

多再入工况下一体化热防护系统拓扑优化设计*

邓通相¹, 匡格平², 胡兆财²,
唐光武³, 杨强¹, 高博¹

(1. 哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150001;

2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076;

3. 招商局重庆交通科研设计院有限公司 桥梁工程结构动力学国家重点实验室, 重庆 400067)

(本刊编委唐光武来稿)

摘要: 一体化热防护系统(integrated thermal protection system, ITPS)需要同时满足承载与隔热的需求.以波纹夹芯方案的 ITPS 为例,这需要其连接结构具有较高的力学性能与较低的热导率.而再入环境的工况恶劣,如何合理地设计连接结构是 ITPS 性能提升的关键.为解决这一问题,综合考虑了再入过程中气动热载荷最大时刻和气动压力载荷最大时刻对应的两种极端工况,以应变能和净传热速率的最小化作为目标函数,将质量作为约束条件,对 ITPS 的连接结构进行了拓扑优化.随后对拓扑优化得到的构型重新建模并进行了热力耦合分析.结果表明,拓扑优化得到的连接结构与文献中的初始波纹夹芯构型和单一工况下拓扑优化得到的构型相比,上面板的最大位移、下面板的温度和质量均有效降低.由于材料用量的减少和结构复杂度的增加,连接结构在应力水平上有所增加,但仍满足使用需求.这表明了考虑多再入工况的拓扑优化策略可以有效提升 ITPS 的刚度与隔热能力,缓解结构的热短路效应.随着增材制造等相关技术的发展,拓扑优化在 ITPS 的连接结构以及其他的热结构设计中具有广阔的前景.

关键词: 一体化热防护系统; 拓扑优化; 多工况; 热力耦合

中图分类号: O34; V45 文献标志码: A DOI: 10.21656/1000-0887.440163

Topology Optimizations of Integrated Thermal Protection Systems in Multiple Reentry Load Cases

DENG Tongxiang¹, KUANG Geping², HU Zhaocai²,
TANG Guangwu³, YANG Qiang¹, GAO Bo¹

(1. Center for Composite Materials and Structure, Harbin Institute of Technology,
Harbin 150001, P.R.China;

2. Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, P.R.China;

3. State Key Laboratory of Bridge Engineering Structural Dynamics, China Merchants Chongqing
Communications Technology Research & Design Institute Co., Ltd., Chongqing 400067, P.R.China)

(Contributed by TANG Guangwu, M. AMM Editorial Board)

* 收稿日期: 2023-05-29; 修订日期: 2023-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(11672088;11472092;11502058;12090034);中国科协青年人才托举工程(2021QNRC001)

作者简介: 邓通相(1998—),男,硕士(E-mail: 21s018013@stu.hit.edu.cn);

高博(1992—),男,助理教授,博士(通讯作者. E-mail: 18b918033@stu.hit.edu.cn).

引用格式: 邓通相, 匡格平, 胡兆财, 唐光武, 杨强, 高博. 多再入工况下一体化热防护系统拓扑优化设计[J]. 应用数学和力学, 2023, 44(11): 1299-1310.

Abstract: The integrated thermal protection system (ITPS) needs to meet both load-bearing and heat-insulating requirements. In terms of the ITPS with a corrugated sandwich structure, this requires the connection structure of the ITPS to have high mechanical properties with low thermal conductivity. However, the re-entry environment is severe, how to reasonably design the connection structure is key to improve the performances of the ITPS. To solve this problem, 2 extreme load conditions corresponding to the maximum aerodynamic heat load and the maximum aerodynamic pressure load during the reentry process were comprehensively considered, the objective function was constructed with the minimized strain energy and the net heat transfer rate, the mass was used as a constraint, and the topology optimization of the ITPS connection structure was carried out. Then, the configuration obtained through the topology optimization was reconstructed and the thermal mechanical coupling analysis was carried out. The results show that, the maximum displacement of the top panel, the temperature of the bottom panel and the mass of the optimized connection structure were reduced effectively compared with those of the initial corrugated sandwich configuration and the topology optimization configuration in single load cases in the literatures. Due to the reduction of material consumption and the increase of the structural complexity, the stress level of the connection structure increases, but it still meets the requirements of use. This means that, the topology optimization strategy considering multiple reentry load cases can effectively improve the stiffness and the insulation capacity of the ITPS and alleviate the thermal short-circuiting of the structure. With the development of additive manufacturing and other related technologies, the topology optimization method has broad prospects in the design of the connection structures for the ITPS and other thermal structures.

Key words: integrated thermal protection system; topology optimization; multiple load cases; thermo-mechanical coupling

0 引 言

热防护系统是可重复使用的运载火箭和高超声速飞行器成功的关键^[1-2]。近年来,由 Bapanapalli 等^[3]提出的一体化热防护系统(integrated thermal protection system, ITPS),由于具有较高的结构效率和较低的维护成本,成为了学者研究的热点^[4-5]。ITPS 的典型结构如图 1 所示,由上面板、连接结构、下面板和填充的隔热材料组成^[6-7]。

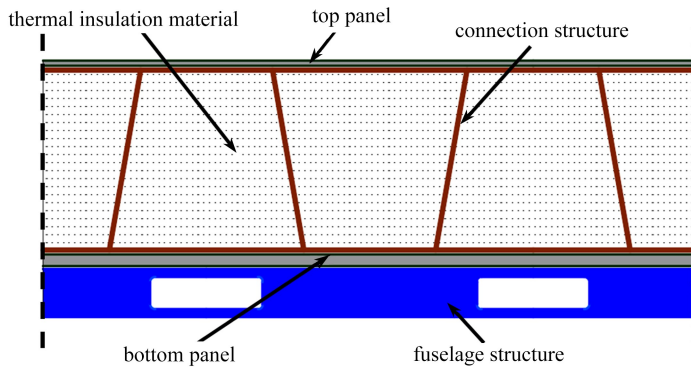


图 1 典型的 ITPS 结构

Fig. 1 A typical ITPS structure

连接结构需要具有较高的刚度来维持整体结构的构型,同时要完成载荷在面板间的传递。由于刚度较高的材料往往热导率也较高,这使得连接结构被动地成为了面板间主要的传热路径,进而在结构的使用中引发发热短路的问题^[8]。即在飞行器再入和高速巡航的过程中,温度由连接结构从上面板快速传递到下面板^[9]。缓解热短路问题的有效手段是减薄面板间的连接结构从而降低传热速率,但这会不可避免地造成整体结构刚度的下降^[8]。

