

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.01.006

低温高抗冲高导热 PA6 的制备及改性

王晓群,陈家锋,黄珂伟,尹城龙,陈良俊

(杭州金州高分子科技有限公司,杭州 310018)

摘要:针对目前国内市场上灯具用工程塑料替代铝制作高导热、高抗冲的制品存在较少、国内技术无法突破工业化的问题,通过向尼龙(PA)6中添加氧化铝(Al_2O_3)、氮化铝(AlN)和乙烯-1-辛烯共聚物接枝马来酸酐(POE-g-MAH)弹性体,制备了LED灯用PA6工程塑料材料,研究了 Al_2O_3 、 AlN 和弹性体的用量对PA6材料导热性能和力学性能的影响。结果表明,高含量的 Al_2O_3 或 AlN 均可明显提高PA6材料的导热系数,但降低了材料的力学性能; Al_2O_3 和 AlN 复配能显著改善PA6材料的导热性能且对材料力学性能影响不大;适宜的 Al_2O_3 、 AlN 和弹性体的复合配比,可在保证PA6一定程度的导热性能和强度的条件下,大幅提高其冲击性能。当弹性体质量分数为10%,复合导热剂($\text{Al}_2\text{O}_3+\text{AlN}$)质量分数为60%, AlN 质量分数为15%时,材料的导热系数可达到 $1.121\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,冲击强度为 $10.5\text{ kJ}/\text{m}^2$,同时通过低温IK05防护等级实验(-30°C),从而制得了高导热、低温高抗冲的LED灯用PA6工程塑料材料。

关键词:工程塑料;尼龙6;导热系数;低温高抗冲;LED灯

中图分类号: TQ323.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)01-0029-06

Preparation and Modification of PA6 with High Impact at Low Temperature and Thermal Conductivity

Wang Xiaqun, Chen Jiafeng, Huang Kewei, Yin Chenglong, Chen Liangjun

(Hangzhou Jinzhou Macromolecule Technology Co., Ltd., Hangzhou 310018, China)

Abstract: According to the problems that using a industrial alumina substitute made of engineering plastics to manufacture high thermal conductive and high impact material is rare in domestic market at present and the main reason is domestic technology can not realize industrialization. The nylon (PA) 6 engineering plastic materials used for LED were prepared through adding Al_2O_3 , AlN and POE-g-MAH flexibilizer into PA6, the effects of Al_2O_3 , AlN and flexibilizer contents on the thermal conductive properties and mechanical properties of the PA6 materials were studied. The results show that Al_2O_3 or AlN with high content can improve the thermal conductivity obviously but decrease the mechanical properties. The compound of Al_2O_3 and AlN can improve the thermal conductivity of the PA6 materials markedly and have slight influences on the mechanical properties. Through adjusting the proportion of Al_2O_3 , AlN and flexibilizer, the impact strength of the materials can be improved dramatically under the conditions of retaining a degree of thermal conductive property and strength. When the mass fraction of the flexibilizer is 10%, the mass fraction of the compound ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{AlN}$) is 60% and the mass fraction of AlN is 15%, the thermal conductivity of the material is up to $1.121\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ and the impact strength is $10.5\text{ kJ}/\text{m}^2$, meanwhile the material passes the IK05 protection grade experiment at low temperature of -30°C , then a kind of PA6 engineering plastics used for LED with high impact at low temperature and thermal conductivity is made.

Keywords: engineering plastic; nylon 6; thermal conductivity; high impact at low temperature; LED

由于地球温暖化的原因,各国各界倡导G20巴黎协议中逐步降低环境污染、实现节能减排的技术,我国在这方面做出了重要贡献。目前,在我国仍有许多使用高电能消耗照明的行业,而LED灯在节能减排方面具有很多优势,这使得其在灯具行业得到迅猛的发展。LED与传统光源一样,在工作期间也会产生热量,其发光效率受外界和自身的影响很大,实际上,芯片上产生的热量不能及时移除已经制约了工程领域许多新产品的的设计^[1-3]。相比于传统铝材料,高分子导热复合材料具有高绝缘性、耐腐蚀、

