压痕损伤对高压电缆绝缘层、屏蔽层微观结构及电气性能的影响

马 涛[1],高 鹏[1],孔雪城[1],宫毓斌[1],徐文震[1],马国彬[2]*,王淑娟[3]

(1.国网山东省电力公司淄博供电公司,山东 淄博 255000;2.山东理工大学电气与电子工程学院,山东 淄博 255000;3.华电淄博热电有限公司,山东 淄博 255000)

摘 要:为了研究压痕损伤对高压交联聚乙烯(XLPE)电缆绝缘及半导电屏蔽层电气性能的影响,模拟高压XLPE电缆的结构制备三明治复合结构试样(半导电缓冲层、半导电屏蔽层和XLPE绝缘),对其进行压力损伤联合热老化试验。采用扫描电子显微镜(SEM)对试样的微观性能进行表征,测试损伤试验前后试样的体积电阻率。结果表明:压痕损伤联合热老化试验后,各试样表面形貌更加粗糙。XLPE晶体分布均匀性降低,晶体结构被破坏,完整度下降,而半导电屏蔽层内部炭黑(CB)颗粒分布不均,团聚现象严重,出现与基体脱黏的现象。随着温度的升高,XLPE的体积电阻率逐渐下降;随着压痕深度的增加,XLPE的体积电阻率与活化能明显下降。在热老化、1.5倍压痕条件下,活化能下降最为严重,达到40%,绝缘性能显著下降。而半导电屏蔽层的体积电阻率随着损伤程度的增加呈上升趋势,导电网络逐渐被破坏。在1.5倍压痕、90 ℃条件下,体积电阻率提高66.5%,导电能力大幅减弱。

关键词:压痕损伤;热老化;交联聚乙烯;半导电屏蔽层;电气性能

中图分类号:TM347 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0156-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.027

Effect of Indentation Damage on Microstructure and Electrical Properties of High-voltage Cable Insulation Layer and Shielding Layer

MA Tao[1], GAO Peng[1], KONG Xuecheng[1], GONG Yubin[1], XU Wenzhen[1], MA Guobin[2]*, WANG Shujuan[3]

(1. Zibo Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Zibo 255000, China; 2. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 3. Huadian Zibo Thermoelectric Power Co. , Ltd. , Zibo 255000, China)

Abstract: To investigate the influence of indentation damage on the electrical properties of the insulation and semiconductive shielding layer of high-voltage cross-linked polyethylene (XLPE) cables, sandwich-structured composite specimens (comprising a semiconductive buffer layer, a semiconductive shielding layer, and XLPE insulation) were prepared to simulate the structure of high-voltage XLPE cables. These specimens were subjected to combined indentation damage and thermal aging tests. The microstructure of the specimens was characterized using scanning electron microscopy (SEM), and the volume resistivity was measured before and after the damage tests. The results showed that after the combined indentation damage and thermal aging tests, the surface morphology of all specimens became rougher. The uniformity of the XLPE crystal distribution decreased, the crystal structure was disrupted, and its integrity was reduced. Meanwhile, the carbon black (CB) particles within the semiconductive shielding layer exhibited uneven distribution and severe agglomeration, accompanied by debonding from the matrix. With increasing temperature, the volume resistivity of XLPE gradually decreased. Moreover, as the indentation depth increased, both the volume resistivity and the activation energy of XLPE decreased significantly. After thermal aging with 1.5-fold indentation damage, the activation energy decreased most severely, reaching 40%, indicating a substantial deterioration in insulation performance. In contrast, the volume resistivity of the semiconductive shielding layer showed an increasing trend with increasing

收稿日期Submitted date 2025-06-29;修回日期Revised date 2025-07-22;录用日期Accepted date 2025-08-12

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520603240007)

*联系人,lixiufeng0910@126.com

引用本文:马涛,高鹏,孔雪城,等.压痕损伤对高压电缆绝缘层、屏蔽层微观结构及电气性能的影响[J].塑料科技,2026,54(8):156-160.

Citation:MA T, GAO P, KONG X C, et al. Effect of indentation damage on microstructure and electrical properties of high-voltage cable insulation layer and shielding layer[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 156-160.

damage severity, indicating progressive destruction of the conductive network. At 1.5-fold indentation damage and 90 ℃, the volume resistivity increased by 66.5%, indicating a significant weakening of its electrical conductivity.

