

有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘高温导线的研究

谢 历, 瞿晓芬, 彭 博

(上海电缆研究所有限公司 特种电缆技术国家重点实验室, 上海 200093)

摘 要:通过有机-无机复配技术,采用有机硅-纳米氧化铝溶胶涂覆石英纤维绕包层制备耐高温绝缘层。通过SEM、FTIR、XRD等表征技术对有机硅-纳米氧化铝溶胶涂层的微观形貌与结构进行分析,采用TG-DSC分析有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆的热稳定性能,并对高温导线进行常温与高温绝缘性能和击穿电压性能测试。结果表明:有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆具有良好的热稳定性,能够显著提升石英纤维绕包层的耐温等级,并且高温导线表现出良好的高温绝缘性和高耐电压性,在800℃时的电阻率大于1 MΩ·m,常温击穿电压超过2 000 V,适用于航空、航天领域中的高温和高压等特殊环境。

关键词:有机硅; 纳米氧化铝溶胶; 石英纤维; 高温绝缘

中图分类号: TM215; TM247 DOI: 10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.02.006

Study on organic silicon-nano alumina sol composite insulated high temperature wire

XIE Li, QU Xiaofen, PENG Bo

(State Key Laboratory of Special Cable Technology, Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract: By using organic-inorganic composite technology, the high temperature resistant insulation layer was prepared by coating quartz fiber wrap cladding with silicone nano alumina sol. The micro morphology and structure of the organic silicon-nano alumina sol coating were analyzed by SEM, FTIR, XRD and other characterization techniques. The thermal stability of the organic silicon-nano alumina sol composite insulating paint was analyzed by TG-DSC. The insulation performance and breakdown voltage performance of high-temperature wire were tested at room temperature and high temperature. The results show that the organic silicon-nano alumina sol composite insulating paint has good thermal stability, and it can significantly improve the temperature resistance level of the glass fiber wrap cladding. The high-temperature wire shows good high temperature insulation and high voltage resistance. At 800℃, the electrical resistance is greater than 1 MΩ·m, and the normal temperature breakdown voltage is greater than 2 000 V. It is suitable for special environments such as high temperature and high voltage in the aviation and aerospace fields.

Key words: organic silicon; nano alumina sol; quartz fiber; high temperature insulation

0 引言

随着我国航空、航天等领域发动机技术的快速发展,相应的动力电机设备性能要求也逐步提升,其通常需要能够在高温(500℃以上)、酸碱、潮湿、原子辐射等特殊环境下稳定工作1 000 h以上^[1-3]。高温导线作为电机设备的关键组件,其性能指标能够直接影响设备的使用性能、高温稳定性以及使用寿命。现阶段国内耐高温导线生产技术与国外领先水平仍有较大的差距,不仅面临着成本高、生产能力不足等挑战,而且研制出的产品还有许多缺陷,如材料尺寸较大、抗高温烧蚀能力差、高温下绝缘性能差等^[4-5]。

为了提高导线的高温绝缘性和稳定性,耐高温绝缘材料的发展引起了研究者的广泛重视。随着高温超导技术的发展,对于绝缘层相关技术要求也逐渐提升。由美国Phelps Dodge公司研发出的单层、双层、三层高温绝缘层电磁线,具有良好的应用效果,并已经在多个领域得到应用^[6]。E CELIK等^[7]使用银线为金属导体,采用溶胶-凝胶法在其表面制备出具有较好耐高温性能的ZrO₂-MgO涂层。S JUMONJI等^[8]在导体材料外侧涂敷一层陶瓷涂层,然后在陶瓷层表面覆盖有机涂层,该导线能够在500℃以下长期使用,目前主要用于核电站。美国伊利诺工艺研究院采用耐高温无机陶瓷涂层作绝缘层,改性铜合金表面镀镍作芯线研制的高温导