缓解结构整体刚度和隔热性能间的矛盾可以通过优化方法有效地实现。王琪等^[10]和 Chen 等^[11]研究了

波纹夹心结构的传热机理和隔热性能,Shi 等^[12]和 Xie 等^[13]通过尺寸优化的手段,以质量为目标函数,在约束条件中引入了温度和热应力的限制,使得在缓解该矛盾的情况下结构最终的质量得到降低。尽管尺寸优化在一定程度上可以满足我们对连接结构设计的需求,但尺寸优化易受结构初始构型特征的影响,难以给出连接结构材料的最优分布形式。Yang 等^[14]指出,尺寸优化无法同时满足在不增长应力水平的情况下降低 ITPS 背板的温度。Jiang 等^[15]的研究表明,不同的连接构型对 ITPS 结构的承载能力具有显著的影响。打破结构初始构型对后续优化的影响,给出结构材料的最优分布形式正是拓扑优化所擅长的。Deaton 等^[16-17]通过拓扑优化手段有效地解决了带有约束的结构的热应力问题。Takezawa 等^[18]提出了一种考虑结构强度和热导率综合约束的拓扑优化方法,并通过引入 QP 松弛算法避免了应力约束下拓扑优化计算过程中的奇异性。Zhang 等^[19]系统地研究了热弹性拓扑优化问题中目标函数为最小结构柔度和最小应变能的区别,结论为应变能作为目标函数趋于产生更小的热应力。Wang 等^[20]的研究表明,以柔度和膨胀量为目标的拓扑优化模型与传统的柔度目标的最小柔度目标的拓扑优化模型相比,可以有效地减少结构在期望方向的膨胀量,而不会显著降低结构刚度。Yang 等^[21]通过对夹芯板进行热力耦合拓扑优化,综合考虑了面内热膨胀系数、轻量化和力学性能。发现通过拓扑技术可以改变现有的热变形控制机制,从而设计出定制的热膨胀系数和高力学性能的微结构。Kim 等^[22-23]基于结构固有频率和热应力问题对热防护结构展开拓扑优化,在维持了结构最小固有频率的情况下,降低了整体结构的热应力。Penmetsa 等^[24]针对热防护结构中的振动和热应力问题展开拓扑优化,并将结果通过画图软件重建进一步开展尺寸优化,为 ITPS 的设计提供了新的思路。Xu 等^[25]通过对 ITPS 的连接结构进行拓扑优化来降低结构的热短路效应,并对获得结构的屈曲模态进一步优化来降低屈曲失效风险。

另一方面,在航天器再入的过程中会面临多种极端工况^[26],有的工况以气动压力载荷为主导,有的工况以气动热为主导,综合考虑多个极端工况对结构进行拓扑优化设计,可以获得综合性能更为优异的结构。在多工况的拓扑优化方面,主要有权重法^[27]、独立连续映射方法^[28]、折中规划法^[29]等。其中, Bendsøe 等^[30]对各子工况的目标函数线性加权来表征多工况拓扑优化问题的目标函数,为本文的多工况拓扑优化目标函数的设计提供了思路。

综上所述,本文的主要工作是:综合考虑航天器再入过程中的多种极端载荷工况,通过拓扑优化设计来平衡 ITPS 连接结构承载与隔热的矛盾,即在缓解热短路的情况下尽可能提升结构的力学性能。

1 热力耦合拓扑优化方法

1.1 热力耦合分析模型

以文献[3]中的 ITPS 结构作为参考构型开展热力耦合分析,构型的几何特征如图 2 所示,具体尺寸参数如表 1 所示。其中上面板的材料为 Inconel 718,连接结构的材料为 Ti-6Al-4V (TC4),下面板的材料为 Al 2024,填充的隔热材料为 Saffil,具体材料参数如表 2 所示。

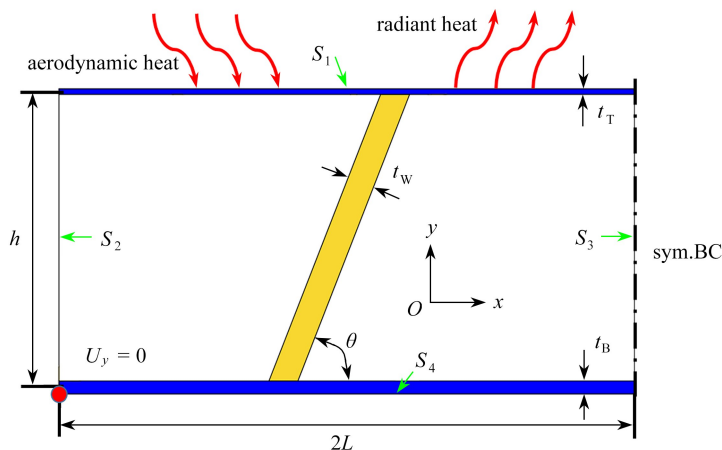


图 2 ITPS 的几何模型

Fig. 2 Geometric characteristics of the ITPS

为方便评估所建立分析模型的准确性,再入环境载荷同样使用参考构型对应的文献[3]中给出的气动热和气动压力条件,如图3所示.结构的边界条件参考了文献[26],一方面考虑ITPS结构的对称特性,对模型右侧采用对称约束,另一方面考虑到实际结构下面板可以沿面内滑动的连接特征,在模型左侧仅约束 y 方向位移,如图2所示.

