

文章编号:1007-2780(2018)05-0427-06

OLED 金属走线弯折过程裂纹扩展有限元分析

张 博¹, 廖敦明^{1*}, 刘正周¹, 滕子浩¹, 吴 棣¹, 陈继峯², 林书如²

(1. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉华星光电半导体显示技术有限公司, 湖北 武汉 430078)

摘要:针对 OLED 面板 COF(Chip on Film)连接过渡区在弯折过程中易发生金属走线断裂的问题,本文对金属走线中裂纹的扩展机理以及抑制裂纹扩展的方法进行了研究。基于复合材料界面裂纹偏转与穿透理论分析了金属走线与有机光阻界面处的裂纹扩展方式,比较了两种金属走线结构在裂纹扩展过程中的应力强度因子变化。仿真结果表明,金属走线与有机光阻的裂纹倾向于沿垂直走线的方向扩展,裂纹沿着界面扩展的趋势很小。对比两种不同金属走线(环状与条状)的应力强度因子发现,环状金属走线内部靠近孔处的应力强度因子降低了 95%,能有效抑制金属走线中的裂纹扩展。

关键词:金属走线;裂纹扩展;能量释放率;应力强度因子

中图分类号:O346.1;TN873 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183305.0427

Finite element analysis of crack growth of metal line in bending process of OLED panel

ZHANG Bo¹, LIAO Dun-ming^{1*}, LIU Zheng-zhou¹, TENG Zi-hao¹,WU Di¹, CHEN Ji-feng², LIN Shu-ru²

(1. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan China Star Optoelectronics Technology Co., Ltd, Wuhan 430078, China)

Abstract: Aiming at the problem that the metal lines breakage easily occurs during the bending process of COF connection transition zone in the OLED panel, the mechanism of crack propagation and the way to inhibit the crack propagation in the metal line are studied. Based on the theory of interface crack deflection and penetration, the mode of crack growth at the interface between metal line and organic photoresist is analyzed. The change of stress intensity factor of the two metal line during crack growth is compared. The simulation results show that the main path of crack propagation in the pad bending area is perpendicular to the metal lines. The tendency of propagation along the interface between the metal traces and the organic photoresist is very small. Through the calculation of stress

收稿日期:2018-01-28; **修订日期:**2018-03-05.

基金项目:教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-13-0229); 国家杰出青年基金(No. NSFC51725504)

Supported by the Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-13-0229); National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. NSFC51725504)

* 通信联系人, E-mail: liaodunming@hust.edu.cn

intensity factor of the two structures, it can be found that the stress intensity factor near the inner hole of the annular metal line is reduced by 95% with respect to that of striped metal line. Thus the hole of the annular metal line effectively suppresses crack propagation.

Key words: metal line; crack growth; energy release rate; stress intensity factor

1 引言

随着显示技术的发展,具有轻薄、柔性、低能耗、高解析度、响应速度快等优异性能的 OLED (Organic Light-Emitting Diode) 成为了新一代显示面板^[1-4]。在未来几年内,屏占比更高的全面屏必将是高端手机的标配^[5]。模组结构以及面板设计是提高屏占比的主要手段。提高屏占比的主要方式是将面板 COF 的连接区域向后弯折,但弯折过程中,易发生金属走线断裂的问题,影响屏幕的显示效果。因此,合理的面板边框金属走线形状以及排布方式设计,可以在一定程度上降低产生裂纹的可能性,进而提高良品率。

