中图分类号:TQ325.1 文献标志码:A 文章编号:2097-017X(2026)05-0087-07
DOI:10.3969/j.issn.2097-017X.2026.05.009

溴锑-硼酸锌协同阻燃在架空绝缘导线电缆料中的应用

陈家慧[1],彭 倩[1],周 锋[2],张春梅[3],王方强[1],王 瑶[2],刘华栋[1],曹之南[1],黄志成[1],濮峻嵩[1],王伟鱼[4]

(1.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;2.远东电缆有限公司,江苏 宜兴 214200;3.河南城建学院材料与化工学院,河南 平顶山 467000;4.上海交通大学材料科学与工程学院,上海 200240)

摘要:为提高架空绝缘导线用耐候型硅烷交联聚乙烯(SXLPE)的阻燃性能,采用三氧化二锑(Sb_2O_3)/十溴二苯乙烷(DBDPE)/硼酸锌(ZB)对SXLPE电缆料进行改性。研究了Sb_2O_3/DBDPE质量分数对SXLPE电缆料力学性能、电气性能、阻燃性能和热稳定性的影响。结果表明,阻燃料质量分数为46%时,复合材料拉伸强度可达18.4 MPa,断裂伸长率为456%,体积电阻率为1.8×10^{14} Ω·m,极限氧指数为28.5%,达到UL-94标准V-0级,热释放速率峰值(PHRR)为534.01 kW/m^2,总热释放量(THR)为18.7 MJ/m^2,总产烟量(TSP)为11.7 m^2,样品燃烧后残炭的SEM图显示表面已经基本无法找到孔洞,形成的炭层非常致密,复合材料力学、电气及阻燃性能均达到使用要求。

关键词:溴锑阻燃剂;硼酸锌;协同阻燃;阻燃电缆

Application of bromo antimony-zinc borate synergistic flame retardant in overhead insulated conductor cable material

CHEN Jiahui[1], PENG Qian[1], ZHOU Feng[2], ZHANG Chunmei[3], WANG Fangqiang[1], WANG Yao[2], LIU Huadong[1], CAO Zhinan[1], HUANG Zhicheng[1], PU Junsong[1], WANG Weiyu[4]

(1. *State Grid Sichuan Electric Power Research Institute*, *Chengdu* 610041, *China*; 2. *Far East Cable Co., Ltd.*, *Yixing* 214200, *China*; 3. *School of Materials and Chemical Engineering*, *Henan University of Urban Construction*, *Pingdingshan* 467000, *China*; 4. *School of Materials Science and Engineering*, *Shanghai Jiao Tong University*, *Shanghai* 200240, *China*)

Abstract: In order to improve the flame retardancy of weather resistant silane cross-linked polyethylene (SXLPE) for overhead insulated conductors, the SXLPE cable material is modified with antimony trioxide (Sb_2O_3)/decabromodiphenyl ethane (DBDPE)/zinc borate (ZB). The influence of the mass fraction of Sb_2O_3/DBDPE on the mechanical properties, electrical properties, flame retardancy and thermal stability of SXLPE cable materials is studied. The results show that when the mass fraction of Sb_2O_3/DBDPE is 46%, the tensile strength of the composite material reaches 18.4 MPa, the elongation at break reaches 456%, the volume resistivity reaches 1.8×1014 Ω·m, the

收稿日期:2026-04-01
基金项目:国网四川省电力公司科技项目(521997230030)
作者简介:陈家慧(1991—),女,博士,高级工程师。研究方向:电网设备失效分析及新材料研究。

ultimate oxygen index is 28.5%, reaching the UL-94 standard V-0 level, the peak heat release rate (PHRR) is 534.01 kW/m^2, the total heat release (THR) is 18.7 MJ/m^2, and the total smoke production (TSP) is 11.7 m^2. Furthermore, the SEM images of the residual carbon after combustion of the sample show that almost no pores can be found on the surface, and the formed carbon layer is very dense. The mechanical, electrical, and flame retardant properties of the composite material all meet the requirements for use.

