

## 低熔点金属/聚合物复合材料的研究现状

张国艳<sup>1,2</sup>, 刘 涛<sup>1</sup>, 易 勇<sup>2</sup>, 刘黎明<sup>2</sup>, 罗江山<sup>3</sup>, 谭秀兰<sup>3</sup>, 芦 艾<sup>1</sup>, 贺江平<sup>1,2\*</sup>, 马寒冰<sup>2\*</sup>

(1. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 绵阳 621900;

2. 西南科技大学材料科学与工程学院, 绵阳 621010;

3. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

**摘要:** 聚合物基导电复合材料在电磁屏蔽、导电、抗静电、自限温加热、甚至导热等领域, 具有广泛的用途。这类复合材料中所用的填料主要有金属、炭黑、石墨、石墨烯等。这些填料在加工过程中处于固态。与之不同的是, 低熔点金属熔点低, 在加工过程中处于液态, 从而可以降低复合体系粘度、提高加工性能、降低设备磨损; 还可以实现加工过程中填料原位细化和原位纤维化, 以及形成双连续相结构。本文概述了低熔点金属填充聚合物复合材料的制备方法, 以及复合材料结构、导电性、流变性和力学性能的主要特点, 分析了与其它聚合物基导电复合材料相比 LMPM/聚合物复合材料的优势, 指出了该领域需要进一步研究的方向。

**关键词:** 低熔点金属; 聚合物; 导电性; 流变性; 力学性能

金属和聚合物是现代社会的两大基本材料, 金属具有优良的导热、导电性能, 而聚合物是一种具有绝缘、隔热性能的材料。将金属与聚合物复合可极大地改善聚合物的导电、导热性能<sup>[1,2]</sup>。金属/聚合物复合材料中所用金属粒子具有多种几何形状, 如颗粒状、薄片状、纤维状等, 但它们的熔点均高于聚合物的加工温度, 在加工过程中处于固态。这就给制备具有高性能的复合材料带来了诸多问题。例如, 在加工过程中剪切力会破坏纤维状或薄片状金属粒子, 减小粒子纵横比, 从而导致复合材料的性能不佳<sup>[3]</sup>。此外, 通过增加填料的体积含量可以提高复合材料的电导率, 但根据刚性粒子填充体系粘度与填料含量的关系<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\eta}{\eta_0} = 1 + 2.5\phi$$

$\eta$ : 体系粘度;  $\eta_0$ : 液体(树脂基体)的粘度;  $\phi$ : 固体填料的体积分数; 2.5: 爱因斯坦系数。

可以得出: 体系粘度随固体含量的增加而升高。也就是说, 如果固体填料的大量添加, 将导致熔体粘度大大增加<sup>[5]</sup>, 导致加工性能降低, 当填料用量超过一定量时还会造成机械性能的下降。不仅如此, 固体粒子还会造成机器磨损<sup>[6~8]</sup>。

与此相反, 在加工过程中, 填料若为流动的液体, 则可以降低聚合物的粘度。低熔点金属(LMPM)正是这样一类材料。因此, 有很多科学工作者以低熔点金属为填料制备了复合材料。常用的低熔点金属有铋、铅、锡、锡铅合金、锡锌合金、锡铝合金、铋铅合金等。在加工过程中, LMPM 可以实现固态与液态的转变, 进而降低体系的粘度, 提高加工性能, 即使是在高的填充量下也不影响加工性能<sup>[5,8]</sup>。另外, 选择恰当的加工工艺还可能会产生以下结果: 如果金属与聚合物复合的温度高于低熔点金属的熔点, 在混炼中处于液态的金属因受到剪切力的作用会分散成纳米粒子, 纳米粒子可以起到增韧聚合物的作用<sup>[9]</sup>。本文综述了有关 LMPM/聚合物复合材料的制备方法、结构特点、流变性质、导电性能和力学性能的研究结果。

### 1 复合材料的制备方法

聚合物基复合材料至少含有两种组分: 填料和树脂基体。各组分之间形成的界面和填料在基体中的分散状态对材料的性能有很大影响。而界面形态及填料在基体中的分散状态很大程度上取决于混合设

收稿: 2013-01-01; 修回: 2013-04-18;

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51073143);

作者简介: 张国艳(1986—), 女, 硕士研究生, 主要从事聚合物基导电复合材料的研究;

\* 通讯联系人, E-mail: he\_jiangping@yahoo.com; mahanbing@163.com.

