

柔性电子封装结构中夹杂对延展性的影响分析

李正伟 陶伟明

(浙江大学 310027 杭州)

摘要: 以岛-桥型柔性电子封装结构为研究对象, 从封装材料中夹杂的刚度、位置、封装方式三个方面探讨了夹杂对柔性电子结构延展性的影响。有限元分析结果表明: 随着夹杂刚度的增大, 桥的最大主应变增大, 整体结构最大延伸量可减小 30%; 夹杂埋藏位置越深, 桥顶局部的整体应变水平越大, 最大延伸量可减小 20%; 相对“硬”封装情形, 相同的夹杂对“软”封装中桥的最大延伸量的影响更严重。本文所得结论对于柔性电子器件结构的设计和材料选用具有参考和指导意义。

关键词: 柔性电子; 夹杂; 岛-桥结构; 最大延伸量; 封装形式

中图分类号: O346; O343 **文献标识码:** A

1 引 言

柔性电子以其独特的延展性及其高效、低成本的制造工艺, 在信息、能源、医疗、国防等领域具有广泛应用前景。目前将有可能在电子眼、电子报纸、电子皮肤^[1-3]等方面获得实际应用。

柔性电子的发展正受到越来越多学者们的关注, 其中文献[4]~[6]在此方面做出了大量而卓有成效的工作; 文献[7]通过比较各种面内互联方式的有限元计算结果, 提出了一种面内最优互联设计方案——“马蹄”形互联; 文献[8]提出了一种非共面电路布局(岛-桥结构)的方法使电路整体的最大延伸量得到大幅提高。对于岛-桥结构来说, 实际使用中需要填充和覆盖一层 PDMS 封装材料以起到保护作用, 它对结构的延展性有较大影响: 封装材料的模量较小时(软封装)对岛-桥结构的延展性影响较小; 模量较大时(硬封装)则对其影响较大^[8]。根据封装需要, 可通过将预聚物和固化剂按

照不同的比例进行混合制备得到不同模量值的 PDMS^[9]。在实际的封装过程中, 由于存在预聚物和固化剂的混合比例、混合效果、温度控制等人为因素, 可能会造成封装材料在某些局部区域不均匀、存在夹杂、孔洞等, 即某一局部区域的模量值与整体封装区域不同。这种不均匀性将可能影响封装结构整体的延展性。

为分析封装材料的不均匀性对柔性电子结构延展性的影响, 将结构简化为带夹杂的模型, 分析夹杂的模量、位置等因素的影响。首先按文献[8]中柔性电子封装结构的制造流程建立相应的有限元分析模型; 再在此基础上引入夹杂并分析夹杂的材料性质、几何性质、结构的封装方式三个方面对柔性电子整体结构延展性的影响。

2 有限元分析模型和分析过程

根据柔性电子封装结构的制造工艺流程^[8], 图 1 给出模型建立的整个过程示意图, 大致过程如下。

- 1) 计算出“桥”的屈曲模态。
- 2) 将“桥”部分粘结在一个具有初始预应变的PDMS基底上面，同时引入第一步中的屈曲模态作为几何初始缺陷，释放基底预应变使金属“桥”产生屈曲。
- 3) 在有限元模型中添加新单元模拟屈曲金属“桥”下面填充以及上面覆盖的封装材料，从而形成完整的封装结构有限元模型。
- 4) 导入第二步中“桥”和基底的应力作为封装结构的初始应力，然后在封装模型上面施加一定的位移载荷 ϵ_{appl} 。

