
- (7) 基于大量的数据进行热防护系统的可靠性评估以及不确定性参数的灵敏度分析。

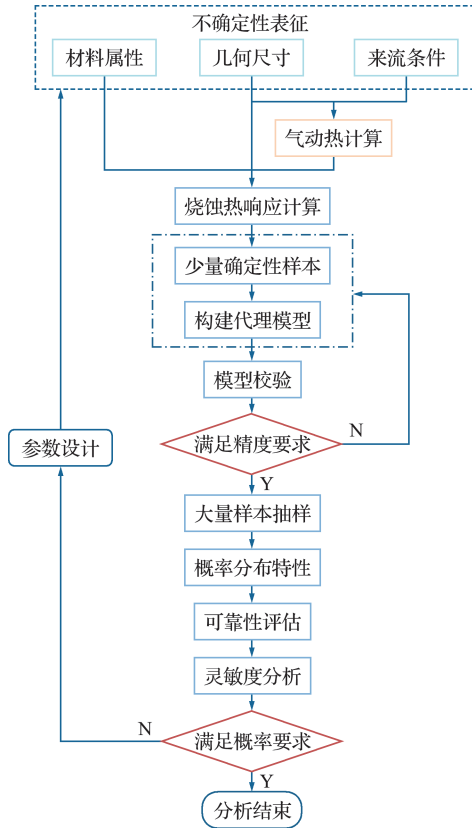


图6 热防护系统的概率设计流程
Fig.6 Probabilistic design process for thermal protection systems

可靠性要求应设置为一个范围,过低说明可靠性不足,过高则说明裕度过大,需要减少尺寸以减轻系统重量。本文采用工程算法进行气动热计算,对于求解简单外形的气动加热具有计算效率高并满足一定精度的优势^[24]。本文代理模型初步采用GPR模型,该方法基于统计学习理论和贝叶斯理论发展构造,适用于高维度、小样本和非线性回归问题^[25]。代理模型的校验评估采用留出法, R^2 指标评价精度,

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_s} (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n_s} (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (10)$$

式中 n_s 为测试样本的数量, y_i 为测试样本数值, \bar{y}_i 为样本均值, \hat{y}_i 为代理模型预测值。

采用 Sobol 指数进行灵敏度分析,该方法基于方差的全局敏感性进行分析^[26]。具体计算方法可通过抽样生成样本矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} , 构建矩阵 \mathbf{A}_B^i ($i=1,2,\dots,N$), \mathbf{A}_B^i 的第 i 列等于矩阵 \mathbf{B} 的第 i 列,其余列为矩阵 \mathbf{A} 的列向量。则 Sobol 一阶和总效应指数计算公式为

$$\text{Var}(Y) = \text{Var}(f(A) + f(B)) \quad (11)$$

$$V_i \approx \sum_{j=1}^N f(B)_j (f(A_B^i)_j - f(A)_j) / N \quad (12)$$

$$S_i = V_i / \text{Var}(Y) \quad (13)$$

$$V_{\sim i} \approx \sum_{j=1}^N (f(A)_j - f(A_B^i)_j)^2 / 2N \quad (14)$$

$$S_{Ti} = V_{\sim i} / \text{Var}(Y) \quad (15)$$

3.2 系统不确定性的表征与参数化

来流的不确定性考虑静温、密度和速度,偏差范围为 $\pm 15\%$, 抽样生成三组标准差为 0.05 的样本数据。对弹道数据中的速度列施加来流速度的不确定性,静温和密度通过修改标准大气模型的方法施加不确定性。材料属性的不确定性参数及其分布规律根据测试分析得到,不考虑材料参数之间的关联性。假设参数分布服从截断正态分布,范围为 $\pm 10\%$ 。几何尺寸主要包括壳体尺寸以及涂层厚度的不确定性,假设均服从截断正态分布,通过试验测量获得相应的均值与标准差,通过网格变形程序进行参数化建模。

