

文章编号: 1005—0523(2006)02—0019—04

横向应力传感系统的光子晶体光纤的有限元分析

刘磊¹, 王智²

(北京交通大学 1. 土木建筑工程学院; 2. 电子信息工程学院, 北京 100044)

摘要:建立了光子晶体光纤在横向应力作用下的力学模型, 对不同结构的光子晶体光纤的力学特性进行了仿真分析. 研究了横向应力作用下, 光子晶体光纤的形变与结构参数的关系. 对于横向应力传感的光子晶体光纤结构的优化设计提出了设计建议.

关键词:光子晶体光纤; 横向应力; 传感与监测; 有限元分析

中图分类号: TU391

文献标识码: A

1 前言

随着我国改革开放的进一步深入, 各种基础设施建设大规模展开. 大型桥梁、隧道、路轨、车站、机场、体育场馆、高楼大厦等大规模建筑物日益增加, 工程速度 and 建设效率也越来越高, 于是对这些大型建筑的质量与安全监测就成为非常重要的研究内容.

建筑物的安全与质量监测, 主要是检测在外力作用下的应力和形变. 一般的检测方法是在建筑材料内安装大量分布式应变片或者其它应变感受纤维^[1], 由于纤维材料与建筑材料构成的复合结构能够适当提高建筑材料的强度, 因此, 使用复合纤维材料进行建筑物的载荷与形变检测是比较常用的方法. 在建筑材料或者建筑物内埋置光导纤维, 形成智能复合结构, 当建筑材料或者建筑物发生形变的时候, 埋置在其中的光纤会感受到相应的应力和应变, 其光学特性(主要是传输特性)能立即发生变化, 因此对光纤中传输的光信号进行检测, 就能实时监测建筑物内的形变和载荷变化情况, 从而实现对建筑物的安全监测. 这种方法不仅可以用于建筑物的检测, 而且在机械、生物医学、航空航天等领域

也有广泛应用前景. 利用光纤进行应力传感与检测, 不仅具有光纤固有的优越性, 如抗电磁干扰, 机械强度高, 还可以实现分布式检测, 而且灵敏度非常高.

光纤应力传感与检测技术已经经历了将近 20 年的发展, 目前已有多种基于普通石英光纤的应力传感器的报导与商用化. 光纤应力传感器按照被检测应力的方向可分为纵向应力传感器和横向应力传感器^[1], 按照基本工作原理可以分为两大类, 一是光纤型应力传感器, 二是光栅型应力传感器. 光纤型应力传感器就是光纤在外力作用下发生形变, 改变其模式的传输特性, 对传输光进行检测即可得到形变或者外力的变化情况. 光栅型应力传感器是利用光纤光栅(包括光纤布拉格光栅 FBG 和长周期光栅 LPG)的周期(纵向)或对称性(横向)随外力改变, 从而改变光栅的透射谱或反射谱, 实现对外力变化的检测^[2].

光纤应力传感器的灵敏度由光纤的主要材料石英(SiO_2)决定. SiO_2 的杨氏模量非常大, 一般都超过 70 GPa (具体数值与石英光纤中的掺杂有关, 非掺杂包层约 72 GPa, 3% 掺 Ge 约为 70.8 GPa), 在外力作用下, 其形变一般都很小, 因此对光纤应力传感器

收稿日期: 2006—01—03

作者简介: 刘磊(1971—), 女, 山东泰安人, 讲师.

的工艺要求比较高. 为了改变光纤横向应力传感器的灵敏度对石英材料杨氏模量的单一依赖性, 人们试图改变光纤结构, 从而改变光纤在外力作用下的形变量, 以此来改进光纤横向应力传感与检测的精度与灵敏度. 初步研究表明, 当光纤中存在空气孔时, 其等效杨氏模量比纯石英材料有所下降, 因此在外力作用下, 光纤将发生更大的形变, 从而更大程度上改变光纤及其中写入的光栅的光学特性, 提高横向应力检测的灵敏度.

目前利用光子晶体光纤(PCF)进行温度和应力传感的研究已经开始^[3], 但是由于 PCF 的应用刚刚起步, 而且横向应力的检测难度比较大, 所以现在仍然没有看到基于 PCF 的横向应力传感与检测的相关报道. 本文对 PCF 光纤和普通光纤的在外力作用下的形变情况进行了初步研究, 利用有限元法分析并比较了两种光纤由于结构差异而带来的应变差异.