Keywords: Indentation damage; Thermal aging; XLPE; Semiconductive shielding layer; Electrical properties

为满足城市电网日益增长的电力输送和供电稳定性需求，高压交联聚乙烯(XLPE)电缆因机械性能优良[1]、安装维护便捷[2]及绝缘性能优异[3]等优势，在现代化城市电网中得到广泛应用。目前，国内高压XLPE电缆多采用金属皱纹铝护套结构，同时在铝护套与绝缘屏蔽层之间增设缓冲层[4]，以有效降低电缆在安装和运行过程中金属护套对绝缘层的机械损伤[5]。皱纹铝护套在高压电缆中主要起机械保护作用，但其与缓冲层之间的接触状态不良可能引发电接触烧蚀，已成为影响电缆可靠性的关键因素[6]。铝护套与缓冲层间接触方式不同，其故障特征也存在差异[7]。两者间存在空气间隙时，电场畸变与局部温升加剧，是诱发烧蚀的重要因素[8-9]。缓冲层受潮时，其结构特性易在接触界面引发局部放电和电化学腐蚀，最终可能导致烧蚀故障[10]。为避免上述问题，通常要求铝护套与缓冲层形成紧密贴合结构[11]。然而，该结构在电缆弯曲时易导致铝护套波谷挤压绝缘屏蔽层，形成不可恢复性压痕。压痕损伤会持续劣化绝缘性能，引发放电，最终导致电缆击穿[12]，严重缩短电缆运行寿命。因此，研究压痕损伤对高压电缆绝缘层与屏蔽层电气性能的影响，具有重要的现实意义。

本研究基于高压XLPE电缆绝缘层与屏蔽层的基本特性，通过压痕损伤与热老化联合试验，研究不可恢复性压痕对XLPE绝缘层、半导电屏蔽层微观结构与电气性能的影响，在模拟紧密接触条件下研究不同压痕程度对两者性能的影响，从微观结构角度揭示压痕损伤对绝缘层和屏蔽层电气性能的劣化机理，为工程中电缆压痕损伤评估及绝缘可靠性提升提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

XLPE，YJ-110，南京中超新材料股份有限公司；半导电屏蔽料，HFDA-0586，美国陶氏化学公司；半导电缓冲层，SCW-50，扬州腾飞电缆电器材料有限公司。

1.2 仪器与设备

游标卡尺，三圈牌，上海汇一尺业有限公司；扫描电子显微镜(SEM)，SU8010，日本日立公司；高阻计，ZC36，上海第六电表厂有限公司；平板硫化机，ZG-20T，东莞市正工机电设备科技有限公司。

1.3 样品制备

XLPE试样的制备：将110 kV XLPE绝缘料在平板硫化机上不加压预热后，在温度175 ℃、压力15 MPa的条件下，加压15 min，制备XLPE试样。

半导电屏蔽层试样的制备：半导电屏蔽料由乙烯-乙酸乙烯酯共聚物(EVA)、炭黑(CB)、抗氧剂以及交联剂等成分组成。将半导电屏蔽料在平板硫化机上不加压预热后，在温度175 ℃、压力15 MPa的条件下加压15 min，制备半导电屏蔽层试样。

压痕损伤联合热老化试验：为模拟电缆在运行中承受压痕损伤的状态，采用扭转夹具对三明治复合结构试样(半导电缓冲层、半导电屏蔽层和XLPE绝缘)施加压力。螺丝旋紧程度越大，试样所受外部压力越高，压痕深度随之增大。随后，将试样连同夹具一同置于135 ℃恒温老化箱中老化480 h。由于缓冲层为可压缩性海绵状材料，卸压后变形可恢复，难以准确定量表征压痕，因此仅对XLPE绝缘层及半导电屏蔽层进行压痕损伤分析。采用游标卡尺测量压痕深度，通过比较压痕前后试样厚度的变化确定压痕深度。图1为压痕深度测量。



(a) XLPE压痕测量　(b) 半导电屏蔽层压痕测量

图1 压痕深度测量

Fig.1 Measurement of indentation depth

测量压痕深度时，设置0.10 mm为1.0倍压痕深度，0.15 mm为1.5倍压痕深度。XLPE绝缘未进行压痕损伤时，试样厚度为1.35 mm；进行1.0倍压痕损伤时，试样厚度为1.25 mm；进行1.5倍压痕损伤时，试样厚度为1.20 mm。半导电屏蔽层未进行压痕损伤时，试样厚度为1.25 mm；进行1.0倍压痕损伤时，试样厚度为1.15 mm；进行1.5倍压痕损伤时，试样厚度为1.10 mm。

