

压电纤维复合材料的研究

刘永刚 沈星 赵东标 裘进浩

(南京航空航天大学, 南京 210016)

摘 要 以提高交叉指形电极压电纤维复合材料诱导应变和挟持应力为目的,采用有限元软件 ANSYS 分析了电极区聚合物参数、交叉指型电极结构和压电相体积分数对压电纤维复合材料诱导应变和挟持应力的影响。结果表明:增加电极区聚合物的介电常数或减小电极区聚合物的厚度,能够提高元件的诱导应变和挟持应力,元件诱导应变最大可达 173μ ;减小分支电极的周期或者适当增大分支电极的宽度,可以有效地提高元件的作动性能;提高压电纤维体积分数,有利于提高元件的作动性能。

关键词 压电纤维复合材料,有限元,交叉指形电极,聚合物,体积分数

Interdigitated Electrodes Piezoelectric Fiber Composites

Liu Yonggang Shen Xing Zhao Dongbiao Qiu Jinhao

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract In order to raise the actuating strain and stress of interdigitated electrodes (DE) piezoelectric fiber composites, FEM is employed to analyze the influence of thickness and material constants of polymer around electrodes, dimension of electrodes and volume ratio of fibers on the composite induced strain and stress. The results show that the actuating strain and stress of interdigitated electrodes piezoelectric fiber composites can be improved much by selecting polymer with high dielectric constant or decreasing the thickness of the polymer around electrodes. And the maximum strain (173μ) is obtained. In addition, much higher induced strain and stress can be obtained by decreasing period of DE or increasing width of DE and volume ratio of fibers among the composite.

Key words Piezoelectric fiber composites, Finite element, Interdigitated electrodes, Polymer, Volume factor

1 引言

1-3型压电复合材料是目前研究最多、最深入、应用最广泛的一种压电复合材料。压电纤维复合材料(PFC)是1-3型压电复合材料的最新研究成果。它采用了压电陶瓷纤维和交叉指型电极(DE)两种技术,利用了较大的压电系数 d_{33} 和横向压电效应。与传统的平面压电陶瓷驱动器相比,压电纤维复合材料的主要优点有:较大的平面诱导应变;可定制的正交异性;抗破坏能力强;容易使用在曲面结构上等^[1]。在航空智能结构如机体的主动减震降噪和机翼表面流场主动控制,以及其他领域智能结构的形状、高度、位置、固有频率、阻尼的控制具有广阔的

应用前景^[2]。

现有文献表明对压电纤维复合材料元件本身性能的研究主要集中在美国,例如麻省理工学院的BENT等^[3~4]研究了PFC的制作工艺;利用均匀场理论和有限元法,分析了纤维局部模型的力学性能;弗吉尼亚大学的JUSTIN^[5]利用保角映射变换对PFC的静电场分布进行了分析;NASA的研究人员^[6~7]对压电纤维复合材料的制作工艺和性能进行了分析研究。在国内,对压电纤维复合材料元件性能的研究主要集中在北京航空航天大学和南京航空航天大学,主要是理论分析^[8~10]。压电纤维复合材料是一个复杂的机电系统,最大的缺陷是试件的性能发散。在元件的

收稿日期:2006-12-28;修回日期:2007-04-18

基金项目:航空科学基金(04G52042);江苏省自然科学基金资助(BK2006568)

作者简介:刘永刚,1972年出生,博士研究生,主要从事机电控制与自动化、功能器件研究

制作过程中,由于元件局部结构和工艺条件的改变,就可能造成试件整体性能的不稳定。因此采用试验研究的方法成本比较高,制品废品率高,利用理论方法对元件性能进行模拟分析显得非常重要。

本文从提高压电纤维复合材料性能(本文定义为元件的诱导应变和挟持应力)的角度出发,利用有限元软件 ANSYS8.0,详细分析了电极区聚合物介电常数和聚合物层厚度、电极结构参数以及压电纤维体积分数对 PFC 元件诱导应变和挟持应力的影响,研究元件性能变化规律,为设计高性能压电纤维复合材料提供理论依据和实验指导。