备、混合工艺以及填料与基体之间的相容性<sup>[10]</sup>。由此可见,制备方法是材料研究中的重要方面。LMPM/聚合物复合材料的制备方法主要包括以下几种:

### 1.1 密炼法

在一定的温度下,选择合适的转子,利用转矩流变仪的密炼单元,将低熔点金属或者合金与聚合物进行复合。如吴德峰<sup>[11]</sup>课题组利用哈克转矩流变仪,在 290℃下,将 Sn-Pb 合金与基体 PPS 进行密炼,研究了 Sn-Pb/PPS 复合材料的流变性能;熊传溪等<sup>[12~14]</sup>利用 Haake-Rheocd 90 型转矩流变仪,在 235℃下,将低熔点金属 Sn 与 PP 进行密炼,研究了 Sn/PP 复合材料的导电性能、力学性能、复合体系的加工性能以及在材料中 PP 的晶型变化。密炼法是热塑性聚合物基复合材料制备的一种较为常用的方法,它的优点是混合效率高,稳定性好,并且可以使低熔点金属原位形成微纤,增大粒子的长径比<sup>[15,16]</sup>。

### 1.2 挤出法

在设定的温度和螺杆转速下,利用双螺杆或单螺杆挤出机,将低熔点金属和聚合物基体进行复合。如 Tobias Pfefferkorn<sup>[5,6]</sup>,在一定的温度下,运用双螺杆挤出机将 Sn-Zn 合金、铜纤维以及聚酰胺 6 进行复合。研究表明,合金的熔点为 200℃时,复合体系加工性能达到最佳。Bormashenko 等<sup>[17,18]</sup>运用单螺杆挤出机,将 Sn-Zn-Cd 合金和 LDPE 进行挤出造粒,研究了合金粒子在聚合物中的分散程度。在 Semsarzadeh<sup>[19]</sup>发明的专利中提到运用单螺杆挤出机将 Pb-Bi 合金与 PP 复合,并指出挤出法使得金属粒子取向拉长形成纤维,贯穿在聚合物中。这种方法的优点是制备过程可以连续进行,易实现大规模生产,通过选用不同的口膜直接进行所需形状产品的成型加工<sup>[20]</sup>。另外,就混合效果而言,双螺杆挤出机要优于单螺杆挤出机<sup>[18]</sup>。

### 1.3 球磨-热压法

将 LMPM 与聚合物基体进行球磨混合,然后在一定温度下热压。如益小苏、张向武等<sup>[21~23]</sup>将 Sn-Pb 合金与 PS 进行球磨,而后热压。研究了这种方式制备的 Sn-Pb/PS 复合材料的导电性和流变性。球磨法的优点是可以实现金属粒子的细化;缺点是球磨混合需要很长的时间,制备效率低、耗能大,对聚合物分子结构会产生一定程度的损伤。

### 1.4 溶液混合法

将聚合物溶解在所选的有机溶剂中,将一定量的低熔点金属粒子分散在溶液中,制成悬浮液。然后除去溶剂,采用需要的模具压制成型<sup>[1]</sup>。该方法的优点是溶液对金属有一定的保护,起到防氧化的作用。

### 1.5 简单混合法

这是较早采用的制备 LMPM/聚合物复合材料的方法。这种方法不需要大型的仪器设备,运用比较方便,实验条件容易满足。只需在一定温度下,将 LMPM 和聚合物基体加在一起,进行搅拌混合,然后将混合好的复合物进行热压或注塑成型。如 Hudgin 和 Semsarzadeh<sup>[24]</sup>在专利中提到将 PE 与 Pb-Bi 合金在一定的转速下混合,使金属在 PE 中分散。然后将共混物夹在薄的炭黑层之间进行热压。

