

引用格式: SHE Yu-lai, ZHOU De-jian, CHEN Xiao-yong, *et al.* Effect Analysis of Embedded Fiber Transmission Performance by Lamination Process[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(3): 0306001

余雨来, 周德俭, 陈小勇, 等. 层压工艺对埋入光纤传输性能影响分析[J]. 光子学报, 2020, **49**(3): 0306001

层压工艺对埋入光纤传输性能影响分析

余雨来¹, 周德俭¹, 陈小勇¹, 杨旭², 涂闪³, 赖华俊⁴

(1 桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004)

(2 西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071)

(3 广西师范大学 物理科学与技术学院, 广西 桂林 541004)

(4 广西信息材料重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 针对层压工艺下, 埋入挠性光电基板的光纤, 其应力、位移的变化, 会影响光路的耦合效率, 改变光纤有效折射率, 导致传输性能发生变化的问题, 采用有限元分析软件, 对光纤埋入不同槽型的挠性光电基板进行了力学、传热和电磁场耦合分析. 分析结果表明: 光纤埋入梯形槽挠性基板的应力最大, 达到 68.336 7 MPa. 埋入梯形槽的光纤位移量最大, 其值为 1.430 4 μm . 随着槽宽增加, 光纤最大等效应力从 52.667 MPa 增加至 71.907 MPa; 随着槽间距增加, 光纤最大应力从 51.589 MPa 增加至 53.567 MPa; 随着槽深增加, 光纤最大应力从 52.667 MPa 减小至 47.793 8 MPa, 然后增加到 67.349 6 MPa. 随着温度和压力的增加, 单模光纤在 X 方向的有效折射率从 1.446 249 977 增加至 1.446 259 084; Y 方向的有效折射率从 1.446 326 398 增加至 1.446 393 041. 光纤有效折射率差会随着温度的增加而增大, 随着压力的增加而减小. 光纤有效折射率增加, 限制光的能力增加, 能够有效地减小光纤弯曲损耗. 本文分析结果对挠性光电基板光纤埋入结构设计和层压工艺具有一定的参考价值和指导意义.

关键词: 光纤埋入结构; 层压工艺; 有限元分析; 单模光纤; 最大应力; 等效折射率

中图分类号: O436

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20204903.0306001

Effect Analysis of Embedded Fiber Transmission Performance by Lamination Process

SHE Yu-lai¹, ZHOU De-jian¹, CHEN Xiao-yong¹, YANG Xu², TU Shan³, LAI Hua-jun⁴

(1 School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

(2 School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(3 Institute of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China)

(4 Guangxi Key Laboratory of Information Material, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: Aiming at the problem of the stress and the displacement of the fiber embedded in the flexible optoelectronic substrate can change, which affects the coupling efficiency of the optical path and the effective refractive index of the fiber which can result in the transmission performance to change under lamination process, the finite element method software was adopted to conduct coupling analysis of stress modules, heat transfer and electromagnetic field of fiber embedded flexible substrate. Simulation results

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51765013), 广西自然科学基金 (No.2017GXNSFBA198180), 广西制造系统与先进制造技术重点实验室课题 (No.1725905004Z), 武汉科技大学机械传动与制造工程湖北省重点实验室开放基金 (No.2017A13), 广西高校光电信息处理重点实验室开放基金 (No.KFJJ2016-01)

第一作者: 余雨来 (1988—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光电互联. Email: 294281554@qq.com

导师: 周德俭 (1954—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微电子产品制造技术. Email: emezdj@guet.com

收稿日期: 2019-10-16; **录用日期:** 2020-01-03

<http://www.photon.ac.cn>

show that the maximum stress of the fiber embedded in the trapezoidal groove flexible optoelectronic substrate was 68.336 7 MPa. The fiber displacement embedded in trapezoidal groove is 1.430 4 μm largest among the three types grooves. The maximum stress of the fiber increases from 52.667 MPa to 71.907 MPa with the increasing of groove width. The maximum stress of the fiber increased from 51.589 MPa to 53.567 MPa as groove spacing increases. The maximum fiber stress decreases from 52.667 MPa to 47.793 8 MPa firstly and then increases to 67.349 6 MPa with the increase of groove depth. With the increase of temperature and pressure, the effective refractive index of single-mode fiber in the X direction increased from 1.446 249 977 to 1.446 259 084 and increased from 1.446 326 398 to 1.446 393 041 in the Y direction. The difference of effective refractive index increases with the increase of temperature and decreases as the pressure increases. With the effective refractive index increases, the fiber core's ability to limit light energy increases which can better reduce the radiation of light energy and the bending loss of the fiber. The research conclusion has certain reference value and guiding significance for designing the embedded structure of flexible optoelectronic printed circuit boards.

