

文章编号 :1001 - 2486(2006)03 - 0024 - 04

基于静力与稳定性分析的小卫星主接头选型优化*

李恩奇,李道奎,唐国金,雷勇军

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要 :基于对预埋主接头蜂窝板的静力与稳定性分析,对小卫星主接头进行选型优化。采用三明治夹心板理论建立预埋分叉式和面板式小卫星主结构连接接头的蜂窝板试件有限元模型,分析得到了蜂窝板最大应力值与失稳载荷,通过与试验结果的对比分析确定了蜂窝板试件破坏原因。在此基础上讨论结构参数对蜂窝板承载性能的影响,确定出最优的接头设计形式。

关键词 :主接头;蜂窝板;有限元;Von-Mises 应力;失稳

中图分类号 :TB330 ;U611.42 **文献标识码** :A

Type Optimization of Small Satellite Major Joint Based on Static and Buckling Analysis

LI En-qi, LI Dao-kui, TANG Guo-jin, LEI Yong-jun

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract :The purpose of this paper is to study the type optimization of small satellite major joint, which is based on static and buckling analysis of honeycomb sandwich plates. Firstly the 3-D FEM model of honeycomb sandwich plates was established by the sandwich plate theory, in which the fork-form or faceplate major joint was buried beforehand. After the liner static and buckling analysis, the maximal Von-Mises stress and buckling load were obtained. Compared with the result of experiment, the failure causation to the Honeycomb Sandwich Plates was then determined. Finally the influence of the structural parameters upon load capacity was discussed, and the optimum major joint type was ascertained.

Key words :major joint; honeycomb sandwich plates; FEM; Von-Mises stress; buckling

现代小卫星通常采用板架式结构。在小卫星板架式主结构中,四块隔板通过六个主结构接头同平台底板与对接环连接,主要通过六个集中点传递整星载荷。如果这六个接头中的一个出现问题,将使整星频率降低,无法有效传递整星的发射载荷,有可能导致卫星发射失败,因此这六个接头可认为是卫星结构的单点故障,必须对其力学性能进行详细的分析。主结构接头主要有两种结构形式:分叉式构形和面板式构形,如图 1 所示。主接头预埋在预隔板的蜂窝芯层中,且在主接头外填充泡沫胶增大主结构接头与蜂窝板蒙皮的胶接面积,提高主结构接头与蒙皮间的抗剪切能力,如图 2 所示。

蜂窝板通常是利用其横向压缩刚度,面内刚度和弯曲刚度常常被忽略,且分析多集中在动力学方面^[1-2]。而在小卫星的结构设计中,主结构接头预埋在隔板中,载荷沿蜂窝板纵向传递。因此有必要对预埋主结构接头蜂窝板试件进行压缩载荷下静力分析和稳定性分析。本文首先针对上述问题建立了相应的三维有限元模型,并确定出等效材料参数,然后分析蜂窝板试件的失效原因,探讨结构参数对蜂窝板承载性能的影响,对主结构接头进行选型优化分析。

1 有限元模型建立

工程中常见的蜂窝夹层结构等效建模方法有三种:三明治夹心板理论、蜂窝板理论以及等效板理论。文献[1]通过比较分析某卫星上蜂窝夹层板的固有频率,证实了三种等效处理方法的合理性和正确性。但三明治夹心板理论方法只对蜂窝夹芯进行等效,而蜂窝板理论和等效板理论方法则是对整个蜂

* 收稿日期:2005-11-06

作者简介:李恩奇(1978—),男,博士生。

窝夹层板进行等效,且三明治夹心板理论有着计算量小,实现容易,模型简单直观,在静力计算中能够较真实地反映应力分布的优点,因此本文选用三明治夹心板理论进行蜂窝板试件有限元建模。

