

柔性基板的几何参数对柔性电子系统延展性的影响

王晓玲[✉], 李 豪, 王国庆

北京科技大学机械工程学院, 北京 100083
✉ 通信作者, E-mail: xiaoling@me.ustb.edu.cn

摘 要 柔性电子系统主要由有机基板和附着其上的金属导体构成,系统组件的几何参数对柔性电子系统延展性能影响很大,良好的尺寸设计可以优化系统的力学性能. 本文研究了柔性基板的尺寸参数(长度、宽度、厚度)对柔性电子系统延展性的影响. 用 ABAQUS 软件对附着在不同几何参数的共聚酯材料上的两种结构铜导体进行单轴拉伸模拟实验,以此来确定基板的尺寸参数对整个系统延展性的影响. 通过对模拟结果进行分析发现,柔性基板长度的改变对系统拉伸变形影响很小,而柔性基板宽度或厚度的增加可以减小整个系统的变形,但是会加大金属导体的应变,因此需要根据实际情况对尺寸参数进行合理设计. 这项工作可以为柔性电子系统中基板的几何设计提供帮助.

关键词 柔性电子器件; 柔性基板; 几何参数; 金属导体; 基板变形
分类号 TH140.8

Effect of the geometric parameters of elastomer substrates on the flexibility of stretchable electronics

WANG Xiao-ling[✉], LI Hao, WANG Guo-qing

School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China
✉ Corresponding author, E-mail: xiaoling@me.ustb.edu.cn

ABSTRACT Stretchable electronics are mainly composed of the organic substrate and the metal thin conductor attached to the substrate. The geometric parameters of both substrate and metal conductor play an important role in the flexibility of stretchable electronics. In this paper, the effect of geometric parameters (length, width, and thickness of the substrate) on the flexibility of stretchable electronics was studied. The ABAQUS software was used to simulate the uniaxial tensile tests on the polyimide-supported copper conductor to determine the effects of geometric parameters of the substrate on its flexibility. As shown in the results, the effect of substrate length on the deformation of the system is very small; while the increase of width or thickness of the substrate can decrease the substrate deformation but increase the strain of metal conductor. This work can provide a theoretical support for the geometrical design of stretchable electronics.

KEY WORDS stretchable electronic; elastomer substrate; geometric parameter; metal conductor; substrate deformation

柔性电子技术发展迅速,已经在众多领域广泛应用,如可折叠的显示器^[1],电子皮肤^[2],心脏辅助器材^[3]等. 柔性电子主要由柔性基板和附着在其上的金属导体构成^[4]. 这种结构比单独的金属导体有更好的延展性^[5],但是系统还是会产生变形,金属导体会屈曲变形甚至断裂脱落,同时柔性基板也会出现变形,这会

影响产品的性能和实际应用.

目前关于柔性电子的研究已经很多, Gonzalez 等设计了类似马蹄形的金属导体结构,经实验计算发现此种结构是最为合适的弯曲形结构^[6-7]; Li 等通过实验计算研究了柔性基底上平直金属导体的拉伸变形特点及基底刚度对伸展比的影响,结果表明合适的基底

收稿日期: 2015-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11272002); 北京高等学校青年英才计划项目(YETP0363)

刚度能约束导体受拉时颈缩的产生和发展,从而将导体-基底结构的伸长比提高约 50%^[8-9]. Lu 等发现较大的导体厚度可以有效地提高柔性电子系统的延伸率,抑制变形^[10]. 本文对基板的几何尺寸参数对系统延展性的影响进行模拟分析研究,模拟结果将对以后的实验和产品设计提供指导.

1 模拟实验设计

在本文中,建立柔性电子系统单轴拉伸模型,用 ABAQUS 有限元软件来模拟整个系统的拉伸过程. 使用弹性模量较低,伸展性较好的共聚酯材料(Ecoflex)作为基板材料,其长度(l)、宽度(w)、厚度(t)为可变参数(根据实验设计限制 $l < 0.8 \text{ mm}$, $w < 0.8 \text{ mm}$, $t < 0.25 \text{ mm}$). 基板选用 Mooney-Rivlin 模型模拟(在弹性体非线性有限元分析中,Mooney-Rivlin 应变能函数是广泛应用的本构关系^[11-12]),对应系数为 $C10 = 0.008$ 、 $C01 = 0.002$ 、 $D1 = 2$ (由弹性模量 E 和泊松比 ν 换算而得). 为了使模拟数据区别明显,采用允许较大变形的导体——形状为波浪状条纹的金属铜导体(弹性模量 $E = 124000 \text{ MPa}$,泊松比 $\nu = 0.34$),铜丝导体厚 0.001 mm ,宽 0.01 mm ,导体结构采用目前最理想的曲形结构,马蹄形结构和与其对比的 U 形结构. 其他数据详见图 1,马蹄形铜丝弯曲角度 $\theta = 45^\circ$,两个结构弯曲处内半径 $R = 0.1 \text{ mm}$,总长度 $L = 0.368 \text{ mm}$,周期数均为 2.