Keywords: bromo antimony flame retardant; zinc borate; synergistic flame retardant; flame retardant cable

常规的架空绝缘导线采用耐候型硅烷交联聚乙烯(SXLPE)绝缘料作为导体外的绝缘层,具有电绝缘性能好、耐高温、强度高、耐磨性好、尺寸稳定性佳等优势[1-2],生产所需的设备简单,操作简便,成本低廉[3-5]。交联聚乙烯是一种以碳氢元素为主体的高分子材料,极限氧指数(LOI)约为17.4%,属于易燃品[6-9],其燃烧过程中会产生大量的滴落物,大量带有明火的滴落物会导致周围树木或草木发生燃烧,从而引发森林或草原火灾。因此,开发阻燃防滴落硅烷交联聚乙烯绝缘料对于扩大其在电线电缆方面的应用有重要意义。

卤系特别是溴系阻燃剂具有添加量少、相容性好、阻燃效率高等优点,目前卤系阻燃剂仍然是北美电线电缆阻燃剂的最佳选择[10]。ZHENG等[11]开发了一种兼具阻燃性和透明度的高分子溴阻燃剂,含有5%(质量分数)溴化聚碳酸酯的PC复合材料UL-94达到V-0级,LOI增加了10.3%,峰值放热率(PHRR)降低了28.6%,点火时间(TTI)延迟了21.3%。溴锑阻燃剂是一种重要的高效协同阻燃剂。LI等[12]采用三氧化二锑(Sb_2O_3)/十溴二苯乙烷(DBDPE)协同阻燃剂对ACS树脂进行改性,当Sb_2O_3/DBDPE质量分数为10%时,阻燃ACS达到V-0级,且炭产量和热稳定性显著提高。硼酸锌(ZB)和溴锑阻燃剂复合可以起到良好的抑烟和抗熔滴作用。马萌等[13]报道了ZB可提高燃烧过程中炭的质量分数,对减少阻燃改性PET的熔滴起到了非常积极的作用。ZHANG等[14]研究表明,ZB和Sb_2O_3的融化可以吸收大量的热,之后与石墨炭结合的玻璃保护层会有效地延缓热量传递并抑制烟雾释放,使环氧基膨胀型阻燃涂料的热释放率、烟雾产生率、烟雾系数和火灾增长指数均显著降低。LIU等[15]报道了ZnB和Sb_2O_3组合能够抑制烟雾以及CO、CO_2和HCl等有毒气体的排放,二者协同作用,实现炭层保护、自由基捕获能以及抑制挥发性芳香化合物产生的效果,提高了氯丁橡胶(CR)的消防安全性,是提高阻燃和抑烟性能的一种经济有效的选择。

本研究使用Sb_2O_3/DBDPE作为主体阻燃剂,以ZB作为协效阻燃剂和抗滴落剂,在SXLPE中加入双峰聚乙烯提高阻燃剂的分散性并调整工艺性能,制备新型的阻燃SXLPE电缆料,通过对成品阻燃SXLPE电缆料的力学性能、体积电阻率、凝胶质量分数、热稳定性、极限氧指数(LOI)和垂直燃烧等级进行测试、分析,探究Sb_2O_3/DBDPE/ZB对阻燃SXLPE电缆料力学性能、电气性能和阻燃性能的影响。

1 实验部分

1.1 原材料

硅烷接枝低密度聚乙烯母料(A料),XL-2301,广州番禺光耀星瀚塑料有限公司;催化剂聚乙烯母料(B料),XL-2301,广州番禺光耀星瀚塑料有限公司;十溴二苯乙烷(DBDPE),三氧化二锑(Sb_2O_3),硼酸锌,均购自上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.2 设备及仪器

双螺杆挤出机,SJSZ-10A,武汉市瑞鸣塑料机械制造公司;微型注塑机,SZS-15,武汉市瑞鸣塑料机械制造公司;万能材料试验机,AI7000-M,高特威尔科学仪器(青岛)有限公司;高阻计,ZC36,上海第六电表厂有限公司;交联度测试仪,TG-869D,上海泰规检测设备有限公司;热重分析仪,TGA5500,美国TA仪器公司;差示扫描量热仪,DSC 2500,美国TA仪器公司;氧指数测定仪,HC-2C,南京上元分析仪器有限公司;水平垂直燃烧实验箱,CZF-3,南京江宁分析仪器厂。

