

界面导热材料研究进展

丁孝均 赵云峰

(航天材料及工艺研究所,北京 100076)

文 摘 综述了导热脂、导热胶黏剂、导热橡胶、导热胶带及相变材料等几类界面导热材料(TIMs)的组成成分、制备方法、主要性能、应用领域及其优化设计方法,并对国内外界面导热材料的发展进行了展望。

关键词 界面导热材料,导热,热阻,导热脂,导热橡胶

Progress of Thermal Interface Materials

Ding Xiaojun Zhao Yunfeng

(Aerospace Research Institute of Materials & Processing Technology, Beijing 100076)

Abstract Thermal interface materials (TIMs) are commonly used to reduce the thermal resistance between an electronic device and its cooling solution. This paper summarizes the progress in the design, composition, properties and application of TIMs in microelectronics. Finally, the developing trend of the technique is also pointed out.

Key words Thermal interface materials, Thermal conducting, Thermal impedance, Thermal conductive grease, Thermal conductive rubber

0 引言

技术进步和市场需求促使电子元器件向小型化、精密化方向发展,其散热成为整机小型化设计的关键。文献[1]表明,电子元器件温度每升高 2°C ,可靠性下降10%;温升 50°C 时的寿命只有温升 25°C 时的 $1/6$ 。

热量从元器件内部需经过器件封装材料和散热器界面再经散热器传递到外部环境。热阻分析表明,器件与散热器之间界面热阻较大。原因是固体表面在微观上粗糙不平,即使两固体表面接触压力高达 10 MPa ,其实际接触面积仅占名义面积的1%–2%,其余部分充满空气($K_{\text{空气}}=0.0242\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[2])的孔隙,不利于热量传递^[3–4]。因此,提高电子元器件散热效率的关键在于降低其与散热装置之间的界面热阻。将界面导热材料填充于接触面之间,可驱除接触界面孔隙内的空气,在整个接触界面上形成连续的导热通道,提高电子元器件的散热效率^[5]。

1 界面导热材料

1.1 导热脂

导热脂是以硅油或矿物油为载体,加入导热填料

研磨成的膏状物。其热导率一般为 $0.6\text{--}1.2\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,将其涂抹于传热界面,能够充分浸润传热界面,降低界面热阻。Lawrence S. Mok 分别测试了填充氧化锌导热脂、二氧化硅导热脂、氮化硼橡胶片、氧化铝橡胶片和导热凝胶的热阻,结果表明氧化锌导热脂热阻最低^[6]。

导热脂为塑性材料,便于元器件反复拆卸装配。其主要缺点是涂抹费时,易沾黏,清洗困难。通常认为导热脂经长期贮存,会出现分油,引起热阻升高。Arun Gowda 等^[7]对导热脂进行了1 000次、 $-50\text{--}150^{\circ}\text{C}$ 温度循环试验,跟踪测试热阻,以考核其可靠性。结果表明,五种导热脂试验后热阻分别下降了10.55%–24.75%,热阻未升高,这主要是由于高温环境下导热脂对界面有更好的润湿性能。

有机硅型导热脂最高使用温度为 150°C ,当温度超过 180°C 时,导热脂中的硅油会剧烈挥发,并产生降解反应^[8],因而不适用于在 150°C 以上或光学性能要求很高的部件^[9]。

航天材料及工艺研究所研制的KDZ-2导热脂的热导率为 $0.80\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,已应用于我国多种型号运

收稿日期:2010-01-06;修回日期:2010-07-21

作者简介:丁孝均,1975年出生,硕士,工程师,主要从事导热材料及非金属材料贮存期评估的研究。E-mail:xiaojundin@yahoo.com.cn

载火箭、导弹及卫星。卫星温控系统中的铝合金部件之间界面的热阻率约为 $0.01(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}$, 使用 KDZ-2 导热脂后, 其界面的热阻率 $<5\times 10^{-5}(\text{m}\cdot\text{K})/\text{W}$ 。在卫星太阳能电池结合板与壳体之间的连接处填充 KDZ-2 导热脂, 可以有效改善太阳能电池的散热性能。

