模内装饰技术在汽车内饰仿木质纹理制备中的应用与性能研究

胡斌[1] 方建中[1] 罗旦旦[2] 倪佑星[1] 徐超[1] 林峰[1]

（1.浙江长江汽车电子有限公司，温州 325025；2.浙江新瓷电气有限公司，温州 325025）

摘要：为解决天然木质纹理应用于汽车内饰时加工复杂、耐候性差、易腐烂变形的问题，系统研究了模内装饰（IMD）技术体系中模内镶件注塑（IML）、模内转印（IMR）、嵌片注塑（INS）3种工艺的核心特性，对比凹版印刷与丝网印刷在仿木质纹理制备中的工艺适配性，设计多组油墨层级DOE试验优化纹理视觉效果，并依据汽车内饰件行业标准开展全面性能验证。结果表明：采用凹版印刷+INS工艺可获得30%~50%的高拉伸率、3H+的表面硬度及优异的耐候性；采用丝网印刷+IML工艺，优化后的油墨层级方案DOE4-4可实现7.3的低光泽度，哑光效果与木纹层次感表现优异；丝网印刷+IML工艺制备的仿木质纹理产品通过耐磨损、耐化学试剂、温度冲击、湿热等试验，各项性能指标均满足汽车内饰件使用要求。

关键词：模内装饰技术 汽车内饰 仿木质纹理 凹版印刷 丝网印刷

中图分类号：U463.83；TQ320.66 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260057

Research on the Application and Performance of In-mold Decoration Technology in the Preparation of Wood-like Textures for Automotive Interiors

Hu Bin[1], Fang Jianzhong [1], Luo Dandan[2], Ni Youxing[1], Xu Chao[1], Lin Feng[1]

(1. Zhejiang Changjiang Automotive Electronics Co., Ltd., Wenzhou 325025; 2. Zhejiang Xinci Electric Co., Ltd., Wenzhou 325025)

Abstract: To address the issues of complex processing, poor weather resistance and easy rotting and deformation of natural wood grain when applied to automotive interiors, this paper systematically studies the core characteristics of three processes in the in-mold decoration (IMD) technology system: in-mold insert injection molding (IML), in-mold transfer (IMR), and insert injection molding (INS).To compare the process compatibility of gravure printing and screen printing in the preparation of wood-like textures, multiple sets of ink-level DOE tests were designed to optimize the visual effect of the texture, and comprehensive performance verification was carried out in accordance with the industry standards of automotive interior parts.The results show that the gravure printing + INS process, with a high tensile rate of 30% to 50%, a surface hardness of 3H+, and excellent weather resistance, has become the optimal choice for preparing complex large curved surfaces of automotive interiors imitating wood textures (without light transmission requirements).Screen printing +IML, the optimized ink hierarchy scheme (DOE 4-4) can achieve a low gloss of 7.3, with excellent matte effect and wood grain layering, making it the optimal process solution for the preparation of wood texture imitation with backlight/working indication.The prepared wood-textured imitation products have passed rigorous tests such as wear resistance, chemical reagent resistance, temperature shock, and damp heat. All performance indicators meet the requirements for automotive interior parts.

Key words: In-mold decoration technology, Automotive interior, Wood grain imitation, Gravure printing, Screen printing

作者简介：胡斌（1979—），男，学士学位，高级工程师，研究方向为汽车整车设计开发及制造。

通信作者：罗旦旦（1990—），女，工程师，研究方向为汽车开关及民用电气开关插排设计开发与制造。

参考文献引用格式：

胡斌，方建中，罗旦旦，等. 模内装饰技术在汽车内饰仿木质纹理制备中的应用与性能研究[J]. 汽车工艺与材料，2026(9)：43-51.

HU B, FANG J Z, LUO D D, et al. Research on the Application and Performance of In-mold Decoration Technology in the Preparation of Wood-like Textures for Automotive Interiors[J]. Automobile Technology & Material, 2026(9): 43-51.

