

一种一体化热防护系统综合效能 量化评价方法



赵旭升, 杨志斌*, 张新霞

中国飞机强度研究所, 陕西 西安 710065

摘要:一体化热防护系统(ITPS)已经成为高超速飞行器关注的主要发展方向,承力和防热的双重作用使得ITPS能够显著降低飞行器的整体重量。在对ITPS进行综合效能分析时,需要考虑结构效率、材料性能、结构的可设计性和工艺的复杂性等因素。本文从ITPS设计的合理性、ITPS减重的可行性、设计的难易度、工艺的复杂度4个方面进行了讨论,为设计人员提供指导。

关键词:一体化热防护系统; 设计合理性; 设计难易度; 工艺复杂度

中图分类号: V248

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2019.05.012

高超声速飞行器在大气层内飞行时将遭遇到极其严重的气动加热环境^[1],在飞行器结构局部受热严重的部位,飞行器表面温度高达1500°C以上。高超声速飞行器高速飞行过程中的气动热及结构内部的热传递过程,是飞行器设计过程中的关键问题^[2],高速气流在结构表面剧烈压缩后产生的大量气动热会引起结构内部热应变并导致舱内温度升高,在长时间受热情况下,结构内部温度梯度极大地改变了结构材料的应力应变特性。局部温度梯度过大,将导致局部产生高温并向结构内部传递,降低材料力学性能,影响结构强度与刚度。因此热防护系统对于研制长时间高马赫数飞行的高超声速飞行器十分关键。

随着航空航天技术的发展,传统的热防护系统已经向一体化热防护系统(Integral Thermal Protection Systems, ITPS)发展。参考文献[3]首次将波纹板应用于防热设计,提出了波纹板+隔热夹芯一体化热防护方案,如图1所示,该方案的最大特点是波纹夹芯结构的截面惯性矩较高,使得ITPS可以承受较高的气动压力载荷,同时在波纹夹芯与面板之间的空隙部位填充高效隔热材料,能够实现隔热与承载功能的高度集成^[4-7]。

图1中腹板与上下面板焊接而成,这种方式正是其能够承力的关键,这样ITPS上面板(迎风面)因气动加热所接受的热量通过热传导方式直接传递给ITPS下面板(背风面),导致热短路效应明显。针对这种缺点,参考文献[8]提出如图2所示的桁架板+隔热夹芯结构ITPS改进方案。这种结构方案优势明显:(1)采用镂空腹板减少了传热面积,进而降低热短路效应;(2)腹板与上下面板增加加强筋可以保持承载力^[9]。

参考文献[10]介绍了腹板加筋ITPS夹芯结构,如图3

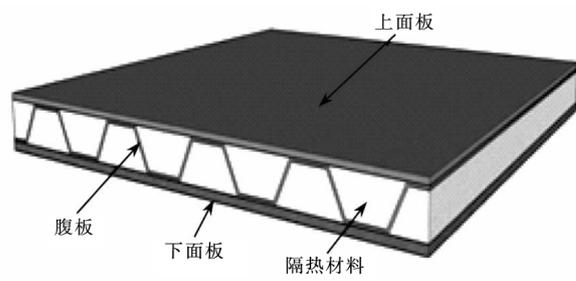


图1 波纹板+隔热夹芯一体化热防护系统
Fig.1 Sandwich structure of corrugated panel in ITPS

收稿日期:2019-03-14; 退修日期:2019-04-08; 录用日期:2019-04-25

基金项目:航空科学基金(2016ZA23003)

*通信作者. Tel.: 029-88268611 E-mail: hk623yzb@163.com

引用格式: Zhao Xusheng, Yang Zhibin, Zhang Xinxia. A quantitative evaluation method for comprehensive efficiency of integrated thermal protection system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(05): 65-69. 赵旭升, 杨志斌, 张新霞. 一种一体化热防护系统综合效能量化评价方法[J]. 航空科学技术, 2019, 30(05): 65-69.

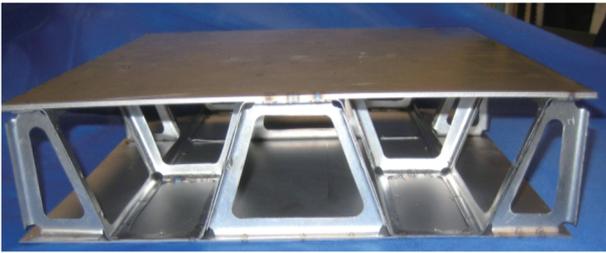


图2 桁架板+隔热夹芯结构一体化热防护系统
Fig.2 Integrated thermal protection system of truss plate and heat insulation sandwich structure