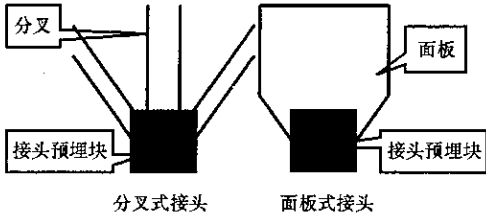


图1 两种接头形式示意图
Fig.1 The type of major joint

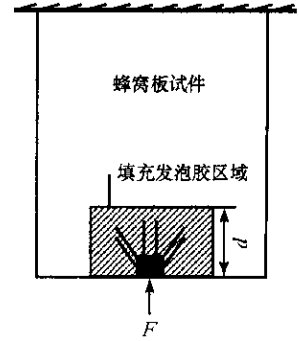


图2 预埋主接头的蜂窝板试件
Fig.2 The honeycomb plate with major joint

在 MSC/NASTRAN 中,将蜂窝板上下两层铝蒙皮简化为 QUAD4 板单元,中间的蜂窝芯层、蜂窝芯和泡沫胶的混合区域都简化为 HEXA 体单元,如图 3 所示。主接头预埋块简化为 HEXA 体单元,接头外凸分叉和面板简化为 QUAD4 板单元。

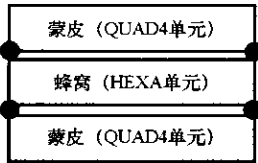


图3 蜂窝板有限元模型示意图
Fig.3 The FEM modal of honeycomb plate

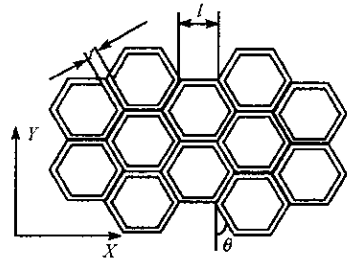


图4 蜂窝夹芯示意图
Fig.4 The cell of honeycomb

应用三明治夹心板理论的先决条件是蜂窝芯层等效材料参数的确定。文献 [3-5] 在此方面都进行了详细的研究。本文的蜂窝芯层为正六边形蜂窝胞元,如图 4 所示,其面内刚度由文献 [4] 中介绍的 Gibson 公式确定,横向刚度 E_z 和剪切刚度 G_{yz} 、 G_{xz} 由文献 [6] 中的经验公式确定:

$$\begin{cases} E_x = E_o \frac{t^3 \cos \theta}{l^3 (1 + \sin \theta) \sin^2 \theta} \\ E_y = E_o \frac{t^3 (1 + \sin \theta)}{l^3 \cos^3 \theta} \\ E_z = 1.54 (t/2l) E_o \\ G_{yz} = 0.53 (t/2l) G_o \\ G_{xz} = 0.77 (t/2l) G_o \end{cases} \quad (1)$$

2 静力与稳定性分析

以预埋分叉型主接头蜂窝板试件为例,进行蜂窝板试件的静力和稳定性分析。压缩载荷 F 为试验压缩破坏载荷的平均值,作用在主接头预埋块的中心处,边界条件如图 2 所示。本节分析中,蜂窝芯层厚度为 25mm,蜂窝芯格边长为 3mm,蜂窝芯格厚度为 0.03mm,蜂窝板铝蒙皮的厚度为 0.3mm,填胶区高度 d 为 55mm。

在压缩载荷 F 作用下,蜂窝板内芯层的应力远远小于外表面铝蒙皮的应力,蜂窝板主要由铝蒙皮承力。图 5 是预埋分叉型主接头蜂窝板试件铝蒙皮 Von-Mises 应力等值线图,蒙皮最大应力位于主接头正上方填胶区的边界线上,为 420MPa,大于铝合金的屈服极限。蒙皮的高应变区也主要集中在填胶区

与蜂窝芯层的交界处。因此填胶区上边界区域最易发生变形,最终导致铝蒙皮在填胶区与蜂窝芯层交界处产生一个外凸的“鼓包”。

由稳定分析知,蜂窝板试件在压缩载荷 F 作用下的第一阶失稳因子是 1.077897,计算失稳载荷大于试验压缩破坏载荷的平均值,失稳形式为整体失稳。在失稳载荷作用下,蜂窝板铝蒙皮最大 Von-Mises 应力达到了强度极限,因此蜂窝板试件在发生整体失稳破坏的同时也伴随着局部强度破坏。

