

导热塑料的研究与应用

李 丽 王成国

(山东大学材料科学与工程学院, 济南 250061)

摘要:随着科学的进步导热塑料应用领域不断扩大, 尤其近些年来蓬勃发展的信息产业, 为导热塑料提供了新的发展空间。本文对比了高分子材料、金属材料及金属氧化物导热性能, 介绍了聚合物的导热机理, 并对不同填充含量可适用的导热模型进行了介绍。讨论了提高塑料导热性能的途径和近年来提高导热性能新的研究方法, 对非绝缘导热塑料、绝缘导热塑料的应用研究和最新进展作了综述, 提出了导热塑料目前存在的问题, 展望了导热塑料的应用前景。

关键词:导热系数; 塑料; 导热模型; 研究方法

金属材料为传统概念上的导电、导热材料, 但随着高分子科学技术的进步, 高分子材料也成为导电、导热领域新的角色, 它颠覆了传统高分子材料绝缘隔热的概念。导电高分子材料是近几年研究的一个热点, 导热高分子材料也随着应用领域的不断扩大逐渐被人们重视, 如换热工程、电磁屏蔽、电子电气、摩擦材料等。近些年来蓬勃发展的信息产业, 对高分子材料的性能提出了新的要求, 尤其为导热塑料的发展提供了发展空间, 导热塑料在电脑配件上的应用将改善电脑的散热问题并提高其运行速度和稳定性, 如 CPU、笔记本外壳和各种集成电路板, 这些材料都要求导热绝缘。高分子材料绝缘好, 但作为导热材料, 纯的高分子材料一般是不能胜任的, 因为高分子材料大多是热的不良导体。高分子的导热系数小(见表 1)要拓展其在导热领域的应用, 必须对高分子材料进行改性。

表 1 一些高分子的导热系数^[1]

Table 1 Thermal conductivity of some polymers

材 料	PE	PVC	PS	PMMA	Nylon
$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	0.33	0.13~0.17	0.08	0.17~0.25	0.25

表 2 一些金属和金属氧化物的导热系数

Table 2 Thermal conductivity of metal and metal oxide

材 料	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	材 料	$\lambda/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$
Ag	417	BeO	219
Al	190	MgO	36
Ca	380	Al ₂ O ₃	30
Mg	103	CaO	15
Fe	63	NiO	12
Cu	398	AlN	320
Au	315	SiC	270

由 Freedonia^[2]集团出版的研究报告(美国市场研究机构)预测, 到 2006 年, 美国对传导性高分子材料的市场需求预计在未来的 4 年内每年增长 6.5%, 达到 9.2 亿美元。报告还研究了不同传导工艺技术过去的发展趋势和将来的预测, 如填充炭黑粉末的、用金属填充、纤维填充、涂层以及可利用树脂的范围。Freedonia 咨询委员会预测最好的工艺技术是纤维填充的传导高分子, 因为他们具有最好的屏蔽性质和表面性质, 增长最大的是 PVC 为基体的树脂, 因为 PVC 树脂具有较低的价格, 可增强的性质和较好的可设

计性和简单的加工工艺。按照这个报告,传导高聚物在抗静电包装将发挥重要作用,在敏感电子装置的电子元件的需求将增加。

Danes 等^[3]在文章中指出,片材在横向上的合适的热导系数是:在机械方面的应用为 $1.3\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ $\sim 2\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,在电子领域的应用为 $2\sim 4\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,而未填充工程塑料热导率只有 $0.15\sim 0.3$ 。制造填充型导热复合材料的一个大的困难是如何保持树脂基体的原有性能。由于填料的加入,使材料的机械性能下降。因此,在复合材料的设计中不仅要考虑到好的传导性,而且要求材料稳定性好、无毒无害、机械性能良好和价廉。相对于填充型聚合物的另一个选择是使用本身具有良好导热性能的聚合物,但是此类材料价格昂贵并且性能上缺乏稳定性,成为他们在使用上的主要缺点。塑料是高分子材料中产量最大的材料,本文将介绍导热塑料的研究和发展。