1.3 试样的制备

将A料(接枝料:线性低密度聚乙烯28%、高密度聚乙烯60%、双峰聚乙烯10%、A171(乙烯基三甲

氧基硅烷）1.4%、交联剂（DCP）0.2%、抗氧剂（1010）0.4%）、B料（催化剂：线性低密度聚乙烯28%、炭黑70%、抗氧剂1%、催化剂（DBDTL）1%）、C料（阻燃料：高密度聚乙烯15%、聚烯烃弹性体10%、DBDPE 50%、Sb_2O_3 25%）和D料（抗滴落剂：ZB 50%、线性低密度聚乙烯50%）按比例混合均匀后加入双螺杆挤出机，挤出造粒后加入注塑机注塑成型得到标准测试样条。将样品置于85 ℃水浴浸泡10 h，取出置于室温晾干。各组分质量分数如表1所示。

表1　阻燃SXLPE电缆料各组分的质量分数

Tab.1　Mass fraction of each component in flame-retardant SXLPE cable material

样品	质量分数/%			
	A料	B料	C料	D料
S-1	50	5	40	5
S-2	48	5	42	5
S-3	46	5	44	5
S-4	44	5	46	5
S-5	42	5	48	5
S-6	40	5	50	5

1.4　测试与表征

拉伸性能测试：按照GB/T 1040.3—2006标准进行测试，拉伸速度为250±50 mm/min。

极限氧指数（LOI）测试：按照GB/T 2406.2—2009标准进行测试，试样尺寸为120 mm×6.5 mm×3 mm。

垂直燃烧性能（UL-94）测试：按照GB/T 2408—2021标准进行测试，试样尺寸为125 mm×13 mm×3 mm。

总热释放量（THR）、总产烟量（TSP）和热释放速率峰值（PHRR）测试：根据标准ISO 5660-1，在50 kW/m^{2}条件下，通过6810锥形量热仪对复合材料样条进行测试，样条尺寸为100 mm×100 mm×3 mm，分析材料的燃烧行为。

扫描电镜（SEM）测试：将样品在氮气氛围下于气氛炉中600 ℃煅烧10 min获得不同样品的残炭，通过SEM对不同样品的残炭进行形貌表征。

交联度（即凝胶质量分数）按JB/T 10437—2004标准进行测试，所用溶剂为二甲苯。试样交联度计算如下：

$$Gel=(W_2-W)/(W_1-W)\times 100\%$$

式中，W为铜网重量；W_1为萃取前试样与铜网的总重量；W_2为萃取后铜网与试样的总重量。

热重分析（TG）：测定试样的热稳定性，升温速率为10 ℃/min，温度范围为室温～800 ℃，氮气气氛。

2　结果与讨论

2.1　力学性能分析

力学性能是衡量电缆料的重要基础指标之一，国内缺少阻燃SXLPE电缆料的技术标准，力学性能指标多以线缆厂家企标规定为主，目前多数线缆厂家规定指标为拉伸强度不低于14 MPa，断裂伸长率不低于400%[16]。具有不同阻燃剂质量分数的SXLPE电缆料的拉伸强度和断裂伸长率性能如图1所示，随着阻燃料质量分数的增加，S-1至S-6样品的拉伸强度分别为19、19.3、19.5、18.4、17.5和12.4 MPa，断裂伸长率分别为498%、489%、474%、456%、398%和322%，随着阻燃料质量分数的增加，材料拉伸强度先增大后减小，断裂伸长率逐渐减小。当阻燃剂添加量较少时（S-1→S-3），能够在树脂分子链之间形成物理纠缠节点，起到物理交联补强作用，有效限制SXLPE分子链自由滑移，同时未挤占过多基体树脂占比，树脂分子链间作用力相对充足，因此材料拉伸强度持续上升[12]，在S-3处达到峰值19.5 MPa。随着阻燃料质量分数的继续增加（S-4及之后），过量Sb_2O_3/DBDPE会破坏树脂基体连续相的分布，削弱树脂分子链间的相互作用力[17]；此外，过量阻燃剂在树脂中难以均匀分散，容易产生应力集中点或团聚缺陷[18]，导致复合材料在拉伸时局部过早破坏，从而使复合材料拉伸强度和断裂伸长率急剧下降。

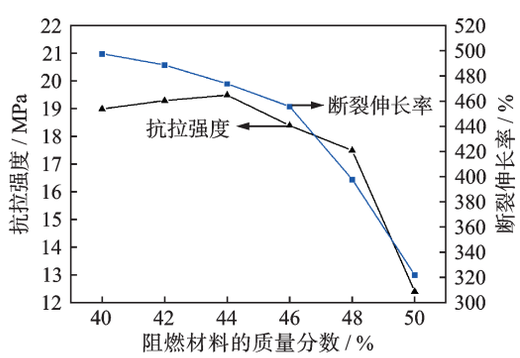

图1　阻燃料质量分数对SXLPE电缆料拉伸强度和断裂伸长率的影响

Fig.1　The effect of flame-retardant mass fraction on the tensile strength and elongation at break properties of SXLPE cable material