1 前言

汽车产业的科技化与智能化升级推动内饰设计向自然质感、高端定制、耐久实用方向发展，木质纹理因兼具自然美学与质感体验，成为汽车内饰高端化设计的主流元素之一。天然木质材料存在加工工艺复杂、规模化量产难度大、成本高的问题，且在汽车内饰高温、高湿、多摩擦的工作环境下，易出现腐烂、变形、褪色等，难以满足汽车内饰件的工业化生产与长期使用要求，因此仿木质纹理的制备技术成为行业关注热点。

模内装饰（In-Mold Decoration，IMD）技术作为塑料制品表面装饰的先进工艺[1]，以“先装饰，后注塑”为核心实现装饰层与塑料基材的一体化熔合成型，兼具装饰效果丰富、耐磨耐刮、环保无污染、无需二次加工等优势，已广泛应用于消费电子、家电制造等领域，近年来逐步成为汽车内饰表面装饰的核心工艺。IMD技术包含模内镶件注塑（In-Mold Labeling，IML）、模内转印（In-Mold Roller，IMR）、嵌片注塑（In-Mold Sticking，INS）三大细分工艺，各工艺在成型特性、表面性能、量产适配性上存在显著差异；而膜片印刷作为仿木质纹理制备的核心环节，凹版印刷与丝网印刷的工艺特性直接决定木纹的还原精度、层次感与仿真度。

本文围绕汽车内饰仿木质纹理的制备需求，系统分析IML、IMR、INS这3种IMD工艺的核心性能与内饰场景适配性，对比凹版印刷与丝网印刷的工艺特点，设计油墨层级试验设计（Design of Experiments，DOE）试验优化仿木纹视觉效果，并通过系列性能测试验证产品可靠性，旨在为汽车内饰仿木质纹理的工艺选型、参数优化与工业化生产提供参考。

2 IMD工艺体系核心特性及适配性分析

IMD技术通过将预印刷装饰薄膜置入注塑模具，利用树脂注塑的高温与高压实现薄膜与塑料件的一体化熔合，形成兼具装饰性与功能性的一体化产品，其3大细分工艺（IML、IMR、INS）在膜片特性、成型能力、表面性能、量产指标上的差异，是汽车内饰仿木质纹理工艺选型的核心依据[2]。

2.1 IML模内贴标工艺

IML工艺采用0.05~0.15 mm薄款单张冲切膜片，膜片由基材聚甲基丙烯酸甲酯/聚碳酸酯（PMMA/PC）复合膜、油墨层、胶合材料3层复合构成，经印刷、成型、冲切后精准置入注塑模具，注塑完成后膜片与基材永久结合，装饰层保留在产品表面。

IML工艺的核心优势为：

a. 表面采用透明聚对苯二甲酸乙二醇酯/聚碳酸酯（PET/PC）+表面硬化处理形成耐磨层，依据GB/T 6739—2022《色漆和清漆 铅笔法测定漆膜硬度》，表面硬度可达3H~4H（可定制至5H），耐刮擦性能良好。

b. 膜片拉伸率为10%~20%，可适配平面及中度曲面内饰件造型。

c. 能精准实现遮光/透光分区设计，支持字符、图案的透光效果。

d. 开发周期短，图案与颜色更改无需更换模具，量产良率可达95%以上。

e. 膜片与基材通过注塑成型一体，其背面粘合胶作用使膜片和塑胶紧密结合，无需添加溶剂型胶黏剂，符合汽车内饰环保要求。

其局限性为：

a. 注塑过程的温度、压力、速度控制精度要求高，模具结构设计复杂。

b. 对产品造型的壁厚、*R*角存在严格限制，易出现膜片起皱、*R*角开裂等缺陷。

c. 膜片冲切过程会产生5%~8%的边角料损耗，材料利用率偏低。

d. 适配场景为10万~100万数量级的中高量产规模，适配汽车小内饰件（按键、出风口、小饰条、控制面板等）等仿木质纹理的制备。

2.2 IMR模内热转印工艺

IMR工艺采用0.038~0.075 mm超薄连续卷筒膜，膜片由PET载体层、油墨层、背胶层构成，注塑时熔融塑料与背胶层结合，注塑完成后剥离聚对苯二甲酸乙二醇酯（Polyethylene Terephthalate，PET）载体层，仅留油墨层附着在产品表面形成装饰层。