1 导热机理

导热性能是聚合物重要的物理性能之一,对于热流平衡计算,聚合物结构与性能,聚合物加工工艺条件及聚合物材料应用等都有重要意义。由乌克兰科学家 IO. C. 利帕托夫主编《聚合物物理化学手册》^[4],对常用聚合物的导热系数及导热系数与交联度、辐照剂量、流体静压力的关系提供了较为详细的数据。

1.1 导热基本定律

傅立叶定律:在导热现象中,单位时间内通过给定截面所传递的热量 $\frac{dQ}{dt}$,正比例于垂直于该截面方向上的温度变化率 $\frac{dT}{dx}$,而热量传递的方向与温度升高的方向相反,即

$$\text{即 } \frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

式中,负号表示热流与温度梯度方向相反; λ 为导热系数,它是衡量物体导热性能的物理量。

热能传输不是沿着一条直线从物体的一端传到另一端,而是采用扩散形式。热能的荷载者包括电子、光子和声子。对于绝大多数固体物质,热能荷载者是电子和声子。所以,物体的总导热系数为:

$$\lambda = \lambda_e + \lambda_p \quad (2)$$

对于完整的晶体电子的导热系数为:

$$k_e = \frac{1}{3} v_l c_0^e; \quad (3)$$

声子的导热系数为:

$$k_s = \frac{1}{3} \vec{v} l c_0 \quad (4)$$

式中, $\vec{v}$ 为声子平均速度, l 为声子的平均自由程, c_0 为声子的热容。

对于大多数聚合物,它们都是饱和体系,无自由电子存在,所以热传导主要是晶格振动的结果,即热能荷载者是声子,其导热系数由(4)处理。

由于粒子填充高分子材料的结构复杂,影响热导率的因素有许多,如:物质的种类、材料成分、温度、湿度、压力、密度等,因此关于导热系数的预测模型也很多,应根据不同的结构形态选择合适的模型进行预测。李侃社^[5]、石彤非^[6]对各种不同的导热模型和适用范围进行了很好的总结,下面介绍三个常用模型。

1.2 导热模型

1.2.1 Maxwell-Eucken 模型^[7] 1881 年 Maxwell 通过求解电场能量的 Laplace 方程得到了基体/球形粒子复合材料的电导率计算公式,但必须满足分散相粒子在基体中极稀分散的条件:

$$R = \frac{R_1 [R_2 + 2R_1 + 2V_2(R_2 - R_1)]}{R_2 + 2R_1 - V_2(R_2 - R_1)} \quad (5)$$

式中: R, R_1, R_2 ——分别为复合材料、基体材料和分散相的电导率; V_2 ——分散相粒子的体积分数。

Eucken 将电导率换为导热系数,得到 Maxwell-Eucken 方程:

$$\lambda = \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 + 2V(\lambda_2 - \lambda_1)}{2\lambda_1 + \lambda_2 - 2V(\lambda_2 - \lambda_1)} \lambda$$

1

(6)

式中： $\lambda, \lambda_1, \lambda_2$ ——复合材料、基体材料和分散相的导热系数； V ——分散相粒子的体积分数。

此式用于预测球形粒子填充复合材料的导热系数。在低填充条件下，填充用量小于 10%，其预测结果与实验结果基本一致^[8]。

1.2.2 Hashin-Shtrikman(HS)模型 Hashin-Shtrikman 方程式是目前估算填充型聚合物热导率应用最多的公式。通常，现有的模型适宜于低填充情况，当导热填料粒子的填充量超过 20%时就不适用了。

一个混合均匀的复合材料的导热率可以根据 Hashin-Shtrikman 模型^[9,10] (简称为 HS)导出。假设一个复合材料由均匀的基体 M 和球形颗粒 P 组成，它们的导热率分别为 λ_M 和 λ_P ，球形颗粒的体积分数为 x_P ，对于基体的导热率较小的情况 ($\lambda_M < \lambda_P$)，取 HS 模型的下限 σ^{HS-} ，则该复合材料的导热率可由(7)式得出：

$$\lambda_{comp,l} = \lambda^{HS-} = \lambda_M \frac{2\lambda_M + \lambda_P - 2\gamma_P(\lambda_M - \lambda_P)}{2\lambda_M + \lambda_P + \gamma_P(\lambda_M - \lambda_P)}$$