质量轻、可加工设计度高、易成型、损耗少等优点,有广泛应用于散热材料领域^[4-5]的倾向。

聚己内酰胺材料[尼龙(PA)6]是被广泛应用的工程塑料之一,和传统的铝材相比,PA6易于加工,成本低廉,综合性能优异^[6-7]。但其耐久性差,加工易吸水,且导热系数低^[8],只有 $0.2\sim 0.3\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,对PA6进行导热改性后,导热系数可提升

联系人:王晓群,博士,高级工程师,主要研究方向为高分子材料的改性与应用

收稿日期:2016-10-25

至 $0.5 \sim 5.0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 可满足新兴 LED 灯具在散热方面的要求, 为 LED 灯具在市场上的推广做出了贡献。针对目前市场上的导热 PA6 具有的导热填料填充量大、导热系数低、加工成型困难且力学性能较差、工业成本高等问题, 麦宗伟等^[9]研究了氧化铝 (Al_2O_3) 和氮化硼的配比对导热 PA6 复合材料导热性能的影响, 制得了高导热 PA6 复合材料, 同时发现弹性体的加入降低了材料的导热系数, 但未对复合材料的力学性能进行研究。为了能够获得兼具低温高抗冲性能和高导热系数的 PA6 工程塑料。笔者通过探讨 PA6 基材中导热填料的种类、增韧弹性体等因素系统研究了导热改性 PA6 材料的导热及力学性能, 采用成本更低的氮化铝 (AlN) 与 Al_2O_3 复配, 同时添加一定用量的弹性体, 开发了一种低温高抗冲高导热 PA6 材料。该材料具有良好的导热性能、优秀的抗冲击性和耐低温性、优良的绝缘性、低廉的生产成本等特点, 为室外灯具外壳提供了一种新的低温高抗冲高导热工程塑料材料。

1 实验部分

1.1 主要原料

PA6: MF-800, 江苏瑞美福有限公司;

AlN: 上海乃欧纳米科技有限公司;

Al_2O_3 : 南京保科特科技有限公司;

乙烯-1-辛烯共聚物接枝马来酸酐 (POE-g-MAH) 弹性体: N-406, 宁波能之光科技有限公司;

抗氧剂: 巴斯夫中国有限公司;

分散剂: 上海花王有限公司。

1.2 主要设备及仪器

界面材料热阻及热传导系数测量装置: LW-9389 型, 瑞领科技股份有限公司;

平行双向螺杆挤出机: CTE35 型, 螺杆直径 35.6 mm, 南京科倍隆有限公司;

注塑机: HDX-50 型, 海达 (宁波) 塑料机械有限公司;

摆锤式冲击试验机: ZBC1400-A 型, 中国 MTS 工业系统有限公司;

万能试验机: AGS-X 型, 日本岛津公司;

恒温恒湿箱: MHK-408AK 型, 泰琪科技股份有限公司。

1.3 试样制备

低温高抗冲高导热 PA6 工程塑料由 PA6、弹性体、 Al_2O_3 及 AlN、分散剂、相关助剂等通过搅拌机混合, 再由双螺杆挤出机挤出造粒而制得^[10-11]。其中挤

出机各段温度为: 1 区 $200 \sim 220^\circ\text{C}$; 2 区 $240 \sim 260^\circ\text{C}$; 3 区 $270 \sim 290^\circ\text{C}$; 4 区 $270 \sim 290^\circ\text{C}$; 5 区 $250 \sim 270^\circ\text{C}$; 6 区 $250 \sim 270^\circ\text{C}$; 7 区 $250 \sim 270^\circ\text{C}$; 8 区 $250 \sim 270^\circ\text{C}$; 9 区 $250 \sim 270^\circ\text{C}$; 10 区 $250 \sim 270^\circ\text{C}$; 机头 $255 \sim 275^\circ\text{C}$ 。挤出物为颗粒状, 根据不同的 Al_2O_3 比例、AlN 比例和弹性体比例, 得到不同填料和助剂含量的 PA6 工程塑料材料。

