

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2017.10.011

环氧复合绝缘子 APG 制造工艺分析^{*}

申巍¹, 尹立², 李飞², 张肿², 杨威², 陈新², 张鹏¹

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710054; 2. 全球能源互联网研究院, 先进输电技术国家重点实验室, 北京 102209)

摘要: 主要阐述了环氧复合绝缘子的自动压力凝胶 (APG) 工艺技术, 重点分析了 APG 工艺对环氧材料和模具的要求、材料预处理及成型温度和压力设定, 并提出了环氧复合绝缘子在制造中常见的环氧固化收缩和开裂常见缺陷的原因与解决对策。

关键词: 自动压力凝胶成型工艺; 环氧树脂; 复合绝缘子; 制造工艺

中图分类号: TM216+.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2017)10-0057-06

Analysis of APG Manufacturing Process for Epoxy Composite Insulators

Shen Wei¹, Yin Li², Li Fei², Zhang Chong², Yang Wei², Chen Xin², Zhang Peng¹

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Transmission Technology, Global Energy Interconnection Research Institute, Beijing 102209, China)

Abstract: The automatic pressure gel (APG) process technology of epoxy composite insulators was mainly discussed. The requirements of APG process for epoxy material and mould, material pretreatment, molding temperature and pressure setting were analyzed emphatically, and the causes and solutions for common defects of epoxy curing shrinkage and cracking in epoxy composite insulators manufacture were put forward

Keywords: automatic pressure gel-forming technology; epoxy resin; composite insulator; manufacturing process

我国线路绝缘子发展和应用至今已有近百年的历史,其中复合绝缘子开始于 20 世纪 80 年代初,相比于瓷和玻璃绝缘子起步较晚,但依赖于国外开发经验起点较高。瓷、玻璃和硅橡胶复合绝缘子性能各有优劣,其中瓷绝缘子为三相共存(玻璃相、结晶相和气孔)的非均质材料,内部缺陷较多,长期使用存在缺陷扩展的隐患,进而使其力学性能下降甚至失效,但这些缺陷不易发现,必须登杆对绝缘子逐片进行劣化检测等运行维护工作^[1-3]。钢化玻璃绝缘子具有零值自爆特性,不存在零值检测问题。上述瓷和玻璃为无机硅酸盐类材料,机械、电气性能优异,具有先天的耐紫外优势,但防污闪性能不足,需要定期清扫,维护成本高。硅橡胶复合绝缘子的机电性能优良、质量轻、制造工艺简单,特别是其优异的防污闪性能使其成为用量最大的一类线路绝缘子,不存在零值检测的问题,运行维护简单^[4-6],但其硅橡胶伞裙的力学强度低,易被鸟啄、强风损伤,且不可踩踏,也给线路维护带来诸多不便。针对上述问题,国内外正在开展环氧复合绝缘子的开发工作,它综合了瓷、玻璃和硅橡胶的优势,能够实现防鸟啄、抗强风损伤、耐踩踏和防污闪的目的。脂环族环

氧(简称环氧)本体优异的耐紫外耐候性能使其使用寿命有效提高,综合性能突出。

环氧复合绝缘子的结构形式与硅橡胶复合绝缘子的基本结构一致,但成型工艺与其有明显差异,该产品适宜采用环氧自动压力凝胶 (APG) 技术成型,其工艺原理是: 首先将嵌件装入模具中,将模具温度设定到比环氧混合料高 80~100℃,然后通过 APG 设备的加压系统,将混合料通过管道注入高温模腔,环氧混合料与高温模具进行快速热交换,初始靠近模腔壁的环氧混合料在短时间内达到高温状态发生凝胶固化,并发生固化体积收缩,而此部分收缩则依靠仍处于压力下的液态环氧混合料来快速补充,直至整个模腔内部环氧混合料全部凝胶后,系统压力补偿才停止,继续高温固化使产品具备足够的强度后进行脱模得到制品。此种固化方式能较好地控制固化反应放热,并在持续的压力注料下实现对固化收缩的补偿,能够实现制品表面光滑、内应力低、产品致密、一致性好、尺寸精度高、成品率高、生

