

## 高体份 SiC/Al 复合材料空间相机框架的拓扑优化设计

李 畅<sup>1,2</sup>, 何 欣<sup>1</sup>, 刘 强<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 为了提高空间相机在力/热双重环境条件下的系统稳定性, 同时能够实现系统的轻量化目标, 在某型空间相机的研制过程中选用了具有高比刚度和热稳定性的高体份 SiC/Al 复合材料。采用整体式框架结构, 将基于变密度法的连续体结构拓扑优化方法应用到相机框架结构的初始设计中, 通过设定相应的约束条件和目标函数, 进行迭代求解, 得到了相机框架分别在 X、Y、Z 三个方向重力作用下的结构拓扑优化结果, 结合工艺要求, 最终确定了空间相机框架的设计方案。通过与对比方案比较发现, 经过拓扑优化所得到的框架结构在结构刚度及轻量化率上都有明显提高, 实现了空间相机框架高刚度、轻量化的设计目标。

**关键词:** 拓扑优化; 高体份 SiC/Al 复合材料; 框架结构; 空间相机

**中图分类号:** TH164 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2526-06

## Design and topology optimization of space camera frame fabricated by high volume fraction SiC/Al composite material

Li Chang<sup>1,2</sup>, He Xin<sup>1</sup>, Liu Qiang<sup>1,2</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to improve the system stability of space camera under the force and heat dual environmental conditions, at the same time to achieve lightweight system, high volume fraction SiC/Al composite material with high stiffness ratio and thermal stability has been used in the space camera. According to the integral frame structure, the continuum structure topology optimization based on the variable density method was introduced in the initial design of space camera frame. Iterative solution was operated by setting the corresponding constraints and objective function. The result of topology optimization was obtained under the gravity in X, Y, Z direction. Combining with process requirements, the design of space camera frame was determined finally, and compared with the traditional one. The comparison result shows that the structure stiffness and lightweight ratio of frame structure have been improved after topology optimization. And it helps achieving the design targets of high stiffness and lightweight ratio.

**Key words:** topology optimization; high volume fraction SiC/Al composite material; frame structure; space camera

收稿日期: 2013-12-07; 修订日期: 2014-01-06

基金项目: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程(ZJ99130B)

作者简介: 李畅(1988-), 男, 博士生, 主要从事空间相机结构设计方面的研究。Email: lichangnuaa@qq.com

导师简介: 何欣(1970-), 男, 研究员, 主要从事空间光学遥感器结构技术方面的研究。Email: hexinxp@yahoo.com.cn

## 0 引 言

在空间相机的研制过程中,需要考虑从加工装调到轨道运行所经历的各种环境的影响,提高相机的环境适应能力,使其最终能在恶劣的空间环境下稳定、可靠地完成任任务,是空间相机研制过程中所追求的理想目标,其中最主要的是要提高相机的力学环境和轨道环境的适应能力<sup>[1]</sup>。因而,在空间相机的结构设计中主要考虑的因素就是相机的动静态刚度和温度载荷作用下的尺寸稳定性,解决上述问题的关键便是结构材料的合理选择以及结构形式的设计优化。

随着材料科学的不断进步,复合材料较传统的单一材料展现出了更加优异的性能,但是,目前科研人员在航空航天领域结构材料的选择和使用上仍然比较保守,使得复合材料的使用范围受到了很大的限制,新型结构/热控一体化复合材料——高体份(50%~60%)碳化硅颗粒增强铝基(SiC/Al)复合材料,在空间相机上多用于某些单独的零件,而用于大型空间相机整体框架的情况极为少见<sup>[2-3]</sup>。例如,1985年美国采用 SiC/Al 复合材料制成导弹惯性器件仪表壳体,用以替代钛合金和铝合金,并发展为继铝合金、钛合金之后的第三代航天惯性器件。1985年以后这种材料迅速应用到航天飞机、导弹和卫星等航天器的零部件上。1987~1988年美国 ACMC 公司与亚利桑那大学光学研究中心合作,采用 SiC/Al 复合材料研制成超轻量化(ULW)空间望远镜(包括结构桁架部件与反射镜)<sup>[4]</sup>。DWA 公司采用 SiC/Al 复合