采用注塑工艺制得测试用标准试样, 每个检测项目检测试样数量 10 根, 共计 4 个项目 (拉伸、弯曲、冲击、导热性能), 注塑制得的试样数量共 760 根; 低温灯具防护等级项目检测需将材料注塑成灯具外壳, 共 7 组外壳制件, 每组测试的制件数量为 10 个。

低温高抗冲高导热 PA6 工程塑料材料的制备工艺流程见图 1。

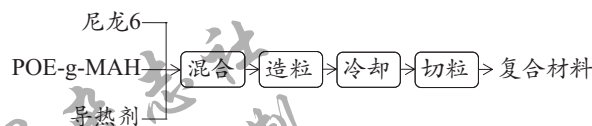


图 1 低温高抗冲高导热 PA6 工程塑料材料的制备工艺流程图

1.4 测试与表征

拉伸强度按 GB/T 1040.2-2006 测试, 拉伸速率为 $10 \text{ mm}/\text{min}$;

弯曲强度按 GB/T 9341-2008 测试, 测试速率为 $5 \text{ mm}/\text{min}$;

冲击强度按 GB/T 1843-2008 测试, 冲击锤能量为 4 J ;

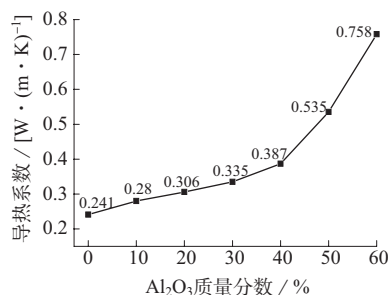
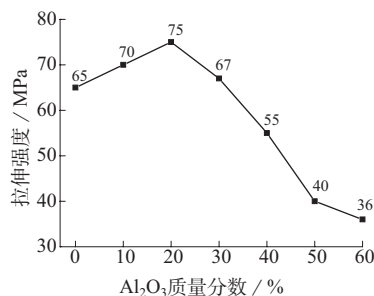
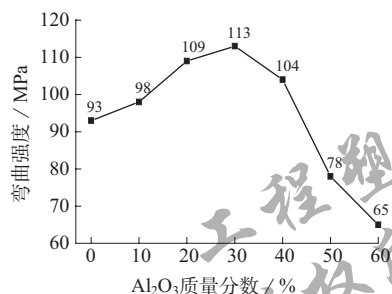
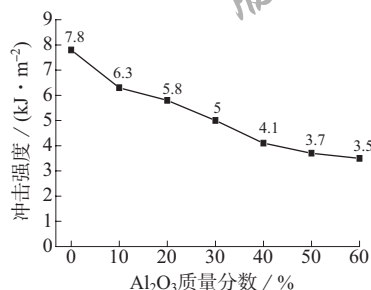
导热系数按 GB/T 10297-1998 测试, 试样厚度为 2.5 mm ;

IK05 低温灯具防护等级通过试验按 GB/T 20138-2006 进行, 冲击锤能量 0.7 J ; 将材料制备成待试灯具外壳, 然后将被试外壳置于 -30°C 低温环境中 4 h , 取出后固定于支撑座上, 施加相应等级的能量于被试外壳, 若发生支撑座位移小于或等于 0.1 mm 且被试外壳无破损, 则试验通过。

2 结果与讨论

2.1 Al_2O_3 用量对 PA6 材料性能的影响

研究了 Al_2O_3 用量对低温高抗冲高导热 PA6 工程塑料材料导热性能和力学性能的影响, Al_2O_3 用量与 PA6 材料导热系数, 拉伸、弯曲及冲击强度的关系分别如图 2、图 3、图 4 和图 5 所示, 图 2~图 5 中各点数据表示 10 组数据的平均值。从图 2 可知, 随着 Al_2O_3 用量的提高, 材料的导热系数逐渐升高, 证明 Al_2O_3 可以提高 PA6 的导热系数, Al_2O_3 质量分数为 60% 时, 材料的导热系数为纯 PA6 的 3.1 倍,

图2 不同 Al₂O₃ 用量下 PA6 材料的导热系数图3 不同 Al₂O₃ 用量下 PA6 材料的拉伸强度图4 不同 Al₂O₃ 用量下 PA6 材料的弯曲强度图5 不同 Al₂O₃ 用量下 PA6 材料的冲击强度