1.2 导热胶黏剂

导热胶黏剂用于粘接固定电子元器件, 兼起防潮、减振作用。环氧类导热胶黏剂适于粘接强度要求较高的电子设备, 有机硅类导热胶黏剂适用于电子设备的柔性粘接传热。采用由 Al_2O_3 、 SiO_2 、 AlN 、 SiC 组成的复合填料填充环氧树脂, 制备用于集成电路封装的导热灌封胶, 热导率为 $1.0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 性能达到美国同类产品水平^[10]。

Prabhakumar^[11]对三种有机硅类和两种环氧类导热胶黏剂进行 $-55-125^\circ\text{C}$ 下 1 000 次热冲击循环及 85°C 、RH85% 下 1 000 h 湿热试验。结果显示, 有机硅类导热胶黏剂粘接强度无显著下降, 环氧类胶黏剂粘接强度下降较大。有机硅的非极性分子结构具有较好的湿热稳定性, 但粘接强度低。因此环氧类导热胶黏剂适用于粘接强度要求高、湿度和热冲击水平中等的工作环境。

航天材料及工艺研究所研制了多种导热胶黏剂。HYJ-51 高温导热绝缘胶可在 200°C 下使用, 其热导率 $\geq 0.84 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 200°C 下的铝-铝拉剪强度 4.9 MPa。研制的低温导热绝缘胶在液氢液氧温度下的拉剪强度 $\geq 18 \text{ MPa}$, 热导率为 $0.63-0.70 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 用于火箭氢氧发动机系统表面温度传感器的端封和胶接安装^[12]。研制的阻尼导热导电多功能胶黏剂和阻尼导热绝缘胶黏剂则具有阻尼导热导电或绝缘等多种功能^[13-14]。

1.3 导热橡胶

导热橡胶一般由硅橡胶、导热填料和承载料组成, 填料主要是氧化铝、氮化硼及金属氧化物, 承载料为玻璃纤维、介电膜、聚酯膜和聚酰亚胺等, 用于提高橡胶的绝缘和抗切割性能。导热绝缘橡胶具有良好的导热和绝缘性能, 其表面平整柔软, 能很好的贴合功率器件与散热装置, 达到良好的导热效果。导热橡胶可反复拆卸, 但要获得较好的导热效能, 必须对导热橡胶施加较大的压力, 使得界面接触紧密, 但这会引起连接材料变形, 在离紧固螺栓某个距离处会发生分离, 因此紧固螺栓的跨度不能大^[15]。

在对航空航天产品进行阻尼减振处理时, 往往既要改善电子设备的振动力学环境, 又要满足其散热要求, 这就需要使用导热橡胶阻尼材料^[16]。航天材料及工艺研究所研制的几种导热橡胶阻尼材料的主要性能见表 1。

表 1 导热橡胶阻尼材料的性能^[16]

Tab. 1 Properties of heat-conductive damping rubbers

材料 牌号	热导率/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	拉伸强 度/MPa	扯断伸 长率/%	邵氏 硬度	剪切模 量 ¹⁾ /MPa	损耗 因子 ²⁾
DRZN-1	0.65	2.1	112	62	2.7	0.24
DRZN-2	0.70	1.4	36.6	65	19.5	0.25
DRZN-3	0.70	1.5	52.7	67	21.0	0.24
DRZN-4	1.85	1.1	149	42	1.4	0.30
DRZN-5	1.90	1.5	131	60	3.1	0.23

注: 1) 62.5 Hz; 2) 25°C , 62.5 Hz。

1.4 相变材料

相变材料由融化温度在 $50-90^\circ\text{C}$ 的石蜡、硅烷、多元醇 (如 2,2-二羟甲基-丙醇, 新戊二醇, $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}_2$) 等加入导热填料组成^[17-18]。石蜡相变潜热高、蒸汽压低、化学惰性、性能稳定, 应用较广泛^[19]。装配于电子元器件与散热片之间的相变材料, 当温度达到融化点后, 融化为黏度较大的液体, 润湿配合界面, 使得配合面由点接触变为面接触, 降低了界面热阻。