^{*} 国网陕西省电力公司科技项目 (SGRIDGJSFW[2016]1305 号)

联系人: 尹立,工程师,主要从事电工绝缘材料的研究及应用

收稿日期: 2017-08-16

产效率高等诸多优势。在实际生产中,模具结构、工艺参数等因素对整体 APG 工艺具有重要的影响^[7],笔者对环氧复合绝缘子 APG 工艺进行了深入研究,为环氧复合绝缘子的发展提供相关技术积累。

1 环氧复合绝缘子用原材料及模具

1.1 原材料的要求

环氧复合绝缘子采用 APG 工艺进行制造,对环氧材料有较高的技术要求,即室温下较为稳定,高温下具有高的反应活性,能迅速完成凝胶固化,成型周期短,能够抵抗机械应力和电气应力,具有优良的抗开裂性能和冲击性能^[8-9]。从环氧复合绝缘子产品所要达到的性能和 APG 工艺对环氧树脂体系性能的要求出发,环氧材料通常需要进行填料预混,环氧配方中填料包括硅微粉、氢氧化铝和少量其它填料,其中硅微粉能够对材料进行增强和降低成本,氢氧化铝对提高材料耐漏电起痕性能起主要作用,少量其它填料主要对体系润滑起到一定作用。作为环氧伞裙材料,环氧复合体系的主要性能通常需要满足表 1 中的要求。

表 1 环氧伞裙材料的主要性能参数要求

项目	数值	试验标准
拉伸强度 / MPa	≥ 50	GB / T 2567-2008
断裂伸长率 / %	≥ 2	GB / T 2567-2008
弯曲强度 / MPa	≥ 80	GB / T 2567-2008
冲击强度 / (kJ · m ⁻²)	≥ 10	GB / T 2567-2008
邵氏硬度 (A)	≥ 90	GB / T 2411-2008
介电强度 / (kV · mm ⁻¹)	≥ 20	GB / T 1408.1-2006
耐漏电起痕性能	1A4.5 级	GB / T 19519-2014
静态接触角 / (°)	$\theta_{sa} \geq 100$, $\theta_{min} \geq 90$	GB / T 19519-2014
憎水性丧失下的静态接触角 / (°)	$\theta_{sa} \geq 90$, $\theta_{min} \geq 85$	GB / T 19519-2014
憎水性恢复下的静态接触角 / (°)	$\theta_{sa} \geq 95$, $\theta_{min} \geq 90$	GB / T 19519-2014
憎水性迁移下的静态接触角 / (°)	$\theta_{sa} \geq 110$, $\theta_{min} \geq 100$	GB / T 19519-2014
凝胶时间 (130 °C) / min	10 ~ 30	GB / T 12007.7-1989

注:表中 θ_{sa} 为接触角平均测量值, θ_{min} 为接触角最小测量值。

表 1 中环氧体系的凝胶时间是环氧复合绝缘子 APG 工艺的主要参数要求,其它的性能则是针对复合绝缘子所要实现的抗鸟啄、耐踩踏、抗强风和防污闪等目的对环氧材料提出的主要要求。

采用液体环氧树脂 APG 技术制造的电工绝缘制品表面应光滑、均一,无开裂、分层、变形缺陷。APG 工艺对环氧树脂预混料体系的技术要求要高于真空浇注材料,与真空浇注工艺相比, APG 工艺生产周期由近 10 h 缩短到不足 1 h,并能控制反应放热,对固化收缩进行有效补偿,制品尺寸稳定性和