采用 ABAQUS 软件对封装结构进行有限元分析。

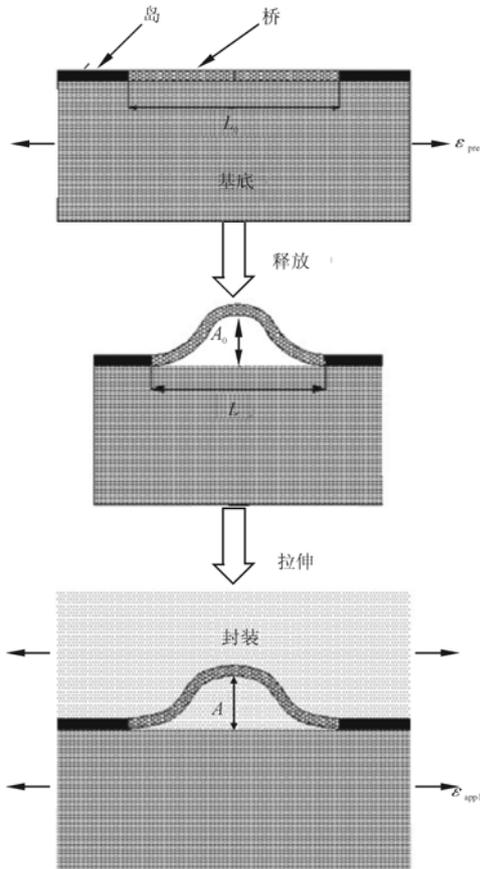


图1 仿真过程示意图

图2给出了夹杂封装模型图。为方便讨论，将夹杂区域看作是圆形区域且位于桥下方某一区域。桥的材料为铜，其厚度为100nm；弹性模量 $E=119\text{GPa}$ ；泊松比 $\mu=0.326$ 。桥的初始长度 $L_0=0.4\text{mm}$ ，粘结在预应变 $\epsilon_{pre}\approx 30\%$ 的基底上。发生屈曲后长度变为 $L=0.3\text{mm}$ ，高度 A_0 约为0.12mm，这与文献[10]的结果（约为0.122mm）基本一致。基底PDMS的弹性模量 $E=1.8\text{MPa}$ ；泊松比 $\mu=0.48$ ；基本尺寸 $L_{sub}=0.6\text{mm}$ 、 $H_{sub}=0.5\text{mm}$ 。封装材料厚度 $H_{enc}=0.5\text{mm}$ ；弹性模量值用 E_{enc} 表示；夹杂区域的

大小用直径 D 表示；弹性模量值用 E_{inc} 表示；掩埋位置用中心到桥顶的距离 H 表示。对“岛”进行刚性假设，取较大刚度。这里本文使用平面应变模型，采用平面四节点单元进行网格划分。

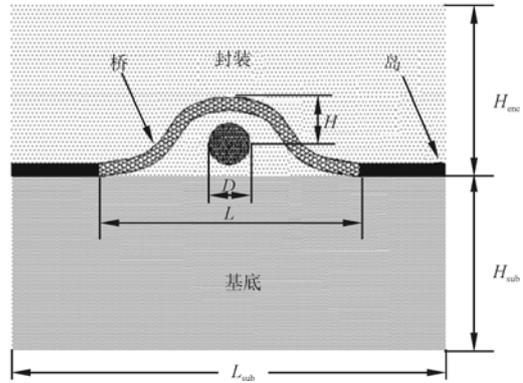


图2 夹杂封装模型

3 结果与讨论

3.1 夹杂刚度对岛-桥结构延展性的影响

图3分别给出了桥延伸量 ϵ_{appl} 为10%、15%、20%三种情况时桥的最大主应变随夹杂模量的变化关系图，其中 ϵ_{inc}/ϵ 表示有、无夹杂情形时桥的最大主应变比值。从图中可以得知：当延伸量一定时，随着夹杂模量值的变大，桥最大主应变随之变大；同时对于确定的夹杂材料，随着拉伸量的增大，桥最大主应变比值则略有减弱。

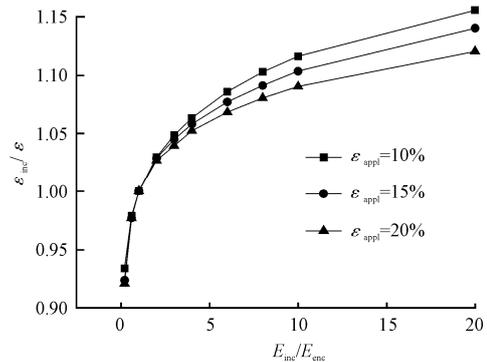


图3 桥的最大应变随夹杂弹性模量变化关系

图4中桥初始高度 $A_0=0.12\text{mm}$ (下同)，分别给出了夹杂区域大小比值 D/A_0 为0、0.33、0.50、0.67、0.83时，桥的最大主应变历程。本例中夹杂的位置 $H=0.08\text{mm}$ ，夹杂弹性模量 $E_{inc}=10\text{MPa}$ 。图中 ϵ_c 表示桥发生断裂时的最大主应变， δ_{max} 表示没有夹杂时桥的最大延伸量（下同）。从图中可以看出：夹杂区域大小比值 $D/A_0=0.83$ 时桥的最大主应变在整个延伸过程当中相对于其它几种情形始终最大，桥的