Dow Corning 公司通过合理设计硅氧烷的分子结构, 控制分子量, 合成不同融化温度和黏度的甲基硅烷相变材料系列, 热导率为 $0.3 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。通过填充氧化铝, 可得到在融化态热导率为 $5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 的相变材料, 具有极低的热阻^[20]。

相变材料的优点是常温下呈固态, 可制成垫片, 便于装配, 无导热脂的易沾污性。工作时可获得类似于导热脂的低界面热阻, 通常作为导热脂的替代材料。与导热脂一样, 相变材料不适用于要求绝缘的电子产品, 并且在融化成液态时有从界面流出的可能。

1.5 导热胶带

导热胶带以玻璃纤维布或铝箔 (铝网) 为基材, 单面或双面压有机硅导热压敏胶。也可采用氧化铝填充丙烯酸胶黏剂涂在铝箔、玻璃纤维或多孔铝网上制成。导热胶带可实现导热、绝缘和固定等功能。适用于集成度高、设备空间小和固定困难等场合, 主要用于粘接散热片到微处理器和其他功率消耗半导体器件上, 可以部分取代机械固定。

2 界面导热材料的组分设计

2.1 基体材料

界面导热材料的基体主要有硅油、矿物油、硅橡胶、环氧树脂、聚丙烯酸酯、聚乙烯、聚丙烯、聚氨酯、聚氯乙烯、聚酰亚胺等^[21]。硅油耐温性能好, 化学性质稳定、饱和蒸气压低, 主要用于制备导热脂。硅橡胶在界面导热材料中得到广泛应用。L. H. Meyey 的研究表明^[22-23], 高比例添加相同质量比的同种导热填料, 高温硫化成型导热硅橡胶由于致密性较高, 其热导率明显高于室温硫化成型硅橡胶。用环氧树脂

配制的导热胶主要用于粘接强度要求较高的电子设备;聚酰亚胺薄膜具有很好的韧性和绝缘强度,主要用作导热双面胶带的基材。

2.2 导热填料

2.2.1 种类

导热填料分两类,一类为导热绝缘填料,主要为金属氧化物、碳化物及氮化物,如 Al_2O_3 、 MgO 、 ZnO 、 SiO_2 、 BeO 、 BN 、 AlN 、 Si_3N_4 、 SiC 和金刚石粉等;另一类为导热导电性填料,以金属粉末为主,如 Ag 、 Ni 、石墨等。导热填料添加到基体中,可提高体系的热导率,并对基体补强,提高其力学性能。选择相同加入量的高热导率填料,制备的界面材料热导率更高。一些常见材料的热导率见表 2^[24]。

表 2 一些常见材料的热导率

Tab.2 Thermal conductivity of some kinds of materials

W/(m·K)					
材料	热导率	材料	热导率	材料	热导率
金刚石	2000	氮化硼	210	丙烯酸酯橡胶	0.27
银	427	氮化铝	320	氯丁橡胶	0.25
铜	398	氧化镁	60	硅橡胶	0.20
金	315	氧化铝	36	丁基橡胶	0.10
铝	237	氧化锌	25	尼龙 6	0.25
镁	156	碳化硅	270	聚乙烯	0.22
铁	80	氧化铍	272	聚氯乙烯	0.16

界面导热材料常用的填料有氧化铝、氮化硼、碳化硅、氧化镁、氢氧化铝或它们的混合物,其中氧化铝应用最多。氧化铝热导率高,价格便宜,阻燃性能优异,通过粒径配比后,可制得高热导率的界面导热材料。但氧化铝对聚合物的补强作用较差,一般需采用玻璃纤维增强。氧化铝硬度高,对接触界面具有磨蚀性,不适合航天或其他振动环境恶劣的场合^[25]。