目前,显示面板中金属走线的研究主要集中在柔性基底上沉积的金属走线和机械性能的测试。刘艳玲等人^[6]通过弯折实验以及有限元仿真,对附着在柔性衬底材料上连接 TFT (Thin Film Transistor) 的金属导线进行了力学可靠性研究。研究表明,金属导线的力学可靠性与金属导线的尺寸、形状密切相关。邓亮等人^[7]分析了柔性 AMOLED 中不同柔性衬底材料和金属走线的可靠性以及弯曲过程中电性的可靠性;对隔层材料和 TFT 器件在聚酰亚胺材料 (PI) 基底上的制作工艺进行了一定的研究。Kim B J 等人^[8]采用弯折与刮伤等测试方式分析了等离子处理对金属走线的机械性能的影响。结果表明,等离子处理可以提高金属走线的粘附性,进而提高金属走线的弯折性能。此外, Kim B J 等人^[9]还通过机械弯折实验对沉积在不同表面的金属走线的机械性能进行了分析,发现金属走线沉积在有沟壕的 PI 表面时比沉积在平面时具有更高的粘附性,相应地,金属走线的弯折性能也有提升。但是,目前通过仿真手段对金属走线中裂纹的扩展方式和金属走线结构对裂纹扩展影响的系统研究甚少。通过实验方法来优化金属走线,设计过程繁琐,产品的开发周期长,效率低下。基于此,本文通过数值模拟的方式,对金属走线中裂纹的扩

展方式以及抑制裂纹扩展的方法进行了研究,并为金属走线的排布方式和形状设计等问题提供了优化建议。

2 理论与方法

2.1 裂纹偏转和穿透的有限元建模

在分析金属走线和有机光阻中裂纹的具体扩展形式时,必须考虑裂纹在两相材料界面中的扩展路径。金属裂纹在两相材料界面中的可能扩展形式如图 1 所示。 a_p 和 a_d 分别表示裂纹沿界面和垂直于界面的扩展长度。

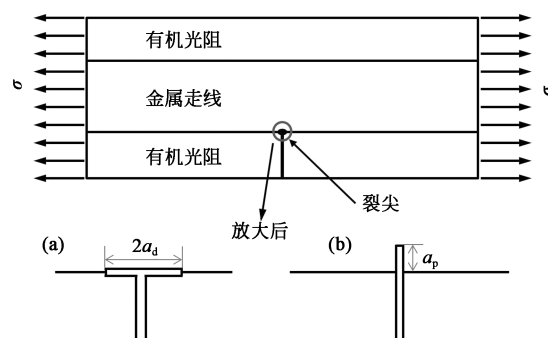


图 1 金属走线与有机光阻两相材料界面的裂纹偏转与穿透示意图。(a) 裂纹偏转; (b) 裂纹穿透。

Fig.1 Schematic of crack deflection and penetration at the metal line and UHA interfaces. (a) Deflection and (b) penetration.

在裂纹扩展前端,其应力状态为简单的张开型裂纹的应力形式,则裂纹尖端的应力强度因子为

$$K_I = c(\alpha, \beta) k_I a^{1/2-\lambda}, \quad (1)$$

式中: k_I 是与施加载荷有关的系数; $c(\alpha, \beta)$ 为 Dundurs 参数 α, β 的函数。 λ 是关于 Dundurs 参数 α, β 的函数,其具体形式^[10]如下:

$$\cos \lambda \pi = \frac{2(\beta - \alpha)}{1 + \beta} (1 - \lambda)^2 + \frac{\alpha + \beta^2}{1 - \beta^2}, \quad (2)$$

裂纹穿过程程中的能量释放率为:

$$G_p = \frac{1 - \nu_1}{2\mu_1} K_I^2 = \frac{1 - \nu_1}{2\mu_1} c^2 k_I^2 a^{1-2\lambda}. \quad (3)$$

在任一偏转裂缝右侧尖端的前沿界面,其牵引力满足如下公式^[11]:

$$\sigma_{yy}(x,0) + i\sigma_{xy}(x,0) = (K_1 + iK_2)(2\pi r)^{-1/2} r^{i\xi}, \quad (4)$$

式中: $r = x - a$, $\xi = \frac{1}{2\pi} \ln\left(\frac{1-\beta}{1+\beta}\right)$, $i = \sqrt{-1}$ 。

在裂纹偏转的结构中,应力强度因子满足:

$$K_1 + iK_2 = k_1 a^{1/2-\lambda} [d(\alpha, \beta) a^{i\epsilon} + e(\alpha, \beta) a^{-i\epsilon}], \quad (5)$$

