

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.07.020

有机磷阻燃玻璃纤维增强 PA6 的漏电起痕失效机理与提升

叶士兵^{1,2}, 黎焕敏², 安朋^{1,2}

(1.上海金发科技发展有限公司,上海 201714; 2.金发科技股份有限公司,广州 510700)

摘要:近年来阻燃玻璃纤维(GF)增强尼龙材料在耐高电压部件中应用广泛,但现有材料的耐漏电起痕性能难以满足高电压场景下的长期使用需求。为提升材料的耐漏电起痕性能,在有机磷阻燃 GF 增强聚酰胺 6(PA6)体系中引入高绝缘无机填料与疏水助剂。结合相比漏电起痕指数(CTI)测试,通过观测材料在多次放电过程中漏电起痕区域的宏观及微观形貌变化,系统探究了有机磷阻燃 GF 增强 PA6 的 CTI 测试失效机理,并基于机理分析优化材料配方。研究发现,该材料 CTI 测试失效的核心原因在于:GF 在电弧放电产生的高温作用下发生熔融,随着放电次数增加,熔融的 GF 在漏电起痕区域逐渐导通,最终导致材料绝缘失效。针对这一机理,通过加入高绝缘无机填料[包括滑石粉、Al₂O₃、玻璃微粉(GM)及低表面能硅酮母粒(Silicone MB-50%)],可有效缩短电弧放电时间、阻隔炭痕发展,提升 GF 在放电过程中的结构完整程度。性能测试结果显示,不同填料组合对 CTI 提升效果存在差异,其中当体系中加入质量分数为 4% 的 GM 与 0.4% 的 Silicone MB-50% 时,材料的 CTI 从基础体系的 800 V 提升至 950 V,提升幅度达 18.75%。该研究通过明确失效机理并针对性地优化配方,显著提升了阻燃 GF 增强尼龙材料的耐漏电起痕性能,为高 CTI 值材料的制备提供了参考。

关键词: 有机磷阻燃;玻璃纤维;聚酰胺;相比漏电起痕指数;失效机理;绝缘;低表面能硅酮

中图分类号: TQ327.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)07-0139-07

Failure mechanism and improvement of tracking of organophosphorus flame-retardant glass fiber reinforced PA6

YE Shibing^{1,2}, LI Huanmin², AN Peng^{1,2}

(1. Shanghai Kingfa Science & Technology Development Co., Ltd., Shanghai 201714, China;

2. Kingfa Science and Technology Co., Ltd., Guangzhou 510700, China)

Abstract : In recent years, flame-retardant glass fiber (GF) reinforced nylon materials have been widely used in high-voltage resistant components. However, the tracking resistance performance of existing materials is difficult to meet the long-term service requirements in high-voltage scenarios. To improve the tracking resistance of materials, high-insulation inorganic fillers and hydrophobic additives were introduced into the organic phosphine flame-retardant GF reinforced polyamide 6 (PA6) system. Combined with the comparative tracking index (CTI) test, the failure mechanism of CTI test for organic phosphine flame-retardant GF reinforced PA6 was systematically explored by observing the macroscopic and microscopic morphological changes in the tracking region during multiple discharge processes. Based on the mechanism analysis, the material formula was optimized. The study found that the core reason for the failure of CTI test in this system is as follows: GF melts under the high temperature generated by arc discharge. With the increase of discharge times, the molten GF gradually forms the conductive path in the tracking region, eventually leading to insulation failure of the material. Targeting this mechanism, the addition of high-insulation inorganic fillers, including talc, Al₂O₃, glass microspheres (GM) and low surface energy silicone masterbatch (Silicone MB-50%), can effectively shorten the arc discharge duration, block the development of carbon traces, and improve the structural integrity of GF during the discharge process.

通信作者: 叶士兵,博士,高级工程师,从事工程塑料高性能化和功能化关键技术研究

收稿日期: 2025-05-20

引用格式: 叶士兵,黎焕敏,安朋.有机磷阻燃玻璃纤维增强 PA6 的漏电起痕失效机理与提升[J].工程塑料应用,2025,53(7):139–145.

YE Shibing, LI Huanmin, AN Peng. Failure mechanism and improvement of tracking of organophosphorus flame-retardant glass fiber reinforced PA6[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(7): 139–145.

Performance test results show that different filler combinations have varying effects on CTI improvement. When 4 wt% GM and 0.4 wt% Silicone MB-50% are added to the system, the CTI of the material increases from 800V in the base system to 950V, with an improvement rate of 18.75%. This study has significantly enhanced the tracking resistance of flame-retardant GF reinforced nylon materials by clarifying the failure mechanism and optimizing the formula accordingly, providing a reference for the preparation of materials with high CTI values.