氮化硼、氧化镁对聚合物材料具有较好的补强作用,但大量加入会使材料成型工艺性能变差,一般需与其他填料配合使用。氮化铝高纯单晶体理论热导率可达 $320 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,是理想的导热填料^[26]。但由于氮化铝对氧具有强烈的亲和作用,氧杂质易于固溶进氮化铝晶格形成缺陷,阻碍声子传热,从而降低热导率。实际制备得到的多晶氮化铝的室温热导率一般为 $30\text{--}260 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ^[27]。较好的方案是将不同填料经粒径配比后加入到聚合物基体中,以获得较高的堆砌密度^[28],制备出综合性能良好的界面导热材料。

2.2.2 导热填料含量

增加填料含量,有利于提高界面材料导热性能。当填料含量达到某一临界值时,填料在聚合物基体中相互接触,形成导热网链,材料整体导热性能得以改善。但填料含量过高,将导致材料成型工艺性变差,

力学性能劣化。填料含量较低时,由于填料弥散于聚合物基体中,不能相互接触,难以形成连续的导热通道,对界面材料导热性能改善幅度不大^[29]。

填料在聚合物中的最大含量与填料表面状态、粒径密切相关。填料粒径小,聚合物对填料表面浸润性好,易引起胶料黏度快速升高,导致工艺性能变差,限制了填料的大量加入。填料粒径大,有利于填料大量加入,但其对聚合物的补强作用降低,成型后的界面材料物理力学性能差。

2.2.3 导热填料状态

填料的粒径大小、长径比及表面特性等对填充材料的导热性能影响显著。填料粒径大,热量传递相同距离经过的填料基材界面数量减少,可提高材料整体热导率,但填料粒径增大会降低对聚合物的补强作用,导致物理力学性能下降。采用氮化硅作为导热填料,当其粒径在 $5\text{--}20 \mu\text{m}$,可制得导热、力学及加工性能良好的导热绝缘 RTV 硅橡胶^[30]。

提高填料长径比,填料之间容易相互接触,有利于形成连续的热流通路^[31],填料表面与基材润湿性好,两者接触紧密,可提高热导率。一般采用表面处理剂对填料进行表面处理,以提高两者的结合力^[32]。

3 界面导热材料热导率和热阻计算模型

3.1 热导率预测模型

Maxwell-Eucken 模型^[33]、Nielsen-Lewis 模型^[34]和 Baschirov-Selenew 模型^[35]适用于单一填料低比例填充聚合物的界面导热材料热导率的预测。当填充量较大时,应用 Y. Agari 模型^[36]预测结果与实际比较相符,其表达式如下:

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

式中, λ 为界面导热材料热导率, V_f 为粒子的填充体积分, 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_1 为聚合物的热导率, λ_2 为填充粒子的热导率。

对于多种填料填充聚合物体系,Agari 新模型^[36]与实验数据吻合较好,其表达式如下:

$$\lg \lambda = V_f (X_2 C_2 \lg \lambda_2 + X_3 C_3 \lg \lambda_3 + \dots) + (1 - V_f) \lg (C_1 \lambda_1) \quad (2)$$

式中, C_2 、 C_3 为各填料粒子形成导热链的自由因子, X_1 、 X_2 为各填料粒子占总填料的统计分数, λ_2 、 λ_3 为填充粒子的热导率。

3.2 界面接触热阻计算模型^[37]

典型的界面接触热阻计算模型:

$$\frac{R_{c12} k}{\sigma} = c \left(\frac{H}{p} \right)^n \quad (3)$$

式中, R_{c12} 是材料 1 和材料 2 之间的接触热阻, σ 是表面粗糙度, k 为材料 1 和材料 2 接触材料热导率的调

和均数, H 为材料 1 和材料 2 中硬度较低材料的显微硬度, p 为接触压力, c 和 n 为经验系数, $k = \frac{2k_1k_2}{k_1+k_2}$ 。

当材料 1 为金属, 材料 2 为界面导热材料时, 由于 $k_1 \gg k_2$, $k = 2k_2$ 。模型中 H 可用界面导热材料的剪切模量替代。该模型表明, 降低界面导热材料的显微硬度和接触材料的表面粗糙度, 提高接触压力和界面导热材料的热导率, 是减小界面热阻的有效途径。

3.3 安装状态下热阻计算模型^[38]