3.3 可靠性评估方法

基于经典的应力-强度干涉理论进行可靠性评估,本文广义应力为系统最高背温,其分布特性通过大量样本计算得到,假设热强度为 150°C ,如图7所示。则系统的失效概率即为阴影部位面积记为 P_f ,系统的可靠性定义为

$$R = 1 - P_f \quad (16)$$

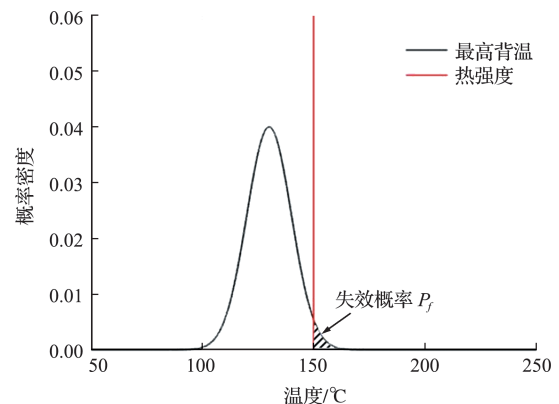


图7 可靠性评估
Fig.7 Reliability assessment

4 热防护系统概率设计案例

以二维平板的热防护涂层厚度设计为例,材料属性如上文所述,壳体厚度 2 mm。最高背温随涂层厚度变化的结果如图8所示。涂层厚度至少为 6.25 mm,初步设计为 6.5 mm,可靠性范围设置为 99.99%~99.999%。

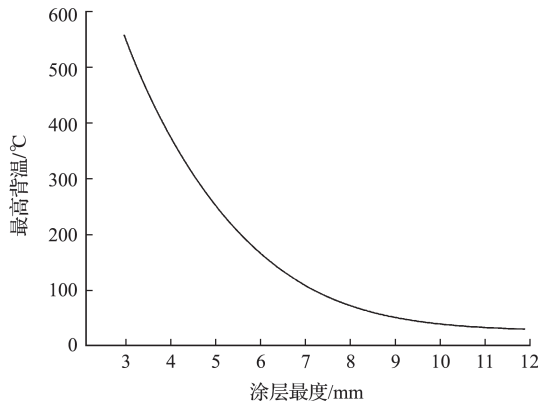


图8 最高背温随涂层厚度变化

Fig. 8 Maximum back temperature varies with coating thickness

4.1 热防护系统不确定性

来流条件的不确定性如 3.1 节所示;材料属性的不确定性参数列入表 4。几何尺寸的不确定性参数为涂层材料厚度和壳体厚度,标准差均为 1×10^{-4} mm。

表4 材料属性的不确定性

Tab. 4 Uncertainty of material properties

不确定性参数	不确定度 $\Delta = \sigma / X_{\text{mean}}$	不确定性参数	不确定度 $\Delta = \sigma / X_{\text{mean}}$
原始材料密度	0.00973	炭化材料孔隙率	0.04
原始材料热容	0.05	热解热	0.075
炭化材料密度	0.01212	原始材料热导率	0.05
炭化材料热容	0.10185	炭化材料热导率	0.05

4.2 系统热响应的概率分布特性

抽样生成 100 组样本进行确定性计算,以最高背温为目标输出。采用 50 组样本数据构建代理模型,剩余 50 组样本作为校验数据,模型精度 $R^2 = 0.9874$ 。再次抽样方法生成 1×10^6 组样本,基于代理模型快速计算,输出响应均值为 134.55°C ,标准差为 13.69,概率分布特性如图 9 所示。

