

电子封装用 Al_2O_3 改性环氧树脂及其性能

刘长岭* 杨 宁 张泽宇

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130033)

摘 要 将不同粒径和形状的 Al_2O_3 混合颗粒填充到液态环氧树脂中,研究了单一粒径、二元混合粒径和多元混合粒径填充对固化环氧树脂复合材料的热导率、热膨胀系数和介电常数的影响。通过分形理论探讨了填料的密堆积与复合材料导热性能的关系。结果表明,单一片状及直径 $48\ \mu\text{m}$ 的粒状 Al_2O_3 填充环氧树脂复合材料,具有较好的综合性能;对二元混合粒径填料,小粒子用量占填料总体积的 20% ~ 40% 之间时,获得的复合材料的热导率、介电常数和热膨胀系数均能达到最佳值;混合粒子中粒径分布的分形维 D 值在某一适宜区间时,不同粒径的粒子之间可形成空隙率相对最小的紧密堆积,从而可获得热导率相对较高的复合材料。

关键词 Al_2O_3 , 粒径形态, 改性环氧树脂, 热导率, 热膨胀系数, 介电常数, 分形理论

中图分类号: O631.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-0518(2013)12-1417-06

DOI: 10.3724/SP.J.1095.2013.30259

电子器件的封装材料是信息产业的重要组成部分。微电子技术要求其封装材料具有较好的散热性和较低的膨胀系数及良好的电绝缘性能。陶瓷封装材料虽然具有上述特点,但在封装制做时,热裂纹现象和脆性影响及其成形性不佳,使其应用受到很大局限性。

用 Al_2O_3 陶瓷颗粒改性的环氧树脂封装材料,对其性能及应用的研究已有很多报道^[1-4],但关于不同粒径不同形状 Al_2O_3 填充剂对环氧树脂综合性能影响的研究不多。根据分形理论,将不同粒径和形状的 Al_2O_3 按适当比例添加到液态环氧树脂中,使之产生较强的界面结合力,均匀地分散于环氧树脂基体中,有利于环氧树脂基体与 Al_2O_3 粒子之间的热载荷传递,不仅可提高材料的热导率,降低材料的膨胀系数,同时还具备高阻燃特点。液态环氧树脂具有优良的成型性和出色的封装工艺性,能对芯片和电路提供可靠的环境保障。用其作为陶瓷粒子复合材料基体,可进一步完善对电子器件的封装保护。

本文利用分形理论研究了 Al_2O_3 填料粒径变化对环氧树脂(EP)的填充效果和体积填充率的影响,确定了填料的分形维数对 EP 基 Al_2O_3 复合材料导热性能的影响,为进一步提高 EP 基 Al_2O_3 复合材料的导热性能提供了依据。

1 实验部分

1.1 材料和仪器

双酚 A 型环氧树脂 E-51(南京台力研究所),环氧当量(g/mol) 185 ~ 208、环氧值($\text{mol}(100\ \text{g})$) 0.48 ~ 0.54、无机氯值($\text{mol}/100\ \text{g}$) 0.001、有机氯值($\text{mol}/100\ \text{g}$) 0.02;采用酸酐类固化剂 EDA(中石化南京化工厂),用量 6% ~ 8%、胺值当量 15 粘度液,外观为淡黄色液体;KH550 硅烷偶联剂(南京曙光硅烷化工有限公司),折射率:(n_{425}) 1.4175 ~ 1.4200,相对密度(d_{420}) 0.9390 ~ 0.9430,外观为无色透明液体;填料氧化铝 Al_2O_3 (福建斯诺瑞新材料有限公司),密度 $3.97\ \text{g/cm}^3$,热导率 $36\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,热膨胀系数 $6.6 \times 10^{-6}\ ^\circ\text{C}^{-1}$; Al_2O_3 填料包括颗粒状和层片状 2 种形状,其中颗粒状有 6 种粒度,分别是 175、48、30、8、2 和 $0.03\ \mu\text{m}$,层片状有 2 种粒度,分别为 50 和 $9\ \mu\text{m}$ 。