材料制备的液压制动器缸体已用于 F-18“大黄蜂”战斗机、军用 V-22“鱼鹰”直升机,与替代材料铝青铜相比,不仅质量减轻、热膨胀系数降低,而且疲劳极限还提高了 1 倍以上<sup>[5]</sup>。我国制备的 SiC/Al 复合材料卫星相机零件与原设计材料钛合金相比,不仅质量降低了 35%,而且零件的传热性能提高了 10 倍,并且已经应用于我国的资源二号卫星上<sup>[6]</sup>。

目前,针对航空航天领域的结构优化设计研究,大多仅仅局限于尺寸优化和形状优化,有关拓扑优化的研究很少,类似于空间相机框架这种复杂结构的拓扑优化研究就更为少见<sup>[7]</sup>。文中根据高体份 SiC/Al 复合材料的特性,选择该种材料制备空间相机框架,基于 SIMP 材料插值模型的变密度法,结合有限元分析软件,完成了框架结构的拓扑优化设计。

## 1 框架结构材料选择

针对空间相机所经历的环境特点,在选择相机框架结构材料时,主要的考察指标是材料的力学性能和热性能<sup>[8]</sup>。比刚度是材料力学性能的重要衡量指标,是指材料的弹性模量与密度的比值( $E/\rho$ ),采用高比刚度的结构材料,在满足系统刚度要求的前提下,更易于实现结构轻量化的目标。热稳定性是表征材料热性能的重要指标,即材料的导热系数与热膨胀系数的比值( $\lambda/\alpha$ ),热稳定性值越大的材料,空间应用的热适应性越好<sup>[9]</sup>。在实际应用中,除了考虑比刚度和热稳定性外,还要综合考虑材料的成本、机械加工性能等因素。

表 1 列出了较为常用的空间结构材料。比较发

表 1 主要空间结构材料的性能对比

Tab.1 Comparison of main structural materials in space

Material	Elastic modulus E /GPa	Density $\rho/g \cdot cm^{-3}$	Stiffness ratio $E/\rho$	Heat conduction coefficient $\lambda /W \cdot m^{-1}K^{-1}$	Thermal expansion coefficient $\alpha 10^{-6}/K^{-1}$	Thermal stability $\lambda/\alpha$
Al	69	2.70	25.56	167	22.50	7.42
45	200	7.81	25.61	48	11.60	4.14
TC4	114	4.44	25.68	7.4	9.10	0.82
4J32	141	8.10	17.41	13.7	2.40	5.71
Be	287	1.85	155.14	216	11.3	19.12
Low volume fraction SiC/Al	100	2.94	34.01	155	16.00	9.69
High volume fraction SiC/Al	180	3.00	60.00	225	8.00	28.13

现, 铍合金具有较高的比刚度, 但是由于铍粉、铍蒸气具有毒性, 不易于加工, 且制造工艺不成熟, 故排除在外。高体份 SiC/Al 复合材料在力学性能和热性能两方面的功能特性都更为突出: 它不仅具有比铝合金和钛合金高出近两倍的比刚度, 其热膨胀系数比钛合金还低, 且热导率远优于钛合金甚至铝合金<sup>[9]</sup>。因此, 选择用高体份 SiC/Al 复合材料作为某空间相机框架的结构材料。这样不仅可以大幅度减轻框架重量, 且易于保证结构精度, 降低光机系统在失重及大范围高低温交变下产生的光学误差, 增强对空间环境的适应性。

北京航空材料研究院采用无压浸渗工艺, 具有制备直径或对角线达 1.5 m 的高体份 SiC/Al 复合材料大型构件的能力。金相组织特征表明 SiC 颗粒与铝合金基体的界面结合状况良好, 组织较为均匀、致密, 且无任何界面反应产物, 为低热阻、低电阻、高结合强度的原子间直接匹配物理冶金结合型界面。完全满足高体份 SiC/Al 复合材料的结构/热控一体化要求<sup>[2]</sup>。