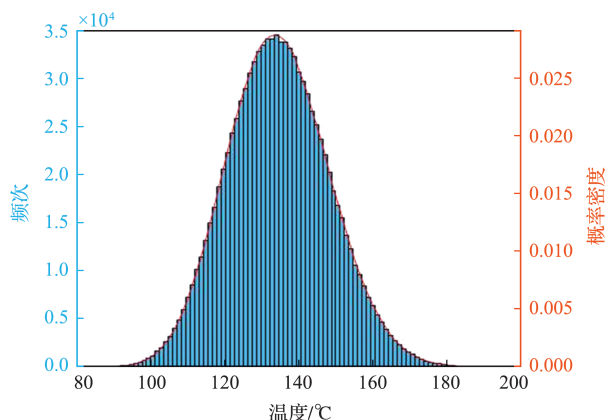


图9 概率分布

Fig. 9 Probability distribution characteristics

如图 10 所示为 Sobol 灵敏度分析结果,其中原始热导率对结果的影响最显著,其次是来流速度、原始比热容和涂层厚度等影响较大。

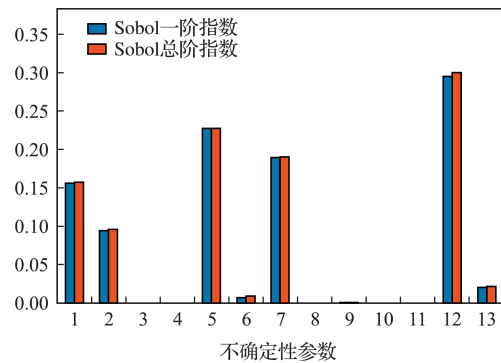


图10 不确定性参数的 Sobol 指数

Fig. 10 Sobol index of uncertainty parameter

4.3 系统可靠性评估

基于可靠性评估方法,计算得到热可靠性为 86.7042%。对涂层厚度从新设计,涂层厚度为 6.8 mm~7.3 mm,系统的热可靠性从 98.9986% 增加到 99.9998% (表 5)。基于可靠性的范围,涂层厚度取为 7.1 mm。对比安全系数法, $n = 1.5$ 时,涂层厚度取 9.375 mm,减重达到 24%。

表5 热可靠性随涂层厚度变化

Tab. 5 Thermal reliability varies with coating thickness

涂层厚度/mm	可靠性	涂层厚度/mm	可靠性
6.8	98.9986%	7.1	99.9916%
6.9	99.7958%	7.2	99.9980%
7.0	99.9487%	7.3	99.9998%

5 结论

本文对炭化烧蚀材料的防热机理进行研究,并通过试验测试和数值模型的对比分析证明该计算方法的有效性。进一步对炭化烧蚀型热防护系统的概率设计方法进行研究,得到结论如下。

(1) 考虑来流、几何以及材料属性参数的不确定性,基于有限元计算方法和代理模型得到了烧蚀型热防护系统背温的概率分布特性。

(2) 采用应力-强度干涉理论计算系统热可靠性,通过 Sobol 指标量化不确定性参数,原始材料热导率对输出响应的影响最显著。

(3) 分析比较概率设计方法与安全系数法,发现采用概率设计方法可在保证热防护系统性能要求下减轻系统重量。

参考文献(References):