1.4 性能测试与表征

SEM测试：将XLPE与半导电屏蔽层试样分别在液氮中冷冻脆断，将XLPE试样放入5% $KMnO_4$浓硫酸溶液中腐蚀2 h，之后进行超声清洗和干燥处理。半导电屏蔽层不需要腐蚀。观察XLPE绝缘脆断面的晶体形态与半导电屏蔽层中导电粒子的分布情况。

XLPE体积电阻率测试：采用高阻计进行测试，分别在温度20、40、60、80、90 ℃下测量XLPE试样的体积电阻率，实验电压为1 kV。根据拟合后的体积电阻率(ρ_v)-温度(T)数据计算材料的活化能。

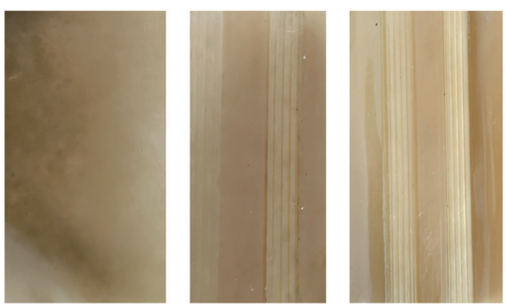
半导电屏蔽层体积电阻率测试：采用高阻计，根据JB/T 10738—2007中的方法，分别在20、90 ℃下测试半导

电屏蔽层的体积电阻率。

2 结果与讨论

2.1 压痕损伤后试样的表面形貌分析

图2为XLPE经压痕损伤联合热老化后的表面形貌。从图2可以看出，无压痕损伤时XLPE试样表面较为平整光滑。在经历1.0倍压痕损伤联合热老化试验后，试样表面颜色加深，呈现棕褐色，试样在高温老化后更加软化，出现夹具的压痕印迹，压痕区域试样明显变薄。在1.5倍压痕损伤时，压痕深度高达0.15 mm。可见压痕损伤联合热老化试验会严重破坏XLPE试样的表面形貌。

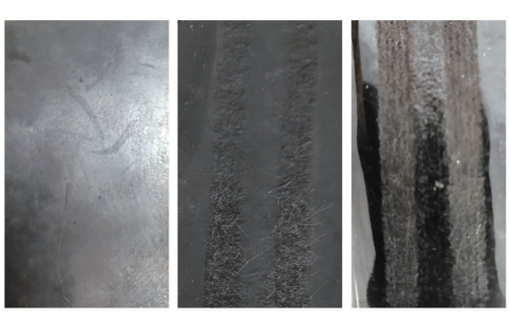


(a) 无压痕 (b) 1.0 倍压痕 (c) 1.5 倍压痕

图2 XLPE经压痕损伤联合热老化后的表面形貌

Fig.2 Surface morphology of XLPE after indentation damage combined with thermal aging

图3为半导电屏蔽层经压痕损伤联合热老化后的表面形貌。从图3可以看出，未经过压痕损伤时试样表面光滑程度较高，无明显损伤。在压痕损伤联合热老化试验后，试样表面颜色无明显变化，但老化过程中的高温使半导电屏蔽层中EVA基体发生熔化，在与半导电缓冲层的接触界面发生粘连现象。去掉夹具后，半导电缓冲层已部分附着在半导电屏蔽层表面，尤其是图3c中1.5倍压痕损伤联合热老化试验后，半导电缓冲层已牢固附着在半导电屏蔽层上，无法实现界面的完整剥离。此时，压痕深度达到最大，为0.15 mm。



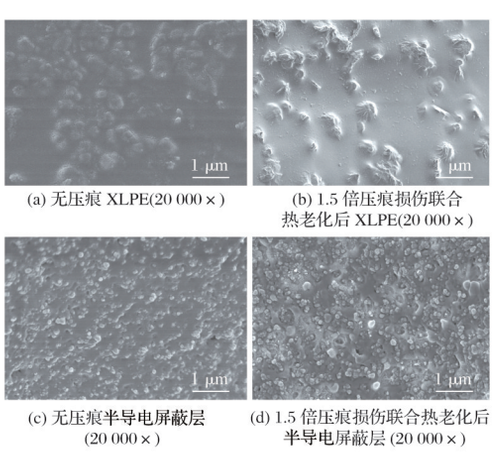
(a) 无压痕 (b) 1.0 倍压痕 (c) 1.5 倍压痕

图3 半导电屏蔽层经压痕损伤联合热老化后的表面形貌

Fig.3 Surface morphology of semiconductive shielding layer after indentation damage combined with thermal aging