而在主结构接头试验总结报告^[7]中也认为,蜂窝板试件“压缩破坏形式为面板局部失稳”。图 6 是蜂窝板失稳后的记录照片,面板在接头分叉前端处外凸鼓起。

结合理论计算和试验分析可知,随压缩载荷 F 的逐步增大,蜂窝板在发生整体失稳前,铝蒙皮在填胶区和蜂窝芯层交界区域的局部应力就已经超过了屈服极限,材料进入塑性阶段,导致结构的整体承载能力下降,所以试验失稳载荷要小于计算失稳载荷。对于预埋小卫星主接头蜂窝板试件,其压缩破坏是失稳破坏和强度破坏共同作用的结果,强度破坏起主导作用。

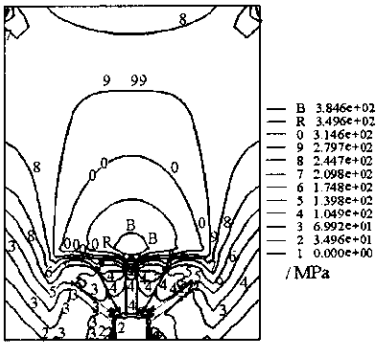


图 5 蜂窝板蒙皮 Von-Mises 应力等值线图

Fig.5 The Von-Mises stress contour in skin of honeycomb plate

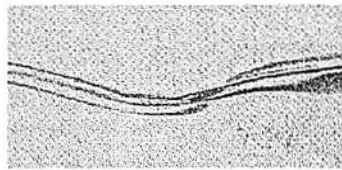


图 6 蜂窝板试验失稳破坏形式

Fig.6 The buckling mode of honeycomb plate in experimentation

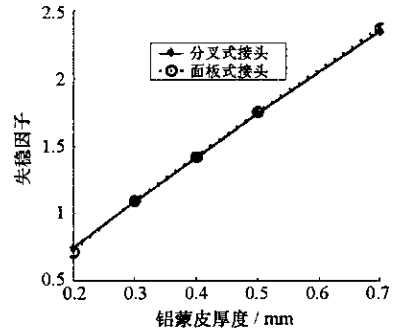


图 7 蜂窝板蒙皮厚度对失稳因子的影响

Fig.7 The effect of skin thickness on buckling factor

3 蜂窝板参数影响和接头选型分析

图 7 给出了蜂窝板试件的失稳因子随铝蒙皮厚度变化的曲线。图中两条曲线基本重合,说明预埋分叉式主接头和面板式主接头的两种蜂窝板试件抗失稳能力基本相当,且由上节分析知,强度破坏是蜂窝板压缩破坏的主要原因,同时考虑到航天器件有着严格的质量限制,因此本节主要分析蜂窝板规格和填胶区域大小对蜂窝板铝蒙皮最大应力·结构总质量的影响,并确定出最优的主接头形式。

图 8 是最大应力·总质量随蜂窝板参数变化曲线,显然蒙皮厚度越大、蜂窝芯层厚度越小、蜂窝芯格边长越大、蜂窝芯格厚度越小,蜂窝板承载性能越好。从图 8(d)可知,最大应力·总质量值对填胶区的大小比较敏感,但当填胶区高度大于 50mm 时,两条曲线都基本上趋于水平。因此在工程加工中泡沫胶填充高度至少要超过 50mm。在图 8 中,面板式接头的曲线都基本上位于分叉式接头曲线的下方,所以面板式接头是一种较好的设计形式。

4 总结

本文采用三明治夹心板理论在 MSC/NASTRAN 建立了预埋小卫星主接头的蜂窝板试件模型,进行了结构静力分析和稳定性分析。计算结果表明,蜂窝板试件的压缩破坏是失稳破坏和强度破坏共同作用的结果,其中强度破坏起主导作用。以蜂窝板铝蒙皮最大应力·结构总质量最小为准则,得出蒙皮厚度越大、蜂窝芯层厚度越小、蜂窝芯格边长越大、蜂窝芯格厚度越小蜂窝板承载性能越好的结论,指出填胶区高度必须大于 50mm,蜂窝板承载性能才能保持稳定。最后确定出面板式接头是小卫星主结构接头的最优设计形式。本文研究工作将为卫星设计部门提供重要参考。

