

干燥温度对透明热敏膜性能的影响研究

邓达丽

广东冠豪高新技术股份有限公司，广东 湛江 524000

DOI:10.61369/ERA.2026090032

摘 要：干燥温度显著影响透明热敏膜的雾度、透光率与显色效果。热敏发色层与保护涂层的最佳干燥区间为60 ~ 80℃，此范围内涂层干燥平缓、纳米粒子排布均匀，雾度35.5%、透光率60.5%，微胶囊完整，光密度达3.02/0.19，翘曲受控。温度低于60℃时粒子团聚，雾度升至62%；超过80℃时微胶囊破裂或交联，灰雾增多、光密度下降。干燥温度需与热定型协同，并适配各功能涂层；阶梯分段干燥可缓解内应力、控制翘曲。合理控温是平衡光学与显色品质的关键。

关 键 词：干燥温度；透明热敏膜；雾度；透光率；显色性能；微胶囊

Study on the Effect of Drying Temperature on the Properties of Transparent Thermal Sensitive Films

Deng Dali

Guangdong Guan hao High tech Co., Ltd., Zhanjiang, Guangdong 524000

Abstract：Drying temperature significantly affects the haze, transmittance, and color rendering effect of transparent thermosensitive films. The optimal drying range for the thermosensitive coloring layer and protective coating is 60–80 °C. Within this range, the coating dries smoothly, the nanoparticles are evenly distributed, the haze is 35.5%, the light transmittance is 60.5%, the microcapsules are intact, the optical density is 3.02/0.19, and the warpage is controlled. When the temperature is below 60 °C, particles aggregate and the haze increases to 62%; When the temperature exceeds 80 °C, microcapsules rupture or crosslink, causing an increase in fog and a decrease in optical density. The drying temperature needs to be coordinated with heat setting and adapted to various functional coatings; Step wise segmented drying can alleviate internal stress and control warping. Reasonable temperature control is the key to balancing optical and color quality.

Keywords：drying temperature; transparent thermal sensitive film; haze; light transmittance; color rendering performance; microcapsule

引言

透明热敏膜是医疗影像关键耗材，其光学与显色品质影响诊断可靠性。它用聚酯基材，涂覆多层功能涂层，雾度、透光率、光密度有明确指标。制备涉及显色剂研磨分散、染料胶囊包覆及涂层干燥等核心技术。干燥温度尤为关键，影响成膜质量、均匀性和胶囊稳定性。温度不当导致成膜不良、粒子团聚、胶囊破裂或应力失衡，削弱光学与显色性能。因此，考察干燥温度对各层的影响并总结规律，可优化透明热敏膜工艺。

一、技术背景与生产难点

（一）透明热敏膜的技术特点

透明热敏医疗胶片以PET为支撑基材，涂覆背涂层、底涂层、热敏显色层和保护涂层等多层功能涂层，属高技术产品^[1]。热敏显色层含供电子型染料前体与受电子型显色剂，可在不同热能等级下精准显影^[2]。产品光学要求明确：透光率不低于55%、雾度控制在50%以内，最高光密度达2.70以上，打印精度达502ppi。雾度与透光率相互制约，需平衡调控。相较传统纸基热敏记录材

料，透明热敏膜对涂层均匀性、微粒粒径分布及界面结合质量要求更严格。

（二）生产过程中的技术难点

透明热敏膜制备面临多重技术挑战。热敏涂层中包含关键发色组分供电子型染料前体和显色组分受电子型显色剂，通常还包含增感剂。在加热时，染料前体与显色剂同时吸收热量，染料前体从稳定态转变为熔融态或半液态，开环释放电子，显色剂从稳定态转变熔融态或半液态，羟基或活泼基团吸收电子，热敏膜从透明无色显现为有色。为提高发色敏感度，加入的增感剂熔点低