2.2 压痕损伤后试样的SEM分析

为了深入研究压痕损伤对XLPE及半导电屏蔽层微观形态的影响，利用SEM分别观察正常试样与1.5倍压痕损伤联合热老化试验后试样脆断面的微观形貌。图4为压痕损伤联合热老化前后试样的SEM照片。从图4可以看出，XLPE为半结晶型聚合物，结晶形态为球晶，以晶核为起点，向四周发散性生长，直到生长的球晶相互接触为止，所以外形不一定为球状。从图4a可以看出，无压痕损伤时XLPE试样晶体分布较为均匀，晶体结构较为完整规则，堆砌较紧密，非晶区面积较少。从图4b可以看出，在经过1.5倍压痕损伤试验之后，XLPE晶体分布均匀性降低，部分晶体结构被破坏，部分晶片剥落，完整度下降。因为在老化作用下，XLPE分子链发生断裂，长度和键角发生变化，难以在晶核上缠绕折叠结晶，形成晶体缺陷[13]。压痕区域非晶区面积扩大，晶体出现明显损伤，压痕会导致XLPE中晶体区域发生局部变形，破坏分子链的规整排列，加剧晶体缺陷。从图4c可以看出，压痕损伤前屏蔽层中CB呈均匀分散状态，粒径较小且在EVA基体中分布均一，表面偶有细小孔洞，但整体致密性良好[14]。从图4d可以看出，压痕损伤联合热老化后，屏蔽层中CB粒子团聚加剧，分散性差，可见CB颗粒与基体界面之间已出现脱黏现象，局部有较多孔隙形成。这种结构变化主要源于压痕过程中局部应力集中，导致聚合物基体链段断裂，交联网络松弛[15]。在老化过程中，有机EVA基体与无机CB粒子的热膨胀系数不同，导致CB与基体界面结合力下降，界面出现脱黏现象。



(a) 无压痕 XLPE(20 000×) (b) 1.5 倍压痕损伤联合热老化后 XLPE(20 000×)

(c) 无压痕半导电屏蔽层 (20 000×) (d) 1.5 倍压痕损伤联合热老化后半导电屏蔽层 (20 000×)

图4 压痕损伤联合热老化前后试样的SEM照片

Fig.4 SEM images of specimens before and after indentation damage combined with thermal aging

2.3 压痕损伤对XLPE绝缘电气性能的影响

ρ_v是表征电介质绝缘性能的宏观参数，与体积电导率(γ_v)互为倒数[16]。XLPE的ρ_v主要受其内部载流子的浓度和迁移率的影响[17]，浓度和迁移率越高，XLPE的ρ_v越小。而XLPE内部的载流子迁移率主要由束缚势垒(即活化能)决定，束缚势垒越大，载流子的迁移率越小，试样的ρ_v越大。图5为压痕损伤联合热老化后XLPE的ρ_v-T关系曲线。从图5可以看出，随着测试温度的升高，各试样的ρ_v逐渐下降。原因是温度的升高使XLPE内部载流子受热激

发，易摆脱势垒的束缚，提高载流子的迁移率[18]，从而使其ρ_v下降。与老化前试样相比，老化后试样的ρ_v有所下降。原因是在热老化作用下，XLPE内部的长分子链发生断裂，生成数量更多的短分子链，这些短分子链增加了试样内部载流子的浓度。同时，材料内部结构因热裂解而变得松散，界面势垒降低，载流子受到的束缚力减弱，迁移率提高[18]，因而ρ_v有所下降。对比压痕前后试样的性能，发现存在压痕试样的ρ_v均低于无压痕的试样。随着压痕深度的增加，试样的ρ_v逐渐降低，热老化后1.5倍压痕的试样ρ_v下降最为严重。原因是压痕深度的增加使XLPE缺陷形成加剧，导致其势垒降低，进而影响其ρ_v。