## 2 相机框架结构设计优化

框架结构设计优化通常是一个从结构到强度, 再从强度到结构的多次反复、不断逼近的过程。在这个过程中, 设计人员在很大程度上依赖经验和类比来进行设计, 而分析人员则需要重复的进行模型修改、分析、校核, 整个过程耗时多、周期长、工作量大。为了提高工作效率, 采用结构和强度共同参与的拓扑优化设计方法, 将强度由被动校核变为主动设计, 确定强度必须的设计参数, 结合结构设计要求, 再交给结构设计人员完成最终的设计。自 BENDSOE 等首次提出连续体结构拓扑优化概念和基于均匀化理论的拓扑优化方法-均匀化法以来<sup>[10]</sup>, 连续体结构拓扑优化方法就被公认为结构优化研究领域的热点之一。一方面拓扑优化大大减少了建模方面的工作量, 另一方面它可以在改善结构性能的基础上大大减轻结构的重量。

### 2.1 拓扑优化概述

结构拓扑优化的目的是在特定的设计空间、载荷以及边界条件的前提下, 寻求材料的最优分布。拓扑优化能在工程结构设计的初始阶段为设计者提供一个概念性设计, 使结构在布局上采用最优方

案, 与截面优化和形状优化相比能取得更大的经济效益<sup>[11]</sup>。

均匀化法 (homogenization method) 和变密度法 (variable density method) 是目前最为常见的两种连续体结构拓扑优化方法<sup>[12]</sup>。早期的 MSC.Nastran 的拓扑优化功能是基于均匀化法的, 而目前则采用了工程应用普遍接受的变密度法。变密度法受均匀化法的启发, 但不引入微孔结构, 相对均匀化方法具有设计变量少的优点。变密度法的一个重要特征就是假定材料的宏观属性(如弹性模量、许用应力)与伪密度有着某种关系, 在具体优化过程中, 变密度方法将 0-1 离散变量的优化问题变为一个(0, 1)之间取值的连续变量的优化问题。为了消除中间密度材料, 变密度法通过惩罚因子对设计变量在(0, 1)之间的中间密度值进行惩罚, 使连续变量的拓扑优化模型能很好地逼近传统的 0-1 离散变量的拓扑优化模型。中间密度单元对应很小的弹性模量, 对结构刚度矩阵的影响很小, 可以近似地认为将该单元处的材料删除。

变密度法中常见的插值模型包括 Hashin-Shtrikman 模型, 固体各向同性惩罚微结构模型(solid isotropic microstructures with penalization, SIMP)和材料属性的有理近似模型 (rational approximation of material properties, RAMP)等。其中, SIMP 方法假设材料密度在单元内是常数并以其为设计变量, 而材料特性用单元密度的指数函数来模拟, 简化了计算求解过程。优化过程中以单元设计变量的大小决定单元取舍, 在消除棋盘格现象和数值稳定性方面有了很大的提高。其材料插值数学模型可表示为:

$$E = \rho^p E_0 \quad (1)$$

式中:  $E$  和  $\rho$  分别表示设计单元的弹性模量和密度;  $E_0$  表示结构初始弹性模量;  $p$  为惩罚因子, 用于迫使设计变量的值在 0~1 之间, 惩罚因子的值通常取 2~5 之间的值。

在静力优化问题中, 通常以结构柔顺度最小化(或刚度最大化、应变能最小化)作为优化的目标函数, 以结构体积比作为优化的约束函数<sup>[13]</sup>。其数学模型可表示为:

$$\begin{aligned} \min C &= F^T U = U^T K U \\ \text{s.t.} & \begin{cases} V(\rho)/V_0 - f \leq 0 \\ K U = F \\ 0 < \rho_{\min} \leq \rho \leq 1 \end{cases} \quad (2) \end{aligned}$$