Keywords : organophosphorus flame-retardant ; glass fiber ; polyamide ; comparative tracking index ; failure mechanism ; insulation ; low surface energy silicone

漏电起痕现象是指聚合物绝缘材料在户外或严酷环境中运行时,其表面易受到盐露、水分、灰尘等的侵蚀与污染,进而形成具有导电性的电解质层,在电场作用下引发表面放电起弧的破坏性现象^[1]。相比漏电起痕指数(Comparative tracking index, CTI)是衡量材料漏电起痕性能的指标,指材料表面经受50滴电解液而未形成漏电痕迹的最高电压值。随着新能源汽车、光伏、电子电器工业的迅速发展,高电压继电器、高压连接器、变压器骨架、薄壁电子元件、断路器等器件均需要高CTI的工程塑料。开发CTI>800 V的高CTI阻燃工程塑料是目前工程塑料改性的重要方向。影响材料的耐漏电起痕能力的因素包括成炭能力^[2-3]、亲疏水性^[4-5]、导热性^[6-7]、降解过程及产物^[8-10]等。材料残炭量越高、成炭能力越强,越容易形成低电阻通路,导致CTI值降低。

聚酰胺(PA)是一种半结晶高分子,分子链之间存在大量的氢键,使其具有良好的结晶性、耐化学性、耐候性及力学性能^[11-13]。但纯PA6, PA66或玻璃纤维(GF)增强PA6, GF增强PA66存在阻燃性差、CTI值低的问题,需通过阻燃及绝缘改性才能应用于高CTI要求的电子领域^[14-15]。PA体系常用的阻燃剂包括卤系、磷系、氮系及无机阻燃剂^[16-17],其中卤系阻燃剂对于自然环境和人类身体健康存在安全隐患,因此无卤化已成为绿色发展的方向。有机磷阻燃体系中,二乙基次膦酸铝(AlPi)性能突出,初始分解温度达405℃,CTI值高达600 V^[17]。目前,无卤阻燃PA(如红磷阻燃^[7]、有机磷阻燃、氢氧化镁阻燃^[15]等)的CTI最高为600 V,因此开发CTI>600 V的有机磷阻燃增强PA,对于新能源领域高电压发展需求具有重要意义。此外,在PA中加入微米级氧化铝、氮化硼等绝缘填料,可提升GF增强PA材料的耐漏电起痕特性^[9]。

因此,笔者以GF增强PA6为基材,采用AlPi与聚磷酸三聚氰胺(MPP)复配的固定有机磷阻燃体

系,系统研究了有机磷阻燃GF增强PA6在CTI测试失效过程中漏电起痕区域的形貌变化,通过加入滑石粉(Talc)、中性氧化铝(Al_2O_3)、低软化点玻璃微粉(GM)阻隔炭痕发展,同时添加低表面能硅酮提高表面疏水性以加速导电液滴的滚落、缩短电弧放电时间,从而提高有机磷阻燃GF增强PA6体系的CTI值,以满足新能源领域对PA材料CTI日益提高的应用需求。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PA6: M2400, 相对黏度为2.45, 广东新会美达锦纶股份有限公司;

AlPi: EXOLIT OP 1230, 科莱恩化工(惠州)有限公司;

MPP: BUDIT 3141, 博德精细化工(上海)有限公司;

GM: KFFR-01, 熔融温度范围500~550℃, 金发科技股份有限公司;

Talc: HTPUltra5 L, 意大利意米法比公司;

Al_2O_3 : 200~300目(对应粒径为48~74 μm), 国药集团化学试剂有限公司;

50%硅酮母粒(Silicone MB-50%): MB50-002, 道康宁(中国)有限公司;

GF: ECS10-03-568H, 中国巨石股份有限公司;

抗氧化剂: RIANOX 1098, 德国巴斯夫公司;

电解液: 0.1%的氯化铵电解液, 电阻率为395 $\Omega \cdot \text{cm}$, 自配。

1.2 主要仪器及设备

双螺杆挤出机: TSE-40A, 南京瑞亚弗斯特高聚物装备有限公司;

注塑机: PL860/290 V, 无锡海天机械有限公司;

漏电起痕测试仪: M31.06, 德国PTL检测公司;

数码超景深显微镜: DVM6, 德国Lecia公司;

扫描电子显微镜(SEM): S-3400N, 日本HITACHI公司。

1.3 试样制备

实验配方见表1。具体制备过程如下:将干燥好的PA6树脂与填料(Talc, Al_2O_3 , GM)、阻燃剂(AlPi, MPP)、抗氧剂、润滑剂(Silicone MB-50%)按设定配比充分混合后,通过主喂料口送入双螺杆挤出机,GF通过侧喂料口加入,经共混、造粒后得到塑

胶粒子。双螺杆挤出机机筒温度依次为180,230,260,240,240,230,230,230℃,机头温度为260℃,螺杆转速为300 r/min。将挤出后的塑胶粒子充分烘干,再通过注塑机注射成型为60 mm×60 mm×3 mm的方板,注塑温度分段设置为280,270,260℃,成型周期为30 s。