(7)

如果复合材料是由高导热性的相围绕低导热性的颗粒组成的，即 $\lambda_M > \lambda_P$ ，则应该用 HS 模型的上限 σ^{HS+} 来描述其导热行为^[11]。例如，对于高导热性的云母 (λ_{talc} 为云母的导热系数)基体中嵌着聚合物 PP(聚丙烯) (λ_{pp} 为聚丙烯的导热系数)颗粒的情形，其导热率按(8)式计算：

$$\lambda_{comp,l} = \lambda^{HS+} = \lambda_{talc} \frac{2\lambda_{talc} + \lambda_{pp} - 2\gamma_{pp}(\lambda_{talc} - \lambda_{pp})}{2\lambda_{talc} + \lambda_{pp} + \gamma_{pp}(\lambda_{talc} - \lambda_{pp})}$$

(8)

尽管对颗粒形状采用了球形近似，但方程(7)和(8)实际上仅依赖于材料的体积分数而未考虑填料和基体的微观尺寸和形貌。如将颗粒填充的聚合物基复合材料的测量结果与方程(7)和(8)作比较，颗粒必须在基体中是随机分布的。

利用(HS)模型的传导率 λ^{HS+} 和 λ^{HS-} ，根据 Schilling 和 Partzsch^[12] 的研究结果，可以算出传导相的连接率 $\gamma_{int\ connected}$ ：

$$\gamma_{int\ connected} = \frac{\lambda_{measured} - \lambda^{HS-}}{\lambda^{HS+} - \lambda^{HS-}}$$

(9)

由此所确定的连接率是针对一个理想的由高导热相构成的互连网络的一个相对测量值。由于导热率是由高导热路径上的最少的连接点决定的，所以得到的连接率也主要由这些连接点所决定。例如，如果高导热相是通过点接触互连的，大多数的高导热相将不会对总的导热率有直接的贡献，这不是理想情况下的互连，所确定的连接率主要受点接触情况控制。如果材料中不同相的导热率差别很大时，情形就更是如此。

虽然热扩散系数 α 是关于热平衡过程的度量，而导热率描述的是物体的传热能力，但在一个均匀的物体中，热扩散系数 α 和导热率 λ 通过比重 ρ 和比热容 c_p 产生关连，存在如下关系：

$$\lambda = \alpha c_p \rho$$

(10)

式中，热扩散系数 α 表示热平衡过程，导热系数 λ 表示材料热传导的能力。

Weidenfeller^[9] 利用 Hashin-Shtrikman 模型对导热系数进行了比较，并预测了粒子的连接率。他用磁铁矿、重晶石、云母、铜粉、铁酸锶和玻璃纤维作填料，测量了样品的热扩散系数、比热和密度，从而得到导热系数。用 30vol% 的云母填充，PP 的导热率从 0.27 增加到 2.5W/(mK)，填充 PP 样品的导热率同 HS 模型值进行比较，通过热导率的模型值与测量值的对比得出聚丙烯基体中粒子的连接率。

1.2.3 Agari 模型 许多模型讨论的填充量一般集中在 0~10Vol% 或 10%~30Vol% 低、中填充量的情况，对于高填充以及超高填充，粒子彼此有了接触而发生团聚现象甚至形成导热链，另外填充粒子对聚合物形态的影响也应有所考虑。

Agari 等^[13] 提出的模型，对高填充和超高填充的导热材料进行了预测。他对不同压力下填充粒子的表观密度进行测量，并计算了空隙度(FV)，FV 与粒子的临界体积分数(CPVC)有关，即 CPVC = 1-FV。他提出的理论模型认为，在那些填充的聚合物体系中，若所有填充粒子聚集形成的传导块与聚合物传导块

在热流方向上是平行的,则复合材料的导热率最高;若是垂直的,则复合材料的导热率最低(见图 1)。由于在复合材料的制备中,填料会影响聚合物的结晶度和结晶尺寸,从而改变聚合物的导热率,因此他考虑了填料的影响,并假定均匀分散,而得到了理论等式:

$$\lg \lambda = V_f C_2 \lg \lambda_2 + (1 - V_f) \lg (C_1 \lambda_1) \quad (11)$$

