

科技论坛

高透光 PC 光学 LED 灯罩的光学性能影响因素分析

张于兰

杭州临安中盛照明器材有限公司 311300

【摘要】随着LED照明向高光效、轻薄化与视觉舒适并重发展，高透光PC光学灯罩成为实现高出光效率与柔和配光的重要部件，但实际应用中常出现透光率与雾度难兼顾、热点与眩光抑制不足、黄变色偏导致一致性下降等问题。基于此，围绕透光率—雾度/散射—均匀性/眩光—色度稳定性指标体系，系统分析树脂本征与添加体系、壁厚几何与表面纹理、干燥塑化与注射保压冷却及排气流动等因素对光学性能的作用机理与耦合关系，以期高透光PC灯罩的指标设定与协同控制提供可复核的工程依据。

【关键词】高透光PC；LED灯罩；透光率；雾度

Analysis of Factors Affecting Optical Performance of High-Transmittance PC Optical LED Luminaires

Zhang Yulan

Hangzhou Lin'an Zhongsheng Lighting Equipment Co., Ltd. 311300

【Abstract】 With LED lighting evolving toward high luminous efficiency, lightweight design, and visual comfort, high-transmittance PC optical luminaires have become critical components for achieving superior luminous efficiency and soft light distribution. However, practical applications often face challenges such as difficulty in balancing transmittance and haze, insufficient suppression of hotspots and glare, and reduced uniformity due to yellowing. Based on this, this study systematically analyzes the mechanisms and coupling relationships of factors affecting optical performance, including resin properties and additive systems, wall thickness geometry and surface texture, drying and plasticizing processes, injection pressure holding, cooling, and exhaust flow, within the framework of the transmittance-haze/scattering-uniformity-glare-color stability index system. The aim is to provide verifiable engineering references for the specification setting and coordinated control of high-transmittance PC luminaires.

【Key words】 high-transparency PC; LED lampshade; light transmittance; haze;

引言

高透光PC光学LED灯罩兼具增透、配光与舒适照明作用，其性能并非由透光率单独决定，而由透光率与雾度/散射、均匀性与眩光、黄变与色偏等色度稳定性共同耦合。高透光要求会放大微弱散射源与界面反射影响，使杂质散射、取向应力双折射、壁厚曲率变化、表面纹理，以及焊线、困气、银纹、气泡等缺陷对局部光强与色度更敏感；干燥、熔体温度、注射保压与冷却路径也会塑形微结构与残余应力，影响透光、雾度与条纹等问题。围绕“指标—材料结构—工艺缺陷”梳理主导因素与作用链，可为在高透光前提下实现扩散均匀、眩光可控与色度稳定提供控制要点。

1 光学性能指标框架

1.1 透光率与雾度/散射

高透光PC光学LED灯罩的光学表现首先由透光率与雾度（散射能力）的协同决定。透光率反映可见光在材料吸收、界面反射与内部散射作用后的净透过水平，数值提升意味着光通损失降低；雾度刻画透射光偏离原传播方向的比例，体现扩散强度与散射角分布。二者构成“效率—扩散”的主权衡：雾度适度提高可削弱光源特征、柔化光斑边界并抑制热点，使观察面亮度更平滑；雾度过高则会增加散射损失，引发出光发白、照度不足与有效光效下降。评价口径宜将透射损失拆解为吸收损失、反射损失与散射损失，避免将“高透光”误解为“低雾度”，而应理解为在满足扩散与观感需求的前提下压缩不可逆损失，使透光率与雾度形成可复核的目标组合^[1]。

1.2 均匀性与眩光相关表现

均匀性强调出光面或观察面亮度分布的平滑一致,关键不在平均亮度高低,而在局部峰值是否尖锐、亮度梯度是否突变及分布是否连续稳定。评价需兼顾空间一致性与局部异常,避免单点过亮和区域性明暗分割。热点、亮度分区或条带明暗差易产生颗粒感、麻点感与带状阴影,并显著增加不适眩光;即便整体照度适中,只要局部对比过强也会刺眼疲劳。亮度梯度过陡还可能引发视线移动时的“跳变”不适。量化口径宜采用“峰值抑制+离散度控制”:以 L_{max}/L_{avg} 约束尖峰,以 L_{min}/L_{avg} 或离散度指标约束不连续,使舒适性要求可检验,并与透光率—雾度的效率扩散权衡一致^[2]。

1.3 色度稳定性(黄变、色偏)

