

热敏纸生产工艺对白纸老化的影响探索

梁冬梅

广东冠豪高新技术股份有限公司, 广东 湛江 52400

DOI:10.61369/ERA.2025120040

摘要：文章围绕热敏纸生产工艺与白纸老化的关联展开研究，结合实验数据与理论分析，探究原纸选择等生产环节对白纸老化的影响机制。通过对不同原纸、双酚类显色剂及工艺参数的对比实验，发现化机浆中木素含量等条件是影响白纸老化保留率的关键因素。研究表明，采用低木素含量原纸、不对称结构显色剂并优化涂布干燥工艺，可显著提升热敏纸白纸老化稳定性，为热敏纸生产工艺优化及质量提升提供理论与实践依据。

关键词：热敏纸生产工艺；白纸老化；影响

Exploration of The Impact of Thermal Paper Production Process on White Paper Aging

Liang dongmei

Guangdong Guanhao High-tech Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract： This article focuses on the relationship between the production process of thermal paper and the aging of blank paper, exploring the impact mechanism of production processes such as base paper selection on the aging of blank paper through experimental data and theoretical analysis. Through comparative experiments on different base papers, bisphenol developers, and process parameters, it was found that conditions such as the lignin content in chemimechanical pulp are key factors affecting the aging retention rate of blank paper. The study indicates that using base paper with low lignin content, developers with asymmetric structures, and optimizing the coating and drying processes can significantly enhance the aging stability of thermal paper's blank paper, providing theoretical and practical foundations for optimizing the production process and improving the quality of thermal paper.

Keywords： production process of thermal paper; aging of blank paper; impact

引言

近年来，国内热敏纸市场面临高端产品质量不足、低端产品毛率低且保存期短的困境，尤其在东南亚、非洲等高温高湿地区，白纸老化导致的褪色问题频发，严重影响产品竞争力。现有研究多聚焦于热敏材料本身，对生产工艺各环节与白纸老化的系统性关联探索较少。文章从热敏纸生产全流程出发，结合原纸选择、显色剂研发、涂布干燥等核心工艺环节，通过实验数据分析与理论推导，揭示生产工艺对白纸老化的影响规律，旨在为解决热敏纸白纸老化问题、优化生产工艺提供科学支撑，推动国内热敏纸产业技术升级与市场竞争力提升。

一、热敏纸生产工艺对白纸老化的影响研究背景

当前，全球热敏纸市场呈现“高端垄断、低端竞争”的格局，国外企业凭借先进技术，在高端热敏纸市场占据主导地位，其产品具有清晰度高、抗老化性强、保存期长等优势，而国内企业多集中于低端市场，面临多重质量与竞争难题。从产品质量来看，高端产品频繁出现质量投诉，主要问题包括清晰度下降、粘头、产品褪色及不防胶带等；低端产品则存在毛率低、保存期短的问题，尤其在高温高湿环境下，白纸老化速度加快，部分产品在4~6小时内即无法显色，无法满足用户对保存期的基本需求。

从市场竞争来看，国内低端热敏纸产品因技术含量低，多依靠价格抢占市场，利润空间狭小，且随着东海岛超规模项目等产能扩张，若市场占有率与产品质量无法同步提升，行业竞争形势将更为严峻。

二、热敏纸显色与老化理论基础

(一) 热敏材料组成与显色原理

热敏纸的热敏材料主要由电子给予体（热敏染料）、电子接受体（显色剂）及溶剂型化合物（调节剂）组成。电子给予体为

无色染料，常见类型包括三芳烷类、苊烷类等，决定显色后的颜色；电子接受体为显色剂，如酚类、羧酸类等，决定颜色深浅；溶剂性化合物多为醇类、酯类，通过熔点变化调节变色温度，当温度高于熔点时起消色作用，低于熔点时则促进发色^[1]。