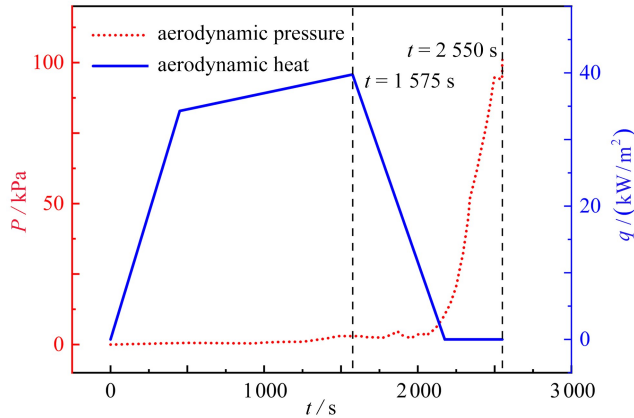


图3 典型的再入环境载荷

Fig. 3 Typical aerodynamic loads during the re-entry flight

表1 ITPS的尺寸参数

Table 1 Sizes of the referenced ITPS design

parameter	value	parameter	value
t_T /mm	2.1	h /mm	120.0
t_W /mm	3.1	L /mm	117.0
t_B /mm	5.3	θ /($^\circ$)	71.0

表2 材料性能参数

Table 2 Material properties

material	Inconel 718	TC4	Al 2024	Saffil
density ρ /(kg/m^3)	8 100	4 440	2 770	50
elastic modulus E /GPa	199(393 K)	115	71	-
	153(1 033 K)			
Poisson's ratio μ	0.294	0.3	0.33	-
thermal expansion coefficient α / K^{-1}	1.26×10^{-5} (373 K)	9.6×10^{-6}	2.0×10^{-5}	-
	1.61×10^{-5} (1 033 K)			
thermal conductivity k /($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	11.1(293 K)	7.6	816(255 K)	0.014(477 K)
	28(1 273 K)		975(477 K)	0.154(1 144 K)
specific heat c /(J/kg)	432(293 K)	560	944	942(389 K)
	620(1 070 K)			1 339(1 170 K)

通过热传导分析获得结构的热响应,如图1所示将热流施加到ITPS的上面板,控制方程如下所示:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中, x, y 代表坐标, k 代表热导率, ρ 代表密度, c 代表比热容, t 代表时间, T 代表温度.

尽管大量的气动热通过上面板辐射到外部环境中,但仍有部分热量通过连接结构和填充的绝热材料传导到下面板.假定边界 S_2, S_3, S_4 绝热,整体的边界条件如下所示:

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = q - \varepsilon_s \sigma_s (T_{\text{out}}^4 - T_A^4), \quad \text{on } S_1, \quad (2)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad \text{on } S_2, S_3, \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad \text{on } S_4, \quad (4)$$

式中, T_{out} 和 T_A 分别为上面板的温度和周围环境的温度, q 是图 3 中的热流, σ_s 是 Stefan-Boltzmann 常数, ε_s 是辐射系数, 取值为 0.85^[31]。

在 ITPS 的热力耦合分析中, 将热传导分析中得到的温度场视为力学分析中的体力, 同时考虑图 2 中作用在 S_1 上的气动压力载荷, 整体的应力-应变关系如下所示:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial U_x}{\partial x} = \frac{1}{E}(\sigma_{xx} - \mu\sigma_{yy}) + \alpha\Delta T, \quad (5)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial U_y}{\partial y} = \frac{1}{E}(\sigma_{yy} - \mu\sigma_{xx}) + \alpha\Delta T, \quad (6)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial y} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad (7)$$

式中, $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \gamma_{xy}$ 代表应变, U_x 和 U_y 代表位移, α 代表热膨胀系数, ΔT 代表温度变化量, E, G, μ 分别代表拉伸模量、剪切模量和 Poisson 比。将上述方程集成到商业有限元软件 COMSOL 中完成求解, 模型的网格划分采用四边形网格, 考虑计算成本与精度的平衡, 本文使用的最小的网格尺寸为 0.004 mm。

1.2 承载能力与隔热性能表征方法

ITPS 连接结构的承载和维持整体结构构型的能力可以通过刚度体现, 在拓扑优化设计方法中, 体积约束下的结构刚度最大化的设计方法具有较为广泛的应用^[8, 19, 25, 32]。在拓扑优化的处理中, 可将结构刚度问题转化为最小结构柔度或最小应变能问题, 其中以应变能作为目标函数更易优化出应力较小的结构^[19], 这与 ITPS 的设计需求相匹配, 因此本文选用最小应变能作为承载能力部分的目标函数。热力耦合问题中的应变能可以表述成如下形式:

$$W = \frac{1}{2} \int (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{th}})^T \mathbf{D} (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{th}}) dV, \quad (8)$$

式中, $\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{th}}$ 是热膨胀带来的应变, \mathbf{D} 是材料的刚度矩阵, 可表示为

$$\mathbf{D} = \frac{E}{1 - \mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}(1 - \mu) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

结构的隔热性能可以通过等效热导率来表征, 利用 Fourier 定律, 热流在流过 y 方向时有

$$q_{\text{in}} = -k \frac{\partial T}{\partial y} = -\lambda \frac{\Delta T}{h}, \quad (10)$$

式中, q_{in} 是流入结构内部的热流, λ 是 ITPS 的等效热导率, 结构的净传热速率可以进一步表示成

$$Q = \lambda \frac{T_{\text{out}} - T_{\text{in}}}{h} A, \quad (11)$$

式中, T_{out} 为上面板温度, T_{in} 为下面板温度, Q 是净传热速率, A 是 ITPS 的截面积。如式(11)所示, 结构净传热速率 Q 与等效热导率 λ 成正比, 因此本文参考文献[8, 25], 使用结构的净传热速率来表征结构的隔热性能。

1.3 拓扑优化模型

1.3.1 设计变量与设计域

在拓扑优化中采用了固体各向同性材料惩罚模型 (solid isotropic material with penalization, SIMP), 并引入伪密度参数对性能指标进行表征。考虑到模型需要兼顾承载与隔热性能, 对材料的弹性模量和热导率进行插值, 如下所示:

$$E = E_0 \rho(x)^p, \quad (12)$$

$$k = k_0 \rho(x)^p, \quad (13)$$

式中, E_0 为材料的原始弹性模量, k_0 为材料的原始热导率, p 为惩罚因子, 取值为 5.

拓扑优化的设计域为上、下面板间的整个区域, 即连接结构所在的区域, 如图 4 所示. 设计域的材料为 Ti-6Al-4V.

