

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2014.11.025

## 导热 PE-LD 复合材料的制备与性能研究<sup>\*</sup>

周健, 陈志健, 周仕龙, 王国军

(江苏理工学院材料工程学院, 江苏常州 213001)

**摘要:** 采用低密度聚乙烯 (PE-LD) 为基体材料, 石墨、AlN 为导热填充材料, 通过双辊混炼、模压制备了导热复合材料, 并对该复合材料的导热性能、力学性能、热行为进行了分析。结果表明, 随着石墨或 AlN 含量的增加, PE-LD/石墨复合材料和 PE-LD/AlN 复合材料的热导率逐渐增大; PE-LD/石墨复合材料的热导率高于 PE-LD/AlN 复合材料的热导率。当石墨与 AlN 的总质量分数为 50%、石墨与 AlN 的质量比为 4:1 时, PE-LD/石墨/AlN 复合材料的拉伸强度、弯曲强度均达到最大值, 分别为 12.8, 17.15 MPa; 此时 PE-LD/石墨/AlN 复合材料的热导率达到最大值, 为 0.618 W/(m·K), 略低于添加质量分数 50% 的石墨时的 PE-LD/石墨复合材料的热导率 [0.634 W/(m·K)]; 当石墨与 AlN 质量比为 1:4 时, PE-LD/石墨/AlN 复合材料的热导率为 0.488 W/(m·K), 高于只添加质量分数 50% AlN 的 PE-LD/AlN 复合材料的热导率 [0.410 W/(m·K)]。当石墨和 AlN 总质量分数为 50% 时, 随着 AlN 含量的增加, PE-LD 的结晶度增大。

**关键词:** 低密度聚乙烯; 石墨; 氮化铝; 热导率

**中图分类号:** TQ327.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3539(2014)11-0117-05

### Study on Preparation and Performance of Low Density Polyethylene Thermal Conductive Composites

Zhou Jian, Chen Zhijian, Zhou Shilong, Wang Guojun

(School of Material Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

**Abstract:** Low density polyethylene (PE-LD) used as matrix material, while graphite and aluminum nitride (AlN) as thermal conductive particles, three kinds of composites were prepared by double roll mixing and moulding. Thermal conductivities, mechanical performances and thermal behaviors were analysed. The experimental results demonstrate that thermal conductivities of PE-LD/graphite composites and PE-LD/AlN composites increase gradually with the increase of the single particle such as graphite or AlN content. The graphite particles are more beneficial to improve the thermal conductivity than AlN particles. When the mass fraction of graphite and AlN is 50% and the mass ratio of graphite and AlN is 4:1, the tensile strength, flexural strength and thermal conductivity reach the maximum value, are 12.8 MPa, 17.15 MPa and 0.618 W/(m·K) respectively, and thermal conductivity of PE-LD/graphite/AlN composite is slightly lower than that of PE-LD/graphite composite which is added 50% mass fraction of graphite. The mass ratio of graphite and AlN is 1:4, the thermal conductivity of PE-LD/graphite/AlN composite is higher than that of PE-LD/AlN composite which is added 50% mass fraction of AlN. Differential scanning calorimetry analysis indicate that the crystallizability of PE-LD decreases when the mass fraction of graphite and AlN is 50% and AlN content increasing.

**Keywords:** low density polyethylene; graphite; aluminum nitride (AlN); thermal conductivity

当今社会, 导热材料的用途越来越广泛, 尤其是在电子信息、换热领域。随着集成电路的发展, 电子元器件越来越小, 若不及时散热将导致材料的使用寿命下降<sup>[1]</sup>。传统的电子元器件使用金属材料较多, 虽然热导率较高, 但金属易被腐蚀。而纯高分子树脂如环氧树脂、聚酰亚胺等虽然有较高的电阻率、低介电常数、易加工等特点, 但热导率过小, 其用于电子元器件无法使高热量及时散去。因此, 通过填充导热填料的方式获取高分子复合材料, 从而改进高分子的导热性能, 以避免热疲劳受损。向高分子