2 光纤横向应力传感结构的仿真分析

光子晶体光纤在横向应力的受力如图 1 所示: 光纤横截面为带空气孔的圆形截面, 在径向受到一对横向荷载 F 的作用. 空气孔按照三角形周期分布, 小圆圈表示空气孔, d_1 为空气孔直径, D 为光纤外直径, (Λ 为空气孔中心距离, N 为空气孔的圈数. 外力用矢量 F 表示.

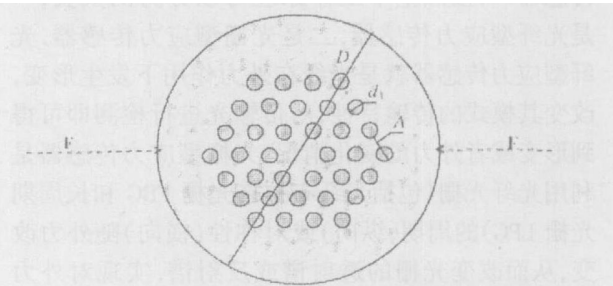


图 1 光子晶体光纤受径向力作用的横截面示意图

一般参数:

$D=125\ \mu\text{m}$

$N=5\sim8$

$\Lambda=6\ \mu\text{m}$

$d_1=0.4\ \Lambda$

$F=200\ \text{N}$ (根据实际情况调整)

光纤弹性模量: $E=70.8\ \text{GPa}$

本文应用大型结构分析程序 SAP 对横向应力作用下的光纤结构的形变进行了有限元分析. 对光纤结构采用平板单元来建模. 因为是对称结构,

建模时取 $1/4$ 结构.

2.1 普通光纤的变形分析

首先分析了普通光纤的变形, 如图 3 所示, 最大应力、最大位移均发生在集中力的作用点处, 沿力的作用方向(x 向)的最大位移为 $13.5\ \mu\text{m}$. 以力的作用点为圆心, 光纤上其它点的位移呈环行递减, 圆心($D/8$)附近的变形接近于零, 光纤的上半部及下半部的位移也很小.

2.2 $N=3$ 的光子晶体光纤的变形分析

将普通光纤改为晶体光纤, 采用一般参数, 当空气孔的圈数 $N=3$ 时, 光纤的横向变形如图 5 所示. 集中力作用处的 x 向的最大位移为 $15.6\ \mu\text{m}$, 晶体光纤的 x 向的位移分布与普通光纤类似.

2.3 $N=5$ 的光子晶体光纤的变形分析

增加空气孔的圈数 $N=5$, 保持其它参数不变, 光纤的横向变形如图 7 所示. 集中力作用处的 x 向的最大位移为 $16.06\ \mu\text{m}$, 位移分布仍与普通光纤类似.

2.4 扩大空气孔直径的光子晶体光纤的变形分析

空气孔的圈数 $N=5$, 将空气孔的直径增加 1 倍, 保持其它参数不变, 光纤的横向变形如图 9 所示. 集中力作用处的 x 向的最大位移为 $21.5\ \mu\text{m}$, 位移分布与普通光纤大致类似, 只是纤的上半部及下半部也有了较大的变形($5.3\ \mu\text{m}$), 圆心附近光纤基本没有发生变形.

有限元分析结果汇总于表 1. 由表 1 可见, 将普通光纤改为光子晶体(PCF)光纤, 可有效增加光纤结构的变形, 当有 3 圈空气孔时, 可使其横向变形增加 15.5% , 增加到 5 圈时, 变形又有所提高, 但增加不明显. 保持 5 圈不变, 将空气孔的直径扩大为原来的 2 倍, 则变形有明显的提高, 比普通光纤的变形增加了 59.2% .

表 1 不同光纤结构的变形

空气孔的圈数	$N=0$	$N=3$	$N=5$	$N=5, d_1=0.8\Lambda$
x 向的最大位移(μm)	13.5	15.6	16.1	21.5
PCF 光纤位移增大的相对值 /		15.5%	19.2%	59.2%

3 结论

从以上的初步分析结果可以看出, 空气孔有利于增强光纤对外力的应变, 孔越大, 应变越大. 如果增加空气孔圈数, 应变将进一步增大. 应变大小对光子晶体光纤结构有很强的依赖关系, 因此, 可以通过选择不同的晶体光纤结构来获取最好的应变

参数,不仅降低检测难度,提高检测灵敏度,而且能获得横向应力的最佳检测条件.