尽管人们在 LMPM/聚合物复合材料的制备方面开展了大量工作,但在这方面仍然存在许多需要解决的问题。有报道指出,Sn-Cu 合金与 PE 在密炼机中复合后,有银白色的合金液体从密炼机中流出,导致金属含量不能提高<sup>[25]</sup>。这种现象可能产生于以下原因。在加工温度范围内,PE 熔体的粘度为  $10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ <sup>[6]</sup>,Sn 的粘度大约  $1.4 \sim 1.8 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ <sup>[26]</sup>。另一方面,锡熔体的表面张力为  $400 \sim 620 \text{ mN/m}$ <sup>[27]</sup>,而 PE 熔体在  $140 \sim 250^\circ\text{C}$  范围内的表面张力为  $20 \sim 30 \text{ mN/m}$ <sup>[28]</sup>。可见 Sn 熔体与 PE 熔体在粘度和表面张力方面均存在巨大差异<sup>[6]</sup>。有研究者尝试通过加入偶联剂来改善 LMPM 与 PP 的界面相容性。如熊传溪等<sup>[13,14]</sup>将 Sn(熔点  $231.97^\circ\text{C}$ )或者 Sn-Pb 合金(熔点  $210^\circ\text{C}$ )用 DBTL(二月桂酸二丁基锡)或者 NDZ(钛酸酯偶联剂)处理,然后将处理过的金属或合金与 PP 在 Haake~heocd 90 转矩流变仪上进行密炼。由于 DBTL 属于物理偶联剂,它在 LMPM 与 PP 之间形成比较疏松的物理界面层;而 NDZ 属于化学偶联剂,它在 LMPM 与 PP 的界面上可以形成化学键,使得 PP 与 LMPM 结合相对紧密<sup>[14]</sup>。偶联剂种类会对加工性能产生影响。在他们的研究中发现加入这两种偶联剂会增加 PP 的熔化时间,加工能耗增大<sup>[14]</sup>。要使加工性能最优化,还需寻找更合适的偶联剂。更为重要的是,即使采用偶联剂,也不能解决加工过程中

金属液体从复合体系中析出的问题<sup>[25]</sup>。

## 2 复合材料的结构特点

低熔点金属与聚合物复合时,处于熔融态的低熔点金属因受到剪切或拉伸作用会发生变形,实现原位细化或原位纤维化。熊传溪研究小组<sup>[15,16,29]</sup>以 Sn/PP 为体系,研究了低熔点金属在聚合物中的存在形态。结果表明,金属在聚合物中原位形成了长为 0.4~0.6mm 的微纤,并且形成微纤的尺寸与剪切应力和拉伸应力的大小有密切关系。Bormashenko 等<sup>[17]</sup>利用低熔点金属与聚合物复合,实现了金属粒子的原位细化,发明了一种制备 LMPM 细小粒子(平均粒径达 3.8 $\mu$ m)的方法。

LMPM/聚合物复合材料与其它聚合物基导电复合材料相比,最大的优点在于可以形成金属与聚合物相互贯穿的双连续相结构,从而赋予复合材料高的导电性能。早在 1985 年,Sorensen 等<sup>[30,31]</sup>将聚合物与低熔点金属共混得到具有高电导率的复合材料而申请了专利。他们的发明是:在使所选 LMPM 处于固态与液态之间的一个温度下,通过剪切应力将具有非牛顿型流变行为的聚合物与低熔点金属复合,在得到的复合材料中形成了聚合物与金属相互贯穿的网络,由于金属网络贯穿于聚合物基体中,为复合材料提供了导电通道,因此大大降低了聚合物的电阻率。Hudgin 和 Semsarzadeh<sup>[3,24]</sup>的专利中提到,由 LMPM 和聚合物形成的金属化复合材料具有高的热导率和电导率,如 LMPM/聚合物复合材料的电导率可达纯金属的 50%,这是其它聚合物基导电复合材料难以实现的。

随后,Semsarzadeh<sup>[32,33]</sup>又报道了 LMPM 与聚合物形成相互贯穿的双连续相结构的现象。他采用相同的制备工艺,制备了 Sn-Zn/PP 和铝合金(薄片)/PP 两种复合材料,然后将两者的电阻率进行对比,发现后者的电阻率比前者高 200 倍。这是因为加工温度在 Sn-Zn 合金的熔点附近,在加工的过程中,随着剪切力的作用使得软化的 Sn-Zn 合金可以在熔融态的聚合物中流动,从而形成了贯穿于聚合物基体中的金属连续相。实验结束时又采取了急剧降温,将形成的连续相予以及时“固定”。铝合金的熔点较高,在加工过程中,铝合金薄片始终处于固态,不能形成类似结构。