FD-TC-B 型热导率测试仪(上海复旦天欣科教仪器公司);PCY-III 型热膨胀系数测试仪(湘潭华丰

仪器制造有限公司);QBG-3DQ 高频 Q 表(上海爱仪电子设备有限公司)。

1.2 Al₂O₃填充环氧树脂的制备

将 Al₂O₃填料放入真空干燥箱中于 60 ℃ 真空干燥约 2 h,脱除水分后备用。称取一定量干燥后的 Al₂O₃填充剂。另称取填料质量 1% 的 KH-550 硅烷偶联剂,用适量 95% 乙醇配制成溶液,并将称量干燥后的 Al₂O₃粉末加入其中,搅拌 0.5 h 至偶联剂与填料均匀混合后,60 ℃ 真空蒸出乙醇,再置于真空干燥箱中,在 60 ℃ 干燥,获得混合干粉。将一定量的液态环氧树脂放入烧杯,按设计的配方加入上述混配好的 Al₂O₃填料粉末并搅拌均匀。再按环氧树脂/固化剂质量比为 2:1 加入固化剂并混匀后,倒入模具(Φ 30 mm,圆筒状)中,置 60 ℃ 干燥箱中固化 24 h。冷却后取出,得到 Al₂O₃颗粒填充环氧封装材料。将其制成试片用于其热电性能测试。

2 结果与讨论

2.1 Al₂O₃粒径和填充体积分数对单一粒径 Al₂O₃晶粒充填改性环氧树脂性能的影响

将 Al₂O₃填充到液态环氧树脂中,研究填料体积分数对改性环氧树脂热导率的影响,结果如图 1 所示。所用 Al₂O₃颗粒平均粒径为 2、48 和 175 μm,填充体积分数分别为 5%、15%、25% 和 35%。

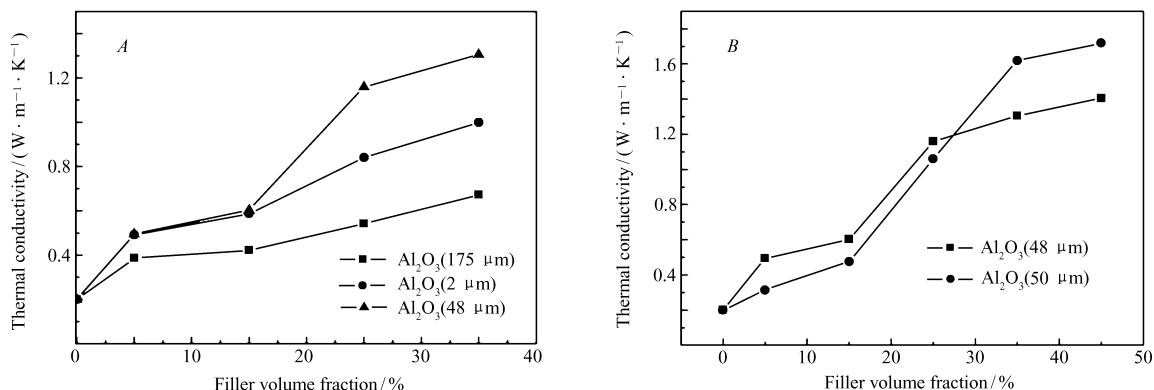


图 1 不同粒径 Al₂O₃ 粒子填充环氧树脂的热导率

Fig. 1 Effect of filling volume fractions of Al₂O₃ particle(A) and flake(B) on thermal conductivity of modified EP

图 1A 为平均粒径为 175、48 和 2 μm 的 Al₂O₃ 颗粒填充固化后环氧树脂热导率随填充体积分数的变化。从图中可以看出,在较低填充量情况下(体积填充量 < 15%),2 μm 的 Al₂O₃ 颗粒和 48 μm 的 Al₂O₃ 颗粒填充固化环氧树脂材料比 175 μm Al₂O₃ 颗粒填充的热导率高。随着填充体积分数增加,48 μm Al₂O₃ 颗粒填充的固化环氧树脂材料的热导率最高,达到约 1.31 W/(m · K),其次是 2 μm 颗粒的,而 175 μm 颗粒填料的改性树脂热导率最低。这是因为在相同体积填充量条件下,在单位体积中较细填料的颗粒数比粗颗粒填料的多,颗粒间相互接触几率增大,容易形成导热链,以及不易吸附空气形成热阻界面有关^[5-6]。

