

# 低黏度、高导热环氧浇注料的制备与性能研究

黄骏<sup>1</sup>, 杨昊<sup>1,2\*</sup>, 张博<sup>1</sup>, 熊佳明<sup>3</sup>, 周福升<sup>2,3</sup>

(1. 西安工程大学电子信息学院, 陕西 西安 710600; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;  
3. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663)

**摘要:** 在环氧酸酐体系中引入 $\gamma$ -氨基丙基三乙氧基硅烷(KH550)改性的六方氮化硼(h-BN)填料, 并协同添加正丁基缩水甘油醚(501)、1,4-丁二醇二缩水甘油醚(622)和邻苯二甲酸丁酯(DBP)等稀释剂和增韧剂, 开发一种适用于干式变压器的高导热低黏度环氧复合材料。系统研究h-BN填料及不同稀释剂、增韧剂的种类与含量对环氧复合材料性能的影响规律。结果表明: 35%h-BN+5%DBP+15%501环氧复合材料综合性能最佳, 在80℃下的黏度为1498 mPa·s, 热导率达1.627 W/(m·K), 成功实现低黏度与高导热的协同优化。研究结果为开发兼具高导热与低黏度特性的环氧复合材料提供了新的设计思路。

**关键词:** 干式变压器; 环氧复合材料; 导热性能; 黏度

中图分类号: TM215.92

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)02-0021-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.02.004

## Study on Preparation and Properties of Epoxy Casting Materials with Low Viscosity and High Thermal Conductivity

HUANG Jun<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Bo<sup>1</sup>, XIONG Jiaming<sup>3</sup>, ZHOU Fusheng<sup>2,3</sup>

(1. School of Electronic Information, Xi'an Engineering University, Xi'an 710600, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 3. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** In the epoxy anhydride system, hexagonal boron nitride (h-BN) fillers modified by  $\gamma$ -aminopropyltriethoxysilane (KH550) were introduced, and diluents and toughening agents such as n-butyl glycidyl ether (501), 1,4-butanediol diglycidyl ether (622), and butyl phthalate (DBP) were added in combination to develop a high thermal conductivity, low viscosity epoxy composite suitable for dry-type transformers. The effects of h-BN fillers and different types and content of diluents and toughening agents on the properties of epoxy composites were systematically investigated. The results showed that the composite with 35%h-BN+5%DBP+15%501 exhibited the best overall performance. The viscosity of the epoxy composite at 80 °C was 1498 mPa·s, and the thermal conductivity reached 1.627 W/(m·K). The low viscosity and high thermal conductivity were successfully optimized simultaneously. The research findings provided a new design approach for developing epoxy composites with both high thermal conductivity and low viscosity.

**Keywords:** Dry-type transformers; Epoxy composites; Thermal conductivity; Viscosity

环氧复合材料广泛应用于干式变压器等设备绝缘件的浇注成型, 在树脂绝缘干式变压器中占据主导地位<sup>[1-6]</sup>。近年来, 国内外对环氧浇注料的研究不断成熟, 热导率从0.45~0.80 W/(m·K)提升至0.6~1.4 W/(m·K), 黏度从

3500 mPa·s降低至2000 mPa·s(80℃)<sup>[7]</sup>。然而, 海上风电用干式变压器的环氧浇注料仍面临散热效率低、存在气泡和空腔、可靠性不足等问题。而海上风电正向集约化、轻型化、高可靠性方向发展。作为海上风电平台的关键能量

收稿日期 Submitted date 2025-03-18; 修回日期 Revised date 2025-04-20; 录用日期 Accepted date 2025-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52107028)

\*联系人, yanghao@xpu.edu.com

引用本文: 黄骏, 杨昊, 张博, 等. 低黏度、高导热环氧浇注料的制备与性能研究[J]. 塑料科技, 2026, 54(2): 21-26.

Citation: HUANG J, YANG H, ZHANG B, et al. Study on preparation and properties of epoxy casting materials with low viscosity and high thermal conductivity[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(2): 21-26.