2.2 体积电阻率性能分析

阻燃SXLPE电缆料应用于不同电压等级的线缆，在超高压线缆中也有应用，因此体积电阻率是一项十分关键的指标，目前行业内要求阻燃PE电缆料体积电阻率不低于1×10^{12} Ω·m[16]。具有不同阻燃剂质量分数的SXLPE电缆料的体积电阻率如图2所示。随着阻燃料质量分数的增加，S-1至S-6样品的体积电阻率值分别为2.6×10^{14}、2.8×10^{14}、2.9×10^{14}、1.8×10^{14}、4.9×10^{13}和1.1×10^{13} Ω·m，S-1至S-4号样品体积电阻率均达到10^{14} Ω·m级别，S-5和S-6号样品体积电阻率值下降至10^{13} Ω·m级别，Sb_2O_3/DBDPE添加过量过高会破坏聚烯烃树脂基体连续相的分布，使分子链间的间距增大，分子间作用力减小[9]；此外，阻燃料质量分数过高还会使基体树脂质量分数减少，交联不充分，最终导致体积电阻率下降。

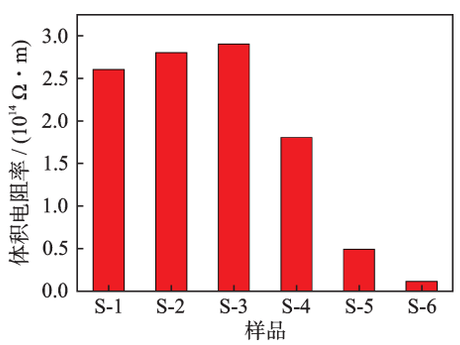

图2 阻燃料质量分数对SXLPE电缆料体积电阻率的影响

Fig.2 The effect of flame retardant mass fraction on the volume resistivity of SXLPE cable material

2.3 凝胶质量分数测试

通常用凝胶质量分数来表征交联聚乙烯交联程度，体系凝胶质量分数越大，交联度越高。S-1至S-4号样品凝胶质量分数测试结果如表2所示。

复合材料交联度随着阻燃料用量的增加略有升高，表明阻燃料的加入能在一定程度上提高SXLPE的交联度，一方面可能是Sb_2O_3/DBDPE的引入影响了聚乙烯分子结构的规整性，水在无定型分子结构中比结晶结构更易扩散，从而有助于交联；另一方面可能是Sb_2O_3/DBDPE具有一定亲水性，可以将更多水分带入基体内部，水浴交联结束后，残留在基体内部的水分仍然能参与硅烷之间的交联反应，进一步增加交联点，使交联度有所提高[9]。

表2 不同阻燃料添加量下SXLPE电缆料的凝胶质量分数

Tab. 2 Gel mass fraction of SXLPE cable material with different flame-retardant loadings

样品	W/g	W_1/g	W_2/g	凝胶质量分数/%
S-1	3.396	3.899	3.708	0.620
S-2	3.370	3.877	3.689	0.629
S-3	3.215	3.718	3.542	0.650
S-4	3.398	3.898	3.722	0.648