线,使用温度可达到1 000℃。法国 THERMO-COAX 公司采用新型耐高温绝缘胶作为导线绝缘层,经高温烧结合型后,在600℃高温下绝缘层电阻率达到10 MΩ·m,在航空、航天领域取得成功的应用。与国外先进技术相比,高温导线在国内的发展比较缓慢,通常击穿电压约为600 V,工作温度难以超过500℃,当使用环境温度高于650℃时,绕组线表面粉化严重,基本丧失绝缘性能,无法满足使用需求。周范能等^[9]将熔融状的石英涂敷在镀镍铜线的表面,制备出耐温等级为400℃的陶瓷电磁线。此外,国内有关单位对Na₂O-B₂O₃-SiO₂系、磷酸铝硅质和K₂O-PbO-SiO₂系涂层的高温导线开展了研究,在500℃时导线电阻率可达20 MΩ·m,650℃时仍可达到5 MΩ·m,但该类绝缘层质地较硬、绕弯与抗震性能差、高温下绝缘层易脱落,同时制备工艺较为复杂。溶胶-凝胶法是制备涂层的常用方法之一,韩旭等^[10]采用正硅酸乙酯、无机盐等为原料,采用溶胶-凝胶法制备出溶胶,并向溶胶中加入Cr₂O₃,然后在800℃烧结得到耐高温绝缘涂料,材料的电阻率可以达到5.77×10⁸ Ω·m。但是目前将涂层优异的耐热性与随基体的可挠曲性相结合的报道仍比较匮乏。解决国内高温导线产品存在的诸多问题,实现关键技术的突破仍然需要进一步努力。

耐高温绝缘材料通常有3种类型:有机型、无机型、有机-无机复合型,其中有机-无机复合型绝缘材料兼具无机材料的耐高温性、高绝缘性和有机材料的高附着力、抗开裂性强、良好柔韧性等优点^[11-13]。纳米粒子具有量子尺寸效应和比表面效应,适量的添加能够显著提升复合材料的介电性能,因此,制备无机纳米粒子-有机聚合物复合绝缘层成为当前研究的热点^[14-15]。日本的M MASKAZU等^[16]将PAI(聚酰胺酰亚胺)和二氧化硅进行交联制备了耐高温的聚合物-SiO₂复合绝缘层。杨欣等^[17]采用纳米TiO₂改性PAI,成功制备了纳米改性聚合物,并将电磁线的寿命提高了7倍。

目前,国内研制的高温导线通常以有机绝缘漆、石英纤维丝或无机氧化物作为绝缘层。但受到石英纤维丝和绝缘漆本身耐热和绝缘性能的限制,通常其击穿电压约为600 V,工作温度难以超过500℃。与该结构类似的乌克兰HIOЖ700导线,采用石英纤维结合高温绝缘漆作为绝缘层,基本解决了导线高温绝缘的问题,该高温导线的室温电阻率大于1 000 MΩ·m,在650℃高温下电阻率大于10 MΩ·m,具有良好的耐环境氧化性。有机硅树脂具有优良的热稳定性、抗氧化性、耐辐照和耐电弧等

优点,其作为C级无溶剂浸渍绝缘漆已经成功应用于高性能变频牵引电机的绝缘系统中^[18]。氧化铝溶胶具有良好的成膜性,高温成型后具有介电常数高、绝缘性优良、金属离子渗透率低、导热系数高、抗辐射能力强、化学稳定性优良等特点^[19]。

本研究通过复合有机硅树脂与纳米氧化铝溶胶制备耐高温绝缘浸渍漆并涂覆在石英纤维绕包层表面,研制出耐高温导线,改进传统的电磁线绝缘材料,期望为航空、航天领域高温导线的发展提供一定的研究基础。

1 实验

1.1 主要原材料

有机硅树脂,THQA800-NS型,上海电缆研究所有限公司;纳米氧化铝溶胶,A1010/SINAPROSPER型,郑州锦仲新材料科技有限公司。

1.2 有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆的制备

本实验采用的导体材料为镀镍圆铜线,绝缘层为有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆浸渍石英纤维绕包层。本实验采用有机硅树脂和30%纳米氧化铝溶胶配制复合绝缘漆。配制有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆时,需综合考虑绝缘漆黏度、绝缘性能和制备工艺等因素。根据以往绝缘漆的配制经验,在本实验中选用有机硅树脂与浓度30%纳米氧化铝溶胶以1:3的体积比混合,然后在室温环境下经充分搅拌3 h后待用。

