一体化热防护系统承载能力/热失配 改进方法

张肖肖,秦强*

中国飞机强度研究所,陕西西安 710065

摘 要:采用 POL 语言参数化建模方法,开发了一体化热防护系统 (ITPS)参数化建模程序,建立了不同外形参数下的一体 化热防护系统有限元模型,分析了其承载能力与热失配现象随腹板角度和倒圆形式的变化趋势,提出了提高一体化热防护 系统承载能力和改善热失配的改进方法。研究结果表明,在满足一体化热防护系统承载能力的前提下,腹板与底面夹角存 在一个最佳角度,使得热短路降到最低水平,对腹板与壁板之间的夹角进行倒圆设计,可有效改善应力集中下面板的温度 均匀性。

关键词:一体化热防护系统,热失配,承载能力,优化设计

中图分类号: V214.19 文献标识码: A DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2018.06.068

随着高超声速飞行器飞行速度的不断提高,服役环境 越来越恶劣,飞行器的热防护问题成为限制飞行器发展的 瓶颈^[1]。新一代空天飞行器对结构轻质化提出了苛刻的要 求,热防护系统研究正在向防热-承载结构功能集成化、 低成本和高效率的一体化方向发展^[2]。波纹夹芯式一体 化热防护系统结构简单且具有可设计性,是一种极具发展 潜力的热防护形式。其设计理念是机身外部不再需要单 独的热防护系统,本身既是机身结构又是热防护系统,集 结构、防/隔热和承载功能为一体^[3],该热防护系统称为一 体化热防护系统 (Integrated Thermal Protection Systems, ITPS)。

由于 ITPS 上下面板间通过腹板直接连接,不存在隔热层, 致使热量直接由外部表面通过传导或辐射传到机身内部^[4]。 本文通过改变腹板与下面板之间的夹角,探寻减小热短路的 最佳途径,同时在 ITPS 热分析模型上增加倒角并使下面板 厚度从对称面到腹板逐渐增大,以改善 ITPS 下面板温度均 匀度。最后采用结构尺寸参数的个数评价 ITPS 设计的难 易程度。

1 ITPS 承载能力优化方法

减轻重量(质量)是飞行器设计关心的主要问题之一,因此,对ITPS隔热层的厚度有一定的要求。在给定厚度下,通过改变腹板角度探讨ITPS热短路的改进方法。

ITPS 热短路改进方法可以转换为腹板角度优化,因为随 着腹板角度θ的变化,腹板长度随之发生改变,当θ值变小则 腹板长度增大,其传热相对缓慢,ITPS下面板温度越低。

1.1 ITPS 腹板角度等价描述

由图 1 可知, ITPS 下面板外缘长度为 2p, ITPS 上面板 与腹板相交区域为 2f, 腹板与下底面夹角为 θ , 腹板厚度为 t_w , 上面板厚度为 t_T , 下面板厚度为 t_B , 腹板长度为s, 腹板高 度 d_c 。已知:

$$d = d_{\rm c} + t_{\rm T} + t_{\rm B} \tag{1}$$

$$\tan(\theta) = \frac{b}{d_c} \tag{2}$$

设腹板为可变长度的一条线段,让腹板绕其中心旋转, 并保证腹板与 ITPS 上板接触,这种数学描述等价于腹板张 角的变化。

收稿日期:2018-03-21; 退修日期:2018-04-09; 录用日期:2018-05-25

基金项目: 航空科学基金 (2016ZA23003)

*通信作者.Tel.:029-88268609 E-mail:zx010750117@163.com

引用格式: Zhang Xiaoxiao, Qin Qiang. Improvement method for bearing capacity/thermal mismatch of the Integrated Thermal Protection Systems[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018,29(06): 68-72. 张肖肖,秦强. 一体化热防护系统承载能力/热失配改进方法[J]. 航空科学技术, 2018,29(06): 68-72.



图 1 结构单胞尺寸 Fig.1 The structural unit cell dimension

1.2 PCL 参数化建模背景

由腹板角度变化特点得知,每一次腹板角度的改变都必须建立新的有限元模型,必然耗费大量精力做重复性操作。同时,腹板角度变化是在满足 ITPS 承载能力前提下的寻优过程,而寻优是一个参数迭代与循环计算的过程,每一次迭代都需要修改模型的参数,然后重新建模分析,周而复始。

为了实现 ITPS 有限元建模的自动化和高效化,采用 MSC.Software 公司提供的二次开发语言 PCL 的参数化建 模技术。PCL 是一个模块化结构的编程语言和用户自定义 工具,提供了大量的内置库函数。使用 PCL 语言用户可以 方便地编制 MSC.Patran 的二次开发程序,扩展 MSC.Patran 的功能。