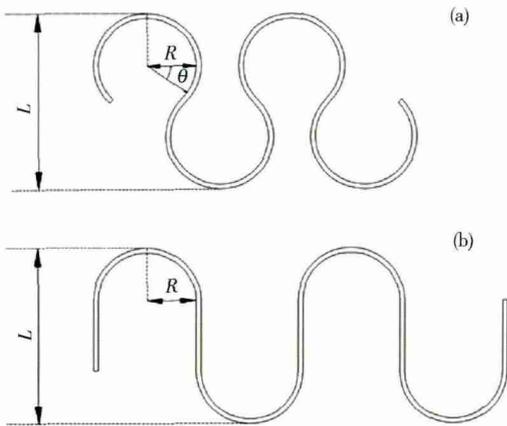


图 1 两种铜丝导体结构参数. (a) 马蹄形铜丝; (b) U 形铜丝
Fig. 1 Structure parameters of copper conductors: (a) horseshoe-shaped; (b) U-shaped

模型采用单轴拉伸^[13]. 模型设置为各向同性,塑性良好,不考虑温度和粘结的影响. 基板两端面各向外施加 50% 长度的位移,即使基板拉伸 100%. 我们用 3D 模拟来观察整个系统的变形情况. 但是在实际应用中金属导体会被嵌入柔性基板并使用了粘结剂,而且也没考虑覆盖层的影响,其模拟结果与现实实验并不完全相同,而且无法保证精度. 但是本次实验主

要是针对基板尺寸参数对整个系统的影响做的第一次尝试,以上提及的模拟实验与现实情况的不符不会影响结论.

实验共进行三组对照模拟,每组取一个基板尺寸参数为可变量,其他两个参数不变. 记录模拟拉伸结果,两两对比三组实验模型,考察铜丝导体延伸率,铜丝导体应变,这里我们直接使用 ABAQUS 软件中的考察量——最大对数应变(LE)来表示铜丝导体应变. 现实中,柔性电子系统拉伸后基板一定会发生变形,过大的变形会对实验和产品产生不利影响. 由于基板一侧表面覆盖有铜丝导体,使其拉伸时产生了特殊的变形,铜丝导体附着的部分凸起,未附着的部分下凹,可以说基板拉伸后产生了翘曲. 这种特殊的变形使得基板拉伸后的厚度反而增大(如果未附着铜丝,基板拉伸后厚度应该减小). 因此基板的变形情况(厚度方向上的变形——基板 Z 向变形)在本文中也会被研究.

2 实验结果与讨论

分析实验数据可以发现三组实验虽然数据没有明显的直接联系,但是三组实验数据的变化趋势还是有规律可循的,基板的尺寸参数变化对实验结果的影响确实存在.

2.1 基板长度的影响分析

通过比较图 2 中的实验结果发现,随着基板长度的增加,铜丝导体的延伸率数值相近,而且变化都不大,稍微有些下降,这可能是由于基板的特殊弹性系数和铜丝导体的结构造成的. 图 3 为铜丝导体应变与基板长度的关系,对于铜丝导体应变来说,随着基板的长度的增加,两者变化都不大,U 形结构下降趋势较为明显,但是 U 形结构的数值还是维持在一个较高的水平,而马蹄形结构的数值则一直较低. 而基板的 Z 向变形,如图 4 所示,随着基板长度的增加,两种结构的基板变形虽然出现了波动,但是总体来说变化不大.

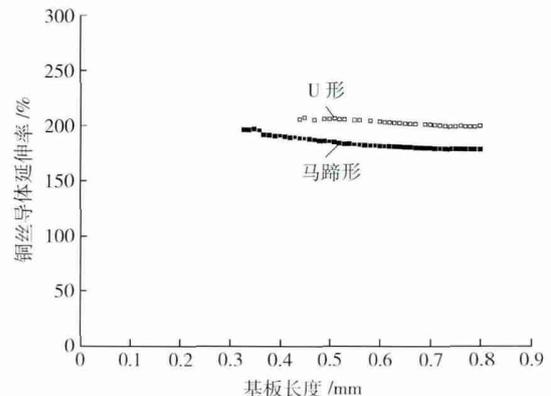


图 2 铜丝导体延伸率与基板长度的关系

Fig. 2 Relationship between elongation rate of the copper conductor and the substrate length

而且马蹄形结构的基板变形要远远大于 U 形结构的基板变形. 由于马蹄形铜丝结构的长度要比 U 形结构的要短, 因此附有马蹄形导体的基板拥有更大的长度范围, 但是这不影响本文的研究.

