

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.023

矿用聚乙烯导线电热协同老化 致灾效应及机理研究*

张英¹,王涛¹,王文伟²,田富超³,许磊⁴,林一凡¹,唐凯旋¹

(1. 武汉理工大学安全科学与应急管理学院,武汉 430070;2. 中国科学技术大学先进技术研究院,合肥 230000;
3. 中煤科工集团沈阳研究院有限公司煤矿灾害防控全国重点实验室,沈抚示范区 113122;
4. 应急管理部沈阳消防研究所消防与应急救援国家工程研究中心,沈阳 110034)

摘要: 矿井环境中,电气火灾是诱发瓦斯与粉尘爆炸的重要因素,而线缆老化又是引起电气火灾主要原因。在高温、高电压等矿井工况下,导线易发生电热协同老化,然而现有研究多聚焦于单一应力对导线火灾行为的影响。为弥补该不足,构建电热协同老化平台,结合火蔓延测试和同步热分析(TG-DSC),对比研究两种尺寸聚乙烯(PE)导线在电热协同老化与热老化条件下的火蔓延特性与热稳定性。结果表明:电热协同老化组火蔓延速率及质量损失速率分别下降至热老化组的91%和71%,熔融滴落频率显著增加;同时,绝缘层熔融峰前移、分解峰后移,残炭率提升明显。研究揭示电热应力对导线燃烧与热解行为的协同影响,为矿井电力系统火灾风险评估与防爆安全提供理论依据。

关键词: 矿井爆炸;导线火灾;电热老化;火蔓延;同步热分析

中图分类号: TM247

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2025)04-0215-08

Hazard Effects and Mechanism of Thermo-electrical Synergistic Aging in Mining Polyethylene-insulated Conductors

ZHANG Ying¹, WANG Tao¹, WANG Wen-wei², TIAN Fu-chao³, XU Lei⁴, LIN Yi-fan¹, TANG Kai-xuan¹

(1. School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. Institute of Advanced Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230000, China; 3. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, China Coal Technology and Engineering Group Shenyang Research Institute, Shenyang Demonstration Zone 113122, China; 4. Key Laboratory of Fire Prevention Technology, Shenyang Fire Science and Technology Research Institute of MEM, Shenyang 110034, China)

Abstract: Electrical fires caused by cable degradation constitute a critical ignition source for gas and dust explosions in underground mining environments, where aged cable insulation serves as the primary contributing factor. Under harsh mining conditions, characterized by elevated ambient temperatures and high operating voltages, electrical

收稿日期(Date of reception): 2025-04-16

网络首发日期(Published online): 2025-05-19

作者简介: 张英(1985-),男,工学博士、教授,主要研究方向为新能源利用热安全等, (E-mail) yzhang@whut.edu.cn。

通信作者: 唐凯旋(1993-),男,博士,主要研究方向为光伏与电气火灾防控, (E-mail) kaixuant@whut.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金(52374225); 辽宁省自然科学基金(2022-KF-23-07)

About the author: ZHANG Ying(1985-), male, Ph. D, Professor, mainly engaged in thermal safety in new energy utilization, (E-mail) yzhang@whut.edu.cn.

Corresponding author: TANG Kai-xuan(1993-), male, Ph. D, mainly engaged in prevention and control of photovoltaic and electrical fires, (E-mail) kaixuant@whut.edu.cn.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China(Grant No. 52374225), the Natural Science Foundation of Liaoning Province(Grant No. 2022-KF-23-07)

cables experience accelerated electrothermal aging due to synergistic temperature-voltage degradation mechanisms. However, existing studies have primarily concentrated on investigating the influence of individual stress factors on cable fire behavior. To address this research gap, this study developed an electro-thermal synergistic aging platform and conducted comparative investigations of flame propagation characteristics and thermal stability for two different-sized polyethylene (PE) wires using flame spread tests and simultaneous thermal analysis (TG-DSC), under both electro-thermal synergistic aging and pure thermal aging conditions. The results demonstrate that electro-thermal synergistic aging, compared to thermal aging alone, reduces the flame spread rate and mass loss rate to 91% and 71%, respectively, while significantly increasing molten dripping frequency. Furthermore, the insulation layer exhibits an earlier melting peak, a delayed decomposition peak, and more substantial increases in residual carbon content. These findings elucidate the synergistic effects of electrical and thermal stresses on the combustion and pyrolysis behavior of PE wire, offering valuable theoretical insights for fire risk assessment and prevention in underground mining electrical systems.