但如果颗粒过于细小,在相同体积分数下添加填料的颗粒数目就增加,颗粒间的接触点又会增加热传导过程中声子的散射度而降低了材料的热导率^[7]。因此,在相同填充体积分数下,2 μm 填料改性环氧树脂的热导率并不比 48 μm 的好。当单一粒径 Al₂O₃ 填料的体积分数为 35% (相对于材料总体积而言)时,Al₂O₃ 的粒径为 48 μm 时,改性环氧树脂的热导率较高。

图 1B 中层片状 Al₂O₃ (50 μm) 填充环氧树脂后,其热导率随填充体积分数的变化,在填充体积分数较小时,层片状的 Al₂O₃ 和颗粒状 48 μm 的 Al₂O₃ 改性环氧树脂的热导率相当。但在较高的填充体积分数时(> 25%),层片状的 Al₂O₃ 改性环氧树脂的热导率要高于颗粒状的,这是因为随着填充体积分数增加,层片状填料颗粒间接触几率比颗粒状的填料大,在环氧树脂基体中更容易形成导热通道而降低热流传输的阻力所致。

2.2 2 种粒径 Al₂O₃ 颗粒混合填充对改性环氧树脂性能的影响

在相同填充体积分数下,采用粒径不同的 2 种颗粒混合填充,可比单一大粒径填充获得更紧密的堆积,可产生更多的粒子间接触点,形成更多导热通路,从而可获得更高热导率的复合材料^[8]。此外,在树脂中加入部分大粒子填料可以降低体系粘度而改善加工性,因此,目前环氧树脂改性用导热填料多将大小粒径粒子混配使用。

Cumberland 等^[9] 计算了总填充体积分数 65% 条件下,不同直径的圆球颗粒体积比进行堆积的最大体积填充分数,结果表明,小粒径球体的体积分数约为 26.5% 时,2 种粒径混合粒子中,随大、小粒子的粒径比例增大,体系可达到最大堆积密度。图 2 为固定 Al₂O₃ 总填充体积分数为 35% 条件下,不同粒径的 Al₂O₃ 填料粒子混配填充环氧树脂,粒径变化及混合粒子相对含量对改性环氧树脂材料热导率、介电常数及热膨胀系数的影响。

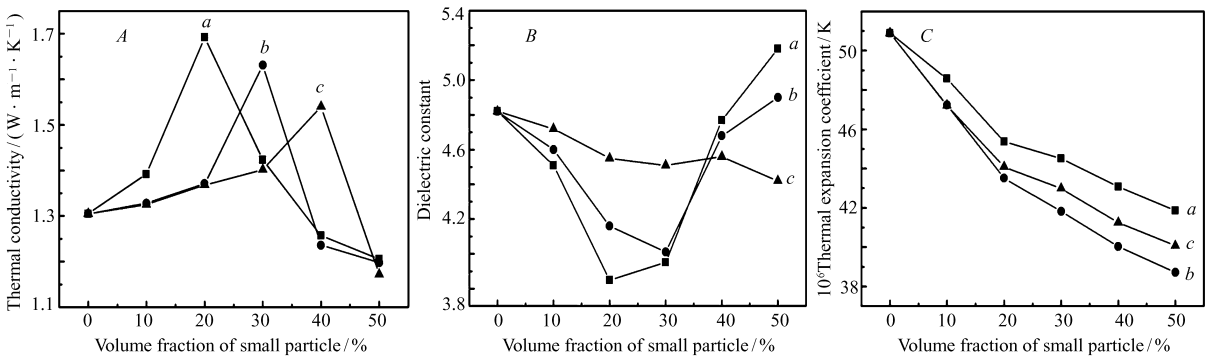


图 2 二元 Al₂O₃ 混杂颗粒填充对改性环氧树脂热电性能的影响

Fig. 2 Effect of filled volume fraction of binary Al₂O₃ particle on the thermal and electric properties of composites

a. $D_L/D_S = 48 \mu\text{m}/2 \mu\text{m} = 24$; b. $D_L/D_S = 48 \mu\text{m}/8 \mu\text{m} = 6$; c. $D_L/D_S = 48 \mu\text{m}/30 \mu\text{m} = 1.6$

