

# 导热橡胶复合材料研究进展

王子君<sup>1</sup>, 周文英<sup>1\*</sup>, 睢雪珍<sup>1</sup>, 董丽娜<sup>1</sup>, 张溟涛<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学 化学与化工学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安百衡伯仲复合材料有限公司, 陕西 西安 710082)

**摘要:**介绍填充型导热橡胶复合材料的研究进展及其发展方向。填充型导热橡胶复合材料以其高热导率、低压易变形、密封性好等优点被广泛应用于热界面导热材料。制备导热橡胶的常用填料主要有金属、碳、氮化物、氧化物、碳化物等, 填料类型、尺寸、表面改性及材料加工方法等因素对导热橡胶热导率产生影响, 提高导热橡胶热导率可从这些因素入手进行调控。未来一定时期内, 对导热橡胶的研究将围绕导热填料表面处理新方法、导热填料与橡胶基体界面优化、混杂复配技术、新型加工技术、导热填料在基体中的结构演化及其对导热通路的调控等方面进行。

**关键词:**导热橡胶; 导热填料; 表面改性; 界面热阻

**中图分类号:** TQ336.4<sup>+</sup>2; TQ330.38<sup>+</sup>3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-890X(2015)08-0505-06

随着微电子技术的发展, 电子元件、逻辑电路体积急剧减小, 电子元器件趋于密集化、小型化、高度集成化, 由此带来的散热问题严重影响着器件精度和工作寿命, 成为元器件体积持续缩小的技术瓶颈, 制约着集成技术的发展。作为热界面材料(Thermal Interfacial Material, TIM)使用的导热橡胶具有热导率较高、电绝缘、低压易变形、密封性好等特点, 替代普通橡胶或其他聚合物用于发热元器件散热时能有效去除元器件与热沉之间的冷热界面间的残留空气[空气热导率约 $0.024 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ], 从而改善界面散热效果, 将散热器功效提高 40% 以上。目前, 导热橡胶主要用作发热电子元器件(如 CPU)的 TIM<sup>[1]</sup>, 广泛应用于汽车及家用电器、计算机、电源、LED 照明、航空航天等行业, 不但为功率元器件提供安全可靠的散热途径, 还起到绝缘减震等作用。本文综述当前国内外导热橡胶复合材料的最新研究进展。

## 1 填充型导热橡胶研究

本征型导热橡胶因制备工艺极其复杂、成本

**基金项目:** 陕西省教育厅自然科学专项基金资助项目(14JK1485); 教育部重点科技项目(212175); 国家自然科学基金资助项目(51073180)

**作者简介:** 王子君(1992—), 女, 黑龙江青冈人, 西安科技大学在读硕士研究生, 主要从事聚合物基电子功能材料研究。

\* 通信联系人

高而难以应用, 故目前导热橡胶主要以填充型为主。分散在橡胶中的导热填料在其用量达到一定值后, 导热粒子开始在橡胶基体中形成利于声子传递的导热网络或路径, 此时体系热导率明显升高。制备导热橡胶的常用填料主要有金属、碳(碳纳米管、石墨烯、石墨、碳纤维、炭黑)、氮化物类(氮化铝、氮化硼、氮化硅)、氧化物类(三氧化二铝、氧化铝、二氧化硅等)、碳化物(碳化硅、碳化硼等)等。

### 1.1 金属粒子填充导热橡胶

金属主要靠自由电子传热, 是热的良导体。常用作导热粒子的金属有银、铜、铝、镍等。使用金属粒子可以提高橡胶导热性能, 但会降低电绝缘性, 主要用于非绝缘场合。利用金属自身物理特性, 采用特殊加工工艺可制备出高导热金属填充复合橡胶。镍粉具有铁磁性, 热导率较铜、铝等金属低, 但利用外磁场使其发生取向, 可获得沿特定方向的高热导率镍/硅橡胶, 体积分数为 0.30 的镍/硅橡胶沿热流方向的热导率可达  $1.9 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ <sup>[2]</sup>。银、铜、铝是高热导率金属, 但表面未改性金属与橡胶基体相容性差、结合能力弱, 易使复合材料发生微观相分离, 降低热导率。因此, 对金属表面进行改性可提高两相的界面相容性, 强化界面声子传热效应, 获得高导热橡胶材料。在天然橡胶(NR)中加入铝粉可大幅提高其热导率, 经偶联剂 Si69 表面湿法改性的铝粉/NR