1.3 有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘高温导线的制备

高温导线试制过程为对镀镍导体进行石英纤维绕包,然后采用提拉法进行多次涂覆复合绝缘漆,每涂覆1道耐高温绝缘漆都要经过一次烘炉加热固化,导线浸漆的线速度为2.0 m/min。制备结束后,将导线置于200℃烘箱中保温2 h,使溶剂挥发,增加氧化铝溶胶黏性并生成氧化铝薄膜,同时促进有机硅树脂固化。

1.4 测试与表征

使用X射线衍射仪(X'Pert3 Powder型, Malvern Panalytical公司)测量有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆800℃烧结前后晶体结构的变化,采用Cu靶,波长λ=0.154 05 nm,管电压为40 kV,电流为30 mA,扫描范围为10°~80°。使用傅里叶红外光谱仪(Nicolet iS20型, Thermo Scientific公司)测试有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆800℃烧结前后的红外光谱。使用同步热分析仪(STA 449F3, Netzsch公司)对有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘

漆进行热重和差热分析,测试温度为30~900℃,升温速率为10℃/min,采用氮气作为保护气体。采用冷场发射扫描电子显微镜(S-4700型,日本日立公司)对涂敷有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆的高温导线800℃烧结前后的表面形貌进行观测。使用高绝缘电阻测量仪(ZC-90G型,上海太欧电子有限公司)测量高温导线常温与800℃时的电阻率,并采用自动电压试验仪(WDY-II型,常州威远电工器材有限公司)测量高温导线的击穿电压。

2 结果与讨论

2.1 高温导线绝缘材料的性能测试分析

2.1.1 复合绝缘漆的XRD分析

高温导线的结构示意图如图1所示,从内到外分别为导体、石英纤维绕包层和有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆层。X射线衍射能够定性分析材料的物相与组成,因此可用来研究有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆在800℃高温煅烧前后的结构和组成的变化,其XRD谱图如图2所示。

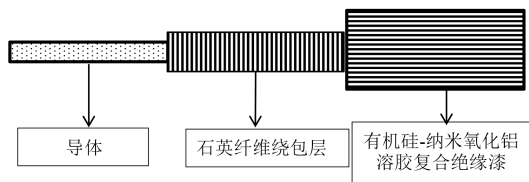


图1 高温导线的结构示意图

Fig.1 Structure diagram of high-temperature conductor

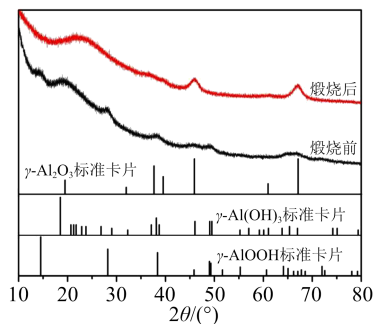


图2 有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆高温煅烧前后的XRD谱图

Fig.2 XRD patterns of silicone-nano alumina sol composite insulating paint before and after calcination at high temperature

从图2可以看出,有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆的衍射图谱信噪比较差,这是典型的结晶程度低的现象。复合绝缘漆煅烧前在2θ分别为14.52°、28.20°、38.36°处形成3个小的衍射峰,这些衍射峰与γ-AlOOH的标准卡片匹配完好^[20]。此外,在2θ为18.75°处有一个较宽的突起衍射峰,它与Al(OH)₃的标准卡片较为吻合^[21]。研究表明^[22],碱性

Al(OH)₃溶液受热脱水能够触发γ-AlOOH的成核,因此这个结果说明在固化过程中Al(OH)₃溶胶会发生脱水,然后再进一步转化为γ-AlOOH。由于热处理不完全,因而在固化绝缘漆中仍存在一定量的Al(OH)₃相。从高温煅烧后复合绝缘漆的XRD图谱可以观察到,Al(OH)₃与γ-AlOOH的衍射峰基本完全消失,而样品在2θ为45.91°和67.06°出现两个较为尖锐的衍射峰,它们与γ-Al₂O₃的标准卡片相对应。在2θ为22°左右出现一个较宽的弥散衍射峰,这为典型的非晶态SiO₂衍射峰^[23]。从这个结果可以推测出,固化后的有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆在高温下发生脱水与分解反应,有机硅树脂受热分解,其留存的产物主要为非晶态SiO₂,而纳米氧化铝溶胶会先转化为γ-AlOOH,然后随着温度的升高进一步脱水转化生成更为稳定的γ-Al₂O₃。

