第 49 卷 第 2 期：449-460 高电压技术 Vol.49, No.2: 449-460
2023 年 2 月 28 日 High Voltage Engineering February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221618

核电站电缆绝缘的研究现状与展望

高　宇[1]，刘柏欣[1]，杜伯学[1]，梁国华[2]，孙建生[3]
（1. 天津大学电气自动化与信息工程学院，天津 300072；2. 扬州曙光电缆股份有限公司，扬州 225652；
3. 上海电缆研究所有限公司，上海 200093）

摘　要：电缆作为核电站的“血管”和“神经”，是保障核电系统安全运行的重要电力装备。论文系统梳理了核电站电缆绝缘领域的研究进展，分析了绝缘材料在核电站强辐射、高温等极端环境下的劣化失效机理，探究了由辐照引起的物理、化学变化对材料机械和电学性能的影响；探讨了提升电缆绝缘耐受极端环境的改性方法，介绍了纳米颗粒的阻氧效应对材料耐辐照性能的提升；并且分析了核电缆的检测与评估技术发展现状，介绍了宽频阻抗谱法和介电谱法两种无损检测技术；最后，展望了核电缆领域的未来研究方向，未来还需要进一步进行核辐射、高温、LOCA 等极端环境下的研究，确立有效提升耐候性的物理、化学改性方法，并且发展非侵入式、非破坏性的检测与评估技术。论文将为服役于核电站极端环境中电缆的绝缘设计、生产和运行维护提供参考。
关键词：核电；电缆绝缘；材料劣化；γ 射线；极端环境

Research Progress and Prospect of Cable Insulation in Nuclear Power Plants

GAO Yu[1], LIU Baixin[1], DU Boxue[1], LIANG Guohua[2], SUN Jiansheng[3]
(1. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Yangzhou Shuguang Cable Co., Ltd., Yangzhou 225652, China;
3. Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200093, China)

Abstract：Cable ,which is regarded as the “blood vessel” and “nerve” of nuclear power plant, is an important electrical setup to ensure the safe operation of the nuclear power system. In this paper, the research progress in cable insulation of nuclear power plants is systematically reviewed. The degradation mechanism of insulation materials in the harsh environments such as strong radiation and high temperature of nuclear power plants is analyzed. The influences of physical and chemical changes caused by irradiation on the mechanical and electrical properties of materials are explored. The modification methods for improving the weather resistance of materials are discussed. It is introduced that the the oxygen barrier effect of nano particles can improve the irradiation resistance of materials. The development of detection and evaluation technologies for nuclear cables is presented. As nondestructive testing, broadband impedance spectroscopy and dielectric spectroscopy are introduced. And the future research directions of nuclear cables are put forward. In the future, the harsh environments such as nuclear radiation, high temperature and LOCA should be further researched, and physical and chemical modification methods should be determined to effectively improve weather resistance, and to develop non-invasive and non-destructive detection and evaluation technologies. The paper provides a reference for the insulation design, production and operation maintenance of cables serving in harsh environment of nuclear power plants.
Key words：nuclear energy; cable insulation; material degradation; gamma-ray; harsh environment

0　引言

核能作为一种清洁、低碳、高效、优质的绿色能源，是人类应对能源枯竭和气候变化的重要选择之一。发展核能是实现“碳达峰、碳中和”战略目标的重要举措，已受到世界各国的瞩目[1-5]。自 1954 年前苏联的第一座核电站投入运营以来，核电已为人类社会服务了 68 年，期间核反应堆技术不断升级，核能利用水平逐步提高。以美国和前苏联为主的核电大国，于 1966—1980 年间高速发展核电技术，取得了一系列划时代的重要成果[6]。相比之下，中国的核电技术起步较晚，但近年来发展迅速。截至 2022 年 9 月，中国大陆在运的商业核电机组达

基金资助项目：国家自然科学基金(52077151)；新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS210130)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52077151), State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(LAPS21013).

53 台，总装机容量 55.6 GW；在建核电机组 23 台，居世界第一位[7]。预计到 2035 年，我国核电在运、在建机组的总装机容量将达到 200 GW，核能发电量占全国发电量的 10%左右[7]。核电在我国能源结构中将发挥更加重要的支撑作用。

然而，由于核素的放射性特征，一旦核电站出现事故，将对人类社会造成深远的影响。1979 年美国三哩岛、1986 年前苏联切尔诺贝利和 2011 年日本福岛的核电事故均为人类社会安全利用核电敲响了警钟。特别是切尔诺贝利核电事故，共造成 320 万人遭受超量辐射，经济损失超过 2000 亿美元。截至 2006 年，该事故已导致 9.3 万人死亡，超过 27 万人罹患癌症，事故影响将超过 100 年[8]。因此，利用核电技术必须把安全放在首位，这也是我国核电发展的根本方针。

在核电站中，电气系统结构复杂、设备种类繁多，对核电安全有着至关紧要的影响。其中，敷设于核岛内的各类电力、动力、仪控电缆，总里程可达数千千米，被称为核电站的“血管”和“神经”[9]。它们长期工作于强辐射、高温等极端环境中，面临着较大的事故风险。研究表明，构成上述电缆绝缘的聚合物材料，在极端环境的作用下，会发生一系列复杂的物理、化学变化，引起断键、氧化、开裂等现象，严重影响电缆的运行安全[9-12]。在过去的 30 年中，研究人员已围绕核电站电缆的绝缘材料老化机理、新材料开发和老化评估方法等开展了大量研究工作，取得了许多重要成果。本文将对该研究领域的相关成果进行综述，为未来核电站电缆的研发与运行维护提供借鉴。

1 核电站电缆绝缘材料老化机理与材料改性

1.1 核电站中的极端环境简介

核电站由核岛、常规岛、核电站配套设施、核电站的安全防护措施组成[13-15]。其中，核蒸汽供应系统及其配套设施和它们所在的厂房称为核岛，核电站的汽轮发电机组及其配套设施和它们所在的厂房称为常规岛。图 1 给出了我国自主研发的第三代核电华龙一号的外景图，核岛是核电站的核心，核电站特有的极端环境主要存在于核岛安全壳内。以第三代核电技术为例，在核反应堆常规运行期间，电缆绝缘材料累积的 γ 射线辐照剂量可达 250 kGy，安全壳内正常运行温度为 0~49 ℃[14]。一旦出现严重事故，辐射剂量率将由常规运行时的<1.6 Gy/h 剧增至 10 kGy/h，总辐射量激增至 390 kGy，温度升高至 251 ℃[15]。

核电站用电缆与常规电网用电缆的主要区别是，核电缆需要面对高剂量的辐照和高温的极端环境。核电站中，常用的有 6/10 kV 和 0.6/1 kV 电力电缆，0.6/1 kV 控制电缆，300/500 V 仪表电缆，300/500 V 补偿导线共 5 种[13]。为了满足核电站安全性的要求，国内外均对核电站使用的核级设备制定了严格的使用标准[16-18]。根据 RCC-E 规范要求和我国核电站设计使用的实际情况，将核电站 1E 级设备按照其安装位置和承担的安全功能，划分为 K1、K2 和 K3 类[17]。K1 和 K2 类设备安装于安全壳内，能够在正常环境条件下和地震荷载下执行其规定功能。其中，K1 类设备还要求在正常事故情况下或事故后仍能执行规定功能。因此，K1 类设备的性能要求最为苛刻[18]。本文讨论的核电站用电缆即为 K1 类电缆，其典型结构如图 2 所示。

目前，核电站 K1 类电缆采用的绝缘材料主要包括聚乙烯(polyethylene，PE)/交联聚乙烯(cross-linked polyethylene，XLPE)[19-21]、硅橡胶(silicone rubber，SiR)[22-24]和乙丙橡胶(ethylene pro-



图 1 我国自主三代核电华龙一号示范工程[5]

Fig.1 China’s independent third-generation nuclear power Hualong No.1 demonstration project[5]