材料中添加导热填料的方法制备添加型导热高分子材料, 其加工工艺简单, 成本相对较低, 所以目前导热高分子复合材料的研究主要集中在添加型导热高分子材料的研究上<sup>[2]</sup>。

对于导热低密度聚乙烯 (PE-LD) 的研究, 主要采用单一导热材料 (如石墨) 进行研究<sup>[3]</sup>。笔者分别采用石墨、氮化铝 (AlN) 及石墨与 AlN 复合作为

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目 (21204032)

联系人: 周健, 教授, 长期从事高分子材料改性及加工工作

收稿日期: 2014-08-22

填充导热填料,研究其对 PE-LD 导热性能、力学性能的影响,研究表明,将石墨和 AlN 复合有助于提高 PE-LD 的导热性能并改善其综合力学性能。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

PE-LD: 2426H, 中国石油天然气股份有限公司大庆石化分公司;

AlN: 三河燕郊新宇高新技术陶瓷材料有限公司;

高导热石墨: K15, 南京格瑞碳素材料有限公司。

### 1.2 主要仪器与设备

双辊开炼机: XH-401BE 型, 东莞市锡华检测仪器有限公司;

压片机: XH406B 型, 东莞市锡华检测仪器有限公司;

万能材料试验机: CMT4104 型, 珠海市三思泰捷电气设备有限公司;

哑铃型制样机: ZYJ1251 型, 深圳新三思材料检测有限公司;

缺口型制样机: QYJ1251 型, 深圳新三思材料检测有限公司;

摆锤式冲击试验机: ZBC-1 型, 深圳新三思材料检测有限公司;

维卡软化点试验机: ZWK1302-B 型, 美斯特工业系统(中国)有限公司;

导热系数测定仪: DRPL-I 型, 湘潭市仪器仪表有限公司;

差示扫描量热(DSC)仪: Q2000, 美国 Waters 公司。

### 1.3 试样制备

按配方准确称取所需各物料,在双辊开炼机上进行充分混合塑炼,前辊温度控制在 108℃,后辊温度控制在 106℃。将混合塑炼好的物料定量放入压片模具中,将模具放入压片机上加热加压,并经过冷却定型得到 PE-LD 导热复合板。压片工艺参数为:上下模温均为 150℃。模压参数为:低压 5 MPa, 2 min;高压 15 MPa, 5 min。

### 1.4 性能测试

拉伸性能按 GB/T 1040-2006 测试;

冲击性能按 GB/T 1843-2008 测试;

弯曲性能按 GB/T 9341-2008 测试;

导热性能按 GB/T 3399-1982 测试;

DSC 分析:在扫描速率 10℃/min 下,从室温升至 200℃,保温 5 min,再降至室温,再升温至 200℃。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单一导热填料含量对 PE-LD 复合材料力学性能的影响

(1) 石墨含量对 PE-LD/石墨复合材料力学性能的影响。

石墨含量对 PE-LD/石墨复合材料力学性能的影响如表 1 所示。

表 1 石墨含量对 PE-LD/石墨复合材料力学性能的影响

| 项目                           | 石墨质量分数/% |       |      |       |       |
|------------------------------|----------|-------|------|-------|-------|
|                              | 0        | 20    | 30   | 40    | 50    |
| 拉伸强度/MPa                     | 10.00    | 9.25  | 9.48 | 9.78  | 11.06 |
| 弯曲强度/MPa                     | 5.95     | 8.4   | 9.28 | 11.28 | 15.74 |
| 缺口冲击强度/(kJ·m <sup>-2</sup> ) | 30.1     | 12.53 | 6.14 | 4.43  | 4.49  |