## 3 复合材料的导电性

导电性是 LMPM/聚合物复合材料最重要的性质之一,因聚合物与低熔点金属复合,使得聚合物的电阻率下降。比如,一般聚合物导电率的数量级达  $10^{-17}$  S/cm,如 PP 的电导率为  $10^{-16} \sim 10^{-20}$  S/cm<sup>[34]</sup>,LMPM 如锡的电导率为  $8.77 \times 10^4$  S/cm,LMPM 的添加很大程度上降低了 PP 的电阻率,这是因为 LMPM 在聚丙烯基体中形成了连续的导电网络,赋予 LMPM/PP 复合材料良好的导电性能<sup>[35]</sup>。LMPM/聚合物复合材料的导电性能与温度、基体种类、填料含量、尺寸、形态、分散以及氧化层厚度等众多因素有关<sup>[36]</sup>。这里主要对以下因素的影响进行总结。

### 3.1 温度的影响

加工温度对 LMPM/聚合物复合材料的导电性能有影响。张向武、潘颐等<sup>[22,23]</sup>用 PS 作基体,Sn-Pb 合金(Sn:Pb=60:40,合金熔点为 183 $^{\circ}$ C~188 $^{\circ}$ C)为填料,采用球磨-热压法制备了复合材料,研究了热压加工温度对导电性能的影响。结果表明当热压温度在合金熔点(200 $^{\circ}$ C)以上时,随着合金含量的增加,材料电阻率没有明显变化,仍处于高电阻率的状态;当热压温度在合金熔点以下时,随着合金含量的增加材料电阻率明显下降,在含量为 20vol%时,材料电阻率的对数值陡然下降,复合材料由绝缘体变为导体,出现了渗流现象,渗流阈值为 20vol%。

测试温度也对 LMPM/聚合物复合材料的导电性能有影响。对热压温度低于合金熔点时制备的上述复合材料,在合金含量大于等于渗流阈的条件下,测试温度在 180 $^{\circ}$ C~200 $^{\circ}$ C 之间,复合材料电阻率随温度升高急剧上升,材料由导体变为绝缘体,产生 PTC 效应。PTC 效应发生的温度区间包含了合金的熔程 183 $^{\circ}$ C~188 $^{\circ}$ C。调节合金填料的熔点可以改变 PTC 转变温度<sup>[21,37]</sup>。

### 3.2 聚合物基体的影响

复合材料产生的 PTC 效应与所用基体有关。Sn-Pb 合金与 PS 形成的复合材料具有 PTC 效应。

PTC 效应发生在合金熔点处,是合金的物态变化引起的。合金变为液态时表面能减小,大大提高了 LMPM 与 PS 之间的浸润性,导致单位体积内合金含量的降低,破坏了合金在聚合物中的偏聚分布,导致 PTC 效应的出现<sup>[38]</sup>。在 Sn-Pb 合金与 HDPE 形成的复合材料中,则出现两次 PTC 效应<sup>[37]</sup>。第一次 PTC 效应发生在 HDPE 的熔点处。HDPE 是结晶聚合物,导电填料主要分布在基体的非结晶区。与非结晶聚合物 PS 相比,等量的合金粒子在 HDPE 基体中的分散密度更大,易于形成偏聚分布,提高导电性<sup>[34]</sup>。而在 HDPE 熔点处,HDPE 的熔融膨胀导致合金粒子间距增大,破坏了形成的导电网络,产生了 PTC 效应;第二次 PTC 效应发生在合金的熔点处,发生的原因与 Sn-Pb/PS 出现 PTC 效应的原因相同。

### 3.3 LMPM 含量的影响

LMPM 在复合材料中的含量对材料的导电性能有显著影响,一般来说,复合材料的电导率随 LMPM 含量的增加而增加。Walter<sup>[39]</sup> 研究小组,用 PA6(聚酰胺 6)为基体,以铜纤维和 Sn-Zn 合金为填料,制备了导电复合材料,研究了复合材料的导电性能与填料含量的关系。结果表明,随着金属含量的增加,电导率逐渐增加,当填料体积含量约为 20% 时,电导率急剧增大,发生了渗流现象。Bormashenko<sup>[18]</sup> 等在研究 Sn-Zn-Cd/LDPE 体系时,也得出了类似的规律,即随着 Sn-Zn-Cd 质量百分含量的增加电阻率下降。

## 4 复合材料的流变性

研究聚合物基复合材料的流变性能对确定材料成型加工工艺等有很大意义。同导电性一样,LMPM/聚合物体系的流变性质也与诸多因素有关,主要有加工方式、基体的极性、测试温度、剪切速率(转速)、填料的粒径、分散、含量等。