图 2 典型 K1 类电缆外观图

Fig.2 The appearance of K1 cable

pylene rubber，EPR)[25-27]等。当受到高能辐射的作用时，组成聚合物材料的化学键断裂，继而引发氧化、脱气、交联等一系列反应，使材料的分子链结构、结晶形貌、交联度等理化结构发生改变[9-12]，影响其绝缘性能。因此，深入研究核电站电缆绝缘材料在极端环境下的劣化失效机理，探寻有效提升电缆绝缘耐候性的改性方法，开发可靠的电缆绝缘劣化程度检测与评估技术，对于保障核电站电缆的安全可靠运行具有重要的理论意义和工程价值。

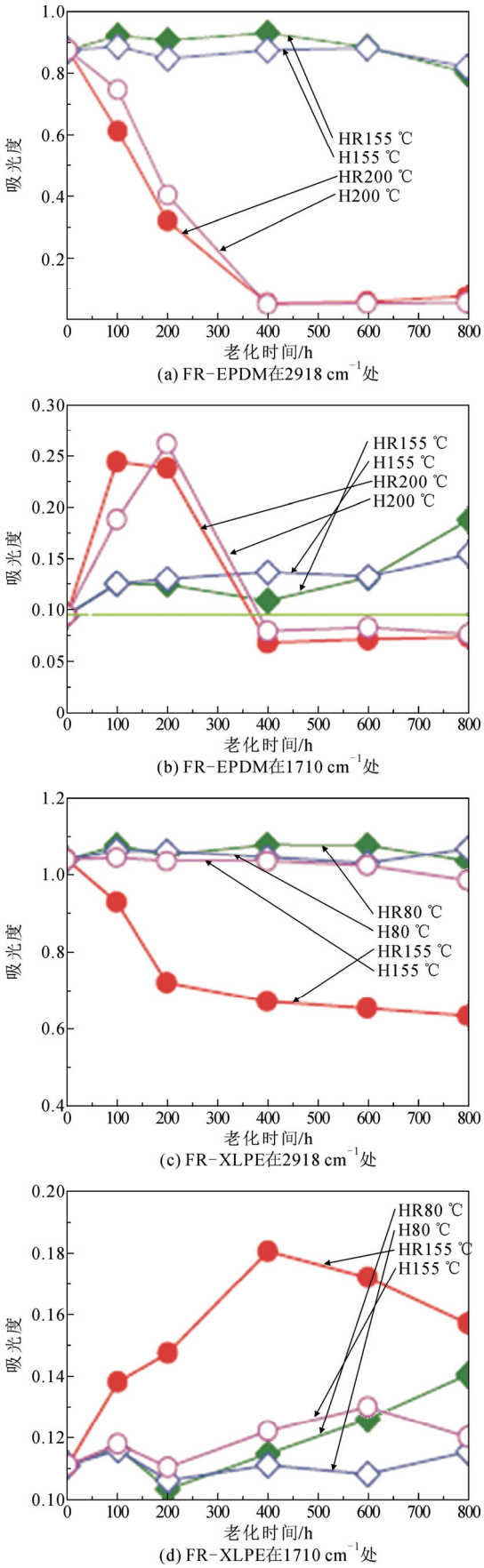
1.2　核电站电缆绝缘的劣化失效机理

核电站电缆绝缘劣化，主要指其介电性能和机械性能的下降。介电性能主要通过电导率、介电常数、空间电荷输运行为等参量描述；机械性能主要由断裂伸长率(elongation at break，EaB)、抗张强度和压头模量(indenter modulus，IM)等参量表征。压头模量是将称为压头的金属针插入聚合物表面所需的负载相对于压痕深度的导数[28]，是衡量样品表面机械性能的良好指标。研究人员已对核电站电缆绝缘材料的劣化失效机理进行了大量研究，采用上述参量对材料劣化程度进行了表征，并结合对材料本身物理、化学结构的测试与分析，有效揭示了核电站极端环境下材料劣化的机理。

PE 是主要的电缆绝缘材料之一，其在核电站极端环境中的劣化失效机制得到了广泛关注。G. Chen 等人采用电声脉冲法(pulsed electro-acoustic method，PEA)研究了低密度聚乙烯(low density polyethylene，LDPE)受 γ 射线辐照后的空间电荷积聚行为[29]，发现 γ 射线辐照诱导的氧化反应生成了羰基基团，引入浅陷阱、促进了空间电荷的输运。B.X. Du 等人研究了 γ 射线辐照对 PE 表面电荷积聚特性的影响[30]，结果表明，随着 γ 射线辐照剂量从 0 kGy 增加到 1000 kGy，表面电荷积聚量呈先减小后增加的变化趋势，这归因于 γ 射线辐照诱导的氧化降解反应与交联反应相互竞争的结果。Y. Gao 等人研究了 γ 射线辐照对 PE 的相对介电常数及介质损耗的影响[31]，发现随着总辐照剂量的增加，PE 的相对介电常数和介质损耗角正切值均呈现先减小后增大的趋势，这与 γ 射线辐照引发的 PE 分子链基团及结晶度的变化密切相关。可见，γ 射线辐照导致 PE 的物理、化学结构出现的变化，是造成其介电性能改变的主要原因。

与 PE 材料相似，XLPE 作为常见的电缆绝缘材料，其在核电站中应用时的劣化机制一直以来也是研究人员关注的重点。X.Y. Huang 等人采用 3.3 kV 的 XLPE 电缆为样品，以(5.5±0.1) kGy/h 的剂量率、在最高辐照剂量 4000 kGy 的条件下开展试验[32]，发现随着辐照剂量升高至 1000 kGy，XLPE 的结晶度增大；但在 1000~4000 kGy 的范围内，结晶度随着辐照剂量升高而减小。γ 射线辐照对水树有明显影响，剂量增加，电缆中水树的长度变短，长度的分布变窄。这是由于随着辐照剂量的变化，XLPE 中交联和断链会对自由体积产生影响。Z.Y. Liu 等人对 XLPE 样品在 100、135 和 155 ℃下进行 40~2000 h 的老化，并在相同温度和时间下，采用 Co^{60}γ 射线源进行以 100 Gy/h 的剂量率辐照进行联合老化[33]。研究发现，联合老化会加速极性羰基化合物的形成，使 XLPE 的复介电常数增大，失去柔韧性，阻碍载流子的输运。Y. Ohki 等人同样研究了在 100、135 和 155 ℃下、200~2000 h 的纯热老化或热与 100 Gy/h 剂量率 γ 射线辐照的联合老化对 XLPE 的影响[34]。发现 XLPE 老化时会出现含羰基的分子结构及 C—O—C 键，阻碍晶格的规则折叠和晶体熔化后的再结晶过程，导致晶体熔点和熔融焓降低、机械性能变差。在联合老化的条件下，XLPE 更易被氧化。老化过程中，XLPE 电荷输运能力增强，复介电常数和电导率增加；但当老化程度加剧后，XLPE 的机械性能下降，复介电常数和电导率先增加后下降。可见，γ 射线辐照对绝缘材料劣化的影响，在联合热老化的情况下变得更加复杂。

为了避免核电站发生火灾对人员和设备造成损害，核电站电缆绝缘通常选用耐火、阻燃型材料，相关的老化现象也得到了研究人员的关注。0.6 和 1 kV 的电力和控制电缆一般使用阻燃(flame-retardant，FR)XLPE 或三元乙丙橡胶(Ethylene-propylene-diene Terpolymer，EPDM)[35]。L.Q. Yang 等人在 155 ℃下对 FR-XLPE 和 FR-EPDM 样品进行热老化，用 100 Gy/h 剂量率的 γ 射线辐照联合老化[36]。研究发现，FR-EPDM 比 FR-XLPE 表现出更好的耐辐射性能。如图 3(a)和图 3(b)所示，对于 FR-EPDM 样品，有无 γ 射线辐照，在 2918 cm^{-1} 处的亚甲基和 1710 cm^{-1} 处的羰基没有明显差别。而 FR-XLPE 样品在受到辐照后变化明显，如图 3(c)和图 3(d)中圆点所示，155 ℃联合老化时，2918 cm^{-1} 处的吸光度明显下降，1710 cm^{-1} 处的明显上升。这是由于 FR-EPDM 具有丰富的侧基和第三单体，可在老化初期 γ 射线辐照时，消耗



