透光率对隐藏显示木纹IML膜片效果的影响研究

邱鑫[1] 陈立亮[2] 彭小娟[1] 周忠保[1] 白旭东[1]

（1.重庆长安汽车股份有限公司，重庆 401133；2.重庆工业职业技术大学，重庆 401120）

摘要：为分析透光率对隐藏显示木纹模内镶件注塑（IML）膜片显示效果的影响，通过制备具有不同透光率的隐藏显示木纹膜片，结合主观视觉评价试验，系统分析了透光率变化对木纹“隐藏性”与显示清晰度的影响。试验结果表明，当隐藏显示木纹膜片的透光率为25%~35%时，能有效弱化木纹视觉干扰，并显著提升显示内容的清晰度与色彩还原度，同时揭示了透光率与背景光源亮度等因素的交互作用规律。

关键词：透光率 隐藏显示 木纹效果 IML膜片

中图分类号：U463.83 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260001

Research on Effect of Light Transmittance on Hidden Woodgrain IML Films

Qiu Xin[1], Chen Liliang[2], Peng Xiaojuan[1], Zhou Zhongbao[1], Bai Xudong[1]

(1. Chongqing Changan Automobile Co., Ltd., Chongqing, 401133; 2. Chongqing Industry Polytechnic University, Chongqing 401120)

Abstract: To analyze the effect of light transmittance on the display performance of In-Mold Labeling (IML) films with hidden woodgrain patterns, a series of hidden woodgrain IML films with different light transmittance levels are prepared. Combined with subjective visual evaluation experiments, the influence of transmittance variation on the "hidden nature" of woodgrain and display clarity is systematically investigated. The experimental results show that when the light transmittance of the hidden woodgrain IML film ranges from 25% to 35%, visual interference from the woodgrain pattern is effectively reduced, while the clarity and color reproduction accuracy of the displayed content are significantly improved. Furthermore, the interaction patterns between light transmittance and factors such as background light intensity are revealed.

Key words: Light transmittance, Hidden display, Woodgrain effect, IML films

1 前言

随着经济的发展，消费者对汽车产品表面装饰的美感需求增多，模内装饰工艺也得到迅猛发展[1]。通过将预先印刷了多层油墨的膜片嵌入注塑模具中，模内镶件注塑（In-Mold Labeling，IML）工艺可使装饰层与塑料基材在一次成型过程中紧密结合，从而赋予产品耐磨、耐腐蚀、图案精细等优点[2-3]。近年来，真木装饰件因其独特的自然美学和温馨质感，受到了汽车消费者的欢迎[4]，然而真木装饰件价格高，所以IML工艺制品常用于替代真木作为汽车内饰的装饰膜片。早期汽车内饰用木纹IML膜片仅包含颜色和纹理，随着智能化和集成化需求的日益增长，已不能满足消费者的美学需求，不仅需要通过紫外线（Ultraviolet，UV）转印、热压、透光、镭雕等方式提升其触感和科技感，还需要结合柔性元件提升交互感[5]。近年来，高触感木纹膜片、隐藏显示木纹膜片等技术应运而生，逐渐在量产车型中得到应用。在这一类产品中，透光率是非常关键的物理参数，不仅决定了

作者简介：邱鑫（1998—），男，工程师，硕士学位，研究方向为汽车内饰装饰膜片的应用。

参考文献引用格式：

邱鑫，陈立亮，彭小娟，等. 透光率对隐藏显示木纹IML膜片效果的影响研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(6)：40-44.

QIU X, CHEN L L, PENG X J, et al. Research on Effect of Light Transmittance on Hidden Woodgrain IML Films[J]. Automobile Technology & Material, 2026(6): 40-44.