表1 有机磷阻燃GF增强PA6及其改性材料的配方(质量分数)

Tab. 1 Formulation of organophosphorus flame-retardant GF reinforced PA6 and its modified materials (mass fraction)

Items	0 [#]	0-4%Talc	0-4% Al_2O_3	0-4%GM	0-4%GM-0.4%(Silicone MB-50%)	%
PA6	48	44	44	44	43.6	
AlPi	17	17	17	17	17	
MPP	3	3	3	3	3	
GF	30	30	30	30	30	
Antioxygen	2	2	2	2	2	
Talc		4				
Al_2O_3			4			
GM				4	4	
Silicone MB-50%					0.4	

1.4 测试与表征

(1)CTI测试:根据IEC 60112进行测试,以样品承受50滴电解液且未出现试验失败现象(即未发生大于0.5 A的电流持续2 s或持续燃烧2 s的情况)时的最高电压作为样品的CTI值。

(2)数码显微镜表征:将漏电起痕区域固定在样品台上,调整数码超景深显微镜焦距至清晰后,对起痕区域进行观察并拍照记录。

(3)SEM表征:先对样品进行喷金处理,随后用导电胶将样品固定在SEM样品台上,通过SEM对样品漏电起痕区域的微观形貌进行观察,并同步开展能谱仪(EDS)元素成分分析。

2 结果与讨论

2.1 有机磷阻燃GF增强PA6的CTI失效机理

有机磷阻燃GF增强PA6(样品0[#])的CTI值为800 V。为探究该材料在CTI测试中的失效机理,实验选取高于其CTI值的900 V电压进行测试:当电解液累计滴加至35滴时,样品两电极间的放电区域发生导通,出现失效现象。为研究高电压放电作用下样品表面的失效演化过程,选取同一块测试样板的不同区域,在900 V电压下记录电解液滴加至5,10,15,20,25,30滴(失效前)及35滴(失效时)后样品漏电起痕区域的宏观与微观形貌,不同滴数电解液作用后漏电起痕区域宏观形貌如图1所示。随着电解液滴下次数(即放电次数)增多,漏电起痕区域的颜色逐渐加深,由初始的黄色逐渐变为黑色;同

时,起痕区域不断向两测试电极方向扩展,直至35滴时完全与电极接触,最终导致样品失效。

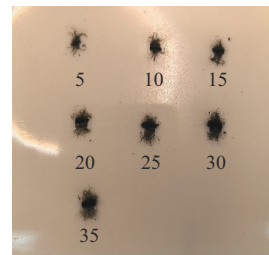


图1 有机磷阻燃GF增强PA6(样品0[#])在900 V不同滴数电解液作用下漏电起痕区域的宏观形貌

Fig. 1 Macroscopic morphology of tracking regions on organophosphorus flame-retardant GF reinforced PA6 (sample 0[#]) under action of electrolyte droplets with different counts at 900 V

图2为电解液滴滴加至5,10,15,20,35滴状态下的漏电起痕形貌及其局部放大特征,由于25,30滴状态与20滴的状态形貌类似差别不大,在这里没有展示。在900 V高压作用下,当有5次电解液滴落至样品表面引发5次电弧放电后,两电极的中间形成宽度约1 mm的漏电起痕区域。电弧放电产生的高温导致样品表面PA6树脂发生熔蚀,部分区域因炭化呈现黄变黑的特征;局部放大图中红色椭圆标记区域可见部分GF裸露于表面,但纤维结构仍保持完整。随着放电次数增加至10次,漏电起痕区域向两侧电极方向扩展,宽度增至约2 mm,整体颜色进一步加深,黑色炭化区域面积扩大;局部放大图中标记区域内可观察到少量呈白色、具有光泽的

玻璃态物质。当放电次数达到15次时,漏电起痕区域拓展至一侧电极并与电极接触,标记区域内清晰可见电极取下后遗留的印记,且前期出现的白色玻璃态物质逐渐形成网状结构,其分布面积显著增加。