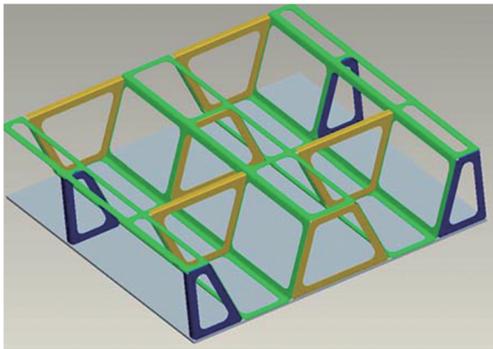


图3 腹板加筋ITPS夹芯结构示意图
Fig.3 Structural sketch of web stiffened ITPS sandwich

所示,该方案内部结构比较复杂,结构设计参数诸如材料厚度、腹板角度、镂空大小与位置、加强筋的数目与位置等远多于单一的波纹板夹芯结构。同时,复杂的结构使得制备困难,各部位的连接等问题需要深入研究。

参考文献[11]提出更简单的结构,如图4所示,这种方案去除复杂的加强筋,采用更加密集的减重孔以保持承力性能。

热防护系统隔热/承载已经明确了隔热和承载两个方面,同时,一个产品的完成还应该包括设计的易实现性和制备的可操作性,而重量(质量)是飞行器关心的重要指标。

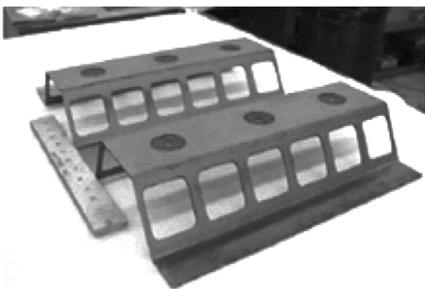


图4 腹板减重波纹夹芯一体化热防护
Fig.4 Integrative thermal protection of web weight-reducing corrugated sandwich

本文通过对腹板倒角的变化确定腹板的最佳长度,通过底板曲线过渡改进热适配,从而给出ITPS比较合理性设计。通过镂空腹板以达到减重的目的。最后对设计的难易度以及工艺的复杂度进行了对比分析。

1 ITPS 设计的合理性

ITPS 设计的合理性包括热短路效应和热失配性两方面因素^[12],即热短路效应越明显、热失配程度越高,则结构设计越不合理,采用如下函数关系描述:

$$\text{设计合理性} = \frac{1}{\text{热短路效应} \times \text{热失配响应}} \quad (1)$$

1.1 确定 ITPS 腹板最佳长度

为起到承受载荷的作用,热防护结构中的金属结构一般会有连接件或加强件,这些附件通常采用导热性能良好的金属材料。经过这些金属附件,热量便会迅速地穿过隔热材料,严重影响整体的隔热效果。在满足承载能力的前提下,腹板长度越长,热量传导底面的时间越长,腹板长度越短,热量传导底面的时间越短,这种现象可以理解热短路效应。

增大隔热层厚度必然能够降低热短路效应,但是这种方案导致ITPS总质量增大。在相同隔热厚度的前提下,通过改变ITPS腹板与底面板夹角以找寻最佳角度是一种合理的方法。

对ITPS采用全参数化设计,图5给出参数描述。以ITPS腹板与底面板夹角 θ 为设计变量,以ITPS承载能力(最大等效应力)最小为目标函数,保持其他参数不变进行数值分析,通过数值分析找寻 θ 与ITPS等效应力和最大等效应力关系。

表1给出ITPS等效应力和最大位移随腹板张角变化关系^[13]。可以看出,在ITPS满足承载能力的前提下,腹板与底面夹角 76° 时,腹板长度为最佳选择,此时ITPS腹板长度

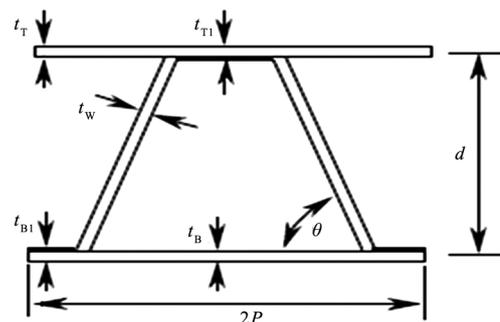


图5 ITPS 热短路改进参数描述
Fig.5 Improved parameter description of ITPS thermal short circuit

表1 等效应力和最大位移随腹板张角变化关系

Table 1 The relation between equivalent stress and maximum displacement and web tension angle

腹板张角/(°)	最大等效应力/MPa	最大位移/mm
65	291	0.677
68	262	0.552
70	243	0.479
72	225	0.413
74	208	0.384
75	199	0.438
76	191	0.494
77	197	0.554
78	204	0.617
80	219	0.754
85	261	1.16
90	308	1.66