(a) FR-EPDM在2918 cm^{-1}处

(b) FR-EPDM在1710 cm^{-1}处

(c) FR-XLPE在2918 cm^{-1}处

(d) FR-XLPE在1710 cm^{-1}处

H—热老化；HR—联合老化

图 3 吸光度随老化时间的变化

Fig.3 Change of absorbance with aging time

侧基而防止主链断裂。因此，从耐辐射性上来看，FR-EPDM 可作为核电站电缆绝缘重点研究的材料。

J.Y. You 等模拟了 16 种条件下的严重事故[37]，包括在室温或 100 ℃、γ 射线以 0.1 或 10 kGy/h 的剂量率辐照、暴露于饱和或过热蒸汽中等，系统地描述了 FR-EPR 在不同条件下的降解情况。发现 γ 射线辐照在高温下会加速 FR-EPR 的氧化，蒸汽暴露会导致分子链断裂，两者均使材料变脆。还发现 FR-EPR 会因室温下高剂量率的辐照引起的交联而变硬，使电荷载流子的输运变得困难，到达电极且停留在那里的电荷载流子变少，界面极化变弱，介电常数实部和虚部(ε_r' 和 ε_r'')减小。M.P. Spencer 等人采用 150 ℃和 300 Gy/h 剂量率的 γ 射线辐照，对 EPDM 样品进行热和辐照的联合老化，或进行先热后辐照的顺序老化[38]。通过老化前后样品的质量、EaB 和羰基指数的测量表征老化情况。结果发现，联合老化的 EPDM 样品更易出现寿命终止。初始诱导期过后，对于联合和顺序老化的两种情况，EaB 分别以每天约 23%和 8%的相对速度迅速下降。在 36 d 的联合老化后，观察到聚合物链基本完全降解，EaB 仅为 17%，但顺序老化的样品 EaB 保留在 180%。T. Šarac 等人研究了 EPDM 在 25~85 ℃时 106~1390 Gy/h 剂量率和 20~1000 kGy 的总剂量范围内的老化情况[39]，发现聚合物的极限拉伸应力、杨氏模量、EaB 等机械性能均受到辐照剂量的显著影响。其中，由于交联和断链以相似的方式影响 EaB，导致其变化仅与辐照剂量有关，基本不受温度和剂量率的影响。因此，EaB 可作为良好的预测电缆寿命的参数。D.M. Min 等人通过考虑 γ 辐照引起的化学反应，开发了降解动力学模型来模拟氧化产物的演变、交联与断链和气体扩散的发生[25]。通过数值求解化学反应和气体扩散控制方程得到 EPDM 样品内各种氧化产物的浓度分布，成功地定性解释了 EPDM 特性的各种变化。综上所述，在核电复杂工况下，多种极端条件同时施加于电缆绝缘时，材料发生氧化、交联、断键等化学结构的变化规律也十分复杂，联合老化更能还原实际运行电缆的绝缘劣化情况。

SiR 也是一种在核电站应用较多的绝缘材料。SiR 老化后，EaB 会明显降低，IM 增加。但 SiR 作为一种无机聚合物，初级结构几乎不会因热老化和辐射老化而改变[36]。SiR 的降解主要由侧甲基的损失以及形成 Si—O—Si 键的氧化交联而引起，温度升高和 γ 射线辐照均会加速这些变化。D.M. Min 等

人研究发现，γ 射线低剂量辐照时，SiR 中交联占主导地位；高剂量时，断链占主导地位[40]。如图 4 所示，不同温度下接受 γ 射线辐照的 SiR 样品的直流电导率随着陷阱能级的增加呈指数下降，t_{ir} 为辐照时的温度。这是由于少量的辐照可以通过触发 SiR 内部的链交联来增加陷阱能级，使载流子的跳跃变得更加困难，电导率下降。当辐照时间足够长时，断链反应速率大于交联反应速率，陷阱能级降低，载流子更容易在材料中跳跃，直流电导率会再次增加。可见，辐照会对材料的化学结构产生影响，不同材料表现出不同的劣化现象源于本身的物理、化学结构差异。

国内外学者们广泛研究了核电环境对绝缘材料的影响及机理，通过试验和模拟分析了不同条件下不同材料的降解过程。这些研究探明了核电站常用绝缘材料的劣化现象并且逐步揭示了材料的降解机理。表 1 总结了核电站电缆绝缘材料的劣化机理方面的部分代表性研究。在掌握绝缘材料劣化机理的基础上，开发具有良好核电极端环境耐受性的新型绝缘材料成为了研究者们的重点工作。

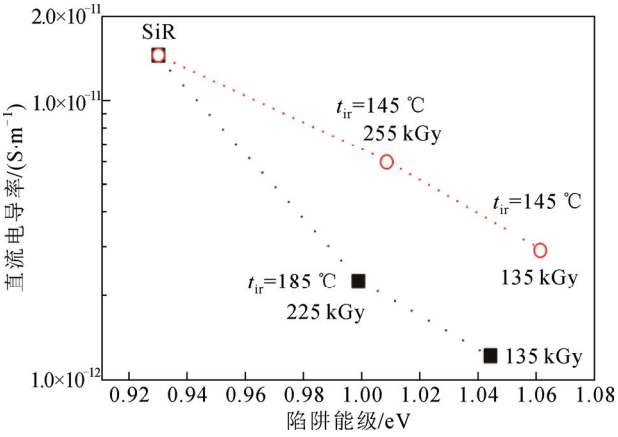


图 4　在不同条件下被降解的 SiR 样品的直流电导率与陷阱能级的关系

Fig.4　Relationship between DC conductivity and trap energy level of degraded samples under different conditions

表 1　核电站电缆绝缘的部分研究文献的总结

Table 1　Summary of some research literatures on cable insulation in nuclear power plants

年份	作者	材料	剂量率/(kGy·h⁻¹)	总剂量/kGy	温度/℃	时间/h	其他	主要结论
1996	G. Chen, H. M. Banford, A E. Davies[29]	LDPE	1	10，500	室温			辐照诱导氧化反应生成了羰基基团，引入浅陷阱，促进了空间电荷的输运
2008	B. X. Du, X. H. Zhu, Y. Gao[30]	PE	10	0~1000	室温			剂量增加，总表面电荷呈先减小后增加的趋势
2011	X.Y. Huang, C. Kim, P.K. Jiang[32]	XLPE	5.5±0.1	0~4000	室温			剂量增加，水树的长度变短，长度的分布变窄
2012	Y. Gao, B.X. Du[31]	PE	10	0~1000	室温			剂量增加，介电常数降低，交流电导率和介质损耗增加
2013	Y. Gao, Y. Li, J. Jia[41]	LDPE	10	0~1000	室温			剂量增加，LDPE 的 PD 电阻呈增加趋势
2016	T. Šarac, N. Quiévy, A. Gusarov [39]	EPDM	0.106，−1.39	20~1000	25~85			剂量增加，断裂伸长率下降，且发现其对温度和剂量率均不敏感
2017	L.Q. Yang, Y. Ohki, N. Hira[36]	SIR, PEEK, FR-XLPE, FR-EPDM	0.1，0.15		155	0~5000		不同材料的降解机制不同，但机械性能均先于介电性能出现劣化
2019	S. V. Suraci, D. Fabiani, C. Y. Li[20]	XLPE	0.42，1.06		85	0~1000		老化完关闭辐射源数年后，降解仍在继续，且不受老化时剂量率的影响
2020	Z.Y. Liu, Y. Miyazaki, N. Hirai[33]	XLPE	0.1		100~155	20~2000		联合老化对氧化影响更大，老化使 XLPE 变脆，阻碍了载流子的传输
2020	Y. Miyazaki, N. Hirai, Y. Ohki[34]	XLPE	0.1		100~155	200~2000		XLPE 的分子链会随着氧化的进行而断裂，使机械性能恶化
2021	H. L. Zhou, W. Hanafusa, K. Ydo[42]	FR-XLPO	0.1		100~155	200~2000		对 FR-XLPO 进行适当剂量的 γ 辐照可以减轻热老化引起的降解
2022	Y. Ohki, N. Hirai[43]	FR-XLPE	0.1，10	250，800	100		高温蒸汽	220 ℃的蒸汽暴露促进了电荷输运，但若先辐照形成交联结构，则这种促进会受到抑制