木纹能否在汽车内饰中正常呈现,还决定了数字信息显示是否清晰。透光率的高低不仅影响光线透过膜片时的能量损耗与散射行为,还影响木纹的视觉显著性以及显示内容的对比度、色彩饱和度和分辨率。然而,目前透光率对木纹效果与显示质量影响的系统性研究相对不足,因此,本研究系统分析透光率对隐藏显示木纹模内镶件注塑膜片显示效果的影响。

2　材料与方法

2.1　膜片结构及试验材料制备

如图1所示,当背面的灯光或屏幕未点亮时,隐藏显示木纹IML膜片具有木纹的纹理效果和深浅不一的色彩层次,当背光或屏幕点亮后,其可清晰展示出数字信息和动态图像,从而实现美学与功能的动态统一。

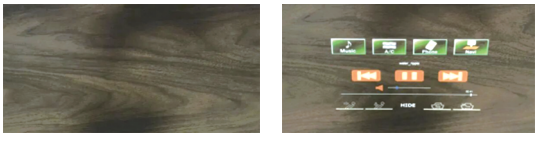


图1　点亮前后的隐藏显示木纹IML膜片产品

如图2所示,隐藏显示木纹IML膜片包括硬化层、聚碳酸酯(Polycarbonate,PC)/聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl methacrylate,PMMA)层、木纹纹理层和丝网印刷层。透明PC/PMMA作为基材层,厚度为200~400 μm,印刷前需进行裁切和烘烤。为提升耐磨性,基膜的表面会印刷一层厚度为6~8 μm的硬化涂层。为获得木纹的纹理效果,通过网板印刷的方式将厚度为3~5 μm的木纹纹理层印刷在基膜的背面;为进一步达成木纹的颜色效果,采用丝网印刷的方式将油墨印刷在纹理层上,油墨层的厚度为2~20 μm,通过调整油墨层的厚度,可获得不同透光率的IML膜片(15%、25%、35%、45%、55%)。

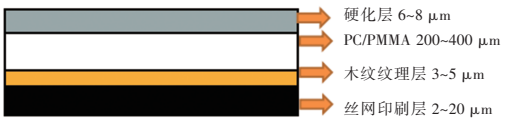


图2　隐藏显示木纹IML膜片结构示意

如图3所示,隐藏显示IML膜片经过冲孔、分切等工艺步骤,在IML成型模具中,与厚度为2 mm的透明PC一体成型,经过脱模、去水口后,得到隐藏显示木纹IML样板。所有样板的表面应平整且光滑,无灰尘、油污、异物和划痕等,确保光学测量与显示测试的准确性。样板尺寸为10 cm×10 cm,便于盖住CM3700 A分光测色仪的入口窗。

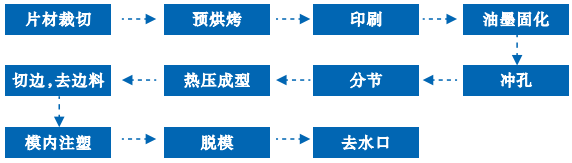


图3　IML膜片样品成型工艺

2.2　透光率测量

使用CM3700 A分光测色仪测量透光率,仪器的原理如图4所示,仪器光源的光谱特性符合国际照明委员会于1931年提出的表色系三刺激值以及CIE标准中的C光源色坐标,积分球是该仪器的测量系统,积分球的反射板、内表面和挡板均不光滑,且具有类似的反射率,在可见光频率范围内具有较高的反射率。

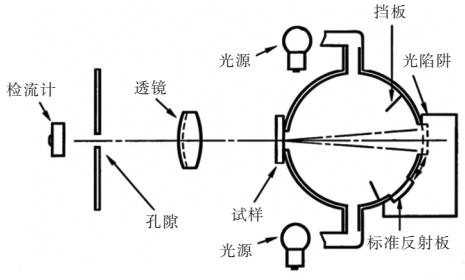


图4　分光测色仪原理示意

测试在温度为(23±2)℃和相对湿度为50%±10%的恒温恒湿环境中进行。每次测试时,应至少准备3个平行样板,样品没有对测试结果或研究产生偏差的内部缺陷。开启设备,选择C光源、"10°"观察者角度和"透光率"的测量模式并进行设备校准,将样板紧贴分光测色仪的积分球窗口并完全盖住入口窗,每个样板选取5个点进行测量,测量结果取算术平均值。