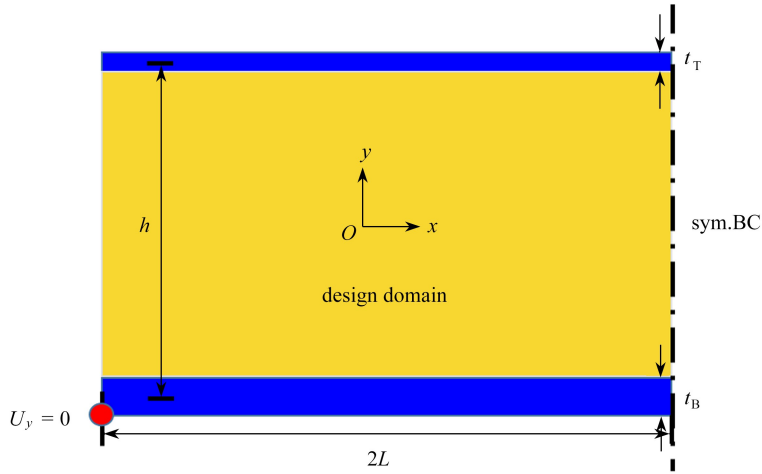


图 4 ITPS 的设计域和边界条件

Fig. 4 The design domain and boundary conditions of the ITPS

1.3.2 载荷和边界条件

基于图 3 的再入历程, 选取了气动热最大 ($t = 1\ 575\ \text{s}$) 和气动压力最大 ($t = 2\ 550\ \text{s}$) 对应时刻的载荷工况作为拓扑优化使用的载荷条件, 边界条件同 1.1 小节, 如图 4 所示. 拓扑优化的温度载荷条件是通过指定上、下面板温度实现的. 两个工况对应的上、下面板温度的边界条件是参考 1.1 小节中初始构型在图 3 的再入载荷下, 对应这两个工况下上、下面板的最大温度. 在气动热最大时上、下面板的给定温度分别为 944 K 和 333 K, 在气动压力最大时上、下面板给定的温度分别是 504 K 和 404 K.

1.3.3 目标函数和约束

为了同时满足 ITPS 结构承载和隔热的需求, 在每种工况下, 目标函数采用应变能和净传热速率归一化后加权求和的形式. 另一方面, 为了获取多工况下的最优构型特征, 本文将两种工况的目标函数进一步加权得到最终的目标函数, 拓扑优化的约束条件为优化后的连接结构的质量小于 1.1 小节中的参考构型, 具体表现为优化后构型在整体设计域的面积占比小于参考结构在设计域的占比, 最终优化模型如下:

$$\begin{cases} \min \left(N \frac{W_{1,\text{opt}}}{W_{1,\text{ini}}} + (1 - N) \frac{Q_{1,\text{opt}}}{Q_{1,\text{ini}}} \right) M + \left(N \frac{W_{2,\text{opt}}}{W_{2,\text{ini2}}} + (1 - N) \frac{Q_{2,\text{opt}}}{Q_{2,\text{ini2}}} \right) (1 - M), \\ \text{s.t.} \quad \frac{V_{f,\text{opt}}}{V_{f,\text{ini}}} \leq 1.0, \quad 0 < \rho_{\min} \leq \rho \leq 1, \end{cases} \quad (14)$$

式中, W 和 Q 分别代表了应变能和净传热速率; 下标 1 和 2 分别代表了气动压力和气动热最大时刻对应的载荷工况; 下标 ini 和 opt 分别代表了初值和优化计算过程中的结果; M 代表气动压力最大时刻对应工况的权重, N 代表应变能即承载能力的权重, M 和 N 取值范围在 0~1 之间; V_f 代表了构型在设计域的面积占比, $V_{f,\text{ini}}$ 代表了 1.1 小节中参考的 ITPS 构型在设计域内的面积占比; ρ_{\min} 代表了最小密度的许用值, 引入的目的是为了增加求解的数值稳定性, 取值为 0.001.

1.3.4 求解算法

在拓扑优化的整个求解过程中, 首先计算传热部分得到的结构净传热速率, 随后计算热应力与气动压力载荷作用下的结构应变能, 进而根据权重因子 M, N 对目标函数进行计算. 本文采用的求解算法为全局收敛的移动渐近线法 (globally convergent version of method of moving asymptotes, GCMMA), 该算法内嵌于 COMSOL 中, 收敛准则为在优化过程中两次迭代的最大单元密度变化量小于 0.01, 算法的具体推导详见文献[33].

2 结果与讨论

2.1 拓扑优化结果

不同工况、不同承载与隔热的权重占比下的拓扑优化得到的构型特征如图 5 所示。在保持 M (气动压力最大时的载荷工况) 不变的情况下,当 N (承载权重) 较低时,结构中出现了较为明显的畸形构型(如图 5 中的 $M = 0.2, N = 0.2$),而随着 N 的增加,结构的构型趋于稳定,中间密度与畸形结构减少,并最终形成趋于树权型的承载结构(如图 5 中的 $M = 0.8, N = 0.8$)。这是由于隔热需要较多的传热路径,为增加传热路径在承载能力要求降低的情况下会产生较多的中间密度和畸形的构型,而随着承载比重增加,结构与上面板间需要较高的刚度即较强的约束连接,其连接特征更为清晰,与面板间的连接点增加。

在保持 N 不变的情况下,观察 M 的改变对承载能力的影响,构型特征与 M 不变 N 增加的结论具有一定的相似性,即随着 M 的增加,结构形式趋于稳定,畸形与中间密度的结构减少(如图 5 中的 $M = 0.8, N = 0.5$)。这是由于气动压力最大时刻对应的载荷工况中的气动热水平较低,结构对传热路径的需求相对较小,主要是承载方面的需求,故而与增加承载能力拓扑优化特征相似;同时可以发现随着 M 的增加,结构与顶部的稳定连接点的个数整体呈现增加趋势(如 $N = 0.2$ 时),这表明随着 M 的增加,结构需要更多稳定的连接以提供更强的刚度。且随着 M 的增加可以明显发现连接结构“树干”和“树杈”的连接位点和连接结构与顶部的连接点逐渐从设计域左半区向设计域中间移动,这是因为连接结构的下端与下面板的左边界相连,结构整体的连接位点以及“树杈”分枝点从设计域左半区向设计域中间移动,会使得整体构型在 M 增加下的结构承载更为稳定。另一方面,随着 M 值的降低,优化目标以气动热工况为主导,上面板具有较高的温度,对结构的传热路径提出了较高的要求,而承载能力要求降低,使结构构型趋于复杂,中间密度较多(如图 5 中的 $M = 0.2, N = 0.5$)。同时可以发现连接结构产生了更多枝杈,且枝杈间更加分散来增加传热路径(如图 5 中的 $N = 0.5$)。