本文工作是在线弹性本构关系的基础上进行的。而静力分析结果表明,在试验压缩破坏载荷的作

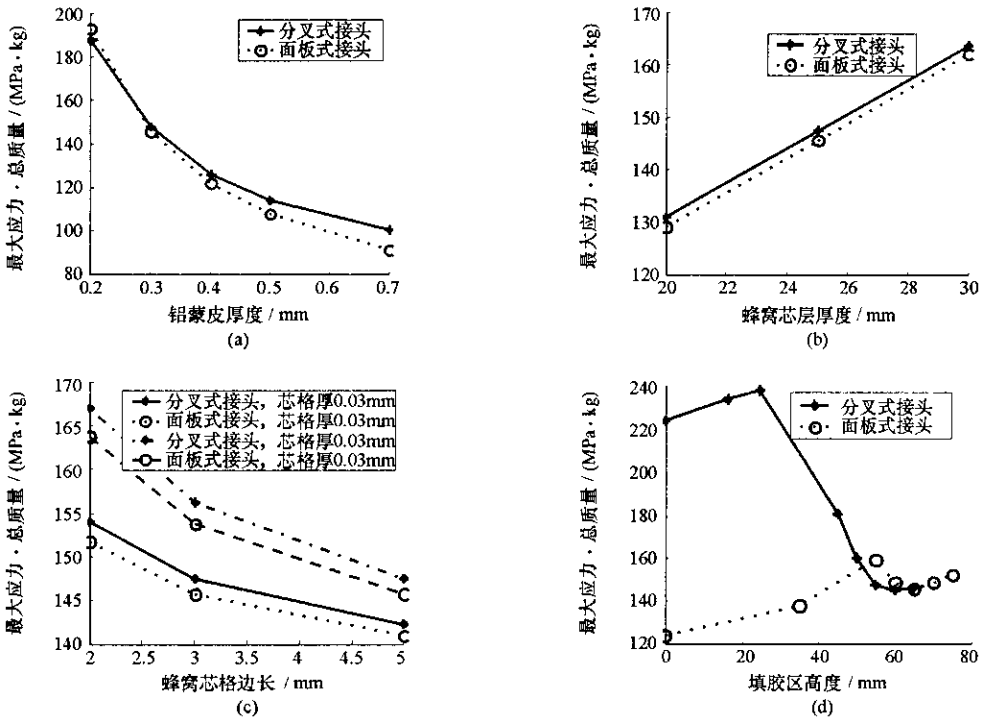


图8 蜂窝板参数对最大应力·总质量的影响

Fig.8 The effect of honeycomb plate parameter on the product of maximum stress and structure mass

用下,铝蒙皮局部材料已经进入塑性阶段,因此在进一步的研究中需要引入弹塑性本构关系。此外,蜂窝芯层和发泡胶混合区域的材料性能有着较强的非线性,在今后工作中有必要研究填胶区材料性能对蜂窝板性能的影响。本文只是将蜂窝芯层作为一个整体,研究了预埋小卫星主接头蜂窝板试件的单向压缩、失稳和破坏机制,没有考虑单个蜂窝胞元局部失稳或破坏^[8]对蜂窝板整体性能的影响。

参考文献:

- [1] 夏利娟,金咸定,汪庠宝. 卫星结构蜂窝夹层板的等效计算[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 999 - 1001.
- [2] 徐胜今,孔宪仁,王本利,等. 正交异性蜂窝夹层板动、静力学问题的等效分析方法[J]. 复合材料学报, 2000, 17(3): 92 - 95.
- [3] 程军,曾伟明,方如华,等. 金属蜂窝夹芯板等效弹性模量的实验测试[J]. 实验力学, 2003, 18(1): 50 - 55.
- [4] 富明慧,尹久仁. 蜂窝夹层的等效弹性参数[J]. 力学学报, 1999, 31(1): 113 - 118.
- [5] 王飞,庄守兵,虞吉林. 用均匀化理论分析蜂窝结构的等效弹性参数[J]. 力学学报, 2002, 34(6): 914 - 923.
- [6] 尹祥祉. 蜂窝夹芯材料的设计和工艺[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1982.
- [7] 航科集团五院总体部6室. xx卫星结构主传力试验件试验总结报告[R]. 航科集团五院总体部, 2004.
- [8] Davalos J F. Buckling Behavior of Honeycomb FRP Core with Partially Restrained Loaded Edges under Out-of-plane Compression [J]. Journal of Composite Materials 2005, 39(16): 1465 - 1485.