色度稳定性决定灯罩在服役周期内是否保持透明观感与颜色一致性,核心表现为黄变趋势与色偏/色差增量。黄变通常对应材料吸收谱在短波段增强,导致透射光偏暖或泛黄,并常伴随透光率衰减;色偏则体现为空间或时间上的颜色不一致,可能表现为同一灯罩不同区域相关色温不一致或白光“发脏”。色度问题与透光率、雾度存在耦合关系:吸收增强会同步拉低透光率并推动黄变,散射结构变化或缺陷增多会改变不同波段的透射与散射比例,从而放大色偏与区域差异。评价宜同时关注初始色度与老化后的漂移幅度,以色差或黄变指数增量作为约束阈值,确保高透光目标在长期使用中不因黄变与色偏而失去意义^[3]。

表 1-1 光学核心指标与保守参考目标

指标	工程含义(简述)	单位	保守参考目标
可见光透光率 T_v	380 - 780 nm 综合净透射能力(效率)	%	$\geq 88\%$
雾度 Haze	透射光偏离方向比例(扩散)	%	10% - 35%
亮度峰值比 L_{max}/L_{avg}	局部峰值相对平均亮度(眩光敏感)	—	≤ 1.8
均匀性比 L_{min}/L_{avg}	亮度下限相对平均值(分布一致性)	—	≥ 0.70
黄变/色差增量 ΔYI 或 ΔE^*	老化后黄变或色差漂移(色度稳定)	—	$\Delta YI \leq 5$ 或 $\Delta E^* \leq 2$

2 材料与结构影响因素

2.1 树脂本征与添加体系(吸收/散射源、双折射风险)

高透光 PC 灯罩的光学上限受树脂本征特性约束,关键在吸收损失、散射源数量与取向应力导致的各向异性。杂质、不相容颗粒、凝胶点、降解产物或金属离子残留会增加散射并增强短波吸收,使透光率下降、黄变风险上升;分子量分布过宽易引起微观不均与局部取向差异,导致条纹与透射不一致。添加体系需在稳定、加工与光学间权衡:抗氧/紫外稳定剂可延缓黄变,但过量或分散不良会抬升雾度;润滑剂、脱模剂迁移析出易造成界面不连续,增强反射与发雾。流动剪切与冷却固化产生残余应力会引发双折射,出现条纹或彩纹并削弱舒适度,因此控制重点应降低吸收与散射源、提升分散均一性,并将双折射作为关键质量维度^[4]。

2.2 壁厚、几何与表面纹理(配光、热点抑制、雾度代价)

结构几何决定光路与出射角分布,是均匀性与眩光控制的关键杠杆。壁厚增大会延长光程、放大吸收与多次散射,常致透光率下降、雾度上升与色度偏暖,且厚度不均易出现分区明暗或色偏;壁厚过薄虽利于透光,但扩散不足会强化点光源特征,使热点更突出。曲率与形状改变折射/全反射路径,局部曲率过大或几何突变易产生方向性出射,抬升亮度峰值并增加眩光敏感,过渡平顺则有利于稳定光路。表面纹理与粗糙度调节镜面与漫散射比例,细微纹理可提升扩散并柔化边界,纹理过强会提高雾度、牺牲透光率并发白。结构设计需围绕目标配光匹配壁厚、曲率与纹理强度,在热点抑制与散射损失间取得平衡。

表 2-1 材料与结构因素对关键指标的影响方向与保守区间

因素	典型变化	对透光率 T_v	对雾度 Haze	对均匀性/热点	对色度稳定性
杂质/凝胶点	含量 \uparrow	\downarrow	\uparrow	变差(麻点/亮斑)	变差(黄变风险 \uparrow)
添加剂分散	分散差 \rightarrow 团聚	\downarrow	\uparrow	变差(局部不均)	变差(色偏风险 \uparrow)
取向应力/双折射	应力 \uparrow	—/轻微 \downarrow	—	变差(条纹/彩纹)	间接变差(区域色差 \uparrow)
壁厚	2.0 \rightarrow 3.0 mm	\downarrow (约 1 - 3%)	\uparrow (约 2 - 6%)	视扩散而定,厚度不均则变差	黄变敏感性 \uparrow
纹理强度	轻纹 \rightarrow 强纹	\downarrow (约 1 - 5%)	\uparrow (约 5 - 15%)	改善热点,但过强会“发白”	对初始色度影响小,老化后差异放大可能 \uparrow

3 成型工艺与缺陷影响因素

3.1 干燥与熔体温度（含水、挥发物导致散射缺陷）

高透光 PC 光学 LED 灯罩性能取决于“效率—扩散—舒适—稳定”的平衡：透光率与雾度决定出光与扩散，亮度峰值与梯度影响均匀性与眩光，黄变与色偏增量体现色度一致性。性能上限受树脂纯度、散射源及取向应力双折射制约，添加体系分散质量影响透明度与漂移敏感性；壁厚、曲率与纹理改变光路与散射比例，左右热点抑制与光效损失；干燥与熔体温度关系水解与挥发风险，注射—保压—冷却决定密实度与残余应力，排气与流动组织影响困气、焊线等缺陷可视性。质量控制应统一指标口径，协同降低散射源与双折射，匹配结构参数并稳定工艺窗口，使关键性能可复核达成。

