

文章编号 1004-924X(2025)23-3639-10

采用 DIC 技术的液晶显示模组力学模型验证

方晶晶¹, 余卿^{1*}, 江昊¹, 郑伟峰², 颜华生³, 邹松³, 郭单余³

- (1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;
2. 厦门市计量检定测试院, 福建 厦门 361004;
3. 厦门天马微电子有限公司, 福建 厦门 361101)

摘要:针对液晶显示模组力学研究中忽视真实结构导致的模拟偏差,以及传统通用材料试验机仅能获取整体载荷信息,难以直接验证复杂位移场分布的问题,建立了包含完整结构细节的三维有限元模型。通过精细的几何建模(保留关键结构特征)、优化的网格划分策略(平衡计算效率与精度需求)以及基于实测/可靠来源的材料参数设定构建模型。模型仿真深入揭示了液晶显示模组在静压及挤压弯曲载荷下的全场位移分布特征与局部响应规律,并借助数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术构建了系统的全场位移验证框架。实验结果表明,在单点静压测试中,受压区域位移场的数值模拟与 DIC 测量的相对误差均小于 10%,进一步对 7 个特征点的静压行为进行对比,其误差进一步降低至 5% 以内。深入分析揭示了边界约束条件与局部结构刚度是影响模型预测精度的关键因素,而这些因素直接关联到液晶显示模组在实际应用中易出现的漏光、压痕等光学缺陷的力学根源。本文所构建的有限元模型在预测核心受压区域行为和面内响应方面具有较高精度,该模型及其验证过程可为后续液晶显示模组结构优化与可靠性设计提供可靠的理论依据与技术支持,也为从力学角度理解和预防光学显示缺陷奠定了基础。

关键词:液晶显示模组;数字图像相关;全场位移;有限元仿真

中图分类号:TH741 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20253323.3639

CSTR:32169.14.OPE.20253323.3639

Verification of mechanical model of LCD modules using DIC technology

FANG Jingjing¹, YU Qing^{1*}, JIANG Hao¹, ZHENG Weifeng²,
YAN Huasheng³, ZOU Song³, GUO Danyu³

- (1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Xiamen Institute of Measurement and Testing, Xiamen 361004, China;
3. Tianma Microelectronics Co., Ltd., Xiamen 361101, China)

* Corresponding author, E-mail: yuqing@hqu.edu.cn

Abstract: To address the simulation errors arising from the omission of actual structural details in mechanical studies of LCD modules, as well as the limitations of conventional universal testing machines that provide only global load information and cannot directly validate complex displacement field distributions, a

收稿日期:2025-07-07; **修订日期:**2025-08-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52075190, No. 52211530491);福建省科技计划资助项目(No. 2023I0017);国家市场监督管理总局科技计划资助项目(No. 2023MK136)

three-dimensional finite element model incorporating complete structural features is established. The model is developed through precise geometric modeling that preserves key structural characteristics, an optimized mesh partitioning strategy that balances computational efficiency and accuracy, and material parameter definitions derived from experimental measurements and reliable data sources. Based on this model, the full-field displacement distribution and local response characteristics of LCD modules under static indentation and compression – bending loads are systematically investigated. Furthermore, a comprehensive full-field displacement verification framework is constructed using three-dimensional digital image correlation (DIC) technology. Experimental results indicate that, in single-point static indentation tests, the relative error between the simulated displacement field and DIC measurements in the compressed region is less than 10%; additional comparison of static indentation behavior at seven characteristic points further reduces the discrepancy to within 5%. Detailed analysis reveals that boundary constraint conditions—particularly the treatment of lateral degrees of freedom and local structural stiffness effects, such as edge stiffening, are key factors governing the predictive accuracy of the model. These factors are closely associated with the mechanical origins of optical defects, including light leakage and surface indentations, commonly observed in LCD modules during service. The results demonstrate that the developed finite element model provides high accuracy in predicting the behavior of core compressed regions and in-plane responses. The modeling and validation methodology presented herein offers a reliable theoretical and technical basis for subsequent structural optimization and reliability design of LCD modules and establishes an important foundation for understanding and mitigating optical display defects from a mechanical perspective.

Key words: LCD module; digital image correlation; full-field displacement; finite element simulation

1 引言

液晶显示技术(Liquid Crystal Display, LCD)因成本低廉、寿命长、显示效果优异,已广泛应用于手机、电脑和大屏幕等工作场景^[1-2]。随着市场对超薄化、无边框设计的追求, LCD 模组结构日趋脆弱,抗压能力显著下降,易引发漏光、压痕、亮点等显示缺陷^[3-4]。这类光学缺陷的深层力学诱因常源于局部过大的应变集中或非均匀位移场,这不仅降低用户体验,更直接威胁产品的可靠性。因此,在量产前建立能精确预测 LCD 模组关键区域(如易漏光边缘、受压中心)力学响应的仿真模型并对其进行有效验证,尤其是挤压-弯曲工况下的结构响应评估,已成为显示制造行业的关键环节^[5-6]。

当前,针对 LCD 模组的力学研究主要沿着实验测试与数值仿真两条技术路径展开。在实验测试方面,传统方法依赖于万能试验机获取整体载荷-位移曲线^[7]或通过目视检测缺陷^[3],虽然两种方法能够捕捉宏观失效现象,但难以量化全场位移分布与局部应变集中,而应变集中、非均