式中, C_1 为影响结晶度和聚合物结晶尺寸的因子, C_2 为形成粒子导热链的自由因子, λ 为复合材料的导热率, λ_1 为聚合物基体的导热率, λ_2 为粒子的导热率, V_f 为粒子的填充体积分数。

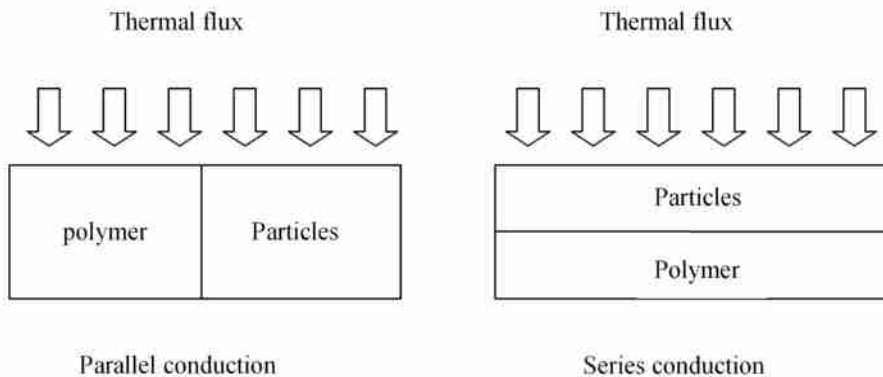


图 1 Agari 的传导模型
Figure 1 Conduction model of Agari

Wong 等^[14]研究了硅石、氧化铝、氮化铝等陶瓷粒子填充环氧树脂,对环氧树脂的导热系数、弹性模量、热膨胀系数的影响。测得的数据同文献中理论或半理论的公式进行比较,并用于预测两相混合物的性质,结果发现 Agari 模型对导热系数提供了一个较为准确的估算。

2 提高塑料导热性的途径

提高聚合物导热性能途径有两种:第一;合成具有高导热系数的结构聚合物,如具有良好导热性能的聚乙炔、聚苯胺、聚吡咯等,主要通过电子导热机制实现导热,或具有完整结晶性,通过声子实现导热的聚合物;第二,通过高导热无机物对聚合物进行填充,制备聚合物/无机物导热复合材料^[15]。由于良好导热性能有机高分子价格昂贵,填充制备导热聚合是目前广泛采用的方法。

可以用作导热粒子的金属和无机填料大体有以下几种:

- (1)金属粉末填料:铜粉、铝粉、金粉、银粉;
- (2)金属氧化物:氧化铝、氧化铍、氧化钨、氧化镁、氧化锌;
- (3)金属氮化物:氮化铝、氮化硼;
- (4)无机非金属:石墨、碳化硅。

无机非金属材料作为导热填料填充高分子材料基体时,填充效果的好坏主要取决于以下几个因素:(1)聚合物基体的种类、特性;(2)填料的形状、粒径、尺寸分布;(3)填料与基体的界面结合特性及两相的相互作用。以往常采用的方法有:利用有一定长径比的颗粒、晶须形成连续的导热网链;选用不同的粒径的填料组合,达到较高填充致密度;利用偶联剂改善填料与基体的界面,以减少界面处的热阻;用纳米材料填充塑料提高导热系数是近年来研究的热点。

3 导热塑料的分类和应用

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>
对于导热塑料的研究和应用很多,可以对其进行简单的分类,按照基体材料种类可以分为热塑性导热树脂和热固性导热树脂;按填充粒子的种类可分为:金属填充型、金属氧化物填充型、金属氮化物填充