2.4 阻燃及燃烧行为与机理分析

LOI和垂直燃烧性能是衡量材料阻燃性能的重要指标，阻燃SXLPE电缆料的LOI性能和垂直燃烧等级如表3所示。随着Sb_2O_3/DBDPE质量分数的增加，SXLPE电缆料的LOI增大，当阻燃料质量分数为46%时，其LOI达到28.5%，样品在空气中点燃后具有自熄性能，达到UL-94标准V-0级，阻燃效果良好。有机卤素系阻燃剂通过卤素与锑的协同作用增强了阻燃效果，这主要归因于挥发性锑化合物的形成，如卤化锑(SbX_3)、卤化锑酰基(SbOX)。在加热过程中，聚合物基体中生成HBr，并与Sb_2O_3反应，最终形成挥发性$SbBr_3$。$SbBr_3$较高的蒸汽密度使其沉积在聚合物表面，降低了聚合物表面的含氧量，带走了大量燃烧产生的热量。这促进了聚合物表面形成致密稳定的炭化层，阻碍了燃烧过程中热和氧的传递，同时通过多步机理消除了氢自由基，最终抑制了聚合物的燃烧过程[12]。不仅如此，ZB和Sb_2O_3在熔化过程中会吸收大量热量，与石墨炭相结合形成的玻璃保护层，可以提高屏蔽层的稳定性和致密性，起到抑制烟气产生、热量释放和熔滴滴落的作用[14-15]，实现难燃性和少熔滴的效果，提高了SXLPE电缆料的防火安全性。模拟真实燃烧环境的锥形量热仪被用来评估复合材料的燃烧行为，结果如表3所示。随着样品中阻燃剂质量分数的增加，复合材料峰值热释放率(PHRR)值逐渐降低，与LOI的结果一致，总热释放量(THR)和总产烟量(TSP)也有所降低，表明复合材料不仅表现出更好

表3 阻燃SXLPE电缆料的LOI、UL-94和锥形量热结果

Tab.3 LOI, UL-94 and cone calorimeter results of flame-retardant SXLPE cable materials

样品	LOI/%	UL-94	PHRR/(kW·m^{-2})	THR/(MJ·m^{-2})	TSP/m^2
S-1	26.9	-	616.21	18.8	12.5
S-2	27.6	V-1	571.66	20.3	11.4
S-3	28.1	V-1	535.34	21.5	11.6
S-4	28.5	V-0	534.01	18.7	11.7
S-5	29.0	V-0	512.60	17.9	11.9
S-6	31.5	V-0	493.52	15.3	10.0

的阻燃性能，而且具有明显的抑烟效果，在燃烧过程中可以明显提高阻燃安全性。综上所述，Sb_2O_3/DBDPE/ZB的应用是提高SXLPE电缆料阻燃性能的一种经济有效的选择，为推广SXLPE电缆料的应用提供了一种切实可行的策略。

图3为不同阻燃剂质量分数的样品燃烧后残炭的电镜图，可以发现样品S-1残炭的表面有很多较大的孔洞，随着阻燃剂质量分数的增加，样品S-2至S-6残炭的表面孔洞逐渐变小且炭层更加致密，其中S-3还能发现明显的孔洞，S-4的孔洞已经非常小，S-5炭层的表面基本无法找到孔洞，形成的炭层非常致密。更加致密和连续的炭层可以形成一个屏障，抑制燃烧过程中的质量和热量传递，从而抑制燃烧[19]。

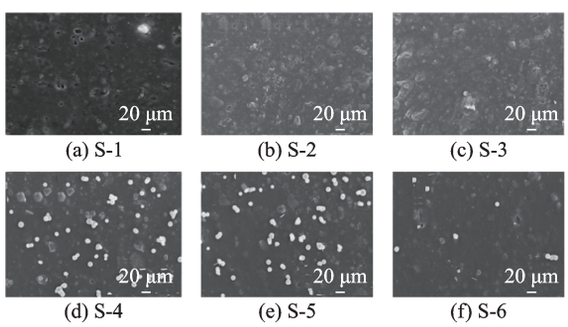

图3　样品残炭的SEM图

Fig.3　SEM images of the residual carbon of samples

通过热重分析进一步研究了Sb_2O_3/DBDPE/ZB在阻燃方面的协同作用。图4给出了样品S-1至S-4在氮气气氛中的热重(TG)曲线和微商热重(DTG)曲线，可以看出，阻燃SXLPE电缆料的热降解过程经历了三个阶段：第一阶段主要发生在330～400 ℃，在350 ℃达到最大失重率，快速的重量损失率是由于硼酸转化为沸点极低的氯化硼，在350 ℃下氯化硼会蒸发导致[14]。另一方面，此阶段与DBDPE的分解温度相匹配，在脱溴化氢过程中可以形成$ZnBr_2$，它具有路易斯酸特性，可以提高SXLPE炭收率[14]。此外，在DBDPE的热分解过程中，Sb_2O_3可以与产生的HBr反应，形成含有$SbBr_3$的溴化锑，这是一种高密度的不易燃气体，这些溴化锑可以沉积在SXLPE材料的表面，防止在较低温度范围内的挥发性排放。同时，$SbBr_3$可以捕获氢自由基(H·)等反应性自由基，并在气相中具有淬灭作用[12]。第二阶段发生在400～480 ℃，第三阶段发生在480～600 ℃，为SXLPE基体快速热分解阶段。结果表明，随着阻燃料质量分数的增加，S-1至S-4样品残炭率逐渐升高，分别为3.7%、4.4%、4.8%和5.6%，表明Sb_2O_3/DBDPE/ZB具有协同阻燃作用。