IMR工艺的核心优势为：

a. 采用卷筒膜连续生产，量产效率极高，良率

可达98%以上。

b. 膜片损耗仅1%左右,材料利用率高。

c. 单产品加工成本最低,前期仅需注塑模加简易送膜机构,图案切换通过更换卷筒膜实现,无需开模。

d. 可实现精细图案的批量转印,适合平面内饰件的规模化生产。

其局限性为:

a. 无独立耐磨层,表面硬度≤2H,耐刮擦性能极差。

b. 油墨层仅通过物理结合附着在产品表面,在高温、高湿环境下易出现起皮、掉漆、褪色现象,耐候性差。

c. 膜片拉伸率<10%,仅适配平面或微浅曲面造型,轻微弧度即易导致油墨模糊、断线。

d. 存在最小订单量限制(一卷膜片约1 000 m,对应产品数量为6~13万件),小批量定制成本高。

适配场景为100万数量级以上的超大量产规模,仅可用于汽车非手持、低耐磨要求的平面低端内饰件,完全不适配仿木质纹理的核心内饰件制备。

2.3　INS嵌片注塑工艺

INS工艺为3D成型的IML升级工艺,又称嵌片注塑,采用0.3~0.5 mm厚款专用膜片,主要材质为丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene,ABS)、ABS/PMMA复合材料,经热吸塑成型为与内饰件匹配的3D造型后,作为嵌片置入注塑模具,注塑完成后膜片与基材一体化融合,形成3D装饰产品。

INS工艺的核心优势为:

a. 膜片经专用热吸塑工艺成型,拉伸率可达30%~50%,可完成三度拉伸与倒扣包膜,装饰区域更深,能精准适配汽车内饰复杂大曲面造型;

b. 膜片采用PMMA/ABS复合结构,PMMA层为专用耐磨层,表面硬度≥3H,耐刮擦、耐摩擦性能最优;

c. 能有效覆盖塑料基材的流痕、缩痕等缺陷,表面平整度高,无拼接痕迹;

d. 油墨层与膜片、基材一体化融合,耐湿热、耐老化、耐化学试剂性能优异,仿木质纹理的耐久性与仿真度最高。

其局限性为:

a. 设备与模具投入成本高,需配套专用热吸塑成型设备、3D冲切设备与高精度注塑模;

b. 量产为“吸塑-冲切-注塑”多工序衔接,效率低于IML、IMR工艺,量产良率为80%~90%(高端设备可达92%);

c. 膜片损耗率为8%~15%,总开发周期较长;

d. 因定位精度及膜片厚度,无法适配透光字符精度要求高的场景;

e. 单产品加工成本高。

适配场景为1万~10万数量级的低中量产规模,适配汽车内饰核心件(门板、仪表台、中控面板、扶手箱等)复杂大曲面的仿木质纹理制备,是目前高端汽车内饰仿木质纹理的最优工艺。

2.4　3种IMD工艺核心性能及仿木纹适配性对比

为直观对比3种工艺的适配性,将其核心性能指标与仿木质纹理制备需求结合,如表1所示,为工艺选型提供直接依据。

表1　3种IMD工艺核心性能及仿木纹适配性对比

对比维度	IMR	IML	INS
膜片厚度/mm	0.038~0.075	0.05~0.38	0.3~0.5
表面硬度	≤2H,耐刮性差	3H~4H(可定制5H),耐刮性良好	3H+,耐刮性最优
最大拉伸率	<10%,仅适配平面/微浅曲面	10%~20%,适配平面/中度曲面	30%~50%,适配复杂大曲面/深度3D造型
透光效果	无,无法分区	优,精准分区+字符透光	一般,可实现基础分区透光
膜片与基材结合力	一般,高温/潮湿易油墨起皮	良好,粘合胶处理提升结合力	优,无缝融合,耐候性优异
量产良率/%	>98	>95	80~92
量产规模适配	100万级以上	10万~100万级	1万~10万级
单件加工成本	最低	中等	最高
材料损耗率	<1%	5%~8%	8%~15%
汽车内饰适配部件	非手持、低耐磨低端平面件	按键、出风口等中小曲面件	门板、仪表台等核心大曲面件
仿木质纹理适配性	完全不适配	中等适配	最优适配

