

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.12.028

电子封装用导热环氧树脂基复合材料的研究进展

谢宇宁,雷华,石倩

(贵州大学材料与冶金学院,贵阳 550025)

摘要: 环氧树脂是电子封装的常用材料,但其热导率仅有 $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右,添加高导热填料是提高环氧树脂导热性能的常用手段。对电子封装用导热环氧树脂基复合材料的导热机理和导热模型进行了综述,介绍了几种常用填料对复合材料导热性能的影响,并对电子封装用导热环氧树脂基复合材料未来的发展方向进行了展望,指出目前仍有许多问题需要解决,所制备的材料热导率不能满足应用要求,导热机理和模型也还需要进行更深入的研究。

关键词: 导热; 电子封装; 环氧树脂; 热导率; 复合材料

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)12-0143-05

Research Progress of Thermal Conductive Epoxy Matrix Composites for Electronic Packaging

Xie Yuning, Lei Hua, Shi Qian

(College of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract : Epoxy resin is a common material for electronic packaging, but its thermal conductivity is only about $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Adding high thermal conductivity filler is a common means to improve the thermal conductivity of epoxy resin. The thermal conductivity mechanism, thermal conductivity model of epoxy resin composite for electronic packaging were reviewed, and the influence of related fillers on the thermal conductivity of composite was presented. The future development direction of epoxy resin composite for electronic packaging was prospected. It was pointed out that there were still many problems to be solved, the thermal conductivity of the prepared materials could not meet the application requirements, and the thermal conductivity mechanism and model also needed to be further studied.

Keywords : thermal conduction ; electronic packaging ; epoxy resin ; thermal conductivity ; composite

随着电子集成技术的发展,电子元件的集成越来越密集,运算速度越来越快。电子元件高频工作所产生的热量累积增加,造成产品性能下降。导热材料对延长电子元件的使用寿命,散热和提高精度具有越来越重要的作用。现代电子元件的尺寸越来越小,运行速度越来越快,热量产生得更多也更集中,这对新的电子封装材料的散热性能提出了更高的要求,即这种材料应具有高的热导率。聚合物材料由于价格低廉,适合大规模自动化生产,成为主要的封装材料。

在一个设备里的热通量增加会显著影响其寿命和可靠性,聚合物封装是封装和保护电子元件的一种常见的方法,然而,聚合物材料是热的不良导体,缺乏导热路径导出余热,这可能会导致设备失效。提高聚合物材料导热性的常规方

法是在聚合物中加入高热导率陶瓷填料,通过与树脂基体复合在基体中形成有效的热传导路径,从而提高整体的热导率。近年来,研究者高度关注具有高热导率和高电阻的陶瓷填充聚合物复合材料的发展情况。

环氧树脂 (EP) 是一类具有良好耐腐蚀性、绝缘性及高强度的热固性高分子合成材料,其同时具有耐化学药品性和良好的尺寸稳定性,粘结强度高、综合性能优异、价格便宜,因而得到广泛应用^[1]。但 EP 的热导率为 $0.2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 左右,一般需要加入无机填料以提高导热性能。无机填料的主要作用是降低热膨胀系数、吸水率、成型收缩率和生产成本,还可以起到增强作用,提高可靠性^[2]。为提高现有聚合物封装材料的导热性能,并满足其他电子封装所需的强度和绝

基金项目: 贵州省科技合作计划项目 (黔科合 LH 字 [2016]7441 号)

通讯作者: 雷华,副教授,主要研究方向为聚合物基复合材料 E-mail: leihua20051104@sohu.com

收稿日期: 2018-09-12

引用格式: 谢宇宁,雷华,石倩. 电子封装用导热环氧树脂基复合材料的研究进展 [J]. 工程塑料应用,2018,46(12):143-147.

Xie Yuning, Lei Hua, Shi Qian. Research progress of thermal conductive epoxy matrix composites for electronic packaging[J]. Engineering Plastics Application, 2018, 46(12):143-147.