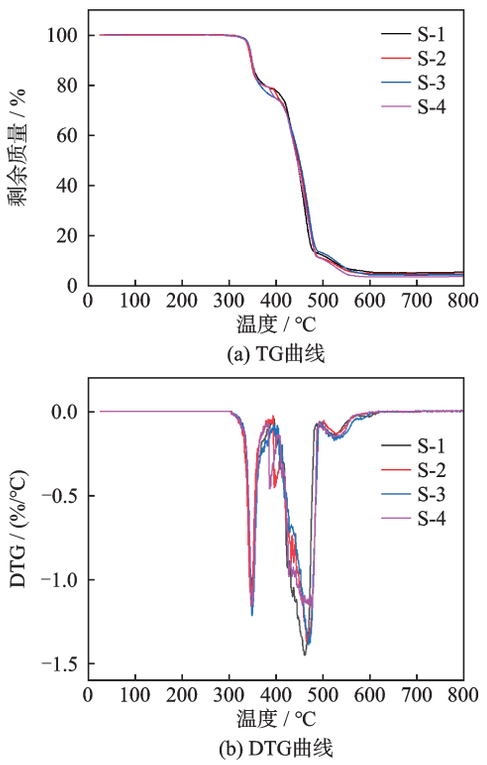

图4　不同阻燃料质量分数SXLPE电缆料在氮气气氛下的TG曲线和DTG曲线

Fig.4　The TG and DTG curves of SXLPE cable material with different flame-retardant mass fractions under nitrogen atmosphere

3　成品电缆试制及阻燃性能研究

经过对比分析，确定S-4号样品的机械、电气及阻燃等综合性能最优，选取S-4号配方进行成品电缆试制，获得表面光滑且无气孔的电缆绝缘层，生产JZ－JKLHA3YJ 10 kV样品100 m，产品如图5所示。

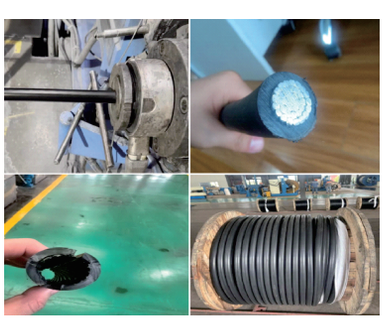

图5　成品阻燃SXLPE电缆产品

Fig.5　Photograph of the finished flame-retardant SXLPE cable products

按照GB/T 18380标准，对成品架空绝缘SXLPE电缆样品进行垂直燃烧测试，持续供火3 min(标准要求为2 min)，测试结果如表4所示，产品无滴落物。

表4 成品架空绝缘SXLPE电缆样品垂直燃烧测试标准要求及测试结果

Tab.4 Vertical burning test standard requirements and test results of the finished overhead insulated SXLPE

项目	标准要求	测试结果
单根垂直燃烧试验(上支架下缘与碳化部分上起始点之间的距离)	＞50 mm	360 mm
单根垂直燃烧试验(上支架下缘与碳化部分下起始点之间的距离)	＜540 mm	489 mm
滴落情况	无滴落物或滴落物不会引燃下方50 mm处滤纸	无滴落物

按照GB/T 12666.2标准，对成品架空绝缘SXLPE电缆样品进行水平燃烧测试，供火30 s，测试结果如表5所示，产品无滴落物。

表5 成品架空绝缘SXLPE电缆样品水平燃烧测试标准要求及测试结果

Tab.5 Horizontal burning test standard requirements and test results of the finished overhead insulated SXLPE cable sample

项目	标准要求	测试结果
损毁长度	—	65 mm
滴落情况	无滴落物或滴落物不会引燃下方50 mm处滤纸	无滴落物

对成品架空绝缘SXLPE电缆样品进行极限状态下的燃烧性能测试，持续供火10 min，如图6所示，成品架空绝缘电缆样品几乎不延燃，无滴落，撤去火焰后短时间内能够熄灭，样品能够满足应用需求。

