

·结构与工艺·

## 光栅与基片的连接对光纤光栅压力传感器的影响

杨 洋<sup>1</sup>, 郑一博<sup>2</sup>, 杨 洋<sup>1</sup>, 刘 兵<sup>1</sup>, 赵亚丽<sup>1</sup>

(1.承德石油高等专科学校 河北省仪器仪表工程技术研究中心,河北 承德 067000;

2.河北地质大学 光电技术研究所,石家庄 050700)

**摘 要:** 光纤光栅压力传感器中光栅与金属基片的连接方法主要分为胶装工艺与金属化封装工艺,工艺不同传感器会出现蠕变等现象,也会直接影响传感器的测量精度。对自主设计的悬臂梁式光纤光栅压力传感器进行实验结果显示,采用金属化封装工艺和353ND胶封装工艺制作的光纤光栅压力传感器其压力与波长的线性拟合度均高于0.998,使用353ND胶与钢质金属基片胶装的光纤光栅压力传感器在0~6 MPa压力范围内,在5 min内由于悬臂梁弯曲所造成的最大波长偏移为8 pm;研究还表明,同一结构金属化光纤光栅压力传感器其灵敏度是使用353ND胶制成的裸光纤光栅传感器的3.4倍。

**关键词:** 光纤光栅传感器;蠕变;胶装工艺;金属化封装

中图分类号: TP212.4

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2018)-01-0071-06

## Influence of Connection of Grating and Substrate on Fiber Grating Pressure Sensor

YANG Yang<sup>1</sup>, ZHENG Yi-bo<sup>2</sup>, YANG Yang<sup>1</sup>, LIU Bing<sup>1</sup>, ZHAO Ya-li<sup>1</sup>

(1.Chengde Petroleum College, Hebei Provincial Instrument Engineering Technology Research Center, Chengde 067000, China;

2. Institute of Optoelectronic Technology, Hebei Geological University, Shijiazhuang 050700, China)

**Abstract:** The connection between the grating and the metal substrate in the fiber grating pressure sensor is mainly divided into the adhesive process and the metallized packaging process. The creep of the sensor will be caused by different processes. It will also directly affect the measurement accuracy of the sensor. Experiments of the self designed cantilever beam fiber Bragg grating pressure sensor are performed, and the experimental results show that the linear fitting of the pressure and wavelength of the fiber Bragg grating pressure sensor made by the metallized packaging technology and the 353ND glue packaging process are both higher than 0.998. The fiber Bragg grating pressure sensor with 353ND glue and steel metal substrate is within the 0~6 MPa pressure range. The maximum wavelength shift caused by the bending of the cantilever beam in 5 min is 8 pm. The research also shows that the sensitivity of the same structure metallized fiber Bragg grating pressure sensor is 3.4 times than that of the bare fiber grating sensor with 353ND glue.

**Key words:** fiber Bragg grating sensor; creep; adhesive technology; metallized packaging

光纤光栅(FBG)是光纤传感和光纤通信领域的重要器件之一。近年来光纤光栅传感器在气象检测、湿度测量、地震检测、物联网等技术领域得到广泛的应用<sup>[1-4]</sup>,由于FBG纤细、质脆、易折断,难以直接使用,因此在实际应用中为实现结构应变监测,光纤光栅器件须以一定的连接方式与被测物固定

连接,也就是通常会将FBG安装在某种材质的基片上一同使用,通过与被测物的协同变形,实现对被测物的应变测量。FBG与基片的连接方式的不同,对于传感器的性能影响很大,特别是在胶装工艺连接方式中,波长蠕变的影响对传感器灵敏度及稳定性的影响也是一个关键因素。因此FBG与基片的

收稿日期: 2017-12-18

基金项目: 科技部火炬计划(2014GH550108)

作者简介: 杨洋(1958-),男,博士,教授,长期从事光纤传感技术的研究工作。

连接工艺成为传感器封装工艺中的核心技术,现有的FBG传感器封装工艺主要分为胶装工艺和金属化封装工艺<sup>[5-6]</sup>,通过对这两种封装工艺过程进行实验研究与分析后得到了一些有意义的结论。

## 1 胶装工艺

### 1.1 胶粘剂的选取与性能比较

在现有的技术手段中,将光纤传感器件利用粘接剂直接固定于构件表面,是最为直接、简单、可行的测量方法。所以当通过粘贴式光纤传感器测量基体应变时,胶黏剂的质量会直接影响到粘接层的