多个优化结果的连接结构均连接于下面板的左侧端部,且与下面板间形成较小的角度,这种构型具有更长的传热路径,可改善结构的热短路效应,表明了拓扑优化在寻找最优构型上的可行性。整体来看,随着 M 和 N 的增加,结构的构型趋于简洁,中间密度与畸形结构减少,与上面板间连接点增多,本质上这是由于低隔热和高承载的需求所导致的。

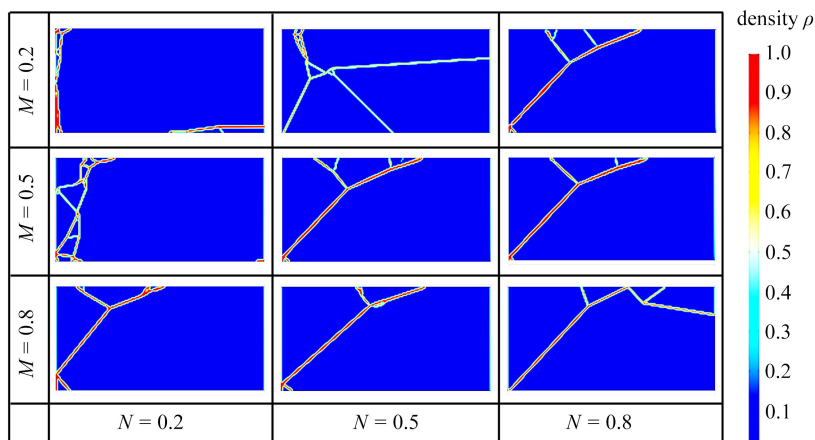


图 5 不同权重组合下的拓扑优化构型

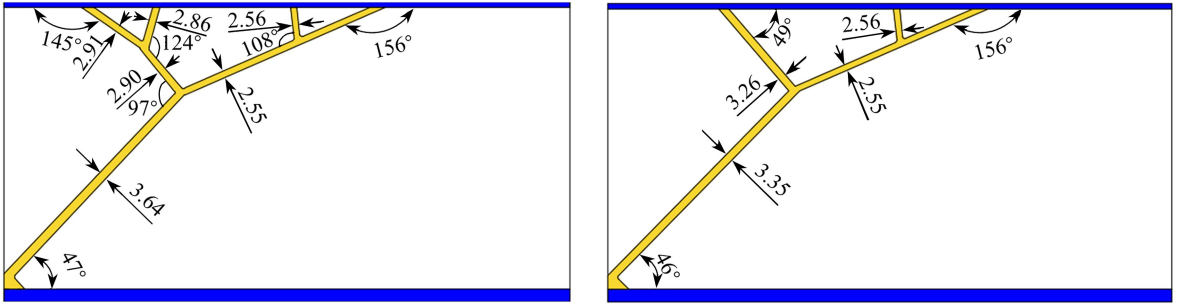
Fig. 5 Topology optimized configurations under different weight combinations

2.2 模型重构与对比分析

综合考虑热力耦合下的性能需求与结构的清晰规则程度,选择图 5 中的 $M = 0.5, N = 0.5$ 与 $M = 0.5, N = 0.8$ 两种权重下对应的结构构型进行重建。为减少重建模型的复杂度,当拓扑优化结果形成的杆件宽度不断变化且变化较小时,忽略杆件的宽度变化特征,采用粗细均匀的杆件进行替代,保守起见所选杆件的宽度为整个杆件的最大宽度,重建后的构型如图 6 所示。

对重建后的构型,1.1 小节中介绍的初始构型以及文献[8]中针对单一工况拓扑优化得到的 ITPS 构型

进行同样的热力耦合分析,分析过程中的边界条件、载荷、网格尺寸等与 1.1 小节一致.文献[8]单工况拓扑优化的构型特征如图 7 所示,可以看出与本文获取的构型相比,其拓扑优化构型更为复杂.



(a) 构型 1 ($M = 0.5, N = 0.5$) (b) 构型 2 ($M = 0.5, N = 0.8$)
 (a) Opt #1 ($M = 0.5, N = 0.5$) (b) Opt #2 ($M = 0.5, N = 0.8$)

图 6 模型重建后的构型特征

Fig. 6 Configurational characteristics after model reconstruction

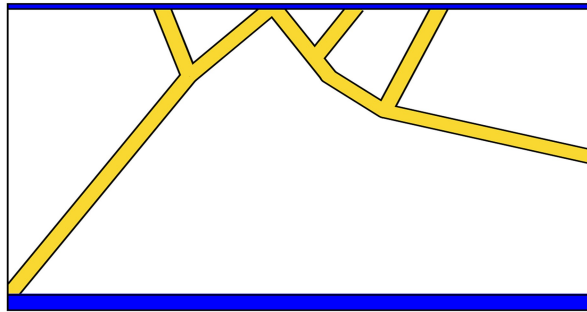
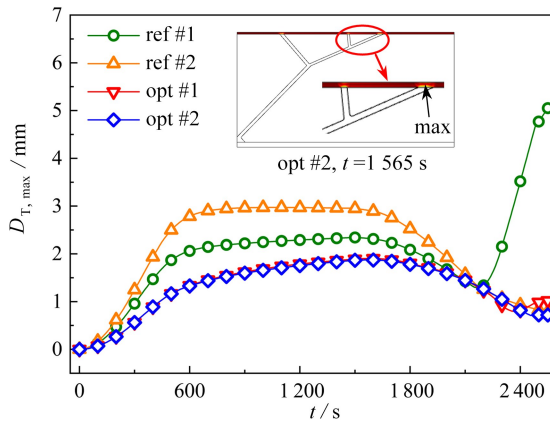


图 7 文献[8]中的拓扑优化构型特征

Fig. 7 Topology optimized configuration characteristics in ref. [8]

图 8 和表 3 展示了不同构型的对比分析结果, $D_{T,max}$, $T_{B,max}$ 分别代表了上面板的最大位移和下面板的最高温度, $S_{T,max}$, $S_{W,max}$, $S_{B,max}$ 分别代表了上面板、连接结构和下面板的最大应力, V_f 代表了连接结构在设计域的面积占比(反映了质量).参考构型 1 为 1.1 小节中介绍的初始构型,参考构型 2 为文献[8]中单工况拓扑优化得到的构型.图中展示的结果分布云图为构型 2 相关响应达到极值时刻对应的云图分布.