Key words: underground mine explosion; electrical wire fire; electro-thermal synergistic aging; flame propagation behavior; thermogravimetric-differential scanning calorimetry (TG-DSC)

在煤矿等易燃易爆环境中,电气设备的安全运行直接关系到井下作业人员的安全与矿井系统的稳定运行。近年来,多起矿井爆炸事故的诱因与电气火灾密切相关,国家能源局统计资料显示,在 34 起瓦斯爆炸事故中,15 起是由电气设备及电源线产生的电火花引爆,占事故总数的 44%,而导线绝缘材料的老化是导致电气火灾频发的重要因素之一。聚乙烯(PE)作为常用的矿用电缆绝缘材料,其在高温、高电压等复杂工况下易发生电热协同老化,进而影响其绝缘性能和热稳定性。特别是在密闭矿井环境中,导线老化导致的电气短路甚至火蔓延极易引燃积聚的瓦斯或煤尘,从而引发连锁爆炸事故,对矿井安全构成严重威胁^[1]。

在矿井下电力系统中,线缆作为关键的传输介质,随着其使用时间的增加,绝缘材料会出现老化现象,这一过程不仅影响其性能,还可能带来火灾风险。目前已有学者针对单一老化应力作用对线缆性能的影响展开研究。Li 探讨了加速水树老化试验对交联聚乙烯电缆(XLPE)材料性能的影响^[2],结果表明样品在低频区(< 50 Hz)电导率明显增加,老化导致结晶度和密度降低,熔融温度下降。Alghamdi 采用标准化的加速热老化技术^[3],基于阿伦尼乌斯模型建立寿命和应力的关系,以预测电缆寿命。也有学者对多应力作用对线缆性能的影响展开研究。Seguchi 通过拉伸性能、凝胶含量、溶胀比及红外光谱分析^[4],探讨了辐射和热老化对 XLPE 电缆绝缘材料降解的影响。Huang 通过对两根高压 XLPE 电缆进行为期 180 d 的电热老化试验^[5],评估其绝缘性能及实际运行中的可靠性。Yang 研究了热老化对交联聚乙烯(XLPE)电缆绝缘材料空间电荷特性和电导行为的影响^[6],发现热老化会导致空

间电荷积聚和电导率变化,从而影响电缆的绝缘性能。

线缆绝缘材料的老化不仅影响其电气性能,还可能对其热解与燃烧特性产生显著影响。Wang 等使用热重分析、傅里叶变换红外光谱及锥形量热仪进行试验^[7],揭示老化后电缆绝缘层热解起始温度升高、残余质量升高,气体释放时间延迟但速率更快,热释放速率降低,点燃时间更晚。同时,Wang 等还研究探讨热老化和入射外热流密度对建筑用阻燃 PE 电缆防火性能的影响^[8],发现热老化延长了点火时间并降低了峰值放热率。Deng 探讨了过载电流对 PE 铜导线燃烧特性的影响^[9],发现过载电流会加速 PE 绝缘层的热降解,降低点火时间和峰值热释放速率,增加火灾风险。

在电气火灾中,线缆不仅是火源,更是火蔓延的重要途径。火灾发生后,线缆的燃烧行为受到材料特性、老化程度、外部因素的多种因素影响,目前有众多学者对线缆火蔓延行为进行研究。Zhang 通过实验探讨了不同电流(0~50 A)下电线火蔓延引起的熔融滴落行为^[10],以更好地分析高电流下的线缆火灾特性,提出了滴落频率预测模型,并提供实验数据验证其准确性。Nakamura 实验研究了低压环境下单根 PE 线束的火焰传播特性^[11],为航空器及太空舱电气火灾预防提供实验支撑。

目前关于线缆老化、火灾安全性及相关性能的研究取得了一定进展,但现有研究仍存在一些不足,尤其是在电热协同老化作用下的线缆火灾特性分析方面。大多数研究聚焦于单一应力环境中的老化机制,未能充分考虑线缆在实际使用中尤其是矿井下环境中的多应力协同作用。这种局限性导致研究结果难以完全反映线缆在复杂工作环境中的真实表

现。此外,目前研究主要关注电热协同老化作用对线缆电气性能的影响,而对导线火灾特性的具体影响未得到系统分析。因此,针对老化过程中的多应力作用、火蔓延特性以及热解特性的关系,开展更为深入的研究尤为重要。在现有研究的基础上,自制电热协同老化平台,模拟矿井下线缆工作环境,进行加速老化试验。使用火蔓延平台实验研究老化 PE 导线在火蔓延过程中的行为表现,如火焰形态、火蔓延速率、质量损失速率、熔融物行为等变化规律,使用热分析平台研究老化作用后 PE 导线的热解特性。本研究旨在揭示老化方式及时间对 PE 导线从宏观燃烧行为到微观能量释放的作用形式,为电气火灾造成矿井下爆炸的风险管控提供理论依据。