3 仿木质纹理的印刷工艺选择与匹配

膜片印刷是仿木质纹理制备的核心环节，印刷工艺的精度、层次感、还原度直接决定仿木纹的仿真效果[3]，目前行业内用于IMD膜片仿木质纹理印刷的主流工艺为丝网印刷与凹版印刷，二者在印刷原理、墨层特性、生产效率上差异显著，需结合IMD工艺的成型特性、量产规模及汽车内饰仿木纹的制备需求进行精准匹配。

3.1 印刷工艺核心原理

3.1.1 丝网印刷

丝网印刷为漏印式印刷，以丝网为印版，通过制版在丝网上形成与木纹匹配的图文区（网孔通透）与非图文区（网孔封闭），利用刮板施压使油墨透过通透网孔漏印到膜片表面，形成装饰层。

其印刷精度由网目数（目/英寸，1英寸长度上网纱的孔眼数量）决定，因单个印刷网点和细线条至少需占据2个网孔才能稳定漏印，丝印的最稳定等效加网线数约为网目数的1/2，受网目数、网纱类型、油墨黏度限制，量产加网线数为80~150 LPI，工艺极限约200 LPI。

3.1.2 凹版印刷

凹版印刷为网点式雕刻印刷，以钢制/铜制滚筒为印版，经电子/激光雕刻在滚筒表面形成与木纹匹配的大小、深浅不同的网穴（凹坑），滚筒转动时蘸取油墨，采用刮刀刮去滚筒表面多余油墨，仅留网穴内油墨，通过加压将网穴内油墨转移到膜片表面，形成由细微网点组成的装饰层。

凹版印刷加网线数由雕刻工艺精度决定，无物理性网孔限制，量产加网线数可达175~300 LPI，工艺极限为800 LPI（量产）/2 000 LPI（定制），能实现极精细的网点排布，精准还原天然木纹的细微纹理与渐变层次。

3.2 丝网印刷与凹版印刷核心特性对比

2种印刷工艺的核心特性差异直接影响仿木质纹理的效果与生产效率，具体对比如表2所示。

表2 丝网印刷与凹版印刷核心特性对比

对比维度	丝网印刷	凹版印刷
墨层厚度/μm	6~8，较厚	1~2，薄且均匀、饱和
墨层效果	立体感、遮盖力极强，有触感	层次细腻，色彩丰富，无明显触感，仿真度高
纹理还原能力	适合大色块、粗纹理，多色渐变实现较难	精准还原细微层次与渐变效果，天然木纹仿真度最优
量产加网线数/LPI	80~150	175~300
走料方式	间歇式/平压式，膜片固定/轻移	连续式，多辊筒牵引，适配卷筒膜
生产速度/m·min^{-1}	10~30，低速	100~300，高速
烘干方式	常温紫外线固化/低温烘干，膜片模量稳定，无变形	高温烘干（60~100 ℃），膜片易拉伸、变形
制版工艺	感光制版，工艺简单，周期短，成本低	电子/激光雕刻，工艺复杂，周期长，成本极高
换版效率	高，方便快捷，适合小批量定制	低，调试耗时久，适合大批量规模化生产
批量适配性	中小批量、定制化生产	超大批量、标准化生产
膜片变形风险	极低，不影响后续成型	较高，易影响IMD工艺后续热吸塑/注塑成型

3.3 印刷工艺与IMD工艺的匹配原则

结合汽车内饰仿木质纹理的仿真度需求、成型特性、量产规模，以及2种印刷工艺、3种IMD工艺的核心特性，形成工艺精准匹配原则，避免因工艺不匹配导致的纹理失真、膜片变形、生产效率低下等问题，具体匹配方案如下：

a. 方案1：丝网印刷+IML工艺。丝网印刷制版成本低、换版效率高、膜片变形风险极低，与IML工艺中小批量、中度曲面成型、中小内饰件制备的需求高度适配；丝网印刷墨层立体感强，能实现仿木质纹理的基础层次感，满足汽车中小内饰件的仿木纹视觉需求。该组合为汽车中小内饰件仿木质纹理制备的高性价比选择，适合10万~100万数量级的中高量产、多款式定制场景。

b. 方案2：凹版印刷+INS工艺。凹版印刷能精准还原天然木纹的细微层次与渐变效果，仿真度为行业最优，与INS工艺核心内饰件、高仿真度、复杂大曲面成型的需求高度适配；虽凹版印刷膜片