Key words: Optical embedded structure; Lamination process; Finite element method; Single mode fiber; Maximum stress; Effective refractive index

OCIS Codes: 060.2400; 060.2430; 060.2330

0 引言

传统基于铜导体的电信号互联不仅易产生寄生电容、时间延迟、信号串扰等寄生效应且在许多场合无法高效地传输信号,无法有效地解决电磁干扰^[1].与电互联相比,光互联不仅能克服传统电互联的缺点,而且具有低损耗、高带宽、大容量、无串扰、抗电磁干扰等诸多优点,具有潜在的优势.为了适应电子产品向小型化、轻量化、多功能化和多自由度方向发展,提高光电互联电子产品的延展性和柔韧性,挠性光电印制电路板(Flexible Electro-optical Printed Circuit Board, FEOPCB)应运而生. FEOPCB不仅具有光传输的优异性能,而且具有可折叠、弯曲等特点,成为了国内外研究的热点^[2].

FEOPCB一般采用光波导或者光纤作为传输介质来传递信号.由于光波导^[3-5]制作工艺复杂,光衰减问题较为突出,聚合物热稳定性差且难于兼容常规的印制电路板制作工艺,目前还处于研究阶段.光纤具有较低的衰减性和较高的机械鲁棒性,兼容常规层压工艺,还能用于弯曲半径较小的地方,具有较低的弯曲损耗^[6-9],保证传输质量,极具吸引力.

层压工艺下,光纤埋入不同槽形结构挠性基板会产生应力和位移,不仅影响整体光路的耦合效率而且会改变光纤的有效折射率,导致传输性能发生变化.成磊等^[10]研究了光纤埋入硬质基板时,层压工艺对光纤应力的影响.研究发现光纤应力较大,达到 1.49 GPa 且无法弯曲.夏安思等^[11]仅仅研究了埋入挠性基板光纤受力情况.迄今为止,鲜有对层压工艺下,光纤传输性能变化的相关研究.针对此问题,本文采用有限元理论分析不同定位结构中的光纤在层压工艺下的应力、光纤位移关系和有效折射率的影响,分析层压工艺对埋入光纤性能的影响,可为 FEOPCB 提供理论基础.

1 光纤埋入工艺有限元分析

光纤埋入挠性基板工艺一般分为刻槽定位和层压两部分.刻槽主要是为了将光纤精准定位.目前的刻槽主要是通过划片机在聚酰亚胺基板横向和纵向切割出定位槽型,加工精度可达到 $\pm 0.5 \mu\text{m}$,可满足大多数光电互联产品中对准要求.槽型结构不同,层压工艺下光纤受力也会不同,光纤偏移和光纤有效折射率也会发生变化.因此为了保证在层压工艺下,光纤仍具有良好的对准精度,选择恰当的埋入槽型尤为重要.

挠性光纤基板为了达到可弯曲或扭转的性能,其厚度一般都在微米量级,为了提高弯曲性能,根据相关项目合作方所提供的材料参数,采用单层覆铜挠性基板为主体对象.常用的埋入槽型主要有 U 形槽、三角形槽、矩形槽和梯形槽四种槽型.多槽结构在槽间距相同的情况下,三角形槽型向下的开口深度大于三种槽型,严重降低挠性光电基板的可靠性能.本文仅对 U 形槽、矩形槽和梯形槽三种槽型进行分析.

1.1 建立有限元模型

根据上述分析,以采用光纤埋入矩形槽挠性基板为例建立有限元分析模型.图 1 为光纤埋入矩形槽挠性基板示意图.模型整体高度为 307 μm ,宽度为 2 mm.建立三维模型有限元分析时,由于划分的网格数量和求

解自由度巨大,而且网格尺寸最小单元尺寸相差较大,计算时易产生奇异点,导致模型不收敛.为了使问题简化,减少计算工作量,固将三维模型转换为平面二维模型,其他横向尺寸和光纤数量均不变.

