

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.01.027

高功率 LED 封装支架基体树脂研究进展

张磊^{1,2}, 金子毅², 李亦灵², 张丽³

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049; 2. 浙江理工大学材料科学与工程学院, 杭州 310018;

3. 辽宁省药品检验检测认证中心, 辽宁省药品检验检测院, 沈阳 110036)

摘要:介绍了目前聚合物基 LED 封装支架基体树脂的研究进展,回顾了通用聚苯二甲酸型聚酰胺树脂 (PPA) 型基体树脂在表面贴片、大电流驱动、器件尺寸紧凑化以及极端环境应用等发展要求下的困境,分析了聚对苯二甲酸环己烷二甲酯、芳香族热致液晶聚酯树脂、环氧树脂、有机硅改性模塑料、不饱和聚酯树脂等新型封装支架基体树脂的特点,重点比较了树脂的初始反射率、老化反射率、耐热温度、玻璃化转变温度和吸水率等材料性能,强调了不同树脂在实际应用中的比较优势及局限性。分析表明,新型基体树脂在光学性能方面相比于 PPA 型树脂优势显著,但材料成本亦显著提高。指出随着生产企业由光视效能向成本效率的思路转变,满足极端应用环境需求,同时兼顾高性价比可能是未来 LED 支架基体树脂的发展方向。

关键词:封装材料; LED; 基体树脂; 光学性能; 耐热性能

中图分类号: TQ323 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)01-0141-05

Advance in Martrix Resin for High Power LED Bracket Packaging

Zhang Lei¹, Jin Ziyi², Li Yiling², Zhang Li³

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

3. Liaoning Drug Testing and Certification Center, Liaoning Institute for Drug Control, Shenyang 110036, China)

Abstract: Recent progress of matrix resins for LED packaging was introduced. The challenges in surface-mounting, large-current drive, compact structure and severe environmental operation of PPA were considered, the features of PCT, LCP, EMC, SMC and UP were analyzed. Initial and aging reflectivity, thermal resistance and glass transition temperature, as well as water absorption were compared. Comparative advantages and limitations of each resin were emphasized. The results indicate that new resins exhibit better optical properties than PPA, with higher material costs. It is suggested that accompanied with the conversion from luminous efficiency to cost efficiency industry, resins enable to satisfy requirements of severe conditions while simultaneously with high cost performance would be the direction in future.

Keywords: packaging material; LED; matrix resin; optical property; thermal resistance

作为新一代光源,发光二极管(LED)具有能耗小、响应快、无汞环保等突出特点,已经被广泛应用于普通照明、背光源、显示屏、医疗灭菌等领域。表面贴装器件(SMD)结构由于具有更紧凑的封装结构和更好的热传导路径成为了LED器件的封装主流结构之一。LED支架是LED器件的重要组成部分,起到了芯片支撑、电路构建、热量传导和出光调控等诸多功能^[1]。LED支架由导电金属基板(引线框架)和绝缘反

射结构组成。其中,绝缘反射结构可以采用低温共烧陶瓷或树脂基材料制备。然而,陶瓷基板由于对设备与工艺要求高,胚材进口依赖度大,成本控制困难。因此树脂基材料作为LED支架材料在实际应用中更为普遍^[2]。

考虑到功能的特殊性,LED支架用树脂基材料与普通封装材料的显著不同是对光学特性要求。光学特性主要包括反射率和色坐标两方面^[3]。张磊等^[4]前期研究已经证

基金项目: 电力设备电气绝缘国家重点实验室项目(EIPE19204)

通信作者: 张磊,博士,副教授,主要研究方向为电力与电子用高分子材料 E-mail: lzhangac@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-11-11

引用格式: 张磊,金子毅,李亦灵,等. 高功率 LED 封装支架基体树脂研究进展[J]. 工程塑料应用,2021,49(1):141-145,151.

Zhang Lei, Jin Ziyi, Li Yiling, et al. Advance in martrix resin for high power LED bracket packaging[J]. Engineering Plastics Application, 2021,49(1):141-145,151.