从表 1 可见,当石墨质量分数小于 40% 时,PE-LD/石墨复合材料的拉伸强度小于纯 PP 的拉伸强度。当石墨质量分数为 20% 时,复合材料的拉伸强度达到最小值,随着石墨含量的增加,复合材料的拉伸强度缓慢增加。当石墨质量分数为 50% 时,复合材料的拉伸强度出现最大值,为 11.06 MPa。说明石墨在 PE-LD 基体中含量达到 50% 时,对复合材料有一定的增强作用。随着石墨含量的增加,PE-LD/石墨复合材料的弯曲强度不断增大。其原因是石墨为片状结构晶体,当复合材料受到弯曲应力时,能承受更大的弯曲应力。但随着石墨质量分数的增加,PE-LD/石墨复合材料的缺口冲击强度呈下降趋势。其原因是石墨是无机填料,与 PE-LD 共混后相界面的相容性差,使得 PE-LD/石墨复合材料受到冲击时,相界面失去吸收冲击能量的作用,导致复合材料的缺口冲击强度下降<sup>[4]</sup>。

(2) AlN 含量对 PE-LD/AlN 复合材料力学性能的影响。

AlN 含量对 PE-LD/AlN 复合材料力学性能的影响如表 2 所示。

表 2 AlN 含量对 PE-LD/AlN 复合材料力学性能的影响

| 项目                           | AlN 质量分数/% |       |      |       |       |
|------------------------------|------------|-------|------|-------|-------|
|                              | 0          | 20    | 30   | 40    | 50    |
| 拉伸强度/MPa                     | 10.00      | 9.55  | 9.87 | 10.24 | 11.07 |
| 弯曲强度/MPa                     | 5.95       | 7.97  | 8.18 | 9.49  | 10.04 |
| 缺口冲击强度/(kJ·m <sup>-2</sup> ) | 30.1       | 21.51 | 8.17 | 7.69  | 4.75  |

从表 2 可见,当 AlN 质量分数为 20% 时,PE-LD/AlN 复合材料的拉伸强度降到 9.55 MPa,下降 4.5%;随着 AlN 含量的继续增加,复合材料的拉伸强度逐渐增大。随着 AlN 含量的增加,PE-LD

/AlN 复合材料的弯曲强度逐渐增加,说明 AlN 的加入使得复合材料的刚性提高。其原因是当弯曲应力作用于复合材料时,弯曲应力传递给 AlN 粒子,AlN 粒子起到抵抗弯曲应力的作用,导致 PE-LD/AlN 复合材料的刚性提高。但随着 AlN 含量的增加,PE-LD/AlN 复合材料的缺口冲击强度不断下降。其原因是 AlN 属于无机填充物,与 PE-LD 基体的相容性差,两者相界面存在缺陷,导致复合材料的缺口冲击强度下降。