匀位移场等局部过大的力学变形正是导致 LCD 模组出现漏光、压痕、亮点等光学缺陷的直接力学诱因。在数值仿真方面,有限元分析(Finite Element Analysis, FEA)已广泛应用于电子产品结构优化,例如手机轻量化、笔记本跌落分析以及电视包装优化^[8-10]。然而,现有研究多聚焦于整机层面的跌落冲击或包装防护^[11-12],或采用大幅简化的等效模型(如忽略层间细节、均质化处理)进行 LCD 模组分析,针对其自身在静力学与挤压冲击行为下,包含真实几何细节(特别是各层厚度)的精细化仿真分析与验证仍存在显著空白。更为关键的是,仿真模型的准确性普遍缺乏有效的验证手段。传统传感器(如应变片、位移传感器)虽然成熟可靠,但只能获取离散点或局部区域的力学信息,难以直接对比复杂的全场位移场分布。其他全场光学测量技术(如电子散斑干涉 ESPI)虽然能提供全场信息,但对环境振动敏感,测试环境要求苛刻,且难以应用于现场或动态加载场景^[13],这导致模型在预测局部应力应变时的可信度受到质疑。

近年来,数字图像相关(Digital Image Corre-

lation, DIC) 技术因其非接触、全场测量、对测试环境要求相对宽松、适用于静态及准静态加载等优势,为力学模型验证,特别是复杂结构全场位移/应变场的验证提供了新思路。该技术已成功应用于柔性屏弯折应变分析和三维变形测量^[14-17],其通过散斑追踪实现亚像素级位移解析的能力^[18],为复杂结构变形场验证奠定了技术基础。然而, DIC 在 LCD 多层级复合结构(含玻璃基板、导光板、铁框等)的静力学验证中尚未得到系统化应用,尤其缺乏对仿真的深入研究^[19-20]。

针对上述局限,本文构建了液晶显示屏的高保真三维有限元模型(精确包含各层几何厚度及材料特性),并利用全场三维 DIC 测量技术进行系统性验证。通过耦合对比仿真与实验数据,不仅定量评估模型在预测复杂位移场(尤其是易诱发光学缺陷的高应变区)的精度,更着重于分析误差来源,揭示影响 LCD 模组力学响应的关键结构因素与边界条件效应。本研究有望为液晶显示屏的精细化机械设计、针对性结构优化(如强化高应变区)及可靠性评估(如预测潜在光学失效风险位置)提供坚实的理论依据和可推广的方法论支持,对提升显示产品质量和可靠性具有重要的理论价值和工程意义。

2 原理

力学模型的构建是进行数值模拟的基础和关键。基于 LCD 模组的结构并考虑产品的功能需求进行建模,其中包括几何建模简化、材料参数设定、边界条件与载荷施加、网格划分等关键步骤,并对仿真的结果进行初步验算以确保模型的结果具有参考意义。

2.1 LCD 模组三维模型构建

在中尺寸 LCD 模组结构设计中,通常按其功能模块化和制造流程划分为 CFOG, BLU 和辅材 3 个模块,如图 1 所示。其中, CFOG 涵盖了液晶单元、驱动 IC 等,作为图像生成的核心部分。BLU 负责提供显示所需的背光,确保显示面板的亮度和显示实现;辅材提供辅助功能,如光线屏蔽、静电消除,确保整个模块的稳定性。

根据上述设计原则和分析,各层通过物理接触耦合,模型中完整保留其几何交互关系。在设

计 LCD 模组时,采用基于 CFOG 模块、BLU 模块以及辅材模块的自底向上(Down to Up)的结构设计方法,建模过程中,严格依据模组设计图纸,精确设定每一功能层(如玻璃基板、导光板、光学膜片、铁框等)的实际物理厚度,在 SolidWorks 软件中实现模块化建模。这种保留真实几何尺度(特别是厚度维度)的方法,是确保模型能够准确捕捉层间相互作用和局部刚度差异的关键。LCD 模组的结构分布如图 1 所示,产品外观尺寸为 306 mm×197 mm×2.25 mm,整体质量为 226 g。

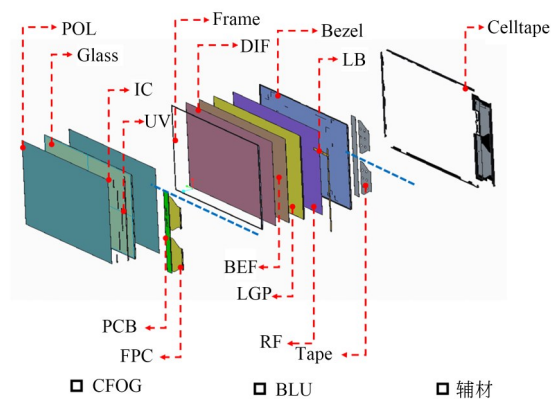


图 1 LCD 模组结构分布

Fig. 1 Structural distribution of LCD module

2.2 LCD 模组前处理

通过合理的几何简化,可以在确保结果精度的同时大幅提高计算效率。本文基于 Abaqus 提供的几何处理模块,从而实现从模型外部导入、简化到网格划分和分析的一体化工作流程。通过在同一平台上完成几何简化,可以减少数据转换、模型传递中可能出现的问题,并提高工作效率。

2.2.1 网格划分

为提高计算效率并确保关键区域(如压头接触区、铁框边缘)的精度,模型采用四面体网格,长度方向尺寸优化为 0.002 5 mm,厚度方向均划分四层网格,在保证位移场解析度的同时控制了计算规模。LCD 模组在内的模拟整机模型的单元总数为 416 304,网格节点数为 450 966。检查后的网格质量有 542 个单元,纵横比超过 10,网格质量为 99.89%。网格划分后的 LCD 模组如图 2 所示。