2 PFC的基本理论

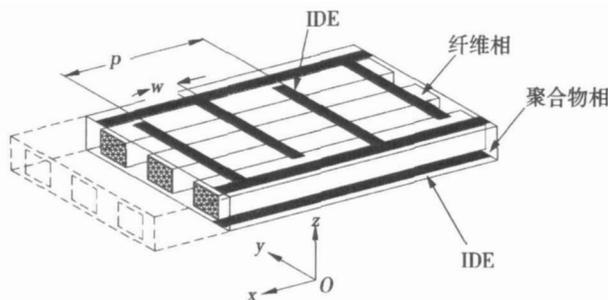


图 1 压电纤维复合材料 (PFC)示意图

Fig 1 Schematic of PFC device

DE结构的特点是:电场分布沿分支电极中心线对称,在外电压作用的瞬时,沿 x 轴方向,分支电极的极性为 +、-、+、-交叉分布。在元件横向上,电场沿 DE周期性交变分布。沿压电纤维方向,PFC的 DE半周期电场分布如图 2所示,在电极区附近,电场强度大小不均匀,方向不平行,仅仅在偏离电极区的中心区域,电场才趋于均匀。由于理论分析建立在电场平行均匀的假设上,所以理论结果与试验结果相差比较大。采用有限元 ANSYS的直接耦合分析,能够更加准确地模拟 PFC元件的性能。

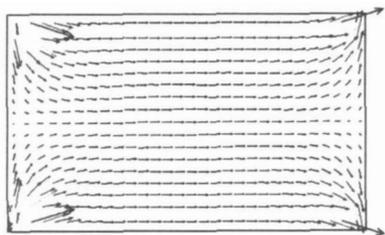


图 2 静电场矢量图

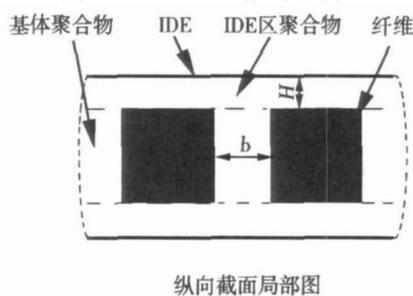
Fig 2 Vectorgraph of electrostatic field

当压电纤维复合材料作为振子使用时,作用于压电纤维的外电场与压电相诱导应变和挟持应力的关系为:

$$x = S_{33} \cdot x + S_{31} \cdot y + S_{32} \cdot z + d_{33} \cdot E_x \quad (1)$$

压电纤维复合材料由三部分组成:压电纤维,聚合物基体和交叉指型电极。为了提高元件的柔韧性,增强元件的抗破坏能力,有些元件加入第四种成分

玻璃纤维。压电纤维是元件的主动部分,聚合物是被动部分,DE为元件施加作动电压。具有代表性的纤维几何形状有圆形、椭圆形、矩形和不规则形。采用矩形结构纤维的 PFC元件如图 1所示。它的结构特点^[10]为:压电纤维沿元件长度方向等间距平行排列在一个平面内;聚合物填充在纤维之间,覆盖在纤维表面,是元件中的连续相。元件最外层是具有交叉指型结构的电极层,元件上、下表面对应位置为同极。



纵向截面局部图

$$x = C_{33} \cdot x + C_{31} \cdot y + C_{32} \cdot z - e_{33} \cdot E_x \quad (2)$$

式中, S 和 C 常数为压电相材料的弹性系数, d 和 e 为压电系数, E_x 为作用于压电纤维的外电场在 x 轴向分量。

3 有限元模型

分析采用的 PFC结构尺寸为:纤维截面 $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$,纤维间距 $25 \mu\text{m}$,纤维表面聚合物厚度为 $25 \mu\text{m}$,DE周期 P 为 1mm ,分支电极宽度为 $100 \mu\text{m}$ 。压电相材料为 PZT-5H,聚合物相材料为环氧树脂。