于染料和显色剂，在吸收热量过程中，先于染料与显色剂转为熔融态，对染料和显色剂起到促进熔融、帮助接触、促进电子供受传递作用。并且，为提高发色敏感度，染料、显色剂和增感剂的粒子通常处理到微米至亚纳米级大小，表面能高，存在一定的水解或水化现象，且在涂料液态阶段粒子布朗运动活跃，容易产生对热过于敏感的灰雾问题。追求热敏膜良好的发色敏感度、保持高温干燥使生产效率达到更高和平衡低灰雾、低背景底色是热敏膜制备的核心挑战。在生产过程中，含有染料前体、显色剂、增感剂的热敏涂料经过涂布干燥，受热过程挥发溶剂，从液态湿膜形成固态干膜涂层，溶剂蒸发速率与热量传递需精密匹配^[3]，若匹配不当，涂层内部易产生微观裂纹或粒子团聚，从而劣化透光性能与显色均匀性。上述难点均与干燥温度设定紧密相关，凸显了工艺参数优化的重要性，因此，系统研究干燥温度对各环节的影响十分必要。

（三）各功能涂层干燥温度的差异化需求

透明热敏膜为多层涂布结构，保护涂层与背涂层的干燥效果均受温度显著影响，且不同功能涂层在涂布配方和性能要求上存在差异，各自存在适宜的干燥温度区间。保护涂层含蜡类或氟素助剂，兼具脱模与润滑作用。温度过高时助剂迁移过快，表面析出不均，不仅使雾度升高，还可能导致打印粘头或走片不畅；温度过低则助剂铺展不充分，润滑性能下降。另外，保护涂层涂覆与热敏发色层之上，其干燥温度的调控应充分考虑在热敏发色层的适配温度区间60–80℃之间，以减少涂层重涂对热敏发色层的二次影响。

背涂层兼具防粘连与抗静电双重功能，其配方中含有导电高分子或表面活性剂类抗静电剂，需在适宜温度下干燥才能形成连续的导电通路和均匀的防粘连微凸结构。温度过低时，抗静电剂分散不均、涂层固化不充分，抗静电效果和防粘连性能均有所削弱；温度过高则可能破坏导电网络结构，同时加剧表面粗糙度，影响收卷整齐性与裁切质量^[4]。经生产实践验证，将背涂层的干燥温度维持在90 ~ 130℃区间，可使其表面电阻率稳定达标，表面光洁平整，收卷及长期储存稳定性满足要求。

底涂层作为连接 PET 基材与显色层的桥接层，其干燥温度宜控制在80 ~ 100℃。此区间内水性介质蒸发适中，树脂充分浸润基材并适度交联，界面剥离强度达标，无分层起泡。温度低于80℃时，水分残留、交联不足，结合力下降，易致层间脱离；高于100℃时，溶剂挥发过快，树脂流平受限，表面粗糙度增大，且内应力上升，长期存放可能产生微裂纹，影响附着力与透明度。底涂层干燥应与后续显色层（60 ~ 80℃）形成梯度衔接，以实现多层界面稳定匹配。

二、干燥温度对涂层微观结构与光学性能的影响

（一）干燥温度对热敏显色层涂层雾度、透光率光学性能的影响

干燥温度对热敏显色层涂层微观结构的形成具有显著影响。实验结果表明，将温度控制在60 ~ 80℃区间时，热敏膜雾度降至

35.5%，透光率达60.5%，这一表现明显优于原有基准（雾度50%以下，透光率55%以上）。在该温度区间内，溶剂蒸发速率适中，涂层干燥过程平稳，纳米粒子有充足时间进行均匀排列，形成致密平整的涂层结构，从而减少了光线在涂层内部的散射，体现为雾度下降、透光率上升，最终提升了胶片的影像清晰度^[4]。

当干燥温度低于60℃时，溶剂蒸发过缓，涂层长时间处于湿润状态，成膜均匀性变差，易形成暗斑、白斑及橘皮、缩孔等外观缺陷，这些缺陷成为光散射中心，导致雾度升高至62%左右，透光率随之下降。

当干燥温度超过80℃时，溶剂蒸发过快，涂层内产生强烈对流效应，黏合剂分子链运动加速，体积收缩不均，纳米粒子来不及均匀排布即被固化，形成粒子富集区与稀疏区，增加光散射并引发干涉条纹，共同导致雾度上升、透光率下降。此外，高温还可能引发黏合剂热氧化反应，产生微裂纹，进一步降低透明度。