通过实验证明,再进一步增加 Al₂O₃ 用量后,材料导热性能的提升已不明显。从图 3 可知, Al₂O₃ 质量分数在 20% 时,拉伸强度最高,为 75 MPa,但是随着用量的继续增加,拉伸强度逐渐下降; Al₂O₃ 质量分数为 60% 时,材料的拉伸强度只有纯 PA6 的 55%。从图 4 可知, Al₂O₃ 质量分数在 30% 时,弯曲强度最高,为 113 MPa,但是随着用量的继续增加,弯曲强度逐渐下降; Al₂O₃ 质量分数为 60% 时,材料的弯曲强度只有纯 PA6 的 70%。从图 5 可知,随着 Al₂O₃ 用量的提高,材料的冲击强度逐渐下降, Al₂O₃ 质量分数为 60% 时,材料的冲击强度只有纯 PA6 的

45%。综上所述, Al₂O₃ 质量分数为 60% 时,材料的导热系数最高;但单纯增加 Al₂O₃ 的用量,导热系数没有达到材料的设计要求,同时力学性能有明显的下降,随着其用量的增加无法实现 PA6 材料综合设计要求。

2.2 AlN 用量对 PA6 材料性能的影响

AlN 用量与低温高抗冲高导热 PA6 工程塑料材料导热系数,拉伸、弯曲及冲击强度的关系分别如图 6、图 7、图 8 和图 9 所示,图 6~ 图 9 中各点数据表示 10 组数据的平均值。