复合材料具有较强的界面相容性,热导率从未改性时的  $0.25 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  提高到  $0.47 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ <sup>[3]</sup>。用经抗氧化、抗团簇处理过的铜粉填充硅橡胶,可制备热导率达  $1.6 \sim 1.7 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 、拉伸强度达  $3 \sim 4 \text{ MPa}$  的片状热接口材料,能很好地满足计算机和电源等电子产品的散热需求<sup>[1]</sup>。

## 1.2 碳材料填充导热橡胶

碳纳米管是一种具有特殊结构的一维量子材料,与其他导热粒子相比,高长径比结构的碳纳米管易在基体中相互接触,形成导热通路,较低含量下可提高聚合物热导率。但碳纳米管和聚合物基体界面处接触热阻很大,界面声子散射效应使声子传递严重受阻,体系热导率提高有限,无法发挥碳纳米管超高热导率优势。当前,制备多层次、多尺度导热纳米粒子作为新型填料是制备新型高导热聚合物的新途径,该途径能够结合两者优势,克服单一纳米粒子的缺陷。碳纳米管在聚合物基体中很难分散,改善其分散有利于形成导热网络结构。采用化学气相沉积法在微米三氧化二铝粒子表面上生长碳纳米管,将众多碳纳米管纤维一端锚在三氧化二铝表面,另一端朝外发散,这种多尺度复合结构充分改善了碳纳米管的分散性,与单独使用碳纳米管相比,该多尺度复合结构在用量很低的情况下便可显著提高橡胶热导率<sup>[4]</sup>。

石墨烯纳米片是近年来研究热点,其面内具有极高热导率,其二维片状结构为聚合物提供了有效的巨大面积导热通道,将石墨烯纳米片均匀分散到聚合物中是发挥其卓越导热性能的关键。石墨烯纳米片均匀分散程度取决于表面化学修饰效果及与基体间的相互作用力,石墨烯纳米片表面功能化改性可降低界面热阻。将超声剥离制备的  $2 \sim 4 \text{ nm}$  石墨烯纳米片,通过溶液混合法填充丁苯橡胶(SBR),石墨烯纳米片体积分数为  $0.24$  的复合材料热导率从 SBR 基体的  $0.17 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  提高到  $0.48 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,且其抗拉强度、杨氏模量、拉断伸长率分别增大  $413\%$ 、 $782\%$  和  $24\%$ ,在低应变下呈现出更好的刚度<sup>[5]</sup>。

碳纤维具有优良的导热性能,常用来改善聚合物热导率及力学强度和韧性。碳纤维表面羟

基、羰基等极性基团较少,惰性大,与橡胶基体的粘合性较差,直接影响复合材料的物理性能。因此,改善碳纤维表面性能显得尤为关键。经高温和硅烷偶联剂 KH-570 共同改性后的碳纤维表面粗糙度增大,有利于碳纤维与顺丁橡胶(BR)基体间产生物理嵌合,强化相界面作用力,改善 BR 物理性能,热阻降低约  $36\%$ ;此外,使用碳纤维后 BR 的硫化速率、热导率及物理性能均明显提高<sup>[6]</sup>。

炭黑大量应用于橡胶工业,是橡胶常用补强剂。炭黑聚集体在胶料中互相接触形成网络状通道而导热和导电。对炭黑 N134, N234, N330, N375, N539 和 N660 等 6 种不同粒径和结构的炭黑/橡胶复合材料的导热性能研究发现,热导率随炭黑用量的增大而增大,相同用量下炭黑平均粒径越小对导热性能影响越大;炭黑结构性越高,材料导热性能越好<sup>[7]</sup>。炭黑在基体中的分布对其物理性能有重要影响,常选择添加无机粒子如三氧化二铝辅助分散以减小炭黑粒子间作用力,改善其分散效果。特殊结构的空心炭黑因其高比表面积而具有较高热导率,35 份空心炭黑/SBR 复合材料的热导率达  $0.36 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,而相同用量的炭黑 N330/SBR 复合材料的热导率仅为  $0.28 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;中空结构空心炭黑/SBR 复合材料的密度比炭黑 N330/SBR 复合材料小,具有更低体积电阻率和更高电导率。低用量下,空心炭黑用量的增大对体系热导率的提高作用明显,15 份时空心炭黑内部发生电逾渗转变,但热导率随填料用量增大而线性增大<sup>[8]</sup>。