1 实验装置与材料

1.1 实验装置

为研究热老化与电热协同老化对聚乙烯导线火

灾特性的影响,需构建同时施加热、电应力的平台。热老化平台由恒温箱 (TEST101-2AB) 与导线悬挂支架组成,两种导线 (长 400 mm) 均匀悬挂,间距适当,以确保充分接触气流,如图 1 所示。电热老化平台包括固定支架、高压直流电源 (Teslaman TCM6000i)、接地装置及恒温箱。参考真实场景中屏蔽层接地防干扰的做法,将导线一端接电源 (0 ~ 30 kV),屏蔽层接地,铜芯与屏蔽层间形成高压直流电场,整体置于恒温箱中。电场装置简化图如图 2 所示。使用傅里叶红外光谱仪 FTIR (美国 Thermo Fisher Scientific Nicolet iS20) 对不同应力作用下不同时间老化聚乙烯导线绝缘层进行分析。采用同步热分析测试仪 (美国 TA SDT Q600) 对不同应力作用下不同时间老化聚乙烯导线绝缘层进行分析,用于 TG-DSC 测试的老化聚乙烯样品约 10 mg,测试时的保护气氛为空气,升温速率为 10℃/min,升温范围 30℃至 700℃。

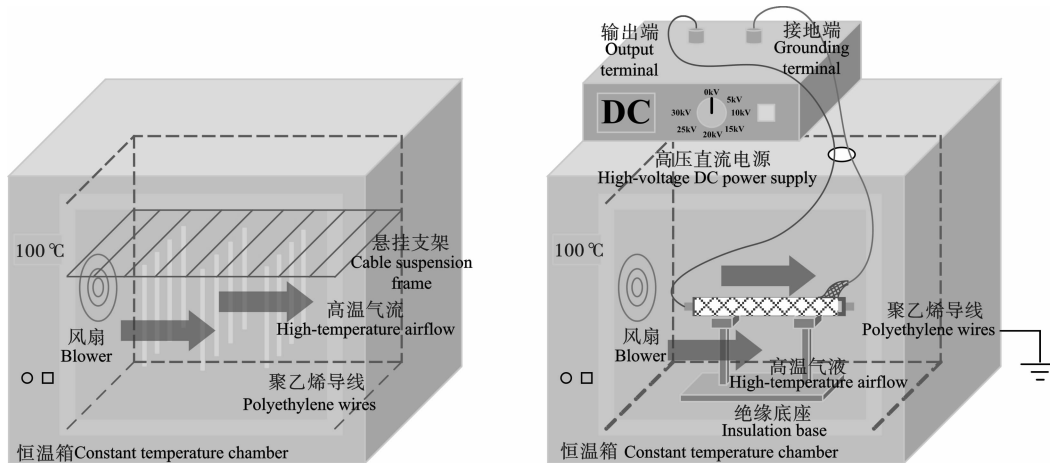


图 1 热老化实验平台(左)和电热老化实验平台(右)

Fig. 1 Thermal aging experimental platform(left) and electro-thermal aging experimental platform(right)

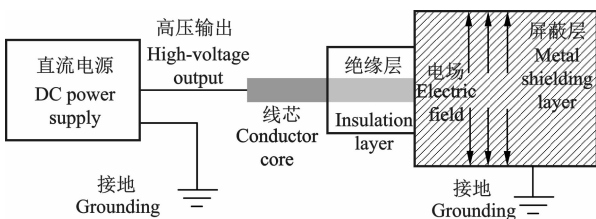


图 2 电热老化平台电路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the circuit in the electro-thermal aging platform

聚乙烯导线火蔓延实验平台如图 3 所示。使用支架、导线固定旋钮固定导线、各装置及测点;高精度电子天平 (梅特勒-托利多 ML6002T) 测量熔融滴落物质量及燃烧质量损失;DV 摄像机 (SONY FDR-AX755) 拍摄火蔓延过程;因在某些工况火蔓延过程

中火焰尺寸和亮度小, DV 拍摄较难识别,所以使用红外摄像机 (FLIR A615) 拍摄火蔓延过程和测量固相温度。

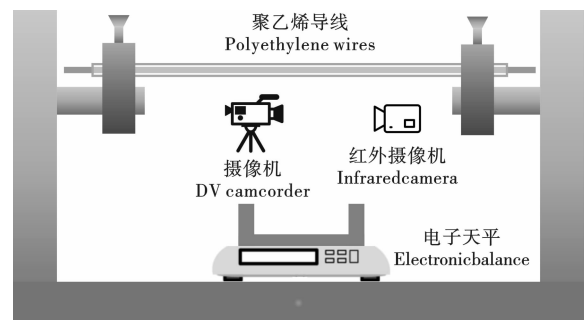


图 3 火蔓延实验平台

Fig. 3 Fire propagation experimental platform

1.2 实验材料

为了研究电热协同老化对聚乙烯导线火蔓延特性的影响,本实验选取了两种实际电力系统中常用规格的聚乙烯导线,具体尺寸和物理性能参数如表 1 所示。聚乙烯导线的热物性参数如表 2 所示。

表 1 实验导线尺寸

Table 1 Specifications of the experimental wires

导线 Wire	线芯直径 Conductor diameter/mm	绝缘层厚度 Insulation thickness/mm	外直径 Outer diameter/mm
I (细导线) Thin wire	0.9	1.05	3.0
II (粗导线) Thick wire	1.3	1.40	4.1