力学性能优势突出^[10-12]。目前, APG 工艺多采用单料罐混料方式,即将树脂、固化剂、促进剂、各类填料助剂等混合预处理,预处理时间通常高于 2 h,这对环氧体系有较高的技术要求,既要保证材料在目前的高温下能迅速凝胶固化,又要控制原材料预处理时或在材料使用周期内(对于本制品料罐材料使用周期约为 5 h)由于反应导致的黏度快速上升,保证其有足够的可操作周期。笔者所采用的 APG 工艺为双罐混料,即树脂体系和部分填料在一个料罐中进行预混处理,固化剂、促进剂和部分填料在另一料罐中进行预混处理,处理完成后各料罐由泵体按照比例将两种预混料通过静态混料器进行充分混合,随即注入模腔,相比单罐混合方式可以不考虑材料的可操作周期这一因素,使更多的环氧体系都能采用 APG 工艺进行制备。

采用静态混料方式需要保证环氧预混料和固化剂预混料在 35 ~ 50 °C 时具有的一定的流动性(黏度 < 8000 mPa · s),通过静态混料器混合进入 130 ~ 155 °C 的模腔中具有短时较好的流动性(黏度 < 4500 mPa · s),这样才能够保证材料在模具中的良好充填。随后,材料的黏度需要在高温下迅速上升直至凝胶,这个特性能尽量避免所添加的大量无机粉体填料出现沉降,进而导致材料固化物均一性差的不足,以保证材料性能稳定。环氧伞裙材料的温度-凝胶时间曲线如图 1 所示。由图 1 可以看出,随着成型温度的提高,环氧体系的凝胶时间逐渐变短,在 140 °C 时凝胶时间只有 3 min,可充分发挥 APG 工艺高效的优势。需要指出的是, APG 工艺在 140 °C 下以恒定压力 0.25 MPa 填充环氧绝缘子模具的时间为 3 ~ 4 min,环氧填充过程中的凝胶是由外向内逐渐的过程,填充时间稍高于凝胶时间同样能够成型高质量的产品。

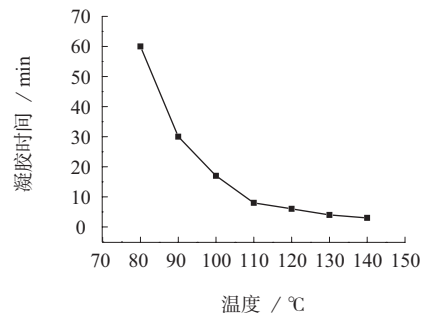


图 1 环氧混合料温度-凝胶时间曲线

1.2 模具的要求

环氧复合绝缘子 APG 成型模具由两个半模组

成,模具包括胶体流道、定位销、排气孔等结构,由锁模机的加热面板对其进行温度控制。环氧复合绝缘子 APG 工艺对模具有很高的要求,从结构上来说,胶体流道的设计直接关系到制品的填充质量,对产品的充模时间和熔接痕的控制极为重要,模具设计中需要对浇口数量、浇口位置、浇口直径进行重点考虑^[13-14],这是保证产品高质量成型最为关键的技术之一,根据经验,通常复合绝缘子的模具长度达到 1 m 时,需要设置 4 个 $\text{Ø}15\text{ mm}$ 的进胶口;绝缘子模具长度达到 2 m 时,需要设置 6 个 $\text{Ø}15\text{ mm}$ 的进胶口。环氧树脂在充模成型过程中需要排出模腔内的气体,设计合理的排气通道是避免产品表面存在气泡的关键,合理的排气设计应在模腔最上端,复杂结构腔体在不易排气部位也需要设置,为防止个别排气孔由于清洁不到位导致排气口堵塞,排气孔最好采用连通设计,实现个别排气口堵塞时仍能起到排气效果;设计需要考虑环氧复合绝缘子的脱模,环氧伞裙属硬质伞裙,不同于硅橡胶的软质伞裙,脱模需要设计合理的脱模角,且模腔表面具有高的光洁度,对于绝缘子这类诸多伞裙结构来说,建议模腔的粗糙度 R_a 达到 0.1。220 kV 环氧复合绝缘子产品注射伞裙部分长度约为 2 080 mm,一次注射成型此长度的制品要求模具具有高的刚度,在 0.2 ~ 0.6 MPa 的压力下不会出现局部形变,否则,模具在压力的作用下出现形变会导致合模缝的密封不足,在压力注射或压力补偿环节中,会出现漏料,产品也会出现明显的合模痕迹,影响产品质量。可采用背部钢板加强的方式来解决刚度不足的问题。此外,环氧复合绝缘子产品的模具还应设有定位销、端部定位密封等结构。