明,LED 支架材料的反射率对 LED 器件整体出光效率影响显著,达到 40% 以上。从支架的材料角度考虑,高反射填料(TiO_2 , ZnO 等)是保障支架整体高反射率的基础;而起到粘结填料功能的基体树脂则是维持高反射性能的关键。因为树脂本体存在吸光,且在长期老化条件下会形成共轭或生色基团,造成明显的反射率衰减。而且对不同频率光反射率衰减的差异还会引起色坐标变化,导致色温漂移。

另一方面,回流焊作为表面贴装技术(SMT)的配套工艺,对封装材料的耐热性能提出更高的要求。特别是随着环保的普及,无铅焊接成为了电子电气产品的材料和工艺要求。通用的无铅焊接材料如 SAC305,熔融温度达到 217°C ,而铅锡合金焊料熔点仅 183°C ,因此要求基体树脂能够短时耐受更高的温度。此外,为适应高温、高湿的使用环境,对树脂本身的玻璃化转变温度(T_g)和耐吸水性能亦有严格要求。

针对上述问题,目前主要的解决方法包括改善现有 LED 支架封装材料基体树脂或设计新型 LED 支架封装基体树脂。笔者对于目前被广泛应用或具有应用前景的 LED 支架封装基体树脂的发展进行归纳总结和比较,重点报道聚苯二甲酸型聚酰胺树脂(PPA)、聚对苯二甲酸环己烷二甲酯(PCT)、芳香族热致液晶聚酯树脂(LCP)、环氧树脂(EMC)、有机硅改性模塑料(SMC)及不饱和聚酯树脂(UP)等封装基体树脂(典型结构见图 1)的制备与关键性能,并探讨后续 LED 封装基体树脂所需关注的问题和可能遇到的挑战。

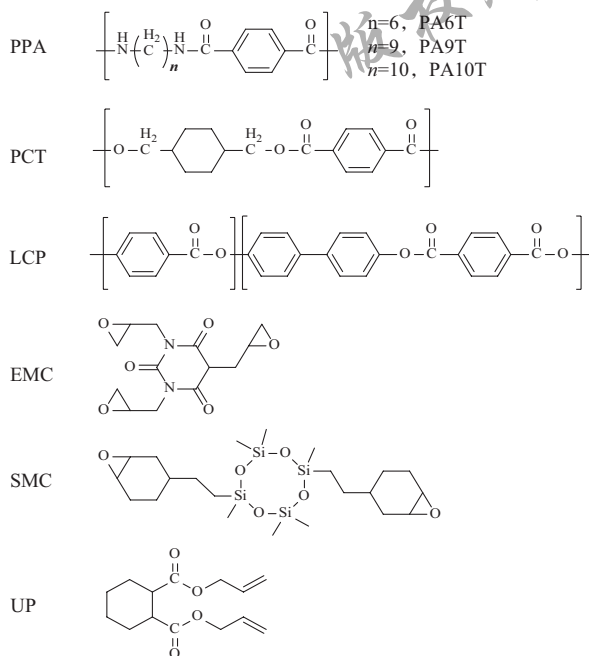


图 1 不同 LED 封装基体树脂的典型结构

1 热塑性 LED 封装基体树脂

1.1 PPA

PPA 是目前应用广泛的 SMD 封装 LED 器件基体树脂。

相较于脂肪族聚酰胺,PPA 主链中的芳环结构提高了材料耐热性和力学性能,并降低了吸水率。基于原料脂肪二胺的碳链长度不同,目前用于 LED 器件基体树脂材料的 PPA 型树脂主要包括 PA6T, PA9T 和 PA10T。J. Malluche 等^[5]总结了合成 PA6T 的三种主要途径:基于二胺和对苯二甲酸酯的酯胺交换法、基于二胺和聚对苯二甲酸乙二酯的聚酯-胺交换法及基于二胺和对苯二甲酸的直接酰胺化法。其中,酯-胺交换法反应过程控制难度较大,虽然实现了聚酯废弃物的回收再利用,但反应分子量偏小。所以 PA6T 主要采用直接酰胺化法制备。反应介质一般为水,但亦可以通过直接固相聚合、离子液体及手性界面聚合等手段降低反应温度、缩短反应时间、减小废液排放^[6-7]。