透光率T计算如下:

$$T=(T_2/T_1)\cdot 100\% \qquad (1)$$

式中:T_1为入射光通量,T_2为通过样板的总光通量。

2.3　显示效果测试平台搭建

显示内容方面,选用可提供50~1 000 cd/m^{2}光源的LED数字屏幕,测试时,木纹样品紧贴屏幕表面,在屏幕上显示包含不同粗细的黑白条纹、文字或图像等标准测试图样,保证标准图样的大小、显

示顺序等一致。

环境控制方面，为排除其他光源或信息的干扰，在暗室中的光源箱中进行测试，选择D65光源。

2.4 主观视觉评价试验

主观视觉评价试验采用孟塞尔色棋检测法，基于孟塞尔颜色系统理论，孟塞尔色棋检测法通常包括85个称为“色棋”的彩色圆盘，受试者通过对打乱顺序的色棋按照颜色渐变的方式再排列，结果以总分的方式呈现。总分越低，颜色分辨能力越强，可认为总分低于34分属于优秀水平[6]。

招募5名视力正常（或矫正后正常）的专业观察者，为使评价结果具有代表性，观察者必须接受过色彩科学、视觉感知或相关领域的系统培训或者长期从事与颜色判断相关的工作，熟悉色彩理论、色度学基础以及人眼对颜色的感知机制，具备丰富的实际比对和评价经验。专业观察者的孟塞尔色棋检测法的结果需小于34分。

评价方式如下：如图5所示，在暗室中，光源箱置于水平桌面上，评价样品摆放在与水平桌面的夹角为45°的置物台上，D65光源与水平桌面垂直，评价者的视线垂直于评价样品。

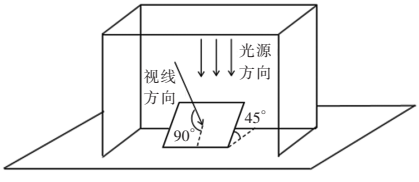


图5 主观视觉评价试验示意

静态评价过程为：开启D65光源，关闭发光二极管（Light Emitting Diode，LED）数字屏幕，5名评价者对不同透光率样品的木纹清晰度、明显程度进行评分（1~10分，1分为完全不可见，10分为非常清晰），计算算术平均值获得总分，同时判断在不同木纹可见度的情况下，黑色的LED屏幕是否可见。

动态评价过程为：开启D65光源，开启LED数字屏幕，并调节LED屏幕的显示亮度，同时将标准内容投放到屏幕上，5名观察者对显示内容的清晰度和木纹可见度进行评分（1~10分），计算算术平均值获得总分。

试验时，采用随机顺序呈现样品，每个样品评价时间为30 s，避免疲劳效应，记录每位评价者的评分并计算结果。

3 结果与分析

3.1 透光率对木纹可见度的影响

在D65标准光源的暗室环境中，5名评价者采用静态评价方法，将不同透光率的木纹膜片样品紧密贴合于未点亮的LED屏幕表面，进行木纹可见度主观评价。试验数据（表1）表明，随着样品透光率的增加，木纹可见度评分显著下降，这一视觉变化可通过材料的光学散射与反射机制进行解释。

表1 LED屏幕未点亮的木纹可见度评价结果

透光率/%	可见度/分	描述	屏幕
15	9.2	很清晰	不可见
25	8.5	很清晰	不可见
35	8.0	很清晰	不可见
45	6.5	较模糊	可见
55	5.2	较模糊	可见

当膜片透光率低于40%时，入射光线在膜片内部受到强烈的散射作用，同时表面及内部纹理结构产生显著的漫反射。大部分光线被反射回观察者眼睛，形成清晰的木纹图像；仅有少量光线透射至底层黑色屏幕并被吸收，因此，屏幕本身不可见，视觉上呈现为纹理分明、不透明的木质外观。

当透光率升高至40%以上时，材料对光的散射作用减弱，透射分量增加。更多入射光线穿透膜片到达底层屏幕，被黑色表面吸收；同时，能够反射回观察者的光量减少，导致木纹纹理的对比度与清晰度下降。此时，膜片趋于呈现均匀的半透明状态，底层屏幕的黑色背景变得明显，木纹细节模糊甚至消失。