## 1.3 氮化物填充导热橡胶

氮化铝具有高热导率[约  $320 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ]、低热膨胀系数和卓越的电绝缘性,但易吸水发生水解,产生的低热导率氢氧化铝阻断导热通路。常用多种偶联剂或表面活性剂共同对氮化铝表面改性,提高其抗水解性及在基体中的分散性。用补强型酚醛树脂对氮化铝表面改性,经酚醛树脂包覆后,氮化铝表面自由能下降,表面包覆的有机基团抑制了氮化铝水解并减弱了其在橡胶基体中的团聚,提高了氮化铝在基体中的分散性及复合材料的热导率。当酚醛树脂/氮化铝质量比为  $1/4$  时,改性后氮化铝/三元乙丙橡胶复合材料的热

导率由未改性时的  $0.375 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  提高到  $0.54 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  [9]。

氮化硼具有高电击穿及绝缘电阻、高热导率、低吸湿率、耐高温氧化的优点,与聚合物的介电常数及介电损耗最为接近,是制备低介电常数、低介电损耗和高导热橡胶的理想填料。氮化硼/聚二甲基硅氧烷可用作嵌入式 LED 柔性高热导界面散热材料,氮化硼粒径对聚二甲基硅氧烷导热性能有较明显影响,体积分数为 0.15 的  $45 \mu\text{m}$  氮化硼/聚二甲基硅氧烷复合材料的热导率最高值达  $0.518 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  [10]。粒子粒径过小,与基体界面的热阻大,不利于提高体系热导率。因此,较大粒径导热粒子有利于在基体中构建稠密而稳定的导热网络,提高材料热导率。

氮化硅具有优异的高温抗氧化、抗热冲击、耐腐蚀、抗水解等性能,是重要的导热绝缘无机粒子。六方晶系氮化硅具有  $\alpha$  和  $\beta$  两种晶型,热导率为  $86 \sim 120 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。 $\beta$ -氮化硅中不存在晶格应力,自由能较低,填充后易形成导热通路,故实际生产应用中以  $\beta$ -氮化硅为主。氮化硅价格昂贵,常与其他廉价导热粒子混合使用。对微米氮化硅和纳米三氧化二铝混合填充硅橡胶导热及物理性能研究发现,总填充体积分数为 0.30、氮化硅与三氧化二铝用量比为 26/4 时,材料热导率达  $1.6 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,介电常数 5.3,电击穿高达  $85 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ ,且具有较强疏水性 [11]。将不同粒径氮化硅粒子复合使用,在基体内利用大小粒子间的协同效应构建更多利于声子传递的导热通路,强化热流在橡胶中传递,在高填充量下体系仍保持高电绝缘性和低介电常数。

#### 1.4 氧化物填充导热橡胶

三氧化二铝/硅橡胶是常用的低价位导热 TIM,填料形状对基体热导率有影响。对球形和不规则状  $\alpha$ -三氧化二铝、 $\gamma$ -三氧化二铝/硅橡胶复合材料的热导率研究发现,热导率随着三氧化二铝用量的增大而提高,低用量下多孔无规  $\alpha$ -三氧化二铝较  $\gamma$ -三氧化二铝和球状  $\alpha$ -三氧化二铝热导率高。通过高温烧结  $\gamma$ -三氧化二铝转化而来的  $\alpha$ -三氧化二铝具有稳定晶型,晶格中氧离子六方紧密堆积,提高了晶体的致密度和孔隙率,具有更高热导率。随着三氧化二铝用量的增大,无规

$\alpha$ -三氧化二铝/硅橡胶复合材料的流动性急剧下降,故球形  $\alpha$ -三氧化二铝/硅橡胶复合材料可实现高用量填充,减小相邻粒子间接触热阻,提高橡胶的热导率。质量分数为 0.82 的球形  $\alpha$ -三氧化二铝/硅橡胶复合材料的热导率达  $1.41 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,是基体的 6 倍 [12]。