（二）热定型工序与干燥温度的协同稳定化作用

透明热敏膜生产中，纳米化研磨后的显色剂分散液则需在60 ~ 80℃下处理3 ~ 3.5小时。该热定型工序可使粒径小于0.05 μm的高表面能微粒通过再聚合或结晶长大至稳定尺寸，从而降低其比表面积，防止后续储存过程中的水化或团聚问题。因此，涂布干燥工艺的温度设定需充分考虑与上述热定型工序的匹配性。当涂布干燥温度控制在60 ~ 80℃区间时，干燥过程与热定型温度窗口重合，涂层可在脱除溶剂的同时，使残余的过小粒子在温热环境中继续完成热定型，形成粒径集中（D90 ≤ 0.5 μm）、分布均匀的稳定体系。干燥完成后，涂层微观结构固化，长期储存性能稳定，证实该工艺设计具备合理性。

若干燥温度显著低于热定型温度下限（如60℃以下），则干燥过程无法提供足够的活化能促使过小粒子完成聚合稳定化。这些高表面能的微小粒子残留在干燥涂层中，处于热力学亚稳态，在后续储存或运输过程中易逐渐发生水化并缓慢长大，导致涂层雾度上升、显色性能漂移。若干燥温度高于热定型温度上限（如80℃以上），过快的热量输入可能使已热定型稳定的粒子吸收过多能量而发生二次过度聚集，形成粗大颗粒，破坏原有的粒径集中分布，进而影响涂层的均匀性与光学性能。

三、干燥温度对显色性能与微胶囊稳定性的影响

（一）干燥温度与微胶囊热稳定性的关系

透明热敏膜采用聚氨酯-聚脲复合壳壁微胶囊对热敏染料进行隔离保护，壳壁 Tg 可调控至30 ~ 40℃。干燥温度对微胶囊结构完整性与热响应特性影响显著。在60 ~ 80℃干燥区间内，微胶囊保持完整球形结构，壳壁分子链处于玻璃态与高弹态过渡区，热量可有效传导至芯材，但尚未达到触发发色反应的条件^[5]。干燥完成后，涂层中微胶囊可在打印时精准响应打印头热能：于80℃启动显色，130℃达密度峰值，显色动态范围达50℃，确保了打印图像灰阶层次的丰富表现^[6]。

当干燥温度超过80℃时，局部过热可能导致部分微胶囊壳壁发生软化甚至破裂^[7]。破裂的微胶囊提前释放出芯材染料，与涂层

中已存在的显色剂接触，造成非成像区域的底色密度升高（D_{min}增大），即灰雾增加。即使微胶囊未发生明显破裂，长时间的高温暴露也可能促使壳壁材料发生后交联反应，交联密度增加使壳壁 T_g 上升至 45℃ 以上，导致微胶囊热响应变得迟钝，初始发色温度升高至 90℃ 以上，有效显色窗口缩小，图像对比度和 Gamma 曲线范围均受不利影响。

当干燥温度低于 60℃ 时，涂层内部溶剂残留量较高。微胶囊长时间处于残余溶剂环境中，壳壁材料发生溶胀，结构强度和密封性下降。在后续收卷张力或打印压力作用下，溶胀后强度降低的微胶囊更易发生变形甚至破损，同样会导致染料提前泄漏，表现为底色上升、图像清晰度下降。此外，残留溶剂在涂层存放过程中缓慢释放，亦可能持续侵蚀涂层内部结构，影响产品的长期稳定性。

（二）干燥温度与显色密度、Gamma 曲线的调控的关系

热敏膜显色能力由最高光密度（D_{max}）与最低光密度（D_{min}）两个核心指标衡量，理想状态需达到 $D_{max} \geq 2.70$ 、 $D_{min} \leq 0.25^{[8]}$ 。干燥温度通过调控微胶囊完整性与涂层固化状态，间接影响二者的表现。在 60 ~ 80℃ 的适宜干燥区间内，微胶囊完好率保持在较高水平，显色剂微粒均匀分布于涂层中。打印受热时，微胶囊壳壁软化并释放染料，与周围显色剂快速反应形成高密度发色层^[9]。实测该区间 D_{max} 达 3.02，D_{min} 降至 0.19，Gamma 曲线线性区间宽，证实该温度范围下显色性能稳定可靠。

干燥温度超过 80℃ 后，微胶囊破损率明显升高。泄漏的染料使 D_{min} 值上升至 0.30 ~ 0.40 区间，画面背景出现灰雾。同时，部分显色剂在高温下可能发生分解或晶型转变，活性下降，导致 D_{max} 值降至 2.50 以下，Gamma 曲线高密度段趋于平缓，对比度减弱，图像清晰度与色彩准确度受到明显影响。