应变传递,从而影响到光纤光栅的应变测量结果。所以选择合适的胶黏剂对光纤光栅测量结果的准确性有重要的意义。

胶装工艺连接方式是一种传统方式。先在铜质、铝质或钢质的基片上刻上细槽,然后将光纤光栅放在细槽中,同时施加一定预应力将光纤拉直,在此基础上将胶注在金属片的细槽中,固化后在金属片上加上保护套。在胶装工艺连接方式中,国内相关研究报告显示,目前采用比较多的胶粘剂是502胶、401胶、高温固化环氧胶353ND、323LP、M-Bond610胶等<sup>[7-10]</sup>。三类代表性胶合剂的主要性能指标见表1。

表1 三类具有代表性的胶合剂主要性能指标

胶粘剂名称	使用温度	产品粘度	剪切强度	粘接速度
502	-55~70 °C	27 °C左右为2~5 CPS	12~16 Mpa	初固3S-2 min 全固24 h
M-Bond610	-269~260 °C	98 CPS	564 Mpa	在30~40 °C固化时间为2 h
353ND	50~200 °C	3 000 CPS	2 000 Mpa	在60 °C时固化时间为1.5 h

通过对三类胶性能的比较发现,353ND胶具有粘结强度高、耐高温、剪切强度高等诸多优势,是光纤粘结剂的首选材料;M-Bond610胶尽管粘结强度和剪切强度方面不如353ND,但它更适合在超低温状况下使用,同时这种产品特别适用于真空环境下使用;502胶水尽管在诸多方面都不如M-Bond610、353ND胶,但价格优势明显,因此在一些特定场合可以作为应急方案。

### 1.2 蠕变的影响分析

在FBG传感器胶装工艺中,波长蠕变是影响传感器灵敏度及稳定性是一个关键因素<sup>[11-12]</sup>。蠕变,在一些文献中也被称为潜变,这一现象是指在应力影响下固体材料缓慢永久性的移动以及变形的趋势,在光纤压力传感器中主要是指位移量对时间的滞后现象。

蠕变是影响光纤传感器的重要因素。早在2005年Xu和Ansari就提出光纤传感器的可靠性问题<sup>[13]</sup>。从传感器结构来看,光纤的蠕变是影响压力型光纤传感器可靠性的重要因素。目前在光纤及光纤光栅传感器应用领域蠕变主要来自于光纤本身、胶粘剂、基底等诸多方面。

2012年,北京航空航天大学李煦等人研究中发现,胶粘剂对产生蠕变的影响主要是由弯曲造成

的。他们对Epo-tek 353ND、Epo-tek323LP、Quick Epoxy等三种胶粘剂进行了测试<sup>[9]</sup>,结果表明,由于作为基底的碳纤维复合材料在30 °C以下极限载荷内的弯曲蠕变几乎为零,所以当进行弯曲蠕变试验时,弯曲蠕变主要是由于胶黏剂造成的。

2011年,合肥工业大学余有龙等人进行了光纤光栅传感器研究压电陶瓷(PZT)的特性的研究工作<sup>[14]</sup>。这种情况下是把PZT作为基底,并将FBG固定在PZT上,也就是说,这种蠕变的产生是由于基底蠕变传递给FBG的。结果显示,当给压电陶瓷施加电压,起始段短时间内PZT产生较大的位移量,之后较长时间完成微小变形,通过实验得到了蠕变特性曲线,并得到当电压从80 V上升至100 V时,PZT实际上伸长量2.247 μm,蠕变量为0.159 μm。

2010年,南京理工大学徐志红等人则研究了测量光纤在静力拉伸和交变载荷作用下的蠕变<sup>[15]</sup>。研究表明在承受静力和动力载荷的作用下,在开始会产生蠕变,但当光纤经受了一定时间静力拉伸或一定次数的循环拉伸后,蠕变将会停止。

综合上述结果表明:

(1)消除由于光纤本身受拉伸产生的蠕变可以预先对光纤光栅进行一定次数的循环拉伸,然后再张紧装入传感器内,通过防止应力松弛的方法来实现;

(2)消除诸如压电陶瓷等由于传感器基底形变引起的FBG传感器波长蠕变,可以利用压电陶瓷的蠕变规律修正其对FBG传感器蠕变的影响;