式中: d 和 e 是关于 Dundurs 参数 α, β 的函数,则裂纹偏转的能量释放率为:

$$G_d = [(1-\nu_1)/\mu_1 + (1-\nu_2)/\mu_2] (K_1^2 + K_2^2) / (4\cosh^2 \pi\epsilon), \quad (6)$$

由式(5)可知:

$$K_1^2 + K_2^2 = k_1^2 a^{1-2\lambda} [|d|^2 + |e|^2 + 2R_\epsilon(de)], \quad (7)$$

$$G_d/G_p = [(1-\beta^2)/(1-\alpha)] [|d|^2 + |e|^2 + 2R_\epsilon(de)] / c^2, \quad (8)$$

从式(6)和(7)可以发现,当 $\alpha > 0.7$ 时,由于 λ 与 0.5 的差距较小,因此能量释放率 G_d 对 a 的依赖性很小。从式(8)可以发现 G_d/G_p 的值与 a 值完全无关,只与材料以及结构参数有关。因此裂纹在复合材料界面的具体扩展方式可以通过 G_d/G_p 的值来进行预估^[12]。

2.2 虚拟节点闭合技术(VCCT)计算能量释放率

界面结构有限元模型的裂纹扩展过程示意图如图2所示,裂纹在扩展四个单元长度的过程中,裂尖依次经过节点 d, c 和 b ,从节点 e 扩展到节点 a 。节点 b, c, d 在扩展过程中分开为节点 b_1 和 b_2, c_1 和 c_2 以及 d_1 和 d_2 。扩展过程中,在 x 和 y 方向的相对位移分别为 Δx 和 Δy 。在 VCCT 中,裂纹扩展后节点对的相对位移一般由裂纹扩展前距离最近的节点对之间的相对位移所代替,例如,节点 e_1 和 e_2 的相对位移可以完全由节点 f_1 和 f_2 的相对位移代替。若裂纹扩展之前的节点力为 F_x 和 F_y ,则当裂纹长度增加 Δa 时,总的能量释放率的离散形式为^[13]

$$G = \frac{1}{\Delta a} \sum_{n=a,b,c,d} [F_{nx} \Delta x_n + F_{ny} \Delta y_n]. \quad (10)$$

2.3 应力强度因子理论

在断裂力学中,裂纹的形式主要分为3种:张

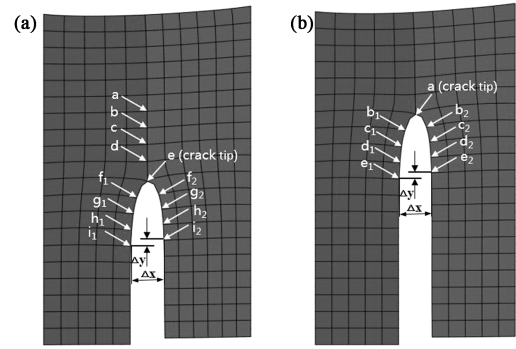


图2 基于有限元分析的 VCCT 示意图

Fig.2 Schematic representation of VCCT based on the finite element analysis

开型、滑开型、撕开型。这3种类型的裂纹在裂纹尖端区域的应力场的公式为^[14]

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\alpha), \quad (11)$$

式中: σ_{ij} 为应力分量, $(i, j = 1, 2, 3)$; $f_{ij}(\alpha)$ 为极角 α 的函数。从式(11)可知应力与参数 K 成正比。在同一变形状态下,若 K 值相同,则裂纹尖端邻域的应力场强度相同。所以, K 是反映裂纹尖端邻域应力场强度的参数,即应力强度因子。

3 结果与讨论

3.1 有限元模型

本文分析了两种不同金属走线的裂纹扩展情况,其具体结构如图3所示。其中,分别选取了环形金属走线的 a, b, c 处和条状金属走线的 d 处(如图3所示),计算其相对能量释放率。金属走线和有机光阻界面的相对能量释放率以及应力强度因子计算的有限元网格模型如图4所示。

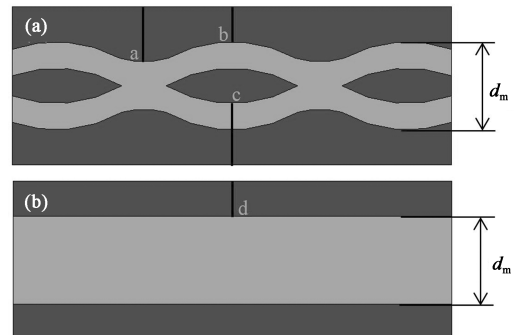


图3 金属走线结构示意图。(a) 环形; (b) 条状。

Fig.3 Metal line model. (a) Annular; (b) Strip.

