

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.03.008

耐高温PCT/LCP合金材料的制备与性能

杨汇鑫^{1,2}, 李建伟², 姜苏俊², 麦杰鸿², 徐显骏², 杨军龙²

(1. 金发科技股份有限公司企业技术中心, 广州 510663; 2. 珠海万通特种工程塑料有限公司, 广东珠海 519050)

摘要: 为了开发可适用于1.0 W以上大功率照明的LED反射支架材料, 将聚对苯二甲酸1,4-环己烷二甲酯(PCT)与液晶高分子聚合物(LCP)按一定质量比制成了PCT/LCP合金。研究了LCP对PCT/LCP合金的熔融结晶性能、热稳定性、力学性能、耐热氧化性能的影响, 同时研究了PCT/LCP合金制备的LED封装灯珠的高温点灯老化性能。结果表明, LCP在PCT/LCP合金体系中起到了异相成核的作用, 提升了合金材料的结晶速度、热稳定性、强度和韧性。在PCT/LCP合金体系中随着LCP含量的增加, 合金材料对不同波长光的初始反射率下降, 但经过表面贴装技术(SMT)老化后, 材料对于不同波长光的反射率变化值和色差值降低, PCT/LCP合金材料耐热氧化性能提升。PCT/LCP合金制备的LED封装灯珠, 高温点灯老化后光衰率明显优于PCT基材, 研究为PCT/LCP合金应用于1.0 W以上的大功率LED反射支架行业提供了参考。

关键词: 聚对苯二甲酸1,4-环己烷二甲酯; 液晶高分子聚合物; 结晶性能; 热稳定性; 耐热氧化性能; LED反射支架

中图分类号: TQ317.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3539(2023)03-0046-06

Preparation and Properties of High Temperature Resistant PCT/LCP Alloy Material

Yang Huixin^{1,2}, Li Jianwei², Jiang Sujun², Mai Jiehong², Xu Xianjun², Yang Junlong²

(1. National-certified Enterprise Technology Center, Kingfa Science and Technology Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

2. Zhuhai Vantique Specialty Engineering Plastics Co., Ltd., Zhuhai 519050, China)

Abstract : In order to develop a LED reflective stent material suitable for high-power lighting above 1.0 W, PCT/LCP alloy was prepared by a certain mass ratio of poly (1, 4-cyclohexanedimethanol terephthalate) (PCT) and liquid crystal polymer (LCP). The effects of LCP on the melting and crystallization properties, thermal stability, mechanical properties and thermo-oxidative aging resistance of PCT/LCP alloy were studied. At the same time, the high temperature lighting aging properties of LED package lamp beads prepared by PCT/LCP alloy were studied. The results show that LCP plays a role of heterogeneous nucleation in PCT/LCP alloy system, which improves the crystallization rate, thermal stability, mechanical strength and toughness of alloy materials. In the PCT/LCP alloy system, with the increase of LCP content, the initial reflectivity of the material to different wavelengths of light decreases, but after surface mounted technology (SMT) aging, the reflectivity change value and color difference value of the material to different wavelengths of light decrease, and the thermal oxygen aging resistance of the PCT/LCP alloy material is improved. The LED package lamp beads prepared by PCT/LCP alloy are significantly better than the PCT substrate after high temperature lighting aging. The research provides a reference for the application of PCT/LCP alloy in the high-power LED reflective bracket industry above 1.0 W.

Keywords : poly (1, 4-cyclohexanedimethanol terephthalate) ; liquid crystal polymer ; crystallization properties ; thermal stability ; thermal oxygen aging resistance ; LED reflection bracket

聚对苯二甲酸1,4-环己烷二甲酯(PCT)材料是一种耐高温、半结晶型的热塑性塑料, 其合成方法

主要是由1,4-环己烷二甲醇(CHDM)和对苯二甲酸二甲酯(DMT)酯交换反应聚合而成。PCT具有优异

通信作者: 杨汇鑫, 硕士, 工程师, 主要从事特种工程塑料开发与应用研究

收稿日期: 2023-01-12

引用格式: 杨汇鑫, 李建伟, 姜苏俊, 等. 耐高温PCT/LCP合金材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(3): 46-51.

Yang Huixin, Li Jianwei, Jiang Sujun, et al. Preparation and properties of high temperature resistant PCT/LCP alloy material[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3): 46-51.