PA6T 支架初始光学反射率在 90% 以上,但耐热与紫外老化性差,紫外辐射 24 h 后反射率低于 75%, $150^\circ\text{C} / 1000 \text{ h}$ 热老化下反射率在 70% 左右。支架耐热温度在 260°C 以上,优于 PA46 和 PA66 等工程塑料,可以满足回流焊要求,但常温吸水率偏高(0.94%)^[8]。同时,纯 PA6T 熔点高于其分解温度,熔融加工困难。为解决上述问题,日本可乐丽公司开发了基于壬二胺的 PA9T 树脂,使熔点降低 60°C ,并使耐热温度进一步提高到 290°C , T_g 为 125°C ,吸水率仅为 0.17%^[9]。然而,壬二胺合成包括丁二烯二聚、转位、羰基化、氢氢还原等步骤,成本较高,为此,我国采用源于蓖麻油的癸二胺为原料开发 PA10T 树脂,由于分子间氢键作用使 T_g 提高 10°C ,热变形温度(HDT)达到 265°C ,拉伸强度为 110 MPa,吸水率与 PA9T 相当^[10-11]。

1.2 PCT

聚酯树脂也被开发作为支架基体树脂。然而,传统的聚酯树脂如聚对苯二甲酸乙二酯(PET)、聚对苯二甲酸丁二酯(PBT)熔融温度低,无法耐受回流焊等工艺条件。为此,通过引入饱和脂环二醇来提高材料耐热性能,并以酯基替换 PPA 中的酰胺基,成为开发应用于中大功率 LED 封装支架基体树脂的一种有效的结构设计方法^[12]。

PCT 树脂,可以采用对苯二甲酸和环己烷二甲醇直接酯化获得,或者通过对苯二甲酸二甲酯与环己烷二甲醇的酯交换反应得到。其中,直接酯化法工艺流程短,但由于对苯二甲酸提纯难度大,导致所得聚合物 PCT 分子量偏低;而采用酯交换法则能够克服该问题,但环己烷二甲醇原料进口依赖度大,导致成本偏高^[13]。基于 PCT 的 LED 支架的突出特点是初始反射率高,含抗氧剂时能够达到 94%。C. Lin 等^[14]采用 MSL-1(湿气敏感等级)和热老化实验对 PCT, PPA 两种支架进行测试,发现 PCT 支架相比于 PPA 支架具有更优异的耐湿热老化性能。在 1.0 W 的工作功率下, PCT 支架 MSL-1 测试后反射率下降仅 4.63%,远低于 PPA 支架

(14.31%)。同时,在 85℃ / 1000 h 热老化测试后, PCT 支架反射率下降 10.83%,而 PPA 支架达到了 39.95%。此外, PCT 亦具有突出的耐热性能,可以满足回流焊工艺要求, HDT 为 280℃,比 PET 高 30℃ 以上, T_g 为 105℃。除此之外, PCT 材料的力学强度与 PPA 材料相当,其拉伸强度达到 115 MPa,饱和脂环结构和酯基使 PCT 常温吸水率仅为 0.01%~0.04%^[12,15],这也解释了 PCT 优异的耐湿热老化性能的原因。

1.3 LCP

液晶聚合物具有耐热性特别突出、熔融加工黏度低等优点,满足 SMT 技术对材料的要求,因此也被应用于 LED 封装支架基体树脂,特别适用于高温环境的照明设备中。液晶聚合物分子结构多样,主要包括溶致型和热致型两类。考虑到成型和耐热性要求,LED 封装支架基体树脂 LCP 材料主要采用芳香族热致液晶聚酯树脂。

北居彻等^[16]以对羟基苯甲酸为主体,以对苯二甲酸、4,4'-二羟基二苯甲酮、2,6-二萘酚等进行缩合共聚,所得液晶树脂可在 380℃ 下注塑成型,加工过后依旧能保持良好的初始白度。该液晶树脂在 480 nm 的初始反射率大于 80%,在 90℃ 下光照射 500 h 后,反射率仅降低 3%~7%。中山敏雄等^[17]以对羟基苯甲酸、4,4'-二羟基联苯、对苯二甲酸等为原料通过固相缩聚制备全芳香族热致性液晶聚酯树脂,熔融温度达到 320℃ 以上。其对应的 LED 反射支架 420 nm 初始反射率 70% 以上,480 nm 初始反射率达到 85% 以上。库普塔等^[18]以氢醌部分代替 4,4'-二羟基联苯,制备基于芳香族聚酯和全芳香性聚酯的 LCP 共聚物,使材料的 HDT 达到 300℃ 以上。组装 LED 器件寿命超过 50 000 h, CIE 白度及反射率变化均小于 1%,与 CIE 标准光源白度差值小于 50%。与其它树脂封装 LED 器件相比,具有优越的发射稳定性、颜色一致性和使用寿命。金东植等^[19]关注 LED 开关电源高频化、小型化应用,针对 LCP 复合物介电性能不佳的问题,提出了一种改性全芳香族液晶聚酯树脂复合物, HDT 达到 270℃ 左右,拉伸强度达到 120 MPa,1 MHz 时介电常数为 3.1~3.6。