## 2.2 单一导热填料含量对 PE-LD 复合材料热导率的影响

导热填料石墨、AlN 对 PE-LD 复合材料热导率的影响如图 1 所示。

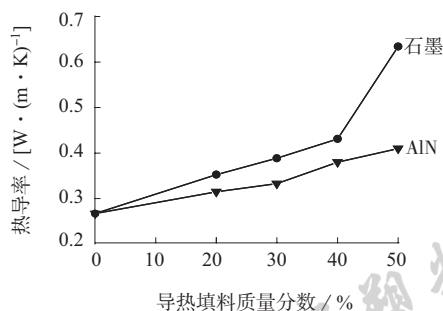


图 1 导热填料对 PE-LD 复合材料热导率的影响

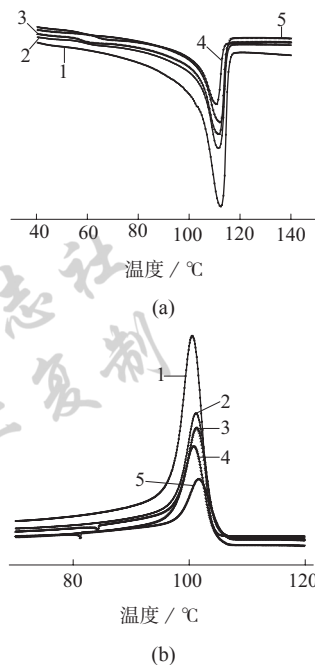
从图 1 可以看出,当石墨质量分数小于 40% 时,PE-LD/石墨复合材料的热导率随石墨含量的增加呈线性增加。当石墨质量分数达到 40% 时,复合材料的热导率为  $0.435 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,相比于纯 PE-LD 的  $0.266 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,提高了 63.5%。这是因为石墨含量较小时,石墨粒子在体系内相互接触机会少,虽然石墨的热导率较高,但石墨粒子被树脂隔开,热阻较大,不能形成导热通路,导致复合材料的热导率不高。当石墨质量分数大于 40% 时,PE-LD/石墨复合材料的热导率随石墨含量的增加急剧增大。当石墨质量分数为 50% 时,复合材料的热导率为  $0.636 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,为纯 PE-LD 的 2.39 倍。这是因为石墨含量较高时,填料间相互接触的几率增大,整个体系形成导热网链结构,因此 PE-LD/石墨复合材料的热导率迅速提高<sup>[5]</sup>。

从图 1 还可以看出,PE-LD/AlN 复合材料的热导率随着 AlN 含量的增加而缓慢增大。当 AlN 质量分数为 50% 时,复合材料的热导率仅为  $0.410 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。AlN 以孤岛方式存在于 PE-LD 基体中,粒子间接触少,对复合材料的热导性能贡献不大<sup>[6]</sup>。另外,可能由于本实验所用 AlN 为粉末,

由多晶组成,存在较多的缺陷,且由于 AlN 粉末的长径比小,与树脂结合界面存在较多的间隙,不易形成导热通路,所以热导率不高<sup>[7]</sup>。对比图 1 中的两条曲线可知,在添加相同含量导热填料情况下,石墨对复合材料的导热性能的提高大于 AlN。

## 2.3 单一导热填料 PE-LD 复合材料的 DSC 分析

PE-LD/石墨复合材料和 PE-LD/AlN 复合材料的 DSC 曲线分别如图 2、图 3 所示, DSC 分析数据见表 3、表 4。



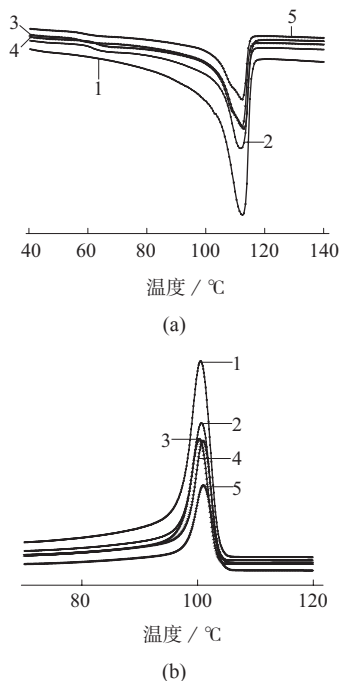
石墨质量分数: 1—0%; 2—20%; 3—30%; 4—40%; 5—50%

a—熔融曲线; b—结晶曲线

图 2 PE-LD/石墨复合材料的 DSC 曲线

由图 2、图 3 及表 3、表 4 可知,随着石墨或 AlN 质量分数的增加,PE-LD 复合材料的玻璃化转变温度呈先下降后上升趋势,而熔融温度、结晶温度变化不大,熔融焓、结晶焓和结晶度呈下降趋势。石墨或 AlN 的存在影响了 PE-LD 大分子链有序排列,降低了 PE-LD 的结晶度,使 PE-LD 分子链段的活动能力增大,导致了 PE-LD 复合材料的玻璃化转变温度降低。而当石墨或 AlN 增加到一定量时,由于导热填料含量过多,阻碍 PE-LD 分子链段运动,使 PE-LD 复合材料的玻璃化转变温度有所升高。

另外,在导热填料用量相同情况下,PE-LD/AlN 复合材料的结晶度高于 PE-LD/石墨复合材料的结晶度。其原因是 AlN 的密度比石墨大,添加相同含量时,其在 PE-LD 中所占体积较小,对 PE-LD 的结晶能力影响相对较小。