有轻微变形风险,但INS工艺前期需热吸塑成型,可对膜片变形进行精准校正,不影响后续注塑成型。该组合为汽车高端核心内饰件仿木质纹理制备的最优选择,适合1万~10万数量级的低中量产、高端定制场景。

IMR工艺因耐候性、耐刮性极差,完全不适配仿木质纹理制备,故无对应的印刷工艺匹配方案[4]。

4　仿木质纹理的油墨层级优化设计

油墨层级的结构设计、油墨配比与排列顺序,直接决定仿木质纹理的光泽度、层次感、哑光效果,同时影响膜片的耐磨性、附着力与耐候性[5]。汽车内饰仿木质纹理要求为低光泽、强哑光、层次感丰富,避免强光反射影响驾驶视野,因此本文聚碳酸酯(Polycarbonate, PC)基膜(IML/INS工艺通用基材)为核心基材,围绕汽车内饰仿木纹的哑光、高仿真需求,设计多组油墨层级DOE试验,通过调整黑色纹理层含黑量、哑光层添加比例、油墨层级排列顺序,优化仿木纹的视觉效果与物理性能。

4.1　试验设计

4.1.1　试验基材与油墨

基材采用PC膜,厚度为0.15 mm(IML)/0.3 mm(INS),符合汽车内饰环保标准。

油墨采用专用IMD耐温油墨(耐注塑高温200 ℃以上),包含底色油墨、黑色纹理油墨、透明光油、哑光油墨、粘结剂油墨,均为行业成熟产品。

4.1.2　油墨层级设计思路

仿木质纹理油墨层级从下到上核心结构依次为粘结剂层、底色层、纹理层、光油层、哑光层。粘结剂层提升油墨层与PC基材的结合力,防止起皮、脱落;底色层奠定仿木质纹理的基础色调,提升纹理层遮盖力;黑色纹理层通过调整含黑量,实现木纹年轮的深浅对比与层次感;光油层用于缓冲注胶口压力,避免纹理油墨被冲走,影响外观效果;哑光层用于提升表面耐磨性与光泽度,可搭配哑光油墨实现哑光效果、调整光泽度。

4.1.3　DOE试验方案

设计4组油墨层级方案,其中DOE4-1~DOE4-3为7层基础结构,仅调整黑色纹理层含黑量与哑光油墨添加比例,研究单一变量对光泽度的影响;DOE4-4为8层优化结构,在基础结构上增加独立满面哑光层,优化油墨层级排列顺序,研究结构优化对视觉效果的提升作用。所有方案的基础油墨厚度、固化工艺保持一致,确保试验变量唯一。试验方案及测试结果如表3所示。

表3　仿木质纹理油墨层级DOE试验方案及测试结果

油墨层级	DOE4-1	DOE4-2	DOE4-3	DOE4-4
5				满面哑光层(保护层)
4				透明光油纹理2层(触感)
3				黑色纹理层(光油+6%黑油墨)
2	满面哑光层(保护层)	满面哑光层+0.5%白(保护层)	满面哑光层(保护层)	底色(浅棕木色油墨)
1	透明光油纹理2层(触感)	透明光油纹理2层(触感)	透明光油纹理2层(触感)	白色(字符白)
0	PC基膜	PC基膜	PC基膜	PC基膜
−1	黑色纹理层(光油+6%黑)	黑色纹理层(光油+6%黑)	黑色纹理层(光油+9%黑)	黑色3层(盖底,挡光)
−2	底色(浅棕木色油墨)	底色(浅棕木色油墨)	底色(浅棕木色油墨)	光油3层(抗浇口冲墨)
−3	黑色3层(盖底,挡光)	黑色3层(盖底,挡光)	黑色3层(盖底,挡光)	粘结剂2层(提升结合力)
−4	白色(字符白)	白色(字符白)	白色(字符白)	
−5	光油3层(抗浇口冲墨)	光油3层(抗浇口冲墨)	光油3层(抗浇口冲墨)	
−6	粘结剂2层(提升结合力)	粘结剂2层(提升结合力)	粘结剂2层(提升结合力)	
光泽度/GV	8.1	7.9	8.2	7.3