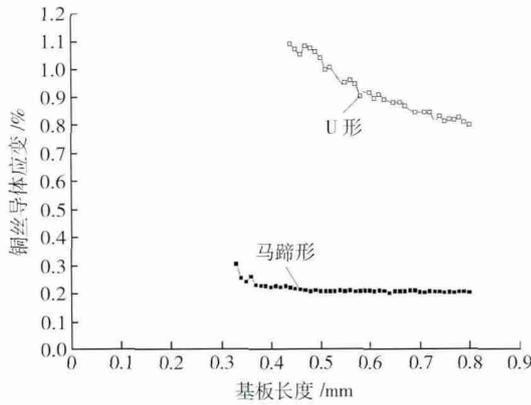


图 3 铜丝导体应变与基板长度的关系

Fig. 3 Relationship between strain of the copper conductor and the substrate length

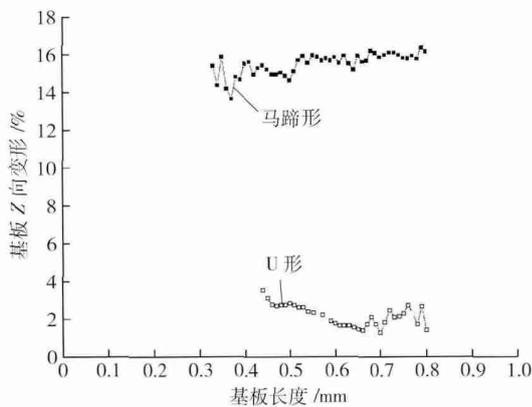


图 4 基板 Z 向变形与基板长度的关系

Fig. 4 Relationship between substrate deformation and substrate length

2.2 基板宽度的影响分析

虽然超弹性材料的特殊性质使其不服从胡克定律, 但是在拉伸平面的垂直方向上表现得不太明显. 从图 5 可以看出, 随着宽度的增加, 两种结构的铜丝导体的延伸率变化不大且数值相近. 随着宽度的增加, 基板的 Z 向变形开始不断减小, 拥有马蹄形结构导体的基板到最后甚至不产生变形, 拥有 U 形结构导体的基板变形也在不断减小, 但是没有前者那么大, 而且最后没有减小到零(图 6). 但是基板变形变小的代价就是铜丝导体应变变大. 当基板宽度较小时, 铜丝导体的应变很小, 但是随着基板宽度增大, 两种结构的铜丝导体的应变都会迅速变大到一个很高的值, 然后保持稳定(图 7).

2.3 基板厚度的影响分析

对于铜丝导体的延伸率来说, 基板厚度对其的影响

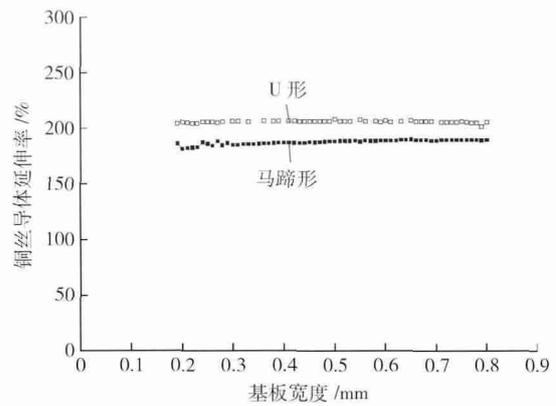


图 5 铜丝导体延伸率与基板宽度的关系

Fig. 5 Relationship between elongation rate of the copper conductor and the substrate width