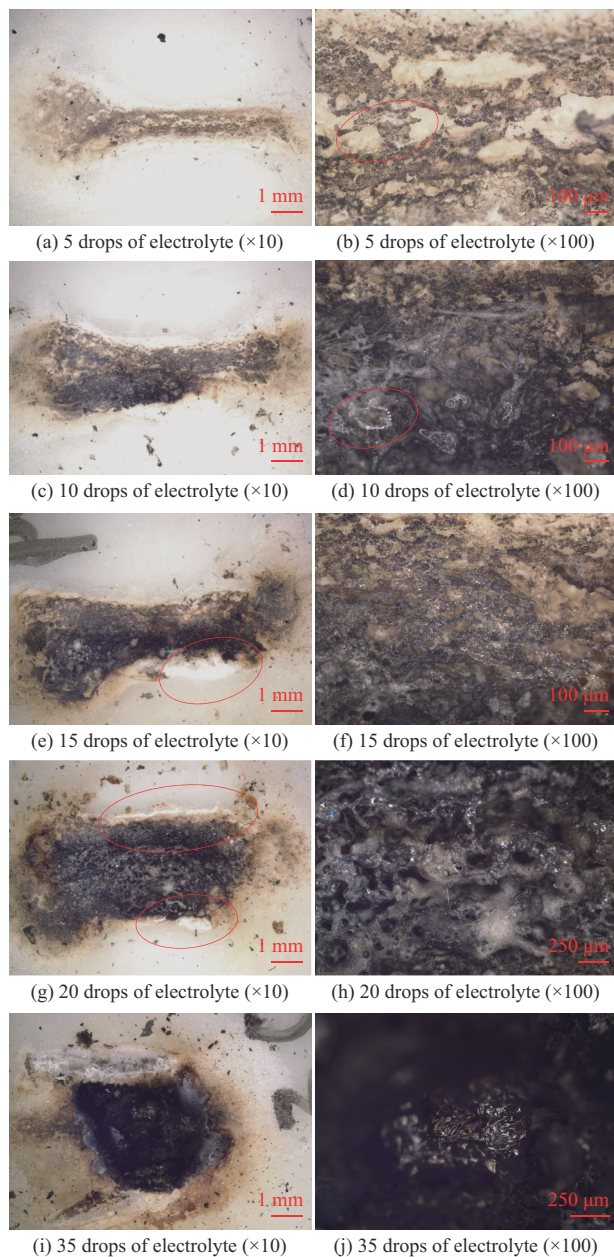


图2 有机磷阻燃GF增强PA6(样品0[#]) 在900 V不同滴数电解液作用下漏电起痕区域的数码显微镜照片

Fig. 2 Digital microscope photos of tracking regions on organophosphorus flame-retardant GF reinforced PA6 (sample 0[#]) under action of electrolyte droplets with different counts at 900 V

放电次数达到20次,漏电起痕的炭化发黑区域进一步拓展至完全接触两电极(如两个椭圆标记区域所示),前期形成的白色闪亮网状玻璃态物质逐渐

呈现出多彩特征,均匀覆盖两电极之间的区域。当电解液滴加到35滴(样品失效)时,失效过程样品表面伴随白色闪光现象,失效后漏电起痕区域炭化程度加深、黑色更深且向样品内部延伸更深入;同时区域内形成大面积多彩玻璃态物质,如图2j所示。

为解析漏电起痕区域的微观形貌及玻璃态物质的成分组成,采用SEM对有机磷阻燃GF增强PA6样品失效后漏电起痕区域进行观察并同步开展EDS元素分析,微观形貌结果如图3所示。图3a显示,失效后的漏电起痕区域形成块状结构,而靠近电极的区域可见树脂被熔蚀的痕迹,部分未熔融的GF裸露在外。图3b中,漏电起痕区域还分布有大量球状物质。结合有机磷阻燃GF增强PA6的配方组成分析:在高温放电条件下,体系中可稳定存在的成分为炭层及无机相,GF是体系中含量较高的无机增强相。由此推测,这些球状物质为熔融后的GF——高温作用下GF发生熔融,熔融态GF在表面张力驱动下收缩形成球状结构。

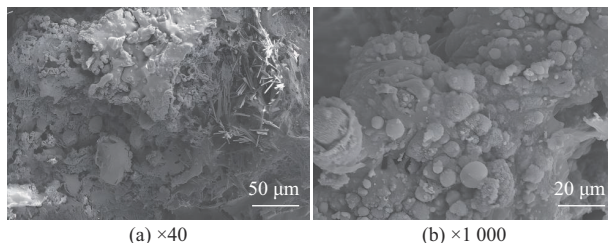


图3 有机磷阻燃GF增强PA6(样品0[#]) 在900 V下35滴电解液作用下漏电起痕区域的SEM照片

Fig. 3 SEM photos of tracking regions on organophosphorus flame-retardant GF reinforced PA6 (sample 0[#]) under action of 35 electrolyte droplets at 900 V

为进一步证实漏电起痕区域内球状物质是GF熔融物,对漏电起痕区域进行EDS元素分析,结果如图4所示。对比结果显示,球状物质中含有Si, Ca, Al与Mg等GF特征元素,其中Si的含量最高、其次是Ca;而表面光滑物质中未检测到Si和Mg,含量最高的元素是C、其次是O。图4中红框标记的球状物质各元素含量见表2,白框标记的表面光滑物质为未被熔蚀的残留物质,元素含量见表3。综合分析可知,GF在高温下熔融后,于冷却过程中在表面张力的作用下形成球状物质。由于熔融物表面存在微观小球状玻璃结构,会对光产生折射,因此在数码显微镜下会观测到如图2所示的五颜六色玻璃态物质。

