

粘结连接在望远镜主镜支撑中应力分散作用研究

李剑锋

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 支撑与镜面的连接是大型望远镜主镜支撑的关键技术之一, 连接的好坏直接影响望远镜的成像质量。相比于机械紧固方式, 粘结连接具有重量轻、成本低、易于装配等优点, 常被用来作为支撑和主镜的连接方式。而硅橡胶粘结剂在固化后模量较低, 因此硅橡胶粘结层还具有分散应力的作用。过去对主镜粘结研究主要集中在粘结强度方面, 而对其他性能研究较少。本文使用有限元方法对粘结层的力分散作用进行了系统研究, 借鉴了MMT望远镜的分析方法, 通过计算应力分散因子PCF来评价粘结层的应力分散能力, 并分析了粘结层模量、厚度等对力分散作用的影响。

关键词: 粘结连接; 主镜支撑; 应力分散, 有限元分析

中图分类号: TH851

文献标识: A

文章编号: 1672-9870(2011)03-0023-05

Reserch on The Stress Dispersion of Bond Connentcion Used in Telescope Primary Mirror Support System

LI Jianfeng

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

Abstract: Support and the surface of the mirror connection and primary mirror is one of the key technologies of large telescope. The connection can directly effect the telescope image quality. Compared to the mechanical connection, the bond connection is lighter, cheaper and easier fixed. And the bond layer has stress dispersion effect. In the past, the study of bond connection was mainly on the bond strength. In this article, the stress dispersion effect of bond connection was studied systemly. The analysis method of Mutiply mirror telescope (MMT) was borrowed. And the pressure concentration factor (PCF) was used to value the stress dispersion effect. The influence of bond module and thickness to PCF was also studied.

Key words: bonding connection; primary mirror support system; stress dispersion; finite element anlysys

在反射式光学望远镜中,主反射镜是其关键部件,主镜的面形直接影响望远镜的成像质量^[1]。影响主镜面形的因素除了镜面的加工误差外,镜面的重力和支撑系统也将产生附加的镜面误差。而支撑安装技术对主镜最终的面形影响也很大。支撑和主镜的常用连接方式有机械连接和使用粘结剂连接,相比机械紧固方式,粘结剂连接具有重量轻、成本低、易于装配等优点,常被用来作为支撑和主镜的连接方式。而且相对于机械连接方式,粘结连接在对于轻量化主镜时更有优势。由于大型望远镜的重量和制作成本很大程度上都是由主镜决定的,研究表明主镜的重量是主镜重量的二次方,而制作成本是

主镜质量的四次方^[2,3],现代大型望远镜制作中在要求主反射镜满足口径要求之外,一般要求降低主镜的质量,因此很多大型反射镜的主镜都进行了轻量化设计。轻量化后的主镜质量大幅下降,但主镜的刚度也在下降,微小的作用力都有可能引起主镜较大的变形,这就为主镜支撑特别是支撑和主镜的连接提出了更高的要求。而且传统的机械连接方式极易引起应力集中,特别是对于主镜轻量化的薄壁结构,由于强度较低,在机械连接时可能造成主镜破坏。而采用粘结连接时,主镜和支撑之间是一层模量较低的橡胶层,这层粘结层可以使支撑应力分布更为均匀,不至于出现应力集中的现象。

收稿日期: 2011-07-14

作者简介: 李剑锋(1982-),男,博士,助理研究员,主要从事光机结构设计和分析, E-mail: ljfengli@mail.ustc.edu.cn.

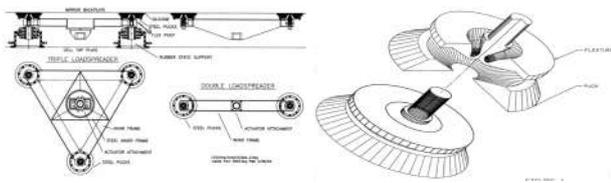


图1 MMT主镜支撑结构

Fig.1 Mirror support structure of multiply mirrors telescope^[1]