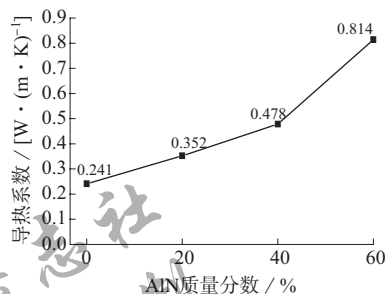


图6 不同 AlN 用量下 PA6 材料的导热系数

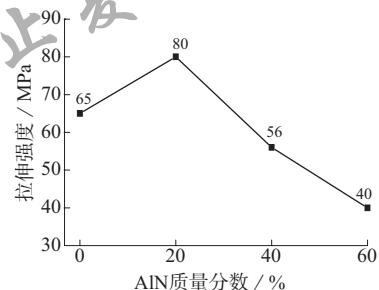


图7 不同 AlN 用量下 PA6 材料的拉伸强度

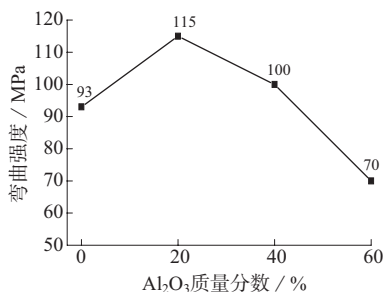


图8 不同 AlN 用量下 PA6 材料的弯曲强度

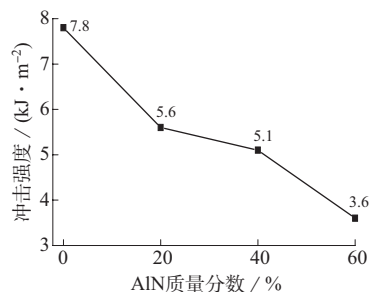


图9 不同 AlN 用量下 PA6 材料的冲击强度

从图 6 可知,随着 AlN 用量的增加,材料导热

系数逐渐升高,当 AIN 质量分数高达 60% 时,材料导热系数最高。虽然 AIN 的导热系数比 Al_2O_3 高,但是相对来说单纯使用 AIN 也不能大幅提高材料导热性能,无法满足既定的实验要求,需要进一步通过实验配方的调整来改善其性能。从图 7 可知,AIN 质量分数在 20% 时,拉伸强度最高,为 80 MPa,但是随着用量的继续增加,拉伸强度逐渐下降; AIN 质量分数为 60% 时,材料的拉伸强度只有 PA6 的 63%。从图 8 可知,AIN 质量分数在 20% 时,弯曲强度最高,为 115 MPa,但是随着用量的继续增加,弯曲强度逐渐下降; AIN 质量分数为 60% 时,材料的弯曲强度只有 PA6 的 75%。从图 9 可知,随着 AIN 用量的提高,材料的冲击强度逐渐下降, AIN 质量分数为 60% 时,材料的冲击强度只有 PA6 的 46%。由此可见, AIN 质量分数为 60% 时,材料的导热系数最高,但单纯增加 AIN 的用量,导热系数虽比添加 Al_2O_3 时有所增加,但仍没有达到材料设计要求,同时力学性能有明显的下降,从而无法实现 PA6 材料的综合设计要求。

由以上结果可知,单纯增加导热剂 Al_2O_3 或 AIN 的用量均可以明显提高材料的导热性能,当其质量分数为 60% 时,材料的导热系数均最高。这说明若以单纯提高材料导热性能为目的,添加质量分数为 60% 的 Al_2O_3 或 AIN 是较为可行的方法,这是因为高含量的 Al_2O_3 和 AIN 均可以在 PA6 工程塑料中构造一部分的导热网络,促进材料的内部导热方式发生变化。但仅仅使用一种导热剂,材料的导热性能尚未达到应用要求,同时,随着 Al_2O_3 或 AIN 用量的增加,材料的力学性能也逐渐下降。经分析,材料的导热性能取决于导热剂在材料中是否形成足够的导热链,若导热剂没有形成充分的导热链则会造成导热链空间结构的中断,从而无法获得更高的导热系数。同时,由于导热剂 Al_2O_3 或 AIN 的加入,破坏了原来 PA6 的空间结构,使拉伸强度和弯曲强度均随着导热剂用量的增加先升高后下降,而冲击强度直接出现明显的下降趋势。这说明,单纯添加 Al_2O_3 和 AIN 无法提高材料的综合性能,使其没有达到工程塑料既定要求。综合以上分析,需要重新进行复合导热剂方面的设计,从而使 PA6 具有低温高抗冲高导热的优异综合性能。

2.3 复合导热剂对 PA6 材料性能的影响

由 2.1 和 2.2 的结论得出,导热剂质量分数为 60% 时,导热性能达到最佳状态,但仍没有达到材料

的相关应用要求。所以,为了在 PA6 材料中形成充分连接的导热链,选取大粒径导热剂 Al_2O_3 和小粒径导热剂 AIN 进行复配,以促成微观结构中小的导热链条(AIN)和大的导热链条(Al_2O_3)较为容易地连接,使其易于形成多方向多角度的导热链条,从而形成连续的导热空间,进一步提高材料的导热性能。因此,固定 Al_2O_3 和 AIN 的总质量分数为 60%,通过改变 AIN 的用量研究了复合导热剂对 PA6 材料导热系数的影响,如图 10 所示,图 10 中各点数据表示 10 组数据的平均值。

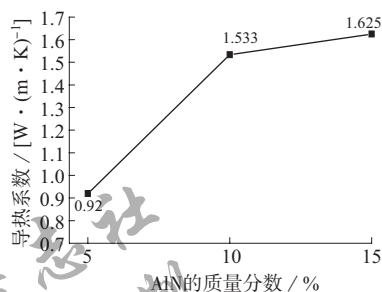


图 10 复合导热剂中不同 AIN 用量下 PA6 材料的导热系数

从图 10 可知,当复合导热剂中的 AIN 质量分数分别为 5%,10% 和 15% 时,材料导热系数分别为 0.920,1.533,1.625 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,比单纯添加 60% 的 Al_2O_3 或 AIN 的导热系数有较大的提高。可以证明,在 60% 的复合无机导热剂中通过添加不同粒径的导热粒子,可以更大幅度地提高材料的导热性能。在质量分数分别为 45% 和 15% 的 Al_2O_3 与 AIN 的最佳复合配比下,材料的导热系数最高,其导热性能约为添加单纯无机导热剂的材料 2 倍,充分证明了大小粒径复合导热剂的配比,可以改变结构空间中的导热网络的构成,提高热量的传导。