缘性能,常见的无机填料有二氧化硅(SiO_2)、氧化铝(Al_2O_3)、云母、氮化硼(BN)、氮化铝(AlN)、碳化硅、金刚石、氧化铝纤维、氮化铝纤维和玻璃纤维/碳纤维等,其中 AlN, BN 和金刚石填料可显著提高聚合物材料的导热性能,但价格昂贵,规模化应用受到限制,而 Al_2O_3 和 SiO_2 填料因价格便宜获得了广泛的应用^[3]。石墨烯、碳纳米管等碳材料,金属粉末、金属线等金属材料也常用以提高聚合物材料的导热性能。

1 导热机理和导热模型

1.1 导热机理

电子、声子和光子都可以作为固体导热的载体。聚合物复合材料主要依靠晶格振动进行导热,也就是依靠声子来进行传热。当热量传递到聚合物分子链时引起原子的振动,热量得以传递,热量在传递过程中也会引起聚合物分子链中原子的无序振动和旋转,这显著降低了聚合物材料的导热性^[4]。EP 是一种非晶聚合物,主要依靠声子传热,由于其巨大的分子量以及分子量的多分散性,分子大小不等和分子链无规缠结,声子散射严重,使 EP 的导热性能不佳,电子封装用以填充型导热 EP 为主。目前填充型导热高分子材料导热机理的理论主要有三种:导热通路理论、逾渗理论和热弹性系数理论。最为普遍的是导热通路理论,复合材料热导率取决于基体和填料间协同作用,填料含量低时聚合物基体是连续相,填料是分散相,基体与填料形成海岛结构,填料被聚合物基体所包覆,随着填料的添加,填料之间相互接触形成局部导热网链。若继续增加填料,局部的导热网链相互连接贯穿,基体和填料都成为连续相,填料形成的导热网链与基体相互贯穿形成网链结构使导热性能大大提升。Li Jing 等^[5]采用碳纤维制备了高效导热涂层,填料相互重叠形成通道,当填料含量为 12.3% 时,热导率达到 $1.61 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,将其涂附在发动机气缸以测试其散热性能,15 min 后与没有涂层的气缸相比温差达到 15°C ,散热效果明显。但是这种机理无法解释热导率不会随导热填料的添加热导率急剧增加的逾渗行为。

逾渗理论类似于填充型导电高分子材料的逾渗现象,但这种理论存在争议,逾渗理论无法解释热导率随填料粒径减小而降低的现象,并且普通填料很难观察到逾渗现象,只有具有极高热导率的填料粒子才可以观察到逾渗现象,逾渗转变点附近的聚合物电导率急剧升高,而聚合物的热导率却幅度不大,电子由于隧道效应可以穿过聚合物势垒而导电,但声子却不能,填料与聚合物基体间存在巨大的界面热阻,即使填料含量在逾渗转变点以上热导率依然很低。

热弹性系数理论将热导率看作是声子传热过程的热弹性系数,但复合材料热导率并不是一个依赖于路径的性质,而应当是一种取决于材料整体特性的宏观性质^[6]。导热填

料提高复合材料体系的热导率遵循整体热弹性的组合增强机理,复合材料的热导率随着导热填料的添加不会发生急剧增加,而是呈现逐渐增加的趋势。图 1 为复合材料热振动增强示意图^[6],图中含有黑粗折线的椭圆代表导热填料,细折线代表基体树脂,小空椭圆代表空隙和杂质等结构缺陷。导热填料和基体树脂分别是具有不同热导率的两相,与振动和波相似,传递热振动的声子也会在具有不同热导率的两相界面发生反射、折射、干涉和阻滞等现象造成声子散射,如果基体和填料之间存在缺陷,声子在界面的散射会更加严重,因此,复合材料中基体与填料之间的界面会造成材料热导率的降低。

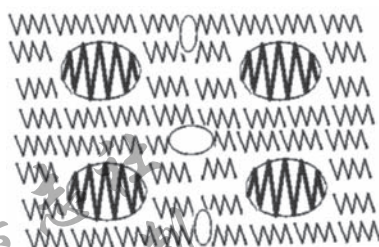


图 1 导热填料填充复合材料的热振动增强示意图

1.2 导热模型

基于有效介质理论估算聚合物纳米复合材料的热导率的模型已有很多。从聚合物纳米复合材料中也观察到了在电逾渗阈值下的类似导电聚合物的热逾渗行为,但是热性能与电性能有很大不同,聚合物的电性能很差可以忽略,只有导电填料有利于导电,而在热情况下,没有绝对的热绝缘体,聚合物基质不能被忽略,这种行为的基本原因是由于界面热阻或组分的固有热导率与几何因素有关,热逾渗行为没有明确的证据来证明。因此,在激烈的争论中,这种复合材料的增强是否应该根据热逾渗或有效介质理论进行解释仍然是一个问题^[7]。