通过以上有机磷阻燃GF增强PA6在CTI测试

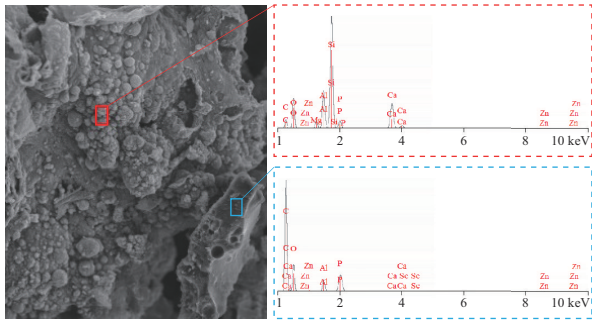


图4 有机磷阻燃GF增强PA6(样品0[#])在900 V的35滴电解液作用下漏电起痕区域的EDS元素分析

Fig. 4 EDS element analysis of tracking regions on organophosphorus flame-retardant GF reinforced PA6 (sample 0[#]) under action of 35 electrolyte droplets at 900 V

表2 球状物质元素含量

Tab. 2 Elemental composition of spherical substances

Items	C	O	Mg	Al	Si	P	Ca	Zn
Atomic percentage	24.595	32.022	1.777	7.462	23.623	2.043	7.555	0.923
Weight percentage	13.790	23.916	2.017	9.399	30.972	2.954	14.136	2.816

表3 表面光滑物质元素含量

Tab. 3 Elemental composition of smooth-surfaced substances

Items	C	O	Al	P	Ca	Sc	Zn
Atomic percentage	73.447	21.197	1.513	2.819	0.095	0.030	0.899
Weight percentage	62.417	23.996	2.888	6.179	0.269	0.096	4.156

失效过程中的形貌观测结果,可以推测GF导通导致CTI测试失效的机理如图5所示。CTI测试失效过程分为测试前、测试初期、测试中期与测试失效4个阶段。每个阶段均包含样品表面俯视图,以及经过电极中轴线垂直于样品表面的剖视图。图中灰色代表PA6树脂基体、橙黄色条状为GF、蓝色为电极、深灰色为漏电起痕区域、黑色条状为被熔蚀的

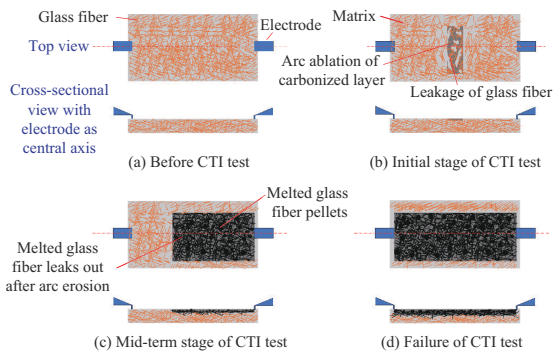


图5 有机磷阻燃GF增强PA6材料CTI测试失效机理

Fig. 5 Failure mechanism of organic phosphine flame retardant GF reinforced PA6 in CTI test

GF、黑色圆形为熔融GF冷却后形成的玻璃状物质。

CTI测试前,GF在PA6树脂基体中呈无规分布,均匀分散于样品内部。测试初期,导电液引发的电弧放电产生高温,首先熔蚀样品表面的树脂基体。在两电极中间区域,部分聚合物基体被熔蚀后发生炭化,形成黑色漏电起痕区域;同时,部分GF从基体中裸露出来,但纤维结构保持完整。随着放电次数增加,熔蚀掉的树脂基体增多,漏电起痕区域向两电极方向扩大,GF外露程度加深。部分纤维发生坍塌并相互搭接,形成GF网络;同时,部分外露GF在高温作用下熔融,冷却后形成玻璃微球。此阶段,漏电起痕区域已接触一侧电极,且局部熔蚀程度进一步加深。在测试失效阶段,随放电次数进一步增加,漏电起痕区域在高温作用下与两电极接触,炭层在两电极间形成导电通路,最终因电路导通、电流过载导致样品失效。导通过程中,GF导电通路产生大量焦耳热,进一步加速聚合物基体的熔蚀与炭化,使漏电起痕区域的深度显著增加。