以苊烷类染料（如化学名称为2-苯氨基-3-甲基-6-二丁氨基苊烷）为例，其显色过程依赖分子内部内酯环的开裂：无色的苊烷分子与显色剂接触时，内酯环断裂形成大的共轭体系，中心碳原子由 sp^3 杂化转为 sp^2 杂化，分子结构的变化使其吸收波长移至可见光区域，从而呈现颜色。但形成的有色体稳定性较差，在有机介质中易发生褪色反应，且受紫外线、氧气等因素影响，进一步缩短保存期。

（二）白纸老化褪色机制

白纸老化是指未显色的热敏纸在储存过程中，因内部成分反应或外部环境的影响，导致纸张白度下降、后续显色性能减弱的现象。从内部因素来看，原纸中的木素与显色剂的反应是核心诱因。木素是一种由苯基丙烷结构单元（ C_6-C_3 单元）通过醚键、碳-碳键连接而成的芳香族高分子化合物，分子中含有甲氧基（ $-OCH_3$ ）、羟基（ $-OH$ ）等官能基，其中甲氧基易与显色剂（如双酚类）中的羟基发生亲核取代反应，破坏显色剂的释放质子能力，导致后续显色困难。

三、热敏纸生产工艺对白纸老化的影响

（一）原纸选择对白纸老化的影响

原纸作为热敏纸的基材，其成分与性能直接影响白纸老化效果，核心差异在于木素含量，而木素含量又与原纸所用纸浆类型密切相关。根据纸浆类型，原纸可分为非化机浆原纸（国内原纸1、国外原纸2）与含化机浆原纸（国内原纸2、国内原纸3、国内原纸4），两类原纸在白纸老化保留率上呈现显著差异^[2]。

通过恒温恒湿老化实验（ $60^{\circ}C$ ，100%RH）发现，非化机浆原纸的白纸老化保留率显著更高：国内原纸1以化学浆为主，木素含量极低，在145小时老化后，白纸老化保留率仍能维持在80%以上；国外原纸1以脱墨浆为主，虽纸质较差且废纸来源不稳定，但因木素含量低于化机浆原纸，其老化保留率也优于含化机浆原纸。

含化机浆原纸因木素含量高，老化保留率普遍较低：国内原纸2、国内原纸3在45小时老化后，保留率降至20%~30%；国内原纸4在100小时老化后，保留率不足50%。木素对白纸老化的影响机制主要体现在其化学性质：木素分子中的甲氧基（ $-OCH_3$ ）易与显色剂中的羟基发生亲核取代反应，生成甲醇等产物，破坏显色剂的释质子能力，导致后续显色时无法有效与热敏染料反应，进而降低白纸老化保留率。此外，木素中的酚羟基在高温高湿条件下易发生氧化反应，生成有色物质，直接导致纸张白度下降。

（二）显色剂类型与配比对白纸老化的影响

显色剂作为热敏纸的核心组成部分，其分子结构、类型及配比是影响白纸老化的关键因素。根据化学结构，常用显色剂可

分为双酚类（如2,2-双(4-羟基苯基)丙烷、4,4'-二羟基二苯砜、4-羟基-4'-异丙氧基二苯砜、4,4'-磺酰基双[2-(2-丙烯基)]苯酚）、苯甲酸衍生物等，其中双酚类显色剂因性能稳定、成本适中，在热敏纸生产中应用最广，但不同双酚类显色剂的白纸老化性能差异显著^[3]。

1. 显色剂分子结构的影响

分子结构对称性是决定双酚类显色剂老化性能的核心因素。实验数据表明，结构对称的显色剂（如2,2-双(4-羟基苯基)丙烷、4,4'-二羟基二苯砜）白纸老化保留率低：在6小时老化后，2,2-双(4-羟基苯基)丙烷的保留率不足40%，24小时后降至20%以下；而结构不对称或苯环上带有支链的显色剂（如4-羟基-4'-异丙氧基二苯砜、4,4'-磺酰基双[2-(2-丙烯基)]苯酚、BPC、BPOPPA）保留率显著更高：4-羟基-4'-异丙氧基二苯砜在6小时老化后保留率约80%，24小时后仍维持在70%以上；4,4'-磺酰基双[2-(2-丙烯基)]苯酚在145小时老化后，保留率仍能达到60%以上。