LCP 与 PPA 和 PCT 相比具有突出的耐热性能和耐老化性能,但初始反射率和成本方面的缺陷也在一定程度上限制了其推广与应用。

2 热固性 LED 封装基体树脂

热固性树脂是一种固化后形成三维交联网络结构的聚合物材料,相比于热塑性树脂,其尺寸稳定性和耐热性能优良。与热塑性树脂不同,用于 LED 封装的热固性树脂大多采用传递模塑工艺,可以用于生产方形扁平无引脚封装(QFN)结构。这种表面贴片型封装结构由于没有引脚结构,

所以有利于提高封装密度,同时内部引脚、引线框架与焊盘间导热路径显著缩短,对提高大功率 LED 散热非常有利。

2.1 EMC

EMC 模塑料是以热固性 EMC 为基体,具有高 T_g 、低翘曲、良好力学性能,已被广泛作为通用的电子器件封装。由于功能特殊性,应用于 LED 领域的 EMC 对光学性能要求很高^[20]。目前,LED 支架用 EMC 基体主要是异氰尿酸三缩水甘油酯(TGIC)及含饱和脂环结构。

TGIC 合成方法主要有:①异氰尿酸三烯丙基酯环氧法,②三聚氰氨-缩水甘油法,③氰尿酸-环氧氯丙烷法,④异氰酸酯三聚法^[21]。其中,①与②两种方法由于原料的成本高,工业化应用困难。方法③分为一步法和二步法。胥松等^[22]以氰酸钠为原料,采用一步法脱水缩合生成稳定的 TGIC,但投料比过大导致产率较低。目前市场上生产 TGIC 采用的是传统的二步高低温合成工艺,但产率仅 80% 左右。为此,洪昭雷等^[23]采用无卤的的氢氧化四甲铵作为催化剂制备电子级 TGIC,产率达到 90%。费小马等^[24]发现基于 TGIC 的 LED 反射杯,其初始光反射率均大于 91%,经过 150℃ / 1000 h 热老化后,反射率损失在 15% 以内。

除了 TGIC,其它含饱和脂环结构的 EMC 由于具有优良的耐光热老化特性,亦被用作 LED 封装基体树脂。刘红杰等^[25]报道了基于环氧环己烯封端的聚环己内酯和氢化双酚 A 型缩水甘油醚的 LED 反射杯用 EMC。该材料 T_g 可以达到 148℃,同时在 85℃ / 85%RH 经过 168 h 吸水率仅为 0.7%~1.1%,450 nm 的初始反射率在 95% 以上,150℃ 高温下老化 1000 h 后反射率保持在 60% 左右。陈子栋等^[26]报道了基于 3,4-环氧环己烯甲基-3,4-环氧环己烯酸酯(ERL-4221)和四甲基氢化联苯型缩水甘油醚等的 EMC,使 450 nm 下初始反射率保持在 90% 以上的同时 T_g 进一步提升到 160℃ 以上。张磊等^[4]还将 ERL-4221 脂环族环氧树脂型 EMC 拓展到紫外 LED 的应用,在氧化铝填充下反射率比现有白光 LED 支架材料提升 120% (365 nm),器件整体出光效率提高 9%。图 2 为几种典型的含饱和脂环基团的 EMC 分子结构。

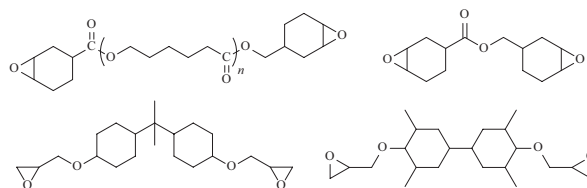


图2 用于LED反射支架的含饱和脂环结构 EMC 示例

朱小清等^[27]系统比较了 PCT, PPA 和 EMC 三种支架的耐热性能。在经过一次回流焊和三次回流焊后, EMC 支架光衰率分别为 0.4% 和 1.1%, 小于 PPA (1% / 2.6%) 和