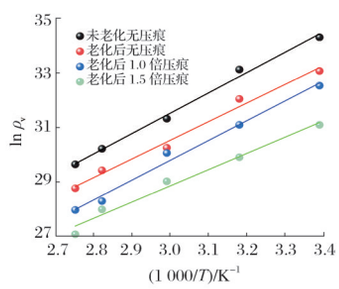


图5 压痕损伤联合热老化后XLPE的ρ_v-T关系曲线

Fig.5 ρ_v-T relationship curves of XLPE after indentation damage combined with thermal aging

表1为压痕损伤联合热老化后XLPE的活化能。从表1可以看出，热老化后试样的活化能均低于老化前试样。原因是热老化作用使分子间作用力对载流子的束缚能力减弱[13]，热老化过程中高温使材料内部自由体积增大，分子间距增加，从而使势垒能级降低，载流子跃迁的难度下降，最终导致试样活化能的降低。随着压痕深度的增加，试样活化能逐步降低，热老化后1.5倍压痕的试样活化能下降最为严重，较热老化后无压痕的试样下降32.8%；相较于未热老化无压痕的试样，则下降程度更为明显，达到40%。压痕使材料内部陷阱从深陷阱转为以浅陷阱为主[19]，载流子被捕获的概率减少，入陷电荷更容易从陷阱中脱离，势垒减小，活化能降低。可见，压痕损伤会严重劣化XLPE的绝缘性能。

表1 压痕损伤联合热老化后XLPE的活化能

Tab.1 Activation energy of XLPE after indentation damage combined with thermal aging 单位：eV

XLPE试样	活化能
未老化无压痕	0.65
老化后无压痕	0.58
老化后1.0倍压痕	0.48
老化后1.5倍压痕	0.39

2.4 压痕损伤对半导电屏蔽层电气性能的影响

导电性是评价半导电屏蔽层性能的重要指标，根据JB/T 10738—2007，选择测试温度为20 ℃和90 ℃下的ρ_v作为表征其电气性能的关键参数[20]。图6为压痕损伤联合热老化后半导电屏蔽层在20 ℃和90 ℃下的ρ_v。从图6可以看出，与20 ℃相比，试样在90 ℃时的ρ_v均有所上升。原因是随着测试温度的增加，半导电屏蔽层中基体树脂分子链运动更加活跃，其内部热胀冷缩的膨胀系数不同，从而使其体积膨胀，对CB导电网络造成了破坏[21]，进而导电能力下降，ρ_v上升。与老化前试样相比，老化后试样的ρ_v均出现一定程度的下降。原因是在热老化过程中，半导电屏蔽材料的基体结构虽然受到了一定程度的热劣化，但此时CB与基体之间的导电网络还未被明显破坏，同时热老化过程使基体分子链发生松弛，内部应力被消除[22]。在热老化过程中CB粒子进行热重排且运动加剧，使分子链形成更紧密的聚集态，因此其内部导电网络更加稳定，从而使其ρ_v下降[23]。

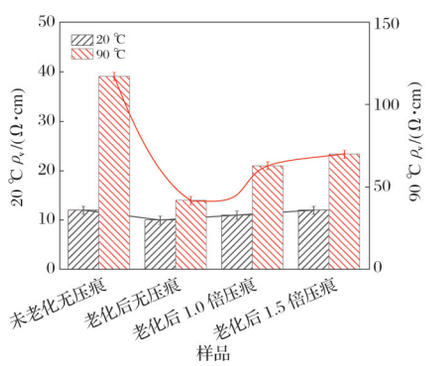


图6 压痕损伤联合热老化后半导电屏蔽层在20 ℃和90 ℃下的ρ_v

Fig.6 ρ_v of semiconductive shielding layer after indentation damage combined with thermal aging at 20 ℃ and 90 ℃

老化后，随着压痕深度的增加，试样的ρ_v逐渐上升，其中1.5倍压痕的试样相较无压痕的试样在测试温度为20 ℃下的ρ_v提高19.8%，而在90 ℃时ρ_v则提高66.5%。原因是在压痕产生的过程中，随宏观形变的发展，压痕处单位厚度内的CB颗粒之间距离变小，CB颗粒出现团聚现象[24]，CB颗粒分散不均，难以形成完整的导电通道。当压痕深度达到一定程度时，CB与EVA基体之间会出现脱黏现象。同时，在热老化作用下，基体材料的分解和交联反应加剧，CB颗粒形成的导电网络受热氧老化作用而被破坏，从而难以形成完整的导电路径[25]，使其导电能力下降，ρ_v上升。