因此，为实现隐藏式显示木纹IML膜片在屏幕未点亮时呈现清晰木纹且完全遮蔽黑色屏幕的效果，需将透光率控制在40%以下。该阈值保证了膜片具有足够的散射与反射能力，在视觉上重建鲜明的木纹质感，同时抑制透射光量以遮蔽底层屏幕结构。

3.2 透光率对显示效果的影响

在D65光源的暗室环境中，5名评价者采用动

态评价方法,将不同透光率的木纹膜片样品紧密贴合于亮度为300 cd/m^{2}的LED屏幕上,对木纹可见度与屏幕信息可读性进行主观评价。表2数据显示,当透光率低于15%时,屏幕内容显示模糊,而木纹清晰可见;当透光率升至25%以上时,屏幕内容可读性提升,木纹则趋于模糊。该现象源于膜片中光散射与反射机制的共同作用。

表2　300 cd/m^{2}显示亮度的LED屏幕下的评价结果

透光率/%	可见度		可读性	
	评分/分	描述	评分/分	描述
15	7.1	较清晰	5.5	很模糊
25	5.9	较模糊	7.5	较清晰
35	5.2	很模糊	8.5	很清晰
45	4.2	很模糊	9	很清晰
55	3.5	很模糊	9	很清晰

当膜片透光率低于15%时,此时膜片具有强烈的光散射特性。一方面,入射的D65光源在膜片表面及内部结构上发生多次散射和漫反射,反射光占主导,使观察者接收到明显的木纹图像;另一方面,LED屏幕发出的光在穿透膜片过程中被大量散射和吸收,仅有少量到达观察者,因此屏幕信息对比度低、显示模糊。

当膜片透光率高于15%时,膜片散射作用减弱,透射成为主导。LED屏幕发出的光能够较大量透过膜片,保持较好的方向性与亮度,从而呈现清晰的屏幕信息;同时,D65光源的反射光比例显著降低,木纹因缺乏足够的反射光与背景对比而显得模糊,甚至与透过的屏幕光融合,视觉上趋于隐没。

因此,为实现在屏幕点亮时隐藏木纹并清晰显示信息的“隐藏式显示”效果,需将透光率控制在15%以上。这一阈值确保了屏幕光的透射占主导,同时将外部光源的反射光抑制到不足以干扰信息读取的程度,从而实现视觉上的功能切换。

3.3　透光率与LED显示屏亮度的交互作用

为进一步研究透光率对隐藏显示木纹IML视觉效果的影响机理,在控制其他变量的条件下,分析了LED显示屏亮度与透光率的相互作用关系。如表3数据所示,透光率为25%的木纹膜片样品的视觉表现与显示亮度密切相关。

当LED显示屏亮度较低时,出射光强度不足,穿过木纹膜片的光通量有限。此时,环境光在膜片表面及内部木纹纹理处发生较强的散射与反射,使木纹图案因对比度高而显得清晰突出;相反,由屏幕主动发出的显示信息光被弱化,导致信息内容模糊。随着LED显示亮度的提升,屏幕发出的定向光强度增强,有效压制了木纹纹理对环境光的散射与反射,使木纹的可见度降低,显示信息与背景的对比度得到改善,提高了整体可读性。

表3　25%的透光率、不同屏幕显示亮度下的评价结果

显示亮度/cd·m^{-2}	木纹可见度		屏幕可读性	
	得分	描述	得分	描述
100	7.1	较清晰	5.2	很模糊
300	5.9	很模糊	7.5	较清晰
500	5.2	很模糊	7.9	较清晰
700	4.9	较模糊	8.2	很清晰
900	4.5	较模糊	8.4	很清晰

然而,当屏幕亮度提升至500 cd/m^{2}以上时,继续增加亮度对显示质量的改善趋于平缓。此现象可由光强的非线性感知及饱和效应解释:一方面,在较高亮度下,木纹纹理的散射/反射光已被主动显示光掩盖;另一方面,人眼视觉系统对亮度差异的敏感度随光强增加而降低,导致亮度提升带来的主观感知收益递减。