PFC的有限元分析属于耦合场分析,由于压电纤维内部电场分布的非线性,利用 ANSYS软件直接耦合的方式求解,可以提高仿真计算的精度。PFC有限元分析几个关键的步骤为:(1)建立 2个压电材料模型,一个聚合物材料模型,1[#]压电材料模型输入极化方向沿 x 轴正向的压电常数,2[#]压电材料模型输入极化方向沿 x 轴负向的压电常数;(2)定义压电相和聚合物相的单元类型都为 SOLID98,设定聚合物相的压电系数 d 矩阵元素值很低,几乎不具有压电性能。这样既避免了划分单元网格时不同单元之间的衔接错误,也有利于提高有限元求解效率;(3)建立实体模型,首先沿分支电极中心线分割 PFC,各部分分别建立实体模型(便于不同部分设定不同的材料常数),

然后再粘接在一起;(4)边界约束。首先进行应变分析,元件处于机械自由状态,然后进行应力分析。具体约束条件如表 1 所示。

表 1 约束条件¹⁾

Tab 1 Restriction conditions		mm
项目	边界面 /mm	位移约束
应变分析	$x=0$	$S_x=0$
	$y=0$	$S_y=0$
	$z=0$	$S_z=0$
应力分析	$x=40$	$S_x=0$
	$y=25$	$S_y=0$
	$z=0.5$	$S_z=0$

注:1)电压激励,在上、下表面正电极区域加电压 200 V,负电极区域加电压 0 V。

4 结果与讨论

4.1 电极区聚合物对元件性能的影响

在压电纤维复合材料中聚合物是从动相,它的首要作用是连接压电纤维,使元件保持一个几何整体,保护压电纤维,避免纤维被破坏,降低纤维裂纹的扩散。其次,在外电场的作用下,压电纤维产生的变形力通过聚合物传递给外部结构体,并且把结构体对元件的作用,传递给压电纤维。DE区的聚合物不仅具有上述作用,而且对压电纤维上的电场分布起关键作

用,因此聚合物相的厚度和介电常数对 PFC 的性能影响很大。图 3 和图 4 分别为 DE 区聚合物厚度和介电常数对元件性能的影响。可以看到,聚合物的介电常数对元件性能的影响呈线性,元件诱导应变和挟持应力随聚合物介电常数增加而增大;随聚合物厚度减小,元件诱导应变和挟持应力增大。当电极与纤维表面直接接触时,诱导应变和挟持应力最大,其中最大诱导应变为 173μ ,最大挟持应力为 4.2 MPa。随聚合物厚度减小或介电常数增加,聚合物对外电场的隔离效果减弱,作用于压电纤维的外电场增大,PFC 的性能得到提高。

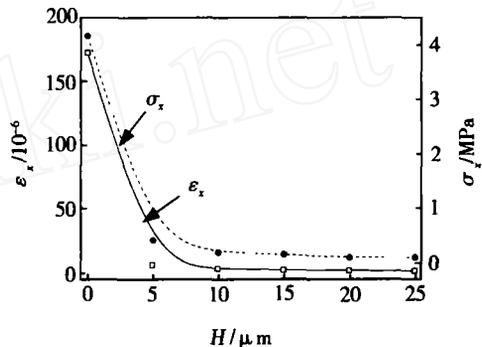
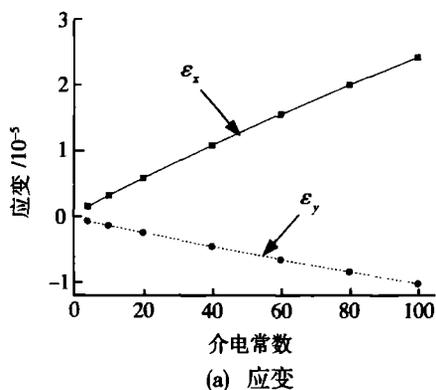
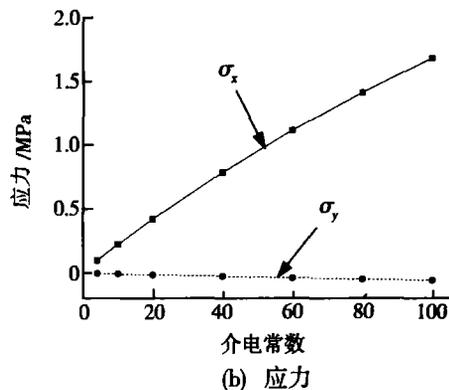