转换装置,干式变压器长期运行于高温、高压等恶劣环境,对其导热性能和固化过程中的黏度提出了更高要求。

导热性能直接影响设备的工作效率和使用寿命。国内外学者多通过添加高导热系数的无机陶瓷填料来增强环氧复合材料的导热率<sup>[8-16]</sup>。KIM等<sup>[17]</sup>制备具有取向性的六方氮化硼/环氧树脂(h-BN/EP)复合材料,显著提升了其导热性能。查俊伟等<sup>[18]</sup>对比了多种提升h-BN导热性能的方法,认为表面改性是最有效的途径。吴加雪等<sup>[19]</sup>对比不同填料共混模型对导热性能的提升效果,发现相同填充量下氮化硼(BN)填料的提升效果最为显著。然而,低填料填充量的环氧复合材料难以形成有效的传热通道,导热性能提升有限;而高填料填充量虽可获得较好的导热性能,但会导致填料分散性变差和复合材料黏度显著增加。

环氧复合材料的黏度对浇注工艺具有决定性影响。当浇注料的黏度小于3 500 mPa·s时,灌注过程更为均匀,不易产生气泡和空腔<sup>[20-21]</sup>。然而,填料的引入导致黏度增加,限制了环氧复合材料在浇注工艺中的进一步优化。SONG等<sup>[22]</sup>提出添加多尺度填料的方法来平衡导热性能与可加工性。陈辉<sup>[23]</sup>研究了稀释剂对环氧体系黏度的影响,发现添加0~30%的稀释剂具有最佳的降黏效果。目前,国内外对导热型灌封胶的研究多集中于小型电子元器件的灌封,这些材料普遍存在黏度大、流动性差的问题,难以应用于干式变压器的灌封。因此,在降低黏度的前提下提升导热性能,成为解决这一问题的关键。

本文从实际应用出发,提出一种适用于干式变压器固封绝缘的环氧配方。该配方以环氧酸酐为基体,h-BN为填料,调整改性剂的种类和含量,在降低黏度的同时兼顾导热性能,旨在为海上干式变压器环氧浇注料的自主研发提供一种新思路和新技术。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

双酚A型树脂,E51,上海麦克林生化科技股份有限公司;固化剂,甲基四氢苯酐,MTHPA,淡黄色透明油状液体,质量分数大于95%,上海麦克林生化科技股份有限公司;偶联剂, $\gamma$ -氨丙基三乙氧基硅烷,KH550,质量分数大于99%,上海麦克林生化科技股份有限公司;填料,h-BN,粒径1~2  $\mu\text{m}$ 和5~10  $\mu\text{m}$ ,上海麦克林生化科技股份有限公司;促进剂,苯酚,DMP-30,淡黄色至棕色透明液体,上海麦克林生化科技股份有限公司;稀释剂,正丁基缩水甘油醚(501)、1,4-丁二醇二缩水甘油醚(622)、丙酮醇(DAA),无色透明液体,上海麦克林生化科技股份有限公司;增韧剂,邻苯二甲酸丁酯,DBP,上海麦克林生化科技股份有限公司;增韧剂,DY-040,滁州惠盛电子材料有限公司。

### 1.2 仪器与设备

旋转黏度计,NDJ-9S,湖南力辰科技有限公司;磁力搅拌器,JB-80,上海司乐仪器有限公司;真空烘箱,DZF-

6053,上海蚁霖科学仪器有限公司;超声波振荡器,ZL10-250C,上海左乐仪器有限公司;扫描电子显微镜(SEM),TESCAN MIRA4,捷克TESCAN公司;X射线能谱仪(EDAX),XPLORE 30,英国牛津仪器公司;激光导热仪,LFA-447,德国耐驰公司;击穿测试装置,自制。