AlN 质量分数: 1—0%; 2—20%; 3—30%; 4—40%; 5—50%

a—熔融曲线; b—结晶曲线

图3 PE-LD/AlN 复合材料的 DSC 曲线

图3 PE-LD/石墨复合材料的 DSC 分析数据

| 项目                       | 质量分数/% |        |        |        |        |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                          | 0      | 20     | 30     | 40     | 50     |
| 玻璃化转变温度/℃                | 68.98  | 58.56  | 57.19  | 57.51  | 63.44  |
| 熔融温度/℃                   | 102.73 | 103.44 | 102.83 | 102.68 | 102.20 |
| 熔融焓/(J·g <sup>-1</sup> ) | 111.90 | 73.65  | 63.68  | 56.65  | 37.58  |
| 结晶温度/℃                   | 103.56 | 101.20 | 101.25 | 100.80 | 101.73 |
| 结晶焓/(J·g <sup>-1</sup> ) | 131.00 | 96.46  | 86.65  | 79.89  | 67.98  |
| 结晶度/%                    | 39.08  | 25.72  | 22.24  | 19.78  | 13.12  |

表4 PE-LD/AlN 复合材料 DSC 分析数据

| 项目                       | 质量分数/% |        |        |        |        |
|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                          | 0      | 20     | 30     | 40     | 50     |
| 玻璃化转变温度/℃                | 68.98  | 61.61  | 57.53  | 58.10  | 58.72  |
| 熔融温度/℃                   | 102.73 | 103.56 | 101.98 | 101.81 | 101.47 |
| 熔融焓/(J·g <sup>-1</sup> ) | 111.90 | 76.29  | 71.15  | 64.57  | 44.13  |
| 结晶温度/℃                   | 103.56 | 100.63 | 100.31 | 100.93 | 100.97 |
| 结晶焓/(J·g <sup>-1</sup> ) | 131.00 | 90.59  | 80.81  | 72.75  | 57.07  |
| 结晶度/%                    | 39.08  | 26.64  | 24.85  | 22.55  | 15.41  |

#### 2.4 石墨与 AlN 质量比对 PE-LD/石墨/AlN 复合材料力学性能的影响

当石墨与 AlN 的总质量分数为 50% 时,石墨与 AlN 质量比对 PE-LD/石墨/AlN 复合材料力学性能的影响如表 5 所示。由表 5 可知,当石墨与 AlN 的质量比为 4:1 时,PE-LD/石墨/AlN 复合材料的拉伸强度达到最大值,为 12.80 MPa,相比单一填充质量分数 50% 石墨的 PE-LD/石墨复合材料的拉伸强度 11.06 MPa,提高了 15.7%;当石墨与 AlN 的质量比为 1:4 时,PE-LD/石墨/AlN

复合材料的拉伸强度下降到 10.89 MPa,相比单一填充质量分数 50% AlN 的 PE-LD/AlN 复合材料拉伸强度 11.07 MPa,拉伸强度变化不大。随着石墨含量的减少,PE-LD/石墨/AlN 复合材料的弯曲强度总体呈降低趋势。当石墨与 AlN 的质量比为 4:1 时,弯曲强度有最大值,为 17.15 MPa;而当石墨与 AlN 的质量比为 1:4 时,弯曲强度有最小值,为 12.52 MPa。而单一填充质量分数 50% 石墨或 AlN 的复合材料的弯曲强度分别为 15.74, 10.04 MPa。表明两种填料对复合材料的弯曲性能有正向协同增强效果。当石墨与 AlN 的质量比为 4:1 时,PE-LD/石墨/AlN 复合材料的缺口冲击强度有最小值,为 3.28 kJ/m<sup>2</sup>;当石墨与 AlN 的质量比为 1:4 时,复合材料的缺口冲击强度有最大值,为 3.95 kJ/m<sup>2</sup>;而单一填充质量分数 50% 石墨或 AlN 的 PE-LD 复合材料的缺口冲击强度分别为 4.49, 4.75 kJ/m<sup>2</sup>。说明混合导热填料对 PE-LD 复合材料的缺口冲击强度不如单一填料的填充效果好。