在 MSC.Patran 中进行有限元建模时, MSC. Patran 界面 底部的命令输入栏同时显示当前操作的命令,并以 SES 为 扩展名形成文件,该文件用 PCL 语言完整记录了所有的界 面操作过程和相关数据。用变量代替关键参数的数值,通过 编写界面输入 ITPS 参数即可自动建立当前参数的有限元 模型。

1.3 参数输入窗口

应用 MSC.Patran 的 PCL 语言编写了输入窗口,如图 2 所示,在该窗口中采用图示方法描述了 ITPS 参数。一般静 力分析所用的材料数据包括材料弹性模量和泊松比; ITPS 热短路优化计算软件需要的几何尺寸如图 1 所示。参考文 献 [5] 提出的结构夹芯板为上下面板与框架焊接,因此框架 与上下面板结合区域进行了加强。上面板加强厚度 t_{T1},下 面板加强厚度 t_{B1};载荷为上面板承受均布压力^[6]。

1.4 约束方式

约束形式为下面板固支,上面板简支(约束上面板边界 水平方向的平移和垂直于上面板边界的旋转)。

1.5 ITPS 承载能力优化

在 ITPS 其他参数不变的情况下,改变腹板张角进行数 值分析,得到一系列静力计算结果,见表 1。可以看出,腹板 张角为 76°时,ITPS 最大等效应力达到最小极值 191MPa, 此时 ITPS 最大位移 0.494mm;腹板张角为 74°时,ITPS 最 大位移达到最小极值 0.383mm,此时 ITPS 最大等效应力 208MPa。两种张角计算的最大等效应力相对误差 8.17%, 最大位移相对误差 22.47%。从误差角度描述,腹板张角为 74°时达到最优,从热短路效应方面考虑,腹板张角为 74°时 腹板长度相对较大,此时, ITPS 结构变形也达到最小值。



图 2 参数输入菜单窗口 Fig.2 The window of parameter input menu

表 1 计算结果 Table 1 The calculation results

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	1.160
90	308	1.660

2 ITPS 热失配改进方法

ITPS 腹板在支撑上面板的同时也约束其变形。在高温 下,腹板与上面板之间存在较大的温度梯度,两者之间变形 量不一致,产生热失配现象,如果 ITPS 腹板与其上面板两 者为异种材料,因热膨胀系数的不同导致热失配效应更为明 显。如果 ITPS 腹板与其上面板为同一种材料,在两者结合 面若没有倒圆过渡将会产生应力集中现象,因此,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 圆确定。

2.1 ITPS 热失配几何模型

共建立三种 ITPS 热失配模型,模型1为腹板与下面板 为74°,不考虑倒圆,如图3(a)所示;模型2为腹板与下面 板为74°,锐角倒圆半径为3mm、钝角倒圆半径为8mm,如 图3(b)所示;模型3腹板与下面板为74°,上面板与腹板 连接方式与模型2相同,下面板厚度分为内外两个区域进行 调整,调整方法为以下面板加强厚度*t*_{B1}内边界线的延长线 与腹板形成倒圆半径为3mm的圆弧,该圆弧与下面板厚度 *t*_B的内边界线中点连线采用样条曲线拟合形成渐变厚度,如 图3(c)所示。



图 3 ITPS 温度场分析模型剖面图 Fig.3 The cross-section of temperature analysis model of ITPS

2.2 材料数据

选用钛合金材料, 热导率 7.3W/(m·K), 比热容 553J/(kg·K),

密度4407kg/m³;隔热材料热导率0.09W/(m·K),比热容1300J/(kg·K),密度50kg/m³。

2.3 热流载荷

热流载荷施加于 ITPS 上表面,材料数据取自参考文献 [6]。 计算时间长度 3000s。

2.4 边界条件

ITPS 上表面施加空间辐射边界条件,辐射系数 0.8,参考温度 300K。其他边界采用绝热边界。

2.5 ITPS 热失配改进

图 4 给出 ITPS 模型 3 最高温度云图,图 5 给出隔热材 料模型 3 最高温度云图,最高温度发生在 1445s,最高温度 975K。图 6 给出 ITPS 模型 3 温度一时间历程曲线,可以 看出,由于表面辐射效应,腹板中部温度在 2250s 之后超过 ITPS 表面温度,由于温度的累积效应,下面板温度一直处于 上升趋势。