国外6米的Mutiply mirrors telescope (MMT)的主镜支撑就使用了2mm厚的硅橡胶粘结层作为支撑和主镜的连接。MMT的支撑采用主动支撑技术,使用104个力促动器输出主动力,力促动器通过三脚架结构(load spreader)将主动力传递给主镜,三脚架结构三个顶点处分别连接三个支撑块(puck),支撑块的形状像一个倒扣的碗,大口部分通过2mm厚的粘结层和主镜链接,小口部分通过一个柔性机构和三脚架连接,具体的结构在图1中给出^[4]。MMT的主镜支撑中使用2mm厚粘结层一是起到连接作用,二是在安装和实际使用中主镜支撑可能会受到意外的力和力矩,例如由于热膨胀系数不同,支撑块和主镜的膨胀不同,它们之间会产生热应力;当主镜支撑安装或实际使用中产生变形,或安装偏心时也会使主镜受到额外的力。当出现这些意外情况时,2mm厚的粘结层可以起到缓冲和分散力的作用,使主镜不至于受力过大而导致破坏。

国内对于使用粘结连接的研究主要集中在如何保证粘结强度方面,而对于粘结连接在应力分散等方面的研究较少。本文针对粘结层的应力分散进行了仿真研究。借鉴了MMT的分析方法,通过计算粘结层和主镜的接触层的应力,找出最大应力和平均应力之比PCF,用PCF来评价粘结层的应力分散情况。还计算了使用不同参数时粘结层的PCF值。本文首先给出分析模型,然后依次分析不同模量和厚度粘结层对PCF的影响,并同MMT计算结果进行了对比和讨论。

1 分析模型

本文建立支撑结构和粘结层的模型时,借鉴了MMT的分析,建立的模型几何尺寸和MMT模型相差不大。而对于粘结层的仿真分别采用两种方法,一种是利用Ansys的超弹性体单元来模拟粘结层,另一种方法使用Ansys的普通单元进行模拟。由于橡胶粘结层属于高分子材料,高分子材料的力学性能具有静态超弹性,动态粘弹性。其中静态超弹性是指粘结层在力作用下有大变形,伸长率可以达到

1000%,粘结层在受压时也可以表现为大变形。当粘结层变形较大时,普通弹性体单元模拟粘结层已经不能适用,需要利用ansys的超弹性体单元进行模拟,求解时也需要进行非线性大变形分析。但当粘结层变形较小时也可使用普通弹性体单元进行模拟,MMT文献中对MMT粘结层的分析就使用了这种方法。为了找出更准确实用的模拟方法,本文分别使用两种单元对相同情况进行了计算。

表1 不同弹性体单元参数

Tab.1 Parameters of different element

	超弹性体单元	普通弹性体单元
单元号	Plane182	Plane42
单元参数	两参数Mooney-Rivlin模型,其中 C1=0.735,C2=0.035,2/K= 6.93063E-5[2];泊松比:0.49932[1]	模量:5.6MPa[1];泊 松比:0.49932[1]

表1中给出了两种不同单元的参数,其中超弹性体单元为plane182,它使用两参数门尼模型,其中参数参考文献[5]给出。普通弹性体单元为plane42,它使用典型硅橡胶拉伸模量的参数。为了方便分析本文还建立了两种网络模型,一种是二维的轴对称模型,如图2(a)所示;另一种是三维模型,如图2(b)所示。此处分析使用了二维轴对称网格模型,模型中粘结层厚度均为2mm,在中心轴施加Y向载荷1000/3N,粘结层端部固定。

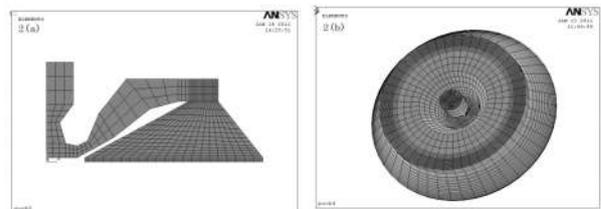


图2 2D和3DAnsys模型

Fig.2 2D and 3D ansys models

图3(a)中给出使用不同单元计算得到的粘结层与玻璃接触面处应力分布曲线,从图中可以看出使用不同单元计算结果相差不大,曲线趋势基本一致。因此使用不同弹性体单元对于分析应力分布影响不大。图3(b)中给出了使用不同单元体计算得到的粘结层与支撑连接处的位移随轴向距离变化曲线。从图中可以看出使用超弹体单元与普通弹性体单元计算得到位移变化存在较大的差距,但两条曲线的变化趋势基本一致。使用超弹体单元计算得到的位移值明显大于使用普通弹性体单元得到的位移值,原因是超弹体单元的等效刚度大于使用普通弹性体单元的等效刚度,即设定的超单体单元硬于普通弹性体单元,所以计算得到的位移较小。在图4