的光反射率和耐高温烘烤黄变性能、耐化学药品性、易加工性、易着色性、耐水解性、低吸水率以及良好的尺寸稳定性和电性能(耐电弧),因此PCT被广泛地应用于LED行业、电子电气行业、家用电器行业、食品接触包装或设备行业、薄膜行业、纤维行业等^[1-4]。虽PCT耐热性明显优于聚对苯二甲酸乙二酯(PET)和聚对苯二甲酸丁二酯(PBT),但PCT热变形温度仅有260℃,其耐热性仍低于聚苯硫醚(PPS)、液晶高分子聚合物(LCP)和耐高温聚酰胺(PPA),在LED反射支架行业仅能用于生产0.5~1.0 W功率的产品,使用范围受到限制,同时PCT结晶速度慢,容易翘曲^[1-7]。

LCP具有密集排列的直链聚合物结构和异常规整的纤维状结构,使其表现出优异的力学性能(高强度、高刚性)、耐高温性能(高热变形温度、高热分解温度)、耐辐射、耐化学药品性以及突出的尺寸稳定性(线膨胀系数小)和电绝缘性等特点,已被广泛应用于电子电器、航空航天、光纤通讯、汽车工业、机械制造和化学工业等领域^[8-10]。LCP具有紫外线穿透率极低、耐候、耐高温老化性能特点,非常适用于1.0 W以上大功率LED照明反射支架应用。但是,在笔者实际研发中发现LCP材料与无机颜料之间的相容性较差,制得的LCP材料因着色困难出现初始反射率低的问题,限制了其在LED反射支架行业应用^[9-13]。

笔者将PCT和LCP进行熔融共混制备成PCT/LCP合金材料,尝试解决两种聚合物树脂在LED反射支架行业的应用缺陷。在PCT/LCP合金中,PCT的加入可以提升LCP的着色性和初始反射率,同时LCP的原位成纤效果及优异的耐热、耐候、耐紫外辐照性能补充了PCT的力学性能、耐温性的不足^[14-16]。利用熔融共混制备了不同树脂比例的PCT/LCP合金材料,讨论了不同LCP树脂含量对PCT/LCP合金熔融结晶性能、热稳定性、力学性能、初始反射率、耐烘烤黄变性能的影响,为开发可适用于1.0 W以上大功率LED反射支架材料提供了新思路。

1 实验部分

1.1 主要原材料

LCP树脂: Vicryst R8000, 珠海万通特种工程塑料有限公司;

PCT树脂: Thermx 36294, 美国伊士曼化工有限

公司;

钛白粉: CR-211, 平均粒径0.25 μm, 中信钛业股份有限公司;

硅灰石: NYGLOS 12, 平均粒径12 μm, 法国益瑞石有限公司;

滑石粉: HTPUltra5, 平均粒径0.65 μm, 法国益瑞石有限公司;

抗氧剂: Irganox1010, 德国巴斯夫公司;

抗氧剂: S-9228, 美国都福公司。

1.2 主要仪器及设备

真空烘箱: ZKGT-6053 型, 深圳市澳德玛电子科技有限公司;

双螺杆挤出机: STS Mc 11 型, 科倍隆(南京)机械有限公司;

注塑机: KM420C 型, 克劳斯玛菲机械(浙江)有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: NETZSCH - DSC 200 F3 型, 德国Netzsch公司;

热重(TG)分析仪: NETZSCH - TG 209 F3 型, 德国Netzsch公司;

电子力学试验机: UTM4104 型, UTM6103 型, 深圳三思纵横科技股份有限公司;

反射率/颜色测试仪: CM3500d 型, 日本柯尼卡美能达控股公司;

傅里叶变换红外光谱(FTIR)仪: IRAffinity-1 型, 岛津(上海)实验器材有限公司;

SMT无铅回流焊接机: KSD-RF6600 型, 深圳市科延机电有限公司;

高精度快速光谱辐射计: HAAS-3000/HAAS-2000 型, 杭州远方光电信息股份有限公司;

数码显微镜: DVM6 型, 徕卡显微系统(上海)贸易有限公司。

1.3 试样制备

(1) PCT/LCP的共混改性。

首先将LCP和PCT基体树脂放于120℃真空烘箱中干燥4 h。然后将干燥好的LCP和PCT树脂、硅灰石、滑石粉、钛白粉、抗氧剂等通过双螺杆挤出机混合均匀, 挤出工艺设置如下: 挤出温度为250, 300, 290, 280, 280, 270, 270, 280, 290, 300, 310℃; 螺杆转速为400 r/min; 喂料量为400 kg/h。