(3)采用悬臂梁结构设计制作的FBG压力传感器中,胶粘剂是产生波长蠕变的主要因素,光纤本身拉伸引起的蠕变和传感器基底形变引起的蠕变相对于胶粘剂对蠕变产生的影响可以忽略不计。因此,减小蠕变产生的关键是胶粘剂的选择。

## 2 金属化封装工艺

金属化封装工艺是一种无胶化封装方式。选择胶粘剂作为连续介质时,由于胶粘剂与传感器基底和光纤的材料特性差异很大,作为力学传递的中间层,难以保证层间应变的精确传递,且胶粘剂自身产生的长期蠕变及老化不可避免。为了避免胶装工艺的缺陷,有效的途径是将有机胶封装方式改为金属化封装。这是因为金属材料作为各向同性的材料,材料特性比较稳定,使用寿命长,因此,通过金属化封装方式将FBG与基片直接进行连接可以有效降低蠕变的影响,且增强应变测量效果。

2006年武汉理工大学范典在国内较早采用金属化工艺连接方式<sup>[6]</sup>。研究表明,采用这种金属化封装技术可以有效改善系统线性性和可重复性,加减应力的应变曲线高度重合,没有冗余现象,且温敏系数较裸光栅提升2~3倍。2008年,第二炮兵工程学院刘春桐也开展了全金属封装光纤光栅的温度传感特性研究<sup>[6]</sup>,在研究中采用了焊点较低的锡焊的方式实现全金属封装光纤光栅,所完成封装的光纤光栅传感器的温度灵敏度较裸光栅提升了3.3倍。2012年重庆大学的吴俊等人围绕金属直接连接的布拉格光纤光栅应变测量方法的相关内容进行了更为深入的探究<sup>[8]</sup>,在这项研究中指出了金属化直接连接FBG应变测量结构,证明了金属化直接连接的理论优越性,并通过实验证明具有优越的应变测量能力。上述研究表明,采用金属化工艺可以从根本上消除胶装工艺连接方式中存在的冗余、蠕变、老化等问题,同时可以明显提升应变传递系数。

光纤光栅传感器的金属化封装工艺主要包括光纤光栅表面金属化、光纤与金属管金属化焊接、金属管与传感基底激光焊接等三个主要环节。

### 2.1 光纤光栅表面金属化

光纤光栅表面金属化主要是在光纤光栅表面进行化学镀的过程<sup>[7]</sup>。光纤的主要成分为二氧化硅,直径很细,同时非常易于受损或折断,为了起到保护作用,一般光纤外面包裹保护层。因此化学镀前必须去除这层保护层,对光纤光栅表面进行预处理,在此基础上实施光纤光栅金属化工艺过程。在这一过程中,首先在光纤光栅表面进行化学镀镍,这一过程从本质上讲是为了达到在光纤表面沉积一层具有导电能力的镍磷合金的目的,随后利用电镀方法进一步增加镍层的厚度,增强金属层在光纤表面的附着力,最后将表面镀有镍的光纤光栅放入80℃的镀金液中,通过电镀的方法在其表面上镀金,形成稳定的金属层,完成光纤光栅表面的金属化,为下一步焊接做准备。

### 2.2 金属化光纤光栅与金属管焊接

实验采用内径与光纤匹配的镀金镍管,通过金锡焊料实现金属化光纤光栅与金属管的金属化焊接。无铅焊料由于成本低、机械性能良好,且材料能够保证充分供应,因此是焊接材料的首选。实验采用Au80%Sn20%金锡焊料的预成型片,利用加热焊接的方式,通过有效控制焊接温度和时间可以实现镀金光纤光栅和镀金镍管的金属化焊接。

### 2.3 金属管与传感基底的激光焊接过程

光纤光栅传感器基底与镍管之间的焊接采用激光点焊的方式。这种方式首先保证了传感器最终使用温度可以达到200℃以上,其次可以增加传感器的可靠性,避免因为多次焊接影响光纤光栅镀金层的质量。基于实验选用的金属管和传感器基底的材料特性,实验采用热传导型激光点焊方式实现镀金镍管和传感基底的金属化,这一过程是首先通过激光辐射加热待加工表面,然后表面热量通过热传导向内部扩散,促使工件熔化,并最终形成特定的熔池。