图 3 聚合物厚度对 PFC 性能的影响

Fig 3 Induced strain and stress against thickness of polymer around DE



(a) 应变



(b) 应力

图 4 聚合物介电常数对 PFC 性能的影响

Fig 4 Induced strain and stress against dielectric coefficient of polymer

4.2 电极结构对元件性能的影响

在 PFC 极化的时候,DE 作为极化电极使用,在 PFC 元件布置在结构体上的时候,外加电源通过 DE,对压电纤维施加电场,使元件产生振动。图 5 和图 6 分别为 DE 周期和分支电极宽度对元件性能的影响。由图可见,随周期的增加,元件诱导应变和挟持应力下降。在 $P < 1$ mm 的区域,曲线斜率比较大,元件性能变化比较明显。所以采用较小的周期 P,能够有效地提高元件的性能。同时,当分支电极

宽度增加时,诱导应变增加,而挟持应力呈现减小趋势,特别是横向应力出现先增加后减小的性质。这是由于分支电极的宽度加大,压电纤维上外加电场的均匀性变差,不均匀电场的区域增大,均匀电场区域减小,电场强度的 y 向分量增加, x 向分量减小。因而挟持应力发生扭曲现象。另外,不均匀电场对元件的均匀极化也是一个不利的因素。所以,合理选择分支电极的宽度,可以提高元件的性能。