4.2 试验结果分析

4 组 DOE 方案均实现了汽车内饰仿木质纹理所需的哑光效果，光泽度控制在 7.3~8.2 之间，符合行业哑光设计要求（光泽度<9），通过对比试验结果，得出以下核心结论：

a. 面保护层白油墨比例对光泽度的影响：对比 DOE4-1 与 DOE4-2，在其他层相同的情况下，表面保护层增加 0.5% 白油墨，光泽度从 8.1 降至 7.9，说明保护层白油墨比例与光泽度呈负相关，提升保护层白油墨比例可有效降低光泽度，强化哑光效果。

b. 黑色纹理层含黑量对光泽度的影响：对比 DOE4-1 与 DOE4-3，在其他层相同的情况下，黑色纹理层含黑量从 6% 提高至 9%，光泽度从 7.9 升至 8.2，说明黑色纹理层含黑量与光泽度呈正相关，含黑量过高会提升膜片表面反光性，降低哑光效果，因此仿木质纹理黑色纹理层含黑量不宜过高，6% 为最优比例。

c. 油墨层级排列对光泽度与层次感的影响：DOE4-4 通过增加独立满面哑光层，将哑光层从光油混合层调整为单独顶层，同时优化纹理层、底色层排列顺序，光泽度降至 7.3，为 4 组方案中最低，且木纹的深浅对比、层次感更丰富。说明独立哑光层的顶层设计是实现低光泽、强哑光的关键，同时合理的油墨层级排列可提升仿木质纹理的层次感与仿真度。

d. 功能层的核心作用：粘结剂双层设计可有效提升油墨层与 PC 基膜、塑料基材的结合力，避免后续注塑、服役过程中出现起皮、脱落；透明光油纹理层可在实现木纹细节的同时，提升表面耐磨性。

综上，DOE4-4 为仿木质纹理油墨层级的最优方案，7.3 的低光泽度满足汽车内饰哑光需求，且层次感与仿真度最优，可作为后续工业化生产的标准方案。

5 仿木质纹理产品的性能测试与验证

为验证丝网印刷+IML 工艺组合制备的仿木质纹理产品的可靠性，依据 JT1-9900-10-1《汽车内饰零件通用技术条件》、GB/T 5478—2008《塑料 滚动磨损试验方法》等，对产品开展基础力学性能、耐候性、耐化学试剂性能 3 大类严苛试验，测试样品为按最优油墨层级方案（DOE4-4）制备的副仪表板开关盖板。

5.1 基础力学性能测试

基础力学性能聚焦汽车内饰件的耐磨、耐刮、附着力，为核心使用性能，测试方法与结果如下：

a. 表面耐磨损测试：采用 CS10 砂轮，施加 500 g 载荷，进行 600 个循环磨损测试。测试结果如图 1、图 2 所示，测试件磨损区域无明显划痕、露底现象，雾度变化值<3%，满足汽车内饰件耐磨要求（雾度变化值<5%）。

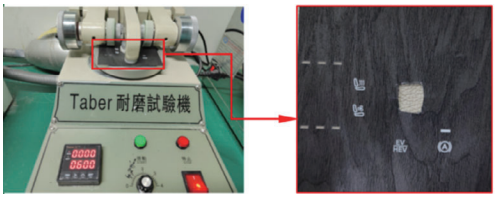


图 1 耐磨损试验前



图 2 耐磨损试验后

b. 表面耐刮擦测试：使用 Φ1 mm 半球形金属棒，施加 13 N 的力在产品表面匀速刮擦。测试结果如图 3、图 4 所示，测试件表面仅出现轻微擦痕，无刺穿、开裂、露底现象，表面硬度与抗刮性优异，可抵御汽车内饰日常使用中的刮擦损伤。



图 3 耐刮擦试验前

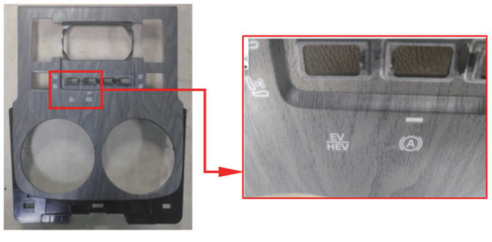


图 4 耐刮擦试验后

c.薄膜附着力测试:按照百格测试标准[7],采用1 mm间距划格刀划格,3M 610胶带粘合1~2 min后垂直瞬间撕离。测试结果如图5、图6所示,测试件划格区域无油墨脱落、起皮现象,脱落面积<5%,达到附着力0级标准,油墨层与基材结合力稳定,满足长期使用要求。