最大延伸量约为“没有夹杂”情形时的 70%。通过分析可以得出以下结论: 在夹杂位置不变的情形下, 夹杂区域越大, 桥的最大延伸量就越小。

上述结果表明: 随着夹杂刚度的增大, 桥的最大主应变增强, 最大延伸量减小。

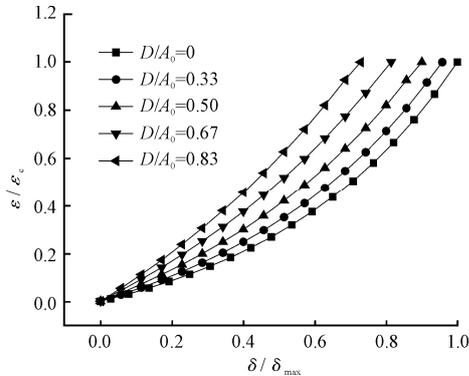


图4 不同夹杂区域大小情况下桥最大主应变历程

据 Mori-Tanaka 等效模量法可对以上结论进行定性分析: 随着夹杂材料模量值的增大或者本身区域的增大(夹杂的弹性模量值始终比封装材料模量值大), 桥下方封装区域的等效模量值随之变大。由文献[10]的实验和分析结果可知, 桥的最大延伸量随封装材料弹性模量的增大而下降。所以, 当延伸量一定时, 随着夹杂模量值的变大, 桥的最大主应变随之增大; 夹杂区域越大, 桥的最大延伸量就越小。

3.2 夹杂位置对岛-桥结构延展性的影响

图 5 给出了在桥延伸量约为 15%时桥顶局部区域的应变分布图, 其中 ϵ_{\max} 表示没有夹杂时桥的最大主应变。本例中 $E_{\text{enc}}=0.5\text{MPa}$, $E_{\text{inc}}=10\text{MPa}$, 夹杂区域大小 $D=0.08\text{mm}$ 。图中分别给出了夹杂位置相对比值 H/A_0 为 0.33、0.50、0.67 以及“没有夹杂”四种情形下桥顶局部区域应变分布图。从图中可以看出: 随着夹杂位置的增大, 桥顶局部区域的整体应变水平则会增强; 同时, 每种情况均在桥顶位置应变达到最大。图 6 表示不同夹杂位置情况下桥的最大主应变历程。通过该图可以发现 $H/A_0=0.67$ 时相对于其它三种情形桥的最大主应变在整个的延伸过程中始终最大。该情形下的金属桥也最先发生断裂, 最大延伸量约为“没有夹杂”情况时的 80%。通过图 5 与图 6 可以得出以下结论: 对于大小相同、模量相等的夹杂, 距“桥顶”位置越远, 桥顶局部区域的整体应变水平越高, 桥的最大延伸量也越低。