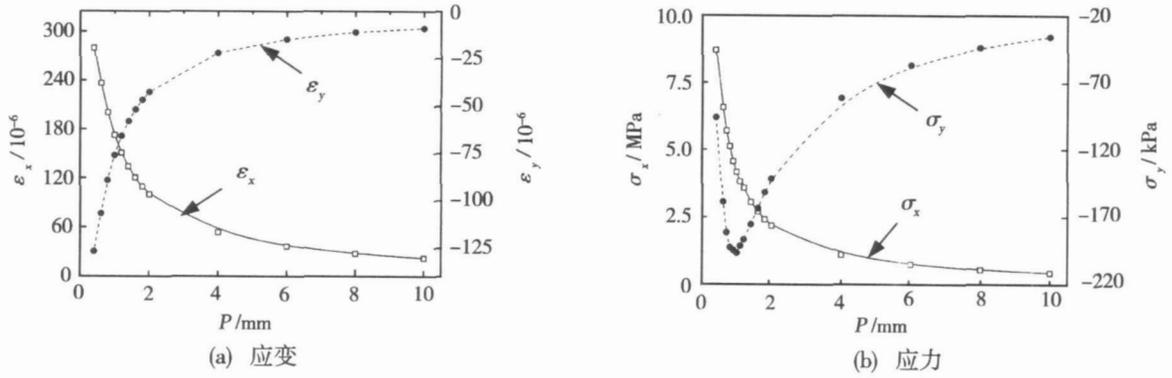


图 5 DE周期 P 对 PFC性能的影响

Fig 5 Induced strain and stress against period of DE

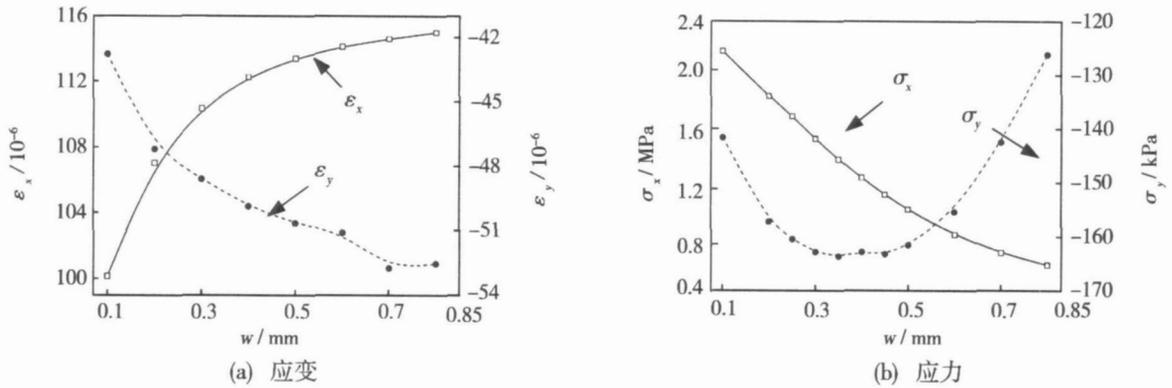


图 6 DE分支电极宽度 w 对元件性能的影响

Fig 6 Induced strain and stress against width of DE

4.3 压电纤维体积分数对元件性能的影响

压电纤维是 PFC 中的主动相,是元件组成的关键部位。压电纤维的体积分数对元件性能的影响如图 7 所示。可以看到,随压电纤维体积分数的增加,元件诱导应变和挟持应力增大,特别是横向应变 ϵ_x 和应力 σ_x 保持线性增大趋势。由于聚合物相的体

分数与元件的柔顺性有关,聚合物相含量高,对改善元件与结构之间的相容性十分有利。所以可以采用增加压电纤维体积分数的方法来提高元件的作动性能,但同时必须考虑元件柔顺性的问题,应选择合适的体积分数。

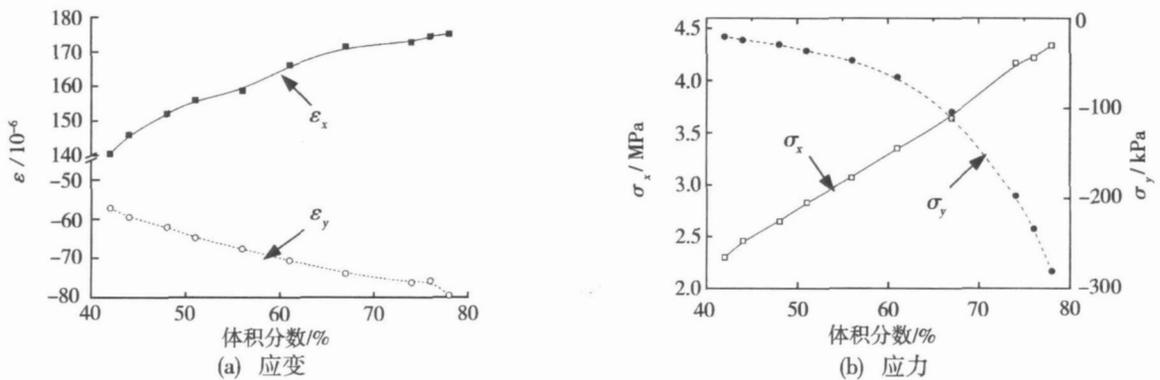


图 7 压电相体积分数对元件性能的影响

Fig 7 Induced strain and stress against volume factor of fibers

5 结论

利用有限元软件 ANSYS8.0 详细分析了 DE 区聚合物参数、DE 结构和压电相体积分数对压电纤维

复合材料作动性能的影响,得到的优化设计结果如下:

(下转第 33 页)