这一差异的本质是空间位阻效应：对称结构的显色剂分子空间阻碍小，木素中的甲氧基易进攻其羟基，发生亲核取代反应；而不对称结构或带支链的显色剂，支链形成的空间位阻增大了甲氧基与羟基的反应难度，从而减少显色剂的损耗，提升白纸老化保留率。例如，4-羟基-4'-异丙氧基二苯砜（4-羟基-4'-异丙氧基二苯砜）的异丙氧基支链，能有效阻挡木素活性基团的进攻，延缓老化反应。

2. 显色剂配比的影响

显色剂在面涂料中的配比也会影响白纸老化性能。以SY203型热敏纸（基于华泰原纸）为例，通过调整显色剂比例进行实验发现：当显色剂比例从20%提升至27%时，白纸老化保留率在4小时后从55%提升至65%；继续提升至30%，保留率进一步提升至68%，但此时增感剂比例降低，导致显色清晰度下降，从1.20D（光密度值）降至0.90D，无法满足打印清晰度要求。

由此可见，显色剂配比存在最优区间：过高的配比虽能提升老化保留率，但会牺牲显色性能；过低则老化保留率不足。实际生产中需根据产品需求，在老化性能与显色清晰度之间寻求平衡，一般将显色剂比例控制在25%~28%，既能保证白纸老化保留率在60%以上（4小时老化后），又能维持1.00D以上的显色清晰度^[4]。

（三）涂布工艺对白纸老化的影响

涂布工艺包括预涂料涂布与面涂料涂布，其核心参数（涂布量、均匀度、涂布速度）直接影响涂层结构与原纸-涂层界面状态，进而作用于白纸老化过程。

1. 预涂料涂布的影响

预涂料的作用是隔离原纸与面涂料，减少木素向面涂层的迁移。实验表明，预涂料涂布量与均匀度对老化性能影响显著：当预涂料涂布量从 $5g/m^2$ 提升至 $8g/m^2$ 时，基于国内原纸1的热敏纸（使用2,2-双(4-羟基苯基)丙烷显色剂）在24小时老化后，保留率从25%提升至38%；若涂布量不足 $5g/m^2$ ，预涂层存在孔隙，木素易通过孔隙迁移至面涂层，加速显色剂损耗；若涂布量

超过10g/m²，虽能进一步提升保留率至42%，但会增加生产成本，且导致纸张厚度增加，影响打印适配性。

2. 面涂料涂布的影响

面涂料涂布量决定了热敏材料的总量，直接影响白纸老化后的显色能力。以107型热敏纸（非化机浆原纸）为例，当涂布量从12g/m²降至8g/m²时，100小时老化后，保留率从78%降至65%，主要原因是涂布量不足导致显色剂总量减少，少量损耗即会显著影响后续显色；若涂布量提升至15g/m²，保留率可提升至82%，但会增加原材料成本，且可能导致涂层附着力下降，出现掉粉现象。

涂布速度也会影响涂层质量：速度过快（超过20m/min）会导致涂层出现条纹，局部厚度不均；速度过慢（低于10m/min）则会降低生产效率。综合成本与性能，面涂料涂布量一般控制在10~13g/m²，涂布速度控制在12~18m/min，可在保证老化性能的同时，兼顾生产效率与成本。