1.3 核电站电缆绝缘材料的性能提升

随着高电压与绝缘技术的不断发展，各种新型电介质材料被不断开发，它们在核电极端环境下的应用可能性也受到关注。核电站的高辐射、高温环境会对绝缘材料造成恶劣影响，加速降解的同时影响材料的电学性能。常规聚合物材料很难在这种极端环境中长期维持其性能。为了解决这些问题，研究人员开发了以耐 γ 射线辐射、耐热老化功能为主的新型绝缘材料。

研究发现，芳香族聚合物的辐射稳定性优于脂肪族聚合物，将芳香族化合物作为添加剂混入脂肪族聚合物中，能够提升其耐辐射性。S. Tabuse 等人借助脉冲辐射，分析了芳香族添加剂的作用[44]，发现随着芳香度和添加浓度的增加，基体的最终分解产物会减少；此外，添加剂的芳香度越高，添加剂对激发分子、自由基阳离子和电子的反应性越高。研究认为芳香族化合物是通过激发能量和电荷转移释放多余能量的方式，减少基体分解，在辐射防护过程中能够起到重要作用。J. Chen 等采用芳香族化合物添加剂改善聚合物材料的性能，发现经 γ 射线辐照后，与不含添加剂的样品相比，含有芳香族添加剂的材料的机械、介电和热性能均有所改善[45]。进一步证实，添加芳香族化合物，利用芳香环共轭 π 键的散能作用，可显著提高基体的耐辐射能力。以上研究表明，可将芳香族化合物作为一种核电站电缆绝缘的耐辐射添加剂。另外，带有苯环等共轭大 π 键的有机物还兼具阻燃性能，于是也有研究者制备出含有苯环结构的阻燃剂[46]。但是，使用小分子化合物添加提升材料性能，无法避免长期使用导致的添加剂耗散，材料性能下降。因此，如何长期保持绝缘材料的性能，是研究新型核电站用绝缘材料需要重点关注的问题。

为此，有研究者通过难以分解或迁出的无机颗粒掺杂进行绝缘材料改性，取得了较好的效果。Y. Gao 等人采用微米级六方氮化硼(boronnitride，BN) 和纳米级二氧化硅(SiO_2)为填料制备出 PE 基微/纳米复合材料，并以最高辐射剂量为 1000 kGy 的 Co^{60}γ 射线进行辐照[47]。发现随着辐照总剂量从 0 增大至 1000 kGy，纯 PE 样品中的空穴迁移率从 2.62×10^{-14} $m^2/(V\cdot s)$增加到 8.53×10^{-14} $m^2/(V\cdot s)$，而添加质量分数为 10%的 BN 和质量分数为 5%的 SiO_2 的复合材料样品中的空穴迁移率仅从 1.93×10^{-14} $m^2/(V\cdot s)$增加到 2.72×10^{-14} $m^2/(V\cdot s)$。这表明，从抑制电荷输运的角度讲，PE 基微纳米复合材料展现出比纯 PE 样品更好的耐辐射性能。图 5 给出了复合材料耐辐射性能提高的原因。一方面，微、纳米颗粒可以起到物理阻隔氧气渗入的作用，延缓 PE 在 γ 射线作用下的氧化降解；另一方面，纳米颗粒引入的深能级陷阱抑制电荷的自由迁移，降低了载流子的迁移率。因此，选取适当种类、尺寸和比例的无机颗粒进行掺杂改性，能够有效提升绝缘材料的耐辐射性能。相较于小分子化合物添加剂，无机颗粒不会出现耗散或从基体中迁出的问题，能够更加长期、稳定地改善材料的性能。

乙烯–醋酸乙烯共聚弹性体(ethylene-vinyl acetate copolymer，EVA)作为核电站电缆常用的绝缘材料之一，具有成本低、绝缘性能优异等特点，但纯 EVA 的耐辐射和耐热性能均较差。K.Y. Lee 等人制备了一种添加碳纳米管 (carbon nanotube，CNT) 的 EVA 纳米复合材料[48]。通过化学发光(chemiluminescence，CL)测试发现，随着 CNT 的添加，样品的 CL 强度迅速下降，含有质量分数为 10%的 CNT 的 EVA 的 CL 强度比纯 EVA 的低 33 倍。这是由于分布在 EVA 内部的 CNT 延迟了氧气的扩散(如图 6 所示)，提升了 EVA 的耐辐射性。与纯 EVA 相比，因为 CNT 可以增加热阻，所以复合材料的耐热性也得到提升。进一步说明，加入合适的无机颗粒对聚合物的性能提升有积极效果，这是新型绝缘材料发展的重要方向。

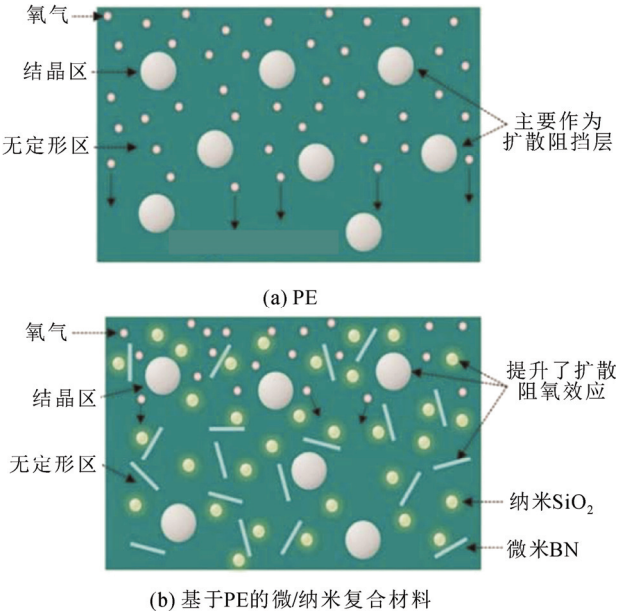
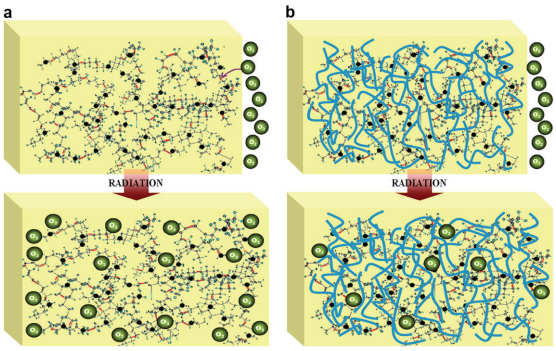


图 5 PE 及其微/纳米复合材料中氧扩散的可能机制

Fig.5 Possible mechanism on the oxygen diffusion in PE and its micro/nanocomposite



(a) EVA　(b) EVA/CNT 纳米复合材料

图 6　碳纳米管的氧扩散阻隔系统

Fig.6　Oxygen diffusion block system of the CNTs for the radiation resistance

除了耐辐射和耐热性能以外，核电工况下，阻燃性也是电缆绝缘必须具备的性能。上文已经介绍到，核电站常用的绝缘材料 EPDM 具有优异的耐辐射性能，但其缺点是易燃，故需要使用 FR-EPDM。然而，大多数 FR-EPDM 是含卤体系，在燃烧过程中会产生大量有毒气体和有害物质，危害核电站运行人员安全。因此，开发无卤且具有高阻燃性的新型聚合物材料十分必要。J.S. Wang 等人以聚磷酸(intumescent flame retardant，IFR)与可膨胀石墨(expandable graphite，EG)配合使用，制备了高阻燃性的 FR-EPDM[49]。研究表明，EPDM/IFR/EG 材料的极限氧指数值可达 30.4%，且在锥形量热试验中，EPDM/IFR/EG 的放热率和总放热量分别比纯 EPDM 低 69.0%和 33.3%，烟气释放量也显著降低。