氧化锌是一种半导体材料,粒径均匀性很好。相比微米级氧化锌,较低用量下纳米氧化锌能赋予硅橡胶更高的导热性能。用硅烷偶联剂对直接沉淀法合成的纳米氧化锌进行表面接枝,改性前后纳米氧化锌的晶型不发生变化,在低填充量下改性后纳米氧化锌对液体硅橡胶起到一定补强作用。质量分数为 0.02 时硅烷改性纳米氧化锌填充液体硅橡胶的热导率从  $0.189 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  提高到  $0.61 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  [13]。

二氧化硅热导率低,约  $4 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,电绝缘性能优异,是最常用的廉价封装填料。二氧化硅有球形和片状,球形二氧化硅可有效降低体系粘度,实现高用量填充;片状二氧化硅对树脂有增稠、触变和增加流动性的作用,有效防止粒子结块、团聚及重质粒子下沉换热分离作用,可与其他导热粒子配合使用。微米硅微粉热导率变化与其结构密切相关,结晶型二氧化硅热导率较高。在乙烯-乙酸乙酯共聚物(EVA)中掺混结晶二氧化硅制备导热弹性体,相比单一 EVA 薄膜,掺混 200 份结晶二氧化硅的导热弹性体热导率最大达  $1.15 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;二氧化硅/EVA 复合材料的热导率随二氧化硅粒径的增大而增大,粒径  $25 \mu\text{m}$  时达到最大值,80 份  $25 \mu\text{m}$  二氧化硅填充 EVA 的热导率达到  $0.67 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,综合性能最优 [14]。

#### 1.5 碳化物填充导热橡胶

用作导热填料的碳化物主要有碳化硼、碳化硅等。碳原子与硼、硅等原子以共价键结合,属原子晶体,化学性质稳定,硬度高,具有良好的导热性能。碳化硼/NR 复合材料的热导率随着填料用量的增大而提高,填充 50 份碳化硼的体系热导率达  $4.6 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 。在 NR 中引入碳化硼后明显提高了体系热扩散系数和热导率,碳化硼/NR 复合材料经过一段时间老化后,基体内团聚的无机导热粒子通过调整彼此位置,重新达到一

种平衡,减少了界面间声子散射,体系获得更高的热导率<sup>[15]</sup>。碳化硅不仅可提高聚合物的物理及导热性能,还能显著降低聚合物的摩擦因数及磨损率。随着碳化硅粒径减小,粒子间距减小,与基体塑性变形减小,碳化硅/氟醚橡胶复合材料的拉伸模量增大,拉伸强度提高;随着碳化硅粒径增大,粒子与基体间接触点数目、面积减小,声子散射和界面热阻降低,碳化硅/氟醚橡胶复合材料的热导率升高,体积分数为0.15的20 nm碳化硅填充橡胶的综合力学性能较优异<sup>[16]</sup>。

## 2 提高复合橡胶导热性能的途径

填料在基体中形成有效导热通路是提高材料热导率的有效途径,填料粒子用量、粒径、表面改性、相互堆积方式及空间排布均影响导热通路的形成。

### 2.1 导热填料

导热填料种类、粒径及分布、形状(粒状、纤维状、片状等)、表面改性及混杂填充均影响到橡胶体系的热导性能。

#### 2.1.1 粒径及分布

粉体粒径影响材料热导率,当填料的尺寸减小到纳米水平时,其本身的导热性也因粒子内原子间距和结构的变化而发生质的变化。普通微米氮化铝的热导率约为 $36 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,而纳米氮化铝的热导率可达 $320 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ <sup>[17]</sup>。热导率与粒子粒径、界面热阻及导热路径有关,界面热阻与其粒径有关,粒径愈小,与基体界面间热阻愈大。因此需要综合考虑填料自身热导率、粒径与界面热阻等因素,选用合适粒径的导热粒子,以易于在基体内形成导热网络,降低界面热阻。较大粒径( $35 \mu\text{m}$ )的氮化硅比小粒径( $5 \mu\text{m}$ )的氮化硅更能提高硅橡胶的热导率,这是由于大粒径填料相互接触几率增大,降低了声子散射和界面热阻,更易形成导热通路<sup>[18]</sup>。

#### 2.1.2 混杂填充

混杂导热粒子填充时,在基体内形成不同堆砌度的导热粒子分布及立体结构,在最佳混杂粒径比时,基体内可形成最大粒子堆砌度,充分发挥导热粒子间的协同导热通路效应,从而有效改善基体的导热性能。溶液共混法制备不同粒径(10,