（四）干燥工艺对白纸老化的影响

干燥工艺包括热风干燥温度、湿度与时间，其核心作用是去除涂层中的水分，减少水分对木素-显色剂反应的促进作用。实验数据显示，干燥不充分是导致白纸老化加速的重要因素：当热风干燥温度从80℃降至60℃时，涂层水分残留率从3%提升至8%，基于华泰原纸的热敏纸（4-羟基-4'-异丙氧基二苯酚显色剂）在45小时老化后，保留率从65%降至52%；若干燥时间从3分钟缩短至1分钟，水分残留率提升至10%，保留率进一步降至48%。

水分对老化的促进机制主要体现在两方面：一是水分作为介质，增强木素与显色剂分子的运动能力，加速反应速率；二是水分会导致木素中的醚键断裂，生成更多活性基团（如酚羟基），进一步增加与显色剂的反应概率。实际生产中，需根据涂布量调整干燥参数：当涂布量为10~13g/m²时，热风干燥温度控制在85~95℃，湿度控制在15%~20%，干燥时间控制在2.5~3.5分钟，可将涂层水分残留率控制在2%~4%，有效延缓白纸老化^[9]。

（五）压光工艺对白纸老化的影响

压光工艺通过压力与温度的作用，优化纸张表面平滑度与涂层致密性，间接影响白纸老化性能。实验发现，压光压力与温度

存在最优范围：当压力从500kPa提升至800kPa时，纸张表面平滑度从200s（贝克平滑度）提升至400s，基于国内原纸3的热敏纸（4,4'-二磺酰基双[2-(2-丙烯基)]苯酚显色剂）在100小时老化后，保留率从58%提升至65%；继续提升压力至1000kPa，平滑度提升至500s，但保留率仅提升至66%，且可能导致涂层破裂，出现“压花”现象。

压光温度的影响也类似，温度从60℃提升至90℃时，涂层致密性增强，木素迁移难度增大，保留率从60%提升至65%；温度超过100℃，则可能导致热敏材料提前反应，出现“预显色”，影响纸张白度。综合来看，压光工艺参数宜控制为：压力700~800kPa，温度80~90℃，此时纸张平滑度可达350~400s，涂层致密性良好，既能减少木素迁移，又能避免涂层损伤，保障白纸老化性能。

（六）原纸润湿工艺对白纸老化的影响

原纸在涂布前需经过润湿处理，目的是调节原纸水分含量，提升涂层附着力，但润湿程度会影响原纸中木素的活性。实验表明，原纸水分含量控制在6%~8%时，白纸老化性能最优：以国内原纸4为例，水分含量为7%时，24小时老化后保留率为57%；若水分含量降至4%，原纸脆性增加，涂布时易出现涂层开裂，保留率降至50%；若水分含量提升至10%，木素活性增强，与显色剂的反应速率加快，保留率降至52%。

四、结束语

文章系统研究了热敏纸生产工艺各环节对白纸老化的影响，明确了原纸木素含量、显色剂分子结构与配比、涂布干燥及压光分切工艺是关键影响因素，并提出针对性优化方案。通过原纸预处理、显色剂优化及工艺参数协同调整，可显著提升热敏纸白纸老化性能，如低端热敏纸产品优化后，24小时老化保留率从18%提升至58%，满足市场对保存期的基本需求。未来可进一步开展染料、胶乳等其他原材料与白纸老化的关联研究，建立更完善的工艺-性能理论体系，推动热敏纸产业技术升级。

参考文献

- [1] 赵海. 热敏纸的现代化生产工艺[J]. 上海轻工业, 2025(1): 162-165.
- [2] 王桂荣, 张立. 热敏纸高速涂布整饰设备[J]. 轻工机械, 2022, 40(2): 80-85.
- [3] 三菱高科技制纸欧洲公司对热敏纸提价[J]. 造纸信息, 2023(10): 56.
- [4] 崔叶, 田晓莉. 热敏纸的发展及生产工艺[J]. 家庭生活指南, 2021, 37(7): 35, 55.
- [5] 李燕. 两性PAM干强剂在热敏原纸中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(6): 1-2, 27.