2.1.2 复合绝缘漆的FTIR分析

为了进一步对有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆煅烧前后的结构变化进行探究,采用红外光谱分析对样品的结构进行表征。图3为固化有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆在800℃高温煅烧前后的红外光谱图。

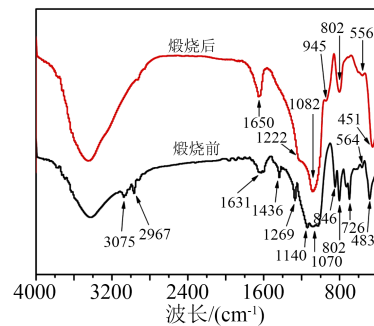


图3 有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆高温煅烧前后的FTIR谱图

Fig.3 FTIR spectra of silicone-nano alumina sol composite insulating paint before and after high temperature calcination

从图3可以看出,热煅烧前的样品有多组红外吸收特征峰,3 400~3 600 cm⁻¹处为-OH基团的吸收峰,1 631 cm⁻¹处为H₂O的振动吸收峰^[24],2 967 cm⁻¹为有机基团-CH₃的伸缩振动吸收峰。1 269 cm⁻¹和802 cm⁻¹为苯甲基树脂中侧链基团Si-CH₃的吸收峰。在3 075 cm⁻¹和1 140 cm⁻¹处的吸收峰分别对应于苯环氢和Si-O-C的伸缩振动,在846 cm⁻¹和1 436 cm⁻¹两处的吸收峰分别归因于Si-C₆H₅的伸缩振动和苯环中C=C骨架振动,这些特征峰都对应于有机硅树脂的吸收峰^[25-26]。此外,在483 cm⁻¹和

1 070 cm^{-1} 处为 Al-OH 的振动吸收峰^[27], 726 cm^{-1} 处主要是 Al-O-Al 的振动吸收峰^[28], 这个结果说明固化后的有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆中的主要成分为有机硅树脂和 γ -AlOOH。观察高温煅烧后的样品红外光谱图可知, 有机硅树脂的特征峰基本消失, 说明有机硅树脂在高温煅烧过程中发生了裂解, 同时也出现了一些新的衍生峰, 在 1 082 cm^{-1} 处为 Si-O-Si 的振动吸收峰, 451、556、945 cm^{-1} 处为 Al-O-Al 的振动吸收峰。结合上述分析可以推测出固化后的有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆在高温煅烧后生成的产物主要为非晶态 SiO_2 和 γ - Al_2O_3 。

2.1.3 复合绝缘漆的 TG-DSC 分析

对有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆煅烧过程中结构的转化做进一步研究, 通过对固化后的有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆样品进行热重和差热分析, 得到样品的 TG-DSC 曲线如图 4 所示。

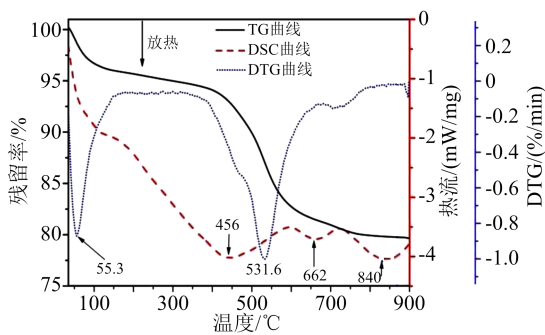


图4 有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆 TG-DSC 曲线

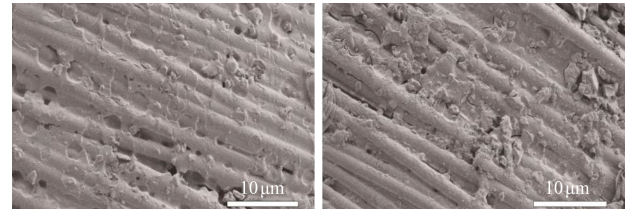
Fig.4 TG-DSC curves of silicone-nano alumina sol composite insulating paint