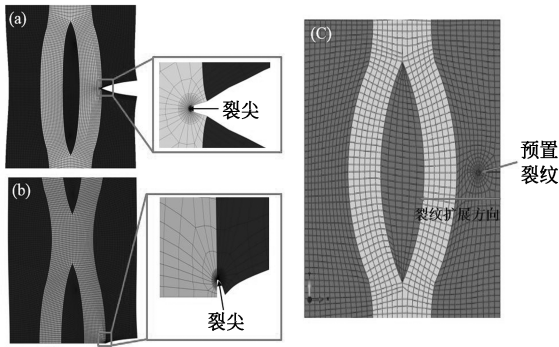


图 4 金属走线和有机光阻界面的相对能量释放率以及应力强度因子计算的有限元网格模型。(a) 裂纹穿透能量释放率;(b) 裂纹偏转能量释放率;(c) 裂纹扩展应力强度因子。

Fig.4 Finite element mesh for calculating energy release rate and stress intensity factor. (a) Crack penetration energy release rate; (b) crack deflection energy release rate, respectively; (c) Crack growth stress intensity factor.

3.2 裂纹相对能量释放率的计算结果分析

通过分析裂纹在界面的相对能量释放率的变化,可以确定裂尖在有机光阻和金属走线界面的具体扩散路径。图 3 所示的金属走线与有机光阻界面 a、b、c、d 处的相对能量释放率变化如图 5 所示。结果表明,随着裂纹长度的增加,a、b、d 三个位置的相对能量释放率 G_d/G_p 均大幅下降。例如,对于宽度为 $10\ \mu\text{m}$ 的条状金属走线,当裂纹长度 a_p 由 $0.1\ \mu\text{m}$ 增加到 $1\ \mu\text{m}$ 时,相对能量释放率 G_d/G_p 降幅达到 86.5%。这说明 a、b、d 三个位置的裂纹沿界面扩展的趋势随着裂纹长度的增加而减小,从而可以认为,当裂尖前端为金属走线时,裂纹会沿着金属走线横向扩展。对于环形金属的 c 位置,当裂纹长度增加时,裂纹沿界面扩展的趋势没有明显变化,其主要原因是裂尖前端的材质为有机光阻,而裂纹在有机材质中不易扩展。从而说明金属走线内部的孔可以抑制裂纹扩展。从不同宽度金属走线的计算结果可以发现,在 a、b、d 三个位置,当裂纹长度增加时,金属走线宽度