Ravi S. Prasher 以导热填料的热导率远高于聚合物基体假设为前提, 建立了粒子填充界面导热材料流变学模型, 用于界面导热材料的热阻优化设计, 在低 p/τ_{yb} 时热阻为 R_{small} , 高 p/τ_{yb} 时热阻为 R_{large} , 其计算模型如下:

$$R_{small} = \frac{1}{d^3} \left[\frac{1}{(\varphi_m/\varphi)^{1/3} - 1} \right]^2 \frac{(1-\varphi)^3 \left(1 - \frac{R_b k_m}{d}\right) / \left(1 + 2\frac{R_b k_m}{d}\right)}{k_m} \quad (4)$$

$$R_{large} = d^{0.247} \left[\frac{1}{(\varphi_m/\varphi)^{1/3} - 1} \right]^{0.376} \frac{(1-\varphi)^3 \frac{1 - \frac{R_b k_m}{d}}{1 + 2\frac{R_b k_m}{d}}}{k_m} \quad (5)$$

式中, p 为界面压力, τ_{yb} 为 TIM 屈服应力, d 为导热填料粒子直径, φ 为导热填料体积分数, φ_m 为导热填料最大填充体积分数, R_b 为导热填料粒子与聚合物基体接触热阻, k_m 为聚合物基体热导率。

该模型能够较准确地预测高热导率填料填充聚合物基界面材料在安装状态下的热阻, 实用性较强。

3.4 应用效果评价

界面导热材料应用效果不仅取决于材料自身特性, 与安装状态也密切相关。以导热橡胶垫为例, Vishal Singhal 等人^[39]认为热源与散热装置之间的热阻可分为三部分: 橡胶垫与热源之间的接触热阻、橡胶垫的热阻及橡胶垫与散热装置之间的接触热阻。并假设橡胶垫与热源和散热装置之间的接触热阻相同, 原因是两接触面的粗糙度相似, 橡胶垫硬度远小于接触面的硬度。以填充有导热橡胶垫的热阻与无填充材料的热阻比值 f 作为反映导热橡胶垫对减少热阻的效果指标, f 越小, 其改善程度越高。

$$f = \frac{R_{c,TIM}}{R_{c,NOTIM}} = \frac{R_{c,TIM1} + R_{b,TIM} + R_{c,TIM2}}{R_{c,NOTIM}} = f_c + f_b \quad (6)$$

式中, $R_{c,TIM}$ 为填充导热垫的热阻, $R_{c,NOTIM}$ 为未填充导热垫的热阻, $R_{c,TIM1}$ 、 $R_{c,TIM2}$ 是导热垫与两接触面的接

触热阻, $R_{b,TIM}$ 是安装状态下导热垫材料热阻, f_c 是安装有导热垫的双面接触热阻与未填充导热垫时的热阻比值, f_b 是导热垫热阻与未填充导热垫时的热阻比值。 f_c 、 f_b 计算模型如下:

$$f_c = \left[2 \frac{E_{TIM}(1 - \nu_1^2)}{E_1(1 - \nu_{TIM}^2)} \right]^{0.94} \left(1 + \frac{k_1}{k_{TIM}} \right) \quad (7)$$

$$f_b = 1.55 \frac{\tan\theta}{\sigma} \left[\frac{2\sqrt{2p}(1 - \nu_1^2)}{E_1 \tan\theta} \right]^{0.94} k_1 R_{b,TIM} \quad (8)$$

式中, E_{TIM} 为导热垫弹性模量, ν_1 为接触材料泊松比, E_1 为接触材料弹性模量, ν_{TIM} 为导热垫泊松比, k_1 为接触面材料热导率, k_{TIM} 为安装状态下导热橡胶垫的热导率, θ 为接触材料粗糙斜角, $\tan\theta = 0.125\sigma^{0.402}$ 。

导热橡胶垫的设计与电子元器件工况密切相关, 选用较厚的导热橡胶垫, 绝缘和抗击穿性能好; 提高导热橡胶垫的热导率和接触压力, 有利于热阻的下降; 对压力敏感的精密器件, 通过降低导热橡胶垫弹性模量, 提高表面润湿性能, 减小厚度, 同样可以达到降低整体热阻的目的。