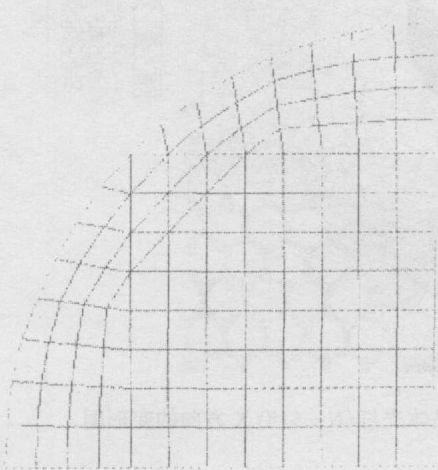


图 2 普通光纤的单元划分

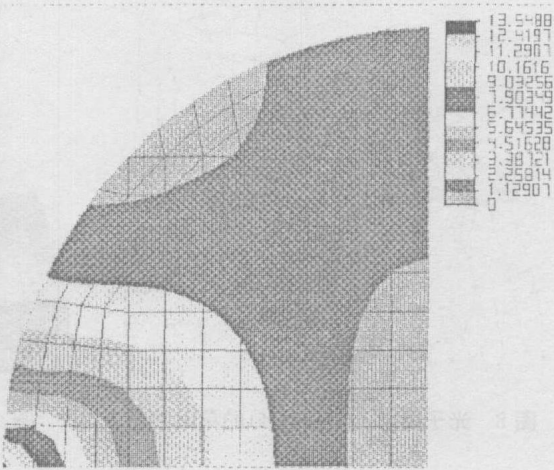


图 3 普通光纤沿沿 X 方向的变形图

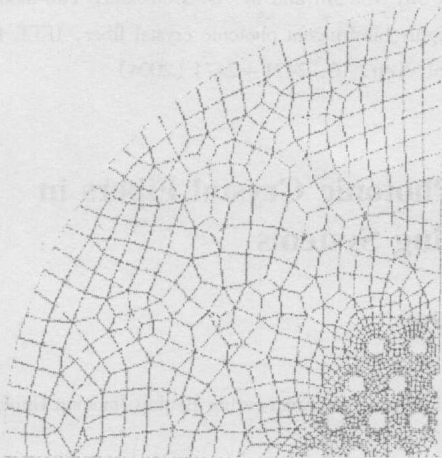


图 4 光子晶体光纤(N=3)的单元划分

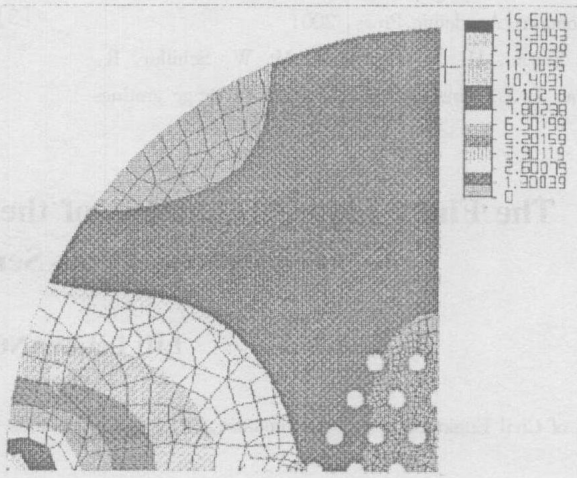


图 5 光子晶体光纤(N=3)沿 X 方向的变形图

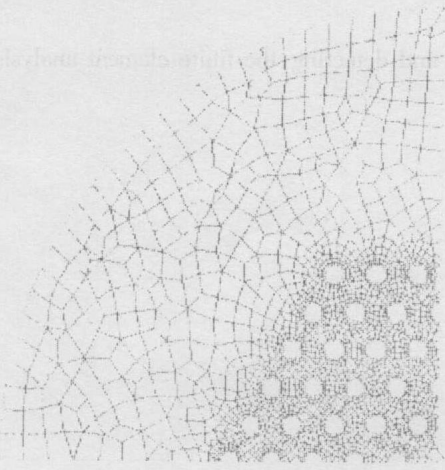


图 6 光子晶体光纤(N=5)的单元划分

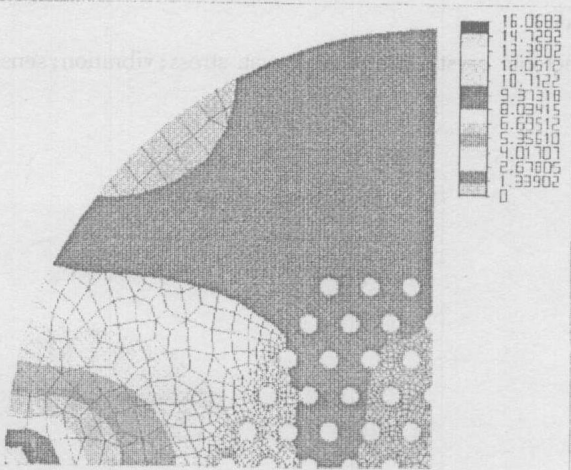


图 7 光子晶体光纤(N=5)沿 X 方向的变形图

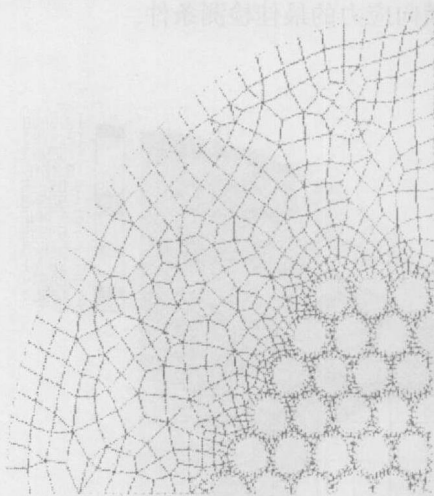


图 8 光子晶体光纤(N=5)的单元划分

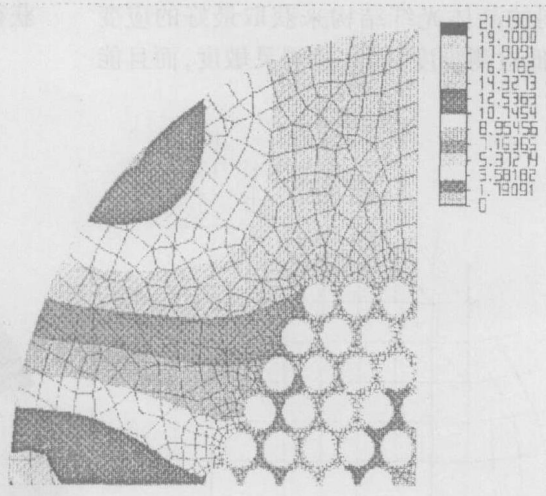


图 9 光子晶体光纤(N=5)沿 X 方向的变形图

参考文献:

- [1] R. M. Measures, Structural monitoring with fiber optic technology[M]. London: Academic Press, 2001
- [2] I. Abe, O. Frazao, H. J. Kalinowski, M. W. Schiller, R. N. Nogueira, J. L. Pinto, Characterization of Bragg gratings in Normal and reduced Diameter HiBi fibers[M]. Proc. SBMO/IEEE MIT-S IMOC 2003, 887—891 (2003)
- [3] J. Ju, W. Jin and M. S. Demokan, Two-mode operation in highly birefringent photonic crystal fiber, IEEE Photon. Technol. Lett. 16, 2471—2474 (2004)

The Finite Element Analysis of the Photonic Crystal Fibers in Transverse-Stress Sensing Systems

LIU Lei, WANG Zhi

(School of Civil Engineering and Architecture, School of electronics and information Engineering Beijing Jiaotong University)

Abstract: The model of photonic crystal fibers bearing transverse stress was established, and the mechanics characteristics of several kind of photonic crystal fibers were analysed. The transversal displacement-structural parameter relations were studied. several design conclusions that can optimize the transverse-stress sensing systems employing the photonic crystal fibers were given.

Key words: photonic crystal fiber; transverse stress; vibration; sensing and detecting; the finite element analysis