图 11~图 13 分别为 Al_2O_3 和 AIN 的总质量分数为 60% 时,复合导热剂中的 AIN 用量对 PA6 材料拉伸、弯曲和冲击强度的影响,图 11~图 13 中各点数据表示 10 组数据的平均值。从图 11~图 13 可以看出,在 Al_2O_3 和 AIN 总质量分数为 60% 的条件下,调整 Al_2O_3 和 AIN 的不同配比,材料的拉伸强度、弯曲强度和冲击强度变化不明显,但冲击强度仅为 $3.5 \text{ kJ}/\text{m}^2$ 左右,没有达到灯用工程塑料的既定要求。

2.4 弹性体对 PA6 材料性能的影响

为了更好地提高 PA6 材料的冲击性能,在上述复合导热剂的最佳配比基础上添加弹性体 POE-g-MAH,研究了弹性体对 PA6 材料导热性能的影响,如图 14 所示,图 14 中各点数据表示 10 组数据的平均值。

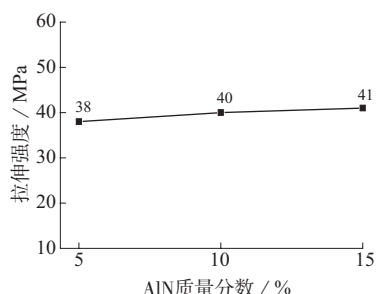


图 11 复合导热剂中不同 AlN 用量下 PA6 材料的拉伸强度

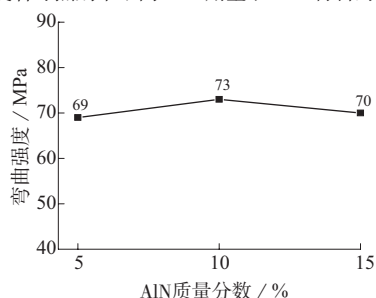


图 12 复合导热剂中不同 AlN 用量下 PA6 材料的弯曲强度

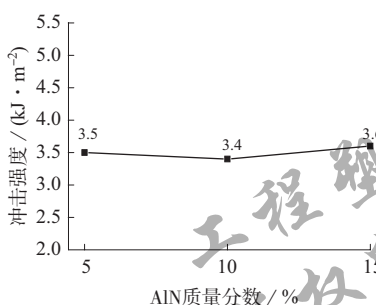


图 13 复合导热剂中不同 AlN 用量下 PA6 材料的冲击强度

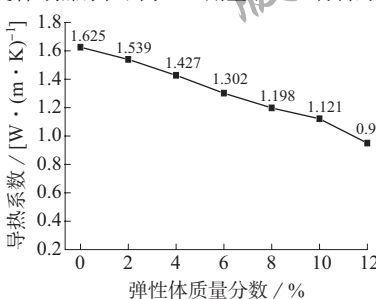


图 14 不同弹性体用量下 PA6 材料的导热系数

从图 14 可知,随着弹性体用量的提高,材料的导热系数逐渐下降,但当弹性体质量分数为 12% 时,材料的导热系数仍为 0.95 W/(m · K),是单纯添加导热剂 Al₂O₃ 的 1.25 倍,是单纯添加导热剂 AlN 的 1.17 倍。

图 15~ 图 17 分别为弹性体用量对 PA6 材料拉伸、弯曲和冲击强度的影响,图 15~ 图 17 中各点数据表示 10 组数据的平均值。由图 15 和图 16 可以看出,随着弹性体用量的增加,拉伸和弯曲强度逐渐下降,但仍可满足应用要求。当弹性体质量分数为 12% 时,材料的拉伸强度为 27 MPa,是单纯