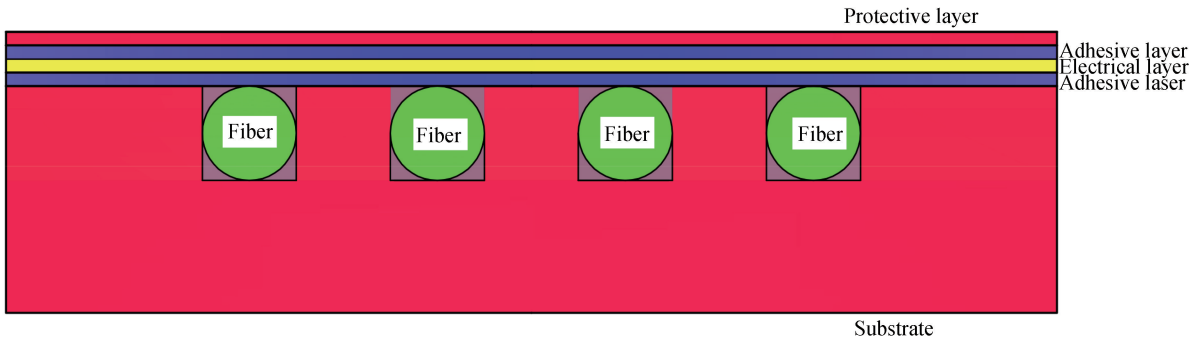


图 1 光纤埋入矩形槽挠性基板示意

Fig.1 Schematic of fiber embedded in the rectangular groove flexible optoelectronic substrate

由图 1 可知,挠性基板从上到下依次为保护层、粘接层、导电层、粘接层、基板、光纤和填充胶.保护层和基板均为聚酰亚胺,导电层为铜箔,光纤选用 SMF-28 型,根据已有的分析^[6],弯曲半径为 mm 级别时,其弯曲损耗能满足损耗要求.由于光纤芯层较小,包层大,虽然芯层和包层纯度不一样,但都按同种 SiO₂ 的材料属性计算.有限元各部分材料属性^[12]参数见表 1.在层压工艺过程中,温度和压力同时加载在挠性基板上,属于热固耦合分析.

表 1 材料属性

Table 1 Material properties

Material	Material properties					
	Elasticity modulus /Gpa	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion/ ($\times 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Specific heat capacity/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	Thermal conductivity/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
Electrical layer	110	0.33	18	894 0	384	398
Polyimide	3.2	0.335	22	142 0	109 0	0.12
Adhesive layer	0.586($\leq 48^\circ\text{C}$) 0.003($> 48^\circ\text{C}$)	0.45	42.40($\leq 48^\circ\text{C}$) 388.00($> 48^\circ\text{C}$)	110 0	192 5	0.23
Fiber	71.9	0.16	0.55	222 0	745	1.5
Filled-rubber	1.84	0.3	27	970	160 0	0.21

层压工艺对挠性光电基板的成形性能影响重大.影响层压工艺的参数主要有温度、时间和压力.层压工艺曲线随着不同的基体材料有所区别.低温共烧陶瓷层压工艺压力大,温度较低时间短^[13],而对于高分子基体材料,为了使固化片充分固化,一般温度较高,成形时间较长.根据已有对聚酰亚胺树脂基和环氧树脂单层覆铜板的层压工艺研究^[14],本文选取的层压工艺曲线如图 2.由图可知,压力采用三段式加压法,温度则区分为不同的阶段.首先对挠性光电基板从室温(25 °C)上升到 130 °C,此时压力为 0 MPa;然后在 15 min 内将压力增加到 1 MPa(温度为 130 °C);再将温度升到 180 °C 并加压到 2 MPa 保压 0.5 h,接着升温到 220 °C 在 2 MPa 的环境下保温固化 2 h,最后卸载压力和温度.升温速率和降温速率均为 5 °C/min.

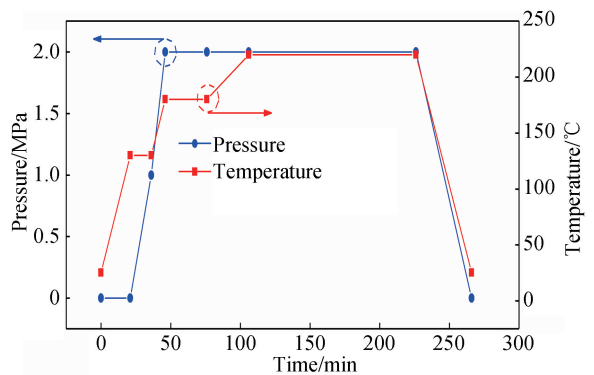


图 2 层压曲线

Fig.2 Curves of lamination process

对光纤埋入挠性基板层压分析时,固体力学中设置下板为固定约束,左右两侧为自由,上板加载压力;固体传热模块中,上下板均加载温度曲线,左右两侧为热绝缘,最后添加多物理场耦合。

1.2 层压工艺对光纤埋入结构应力与位移分析

根据 1.1 节的层压工艺,对模型进行瞬态热固耦合分析.文中所描述的应力均为 Von Mises Stress(冯米斯应力)应力,其遵循材料力学的第四强度理论,也会在后续研究折射率变化中应用。