从图 8 和表 3 中可以发现多工况下重建的两种拓扑优化构型的结构极值响应在量级上较为相似,为方便表述,后续对比中仅采用构型 2 与两种参考构型进行对比说明.



(a) 上面板的最大位移

(a) The maximum displacements of the top panel

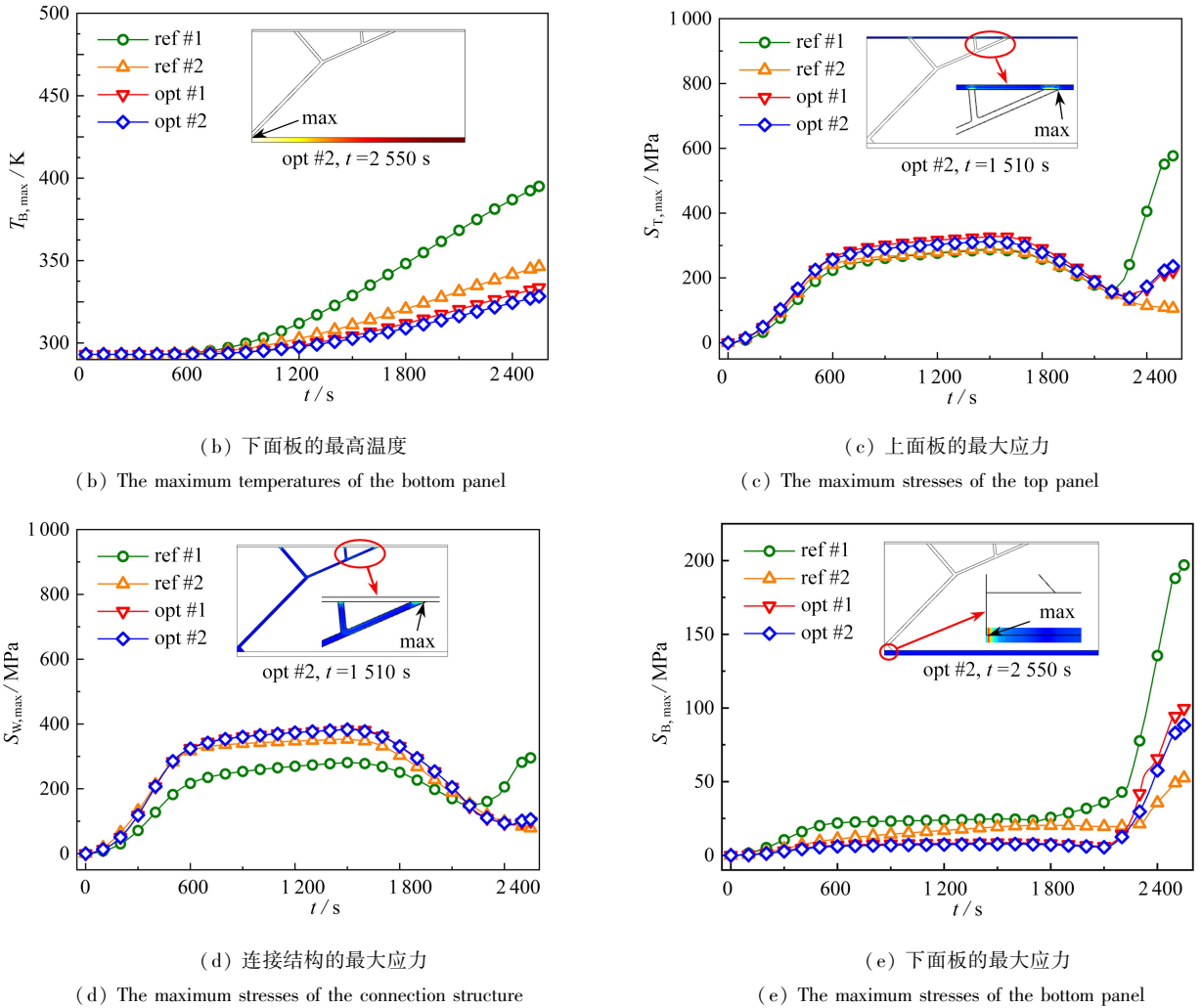


图 8 拓扑优化构型与参考构型的热力响应对比

Fig. 8 Comparison of thermal and mechanical responses between topology optimized configurations with reference configurations

表 3 优化构型与参考构型的结构响应对比

Table 3 Comparison of structural responses between optimized configurations with reference configurations

	ref #1	ref #2	opt #1	opt #2
$D_{T,max} / \text{mm}$	5.16	2.97	1.90	1.87
$T_{B,max} / \text{K}$	393.20	346.38	333.57	328.33
$S_{T,max} / \text{MPa}$	579.61	289.36	327.80	312.99
$S_{W,max} / \text{MPa}$	291.90	353.02	384.11	383.51
$S_{B,max} / \text{MPa}$	199.30	52.43	99.67	88.38
V_f	0.045 2	0.045 1	0.032 0	0.029 0

从图 8(a)、(b)与表 3 可以发现,采用多工况热力耦合的拓扑优化构型可以显著降低再入过程上面板的最大位移(与两种参考构型相比分别降低了 63.76%和 37.04%)和下面板的最高温度(与两种参考构型相比分别降低了 16.50%和 5.21%),即在提高结构刚度的同时解决了连接结构热短路的效应。可以看到结构的最大位移在上面板的中部与连接结构相连的两个连接点之间,下面板的最高温度在约束边界处。同时,构型 2 连接结构的面积占比分别降低了 35.84%和 35.70%,这说明多工况的拓扑优化在减重方面具有一定的优势。