表5 石墨与 AlN 混合比对 PE-LD/石墨/AlN 复合材料力学性能的影响

| 项目                           | 石墨与 AlN 质量比 |       |       |       |
|------------------------------|-------------|-------|-------|-------|
|                              | 4:1         | 3:2   | 2:3   | 1:4   |
| 拉伸强度/MPa                     | 12.80       | 11.41 | 11.42 | 10.89 |
| 弯曲强度/MPa                     | 17.15       | 13.41 | 14.22 | 12.52 |
| 缺口冲击强度/(kJ·m <sup>-2</sup> ) | 3.28        | 3.88  | 3.74  | 3.95  |

#### 2.5 石墨与 AlN 质量比对 PE-LD/石墨/AlN 复合材料热导率的影响

当石墨与 AlN 的总质量分数为 50% 时,石墨与 AlN 质量比对 PE-LD/石墨/AlN 复合材料热导率的影响如图 4 所示。

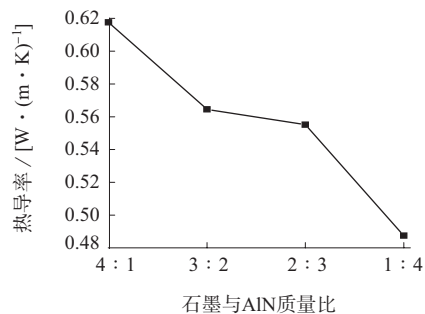


图4 石墨与 AlN 质量比对 PE-LD/石墨/AlN 复合材料热导率的影响

由图 4 可以看出,随着 AlN 的含量不断增加,PE-LD/石墨/AlN 复合材料的热导率呈下降趋势。当石墨与 AlN 质量比为 4:1 时,PE-LD/石墨/

AlN 复合材料的热导率有最大值,为  $0.618 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;当石墨与 AlN 质量比为  $1:4$  时,PE-LD/石墨/AlN 复合材料的热导率则下降到  $0.488 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。只添加质量分数 50% 的石墨时,PE-LD/石墨复合材料的热导率为  $0.634 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,略大于石墨与 AlN 质量比为  $4:1$  时的 PE-LD/石墨/AlN 复合材料的热导率;只添加质量分数 50% AlN 的 PE-LD/AlN 复合材料的热导率仅为  $0.410 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ,低于石墨与 AlN 质量比为  $1:4$  时的 PE-LD/石墨/AlN 复合材料的热导率。这是因为相同质量的石墨比 AlN 的体积大,又由于 AlN 是颗粒状,而石墨是片状结构,并具有超大的径厚比,在聚合物基体中片状石墨与 AlN 颗粒易于搭接,容易形成导热网链。当石墨与 AlN 的质量比为  $4:1$  时,达到最佳填充状态,热导率取得最大值。

## 2.6 PE-LD/石墨/AlN 复合材料的 DSC 分析

当石墨与 AlN 的总质量分数为 50% 时,PE-LD/石墨/AlN 复合材料的 DSC 分析数据如表 6 所示。

表 6 PE-LD/石墨/AlN 复合材料 DSC 分析数据

| 项目                                     | 石墨与 AlN 质量比 |        |        |        |
|----------------------------------------|-------------|--------|--------|--------|
|                                        | 4:1         | 3:2    | 2:3    | 1:4    |
| 玻璃化转变温度 / $^{\circ}\text{C}$           | 68.82       | 65.86  | 64.62  | 66.45  |
| 熔融温度 / $^{\circ}\text{C}$              | 102.73      | 102.75 | 103.24 | 103.26 |
| 熔融焓 / $(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$ | 39.42       | 42.86  | 43.07  | 51.26  |
| 结晶温度 / $^{\circ}\text{C}$              | 102.00      | 102.13 | 102.06 | 101.69 |
| 结晶焓 / $(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$ | 55.78       | 56.40  | 54.38  | 53.04  |
| 结晶度 / %                                | 13.76       | 14.97  | 15.04  | 17.90  |