的变形图中也可以看出这一趋势,图4(a)中为使用超弹性体计算得到的位移图,图4(b)为使用普通弹性体计算得到的位移图,可以看出使用普通单元计算时粘结层因为受压有明显的侧向变形,这也说明了普通单元的刚度小,变形大。但两种单元计算得到的位移曲线趋势变化一致,这也说明在分析时使用两种单元效果等效。

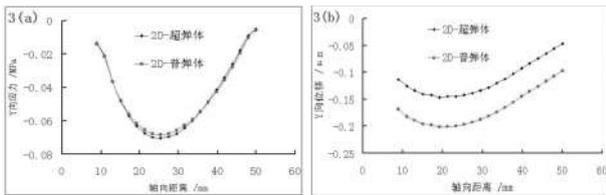


图3 不同模型分析结果-Y向应力和Y向位移
Fig. 3 Results of different models: stress and strain of y direction.

从上面分析可以看出使用超弹性单元和普通弹性单元对于分析影响不大,原因是实际中橡胶粘结层很薄,只有几毫米,变形也较小,属于小变形的情况,因此使用普通弹性体单元分析也可以获得较好的结果,在文献[1]中MMT就是用了普通弹性体单元进行分析的,因此本文后面的分析都是使用普通弹性体单元。

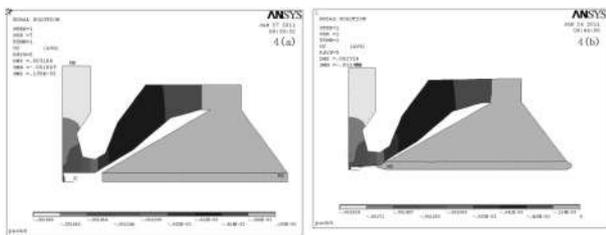


图4 不同弹性单元分析结果-Y向变形图
Fig.4 Results of different elements: deformation of y direction

2 结果和讨论

2.1 应力分散因子

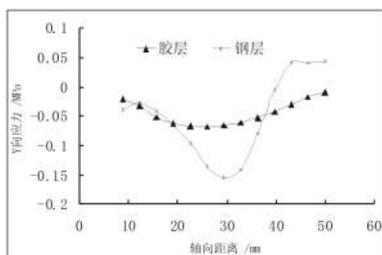


图5 不同连接层的分析结果-Y向应力
Fig.5 Results of different connection: stress of y direction

在主镜支撑中使用粘结层的主要原因在于粘结层可以起到分散应力的作用,使用粘结层后应力在轴向距离分布更为均匀。此观点可以通过计算相同情况下使用不同材料作为支撑与玻璃连接层的应力分布来验证,图5中给出了在相同条件下分别使用硅橡胶粘结剂和使用钢层作为连接层时的应力分布情况,这两种情况分别代表了粘结连接和机械连接的情况。从图中可以清楚看到使用粘结连接应力在轴向分布更为均匀,最大应力明显小于使用钢作为链接层的情况,因此相同情况下使用粘结连接更不容易引起局部应力过大造成主镜破坏。这也说明在分析中应力随轴向距离的变化曲线是评价粘结层性能的一个重要指标,应力变化趋势越缓,对主镜支撑的安全越有利。在MMT文献^[4]中使用应力分散因子PCF作为应力分散情况的评价,应力分散因子定义为最大应力和平均应力的比值,PCF越大说明应力分散情况越糟糕,越容易出现应力集中现象。表2中给出粘结连接和钢层连接两种情况下计算结果,可以看到粘结连接的PCF为1.54,而钢层连接为3.54,很明显钢层连接的应力分散能力要小于粘结层连接。

表2 不同模型计算结果

Tab.2 Results of different models

模量 /Mpa	PCF	应力最大值 / Mpa	应力最小值 / Mpa
粘结连接	1.543526	-0.067655	-0.008777
钢层连接	3.54381	0.043993	-0.15533

2.2 模量影响

连接粘结中的主要性能参数一是粘结层材料的模量,其次是粘结层的厚度。本文中主要从静力学角度分析这些参数对粘结层与玻璃连接面处应力分布和粘结层与支撑连接面处位移的情况。对于模量的影响,参考了文献[4]中MMT对于模量变化分析,设定了四种模量分别为0.56MPa、5.6MPa、56MPa和560MPa,分别计算这四种情况下的应力和位移情况。计算使用了三维模型,材料泊松比设为0.49932,厚度设定为2mm,载荷情况为连接处施加Y向载荷1000/3N,粘结层底端固支。