从图 4 的 TG 曲线可以看出, 样品的质量在 30~150 $^{\circ}\text{C}$ 下降较快, 这是由于样品受潮所吸收的水分蒸发而引起的质量下降, 下降速率最快的点对应于 DTG 曲线中的 55.3 $^{\circ}\text{C}$ 处。随后质量下降速率减缓, 直到 400~750 $^{\circ}\text{C}$ 时出现较大的质量损失, 这归因于有机硅树脂受热分解和氧化铝溶胶脱水, 下降速率最快的点对应于 DTG 曲线中的 531.6 $^{\circ}\text{C}$ 处。样品的质量在 750~900 $^{\circ}\text{C}$ 下降较为缓慢, 趋于平稳。随着温度的升高, 有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆样品的 DSC 曲线首先在 456 $^{\circ}\text{C}$ 处形成一个较宽的放热峰, 该放热峰的形成主要有两个原因, 一是由于有机硅树脂的高温燃烧分解, 二是由于 γ -AlOOH 向 γ - Al_2O_3 的晶相转变^[29]。当温度继续升高时, 出现非晶态 γ - Al_2O_3 逐渐向晶态 γ - Al_2O_3 的转化过程, 因而在 662 $^{\circ}\text{C}$ 处形成一个放热峰。当温度进一步升高时, 在 840 $^{\circ}\text{C}$ 时出现一个放热峰, 该放热峰的形成主要来自于晶态 γ - Al_2O_3 转化为其他结构

Al_2O_3 时的放热。

2.1.4 复合绝缘层的 SEM 分析

为了探究有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆涂覆高温导线的热稳定性, 使用扫描电镜观测高温导线经 800 $^{\circ}\text{C}$ 煅烧 30 min 前后的形貌, 结果如图 5 所示。



(a)煅烧前

(b)煅烧后

图5 高温导线绝缘层煅烧前后的 SEM 图

Fig.5 SEM images of insulation layer of high temperature wire before and after calcination

从图 5(a)可以看出, 有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆完整的涂覆在石英纤维绕包层的外表面, 表面较为光滑, 复合绝缘漆与石英纤维丝粘结紧密, 无明显脱落、开裂的痕迹。涂覆的绝缘漆厚度较薄, 因而在石英纤维丝间隙位置未浸润完全, 存有一些孔洞。从图 5(b)可以看出, 有机硅-纳米氧化铝溶胶复合绝缘漆烧结产物紧密附着在石英纤维丝的表面, 形成致密的陶瓷层, 并且能够填充石英纤维丝间的空隙, 使高温导线仍具有一个完整的表面结构。此外, 在烧结后样品的表面有许多纳米级的小颗粒, 这可以推测出纳米氧化铝溶胶在高温下析出了纳米氧化铝, 在石英纤维丝的表面烧结形成了一个耐高温的保护层, 进而改善了高温导线的高温稳定性。

2.2 高温导线的性能测试分析

2.2.1 高温导线的击穿电压测试分析

参考 GB/T 4074.5—2008《绕组线试验方法 第 5 部分: 电性能》^[30] 测试高温导线的常温击穿电压性能, 测得 5 组样品的击穿电压分别为 2 100、2 000、2 500、2 200、2 400 V, 均高于 2 000 V, 造成的测试结果之间的偏差原因可能是绝缘层的不均匀或是制样过程中扭绞导致样品受力不同导致的。测试结果表明有机硅树脂-纳米氧化铝溶胶绝缘浸渍漆涂覆石英纤维绕包层构成的绝缘层具有高的击穿电压, 能够适用于 2 000 V 高压环境中。

2.2.2 高温导线的绝缘电阻率测试分析

根据 GB/T 3048.5—2007《电线电缆电性能试验方法 第 5 部分: 绝缘电阻试验》^[31] 测试高温导线不同温度下的电阻率, 结果如图 6 所示。从图 6 可以看

出,高温导线在常温时的电阻率为 $6.50 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{m}$,说明有机硅树脂-纳米氧化铝溶胶绝缘浸渍漆涂覆的石英纤维绕包层具有较好的绝缘性能。高温导线的高温电阻率(高温下保温0.5 h后测试)随着温度的升高逐渐降低,在 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ 下降较快,在 $700 \sim 800^\circ\text{C}$ 下降趋于平缓。结合上述分析可知,电阻率在 $500 \sim 600^\circ\text{C}$ 范围内的快速下降是有机硅树脂的分解造成的,而在更高温度下由纳米氧化铝溶胶转化生成的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 与有机硅分解产物附着在石英纤维绕包层的表面构成了耐高温的陶瓷保护层,从而赋予了高温导线良好的高温稳定性和绝缘性能。