由表 6 可知,随着 AlN 含量的增加,PE-LD/石墨/AlN 复合材料的玻璃化转变温度呈现先减小后增大趋势,而熔融温度和结晶温度变化不大,熔融焓和结晶度不断增大,结晶焓呈现先增大后减小趋势。AlN 的密度比石墨大,随着 AlN 用量的增大,混合导热填料在复合材料中的体积占有率降低,导致对 PE-LD 结晶能力影响减小。所以石墨/AlN 复合材料的结晶度有所增加。

## 3 结论

(1) 随着石墨或 AlN 含量的增加,PE-LD 复合材料的弯曲强度逐渐增大,而缺口冲击强度呈下降趋势。

(2) 随着石墨或 AlN 含量的增加,PE-LD 复合材料的热导率逐渐增大,且石墨对复合材料热导率的提高比 AlN 显著。

(3) 随着石墨或 AlN 含量的增加,PE-LD 复合

材料的玻璃化转变温度呈先减小后增大的趋势,而结晶度逐渐降低。

(4) 当石墨与 AlN 的总质量分数为 50%,石墨与 AlN 的质量比  $4:1$  时,PE-LD/石墨/AlN 复合材料的拉伸强度、弯曲强度均达到最大值,分别为  $12.8, 17.15 \text{ MPa}$ ;此时 PE-LD/石墨/AlN 复合材料的热导率达到最大值,为  $0.618 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

(5) 采用石墨和 AlN 填充 PE-LD 制备复合材料,降低了 PE-LD 的结晶能力。当石墨和 AlN 总质量分数为 50% 时,随着 AlN 含量的增加,PE-LD 的结晶度增大。

## 参考文献

- [1] Ganguli S, Roy A K, Anderson D P. Improved thermal conductivity for chemically functionalized graphite / epoxy composites[J]. Carbon, 2008, 46:806-817.
- [2] 杜茂平,魏伯荣. 导热高分子材料的研究新进展 [J]. 塑料工业, 2007, 35(6):54-57.  
Du Maoping, Wei Borong. Recent advance in research on thermal conductive polymer material[J]. China Plastics Industry, 2007, 35(6):54-57.
- [3] 李侃社,闫兰英,邵水源,等. LDPE/石墨复合材料的制备和性能 [J]. 西安科技学院学报, 2003, 23(2):191-194.  
Li Kanshe, Yan Lanying, Shao Shuiyuan, et al. Preparation and properties of LDPE / graphite composite[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2003, 23(2):191-194.
- [4] 王锴,马海红,孙海燕,等. 抗静电导热 PP/Al 复合材料的制备与性能 [J]. 塑料, 2012, 41(6):29-31.  
Wang Kai, Ma Haihong, Sun Haiyan, et al. Preparation and property of anti-static electricity and thermal conductive polypropylene / aluminum powder composite[J]. Plastics, 2012, 41(6):29-31.
- [5] 王超,周正发,徐卫兵.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / PP 导热复合材料的制备与性能研究 [J]. 塑料制造, 2013(4):58-62.  
Wang Chao, Zhou Zhengfa, Xu Weibing. Study on preparation and performance of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  / PP conductive composites[J]. Plastics Manufacture, 2013(4):58-62.
- [6] 安群力,齐署华,周文英,等. 绝缘导热  $\text{Si}_3\text{N}_4$  / LLDPE 复合材料的研制 [J]. 合成树脂与塑料, 2008, 25(1):40-43.  
An Qunli, Qi Shuhua, Zhou Wenying, et al. Insulating thermal conductive  $\text{Si}_3\text{N}_4$  / LLDPE composite plastics[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2008, 25(1):40-43.
- [7] 黄丽. 高分子材料 [M]. 第 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2010.  
Huang Li. High molecule material [M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.