孙义明<sup>[40]</sup> 研究团队研究了基体极性和混合方式对 LMPM/聚烯烃体系的流变性质的影响。选用的低熔点合金为 Bi-Pb,基体为 HDPE 或者 PVC。结果表明,采用开炼方式有利于合金颗粒的分散,但会使粘度上升;并且使用极性 PVC 作基体会出现不稳定的现象<sup>[41]</sup>。

LMPM 的含量以及剪切速率对 LMPM/聚合物复合材料的流变性有影响,一般在 LMPM 含量一定的条件下,LMPM/聚合物复合体系粘度随剪切速率增大而减小;在剪切速率一定的条件下,当加工的温度在 LMPM 熔点以上时,LMPM 的含量越高,复合体系的粘度越低,若加工温度低于金属的熔点时,在金属含量很低时,体系粘度稍有减小,而随着金属加入量的增大,复合体系的粘度曲线会陡然上升<sup>[8]</sup>。如吴德峰课题组<sup>[11]</sup> 在合金熔点以上,采用哈克转矩流变仪密炼的方法制备 Sn-Pb/PPS 复合材料,研究了剪切速率对 Sn-Pb/PPS 复合体系粘度的影响。他们发现,在较低剪切速率范围内(小于 0.02/s),剪切速率对粘度的影响不大;当剪切速率在 0.02/s 以上时,随剪切速率的增大,体系粘度减小,呈现出剪切变稀的特征。这是因为沿流动方向聚合物分子链取向导致局部应力急剧减小。而当剪切速率增大至 100/s 以上时,随剪切速率的增大,体系粘度迅速减小。孙义明、熊传溪等<sup>[40, 42]</sup> 也研究了 LMPM 含量对复合体系粘度的影响,发现当加工温度在 LMPM 熔点以上时,随着 LMPM 含量的增加,在混炼中体系粘度明显降低,表现出液态金属对基体的促流作用;当金属的加入量过大时,LMPM/聚合物复合材料会发生流体由假塑型流体向牛顿型流体转变,流变行为更多的凸显出金属的性质。张向武<sup>[8]</sup> 基于 Sn-Pb/PS 体系研究了加工温度分别在合金熔点以上和熔点以下,LMPM 含量对体系粘度的影响。研究结果表明,当加工温度在 Sn-Pb 熔点以下时,加工体系粘度随合金含量的增加而增加;而当加工温度在合金熔点以上时,结果恰好相反。这是由于加工温度在合金熔点以上时,合金粒子从刚性粒子变为可变形液滴,熔融态合金的粘度比熔融态聚合物的粘度小很多,合金液滴在剪切应力的作用下会变形或破碎,从而原位变成椭圆状或纤维状<sup>[29]</sup>。

## 5 复合材料的力学性能

力学性能是材料性能最基本的考量项目之一,研究材料的力学性能对材料的实际应用具有重要意义。

早在 20 世纪 80 年代, Hudgin 和 Semsarzadeh 就对 LMPM/聚合物复合材料的力学性能做了研究,

他们认为在加工过程中,低熔点合金与聚合物之间发生了自由基反应而形成了相互贯穿的网络结构,使得合金与聚合物之间有很强的作用力,从而增强了复合材料的力学性能如冲击强度、拉伸强度。他们将填充 LMPM 的复合材料(Sn-Zn/PBT 和 Pb-Bi/PBT)的力学性能与 Al(薄片)/PBT 复合材料进行了比较,发现前者冲击强度比后者高 30%,将聚合物基体换成 PC 可以得到相似的结论,且前者的拉伸性能也远优于后者<sup>[33,43]</sup>。

选用 Sn-Zn/PP 体系,进行了进一步研究。在其它条件不变的条件下,改变合金组成元素的比例,增加 Sn-Zn 中 Zn 的含量,导致复合材料的冲击强度和拉伸性能均下降。Zn 的熔点较高,Zn 含量的增加导致合金熔点的升高,因此,在加工过程中合金处于固态。选用其它金属与锡组成合金,如 Sn 分别与 Zn、Al、Mo、Ag、Cu 等组成双组分合金,并将各个合金与 PP 复合后,测试了复合材料的冲击强度和拉伸强度。结果表明,含 Sn 与 Zn、Al 或者 Mo 组成合金的复合材料的冲击强度和拉伸强度均高于含 Sn 与 Ag 或者 Cu 组成合金的复合材料。这是因为 Zn、Al 和 Mo 比 Ag 和 Cu 的熔点低,在加工中易于熔融而成为液态。由此可见,形成合金与聚合物相互贯穿网络有利于提高 LMPM/聚合物复合材料的冲击强度和拉伸强度<sup>[44]</sup>。