PCT (2%/5%)。此外,PPA 支架在 720 h 老化后因不耐热而发黑,EMC 支架的光衰减率为 6%,远远小于 PCT 支架 (14%),表现出了更优异的耐热性。然而,EMC 体系固化后由于形成高交联结构,导致材料脆性较大,容易发生断裂、脱焊等一系列问题,在应用时需要注意。

2.2 SMC

EMC 封装支架适用于中高功率 LED 器件,而对于更高功率、封装密度更大的器件,通常使用 SMC 封装来提高材料的耐热性能。

费小马等^[28]基于环状二甲基硅氧烷制备了有机硅改性脂环族环氧树脂,固化物初始反射率可达到 90% 以上,经过 150℃ 高温热老化后 1000 h 后,反射率损失率在 10% 以内。邱幸等^[29]比较了 150℃ 高温紫外环境下 EMC 与 SMC 的光反射率变化。发现 SMC 在 390~400 nm 区域内反射率仅下降 2.7%,而 EMC 反射率下降了 17.1%,并且 EMC 树脂的光降解比 SMC 更严重。说明 SMC 比 EMC 更适合用于极端高温辐照环境。类似地,田口雄亮等^[30]开发了 LED 支架用 SMC,在 350~400 nm 的波长范围内初始反射率最高可达 87%,经过 180℃ 高温加热 24 h 和紫外辐射 24 h 后,反射率和黄变指数基本上保持不变,说明该固化产品具有优异的耐高温、耐黄变和抗紫外性能。孙宏杰等^[31]制备了可在 80℃ 以下模塑成型的 SMC,成型品在 85℃ / 85% 相对湿度 / 1000 h 下的反射率变化小于 10%,适用于高温潮湿的环境中。田崎益次等^[32]开发了基于线性二甲基硅氧烷树脂的 LED 反射材料,相比于聚苯基硅氧烷树脂,其初始反射率要提高 3%~5%,同时两种支架经过 150℃ 热老化 1000 h 后,聚苯基硅氧烷树脂在短波长侧反射率下降明显,而聚二甲基硅氧烷树脂基本上保持不变,并且表面并未出现黄变现象,适用于板上芯片封装等结构中。值得说明的是,基于 EMC 的 LED 反射支架在全可见光波长区域的反射率普遍低于该型 SMC 树脂。前者热老化后在短波长区域反射率下降明显,而后者基本上保持不变。目前,SMC 型基体树脂主要应用受其高昂的材料价格影响。

2.3 UP

UP 相比于 EMC 和 SMC 树脂的突出特点是成本较低,并且可以接受射出成型、转注成型等不同的方式加工成型。通过合理的结构设计提高其耐热性能,也可以应用于 LED 领域。因此,成为近年来新型封装材料的重点研发领域之一。

蔡耀全等^[33]采用六氢邻苯二甲酸二烯丙酯和聚邻苯二甲酸二烯丙酯制备了一种可应用于 LED 反射材料的 UP 组合物。制备的 LED 反射支架白度均高于 95%,460 nm 波长的反射率超过 90%。长冈淳等^[34]发现 UP 型 LED 支架在 150℃ 下热老化 1000 h 后依旧大于 70%,与 EMC 具有相

似的变化趋势,而 PPA 热老化 300 h 后反射率已小于 70%。原田健司等^[35]基于非结晶性不饱和聚酯和二烯丙酯制备了一种耐热及紫外老化的 LED 反射材料。经过 150℃ / 500 h 或 120℃ / 500 h+ 紫外老化后白度下降不超过 5%。类似地,小山智仁^[36]以富马酸与饱和二醇缩聚而成的结晶性 UP 为树脂基体制备的 LED 支架在 450 nm 的初始反射率达到 90% 以上,经过 150℃ 热老化处理 1000 h 后反射率依旧可以达到 80% 以上,远远高于非结晶性 UP 支架 (低于 80%)。

C. Lin 等^[37]对 UP、EMC 和 PCT 支架材料的热老化和湿热老化性能进行比较,110℃ / 1000 h 老化下,UP 支架反射率降低 5.02%,大于 EMC 支架 (4.13%),但优于 PCT 支架 (5.81%)。相反地,在 85℃ / 85% 相对湿度 / 1000 h 老化后,UP 支架反射率下降 15.7% 左右,优于 EMC 支架 (17.71%),但是大于 PCT 支架 (10.41%)。