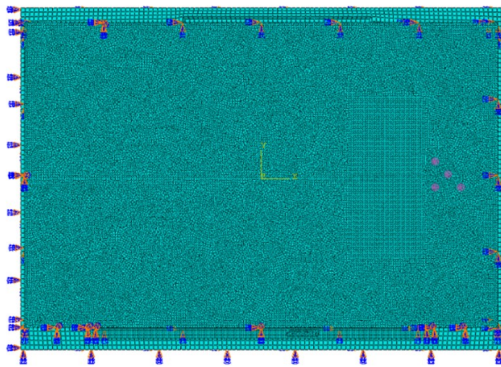


图2 LCD模组模型网格划分与边界约束示意图
Fig. 2 Schematic diagram of LCD module model grid division and boundary constraints

2.2.2 材料力学参数

LCD模组涉及多种材料,其中液晶屏使用有机玻璃来支撑强度。背光模块通过应用不同的材料来实现功能来协同。铁框采用日本住友研发的GM55高强度铝合金材质;导光板则由PM-MA(聚甲基丙烯酸甲酯)制成;扩散膜、增光片以PET(聚对苯二甲酸乙二醇酯)材质制作;反射片采用PP(聚丙烯)材质。基于供应商实测数据,LCD模组涉及的主要材料力学参数如表1所示,为每一层赋予其真实力学属性,避免使用简化或均质化材料模型带来的潜在偏差,是精细化仿真的重要基础。

表1 LCD模组的主要部件材料参数
Tab. 1 Terial parameters of main components of LCD module

部件名称	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	杨氏模量/ MPa	泊松比	屈服强度/MPa
反射片	0.82	1 500	0.37	23
导光板	1.24	2 400	0.36	57
扩散片	1.19	4 500	0.31	78
增光片	1.36	4 200	0.39	66
玻璃基板	2.59	85 000	0.24	101
偏光片	1.18	500	0.30	—
铁框	2.71	71 000	0.32	269
连接器	8.5	110 000	0.32	—
PCB板	1.18	16 000	0.13	—

2.2.3 边界设定

在进行LCD模组的静压测试前,需要对其边界条件进行明确设定,包括约束条件和载荷类型。首先,确定压力施加的接触面。这里采用两种类型的施压面进行分析:一是机壳的上表面,二是LCD模组的背面。接着,确定压头的相关参数。在本次静压测试中采用了刚性压头,压头变形可忽略不计,因此,在仿真中可以通过设置分布载荷以进行模拟。

测试过程中,在压力面上施加压力时,重点关注与施压方向一致的变形量,具体表现为Z方向的位移,该项位移数据即为最终的测试结果。同时,测试中必须确保LCD模组在施压过程中不会发生破裂或其他形式的永久性破坏,保证其结构和功能完整性。

根据上述要求,在LCD模组的静压测试中施加98 N的压力,而在整机测试中施加196 N的压力。施压区域为直径 $\Phi 25\text{ mm}$ 的圆形区域,在Load模块中分别施加合力98 N和196 N。同时将治具的底部完全约束,固定所有自由度以模拟刚性平台,并根据实际测试条件对侧边自由度进行适当约束,限制法向位移。

2.2.4 LCD模组模型校验

为校验仿真精度,对LCD模组模型进行静压仿真,确保网格单元及尺寸设置合理。如图3所示,LCD模组模型的伪应变能数值接近0,与内能的比值远低于10%,网格满足仿真精度要求。动能与内能的比值也小于5%,说明过程未产生额外惯性力,设置的质量缩放系数在合理范围内。

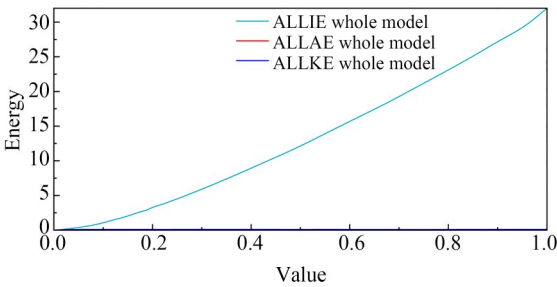


图3 LCD模组静压能量变化曲线
Fig. 3 Static pressure energy variation curve of LCD module

3 实 验

本文搭建了DIC测量系统,并通过DIC测量系统采集LCD模组在力学测试中的表面变形过程,以及其在压力作用下的变形响应参数。最后,将数值模拟结果与实验所得的变形响应结果进行对比,评估模型的准确性。

3.1 DIC测量系统搭建

3.1.1 系统组成

DIC测量系统具有非接触、全场测量的特性,能够获取LCD模组在复杂加载下表面的完整位移场数据,从而为精细化的有限元模型提供更全面、直接的验证依据,这是传统点式传感器(如LVDT或应变片)无法实现的^[13]。该测量系统主要由Dantec-Q400数字图像测量分析系统以及岛津万能材料试验机AG-Xplus-HS组成。数字图像测量分析系统包括相机支架,光源,信号触发器,双目CCD相机以及计算机等组成,测量系统搭设如图4所示。