### 1.3 样品制备

#### 1.3.1 h-BN改性

不同粒径的h-BN改性过程一致。称取h-BN原料20 g,KH550、乙醇、去离子水水解质量比为1:10:562。分别称取KH550溶液0.8 g、无水乙醇8.0 g、去离子水450.0 g,在50  $^{\circ}\text{C}$ 条件下高速搅拌0.5 h,制得溶液a<sup>[24]</sup>。将制备好的溶液a倒入h-BN粉末中,于60  $^{\circ}\text{C}$ 条件下恒温中速搅拌振荡1 h,得到h-BN改性溶液。将均匀的乳白色混合溶液倒入真空泵抽滤,对抽滤所得的粗产物b在80  $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干。将粗产物b用研磨机进行物理研磨,得到改性h-BN细产物。

#### 1.3.2 环氧复合材料制备

表1为环氧复合材料的配方。质量分数为0、30%、35%和40% h-BN的环氧复合材料分别记为0%h-BN/EP、30%h-BN/EP、35%h-BN/EP和40%h-BN/EP。增韧剂添加量为总质量 $m$ 的2%、5%和7%,稀释剂添加量为总质量 $m$ 的15%、20%、25%和30%,其中 $m$ 为环氧复合材料样品原料质量总和。将制得的h-BN细产物加入双酚A环氧树脂中,在50  $^{\circ}\text{C}$ 下恒温搅拌,辅以超声振荡30 min,得到混合溶液a。将固化剂和改性剂(增韧剂、稀释剂)加入混合溶液a中,在50  $^{\circ}\text{C}$ 下恒温搅拌<sup>[25]</sup>,辅以超声振荡30 min,得到环氧复合溶液。采用重力浇注,待浇注完成,将模具放入50  $^{\circ}\text{C}$ 烘箱真空脱泡30 min。然后将模具放入烘箱中高温固化成型,固化条件为100  $^{\circ}\text{C}/4\text{ h}+120\text{ }^{\circ}\text{C}/2\text{ h}$ ,得到最终的环氧复合材料。

表1 环氧复合材料的配方

Tab.1 Formula of epoxy composites 单位:%

样品名称	$W_{E51}$	$W_{MTHPA}$	$W_{h-BN}$	$W_{DMP-30}$
0%h-BN/EP	69.300	29.700	0.000	1.000
30%h-BN/EP	48.510	20.790	29.700	1.000
35%h-BN/EP	45.045	19.305	34.650	1.000
40%h-BN/EP	41.580	17.820	39.600	1.000

### 1.4 性能测试与表征

SEM测试:采用扫描电子显微镜,在5 kV加速电压下观察经喷金处理的改性h-BN粉体表面的微观形貌<sup>[26]</sup>。

EDAX表征:采用X射线能谱仪,在5 kV加速电压下观察经喷金处理的h-BN粉体表面的微观元素分布。

黏度测试:依据GB/T 2794—2022采用旋转黏度计进行测试,测试温度为80  $^{\circ}\text{C}$ ,每降低5  $^{\circ}\text{C}$ 记录1次黏度。

导热性能测试:依据GB/T 22588—2008采用激光导热仪进行热导率测试,氮气气氛,温度节点为25、50、

80 °C,每个温度点闪射3次,取平均值进行表征。

**击穿性能测试:**击穿测试装置电极采用球球电极,球直径为25 mm。测试时,将试样夹在球球电极之间,电极与试样均浸没在变压器油中。依据GB/T 1408.1—2016,升压速度采用2 000 V/s<sup>[27-29]</sup>,每个配方测试10个样片,结果取平均值。测试样片为直径80 mm、厚度1 mm的圆片。

## 2 结果与讨论

### 2.1 h-BN对环氧复合材料黏度和导热性能的影响

#### 2.1.1 h-BN粒径与含量对黏度的影响

本文分别选取1~2 μm和5~10 μm粒径的h-BN制备质量分数为30%、35%和40% h-BN的环氧复合溶液。图1为h-BN粒径与含量对环氧复合溶液黏度的影响。从图1可以看出,不同粒径下环氧复合溶液的黏度性能均随着h-BN含量的增加而显著提高。这是由于固体颗粒之间的间距减小,减少了环氧树脂悬浮液的流动性,增强其内部的流动阻力。经对比可知,在相同h-BN含量下,1~2 μm配方的黏度远高于5~10 μm配方的黏度,符合h-BN黏度随粒径增大而降低的原理。然而,当h-BN质量分数≥30%时,5~10 μm的黏度在1.617 8~2.154 3×10<sup>4</sup> mPa·s,远大于3 500 mPa·s,无法满足干式变压器浇注工艺的实际要求。