式中:  $C$  为柔顺度值,  $F, U, K$  分别表示力矩阵, 位移矩阵和刚度矩阵;  $V_0$  和  $V$  分别表示初始结构和优化结构体积;  $f$  是优化体积比;  $\rho_{min}$  是拓扑变量下限, 用于避免有限元计算时单元刚度矩阵奇异, 通常可取拓扑变量下限值  $\rho_{min}=10^{-3}$ 。

### 2.2 框架拓扑优化应用

某型空间相机采用离轴三反光学系统, 由于焦距较短, 前后框架间距较小, 因此采用整体式结构设计, 分块制备, 整体焊接成型<sup>[14]</sup>, 框架材料选择高体份 SiC/Al 复合材料。此方案与采用碳纤维杆的桁架式结构相比, 具有材料连续, 结构刚度和稳定性高, 不易产生较大的应力集中, 无需装配, 空间利用率高等优点, 多用于中小型空间相机中。

相机框架外形尺寸的设计依据是, 在保证光学系统中的光学元件被安装在指定位置的前提下, 将相机整体尺寸设计得尽量小。由于该相机的光学元件在位置分布上趋于前后两组的形式, 根据光学系统的特点, 前组反射镜安装在框架的前端面上, 后组反射镜安装在框架的后端面上。为保证框架前后端面具有足够的刚度, 采用高强度的加强筋与薄壁组合的结构形式, 组成多个结构封闭的四边形单元, 在设计时主要考虑加工装配的工艺性和可检测性等因素。文中框架优化设计的主要区域为起连接作用的框架侧面和底面, 利用有限元分析软件 MSC.Patran, 建立了框架拓扑优化的初始结构模型, 如图 1 所示。

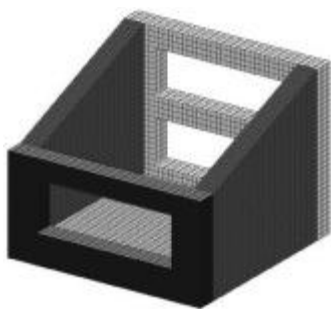


图 1 框架结构初始模型

Fig.1 Frame structure initial model

针对优化区域的拓扑优化流程如图 2 所示。以高体份 SiC/Al 复合材料的密度为设计变量, 以框架结构的总柔顺度为目标函数, 以保留体积比例为约束函数, 进行迭代求解, 最后得到相机框架在 X、Y、Z 三个方向重力分别作用下的结构拓扑优化结果, 如图 3 所示。