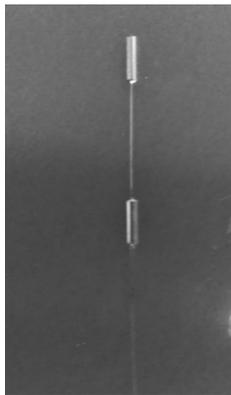
## 3 光纤光栅传感器制作与实验测试

实验基于胶装工艺和金属化封装工艺分别制作了两只悬臂梁式光纤光栅传感器,如图1和图2

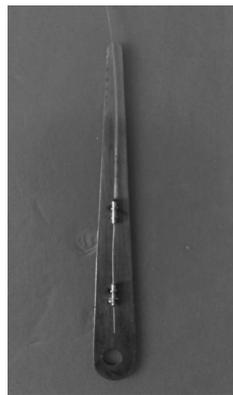
所示。



图1 使用353ND胶制作的胶装FBG传感器



(a)金属化光纤与金属管的焊接成品



(b)金属管与金属基底的焊接成品

图2 基于激光焊接方式制作的FBG传感器

实验将安装有光纤光栅(FBG)的悬臂梁安置在弹簧管内,并构成如图3所示的光纤光栅弹簧管压力传感器。

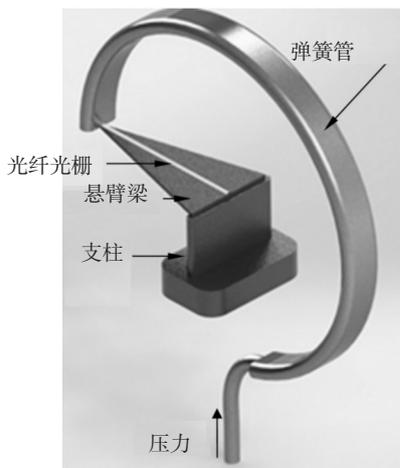


图3 基于悬臂梁式结构的弹簧管压力传感器

由光纤光栅悬臂梁调谐技术的原理可知<sup>[18]</sup>,光纤光栅中心波长的相对改变量为

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = kP \tag{1}$$

式中, $k$ 为压力敏感系数,它是一个仅悬臂梁结构及光纤光栅特性有关的常量。

根据上述原理,可以通过测量光纤光栅中心反射波长的移动来测量气体或液体的压力变化。

光纤光栅弹簧管压力传感器安装在一个微型压力校验台上(虚线部分,这个压力校验台上同时还安装着一个标准压力表(0.25级),压力校验台上的标准压力表与所研制的光纤光栅弹簧管压力测试系统的内部是连通的,因此可以根据实验需要得到加在光纤光栅压力传感器上的压力。

实验自主搭建了传感器性能测试系统,如图4所示。

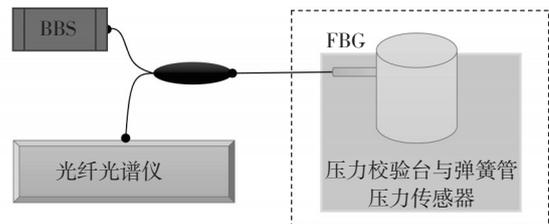


图4 波长解调测试系统结构图

当压力较验台上的标准压力表中的压力从0开始,每次增加0.5 MPa直至6 MPa时,利用光纤光谱仪测量反射光谱的中心波长,光源采用功率为100 mW的ASE宽带光源。

下述实验测试结果分别给出了使用353ND胶粘贴方式制成的光纤光栅传感器和使用金属化方式制成的光纤光栅传感器使用进行的压力测试实验测试结果。

### 3.1 使用353ND胶制成的光纤光栅传感器进行的压力测试实验

表2中波长1是刚加压力时的测试结果,而为了检验传感器蠕变带来影响,波长2给出的是5 min后的测试结果。图5、图6给出是波长-压力-拟合关系图。图7给出两个实验结果误差曲线。

波长1的拟合方程为

$$y = -0.1833x + 1550.6044 \tag{2}$$

线性拟合度:0.99806

波长2的拟合方程为

$$y = -0.1846x + 1550.6098 \quad (3)$$

线性拟合度:0.99809

表2 压力测试数据(胶粘光纤光栅传感器)