图 2A 为由粒径 48 和 2 μm 粒子混合填充改性环氧树脂的热导率随小粒子体积分数的变化。2 μm 粒子体积用量在 20% 时热导率达到最大值 1.692 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 是 48 μm 粒子单独填充时热导率的 1.3 倍。对由粒径 48 和 8 μm 组成的混合粒子, 当 8 μm 粒径体积用量在 30% 时热导率达到最大值 1.631 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 是单纯 48 μm 粒子填充的 1.25 倍。对粒径为 48 和 30 μm 的混合粒子, 30 μm 粒子体积用量在 40% 时改性环氧树脂的热导率有最大值 1.540 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 是单纯 48 μm 粒子填充的 1.18 倍。热导率最大值并未出现在小粒径粒子体积分数 26.5% 的最大密堆积处, 而是分别在 20%、30% 和 40% 处, 且随大小粒径比 (D_L/D_S) 减小, 最大值向大用量小粒子方向移动。这种与理论预测值的偏差, 主要是因为理论预测是根据粒子为理想圆球型, 而实际填料粒子不是球形引起的。此外, 粒子在环氧树脂基体中的堆积也不会是规则的理想堆积。然而, 理论预测对实验结果的趋势判断仍有指导意义。

图 2B 为粒径 48 和 2 μm 混合粒子填充改性环氧树脂介电常数随 2 μm 粒子占填料体积分数的变化。当小粒子体积分数为 20% 时, 介电常数由单纯 48 μm 填充的 4.82 降至 3.85; 当小粒子体积分数超过 20% 后, 介电常数又随着小粒子用量增加而升高; 对用 48 和 8 μm 混合粒子填充树脂材料, 当 8 μm 粒子体积分数在 30% 时, 介电常数由零用量的 4.82 降至 4.01。并且, 当 8 μm 粒径体积分数超过 30% 后, 介电常数又随着小粒子量的增加而升高。对 48 和 30 μm 混合粒子填充改性环氧树脂材料的介电常数随着 30 μm 粒子用量的增加而略微减小。

图 2C 为 48 μm 大粒子分别与 3 种小粒径粒子混合填充环氧树脂的热膨胀系数 (CTE) 随小粒子体积分数的变化。随着小粒子用量的增加, 3 个体系的 CTE 均呈下降趋势。对 48 与 2 μm 的混合粒子, 当 2 μm 粒子体积用量在 50% 时, CTE 由零体积用量的 $50.89 \times 10^{-6}/\text{K}$ 降至 $41.85 \times 10^{-6}/\text{K}$; 对于 48 和 8 μm 混合粒子填充环氧树脂, 当 8 μm 粒子体积用量在 50% 时, CTE 由零体积用量的 $50.89 \times 10^{-6}/\text{K}$ 降至 $38.72 \times 10^{-6}/\text{K}$; 对 48 和 30 μm 混合粒子填充环氧树脂, 当 30 μm 粒子体积用量在 50% 时 CTE 由零体积用量的 $50.89 \times 10^{-6}/\text{K}$ 降到 $40.07 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。因此, 使用大小粒子混配, 调整小粒子含量可有效降低材料体系的 CTE 值。CTE 值越低, 可使改性后环氧树脂材料的 CTE 值与被保护金属材料的 CTE 值越