4 结语

新一代微处理器要求界面导热材料具有更高的热导率和更好的长期使用可靠性, 某些应用领域还需兼顾绝缘、减振和固定等功能。采用原位固化低模量导热硅凝胶作为界面导热材料是实现这一目标的有效途径之一。研制低成本的高热导率填料代替常用的氧化铝填料, 可在不降低界面导热材料热导率的前提下减少填料的加入量, 从而提高界面导热材料对接触材料表面的润湿性能, 达到降低接触热阻提高传热效率的目的。采用表面活性剂来处理填料表面、对填料的粒径及其分布进行配比设计等技术途径, 在一定程度上也可提高界面导热材料的热导率, 由于该途径成本较低而得到普遍应用。

相比于国外界面导热材料生产企业如日本信越和美国道康宁等, 我国界面导热材料生产企业的规模普遍较小, 缺少高端产品。要提高我国界面导热材料的整体生产技术水平, 还需加大上游原材料的研发投入, 形成完整的上下游产业链, 走专业化规模发展道路, 以满足我国电子工业快速发展的需求。

参考文献

- [1] 孙春雷. 有源液晶显示器加固技术探讨[J]. 湖南轻工高等专科学校学报, 2002, 114(14): 20-24
- [2] 赵兰萍, 徐烈. 固体界面间接导热的机理和应用研究[J]. 低温工程, 2000(4): 29-34
- [3] Luke Maguire, Masud Behnia, Graham Morrison. A systematic evaluation of thermal performance of interface materials in high power amplifiers[R]//2003 ICEPT, IEEE, 2003: 355
- [4] Chiu Chiapin, Solbrekken G L, Young T M. Thermal <http://www.yhclgy.com> 宇航材料工艺 2010年 第6期

modeling and experimental validation of thermal interface performance between non-flat surface[R]//2000 inter society conference on thermal phenomena, IEEE, 2000; 55-62

[5] 湛利华, 李晓谦, 胡仕成. 界面接触热阻影响因素的试验研究[J]. 轻合金加工技术, 2002, 30(9): 42

[6] Mok L S. Thermal management of silicon-based multi-chip modules[R]//10th IEEE SEMI-THERM, IEEE, 1994; 59-63

[7] Arun Gowda, David Esler, Sara N. Paisner. Reliability Testing of Silicone-based Thermal Greases[C]//21st IEEE SEMI-THERM Symposium, 2005

[8] Sheila Liza B. Dal. Degradation mechanisms of siloxane-based thermal interface materials under reliability stress conditions [C]//42nd annual international reliability physics symposium. Phoenix, 2004, IEEE, 2004; 537-541

[9] 任红艳, 胡金刚. 接触热阻和接触导热材料[J]. 宇航材料工艺, 1999, 29(6): 13

[10] 王政. 用于集成电路封装的有机复合高导热灌封料[J]. 安徽化工, 2001(1): 41-44

[11] Prabhakumar, et al. Comparison of the adhesion strength of epoxy and silicone based thermal interface materials [C]//2003 electronic components and technology conference; IEEE, 2003; 1809-1814

[12] 吴金林. 低温导热绝缘胶黏剂研究[J]. 低温工程, 1998(3): 51-54

[13] 陈江涛, 赵云峰, 吴金林. 阻尼导热导电多功能胶黏剂研究[C]//第四届全国功能材料及应用学术会议论文集, 厦门, 2001

[14] 陈江涛, 赵云峰, 吴金林. 阻尼导热绝缘胶黏剂研究[R]//全国先进材料及工艺技术学术会议论文集, 太原, 2001

[15] Scialdone J J, Clatterhuck C H, Wall J L. Thermal conductance of two interface materials and their applications in space systems [C]//27th thermophysics conference, Nashville, TN, July 6/8, 1992, Washington: AIAA, 1992; 1-9