3 封装基体树脂性能比较

为了进一步明确不同 LED 封装支架基体树脂的性能差异,建立清晰的结构性能关系,对基体树脂的光学性能和耐热性能进行了综合比较,图 3 汇总了各种树脂的初始反射率和热老化反射率结果 (老化条件 150℃ / 1000 h, LCP 为 90℃,PPA 老化时间小于 500 h)。老化前后反射率的变化程度可以通过树脂的数值点与等反射率线距离确定,距离越大说明老化后反射率下降越大。可以发现,PCT 具有最高的初始反射率,达到 94% 以上,而 LCP 的初始反射率则低于 90%,其余树脂均达到 90% 以上。经过热老化后,LCP 和 SMC 反射率下降程度较小而 PCT 反射率下降明显,PPA 树脂老化后反射率甚至低于 70%,证明其很难适用于高温的使用环境。UP 与 EMC 的光学性能相近。

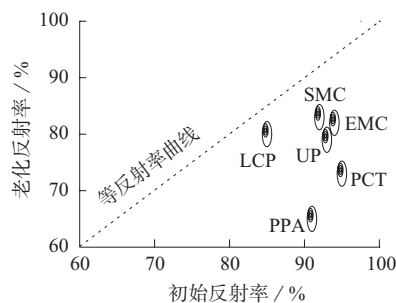


图3 各种LED封装支架基体树脂的初始和老化后光反射率

图4为各种封装树脂的 T_g 和耐热温度。可以发现,所有LED支架封装树脂均可满足无铅回流焊工艺要求。其中LCP具有最突出的耐热性能,HDT可以达到300℃以上。另一方面, T_g 对应于聚合物非晶区间分子链的运动能力。由于 T_g 前后材料热膨胀系数、模量与强度、介质损耗等性能变化明显,对封装可靠性亦存在显著影响。结果显示,上述LED支架封装材料的 T_g 均在100℃以上。其中,热固

性的 EMC 和 SMC 树脂达到 160℃ 以上,这主要是由于其高交联网络限制了分子链运动。PA6T 由于具有刚性对苯二甲酸结构和强分子间氢键, T_g 甚至达到 170℃ 以上。相比之下,PA9T 与 PA10T 由于引入更长的柔性链,增加了分子链运动能力同时降低了分子间氢键密度,导致 T_g 下降。而 PCT 由于采用酯基代替了 PPA 中的酰胺键,导致体系内不存在强分子间氢键结构,对应的 T_g 仅 105℃。

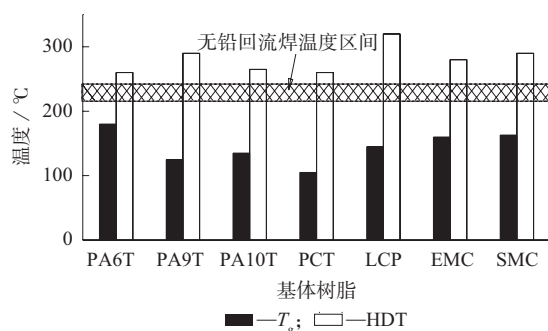


图4 各种LED封装支架基体树脂的 T_g 和HDT

4 结语

LED封装支架是支撑LED的大规模应用和可靠运行的重要部件。一方面,为了满足LED高功率化、小型化封装对于出光、耐热和散热性能的要求,具有更高耐热性能的封装材料及封装结构在不断开发;另一方面,由于LED封装成本在LED器件中占比较大,且随着LED生产企业由光视效能向成本效率的思路转变,如何设计满足LED在高温、高湿、户外紫外辐照条件应用的材料性能,同时降低单位出光成本,实现高性能、高性价比平衡是后续研究与产业的主要关注点。