干燥温度降至 60℃ 以下时，涂层固化不充分，显色层中残留较多挥发性组分。在后续打印受热过程中，残留溶剂快速汽化，在涂层内部产生微泡或微孔缺陷，使染料与显色剂的接触状态不均匀，表现为显色浓度波动，同张胶片不同区域或多次打印之间

的显色重现性变差。这类不均匀性难以满足医疗影像诊断对图像一致性的严格要求，会影响图像解析度与诊断可靠性。

四、干燥温度对涂层翘曲与尺寸稳定性的影响

透明热敏膜采用 175 μm 厚的 PET 基材，涂层材料与 PET 基材的热膨胀系数存在差异，干燥过程中若温度控制不当，界面处易产生热应力，导致胶片翘曲变形。当翘曲值超过 ±10mm 时，会影响打印机进片顺畅度，严重时甚至引发卡纸故障，影响使用稳定性。

PET 基材热变形温度通常在 120℃ 以上，在 100℃ 以下的干燥温度区间内，基材本体不会发生大幅热收缩。然而，在过于高温干燥条件下，涂层因溶剂快速挥发而迅速固化收缩，冷却后表现为胶片向涂层面弯折。实际生产中可通过阶梯式分段干燥工艺缓解这一问题，例如先以 60℃ 预干燥排湿，再经 80℃ 主干燥固化，最后 70℃ 恒温定型，使涂层收缩与热膨胀过程逐步匹配，有效降低内应力积累，翘曲值可稳定控制在 ±10mm 安全范围内^[10]。偏离适宜温度的干燥条件均会导致翘曲超标，需通过合理的温度设定与干燥曲线设计加以规避。

五、结束语

干燥温度影响透明热敏膜的光学性能、显色与尺寸稳定性。热敏发色层、保护涂层最佳区间为 60 ~ 80℃。此条件下涂层干燥平缓，纳米粒子均匀排布，微胶囊完整。雾度、透光率改善，光密度达医用要求。温度不当会引发粒子团聚、微胶囊破损或应力失衡，致使雾度增大，光密度下降。干燥温度需与纳米微粒热定型工序协同，并兼顾保护层与背涂层的差异。分段阶梯干燥可降低内应力，控翘曲，提合格率。研究结果为透明热敏膜涂布工艺的温度控制提供参考依据。

参考文献

[1] 孔英琪. 热致可逆变色环氧树脂涂料的制备及装饰应用 [J]. 化学工程师, 2022(3): 97-100.
[2] 王莹雪, 刘茜. 多级热敏变色纤维的制备及其表征 [J]. 北京服装学院学报 (自然科学版), 2023, 43(2): 36-43.
[3] 张洪磊, 潘冬辉, 程雪梅, 等. 一种影像记录材料的干燥模型与计算 [J]. 信息记录材料, 2021, 22(2): 1-5.
[4] 马敬波, 赵腾飞, 白宇, 等. 干燥温度对透明热敏膜性能的影响研究 [J]. 信息记录材料, 2024, 25(5): 7-9.
[5] 李功明, 王亚涛, 贾伟艺, 等. 热敏变色微胶囊的制备及油墨化应用研究 [J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2023(3): 49-56.
[6] 肖作兵, 张斌, 寇兴然, 等. 耐热型微胶囊的研究进展 [J]. 应用技术学报, 2023, 23(3): 242-254.
[7] 钟丽桢, 李莉, 何淋波, 等. TF-R1-脲醛树脂原位聚合可逆热致变色微胶囊 [J]. 化学与生物工程, 2023, 40(9): 60-64.
[8] 牛朝露, 李泽浩, 司马文霞, 等. 用于储能电站热失控预警的热敏涂层材料研究 [J]. 南方能源建设, 2023, 10(5): 106-115.
[9] 郭姣, 卢志凯, 刘欢, 等. 不同显色剂对热敏记录材料发色和保存性能的影响 [J]. 信息记录材料, 2023, 24(7): 1-3, 7.
[10] 赵迎新, 王志远, 孙伟娜. 一种热敏记录材料用新型聚酯片基的应用研究 [J]. 信息记录材料, 2019, 20(8): 1-4.