这是由于 IFR 和 EG 的互补作用，在燃烧过程中形成了具有连续致密微观结构的膨胀致密碳层，可以有效地延缓聚合物分解，阻止热量和氧气在内部传递，从而显著提高 EPDM 基体的阻燃性。这种阻燃剂用于其他聚合物基体中，也可以取得优异的改性效果[50-52]。

综上所述，要制备出具有耐辐射性、耐热性和阻燃性的新型绝缘材料，可以通过在基体材料中添加纳米颗粒、芳香族化合物、阻燃剂等方式来实现。添加剂的加入可能会让电缆绝缘的生产工艺复杂化，但为了获得更好性能的电缆绝缘，这被认为是可以接受的。但是，添加剂可能会对基体材料本身的性能造成影响，且多数小分子添加剂面临使用过程中的迁出与耗散问题，可能会在核电站长期的运行过程中埋下隐患。如何延长聚合物材料的改性效果，更好地平衡电、热、力学性能，是研究人员下一阶段面临的重要课题。

2　核电站电缆绝缘老化的检测与评估技术

近年来，对于核电站电缆绝缘的研究，除了材料领域的进步，在电气测量领域也取得了显著进展。这让绝缘材料性能相关的研究具备了更多的手段。核电站电缆系统是关键装备，必须保持其功能直至服役完成。即使发生异常事件，电缆也应维持其功能。由于电缆绝缘材料是对辐射和热敏感的聚合物，并且核电缆不能轻易、经济地更换或升级。为了确保更高水平的核安全，需要严格电缆系统的老化管理，对聚合物绝缘的完整性进行状态检测。在常规情况下，电缆行业中通常选择使用断裂特性来预测绝缘寿命。

上文已经提到：在核电工况下，机械性能会比介电性能更早一步显现出劣化迹象。由此，可以在绝缘性能还未失效时，先通过机械性能进行评估，得出绝缘材料的劣化程度，避免发生严重事故。Y. Ohki 等人进一步发现，在各项机械性能参数中，EaB 可作为评估 FR-XLPO 老化早期的合适指标，而 IM 可用来反映老化晚期[43]。其中，测量 IM 时，使用 Tobusa Systems IM-INSS III 压头，在室温下以 0.080 mm/s 的速度将尖端直径为 0.79 mm 的压头压入样品中。虽然机械性能可以作为一个优先于介电性能的评估参数，但是测量 EaB 作为一种破坏性评估技术，其应用场合受到限制。并且，为延长核电站运行寿命，单纯采用机械寿命作为判据会在电缆寿命管理方面引发严重问题。因此，对于核电站的极端环境，需开发和使用那些能够避免对绝缘造成损害的现场非破坏性的检测技术。

Y. Ohki 等人研究了基于宽频阻抗谱(broadband impedance spectroscopy，BIS)的电缆绝缘局部劣化检测技术[53]。该方法是一种频域反射(frequency domain reflectometry，FDR)技术：当电压或电磁波施加到电缆上时，它将通过电缆传播，并在电缆复阻抗变化的点反射。阻抗主要是电缆绝缘材料的介电常数和电阻率的函数，若材料劣化，复阻抗将会发生变化。如果对在非常宽的频率范围(1~110 MHz 或 1.5 GHz)中测量的阻抗幅度和相位角的频域频谱进行快速傅里叶逆变换(fast Fourier transform，FFT)，就可以获得各自的时域频谱，其表现出特定时间的特定信号，对应于电缆阻抗幅值或其相位角发生变化的点[54]。如果电缆绝缘层出现局部劣化、

机械损伤或局部热点等异常情况，可以通过电缆中传播的电磁波速度，根据上述方法计算它们的位置。

由前文可知，当电缆的聚合物绝缘层因暴露于放射性射线或高温下而劣化时，只要电缆处于有氧环境中，大多数情况下会诱发其氧化，在聚合物中形成羰基，使聚合物的介电常数增大。因此，可以通过这种 BIS 方法检测核电工况下聚合物电缆绝缘的劣化情况。采用阻抗分析仪或网络分析仪，对于最高频率相对较低的测量，使用能够测量 0.04~110 MHz 阻抗的阻抗分析仪(4294A，Agilent)，而将能够测量 100 kHz~1.5 GHz 的网络分析仪(E5061，Agilent)用于具有较高最大频率的测量。具体检测流程[55-58]为：将待测电缆导体的一端与分析仪连接，另一端在测量过程中保持开路状态，测量得出频域频谱；再使用 FFT 分析在不同频率下测量的多个数据，即可进行较为精准且具有高灵敏度的无损检测。研究表明，这种方法可以通过增加频率范围来提高灵敏度。如图 7 所示，随着最高频率的增加，劣化位置的峰值逐渐变尖[53]。从实际应用的角度来看，如果电缆不动，这种定位方法可以获得非常好的分辨率。因此，BIS 法十分适用于实际敷设电缆的状态检测及老化定位。后续研究也验证了这种方法可以估计聚合物绝缘电缆的劣化、受热或机械应力作用的精确位置[59-63]。采用网络分析仪能够定位 1000 m 以上电缆中的故障点[62]。这种缺陷定位的能力取决于电缆的结构和绝缘材料的种类等多种因素，研究人员进一步探索了这种定位能力的影响因素，为核电站电缆绝缘的无损状态检测与评估提供了指导。

L. Verardi 等人对核电站低压电力电缆的电气性能进行研究[64]。将电缆样品在 55 或 85 ℃、γ 射线剂量率在 0.42 或 1.58 kGy/h 的条件下进行 200~1000 h 的老化。结果表明，介电常数的实部和虚部都会随着老化时间的增加而增大，这一现象在低频下(即低于 10^{-2} Hz)尤为明显。此外，如图 8 所示，随着老化时间的增加，介电常数的实部和虚部都与 EaB 表现出良好的相关性，其中虚部的相关性更好。因此，可以以此为老化标识评估核电站电缆绝缘的劣化状态。与 EaB 不同，这是一种非破坏性检测技术，可以便捷地对核电站中各个位置的电缆进行检测。D. Fabiani 等人进一步研究了介电谱检测法，发现此法可应用于整根电缆，且可快速检测多根电缆[65]。从图 9(a)可以看出，ε″随着辐射剂量的增加而增大。在 85 ℃时，在相同剂量下，剂量率越高(1.06 kGy/h)则 ε″越小。在较低温度时，ε″的值仅取决于总剂量。图 9(b)显示，EaB 随着辐射剂量的增加而降低，在较高的剂量率和温度下急剧降低，这种现象因扩散限制氧化(diffusion-limited oxide，DLO)效应而致。高剂量率和温度可能导致聚合物的非均匀氧化，如果氧含量不足以与高辐射剂量率产生的自由基结合，氧分子就不能迁移到绝缘的内部而留在最外层。这种行为会导致电缆外层老化，绝缘表面形成裂缝，从而显著降低 EaB。文献[66]同时测量了电缆绝缘样品在辐射和热老化过程中，多种物理、化学性能的变化，解释了 ε″随着辐射剂量