[16] 赵云峰. 高性能粘弹性阻尼材料及其应用[J]. 宇航材料工艺, 2009, 39(5): 1-6

[17] Bob Rauch. Understanding the performance characteristics of phase-change thermal interface materials[R]//2000 inter society conference on thermal interface, IEEE, 2000; 42

[18] 张丽芝, 张庆. 相变贮热材料[J]. 化工新型材料, 1999, 27(2): 20

[19] Konstantin Golemanov, Slavka Tcholakova, Nikolai D. Denkov, et al. Selection of surfactant for stable paraffin-in-water dispersions, undergoing solid-liquid transition of the dispersed particles[J]. Langmuir, 2006, 22(8): 3560

[20] Zhang S Mark, Diane Swarthout, Feng Q Jane. Alkyl methyl silicone phase change materials for thermal interface applications [C]//Inter Society Conference on Thermal Phenomena, IEEE, 2002; 485-487

[21] 康学勤, 孙智. 陶瓷纤维填充聚烯烃复合材料的导热性能研究[J]. 塑料工业, 2004, 32(3): 52

[22] Luiz Meyey, Shesha Jayaram, Cherney E. Thermal char-

acteristics of filled silicone rubber under laser heating[C]//2003 annual report conference on electrical insulation and dielectric phenomena, IEEE, 2003; 383-386

[23] Luiz Meyey, Shesha Jayaram, Edward Cherney. Thermal conductivity of filled silicone rubber and its relationship to erosion resistance in the inclined plane test [C]//IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation, 2004, 11(4): 620-629

[24] Toshio Miyahara, Kouichi Tanabe, Mitsuo Shimazaki et al. New products developed using environment-friendly elastomer rubber[J]. Furukawa Review, 2002(22): 4

[25] 北京粘接学会编译. 胶粘技术与应用手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1991: 710

[26] 李侃社, 王琪. 导热高分子材料研究进展[J]. 功能材料, 2002, 33(2): 139

[27] 李淘, 沈强, 王传彬, 等. AlN 陶瓷的烧结致密化与导热性能[J]. 中国陶瓷, 2005, 41(1): 39-42

[28] 汪倩, 杨始燕, 谢择民, 等. 高导热室温硫化硅橡胶和硅脂[J]. 有机硅材料, 2004, 14(1): 65-71

[29] 马传国, 容敏智, 章明秋. 导热高分子复合材料的研究与应用[J]. 材料工程, 2002(6): 43

[30] 潘大海, 刘梅, 孟岩, 等. 导热绝缘室温硫化硅橡胶的研制[J]. 橡胶工业, 2004, 51(9): 536

[31] 汪雨荻, 周和平, 乔梁. AlN/聚乙烯复合基板的导热性能[J]. 无机材料学报, 2000, 15(6): 1030-1036

[32] Xu Yunsheng. Composite materials through interface, paste, shape and perform engineering[M]. State University of New York, UMI Number: 3052556, 2002; 180

[33] Ervin Vincet J, Klett James W, Mundt Chad M. Estimation of the thermal conductivity of composites[J]. J Mater. Sci., 1999, 34: 3545

[34] Lewis T, Nielsen L. Dynamic mechanic properties of particulate-filled composites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1970, 14(1): 449

[35] Agari Y, Uno T. Estimation on thermal conductivities of filled polymer[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1986, 32(5): 705-708

[36] Agari Y, Tanaka M, nagai S, Uno T. Thermal conductivity of a polymer composite filled with mixtures of particles[J]. J. Appl. Polym. Sci., 1987; 34: 1429

[37] Ravi, S. Prasher. Thermal contact resistance of cured gel polymeric thermal interface material//IEEE transactions on components and packaging technologies, 2004, 27(4): 702-708

[38] Ravi, S. Prasher. Rheology base modeling and design of particle laden polymeric thermal interface materials [C]//IEEE transactions on components and packaging technologies, 2005, 28(2): 230-236

[39] Vishal singhal, Tomas siegmund, Suresh V. Garimella. Optimization of thermal interface materials for electronics cooling applications [R]//IEEE transactions on components and packaging technologies, 2004, 27(2): 244-251

(编辑 吴坚)