参考文献

- [1] Zhang L, et al. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2014, 14(4):1 022–1 030.
- [2] Zhang L, et al. Microelectronics Reliability, 2015, 55:799–806.
- [3] Mehr M, et al. International Materials Reviews, 2020, 65(2):102–128.
- [4] Zhang L, et al. Optical Materials, 2018, 83:356–362.
- [5] Malluche J, et al. Polymer Engineering & Science, 2007, 47(10):1 589–1 599.
- [6] Porfyrus A, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2017, 134(29).doi:10.1002 / app.45080.
- [7] Park J, et al. Macromolecules, 2014, 47(9):2 784–2 795.
- [8] 罗晓玲,等. 中国塑料, 2017, 31(6):16–21.
Luo Xiaoling, et al. China Plastics, 2017, 31(6):16–21.
- [9] 冯美平,等. 工程塑料应用, 2002, 30(2):58–60.
Feng Meiping, et al. Engineering Plastics Application, 2002, 30(2):58–60.
- [10] 张凯,等. 石油化工, 2015, 44(5):536–542.
Zhang Kai, et al. Petrochemical Technology, 2015, 44(5):536–542.
- [11] 刘冰肖,等. 工程塑料应用, 2019, 47(3):101–105.
Liu Bingxiao, et al. Engineering Plastics Application, 2019, 47(3):101–105.
- [12] 蒋智强,等. 塑料工业, 2019, 47(4):138–141.
Jiang Zhiqiang, et al. China Plastics Industry, 2019, 47(3):138–141.
- [13] 王德全. 国外塑料, 2009, 27(8):41–45.
Wang Dequan. World Plastics, 2009, 27(8):41–45.
- [14] Lin C, et al. 11th international microsystems, packaging, assembly and circuits technology conference[C]. New York:IEEE, 2016:341–344.
- [15] 喻爱芳,等. 合成技术及应用, 2004(3):31–35.
Yu Aifang, et al. Synthetic Technology and Application, 2004(3):31–35.
- [16] 北居彻,等. CN102803380A.2012-11-28.
Tooru kitai, et al. CN102803380A.2012-11-28.
- [17] 中山敏雄,等. CN102378791A.2012-03-14.
Toshio Nakayama, et al. CN102378791A.2012-03-14.
- [18] 格伦·W·库普塔,等. CN102217108A.2011-10-12.
Glenn·W·Kupta, et al. CN102217108A.2011-10-12.
- [19] 金东植,等. CN105542408A.2016-05-04.
Jin Dongzhi, et al. CN105542408A.2016-05-04.
- [20] 王阳夏. 电子与封装, 2013, 13(12):9–11.
Wang Yangxia. Electronic & Packaging, 2013, 13(12):9–11.
- [21] 张亨,等. 塑料助剂, 2020(2):10–19.
Zhang Heng, et al. Plastics Additives, 2020(2):10–19.
- [22] 胥松,等. CN106588896B.2019-01-04.
Xu Song, et al. CN106588896B.2019-01-04.
- [23] 洪昭雷,等. CN108947987B.2020-04-24.
Hong Zhaolei, et al. CN108947987B.2020-04-24.
- [24] 费小马,等. CN111040703A.2020-04-21.
Fei Xiaoma, et al. CN111040703A.2020-04-21.
- [25] 刘红杰,等. CN103641998A.2014-03-19.
Liu Hongjie, et al. CN103641998A.2014-03-19.
- [26] 陈子栋,等. CN109438920A.2019-03-08.
Chen Zidong, et al. CN109438920A.2019-03-08.
- [27] 朱小清. 第十四届全国LED产业发展与技术研讨会[C]. 马鞍山:中国光学光电子行业协会, 2014:70–73, 118.
Zhu Xiaoqing. 14th national LED industry development and technology conference[C]. Maanshan:China Optics and Optoelectronics Manufactures Association, 2014:70–73, 118.