目前用于聚合物复合材料的导热模型主要有 Maxwell-Eucken 模型^[8]、Y. Agari 模型^[9]、Bruggeman 模型^[10]、Every 模型^[11]和 Hamilton-Crosser 模型^[12]。

(1) Maxwell-Eucken 模型。

在 Maxwell 提出的模型的基础上, Eucken 对其进行了改进,将导热类比为导电,得到了 Maxwell-Eucken 模型,见式 (1)。该模型适用于填料为球状,并且均一地分散在连续基体中,该模型在填料含量较少时 ($V < 0.4$) 可以很好地预测导热性能,但是在填料含量较大时与实验值相差较大,主要原因是当填料含量较大时,填料间相互接触形成通路,大大提高了复合材料的热导率。

$$\lambda = \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 + 2V(\lambda_2 - \lambda_1)}{2\lambda_1 + \lambda_2 - 2V(\lambda_2 - \lambda_1)} \lambda_1 \quad (1)$$

式中: λ , λ_1 , λ_2 分别为复合材料、填料、基体材料的热导率; V 为粒子的体积分数。

(2) Y. Agari 模型。

Y. Agari 模型解决了 Maxwell-Eucken 模型的缺陷,使其可以预测高填充下的热导率,并首先提出了“导热链”的概念,用于预测热导率, Y. Agari 模型见式 (2)。

$$\lg \lambda = VC_1 \lg \lambda_2 + (1 - V) \lg (C_2 \lambda_1) \quad (2)$$

式中: C_1 是形成粒子导热链的自由因子; C_2 是影响结晶度和聚合物结晶尺寸因子。

(3) Bruggeman 模型。

Bruggeman 对 Maxwell 的有效介质理论进行了改进,通过逐渐增加分散粒子数的方法得到较高填充率时的计算模型,见式 (3)。Bruggeman 模型适用于球形粒子,高填充量的体系。

$$(1 - V)^3 = \frac{\lambda_1}{\lambda} \left(\frac{\lambda - \lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \right)^3 \quad (3)$$

(4) Every 模型。

在 Bruggeman 模型的基础上, Every 模型增加了粒子与基体之间界面热阻 (R_i) 的影响,见式 (4)。Every 模型适用于考虑界面热阻的球形粒子高填充的体系。

$$(1 - V)^3 = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda} \right)^{\frac{1+2\alpha}{1-\alpha}} \left[\frac{\lambda - \lambda_2(1-\alpha)}{\lambda_1 - \lambda_2(1-\alpha)} \right]^{\frac{2}{1-\alpha}} \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2R_i \lambda_1}{d} \quad (5)$$

式中: d 为粒子半径。

(5) Hamilton-Crosser 模型。

Hamilton-Crosser 模型对 Maxwell 模型进行了改进,是考虑粒子形状的复合材料热导率模型,并且具有普遍意义。Hamilton-Crosser 模型见式 (6)。

$$\lambda = \lambda_1 \left[\frac{\lambda_2 + (n-1)\lambda_1 + (n-1)V(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_2 + (n-1)\lambda_1 - V(\lambda_2 - \lambda_1)} \right] \quad (6)$$

$$n = 3 / \Phi \quad (7)$$

式中: $\Phi (0 \leq \Phi \leq 1)$ 表示粒子的球形度, Φ 为 1 时粒子为正球形。

2 常用 EP 导热填料

2.1 无机陶瓷填料

(1) AlN。

AlN 具有高导热系数并且绝缘性能优良,导热系数可达 200 ~ 300 W/(m·K),热稳定性好,室温强度高,热膨胀系数为 $4.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, AlN 还是优良的电绝缘体,介电性能优良,作为填料可以很大程度地提高基体材料的热导率。E. S. Lee 等^[13] 制备 EP/AlN 复合材料时加入分散剂,复合材料的热导率达到 3.39 W/(m·K),比纯 EP 高出约 15 倍。赵广辉等^[14]

制备的 EP/AlN 导热复合材料, AlN 含量为 30% 时,热导率达到 0.75 W/(m·K),约为 EP 的 4 倍。AlN 虽然有较高的热导率但是价格昂贵,限制了 AlN 在导热材料中的应用。