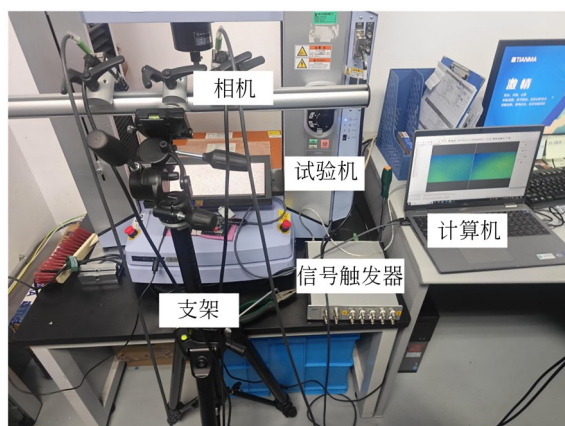


图4 DIC测量系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of DIC measurement system

3.1.2 测量样品处理

散斑作为跟踪和分析表面变形的参照点,其质量至关重要^[20]。为了评估散斑质量对测试的影响以寻求合适的散斑制备方式,采用喷涂斑和滚轮两种制备,截取的图片尺寸为300 pixel×300 pixel。

图5为不同制备方式的散斑图案与灰度直方图。从对比度来看,图5(b)几乎涵盖了低灰度值到高灰度值的范围,具有较高的对比度。

从图像峰值看,图5(a)和图5(b)均呈现双峰值曲线。

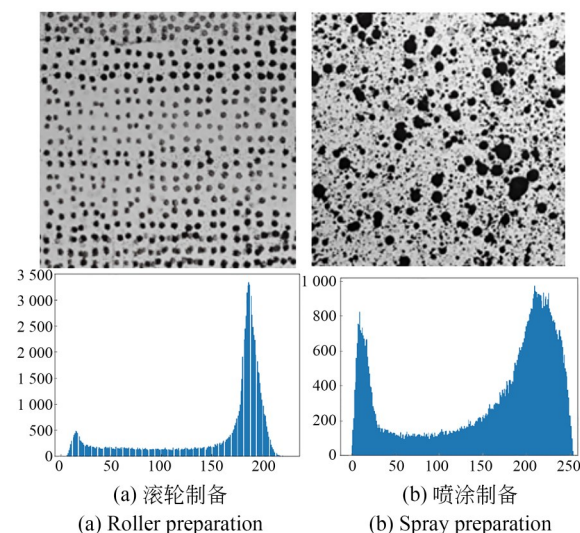


图5 不同制备方式的散斑图案与对应灰度直方图

Fig. 5 Speckle patterns and corresponding gray-level histograms for different preparation methods

由于人工操作的不稳定性,在作用区域较大范围时难以控制散斑喷涂的质量。相比之下,滚轮散斑具有更好的稳定性,同时仍能提供优良的散斑效果。图6为DIC在计算两种制备方式的有效区域示意图,滚轮制备方式的稳定性明显好于喷涂制备方式,因此测试采用滚轮制备散斑。

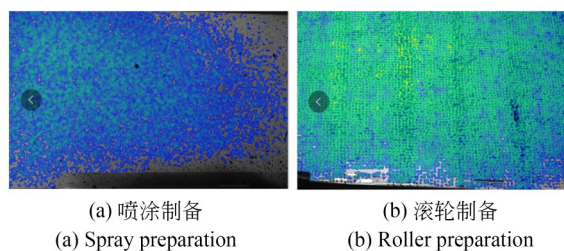


图6 不同制备方式的散斑计算效果

Fig. 6 Computational effects of speckle patterns under different preparation methods

滚轮散斑需确定其散斑尺寸,合理的散斑质量通常需要将其尺寸控制在10个像素以内,否则可能会出现较大的随机误差,而且散斑占空比应处于40%~60%之间。根据观察区域300 mm×200 mm的范围与相机分辨率1 920 pixel×

1 200 pixel 可知,单像素的物理尺寸约为 0.156 mm/pixel,散斑尺寸应控制在 14.7 pixel 以内。实际中选用的散斑尺寸为 1.5 mm,即:

$$N_{\text{pix}} = \frac{dP}{L}, \quad (1)$$

其中: N_{pix} 为散斑覆盖像素; d 是实际选择的散斑尺寸; P 是相机在水平方向或在垂直方向的像素分辨率; L 为视场的宽度或者高度。

计算后其对应的像素值约为 9.6 pixel,散斑尺寸在合理范围内。

3.1.3 DIC 测量系统验证

为了检验 DIC 测量系统在所选散斑尺寸下的测量稳定性,对 LCD 模组进行挤压弯曲测试,将 DIC 测量系统与试验机位移传感器的测量结果进行对比。首先,按照滚轮散斑处理方法对 LCD 试件进行制备,接下来采用弯曲衬板(中心为镂空 60 mm 的圆形治具),如图 7 所示,将屏幕居中放置,并把压头定位至下压点,校准位移零点,随后压头逐渐施加载荷使模组发生变形直至达到设定值 250 N,DIC 和位移传感器同步记录模组受压表面的位移变化,重复进行 3 次实验。

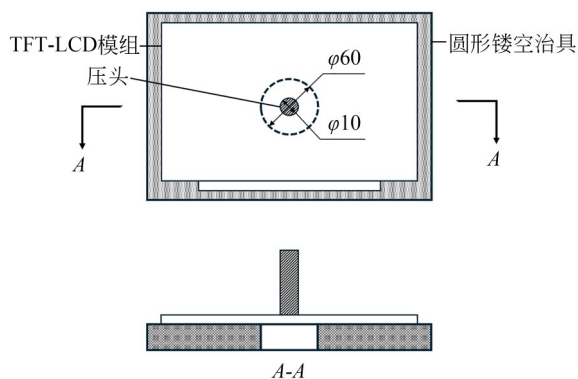


图 7 DIC 测量系统挤压弯曲验证示意图

Fig. 7 Schematic diagram of extrusion bending verification of DIC measurement system