相对较大,从而达到热短路改进。当腹板与底面夹角 74° 时,最大位移达到极小值。

1.2 ITPS 热失配改进方法

ITPS 热失配改进方法归结为ITPS 腹板与其上下面板结合部位的倒角关系,而由于ITPS 腹板与下面板结合部位的倒角存在,下面板温度均匀度将会明显好转。

图6 给出的底面板最终温度云图,底板温度最高值452K,底板温度最低值397K,可以看出此时ITPS 底面板温度比较均匀,温度比较均匀度88%。

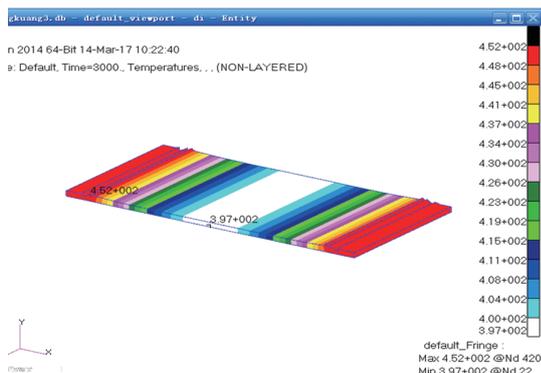


图6 ITPS 底面板最终温度云图

Fig.6 Final temperature cloud of ITPS bottom panel

2 ITPS 减重的可行性

2.1 ITPS 减重方法

ITPS 镂空腹板可以达到ITPS 减重的目的。表2 给出ITPS 重量优化结果,可以看出:在ITPS 重量相同和镂空腹板宽度不变的情况下,工况2 的计算结果已经超高ITPS 拉

伸强度500MPa,说明镂空腹板高度和倒角半径的合理设计非常必要,关系到ITPS 设计的成败。

表2 ITPS 重量改进结果

Table 2 ITPS weight improvement results

工况	腹板宽度/mm	腹板高度/mm	腹板倒角半径/mm	等效应力/MPa	最大位移/mm	质量/kg
1	160	85	38	440	1.53	1.4
2	160	80	22.5	535	1.65	1.4

2.2 镂空腹板对ITPS 隔热性能的影响

按照前述ITPS 结构, θ 保持为 76° ,建立三维实体单元有限元模型进行传热分析,该模型没有考虑镂空腹板倒角。表3 给出镂空腹板尺寸,表4 给出各工况ITPS 温度计算结果。可以看出:采用隔热材料填充的镂空腹板区域能够降低ITPS 下面板的温度,同时也改善ITPS 下面板的温度均匀性。

表3 镂空腹板尺寸

Table 3 Hollow web size

工况数	孔宽/mm	孔高/mm
1	80.0	45.0
2	100.0	50.0
3	115.0	60.0
4	135.0	70.0
5	150.0	75.0
6	165.0	86.0

表4 各工况ITPS 底面温度计算结果比较

Table 4 Comparing of calculation results of bottom temperature of ITPS under different working conditions

工况数	最高温度/K	最低温度/K	温度差/K
1	413.0	359.0	54
2	401.0	350.0	51
3	389.0	340.0	49
4	375.0	331.0	44
5	357.0	322.0	35
6	335.0	312.0	22

3 设计的难易度

假设设计周期与设计变量个数服从指数分布规律:

$$C = e^{N_{\text{new}}/N_{\text{min}}} \quad (2)$$

式中: C 为设计周期; e 为自然对数的底; N_{new} 为当前结构设计变量个数; N_{min} 为最简单结构设计变量个数。

由表5可以看出,结构设计参数的多少与设计难易程度成正比,表征参数越多,设计越复杂,反之,表征参数越少,设计越简单。

表5 各方案设计难易程度

Table 5 The degree of difficulty in designing various schemes

方案	设计变量个数 N	复杂程度 $\exp(N_{\text{new}}/N_{\text{min}})$	设计难易 表征参数
波纹夹芯	9	2.71828	1
减重孔	12	3.79367	0.71653
腹板倒角	14	4.73772	0.57375

4 工艺的复杂度

表6给出了ITPS单胞结构各方案制备工艺的复杂程度,由表6可以看出,工序次数越多,工艺性越好,制备工艺越复杂;反之,工序次数越少,工艺性越差,制备工艺越简单。

表6 各方案制备工艺的复杂程度

Table 6 Complexity of preparation process for various schemes

方案	工序次数 N	工艺性表征参数
波纹夹芯	3	1
减重孔	4	0.75
腹板倒角	6	0.5

5 结论

本文研究结果表明,设计变量个数与难易程度成正比,同时,工艺性表征参数与工序次数成反比。从减重、隔热、热短路、热匹配以及ITPS底面温度均匀性等方面综合考虑,最多的设计变量个数虽然工艺比较复杂,但是其综合效能最优。