(a) 垂直燃烧试验后形貌 (b) 水平燃烧试验后形貌 (c) 持续供火下的垂直燃烧过程

(d) 持续供火垂直燃烧后试样形貌 (e) 持续供火下的水平燃烧过程 (f) 持续供火水平燃烧后试样形貌

图6 阻燃SXLPE架空绝缘成品电缆的燃烧试验照片

Fig.6 Photograph of combustion test on finished flame-retardant SXLPE overhead insulated cables

4 结束语

(1)使用Sb_2O_3/DBDPE作为主体阻燃剂，以ZB作为协效阻燃剂和抗滴落剂，制备阻燃SXLPE电缆料，阻燃料质量分数为46%时，复合材料极限氧指数为28.5%，达到UL-94标准V-0级，复合材料力学、电气及阻燃性能均达到使用要求。

(2)Sb_2O_3/DBDPE促进了聚合物表面形成致密稳定的炭化层，ZB和Sb_2O_3在熔化过程中会吸收大量热量，与石墨炭相结合形成的玻璃保护层，可以提高屏蔽层的稳定性和致密性，起到抑制烟气产生、热量释放和熔滴滴落的作用，实现难燃性和少熔滴的效果。

(3)对成品架空绝缘电缆样品进行极限状态下的垂直燃烧和水平燃烧测试，持续供火10 min，样品几乎不延燃，无滴落，撤去火焰后短时间内能够熄灭，能够满足实际应用需求。Sb_2O_3/DBDPE/ZB体系Okay的应用是提高SXLPE电缆料阻燃性能的一种经济有效的选择。

参考文献：

[1] HETTAL S, SURACI S V, ROLAND S, et al. Towards a kinetic modeling of the changes in the electrical properties of cable insulation during radio-thermal ageing in nuclear power plants. application to silane-crosslinked polyethylene[J]. Polymers, 2021, 13(24): 4427.

[2] XU A, ROLAND S, COLIN X. Thermal ageing of a silane-crosslinked polyethylene stabilised with an excess of Irganox 1076®[J]. Polymer Degradation and Stability, 2021, 189: 109597.

[3] SUN F S, YANG S Q, WANG Q. Selective decomposition process and mechanism of Si-O-Si cross-linking bonds in silane cross-linked polyethylene by solid-state shear milling[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020, 59(28): 12896-12905.

[4] SELVIN M, SHAH S, MARIA H J, et al. Review on recycling of cross-linked polyethylene[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2024, 63(3): 1200-1214.

[5] LIU Y J, LONG Y, QINGYUI W, et al. Effect of the cross-linking agent on the cross-linking degree and electrical properties of cross-linked polyethylene[J]. Materials Research Express, 2023, 10(5): 055301.

[6] 石埕荧. 基于环三磷腈衍生物的无卤阻燃辐照交联聚乙烯复合材料的制备及性能研究[D]. 长春：吉林大学, 2020.

[7] 叶林飞. 共单体促进聚乙烯熔融接枝硅氧烷及阻燃改性[D]. 合肥：合肥工业大学, 2022.

[8] 段春来. 国产硅烷交联低烟无卤阻燃料的研发[J]. 电线电缆, 2019, 62(4): 31-33.
[9] 袁俊轩. 阻燃硅烷交联聚乙烯电缆料的制备与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
[10] Morgan A B, Wilkie C A. Fire Retardancy of Polymeric Materials [M]. Third Edition. Florida: CRC Press, 2024.
[11] ZHENG Y, LIU Z S, GE B D, et al. Bromine-containing copolymer polycarbonate for simultaneous thermal stability, transparency, and thin-wall flame-retardant polycarbonate [J]. Polymer, 2024, 311: 127532.
[12] LI M D, NIE B, SUN L T, et al. Enhancement of flame retardancy of ACS resin with synergistic flame retardant antimony oxide/decabromodiphenyl ethane [J]. Journal of Macromolecular Science, Part A, 2025, 62(3): 285-293.
[13] 马萌. 硼酸锌复合阻燃PET的制备及性能研究[D]. 北京:北京服装学院, 2015.
[14] ZHANG F, CHEN P F, WANG Y, et al. Smoke suppression and synergistic flame retardancy properties of zinc borate and diantimony trioxide in epoxy-based intumescent fire-retardant coating [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2016, 123(2): 1319-1327.
[15] LIU L H, ZHANG Y, WANG T T, et al. Dependence of flame retardancy and smoke suppression properties of chloroprene rubber on zinc borate and antimony trioxide loadings [J]. Materials Today Chemistry, 2024, 36: 101966.
[16] 叶翔宇. 三聚氰胺氰尿酸盐在阻燃聚乙烯电缆料中的应用与性能研究[J]. 中国塑料, 2025, 39(7): 28-31.
[17] 何凤, 邹修敏, 周松, 等. EVA-g-MAH和滑石粉对金属氢氧化物/LLDPE材料性能的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(6): 35-40.
[18] 李云帆. 镁基功能化固化剂及本征阻燃环氧树脂的制备和性能研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2025.
[19] 朱元昭. 聚磷腈微纳材料形貌结构对PET阻燃性能的影响研究[D]. 上海: 东华大学, 2022.