通过 3 次实验获得了相同载荷下的 DIC 位移值与试验机位移传感器记录的结果,绘制散点图,并采用最小二乘法将散点绘制成直线,并根据实际情况把截距设置为原点,3 组实验结果如图 8 所示。可以看到,3 组实验的结果显示线性拟合结果 R^2 在 0.99 以上,拟合结果较好。该结果不仅确认了本实验 DIC 系统自身测量的可靠性,也表明在测量模组整体弯曲变形方面,DIC

系统与高精度的试验机位移传感器具有良好的一致性。这为后续利用 DIC 提供的、远超传统传感器信息维度的全场位移数据进行模型验证奠定了基础。

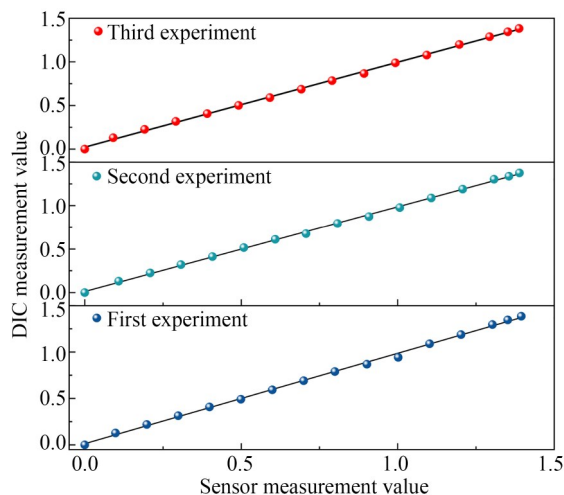


图 8 DIC 测量系统挤压弯曲验证数据

Fig. 8 Validation data of extrusion bending of DIC measurement system

3.2 DIC 测量系统验证 LCD 模组数值模拟准确性

3.2.1 单点静压对比分析

在进行 LCD 模组单体静压测试时,预设载荷 98 N,当达到设定值时保压 10 s。为评估实验结果的稳定性和可重复性,在相同条件下(相同样件、相同散斑、相同加载位置和路径)进行了 3 次独立的静压测试(分别标记为 DIC 实验 1, 2, 3)。图 9 和图 10 分别给出了加载初期(29.42 N)与加载结束时(98 N)的变形云图,对比 3 次 DIC 重复实验与数值模拟在不同载荷下的 Z 向位移结果(灰色区域为压头视觉遮挡导致的感兴趣区域缺失)(彩图见期刊电子版)。

由 3 次 DIC 重复实验(图 9(a)~9(c), 图 10(a)~10(c))的位移云图可知:

(1)3 次实验的位移场在形态分布(梯度扩散特征、等值线密集区域)和量级上均表现出高度一致性,证明了实验系统(包括 DIC 测量、加载控制、散斑)具有良好的稳定性和结果可重复性;

(2)LCD 模组在受压区域形成了明显的变形区域,并以该受压处为中心,向外呈现梯度下降的分布特征,位移逐渐向四周扩散;

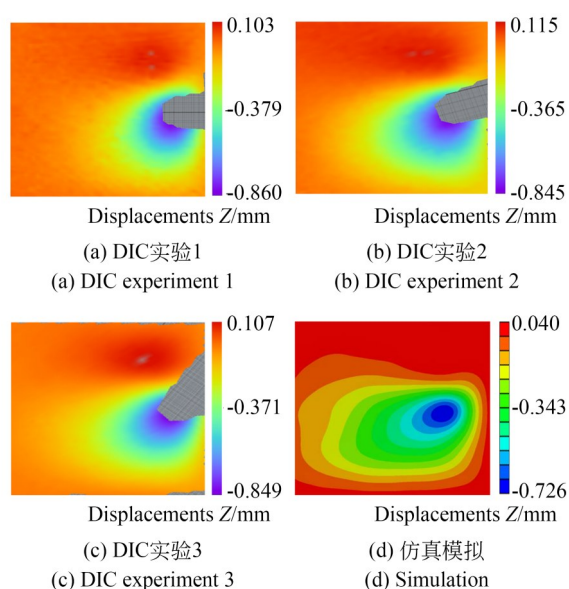


图 9 29.42 N 载荷下的位移场对比

Fig. 9 Displacement field comparison under 29.42 N load

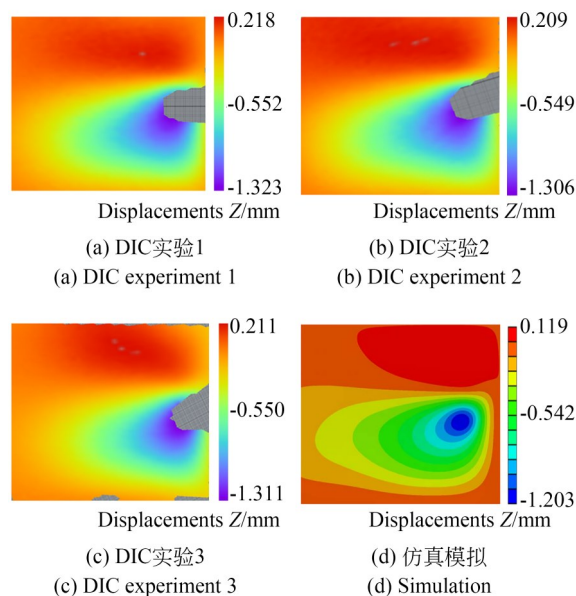


图 10 98 N 载荷下的位移场对比

Fig. 10 Displacement field comparison under 98 N load

(3) 模组在受压时与键盘治具的凸面结构存在干涉,使位移等值线在接触区域分布显著密集。而在模组上部区域,边界条件的设置导致模型在边界处出现微小变形,与 DIC 云图所表征出来的情况基本符合,这也说明模型假设的边界条件与实验条件较为接近。