1989 年,以色列的 Rigbi, Haifa<sup>[45]</sup>报道了 Bi-Pb-Sn-Ca 合金与 EPDM 橡胶复合,将复合材料的拉伸强度、伸长率与纯橡胶进行比较,结果如表 1 所示,在相同测试条件下前者高于后者。

表 1 Gum 及 Bi-Pb-Sn-Ca/EPDM 复合材料拉伸强度和伸长率

Table 1 Gum and Bi-Pb-Sn-Ca/EPDM compound tensile strength and elongation

	Gum	Bi-Pb-Sn-Ca/EPDM
拉伸强度(在 72℃)	0.79MPa	1.15MPa
拉伸强度(在 88℃)	0.56MPa	1.11MPa
伸长率(在 72℃)	338%	600%
伸长率(在 88℃)	150%	480%

## 6 结束语

LMPM 填充聚合物复合材料是一种新型的导电高分子材料,具有优良的导电性能和力学性能,且易加工。可以用在电子、电气以及电磁屏蔽等领域。尽管对该类复合材料已开展了大量研究,但仍然存在很多亟待解决的问题。如:如何提高填料的分散程度<sup>[46,47]</sup>;如何消除复合过程中金属液体析出现象<sup>[25]</sup>;未涉及金属的流变性质对复合材料流变性质和加工行为的影响;对复合材料的结构与加工过程之间的关系研究不够深入等。这些问题还有待今后进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 张向武. 低熔点合金聚合物基复合材料的制备与性能研究. 杭州:浙江大学工学博士学位论文, 2001.
- [2] 王松林, 郦华兴, 彭少贤, 黄小平, 郦昊. 湖北工学院学报, 1998, 13(4): 29~32.
- [3] Hudgin D E, Semsarzadeh M A. USP 4533685, 19850806.
- [4] 梁基照. 聚合物基复合材料设计与加工. 北京:机械工业出版社, 2011, 178.
- [5] Walter M, Tobias G P. Polym Eng Sci, 2009, 1511~1524.
- [6] Walter M, Tobias P. Hamburg, Germany, 2007:19.
- [7] 孙义明, 孟庆浩, 彭少贤, 陈绪煌, 郦华兴, 龙化云, 黄再兵. 塑料科技, 2004, (4): 31~34.
- [8] Zhang X W, Pan Y, Chen J F. Mater Sci, 2000, 35: 4573~4581.
- [9] 巴塔查里亚 S K. 金属填充聚合物——性能和应用. 杨大川, 刘美珠. 北京:中国石化出版社, 1992, 26.
- [10] 梁基照. 聚合物基复合材料设计与加工. 北京:机械工业出版社, 2011, 231.
- [11] Wu D F, Wu L F, He J, Zhang M, Yan C G. Polym Sci, 2008, 46: 677~ 690.
- [12] 熊传溪, 闻获江. 复合材料学报, 1999, 16(3): 40~45.
- [13] 熊传溪, 闻获江. 中国塑料, 1999, 13(4): 23~28.