AST

参考文献

- [1] 李会萍. 高超声速飞行器加热特性及计算方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
Li Huiping. Calculation and analysis of aerodynamic heating distribution for the hypersonic aircrafts[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010.(in Chinese)
- [2] 程克明, 吕英伟. 飞行器持续气动加热的耦合性分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 32(2): 150-155.
Cheng Keming, Lv Yingwei. Coupling analysis of continuous aerodynamic heating of aircraft [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2000, 32(2): 150-155. (in Chinese)
- [3] Bapanapalli S K, Martinez O M, Gogu C, et al. Analysis and design of corrugated-core sandwich panels for Thermal Protection Systems of space vehicles[C]// 47th AIAA/ASME/ASCE / AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Newport, Rhode Island, USA, 2006.
- [4] Kumar S, Diane Villanueva D, Sankar B V, et al. Optimization of integrated thermal protection system [R]. AIAA 2008-5928, 2008.
- [5] Sharma A, Sankar B V, Raphael T, et al. Multi-fidelity analysis of corrugated-core sandwich panels for integrated thermal protection systems[R]. AIAA 2009-2201, 2009.
- [6] Ravishankar B, Sankar B V, Haftka R T. Homogenization of integrated thermal protection system with rigid insulation bars [R]. AIAA 2010-2687, 2010.
- [7] Villanueva d, Haftka R T, Sankar B V. Accounting for future redesign in the optimization of an integrated thermal protection system [R]. AIAA 2012-1933, 2012.
- [8] 胡秋野. 波纹夹层板一体化热防护系统多级优化方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
Hu Qiuye. Multilevel optimization of corrugated-core integrate thermal protection system[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017.(in Chinese)
- [9] 解维华, 霍施宇, 杨强, 等. 新型一体化热防护系统热力分析与试验研究[J]. 航空学报, 2013, 34(9): 2169-2175.
Xie Weihua, Huo Shiyu, Yang Qiang, et al. Thermal mechanical analysis and test study of a new integrated thermal protection system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(9): 2169-2175.(in Chinese)
- [10] 梦松鹤, 杨强, 霍施宇, 等. 一体化热防护技术现状和发展局势[J]. 宇航学报, 2013, 34(10): 1295-1302.
Meng Songhe, Yang Qiang, Huo Shiyu, et al. State-of-arts and trend of integrated thermal protection systems[J]. Journal of Astronautic, 2013, 34(10): 1295-1302.(in Chinese)
- [11] Materials Research & Design, Inc. Thermal protection for reentry & hypersonic systems [EB//OL]. [2013-04-26]. <http://www.m-r-d.com/experience/thermal-protection.php>.
- [12] 杨强. 一体化热防护系统设计与综合效能多级优化方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

Yang Qiang. Design and performance evaluation method of integrated thermal protection systems[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

- [13] 杨志斌,成竹,李丽霞,等.一种一体化热防护系统承力结构的设计研究[J].应用力学学报,2018,35(4):883-889.

Yang Zhibin, Cheng Zhu, Li Lixia, et al. Research on a load-carrying capacity structure design of integrated thermal protection systems[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018,35(4):883-889. (in Chinese) (责任编辑 王为)

作者简介

赵旭升(1990—)男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行器结构热强度分析与试验研究。

Tel:029-88268611

E-mail:zhaoxusheng90s@126.com

杨志斌(1962—)男,学士,研究员。主要研究方向:飞行器结构热强度分析。

Tel:029-88268611

E-mail:hk623yzb@163.com

A Quantitative Evaluation Method for Comprehensive Efficiency of Integrated Thermal Protection System

Zhao Xusheng, Yang Zhibin*, Zhang Xinxia

Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China

Abstract: Integrated Thermal Protection System (ITPS) has become the main development direction of high-speed aircraft. The combined effect of load bearing and heat protection allows ITPS to significantly reduce the overall weight of the aircraft. In the comprehensive performance analysis of ITPS, factors such as structural efficiency, material properties, structural designability, and process complexity need to be considered. This paper discusses the rationality of ITPS design, the feasibility of ITPS weight reduction, the difficulty of design, and the complexity of the process, which can provide guidance to designers.

Key Words: ITPS; design rationality; design difficulty; process complexity

Received: 2019-03-14; **Revised:** 2019-04-08; **Accepted:** 2019-04-25

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2016ZA23003)

***Corresponding author.** Tel. : 029-88268611 **E-mail:** hk623yzb@163.com