1.3 工况设置

设置热老化和电热协同老化两种老化方式。根据 GB/T2951.2 热老化实验标准对聚乙烯导线进行热老化处理^[12],一般温度升高 10℃,聚合物老化速

度会提高 2~3 倍,本次老化温度取 100℃,加速热老化 28 天的聚乙烯导线对应实际老化时间为 10~20 年。对于电热老化,参考 GB/T12972,电老化一般取 2~3 倍电缆额定电压^[13]。本次使用的聚乙烯导线为中压电力线,额定电压为 4 kV,故在电热协同老化过程中施加 10 kV 的高压直流电场。设定的工况如表 3 所示。

表 2 导线热物性参数

Table 2 Thermal properties of the wires

材料 Material	热物性 Thermal properties		
	密度 Density/ (kg·m ⁻³)	比热容 Specific heat capacity/ (kJ/kg/K)	电阻率 Resistivity/ (Ω·m)
PE(绝缘层) Insulation layer	930	1.916	—
Cu(线芯) Core	8960	0.39	1.75 × 10 ⁻⁸

表 3 工况设置

Table 3 Operating condition settings

热老化 Thermal aging			电热老化 Electro-thermal synergistic aging		
序号 Number	老化时间 Aging time/d	老化温度 Temperature	序号 Number	老化时间 Aging time/d	老化温度、电压 Temperature
1	0		7	0	
2	7		8	7	
3	14	100℃	9	14	100℃、10 kV
4	21		10	21	
5	28		11	28	

2 实验结果与讨论

2.1 电热协同老化对导线熔融滴落行为的影响

熔融物滴落是反映导线火灾危险性的重要现象,它可以引燃其他与之接触的可燃物,尤其在矿井环境中,如可燃气体、粉尘、电气设备、建筑材料等,从而引发二次火灾或爆炸。如图 4 和 5 所示, I 型聚乙烯导线在火蔓延过程中,滴落频率和质量随着老化时间的增加而增加,电热老化作用下增长更快且幅度更大。这可能是因为老化导致熔点下降,使聚乙烯更易熔化并滴落。而单次滴落质量则呈下降趋势,也是由于老化使 PE 绝缘层表面张力和黏性力减弱,无法抵抗重力。当表面张力和黏性力降低到一定程度时,出现流淌火滴落现象(图 6 和 7),这一现象在 II 型导线中尤为显著。流淌火滴落显著提高了引燃周围可燃物的风险,具有较高火灾危险性。

2.2 电热协同老化对火灾蔓延行为的影响

火蔓延速率是评估导线火灾特性的关键参数。利用 Matlab 图像识别提取火焰前沿位置,其斜率即为平均蔓延速率^[14]。图 8 显示两种导线在不同老化条件下火蔓延速率均随时间下降。I 型导线在电热老化下速率下降更快,因其提高材料活化能,抑制燃烧持续性; II 型导线因绝缘层较厚,热解延迟,14 d 后火蔓延速率显著下降。随老化进行,氧化与热解趋于饱和,速率下降逐渐放缓。28 d 时, I 型导线在热、电热老化后速率下降 10.71%、29.17%; II 型导线分别下降 11.32%、22.65%。说明电热老化更显著降低导线火蔓延速率,降低火灾风险。

燃烧质量损失速率反映材料燃烧持续性与剧烈程度,是评估火灾危险性的关键参数。通过线性拟合火蔓延过程中的质量损失与时间关系,发现该速率随老化时间增加而下降,趋势与火蔓延速率一致。电热老化组的质量损失速率低于热老化组,表明其

更显著抑制热解速率及气体释放,降低燃烧强度并减缓火蔓延,II型导线老化14 d后下降趋缓。I型导线热老化28 d质量损失速率下降16.8%,电热老化下降61.6%;II型导线分别下降17.74%、

58.33%。结果表明:老化特别是电热协同作用显著降低聚乙烯导线燃烧质量损失速率,从而有效减小火灾风险。见图9。

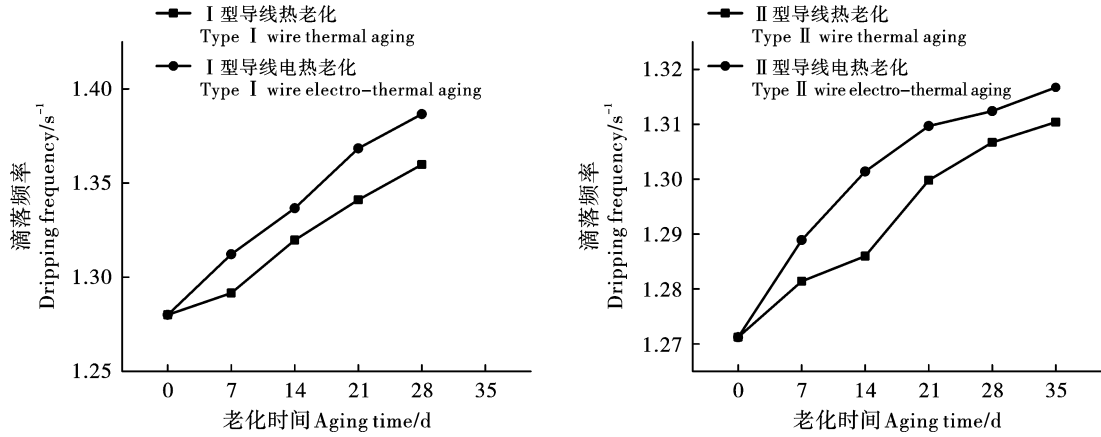


图4 滴落频率: I型导线(左), II型导线(右)