(上接第86页)

[4] LV R, LI Z L, WEI Y C, et al. BN interface in SiC/SiC composites: a review on structural characteristics, service failure mechanisms, and optimization strategies [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2026, 40: 763-789.
[5] 刘巧沐, 黄顺洲, 何爱杰. 碳化硅陶瓷基复合材料环境障涂层研究进展[J]. 材料工程, 2018, 46(10): 1-8.
[6] CHRISTENSEN V L, GAVALDA-DIAZ O, SKILLETT R, et al. Influence of BN microstructure on oxidation of SiC/BN/SiC composites[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2025, 108(3): e20230.
[7] 景鑫. 三维编织陶瓷基复合材料高温力学性能研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2016.
[8] YANG H T, LU Z L, BIE B X, et al. Microstructure and damage evolution of SiC_f/PyC/SiC and SiC_f/BN/SiC mini-composites: a synchrotron X-ray computed microtomography study[J]. Ceramics International, 2019, 45(9): 11395-11402.
[9] 张钧, 栾新刚, 成来飞, 等. 应力氧化环境中3D C_f/SiC复合材料损伤演变[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(5): 799-804.
[10] 陈婧, 吕熙睿, 张佳平, 等. CVI+PIP复合工艺制备SiC_f/SiC复合材料的微观结构和水氧腐蚀行为研究[J]. 陶瓷学报, 2022, 43(6): 1030-1036.
[11] XIA S R, CHANG Q, ZHANG Q, et al. Microstructure and mechanical properties of SiC_f/SiC composites with a hybrid BN interphases[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2026, 40: 1975-1984.
[12] MOHAN A, UDAYAKUMAR A, KAMARAJ M, et al. Impact of high temperature and water vapor on the oxidation behavior of chemical vapor infiltration-SiC_f/SiC composite[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2024, 33(19): 10104-10114.
[13] SMIALEK J L, ROBINSON R C, OPILA E J, et al. SiC and Si_3N_4 recession due to SiO_2 scale volatility under combustor conditions[J]. Advanced Composite Materials, 1999, 8(1): 33-45.
[14] 戴建伟. SiC_f/SiC复合材料BN/SiC界面层生长行为和环境损伤机制研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2020.
[15] ZHOU L, HU J B, YUAN W, et al. Enhanced water vapor corrosion resistance of SiC_f/SiC composites at 1200 - 1400 ℃ *via* integrated process[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2025, 45(13): 117498.
[16] KANAZAWA S, ZOK F W. BN recession and recession cessation in SiC/BN/SiC composites[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2026, 109(1): e70370.
[17] 艾莹珺, 赵春玲, 郎旭东, 等. 熔融渗硅工艺制备的SiC_f/SiC复合材料在水氧腐蚀环境中的氧化行为[J]. 材料工程, 2025, 53(5): 152-158.
[18] 杨金华, 丁宁, 刘伟, 等. 不同工艺制备的SiC_f/SiC复合材料水氧腐蚀行为[J]. 航空材料学报, 2024, 44(4): 57-67.
[19] 王雅娜, 李天山, 王海润, 等. GE公司预浸料-熔渗工艺SiC_f/SiC复合材料应用研究历程及启示[J]. 航空材料学报, 2025, 45(2): 1-17.
[20] Standard test method for monotonic compressive strength testing of continuous fiber-reinforced advanced ceramics with solid rectangular cross section test specimens at ambient temperatures: ASTM C1358[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2018.