添加导热剂 Al₂O₃ 的 75%,是单纯添加导热剂 AlN 的 68%,而弯曲强度为 45 MPa,是单纯添加导热剂 Al₂O₃ 的 70%,是单纯添加导热剂 AlN 的 64%。从图 17 可知,随着弹性体用量的增加,冲击强度大幅度上升,证明弹性体对材料的冲击性能影响显著。当弹性体质量分数为 12% 时,材料的冲击强度为 11.3 kJ/m²,是单纯添加导热剂 Al₂O₃ 的 3.2 倍,是单纯添加导热剂 AlN 的 3.1 倍。由此可见,添加一定量的弹性体,可在保证一定程度的导热性能和强度的前提下,大幅提高材料的冲击强度,从而达到 PA6 工程塑料的相关应用要求。

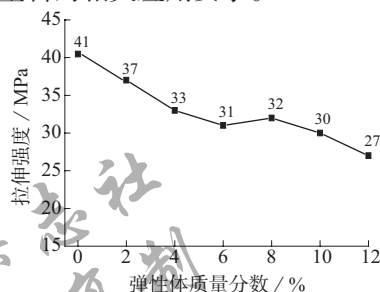


图 15 不同弹性体用量下 PA6 材料的拉伸强度

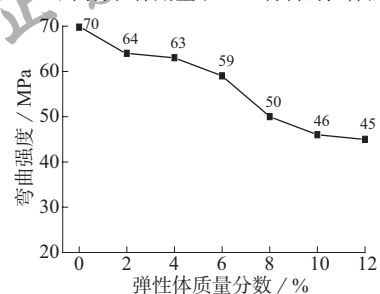


图 16 不同弹性体用量下 PA6 材料的弯曲强度

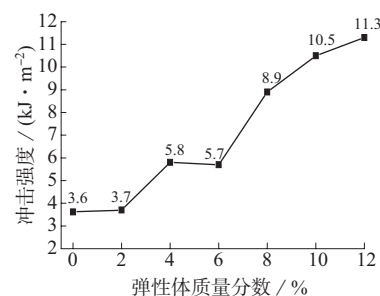


图 17 不同弹性体用量下 PA6 材料的冲击强度

将不同弹性体用量的 PA6 材料注塑成灯具外壳,然后进行了 IK05 低温灯具防护等级通过试验,结果如表 1 所示。

表 1 不同弹性体用量对被试外壳 IK05 低温灯具防护等级的影响

弹性体质量分数 / %	被试外壳破损程度	支撑座位移量 / mm	是否通过 IK05 低温灯具防护等级 (-30℃)
0, 2, 4, 6	破损	> 0.1	未通过
8	不破损	> 0.1	未通过
10, 12	不破损	< 0.1	通过

从表 1 可知,在其它组分配比相同的条件下,

当弹性体质量分数在 0%~8% 时,材料未通过 IK05 低温灯具防护等级 (-30°C),随着弹性体质量分数增加到 10% 和 12% 时,材料通过了 IK05 低温灯具防护等级 (-30°C),证明弹性体的质量分数在 10% 和 12% 时可以满足灯具领域的应用要求。

综合以上测试结果可知,当复合导热剂 ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{AlN}$) 质量分数为 60%、 AlN 质量分数为 15%,弹性体质量分数为 10% 和 12% 时,制备的低温高抗冲高导热 PA6 材料的导热系数达到 $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右,冲击强度达到 $10 \text{ kJ}/\text{m}^2$ 以上,且通过了 IK05 低温灯具防护等级 (-30°C)。考虑到弹性体质量分数为 12% 时,相对于其质量分数为 10% 的材料,其冲击强度提升并不明显,而导热系数下降到 $1 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下,综合考虑导热性能与冲击性能的平衡性,可以认为当弹性体质量分数为 10% 时,PA6 材料的综合性能最优,其导热系数为 $1.121 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,冲击强度为 $10.5 \text{ kJ}/\text{m}^2$,且通过了 IK05 低温灯具防护等级 (-30°C),满足 LED 灯具市场需求,达到了 PA6 工程塑料应用的相关要求。

3 结论

(1) 随着导热剂 Al_2O_3 或 AlN 用量增加,材料导热系数逐渐升高,当 Al_2O_3 或 AlN 质量分数为 60% 时,PA6 材料的导热系数分别达到最高,其值为 $0.758 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 或 $0.814 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