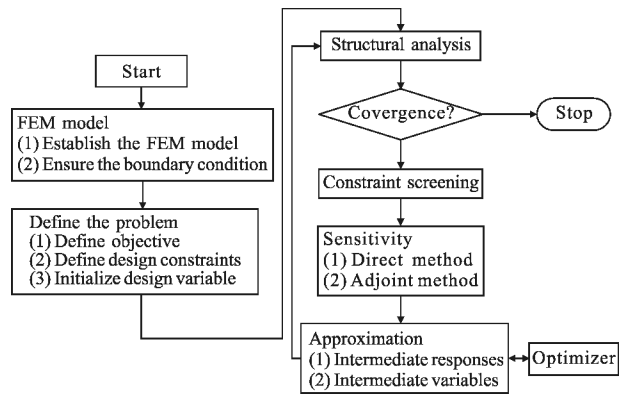


图 2 拓扑优化流程图

Fig.2 Flow chart of topology optimization

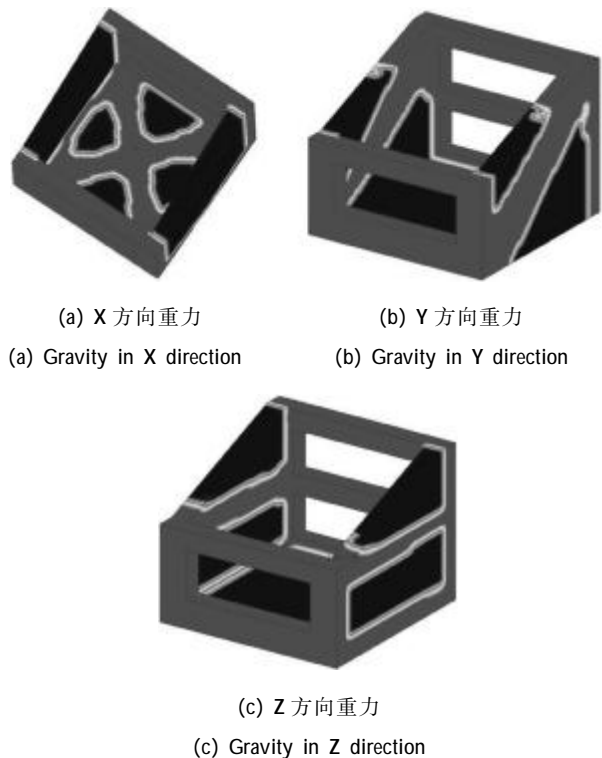


图 3 X、Y、Z 方向重力作用下拓扑优化结果

Fig.3 Topology optimization result under the gravity in X, Y, Z direction

拓扑优化得到的轻量化形式并不能直接应用于工程中, 需要结合工程实际要求稍作改动。根据优化结果中的材料密度分布结果, 尽可能多地去除单元密度很小的部分材料, 把拓扑优化结果模型转换为较容易制造和加工的加强筋形式。综合框架在 X、Y、Z 三个方向重力作用下的拓扑优化结果, 在不改动拓扑形式的情况下, 结合工艺要求, 最终确定空间相机框架的设计方案如图 4 所示。



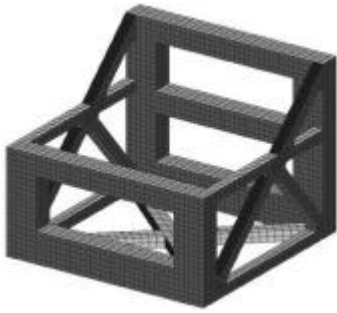


图 4 拓扑优化后空间相机框架最终模型

Fig.4 Final space camera frame model after topology optimization

### 2.3 优化结果对比

根据传统设计方案,建立框架对比模型,结构如图 5 所示。考察拓扑优化前后,空间相机框架刚度及质量的变化。通过有限元软件分别计算分析两种相机框架在底端四点约束工况下的模态,分析结果对比如表 2 所示。

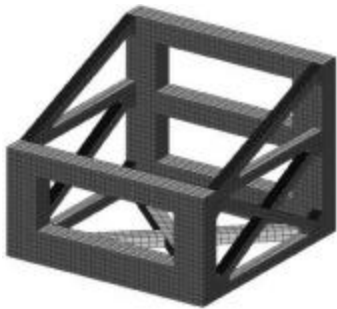


图 5 对比模型

Fig.5 Comparative model

表 2 空间相机拓扑优化前后设计结果对比

Tab.2 Result contrast before and after topology optimization

	Frequency/Hz			Lightweight rate
	First-order	Second-order	Third-order	
Before	197.72	232.34	270.60	55.2%
After	215.61	258.48	296.33	60.1%
Addition	17.89	26.14	25.73	4.9%

根据分析结果可以看出,经过拓扑优化方法得到的空间相机框架较传统对比方案,一阶频率提高了 17.89 Hz,二阶频率提高了 26.14 Hz,三阶频率提高了 25.73 Hz,结构刚度明显提高,与此同时,框架的轻量化率也提高了 4.9%,有效降低了框架的质量,从而实

现了空间相机框架结构的最佳拓扑结构形式设计。

### 3 结论

高体份 SiC/Al 复合材料因其具有较高的弹性模量、超高的比刚度等优异的机械性能,以及低膨胀、高导热、高导电等良好的物理性能,将其作为某型空间相机框架材料。采用整体式结构,在框架具体结构形式未知的前提下,依据变密度法建立 SIMP 材料插值模型,完成框架结构的拓扑优化设计。与传统对比方案相比,在降低了结构质量的同时,前三阶频率均有较大改善,提高了结构的比刚度,避免了设计过程中的主观性和盲目性,极大的提高了设计效率,说明变密度结构拓扑优化方法在结构优化设计上的可行性和有效性,为以后的空间相机结构轻量化设计提供直接的参考价值。