PCT与LCP的质量分数及对应的样品编号见表1, 其中钛白粉的质量分数均为30%, 硅灰石质量

分数为15%,滑石粉质量分数为2%,抗氧剂1010质量分数为0.3%,抗氧剂S-9228质量分数为0.4%。

表1 PCT/LCP合金材料中PCT与LCP质量分数 %

样品编号	PCT	LCP
1 [#]	52.3	0
2 [#]	34.8	17.5
3 [#]	26.0	26.3
4 [#]	17.5	34.8
5 [#]	0	52.3

(2)样品制备。

通过注塑机(温度设置300~310℃)注塑制成符合标准的力学性能测试样条,60 mm×60 mm×1 mm的测试样板,以及LED反射支架。

(3) LED灯珠封装。

将材料经注塑成LED反射支架后,经过固晶、焊线、封装硅胶点胶固化,SMT焊接制成LED灯珠,如图1所示。

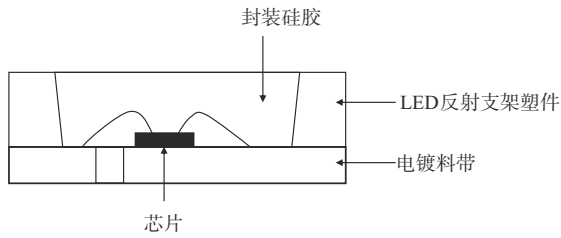


图1 封装后LED灯珠示意图

1.4 性能测试与表征

DSC:载气气氛为氮气,按升温速率20℃/min升温至290℃,恒温4 min,然后按降温速率20℃/min降温至30℃,恒温2 min后再升温至370℃;

TG分析:氮气气氛,升温速率20℃/min,测试温度范围50~500℃;

拉伸性能按照ISO 527-1/-2:2012测试,拉伸速率10 mm/min;

弯曲性能按照ISO 178:2010测试,弯曲速率2 mm/min;

缺口冲击强度根据ISO 180/1 A:2000测定,测试条件为23℃,A型缺口;

颜色/反射率测试:依据GJB 5023.1-2003,测试60 mm×60 mm×1 mm样板的初始及过3次SMT后反射率及黑白亮度值*L*和色品指数*a*,*b*值,由*L*,*a*,*b*值计算得到色差(ΔE);

老化性能测试:将封装后的LED灯珠在130℃温度、7 V电压、300 mA电流条件下点灯老化1 000 h,使用高精度快速光谱辐射计分别在0,72,168,500,1 000 h测试灯珠亮度的光维率。

2 结果与讨论

2.1 PCT/LCP合金熔融结晶性能研究

选用PCT树脂熔点为287℃,LCP因有多种分子结构所以对应了不同熔点的聚合物,若生产PCT/LCP合金时选择的LCP熔点太高,挤出注塑加工时需要设置较高的加工温度,对于改性后PCT/LCP基体材料的初始颜色有劣化影响,所以在制备PCT/LCP合金时选用了与PCT熔点接近的LCP树脂,熔点279℃。PCT树脂中含有环己烷基团,分子链刚性大,运动位阻大难以进入晶格形成晶体^[4],所以结晶速率慢。在PCT/LCP合金中,期望LCP的加入起到异相成核作用^[15],提升PCT结晶速度和结晶度。为了研究LCP对PCT熔融结晶行为的影响,制备了LCP质量分数分别为0%,17.5%,26.3%,34.8%,52.3%的PCT/LCP合金材料。图2为PCT/LCP合金的DSC曲线,其熔点、结晶温度和结晶半峰宽数据列于表2。从图2a,图2b可以看出,287℃和279℃分别为PCT和LCP树脂的熔融峰,252℃和233℃分别为PCT和LCP树脂的结晶温度,当LCP质量分数分别为17.5%,26.3%,34.8%时,仅出现了一个熔