分别对三种槽型光纤加载层压工艺参数,发现模型中最大应力出在导电层上表面,光纤和其他部位的应力均小于导电层.由于模型均在 μm 级别,在温度影响下,各部件的温度都会达到一个平衡状态,以矩形槽为例,上下板为热源,温度略高于中间区域,在保温期间,整体温度都在 $220\text{ }^\circ\text{C}$ 。

图 3 为层压工艺下,三种槽型内的光纤应力分布.由图可知,4 根光纤的应力分布均匀,且最大应力均在光纤顶部与填充胶接触的地方.层压过程中,光纤埋入梯形槽挠性基板的应力最大,最大值为 68.3367 MPa ;光纤埋入矩形槽挠性基板的应力为 52.667 MPa ;光纤埋入 U 形槽挠性基板应力为 51.312 MPa .根据 Griffith 强度理论分析,光纤实际断裂强度为 $4.07\text{ GPa}^{[10]}$,远大于 3 种槽型种光纤受到的应力,在此种层压工艺条件下,光纤能够正常应用。

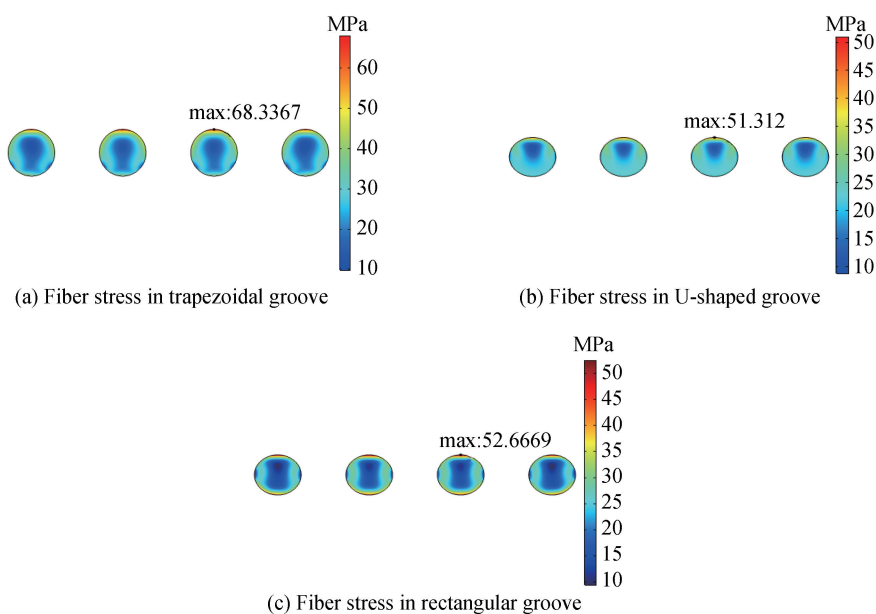


图 3 光纤埋入三种槽型结构应力分布

Fig.3 The stress distribution of fiber embedded in three kinds of groove structures

光纤在温度和压力的影响下,会发生偏移,偏移越大,光纤耦合效率越低^[15].光纤埋入不同槽型挠性基板下的总位移曲线中埋入梯形槽的光纤位移量最大为 $1.4304\text{ }\mu\text{m}$,埋入矩形槽与 U 形槽的光纤位移曲线基本重合,相差无几,为 $1.296\text{ }\mu\text{m}$,但是 U 形槽加工工艺复杂,精度难以达到要求,因此,层压工艺下,光纤埋入矩形槽结构为最优选择,后续分析中采用矩形槽进行分析。

1.3 槽形结构对应力影响分析

在挠性基板上刻槽,埋入光纤,不仅对光纤具有引导作用,避免了光纤使用过程中的微弯和振荡,而且对埋入光纤在层压过程中的保护作用,保护光纤在层压工艺时不被破坏.光纤埋入不同槽形,加入填充胶,可以保证光纤的端面定位,对光纤光路耦合元件具有不可忽视的影响.在选择槽形结构时还要考虑其他因数的制约,建议选择使用矩形槽埋入无涂覆层光纤制作挠性光电印制板,有助于减小尺寸、提高加工工艺性,因此研究槽形结构的具体尺寸是光纤埋入挠性基板槽形结构设计中不可或缺的研究内容.当槽深和槽宽发生变化时,光纤与挠性基板间的间距会变大,填充胶的体积会增大;槽深增大,光纤底部与基板的底部的距离会减小,应力也会产生变化.研究槽形结构对在最大层压工艺下(压力, $P=2\text{ MPa}$;温度, $T=220\text{ }^\circ\text{C}$)对光纤应力影响,采用控制变量法研究槽宽,槽深与槽间距分别对埋入光纤的应力与应变关系。

