

空间相机主镜组件加工过程中的 疲劳寿命分析

杨近松

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 在空间相机主镜镜面加工过程中, 磨盘与主镜间磨削动作往复运行, 使主镜柔性支撑结构受到交变载荷作用, 这种交变载荷会引起结构疲劳破坏。按应力-寿命 (S-N) 法进行疲劳寿命分析, 分析结果表明, 主镜柔性支撑结构的疲劳寿命满足使用要求。通过疲劳寿命仿真分析, 可以有效预示光学结构在加工、运输、使用过程中的疲劳强度, 减少试验次数及成本, 为空间相机结构的可靠性设计提供理论依据。

关键词: 空间相机; 主镜; 加工; 疲劳寿命

中图分类号: V248.3

文献标识码: A

DOI: 10.3788/OMEI20112805.0017

Fatigue Life Analysis in Machined Course of Primary Mirror Group of Space Camera

YANG Jin-song

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: In the course of primary mirror face of space camera being machined, milling action runs repeatedly between millstones and primary mirror, which brings about the alternately changed load in the soft support structure of primary mirror. The alternately changed load can lead to fatigue destruction of the structure. Fatigue life is analyzed by S-N method in this paper, the analyzed results show that the fatigue life of the soft support structure meets the demand. The simulated analysis of fatigue life can forebode effectively the fatigue intensity in the course of the structure being machined and used, reduce experiment times and cost, and provide theory foundation for reliability design of space camera structure.

Keywords: space camera; primary mirror; machine; fatigue life

1 引言

疲劳是结构在一定载荷水平范围内（小于极限静载荷）承受重复性载荷而产生的一种现象^[1]，这种重复性载荷最终会导致结构疲劳失效。根据仿真计算得出应力应变结果，进行疲劳寿命分析是结构可靠性研究的主要内容^[2]。

本文所述空间相机主镜采用组件组合加工方法，即在主镜轻量化工作完成后，将其支撑结构装配后对主镜镜面进行磨削与抛光。在镜面加工过程中，磨盘与主镜间磨削动作往复运行，使主镜柔性支撑结构受到交变载荷作用，有可能引起结构的疲劳破坏，因此，有必要对主镜组件加工过程中的支撑结构进行疲劳寿命分析。

2 加工条件参数

磨盘自重 在 20~50 kg 间可调，直径 $\varphi 300\sim 400$ mm；

主镜自转速度 8 r/min，直径 $\varphi 620$ mm；

摆杆往复运动 12 r/min；

全加工过程的载荷循环次数：60（天） $\times 8$ （小时） $\times 60$ （分） $\times 12$ （次）=345 600 次。

3 疲劳分析简述

疲劳分析分为应力分析和寿命分析两部分。

应力分析是在一定载荷作用下结构的应力响应，其应力响应结果将作为寿命分析的输入参数，这部分的工作与常规的力学响应（静力学响应、瞬态响应等）分析一致。基本分析过程为：有限元模型的建立→分析求解→后处理→查找关心点/部位的应力响应。

疲劳寿命分析是在特定载荷交变作用下结构的寿命分析。疲劳寿命分析的方法较多，根据本文结构的特点，采用应力-寿命（S-N）法分析计算，这种方法的结果为材料的总体寿命，材料的塑性在 S-N 曲线中体现^[3-5]。

4 应力分析

4.1 主镜组件的有限元模型

主镜组件包含主镜、柔性支撑结构、小三角板、中心定位结构和大三角板等。为最大程度忠实于原结构，各构件采用六面体单元划分，构件之间的连接采用节点直接对接，划分好的组件模型共有节点 116 724 个、单元 78 583 个。有限元模型示意图如图 1 所示。

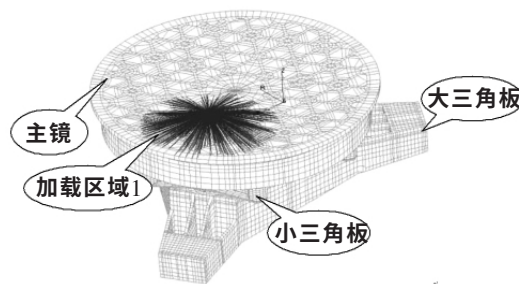


图1 主镜组件有限元模型示意图

主镜组件中涉及 3 种材料，其材料的力学属性如表 1 所示。

表1 材料属性表

序号	名称	密度 ρ (g/cm ³)	弹性模量 E (Gpa)	泊松比 μ	屈服强度 σ_b (MPa)
1	4J32	8.18	141	0.25	470
2	TC4	4.44	109	0.34	895
3	微晶玻璃	2.53	90.6	0.24	