3.4 模拟结果与试验结果的比较

(1)在 ANSYS中分析得到的高温区形状呈细长的纺锤形状,尾部区域拖的比较长。

而实际拍摄得到的云图,高温区也呈细长的纺锤形状,并且拖尾也较长。可见,仿真和实验得出高温区域分布形状基本吻合。

(2)当焊接热源的位置不是处在焊缝中心位置时实际拍摄得到的温度场的偏移情况与数值计算得到的温度场的偏移情况相同。

(3)从温度场的最高温度定量比较可以看出,仿真得到的熔池温度和实验测得的最高温度相差不大,仿真温度略高于实验温度。

3.5 误差分析

造成上述误差的因素有三个:第一是热物理参数造成的误差,由于热物理参数的测量比较困难,公式中推导得出的是理论值,和实际值有所差别;第二是因为本文在模拟过程中,为了简化模型,做了一些简化假设造成误差;第三是热像仪的因素,虽然红外热像仪精度高,误差小,但是在焊接过程中,电弧的弧光会对红外热像仪的测量精度产生影响。

4 结论

建立了厚钢板多层多道焊的焊接温度场模型,将移动高斯热源作为热载荷施加于工件。实测了三层焊焊接过程的温度场,并且和 ANSYS求解得到的温度场进行比较。对实测温度场和模拟温度场的比较可以看出模拟得到的温度场分布与试验结果吻合较好,二者高温区分布情况比较吻合,表明所建立的数值分析模型是正确有效的。

参考文献

- 1 潘际奎. 现代弧焊控制. 北京:机械工业出版社, 2002
- 2 陈楚,汪建华,杨洪庆. 非线性焊接热传导的有限元分析和计算. 焊接学报, 1983; 4(3): 139~147
- 3 徐家园. 复杂构件三维焊接过程虚拟分析技术研究. 广西大学硕士学位论文, 2003
- 4 鹿安理,史清宇,赵海燕等. 厚板焊接过程温度场、应力场的三维有限元数值模拟. 中国机械工程, 2001; 12(2): 183~186
- 5 武传松. 焊接热过程数值分析. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1990

(编辑 任涛)

(上接第 21 页)

(1)增加电极区聚合物的介电常数或减小电极区聚合物的厚度,能够有效增加元件的作动性能,当采用电极直接接触纤维表面时,元件作动性能最优,最大诱导应变为 173μ ,最大挟持应力为 4.2 MPa ;

(2)减小 DE周期或者适当增大分支电极的宽度,可以有效地提高元件的性能;

(3)在兼顾元件柔顺性的情况下,提高高压电纤维体积分数,有利于提高元件的性能。

参考文献

- 1 Bent A A, Pizzochero A E. Recent advances in active fiber composites for structural control. SPIE, 2000; 3991: 244~254
- 2 沈星,冯伟. 基于铁电陶瓷 RA NBOW 元件的力学优化设计. 材料科学与工程, 2005; 23(6): 799~802
- 3 Bent A A. Active fiber composites for structural actuation. Massachusetts Institute of Technology, 1997
- 4 Bent A A, Hagood N W. Improved performance in piezoelectric fiber composites using interdigitated electrodes. SPIE,

2001; 2441: 196~211

- 5 Justin Michael L Boyd. Electrical properties of macro-fiber composite actuators and sensors. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004
- 6 Andreas J S, Thomas D, Bent B. Overview on macro fiber composite applications. SPIE, 2006; 6170: K-1~K-8
- 7 Rudy J W, Robert G B, Dennis M. Macro fiber piezo-composite actuator poling study. NASA/TM-2002-211434
- 8 赵寿根,程伟. 1-3型压电纤维复合材料的细观力学模型及其力电宏观参数研究. 应用力学学报, 2005; 22(3): 335~341
- 9 刘卫民,陈勇,刘永刚等. 交叉指形电极压电纤维复合材料的优化设计. 机械工程材料, 2006; 30(2): 29~31
- 10 刘永刚,沈星,赵东标等. 测控用压电纤维复合材料研究. 测试技术学报, 2006; 20(9): 39~42

(编辑 李洪泉)