40和 $70 \mu\text{m}$ )三氧化二铝混杂填充硅胶复合材料,在单组分体系中,40  $\mu\text{m}$ 三氧化二铝填充体系热导率最高达 $1.71 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ;在二元体系中,70  $\mu\text{m}$ 三氧化二铝/10  $\mu\text{m}$ 三氧化二铝/硅橡胶体系热导率最高达 $2.7 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,制品邵尔A型硬度均为20~35度,具有良好的热稳定性以及电绝缘性<sup>[19]</sup>。炭黑N330、二氧化硅T80、铝粉和磁性氧化铁纳米粉混杂填充可赋予橡胶良好的导热特性及物理性能<sup>[20]</sup>。

### 2.1.3 表面改性处理

复合材料相界面对材料性能特征尤为重要,填料表面湿润程度影响其分散状态、与基体的粘附程度、界面热阻大小。无机填料粒子和有机树脂基体界面因极性差异导致两者相容性差,无机粒子表面张力高,难被树脂润湿,在树脂基体中易团聚、难以有效分散,导致界面处存在的空隙及缺陷,增大了界面热阻。

常采用各类偶联剂对粒子表面进行处理,改善其在基体中的分散状态,减少界面缺陷,增强界面粘附强度,抑制声子在界面的散射,提高体系热导率。硅烷偶联剂改性三氧化二铝填充硅橡胶的热导率由 $1.23 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 增至 $1.36 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ,拉伸强度和撕裂强度均有所提高<sup>[21]</sup>。利用甲基丙烯酸锌对石墨烯表面改性,避免了其他改性方法中碳原子平面由 $sp^2$ 杂化扭曲为 $sp^3$ 杂化,确保了石墨烯基面结构。氯化锌在石墨烯片层与甲基丙烯酸离子交换,原位聚合生成甲基丙烯酸锌,有助于改善石墨烯在橡胶基体中的分散性,降低石墨烯与NR的界面热阻,利于声子传递,40份甲基丙烯酸锌改性石墨烯/NR复合材料的热导率相比NR提高了3倍<sup>[22]</sup>。

研究偶联剂用量对120份三氧化二铝填充甲基乙烯基硅橡胶热导率的影响发现,硅烷偶联剂质量分数为0.01时体系热导率较高,钛酸酯质量分数为0.015时体系热导率最高<sup>[1]</sup>。适量偶联剂可以有效提高硅橡胶的热导率,当偶联剂用量过小时,导热填料粒子表面不能被完全包覆,与基体间不能紧密结合,界面热阻升高;当偶联剂用量过大时,过剩的低热导率偶联剂分散在两相界面间,对界面间热流产生声子散射,降低声子平均自由程,增加界面间热阻。

## 2.2 成型工艺

导热通路是在材料成型加工过程中形成的,为使导热填料在聚合物基体中形成有效导热链,获得高导热材料,不仅要考虑复合材料整体设计角度,还要充分考虑其具体的加工工艺过程。

### 2.2.1 改变导热粒子分布状态

填料在基体中的分布状态及导热链的形成对体系热导率有重要影响,控制填料在基体中的局部有序结构可以提高导热性能。在加工过程中,通过控制工艺,使填料通过一定取向可获得各向异性的导热材料。将精细处理过的氮化铝粒子均匀排布在有机硅树脂片两侧,可获得热导率达  $20 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 、具有优良的电绝缘性和可挠性的高导热性能的片材。经过一定制备工艺使碳纳米管在基体中定向排列形成纳米纤维阵列,沿碳纳米管排列方向材料热导率显著提高,再用溶液共混技术制备定向碳纳米管填充 NR,体积分数为 0.01 的多壁碳纳米管定向排列时,复合材料的热导率相比 NR 从  $0.179 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  跃增至  $0.753 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  [23]。

### 2.2.2 电场、磁场辅助加工技术

对导热粒子/聚合物混合液施加不同频率和强度的电场,利用介电效应改变粒子在聚合物中的排列和分布,成型完毕,将这种结构固定下来,可得到某方向高热导率的复合材料。将经超声分散、高速搅拌均匀的金刚石/聚硅氧烷混合液置于不同直流、交流电场下,可发现在外电场下实现了金刚石粒子的线性排列自组装,沿着膜厚度方向形成了自组装粒子的取向结构并构成导热通道,该方向的热导率及电绝缘性显著增加 [24]。