2.2 有机磷阻燃GF增强PA6的CTI提升研究

根据前文对有机磷阻燃GF增强PA6的CTI测试失效机理研究,为提高材料的CTI,制备了一系列改性有机磷阻燃GF增强PA6材料。各材料样品的CTI值测试结果如图6所示,其中样品0[#],0-4%Talc,0-4%Al₂O₃,0-4%GM,0-4%GM-0.4%(Silicone MB-50%)的CTI值分别为800,900,900,850,950 V,CTI最高值较样品0[#]提升幅度达18.75%。加入绝缘矿粉填料(Talc,Al₂O₃)在聚合物基体中能阻隔炭痕的继续发展,同时这些矿粉具有熔点高、绝缘性好的特点,能有效提高漏电起痕区域的绝缘性能,从而将CTI值从800 V提高至900 V。低软化点的GM能在电弧放电过程中通过吸热熔融阻隔炭层,在冷却后固化,通过吸热散热机制循环带走热量,将改性有机磷阻燃GF增强PA6材料的CTI值从800 V提高至850 V。在含有质量分数4%GM的有机磷阻

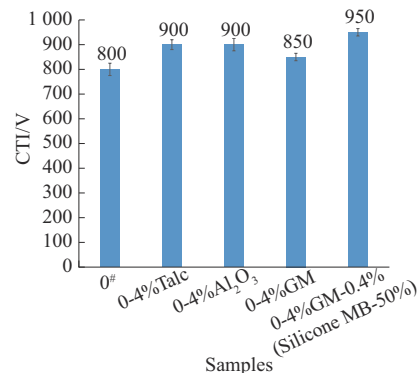


图6 有机磷阻燃GF增强PA6及其改性材料的CTI

Fig. 6 CTI of of organophosphorus flame-retardant GF reinforced PA6 and its modified materials

燃 GF 增强 PA6 材料中加入 0.4% 的 Silicone MB-50% 进一步优化其性能,发现低表面能助剂能迁移至样品表面形成疏水界面,加速导电液滴的脱离,减少电弧放电时间,最终将 CTI 值提升至 950 V。

为了进一步研究 Talc, Al_2O_3 , GM 以及硅酮对 CTI 的影响,将样品在固定电压 900 V 下做 CTI 测试,CTI 值低于 900 V 的样品 0[#], 0-4%GM 在滴加 35 滴、43 滴电解液滴后失效;而 CTI 值等于或高于 900 V 的 0-4%Talc, 0-4% Al_2O_3 , 0-4%GM-0.4%(Silicone MB-50%)样品在 50 滴电解液作用下没有失效。