压力/MPa	波长1/nm	波长2/nm	偏差/nm
0	1550.5960	1550.6000	0.004
0.50	1550.5120	1550.5200	0.008
1.00	1550.4080	1550.4120	0.004
1.50	1550.3440	1550.3480	0.004
2.00	1550.2320	1550.2320	0
2.50	1550.1720	1550.1760	0.004
3.00	1550.0560	1550.0560	0
3.50	1549.9720	1549.9720	0
4.00	1549.8760	1549.8760	0
4.50	1549.7560	1549.7560	0
5.00	1549.6840	1549.6840	0
5.50	1549.5720	1549.5720	0
6.00	1549.5280	1549.5240	0.004

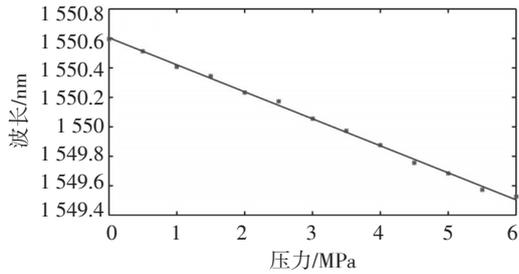


图5 波长1压力-波长拟合关系图

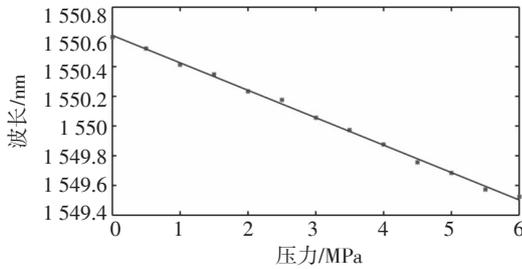


图6 波长2压力-拟合关系图

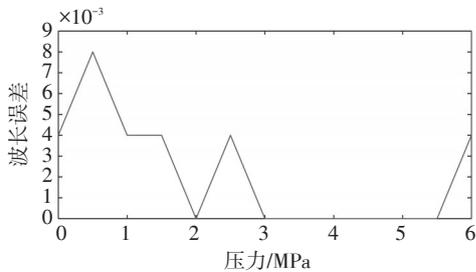


图7 误差曲线

### 3.2 使用金属化光纤光栅传感器进行的压力测试实验

在完成金属化光纤光栅传感器的制作后进行的实验中没有发现压力对时间的滞后现象,说明这种无胶化的金属化封装工艺基本不存在蠕变的影响,同时发现这种方式可以明显提升应变的有效传递。表3是金属化光纤光栅传感器的压力测试数据。

表3 压力测试数据(金属化光纤光栅传感器)

序号	压力/MPa	波长平均/nm
0	6.00	1534.5720
1	5.50	1534.8140
2	5.00	1535.1120
3	4.50	1535.4260
4	4.00	1535.7340
5	3.50	1536.0520
6	3.00	1536.3500
7	2.50	1536.6700
8	2.00	1536.9920
9	1.50	1537.3100
10	1.00	1537.6300
11	0.50	1537.8800
12	0	1538.2980

依据表3绘出的图8给出了金属化光纤光栅压力-波长拟合关系图。

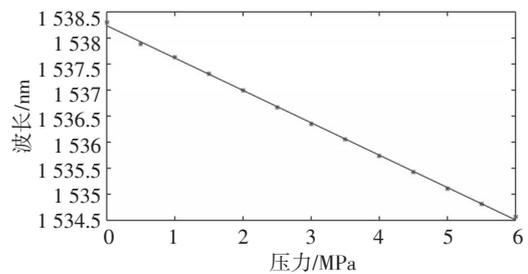


图8 金属化光纤光栅压力-波长拟合关系图

波长的拟合方程为

$$y = -0.6213x + 1538.2363 \quad (4)$$

线性拟合度:0.9993

## 4 结论

基于胶装工艺和金属化封装工艺分别制作了两种悬臂梁结构的弹簧管式压力FBG传感器,并进

行了压力传感性能测试及蠕变影响分析。实验表明,两种FBG传感器的压力与波长的线性拟合优度都高于0.998;使用353ND胶制作的光纤光栅传感器蠕变很小,说明合理选用合适胶水和适当的基底可以使传感器的蠕变大大降低,同时发现,使用353ND胶制成的光纤光栅传感器进行的延时(5 min内)压力测试实验中,当悬臂梁的弯曲较小时,也即压强在6-3 MPa过程中,测试偏差基本为0,当悬臂梁的弯曲较大时,即对应压强在3-0 MPa过程中偏差出现的频次大大增加,其中最大偏差为8 pm,说明这部分偏差应该是由胶合剂引起的弯曲蠕变。与胶装封装方式相比,金属化封装方式具有明显优势,一方面这种方式制作的FBG压力传感器可以从根本上消除蠕变,另一方面还可以明显提高传感器压力灵敏度。对表2和表3的实验数据进行比较后,得到经过金属化处理后的传感器压力灵敏度是使用353ND胶制成的FBG传感器的3.4倍。