(2) BN。

BN 不仅具有良好的导热性还具有抗腐蚀和耐热性,常见的 BN 具有无定型态、立方和六方三种形态。六方 BN 是最为稳定的晶型,有类似石墨的结构,受到广泛研究, BN 作为聚合物导热填料有非常好的应用前景。Yu Cuiping 等^[15] 使用六方氮化硼 (h-BN) 微片作为填料,制备了 EP/BN 复合材料,获得的复合材料具有 9 W/(m·K) 高贯穿平面热导率并且具有良好的力学强度。Hu Jiantao 等^[16] 用冰模板自组装和渗透法制备了 EP/有序三维网络氮化硼 (3D-BN) 复合材料,制备的复合材料在 34% 的填料加载下,热导率达到 4.42 W/(m·K)。从理论上讲大粒径的填料可以更有效地提高复合材料的热导率,但小粒径填料可以获得更高的堆积密度,从而减小基体层的厚度,使声子散射减弱,热导率提高。表面处理增加基体与填料的界面相容性也是提高复合材料热导率的常见手段。He Yongming 等^[17] 通过对氮化硼纳米颗粒 (BNNP) 进行表面改性制备功能化氮化硼纳米颗粒 (f-BNNP),大大改善了 EP 的热导率, f-BNNP 质量分数为 10% 时 EP / f-BNNP 复合材料表现出 1.58 W/(m·K) 的高热导率。由于混杂效应,将不同种类、形状、粒径的填料进行复配,比使用单一粒子可以更有效地提高复合材料的热导率。K. C. Yung 等^[18] 将空心玻璃微球 (HGM) 和 BN 一起加入到 EP 基体中同时获得了高热导率和低介电常数,最佳填料体积含量为 31.6% HGM 和 8.3% BN,与纯 EP 相比,复合材料热导率大约增加了 85%。氮化硼纳米管 (BNNT) 具有良好的电绝缘性、非常好的化学、热稳定性和力学性能, BNNT 还具有沿轴向为 600 W/(m·K) 的高热导率,有较高的纵横比,易于在聚合物基体中形成导热通路,与传统填料相比能够能有效提高复合材料的热导率。C. Y. Zhi 等^[19] 制备 EP/BNNT 复合材料, BNNT 质量分数为 5% 时 EP 的热导率提高了 69%。

2.2 碳材料

(1) 石墨烯。

石墨烯具有非常好的热传导性能同时具有良好的导电性,纯的无缺陷的单层石墨烯的热导率高达 5000 W/(m·K),是目前为止热导率最高的碳材料,是一种极好的导热候选材料,高于单壁碳纳米管的 3500 W/(m·K) 和多壁碳纳米管的 3000 W/(m·K)。石墨烯作为填料可以很好地提高复合材料的热导率,但石墨烯作为导热填料与其表面官能团含量有很大关系,需要对其表面官能团含量进行优化,目前缺乏统一的评价体系。Fu Yuanxiang 等^[20] 通过再膨胀

法制备了石墨烯片并制备 EP/石墨烯复合材料,石墨烯质量分数为 10.10% 时,复合材料的热导率达 $4.01 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,比纯 EP 提高了约 22 倍。有研究表明采用小尺寸的石墨烯可以更好地提高复合材料的导热性能。Sun Xiaobo 等^[21]用硝酸处理石墨烯纳米片使其功能化制备 EP/石墨烯纳米片复合材料,使其热导率提高了 40% 并改善了材料的流变行为。E. Messina 等^[22]采用双壁碳纳米管和石墨烯纳米片提高导热性,他们将异丙醇作为用于纳米管的拆散、石墨烯的剥离和碳纳米管在 EP 基体中的分散的溶剂,在非常小的含量(纳米管质量分数 1% 和石墨烯质量分数 0.01%)下复合材料热导率达到 $12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。M. A. Raza 等^[23]添加质量分数为 4%~6% 的炭黑纳米颗粒(CB)和 12%~14% 的石墨烯纳米片(GNP)到 EP 中开发杂化复合材料,EP/4% CB/1% GNP ($15 \mu\text{m}$)杂化复合材料的热导率为 $0.81 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,约比 EP 提高 4 倍。A. K. Singh 等^[24]通过在浓 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{H}_3\text{PO}_4$ 的混合物中化学还原氧化石墨制备了杂化 BN/石墨烯填充 EP 复合材料,测试结果表明热导率改善升至 $1.65 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,超过原 EP 的 9 倍。