约束：加工时在大三角板的底部加装一个斜板，使主镜的镜面水平。分析计算时按主镜组件上大三角板安装用螺钉孔全约束处理。

工况：对主镜组件设定如表 2 所示两种工况。

表2 主镜组件的外载荷作用方式

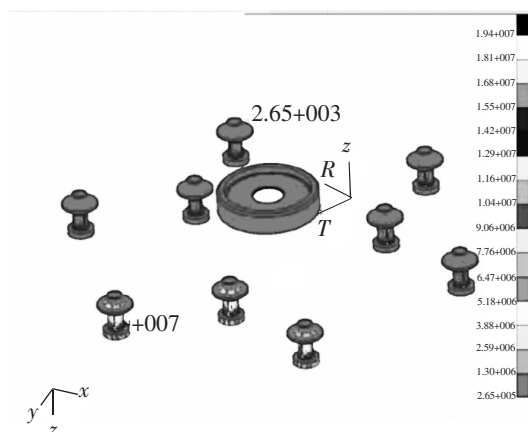
工况	载荷作用方式
1	磨盘作用在某小三角板的正上方（图1中加载区域1），载荷包括重力、正压力和径向、切向两方向上的摩擦力。
2	磨盘作用在两小三角板之间正上方，载荷包括重力、正压力和径向、切向两方向上的摩擦力。

4.2 应力响应结果

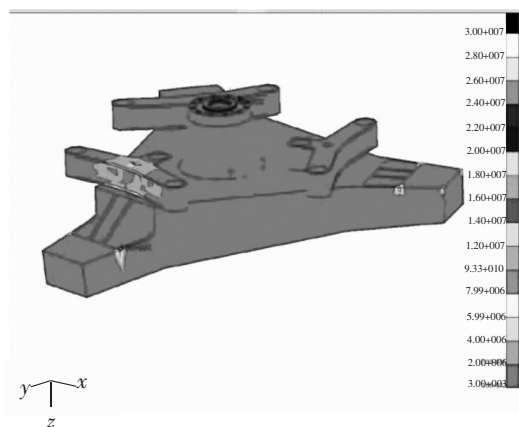
以表2所示工况将载荷施加于有限元模型中,得到如表3所示应力响应。该应力水平相对于其材料屈服明显较小,所以预计其寿命将会较长。

表3 静载荷应力响应

工况	材料	最大主应力 (MPa)	最大主应力发生部位	应力分布
1	4J32	18.1	柔性支撑结构处	图1
	TC4	30.7	大三角板之固定联接处	
2	4J32	18.4	柔性支撑结构处	图2
	TC4	28.7	大三角板之固定联接处	

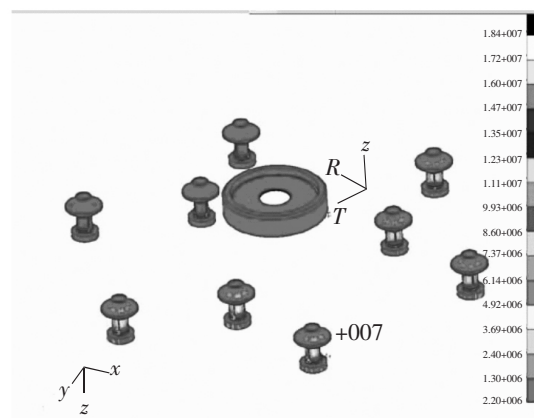


(a) 殷钢4J32

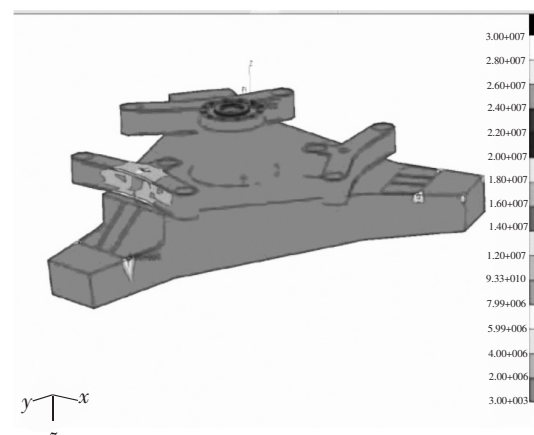


(b) 钛合金TC4

图1 工况1应力响应云图



(a) 殷钢4J32



(b) 钛合金TC4

图2 工况2应力响应云图

5 疲劳寿命分析

5.1 应力-寿命 (S-N) 曲线

由于没有所用材料的真实 S-N 曲线,所以按 MSC-Fatigue 材料库中的材料类型及材料手册中得到的弹性模量 E 、屈服强度 σ_b 自制材料的 S-N 曲线(如图3所示),所用数据如表4所示。应力-寿命 (S-N) 曲线由 Y 轴截距 SRI_1 、第一段曲线的斜率 b_1 、第二段曲线的斜率 b_2 、弹性模量 E 、屈服强度 σ_b (UTS) 等参数构成。