- [14] 熊传溪, 闻荻江. 玻璃钢/复合材料, 1999, (2): 29~31.
- [15] 熊传溪, 杨小利, 余剑英, 闻荻江. 武汉工业大学学报, 1999, 21(4): 13~15.
- [16] Xiong C X, Yang X L, Wen D J. J Wuhan Univ Techn, 1998, 13(4): 36~41.
- [17] Bormashenko E, Sutovski S, Pogreb R, Sheshnev A, Bormashenko Ye, Musina A, Nir A, Luban L. J Mater Process Technol, 2005, 168: 367~371.
- [18] Bormashenko E, Sutovski S, Pogreb R, Sheshnev A, Bormashenko Y. J Thermoplast Compos Mater, 2004, 17: 245~257.
- [19] Semsarzadeh M A. USP 4639396, 19870627.
- [20] 梁基照. 聚合物基复合材料设计与加工. 北京: 机械工业出版社, 2011, 263.
- [21] Yi X S, Zhang X W, Shen L, Pan Y. Polym-plast Technol Eng, 2000, 39(5): 829~833.
- [22] Zhang X W, Pan Y, Shen L, Zheng Q, Yi X S. J Appl Polym Sci, 2000, 77: 1044~1050.
- [23] Zhang X W, Pan Y. J Appl Polym Sci, 2000, 77: 756~763.
- [24] Hudgin D E, Semsarzadeh M A. EUP0132739, 19840714.
- [25] 贺江平, 唐明静, 王宪忠, 芦艾. 中国化学会. 2008年全国高分子材料科学与工程研讨会. 贵阳, 2008, 520.
- [26] Tomasz G, Zbigniew M, Wladyslaw G. Int J Thermophys, 2011, 32: 1210~1233.
- [27] Zhang F Y, Kusuhira M. J Colloid Interface Sci, 2002, 254: 338~345.
- [28] 吴爱民, 孙载坚. 中国塑料, 1999, 4(13): 87~92.
- [29] 熊传溪, 闻荻江. 材料导报, 1998, 12(3): 69~73.
- [30] Sorensen, Willard I. EUP0163058, 19850204.
- [31] Sorensen I W, Hills B, Mich. USP 4557857, 19851210.
- [32] Semsarzadeh M A. J Polym Sci, Polym Lett Ed, 1985, 23: 183~184.
- [33] Semsarzadeh M A. J Polym Sci, Part C: Polym Lett, 1987, 25: 447~449.
- [34] 杜新胜, 张春梅, 刘志琴, 杨成洁, 薛小妮. 塑料助剂, 2009, (2): 1~5.
- [35] Anderzej B. Polimery, 1996, 41(3): 139~142.
- [36] 刘远瑞. 填充型导电复合材料的研究. 杭州: 浙江大学硕士学位论文, 2005.
- [37] 刘静, 潘颀, 张向武. 复合材料学报, 2002, 1(6): 116~119.
- [38] 益小苏. 复合导电高分子材料的功能原理. 北京: 国防工业出版社, 2004, 219.
- [39] Walter M, Tobias G P. Polym Eng Sci, 2009, 1511~1524.
- [40] 孙义明, 孟庆浩, 彭少贤, 杨宇红, 张光彦. 现代塑料加工应用, 2004, 16(6): 11~12.
- [41] 孙义明, 孟庆浩, 彭少贤, 杨宇红. 现代塑料加工应用, 2004, 16(3): 1~4.
- [42] 熊传溪, 万影, 闻荻江. 中国有色金属学报, 1999, 9(2): 268~272.
- [43] Semsarzadeh M A, Hudgin D E. J Polym Sci; Part C: Polym Lett, 1986, 24: 541~543.
- [44] Semsarzadeh M A, Hudgin D E. J Polym Sci; Part A: Polym Chem, 1988, 26: 2763~2768.
- [45] Haifa Z R. The 135th Rubber Division ACS Meeting, Mexico City, 1989, 1107~1110.
- [46] 贺丽丽, 叶明泉, 韩爱军. 材料导报, 2008, 22: 294~297.
- [47] 孙业斌, 张新民. 特种橡胶制品, 2009, 30(3): 73~78.

## Present Situation of Studying LMPM/Polymer Composites

ZHANG Guo-yan<sup>1,2</sup>, LIU Tao<sup>1</sup>, YI Yong<sup>2</sup>, LIU Li-ming<sup>2</sup>, LUO Jiang-shan<sup>3</sup>,  
TAN Xiu-lan<sup>3</sup>, LU Ai<sup>1</sup>, HE Jiang-ping<sup>1,2\*</sup>, MA Han-bing<sup>2\*</sup>

(1. *Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;*

2. *School of Materials, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China;*

3. *Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China*)

**Abstract:** Polymer-based conductive composites were broadly applied in many fields, such as electromagnetic shielding, electric conduction, antistatic materials, self-limiting temperature heating, heat conduction and so on. Currently, the fillers used in electrically conductive polymer composites are in solid state during the processing, including metal, carbon black, graphite and graphene. In contrast to this, the low melting point metals are in liquid state as conductive fillers during the processing, which allows to reduce the viscosity of the composites, improve the processability, reduce the wear on equipment, reduce the particle size of fillers and increase the length-diameter ratio of particle. In this paper, LMPM/polymer composites' preparation methods, and the main features of composite's structure, conductivity, rheology and mechanical properties were reviewed, LMPM/polymer conductive composite's superiority compared with other polymer-based conductive composites were introduced, and some deficiencies in this field were pointed out.

**Key words:** Low melting point metal; Polymer; Conductivity; Rheology; Mechanical properties