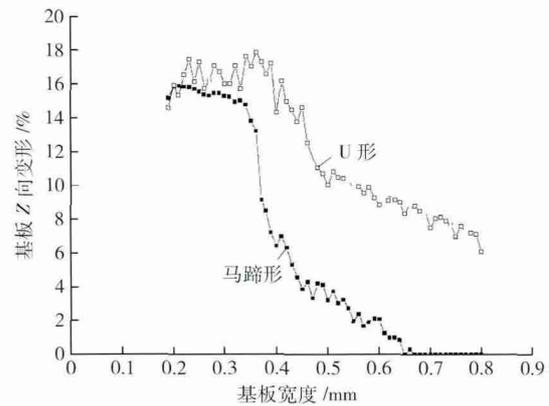


图 6 基板 Z 向变形与基板宽度的关系

Fig. 6 Relationship between the substrate deformation and the substrate width

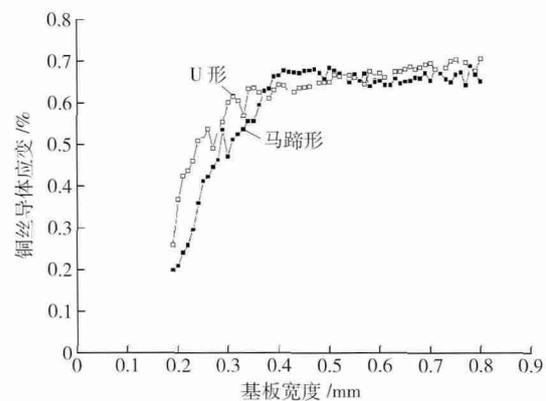


图 7 铜丝导体应变与基板宽度的关系

Fig. 7 Relationship between strain of the copper conductor and the substrate width

响与前两者无异. 如图 8 所示, 随着厚度的增加, 两种结构的铜丝导体的延伸率几乎不发生变化. 相对于基板的长度和宽度来说, 基板厚度对基板变形和铜丝导体应变的影响较为不同. 随着厚度的增加, 基板的 Z 向变形均是从一个很高的值迅速下降直到不产生变形

(图9). 而两者的铜丝导体应变的变化趋势比较相似且较复杂, 先是小幅度上升后稳定不变, 然后在某一值时跳跃到一个很高的值后继续保持不变(图10). 值得注意的是, 两者产生数值跳跃时的厚度与两者基板变形为零时的厚度相同, 其中的原因尚不清楚, 但是可以肯定的是这是一个临界值, 而且这个临界值对系统影响较大.

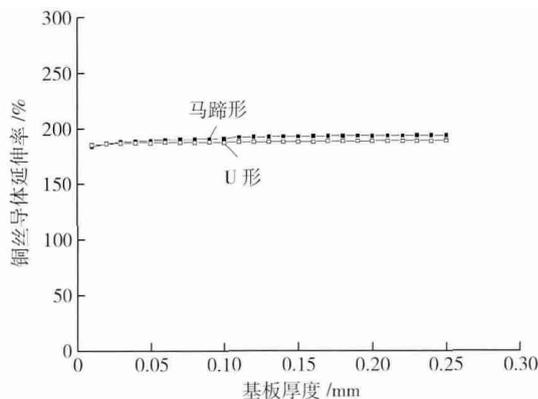


图8 铜丝导体延伸率与基板厚度的关系

Fig. 8 Relationship between elongation rate of the copper conductor and the substrate thickness

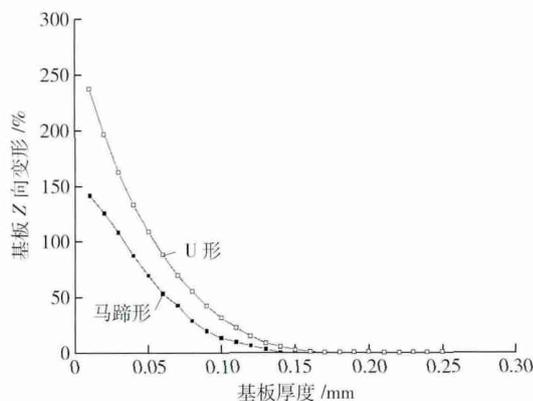


图9 基板Z向变形与基板厚度的关系

Fig. 9 Relationship between the substrate deformation and the substrate thickness

对于铜丝导体延伸率来说, 柔性基板的尺寸对其影响较小, 在柔性基板的尺寸的优化设计中可以作为次要考虑. 对于柔性基板的变形和铜丝导体应变来说, 两者都不宜过大(理论上越小越好, 但是无法实现), 因此柔性基板的尺寸设计要综合考虑, 以求最佳.

对于柔性电子系统来说, 直接受拉伸的是基板而不是金属导体, 基板与金属导体的相互作用成就了柔性电子系统的优良特性. 基板抑制了金属导体的变形, 但是基板因此产生了变形(可以说金属导体的一部分变形转移到了基板上), 基板变形过大可能会对整个系统产生不利影响, 实际中需要我们注意和考虑.