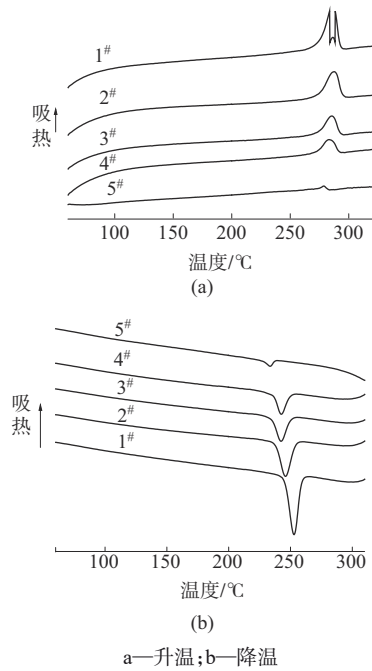


图2 PCT/LCP合金的DSC曲线

表2 PCT/LCP合金熔融结晶特征温度 ℃

样品编号	熔点	结晶温度	结晶半峰宽
1 [#]	287	252	21
2 [#]	287	246	20
3 [#]	286	242	19
4 [#]	283	242	18
5 [#]	279	233	10

融峰和一个结晶峰,说明两种类型的树脂在结晶区相容性好,形成了共晶或混晶^[1]。同时发现LCP的加入导致PCT/LCP合金的熔点和结晶温度相较于PCT略有下降,这可能是由于两种类型树脂中晶相间的非晶部分具有很好的相容性,同时两种高温聚酯的酯交换反应也是重要原因之一。此外随着LCP添加量的增加,PCT/LCP合金材料的结晶半峰宽减小,说明LCP在PCT/LCP合金中起到了异相成核的作用,提升了材料的结晶速度。

2.2 PCT/LCP合金热稳定性

图3为PCT/LCP合金的TG-DTG曲线,其起始分解温度($T_{5\%}$),最大失重速率温度(T_{PK})数据列于表3。

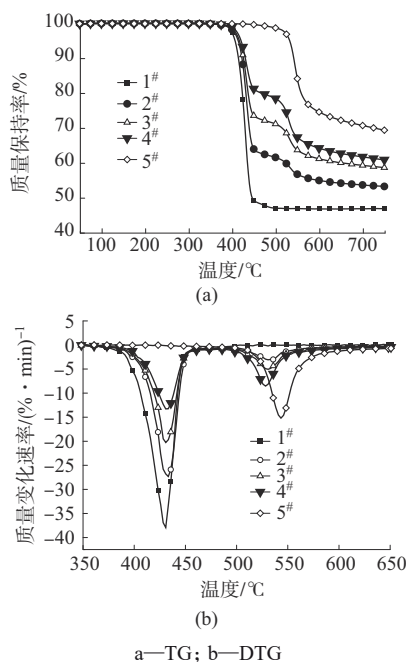


图3 PCT/LCP合金的TG-DTG曲线

表3 PCT/LCP合金TG,DTG数据

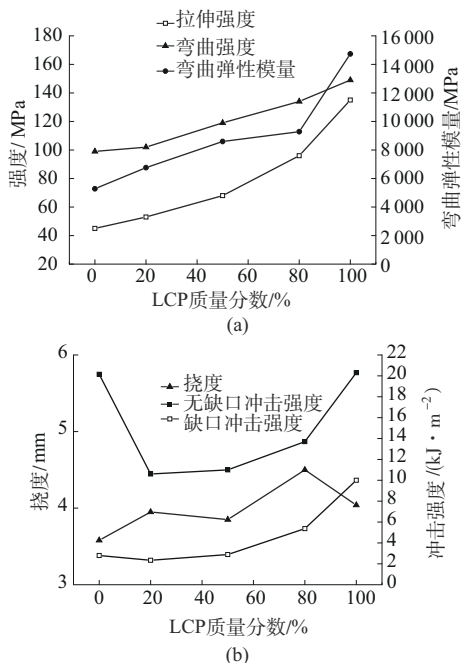
样品编号	$T_{5\%}$	T_{PK}
1 [#]	404	430
2 [#]	412	433/532
3 [#]	414	431/531
4 [#]	419	432/528
5 [#]	531	544

从图3a,图3b和表3可以看出,LCP初始分解温度和最大失重速率温度比PCT分别高127,114 °C。在PCT/LCP合金中随着不同含量LCP树脂加入初始分解温度有不同程度的提升,如LCP质量分数达到34.8%时,初始分解温度提高了15 °C。同时发现在PCT/LCP合金的DTG曲线中,出现了2个最大失重速率峰,其峰值分别对应PCT/LCP合金