图 4 为加载层压工艺条件下,槽形结构尺寸对光纤的应力影响.图 4(a)为槽宽对光纤应力的影响,从图中可知,随着槽宽的增加,光纤的最大应力也会增加.当槽宽从 $125\text{ }\mu\text{m}$ 增加至 $215\text{ }\mu\text{m}$,光纤最大应力从

52.667 MPa增加至 71.907 MPa;从图 4(b)可知,随着槽间距增加,光纤最大的应力也会增加但增加不大,槽间距从 215 μm 增加至 305 μm ,光纤最大应力从 51.589 MPa 增加至 53.567 MPa;从图 4(c)可知,随着槽深增加光纤最大应力先减小后增加,当槽深 125 μm 增加至 215 μm 时,最大光纤应力先从 52.667 MPa 减小至 47.7938 MPa,然后增加到 67.349 6 MPa.这是因为随着槽深的增加,光纤底部到基板底部的距离减小,光纤顶部填充胶的影响小于基板底面传递到光纤应力影响.根据分析可知,槽形结构尺寸对光纤应力影响大小依次为槽深>槽宽>槽间距.此分析对于提高光纤埋入挠性基板具有一定的工艺参考价值.

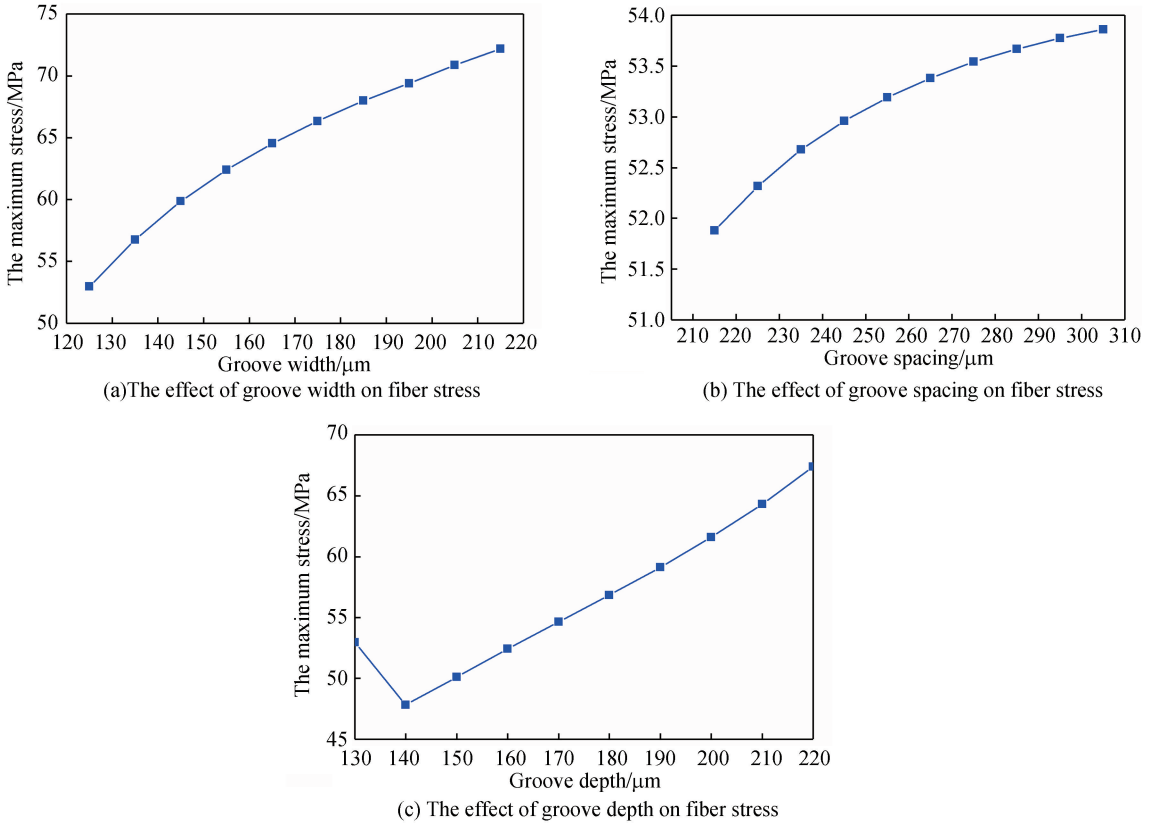


图4 槽形结构对光纤应力的影响

Fig.4 The effect of groove structure on fiber stress

2 层压工艺对光纤传输性能影响

光纤在温度和压力的作用下,芯层折射率会发生变化,导致光纤传输性能的改变.为了求解光纤在层压条件下的有效折射率,将电磁场、传热、力学模块三者进行耦合计算.由于模型较小,在层压工艺下,默认模型内部温度场都相同.在这种情况下,光纤内部的热应变和应力场就可以通过式(1)求解,即^[16]