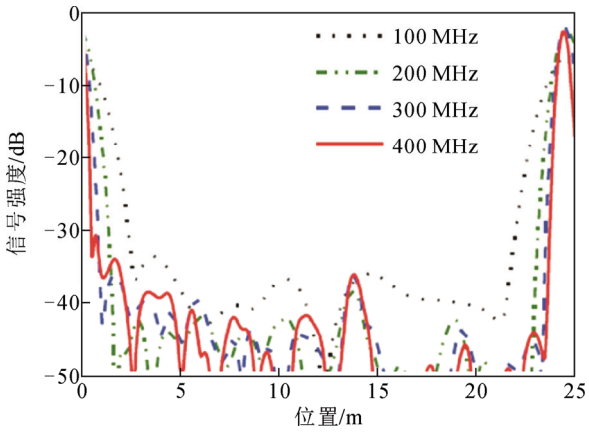
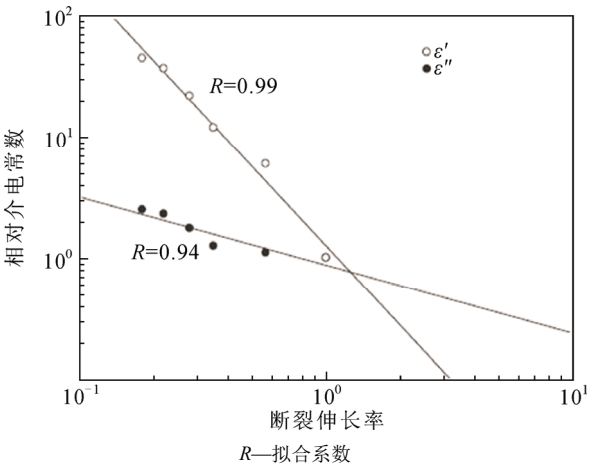


图 7 不同最高测量频率下 BIS 测试定位能力的比较(退化部分和测量端子之间的距离约为 14 m)

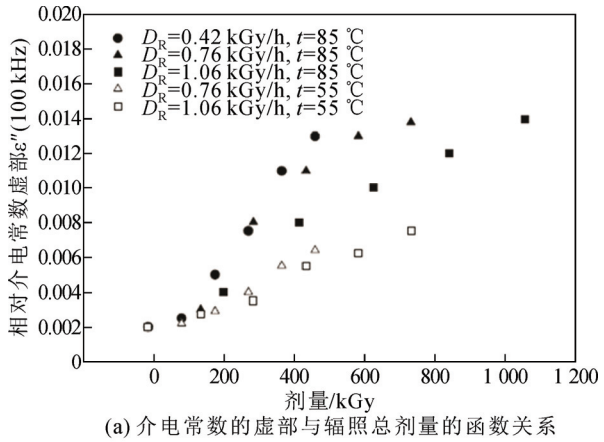
Fig.7 Comparison of BIS test positioning capability under different maximum measurement frequencies (The distance between the degraded part and the measuring terminal is about 14 m)



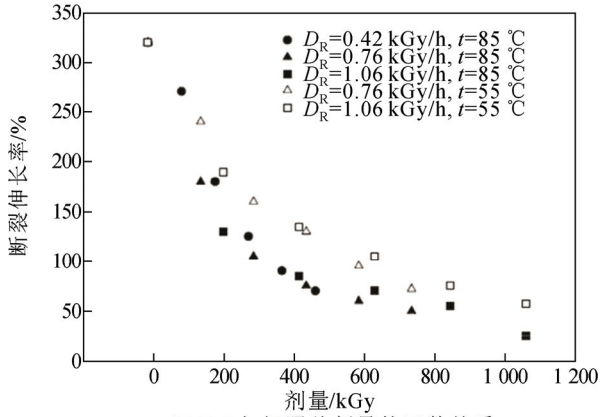
R—拟合系数

图 8 样品的介电常数的实部(ε′)/虚部(ε″)与断裂伸长率之间的相关图

Fig.8 Correlation plot between real (ε′)/imaginary (ε″) permittivity and elongation at break



(a) 介电常数的虚部与辐照总剂量的函数关系



(b) EaB与辐照总剂量的函数关系

D_R—辐照总剂量；t—温度

图 9　100 kHz 时不同样品的介电常数虚部和 EaB 与辐照总剂量的函数关系

Fig.9　Imaginary part of the permittivity and EaB as a function of total absorbed dose for different combinations of dose rates and temperatures

的增加而增大的原因，进一步验证了介电谱法的有效性。可见，介电谱法作为一种简便的无损检测方法，在评估核电极端工况下电缆绝缘劣化程度的工作中，已得到了研究者的关注[64-68]。

综上所述，采用 BIS 法对电缆绝缘缺陷位置进行定位，通过介电谱法评估电缆绝缘的整体劣化进程，是目前适用于核电站电缆绝缘的非破坏性状态检测与评估技术。如能将两种检测和评估技术结合起来：既能实现整体绝缘劣化程度评估，又可定位局部劣化严重的区域，将对核电缆的运行维护提供更为完善有益的信息。

3　核电站电缆绝缘的未来研究展望

未来核电将朝着更安全、更灵活、更智能的方向发展，第四代核电具有固有安全性高、经济性好、可持续发展、核废料极少等优势，是未来核电发展的主要方向。2021 年 12 月，我国率先建成的世界首座高温气冷堆第四代核电站——华能石岛湾核电站送电成功，标志着我国已掌握第四代核电的核心技术。然而，高温气冷堆出口温度高达 750 ℃，比目前普遍使用的水冷反应堆的温度高出 1 倍多；二回路仍可产生 566 ℃的过热蒸汽[69]。电缆绝缘需要承受的最高环境温度比第三代核电站中高约 10~50 ℃[70]。电缆绝缘面临更为复杂、极端的运行环境挑战。为此，需在以下方面开展更为深入系统的研究。

1）核辐射、高温、LOCA 等极端环境下的电缆绝缘劣化失效机理研究，探索极端环境条件与绝缘性能参数之间的定量关系，建立核电缆绝缘寿命预测模型，进一步深刻揭示核电缆绝缘老化的物理本质。

2）超耐辐射、耐高温、耐 LOCA 电缆绝缘料及绝缘结构的研究，建立模拟核电复杂环境的等效加速老化试验平台，确立有效提升电缆绝缘料耐候性的物理、化学改性方法，进一步提高核电缆对未来核电发展中复杂极端环境的耐受能力。

3）非侵入式、非破坏性的核电缆绝缘检测与评估技术，构建微观、介观、宏观尺度的电缆绝缘劣化表征方法，结合大数据和人工智能技术，从电缆原料、成品电缆到服役电缆的全寿命周期健康检测、评估与防护技术，进一步提高核电缆运行的可靠性。

4　结论

1）以聚合物绝缘材料为主的核电缆绝缘，在高能辐射、高温等极端环境条件的作用下，发生断键、氧化、交联等一系列物理、化学变化，使材料性能不断劣化、失效。聚合物材料的微观、介观结构随极端环境作用而发生变化的规律十分复杂，受分子链结构、结晶度、结晶形貌等多方面因素影响。通过合理掺杂微、纳米无机颗粒或芳香族小分子化合物，可提升聚合物材料耐辐射、耐热氧化性能。

2）以压头模量测量为代表的、适用于小尺寸样品的非破坏性评价方法逐步受到研究者的青睐，而对于服役电缆，宽频阻抗谱和介电谱法具有较好的评估或定位能力。

3）未来需进一步研究核电极端环境下电缆绝缘材料的劣化失效机理，构建材料老化物理模型，

并通过材料改性、电缆结构优化等手段提升核电缆的极端环境耐受能力。同时，应重视非侵入式、非破坏性的电缆绝缘劣化程度检测和评估技术，结合人工智能技术构建全寿命周期的核电缆测评体系，满足新一代核电对电缆的高安全性、高可靠性运行要求。

参考文献 References

[1] 江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报，2008，42(3)：345-359.
JIANG Zemin. Reflections on energy issues in China[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(3): 345-359.

[2] 徐小舒. 迭代突破多元发展[N]. 中国电力报，2022-02-18(01).
XU Xiaoshu. Iterative breakthrough and diversified development[N]. China Electric Power, 2022-02-18(01).

[3] 邢 继，高 力，霍小东，等. “碳达峰、碳中和”背景下核能利用浅析[J]. 核科学与工程，2022，42(1)：10-17.
XING Ji, GAO Li, HUO Xiaodong, et al. Analysis of nuclear energy utilization under the background of “carbon peaking and carbon neutrality”[J]. Nuclear Science and Engineering, 2022, 42(1): 10-17.