接近,从而有利于降低受冷热冲击产生的界面热应力破坏。

2.3 多粒径或形态 Al₂O₃混合填料对改性环氧树脂性能的影响

2 种或 2 种以上不同平均粒径的同类粒子组成的混合填料填充环氧树脂,其用量比例变化对复合材料的性能有一定影响。在实际填充时经常使用多种粒径的同类的混合粒子为填料,以发挥其混合效应。表 1 为 4 种不同平均粒径 Al₂O₃以不同质量比混合用作填料时,在填料的体积用量为总体积 35% 的条件下,对改性环氧树脂材料性能的影响。

表 1 不同粒径质量比对复合材料性能的影响

Table 1 Effect of mass ratios of different sized particles in the hybrid micro-Al₂O₃ on the thermal property and dielectric constant of composites

Total Al ₂ O ₃ volume fraction in composite/%	<i>m</i> _{48 μm} : <i>m</i> _{30 μm} : <i>m</i> _{8 μm} : <i>m</i> _{2 μm}	Thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	10 ⁶ Thermal expansion coefficient/K	Dielectric constant
35	1:1:1:0	1.295	52.74	4.89
35	3:2:1:0	1.375	49.66	4.95
35	5:3:1:0	1.405	51.09	5.13
35	7:4:2:1	1.455	53.31	5.06
35	5:3:2:1	1.495	49.23	5.15
35	5:0:3:1	1.345	46.18	5.23
35	5:3:0:1	1.245	48.09	5.05
35	0:3:2:1	1.275	43.92	4.51
35	0:5:3:1	1.145	45.85	4.48
35	<i>m</i> _{48 μm}	1.305	50.89	4.82
35	<i>m</i> _{30 μm}	1.221	47.51	4.95
35	<i>m</i> _{8 μm}	1.302	48.95	4.71
35	<i>m</i> _{2 μm}	0.999	50.15	4.68

由表 1 可见,Al₂O₃粒径从大到小分别按照质量比(*m*_{48 μm}:*m*_{30 μm}:*m*_{8 μm}:*m*_{2 μm})3:2:1:0、5:3:1:0、7:4:2:1和 5:3:2:1 混合填充剂时,改性环氧树脂的热导率增加,其中在质量比 5:3:2:1 时热导率达最大为 1.495 W/(m·K),比单一粒径填充的最高热导率 1.305 W/(m·K)高。这与文献^[10]结果一致,因为混合填充可以使小粒径与大粒径导热粒子形成比较紧密的堆积,有利于形成更有效的导热网络。表 1 的数据还揭示,并非所有不同粒径的混合填充效果一定优于单一粒径的填充效果,只有不同粒径颗粒在一定的比例范围时才有较高的热导率,这同样归因于大小粒子可以形成较好的紧密堆积,粒子间的相互接触达到最大值时最有利热传导。

2.4 分形理论与填料颗粒的分形维数

根据分形理论,假如加入的混合粒子粒径分布服从分形特征,则对某一粒径 *r*,粒径小于 *r* 的填料的质量分数 *w*_(*r*)与粒径 *r* 成指数关系:

$$w_{(r)} = k \cdot r^D$$
(1)

或
$$\lg w_{(r)} = \lg k + D \lg r$$
(2)

式中,*r* 为粒径,*w*_(*r*)为对应的质量分数(相对于总质量而言),*D* 为粒径的分数维,*k* 为常数。

在固定填料总体积分数为 35% 的情况下,将 2、8、30 和 48 μm 粒径 Al₂O₃粒子按不同质量比进行混合,制备改性环氧树脂,测定试样的热导率,结果如表 2。由表 2 数据按照式(2) 双对数形式进行线性拟合,可计算出 *D* 值和 *k* 值,结果列入表 3。

表 2 混合粒子不同粒径 Al₂O₃质量比对改性树脂电导率的影响

Table 2 Effect of mass ratio of Al₂O₃ of different particle sizes on thermal conductivity

No.	<i>m</i> _{2 μm} : <i>m</i> _{8 μm} : <i>m</i> _{30 μm} : <i>m</i> _{48 μm}	Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
Al ₂ O ₃ (a)	8:5:3:2	1.182
Al ₂ O ₃ (b)	5:8:2:3	1.255
Al ₂ O ₃ (c)	3:2:8:5	1.302
Al ₂ O ₃ (d)	2:3:5:8	1.236