2 环氧复合绝缘子成型工艺

环氧复合绝缘子采用 APG 工艺成型,其 APG 工艺流程如图 2 所示。

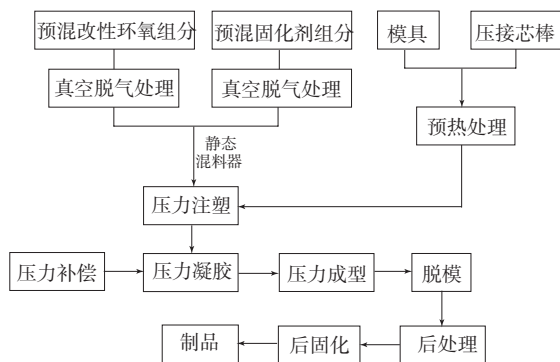


图2 环氧复合绝缘子 APG 工艺流程图

2.1 材料预处理

环氧树脂和固化剂分置于注塑机的两个料罐中,并按照要求在各组分中预混无机微米填料,填料含量是由材料体系的黏度和最终固化物的性能决定的,为了确保材料的流动性满足预混和注塑要求,需要对两料罐进行加温真空搅拌处理,其中预混环氧组分在 40°C 下真空搅拌处理 3 h,真空度控制在 100 ~ 200 Pa;预混固化剂组分在 40°C 下真空搅拌处理 3 h,真空度控制在 300 ~ 400 Pa,转速为 80 ~ 120 r/min。对于该材料体系,预混环氧组分在 40°C 下的黏度为 1 100 mPa·s,预混固化剂组分在 40°C 下的黏度为 6 500 mPa·s,此黏度能够使填料均匀混合,具有优良的流动性,并能实现在短时间内不出现明显沉降,符合预混和产品量产技术要求。本工艺设备为静态混料系统,浇注料的适用期在此可不作重点考虑。

2.2 成型温度制定

将芯棒和金具压接好,采用微粉粒度为 28 ~ 75 μm 砂纸打磨芯棒表面,使其具有一定的粗糙度,用酒精擦拭表面粉体杂质,以有利于与环氧树脂的粘结。表面处理完毕后放入烘箱在 140°C 下预热。在两端金具处缠绕 8 ~ 10 圈生料带(两端密封),装入预热模具中,调整芯棒位置,使芯棒在模腔中居中,模具合模继续在 140°C 下预热 5 min。

特别要指出的是,达到模具温度预热后的芯棒必须安装在模腔内部 5 ~ 10 min,使其与模腔温度趋于一致(模腔整体温差控制 $\leq \pm 3^{\circ}\text{C}$),模具和芯棒的温度最好应高于注塑料 80 ~ 100°C ,使固化凝胶过程能够由模具壁向中部的浇注料扩散,既能保证制件的成型质量,又能实现持续压注对环氧固化收缩的补偿。成型温度过高,来不及充模完全浇注料便会在局部发生凝胶固化,出现分层固化甚至制品局部缺胶,此外,某些环氧树脂在高温下还会出现自交联,固化物性能明显降低,严重影响制品质量;成型温度过低,浇注料充模完全便会出现溢胶口溢胶现象,长时间仍未凝胶,填料分布不均匀化增大,制品质量难以保证,且浪费原材料,更重要的是制作周期变长,影响产品生产效率,且制品脱模时固化度仍不足,容易造成脱模损伤。