(2) 将不同粒径的 Al_2O_3 和 AlN 复配可大幅提高 PA6 材料的导热性能,复合导热剂的质量分数为 60% 且 Al_2O_3 和 AlN 的质量分数分别为 45% 和 15% 时,材料的导热系数达到最大,为 $1.625 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,是单纯添加无机导热剂的 2 倍。

(3) 在复合导热剂的最佳配方基础上,添加适当用量的弹性体,可以在保证一定程度的导热性能和强度的条件下,大幅提高复合材料的冲击强度。当弹性体质量分数为 10% 时,材料的导热系数可达到 $1.121 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,冲击强度达到 $10.5 \text{ kJ}/\text{m}^2$,且通过了 IK05 低温灯具防护等级 (-30°C)。这表明,通过适宜的 Al_2O_3 , AlN 和弹性体的复合配比,可制备出高导热且低温高抗冲的 PA6 复合材料,实现塑料工程化。

参考文献

- [1] Procter P, Solc J. Improved thermal conductivity in microelectronic encapsulants[C]//Proceedings of 41st electronic components and technology conference. New York:IEEE,1991:835-842.
- [2] 李丽,王成国. 导热塑料的研究与应用[J]. 高分子通报,2007(7):25-31.
- [3] 金钊,金荣福,蔡琼英,等. LED 与导热高分子复合材料[J]. 广东化工,2011,38(11):55-57.
Jin Fang, Jin Rongfu, Cai Qiongying, et al. LED and thermal conductive polymer composites[J]. Guangdong Chemical Industry, 2011,38(11):55-57.
- [4] 何和智,吴明春,周丽英. AlN 填充 PA6 导热复合材料的性能研究[J]. 塑料工业,2015,43(9):66-69.
He Hezhi, Wu Mingchun, Zhou Liying. Research on properties of thermal conductive PA6 composites filled with AlN [J]. Plastics Industry, 2015,43(9):66-69.
- [5] 王文,夏宇. 导热绝缘材料的研究与应用[C]//第十三届全国工程电介质学术会议论文. 北京:中国电工技术学会,2011:19-24.
Wang Wen, Xia Yu. Research and application of thermal conductive and electrical insulating polymer composites[C]//Proceedings of 13th national academic conference of engineering dielectrics. Beijing:China Electrotechnical Society,2011:19-24.
- [6] Liu S P, Hwang S S, Yeh J M, et al. Mechanical properties of polyamide-6 / montmorillonite nanocomposites-Prepared by the twin-screw extruder mixed technique[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2011,38(1):37-43.
- [7] 程亚非,杨文彬,魏霞,等. PA 基导热绝缘复合材料的制备及性能研究[J]. 功能材料,2013,44(5):748-751.
Cheng Yafei, Yang Wenbin, Wei Xia, et al. Study on preparation and properties of thermally conductive and insulating PA composites[J]. Journal of Functional Materials, 2013,44(5):748-751.
- [8] 严从立. LED 灯用导热绝缘复合材料的研究与制备[D]. 北京:北京化工大学,2013.
Yan Congli. Preparation and research on LED used thermal conductive and electrical insulation polymer composites[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- [9] 麦伟宗,王飞,黄李胜,等. 导热 PA6 复合材料导热性能的研究[J]. 合成材料老化与应用,2013(5):14-15.
Mai Weizong, Wang Fei, Huang Lisheng, et al. Studies on the thermal conductivity of PA6 composites[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2013(5):14-15.
- [10] 孙芳,张伟,郝喜东,等. 高导热绝缘尼龙复合材料的制备和性能[J]. 塑料工业,2015,43(1):117-120.
Sun Fang, Zhang Wei, Hao Xidong, et al. Preparation and properties of high thermally conductive and insulating PA composites[J]. Plastics Industry, 2015,43(1):117-120.
- [11] 李明辉,高智芳,罗红林,等. 填充型尼龙 6 导热绝缘复合材料的性能及制备[J]. 塑料,2013,42(1):1-3.
Li Minghui, Gao Zhifang, Luo Honglin, et al. Properties and preparation of polyamide 6 thermally conductive insulating composite materials filled with different fillers[J]. Plastics, 2013,42(1):1-3.