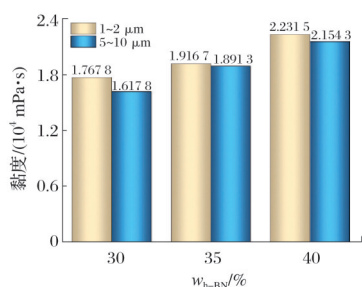


图1 h-BN粒径与含量对环氧复合溶液黏度的影响

Fig.1 Effect of h-BN particle size and content on viscosity of epoxy composite solutions

#### 2.1.2 h-BN粒径与含量对导热性能的影响

图2为h-BN粒径与含量对环氧复合材料导热性能的影响。从图2a可以看出,h-BN质量分数为40%的复合材料热导率最高,平均为1.155 W/(m·K),小于当前市面产品水平的1.400 W/(m·K)。从图2b可以看出,当h-BN的质量分数≥35%时,环氧复合材料的热导率升至1.451~1.939 W/(m·K),较1~2 μm粒径的热导率提高近68%,高于市面新产品配方的1.400 W/(m·K)。经对比可知,相同含量下的环氧复合材料热导率由粒径决定,粒径越大的h-BN对复合材料的热导率提升幅度越高。

图3为环氧复合材料的断面SEM照片和EDAX谱图。从图3b可以看出,Si元素的出现侧面证明了硅氧烷基团与h-BN表面的羟基充分反应,形成稳定的共价键连接,证明h-BN接枝改性的成功。改性后的h-BN与有机高分子之间的相互作用力增强,即与环氧酸酐交联度得到提升,改

善h-BN在环氧复合材料中的分散性。片状h-BN在环氧复合材料内部构建起一种层叠平铺的导热结构,如图3a所示。随着h-BN含量的不断增加,颗粒之间相互接触并逐渐交织,最终形成一条连续的导热通路。这一导热路径使热流能够在h-BN颗粒之间迅速传递,而h-BN本身所具备的高导热系数进一步加速了热量的扩散。因此,在h-BN本身的高导热性能与连续导热通路的协同作用下,复合材料的导热性能显著提升。

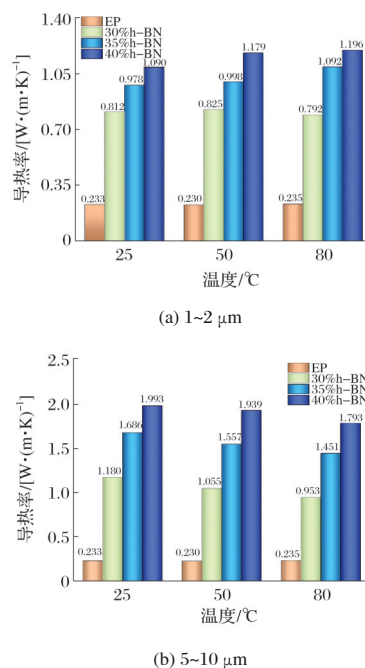
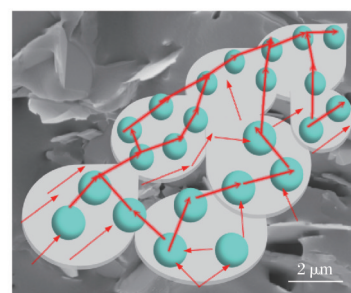
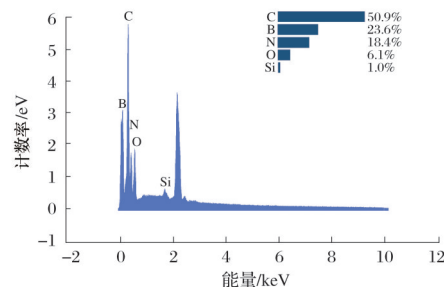