$$\begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix} = \frac{E_Y}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu \\ \nu & 1-\nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \xi_x \\ \xi_y \\ \xi_z \end{bmatrix} - \frac{\alpha_{\text{thermal}} E_Y (T_{\text{high}} - T_{\text{room}})}{(1-2\nu)} \quad (1)$$

式中, $\delta_{x,y,z}$ 和 $\xi_{x,y,z}$ 分别为应力和应变沿模型在 x,y,z 方向上的分量, E_Y 为杨氏模量, ν 为泊松比.

考虑温度和压力耦合对光纤有效折率的影响,采用式(2)来计算,即

$$2\sigma_e^2 = (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 \quad (2)$$

式中, $\sigma_e(x,y)$ 为光纤在温度 220℃ 和外部压力为 2 MPa 时应力.用式(3)来评价应力诱导材料折射率的各向异性,即

$$\begin{aligned} n_x - n_0 &= -B_1\sigma_x - B_2(\sigma_y + \sigma_z) \\ n_y - n_0 &= -B_1\sigma_y - B_2(\sigma_x + \sigma_z) \end{aligned} \quad (3)$$

式中, n_0 为在没有压力作用下的芯层和包层的折射率, B_1 和 B_2 为由材料光弹性张量决定的应力光学常数.得

到了折射率的分布,埋入挠性基板光纤的传播光场模式分布和有效折射率可以通过式(4)求解

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) - k_0^2 n^2 \mathbf{E} = 0 \quad (4)$$

式中, k_0 为真空自由波数, \mathbf{E} 为横截面电场分布, n 为压力和温度影响下的折射率.

图5为温度对光纤折射率和折射率差的影响.由图可知,压力为2 MPa时,随着温度的升高,光纤在Y方向和X方向的折射率都会增加且光纤的双折射(Y方向与X方向的折射率差)也会增强.当温度从25 °C增加至225 °C, $N_{\text{eff}X}$ 从1.446 249 977增加至1.446 259 084; $N_{\text{eff}Y}$ 从1.446 326 398增加至1.446 393 041.有效折射率在Y方向的增量大于X方向,温度对Y方向折射率影响大于X方向折射率,与文献[15]趋势相同.

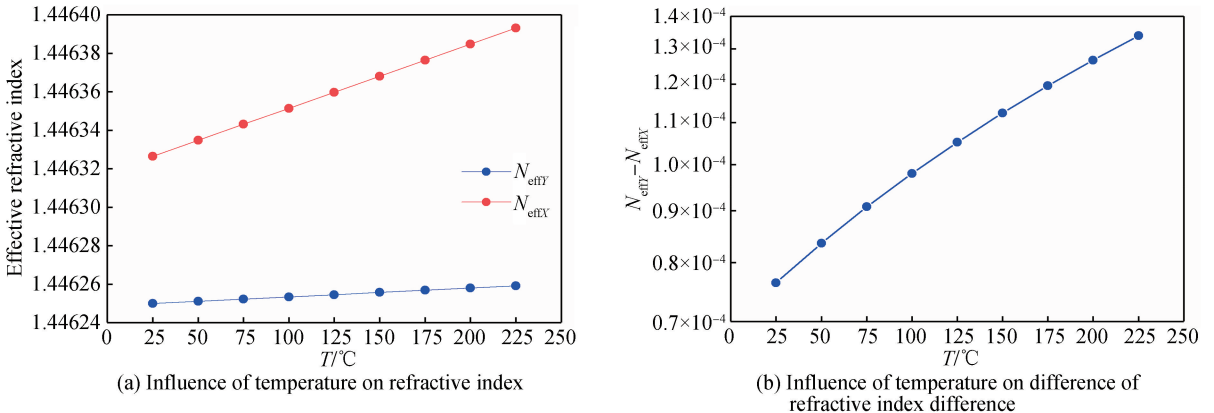


图5 温度对折射率和折射率差影响

Fig.5 Influence of temperature on refractive index and the difference of refractive index

图6为压力对光纤折射率和折射率差的影响.由图可知,温度为220 °C时,随着压力的升高,光纤在Y方向和X方向的折射率都会增加,但是光纤的双折射(Y方向与X方向的折射率差)降低.当压力从0.2 MPa加至2 MPa, $N_{\text{eff}X}$ 从1.446 235 708增加至1.446 246 419; $N_{\text{eff}Y}$ 从1.446 292 888增加至1.446 300 357.有效折射率在Y方向的增量小于X方向,压力对光纤X方向折射率影响大于Y方向折射率.