2.5 不同压痕损伤下半导电屏蔽层CB粒子分布仿真

为模拟压痕损伤状态下半导电屏蔽层中CB粒子分布情况，采用COMSOL Multiphysics仿真软件，建立半导电屏蔽层微观仿真模型，在EVA基体中填充CB粒子，通过在其表面施加不同作用力模拟屏蔽层在真实运行过程中遭受压痕损伤的状态。图7为压痕损伤状态下半导电屏蔽层中CB粒子的分布。

CB颗粒在外部电场作用下，通过相互连接形成网状结构或缩短颗粒间距，使表面π电子形成连续导电通路，从而实现电流传导[26]。从图7可以看出，压痕损伤前，屏蔽

层中CB粒子分布均匀，导电网络较为完整。当屏蔽层表面施加压力达到1.0倍压痕损伤状态时，EVA基体发生轻微变形，CB粒子出现小规模团聚，部分导电网络被破坏。继续增大压力至1.5倍压痕损伤状态时，EVA基体变形加剧，CB粒子出现大规模团聚，无法形成有效的导电通路[27]。这是因为压痕程度增大使EVA基体受力增加，CB粒子间距减小，局部密度升高，引发团聚[24]，导致导电网络不完整，导电性能下降，该现象与SEM观察结果一致。

因此，压痕损伤与热老化均会对XLPE绝缘层及屏蔽层产生不同程度的劣化。随压痕深度和热老化程度的增加，XLPE绝缘的ρ_v与活化能逐渐降低，绝缘性能劣化。对于半导电屏蔽层，轻度热老化可使其ρ_v下降；而随着压痕损伤与热老化程度增强，内部CB粒子分布不均并出现脱黏现象，导电网络被破坏，ρ_v逐渐上升，导电能力减弱。

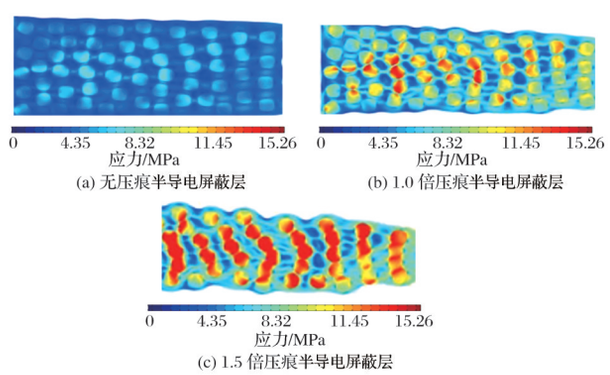


图7 压痕损伤状态下半导电屏蔽层中CB粒子的分布

Fig.7 Distribution of CB particles in semiconductor shielding layer under indentation damage state

3 结论

压痕损伤联合热老化试验对XLPE及半导电屏蔽层微观结构造成显著破坏。XLPE内部晶体分布均匀性降低，晶体结构完整性下降；半导电屏蔽层中CB粒子团聚加剧，分散性降低，难以形成完整的导电网络。压痕损伤联合热老化导致XLPE绝缘的体积电阻率与活化能均出现下降，尤其在1.5倍压痕损伤条件下，内部载流子浓度和迁移率上升，势垒降低。与未老化无损伤试样相比，活化能下降约40%，绝缘性能显著劣化。压痕损伤对半导电屏蔽层的导电性能也造成不利影响。在热-力联合作用下，CB颗粒分散不均，单位厚度内颗粒间距缩小，导电网络受热氧老化破坏并出现脱黏现象。压痕越深，导电能力下降越明显。

参考文献

[1] 潘燕凯. 电缆绝缘树脂用交联聚乙烯的制备及其改性研究进展[J]. 塑料科技, 2023, 51(3): 99-105.

[2] 杨卓然, 王晗, 童斌, 等. 输电线缆表面烧蚀与交联聚乙烯绝缘层相关性研究[J]. 塑料科技, 2025, 53(4): 99-103.

[3] 张凯, 刘爱民, 段玉兵, 等. 热老化对聚丙烯电缆绝缘料聚集态结构的影响[J]. 塑料科技, 2024, 52(10): 55-60.