图5　附着力试验前

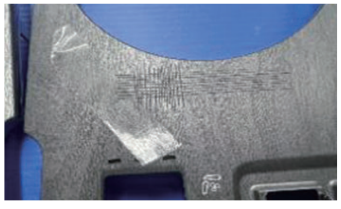


图6　附着力试验后

5.2　耐候性测试

耐候性聚焦汽车内饰件在高温、高湿、温度交变服役环境下的性能稳定性,测试方法与结果如下:

a.表面耐光性测试:采用氙灯老化试验,辐照度1.2 W/m²@420 nm、黑板温度89 ℃、相对湿度50%,照射3.8 h后,在黑板温度38 ℃、相对湿度95%环境下放置1 h,循环测试403.2 h。测试结果如图7、图8所示,测试件表面无明显黄变、褪色、粉化现象,灰度、色牢度均大于4级,耐光性优异,可抵御车内长期光照影响。

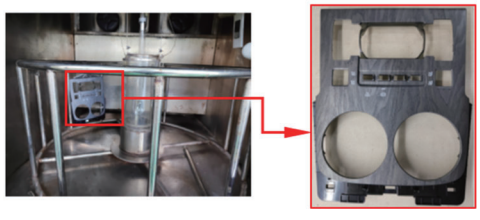


图7　耐光性试验前



图8　耐光性试验后

b.温度冲击试验:将样件置于高低温试验箱,-40 ℃低温存放30 min后,10 s内切换至95 ℃高温存放30 min,为1个循环,连续测试100个循环。测试结果如图9、图10所示,测试件表面无脱落、开裂、变形现象,油墨层与基材无分离,标识内容清晰可读,能适应汽车内饰极端高温与低温的交变环境。

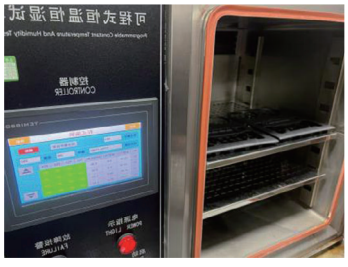


图9　温度冲击试验前



图10　温度冲击试验后

c.湿热试验[6]:将样件置于恒温恒湿试验箱,温度(65±1)℃、相对湿度90%±2%,持续放置240 h,每72 h检查一次。测试结果如图11、图12所示,测试件无起泡、开裂、油墨脱落现象,表面无腐蚀、发黄、变形,耐湿热性能良好,解决了天然木质材料易受潮腐烂的弊端。



图11　湿热试验前



图12　湿热试验后

5.3 耐化学试剂测试

汽车内饰在使用过程中易接触酒精、饮料、清洁剂等化学试剂，因此需开展耐化学试剂性能测试，测试方法如下：选取汽车内饰日常接触的13类典型试剂（可口可乐、果粒橙、雀巢咖啡、白猫玻璃清洁剂、威猛先生去污剂、PV3964护手霜、SPF25防晒霜、≥92%食用酒精、92#汽油、风油精、3类主流香水、酸性人工汗液（pH值5.5）、碱性人工汗液（pH值8.0）），用30 cm×30 cm尺寸纯棉毛巾蘸取试剂后，敷在样件表面，空气干燥15 s后常温存放48 h。测试结果如图13、图14所示，测试件表面均无变色、起泡、开裂、油墨脱落现象，标识内容清晰可读，无任何损伤，耐化学试剂性能优异，可适应汽车内饰复杂的化学接触环境。