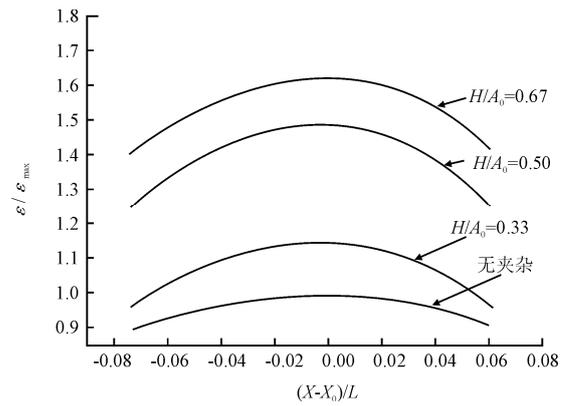


图5 桥顶局部区域应变分布

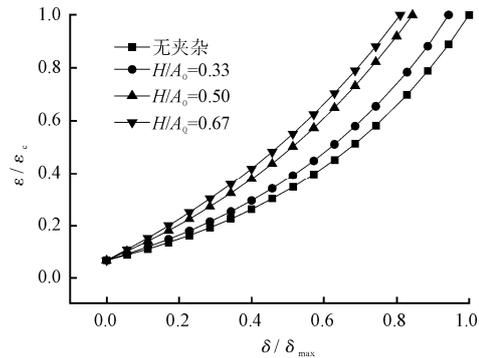


图6 不同夹杂位置情况下桥最大主应变历程

事实上, 由于夹杂和封装材料的弹性模量远远小于桥的模量(相差5个数量级), 所以夹杂所引起的应力集中对岛-桥结构延展性所造成的影响几乎可以忽略。相反, 对岛-桥结构延展性的影响主要是由于夹杂的存在阻碍了桥的自然延伸, 从而使得桥的整体应力、应变水平提高, 最大延伸量降低。本模型中的夹杂可以看作是存在软封装材料中的“硬块”; 掩埋深度越浅, 在整体结构的延伸过程中反而更容易“游动”, 相对而言, 对桥延伸的阻碍程度也越小。

3.3 软、硬封装下夹杂的影响

图 7 给出了夹杂导致桥的最大主应变增加幅度随封装材料模量值的变化曲线。其中纵坐标 $(\epsilon_{\text{inc}} - \epsilon) / \epsilon$ 表示桥的最大主应变增加幅度; 夹杂区域大小 $D=0.05\text{mm}$; $H=0.04\text{mm}$; 弹性模量值 $E_{\text{inc}}=4\text{MPa}$; 桥延伸量 ϵ_{appl} 约为 15.0%。图中封装材料模量值 E_{enc} 分别为 0.1、0.3、0.5、0.8、1.0、1.5、2 (量纲均为 MPa)。从图中可以得知: 当封装材料模量值 $E_{\text{enc}}=0.1\text{MPa}$ 时, 该夹杂使得桥的最大主应变上升约 30%; 而在 E_{enc} 值为 2MPa 时该夹杂对桥的最大主应变的影响几乎可以忽略。从图中可以明显地得出如下结论: 对于同一夹杂, 封装材料的模量值越小, 桥的最大主应变偏差程度越大, 即相同夹杂对于“软”封装情况下桥

结构的应变影响程度较“硬”封装情况时要大。

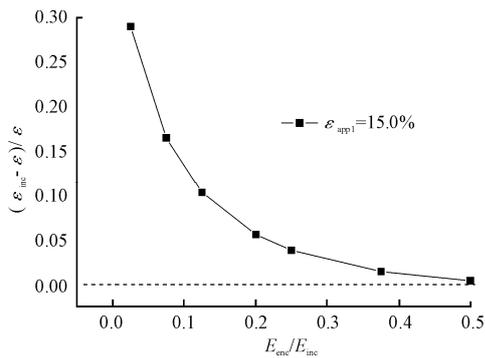


图7 桥最大主应变增加幅度随封装材料模量值的变化关系

图8与图9分别给出了两种典型封装形式下,即 $E_{enc}=0.5\text{MPa}$ 与 1.5MPa 时桥的最大主应变历程。本例中夹杂区域大小 $D=0.08\text{mm}$; $H=0.06\text{mm}$; $E_{inc}=10\text{MPa}$ 。在 $E_{enc}=0.5\text{MPa}$ 的情况下该夹杂导致桥的最大延伸量约为“没有夹杂”情况时的85%;在 $E_{enc}=1.5\text{MPa}$ 的情况下相同夹杂导致桥的最大延伸量约为“没有夹杂”情况时的90%。通过两图可以得出以下结论:相对于“硬”封装情形,相同夹杂对“软”封装形式中连接桥的最大延伸量削弱程度更加严重。