为设置合理的模温成型温度,分别在 120, 140, 155°C 三个成型温度下进行制品加工及性能分析。 120°C 下进行制品的成型效率很低,从注胶到脱模需要 1 h 以上,成型效率低,不适合批量生产。在

140℃和155℃下均成功制备了外观良好的制品,并经过同样的后固化制度(145~155℃/4 h)。表2是APG成型制品及后固化制品的玻璃化转变温度(T_g)和拉伸性能数据。

表2 APG成型制品及后固化制品的 T_g 和拉伸性能数据

项目	140℃成型制品		155℃成型制品	
	脱模后	后固化	脱模后	后固化
T_g /℃	107	108	87	95
拉伸强度/MPa	70	72	57	61
拉伸弹性模量/MPa	8431	8694	7757	8006

从表2可以看出,140℃模温成型固化物的 T_g 为107℃,较155℃模温成型固化物的 T_g (87℃)明显偏高。经过后固化后,140℃模温成型固化物的 T_g 由107℃上升至108℃,155℃模温成型固化物的 T_g 由87℃上升至95℃,但仍明显低于140℃模温成型固化物的 T_g 。对比固化物的拉伸性能可以看出,155℃模温成型固化物进行后固化后的拉伸强度有所提高(由57 MPa升至61 MPa),拉伸弹性模量也有所提高(由7757升至8006 MPa),但均明显低于140℃模温成型固化物的拉伸性能(拉伸强度为72 MPa,拉伸弹性模量为8694 MPa)。155℃模温成型固化物进行后固化后,其 T_g 进一步升高,表明该产品后固化不充分,同时该样品的 T_g 未达到140℃模温成型固化物的 T_g 值,这是由于该产品在生产时模温太高,固化过快导致环氧交联网络提前形成,部分环氧和酸酐基团被包裹在交联体系内,使得 T_g 达不到理想值。

2.3 注塑成型

调节APG工艺中注塑机的A、B组分配比(可人工精确计量),开启注塑模式将A、B组分通过静态混料器混合,以0.15~0.25 MPa的压力充填模腔,环氧绝缘子每段注满时间为3~4 min,注满是以排气孔溢胶为准,注满后可适当加压至0.25~0.35 MPa,大约在10 min左右即发生整体凝胶固化,整个注料至脱模时间为30~40 min。为防止注料管与模具接触部分固化堵住管路,可在浇注料凝胶后15 min卸下注胶管路。成型压力过大,易出现局部填充不完全的缺陷;成型压力过小则易出现固化分层的现象,严重的会导致局部固化过快影响胶体正常流动,不利于生产效率的提高。

3 产品制造中需要关注的问题

3.1 表面缺陷的避免

明显的收缩痕和表面气泡等缺陷的产生与成型模温有直接关系^[15],控制成型温度对产品表面质

量的提升极为重要,是APG工艺的关键环节。为选择合理的成型温度,不但对不同温度下固化物性能进行对比,同时还对环氧固化物在不同温度下收缩率的变化进行分析(见图3)。

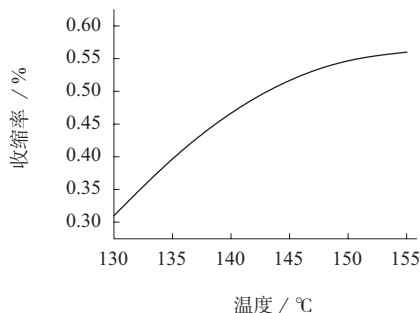


图3 成型温度与产品收缩率的关系曲线

由图3能够看出,随着成型模温的升高,固化速度加快,产品收缩率逐渐增大。成型模温过高,局部受热快速固化,整体固化速率不均匀,导致产品表面出现收缩痕和明显色差(见图4),明显色差处一般同时存在收缩所导致的表面光滑度不足的问题,严重的还会出现由于固化过快所造成的产品表面或内部气泡,对产品稳定运行带来一定的隐患。然而,成型模温过低会使产品固化不足,固化物强度低,脱模时内应力易使产品出现微裂纹,且大大影响生产效率,无法体现APG工艺高效的优势。环氧材料的APG工艺的成型温度建议在130~155℃区间由低到高选取进行试验,从中优选出高质量成型工艺参数。