Fig. 4 Dripping frequency: type I wire(left), type II wire(right)

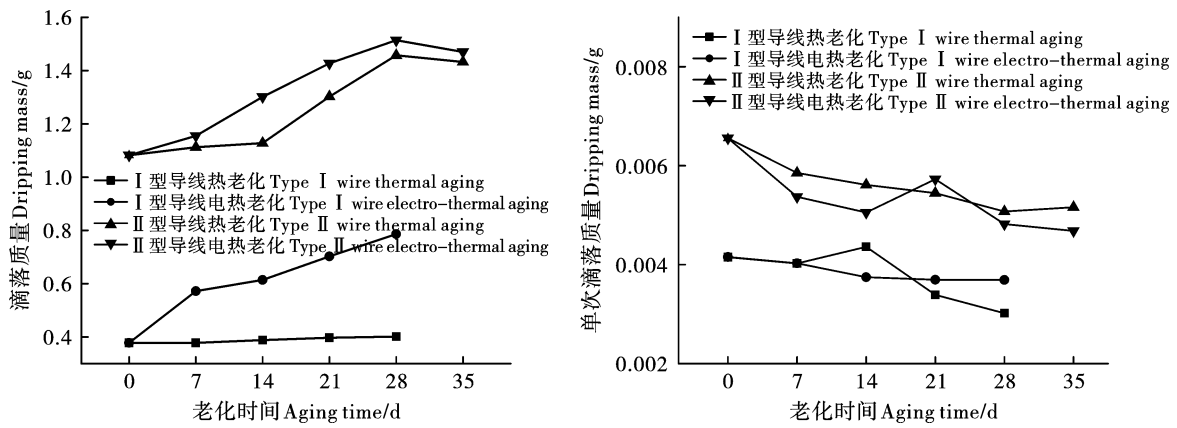


图5 滴落质量及单次滴落质量

Fig. 5 Droplet mass and single droplet mass

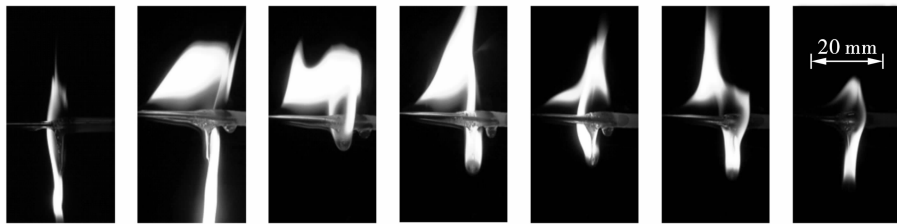


图6 I型导线电热老化28 d出现流淌火滴落现象

Fig. 6 Dripping phenomenon observed on type I wire after 28 days of electro-thermal aging

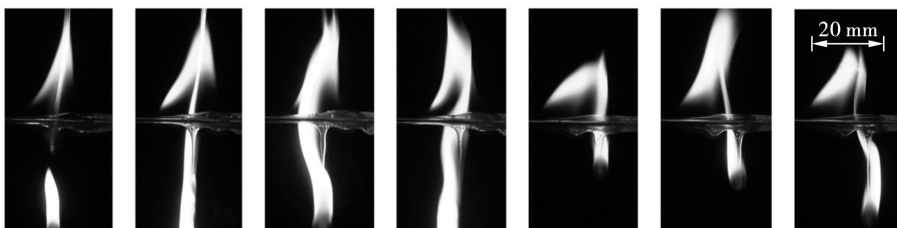


图7 II型导线电热老化28 d出现流淌火滴落现象

Fig. 7 Dripping phenomenon observed on type II wire after 28 days of electro-thermal aging

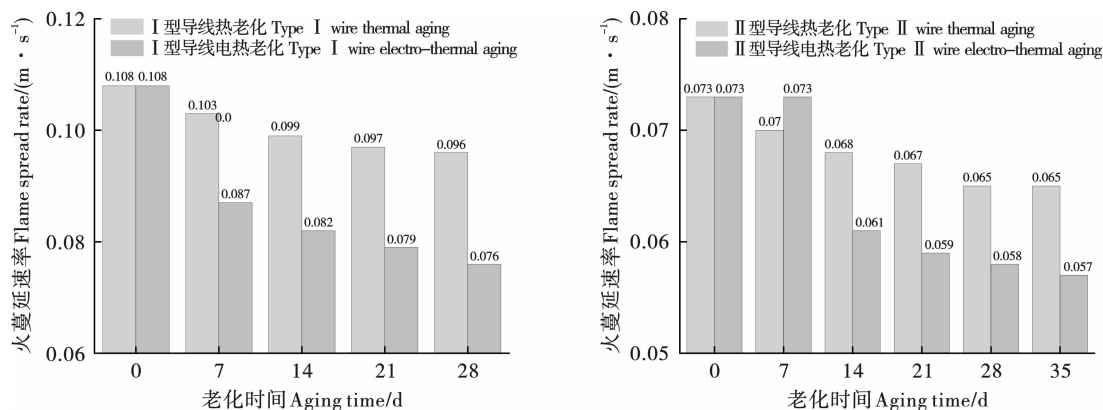


图 8 I 型导线火蔓延速率(左), II 型导线火蔓延速率(右)