型、无机非金属填充型、纤维填充型导热塑料;也可以按照导热塑料的某一种性质来划分,比如根据其电绝缘性能可以分为绝缘型导热塑料和非绝缘型导热塑料,本文按后一类分类。

3.1 非绝缘型导热塑料

由于塑料本身具有绝缘性,因此绝大多数导热塑料的电绝缘性能,最终是由填充粒子的绝缘性能决定的。用于非绝缘型导热塑料的填料常常是金属粉、石墨、炭黑、碳纤维等,这类填料的特点是具有很好的导热性,能够容易地使材料得到高的导热性能,但是同时也使得材料的绝缘性能下降甚至成为导电材料。因此在材料的工作环境对于电绝缘性要求不高的情况下,都可以应用上述填料。而且在某些条件下还必须要求导热塑料具有低的电绝缘性以满足特定的要求,如抗静电材料、电磁屏蔽材料等。

金属填料的添加对聚合物的导电和导热性能都有很大的提高^[16~19],此类研究文章很多。Luyt 等^[20]用不同含量的铜粉填充低密度聚乙烯(LDPE)和线性低密度聚乙烯(LLDPE),导热系数随着铜粉含量的增加而增加,电阻随着铜粉含量的增加而降低,例如:填充 24V%的铜粉,LDPE 和 LLDPE 导热系数均提高 2 倍以上,电阻降低 1.5 倍以上。从混合焓的结果显示铜粒子可以做成核剂,可以提高复合材料的结晶度,LDPE 填充铜粉热稳定性比未填充的提高;在填充较低含量的铜粉时,LLDPE 便显示较好的热稳定性。通常同未填充的高聚物相比,此类复合材料的机械性能较差(除模量外),热传导和电传导性能提高。

在无机非金属中石墨的热导率较高,一般为 $116\sim 235\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,接近金属。中科院广州能源研究所进行的高导热纳米混合材料的研究^[21],从石墨嵌入化合物与聚合物混合体系入手,继而发展至二硫化物/聚合物混合至分子化合物系统,进行了系列理论和实验研究。为了提高这种能保持形状的相变复合材料的导热性,在其中混杂 3%(wt)(或 5%(wt))的膨胀石墨,由于膨胀石墨的加入,特别是加入时控制了石墨网状结构时,即使量只有 3%(wt),导热率都比未形成网的石墨(5%(wt))混入的高一倍以上。

3.2 绝缘型导热塑料

由于电子产品越来越趋于小型化,因此那些容易集成化和小型化而且柔韧性好的聚酰胺、聚酯塑料基板被广泛应用,但因为集成电路的高集成化和层板的多层化必然产生放热问题,因此对这些材料的导热性能的要求就成了当务之急。而在电子工业中,大多数电子材料要求较高的电绝缘性能。因此要求这些材料不仅具有良好的导热性能而且同时具有电绝缘性能。近年来人们用非导电性的金属氧化物和其它化合物填充聚合物,已初步解决了这一问题^[5]。用于绝缘型导热塑料的填料主要包括:金属氧化物如 BeO , MgO , Al_2O_3 , CaO , NiO ;金属氮化物如 AlN , BN 等;碳化物如 SiC , B_4C_3 等。从表 2 中可以看出,它们有较高的导热系数,而且更为重要的是同金属粉相比有优异的电绝缘性,因此它们能保证最终制品具有良好的电绝缘性,这在电子电器工业中是至关重要的。

日本科学冶金公司与大阪市工业研究所开发成功聚苯硫醚高导热塑料^[22]。该塑料同一般塑料一样可以注射成型复杂形状的制品,可降低电子设备、办公自动化设备的发热,纺织机器动作失灵。以聚苯硫醚颗粒和高导热的陶瓷粉末为原料,先在低温($200\sim 240^\circ\text{C}$)熔融成合金粉末,再加热成型。该塑料的导热系数比金属钛高 100 倍以上。可以用于要求良好放热的半导体和激光制品等电子领域和家电、办公设备等方面。

由 Hatsuo 和 Sarawut^[23]发表的论文报道,通过氮化硼填充苯并恶嗪,可得到了 $32.55\text{W}/\text{mK}$ 的导热系数,填料的最大的体积比为 78.5%(重量比 88%)。这个格外高的导热数值源于苯并恶嗪树脂和氮化硼填料突出的导热性能。苯并恶嗪中双酚 A-甲基胺基团具有很低的 A 阶粘性,它可以使填料润湿和混合。这种平均尺寸为 $225\mu\text{m}$ 的填料颗粒是氮化硼片状晶体的大团聚体,它的粒度呈双峰分布,这有助于提高颗粒的堆积密度。