图 7 为数码显微镜拍摄的样品 0[#], 0-4%GM 失

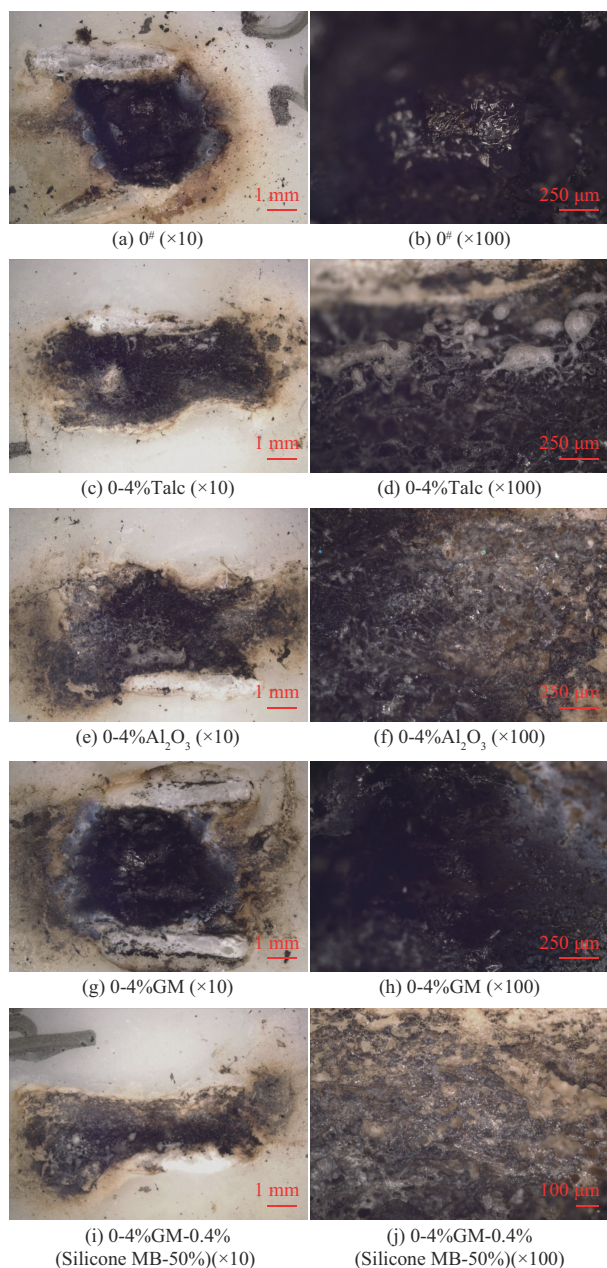


图 7 样品的数码显微镜照片

Fig. 7 Digital microscope photos of samples

效后的漏电起痕区域,以及样品 0-4%Talc, 0-4% Al_2O_3 , 0-4%GM-0.4%(Silicone MB-50%)经 50 滴电解液放电作用后的漏电起痕区域的宏观形貌。样品 0[#], 0-4%GM 因失效导通,放电区域形成深邃的黑色炭化层,GF 与 GM 在高温作用下熔融凝聚成大块整体,呈现彩色玻璃状物质形态。样品 0-4%Talc, 0-4% Al_2O_3 的 CTI 值均为 900 V, 抗漏电起痕能力接近,因此经 50 次放电后表面形貌类似,仅出现部分炭化熔融形成的网络结构,未发生导通失效。样品 0-4%GM-0.4%(Silicone MB-50%)的表面炭化与破坏程度比样品 0-4%Talc, 0-4% Al_2O_3 更轻微,GF 外露程度更低,因此导通失效概率降低,抗漏电起痕能力进一步提升。

通过 SEM 对上述样品进行微观形貌分析,结果如图 8 所示。样品 0[#], 0-4%GM 失效导通后,放电区域黑色炭化层为团聚的球状与块状结构,GF 在放电电弧高温作用下被融化所致。样品 0-4%Talc, 0-4% Al_2O_3 抗漏电起痕能力接近,在 900 V 下经 50 次放电后 GF 出现部分熔融断裂形成碎段,但 GF 有部分被熔融的痕迹,形成了小球富集在 GF 段表面。在 900 V 电压作用下,样品 0-4%Talc, 0-4% Al_2O_3 的 GF 保留完整性高于样品 0[#], 0-4%GM, 证明样品 0-4%Talc, 0-4% Al_2O_3 的抗漏电起痕能力高于样品 0[#],

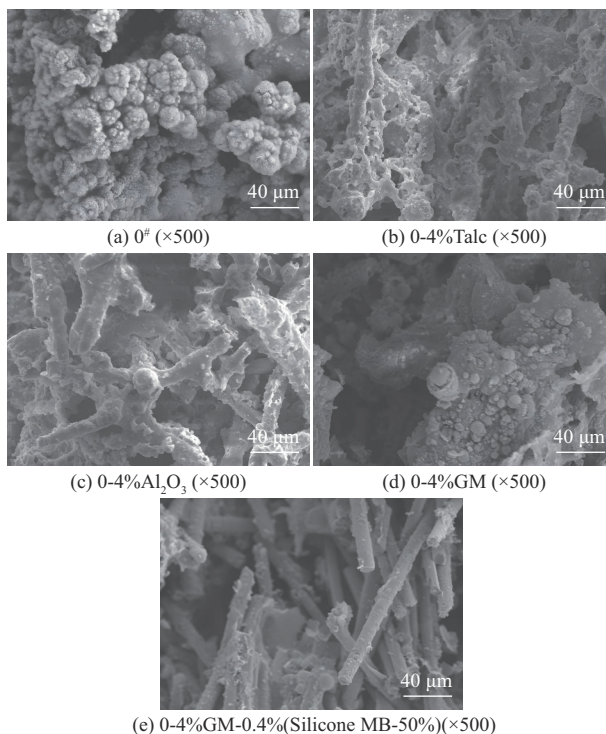


图 8 样品的 SEM 照片

Fig. 8 SEM photos of samples

0-4%GM。而样品 0-4%GM-0.4%(Silicone MB-50%) 在相同测试条件下,GF 的保留段长度、表面光滑程度等完整性明显比样品 0-4%Talc, 0-4%Al₂O₃ 更好,进一步说明样品 0-4%GM-0.4%(Silicone MB-50%)抗漏电起痕能力更强,CTI 值达到 950 V。

3 结论

(1)在 CTI 测试中,有机磷阻燃 GF 增强 PA6 体系样品表面树脂熔融、炭化形成漏电起痕区域,GF 裸露;随着放电次数增加,GF 在高温作用下熔融成玻璃微球并搭接成网络,最终漏电起痕区域与两电极接触形成导通电路,导致样品失效。

(2)在有机磷阻燃 GF 增强 PA6 中加入绝缘矿粉填料(Talc, Al₂O₃)、低软化点的 GM、低表面能硅酮,能起到阻隔炭痕发展、提高绝缘性、快速转移电弧放电热、延缓 GF 熔融导通、加速电解液滴脱离等作用。其中,添加 GM 和低表面能硅酮可将 CTI 从未加助剂的 800 V 提高至 950 V,提升幅度达 18.75%。

(3)在相同电压下进行 CTI 测试时,低 CTI 样品失效时 GF 被融化成块状,随着抗漏电起痕能力(CTI 值)提升,样品中 GF 完整性提升、炭化程度降低。