中PCT和LCP热分解出现最大失重速率时对应的分解温度,分析其出现此类现象的原因,主要是由于LCP分子链堆积紧密,主链之间分子力大,赋予其极为优异的耐热性^[12-13],所以PCT/LCP合金体系的热稳定性显著提升。

2.3 PCT/LCP合金力学性能

不同LCP质量分数的PCT/LCP合金的力学性能如图4所示。从图4a可以看出,在PCT/LCP合金中,随着LCP添加量的增加,合金材料的拉伸强度、弯曲强度、弯曲弹性模量均明显提升,说明LCP的加入有利于提升合金材料的强度和刚性。从图4b可以看出,在PCT/LCP合金中,随着LCP添加量的增加,缺口冲击强度和挠度均有上升趋势,说明LCP添加量的增加有利于提升合金材料的韧性。分析其改善机理,LCP具有刚性棒状分子链结构,使得其分子链可以高度取向排列,在合金材料中呈微纤状,起自增强作用^[12-15],使得PCT/LCP合金的拉伸及弯曲强度、弯曲弹性模量、缺口冲击强度提高。



a—强度及弯曲弹性模量; b—挠度及冲击强度

图4 不同LCP质量分数的PCT/LCP合金的力学性能

2.4 PCT/LCP合金初始亮度及耐黄变性能

LED反射支架从成型到封装成LED灯珠,需要经历固晶及封装胶固化等在烘箱中高温烘烤的过程,同时在贴片安装时需要经历SMT焊接过程。在此过程中,如果LED反射支架用的材料耐烘烤黄变性能较差会影响LED灯珠初始亮度。因此笔者研

究了不同 LCP 添加量的 PCT/LCP 合金材料对于不同波长光的初始反射率的影响,同时研究了热氧老化(SMT 过炉老化)后材料对于不同波长光的反射率和颜色的影响。

图 5 为 PCT/LCP 合金对不同波长光线的初始反射率(R_0)曲线,表 4 为 PCT/LCP 合金材料对 460 nm 波长光的反射率和 ΔE 数据。从图 5 和表 4 可以看出,LCP 材料对于不同波长光的 R_0 低,这是因为无论何种类型的 LCP,其分子主链上都存在大量刚性苯环结构,导致 LCP 的染色能力极差。与 LCP 形成鲜明对比的是 PCT 材料,对于不同波长光线的 R_0 明显优于 LCP。在不同 LCP 质量分数的 PCT/LCP 合金中,随着 LCP 含量的增加,PCT/LCP 合金对于不同波长光的 R_0 逐渐降低,以 PCT/LCP 对于 460 nm 波长光的反射率为例,LCP 质量分数为 0% 时, R_0 为 94.3%,当分别添加 17.5%、26.3%、34.8% 的 LCP 时, R_0 分别降至 89.33%、88.23%、85.94%。与此同时,发现随着 LCP 含量的增加,PCT/LCP 合金材料与 PCT 材料相比,经过 SMT 老化后的反射率变化值(ΔR)和 ΔE 降低,说明 PCT/LCP 合金材料耐热氧老化性能提升,与 TG 分析测试中表现出来的 PCT/LCP 合金体系热稳定性提升相吻合。

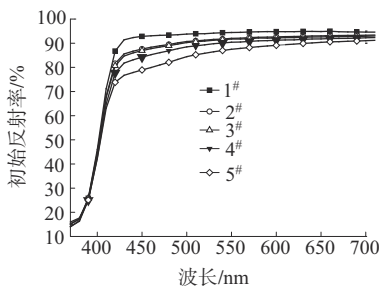


图 5 PCT/LCP 合金对不同波长光线的初始反射率曲线

表 4 PCT/LCP 合金对于 460 nm 波长光的反射率和 ΔE 数据

项目	试样编号				
	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]
R_0	94.3	89.33	88.23	85.94	82.18
R_s	93.07	88.33	87.74	85.24	79.93
ΔR	1.23	1	0.49	0.7	2.25
ΔE	0.44	0.42	0.18	0.33	1.02

注: R_0 为 460 nm 波长光初始反射率; R_s 为 460 nm 波长光 SMT 后反射率; ΔR 为 SMT 老化后反射率变化值。

2.5 PCT/LCP 合金基体 LED 反射支架材料点灯老化测试

选取 ΔR 和 ΔE 最小的 PCT/LCP 合金材料(3[#])与 PCT 材料在相同模具中注塑成 2835 杯型的 LED 反射支架,将 LED 反射支架封装制得 LED 光源灯珠。