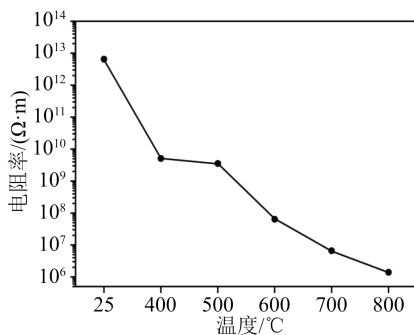


图6 高温导线不同温度时的电阻率

Fig.6 Resistivity of high temperature conductor at different temperature

3 结论

(1)有机硅树脂与纳米氧化铝溶胶混合配制的绝缘漆具有良好的黏性和成膜性,可以均匀涂敷并紧密粘附在石英纤维绕包层的外表面,并且固化后漆膜无脱落开裂等现象,经过高温煅烧后高温导线的绝缘层仍然能够保持良好的整体结构。

(2)在高温条件下,纳米氧化铝溶胶发生脱水以及 $\gamma\text{-AlOOH}$ 向 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 晶体结构的转变,此外,有机硅树脂也发生分解并以无定形 SiO_2 的形式留存,两者能够附着在石英纤维绕包层的表面构成致密的保护层,从而赋予了高温导线良好的高温稳定性和绝缘性。

(3)有机硅-纳米氧化铝溶胶绝缘浸渍漆涂覆石英纤维绕包层构建的绝缘层具有较好的绝缘性能,在常温状态下电阻率超过 $10^6 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}$,在 800°C 保温0.5 h后电阻率仍超过 $1 \text{ M}\Omega \cdot \text{m}$,并且高温导线常温击穿电压大于2 000 V,表明高温导线能适应于高温和高压等工作环境。

参考文献:

[1] KONG F Z, YIN W Y, MAO J F, et al. Electro-thermo-mechanical characterizations of various wire bonding interconnects illumi-

nated by an electromagnetic pulse[J]. IEEE Transactions on Advanced Packing,2010,33(3):729-737.

- [2] 胡志勇,刘雪峰,王自东,等.石英包覆金属微丝快速凝固制备及应用[J].材料导报,2004,18(9):8-11.
- [3] DI Y J, JIANG J J, BIE S W, et al. Collective length effect on the magnetostatic properties of arrays of glass-coated amorphous alloy microwires[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials,2008,320(3-4): 537-539.
- [4] UGLIETTI D. A review of commercial high temperature superconducting materials for large magnets: From wires and tapes to cables and conductors[J]. Superconductor Science and Technology,2019,32(5):053001.
- [5] 李俊祥,徐婕,莫晓芸,等.新型耐高温导线的研制[J].光纤与电缆及其应用技术,2009,4:18-21.
- [6] CHUNG H, LEE J, JANG W, et al. Stress behaviors and thermal properties of polyimide thin films depending on the different curing process[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics,2000,38(22):2879-2890.
- [7] CELIK E, MUTLU I H, HASCICEK Y S. Electrical properties of high temperature insulation coatings by the sol-gel method for magnet technology[J]. IEEE transactions on Applied Superconductivity,2000,10(1):1341-1344.
- [8] JUMONJI S, SENOO J, UEDA K, et al. Super heat resistant ceramic insulated wire[C]//Proceedings: Electrical Electronics Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference. Rosemont, USA: IEEE,1995:557-563.
- [9] 周范能,邱长军,陈平虎.新型无机绝缘电磁线的制备与表征[J].绝缘材料,2012,45(5):16-18.
- [10] 韩旭,陈敏,王跃华.溶胶-凝胶法制备耐高温绝缘涂料[J].大连工业大学学报,2008,27(2):137-139.
- [11] 王李军.耐高温绝缘涂层的技术研究[D].南京:南京理工大学,2004.
- [12] 姜立萍.耐高温绝缘涂料的研制[J].现代涂料与涂装,2000(3):12-15.
- [13] 王国志,范宗良,孟军峰,等.高频涡流线圈用高温绝缘抗开裂涂料的研制[J].涂料工业,2008,38(4):42-44.
- [14] 成昊霖,周剑林,曾荣今.纳米 SiO_2 表面改性及耐电晕漆包线漆的制备[J].绝缘材料:2023,56(3):9-13.
- [15] 李亮荣,倪智超,陈祖杰,等.无机纳米粒子改性聚酰亚胺电学性能研究现状[J].绝缘材料,2022,55(8):1-5.
- [16] MASKAZU M, HIDEKI G. Hybrid composites of polyamide-imide and silica applied to wire insulation[J]. Polymer journal, 1992,24:107.
- [17] 杨欣,施利毅,马寒冰,等.纳米复合电磁线绝缘材料制备和表征[J].上海大学学报:自然科学版,2003,9(6):537-542.
- [18] 孙争光,朱杰,黄世强.有机硅涂料研究进展[J].有机硅材料, 2000,14(4):21-24.
- [19] 牛迪.基于MEMS技术的高温绝缘层制备方法的研究[D].上海:上海交通大学,2016.
- [20] SUN Y, WANG H, LI P, et al. Effects of the facet orientation of $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ support on the direct synthesis of H_2O_2 catalyzed by Pd nanoparticles[J]. European Journal of Inorganic Chemistry,2018, 2018(16):1715-1725.