表 3 lg $w_{(r)} \propto \lg r$ 的线性关系
Table 3 Linearly relation of $\lg w_{(r)} \propto \lg r$

No.	Linear relation function	D value	k value
Al ₂ O ₃ (a)	$y = 0.36732x - 0.6839$	0.36732	0.20706
Al ₂ O ₃ (b)	$y = 0.72291x - 1.20915$	0.72291	0.06178
Al ₂ O ₃ (c)	$y = 0.38648x - 1.12718$	0.38648	0.07461
Al ₂ O ₃ (d)	$y = 0.69324x - 1.5803$	0.69324	0.02628

由表 3 可以看出,填料粒子具有分形特征,其粒径分数维数 D 值分别为 0.36732、0.72291、0.38648 和 0.69324。分数维 D 值可作为表征颗粒粒径分布宽窄的一个量度,在相同粒径范围内, D 值越大,小粒子成分越大; D 值越小,大粒径成分越大。在 35% 总填充体积分数下,当 D 值为 0.36732 和 0.72291 时,改性环氧树脂材料的热导率分别为 1.182 和 1.255 W/(m·K),并不是最高值,只有 4 种粒子质量比为 $m_{2\mu\text{m}}:m_{8\mu\text{m}}:m_{30\mu\text{m}}:m_{48\mu\text{m}} = 3:2:8:5$ 时, $D = 0.38648$, 改性环氧树脂材料才具有最高热导率 1.302 W/(m·K)。

上述结果说明,当 D 值达到某区间时,由于形成紧密堆积,热导率最高。 D 值很小时,大粒径粒子较多,颗粒间接触点密度较小,造成的缺陷及空洞增加,无法使改性材料达到最佳的导热性;而当 D 值很大时,由于粒径分布宽,小粒径粒子成分较多,会导致粒子在基质中分散欠佳,填料和基质之间的界面增多而导致界面声子的热散射增加,因而填充效果也不佳。只有当填料粒径满足一定条件下, D 值在某区间时,才能获得最佳的填充效果^[11]。

3 结 论

对于 Al₂O₃ 填料,粒径为 48 μm 时,改性环氧树脂材料的热导率可达到较大值。与相近粒度颗粒状 Al₂O₃ 相比,层片状 Al₂O₃ 颗粒填充环氧树脂可以获得较大的堆积密度,填料之间接触的几率更大,在复合材料中能够有效形成导热通道,故其热传导能力强,热导率大。对于二元粒径混合单一形状填料,小粒子体积用量占总填料体积分数的 20% ~ 40% 时,改性环氧树脂的热导率、介电常数和热膨胀系数均能达到最佳值。通过分形理论讨论了材料热导率对填料粒径的依赖性,发现混合粒径粒小的分数维 D 值既不是越小越好,也不是越大越好,而是当 D 值达到某区间,由于形成密堆积,可使环氧树脂具有较大的热导率,较小热膨胀及较高介电常数。

参 考 文 献

[1] HA Enhua, KOU Kaichang, CHEN Lixin. Research Progress on Epoxy Resin Packaging Materials[J]. *Chem Ind Prog*, 2003, **22**(1):1057-1060 (in Chinese).
哈恩华,寇开昌,陈立新. 环氧灌封材料的研究进展[J]. 化工进展, 2003, **22**(1):1057-1060.

[2] HE Bingbing, FU Renli, JIANG Li. Study of Ceramic Filler for Use in Liquid Epoxy Resin for Electronic Packaging[J]. *China Plast Ind*, 2011, **39**(5):46-49 (in Chinese).
何兵兵,傅仁利,江利. 电子封装液体环氧树脂中陶瓷填料的改性研究[J]. 中国塑料工业, 2001, **39**(5):46-49.