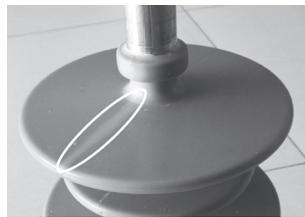


图4 产品色差缺陷

3.2 环氧复合绝缘子伞裙典型问题及避免措施

由于环氧复合绝缘子伞裙材料属脆性,其与金属包裹处需要考虑环氧和金属的配合问题,该环氧复合绝缘子伞裙材料中掺入部分填料,其目的之一就是控制环氧体系热膨胀系数与金属趋于一致,避免匹配性不足出现开裂。传统硅橡胶复合绝缘子端部可采用压接方式实现密封,但脆性环氧压接密封控制难度大,所以环氧复合绝缘子的端部结构在设计上与硅橡胶复合绝缘子不同,采用包裹式密封设计,并在设计上对环氧固化物内应力释放而造成开

裂进行优化和避免,这种开裂方式最易发生在以下部位^[12]:

(1) 包裹绝缘子端部金具的环氧层薄厚不均匀区域。此区域的高电场易使环氧材料产生应力集中,应力最终在环氧厚薄不同的交界处发生破坏性释放,所以在金具部位对环氧的包裹层厚度设计尽量保持一致,使应力能够较为均匀地分散。

(2) 环氧固化物尖锐过渡或直角部位。这些部位都是外部应力容易集中的区域,在绝缘件的设计中设计环氧倒圆角是十分必要的。

(3) 被环氧固化物包裹的绝缘子端部金具存在尖锐棱角或倒圆角度过小的部位(见图5)。这些部位在电场中会引起电荷积聚,产生电场畸变,易发生放电,对材料具有一定的破坏作用,所以应用于高电压的金属结构部件都应具备倒圆角的设计,倒圆角的大小需要结合电场强度和产品结构特征综合考虑。

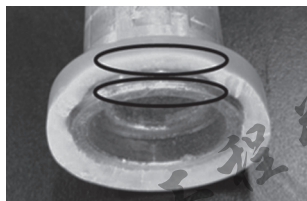


图5 优化前环氧复合绝缘子金具端部结构

(4) 包裹金具的环氧层较薄部位。包裹金具的环氧层较薄部位(见图5)为内应力释放的集中部位,特别是在环氧复合绝缘子进行陡波前冲击型式试验时,金具边缘环氧树脂层会出现裂纹甚至炸裂,如图6所示。

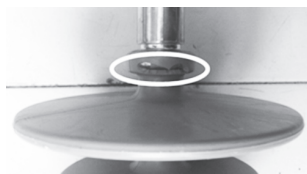


图6 环氧复合绝缘子端部电冲击破坏形貌

由图6可以看出,其炸裂的主要原因一方面与环氧包裹层厚度不足有关,另一方面与金具边缘倒角处理不足有关,最终导致其环氧层强度小于电场集中所产生的内应力,进而导致环氧材料破坏。导致内应力破坏性释放的原因主要包括机械冲击力、电能冲击、温差变化和振动等。因此,在进行环氧复合绝缘子设计时就要考虑到上述应用场景对产品的影响。