3.2 注射/保压/冷却与残余应力（条纹、雾度、双折射）

注射速度、保压与冷却共同决定制件取向与密实度，是条纹、雾度波动和双折射的主要来源。速度偏高会增强剪切取向，固化后形成折射率各向异性，易出现条纹/彩纹并导致亮度带状不均；速度偏低则使前沿降温、流动不稳，产生流痕或充填不足，透射不一致。保压不足会造成收缩空隙与

微孔增多，散射增强使雾度上升并局部发白；保压过大或过久会抬升内应力，双折射风险增加，并可能在后续热作用下应力松弛引起外观漂移。冷却过快会冻结取向并锁定应力，冷却不均会形成厚薄区应力差与光学不均；冷却更平衡可降低取向与应力梯度，使亮度更平滑、条纹更弱。工艺控制要点在于在剪切取向、补缩密实与应力释放间取得稳定平衡，保持透光率、雾度、均匀性与色度的一致性^[5]。

3.3 模具排气与流动痕（焊线、困气、表面缺陷）

模具排气与流动组织决定困气、焊线及表面缺陷的发生，这些缺陷常表现为局部光学异常。排气不足使气体滞留，形成白雾、烧焦点或微孔区，透射下降、雾度局部升高，出现白斑或暗影；焊线因温压偏低、界面结合不足且易夹带微孔，呈线状可视缺陷，降低透光率并破坏均匀性，点光源下亮暗分界更明显。流道/浇口布局不当会造成汇合角度不合理或前沿温差过大，诱发流痕与表面复制差，增加镜面不连续与散射波动，导致亮度带状不均并提升眩光敏感。排气槽、浇口形式与流动路径需协同优化，降低困气并弱化焊线可视性，使缺陷影响可忽略，保持出光连续稳定^[6]。

表 3-1 工艺参数偏离对光学缺陷与指标的影响

关键环节	偏离方向	易出现的缺陷/现象	典型指标变化（量级）
干燥不足（含水偏高）	含水↑	银纹、微气泡、雾状不均	Tv ↓约 2 - 6%，Haze ↑约 5 - 15%
熔体温度过高	温度↑	热降解、轻黄变、气体析出	Tv ↓约 1 - 3%，ΔYI ↑约 1 - 3
注射速度过高	剪切↑	条纹、双折射彩纹、带状不均	Lmax/Lavg ↑约 0.1 - 0.3
保压不足	补缩不足	微孔/缩痕区发白、局部暗影	Haze ↑约 2 - 8%，均匀性下降
排气不足	困气	白斑/烧焦点、焊线更明显	局部 Tv 明显下降，亮暗分界增强

4 结论

高透光 PC 光学 LED 灯罩的性能是“效率—扩散—舒适—稳定”的综合平衡：透光率与雾度决定出光效率与扩散水平，亮度峰值与梯度控制均匀性与眩光风险，黄变与色偏增量决定色度一致性与透明观感。性能上限受树脂纯度、散射源与取向应力双折射制约，添加体系的相容与分散影响初始透明度及色度漂移敏感性；壁厚均匀性、曲率

连续性与表面纹理重塑光路与散射比例，支配热点抑制与光效损失的权衡；干燥与熔体温度窗口影响水解与挥发风险，注射—保压—冷却路径决定密实度与残余应力，排气与流动组织决定困气、焊线等缺陷可视性。质量控制需统一指标口径，协同抑制散射源与双折射，匹配厚度与纹理，稳定工艺窗口并降低缺陷可视性，确保透光、扩散、舒适与色度稳定可复核达成。

参考文献

- [1]杨明山, 朱宝, 张万里, 等.照明 LED 灯罩及灯管用光扩散聚碳酸酯的制备[J]. 中国塑料, 2019, 33 (1).
- [2]赵盼盼, 等.量子点光扩散板用 PS/SAN 复合薄膜的制备与性能研究[J].
- [3]孙琦伟, 王韬, 陈宇宏.紫外加速老化对聚碳酸酯力学和光学性能的影响[J]. 材料工程, 2021, 49 (11): 83-89.
- [4]李廷健, 朱辉, 樊利, 阳立, 张杰.注塑制品残余应力的研究进展[J].高分子通报, 2017 (1): 66-70.
- [5]葛勇, 王韬, 郎建林, 厉蕾, 颜悦.注射成型塑化过程对聚碳酸酯性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2017,
- [6]张文灼, 等.隔热涂层对注塑制品熔接痕的改善机理研究[J].塑料科技, 2021.