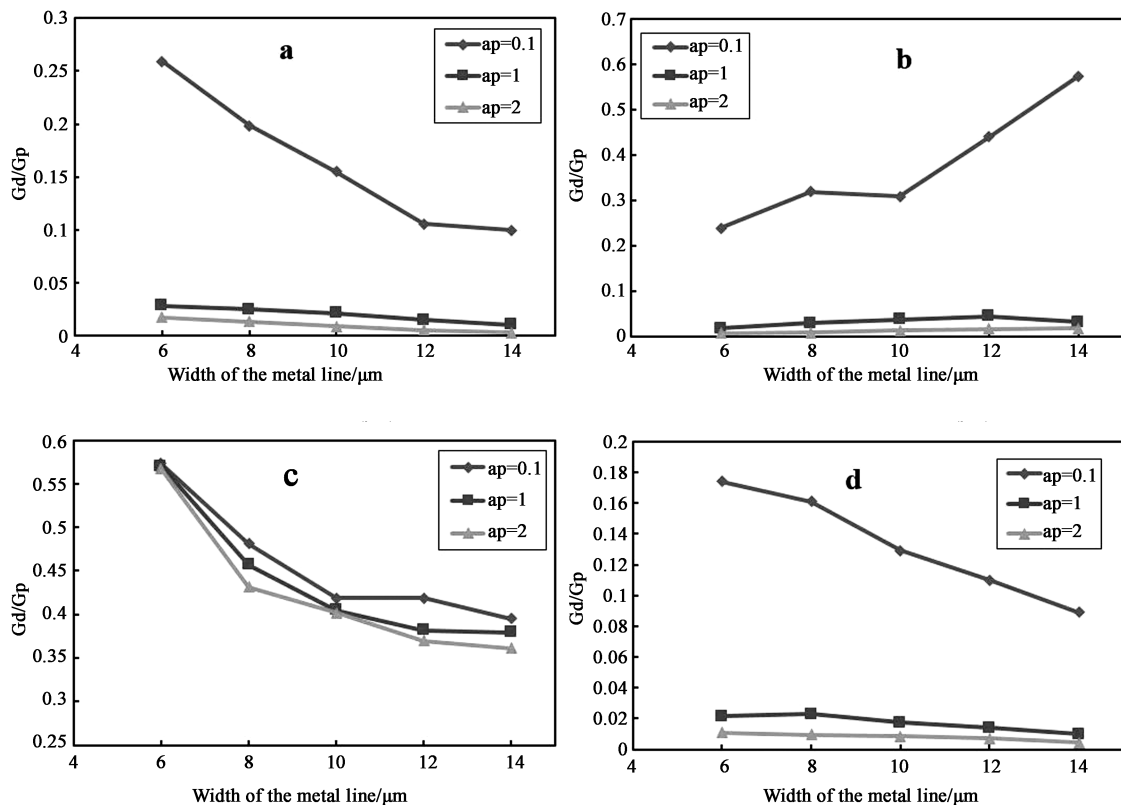


图 5 金属走线界面的相对能量释放率

Fig.5 Relative energy release rate at the metal line interface

对相对能量释放率的影响几乎可以忽略。因此,金属走线中的裂纹主要沿着垂直于走线的方向扩展。

3.2 应力强度因子计算结果分析

通过对裂纹相对能量释放率的计算,可以确定裂纹在金属走线中的扩展路径。为研究金属走线结构对裂纹扩展倾向的影响,分别计算了不同裂纹长度下两种结构的应力强度因子,其结果如图6所示。从图中可以发现环形金属走线结构在不同长度裂纹中的应力强度因子都比条状金属走

线结构小。因此,环形金属走线中裂纹的扩展倾向小于条状金属走线。从环形金属节点(图3中a所在位置)以及环中心(图3中b所在位置)的金属走线应力强度因子的计算结果可以发现,在金属走线靠近有机光阻材质孔位置的应力强度因子值有较明显的减小。因此,金属走线中的开孔可以对裂纹扩展起到一定的抑制作用。

4 结 论

本文针对 OLED 面板 COF 连接区域弯折过程中金属走线易断裂的问题,计算分析了金属走线与有机光阻界面的相对能量释放率,从而确定了金属走线以及有机光阻中裂纹的扩展方式,此外,计算分析了裂纹在垂直于金属走线扩展的应力强度因子的变化。结果表明,在过渡区弯折过程中,裂纹在金属走线中主要沿垂直于走线的方向扩展。而应力强度因子的计算结果表明,环状金属走线孔附近应力强度因子相对于条状金属走线减幅达到 95%,表明金属走线中的孔可以抑制裂纹的扩展,这可为 OLED 面板 COF 连接过渡区的金属走线的设计提供指导。