进一步从图 8(c)—8(e)分析应力情况,可以看到构型 2 与两个参考构型相比在上面板的应力水平上分别降低了 46.00%和增加了 8.17%。应力危险点为连接结构与上面板最右侧的连接点处。构型 2 在下面板的应力水平与参考构型 1 相比下降了 55.65%,比参考构型 2 升高了 68.57%,但下面板的整体应力水平较低(不

超过 90 MPa),下面板应力的危险点在左侧约束边界处.在连接结构方面,采用多工况拓扑优化的结果相对参考构型 1 和参考构型 2 分别增加了 31.38% 和 8.64%,最大应力为 383.51 MPa.应力危险点与上面板的应力危险点相同,为连接结构与上面板间最右侧的连接处.进一步分析连接结构的温升情况如图 9 所示.在整个加载过程中连接结构的最高温度为 939.94 K,满足文献[3]指出的该材料作为 ITPS 连接结构材料时适宜的服役温度为 950 K.查阅规范要求该材料的极限拉伸强度在 673.14 K 时不小于 620 MPa^[34],高于连接结构最大应力.从应力水平上看,多工况拓扑优化下连接结构等部件的应力水平增加的原因是结构构型的复杂和增加材料用量的减少,且在优化模型中没有针对连接结构部分的应力水平设计特定的约束.但对于航天器来说在满足性能的条件下,减重无疑是至关重要的,且多工况优化后的拓扑构型结构形式较为规整(与参考构型 2 相比),在制造业逐步发展的今天会有很好的应用前景.

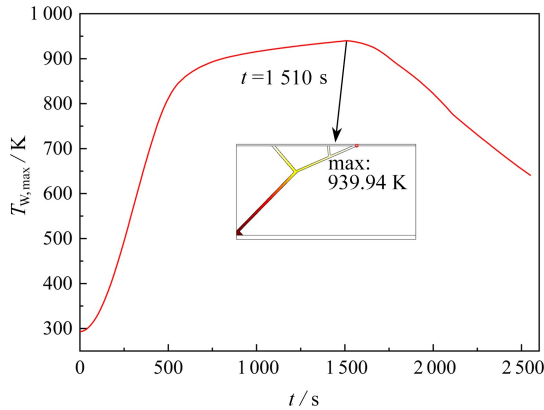


图 9 ITPS 连接结构温度响应

Fig. 9 Temperature response of the connection structure of the ITPS

另一方面,通过应力分布的观察发现关键危险点为连接结构与上面板间的连接处,后续的优化策略可以集中于连接结构与上面板间的连接点处的设计,从而进一步减小应力水平.

3 结 论

为缓解 ITPS 中存在的热短路效应,同时提高结构的刚度,本文以应变能和净传热速率的最小化为目标函数,质量为约束,完成了对 ITPS 连接结构的拓扑优化.考虑到载入环境的工况复杂,在目标函数中加权考虑了气动热和气动压力最大的两种极端工况的影响.得到如下结论:

1) 拓扑优化得到的构型具有树杈状的特征,即与上面板具有多点连接,这代表着连接结构与上面板间具有较强的约束,符合提升刚度的需求;另一方面,优化后的连接结构的构型趋于复杂,连接结构与下面板间的夹角明显减小,即连接结构的长度明显增加,这表明优化后的连接结构具有更多、更长的传热路径,符合隔热即降低热短路效应的需求.

2) 通过对比拓扑优化后的构型、初始波纹夹芯构型和单工况拓扑优化得到的构型在热力耦合下的响应极值可以发现:以拓扑优化后的构型 2 为例,在结构刚度方面分别提升了 63.76% 和 37.04%,下面板的温度分别降低了 16.50% 和 5.21%,分别减重了 35.84% 和 35.70%.在应力方面由于连接结构材料用量的大幅减少,连接结构的应力水平分别增加了 31.38% 和 8.64%,上面板分别降低了 46.00% 和增加了 8.17%,下面板与两种构型相比分别下降了 55.65% 和增加了 68.57%,但整体应力水平较小,不超过 90 MPa.尽管与单工况拓扑优化构型相比,因为材料用量减少使得应力水平有一定增加,但拓扑优化构型更为规整,热短路效应缓解和减重更为明显.另一方面,研究发现,连接结构与上面板间的连接位点是应力危险点,后续的优化和设计可针对连接处展开来进一步降低应力水平.

因此,尽管多工况的拓扑优化构型较为复杂,但随着 3D 打印等技术的发展,在 ITPS 的连接结构中考虑拓扑优化设计具有很好的应用前景.

参考文献(References):