图7是优化后的环氧复合绝缘子端部结构,主

要是覆盖金具进行了圆滑过渡处理,使倒圆角增大,同时将环氧材料的覆盖金具的厚度由5 mm增大到8 mm,解决了此处裂纹损坏的问题。

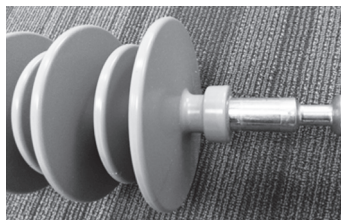


图7 优化后的环氧复合绝缘子端部结构

4 结论

(1) 环氧材料应用于复合绝缘子伞裙不仅需要考虑环氧材料的综合性能是否符合绝缘子的要求,还要考虑环氧材料的加工性能是否满足APG工艺的要求,这是保证产品质量的基础。

(2) 材料预处理、成型温度的制定和注塑工艺控制是环氧复合绝缘子制造的关键工序,需要重点进行试验研究和严格控制。

(3) 基于环氧伞裙材料脆性较大、环氧固化物内应力泄放而造成开裂的问题是设计需要考虑的重点。该问题最容易出现于型式试验陡波前电压冲击环节,优化金具结构和适当增大包裹环氧厚度可解决此工艺问题。

参考文献

- [1] 关志成. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006:3-16.
Guan Zhicheng. Insulator and external insulation of power transmission and transformation equipment[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2006:3-16.
- [2] 卢春莲,付强. 耐高压绝缘材料的研究现状及进展[J]. 绝缘材料,2010,43(3):32-37.
Lu Chunlian, Fu Qiang. Research Status and progress of high voltage resistant insulation materials[J]. Insulating Materials,2010,43(3):32-37.
- [3] 王永平. 电力网输电线路绝缘子可靠性分析[J]. 中国高新技术企业,2016(10):122-123.
Wang Yongping. Reliability analysis of insulators for power transmission and distribution lines[J]. China High-Tech Enterprises,2016(10):122-123.
- [4] 田浩,李继承,郝留成,等. 直流电压下环氧绝缘材料电气性能对电荷积聚的影响[J]. 电网技术,2015,39(5):1463-1468.
Tian Hao, Li Jicheng, Hao Liucheng, et al. Influence of electrical properties of epoxy insulating materials on surface charge accumulation under DC voltage[J]. Power System Technology,2015,39(5):1463-1468.