对比数值模拟结果(图 9(d),图 10(d))与 3 次 DIC 实验云图,在整体位移场分布形态上,仿

真结果与 3 次实验均高度吻合,仿真准确地再现了以受压中心为核心向外梯度扩散的基本特征(图 9,图 10)。受压中心区域位移最大,并随着远离中心而减小。仿真捕捉到了因与治具凸面干涉导致的接触区域位移等值线密集现象(图 9(d),图 10(d)),这与 3 次 DIC 实验观测到的特征一致(图 9(a)~9(c),图 10(a)~10(c))。模型预测的边界处微小变形特征(图 9(d),图 10(d))在 3 次 DIC 实验云图(图 9(a)~9(c),图 10(a)~10(c))中亦有所体现,这表明模型假设的边界条件与实验的实际约束条件较为接近。

图 11 显示了 LCD 模组在受压处的载荷-位移曲线。压头遮挡导致受压中心区域(ROI 缺失)无法直接获取 DIC 位移数据,因此,选择靠近受压边缘但仍在清晰测量区域内且与仿真节点位置对应的一个固定参考点进行位移对比。3 次独立 DIC 实验在该参考点测得的载荷-位移数据点(图 11 中散点)均紧密分布在仿真预测的曲线附近,线性拟合(考虑截距为原点)结果显示相关系数 R^2 高于 0.99,表明仿真在描述该点受载变形过程上具有较高精度。当载荷为 98 N 时,该参考点的 DIC 测试结果显示最大位移分别为 1.323, 1.306 和 1.311 mm,而对应数值模拟的结果为 1.203 mm。对应 3 组 DIC 试验结果的相对误差分别为 9.070%, 7.886% 和 8.237%,均在 10% 内。更重要的是,如前所述,模型成功再现了载荷作用下位移场由受压中心向外呈梯度扩散的基本分布规律(图 9,图 10),反映了 LCD 模组多层复合结构在局部压力下整体协调变形的内在

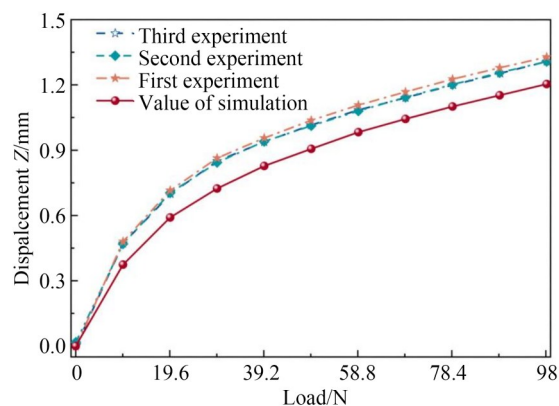


图 11 LCD 模组单体测试受压处载荷-位移曲线

Fig. 11 Load-displacement curve at compression point in single test of LCD module

力学行为特征。这表明所构建的模型能够较好地反映 LCD 模组在该工况下的整体变形行为。需要指出的是,传统点式测量方法(如安装在压头或模组特定点的位移传感器)虽然也能获得该点的位移值用于与仿真对比,但其无法提供图 9 和图 10 所示的全场分布信息来确认模型预测的位移场形态是否合理,也无法揭示压头遮挡区域外的变形特征。DIC 的全场测量能力极大地增强了对模型整体预测性能的评估深度,而且模型成功识别并通过 DIC 验证的受压中心高位移梯度区域以及模型与实验共同揭示的边缘区域潜在更大变形倾向(尽管存在误差),正是 LCD 模组在实际应用中易出现压痕、边缘漏光等光学缺陷的关键力学位置^[3]。本模型预测这些区域力学响应的能力,为后续针对性优化设计以预防光学失效提供了直接依据。

3.2.2 多点静压对比分析

为了验证 LCD 模组模型,基于挤压弯曲测试对 LCD 模组进行了数值模拟,并与 DIC 实验结果进行对比。测量模组表面 7 个测试点的变形量,当测量完每个测试点的变形后,需要调整模组位置,使下一测试点位于治具镂空区域的正上方,7 处测试点的分布位置如图 12 所示。若使用传统点式位移传感器逐个测量这 7 个点的位移,不仅需要复杂的夹具和多次调整传感器位置,过程繁琐且难以保证加载条件完全一致。而 DIC 技术在一次加载过程中即可同步获取整个视野内所有点的位移信息,包括这 7 个特征点,大大提高了测试效率和一致性。