林晓丹等^[24]通过聚苯硫醚与大颗粒氧化镁(40, 325 目)混合经双螺杆挤出机挤出造粒制备了导热绝缘塑料,研究了导热性能与氧化镁填充量的关系。实验发现:热扩散系数和热导率随氧化镁的填充量的增加而增加;最高热导率达到 $3.4\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,此样品仍然可注射成型,且具有良好的机械性能。

电封装材料要求导热、绝缘并具有较低的介电常数、良好的热传导性能和低的热膨胀系数^[13,25,26]。此类材料是导热高分子材料较大的应用市场。为了获得以上性能的复合材料,Xu 等^[25]用 AlN 晶须(和/

或粒子)和 SiC 晶须做填料,聚偏二氟乙烯或环氧树脂作基体,AlN 晶须和 AlN 粒子(7 μm)总的填充体积为 60%,获得最高的 11.5 热导率 W/(mK),AlN 晶须和 AlN 粒子比率是 1:25.7。Xu 还研究了填料的混杂效应和偶联剂对复合材料导热性能的影响。用适当比率的 AlN 晶须和 AlN 粒子混合,比单独用晶须和粒子赋予复合材料较高热导率和较低的热膨胀系数。通过用硅烷表面处理,AlN 粒子增强的环氧树脂复合材料的热导率提高达 97%,热导率提高是由于通过改进基体和粒子的界面,填料-基体的接触电阻减小。硅烷处理的 AlN 粒子 60% (体积比),环氧基体复合材料的热导率达 11.0W/(m K)。

Lee 等^[26]用各种不同形状和尺寸的填料单独使用和混合使用提高聚合物基的热传导能力,填料包括氮化铝、钙硅石、碳化硅晶须和氮化硼。发现用混合填料提高复合材料的热导率更有效,对于给定的填料用较大的粒子和表面处理剂可以使复合材料的热导率提高,填料的表面处理还可以得到低的热膨胀系数的复合材料。

3.3 导热塑料研究的最新进展

日本东丽日前开发成功了导热率高达 25W/m·K 的热塑性树脂^[27]。该技术利用独特的分子设计,提高了热塑性塑料和填料之间分子的相互作用力,填料相互之间的高效率接触形成了热量通道,大幅度提到了导热率。以前进行的各种导热率的开发,但改善的极限是一般塑料的 10~25 倍(2~5W/m·K,塑料的导热系数为 0.1~0.3W/m·K)。该材料有望成为激光头及设备内部元件壳等金属部件的替代品。东丽计划在 1 年内投产。此次开发的树脂通过采用致密的填充方法,实现了像陶瓷一样的外形稳定性,线膨胀率可达 8ppm/°C。

日经 BP 社 2006 年 2 月 23 号报道^[28],日本保力马科技公司(Polymatech)在日前举办的国际纳米科技综合展“nano tech2006”上宣布,通过向高分子施加强磁场,以纳米水平上沿磁场方面进行配向控制,成功开发出了导热率高达 20×10^{-6} W/m·K 的高分子薄膜。纤维领域已有类似的先例,但在高分子薄膜中则是首次达到这么高的导热率。该公司认为可望用于正受困于发热量问题的半导体封装材料。

4 结语

传导性高分子材料的市场需求每年都在增长,其中导热塑料的市场需求量增长更快。因此对塑料导热性能的研究已引起各国研究者的兴趣,并已作了很好的工作。导热高分子的数学模型取得了很大的进步,计算误差和实际误差逐步缩小,尤其用计算机模拟采用分子动力学方法研究导热系数为导热材料的研究起到较大的推动作用。但导热塑料不如导电塑料材料研究深入,理论研究有待突破,目前填充性导热塑料的研究,大部分采用物理填充的方法,导热性能不高,机械性能下降严重,导热系数预测理论局限于经验模拟,缺乏导热机理的理论支持。但随着日益扩大的市场和研究的深入,导热塑料将有一个大的发展,尤其是纳米导热材料的研究和开发,高导热本体聚合物材料的制备,聚合物导热机理的探讨应成为导热高分子材料的研究方向。