- [21] WANG D, LI Z, LÜ F, et al. Synthesis of nucleoshell γ -AlOOH as an ultra-high-capacity adsorbent for organic pollutants removal[J]. *Colloid and Interface Science Communications*,2022,50: 100658.
- [22] FENG H, WANG H, MA Z, et al. Quantification of surface orientation effect on the thermal stability of γ -Al₂O₃ with different morphologies[J]. *Applied Surface Science*,2022,594:153509.
- [23] PATTNAYAK A, MADHU N, PANDA A S, et al. A Comparative study on mechanical properties of Al-SiO₂ composites fabricated using rice husk silica in crystalline and amorphous form as reinforcement[J]. *Materials Today: Proceedings*,2018,5(2):8184-8192.
- [24] DU Y, WANG C, YANG L, et al. Enhanced oxidation and corrosion inhibition of 1Cr11Ni₂W₂MoV stainless steel by nano-modified silicone-based composite coatings at 600 °C [J]. *Corrosion Science*,2020,169:108599.
- [25] 邹铭,王丹,赵莉,等. 常温固化耐高温 400 °C 的有机硅-聚硅氮烷涂料[J]. *表面技术*,2018,47(5):83-90.
- [26] JIA P, LIU H, WANG Y, et al. A novel epoxy-functionalized hyperbranched polysiloxane (HPSi) endowing methyl phenyl silicone resin (Si603)/epoxy systems with enhanced compatibility and fire retardancy performance[J]. *RSC Advances*,2015,5(118): 97413-97421.
- [27] MOZGAWA W, KROL M, BAJDA T. Application of IR spectra in the studies of heavy metal cations immobilization on natural sorbents[J]. *Journal of Molecular Structure*,2009,924:427-433.
- [28] ADAMCZYK A, DLUGON E. The FTIR studies of gels and thin films of Al₂O₃-TiO₂ and Al₂O₃-TiO₂-SiO₂ systems[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*,2012,89:11-17.
- [29] ZHANG X, WU Y, LIU G, et al. Investigation on sol-gel boehmite-AlOOH films on Kapton and their erosion resistance to atomic oxygen[J]. *Thin Solid Films*,2008,516(15):5020-5026.
- [30] 全国电线电缆标准化技术委员会. 绕组线试验方法 第 5 部分: 电性能:GB/T 4074.5—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [31] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电线电缆电性能试验方法 第 5 部分:绝缘电阻试验:GB/T 3048.5—2007[S]. 北京:中国标准出版社,2007.

收稿日期:2023-01-10;修回日期:2023-01-31。

作者简介:谢历(1994-),男(汉族),湖北孝感人,工程师,主要从事特种绕组线及耐高温绝缘漆的研究。