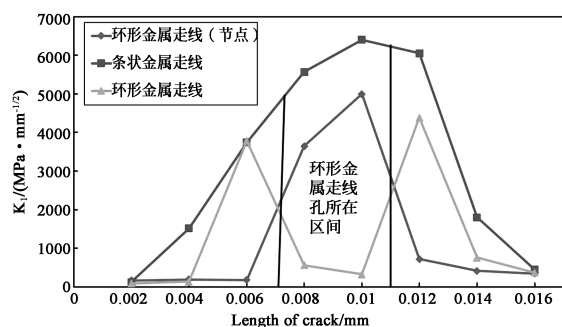


图6 两种不同金属走线裂纹扩展的应力强度因子比较

Fig. 6 Comparison of stress intensity factors of crack propagation between two different metal line

参 考 文 献:

- [1] 马东阁.OLED显示与照明——从基础研究到未来的应用[J].液晶与显示,2016,31(3):229-241.
MA D G. OLED display and lighting—from basic research to future applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3): 229-241. (in Chinese)
- [2] 王琦,马东阁.白光有机发光二极管的制备方法[J].液晶与显示,2009,24(5):617-629.
WANG Q, MA D G. Fabrication methods of white organic light-emitting diodes [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2009, 24(5): 617-629. (in Chinese)
- [3] KANG M S, JOO M K, LEE J H, *et al.* 66.1: Invited Paper: performance of a large - size white OLED for lighting application [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2011, 42(1): 972-974.
- [4] 刘晋红,张方辉.OLED薄膜干燥剂的制备及其对OLED的影响[J].发光学报,2017,38(1):76-84.
LIU J H, ZHANG F H. Preparation of OLED desiccant film and the impact for OLED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(1): 76-84. (in Chinese)
- [5] 杨永强,段羽,陈平,等.低温原子层沉积氧化铝作为有机电致发光器件的封装薄膜[J].发光学报,2014,35(9):1087-1092.
YANG Y Q, DUAN Y, CHEN P, *et al.* Deposition of Al_2O_3 film using atomic layer deposition method at low temperature as encapsulation layer for OLEDs [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(9): 1087-1092. (in Chinese)
- [6] 刘艳玲,胡坤,党鹏乐,等.柔性显示器件机械试验方法研究[J].信息技术与标准化,2017(6):21-24.
LIU Y L, HU K, DANG P L, *et al.* Study on mechanical test method used for flexible display device [J]. *Information Technology & Standardization*, 2017(6): 21-24. (in Chinese)
- [7] 邓亮.柔性 AMOLED 背板开发的关键问题研究[D].苏州:苏州大学,2015.

- DENG L. Study on the key technology of flexible AMOLED backplane [D]. Suzhou: Soochow University, 2015. (in Chinese)
- [8] KIM B J, OH S G, LEE Y J, *et al.* Enhancement of the endurance against mechanical deformation of metal lines on flexible polyimide substrate [J]. *Science of Advanced Materials*, 2016, 8(4): 830-833.
- [9] KIM B J, OH S G, LEE Y J, *et al.* Mechanical properties of metal lines formed on trench polyimide film substrate [J]. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2014, 9(4): 541-545.
- [10] ZAK A R, WILLIAMS M L. Crack point stress singularities at a Bi-material interface [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1963, 30(1): 142-143.
- [11] RICE J R. Elastic fracture mechanics concepts for Interfacial cracks [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1988, 55(1): 98-103.
- [12] HE M Y, EVANS A G, HUTCHINSON J W. Crack deflection at an interface between dissimilar elastic materials: role of residual stresses [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 1994, 31(24): 3443-3455.
- [13] JOKINEN J, WALLIN M, SAARELA O. Applicability of VCCT in mode I loading of yielding adhesively bonded joints—a case study [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015, 62: 85-91.
- [14] SOUIYAH M, ALSHOAIBI A, MUCHTAR A, *et al.* Two-dimensional finite element method for stress intensity factor using adaptive mesh strategy [J]. *Acta Mechanica*, 2009, 204(1/2): 99-108.

作者简介:张博(1995—),男,甘肃定西人,硕士研究生,主要从事扩展有限元裂纹仿真分析方面的研究。E-mail: zhangbo95@hust.edu.cn

廖敦明(1973—),男,湖南隆回人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为材料成形数字化。E-mail: liaodunming@hust.edu.cn