在 130 °C 温度、7 V 电压、300 mA 电流的测试条件下点亮老化 1 000 h,使用高精度快速光谱辐射计分别在 0, 72, 168, 500, 1 000 h 测试灯珠亮度,其光纤维率变化如图 6 所示。从图 6 可以看出,短期(168 h 以内)老化时,PCT 基体封装灯珠光纤维率略优于 PCT/LCP 合金基体的封装灯珠。在高温与 LED 芯片发光发热共同作用下,随着老化时间延长至超过 168 h,PCT/LCP 合金基体封装灯珠的性能优势逐渐凸显,PCT 基体封装灯珠光衰明显,1 000 h 老化结束时,光纤维率仅有 44.18%,而 PCT/LCP 合金基体封装灯珠光纤维率仍有 92.64%。

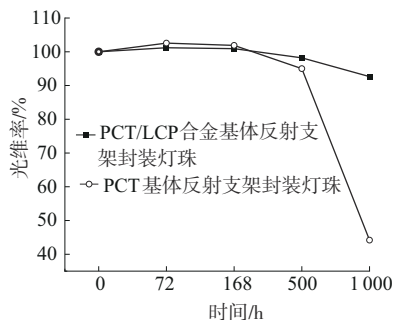
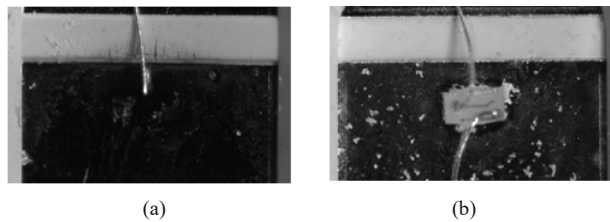


图 6 PCT 和 PCT/LCP 合金基体封装灯珠高温老化光纤维率变化曲线

将高温老化后失效的灯珠进行剖析,其解剖图如图 7 所示。发现在 PCT 基体封装灯珠中,靠近芯片位置出现典型的材料经热氧老化后失效龟裂的现象,在老化过程中致使灯珠气密性变差,外部氧气进入灯珠内部,与五金料带的镀银层发生反应,功能区镀层氧化后反射能力下降,从而导致灯珠光纤维率下降。而 PCT/LCP 合金基体封装灯珠中靠近芯片位置并未出现类似的龟裂现象,说明 PCT/LCP 合金高温点灯老化性能更佳,更适合做 1.0 W 以上大功率 LED 光源灯珠应用。



a—PCT; b—PCT/LCP

图 7 PCT 和 PCT/LCP 合金基体封装灯珠高温老化后解剖图

3 结论

(1) 在 PCT/LCP 聚酯合金体系中 LCP 起到了异相成核的作用,提升了合金材料的结晶速度。

(2) 在 PCT/LCP 聚酯合金体系中 LCP 的加入显著提升了合金材料的热稳定性。

(3)在PCT/LCP聚酯合金体系中LCP的加入有利于提升合金材料的强度、刚性和韧性。

(4)在PCT/LCP聚酯合金体系中,随着LCP含量的提升,合金材料经过SMT老化后的反射率变化值 ΔR 和色差值 ΔE 降低,说明PCT/LCP聚酯合金材料耐热氧化性能提升。

(5)PCT/LCP合金基体的LED反射支架材料耐高温老化性能优异,高温点灯老化时,PCT/LCP合金封装灯珠光衰率优于PCT基体封装灯珠,PCT/LCP合金更适合做1.0 W以上大功率LED光源灯珠应用。