对模组在不同压点的变形行为进行分析,主要可分为边缘压点以及面内压点,各压点模拟结

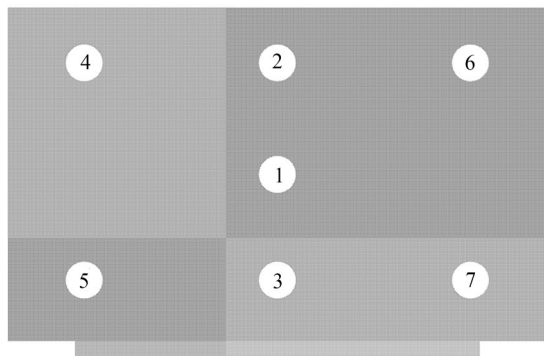


图 12 测试点分布

Fig. 12 Distribution test points

果及 DIC 实验结果均表现出显著的局部变形,其中边缘压点(P4~P7)在边缘处的模拟结果和 DIC 实验的数值结果存在差异,表现出实际结构更柔,也表征出了相似的变形特征。比较两者的位移云图,DIC 体现出了一定的非对称性及复杂性,反映出实际加载过程中的边界效应和材料特性。如图 13 显示,模型对面内压点(P1~P3)的预测精度(误差 $<5\%$)显著高于边缘压点(P4~P7)。这一差异规律性地表明:在靠近自由边界区域,实际结构的约束状态或局部刚度(如铁框边缘的扭转刚度、辅材的边界效应)可能比模型中简化的边界条件更为复杂,或者存在未被模型充分捕捉的局部弱化效应。边缘区域是模型精度提升和实际结构可靠性需要重点关注的位置。实际产品中观察到的边缘漏光问题与本研究模型预测和 DIC 测量共同揭示的边缘区域力学行为(更大变形、更高不确定性)具有显著的空间关联性,这进一步说明了边界条件模拟和局部结构刚度精细化对准确预测光学可靠性风险的重要性。该结果不仅验证了模型在多点加载下的预测精度,也凸显了 DIC 在高效获取多点位移数据方面相对于传统点式测量方法的显著优势。

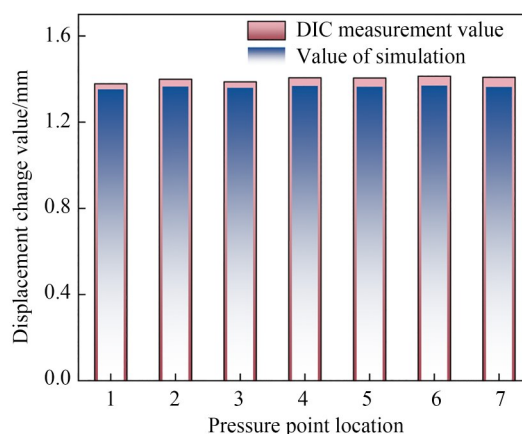


图 13 挤压弯曲实验对比结果

Fig. 13 Comparative results of compression-bending experiments

4 结 论

本文提出并实现了一种针对 LCD 模组多层复合结构的高保真三维有限元建模方法。核心

创新在于精细还原了模组的真实几何构型(特别是各功能层的精确厚度),并基于实测/可靠数据设定了异质材料参数,通过系统的网格收敛性分析确保了计算效率与精度的平衡,为揭示复杂层状结构的局部力学行为奠定了坚实基础。构建了“有限元-DIC”耦合的全场位移验证框架。该框架有效克服了传统点式测量无法验证复杂位移场分布的瓶颈。验证结果表明:模型在预测核心受压区域位移场形态(梯度扩散)方面与DIC高度吻合(相对误差 $<10\%$);对多点(含边缘点)的分析进一步证实模型在面内区域具有更高精度(误差 $<5\%$),并规律性地揭示了边界约束条件(尤其是侧向自由度)和局部结构刚度(如铁框边缘效应)是影响模型预测精度的核心因素,而这些因素与LCD模组的光学失效(如边缘漏光)机理密切相关。所建立的精细化模型及其验证框架,具有直接服务于工程优化和光学可靠性提升的价值。模型能够准确识别高应变风险区域(如受压中心、结构边缘),其揭示的力学规律(如边界约束效应、局部刚度差异)可直接服务于工

程实践,指导针对关键风险区域(如易漏光边缘、高压痕风险区)的针对性结构强化设计,支撑基于刚度影响规律的轻量化方案制定,并实现对潜在光学失效位置的高效预测。该模型框架与验证方法学具有普适性,可推广应用于OLED模组、柔性屏等其他层状电子器件的力学分析与光学可靠性设计优化。

综上所述,所构建的有限元-DIC联合验证框架能够非接触、全场地准确评估LCD模组在复杂载荷下的力学响应,可为后续结构优化、轻量化设计及可靠性评估提供可靠理论与方法支撑。

作者贡献声明:

方晶晶:论文撰写,实验数据分析;
余卿:论文审阅与指导,研究资金获取;
江昊:实验方法设计,数据收集与整理;
郑伟峰:论文指导与审阅;
颜华生、郭单余:提供研究资源,论文审阅;
邹松:实验指导与验证。

参考文献:

- [1] 张怀平,李宏章,钟海强. TFT-LCD液晶显示技术与应用研究[J]. 电子技术与软件工程, 2022(18): 86-89.
ZHANG H P, LI H ZH, ZHONG H Q. Research on TFT-LCD liquid crystal display technology and its application [J]. *Electronic Technology & Software Engineering*, 2022(18): 86-89. (in Chinese)
- [2] JUNG J, PARK H, JUNG H Y, *et al.* Recent progress in liquid crystal devices and materials of TFT-LCDs [J]. *Journal of Information Display*, 2024, 25(1): 121-142.
- [3] 李愿愿,程再军,颜华生,等. 液晶显示屏挤压漏光的分析及改善[J]. 液晶与显示, 2022, 37(4): 475-482.
LI Y Y, CHENG Z J, YAN H SH, *et al.* Analysis and improvement of LCD light leakage caused by pressing[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(4): 475-482. (in Chinese)
- [4] 欧阳钟灿. 中国新型显示技术发展之路[J]. 科技导报, 2023, 41(19): 92-95.
OUYANG ZH C. Development pathway of new display technologies in China[J]. *Science & Technology Review*, 2023, 41(19): 92-95. (in Chinese)
- [5] 郑聪,谭璐,谢冬青,等. TFT-LCD玻璃基板品质对面板制程的影响[J]. 玻璃, 2025, 52(4): 42-45.
ZHENG C, TAN L, XIE D Q, *et al.* Effect of the quality of the TFT-LCD glass substrate on the panel manufacturing process[J]. *Glass*, 2025, 52(4): 42-45. (in Chinese)
- [6] LEE K H, KO D C, LEE J M, *et al.* Manufacturing process of bezel frame for strength-reinforced TFT LCD module by progressive hemming of SUS304 stainless steel sheet [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(3): 1103-1109.
- [7] 张简志伟. 以钢球撞击试验评估玻璃面板强度[D]. 新竹:阳明交通大学, 2007.
ZHANGJIAN ZH W. *Evaluation of Glass Panel Strength by Steel Ball Impact Test* [D]. Hsinchu: Yang Ming Chiao Tung University, 2007. (in Chinese)
- [8] 郭海霞,荆道艳,吴作伟. 基于iSIGHT的手机结构轻量化设计[J]. 重庆工学院学报(自然科学版), 2008, 22(7): 88-90, 169.
GUO H X, JING D Y, WU Z W. Light optimization design of mobile telephone by iSIGHT[J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science)*,

- 2008, 22(7): 88-90, 169. (in Chinese)
- [9] SINGH A, KUMAR V, KHOSLA P K, *et al.* Investigations of an innovative drop test facility for shock evaluation of portable electronics [J]. *Advanced Theory and Simulations*, 2025, 8 (4): 2401006.
- [10] 潘迪, 韩勇, 张坤伦, 等. 液晶电视包装件跌落仿真及结构优化[J]. *包装工程*, 2019, 40(11): 94-99.
- PAN D, HAN Y, ZHANG K L, *et al.* Drop simulation and structure optimization of LCD TV package [J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(11): 94-99. (in Chinese)
- [11] 梁龙. 产品包装件跌落过程分析与仿真[D]. 广州: 暨南大学, 2009.
- LIANG L. *Analysis and Simulation of the Drop Process of Product Packaging* [D]. Guangzhou: Jinan University, 2009. (in Chinese)
- [12] 马恒杰. 某大屏手机的设计及其有限元分析[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- MA H J. *Design and Finite Element Analysis of a Large-screen Mobile Phone* [D]. Suzhou: Soochow University, 2014. (in Chinese)
- [13] 周佳, 闫金健, 刘志强, 等. Micro LED当前面临的瓶颈及技术进展[J]. *光电子技术*, 2023, 43(2): 91-113.
- ZHOU J, YAN J J, LIU ZH Q, *et al.* The current bottleneck and technical progress of micro LED [J]. *Optoelectronic Technology*, 2023, 43(2): 91-113. (in Chinese)
- [14] 唐正宗, 梁晋, 肖振中, 等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(10): 2244-2253.
- TANG ZH Z, LIANG J, XIAO ZH ZH, *et al.* Digital image correlation system for three-dimensional deformation measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10): 2244-2253. (in Chinese)
- [15] 夏衍, 罗晨, 周怡君, 等. 基于 Swin Transformer 轻量化的 TFT-LCD 面板缺陷分类算法[J]. *光学精密工程*, 2023, 31(22): 3357-3370.
- XIA Y, LUO CH, ZHOU Y J, *et al.* A lightweight deep learning model for TFT-LCD circuits defect classification based on swin transformer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(22): 3357-3370. (in Chinese)
- [16] ZHENG H Y, GAO X Q, YANG X Q, *et al.* A study on TFT-LCD manufacturing quality prediction method using SHAP feature selection and ensemble learning [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2025, 1-17.
- [17] 李骏睿, 王欢庆, 潘万林, 等. 基于数字图像相关的柔性屏弯折应变测量分析(特邀)[J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(3): 69-74.
- LI J R, WANG H Q, PAN W L, *et al.* Analysis of flexible screen bending strain measurement based on digital image correlation(invited) [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(3): 69-74. (in Chinese)
- [18] CHU T C, RANSON W F, SUTTON M A. Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics [J]. *Experimental Mechanics*, 1985, 25(3): 232-244.
- [19] YU D, KWAK J B, PARK S, *et al.* Dynamic responses of PCB under product-level free drop impact [J]. *Microelectronics Reliability*, 2010, 50(7): 1028-1038.
- [20] 李芹涛, 郑洁, 王秀会, 等. 数字图像相关方法散斑质量的评价[J]. *价值工程*, 2024, 43(26): 133-135.
- LI Q T, ZHENG J, WANG X H, *et al.* Evaluation of speckle quality in digital image correlation methods [J]. *Value Engineering*, 2024, 43(26): 133-135. (in Chinese)

作者简介:



方晶晶(1999—),女,福建莆田人,硕士研究生,2023年于景德镇学院获得学士学位,主要从事显示面板力学仿真模型与测试技术的研究。E-mail: 412007141@qq.com

通讯作者:



余卿(1983—),男,江西新余人,博士,副教授,硕士生导师,2005年、2011年于合肥工业大学分别获得学士和博士学位,主要从事显示面板力学仿真模型与测试技术等研究。E-mail: yuqing@hqu.edu.cn