

综述·专论

# 导热凝胶的研究进展

缪小冬<sup>1</sup>,王大林<sup>1</sup>,邱晓锋<sup>1</sup>,张利华<sup>2</sup>

(1.北京航天自动控制研究所,北京 100854;2.北京航天光华电子技术有限公司,北京 100854)

**摘要:**概述导热凝胶的组成和导热机理,介绍硅系导热凝胶基体和非硅系导热凝胶基体以及陶瓷材料、碳基材料和复合填料作为导热填料的研究进展。导热凝胶具有热导率大,耐高低温性能和绝缘性能好,塑性、粘性和附着性强,且可重复使用等优点。导热凝胶综合性能提高的关键在于合理设计基体和填料的性质,基体的设计可以从聚合物的类型和相对分子质量及其分布、交联剂、扩链剂等方面进行,并从改变分子链的结构和排列等方面改性聚合物;填料的设计可以从提高导热性能方面进行,如对传统导热填料进行表面功能化以及设计复合填料。

**关键词:**导热凝胶;凝胶基体;导热填料;热导率

**中图分类号:** TQ317.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-890X(2023)12-0994-06

**DOI:** 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.12.0994



OSID开放科学标识码  
(扫码与作者交流)

随着5G时代的到来,电子设备正朝着小型化、集成化、高能量密度的方向发展<sup>[1]</sup>。电子设备在运行时会产生大量热量,从而影响其稳定性、可靠性和使用寿命<sup>[2]</sup>。温度过高导致的电子设备系统热故障约占所有故障的55%<sup>[3]</sup>,因此业界普遍认为,未来电子产品发展的关键在于能否制备出有效的散热材料。一般来说,散热过程主要包括4个阶段:(a)装置本身内部的传热;(b)元器件与散热器之间的传热;(c)通过散热器的传热;(d)从散热器到周围环境的传热<sup>[4-5]</sup>。而元器件与散热器之间的传热通常被认为是重要的阶段。

元器件与散热器贴合时只在接触表面凸起的顶部接触<sup>[6]</sup>,接触表面上凸起形成的微小空气间隙(如图1所示)可能导致导热性能变差<sup>[7]</sup>。采用高导热系数的热界面材料(TIM)填充空隙(如图2所示),可以大幅增强界面之间的热传导。导热凝胶是一种半固体的TIM,它既像液体又像固体,主要用于填补散热接触面间的空隙,从而减少界面气隙,降低接触热阻,具有良好的导热性能,广泛用

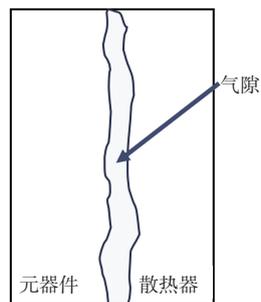


图1 无TIM填充的气隙

Fig. 1 Air gap without TIM filling

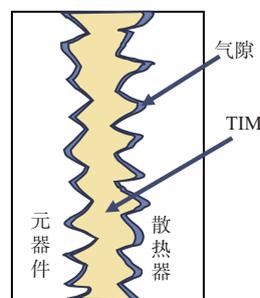


图2 有TIM填充的气隙

Fig. 2 Air gap with TIM filling

于电子产品领域。导热凝胶的主要特点为:硬度

**作者简介:**缪小冬(1984—),男,江苏南通人,北京航天自动控制研究所高级工程师,硕士,主要从事电子设备设计相关的工作。

**E-mail:** miaoxiaodong310@163.com

**引用本文:**缪小冬,王大林,邱晓锋,等.导热凝胶的研究进展[J].橡胶工业,2023,70(12):994-999.

**Citation:** MIAO Xiaodong, WANG Dalin, QIU Xiaofeng, et al. Research progress of thermal conductive gels[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(12): 994-999.

几乎为零,质地柔软,容易操作,具有极高的可塑性;具有较强的粘性和附着力,可重复使用<sup>[8-9]</sup>。

本文概述导热凝胶的组成和导热机理,介绍硅系导热凝胶基体和非硅系导热凝胶基体以及陶瓷材料、碳基材料和复合填料作为导热填料的研究进展。

## 1 导热凝胶的组成和导热机理

### 1.1 组成

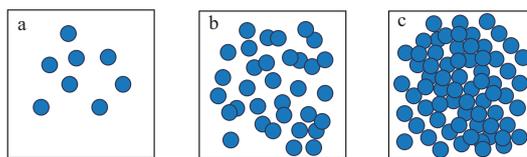
导热凝胶是一种半固体状的导热材料,分为硅系和非硅系两类。硅系导热凝胶由基础硅油、交联剂、扩链剂和导热填料等组成,目前用于导热凝胶的基础硅油主要有二甲基硅油、乙基硅油、羟基硅油、含氢硅油、长链烷基硅油、氟硅油及各种有机基改性硅油<sup>[10]</sup>。非硅系导热凝胶的基础材料为树脂。

提高导热凝胶导热性能途径有两种。第1种是通过改变聚合物分子链的结构和排列来提高其固有导热性<sup>[11-12]</sup>,由于该方法工艺复杂,成本较高,很难大规模推广应用。与之相比,第2种是最常用的方法,是将高导热填料加入聚合物基体中,制备填充型导热复合材料<sup>[13-14]</sup>。导热填料的加入是实现导热凝胶高导热的必要条件,填料种类、含量、尺寸和形状对导热凝胶的热导率有较大影响,此外填料的结构、空间排列以及取向也对导热凝胶的热导率有一定影响。

### 1.2 导热机理

根据热动力学理论,固体物质中的热传导可以看作是通过微观粒子的热振动进行的,而微观粒子的载流子主要包括电子、光子和声子<sup>[15]</sup>。将高导热填料加入聚合物中是提高其导热性的有效方法<sup>[16]</sup>。填充型导热复合材料的热传导机理主要包括热传导途径理论、热传导渗流理论和热弹性系数理论。根据热传导途径理论,导热填料在聚合物基体中通过相互接触和重叠形成连续的传热路径,如图3所示<sup>[17]</sup>。

在填料含量较小时,填料颗粒与基体之间形成海岛结构,填料颗粒像岛屿一样分布在基体中,很难相互接触和重叠,无法形成有效的传热路径,



填料含量:a—较小;b—适中;c—较大。

图3 导热填料形成传热路径示意

Fig. 3 Schematic diagram of heat transfer paths formed by thermal conductive fillers

导致复合材料的热导率较小;随着导热填料含量的增大,填料颗粒之间相互接触和重叠,在基体中逐渐建立起连续的传热路径,从而明显改善复合材料的导热性能。

## 2 导热凝胶研究进展

### 2.1 基体

#### 2.1.1 硅系导热凝胶

##### (1) 基础硅油。

在导热凝胶的制备中,通过调整基础硅油的相对分子质量、反应基团数量和位置可以改善导热凝胶的力学性能、涂敷性能、渗油性能、绝缘性能等<sup>[18]</sup>。

曹衍龙等<sup>[19]</sup>以双端乙烯基硅油为基础硅油,含氢硅油为交联剂制备导热凝胶,研究表明双端乙烯基硅油的粘度偏低,导热凝胶的拉伸强度低,耐热性能也差;双端乙烯基硅油的粘度偏高,导热凝胶的流动性差,不利于涂覆,影响产品的使用,因此应选用不同粘度的基础硅油复配以达到最佳效果。Y. Q. CHEN等<sup>[20]</sup>发现,使用高相对分子质量的乙烯基硅油制备的导热凝胶的渗油率很小,这是因为高相对分子质量的乙烯基硅油的运动和扩散能力相对较低。曾小亮等<sup>[21]</sup>则采用铝粉和氧化锌(ZnO)作为导热填料制备一种低迟滞性导热凝胶,以双端乙烯基硅油分子链为主链,将单封端乙烯基硅油接枝在主链上以提高乙烯基硅油分子链之间的缠结作用,避免乙烯基硅油的自由移动,从而降低导热凝胶的迟滞性能,该研究制备的导热凝胶不仅具有低迟滞性能,而且热导率达到 $6.47 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。赵秀英等<sup>[22]</sup>通过分子支链结构设计制备的导热凝胶的基础硅油,不仅改善了导热凝胶的柔顺性能,还降低了其渗油性能。

## (2) 交联与扩链体系。

导热凝胶的交联密度越大,渗油率越小,压缩应力越大,柔顺性能越差,越不利于填充热界面间微小间隙,会造成接触热阻增大。

任琳琳等<sup>[23]</sup>以含氢MQ树脂为交联剂制备导热凝胶,以在导热凝胶的交联网络中形成多官能交联点,从而提高导热凝胶的固有断裂能,所制备的导热凝胶的热导率最大可达 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,抗疲劳断裂能大于 $50 \text{ J} \cdot \text{m}^{-2}$ 。戴如勇等<sup>[24]</sup>分别用不同的交联剂制备导热凝胶,研究表明使用含有两个反应性官能团的交联剂可以降低导热凝胶的交联密度、硬度和应力。丁娉等<sup>[25]</sup>以聚甲基乙氧基硅氧烷为基础硅油,端含氢硅油为扩链剂,侧链含氢硅油为交联剂制备导热凝胶,结果表明当只使用交联剂而不使用扩链剂时,制备的导热凝胶在受力后容易开裂,且基本无法自修复,当加入扩链剂时则可以解决这个问题;随着扩链剂与交联剂用量比的增大,导热凝胶的锥入度增大。导热凝胶作为TIM应具有低储能模量,这对于降低其接触热阻至关重要。K. CHANO等<sup>[26]</sup>以乙烯基聚合物、悬垂氢化物聚二甲基硅氧烷制备导热凝胶,通过改变交联剂的聚二甲基硅氧烷的乙烯基与悬垂氢化物比例可以得到不同交联密度的导热凝胶;将交联剂替换为扩链剂(500-CP端氢聚二甲基硅氧烷),导热凝胶的模量可降低到未填充凝胶的原始值,热导率为 $1.24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

### 2.1.2 非硅系导热凝胶

多数TIM是基于硅基体系的导热凝胶,但在某些应用领域,如光学精密仪器、汽车电子、磁盘驱动器、医疗电子、LED等中需要非硅系的TIM。此外,非硅系的TIM无硅油挥发,不污染元器件,成本较低,且不会发生明显的迁移。值得注意的是,非硅系的导热凝胶基体往往可以进行多样化的基体结构设计,从而赋予导热凝胶更多特殊的性能。

非硅系的导热凝胶往往以聚丙烯酸(PAA)、聚氨酯、聚烯烃等树脂体系为基础,其特点是易生成相对坚硬的弹性体。K. J. BRUZDA等<sup>[27]</sup>以二嵌段和三嵌段苯乙烯共聚物、石蜡油和导热填料[三氧化二铝( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )]制备可逆导热凝胶,其热导率为 $0.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,且有很好的柔顺性能。

Y. LUO等<sup>[28]</sup>采用离子交联、化学交联和氮化硼掺杂的方法制备氮化硼@十水硫酸钠导热凝胶(BN@SSD),BN@SSD的热导率可达 $1.2668 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;将BN@SSD放到 $40^\circ\text{C}$ 的基材上,2 min内BN@SSD的温度可从 $25.1^\circ\text{C}$ 升到 $32.4^\circ\text{C}$ ,且BN@SSD表现出良好的形态稳定性,可进行200次热循环。H. CAO等<sup>[29]</sup>制备了一种相变导热凝胶(PCG),在PCG中将氮化硼@四氧化三铁(BN@ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ )颗粒和PAA前驱体液引入聚乙二醇(PEG)水溶液中,并施加磁场,促进BN@ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 沿磁场方向有序排列,因此PEG被交联PAA支撑网络包裹,形成具有优异形状稳定性的PCG;BN@ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的垂直取向结构使PCG在BN@ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 负载为25.6%的情况下热导率达到 $1.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,与不含BN@ $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 的复合材料相比,热导率增大了215%。张亮等<sup>[30]</sup>以聚 $\alpha$ 烯烃和三羟甲基丙烷酯为基体,过氧化氢二异丙苯为交联剂,石蜡和高密度聚乙烯为相变材料, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和氮化铝(AIN)为导热填料制备PCG,该PCG具有极佳的导热性能,借助相变材料的传热系数大、密度大、比热容大的优点,其热导率可达 $5.52 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

## 2.2 填料

导热填料主要包括金属填料、陶瓷填料、碳基材料以及复合材料等,它们通常被认为是高导热复合材料的理想候选材料。但由于金属填料中某些金属易被氧化且对凝胶的塑性有一定影响,在实际使用中综合考虑导热性要求,常采用陶瓷材料、碳基材料以及复合材料作为导热填料。

### 2.2.1 陶瓷材料

陶瓷材料如 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、AIN、碳化硅、氮化硅、氧化镁和氮化硼(BN)等具有良好的导热性能、较小的介电常数和较大的电阻率等优点而被广泛应用于导热填料中。

杨敦等<sup>[31]</sup>以 $\alpha$ 、 $\omega$ -二乙烯基聚二甲基硅氧烷为基础硅油,球状 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 为导热填料制备导热凝胶,结果表明随着球状 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粒径的增大,导热凝胶的热导率不断增大;添加粒径为 $32\sim 45 \mu\text{m}$ 的球状 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 制得的导热凝胶的热导率为 $3.23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。王晶<sup>[32]</sup>以羟基硅油( $\alpha$ 、 $\omega$ -二羟基聚二甲基硅氧烷)为基础硅油、含氢硅油(线形甲基氢硅油)为交联

剂和导热填料制备导热凝胶,导热填料为球形或椭圆形的BN颗粒,其大、中、小颗粒的质量比为5:3:1,大颗粒粒径为50~60 μm,中颗粒粒径为20~30 μm,小颗粒粒径为1~5 μm,导热凝胶的热导率为 $3.8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

### 2.2.2 碳基材料

碳基材料如石墨、石墨烯和碳纳米管等因其低密度和高导热性,已广泛应用于导热填料。石墨烯以多种形式存在,包括氧化石墨烯(GO)、还原氧化石墨烯和石墨烯纳米片(GN)。碳纳米管具有单壁碳纳米管和多壁碳纳米管的形态。碳基材料的理论热导率远远大于陶瓷材料,但由于碳基材料的固有缺陷,即分散性差和接触热阻高,加入碳基材料的导热凝胶的热导率仍然难以超过 $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

有研究<sup>[33]</sup>制备了一种氧化石墨烯-硅胶导热凝胶(GO-SG),发现GO-SG在GO质量分数大于3%的情况下,其流动性几乎丧失。J. LIN等<sup>[34]</sup>为了提高LED系统组件的热扩散效率,制备了GN导热凝胶,发现导热凝胶的热导率随着GN质量分数的增大而增大,当GN质量分数为1.5%时,导热凝胶的热导率达到 $2.7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。孙明琪<sup>[35]</sup>使用四氧化三铁作为磁性负载材料对金刚石表面进行改性制备磁性定向金刚石,并将其作为导热填料加入硅胶中,发现磁性定向金刚石/硅胶复合材料表现出更优异的导热性能,这表明磁性定向填料是一种在填料含量较低的情况下得到较高导热性能复合材料的方法。

### 2.2.3 复合填料

在导热凝胶中添加单一填料是应用和研究较多的方法。然而,在大多数情况下,通过这种方式提高的导热凝胶的导热性能远低于预期,这是由于这时导热凝胶的热传导网络为低效建设。可以采用复合填料来促进导热凝胶的导热网络建设,其主要是通过建造桥梁来增大填料的堆积密度,形成高效的导热网络。

王红玉等<sup>[36]</sup>以双组分硅凝胶为基体, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 和ZnO为导热填料,使用气相法白炭黑来调整触变性,制备了点胶式导热凝胶,结果表明老化后导热

凝胶的热导率有所增大,当高温老化时间为1 000 h时,热导率增幅达40%以上。孟鸿等<sup>[37]</sup>采用了特殊的导热凝胶制备方法,即将导热凝胶在真空和加热的条件下高速搅拌,以保证导热凝胶组分的均一性,消除导热凝胶内部的微小气孔,减小导热凝胶的接触热阻,从而提高了导热凝胶的导热性能;当以乙烯基硅油为基础硅油,铝粉、BN、AlN和石墨为导热填料时,测得导热凝胶的热导率为 $7.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;当用氩气和六甲基二硅氧烷对铝粉进行等离子体改性后重新制备导热凝胶,发现导热凝胶的热导率为 $9.2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。J. LIN等<sup>[38]</sup>以双组分硅胶为基料,以铜芯包覆碳壳(Cu-C)的核-壳结构纳米材料为导热填料制备导热凝胶,结果表明随着Cu-C质量分数的增大,导热凝胶的热导率增大,此外Cu-C对导热凝胶粘度的影响较小,这对提高其加工性能和降低热界面厚度和接触热阻尤为重要。

## 3 结语

导热凝胶具有热导率大,耐高低温性能和绝缘性能好,塑性、粘性和附着性强,且可重复使用等优点而被广泛应用。导热凝胶综合性能提高的关键在于合理设计基体和填料的性质,基体的设计可以从聚合物的类型、相对分子质量及其分布、交联剂、扩链剂等方面进行设计,并从改变分子链的结构和排列等方面改性聚合物;填料的设计可以从提高导热性方面进行探索,如对传统导热填料进行表面功能化以及设计复合填料。然而,导热凝胶仍有一些关键的科学问题和技术难点需要解决,今后可以在以下几个方面进行研究:(1)可通过增加基础硅油的可反应基团和调节交联剂与扩链剂的比例来改善硅系导热凝胶的渗油性能、迁移性能和涂敷性能;(2)进一步开发新型非硅系导热凝胶,如通过可逆交联、引入相变基体等方法提高导热凝胶的导热性能、柔顺性能和重复利用性能等;(3)通过对陶瓷材料和碳基材料表面功能化及多种导热填料复合等方法提高导热凝胶的导热性能;(4)在实现高导热的同时,也要关注导热凝胶的综合性能,如涂敷性能、渗油性能、重

复利用性能、绝缘性能等。

### 参考文献:

- [1] WANG S Z, HE H, YE X, et al. Design of rGO-BN hybrids for enhanced thermal management properties of polyurethane composites fabricated by 3D printing[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 227:109591.
- [2] YU X X, XUE M S, YIN Z Z, et al. Flexible boron nitride composite membranes with high thermal conductivity, low dielectric constant and facile mass production[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 222:109400.
- [3] TAN X, LIU T H, ZHOU W J, et al. Enhanced electromagnetic shielding and thermal conductive properties of polyolefin composites with a  $Ti_3C_2T_x$  MXene/graphene framework connected by a hydrogen-bonded interface[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(6):9254-9266.
- [4] SHAIKH S, LAFDI K, SILVERMAN E. The effect of a CNT interface on the thermal resistance of contacting surfaces[J]. *Carbon*, 2007, 45(4):695-703.
- [5] FENG C P, YANG L Y, YANG J, et al. Advances in polymer-based thermal interface materials for thermal management: A mini-review[J]. *Composites Communications*, 2020, 22:100528.
- [6] GRUJICIC M, ZHAO C L, DUSEL E C. The effect of thermal contact resistance on heat management in the electronic packaging[J]. *Applied Surface Science*, 2005, 246(1-3):290-302.
- [7] WANG S L, CHENG Y, WANG R R, et al. Highly thermal conductive copper nanowire composites with ultralow loading: Toward applications as thermal interface materials[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(9):6481-6486.
- [8] SWAMY M. A review of the performance and characterization of conventional and promising thermal interface materials for electronic package applications[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2019, 48(12):7623-7634.
- [9] 陈维斌. 导热硅凝胶的研究与应用进展[J]. *中国胶粘剂*, 2022, 31(7):56-61, 67.  
CHEN W B. Research and application progress of thermal conductive silicone gel[J]. *China Adhesives*, 2022, 31(7):56-61, 67.
- [10] 冯梅玲. 导热硅脂的研究进展[J]. *有机硅材料*, 2016, 30(5):417-423.  
FENG M L. Research progress of thermal conductive silicone grease[J]. *Silicone Material*, 2016, 30(5):417-423.
- [11] ZHAO J N, TAN A, GREEN P F. Thermally induced chain orientation for improved thermal conductivity of P(VDF-TrFE) thin films[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(41):10834-10838.
- [12] MENG X G, YU H J, WANG L, et al. Recent progress on fabrication and performance of polymer composites with highly thermal conductivity[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2021, 306(11):2100434.
- [13] CAO D, ZHOU W Y, YUAN M X, et al. Polymer composites filled with core-shell structured nanofillers: Effects of shell thickness on dielectric and thermal properties of composites[J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, 33(8):5174-5189.
- [14] 倪荣凤. 导热绝缘聚合物基复合材料的制备与性能研究[D]. 南京:南京理工大学, 2019.  
NI R F. Preparation and properties of thermal conductive and insulating polymer matrix composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019.
- [15] PRAHAN S S, UNNIKRISHNAN L, MOHANTY S, et al. Thermally conducting polymer composites with EMI shielding: A review[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2020, 49(3):1749-1764.
- [16] MEHRA N, LI Y F, YANG X T, et al. Engineering molecular interaction in polymeric hybrids: Effect of thermal linker and polymer chain structure on thermal conduction[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 166:509-515.
- [17] YANG X T, LIANG C B, MA T B, et al. A review on thermally conductive polymeric composites: Classification, measurement, model and equations, mechanism and fabrication methods[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2018, 1(2):207-230.
- [18] 曾亮, 齐放, 戴小平. 高分子绝缘材料在功率模块封装中的研究与应用[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(5):1-9.  
ZENG L, QI F, DAI X P. Study and application of polymer insulating material in power module packaging[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(5):1-9.
- [19] 曹衍龙, 陈威. LED照明芯片散热用双组分加成型导热硅胶[P]. 中国:CN 113444487A, 2021-09-28.
- [20] CHEN Y Q, FENG Y K, ZHAO J B, et al. Oil bleed from elastomeric thermal silicone conductive pads[J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2016, 10(4):509-516.
- [21] 曾小亮, 任琳琳, 胡煜琦, 等. 一种低迟滞导热凝胶及其制备方法[P]. 中国:CN 114031944A, 2022-02-11.
- [22] 赵秀英, 柴梦倩, 卢咏来, 等. 一种高柔顺低渗出导热硅凝胶及其制备方法[P]. 中国:CN 111286200B, 2020-06-08.
- [23] 任琳琳, 曾小亮, 孙蓉, 等. 一种抗疲劳热界面材料及其制备方法[P]. 中国:CN 113956669A, 2022-01-21.
- [24] 戴如勇, 林学好, 陆兰硕, 等. 一种低应力导热硅胶及其制备方法、电子仪器[P]. 中国:CN 113789058A, 2021-12-14.
- [25] 丁娉, 陈磊, 唐毅平, 等. 新型大功率IGBT用硅凝胶的制备及其应用性研究[J]. *绝缘材料*, 2014, 47(2):52-55.  
DING P, CHEN L, TANG Y P, et al. Preparation and application research of novel silicone gel for high-power IGBT[J]. *Insulating Materials*, 2014, 47(2):52-55.
- [26] CHANO K, POLISKIE G M, FREGOSO J. Rheology of thermal interface materials composed of silicone gels[J]. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2017, 7(2):217-220.

- [27] BRUZDA K J, STRADER J L. Materials including thermally reversible gels[P]. USA:USP 10087351B2, 2018-10-02.
- [28] LUO Y, ZOU L, QIAO J, et al. Boron nitride-doped inorganic hydrated salt gels demonstrating superior thermal energy storage and wearability toward high-performance personal thermal management[J]. ACS Applied Energy Materials, 2022, 5 (9): 11591-11603.
- [29] CAO H, LI Y, XU W D, et al. Leakage-proof flexible phase change gels with salient thermal conductivity for efficient thermal management[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14 (46): 52411-52421.
- [30] 张亮, 刘成彬. 一种无硅高K值相变导热凝胶及其制备方法[P]. 中国:CN 108753260A, 2018-11-06.
- [31] 杨敦, 付子恩, 刘光华, 等. 加成型导热硅凝胶的制备及性能研究[J]. 有机硅材料, 2017, 31 (5): 335-338.  
YANG D, FU Z E, LIU G H, et al. Research on preparation and performance of additional thermal conductive silicone gel[J]. Silicone Material, 2017, 31 (5): 335-338.
- [32] 王晶. 一种高性能硅基导热凝胶及其制备方法[P]. 中国:CN 105419339A, 2016-03-23.
- [33] LV Y F, ZHOU D Q, YANG X Q, et al. Experimental investigation on a novel liquid-cooling strategy by coupling with graphene-modified silica gel for the thermal management of cylindrical battery[J]. Applied Thermal Engineering: Design, Processes, Equipment, Economics, 2019, 159: 113885.
- [34] LIN J, ZHANG H Y, HONG H Q, et al. A thermally conductive composite with a silica gel matrix and carbon-encapsulated copper nanoparticles as filler[J]. Journal of Electronic Materials, 2014, 43 (7): 2759-2769.
- [35] 孙明琪. 金刚石颗粒/树脂基复合材料的制备与导热性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2020.  
SUN M Q. Preparation and thermal conductivity study of diamond particle/resin matrix composite materials[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [36] 王红玉, 万炜涛, 陈田安, 等. 点胶式导热凝胶的制备与老化性能研究[J]. 有机硅材料, 2018, 32 (2): 85-89.  
WANG H Y, WAN W T, CHEN T A, et al. Research on preparation and aging performance of thermally conductive dispensing silicone gel[J]. Silicone Material, 2018, 32 (2): 85-89.
- [37] 孟鸿, 刘志军, 王飞, 等. 一种导热凝胶及其制备方法[P]. 中国:CN 111876135A, 2020-11-03.
- [38] LIN J, ZHANG H Y, HONG H Q, et al. A thermally conductive composite with a silica gel matrix and carbon-encapsulated copper nanoparticles as filler[J]. Journal of electronic materials, 2014, 43 (7): 2759-2769.

收稿日期:2023-08-16

## Research Progress of Thermal Conductive Gels

MIAO Xiaodong<sup>1</sup>, WANG Dalin<sup>1</sup>, QIU Xiaofeng<sup>1</sup>, ZHANG Lihua<sup>2</sup>

(1. Beijing Aerospace Automatic Control Research Institute, Beijing 100854, China; 2. Beijing Aerospace Guanghua Electronic Technology Co., Ltd, Beijing 100854, China)

**Abstract:** The composition and thermal conduction mechanism of the thermal conductive gel are summarized, and the research progress of silicon-based and non-silicon-based thermal conductive gel matrices, as well as the ceramic materials, carbon based materials and composite fillers as thermal conductive fillers are introduced. The thermal conductive gel has the advantages of high thermal conductivity, good high and low temperature resistance and insulation properties, strong plasticity, viscosity and adhesion, and can be reused. The key to improving the comprehensive performance of the thermal conductive gel lie in the rational design of the properties of the matrix and fillers. The design of the matrix could be carried out from the type and molecular weight of the polymer and its distribution, cross-linking agent, chain extender, etc., and the polymer could be modified by changing the structure and arrangement of molecular chains. The design of the fillers could be carried out from the perspective of improving thermal conductivity, such as surface functionalization of traditional thermal conductive fillers and the design of composite fillers.

**Key words:** thermal conductive gel; gel matrix; thermal conductive filler; thermal conductivity