Fig. 8 Fire propagation rate of type I wire(left), fire propagation rate of type II wire(right)

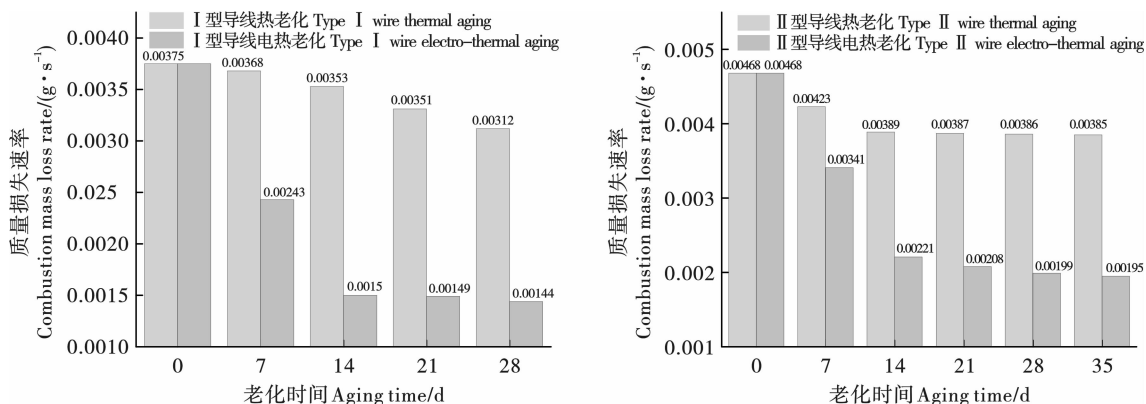


图 9 燃烧质量损失速率: I 型导线(左), II 型导线(右)

Fig. 9 Combustion mass loss rate: type I wire(left), type II wire(right)

2.3 电热协同老化机理分析

对不同老化方式及老化时间作用后的 I 型聚乙烯导线绝缘层进行 TG-DSC 分析, 主要分析热老化和电热老化 PE 材料的熔融温度、结晶度、分解温度以及残炭率随老化时间的变化^[15]。结晶度是 PE 分子链排列有序性的核心指标, 其变化直接关联材料热稳定性与熔融行为, 对导线火蔓延特性研究具有重要指导意义。热老化及电热老化 PE 导线在 60 ~

150℃ 和 250 ~ 600℃ 的 DSC 升温曲线如图 10 所示。通过 DSC 曲线求取了不同老化方式和时间作用后 PE 绝缘层的熔融温度 T_m 、熔融焓 ΔH_m 及结晶度 X_C , 如表 4 所示。其中 $X_C = \Delta H_m / \Delta H_0 \times 100\%$, PE 完全结晶 (100%) 时的熔融焓 $\Delta H_0 \approx 200 \text{ J/g}$, 取熔融峰 (向下吸热峰) 的绝对面积为 PE 的熔融焓, 熔融峰峰值温度为 PE 的熔融温度。

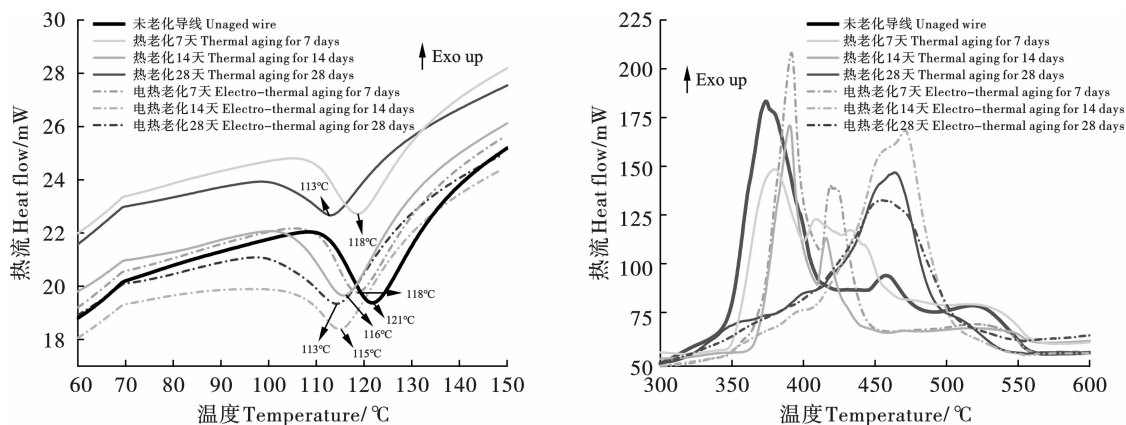


图 10 老化 PE 导线在 60 ~ 150℃ (左) 和 250 ~ 600℃ (右) 的 DSC 升温曲线

Fig. 10 DSC heating curves of aged PE wires at 60 ~ 150℃ (left) and 250 ~ 600℃ (right)