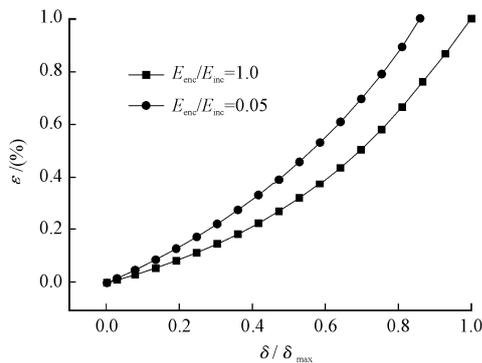


图8 “软”封装情形下桥最大主应变历程

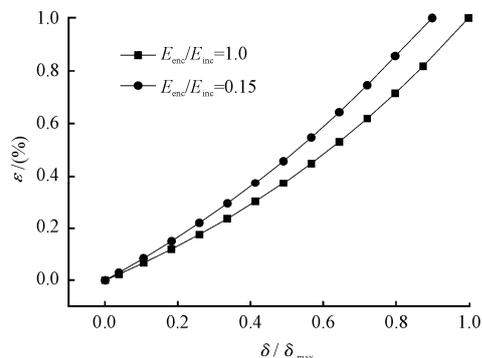


图9 “硬”封装情形下桥最大主应变历程

同样根据 Mori-Tanaka 方法很容易解释上述结论,相同夹杂在硬封装情形下所引起封装材料等效模量值的增加幅度较软封装情形时要小。所以相对“硬”封装情形,相同的夹杂对“软”封装中桥的最大

延伸量削弱得更加严重。

4 结论

本文研究对象为岛-桥型柔性电子封装结构,通过建立合理有效的有限元模型,从夹杂刚度、夹杂位置、封装方式三个方面探讨夹杂对岛-桥结构延展性的影响。有限元分析表明以下几点。

- 1) 随着夹杂刚度的增大,桥的最大主应变增大,整体结构最大延伸量可减小30%。
- 2) 夹杂埋藏位置越深,桥顶局部的整体应变水平越大,最大延伸量可减小20%。
- 3) 相对“硬”封装情形,相同夹杂对“软”封装中桥的最大延伸量的影响更严重。

文中对这些现象和结论均做出了理论解释,但仍需要通过实验进行证实。

参考文献

- [1] Ko H, Stoykovich M, Song J, et al. A hemispherical electronic eye camera based on compressible silicon optoelectronics[J]. Nature, 2008, 454(7205): 748-753.
- [2] Forrest S R. The path to ubiquitous and low-cost organic electronic appliances on plastic[J]. Nature, 2004, 428(6986): 911-918.
- [3] Lumelsky V J, Shur M S, Wagner S. Sensitive skin[J]. IEEE Sensors Journal, 2001, 1(1): 41-51.
- [4] Meitl M, Zhu Z, Kumar V, et al. Transfer printing by kinetic control of adhesion to an elastomeric stamp[J]. Nature Materials, 2006, 5(1): 33-38.
- [5] Choi W, Song J, Khang D Y, et al. Biaxially stretchable 'wavy' silicon nanomembranes[J]. Nano Letters, 2007, 7(6): 1655-1663.
- [6] Jiang H, Khang D Y, Song J, et al. Finite deformation mechanics in buckled thin films on compliant supports[J]. PNAS, 2007, 104(40): 15607-15612.
- [7] Gonzalez M, Hsu Y, Vandeveld B, et al. Design and performance of metal conductors for stretchable electronic circuits[J]. Circuit World, 2009, 35(1): 22-29.
- [8] Kim D, Song J, Choi W, et al. Materials and noncoplanar mesh designs for integrated circuits with linear elastic responses to extreme mechanical deformations[J]. PNAS, 2008, 105(48): 18675-18680.
- [9] Brown X Q, Ookawa K, Wong J Y. Evaluation of polydimethylsiloxane scaffolds with physiologically relevant elastic moduli: interplay of substrate mechanics and surface chemistry effects on vascular smooth muscle cell response[J]. Biomaterials, 2005, 26(16): 3123-3129.
- [10] Kim D, Liu Z, Kim Y, et al. Optimized structural designs for stretchable silicon integrated circuits[J]. Small, 2009, 5(24): 2841-2847.