- [5] 张福增,宋磊,屠幼萍,等.500 kV 复合绝缘子运行特性分析[J]. 高电压技术,2012,38(10):2536-2541.
Zhang Fuzeng, Song Lei, Tu Youping, et al. Analysis of operating performance for the 500 kV composite insulator[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10):2536-2541.
- [6] 吴光亚.我国绝缘子的发展现状及应考虑的问题[J]. 电瓷避雷器,2010(2):7-11.
Wu Guangya. Domestic development situation of insulator and problems needing consideration[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(2):7-11.
- [7] 陈晓丽,史鸿威,宋晓光,等.浇注式互感器 APG 制造工艺分析[J]. 绝缘材料,2014,47(3):55-57.
Chen Xiaoli, Shi Hongwei, Song Xiaoguang, et al. APG Manufacturing process analysis of casting instrument transformers[J]. Insulating Materials, 2014, 47(3):55-57.
- [8] 焦智武,宋凌云,吕磊,等.复合支柱绝缘子成型工艺研究[J]. 纤维复合材料,2009(1):54-56.
Jiao Zhiwu, Song Lingyun, Lyu Lei, et al. Processing research on manufacturing post insulator[J]. Fiber Composites, 2009(1):54-56.
- [9] Li Zhe, Okamoto K, Ohki Y, et al. Role of nano-filler on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of micro- Al_2O_3 / epoxy composites[C]// IEEE 9th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin:IEEE, 2009:735-756.
- [10] 张赛军,袁宁,阮锋.APG 工艺用环氧树脂体系的固化及流变模型[J]. 合成树脂及塑料,2007,24(3):20-24.
Zhang Saijun, Yuan Ning, Ruan Feng. Cure kinetics and rheological model of epoxy resin mixture used in APG process[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2007, 24(3):20-24.
- [11] 吴建红,葛乐矣,王福润,等.中压固体绝缘环氧树脂 APG 制造新工艺[J]. 电工电气,2015(1):47-50.
Wu Jianhong, Ge Leyi, Wang Furun, et al. Medium-voltage solid insulation epoxy apg manufacturing new technology[J]. Electro-technics Electric, 2015(1):47-50.
- [12] 井丰喜,石兆从,张道洪,等.超支化聚酯改性环氧-酸酐浇注树脂及性能研究[J]. 粘结,2016(2):36-39.
Jing Fengxi, Shi Zhaocong, Zhang Daohong, et al. Performance of epoxy resin-anhydride pouring materials modified with hyper-branched polyester[J]. Adhesion, 2016(2):36-39.
- [13] 邱长江,李国福.环氧树脂浇注的固化收缩和浇口冷却法[J]. 高压电器,1994(2):52-54.
Qiu Changjiang, Li Guofu. Curing shrinkage and gate cooling method for epoxy resin casting[J]. High Voltage Apparatus, 1994(2):52-54.
- [14] 李志勇.APG 工艺在中压互感器制造中的应用[J]. 热固性树脂,2014,29(4):49-54.
Li Zhiyong. Application of automatic pressure gelation (APG) technology on manufacture of medium voltage instrument transformer[J]. Thermosetting Resin, 2014, 29(4):49-54.
- [15] 尹立,刘辉,张翀,等.环氧树脂基绝缘材料在悬式绝缘子上的应用[J]. 绝缘材料,2015,48(5):26-30.
Yin Li, Liu Hui, Zhang Chong, et al. Application of epoxy resin insulating material in suspension insulator[J]. Insulating Materials, 2015, 48(5):26-30.
- (上接第 51 页)
- 激光烧结成型精度实验研究[J]. 激光与光电子学进展,2017,54(8):1-10.
Wu Haihua, Yan Junneng, Li Tengfei, et al. Experimental study on the precision of selective laser sintering graphite / phenolic resin mixed powders[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2017, 54(8):1-10.
- [11] 王伟,王璞璇,郭艳玲.选择性激光烧结后处理工艺技术研究现状[J]. 森林工程,2014,30(2):101-104.
Wang Wei, Wang Puxuan, Guo Yanling. The research status of post-processing technology of selective laser sintering[J]. Forest Engineering, 2014, 30(2):101-104.
- [12] 杨来侠,周文明,杜珣涛,等.工艺参数对 PS / 改性滑石粉 SLS 烧结件力学性能的影响[J]. 工程塑料应用,2017,45(6):70-74.
Yang Laixia, Zhou Wenming, Du Xuntao, et al. Effects of process parameters on mechanical properties of PS / modified talc powders sintering parts based on SLS[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 45(6):70-74.
- [13] 孔双祥,胥光申,巨孔亮,等.基于多指标正交试验设计的 SLS 快速成型工艺参数优化[J]. 轻工机械,2017,35(1):30-35.
Kong Shuangxiang, Xu Guangshen, Ju Kongliang, et al. Optimization of process parameters by Multi-index orthogonal experiment in selective laser sintering system[J]. Light Industry Machinery, 2017, 35(1):30-35.
- [14] 帅昌俊.选择性激光烧结翘曲变形抑制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
Shuai Changjun. The research on warp distortion inhibition of selective laser sintering[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [15] 杨来侠,赵贞慧.PS / CF 复合粉末激光选区烧结工艺研究[J]. 工程塑料应用,2016,44(5):43-46.
Yang Laixia, Zhao Zhenhui. Study on process of PS / CF composite powders based on selective laser sintering[J]. Engineering Plastics Application, 2016, 44(5):43-46.