[4] 周远翔，陈健宁，张 灵，等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.

[5] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.

[6] 邹树梁. 世界核电发展的历史、现状与新趋势[J]. 南华大学学报(社会科学版)，2005，6(6)：38-42.
ZOU Shuliang. The history, actuality and trend of world nuclear power[J]. Journal of Nanhua University (Social Science Edition), 2005, 6(6): 38-42.

[7] 中国核能行业协会. 中国核能发展这十年[EB/OL]. 中国核能行业协会，2022. (2022-09-15)[2022-12-12]. https://www.china-nea.cn/site/content/41553. html.
China Nuclear Energy Association. The development of nuclear power in China in the past decade.[EB/OL]. China Nuclear Energy Association, 2022. (2022-09-15)[2022-12-12]. https://www.china-nea. cn/site/content/41553. html.

[8] 肖东生. 基于核电站安全的组织因素研究[D]. 长沙：中南大学，2009：2-5.
XIAO Dongsheng. Study on organizational factors related to safety of nuclear power plant[D]. Changsha, China: Central South University, 2009: 2-5.

[9] KURIHARA T, TAKAHASHI T, HOMMA H, et al. Oxidation of cross-linked polyethylene due to radiation-thermal deterioration[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 878-887.

[10] ZHOU H L, HIRAI N, OHKI Y. Various characteristics of severely aged flame-retardant cross-linked polyolefin[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2021, 16(12): 1556-1562.

[11] BARKHUDARYAN V G. Alterations of molecular characteristics of polyethylene under the influence of heat treatment[J]. International Journal of Plastics Technology, 2016, 20(2): 231-240.

[12] 王小芳. γ 辐照对聚乙烯/氮化硼/氧化硅微纳米复合材料理化结构和电荷输运特性的影响研究[D]. 天津：天津大学，2018：1-50.
WANG Xiaofang. Effect of gamma irradiation on physicochemical structure and charge transport properties of polyethylene based BN/SiO_2 micro/nanocomposites[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2018: 1-50.

[13] 王福志，姜松奕，郑 红，等. 核电站用 1E 级电缆结构设计及有关试验的探讨[J]. 电线电缆，2006(6)：14-18.
WANG Fuzhi, JIANG Songyi, ZHENG Hong, et al. Constructional design of class 1E cables for nuclear power station and investigation of related tests[J]. Electric Wire & Cable, 2006(6): 14-18.

[14] 乌晓燕，钟志民. 核安全级电缆耐 LOCA 工况能力的试验研究[J]. 核科学与工程，2016，36(5)：679-682.
WU Xiaoyan, ZHONG Zhimin. Research on survival of LOCA of Class 1E cables[J]. Nuclear Science and Engineering, 2016, 36(5): 679-682.

[15] 牟思南，胡 清. 坚守与突破：探访上上特种电缆研制[N]. 中国能源报，2014-05-12(01).
MOU Sinan, HU Qing. Persistence and breakthrough: visit Shangshang special cable development[N]. China Energy News, 2014-05-12(01).

[16] IEEE. IEEE standard for qualifying class 1E electric cables and field splices for nuclear power generating stations: IEEE Std 383™—2003[S], 2004.

[17] AFCEN. RCC-E 压水堆核电站核岛电气设备设计和建造规则[M]. 梁 伟，译. 深圳：深圳中广核工程设计有限公司，2005：4-44.
AFCEN. Code for design and construction of electrical equipment of nuclear island of RCC-E pressurized water reactor nuclear power station[M]. LIANG Wei, translated. Shenzhen, China: Shenzhen Zhongguang Nuclear Technology Co., Ltd., 2005: 4-44.

[18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 核电站用 1E 级电缆 通用要求：GB/T 22577—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People’s Republic of China, Standardization Administration of the People’s Republic of China. Class 1E cables for nuclear power generating stations-general requirements: GB/T 22577—2008[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2009.

[19] KOMATSU M, HOSOBUCHI M, OHKI Y, et al. Experimental and numerical analyses on terahertz spectra of oxidized cross-linked polyethylene[C] // 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Bologna, Italy: IEEE, 2013: 501-504.

[20] SURACI S V, FABIANI D, LI C Y. Post-irradiation effect analysis on XLPE-insulated LV cables used in nuclear power plants[C]//2019 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Guangzhou, China: IEEE, 2019: 53-56.

[21] LANFRANCONI M R, ALVAREZ V A, PEREZ C J. Isothermal crystallization of gamma irradiated LDPE in the presence of oxygen[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2015, 111: 74-80.

[22] OHKI Y, ITO S, HIRAI N. Elucidation of the degradation behavior of silicone rubber under adverse environments[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics. Valencia, Spain: IEEE, 2020: 114-117.

[23] OHKI Y, KOTANI H, FUJISHIMA D, et al. Similarity in degradation behavior by heat and irradiation between ethylene-propylene-diene rubber and silicone rubber[C]//2017 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomenon. Fort Worth, USA: IEEE, 2017:

157-160.

[24] GILLEN K T, KUDOH H. Synergism of radiation and temperature in the degradation of a silicone elastomer[J]. Polymer Degradation and Stability, 2020, 181: 109334.

[25] MIN D M, LI S T, HIRAI N, et al. Modeling of oxidation process and property changes of ethylene-propylene-diene copolymer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 537-546.

[26] DEEPALAXMI R, RAJINI V. Performance evaluation of gamma irradiated SiR-EPDM blends-science direct[J]. Nuclear Engineering and Design, 2014, 273: 602-614.

[27] NAH C, OH J, MENSAH B, et al. Effects of thermal aging on degradation mechanism of flame retardant-filled ethylene-propylene-diene termonomer compounds[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(4): 41324.

[28] YAMAGUCHI H, ISHII H, HIRAI N, et al. Degradation of mechanical and dielectric properties of flame-retardant ethylene propylene rubber by thermal aging[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15(4): 488-495.

[29] CHEN G, BANFORD H M, DAVIES A E. Space charge formation in γ-irradiated low density polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(1): 51-57.

[30] DU B X, ZHU X H, GAO Y. Effect of gamma-ray irradiation on characteristics of surface charging of polyethylene[C]// 2008 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Yokkaichi, Japan: IEEE, 2008: 44-47.

[31] GAO Y, DU B X. Effect of gamma-ray irradiation on permittivity and dielectric loss of polymer insulating materials[C]// 2012 International Conference on High Voltage Engineering and Application. Shanghai, China: IEEE, 2012: 229-232.

[32] HUANG X Y, KIM C, JIANG P K. Effects of high-dose gamma ray irradiation on the physicochemical properties and water-treeing deterioration of cross-linked polyethylene cable insulation[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(4): 17-25.

[33] LIU Z Y, MIYAZAKI Y, HIRAI N, et al. Comparison of the effects of heat and gamma irradiation on the degradation of cross-linked polyethylene[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15(1): 24-29.

[34] MIYAZAKI Y, HIRAI N, OHKI Y. Effects of heat and gamma-rays on mechanical and dielectric properties of cross-linked polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 1998-2006.

[35] 陈　丹. 核电站电缆选择要点技术[J]. 中国核电，2012，5(2)：166-171.
CHEN Dan. The technical discussion of the cables application in nuclear power plant[J]. China Nuclear Power, 2012, 5(2): 166-171.

[36] YANG L Q, OHKI Y, HIRAI N, et al. Degradation behavior and mechanisms of several polymeric insulating materials exposed to heat and radiation[C]// 2017 3rd International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems. Rupnagar, India: IEEE, 2017: 98-103.

[37] YOU J Y, YAMAGUCHI H, ISHII H, et al. Degradation of flame-retardant ethylene-propylene-diene rubber by radiation and steam[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15(11): 1572-1579.