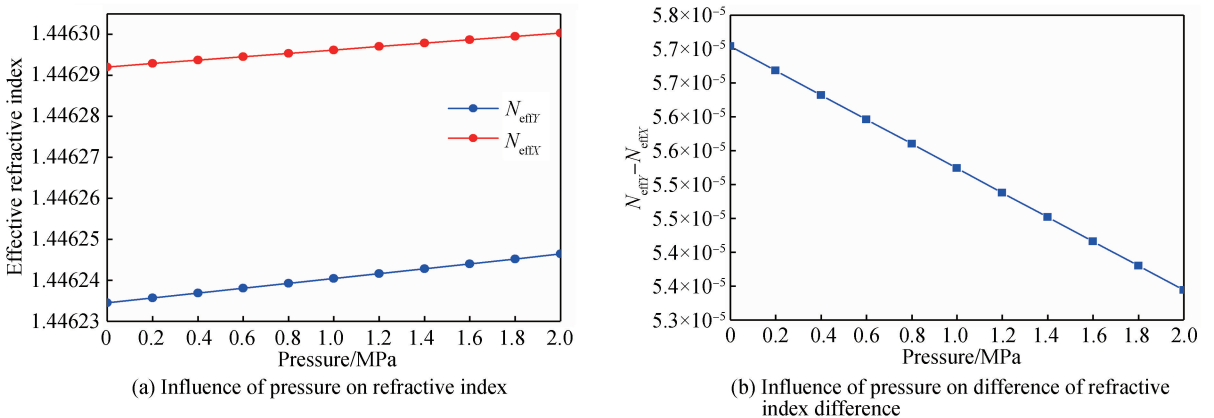


图6 压力对折射率和折射率差影响

Fig.6 Influence of pressure on refractive index and the difference of refractive index

由以上分析可知,未加载层压条件时, $N_{\text{eff}X}$ 为1.446 224 78; $N_{\text{eff}Y}$ 为1.446 226 14.层压条件的加载后,无论是X方向还是Y方向的有效折射率都会增加,光纤有效折射率增加,光纤约束光的能力增强,能更好地限制光能的辐射,降低其弯曲损耗^[17-18].

3 结论

层压工艺下,埋入挠性光电基板内光纤的应力、位移发生变化,影响光路的耦合效率且会改变光纤的折射率,导致传输性能发生变化.针对此问题,采用有限元分析软件,对光纤埋入不同槽形的挠性光电基板进行

了力学、传热和电磁场耦合分析.研究表明:光纤埋入梯形槽挠性基板的应力最大,最大值为 68.336 7 MPa;光纤埋入矩形槽挠性基板的应力最小为 52.667 MPa,光纤埋入 U 形槽挠性基板居中,为 51.312 MPa;埋入矩形槽与 U 形槽的光纤位移曲线基本重合,相差无几;埋入梯形槽的光纤位移量最大为 1.430 4 μm .随着槽宽增加,光纤最大应力从 52.667 MPa 增加至 71.907 MPa;随着槽间距增加,光纤最大应力从 51.589 MPa 增加至 53.567 MPa;随着槽深增加,光纤最大应力从 52.667 MPa 减小至 47.793 8 MPa,然后增加到 67.349 6 MPa.槽形结构尺寸对光纤应力影响大小依次为槽深>槽宽>槽间距.温度和压力的增加,单模光纤在 X 方向的有效折射率从 1.446 249 977 增加至 1.446 259 084;Y 方向的有效折射率从 1.446 326 398 增加至 1.446 393 041.光纤有效折射率差会随着温度的增加而增大;随着压力的增加而减小.有效折射率增加,芯层束缚光能力增加,能更好地限制光能的辐射,降低光纤的弯曲损耗.本文研究结果对挠性光电基板光纤埋入结构设计和层压工艺具有一定的参考价值和指导意义.