表3中给出了四种情况下计算得到PCF,粘结层与玻璃连接处的应力最大值和粘结层的等效刚度。从表中可以看出材料的模量越大计算得到的PCF越大,即材料的模量越大粘结层的应力分散能力越差,这也可以从应力的最大值看出,使用的材料模量越大,计算得到的应力最大值也最大,使用材料

模量 560MPa 的粘结层应力最大值可以达到 0.13MPa。

表3 不同粘结层模量情况计算结果

Tab.3 Results of different connection

模量 / MPa	PCF	应力最大值 / MPa	等效刚度 / MPa
0.56	1.471203	-0.064485	26.05022
5.6	1.543526	-0.067655	264.2549
56	1.957187	-0.085787	4103.32
560	2.903413	-0.12726	29950.25

图6中给出了使用不同模量材料计算得到的应力和位移随轴向距离变化曲线。从图6(a)中可以看出使用的材料模量越大,应力曲线变化越剧烈,粘结层的应力分散能力越差,这与PCF反应的情况类似。图6(b)中给出位移变化曲线,从中可以看出使用的材料的模量越大,位移越小,位移曲线的变化趋势基本一致。

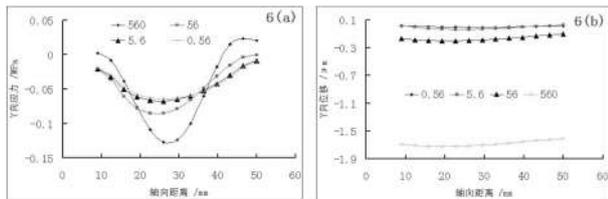


图6 不同模量粘结层分析结果-Y向应力和位移变化曲线

Fig.6 Results of different connection with different module: stress and displacement of y direction

从以上分析结果可以看出实际使用的粘结层的材料模量越小,应力分散情况越好,这与文献[1]中MMT计算的结果一致,文献中也得到了类似的结论。在实际使用中选择材料的模量主要看应力的最大值,要保证应力的最大值小于主镜安全允许值,在此基础上应优先选用模量较低的胶,此时应力的分散性能较好。

2.3 厚度影响

表4 不同粘结层厚度情况计算结果

Tab.4 Results of different connection with different thickness

厚度 /mm	PCF	应力最大值 / MPa	等效刚度 / MPa
0.5	2.078804	-0.091117	2722.892
1	1.721814	-0.07547	972.8061
1.5	1.588002	-0.069605	472.2991
2	1.543526	-0.067655	264.2549
2.5	1.52415	-0.066806	161.0082
3	1.513686	-0.066347	104.5092

对于厚度的影响,设定了六种厚度,分别为 0.5mm、1mm、1.5mm、2mm、2.5mm 和 3mm,并分别计算这六种情况下的应力和位移情况。计算使用了三维模型,材料模量设定为 5.6MPa,泊松比设为 0.49932,载荷情况为连接处施加 Y 向载荷 1000/3N,粘结层底端固支。

表4中给出了六种情况下计算得到的PCF、粘结层与玻璃连接处的应力最大值和粘结层的等效刚度。从表中可以看出材料的模量越大计算得到的PCF越小,即粘结层的厚度越大粘结层的应力分散能力越强,这也可以从应力的最大值看出,使用的粘结层厚度越大,计算得到的应力最大值也最小,使用粘结层厚度 3mm 的粘结层应力最大值最小为-0.066347MPa。

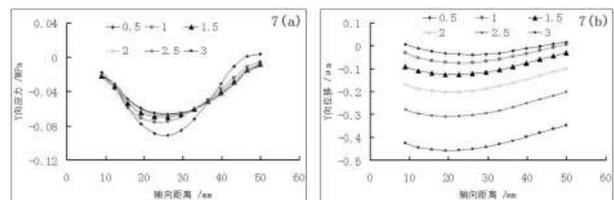


图7 不同厚度粘结层分析结果-Y向应力和位移变化曲线

Fig.7 Results of different connections with different thickness: stress and displacement of y direction

图7中给出了使用不同粘结层厚度计算得到的应力和位移随轴向距离变化曲线。从图7(a)中可以看出使用的粘结层越厚,应力曲线变化越缓和,粘结层的应力分散能力越强,这与PCF反应的情况类似。图7(b)中给出位移变化曲线,从中可以看出使用的粘结层越厚,位移越大,也即等效刚度越小。还可以看出不同情况下位移曲线的变化趋势基本一致。