- [19] 张泉,等. 橡塑技术与装备,2016,42(22):65-68.
Zhang Quan, et al. China Rubber Plastics Technology and Equipment, 2016, 42(22):65-68.
- [20] 严一丰,等. 塑料稳定剂及其应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2008:196.
Yan Yifeng, et al. Plastic stabilizer and its application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008:196.
- [21] Burch G. US5041483A. 1991-08-20.
- [22] 徐国平. 工程塑料应用,2011,39(1):58-60.
Xu Guoping. Engineering Plastics Application, 2011, 39(1):58-60.
- [23] 郝源增,等. CN101570612A[P]. 2009-11-04.
Hao Yuanzeng, et al. CN101570612A[P]. 2009-11-04.
- [24] 杨燕,等. 合成材料老化与应用,2012,41(3):30-33.
Yang Yan, et al. Synthetic Materials Aging and Application, 2012, 41(3):30-33.
- [25] 康鹏,等. CN103304892A[P]. 2012-03-16.
Kang Peng, et al. CN103304892A[P]. 2012-03-16.
- [26] 罗忠富,等. 环境技术,2010,31(6):42-46.
Luo Zhongfu, et al. Environmental Technology, 2010, 31(6):42-46.
- [27] 周英辉,等. CN1840576A[P]. 2015-04-01.
Zhou Yinghui, et al. CN1840576A[P]. 2015-04-01.
- [28] 张鹰,等. CN101469094A[P]. 2009-07-01.
Zhang Ying, et al. CN101469094A[P]. 2009-07-01.
- [29] 康鹏,等. CN109694516A[P]. 2009-04-30.
Kang Peng, et al. CN109694516A[P]. 2009-04-30.
- [30] 杨燕,等. 合成材料老化与应用,2012,41(3):30-33.
Yang Yan, et al. Synthetic Materials Aging and Application, 2012, 41(3):30-33.
- [31] 张小峰. CN102079880A[P]. 2009-12-01.
Zhang Xiaofeng. CN102079880A[P]. 2009-12-01.
- [32] 高翔,等. CN103059409A[P]. 2012-12-24.
Gao Xiang, et al. CN103059409A[P]. 2012-12-24.
- [33] 吕晓琴,等. 广东化工,2019,46(7):144-145, 133.
Lyu Xiaoqin, et al. Guangzhou Chemical Industry, 2019, 46(7):144-145, 133.
- [34] 康鹏,等. 车用聚丙烯材料 VOC 研究进展[C]. 第七届中美材料环境腐蚀与老化试验学术研讨会, 2013.
Kang Peng, et al. Research progress of vehicle polypropylene VOC[C]. Proceedings of the 7th Sino-American Symposium on Environmental Corrosion and Aging Testing of Materials, 2013.
- [35] 汪家宝,等. 工程塑料应用,2009,37(7):53-55.
Wang Jiabao, et al. Engineering Plastics Application, 2009, 37(7):53-55.
- [36] 闫溥,等. 合成树脂及塑料,2017,34(4):17-20.
Yan Pu, et al. China Synthetic Resin and Plastics, 2017, 34(4):17-20.
- [37] 吴锡忠,等. CN101255252A[P]. 2008-04-08.
Wu Xizhong, et al. CN101255252A[P]. 2008-04-08.
- [38] 杨波,等. CN102719021A[P]. 2012-10-10.
Yang Bo, et al. CN102719021A[P]. 2012-10-10.
- [39] 康兴宾,等. CN103044771B[P]. 2015-12-02.
Kang Xingbin, et al. CN103044771B[P]. 2015-12-02.
- [40] 裴造成,等. CN104262783A[P]. 2015-01-07.
Qiu Haocheng, et al. CN104262783A[P]. 2015-01-07.
- [41] 赵鑫. 广东化工,2020,47(2):48, 53.
Zhao Xin. Guangzhou Chemical Industry, 2020, 47(2):48, 53.

(上接第 145 页)

- [28] 费小马,等. CN111040702A. 2020-04-21.
Fei Xiaoma, et al. CN111040702A. 2020-04-21.
- [29] Qiu X, et al. 17th international conference on thermal, mechanical and multi-physics simulation and experiments in microelectronics and microsystems[C]. New York:IEEE, 2016:1-7.
- [30] 田口雄亮,等. CN101629018. 2010-01-20.
Tageshiakira Taguti, et al. CN101629018. 2010-01-20.
- [31] 孙宏杰,等. CN107501942A. 2017-12-22.
Sun Hongjie, et al. CN107501942A. 2017-12-22.
- [32] 田崎益次,等. CN106025053A. 2016-10-12.
Masuji Tazaki, et al. CN106025053A. 2016-10-12.
- [33] 蔡耀全,等. CN109957204A. 2019-07-02.
Cai Yaoquan, et al. CN109957204A. 2019-07-02.
- [34] 长冈淳,等. CN102598326A. 2012-07-18.
Jyun Nagaoka, et al. CN102598326A. 2012-07-18.
- [35] 原田健司,等. CN107615108B. 2020-02-14.
Kenji Harada, et al. CN107615108B. 2020-02-14.
- [36] 小山智仁. CN104471732A. 2015-03-25.
Tomohito Koyama, et al. CN104471732A. 2015-03-25.
- [37] Lin C, et al. 10th international microsystems, packaging, assembly and circuits technology conference[C]. New York:IEEE, 2015:319-322.