[38] SPENCER M P, ZWOSTER A, BISEL T T, et al. Sequential versus simultaneous aging of XLPE nuclear cable insulation subjected to elevated temperature and gamma radiation[C]// 2020 IEEE Electrical Insulation Conference. Knoxville, USA: IEEE, 2020: 50-53.

[39] ŠARAC T, QUIÉVY N, GUSAROV A, et al. Influence of γ-irradiation and temperature on the mechanical properties of EPDM cable insulation[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2016, 125: 151-155.

[40] MIN D M, YAN C Y, HUANG Y, et al. Dielectric and carrier transport properties of silicone rubber degraded by gamma irradiation[J]. Polymers, 2017, 9(10): 533.

[41] GAO Y, LI Y, JIA J, et al. Change in PD resistance of polymer insulating materials irradiated with γ-ray at high dose rate[C]// 2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Bologna, Italy: IEEE, 2013: 748-751.

[42] ZHOU H L, HANAFUSA W, UDO K, et al. Aging behavior of flame-retardant cross-linked polyolefin under thermal and radiation stresses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(1): 303-309.

[43] OHKI Y, HIRAI N. Degradation of flame-retardant cross-linked polyethylene caused by heat, gamma-rays, and steam[J]. IEEE Access, 2022, 10: 62164-62172.

[44] TABUSE S, IZUMI Y, KOJIMA T, et al. Radiation protection effects by addition of aromatic compounds to *n*-dodecane[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2001, 62(1): 179-187.

[45] CHEN J, HUANG X Y, JIANG P K, et al. Protection of SEBS/PS blends against gamma radiation by aromatic compounds[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 112(2): 1076-1081.

[46] 陈希铭. 阻燃耐辐照三元乙丙橡胶复合材料的研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2016：4-5.
CHEN Ximing. Study on flame retardant and radiation resistance of EPDM composites[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2016: 4-5.

[47] GAO Y, XU B B, HAN T, et al. Gamma-ray irradiation induced variation in charge transport behavior of polyethylene based boron nitride/silica micro/nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 459-467.

[48] LEE K Y, KIM K Y. ^{60}Co γ-ray irradiation effect and degradation behaviors of a carbon nanotube and poly(ethylene-co-vinyl acetate) nanocomposites[J]. Polymer Degradation and Stability, 2008, 93(7): 1290-1299.

[49] WANG J S, XUE L, ZHAO B, et al. Flame retardancy, fire behavior, and flame retardant mechanism of intumescent flame retardant EPDM containing ammonium polyphosphate/pentaerythrotol and expandable graphite[J]. Materials, 2019, 12(24): 4035.

[50] RIVA A, CAMINO G, FOMPERIE L, et al. Fire retardant mechanism in intumescent ethylene vinyl acetate compositions[J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 82(2): 341-346.

[51] BOURBIGOT S, LE BRAS M, DUQUESNE S, et al. Recent advances for intumescent polymers[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2004, 289(6): 499-511.

[52] HUANG Y R, YANG J W, WANG Z Z. Flammability and mechanical properties of poly(styrene-butadiene-styrene) copolymer-containing intumescent flame retardants[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2017, 30(6): 816-826.

[53] OHKI Y, YAMADA T, HIRAI N. Diagnosis of cable aging by broadband impedance spectroscopy[C]// 2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2011: 24-27.

[54] YAMADA T, HIRAI N, OHKI Y. Improvement in sensitivity of broadband impedance spectroscopy for locating degradation in cable insulation by ascending the measurement frequency[C]// 2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: IEEE, 2012: 677-680.

[55] OHKI Y, YAMADA T, HIRAI N. Precise location of the excessive temperature points in polymer insulated cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2099-2106.

[56] HIRAI N, YAMADA T, OHKI Y. Comparison of broadband impedance spectroscopy and time domain reflectometry for locating cable degradation[C]//2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: IEEE, 2012: 229-232.

[57] OHKI Y, HIRAI N. Detection of abnormality occurring over the whole cable length by frequency domain reflectometry[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2467-2469.

[58] OHKI Y, HIRAI N, YAMADA T, et al. Highly sensitive location method of an abnormal temperature point in a cable by frequency domain reflectometry[C]//2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Bologna, Italy: IEEE, 2013: 117-120.

[59] HIRAI N, OHKI Y. Highly sensitive detection of distorted points in a cable by frequency domain reflectometry[C]//Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Niigata, Japan: IEEE, 2014: 144-147.

[60] OHKI Y, HIRAI N. Influence of cable structure on the fault location by frequency domain reflectometry[C]//2015 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Ann Arbor, USA: IEEE, 2015: 274-277.

[61] OHKI Y, HIRAI N. Effects of the structure and insulation material of a cable on the ability of a location method by FDR[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 77-84.

[62] OHKI Y, HIRAI N. Location attempt of a degraded portion in a long polymer-insulated cable[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2461-2466.

[63] 饶显杰，周 凯，谢 敏，等. 基于频域反射法的特征时域波形恢复技术[J]. 高电压技术，2021，47(4)：1420-1427.
RAO Xianjie, ZHOU Kai, XIE Min, et al. Recovery technique of characteristic time domain waveform based on frequency domain reflection method[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1420-1427.

[64] VERARDI L, FABIANI D, MONTANARI G C. Electrical aging markers for EPR-based low-voltage cable insulation wiring of nuclear power plants[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2014, 94: 166-170.

[65] FABIANI D, SURACI S V. Broadband dielectric spectroscopy: a viable technique for aging assessment of low-voltage cable insulation Used in Nuclear Power Plants[J]. Polymers, 2021, 13(4): 494.

[66] SURACI S V, FABIANI D, XU A N, et al. Ageing assessment of XLPE LV cables for nuclear applications through physico-chemical and electrical measurements[J]. IEEE Access, 2020, 8: 27086-27096.

[67] SURACI S V, FABIANI D, ROLAND S, et al. Multi scale aging assessment of low-voltage cables subjected to radio-chemical aging: towards an electrical diagnostic technique[J]. Polymer Testing, 2021, 103: 107352.

[68] FABIANI D, MAZZANTI G, SURACI S V, et al. Preliminary development and application of a stress-strength model for reliability estimation of aged LV cables for nuclear power plants[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics. Valencia, Spain: IEEE, 2020: 37-40.

[69] 清华大学. 国家最高科技奖出炉，你还不知道高温气冷堆是咋回事[EB/OL]. 清华大学，2021. (2021-11-10)[2022-10-11]. https://www.china-nea.cn/site/content/39743.html.
Tsinghua University. The national highest science and technology award has been issued, but you know nothing about high-temperature gas-cooled reactor[EB/OL]. Tsinghua University, 2021. (2021-11-10)[2022-10-11]. https://www.china-nea.cn/site/content/39743.html.

[70] 中核能源科技有限公司. 高温气冷堆核电站示范工程QC类电缆采购招标文件技术附件[R]. 北京：中核能源科技有限公司，2014：11-19.
China Nuclear Energy Technology Co., Ltd. Technical appendix to bidding document for QC cable procurement of high temperature gas cooled reactor nuclear power plant demonstration project[R]. Beijing, China: China Nuclear Energy Technology Co., Ltd., 2014: 11-19.



高 宇
1981—，男，博士，副教授，博导
主要从事高电压与绝缘技术方面的教学和科研工作
E-mail: hmgaoyu@tju.edu.cn

GAO Yu
Ph.D.
Associate professor



刘柏欣(通信作者)
1996—，女，博士生
主要从事极端环境绝缘材料的性能研究工作
E-mail: lbaix@tju.edu.cn

LIU Baixin
Ph.D. candidate
Corresponding author



杜伯学
1961—，男，博士，教授，博导
主要从事聚合物绝缘材料的可靠性和安全性理论与试验、高温超导电介质、纳米复合绝缘材料、电气绝缘在线监测、高电压新技术等方面的研究工作
E-mail: duboxue@tju.edu.cn

DU Boxue
Ph.D., Professor

收稿日期 2022-09-28 修回日期 2022-12-11 编辑 曾文君