[3] JIAN Bencheng, CHEN Yan. Effect of Alumina Filler Preperties on the Functions of Epoxy Resin Moulding Product[J]. *Mod Ceram Tech*, 2004, (4):18-20 (in Chinese).
简本成,陈燕. 氧化铝填料性能对环氧树脂浇铸制品性能的影响[J]. 现代陶瓷技术, 2004, (4):18-20.

[4] JIAN Bencheng, LI Bin. Applications of Al₂O₃ as the Moulding Filler of Epoxy Resin[J]. *Light Met*, 2001, (8):21-23 (in Chinese).
简本成,李滨. Al₂O₃作为环氧浇铸用填料的应用[J]. 轻金属, 2001, (8):21-23.

[5] He H, Fu R L, Han Y C. High Thermal Conductivity Si₃N₄ Particle Filled Epoxy Composites with a Novel Structure[J]. *J Electron Packaging*, 2007, **129**:2-3.

[6] DING Feng, XIE Weizhang. Thermal Conductivity of Composites[J]. *Acta Mater Compos Sin*, 1993, **10**(3):21-23 (in Chinese).
丁峰,谢维章. 导热树脂基复合材料[J]. 复合材料学报, 1993, **10**(3):21-23.

[7] ZHOU Wenying, QI Shuhua, TU Chunchao, et al. Study on Thermal Conductivity of Silicone Rubber Composite Materials [J]. *J Aeronaut Mater*, 2007, **27**(1):33-36 (in Chinese).

- 周文英,齐暑华,涂春潮,等. 导热硅橡胶复合材料研究[J]. 航空材料学报,2007,**27**(1):33-36.
- [8] Cumberland D J, Crawford R J. Handbook of Powder Technology[M]. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, Vol. 6, Chap. 4, 1987.
- [9] PAN Dahai, LIU Hai. Effects of Corundum Powder on the Performance of RTV Silicone Rubber[J]. *Silicone Mater*, 2004, **18**(6):9-12 (in Chinese).
- 潘大海, 刘海. 刚玉粉对室温硫化导热硅橡胶性能的影响[J]. 有机硅材料, 2004, **18**(6):9-12.
- [10] WANG Buxuan, ZHOU Leping, PENG Xiaofeng. Fractal Model for Effective Thermal Conductivity of Nanoparticle Suspension[J]. *Prog Nat Sci*, 2003, **13**(9):838-842 (in Chinese).
- 王补宣, 周乐平, 彭晓峰. 纳米颗粒悬浮液有效导热系数的分形模型[J]. 自然科学进展, 2003, **13**(9):838-842.
- [11] ZHAO Lan, PING Xulie. Fractal Model of Contact Heat Transfer Between Solid Interfaces[J]. *J Tongji Univ*, 2003, **31**(3):296-299 (in Chinese).
- 赵兰, 萍徐烈. 固体界面间接触导热的分形模型[J]. 同济大学学报, 2003, **31**(3):296-299.

Preparation and Properties of Al₂O₃ -Modified Epoxy Resin for Electronic Packaging

LIU Changling^{*}, YANG Ning, ZHANG Zeyu
(*Fine Mechanics and Physics, Changchun Institute of Optics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

Abstract Thermal conductivity, thermal expansion coefficient and dielectric constant of liquid epoxy resin filled with Al₂O₃ flakes or particles in single, binary or multiple hybrid particle sizes were investigated. The relationship between enhanced thermal performance and dense packing was studied by the fractal theory. The results show that the modified epoxy resin filled with single Al₂O₃ flakes or particles (~48 μm) exhibit superior comprehensive performance. The best thermal conductivity, dielectric constant and thermal expansion coefficient are obtained when the epoxy resin filled with the binary hybrid particles, where the volume fraction of the smaller particles in the mixed particles is 20% ~40%. The particles in various sizes in a close packing pattern form the relatively minimum gap and the highest relative thermal conductivity is obtained when the fractal dimension *D* value of hybrid particle size is in a suitable range.

Keywords Al₂O₃, grain shape, modified epoxy resin, thermal conductivity, thermal expansion coefficient, dielectric constant, fractal theory