参考文献

- [1] ZHOU De-jian, CHENG Lei. The domestic and international research situation of optoelectronic interconnection technology [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **760-762**: 383-387.
- [2] 张金星. 基于光波导互连的 EOPCB 的研究[D]. 武汉:华中科技大学,2011.
- [3] UEMURA H, HAMASAKI H, FURUYAMA H, *et al.* Hybrid optical interconnection module with built-in electrical power line for mobile phone using highly-flexible integrally-formed OE-FPC[C]. 2009 59th Electronic Components and Technology Conference, IEEE, 2009: 2101-2105.
- [4] KELLER C, SHAO Z, WAKAZONO Y, *et al.* Planar assembled flexible interconnect link with hybrid optical/electrical data transmission for mobile device applications[C]. IEEE, Electronic Components and Technology Conference, 2011: 823-828.
- [5] SHI F, BAMIEDAKS N, VASI'EV P P, *et al.* Flexible multimode polymer waveguide arrays for versatile high-speed short-reach communication links[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, **36**(13): 2685-2693.
- [6] LIAN Y, REN G, JIANG Y, *et al.* Ultralow bending-loss trench-assisted single-mode optical fibers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, **29**(3): 346-349.
- [7] ZHENG Xin-juan, REN Guo-bin, HUANG Lin, *et al.* Study on bending losses of few-mode optical fibers[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(6): 162-169.
郑兴娟,任国斌,黄琳,等. 少模光纤的弯曲损耗研究[J]. 物理学报,2016,**65**(6):162-169.
- [8] TANG Jie-yuan, ZHANG Quan-quan, ZENG Yang-fu, *et al.* Based on U-shape bend optical fiber mode interference between the refractive index of the sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(5): 88-93.
唐洁媛,张仨仨,曾央夫,等. 基于 U 型弯曲光纤模间干涉的折射率传感[J]. 光子学报,2015,**44**(5):88-93.
- [9] CHAO Shan-shan, GUO Chao-yang, WANG Zhen, *et al.* Structure design and bending loss of a novel fiber for low temperature environment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(11): 1148018.
曹珊珊,郭朝阳,王震,等. 用于极寒温度的特种光纤的结构与弯曲损耗研究[J]. 光子学报,2019,**48**(11):1148018.
- [10] CHENG Lei, ZHOU De-jian, WU Zhao-hua. Design of the optical fiber embedded structure in pcb-level circuit based on the fracture mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, **52**(9): 158-165.
成磊,周德俭,吴兆华. 基于断裂机理的板级电路光纤埋入结构设计[J]. 机械工程学报,2016,**52**(9):158-165.
- [11] XIA An-si, ZHOU De-jian, SHE Yu-lai. Influence of flexible substrate with different slot structure on stress and strain of optical fiber[J]. *Journal of Guilin University of Electronic Technology*, 2019, **39**(2): 108-112.
夏安思,周德俭,余雨来. 不同槽型结构挠性基板对光纤应力应变的影响[J]. 桂林电子科技大学学报,2019,**39**(2):108-112.
- [12] HU Fu-kai, ZHOU De-jian, CHENG Lei. Research and design of optical-fiber-embedded structure in optical printed circuit board under thermal shock[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, **763**: 238-241.
- [13] STEFAN W, DESMULIEZ M P Y. Surface embossing of LTCC during the lamination process[C]. 2012 Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS, IEEE, 2012: 181-184.
- [14] 郑强. 聚酰亚胺树脂基和环氧树脂基两类覆铜板的研究[D]. 厦门:厦门大学,2014.
- [15] LEI Ting, ZHOU De-jian, TANG Rui-qiang, *et al.* Design of photoelectric coupler module with optical fiber embedded in flexible printed circuit board[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, **40**(1): 76-81.
雷庭,周德俭,唐睿强,等. 埋入光纤挠性基板的光电耦合模块设计[J]. 发光学报,2019,**40**(1):76-81.

-
- [16] YE W N , XU D X , JANZ S, *et al.* Birefringence control using stress engineering in silicon-on-insulator (SOI) waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2005, **23**(3): 1308-1318.
- [17] SHE Yu-lai, ZHOU De-Jian , CHEN Xiao-yong, *et al.* Study on ultralow bending loss of bend-insensitive single mode optical fiber[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, **50**: 225-232.
- [18] SHE Yu-lai, ZHOU De-Jian, CHEN Xiao-yong, *et al.* Bend-resistant low bending loss and large mode area single-mode fiber with low NA[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, **51**: 101-106.

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China (No.51765013), Natural Science Foundation of Guangxi Province (No. 2017GXNSFBA198180), Guangxi Key Laboratory of Manufacturing System and Advanced Manufacturing Technology (No. 1725905004Z), Hubei Key Laboratory of Mechanical Transmission and Manufacturing Engineering at Wuhan University of Science and Technology(No.2017A13), Guangxi University Key Laboratory of Optoelectronic Information Processing (No.KFJJ2016-01)