从以上分析结果可以看出实际使用的粘结层的厚度越大,应力分散情况越好,这与文献[4]中MMT计算的结果有出入,文献中得到的结果是在厚度 2mm 时分散效果最好。出现这些差异的原因在于本报告中使用的模型和文献中的模型在几何上还是有差别,网格划分情况也有不同。

从表2中还可以看出,粘结层厚度越大,其等效刚度越小,粘结层越软,应力分散情况越好。从表3中也可以得到类似的结论,粘结层模量越小,等效刚度越小,粘结层的应力分散情况越好。因此其中决定粘结层分散应力的关键因素是粘结层的等效刚度。等效刚度大,应力分散能力差,等效刚度小,应力分散能力强。而模量和厚度是决定粘结层等效刚度的两个因素,模量属于材料属性,而厚度是几何属

性,他们从两个方面影响了粘结层的等效刚度。从材料力学的角度考虑,定义等效刚度为 $F/\Delta L$,则 $F/\Delta L=E*A/L$ 。即等效刚度和材料模量与受力面积乘积成正比与厚度成反比,在本文的情况下,受力面积即粘结面积为固定值,所以等效刚度由材料的模量和厚度决定,即与材料模量成正比,与厚度成反比。

在实际应用中选择粘结层的厚度还要分析在不同工况下粘结层的受力情况,例如当主镜指向水平时,粘结层主要承受剪切力作用,此时要求粘结层的应力最大值不能超过粘结层的承受情况,且位移不能太大。而且粘结层厚度增加后,粘结层的粘结强度会降低,为了保证主镜连接安全,粘结层厚度不应过大。

3 结论

本文主要研究了硅橡胶粘结层的应力分散效应,参考了MMT中对粘结层的分析,确定了使用有限元分析的单元和模型,并在静力学范围内支撑受压缩情况下,对粘结层材料模量和粘结层厚度进行了初步分析,分析发现在相同情况下粘结层材料模

量越小,粘结层厚度越大,粘结层与玻璃连接处的应力分布越缓和,粘结层的应力分散情况越好。

本文的分析主要是对粘结层的静力学分析,有些问题有待于进一步研究。例如对粘结层对于热应力的分散情况,粘结层对于振动冲击的缓冲作用。这些都是下一步研究中需要考虑的问题。

参考文献

- [1] 施翔春,陈卫标,候霞.全固态激光技术在航天领域的应用[J].红外与激光工程,2005,34(2):127-131.
- [2] Opto-Mechanical Systems design. Paul R. Y, PP: 418-420.
- [3] Selke L A. Theroretical elastic deflection of a thick horizontal circular mirror on a ring support [J]. Appl. Opt.,1970,9(1):149-153.
- [4] Shawn Callahan.MMT Conversion Technical Memorandum #93-1. Analysis and Design of the Glue Joint, Pucks, and Loadspreader Used in the 6.5m Mirror Support System,November 1993.PP:1-19.
- [5] 郑明军,谢基龙.压缩状态下橡胶件大变形有限元分析[J].北方交通大学学报,2001,25(1):76-79.

(上接第22页)

了对反射镜最佳传递路径的分析,证明了封闭性减重孔的优越性,并且支持了关于侧边布置减重孔的观点,提出了镜体中心通孔的不足。根据ESO细啃模型的结果,综合上面的分析,提出了一种新的镜体结构形式,具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] XIE Y M, STEVEN G P.A simple evolutionary procedure for structural optimization [J].Computers & Structures,1999,49(5):885-896.
- [2] 谢亿民,杨晓英,G P Steven,等,渐进结构优化法的基本理论及应用[J].工程力学,1999,16(6):69-81.
- [3] 罗志凡,卢耀祖,荣见华,等.基于一种新的应力准则的渐进结构优化方法[J].同济大学学报,2005,33(3):372-375.
- [4] 荣建华.渐进结构优化方法及其应用研究[D].长沙:国防科技大学博士学位论文,2006.
- [5] 刘寅东,卞钢.基于ANSYS的结构拓扑优化及其二次开发[J].船舶力学,2006,10(2):120-125.
- [6] 兰倩,杜永峰,李慧.基于拓扑优化的筏形基础传力途径仿真[J].计算机仿真,2007,24(11):163-165.
- [7] 沙巍,陈长征,张兴祥,等.空间主反射镜轻量化及柔性支撑设计与分析[J].光电工程,2009,36(4):35-39.