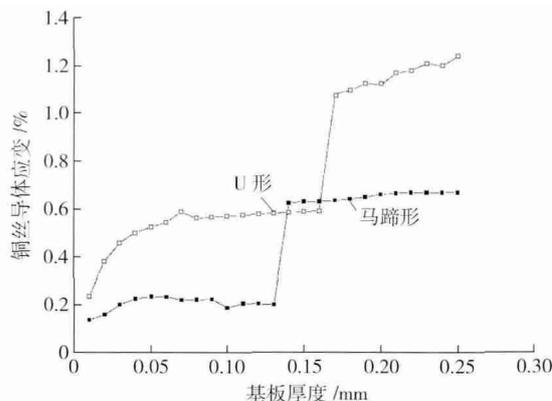


图10 铜丝导体应变与基板厚度的关系

Fig. 10 Relationship between strain of the copper conductor and the substrate thickness

需要注意的是, 本文中系统的总变形是固定不变的, 由柔性基板和铜丝导体一块分担, 对柔性基板尺寸的调整只是改变了两者的分担程度, 使得柔性基板和铜丝导体拥有一个较为合适的变形, 而不是减小了两者的变形.

本文对柔性电子系统中柔性基板的尺寸参数进行了研究, 并没有对产生的现象进行原因分析, 只是从优化设计的角度描述了柔性基板尺寸参数变化影响, 对以后的实验或产品设计起到借鉴作用.

3 结论

(1) 基板的长度对柔性电子系统的延展拉伸影响很小, 在精度要求不高的情况下, 可以不考虑.

(2) 基板的宽度对柔性电子系统延展拉伸影响较大. 在相同情况下, 宽度越大, 整个系统的变形越小, 甚至可能不产生变形, 但是金属导体的应变会随之增大, 需要注意.

(3) 系统延展拉伸时基板厚度存在上限临界值, 厚度不应超过临界值, 同时考虑到基板的变形情况, 基板的厚度也不应太小.

(4) 在铜丝导体结构不变的前提下, 合理的基板尺寸可以减小系统拉伸产生的变形.

参 考 文 献

[1] Rogers J A, Bao Z. Printed plastic electronics and paper-like displays. *J Polym Sci, Part A: Polym Chem*, 2002, 40(20): 3327

[2] Kim D H, Lu N, Ma R, et al. Epidermal electronics. *Science*, 2011, 333(6044): 838

[3] Kim D H, Lu N, Ghaffari R, et al. Materials for multifunctional balloon catheters with capabilities in cardiac electrophysiological mapping and ablation therapy. *Nat Mater*, 2011, 10(4): 316

[4] Xu W, Lu T J. Flexible electronics system and their mechanical properties. *Adv Mech*, 2008, 38(2): 137

(许巍, 卢天健. 柔性电子系统及其力学性能. 力学进展,

- 2008 ,38(2) : 137
- [5] Li T. *Deformation of Thin Films of Electronics Materials on Polymer Substrates* [Dissertation]. Cambridge: Harvard University , 2006
- [6] Gonzalez M , Axisa F , Bossuyt F , et al. Design and performance of metal conductors for stretchable electronic circuits. *Circuit World* ,2009 ,35(1) : 22
- [7] Gonzalez M , Axisa F , Bulcke M V , et al. Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits. *Microelectron Reliab* , 2008 ,48(6) : 825
- [8] Li T , Huang Z Y ,Suo Z , et al. Stretchability of thin metal films on elastomer substrates. *Appl Phys Lett* ,2004 ,85(16) : 3435
- [9] Lu N S , Wang X ,Suo Z G , et al. Metal films on polymer substrates stretched beyond 50%. *Appl Phys Lett* ,2007 ,91(22) : 221909
- [10] Lu N S ,Suo Z G , Vlassak J J. The effect of film thickness on the failure strain of polymer-supported metal films. *Acta Mater* , 2010 ,58(5) : 1679
- [11] Yeoh O H. Some forms of the strain energy function for rubber. *Rubber Chem Technol* ,1993 ,66(5) : 754
- [12] Yeoh O H. Characterization of elastic properties of carbon black filled rubber vulcanization. *Rubber Chem Technol* , 1990 , 63 (5) : 792
- [13] Pearson I , Pickering M. The determination of a highly elastic adhesive's material properties and their representation in finite element analysis. *Finite Elem Anal Des* ,2001 ,37(3) : 221