同电场一样,磁场也常用于辅助调控无机粒子在基体中的取向,强化该方向热导率及其他性能。氮化硼粒子无磁性,在其表面沉积氧化铁磁性纳米粒子薄层增强其磁性,利用复合粒子在外加磁场下的取向,可制备定向分布的氮化硼复合材料。采用化学气相沉积法在氮化硼粒子表面沉积氧化铁纳米粒子,将复合粒子分散于聚硅氧烷中,施加外磁场,诱导氮化硼取向,发现聚合物平行于磁场方向的热导率显著高于其他方向,体积分数为 0.30 的氮化硼填充体系热导率高达  $25 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$  [25]。

## 3 结语

导热橡胶复合材料目前已经取得一系列重要研究进展,在电子设备上获得广泛应用,但仍有许多基础问题有待解决,诸如导热粒子在橡胶基体中分散的改善及通过加工方式对导热通路的调控、对导热粒子与橡胶基体界面热阻的研究及降低界面热阻的途径、原位法制备高导热纳米粒子/橡胶的方法等。

在未来一定时期内,对导热橡胶复合材料的研究将围绕导热填料表面处理新方法、导热填料与橡胶基体界面优化、混杂复配技术、新型加工技术、导热填料在基体中的结构演化及其对导热通路的调控等方面进行。

## 参考文献:

- [1] 周文英,丁小卫. 导热高分子材料[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
- [2] Boudenne A, Mamunya Y, Levchenko V, et al. Improvement of Thermal and Electrical Properties of Silicone-Ni Composites Using Magnetic Field[J]. European Polymer Journal, 2015, 63: 11-19.
- [3] Niu H J, Zhang Z Y, Guo W, et al. Mechanical, Morphological and Thermally Behaviors of Natural Rubber/Aluminum Powder Composites[J]. Key Engineering Materials, 2012, 501: 289-293.
- [4] Bozlar M, He D L, Bai J B, et al. Carbon Nanotube Microarchitectures for Enhanced Thermal Conduction at Ultralow Mass Fraction in Polymer Composites[J]. Advanced Materials, 2010, 22(14): 1654-1658.
- [5] Araby S, Meng Q S, Zhang L Q, et al. Electrically and Thermally Conductive Elastomer/Grapheme Nanocomposites by Solution Mixing[J]. Polymer, 2014, 55(1): 201-210.
- [6] 陶慧,陈双骏,张军. 碳纤维的表面改性对导热顺丁橡胶性能的影响[J]. 弹性体, 2012, 22(3): 37-42.
- [7] 何燕,马连湘,黄素逸. 炭黑/橡胶体系的热导模型及应用研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(4): 671-674.
- [8] Ye X, Yao P, Xi M M, et al. Structure and Properties of Hollow Carbon Black and Filled Rubber Nanocomposites[J]. Plastics Rubber and Composites, 2013, 42(2): 50-58.
- [9] 张娜,杨刚,马连湘,等. 改性氮化铝/三元乙丙橡胶复合材料导热性能和力学性能的研究[J]. 青岛科技大学学报(自然版), 2014(2): 1672-6987.
- [10] Yu J H, Cennini G. Improving Thermal Conductivity of Polymer Composites in Embedded LEDs Systems[J]. Microelectronics Journal, 2014, 45(12): 1829-1833.
- [11] Zha J W, Dang Z M, Li W K, et al. Effect of Micro-  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -

- nano-  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Co-filled Particles on Thermal Conductivity, Dielectric and Mechanical Properties of Silicone Rubber Composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4):1989-1996.
- [12] Cheng G P, Liu T, Zhang J, et al. Influence of Phase and Morphology on Thermal Conductivity of Alumina Particle/Silicone Rubber Composites[J]. Applied Physics. A: Materials Science and Processing, 2015, 117(4):1985-1992.
- [13] 王亦农. 纳米氧化锌对液体硅橡胶导热性能的研究[J]. 化工新型材料, 2012, 40(1):117-121.
- [14] Shen M X, Han Y Q, Duan P P. Effect of Crystal Silica on Thermal Conductivity of Elastic Encapsulant[J]. Journal of Elastomers and Plastics, 2014, 46:401-412.
- [15] Gwaily S E, Badawy M M, Hassan H H, et al. Natural Rubber Composites as Thermal Neutron Radiation Shields. I.  $\text{B}_4\text{C}/\text{NR}$  Composites[J]. Polymer Testing, 2002, 21(2):129-133.
- [16] 蒋洪翌, 王力, 栗付平, 等. 不同粒径  $\text{SiC}$  对氟醚橡胶性能的影响[J]. 航空材料学报, 2008, 28(5):89-93.
- [17] 刘彦波, 苏朋超, 王志谦, 等. 填充型导热高分子研究进展[J]. 河南化工, 2014(3):21-24.
- [18] Zhou W Y, Wang C F, Ai T, et al. A Novel Fiber-Reinforced Polyethylene Composite with Added Silicon Nitride Particles for Enhanced Thermal Conductivity[J]. Composites. Part A, 2009, 40(6-7):830-836.
- [19] 刘城中. 导热型绝缘硅橡胶垫片的制备与性能研究[J]. 化学工程与装备, 2014(6):25-28.
- [20] Xu S M, Ma R B, Du J H, et al. Orthogonal Experiment Analysis of Mechanical Thermal Conductivity on Multi-Component Fillers[J]. Advanced Materials Research, 2013, 753:2379-2382.
- [21] 赵红振, 齐暑华, 周文英, 等. 氧化铝粒子对导热硅橡胶性能的影响[J]. 特种橡胶制品, 2007, 28(5):19-22.
- [22] Lin Y, Liu K H, Chen Y Z, et al. Influence of Graphene Functionalized with Zinc Dimethacrylate on the Mechanical and Thermal Properties of Natural Rubber Nanocomposites [J]. Polymer Composites, 04/2014, DOI: 10. 1002/pc. 23021.
- [23] 马湘连, 冯娟娟, 高佼, 等. 定向碳纳米管/天然橡胶复合材料导热性能研究[J]. 工程物理学报, 2014(9):1798-1801.
- [24] Cho H B, Konno A, Fujihara T, et al. Self-assemblies of Linearly Aligned Diamond Fillers in Polysiloxane/Diamond Composite Films with Enhanced Thermal Conductivity[J]. Composites Science and Technology, 2011, 72(1):112-118.
- [25] Cho H B, Tokoi Y, Tanaka S, et al. Modification of BN Nanosheets and Their Thermal Conducting Properties in Nanocomposite Film with Polysiloxane According to the Orientation of BN[J]. Composites Science and Technology, 2011, 71(8):1046-1052.

收稿日期:2015-05-09

## 固特异投资 5.5 亿美元

### 在墨西哥建轮胎厂

中图分类号:F27 文献标志码:D

美国《现代轮胎经销商》(www. moderntire-dealer.com)2015年4月24日报道:

固特异董事长兼首席执行官 Richard Kramer宣布新轿车轮胎厂将建在墨西哥,轮胎年产量为600万条,雇员1000名。

这家以服务美洲客户需求为宗旨的轮胎厂位于墨西哥圣路易斯波托西。新工厂的投资额高达5.5亿美元,加之固特异现有的位于美国和加拿大的工厂,将满足北美洲和拉丁美洲强大和不断增长的对高附加值消费轮胎的市场需求。预计2014~2019年,该地区对高附加值轮胎的需求将会以每年1000万条的速度递增。

“这是固特异未来的一项重要投资。”Kramer说,“我们的新工厂将为我们提供一个世界级的制

造基地,对在北美和拉丁美洲的现有工厂是一个强有力的补充。新工厂符合我们以服务客户需求为宗旨的战略,并与我们推动盈利增长的高回报项目的投资一致。”

该工厂将于2017年年中投产,拥有固特异最先进的技术和约600万条轮胎的年产能。满负荷生产时,工厂将雇用大约1000名员工。

固特异在工厂选址时对圣路易斯波托西以及美洲很多潜在的地点进行了广泛的考察。包括成本结构、物流、基础设施、技术熟练的劳动力、关税和生活质量问题。“圣路易斯波托西是新工厂的理想位置,将使我们能够服务于我们遍布北美、墨西哥和拉丁美洲的重要客户和消费者。”Kramer说。

该工厂将实现固特异的环保承诺:零废物填埋和零溶剂工厂,并且使用天然气、高效节能发光二极管(LED)照明和最先进的除尘设备。

(孙斯文摘译 吴秀兰校)