石墨烯作为目前热导率最高的材料,已有许多研究。石墨烯在聚合物中的热传导机理比较复杂。石墨烯有非常高的比表面积,石墨烯加入到聚合物基体中造成了更多界面的产生,因此热量很难穿过石墨烯与聚合物基体之间的界面。由于石墨烯与聚合物之间存在错配,界面会导致声子散射并阻碍传热^[5]。但填料含量低于逾渗阈值时,填料之间不能彼此连接形成热传导途径,石墨烯与聚合物之间的界面热阻成为影响复合材料热导率的主要因素,对石墨烯进行表面改性是提高复合材料热导率,降低界面热阻的有效方法,石墨烯作为高导热通道,表面改性构建石墨烯与基体之间的共价键和非共价键,这将促进声子在石墨烯和聚合物基体之间的传播。当石墨烯含量高于逾渗阈值时,由于石墨烯的高导热性,复合材料中的热量主要通过热传导途径传播。

(2) 碳纳米管。

碳纳米管(CNT)具有良好的导热性能,由于其具有高长径比,垂直方向的传热性能较差,沿长度方向传热性能良好,通过合适取向可以制备各向异性的导热材料,在基体中加入少量的 CNT 就可能显著改善复合材料的导热性能。L. K. Olifirov 等^[25]通过高能球磨法制备了不同粒径和形貌的 Al-CNT 粉末,填料质量分数为 80% (体积分数为 60%) 的 EP 复合材料热导率为 $23 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,大大增强了材料的导热性。Zhao Bo 等^[26]在 CNT 上包覆纳米金刚石(ND)颗粒,将 ND 包覆的 CNT 分散到 EP 中制造导热树脂,填充 CNT-ND 的 EP 的导热性明显改善,热导率提高了大约 200%。祁蓉等^[27]对多壁碳纳米管(MWCNT)进行酸化处

理并利用纳米氧化锌改性 MWCNT 制备 EP 复合材料,当填料质量分数为 2% 时,羧酸化复合材料的热导率为 $0.604 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,EP/氧化锌-MWCNT 复合材料的热导率达到 $0.636 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$,相比 EP 分别提高了 168% 和 177%。表面改性会造成 CNT 结构的破坏,不利于复合材料性能提高,在 CNT 与基体之间构建化学键以期提高复合材料的热导率的方法不利于声子传导,不能有效地改善材料的导热性。

3 结语及展望

随着电子器件的尺寸越来越小,精度越来越高,电子器件的散热越来越重要,提高 EP 的热导率对提高电子器件的精度,延长使用寿命,提高电子元件运算精度具有重要意义。合成新型 EP 使其具有高热导率、对填料复配、使用具有高长径比的填料或者开发新型导热填料、对填料表面进行改性以提高填料与基体相容性可以有效改善复合材料的导热性能,目前仍存在许多问题需要解决,如需要新的理论模型来预测复合材料的热导率,所制备的复合材料热导率相对较低不能满足应用等,开发低填充、高导热、经济的 EP 基复合材料具有重要的应用价值。

参考文献

- [1] 郝志勇,等. 热固性树脂,2008(1):45-48.
Hao Zhiyong, et al. Thermosetting Resin, 2008(1):45-48.
- [2] 石志想,等. 复合材料学报,2011(6):8-13.
Shi Zhixiang, et al. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011(6):8-13.
- [3] 祝渊,等. 无机材料学报,2007,22(6):1201-1205.
Zhu Yuan, et al. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22(6):1201-1205.
- [4] Li A, et al. Polymers, 2017, 9:437-453.
- [5] Li Jing, et al. Coatings, 2017, 7(7):94-104.
- [6] 李宾,等. 化工学报,2009(10):2650-2655.
Li Bin, et al. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2009(10):2650-2655.
- [7] Xu X, et al. Advanced Materials, 2018, 30(17):1705544-1705553.
- [8] 李珺鹏,等. 材料导报,2012(3):69-72.
Li Junpeng, et al. Materials Review, 2012(3):69-72.
- [9] 石彤非,等. 高分子材料科学与工程,1994(3):8-13.
Shi Tongfei, et al. Polymeric Materials Science and Engineering, 1994(3):8-13.
- [10] 王璞玉,等. 材料导报,2010(9):108-112.
Wang Puyu, et al. Materials Review, 2010(9):108-112.
- [11] Zhai S, et al. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 117:358-374.
- [12] 闫刚,等. 玻璃钢/复合材料,2006(3):50-52.
Yan Gang, et al. Fiber Reinforced Plastics / Composites,