#### 参考文献

- [1] 潘尔生,郑路遥,姜国义,等.基于光纤光栅传感器的输电线路微气象在线监测系统[J].光电技术应用,2016,31(2):11-14.
- [2] 韩悦文,陈海燕,黄春雄.光电技术在湿度传感器中的应用[J].光电技术应用,2008,23(3):33-36.
- [3] 闫俊芳,裴丽,陈志伟,等.光纤传感技术在物联网中的应用[J].光电技术应用,2012,27(1):37-40.
- [4] 闫冰,丁锋.基于光纤光栅地震检波解调系统的微弱信号检测电路设计[J].光电技术应用,2013,28(5):65-68.
- [5] 马收,李明,郭建春,等.光纤布拉格光栅(FBG)传感器在金属试件上的粘接工艺研究[J].复合材料学报,2013(s1):251-254.
- [6] 范典.光纤光栅金属化封装及传感特性试验研究[J].传感技术学报,2006,19(4):1234-1237.
- [7] 张桂花,柴敬,弥旭锋,等.光纤光栅在不同基底上的应变灵敏度研究[J].光通信技术,2013,37(7):34-36.
- [8] 吴俊,陈伟民,章鹏,等.金属直接连接的布拉格光纤光栅应变测量方法[J].仪器仪表学报,2012,33(12):2709-2713.
- [9] 李煦,贾丽杰,李嘉.粘贴式光纤光栅传感器胶粘剂的选择[C]//中国科协年会第11分会场:低成本、高性能复合材料发展论坛,2012.
- [10] 于秀娟,余有龙,张敏,等.铜片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J].光子学报,2006,35(9):1325-1328.
- [11] 周智,王倩,郝孝伟,等.考虑混凝土基体蠕变的FBG传感器应变传递研究[J].中国测试,2016,42(5):1-5.
- [12] 钟阳,尚冉冉.光纤光栅传感器的无胶化封装及蠕变规律研究[J].山西建筑,2015(14):138-139.
- [13] Xu Z, Bassam A, Jia H, et al. Fiber optic sensor reliability issues in structural health monitoring[C]//Smart Structures and Materials. International Society for Optics and Photonics, 2005: 390-404.
- [14] 余有龙,谭玲,邹李刚,等.用光纤光栅传感器研究压电陶瓷特性[J].光子学报,2011,40(7):994-997.
- [15] 徐志洪,ANSARI Farhad.用弱相干白光双干涉系统测量光纤的蠕变[J].中国科学:技术科学,2010(2):55-58.
- [16] 刘春桐,涂洪亮,李洪才,等.全金属封装光纤光栅的温度传感特性研究[J].传感器与微系统,2008,27(10):58-59.
- [17] 李小甫,姜德生,余海湖,等.石英光纤表面化学镀镍磷合金工艺[J].化工学报,2005,56(1):126-129.
- [18] 杨洋.基于边缘解调技术的光纤光栅波登管压力传感器的研制[J].光学技术,2009,35(1):53-55.

(上接第5页)

- [8] Lampton M L. SNAP telescope: an upstate[J]. Proc SPIE, 2004, 5166: 113-123.
- [9] Sholl M. SNAP secondary support diffraction[R]. Space sciences laboratory university of California at Berkeley, 2001.
- [10] Sholl M, Lampton M L, Aldering G. Snap telescope [J]. Proc SPIE, 2004, 5487: 1473-1483.
- [11] Lampton M, Sholl M. Comparison of on-axis three mirror anastigmat telescopes[J]. Proc SPIE, 2002: 5166.
- [12] 马毅勇,程祖海,张耀宁.高功率激光器窗口热变形分析的有限元方法[J].强激光与粒子束,1999,11(1):6-10.