图 4 模型 3 的 ITPS 温度云图 Fig.4 Temperature contour of ITPS in model-III



图 5 模型 3 的隔热材料温度云图 Fig.5 Temperature contour of insulations in model-III

图 7 (a) 给出三种模型 3000s 的 ITPS 下面板计算结 果,可以看出,下面板温度最高值 454K,下面板温度最低值 389K,两者差值 65K,相对误差为 14.3%,由图 7 (b) 可以看 出,下面板温度最高值457K,下面板温度最低值396K,两者 差值61K,相对误差为13.3%;由图7(c)可以看出,下面板 温度最高值452K,下面板温度最低值397K,两者差值55K, 相对误差为12.2%。

















Fig.7 Temperature contour of the lower panel of TPS (t=3000s)

3 结论

建立了 ITPS 热短路参数化模型,研究腹板张角对 ITPS 承载能力的影响。通过分析,得到了以下结论:

(1) 在给定隔热层厚度和 IPTS 面板厚度的前提下,通 过改变腹板与底面夹角,夹角 74° 时能够满足其承载能力, 此时腹板长度为最佳选择,热短路现象达到极小值。

(2) 在腹板与上下底面之间增加倒角能够改善热失配效应,但却增加ITPS 重量,即倒角需要限制在一定的范围内,本文根据工程设计经验并结合多次计算确定了腹板与壁板锐角导圆半径 R=3mm,腹板与壁板钝角导圆半径 R=8mm为比较合理的倒角设计。这样,在减小应力集中的同时改善下面板的温度均匀性。

(3)下面板按照内外进行分区后,热失配效应得到明显 改进,下面板温差 55K,相对误差为 12.2%。后续工作将研 究腹板开孔对 ITPS 的影响。

参考文献

 郭朝邦,李文杰.高超声速飞行器结构材料与热防护系统[J]. 飞航导弹,2010(4):88-94.

Guo Chaobang, Li Wenjie. Structure, material and thermal protection systems of the hypersonic vehicle[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2010 (4): 88–94. (in Chinese)

- [2] 关春龙,李垚,赫晓东.可重复使用热防护系统防热结构及材料的研究现状[J].宇航材料工艺,2003(6):7-11.
 Guan Chunlong, Li Yao, He Xiaodong. Research status of structures and materials for reusable TPS[J]. Aerospace Materials & Technology, 2003(6):7-11. (in Chinese)
- [3] 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):2169-2176.
 Xie Weihua, Huo Shiyu, Yang Qiang, et al. Thermalmechanical analysis and test study of a new integrated thermal protection system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34 (9): 2169-2176. (in Chinese)
- [4] 解维华,孟松鹤,杜善义,等.金属热防护系统边缘热短路研究
 [J].航空学报,2010,31 (5):1080-1085.
 Xie Weihua, Meng Songhe, Du Shanyi, et al. Study on edge heat shorts of metallic thermal protection systems[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010,31 (5):1080-1085. (in Chinese)
- [5] Blosser M L, Daryabeigi K, Bird R K, et al. Transient thermal

testing and analysis of a thermally insulating structural sandwich 作者简介 panel[R]. NASA/ TM-2015-218701, 2015. 张肖肖(1989-) 男,硕士,工程师。主要研究方向:飞行 [6] 杨强.一体化热防护系统设计与综合效能评估方法研究 [D]. 器结构热分析。 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013. Tel: 029-88268609 E-mail: zx010750117@163.com 秦强(1983-) 男,高级工程师。主要研究方向:飞行器结 Yang Qiang. Design and performance evaluation method of integrated thermal protection systems[D]. Harbin: Harbin

构热分析。

Tel: 029-88268604 E-mail: avic6234@163.com

Improvement Method for Bearing Capacity/Thermal Mismatch of the Integrated Thermal Protection Systems

Zhang Xiaoxiao, Qin Qiang*

Institute of Technology, 2013. (in Chinese)

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

Abstract: An parametric modeling program of Integrated Thermal Protection Systems (ITPS) based on the Patran Command Language (PCL) was developed. Several ITPS models with different configuration parameters were established, to analyze the change trend of bearing capacity and thermal mismatch, as angle of the web and type of the fillet changed. Then an improvement method for bearing capacity/thermal mismatch of ITPS was presented. The research results show there is a best angle between the web and the panel, to make heat short reach the minimum. By adding the fillet to the angle between the web and the panel, the temperature uniformity of the lower panel of ITPS gets improved effectively.

Key Words: ITPS; thermal mismatch; bearing capacity; optimal design

Received: 2018-03-21; **Revised:** 2018–04–09; Accepted: 2018-05-25 Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China (2016ZA23003) *Corresponding author.Tel.: 029-88268609 E-mail: zx010750117@163.com