参考文献

- [1] 杨汇鑫,蒋智强,李闻达,等.玻璃纤维增强PCT/PBT合金性能研究[J].塑料工业,2019,47(4):34-38.
Yang Huixin, Jiang Zhiqiang, Li Wenda, et al. Properties study of glass fiber reinforced PCT/PBT alloy[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(4):34-38.
- [2] 张丽.聚对苯二甲酸1,4-环己烷二甲醇酯产业链分析[J].化学工业,2008,26(4):15-21.
Zhang Li. Industry chain analysis of poly (1, 4-cyclohexanedi-methanol terephthalate)[J]. Chemical Industry, 2008, 26(4):15-21.
- [3] 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 matrix resin for high power LED bracket packaging[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(1):141-145, 151.
- [4] 姜苏俊,常欢,张传辉,等.含六元脂环耐高温聚酰胺PA10T/10C合成与表征[J].工程塑料应用,2020,48(8):10-15.
Jiang Sujun, Chang Huan, Zhang Chuanhui, et al. Synthesis and characterization of high temperature polyamide PA10T/10C containing six-membered alicyclic[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):10-15.
- [5] 刘勇求,严其艳.浅谈大功率LED封装工艺设计及优化[J].工业技术创新,2016,3(3):514-517.
Liu Yongqiu, Yan Qiyang. Design and optimization of high-power LED packaging technology[J]. Industrial Technology Innovation, 2016, 3(3):514-517.
- [6] 王江,连军红,谢成洪.回流焊对铁支架SMD LED产品的可靠性影响[J].电子工业专用设备,2016,45(11):29-33.
Wang Jiang, Lian Junhong, Xie Chenghong. The research on the reliability of Iron frame SMD LED[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2016, 45(11):29-33.
- [7] 杨汇鑫,阎昆,麦杰鸿,等.半芳香族耐高温尼龙PA6T/10T的合成及应用[J].工程塑料应用,2019,47(2):1-6.
Yang Huixin, Yan Kun, Mai Jiehong, et al. Synthesis and application of semi-aromatic heat-resistant nylon PA6T/10T[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):1-6.
- [8] 周广亮,肖中鹏,姜苏俊.不同无机物改性热致液晶聚合物材料的介电性能[J].工程塑料应用,2019,47(7):110-113.
Zhou Guangliang, Xiao Zhongpeng, Jiang Sujun. Dielectric properties of different inorganic modified thermotropic liquid crystalline polymer (TLCP) materials[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7):110-113.
- [9] Ji Yao, Bai Yun, Liu Xiaobo, et al. Progress of liquid crystal polyester (LCP) for 5G application[J]. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, 2020, 3(4):160-174.
- [10] 张登,王道波,叶国滨,等.聚芳醚砜树脂干燥动力学研究[J].当代化工研究,2020(8):4-8.
Zhang Deng, Wang Daobo, Ye Guobin, et al. Study on the drying kinetics of polyethersulfone resin[J]. Modern Chemical Research, 2020(8):4-8.
- [11] 孙兆懿,申娟.不同增韧剂对玻纤增强液晶聚酯体系性能的影响[J].工程塑料应用,2016,44(9):113-116.
Sun Zhaoyi, Shen Juan. Effect of different toughening agent on glass fiber reinforced LCP system's performance[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(9):113-116.
- [12] 李闻达,肖中鹏,罗德斌,等.全芳族液晶聚合物的合成与性能研究[J].塑料工业,2015,43(9):28-32.
Li Wenda, Xiao Zhongpeng, Luo Debin, et al. Synthesis and characterization of liquid crystalline polymer[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(9):28-32.
- [13] 余巧玲,王万卷,潘永红,等.热重-红外联用法研究液晶聚合物的热解行为及其逸出气体组成[J].塑料科技,2017,45(12):104-106.
Yu Qiaoling, Wang Wanjuan, Pan Yonghong, et al. Study on the thermal degradation behavior and escape gas of liquid crystalline polymers by TGA-FTIR[J]. Plastics Science and Technology, 2017, 45(12):104-106.
- [14] 余巧玲,王万卷,潘永红,等.液晶聚合物在工程塑料领域的研究进展[J].现代化工,2016,36(11):19-23.
Yu Qiaoling, Wang Wanjuan, Pan Yonghong, et al. Research progress of liquid crystal polymer in the engineering plastics field[J]. Modern Chemical Industry, 2016, 36(11):19-23.
- [15] 麦杰鸿,杨硕,龙杰明,等. GF增强PPS/LCP复合材料的结晶行为和力学性能[J].工程塑料应用,2022,50(4):1-6, 13.
Mai Jiehong, Yang Shuo, Long Jieming, et al. Crystallization behaviors and mechanical properties of GF reinforced PPS/LCP composites[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):1-6, 13.
- [16] 王雄伟,周玉波,楚少生,等. PPE改性液晶高分子及其吹膜性能[J].工程塑料应用,2021,49(10):44-49.
Wang Xiongwei, Zhou Yubo, Chu Shaosheng, et al. PPE modification LCP and film blowing of LCP[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(10):44-49.