- [1] 屈 强,祝文祥,辛健强,等.刚性陶瓷瓦热防护系统概率设计分析方法[J].重庆大学学报,2016,39(4):154-161.(QU Qiang,ZHU Wen-xiang,XIN Jian-qiang,et al. Investigation of probabilistic design method for ceramic tile thermal protection system[J]. *Journal of Chongqing University*,2016,39(4):154-161. (in Chinese))
- [2] 辛健强,陈景茂,董永朋,等.高超声速飞行器辐射式热防护系统概率分析方法[J].战术导弹技术,2017(1):47-54.(XIN Jian-qiang,CHEN Jing-mao,DONG Yong-peng,et al. Probabilistic transient thermal analysis of a multilayer thermal protection system for hypersonic vehicle [J]. *Tactical Missile Technology*,2017(1):47-54. (in Chinese))
- [3] 范真祥,程海峰,张长瑞,等.热防护材料的研究进展[J].材料导报,2005,19(1):13-16.(FAN Zhen-xiang,CHENG Hai-feng,ZHANG Chang-rui,et al. Development of thermal protection materials[J]. *Materials Reports*,2005,19(1):13-16. (in Chinese))
- [4] Uyanna O,Najafi H. Thermal protection systems for space vehicles:A review on technology development, current challenges and future prospects[J]. *Acta Astronautica*,2020,176:341-356.
- [5] Koo J H, Ho D W H, Ezekoye O A. A review of numerical and experimental characterization of thermal protection materials—Part I: Numerical modeling[J]. *AIAA Paper*,2006,4936:2006.
- [6] Lachaud J, Scoggins J B, Magin T, et al. A generic local thermal equilibrium model for porous reactive materials submitted to high temperatures [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,2017,108:1406-1417.
- [7] Chen Y K, Milos F S. Multidimensional finite volume fully implicit ablation and thermal response code[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*,2018,55(4):914-927
- [8] Ho D W K, Koo J H, Bruns M C, et al. A review of numerical and experimental characterization of thermal protection materials—Part III: Experimental testing [A]. 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit [C]. 2007.
- [9] 靳 亮,王 德,王耀辉,等.热防护材料烧蚀性能测试方法研究[J].固体火箭技术,2018,41(2):245-250.(JIN Liang,WANG De,WANG Yao-hui,et al. Research on test method for ablation properties of ablative materials[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*,2018,41(2):245-250. (in Chinese))
- [10] 严 旭,王洪波,范新中,等.航天飞行器防热涂层烧蚀行为及机理研究[J].航天器环境工程,2020,37(4):369-376.(YAN Xu,WANG Hong-bo,FAN Xin-zhong,et al. The ablation behavior and mechanism of thermal protective coatings used for aerospace vehicles[J]. *Spacecraft Environment Engineering*,2020,37(4):369-376. (in Chinese))
- [11] 严 旭,王洪波,范新中,等.硅橡胶基防热涂层动态烧蚀行为及机理研究[J].宇航学报,2020,41(5):617-623.(YAN Xu,WANG Hong-bo,FAN Xin-zhong,et al. Dynamic ablative behavior and mechanism of silicone rubber based thermal protection coating [J]. *Journal of Astronautics*,2020,41(5):617-623. (in Chinese))
- [12] Wright M J, Bose D, Chen Y K. Probabilistic modeling of aerothermal and thermal protection material response uncertainties [J]. *AIAA Journal*,2007,45(2):399-410.
- [13] Sepka S, Wright M. A Monte Carlo approach to FIAT uncertainties—improvements and results for MSL [A]. 41st AIAA Thermophysics Conference [C]. 2009.
- [14] Wright M, Cozmuta I, Laub B, et al. Defining ablative thermal protection system margins for planetary entry vehicles [A]. 42nd AIAA Thermophysics Conference [C]. 2011.
- [15] Turchi A, Congedo P M, Magin T E. Thermochemical ablation modeling forward uncertainty analysis—Part I: Numerical methods and effect of model parameters [J]. *International Journal of Thermal Sciences*,2017,118:497-509.
- [16] Rivier M, Lachaud J, Congedo P M. Ablative thermal protection system under uncertainties including pyrolysis gas composition [J]. *Aerospace Science and Technology*,2019,84:1059-1069.
- [17] Mazzaracchio A, Marchetti M. A probabilistic sizing tool and Monte Carlo analysis for entry vehicle ablative thermal protection systems [J]. *Acta Astronautica*,2010,66(5-6):821-835.
- [18] 邓诗圆,辛健强,张 琨,等.基于重要抽样法的热防护系统热可靠性评估方法[J].重庆大学学报,2019,42(2):62-70.(DENG Shi-yuan,XIN Jian-qiang,ZHANG Kun,et al. Assessment of thermal reliability of thermal protection systems by importance sampling method [J]. *Journal of Chongqing University*,2019,42(2):62-70. (in Chinese))
- [19] Zhang K, Yao J Y, He Z J, et al. Probabilistic transient heat conduction analysis considering uncertainties in thermal loads using surrogate model [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*,2021,58(4):1030-1042.