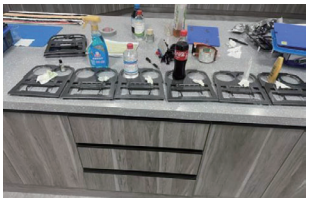


图13 耐化学试剂试验前

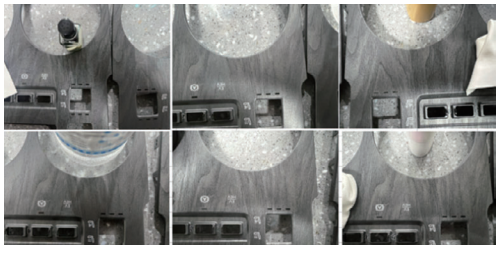


图14 耐化学试剂试验后

综合整体测试结果，丝网印刷+IML工艺组合，按最优油墨层级方案制备的汽车内饰仿木质纹理产品，各项性能指标均满足行业标准与汽车内饰使用要求，可靠性与耐久性优异，可替代天然木质材料实现工业化生产。

6 结束语

本文通过对IMD工艺体系、印刷工艺适配性、油墨层级优化的系统研究，以及产品性能的全面验证，得出以下核心结论：

a. IMD三大工艺中，INS工艺凭借30%~50%的高拉伸率、3H+的表面硬度、优异的耐候性与复杂大曲面成型能力，是汽车内饰核心件仿木质纹理制备的最优选择；IML工艺适合中小内饰件制备；IMR工艺因耐刮、耐候性差，完全不适配仿木质纹理制备。

b. 印刷工艺与IMD工艺的最优匹配组合为：凹版印刷+INS、丝网印刷+IML，其中凹版印刷+INS适配高端核心内饰件高仿真度、复杂大曲面需求，丝网印刷+IML适配中小内饰件高性价比、多款式定制需求。

c. 仿木质纹理油墨层级的最优方案为DOE4-4，通过独立满面哑光层顶层设计、6%黑色纹理层含黑量、合理的层级排列，可实现7.3的低光泽度，哑光效果与木纹层次感表现优异，满足汽车内饰仿木纹的视觉需求。

d. 按最优工艺组合与油墨层级方案制备的仿木质纹理产品，通过了耐磨损、耐刮擦、温度冲击、湿热、耐化学试剂等严苛试验，各项性能指标均满足汽车内饰件行业标准，彻底解决了天然木质材料加工复杂、耐候性差、易腐烂变形的问题，具备工业化生产与实际应用价值。

未来汽车内饰仿木质纹理的制备技术可从以下方面进一步优化与研究：

a. 轻量化膜片开发：研发高拉伸率、超薄型INS专用膜片（厚度<0.2 mm），降低膜片质量与成本，同时优化膜片配方，提升材料利用率。

b. 环保型油墨体系研发：开发水性IMD耐温油墨、无溶剂油墨，替代传统溶剂型油墨。

c. 智能表面整合设计：将仿木质纹理与汽车内饰智能表面技术结合，实现“仿木纹装饰+触控感应+背光、工作指示显示”一体化设计，提升汽车内饰的智能化水平。

d. 数字化木纹复刻技术：利用3D扫描、高清成像、数字化建模技术，精准复刻天然珍贵木材的纹理细节，结合高精度凹版雕刻工艺，实现仿木质纹理的“高保真复刻”。

e. IMD工艺效率提升：研发INS工艺“热吸塑-冲切-注塑”一体化成型设备，减少工序衔接时间，提升量产效率；优化凹版印刷制版工艺，开发快速雕刻、柔性制版技术，缩短制版周期。

f. 多工艺融合：探索IMD工艺与激光雕刻、3D打印、水转印等工艺的融合，实现仿木质纹理的立体雕刻、渐变色彩、个性化定制。

参考文献

[1] 陶永亮, 任登安, 田书竹, 等. 模内装饰技术在汽车外饰件上的应用[J]. 模具制造, 2024, 24(1): 37-40.

[2] 李建明, 王强. IMD工艺在汽车内饰件中的应用与发展[J]. 汽车工艺与材料, 2023(8): 15-21.

[3] 张莉, 陈明. 仿木质纹理塑料表面装饰工艺的优化[J]. 塑料工业, 2024, 52(3): 45-50.

[4] 王浩, 刘娟. 凹版印刷与INS工艺结合的汽车内饰仿木纹制备技术[J]. 包装工程, 2024, 45(5): 201-208.

[5] 全国涂料和颜料标准化技术委员会. 色漆和清漆 划格试验: GB/T 9286—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.

[6] 全国汽车标准化技术委员会. 道路车辆 电气及电子设备的环境条件和试验 第4部分：气候负荷：GB/T 28046.4—2011[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

AT&M