- [1] WEI K, HE R J, CHENG X M, et al. Fabrication and mechanical properties of lightweight ZrO₂ ceramic corrugated core sandwich panels[J]. *Materials & Design*, 2014, **64**: 91-95.
- [2] 郑辉, 邱雷, 袁慎芳, 等. C/C 热防护结构高温气流损伤导波监测实验方法[J]. 航空学报, 2022, **43**(8): 428-440. (ZHENG Hui, QIU Lei, YUAN Shenfang, et al. Research on guided wave monitoring experimental method for high temperature airflow damage of C/C thermal protection structures[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, **43**(8): 428-440. (in Chinese))
- [3] BAPANAPALLI S K, MARTINEZ O, GOGU C, et al. Analysis and design of corrugated-core sandwich panels for thermal protection system of space vehicles[C]//47th AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, Newport, American Institute of Aeronautics and Astronautics. Newport, Rhode Island, 2006.
- [4] WEI K, CHENG X M, MO F H, et al. Design and analysis of integrated thermal protection system based on lightweight C/SiC pyramidal lattice core sandwich panel[J]. *Materials & Design*, 2016, **111**: 435-444.
- [5] LIANG H, WANG Y, TONG M, et al. Multi-scale strength analysis of bolted connections used in integral thermal protection system[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2018, **31**(8): 1728-1740.
- [6] 杨亚政, 杨嘉陵, 方岱宁. 高超声速飞行器热防护材料与结构的研究进展[J]. 应用数学和力学, 2008, **29**(1): 47-56. (YANG Yazheng, YANG Jialing, FANG Daining. Research progress of thermal protection materials and structures for hypersonic vehicles[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2008, **29**(1): 47-56. (in Chinese))
- [7] LE V T, HA N S, GOO N S. Advanced sandwich structures for thermal protection systems in hypersonic vehicles: a review[J]. *Composites(Part B): Engineering*, 2021, **226**: 109301.
- [8] YANG Q, GAO B, XU Z Y, et al. Topology optimisations for integrated thermal protection systems considering thermo-mechanical constraints[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, **150**: 995-1001.
- [9] 彭世彬, 郭瑞, 冯上升, 等. 主动冷却点阵夹层防热结构温度响应计算模型[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(5): 477-489. (PENG Shibin, GUO Rui, FENG Shangsheng, et al. A calculation model for temperature responses of active cooling lattice sandwich structures for thermal protection[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(5): 477-489. (in Chinese))
- [10] 王琪, 吉庭武, 谢公南, 等. 轻质热防护系统波纹夹芯结构热力耦合分析[J]. 应用数学和力学, 2013, **34**(2): 172-182. (WANG Qi, JI Tingwu, XIE Gongnan, et al. Thermal-mechanical coupling analysis of corrugated sandwich structure of lightweight thermal protection system[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2013, **34**(2): 172-182. (in Chinese))
- [11] CHEN Y, ZHANG L, HE C, et al. Thermal insulation performance and heat transfer mechanism of C/SiC corrugated lattice core sandwich panel[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, **111**: 106539.
- [12] SHI S B, DAI C X, WANG Y F. Design and optimization of an integrated thermal protection system for space vehicles[C]//20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference, Glasgow, American Institute of Aeronautics and Astronautics. Glasgow, Scotland, 2015: 3553.
- [13] XIE G, WANG Q, SUNDEN B, et al. Thermomechanical optimization of lightweight thermal protection system under aerodynamic heating[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, **59**(1/2): 425-434.
- [14] YANG Q, MENG S H, XIE W H, et al. Effective mitigation of the thermal short and expansion mismatch effects of an integrated thermal protection system through topology optimization[J]. *Composites(Part B): Engineering*, 2017, **118**: 149-157.
- [15] JIANG F, YE Z, YU W, et al. Analysis of reusable integrated thermal protection panel elements with various insulating core options[C]//55th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Maryland, American Institute of Aeronautics and Astronautics. National Harbor, Maryland, 2014: 0351.
- [16] DEATON J D, GRANDHI R V. Stiffening of restrained thermal structures via topology optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, **48**(4): 731-745.

- [17] DEATON J D, GRANDHI R V. Stress-based design of thermal structures via topology optimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2016, **53**(2): 253-270.
- [18] TAKEZAWA A, YOON G H, JEONG S H, et al. Structural topology optimization with strength and heat conduction constraints[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering*, 2014, **276**: 341-361.
- [19] ZHANG W, YANG J, XU Y, et al. Topology optimization of thermoelastic structures: mean compliance minimization or elastic strain energy minimization[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2014, **49**(3): 417-429.
- [20] WANG B, YAN J, CHENG G. Optimal structure design with low thermal directional expansion and high stiffness[J]. *Engineering Optimization*, 2011, **43**(6): 581-595.
- [21] YANG Z H, ZHANG Y C, LIU S T, et al. Microstructural topology optimization for patch-based sandwich panel with desired in-plane thermal expansion and structural stiffness[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, **64**(2): 779-795.
- [22] KIM W, GRANDHI R V, HANEY M. An evolutionary optimization method for designing a thermal protection system for dynamics[J]. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*, 2006, **34**(1): 1-24.
- [23] KIM W, GRANDHI R V, HANEY M. Multi-objective evolutionary optimization method for thermal protection system design[C]//46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Austin, American Institute of Aeronautics and Astronautics. Austin, Texas, 2005: 2311.
- [24] PENMETSA R C, GRANDHI R V, HANEY M. Topology optimization for an evolutionary design of a thermal protection system[J]. *AIAA Journal*, 2012, **44**(11): 2663-2671.
- [25] XU Q, LI S, MENG Y. Optimization and re-design of integrated thermal protection systems considering thermo-mechanical performance[J]. *Applied Sciences*, 2021, **11**(15): 6916.
- [26] 杨强. 一体化热防护系统设计与综合效能评估方法研究[D]. 硕士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013. (YANG Qiang. Design and performance evaluation method of integrated thermal protection systems[D]. Master Thesis. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese))
- [27] 杜鹏. 大型箱体结构拓扑优化设计研究[D]. 硕士学位论文. 郑州: 郑州大学, 2016. (DU Peng. A research on topology optimization design of large-scale box structure[D]. Master Thesis. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016. (in Chinese))
- [28] 叶红玲, 隋允康. 基于 ICM 方法三维连续体结构拓扑优化[J]. 固体力学学报, 2006, **27**(4): 387-393. (YE Hongling, SUI Yunkang. ICM based topological optimization of 3D continuum structure[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2006, **27**(4): 387-393. (in Chinese))
- [29] 方子帆, 杨磊, 杜道佳, 等. 支撑结构多目标拓扑优化设计研究[J]. 中国机械工程, 2010, **21**(15): 1836-1839. (FANG Zifan, YANG Lei, DU Daojia, et al. Research on topology optimization design for support structure[J]. *Chinese Mechanical Engineering*, 2010, **21**(15): 1836-1839. (in Chinese))
- [30] BENDSØE M P, SIGMUND O. Material interpolation schemes in topology optimization[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 1999, **69**(9/10): 635-654.
- [31] MYERS D E, MARTIN C J, BLOSSER M L. Parametric weight comparison of current and proposed thermal protection system (TPS) concepts[C]//33rd Thermophysics Conference, Norfolk, American Institute of Aeronautics and Astronautics. Norfolk, VA, 1999.
- [32] KRYSKO A V, AWREJCWICZ J, PAVLOV S P, et al. Topological optimization of thermoelastic composites with maximized stiffness and heat transfer[J]. *Composites(Part B): Engineering*, 2019, **158**: 319-327.
- [33] SVANBERG K. A class of globally convergent optimization methods based on conservative convex separable approximations[J]. *SIAM Journal on Optimization*, 2002, **12**(2): 555-573.
- [34] 钛及钛合金棒材: GB/T 2965—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007. (Titanium and titanium alloy bars: GB/T 2965—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese))