

# 六方氮化硼填充导热树脂复合材料的研究进展

张有茶<sup>1,2,3</sup>✉, 贾成厂<sup>1</sup>, 贾鹏<sup>2</sup>, 贾永昌<sup>3</sup>, 张金磊<sup>2</sup>

1) 北京科技大学新材料技术研究院, 北京 100083 2) 北京联合涂层技术有限公司, 北京 100022

3) 北京廊桥材料技术有限公司, 北京 100089

✉通信作者, E-mail: ychazhang@163.com

**摘要** 总结了电气电子领域使用的六方氮化硼(hexagonal boron nitride, hBN)导热填料制备方法, 介绍了近几年 hBN 填充树脂基复合材料的研究进展, 研究了导热树脂复合材料的导热机理和导热模型, 讨论了 hBN 填料的形貌、粒度、颗粒复配及表面改性方法等因素对材料导热性能的影响, 并对 hBN 填充高导热树脂复合材料的发展方向进行了展望。

**关键词** 六方氮化硼填料; 导热; 树脂; 表面改性

**分类号** TB33

## Development of the heat conducted resin composites filled with hexagonal boron nitride

ZHANG You-cha<sup>1,2,3</sup>✉, JIA Cheng-chang<sup>1</sup>, JIA Peng<sup>2</sup>, JIA Yong-chang<sup>3</sup>, ZHANG Jin-lei<sup>2</sup>

1) Institute for Advanced Materials and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 10083, China

2) Beijing United Coatings Technology Co., Ltd., Beijing 102202, China

3) Beijing Langqiao Material Technology Co., Ltd., Beijing 10089, China

✉Corresponding author, E-mail: ychazhang@163.com

**ABSTRACT** Development and preparation of heat conducted resin composites filled with hexagonal boron nitride (hBN) used in electrical and electronics field were studied. The mechanism and model of thermal conductivity were introduced. The effects of morphology, particle size, particle mixing, and surface modification of hBN filler on the resin composites were discussed. Finally, the prospect of the resin composites filled with hBN was proposed.

**KEY WORDS** hexagonal boron nitride (hBN) filler; thermal conductivity; resin; surface modification

树脂具有良好的力学性能、电性能、粘接性能及热稳定性, 被广泛应用于电子元器件<sup>[1-2]</sup>。随着科技的发展, 集成电路逐渐朝着小型化和微型化的方向发展, 电子元器件的散热问题变得尤为重要, 树

脂较低的热导率(~0.18 W/(m·K)), 成为其在电子元器件领域应用的瓶颈。

为了提高树脂基电子元器件的热导率, 普遍采用的方法是在树脂基体中引入高导热绝缘填料, 制备填

收稿日期: 2016-06-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51471023)

充型导热树脂复合材料从而获得高导热性能。在绝缘类导热填料中, 六方氮化硼(hexagonal boron nitride, hBN)具有优良的耐热性能、良好的耐腐蚀性能、较低的热膨胀系数、较高的导热率(30~330 W/(m·K))、化学性能稳定、介电常数低(1.6~3.5)及体积电阻率高等优点, 是最适合的导热绝缘填料<sup>[3]</sup>。近年来, hBN 填充导热树脂成为导热高分子材料研究领域的一个研究重点。

## 1 hBN 填料的制备方法

hBN 属六方晶系, 具有类石墨的层状结构, 层内 B 和 N 原子是靠共价键结合, 层内结构紧密、稳定; 层间靠范德华力结合, 结合力弱, 层与层之间易于剥离。另外, hBN 的每一层由 B 原子和 N 原子相间排列成六角环状网络结构, hBN 层中电子为满壳结构, 无自由电子, 为良好的绝缘体<sup>[4-5]</sup>。按照 hBN 作为绝缘导热填料填充树脂时形貌的不同, 可以将 hBN 填料的制备方法分为片状填料和球形填料的制备。

### 1.1 片状 hBN

随着科技的进步, 粉体颗粒尺寸逐步向微米和纳米尺度发展, 片状 hBN 粉体颗粒逐步以微米(0.1~50 μm)和纳米尺度颗粒形态填充树脂, 应用到导热绝缘领域。该类 hBN 颗粒的制备主要包括传统高温法、先驱体法、化学气相沉积法及水(溶剂)热合成法。

#### (1) 传统高温法

传统高温法是制备 hBN 颗粒的重要途径, 目前工业上最常用的就是以硼砂和尿素(或氯化铵)为原料, 在氨气气氛下高温制备 hBN 颗粒, 且实现了连续化生产<sup>[6-7]</sup>。该工艺具有成本低、流程简单及适合工业生产的优点, 但同时具有产物粒度、纯度、形貌及结晶度波动性大的缺陷。研究人员在此基础上对 hBN 高温合成工艺进行了改进。

Li 等<sup>[8]</sup>采用硼酸/尿素法, 先将硼酸和尿素通过球磨混合, 随后将混合物放入 850 °C 的氮气气氛下焙烧 2 h, 然后继续在空气中焙烧 2 h, 最终得到直径约为 5 μm 的 hBN 颗粒。该方法显著提高了原料的利用率, 减少了副产物的生成。陈加森等<sup>[9]</sup>以尿素为氮源、硼酸为硼源, 研究了合成温度和原料配比对制备 hBN 晶型的影响。结果表明: 合成温度越高, hBN 的结晶性和纯度越好; 当尿素和硼酸以 1:1 摩尔分数混合, 在 1300 °C 的合成温度下可以制备出结晶良好、纯度高、粒度约为 5.98 μm 的 hBN 粉体。

#### (2) 先驱体法

陈朝辉<sup>[10]</sup>以三氯化硼、三乙胺为原料, 在氮气

保护气下, 经低温反应合成了配位键化合物  $\text{Et}_3\text{NBCl}_3$ , 再与  $(\text{Me}_3\text{Si})_2\text{NH}$  反应, 得到了中间产物  $(\text{Me}_2\text{Si})_2\text{NBCl}_2$  和  $(\text{Me}_2\text{Si})_2\text{NB}(\text{Cl})\text{NHSiMe}_3$ , 进而通过热缩合成环和高分子化后, 获得了具有 B、N 六元环结构的 BN 先驱体。先驱体在氮气中热分解至 1500 °C, 获得了含有少量  $\text{Si}_3\text{N}_4$  的 hBN 粉体。

#### (3) 化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD)

CVD 法制备 hBN 粉体一般采用热壁式反应器, 将含有 B、N 的气态原料通过载气导入到一个反应室内, 在高温下气态原料之间发生化学反应生成 hBN 粉体颗粒, 该工艺生成的 hBN 粉末颗粒纯度高。

唐成春等<sup>[11]</sup>以三羟基硼酸酯和氨气为原料, 采用 CVD 法在 1350 °C 沉积条件下得到了 hBN 纳米粉。李俊生等<sup>[12]</sup>以无色透明液态环硼氮烷为先驱体, 以  $\text{N}_2$  为载气, 采用 CVD 法在 900 °C 制备了颗粒粒度 50 nm、较纯净的、部分结晶纳米 hBN 粉体颗粒, 该粉体经 1600 °C 惰性气氛下晶化处理, 得到结晶良好的 hBN 颗粒。

#### (4) 水(溶剂)热合成法

水(溶剂)热合成法简称水热法, 是在密封的高压反应釜里, 采用水或有机溶剂为反应介质, 通过加热高压反应釜, 形成高温、高压的反应环境, 使通常难溶或不溶的反应原料溶解并反应生成新的晶体。该工艺条件易于控制, 产物粒度可达纳米级、均匀性好, 但具有产率偏低的不足。Ma 等<sup>[13]</sup>通过以硼氢化钠为 B 源, 以三氯化钠为 N 源, 在 600 °C 的反应釜中通过水热反应生成平均直径为 20 nm、平均长度为 200 nm 的 hBN 纳米晶须颗粒。

除上述 4 种 hBN 制备方法外, 研究人员开发了新的制备方法, 如自蔓延高温合成、超声剥离、熔盐法等。薛雅芳<sup>[14]</sup>通过改进的液相超声剥离法将块体 hBN 粉末剥离成少层 hBN 纳米片。Ye 等<sup>[15]</sup>通过在  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$  熔盐介质中, 用镁粉作为反应材料, 在氮气气氛中通过镁热还原工艺在 1200 °C 制得了颗粒尺寸为  $\phi 200 \text{ nm} \times 30 \text{ nm} \sim \phi 600 \text{ nm} \times 30 \text{ nm}$  的 hBN 2D 纳米片。

### 1.2 球状 hBN

除片状 hBN 粉体外, 球状 hBN 粉体颗粒因其流动性好、比表面积大等特点逐渐成为研究人员的研究重点。

Pujari 等<sup>[16]</sup>叙述了球形 hBN 粉体的制备工艺, 即采用喷雾干燥的方法, 将含有质量分数为 30%~50% 的 hBN 和质量分数为 0.5%~5% 的表面活

性剂的料浆制成球形 hBN 粉体，对球形 hBN 粉体烧结，从而获得具有高致密度和热导率的球形 hBN 粉体。袁颂东<sup>[17]</sup>以化学气相沉积法为主要合成方法，以低毒的硼酸甲酯(TMOB)为硼源原料，系统的研究了 CVD 反应温度对 hBN 纳米球体的影响，并在此基础上成功制备出 hBN 纳米绒球。

## 2 导热机理和导热模型

传导、对流及辐射是物质热传播的三种基本方式。对于固体导热材料来说，热量的传递主要为热传导，内部的导热载体分为三种：电子、声子、光子<sup>[18]</sup>。树脂类聚合物材料是由不对称的极性链节所构成，内部无自由电子，这些链节都属于晶态或非晶态的材料，整个分子链不能完全自由运动，只能发生原子、基团或链节的振动，声子是其主要热传递载体。hBN 无机填料具有六方晶体结构，自由电

子少，无杂质及错位等缺陷，声子相互间散射带来的热阻很小，导热作用强，具有较高的热导率。

晶体型无机非金属材料填充导热树脂复合材料主要通过声子传递热量，导热填料不仅可以使热量沿着填料晶格传播，增加复合材料的热导率，同时会增加填料与树脂界面的热阻，这是由于填料与树脂界面的声子散射导致的。当填料含量低于某一临界值时(较低)，填料颗粒零散的分布在树脂基体中，不能形成有效的热传导网络，界面热阻决定了复合材料的热导率；当填料含量超过某临界值，填料颗粒间相互连接、交织，形成网状导热通路，此时复合材料的热导率取决于导热通路。

为了更好的预测导热粒子填充树脂基复合材料的导热性能，研究人员在考虑了填料种类、含量及分布等因素对复合材料的导热性能的影响后，建立了导热模型，表 1 列出了五种典型的二元体系导热模型。

表 1 五种典型导热模型

Table 1 Five typical models of thermal conductivity

模型名称	热导率公式	应用范围
Maxwell-Eucken <sup>[19]</sup>	$\lambda = \lambda_1 \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 + 2V(\lambda_2 - \lambda_1)}{2\lambda_1 + \lambda_2 - V(\lambda_2 - \lambda_1)}$	球形填料颗粒 填充体积分数 < 10%
Hashi-Shtrikman <sup>[20-21]</sup>	$\lambda = \lambda_1 \frac{2\lambda_1 + \lambda_2 - 2V(\lambda_1 - \lambda_2)}{2\lambda_1 + \lambda_2 + V(\lambda_1 - \lambda_2)}$	填充量体积分数 > 20%
Bruggeman <sup>[22]</sup>	$1 - V = \frac{\lambda_1 - \lambda}{\lambda_2 - \lambda} \cdot \left(\frac{\lambda_1}{\lambda}\right)^{1/3}$	球形填料颗粒 填充量体积分数 < 30%
Agari <sup>[23]</sup>	$\log \lambda = VC_2 \log \lambda_2 + (1 - V) \log(C_1 \lambda_1)$	球形填料颗粒 填充量较高
Hatta <sup>[24]</sup>	$\frac{\lambda}{\lambda_1} = 1 - \frac{V}{S(1 - V) + \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}}$	片状填料颗粒

式中， $\lambda$ 为复合材料热导率； $\lambda_1$ 为连续相基体热导率； $\lambda_2$ 为分散相粒子热导率； $V$ 为分散相粒子体积分数； $C_1$ 为尺寸因子； $C_2$ 为自由因子； $S$ 依赖于热导率测量方向，当沿平面测量材料热导率时， $S = (\pi L)/(4X)$ ，当沿厚度方向测量热导率时， $S = 1 - (\pi L)/(2X)$ ，其中  $L$  为填料有效直径， $X$  为填料厚度。

## 3 导热性能影响因素

对于 hBN 填充树脂基复合材料而言，导热填料是影响复合材料导热性能的重要因素，其种类、形状、尺寸、含量及表面处理等均会对复合材料的导热性能有较大影响。

### 3.1 hBN 形貌

#### (1) 片状 hBN

安群力<sup>[25]</sup>研究了 hBN 粒子填充对玻璃布增强氰酸酯树脂基复合材料性能的影响。结果显示，hBN 的加入明显提高复合材料的弯曲强度和层间剪切强度，在 hBN 加入量(质量分数)为 8%时，复合材料的弯曲强度和层间剪切强度达到最大值，分别提高了

5%和 36%。加入 hBN 粒子后，复合材料的起始热分解温度都较未填充体系有所提高，耐热指数升高、热稳定性相应提高。

#### (2) 球状 hBN

Pujari 等<sup>[16]</sup>叙述了球形 hBN 粉体以 60%~80%的含量(质量分数)填充聚合物产品，获得热导率为 1~15 W/(m·K)的复合材料。球形优势表现为，球形 hBN 粉有利于降低粉体间的摩擦，因而在聚合物中允许更高的填充量，球形粉比面积最小，降低了粉体对聚合物的吸附，从而有更多游离聚合物，可以改善流动性、降低粘度；球形粉中 hBN 片的分布不规则，会使填充球形 hBN 的聚合物呈现更多的各向异性热导特性，在聚合物厚度方向上具有更高热导率。

Mentghetti 等<sup>[26]</sup>首先以不同粒径、不同形态(片和球形)的 hBN 粉体混合均匀制成共混粉, 之后以质量分数 30%~80%共混 hBN 粉体填充聚合物, 制得聚合物的热导率为 1~25 W/(m·K), 并对共混粉对聚合物粘度和导热性能的影响进行分析。

### 3.2 hBN 粒径

牟其伍等<sup>[27]</sup>在研究超细氮化硼/环氧树脂(boron nitride/epoxy resin, BN/EP)复合材料时发现, 当超细 BN 质量分数达到 90%时, 复合材料的热导率可以达到 1.2447 W/(m·K), 约为 EP 的 7 倍。高建等<sup>[28]</sup>制备了 hBN 纳米片填充环氧树脂复合材料, 通过对其热性能的研究发现, 纳米 hBN 的加入可以提高复合材料的玻璃化转变温度。当 hBN 质量分数为 7%时, 复合材料的玻璃化转变温度最高为 223.5 °C, 热分解温度最高, 耐热性能明显提高。随着 hBN 含量的增加, 复合材料的热膨胀系数逐渐减小, 导热系数逐渐增加, 氮化硼质量分数为 10%时, 树脂的热导率由 0.139 W/(m·K)提高到 0.230 W/(m·K), 提高了约 65%。

### 3.3 hBN 表面处理

Wattanukul<sup>[29]</sup>等研究表明, 经过表面活性剂处理后, 可有效增加 BN 的表面润湿性以及填料与 EP 之间的界面附着力, 与未经处理的 BN 填料相比, BN/EP 复合材料的热导率提高了 30%, 从 1.5 W/(m·K)增加到 2.69 W/(m·K)。

Yung 等<sup>[30]</sup>以颗粒状 hBN 为导热填料制备了环氧树脂聚合物材料, 结果显示: 以 Z-6020 硅烷偶联剂( $\text{H}_2\text{NCH}_2\text{CH}_2\text{NHCH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{Si}(\text{OCH}_3)_3$ )处理的 hBN 为填料制得的复合材料的热导率比没有处理填料所得复合材料提高了 217%, 这表明填料的表面处理对于提高复合材料的热导率具有重要的作用。

赵春宝等<sup>[31]</sup>采用硅烷偶联剂 KH550 对 hBN 粉末进行了表面改性, 并制备了氰酸酯树脂/hBN 导热复合材料。结果显示改性后的 hBN 对氰酸酯树脂固化反应有一定促进作用, 且能有效改善复合材料的导热性能, 当 hBN 体积分数达到 23.6%时, 复合材料的导热系数为 1.33 W/(m·K), 为树脂基体的 4.6 倍; 且复合材料仍能保持良好的电绝缘性能。

### 3.4 颗粒复合

蔚永强<sup>[32]</sup>研究了 hBN 填充量、双粒度级配填充对 BN/EP 高导热绝缘胶膜的影响。研究发现: 在较低填充量下, 导热粒子被基体树脂分割包覆, 导热绝缘胶膜热导率变化不大; 随 hBN 含量增加, 填料粒子在导热绝缘胶膜中逐步形成导热网链, 热导率

增加。实验中所得胶膜在填充质量分数为 40%时可达 0.876 W/(m·K)。

Mikdam<sup>[33]</sup>等对 hBN 和 AlN 填料混杂填充 EP 进行了研究。发现当两种填料粒子粒径呈对称双峰分布且体积比为 1:1 时, 复合材料具有较好的导热性能, 导热率达到 8.0 W/(m·K)。

李明等<sup>[34]</sup>以聚砜为基体, 以具有二维结构的 hBN 和一维结构的碳化硅晶须(SiCw)二元复配填料为导热填料制备了聚砜基复合材料。结果显示: 不同形状的导热填料均匀分散在聚合物基体中, 相互搭接形成导热网络, 合适配比的二元复配填料对复合材料热导率的提高具有协同效应; 当 hBN 与 SiCw 质量比为 8/2, 复配填料质量分数为 50%时, hBN/SiCw/聚砜复合材料的热导率达到 2.728 W/(m·K)。

## 4 结论与展望

填充型高导热树脂基复合材料因其质轻、化学性能稳定、高热导率及优异的力学性能等特点, 在微电子领域具有广阔的应用前景。hBN 以其高热导率和优异的介电性能逐步成为填充型高导热树脂基复合材料的研究重点。综合考虑 hBN 填料颗粒的制备方法、颗粒种类、形状、尺寸、含量及表面处理等因素是制备出具有高导热性能树脂基复合材料的关键。今后的研究重点将集中在高导热系数 hBN 填料, 特别是球形 hBN 填料的制备, 不同粒径(微米、纳米)颗粒的混合, 颗粒表面改性, hBN 与其他无机导热填料的颗粒复配, 以及 hBN 填充对树脂基复合材料导热性能和导热机理的探索, 这将进一步促进 hBN 填充树脂基复合材料的发展。

## 参考文献

- [1] Jin H, Zhang Y L, Xu Y J, et al. Research on epoxy resin based thermal conductive composites. *Plast Sci Technol*, 2010, 38(5): 95  
(金鸿, 张园丽, 许映杰, 等. 环氧树脂基导热复合材料的研究. 塑料科技, 2010, 38(5): 95)
- [2] Song S H, Katagi H, Takezawa Y. Study on high thermal conductivity of mesogenic epoxy resin with spherulite structure. *Polymer*, 2012, 53(20): 4489
- [3] Li H Q, Zhong Y, Wu W J, et al. Progress in filled epoxy resin-based thermal conductive composites. *Adhesion*, 2015, (4): 83  
(李红强, 钟勇, 吴文剑, 等. 填充型导热环氧树脂复合材料的研究进展. 粘结, 2015, (4): 83)

- [4] Liu Y, Zeng L K, Liu M Q. *Non Oxide Ceramics and its Application*. Beijing: Chemical Industry Press, 2011  
(刘阳, 曾令可, 刘明泉. 非氧化物陶瓷及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2011)
- [5] Zhang Y M, Han J C, He X D, et al. Study on self-propagating high perature synthesis technology of HBN-based ceramics. *Ordnanace Mater Sci Eng*, 2000, 23(3): 27  
(张宇民, 韩杰才, 赫晓东, 等. 六方 BN 基陶瓷材料的自蔓延高温合成工艺的研究. 兵器材料科学与工程, 2000, 23(3): 27)
- [6] Hu W Y. Study on a new process for synthesis of hexagonal boron nitride. *Adv Ceram*, 2002, 23(2): 35  
(胡婉莹. 连续合成六方氮化硼的新工艺. 现代技术陶瓷, 2002, 23(2): 35)
- [7] Zheng S Z, Dao J. Synthesis and high-temperature reefing of hexagonal boron nitride. *J Liaodong Univ Nat Sci*, 2008, 15(2): 69  
(郑盛智, 刁杰. 六方氮化硼的合成与高温精制. 辽东学院学报(自然科学版), 2008, 15(2): 69)
- [8] Li D, Zhang C R, Li B, et al. Low-cost preparation of boron nitride ceramic powders. *J Wuhan Univ Technol*, 2012, 27(3): 534
- [9] Chen J S, Tang Z X. Preparation and characterization of h-BN. *J Shandong Univ Technol Nat Sci*, 2015, 29(2): 44  
(陈加森, 唐竹兴. h-BN 的制备与表征. 山东理工大学学报(自然科学版). 2015, 29(2): 44)
- [10] Gou X S, Chen C H, Xiang Y C. Synthesis and study of the BN precursor. *J Xi'an Jiaotong Univ*, 2013, 37(2): 201  
(郭秀生, 陈朝辉, 向阳春. 氮化硼先驱体的合成与研究. 西安交通大学学报. 2013, 37(2): 201)
- [11] Tang C C, Ding X X, Gao J M, et al. *Hexagonal Nanometer Boron Nitride Microsphere and its Synthesis Process and Application*: China Patent, CN1931719A. 2007-03-21  
(唐成春, 丁晓夏, 高建明, 等. 一种六方氮化硼纳米微球及合成方法和应用: 中国专利, CN1931719A. 2007-03-21)
- [12] Li J S, Zhang C R, Li B, et al. Preparation of boron nitride nanopowders by chemical vapor deposition // *Proceedings of the 7<sup>th</sup> China Functional Materials and Applications of Academic Archies*. Changsha, 2010: 72  
(李俊生, 张长瑞, 李斌, 等. 化学气相沉积法制备六方 BN 纳米粉体//第七届中国功能材料及其应用学术会议论文集. 长沙, 2010: 72)
- [13] Ma J H, Li J, Li G X, et al. One simple synthesis route to whisker-like nanocrystalline boron nitride by the reaction of  $\text{NaBH}_4$  and  $\text{NaN}_3$ . *Mater Res Bull*, 2007, 42(5): 982
- [14] Xue Y F. *Exfoliation, Modification and Properties of Hexagonal Boron Nitride and Graphite* [Dissertation]. Shanghai: Donghua University, 2013  
(薛雅芳. 六方氮化硼和石墨的剥离、改性及性能[学位论文]. 上海: 东华大学, 2013)
- [15] Ye L F, Zhao L, Liang F, et al. Facile synthesis of hexagonal boron nitride nanoplates via molten-salt-mediated magnesiothermic reduction. *Ceram Int*, 2015, 41: 14941
- [16] Pujari V K, Collins W T, Gutschke J J. *Boron Nitride Spherical Powder and Methods of Using Same*: China Patent, CN101003436. 2007-07-25  
(普加里V·K, 科林斯W·T, 库茨克J·J. 氮化硼球形粉体以及他们的使用方法: 中国专利, CN101003436. 2007-07-25)
- [17] Yuan S D. *Preparation and Properties of BN Nano Materials* [Dissertation]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009  
(袁颂东. 氮化硼纳米材料的制备及性能研究[学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2009)
- [18] Li M Y, Zhou X Y, Wang D, et al. Research progress of polymer matrix composites with insulating and thermal conductivity. *Mater Rev*, 2013, 27(1): 80  
(李名英, 周曦亚, 王达, 等. 聚合物基绝缘导热复合材料的研究进展. 材料导报, 2013, 27(1): 80)
- [19] Agari Y, Ueda A, Nagai S, et al. Thermal conductivity of composites in several types of dispersion systems. *J Appl Polym Sci*, 1991, 42(6): 1665
- [20] Weidenfeller B, Höfer M, Schilling F R. Thermal conductivity, thermal diffusivity, and specific heat capacity of particle filled polypropylene. *Compos Part A*, 2004, 35(4): 423
- [21] Weidenfeller B, Höfer M, Schilling F R. Thermal and electrical properties of magnetite filled Polymers. *Compos Part A*, 2002, 33(8): 1041
- [22] Ott H J. Thermal conductivity of composite materials. *Plast Rubber Process Appl*, 1981, 1(1): 9
- [23] Agari Y, Ueda A, Nagai S. Thermal conductivity of a polymer composite. *J Appl Polym Sci*, 1993, 49(9): 1625
- [24] Hatta H, Taya M, Kuiaeki F A. Thermal diffusivities of composites with various types of fiber. *J Compos Mater*, 1992, 26(5): 612
- [25] An Q L. Study on BN particles reinforced cyanate ester resin composites. *China Plast*, 2012, 26(9): 42  
(安群力. 氮化硼粒子增强氰酸酯树脂基复合材料的研究. 中国塑料, 2012, 26(9): 42)

(2) 试验室试验已证明新设计的润滑剂系统脱出特性优异。在实际生产体验中都证实了这种新预混合粉材料的试验室测定的脱出特性。

(3) 温模压制工艺生产能力稳定,可将因压制中断产生的废料最小化。

(4) 零件间的重量控制是可行的。

(5) 确定试验室检验得到的压缩性和实际生产体验之间具有良好的关系。

(6) 当将温压转换为温模压制工艺时,温模压制的总压制吨位增高约4%。

(7) 减小润滑剂含量,可减少烧结时 CO<sub>2</sub> 的排出量,同时可减少润滑剂烧除导致的炉子维护。

(8) 新 AncorMax 225 预混合粉的烧结尺寸变化(DC)胀大比替代的标准 ANCORDESE 450 材料大。通过略微改变预混合粉配方,可消除这种差异。

(9) 对预混合粉的生产体验表明,粉末的松装密度与流动性变动极小。

## 参 考 文 献

- [1] *Standard Test Methods for Metal Powders and Powder Metallurgy Products*. 2012 Edition. Published by MPIF, Princeton NJ, Copyright 2012.
- [2] Warzel R. *Tools for High Density: Warm Compaction, Warm Die Compaction and Die Wall Lubrication*. Presented at the 2013 PM Parts Compaction/Tooling Seminar, State

College, PA, November 6–7, 2013.

- [3] Hanejko F, Clisby S. *High Density Compaction using Lubricant Levels of 0.25%*. Presented at SIP 3, Technologies for PM Growth Part 1, 2013 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, June 24–27, 2013, Chicago IL.
- [4] Whittaker D. New lubricant system facilitates higher density PM parts. *Powder Metallurgy Review*. <http://www.ipmd.net/articles/002373.html>
- [5] James W, Narasimhan K. *Warm Compaction and Warm-Die Compaction of Ferrous PM Materials*. Presented at PM-13 International Conference and Exhibition on Powder Metallurgy for Automotive and Engineering Industries, Precision and Additive Manufacturing in Pune, India, 2013
- [6] Falleur G, Hamilton J. *Development of High-Density PM Processes for High Performance Applications*. Presented at SIP 3, Technologies for PM Growth Part 4, 2013 International Conference on Powder Metallurgy and Particulate Materials, June 24–27, 2013, Chicago IL. PM 2013
- [7] Jandeska W, Hoffmann G, Hanejko F, et al. Rolling contact fatigue of surface densified material: microstructural aspects. *Advances in Powder Metallurgy and Particulate Materials—2004*. Edited by James W and Chernenkoff R. Metal Powder Industries Federation. Princeton, NJ, 2014, pp. 10-35 to 10-52

韩凤麟 译自 2014 MPIF World Congress on Powder Metallurgy and Particulate Materials, Orlando, Florida, USA

(上接第 72 页)

- [26] Paulo M, Raman C. *Mixed Boron Nitride Composition and Method for Making Thereof*. China Patent, CN101535176A. 2009-9-16.  
(鲍罗 M, 拉曼·C. 混合的氮化硼组合物及其制备方法: 中国专利, CN101535176A. 2009-9-16)
- [27] Mou Q W, Ren B. Preparation and performance of superfine BN/ epoxy resin composites. *New Chem Mater*, 2011, 39(4): 131  
(牟其伍, 任兵. 超细氮化硼/环氧树脂复合材料的制备和性能影响. 化工新型材料, 2011, 39(4): 131)
- [28] Gao J, Yuan Z K, Yu H J, et al. Preparation and thermal properties study of boron nitride/epoxy resin composite. *Insulat Mater*, 2014, 47(2): 19  
(高建, 袁正凯, 虞锦洪, 等. 氮化硼纳米片/环氧树脂复合材料的制备与热性能研究. 绝缘材料, 2014, 47(2): 19)
- [29] Wattanakul K, Manuspiya H, Yanumet N. Effective surface treatments for enhancing the thermal conductivity of BN-filled epoxy composite. *J Appl Polym Sci*, 2011, 119(6): 3234
- [30] Yung K C, Liem H. Enhanced thermal conductivity of boron nitride epoxy-matrix composite through multi-modal particle size mixing. *J Appl Polym Sci*, 2007, 106(6): 3587
- [31] Zhao C B, Su L, Xu S C, et al. Study on KH550 modified boron nitride/cyanate ester resin thermal conductive composites. *New Chem Mater*, 2014, 42(2): 119  
(赵春宝, 苏磊, 徐随春, 等. KH550 改性氮化硼/氰酸酯树脂导热复合材料的研究. 化工新型材料. 2014, 42(2): 119)
- [32] Wei Y Q. *Properties of Epoxy Composites Adhesive Film with High Thermal Conductivity and Insulation* [Dissertation]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014  
(蔚永强. 环氧树脂基高导热绝缘复合胶膜的研究[学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2014)
- [33] Mikdam A, Makradi A, Ahzi S, et al. Statistical continuum theory for the effective conductivity of fiber filled polymer composites: effect of orientation distribution and aspect ratio. *Compos Sci Technol*, 2010, 70(3): 510
- [34] Li M, Zhang K, Yang W B, et al. Synergistic improvement of thermal conductivity of thermally conductive and insulating BN/SiCw/polysulfone composites. *Ploym Mater Sci Eng*, 2015, 31(4): 73  
(李明, 张凯, 杨文彬, 等. h-BN/SiCw/聚矾导热绝缘复合材料的协同导热效应. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(4): 73)