图2 h-BN粒径与含量对环氧复合材料导热性能的影响

Fig.2 Effect of h-BN particle size and content on thermal conductivity of epoxy composites



(a) 断面SEM照片



(b) EDAX谱图

图3 环氧复合材料的断面SEM照片和EDAX谱图

Fig.3 Section SEM image and EDAX spectra of epoxy composites

## 2.2 改性剂对环氧复合材料黏度和导热性能的影响

### 2.2.1 改性剂种类和含量对黏度的影响

环氧复合材料的黏度对于干式变压器的浇注过程至关重要,当前,环氧浇注料生产工艺的适用黏度在3 500 mPa·s以内。然而,从图1可以看出,h-BN掺杂下的环氧复合溶液黏度远高于生产实际要求。为解决环氧复合溶液黏度随着h-BN增加而骤升的问题,提出引入稀释剂的方法来调节复合溶液黏度。稀释剂添加量为环氧复合材料总质量 $m$ 的15%和30%,分别向环氧复合材料中加入501、622和DAA 3种稀释剂进行黏度测试,探究活性和非活性稀释剂的降黏效果。表2为稀释剂种类和含量对环氧复合溶液黏度的影响。从表2可以看出,加入相同含量稀释剂时,活性稀释剂501的降黏效果最佳。501质量分数为30%时,环氧复合溶液的黏度降至843 mPa·s,比622复配体系的黏度降低了82.9%,比DAA复配体系的黏度降低了95.3%,远低于两种非活性稀释剂,较市面浇注料2 000 mPa·s黏度水平降低57.85%。

表2 稀释剂种类和含量对环氧复合溶液黏度的影响

Tab.2 Effect of diluent types and content on viscosity of epoxy composite solutions

$W_{h-BN}+W_{\text{稀释剂}}/\%$	温度/°C	稀释剂种类	黏度/(mPa·s)	成型度
35+15	80	501	1 387	良
	80	622	7 933	较差
	80	DAA	22 315	较差
35+30	80	501	843	差
	80	622	4 933	差
	80	DAA	18 013	差

为探究501稀释剂降黏变化规律,分别向35%、40% h-BN的环氧复合溶液中加入不同含量的501稀释剂进行黏度测试。图4为501稀释剂含量对环氧复合溶液黏度的影响。从图4可以看出,环氧复合溶液的黏度均符合随温度的升高而降低的原理。其中h-BN质量分数为40%时,黏度在80 °C下为2 200 mPa·s,落后于当前干式变压器环氧浇注料的黏度水平。而h-BN质量分数为35%时,添加质量分数为15%、20%、25%和30% 501稀释剂的环氧复合溶液黏度曲线在80 °C时均小于1 500 mPa·s,与当前市面浇注料的黏度相比,降低25%。样品成型度为环氧复合材料内部是否可以形成平铺堆叠结构的关键,其对后续导热性能及击穿性能影响较大。因此,本文牺牲部分黏度性能以兼顾环氧复合材料的导热性能、成型度和击穿性能,选择35%h-BN+15%501复合材料作为后续实验的条件。

随着填料和稀释剂的加入,环氧复合材料表面易开裂,样品的成型度较差。本文提出加入增韧剂的方法,提升样品的成型度。为排除增韧剂的引入对复合溶液黏度的影响,在35%h-BN+15%501复合溶液中分别加入相同含量的DY-040和DBP增韧剂,探究其对复合溶液黏度性能的影响,