[4] 孟峥峥, 李旭, 于洋, 等. 高压XLPE电缆缓冲层故障研究现状综述[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 33-41.

[5] 刘英, 陈嘉威, 赵明伟, 等. 高压XLPE电缆平滑铝复合护套的弯曲特性及结构设计[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 5036-5045.

[6] 蒋晓娟, 何伟. 一起通过局放在线检测技术成功发现的110 kV电缆本体缺陷[J]. 华东电力, 2011, 39(11): 1960-1963.

[7] BAI C. Cause analysis of a 110 kV cable buffer layer burn[C] // Proceedings of the 2014 Annual Meeting of the High Voltage Technical Committee of Jiangsu Electrical Engineering Society. Nanjing, China: National Engineering and Technology Digital Library, 2014.

[8] 周智鹏, 林国健, 陈真林, 等. 高压XLPE电缆绝缘外屏蔽与金属护套间放电特征及检测方法[J]. 电缆技术, 2018(1): 36-41.

[9] 张玮玮, 严有祥, 王蕾, 等. 110 kV XLPE电缆缓冲层放电灼伤问题的理化分析与仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 155-162.

[10] 邱玮, 章宇聪, 谢亿, 等. 高压XLPE电缆缓冲层缺陷研究现状综述[J]. 绝缘材料, 2024, 57(4): 13-21.

[11] 李陈莹, 李鸿泽, 陈杰, 等. 高压XLPE电力电缆缓冲层放电问题分析[J]. 电力工程技术, 2018, 37(2): 61-66.

[12] 欧阳本红, 李文杰, 刘英, 等. 高压XLPE电缆阻水缓冲层烧蚀机理[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3153-3162.

[13] 董芸滋, 高嫄, 李秀峰, 等. 交联度对交联聚乙烯/有机化蒙脱土纳米复合材料拉伸性能和介电性能的影响[J]. 电工技术学报, 2023, 38(5): 1154-1165.

[14] 杨前程, 侯帅, 贾利川, 等. 炭黑/乙烯-丙烯酸丁酯共聚物半导电屏蔽料制备与性能[J]. 塑料工业, 2022, 50(7): 162-169.

[15] CIGRE TB 446. Advanced design of metal laminated coverings: recommendation for tests, guide to use, operational feedback[R]. Paris, France: CIGRE Working Group B1-25, 2010.

[16] 李昊泽, 王强, 李秀峰, 等. 热老化对三元乙丙橡胶自熔式绝缘理化及介电性能的影响[J]. 复合材料学报, 2025, 42(7): 3744-3755.

[17] 李果, 李秀峰, 申晋, 等. 交联行为对纳米复合电介质电导特性和电气强度的影响[J]. 绝缘材料, 2019, 52(3): 25-30.

[18] 许庆重. 热老化对XLPE/OMMT纳米复合电介质结构和介电性能的影响[D]. 淄博: 山东理工大学, 2022.

[19] 袁宝, 毛应涛, 李维康, 等. 助交联剂对过氧化物交联聚乙烯绝缘料性能的影响[J]. 绝缘材料, 2020, 53(5): 34-40.

[20] 侯帅, 傅明利, 黎小林, 等. 加工助剂对高压电缆半导电屏蔽料性能影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 1222-1230.

[21] 杨俊. 聚丙烯基绝缘及半导电屏蔽料力学与电学性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.

[22] ZAREEI N, GERANMAYEH A, ESLAMI-FARSANI R. Interlaminar shear strength and tensile properties of environmentally-friendly fiber metal laminates reinforced by hybrid basalt and jute fibers[J]. Polymer Testing, 2019, 75: 205-212.

[23] 余钢, 章明秋, 曾汉民. PTC型炭黑/聚烯烃导电复合材料加工工艺的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 1998, 14(2): 111-114.

[24] 荣以平, 唐晓光, 徐小龙, 等. 电缆终端头扩径率对应力锥应力及电场分布的影响[J]. 电工技术, 2022(23): 247-251.

[25] 杨寒. 电缆及附件用半导电材料热老化特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.

[26] 吴道虎, 李玉华, 李敬武. 中高压电力电缆用可剥离型半导电屏蔽材料的研制[J]. 橡胶工业, 1997(1): 9-11.

[27] 傅明利, 侯帅, 王磊, 等. 高压电缆半导电屏蔽料研究进展及关键技术分析[J]. 材料导报, 2023, 37(21): 68-74.