采用这种方法得到的 S-N 曲线,只能起到参考作用,对探讨材料的疲劳失效概率的相对值是有效的,但对寿命预估的绝对值只能作为设计参考。

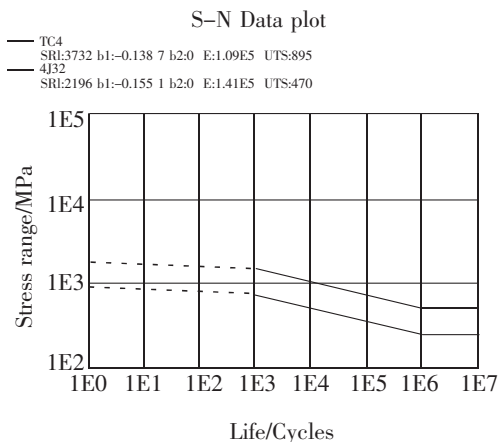


图3 自制的殷钢 4J32 和钛合金 TC4 的 S-N 曲线

表4 制备S-N曲线的输入数据

材料	弹性模量 E (GPa)	屈服强度 σ_b (MPa)	MSC-Fatigue材料库 (材料号及材料说明)
4J32	141	470	700: 锻造镍合金 (WNIA)
TC4	109	895	300: 钛合金 (TA)

5.2 寿命分析

按交变载荷的循环规律 (如图 4) 对主镜组件进行疲劳损伤问题探索, 时间 T 为 1 个周期。按失效概率 0.1% 计算得到殷钢 4J32 和钛合金 TC4 的疲劳寿命均报告为 “cutoff”, 即计算寿命结果超出寿命曲线有效范围。说明这两种材料在两种工况下的寿命均足够大。

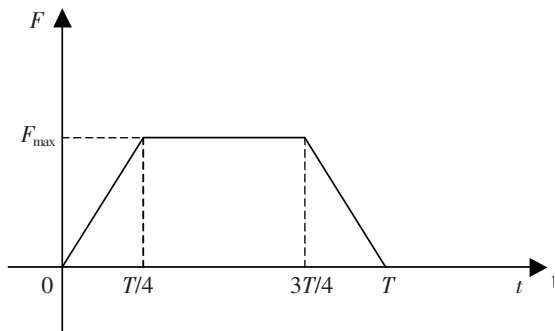


图4 载荷的循环规律示意图

6 误差源分析

仿真分析作为辅助结构设计是十分必要的, 但它不能完全取代试验, 因为仿真过程中或多或少会存在一定误差。主要误差源分析如下。

6.1 约束与联接处理

大三角板的固定、大小三角板间、小三角板与柔头间均用螺钉联结, 联结刚度由螺钉本身、预紧力、接触表面状态等因素决定。分析计算模型中, 模拟螺钉联接用节点直接联接, 而将大三角板的固定孔处节点的自由度全约束, 这样可能使分析计算模型的约束较实物模型的约束强, 应力的分布也会发生一定变化。

另外, 殷钢与主镜间用胶接方式联接, 由于其厚度较小而直接处理为节点联接, 也可能引入仿真误差。

6.2 材料属性

材料属性是参考材料表而得, 这样无形中就引入了刚度和质量偏差, 因为材料表上的参数是在一定工艺、测试条件下测试所得, 而具体使用的材料却不一定是在这种条件下制造出来的, 因此, 从理论上讲, 分析模型存在一定的材料属性误差。

6.3 其他

虽然有限元模型中可能还存在各种各样的误差来源, 但往往所建立的有限元模型还是“先天无缺陷”模型, 即对加工和装配中存在的缺陷或误差 (有时这种误差是合理的) 未予考虑, 如孔轴之间的配合间隙、由于加工误差引起的联结面配合不理想等问题。

对这类问题的解决, 主要方法是在仿真计算过程中不断地积累经验, 并对有关问题进行进一步的讨论, 需要设计、加工、装调环节人员的共同配合, 分析仿真过程中出现的各种问题, 找到计算模型与实际物理模型间的差距, 并予以克服。

参考文献

- [1] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [2] 王成国, 孟广伟, 原亮明, 等. 新型高速客车构架的疲劳寿命数值仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(3): 91-95.
- [3] 王明珠, 姚卫星. 随机振动载荷下缺口件疲劳寿命分析的频域法[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(4): 489-492.
- [4] 彭为, 靳晓雄. 基于有限元分析的轿车零件疲劳寿命预测[J]. 汽车工程, 2004, 26(4): 507-509.
- [5] 过玉卿, 丁卫东. 起重机结构连接件疲劳寿命估算方法[J]. 武汉钢铁学院学报, 1992, 15(1): 42-50.

作者简介: 杨近松(1969-), 男, 吉林长春人, 硕士, 副研究员, 1995年于中科院长春光机所获得硕士学位, 主要从事CAD/CAE技术的研究。E-mail: yangjs@ciomp.ac.cn

《发 光 学 报》

——EI核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于1980年创刊, 曾于1992年, 1996年, 2000年和2004年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于2000年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自1999年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自2000年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自2002年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自2003年已定期收录检索该刊论文; 2008年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊; 2010年被美国“EI”确定为源期刊。2001年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002年获中国科学院2001~2002年度科学出版基金“择重”资助。2004年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自2011年改为月刊, A4开本, 144页, 国内外公开发行。国内定价: 40元, 全年480元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路3888号

电 话: (0431) 86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4

国内邮发代号: 12-312

邮 编: 130033

http://www.fgxb.org

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国外发行代号: 4863BM