参考文献:

- [1] 徐健南. 塑料材料. 北京:中国轻工业出版社,1999:9.
- [2] [www.marketresearch.com/vendors/viewvendor.asp? vendorid=1247&categoryid=0&sortby=date&page=8](http://www.marketresearch.com/vendors/viewvendor.asp?vendorid=1247&categoryid=0&sortby=date&page=8).
- [3] Danes F, Garnier B, Dupuis T. International journal of thermophysics, 2003, 24(3): 771~784.
- [4] Ю. С. 利帕托夫(Ю. С. Липатов)主编, В. П. 普里瓦利科(В. П. Привалко)编. 聚合物物理化学手册. 闫家宾, 张玉昆译. 第二卷. 北京:中国石化出版社,1995:314~336.
- [5] 李侃社,王琪. 高分子材料与工程,2002,18(4): 10~15.
- [6] 石彤非,李树忠,张万喜,等. 高分子材料科学与工程,1993, (3): 8~13.
- [7] Agari Y, Uno T. J Appl Polym Sci, 1986, 32: 5705~5712.
- [8] 陈树川,陈凌冰. 材料物理性能. 上海:上海交通大学出版社,1999: 274~280.
- [9] Weidenfeller B, Höfer M, Schilling F. Composites Part A, 2004, 35(4): 423~429.
- [10] Weidenfeller B, Höfer M, Schilling F. Composites Part A, 2002, 33(8): 1041~1053.
- [11] Hashin Z, Shtrikman S. J Applied Physics, 1962, 33(10): 3125~3131.

[12] Schilling F R· Partzsch G M· Phys Chem Earth (A), 2001, 26 :239~246.

[13] Agar Y Y, Uno T J· J Appl Polym Sci, 1985, 30,2225.

[14] Wong C P, Bollampally R S· J Appl Poly Sci, 1999, 74(14); 3396~3403.

[15] 李侃社,王琪· 功能材料,2002,33(2);136~144.

[16] Bigg D M· Adv Polym Techn, 1984, 4(3-4);255~266.

[17] Narkis M, Srivastava S, Tchoudako R· et al· Synthetic Metals, 2000,113(1-2);29~34.

[18] Cheah K, Forsyth M, Simon G· Synthetic Metals, 1999,102(1-3);1232~1233.

[19] Janicki J· Journal of Alloys and Compounds, 2004, 382(1-2); 61~67.

[20] Luyt A S, Molefi J A, Krump H· Polym Degrad Stab, 2006, 91(7); 1629~1636.

[21] www.giec.ac.cn/giec/item.1/item.jz.05.htm-14k.

[22] 功珍· 塑料. 2004, 33(5); 97~97.

[23] Ishida H, Sarawut R· Thermochemica Acta, 1998, 320(1~2); 177~186.

[24] 林晓丹,曾幸荣,张金柱,等· 塑料工业,2006,34(3);65~67.

[25] Xu Y S, Chung D D L, Cathleen M· Composites Part A, 2001,32(12); 1749~1757.

[26] Lee G W, Park M· Composites Part A, 2006, 37(5); 727~734.

[27] 无名· 国外塑料. 2005, 23(3); 81~81.

[28] www.plan.chinainfo.gov.cn/data/200602/1-20060223-129244.htm.

Study and Application of Thermal Conductive Plastic

LI Li, WANG Cheng-guo

(School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract:As the science progress, the application areas of thermal conductive plastic become more and more extensive. Especially, the information industries, which have been developing vigorously in recent years, has provided a new development space for the thermal conductive plastic. In this article, the heat conduction properties of polymer material, metallic material and metal oxide compound are contrasted, the heat conduction mechanism of polymer and the heat conduction model suitable for different fillers are introduced. The approach and new research technique to improve the thermal conductive of plastic are discussed. The application research and latest progress on non-insulation and insulation thermal conductive plastic are summarized. Some problems of thermal conductive plastic are pointed out. The application of thermal conductive plastic are prospected.

Key words:Thermal conductivity; Plastic; Conduction model; Research method