增韧剂质量分数为环氧复合溶液总质量 $m$ 的2%、5%和7%。表3为增韧剂种类和含量对环氧复合溶液黏度的影响。从表3可以看出,添加DY-040增韧剂样品的黏度随着增韧剂含量的增加而降低,添加7% DY-040的样品黏度比原先(1 387 mPa·s)降低了26.2%,侧面印证活性增韧剂参与反应,起到类似于稀释剂的作用。而添加DBP的样品黏度随含量的增加小幅度上升,添加7% DBP的样品黏度仅比原先(1 387 mPa·s)升高8%,侧面证明非活性增韧剂不参与反应,没有降黏效果。从样品成型度角度可以看出,DBP增韧剂的增韧效果更优。综合考虑可知,添加5% DBP的样品成型度最好,且黏度控制在1 500 mPa·s以内。因此,35%h-BN+5%DBP+15%501环氧复合材料可兼顾黏度性能和样品成型度,该配方为最优配方。

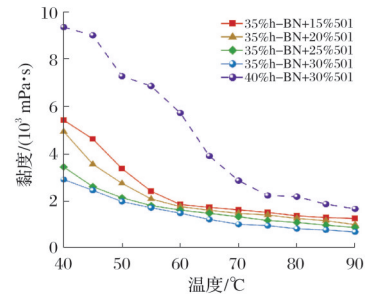


图4 501稀释剂含量对环氧复合溶液黏度的影响

Fig.4 Effect of 501 diluent content on viscosity of epoxy composite solutions

表3 增韧剂种类和含量对环氧复合溶液黏度的影响

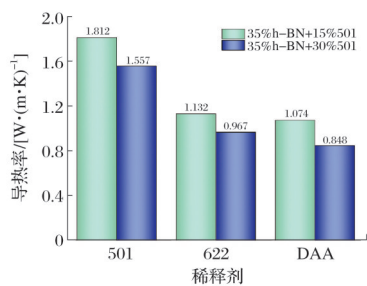
Tab.3 Effect of toughening agent types and content on viscosity of epoxy composite solutions

$W_{\text{增韧剂}}/\%$	温度/°C	增韧剂种类	黏度/(mPa·s)	成型度
2	80	DY-040	1 339	良
	80	DBP	1 406	良
5	80	DY-040	1 210	差
	80	DBP	1 498	优
7	80	DY-040	1 069	差
	80	DBP	1 576	优

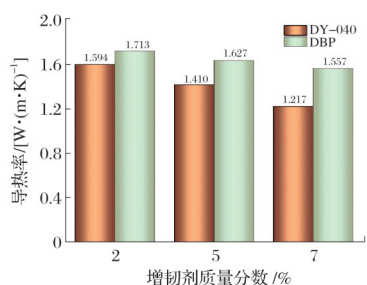
### 2.2.2 改性剂种类和含量对导热性能的影响

图5为改性剂种类和含量对环氧复合材料导热性能的影响。从图5a可以看出,热导率随着稀释剂含量的增加而降低,与添加15% 501的环氧复合材料相比,添加30% 501的环氧复合材料热导率降低14.1%,添加30% 622的环氧复合材料热导率降低14.6%,添加30% DAA的环氧复合材料热导率降低21.0%。结合表2可知,501稀释剂对导热性能的影响最小,添加15% 501的环氧复合材料热导率最佳。从图5b可以看出,增韧剂的引入也会降低环氧复合材料的热导率。其中,添加7% DY-040的样品热导率比添加2% DY-040的样品降低23.7%,而添加7% DBP的样品热导率仅比添加2% DBP的样品降低9.0%。显然,增韧剂DBP

的引入对环氧复合材料的导热性能影响最小。从样品成型度角度同样可以看出, DBP 增韧剂的增韧效果更优。综合考虑可知, 添加 5% DBP 的样品成型度最好, 黏度控制在 1 500 mPa·s 以内, 且热导率略高于 1.6 W/(m·K)。因此, 35%h-BN+5%DBP+15%501 环氧复合材料可兼顾黏度、导热性能和样品成型度, 该配方为最优配方。



(a) 稀释剂对环氧复合材料导热性能的影响



(b) 增韧剂对环氧复合材料导热性能的影响

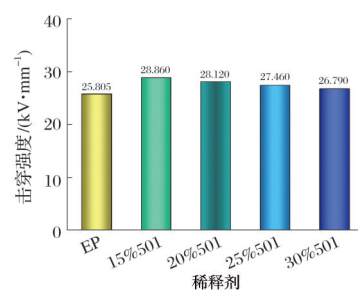
图5 改性剂种类和含量对环氧复合材料导热性能的影响

Fig.5 Effect of modifier types and contents on thermal conductivity of epoxy composites