参考文献

- [1] RIBA J R, MORENO-EGUILAZ M, BOGARRA S. Tracking resistance in polymeric insulation materials for high-voltage electrical mobility applications evaluated by existing test methods: Identified research needs[J]. *Polymers*, 2023, 15(18). DOI: 10.3390/polym15183717.
- [2] BILLINGS M J, SMITH A, WILKINS R. Tracking in polymeric insulation[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1967, EI-2(3):131-137.
- [3] 张强,徐东东.玻纤增强 PPS 漏电起痕性能[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(7):106-110.
ZHANG Qiang, XU Dongdong. CTI performance of glass fiber reinforced PPS[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(7): 106-110.
- [4] HAN D H, PARK H Y, KANG D P, et al. Tracking and erosion resistance and hydrophobicity of HTV silicone rubber for outdoor insulators[C]//*Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*. New York: IEEE, 2000:354-357.
- [5] SARANG B, BASAPPA P, LAKDAWALA V. Effect of water droplets and water films on the electrical performance of practical outdoor insulators[C]//*2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*. New York: IEEE, 2010:1-6.
- [6] 杨涛,徐东东,张强,等.抗静电阻燃增强 PA6 材料的漏电起痕性能研究[J]. *塑料工业*, 2013, 41(2):115-118.
YANG Tao, XU Dongdong, ZHANG Qiang, et al. Study of CTI of the antistatic and flame retarded PA6 composite[J]. *China Plastics Industry*, 2013, 41(2):115-118.
- [7] 张伟,别群梅,袁锦瑶.高 CTI 值、无卤阻燃玻纤增强尼龙 66 的研究及应用[J]. *工程塑料应用*, 2006, 34(8):50-53.
ZHANG Wei, BIE Qunmei, YUAN Jinyao. Study on high CTI value, halogen free flame-retardant glass fibre reinforced nylon 66 [J]. *Engineering Plastics Application*, 2006, 34(8):50-53.
- [8] SARATHI R. Investigations of surface degradation of high-density polyethylene materials resulting from tracking, using physicochemical analysis[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2002, 83(13): 2 843-2 849.
- [9] 吴夕科,蔡凡一,谭东现,等.玻纤增强尼龙材料在严酷环境条件下耐电痕化特性研究[J]. *高压电器*, 2020, 56(11):34-38.
WU Xike, CAI Fanyi, TAN Dongxian, et al. Study on electrical tracking and erosion performance of glass fiber reinforced polyamide under severe environmental conditions[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(11):34-38.
- [10] 王正宏,张敏,黄宁选,等.尼龙 66 改性研究进展[J]. *工程塑料应用*, 2014, 42(1):121-125.
WANG Zhenghong, ZHANG Min, HUANG Ningxuan, et al. Research progress on modification of nylon 66[J]. *Engineering Plastics Application*, 2014, 42(1):121-125.
- [11] DRIGO N, GAAN S. Intrinsically flame retardant polyamides: Research progress in the last 15 years[J]. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 2023, 6(2):95-131.
- [12] 陈勇伟,王增效,徐莉莉.玻璃纤维增强无卤阻燃生物基 PA56 的应用评价[J]. *塑料工业*, 2023, 51(9):114-119.
CHEN Yongwei, WANG Zengxiao, XU Lili. Application evaluation of glass fiber reinforced halogen-free flame-retardant bio-based PA56[J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(9):114-119.
- [13] 余厚咏,陈芸卉,张云云,等.不同阻燃剂对尼龙材料加工改性的研究进展[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2024, 37(3):22-29, 45.
YU Houyong, CHEN Yunhui, ZHANG Yunyun, et al. Progress in the modification of nylon materials by different flame retardants [J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2024, 37(3):22-29, 45.
- [14] 魏然,赵明亮.低填充 P-Si 基阻燃体系协效阻燃 PA66 的制备及性能[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(8):169-175.
WEI Ran, ZHAO Mingliang. Preparation and performance of flame retardant PA66 by low-fill P-Si-based synergistic system[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(8):169-175.
- [15] 虞瑞雷,汤兆宾,叶耀挺,等.低压电器用高 CTI 值无卤阻燃尼龙材料[J]. *塑料*, 2020, 49(3):36-38, 79.
YU Ruilei, TANG Zhaobin, YE Yaoting, et al. Preparation and properties of halogen free flame-retardant nylon with high comparative tracking index[J]. *Plastics*, 2020, 49(3):36-38, 79.
- [16] WILKIE C A. *Non-Halogenated Flame Retardant Handbook*[M]. Beverly: Scrivener Publishing, 2014.
- [17] 葛骅.含磷阻燃剂/单体的合成及其聚酰胺的热稳定性与阻燃性能研究[D].合肥:中国科学技术大学,2017.
GE Hua. Synthesis of phosphorus-containing flame retardant/monomer and study on thermal stability and flame retardancy of polyamide[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.