### 参考文献:

- [1] Guo Jiang, Shao Mingdong, Wang Guoliang, et al. Design of optical-mechanical structure made of CFC in space remote sensing camera[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 571-578. (in Chinese)  
郭疆, 邵明东, 王国良, 等. 空间遥感相机碳纤维机身结构设计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 571-578.
- [2] Cui Yan, Wang Lifeng, Ren Jianyue. Multi-functional SiC/Al composites for aerospace applications [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2008, 21: 578-584.
- [3] Gao Minghui, Zhang Jun, Li Jinglin, et al. Feasibility analysis of high volume fraction SiC/Al mirror application in space optics[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(7): 1803-1807. (in Chinese)  
高明辉, 张军, 李景林, 等. 高体份 SiC/Al 反射镜在空间光学应用可行性的分析[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(7): 1803-1807.
- [4] Miracle D B. Aeronautical applications of metal matrix composites [J]. ASM Int, 2001, 21: 1043-1049.
- [5] Hunt W H. Aluminum metal matrix composites today [J]. Materials Science Forum, 2000, 331: 71-84.
- [6] Jin Peng, Liu Yue, Li Shu, et al. Aerospace applications of particulate reinforced aluminum matrix composites [J]. Journal of Materials, 2009, 23(6): 24-27. (in Chinese)  
金鹏, 刘越, 李曙, 等. 颗粒增强铝基复合材料在航空航天领域的应用[J]. 材料导报, 2009, 23(6): 24-27.
- [7] An Yuan, Jia Xuezhi, Zhang Lei, et al. Optimizing design of

- CFRP based main backbone with high stiffness ratio for space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(2): 416-422. (in Chinese)
- 安源, 贾学志, 张雷, 等. 基于碳纤维复合材料的空间高比刚度主承力板优化设计 [J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(2): 416-422.
- [8] Yoder P R. *Opto-Mechanical System Design* [M]. 2nd ed. New York: MarCel Dekker, 1993.
- [9] Liu Qiang, Zhang Feng, He Xin, et al. Research of materials matching in optical remote sensor based on weight coefficient analysis method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 206-211. (in Chinese)
- 刘强, 张峰, 何欣, 等. 应用权重计算方法的光学遥感器材料间匹配性研究 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 206-211.
- [10] Bendsoe M P, Kikuch I N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method [J]. *Compute Methods in Applying Mechanism & Engine*, 1988, 71(2): 197-224.
- [11] Hei Mo, Lu Yafei, Zhang Zhiyong, et al. Design of fast steering mirror based on dynamic model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(1): 53-61. (in Chinese)
- 黑沫, 鲁亚飞, 张智永, 等. 基于动力学模型快速反射镜设计[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(1): 53-61.
- [12] Tian Lisi, Li Xianghui, Ma Yuefeng, et al. *Guidance for MSC Nastran Dynamic Analysis* [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2012: 241-257. (in Chinese)
- 田利思, 李相辉, 马越峰, 等. *MSC Nastran 动力学分析指南*[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012: 241-257.
- [13] Sha Wei, Chen Changzheng, Zhang Xingxiang, et al. Topological lightweight design of space mirror [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, 36(4): 35-39. (in Chinese)
- 沙巍, 陈长征, 张星祥, 等. 空间反射镜轻量化结构的拓扑优化设计[J]. *光电工程*, 2009, 36(4): 35-39.
- [14] Xin Hongwei, Guan Yingjun, Chai Fangmao. Design of main support of off-axis space remote sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(6): 1257-1264. (in Chinese)
- 辛宏伟, 关英俊, 柴方茂. 离轴空间遥感器主支撑结构设计[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(6): 1257-1264.