综上,透光率决定了显示光与环境光相互竞争的能量分配阈值。较低的透光率需要更高的显示亮度来克服木纹的散射与反射干扰,以实现显示信息的主导地位;而适宜的透光率与亮度组合,能使显示系统在隐藏木纹与保持高可读性之间达到最优平衡。

3.4　最优透光率窗口与平衡点

IML膜片的隐藏显示效果,要满足在屏幕未点亮时清晰显示木纹,在灯光或屏幕点亮时(图6)清晰显示数字信息。综合3.1节、3.2节中的试验结果,最优透光率的窗口为25%~35%,当透光率在此区间内时,屏幕未点亮时的木纹可见度较高,呈现较好的装饰效果,屏幕点亮时木纹可见度较低,且显示屏的整体可读性较高。



图6 透光率为35%的木纹膜片的显示效果

4 性能验证

按照汽车内饰常用膜片性能规范对透光率为25%~35%的隐藏木纹膜片IML样品进行附着力、耐磨性等膜片关键性能验证，结果如表4所示，结果表明，各项性能指标全部合格，达到量产要求。

表4 关键性能验证

试验项	试验结果	判定
附着力	0级	合格
耐高低温交变	外观无裂纹/断裂、变白、剥离、膨胀、分层、边缘翘起、起泡，二次附着力0级	合格
耐潮湿性	外观无裂纹/断裂、变白、剥离、膨胀、分层、边缘翘起、起泡，二次附着力0级	合格
耐高温性	外观无裂纹/断裂、变白、剥离、膨胀、分层、边缘翘起、起泡，二次附着力0级	合格
氙弧灯加速暴露试验	合格(488 kJ)	合格
耐磨性	轻微磨耗痕迹	合格
耐摩擦色牢度	白棉布沾色5级	合格
耐人工汗液	样品表面无明显变化、变色	合格
耐肥皂水	样件灰度4~5级，白色棉布的沾色等级4~5级	合格
耐泡沫清洗剂	灰度等级4级	合格
耐防晒油	表面无明显痕迹残留，变色等级4~5级，二次附着力0级	合格
耐酒精性	样件灰度等级4~5级，白色棉布的沾色等级4~5级	合格

5 结束语

本研究通过系统的试验分析，明确了透光率在隐藏显示木纹效果中的作用及其影响机制：

a. 透光率需低于40%才能在汽车内饰中呈现较好的装饰效果。

b. 高透光率(>25%)是保证显示屏幕整体可读性的必要条件，透光率损失会直接降低显示效果。

c. 当透光率为25%~35%时，屏幕未点亮时木纹可见度高，屏幕点亮时木纹可见度被显著抑制，同时显示质量满足实用要求。

参考文献：

[1] 黄莉, 张洋, 张鹏, 等. 汽车内外饰模内装饰技术工艺研究[C]// 第十六届河南省汽车工程科技学术研讨会论文集, 2019: 194-195.

[2] 胡迪航, 张菊香, 马晓良, 等. IML工艺在汽车内饰上的应用及膜片性能研究[C]// 2015中国汽车工程学会年会论文集, 2015: 135-138.

[3] 陈超, 李亦琛, 高祥达. IML技术在汽车内饰件上的应用研究[J]. 汽车制造业, 2022(6): 23-25.

[4] 殷勤, 刘洪海. 木质材料在汽车内饰中的应用探讨[J]. 林业机械与木工设备, 2020, 48(11): 51-53.

[5] 刘飞, 凌坚韧, 王涛, 等. 商用车内饰CMF设计技术发展现状及趋势[J]. 汽车实用技术, 2025, 50(14): 101-105.

[6] ZHANG Y J, MA J, CHENG S, et al. A Computer-Based Farnsworth-Munsell 100-Hue (CFM-100) Test in Pilots' Medical Assessments[J]. Aerosp Med Hum Perform. 2022, 93(4): 362-367.

AT&M