图 10 表明,约 120℃ 的 PE 熔融峰在热老化和电热协同老化后宽度增大、向低温区移动,熔点降低并提前熔融。热老化和电热老化 28 d 后熔融温度较未老化样品分别下降 5.86% 和 6.53%,熔融焓分别下降 26.31% 和 68.30%。这说明老化引起分子链断裂及氧化,降低结晶度与熔点^[16]。电场作用通过局部放电、电树枝通道、空间电荷积累等机制促进分子结构破坏,进一步增强老化效应,增加火蔓延过程中的熔融滴落频率^[17]。在约 400℃ 的 PE 分解峰区域,随老化时间延长,分解峰右移并呈多峰分布,电热老化加速该趋势,表明材料内部多组分共存,热稳定性增强。氧化区域分解温度较低,交联结构部分则更稳定,需更高温度分解^[18]。整体来看,老化尤其是电热协同老化提升了材料分解温度,初期可燃气体释放减少,降低了火蔓延的剧烈程度。

残炭率反映 PE 热解过程中的成炭能力,是衡量凝聚相燃烧热反馈及火蔓延强度的重要参数。通过热重分析(TGA)测得,其为高温分解后残余质量与初始质量之比。如图 11 所示,随着老化时间增加,残炭率显著上升,热老化 28 d 比未老化增加 167%,电热协同老化则增加 196%。表明老化增强了 PE 的成炭能力,降低气态可燃物释放,减少火蔓延中的放热强度。同时,炭层形成可阻碍热传导,进一步影响火蔓延行为。

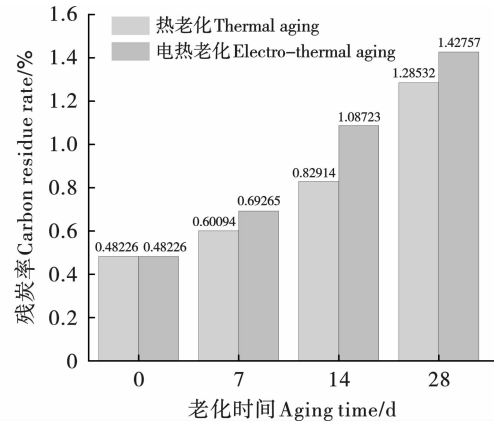


图 11 老化后 PE 绝缘层残炭率

Fig. 11 Char residue rate of aged PE insulation layer

综上所述可以发现,电热协同老化相较于单一热老化表现出显著的加速老化效应,结合 TG-DSC 分析和前人研究,可以推测电热协同老化的内在机制是电应力和热应力协同作用互相影响的结果。电应力会导致空间电荷积累产生局部焦耳热,协同热场加速氧化;此外电场作用导致电树枝形成为氧气和水分渗透通道,扩大氧化反应面积,促进热老化及氧化效应。氧化生成的极性基团(如羰基 C=O),在电场作用下促进分子间相互作用,引发断裂和交联的竞争机制,一方面电场加速分子链断裂和非晶化,表现为结晶度和熔融温度降低;另一方面,促进分子间交联作用,表现为分解峰向高温区偏移,分解温度升高。

表 4 老化 PE 导线的 DSC 参数
Table 4 DSC parameters of aged PE wires

老化方式及时间 Aging method and duration	熔融峰峰值 Melting peak temperature $T_m/^\circ\text{C}$	熔融焓 Enthalpy of fusion $\Delta H_m/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1})$	结晶度 Crystallinity $X_c/\%$
未老化导线 Unaged wire	121.0359	65.4310	32.72
热老化 7 d Thermal aging for 7 days	118.6736	54.5156	27.26
热老化 14 d Thermal aging for 14 days	115.8745	51.9827	25.99
热老化 28 d Thermal aging for 28 days	113.9453	48.2161	24.11
电热老化 7 d Electro-thermal aging for 7 days	118.9399	54.7848	27.39
电热老化 14 d Electro-thermal aging for 14 days	114.6192	51.1077	25.55
电热老化 28 d Electro-thermal aging for 28 days	113.1375	20.7419	10.37

3 结论

本研究基于矿井复杂工况构建电热协同老化平台,系统比较分析PE导线在热老化与电热协同老化条件下的灾害效应及其内在机理,得出如下主要结论:

1) 老化抑制燃烧持续性但增强滴落危险性:老化后导线火蔓延速率与燃烧质量损失速率显著下降,尤其电热老化下降幅度更大,表明其有效降低燃烧强度,减缓火灾扩展。然而,熔融滴落现象加剧,滴落频率升高且出现“流淌火”,提高了引燃周边可燃物的风险,是潜在的二次火灾诱因。

2) 材料宏观灾害行为与微观结构演化高度相关:火焰形态、燃烧路径及火蔓延强度与材料结构参数(熔融温度、结晶度)之间呈显著相关性,验证了老化机制与致灾行为之间的物理化联系。

3) 电热协同老化显著加剧材料降解过程:电场作用促进分子链断裂和氧化反应,表现为熔融熔与结晶度明显下降,残炭率提高,揭示了导线绝缘层结构由有序向无序、由非极性向极性转变的演化路径。

综上所述,电热协同老化相较单一热老化对聚乙烯导线热稳定性与火灾行为的影响更为深远,其加速老化与结构劣化的趋势需引起矿井电力系统安全管理的高度重视。结合本研究所得各老化阶段导线热解参数与火灾行为指标,可建立老化致灾阈值数据库,量化评估老化程度对火灾风险的影响,进而为矿井电缆更换周期、绝缘老化检测与电气防火标准修订提供数据支撑和判据依据。

参考文献(References)

- [1] 金永飞,杨 栋,岳宁芳,等.近十年我国煤矿热动力灾害统计分析[J].煤矿安全,2016,47(11):208-210. DOI:10.13347/j.cnki.mkaq.2016.11.058.
- [2] LI Jian-ying, ZHAO Xue-tong, YIN Gui-lai, et al. The effect of accelerated water tree ageing on the properties of XLPE cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5):1562-1569.
- [3] ALGHAMDI A S, DESUQI R K. A study of expected lifetime of XLPE insulation cables working at elevated temperatures by applying accelerated thermal ageing[J]. Helvion, 2020, 6(1):e03120.
- [4] SEGUCHI T, TAMURA K, OHSHIMA T, et al. Degradation mechanisms of cable insulation materials during radiation-thermal ageing in radiation environment[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2011, 80(2):268-273.
- [5] HUANG Jun-sheng, LU Rui-gang, SHI Yi-xuan, et al. Changes on structural and electrical properties of retired cross-linked polyethylene(XLPE) cable insulation under electro-thermal aging test[J]. IOP Conference Series; Earth and Environmental Science, 2019, 354:012110.
- [6] YANG Jie, LI Rui-zhe, HU Lei-yu, et al. Influence of thermal aging on space charge characteristics and electrical conduction behavior of cross-linked polyethylene cable insulation[J]. Polymers, 2024, 16(11):1600.
- [7] WANG Zhi, WEI Rui-chao, WANG Xue-hui, et al. Pyrolysis and combustion of polyvinyl chloride(PVC) sheath for new and aged cables via thermogravimetric analysis-Fourier transform infrared(TG-FTIR) and calorimeter[J]. Materials, 2018, 11(10):1997.
- [8] WANG Zhi, WANG Jian. An experimental study on the fire characteristics of new and aged building wires using a cone calorimeter[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2019, 135(6):3115-3122.
- [9] DENG Jun, LIN Qing-wen, LI Yang, et al. Effect of overload current values on the fire characteristics of polyethylene(PE) copper wires[J]. Thermal Analysis Calorimetry, 2023, 148:11695-11705.
- [10] ZHANG Yue, FANG Jun, WANG Jing-wu, et al. Ignition and flame spread over thermal aging electrical wires in subatmospheric pressure[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2019, 34:089270571986686.
- [11] NAKAMURA Y, YOSHIMURA N, ITO H, et al. Flame spread over electric wire in sub-atmospheric pressure[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32(2):2559-2566.
- [12] GB/T 2951—2008《电缆和光缆绝缘和护套材料通用试验方法 第12部分:通用试验方法 热老化试验方法》[S].
- [13] GB/T 12972—2008《矿用橡套软电缆 第1部分:一般规定》[S].
- [14] 林一凡.基于OpenFOAM的倾斜固体表面火蔓延数值模拟研究[D].武汉:武汉理工大学,2021.
- [15] BOUKEZZI L, BOUBAKEUR A, LAURENT C, et al. Observations on structural changes under thermal ageing of cross-linked polyethylene used as power cables insulation[J]. Iranian polymer journal, 2008, 17(8):611-624.
- [16] ZHA Si-xi, LAN Hui-qing, LIN Nan, et al. Degradation and characterization methods for polyethylene gas pipes after natural and accelerated aging[J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 208:110247.
- [17] LIU He-chen, ZHANG Ming-jia, LIU Yun-peng, et al. Growth and partial discharge characteristics of DC electrical trees in cross-linked polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6):1965-1972.
- [18] HE Dong-xin, GONG Wen-jie, ZHANG Tao, et al. Space charge accumulation mechanism near the stress cone of cable accessories under electrical-thermal aging[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2020, 16(1):443-448.