- [20] 国义军. 炭化材料烧蚀防热的理论分析与工程应用 [J]. 空气动力学学报, 1994, **12**(1): 94-99. (GUO Yi-jun. Theoretical analysis and engineering application of carbonized materials for ablation and heat protection [J]. *Chinese Journal of Aerodynamics*, 1994, **12**(1): 94-99. (in Chinese))
- [21] 张亚静, 孙 萍. 含碳(或碳化硅)耐火材料导热率的测试 [J]. 耐火材料, 2007, **41**(2): 156-158. (ZHANG Ya-jing, SUN Ping. Measurement of thermal conductivity of carbon-containing (or silicon carbide) refractories [J]. *Refractories*, 2007, **41**(2): 156-158. (in Chinese))
- [22] 汪 洋, 林 喆, 秦志宏, 等. 乙炔黑改性薄壁泡沫炭复合材料的性能研究 [J]. 功能材料, 2021, **52**(8): 8168-8173. (WANG Yang, LIN Zhe, QIN Zhi-hong, et al. Study on properties of acetylene black modified thin-walled carbon foam composite [J]. *Journal of Functional Materials*, 2021, **52**(8): 8168-8173. (in Chinese))
- [23] Wang W, Gao J C, Li Y J, et al. Thermal hazard assessment of cyclohexane-type liquid crystal monomer from the Grignard cross-coupling reaction by different calorimeters [J]. *Thermochimica Acta*, 2022, **714**: 179225.
- [24] 霍 霖. 复杂外形高超声速飞行器气动热快速工程估算及热响应分析 [D]. 国防科学技术大学, 2012. (HUO Lin. Rapid Engineering Estimation and Thermal Response Analysis of Aerodynamic Heat of Hypersonic Vehicle with Complex Shape [D]. National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese))
- [25] Rasmussen C E, Williams C K I. *Gaussian Processes for Machine Learning* [M]. Cambridge, Mass: MIT Press, 2006.
- [26] Sobol I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2001, **55**(1-3): 271-280.

Probabilistic design and reliability assessment methods for ablative thermal protection systems

ZHANG Rui¹, ZHU Wen-xiang¹, ZHANG Ao², HOU Wang-shu¹, SONG Shu-feng¹,
LIU Xu-yang¹, LI Chen-guang³, ZHAO Yue⁴, ZHANG Kai⁴, YAO Jian-yao^{*1}

(1. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China;

3. Aerospace Research Institute of Materials and Processing Technology, Beijing 100076, China;

4. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: In order to reduce the weight on the premise of ensuring the reliability of a thermal protection system, a probabilistic design and reliability evaluation method for an ablative thermal protection system considering multi-source uncertainties is established in this paper. The finite element method is used to calculate the thermal response of the system, and the validity of the method is verified by comparing the experimental test with the numerical model. A surrogate model for the uncertain input parameters and target output of the thermal protection system is constructed, and the probability characteristics of the target variables of the thermal protection system are analyzed based on the surrogate model and the Monte Carlo method. The sensitivity analysis of uncertainty parameters is carried out by using Sobol index, and the probability design is carried out by taking system reliability as an index. In this method, the probabilistic design and reliability evaluation of thermal protection systems are carried out for multi-source uncertainties such as flow, geometry and material properties. Taking the two-dimensional plate model as an example, the probability characteristics of the maximum back temperature of the thermal protection system and the sensitivity of the uncertainty parameters are calculated, and the reliability of the system under different coating thicknesses is obtained. The results show that, compared with the design with safety factor $n = 1.5$, the probabilistic design achieves 24% weight reduction.

Key words: ablative thermal protection system; uncertainty; surrogate model; probabilistic design; reliability assessment