- 2006(3):50–52.
- [13] Lee E S, et al. Journal of the American Ceramic Society, 2008, 91(4):1 169–1 174.
- [14] 赵广辉,等. 工程应用塑料, 2009, 37(7):15–18.
- Zhao Guanghui, et al. Engineering Plastics Application, 2009, 37(7):15–18.
- [15] Yu C, et al. Composites:Part A, 2017(98):25–31.
- [16] Hu Jiantao, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(15):13 544–13 553.
- [17] He Yongming, et al. Physica Status Solidi (a), 2014, 211(3):677–684.
- [18] Yung K C, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2010(1):528–534.
- [19] Zhi C Y, et al. Pure and Applied Chemistry, 2010, 82(11):2 175–2 183.
- [20] Fu Yuanxiang, et al. International Journal of Thermal Sciences, 2014(86):276–283.
- [21] Sun Xiaobo, et al. Journal of Electronic Packaging, 2011(2):161–190.
- [22] Messina E, et al. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 35(8):23 244–23 259.
- [23] Raza M A, et al. Journal of Materials Science, 2012, 47(2):1 059–1 070.
- [24] Singh A K, et al. Polymers for Advanced Technologies, 2017, 28(12):1 523–1 960.
- [25] Olifirov L K, et al. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2017, 101:344–352.
- [26] Zhao Bo, et al. Electronic Materials Letters, 2017, 13(6):512–517.
- [27] 祁蓉,等. 材料导报, 2016(S1):82–86.
- Qi Rong, et al. Materials Review, 2016(S1):82–86.

普立万 TPE 材料能降低 80%的电器振动

普立万宣布,主要的家电制造商正在选择其专业减振 Versaflex™ VDT 热塑性弹性体材料 (TPE),作为顶部加载洗衣机振动问题的有价值解决方案。

普立万特种工程材料全球营销总监 Michelle Hearn 表示:“最近,我们运用材料和设计专业知识,帮助一家大型家电制造商在他们最新的顶部加载洗衣机模型上降低振动。在该客户设计团队完成的一项实验中证明,改用 VERSAFLEX VDT™,比使用 TPV 材料减少了 80% 的设备振动。”

顶部加载洗衣机中的振动问题可能导致设备部件“走动”,这就会给制造商带来不少麻烦。工程师们依靠普立万的抗振材料来缓解这一问题。尽管 TPV 和 EPDM 历来用于此应用,但它们在减少设备“走动”方面效果较差,并且需要更长的生产周期时间。当使用 VERSAFLEX VDT™时,洗衣机运动产生的动能会激活材料中的分子,然后将动能转化为热能,减少振动和“走动”。

此外,这种材料可承受日常使用期间的磨损,易于包覆成型到聚丙烯上,且无需二次加工(如干燥),能够缩短周期时间。

(环聚网)

(上接第 138 页)

- Wang Yingcan, Shen Lixiao. Research progress in the relationship between bisphenol A exposure and childhood obesity [J]. Chinese Journal of Child Health Care, 2015, 23(6):601–603.
- [14] 廖云燕,高志英,刘忠瑞,等. 双酚 A 对记忆功能的影响及其机制研究进展 [J]. 现代预防医学, 2017, 16:44.
- Liao Yunyan, Gao Zhiying, Liu Zhongrui, et al. Research progress in the effect of bisphenol A on memory function and its mechanism[J]. Modern Preventive Medicine, 2017, 16:44.
- [15] 纪红蕊,陈家驹,张茜,等. 双酚 A 的毒性作用机制 [J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(6):710–715.
- Ji Hongrui, Chen Jiaju, Zhang Qian, et al. Toxic mechanism of bisphenol A[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(6):710–715.
- [16] 王璐,关国平,王富军,等. 生物医用纺织材料及其器件研究进展 [J]. 纺织学报, 2016, 37(2):133–140.
- Wang Lu, Guan Guoping, Wang Fujun, et al. Advances in biomedical textile materials and devices[J]. Journal of Textile Research, 2016, 37(2):133–140.
- [17] 寇小琴,柯军. 医疗器械中双酚 A 的应用及安全评价 [J]. 中国医疗器械杂志, 2016, 40(6):438–440.
- Kou Xiaoqin, Ke Jun. Application and safety evaluation of bisphenol A in medical devices[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2016, 40(6):438–440.
- [18] Lu B, Li M Q, Cheng S L. Clinical effectiveness of continuous blood purification in combination with ulinastatin in treating thermoplegia[J]. Eur Rev Med Pharmacol Sci, 2014, 18(22): 3 464–3 467.