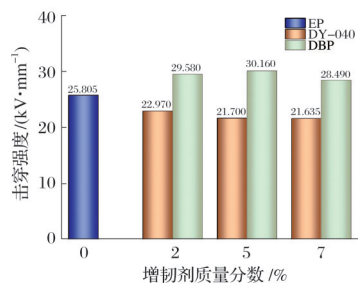
### 2.3 改性剂对环氧复合材料击穿性能的影响

图6为改性剂含量对环氧复合材料击穿性能的影响。从图6a可以看出, 环氧复合材料样片的击穿性能随着稀释剂含量的增加而降低, 添加30% 501的环氧复合材料击穿强度比添加15% 501的环氧复合材料降低7%。结合表2可知, 样片表面开裂和成型度较差问题使环氧复合材料的击穿强度下降, 侧面证明稀释剂含量的增加导致复合材料击穿性能下降。从图6b可以看出, 添加DBP样品的击穿强度整体高于同等含量下添加DY-040的样品。添加DY-040的样品击穿强度随含量的增加而小幅度下降, 基本处于21.7 kV/mm, 比纯环氧酸酐样片的击穿性能下降16%。而添加DBP样品击穿强度变化规律呈马鞍形, 在DBP质量分数为5%时达到最大值, 复合材料击穿强度为30.16 kV/mm, 较纯环氧酸酐样片提高16.88%, 略高于市面干式变压器环氧浇注料击穿强度的25~28 kV/mm。

图6中无增韧剂和添加DBP的环氧复合材料击穿强度较未添加h-BN的环氧样品提升的原因可能是由于片状h-BN在环氧酸酐基体中平铺堆叠, 干扰正常的电荷迁移, 使注入的电荷无法直接通过, 增加其在复合材料中的导通长度, 限制电荷在复合材料内部的迁移, 从而提升环氧复合材料的击穿强度。



(a) 稀释剂对环氧复合材料击穿性能的影响



(b) 增韧剂对环氧复合材料击穿性能的影响

图6 改性剂含量对环氧复合材料击穿性能的影响

Fig.6 Effect of modifier content on breakdown performance of epoxy composites

图7为环氧复合材料的电荷迁移通道。而添加DY-040的环氧复合材料击穿强度较未添加h-BN的环氧样品击穿强度下降可能是由于DY-040活性增韧剂所具有的降黏效果, 破坏了h-BN在基体中沿厚度方向的堆叠, 使电荷在内部的迁移过程更便捷, 从而降低环氧复合材料的击穿强度。

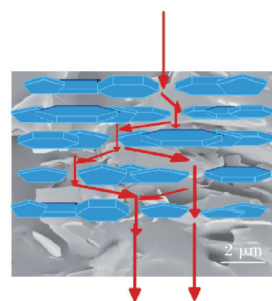


图7 环氧复合材料的电荷迁移通道

Fig.7 Charge migration channels of epoxy composites

### 2.4 不同环氧复合材料的综合性能分析

采用加入改性剂的方法在降低环氧复合材料黏度性能的同时, 更好地兼顾其导热性能和绝缘性能, 该方法对复合材料样品成型度影响较小。图8为不同环氧复合材料的综合性能对比。从图8可以看出, 35%h-BN+5%DY-040+30%501环氧复合材料实现最低的黏度性能811 mPa·s, 但其导热性能和绝缘性能最差。加入15% 501的DY-040环氧复合材料导热性能和绝缘性能与加入30% 501的DY-040环氧复合材料相似, 综合性能均处于较差水平。35%h-BN+5%DBP+15%501环氧复合材料尽管黏度高达1 498 mPa·s, 但其导热性能和绝缘性能最优, 热导率和击穿强度分别为1.627 W/(m·K)和30.16 kV/mm。加入30%

