

硅橡胶复合绝缘子紫外老化研究综述

梅红伟¹, 申鹏¹, 江鸿蛟¹, 刘辉², 周超², 沈浩², 王黎明¹

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055; 2. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250002)

摘要: 随着国内特高压网络的不断建设,复合绝缘子逐渐应用于高海拔强紫外地区。在太阳光紫外辐照下,复合绝缘子硅橡胶会发生紫外老化现象,击穿强度、表面电阻率和体积电阻率,降低长时间运行寿命和电网运行安全性。文中归纳总结了国内外学者对于紫外影响其力学、电气以及材料特性,导致复合绝缘子化学键断裂,材料表面出现孔洞和颗粒,硬度增大,进而影响其外线对硅橡胶的影响机理,分析了紫外线对硅橡胶的宏观以及微观性能影响,探讨了抗紫外老化方法在硅橡胶材料上的应用,比较了不同人工加速紫外老化方法之间的区别并给出了提高硅橡胶抗紫外老化性能的建议,为复合绝缘子老化领域研究人员提供参考。

关键词: 复合绝缘子; 硅橡胶; 紫外老化; 试验方法; 运行状况

Review of Research on UV Aging of Silicone Rubber Composite Insulators

MEI Hongwei¹, SHEN Peng¹, JIANG Hongjiao¹, LIU Hui², ZHOU Chao²,
SHEN Hao², WANG Liming¹

(1. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Guangdong Shenzhen 518055, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

Abstract: With the continuous construction of ultra-high voltage networks in China, composite insulators are gradually applied in high-altitude regions with intense ultraviolet radiation. Under solar ultraviolet irradiation, the silicone rubber of the composite insulators undergoes UV aging, affecting its mechanical, electrical and material properties, leading to breakdown of chemical bonds in the composite insulator, the formation of voids and particles on the material surface, increase of hardness and, consequently, affecting the breakdown strength, surface resistivity and volume resistivity of the insulator as well as reducing its long-term service life and the safety of power grid operation. In this paper, the mechanisms by which ultraviolet radiation affects silicone rubber, as reported by domestic and international scholars, are summarized. The influence of ultraviolet rays on the macroscopic and microscopic properties of silicone rubber is analyzed. The application of anti-ultraviolet aging methods in silicone rubber materials is discussed, the differences between different artificially accelerated ultraviolet aging methods are compared and the suggestions for improving the anti-ultraviolet aging performance of silicone rubber is given so to provide reference for researchers in the field of composite insulator aging.

Key words: composite insulator; silicone rubber; ultraviolet aging; test method; operating status

0 引言

绝缘子作为电网中的关键部件,对维护电网安全、保障电能稳定输送具有重要意义^[1]。线路中大部分绝缘子运行于户外恶劣环境中,需要面对高温高湿、污秽、电晕放电、强紫外环境、机械压力、高电场强度、覆冰以及各类化工废气沉积的影响^[2-5]。为

了防止线路闪络事故,运行中的线路绝缘子除了需要满足优秀的电气绝缘性能之外,还要具有耐高温高湿性、防污性能、高机械强度、表面疏水性以及长期运行中的抗老化性能^[6]。复合绝缘子伞裙和护套主要成分为硅橡胶材料,具有良好的电气绝缘性、憎水性以及憎水迁移特性、在大雾等高湿度环境下仍能保持优异的电气特性,经过多年运行,其在电

收稿日期:2026-05-26; 修回日期:2026-07-02

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(5500-202316123A-1-1-ZN)。

Project Supported by Headquarters Management Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(5500-202316123A-1-1-ZN).

网中所占的比例逐年升高^[7-10]。在中国西部高海拔地区,臭氧层稀薄,日照时间长,紫外线辐射强度较大,在青海、西藏等地到达地面的年太阳辐射总量可达6 500~6 700 MJ/m²^[11],紫外光波长短,能量高,会改变硅橡胶的物理特性和化学成分,降低硅橡胶拉伸强度,出现表面粉化现象,降低憎水性,改变微观形貌,出现局部微孔和孔陷,破坏绝缘子伞裙护套材料中的大分子链,造成其绝缘性能的下降,引发放电事故。目前虽然有国内外学者研究了硅橡胶在长时间紫外老化下的性能变化,但是还存在许多不足之处——紫外老化机理尚不完全清晰,虽然已有文献研究了紫外光对于硅橡胶分子链的影响,但是没有研究不同波长紫外光对于硅橡胶老化的影响区别以及紫外光与氧气、水分对硅橡胶的协同作用,加速老化试验方法缺乏统一标准,实验结果难以横向对比,针对硅橡胶抗紫外老化改性技术研究不足,缺乏全面系统的改性效果评估以及材料长期稳定性测试。因此,有必要对硅橡胶紫外老化机理、人工加速紫外老化标准性试验方法、紫外老化后硅橡胶性能评估方法以及硅橡胶抗紫外改性技术进行深入研究。

文中充分调研了国内外有关硅橡胶紫外老化的研究文献,介绍了硅橡胶复合绝缘子紫外老化特性、紫外老化模拟试验、紫外老化机理以及抗紫外老化方法等方面的研究现状,总结了现有硅橡胶紫外老化研究工作的不足,提出了后续研究方向,可为提高复合绝缘子长时间紫外老化运行性能作为参考。

1 硅橡胶复合绝缘子紫外老化特性

对于硅橡胶复合绝缘子的紫外老化分析,国内外专家学者已经开展了许多研究,在紫外老化之后对硅橡胶材料的各类机械性能、电气性能以及微观结构进行了分析,目的是研究紫外老化对硅橡胶材料的影响。本节先介绍硅橡胶复合绝缘子的测试方法,再介绍国内外研究人员对于该材料的试验方案与分析表征结果,将微观分析手段与宏观分析方法相结合,给出硅橡胶复合绝缘子的紫外老化机理,最后对硅橡胶复合绝缘子的人工加速紫外老化方法进行了综述。

1.1 测试方法

硅橡胶复合绝缘子目前主要从外观、化学成分、微观形貌、官能团等几个方面进行分析,从不同角度反应了硅橡胶材料紫外老化前后的性能变化,

这些测试方法主要包括憎水性测试、扫描电镜分析(SEM)、红外光谱分析(FTIR)、拉伸性能测试、邵氏硬度测试、体电阻率测试等。

1)外观检查。外观检查是检查硅橡胶复合绝缘子紫外老化程度最为直接普遍的方法,在复合绝缘子挂网运行或者人工加速紫外老化一段时间后,通过人眼直接观察、摄像机拍摄等方法判断复合绝缘子老化程度。外观检查内容主要是判断硅橡胶表面是否完好,有无缺陷等,比如伞裙表面的粉化程度、硅橡胶是否发生褪色或者破损,紫外老化严重处与正常运行复合绝缘子表面的区别、是否存在裂纹、孔洞等。

2)拉伸性能测试。拉伸测试是一种简单常见的测试方法,属于机械性能测试,可以反映材料老化前后的机械性能变化。拉伸性能测试将紫外老化后的材料制成合适的形状大小,用夹具夹住样品两端,逐渐施加负载直到材料断裂,通过形变长度、材料尺寸、施加拉力以及横截面积等参数测得拉伸强度以及拉伸伸长率,能够判断样品老化之后的力学性能变化,有助于确定紫外老化对硅橡胶的影响。

3)憎水及其迁移性测试。实验室中主要采取测量静态接触角的方法对硅橡胶材料的憎水性进行测试,静态接触角法测量更加真实可靠、误差更小。静态接触角法需要借助接触角测量仪,将一定量的水滴在样品表面,通过测量水滴与样品之间的接触角对其憎水性进行判断。由于硅橡胶具有良好的憎水迁移性,因此除了需要判断其憎水性外,还需要判断其憎水迁移性。为了测量憎水迁移性,首先需要破坏样品表面的憎水性,然后在样品表面涂上一定密度的盐与灰模拟自然污秽条件,将其置于特定温湿度环境下迁移一段时间后,再次进行憎水性测试,通过比较前后憎水性差异评估其憎水迁移性。

4)电气性能测试。对于复合绝缘子,最关注其高压运行环境中的电气性能,因此在紫外老化之后需要对其电气性能进行测试。电气性能测试可以分为非破坏性试验与破坏性试验,非破坏性试验包括体电阻率、表面电阻率、相对介电常数、介质损耗角正切、泄漏电流等,破坏性试验包括击穿强度、耐压试验等,紫外老化后,通过测试样品的电气性能变化,可以判断其运行的安全性与可靠性。

5)材料性能测试。传统分析方法缺乏对材料老化过程中的化学成分、微观形貌以及组成结构的分析。因此,引入一些材料微观性能的测试方法,比如扫描电子显微镜、傅里叶红外分析以及X射线光

电子能谱等,这可以从微观角度解释硅橡胶紫外老化过程中发生的变化。扫描电子显微镜(SEM)是一种常见的材料分析手段,能够进行几十到几十万倍的放大,从而观察物体的微观表面,通过微观表面硅橡胶的裂纹、孔洞以及表面光滑水平来判断其老化程度,对硅橡胶后续的性能变化做出一定的预测。红外光谱分析基于分子吸收光谱技术,破坏性低,灵敏度高。红外射线照射到分子上时,分子中的原子会发生振动或转动,吸收相应波长的红外光能量,形成独特的红外吸收光谱,因而可以对物质分子进行鉴定,分析其结构或官能团的变化。在硅橡胶老化分析方面,主要用于检测老化后硅橡胶的吸收峰强度、位置或者新峰的出现,可对硅橡胶老化机理、官能团鉴定以及寿命预测提供重要参考。X射线光电子能谱是一种表面分析技术,可分析材料表面1~10 nm深度范围,可进行元素定性定量分析,广泛应用于各化学分析领域。高能X射线照射到样品表面时,会激发原子内层电子或是价电子成为光电子,通过分析光电子能量分布,可以获取材料表面电子结合能信息。X射线光电子能谱能够对硅橡胶表面元素(包括Si、C、O、H等元素)进行测量,分析老化过程中元素的含量变化,得到表面状态信息,评估老化程度。

1.2 微观性能

刘丁华^[12]将试样分别放在高海拔地区(海拔约4 300 m,紫外线年辐照度约为0.27 W/m²)和平原地区(紫外线年辐照度约为0.19 W/m²)进行自然暴露试验,对试样进行热刺激电流测试,得到其热刺激电流峰值随着老化时间的增长而变大,陷阱电荷量更高而且上升较快;但是在紫外老化的各个短时段内样品的性能变化程度不同,需要对样品进行短时取样。陈晓春^[13]等人利用表面衰减全反射红外光谱(ATR-FTIR)等分析方法对在线运行15年左右的交流线路上的复合绝缘子伞裙材料进行了测试,并与UVA人工加速紫外老化600 h的试样进行了对比,结果发现挂网运行的110 kV复合绝缘子表面存在积灰、积污现象,表面出现裂纹,利用红外光谱进行分析,红外光谱结果显示试样中Si-O、Si-CH₃和C-H键吸收峰强度减弱,-OH吸收峰增强,而500 kV复合绝缘子伞裙则出现了更加强烈的Si-O键、Si-CH₃键以及C-H键强度的下降,说明硅橡胶主链断裂严重,侧链甲基基团含量显著下降,与宏观裂纹、粉化等现象相符合。

傅佳^[14]等人用脉宽为28 ns的248 nm紫外激光进行0~4 500次脉冲照射HTV样品,并对照射前后

样品进行了接触角、扫描电子显微镜、傅里叶红外变换光谱以及X射线光电子能谱测试,结果发现硅橡胶憎水角有所下降,材料表面变得粗糙,填充物外露,根据硅橡胶中典型化学键的能量,见表1。综合分析结果认为紫外老化后Si-O、C-C、C-H以及Si-C结合键减弱,生成了活泼的自由基,同时在侧链生成了亲水性-COOH或-CH₂OH,在含氧气氛中,O和Si交联形成了SiO_x(*x*=3或4),紫外激光造成了物理老化和光氧化老化。Chang-Su H^[15]等人使用313 nm UVB荧光紫外灯管在60 ℃条件下进行辐照,测量了其憎水角变化以及样品表面电荷建立的表面电位衰减,结果发现紫外辐照对憎水角的影响不明显,而随着紫外辐照时间的增加,其表面电位衰减速度下降,样品中的O-H键、C-H键、Si-CH₃键以及Si-O-Si键的强度都下降,其中C-H键和Si-CH₃键下降得比Si-O-Si键更明显;XPS结果显示氧的光电子峰键能上升了,并且Si的键能从102.1 eV更多的转移到了103.7 eV,这意味着相比于主链的Si-O-Si, SiO_x有更多的形成;将硅橡胶浸泡在正己烷溶液中100 h,结果显示随着紫外老化时间的增加,硅橡胶中的小分子量硅氧烷数量大幅减小。

表1 硅橡胶分子中典型化学键的能量

Talbe 1 Typical bond energies in silicone rubber molecules

化学键	Si-O	Si-C	C-C	C=C	C-H	C-O
键能/ (KJ·mol ⁻¹)	447	318	345	615	413	357

Farhadinejad Z^[16]研究了3种不同类型的20 kV等级室温硫化硅橡胶绝缘子的紫外老化性能。样品在9支UVC荧光紫外灯下照射65天并进行了热失重分析、表面形貌分析以及能量色散X射线光谱分析(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDX),结果表明200 ℃以下硅橡胶紫外老化前后热失重曲线无变化,200 ℃以上紫外老化后样品初始降解温度更低,降解速度更快,相同温度下的残余量下降,这可能是因为紫外线影响了硅橡胶中的环状硅氧烷低聚物从而影响了其热分解性能;紫外线对硅橡胶基体的微观形貌影响很小,只留下了浅浅的划痕,但是对填料周围的硅橡胶腐蚀更加严重;Si、O、C的含量上升,侧链甲基被氧化,Al/Si比例下降,这是由于UVC紫外线降解了ATH填料。林荧^[17]等人用氙灯紫外老化箱对LSR进行了1 000 h紫外光加速老化实验。结果显示:随着老化时间的增加,试样表面孔洞数量增多,疏松层的深度加深,填料裸露,试样的热稳定性、交联密度、硬度、相对介电常数以及体积电阻率有所提高。材料中的Si元素质量分数

降低,C和O元素质量分数上升,XPS结果显示Si元素倾向于和更多的O元素相结合,EDS结果显示紫外老化后,材料表面的Si元素有所流失,Si元素质量分数从材料表面至内部逐渐上升,并随着深度的增加而逐渐平稳,试验结果表明紫外老化破坏了硅橡胶表面结构,形成了松散层,造成了其中二氧化硅填料流失,并且随着紫外老化时间的增加,Si元素的流失速度逐渐减弱,表明紫外线对材料的破坏作用逐渐减弱。

值得注意的是,尽管目前的研究表明紫外光会对硅橡胶分子链以及内部分子结构造成影响,但是不同的研究之间的紫外老化条件并不一致,难以进行标准化对比,比如各研究中采取的紫外光源种类、数量、波长分布,硅橡胶的配方和制造工艺,以及紫外老化过程的温湿度等,这些因素都会导致紫外老化结果的区别,难以鉴别真正影响硅橡胶紫外老化的因素,今后可以建立标准化紫外老化条件,避免无关因素影响实验结果;动态监测能力不足,现有研究仅通过对比紫外老化前后硅橡胶的微观性能变化推测紫外光的影响,无法监测紫外老化过程中的微观动态性能变化,可以在以后的过程中采用更加便捷的实时监测技术,获得硅橡胶紫外老化过程中的动态信息。

1.3 宏观性能

祁黎^[18]等人对硅橡胶进行了大气暴露试验,将样品置于暴露架上接受720天日光照射,经受日光、温度、湿度、臭氧等综合自然条件作用,暴晒试验结束后对硅橡胶样品进行机械性能测试以及电气性能测试,结果显示随着自然暴露试验的进行,高海拔地区样品的拉伸强度、断裂伸长率以及撕裂强度均先上升后下降,但是变化并不明显,表面电阻率和体积电阻率有所下降,但是暴露时间过短,无法判定其长期性能变化。刘俊^[19]研究了不带电情况下青藏高原环境硅橡胶的自然老化,试验年限为3~5年,结果发现,短期老化完成后硅橡胶憎水性等级均在HC₁至HC₂等级,随着自然老化的进行,硅橡胶硬度增加,热重试验显示硅橡胶的胶含量逐渐减少。Joneidi I A^[20]等人将硅橡胶置于9支UVC荧光紫外灯下照射65天,研究了紫外老化对硅橡胶表面憎水角以及泄漏电流的影响。结果显示,紫外老化局部破坏了HTV硅橡胶表面的憎水性,同时泄漏电流的3次谐波含量增加了,3次谐波更能够反应硅橡胶的老化性能,当3次谐波及以上的谐波成分可以忽略不计时,即使泄漏电流的主谐波成分比较高,也不会出现明显的电弧。

金福宝^[21]等人用313 nm UVB紫外老化灯老化硅橡胶材料2 000 h,结果发现其表面变得粗糙多孔,沿面起始放电电压基本上无变化,但是闪络电压先上升后下降;定义HTV硅橡胶表面的碳化痕迹和放电持续时间的比值为爬电放电的发展速度,随着老化时间的增加,交流电压作用下HTV硅橡胶爬电放电发展速度迅速增加,放电间隔缩短。Yoshimura N^[22]对硅橡胶材料进行了2 000 h紫外老化实验,结果发现紫外老化时间越长,静态憎水角越小,硅橡胶中的ATH含量会影响其憎水角,撤走紫外线之后硅橡胶恢复并不明显;对硅橡胶进行了干区电弧闪络实验,结果发现先进行紫外老化后进行干区电弧闪络实验能够减小憎水角,而紫外老化试验和干区电弧实验交替进行不能减小其憎水角,推测原因是干区电弧闪络实验中硅橡胶表面的固体残留层影响了紫外老化的进一步进行,紫外老化后表面变得更加粗糙多孔,这使得憎水性更加难以恢复,因为相对表面积的增加需要更多的小分子量硅橡胶迁移至表面,而紫外老化后,硅橡胶内部的小分子含量减少,不利于材料表面的憎水性迁移。孙文健^[23]分析了不同配方的硅橡胶抗紫外老化性能的差异,利用UVA紫外灯对3种不同硅橡胶配方的硅橡胶试样进行紫外老化试验,结果发现试样表面出现暗黄色氧化痕,憎水性波动较小,从试验结果看,含胶量越高,硅橡胶抗紫外老化能力越强,其余填料的增加不利于硅橡胶的抗紫外老化性能。

目前国内外学者已经针对硅橡胶紫外老化的宏观性能做了大量工作,然而仍然存在许多不足之处,硅橡胶经过紫外老化后的宏观性能下降机制并不明确。经过紫外老化后,硅橡胶的力学性能有所下降,但是它的下降过程和微观领域分子结构变化之间的定量关系没有明确;绝缘性能有所变化,然而经过紫外老化后,有些样品绝缘性能下降,有些样品则变化不大甚至略微上升,紫外老化对于硅橡胶的绝缘性能影响尚不清楚,对其电学性能的影响分析并不深入;有些样品表面出现了粉化与裂化现象,但是其具体产生因素和演化规律没有深入分析。今后可以从样品宏观性能变化的角度入手,深入分析导致硅橡胶紫外老化后宏观性能变化的原因。

1.4 紫外老化机理

复合绝缘子大致可以分为芯棒、金具、伞裙护套3个部分,其中芯棒负责保持绝缘子的整体机械强度,金具将输电线路与绝缘子相连接,维持线路的稳定运行,伞裙护套作为绝缘子的主要绝缘材料,起到防止输电线路对地放电、造成闪络的作用^[24]。复

合绝缘子伞裙和护套的主要成分是硅橡胶, 为有机材料, 以 Si-O 键螺旋排列为主链, 连接于 Si 原子上的侧链甲基或其他基团为侧链并对外取向, 抵消了主链的极性使得硅橡胶表面材料具有良好的憎水性能, 与传统的瓷和玻璃绝缘子相比更不容易发生闪络^[25]。硅橡胶的主体成分是聚二甲基硅氧烷 (polydimethylsiloxane, PDMS), 其分子结构式见图 1。

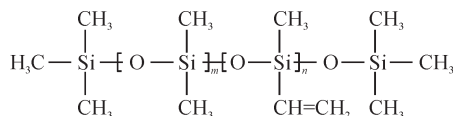


图 1 PDMS 的分子结构式

Fig. 1 Molecular structure of polydimethylsiloxane

硅橡胶侧链主要含有甲基基团以及乙烯基基团, 甲基基团表面能低维持硅橡胶整体的憎水性, 乙烯基基团性质较为活跃, 在硫化过程中与硫化剂反应作为交联点。硅橡胶大分子内部以共价键相互连接, 主链 Si-O 键键能为 447 kJ/mol, 而侧链 Si-C 键键能则为 301 kJ/mol, 相比而言硅橡胶侧链比主链更容易断裂^[26]。在外界环境因素作用下, 硅橡胶内部会发生老化, 破坏内部分子之间的共价键, 使得硅橡胶大分子降解为小分子, 导致材料整体交联度下降, 同时自由基之间会相互反应产生交联, 两种因素共同作用下决定了硅橡胶紫外老化后的交联度^[27]。分子内部亲水性分子暴露在表面, 侧链基团被氧化, 形成极性基团, 使得表面粗糙, 孔洞增加, 憎水性下降, 表面出现粉化、硬化、伞裙开裂等现象, 缺陷在材料内部渐渐增加, 加速材料的劣化, 使绝缘子的憎水性与绝缘性能进一步下降, 在恶劣环境下引发闪络事故, 并威胁到电网的运行安全。

硅橡胶在外界强紫外条件作用下发生的老化主要有物理老化以及化学老化两部分^[28]。物理老化主要表现在微观分子链段的运动中, 高分子材料内部分子不断运动使其凝聚态结构从非平衡态转向平衡态, 导致材料的物理及力学性能发生改变。外界紫外条件不但会造成硅橡胶材料的物理老化, 也会使其化学结构发生变化, 内部发生永久性老化。硅橡胶在紫外条件下会发生光氧化降解现象, 硅橡胶会吸收紫外光子, 激发电子, 在激发态电子作用下会产生自由基等高能粒子, 由这些粒子进一步推动后续的反应。太阳中紫外线穿过大气层到达地面的紫外光波长较短(最短波长为 290 nm, 能量为 396.3 kJ/mol^[29]), 在此波长的紫外光作用下, 硅橡胶的侧链基团能够被切断, 配合其他因素一同作用可以使硅橡胶的组成成分发生变化。在紫外光照射

下, 硅橡胶材料发生大分子链段的断裂, 见图 2。图 2 发生在硅橡胶复合绝缘子运行的全时段内, 在断链处产生自由基, 在氧气以及高电场强度等因素作用下, 侧链基团会发生氧化, 使硅橡胶性能下降。具体而言, 当强紫外光照射在硅橡胶表面时, 硅橡胶表面的 Si-C 键以及 C-H 键会被切断, 大分子链发生降解, 形成活跃的自由基, 这些自由基活性较高, 在环境因素作用下很不稳定, 会进一步发生反应, 主要包括交联反应与氧化反应两种, 见图 3、4^[30]。

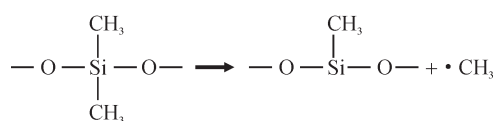
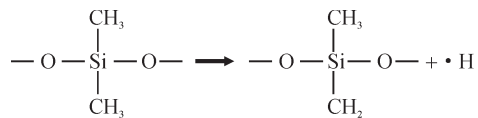


图 2 硅橡胶链段的断裂反应

Fig. 2 Cleavage reaction of chain segment of polydimethylsiloxane

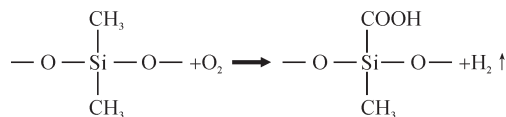


图 3 硅橡胶链段的氧化反应

Fig. 3 Oxidation reaction of chain segment of polydimethylsiloxane

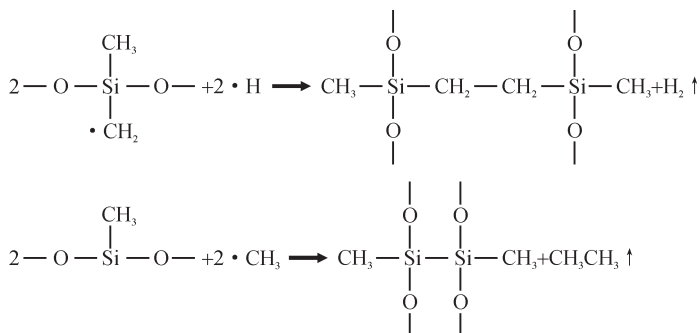


图 4 硅橡胶链段的交联反应

Fig. 4 Crosslinking reaction of chain segment of polydimethylsiloxane

在氧气以及强紫外光产生的少量臭氧条件下, 聚二甲基硅氧烷侧链高活性自由基容易被氧化为甲酸基团(-COOH)、羟基(-OH)等, 形成硅醇或者硅烷醇^[31], 这些基团是极性基团, 在侧链形成大量极性基团之后, 硅橡胶的整体极性会上升, 原先侧链甲基对主链的屏蔽效果减弱, 表面憎水性会有所下降, 亲水基团会使材料更容易吸收外界水分, 水分内部含有的微弱离子会导致内部载流子浓度上升, 提高伞裙表面的电导率, 降低体积电阻率^[32]。

硅橡胶侧链自由基形成之后, 反应活性上升, 自由基与自由基之间也会相互结合进行反应, 彼此

交联,形成更为稳定的网状结构,提高硅橡胶材料整体的交联密度,使材料硬度上升^[33]。链段之间的交联形式多样,可以彼此结合成为更长的主链结构,侧链之间相互交联形成H型的双主链结构,或者是大分子链段结合小分子,小分子硅氧烷结合在侧链上,伴随有氢气、甲烷、乙烯等小分子气体的生成^[31]。硅橡胶内部会生成孔洞与缺陷,出现绝缘薄弱区域,在线路与杆塔之间的强电场强度作用下,伞裙会在最薄弱的地方被击穿,使硅橡胶整体绝缘性能下降。由于硅橡胶材料主体被破坏,其中的填充物也会外露,进一步增加了表面的粗糙性与填料分布的不均匀性,使材料内部电树容易发展^[34],二氧化硅颗粒的析出降低了硅橡胶整体的力学性能,填充物中的氧化铝颗粒作为杂质增加了材料表面的导电性,使硅橡胶的电气性能下降。

综上,紫外老化主要是通过侧链基团的降解、氧化以及交联使硅橡胶化学结构发生改变,气体析出,大分子链结构变化以及填充物外露则使硅橡胶材料的电绝缘性能下降。但是,这些机理主要通过紫外老化前后硅橡胶微观性能测试结果进行推测,没有进一步深入分析紫外老化过程,硅橡胶紫外老化自由基反应路径并不明确,紫外老化过程中自由基生成、传播和终止的路径并不清楚,多因素耦合实验中紫外光和其他环境因素的协同作用也没有进行系统研究,导致实验结果具有很大的偶然性,紫外老化机理也没有和宏观性能的变化联系起来,没有得到系统性分析验证。今后可以深入研究自由基的反应机理,通过标准化测试明确紫外老化过程各因素对实验结果的影响,并尝试建立微观结构变化和宏观性能变化的定量分析。

1.5 紫外辐射强度

1.5.1 等效紫外辐照量换算法

中国地域广阔,复合绝缘子的使用范围横跨东西,复合绝缘子在高海拔强紫外地区的使用数量近年来有所上升,在不同的地区,太阳的直射角度以及全年紫外辐照量都有所差异^[35],为了使人工加速紫外老化与实际环境中老化情况相匹配,需要对人工加速紫外老化的辐射量进行换算,提高模拟不同地区紫外辐射量的准确性。复合绝缘子在实际运行环境中的变化受到多种因素共同作用,除了紫外光照射之外,还有高压、高温、高湿以及腐蚀性物质等的影响,人工加速老化试验难以模拟实际运行环境^[36]。然而,利用等效替代的原则,可以将人工加速紫外老化中的紫外辐射量与运行工况下的自然环境紫外辐射量之间对应起来,进而确定人工加速紫

外老化需要的老化时间,这就是等效辐射量换算法,也是当前应用最为广泛的方法^[37]。由于人工加速紫外老化试验与自然环境下的紫外老化存在差异,在使用等效辐射量换算法时需要对室内紫外辐射量进行修正,修正因子需要对运行工况下的辐射量以及绝缘子倾斜角度进行确定,修正因子随海拔增高而递减^[38]。根据以上方法,假设 F 、 $f_{\text{修}}$ 分别是实际运行环境中的辐照量与人工加速紫外老化试验辐照量,可得:

$$F = QT \quad (1)$$

$$f_{\text{修}} = \frac{f \times t}{k} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: F 为实际运行环境中一年的紫外光辐射量, kJ/m^2 ; Q 为外界环境年平均紫外辐射强度, W/m^2 ; T 为一年中的太阳光照小时数, h ; $f_{\text{修}}$ 为修正之后人工加速紫外老化紫外辐照量, kJ/m^2 ; f 为紫外光源的辐射强度, W/m^2 ; t 为人工加速紫外老化时间, h ; k 为修正因子(约1.0~1.5)。令人工加速紫外老化与实际运行工况对应起来,即令 $F = f_{\text{折}}$,可得人工加速紫外老化时间的计算公式为

$$t = \frac{Q T k}{f} \quad (3)$$

通过式(3)求得,运行工况下复合绝缘子的外界环境紫外辐射时间和人工加速紫外老化时间的对应关系,进而确定室内环境下紫外老化所需时间。

1.5.2 试验辐射强度选择

为了使人工加速紫外老化试验符合实际环境老化情况,又要保证紫外老化过程中各反应充分进行,需要控制紫外光源的辐射强度,令人工加速紫外老化与太阳光紫外老化对应起来。目前人工加速紫外老化有两种试验方法:①控制室内光源辐照度以及紫外光波段与外界太阳光一致,通过模拟太阳光照进行人工加速紫外老化试验,避免外界异常天气的干扰。②另一种方法则是保证紫外光波段与外界太阳光一致,调整紫外光辐照度,令室内紫外老化速率远高于外界太阳光老化速度,达到加速紫外老化的目的。李国芳等^[31]按照国际电工委员会标准 IEC 61109:2008 的实验参数及方法,利用石英玻璃与普通玻璃过滤紫外线高压汞灯发出的射线后对硅橡胶进行紫外老化,模拟云南地区的日光照情况,紫外老化500 h的总辐照量约为720 MJ/m^2 ,相当于云南地区一年的紫外辐照量。王佳妮^[39]利用紫外辐照计测量紫外光源的辐照度,通过测量得到紫外设备的平均紫外辐照度为140.9 W/m^2 ,按照紫外老化设备一天运行23 h计算,其运行一天紫外老

化相当于高原实际环境中运行 10.17 天。崔宇阳^[40]利用 6 根 UVA 荧光紫外灯管进行室内加速老化试验, 可以得到室内紫外光辐照强度为室外的 20.5 倍, 室内加速紫外试验模拟藏区老化试验一年的时间约为 17.8 天。由以上研究可以看出, 目前试验条件能够较好地模拟自然环境紫外光辐照条件并且能够进行可控的紫外加速老化试验。

1.6 寿命评估方法

复合绝缘子在长期运行过程中不仅会受到紫外线的影响, 也会受到如湿气、污染、酸、高电压及机械应力等的影响, 使其性能退化乃至下降, 因此, 对复合绝缘子的寿命评估至关重要, 在人工加速老化之后, 除了对材料进行表征测试之外, 我们还需要将加速老化试验和寿命预测模型相结合来评估材料服役时间。目前国内外有关于橡胶材料寿命预测的标准和现有的实验方法, 大多是根据 Arrhenius 公式进行外推计算来得到材料的长期使用寿命, Arrhenius 公式为

$$k = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (4)$$

式(4)中: k 为反应速率常数; A 为频率因子; E_a 为活化能, J/mol; R 为气体常数, 8.314 J/(mol·K); T 为绝对温度, K。

常用的寿命预测方法是在不同温度下对材料进行加速老化试验, 记录材料的失效时间, 将实验数据代入寿命方程, 通过拟合方法确定材料的 E_a 和 k , 最后利用得到的参数预测不同温度下材料的使用寿命。徐思奕^[41]等人对硅橡胶绝缘子进行了不同时间的热老化, 测得硅橡胶不同升温速率下的热失重曲线, 并以各升温曲线下失重 5% 时的温度作图, 得到绝缘子的活化能, 并通过 Arrhenius 公式、倒易法、Hallberg-Peck 模型计算相应复合加速因子, 预测硅橡胶实际运行环境中的使用寿命, 得出其在常温水条件下使用寿命为 16.6 年。Moghadam^[42]等人不同温度下对硅橡胶材料进行了热老化试验, 并利用断裂伸长率为指标衡量硅橡胶的老化程度, 分析了 ISO 11346、Gillen、Hoang 模型在寿命预测上的差异, 结果认为 ISO 11346: 2023 和 Gillen 模型更符合实际情况, 预测硅橡胶在 50 °C 下的运行寿命在 30~40 年之间。柳荣^[43]等人参照 GB/T 20028—2005 在 100~160 °C 下对硅橡胶进行了热老化, 并以永久压缩变形作为指标评估硅橡胶的贮存寿命, 利用外推法计算硅橡胶的使用寿命, 结论认为硅橡胶在 40 °C 下寿命大于 50 年, 且使用寿命随温度提高而迅速下降。目前对硅橡胶寿命预测的方法大多局限在热

老化范围, 缺乏考虑紫外线、高电压以及污秽污染等条件下的寿命评估, 多因素复杂环境下硅橡胶的寿命评估更具有工程应用价值, 是未来的研究方向。

2 硅橡胶复合绝缘子抗紫外老化方法

高分子材料化学键吸收紫外光能量, 发生光分解以及光氧化等光化学反应, 改变其内部结构, 影响其性能。一般通过向材料中添加光稳定剂来改善材料的抗紫外性能, 光稳定剂能够屏蔽或是吸收紫外线的能量, 抑或是猝灭被紫外线激发的分子或基团的激发态, 使其恢复到基态, 最终抑制其光化学反应, 提高抗紫外老化性能。根据不同的作用机理, 光稳定剂可以分为紫外光吸收剂、激发态猝灭剂、受阻胺光稳定剂以及光屏蔽剂。除了向硅橡胶中添加光稳定剂之外, 还可以通过改变硅橡胶的结构、基底材料、配方成分等方法来提高其抗紫外老化性能。

2.1 紫外光吸收剂

紫外光吸收剂是应用最广的一类光稳定剂, 主要是有机物, 按结构可以分成二苯甲酮类、水杨酸酯类、苯并三唑类、三嗪类等^[44]。紫外光吸收剂具有特殊的化学结构, 比如分子内氢键或是不饱和的共轭体系等, 在吸收外界紫外线之后, 他们能够激发分子内质子转移, 在分子内部形成迅速转化的酚式—醌式异构体转变, 将外界的紫外线能量转化为热能, 达到光稳定的效果^[45], 其作用机理见图 5。但是小分子紫外线吸收剂很容易气化、挥发、被溶剂萃取而迁移到材料表面缩短其使用寿命, 也有研究表明某些紫外光吸收剂具有毒性^[46], 会对生态环境造成不良影响^[47]。

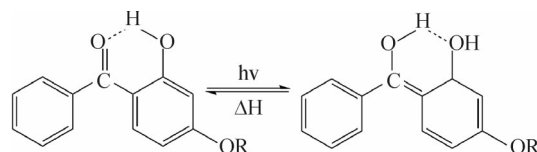


图 5 二苯甲酮类紫外吸收剂作用机理

Fig. 5 The mechanism of action of benzophenone-based UV absorbers

2.2 激发态猝灭剂

目前, 猝灭剂的工业产品主要是镍、钴、铁等金属络合物, 它能够有效转移聚合物中的光敏发色团激发态能量, 使得处于激发态的高分子失活恢复到基态。此时, 猝灭剂本身接受能量转变为激发态, 再以其他形式(主要为光、热能)散发能量恢复到基态^[48]。猝灭剂不容易吸收紫外线的能量, 但能够影响紫外线引发的后续反应, 某些情况下光稳定效果

优于紫外线吸收剂。然而,由于其主要成分是二价镍类,激发态猝灭剂使用已逐步减少,未来会逐渐消失^[49]。

2.3 受阻胺光稳定剂

受阻胺光稳定剂是以2,2,6,6-四甲基-4-哌啶基衍生物为主要成分的脂环胺类化合物。其光稳定功能主要归因于氧化而形成的氮氧化物对自由基的捕获,其在有氧环境中能够吸收光能,转变为氮氧自由基,有效捕获活性自由基,猝灭单线态氧,抑制高分子氧化分解,提高光稳定性^[50]。然而,目前受阻胺光稳定剂存在分子量低、易迁移、易挥发、不耐抽提、碱性高等缺点,限制了其进一步使用^[51]。

2.4 激发态猝灭剂

光屏蔽剂又称为遮光剂,主要由氧化锌(ZnO)、二氧化钛(TiO₂)、二氧化铈(CeO₂)等无机材料构成,他们能够反射或是吸收太阳光的紫外线,阻止紫外线深入聚合物内部,使得聚合物得到保护,其性能优异,光稳定性、化学稳定性和热稳定性都很高。然而,纳米氧化物在低温下性能改善并不明显,其与有机材料的相容性也是一大问题,目前常用的聚合物/无机复合材料的制备方法主要有共混法以及原位聚合法等,但是共混法稳定性较差,容易发生相分离,难以在基体中均匀分散,原位聚合法的产品稳定性较差,残留的乳化剂也会影响聚合产物及其性能。张辉^[52]等人将纳米二氧化钛混入硅橡胶中,对硅橡胶的抗紫外老化性能进行了测试并与原样品比对,结果发现加入二氧化钛之后,硅橡胶经紫外老化后材料微观形貌裂纹与孔洞数量减少,拉伸强度和断裂伸长率有所提高,紫外老化前后硬度以及交联度变化不明显,分析认为纳米二氧化钛的加入有助于提高硅橡胶的抗紫外老化性能,但是他们并没有对具体分析纳米二氧化钛提高硅橡胶抗紫外老化性能的原理。李麟^[53]等人将纳米CeO₂填料引入硅橡胶中以提高其抗紫外老化性能,将不同质量分数的CeO₂分散到防污闪涂料当中并进行560 h的紫外老化试验,结果发现添加了纳米CeO₂的涂层样品在1 200~3 000 nm范围内光谱特性以及红外光谱中相应基团的吸收峰强度基本不变,憎水特性保持良好,说明纳米CeO₂能够有效提高硅橡胶的抗紫外老化性能。骆守康^[54]研究了纳米ZnO对室温硫化硅橡胶的抗紫外老化性能的影响,利用钛酸酯偶联剂对纳米ZnO改性之后,将纳米ZnO加入到硅橡胶中并开展2 500 h紫外光老化试验,随着纳米ZnO质量分数的增大,试样紫外光屏蔽率从25.22%提高到97.85%,击穿强度有所上升,Si-(CH₃)₂和Si-CH₃吸收

峰强度增强,试样微观表面细碎脱落物减少。

综上,可以向硅橡胶配方中加入抗紫外老化填料提高其抗紫外老化性能。但是,这些材料对于硅橡胶紫外老化行为的影响并没有具体分析,抗紫外老化填料对硅橡胶的性能影响也没有得到系统性研究。今后研究方向应该是分析抗紫外老化填料和硅橡胶分子的协同作用,探究不同抗紫外老化填料对硅橡胶紫外老化性能影响的区别,优化改性工艺,尽可能提高填料的抗紫外老化效果。

3 硅橡胶复合绝缘子人工加速紫外老化试验方法

3.1 紫外光源

目前,对于硅橡胶复合绝缘子的紫外老化试验仍然以人工加速紫外老化试验为主,较少进行户外情况下的自然老化试验。自然老化受地区、气候以及季节等环境因素影响,试验结果差异较大,而人工加速紫外老化试验方便控制试验的各项参数,可以排除其他因素的影响,集中研究紫外光老化对于硅橡胶的影响。由于人工加速紫外老化试验对于紫外老化结果影响较为明显,因此需要控制试验方案,令紫外老化结果尽可能符合自然环境中硅橡胶的紫外老化过程。人工加速紫外老化有多种光源可供选择,不同光源的原理、波长、辐射强度以及发光效果都有所不同,针对不同的模拟场景需要选择不同的试验方案。

3.1.1 氙灯

氙灯全名为高强气体放电灯,由带有两个固体钨电极的石英放电管、氙气以及相应的密封石英外壳组成。阴极呈圆锥状、尖端尖锐,阳极表面扁平、体积大、整体结构厚重,有利于接受电子以及散热^[55]。氙灯工作时,放电管首先将电压快速提高,击穿氙气分子,使其处于游离激发的状态并形成稳定的电弧,稳定后电压回落,氙灯电弧产生的光透过石英外壳照射到外界环境中,形成稳定的氙灯光源^[56]。氙灯老化目前被认为是模拟性最好的一种老化方法,其发出的光为连续光谱,在紫外区和可见区的光谱能量分布和太阳光比较接近^[57-58],见图6^[59]。在295~800 nm范围内氙灯的光谱能量和太阳光非常接近。氙灯的光谱能量分布和太阳光较为接近,包括紫外线(UV)、可见光以及红外(IR)部分,氙灯辐射经过过滤,将其中的红外光以及部分紫外光过滤之后,其到达样品表面的光谱可以接近太阳光^[55]。通过不同的玻璃组合,可以模拟不同波段处的光照辐射^[60]。对于硅橡胶的人工加速紫外老化试验,通常

将氙灯发出的紫外光线控制在 340 nm 附近, 对于实际的老化试验箱, 通常在其中加入一个装有过滤器的紫外线传感器, 只能通过 340 nm 附近的狭窄波段。氙灯的特点是灯管长时间使用之后其辐射光谱会发生变化, 石英玻璃微缺陷、电极溅射和灯头绝缘强度等都会影响氙灯的长时间运行稳定性^[61], 需要定期更换才能在试验全程中保持辐照波谱和氙灯输出功率的稳定性。

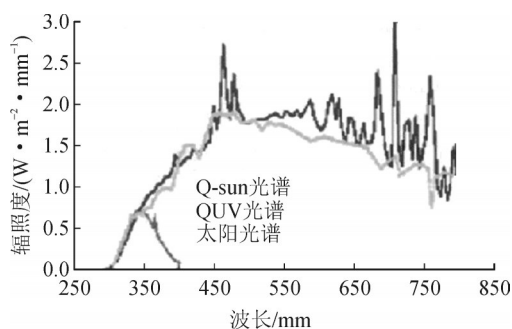


图6 太阳光谱与Q-sun 氙灯光谱和QUV 荧光紫外灯光谱的比较

Fig. 6 Comparison of solar spectrum with Q-sun xenon lamp spectrum and QUV fluorescent UV lamp spectrum

3.1.2 荧光紫外灯

荧光紫外灯通过汞蒸气激发跃迁放出紫外光线, 其主要作用是模拟下雨、凝露以及太阳光照射中的紫外光, 其模拟的环境条件通常包括紫外照射、雨淋、凝露、高温以及昼夜交替等自然环境条件^[62]。通常来说, 荧光紫外老化试验模拟效果比较差, 但是其加速效果十分显著, 在较短的时间内就可以对材料的长期耐老化性能进行测试。对于硅橡胶材料, 其在几个月内造成的破坏效果和室外条件下几年造成的损害相当^[63]。紫外线光源可以分为长波紫外线光源以及短波紫外线光源两种^[60]。长波紫外线灯可以测量大部分材料在太阳光下的耐紫外性能, UVA 灯光谱波长较长, 接近于户外的太阳光照射, 常用的光源有 UVA-340 光源以及 UVA-351 光源。UVA-340 光源在 295~365 nm 波段最接近太阳光照, UVA-351 光源模拟经过窗户玻璃过滤之后的太阳光照, 对于室内应用的材料具有较好的模拟性能, 不同类型荧光紫外灯的光谱和与太阳光的对比见图 7^[60]。短波紫外光源则包括 280~400 nm 的紫外线, 其中 280~295 nm 的紫外线部分能量较强, 穿透力较弱, 太阳光中这一部分光谱的光线会被臭氧层吸收, 难以到达地球表面。对于人工加速紫外老化试验而言, 短波段的紫外光能量强, 容易使高分子材料发生老化, 这会导致短波段的紫外光老化测试结果并不准确。太阳光紫外线中还有一小部分位

于 320~400 nm 的紫外线, 其穿透力比 UVC 更强, 能够到达地球表面, 而且能量也比较高, 在紫外老化试验时应当考虑太阳光中 UVB 对材料的影响。当前, 普遍将荧光紫外老化与冷凝喷水等试验结合进行加速老化, 可以在光照、冷凝以及喷水等操作模式进行切换, 用来模拟自然界的不同气候条件。通过调整光照强度来模拟不同气候下的太阳光状态(如阴天、晴天等), 冷凝功能是为了试验夜间以及清晨时样品表面的露水状况, 喷水功能则用于模拟雨天下样品的状态。由于使用时间的增加, 荧光紫外灯管会发生老化, 其紫外光输出会发生衰减, 但是由于荧光紫外灯的光谱非常稳定, 能量分布在长时间使用前后基本保持一致, 因此只需要依靠调节灯功率就可以很好地补偿灯管老化带来的光强损失。

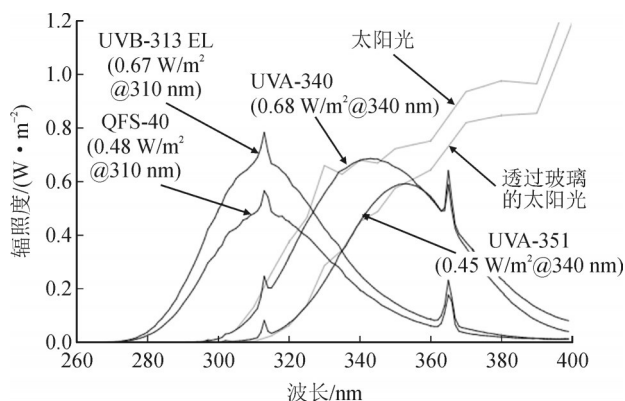


图7 荧光紫外灯光谱与正午太阳光谱比较

Fig. 7 Comparison of solar spectrum with fluorescence UV lamp spectrum

荧光紫外灯管和氙灯的主要差异体现在辐射的热量以及引发的光化学反应上。氙灯发出的是覆盖整个光谱范围的光线, 包括高能量的红外线, 这种光源的热辐射范围也和方向有关, 随着光束传播的距离增加而逐渐减弱, 光照射的方向也会影响其热效应, 同时样品颜色状态以及表面质地也会改变热效应的表现。至于光化学效应, 两种灯的紫外线部分都能够显著破坏材料成分, 导致材料长时间运行中发生化学老化。

3.1.3 高压汞灯

高压汞灯利用高压汞蒸气的电离激发来产生光线, 照射光谱主要集中在蓝区和绿区, 并伴随有强烈的紫外辐射, 效率高、寿命长, 是一种重要的照明光源^[64]。高压汞灯功率大, 在紫外波长区域照射强度集中, 模拟紫外光效果好, 利用高压汞灯进行人工加速紫外老化效果更显著。但是高压汞灯也有启动电压大, 温度高, 内壁蒸气压力大等缺点, 这些因素不利于高压汞灯模拟紫外环境的长时间运

行,温度较高也会影响硅橡胶老化的速度,不利于研究分析紫外老化过程。

3.1.4 日光碳弧灯

日光碳弧灯,也被称为开放式碳弧灯,它在两根相邻碳棒之间通过电流产生电弧来发光,旨在模拟太阳光的辐射光谱,早期曾大量被用于需要高亮度以及模拟日光的场合^[65]。虽然改进其碳棒成分有助于接近太阳光光谱,但其紫外波段对于太阳光的模拟效果仍不理想,再加上燃烧碳棒污染环境、影响光源输出、维护不便等特性,日光碳弧灯已经逐渐被其他光源取代。

3.1.5 金属卤素灯

金属卤素灯利用电弧放电引发金属卤化物跃迁产生光线,包括电弧管、电极、金属卤化物、密封外壳、镇流器等部件。金属卤素灯发光效率高、发光接近自然光颜色,色温范围广,能够模拟全波段的太阳辐射,在红外线区域效果尤为出色^[66]。然而,由于红外线波段照射强度高,金属卤素灯在应用于硅橡胶紫外老化时需要特别注意控制硅橡胶材料表面的温度,温度过高会促进硅橡胶的老化,影响实验结果。金属卤素灯启动时间长、内部含汞等重金属,长时间使用色温漂移等缺点也限制了它的应用。

3.2 运行方式

目前硅橡胶紫外老化运行方式主要有3种:硅橡胶样品的直接紫外老化、水—热—紫外联合老化以及全因素耦合老化,分别用来模拟室外太阳光直射环境、复合绝缘子挂网自然环境以及运行工况下的复杂环境。

3.2.1 直接紫外老化

硅橡胶的直接紫外老化试验主要是在紫外老化试验箱中直接照射硅橡胶进行紫外老化。傅佳^[14]利用准分子激光器发出248 nm激光对硅橡胶进行4 500次脉冲照射,使其表面出现孔洞,内部填充物外露。Joneidi I A^[20]等人将硅橡胶置于9支UVC荧光紫外灯下照射65天,增强了紫外光的能量,加强了硅橡胶的老化效果。林荧^[17]等人用氙灯紫外老化箱对LSR进行了1 000 h紫外光加速老化实验,氙灯光线经过石英玻璃以及普通玻璃过滤,阻挡了300 nm以下的紫外光照射,同时配备了风扇加强老化箱内部空气流动,利用辐照计实时监控氙灯辐射度,一旦低于预设值则更换氙灯灯管,确保氙灯辐照满足实验要求。紫外老化箱光源、样品布置方式以及长时间运行性能对于试验结果影响显著,各因素之间相互影响,导致不同的紫外老化试验结果难以进行横向比较,试验特殊性较高。

3.2.2 水—热—紫外联合老化

在硅橡胶紫外老化的影响因素中,温湿度以及紫外光波长与强度是最重要的影响因素,也最为符合硅橡胶挂网运行所处的自然环境变化,紫外老化箱见图8。



图8 水—热—紫外联合老化试验箱

Fig. 8 Water-heat-ultraviolet combined aging test chamber

目前硅橡胶紫外老化大多根据GB/T 16422.2—2022塑料实验室光源暴露试验方法^[67]进行,该方法规定了老化过程中的水、热、紫外光变化,具有一定的参考价值。首先需要选择光源,以UVA-340荧光紫外灯为例,其光谱辐照度在320~360 nm区间内需要大于60.9%,在290~400 nm区间内需要大于93.3%,实验过程中还需要定期使用辐照仪控制辐照剂量;其次需要设置一定的暴露循环模拟昼夜变化,光周期时打开紫外灯,提高黑板温度,控制光源辐照度,关闭喷淋和凝露系统,暗周期时关闭紫外灯,降低黑板温度,打开喷淋和凝露系统,如此循环直至老化时间满足要求。

3.2.3 全因素耦合老化

在复合绝缘子的实际运行环境中,硅橡胶伞套需要面临包括电、光、热、污秽以及机械应力等多种复杂老化条件的同时作用,因此有必要考察紫外老化在综合环境因素下对于硅橡胶老化的影响。Kumagai S^[68]研究了紫外辐照、电晕、高温以及污秽作用下1 000 h以上硅橡胶的憎水迁移性,结果发现紫外和高温综合作用降低了硅橡胶的憎水性,减少了硅橡胶内部小分子的流动,去除紫外辐射后憎水性恢复也极为有限,而在电晕老化的副产物低分子有机硅化合物则有助于提高硅橡胶的憎水性。梁曦东^[69]等人在IEC 5 000 h老化试验的基础上加入了硅藻土污秽并根据中国的实际情况对试验安排进行了调整,其试验因素包括高电压、降雨、高相对湿度、高温、污秽以及模拟太阳辐照,可用于评价复合绝缘子长期运行的可靠性。Hirano Y^[70]对高温硫化硅橡胶进行了加速耐候试验,采用阳光碳弧灯进行

紫外模拟, 结果发现力学性能初期下降明显, 后期变化不大, 硅橡胶内部的小分子下降了约50%, 而一定程度的污秽有助于屏蔽紫外线, 0.49 mg/cm^2 的固体污秽层可以减少约24%的紫外线照射。硅橡胶老化目前的研究方法主要是制作硅橡胶试样, 对硅橡胶进行人工加速紫外老化试验, 并与没有经过老化试验的硅橡胶试片进行对比, 分析紫外老化前后各类指标变化, 通过其性能变化反应老化程度, 从多角度入手寻找能够表征硅橡胶紫外老化的特征参数, 利用各种分析手段对硅橡胶紫外老化机理进行研究, 研究紫外线对硅橡胶的作用方式, 对不同老化阶段的硅橡胶进行测试判断紫外线对硅橡胶的老化程度。然而, 当前硅橡胶复合绝缘子紫外老化方法也存在一定的缺陷: 研究硅橡胶紫外老化以样片为主, 缺乏对于整支复合绝缘子紫外老化的研究; 紫外老化灯源单一, 可以选择将不同的紫外老化灯源相结合以提高对自然光源的接近程度, 研究硅橡胶在复杂光环境下的性能变化。

4 总结与展望

高海拔地区强紫外条件会破坏复合绝缘子硅橡胶外护套的分子结构, 影响其电气性能、机械性能以及材料性能, 降低整体绝缘特性, 研究复合绝缘子紫外老化特性具有重要意义。文中分析了复合绝缘子老化的影响机理, 总结了自然环境老化、单因素老化以及多因素老化下复合绝缘子的性能变化, 归纳了目前常用的提高硅橡胶抗紫外性能的方法, 分析了当前研究内容的不足并指出了进一步的研究方向, 同时比较了目前多种人工加速紫外老化试验方法的优势与不足。总结与展望如下:

1) 复合绝缘子硅橡胶紫外老化特性总体可以从其外观形貌、拉伸性能、憎水性、材料结构、电学特性等角度出发进行评价, 不同的评价指标在一定程度上均可以反映复合绝缘子硅橡胶的紫外老化程度。大多数研究都通过比较紫外老化前后硅橡胶的性能变化判断紫外光的影响, 各项分析联系性不强, 没有建立硅橡胶微观结构、宏观性能、紫外老化机理三者之间严谨的影响关系。今后可以更加深入地研究硅橡胶中间反应过程的机理, 通过更深入的测试分析揭示紫外光影响硅橡胶微观结构, 进而影响宏观性能的过程。

2) 复合绝缘子硅橡胶抗紫外性能提升一般通过向材料中添加光稳定剂实现, 光稳定剂能够屏蔽或是吸收紫外线的能量, 抑或是猝灭被紫外线激发的

分子或基团的激发态, 使其恢复到基态, 最终抑制其光化学反应, 提高抗紫外老化性能。目前绝大多数研究都局限于分析紫外填料本身的抗紫外老化效果, 抗紫外老化填料和硅橡胶的协同效应尚不明确。因此, 后续可以分析硅橡胶和填料的抗紫外老化协同效应, 也可以研究针对抗紫外老化填料分散于硅橡胶中的制备工艺。

3) 复合绝缘子人工加速紫外老化方法大致原理为通过调整紫外辐射光源, 配合模拟不同的湿热电环境来最终实现人工加速老化。但现有人工加速紫外老化方法都没有明确老化参数与实际老化条件的对应关系, 只有简单的辐射总量等效对应, 因此从实际老化过程出发, 寻找出最能够模拟硅橡胶实际运行过程的紫外老化方法, 建立硅橡胶的紫外老化标准化方法, 也可以作为日后研究发展的一个方向。

参考文献:

- [1] 关志成, 彭功茂, 王黎明, 等. 复合绝缘子的应用及关键技术研究[J]. 高压技术, 2011, 37(3): 513-519.
Guan Zhicheng, Peng Gongmao, Wang Liming, et al. Application and key technical study of composite insulators[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 513-519.
- [2] 晏年平, 房子祎, 万 华, 等. 高温硫化硅橡胶老化状况及表征技术研究进展[J]. 绝缘材料, 2017, 50(12): 1-9.
Yan Nianping, Fang Ziyi, Wan Hua, et al. Research progress in ageing condition and characterization technology of high temperature vulcanized silicone rubber[J]. Insulating Materials, 2017, 50(12): 1-9.
- [3] 江鸿蛟, 廖森林, 周 超, 等. 界面发热复合绝缘子内外温度的映射关系[J]. 电工技术学报, 2026, 41(11): 3829-3838.
Jiang Hongjiao, Liao Senlin, Zhou Chao, et al. The mapping relationship between internal temperature and external temperature of composite insulator with core rod and sheath interface heating[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(11): 3829-3838.
- [4] 张育铭, 耿江海, 侯思祖, 等. 复合绝缘子护套和芯棒交界面绝缘失效机制研究[J]. 电工技术学报, 2026, 41(5): 1738-1752.
Zhang Yuming, Geng Jianghai, Hou Sizuo, et al. Research on the insulation failure mechanism at the interface between sheath and core rod of composite insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2026, 41(5): 1738-1752.
- [5] 周立玮, 叶昊亮, 李 特, 等. 可见光干扰下复合绝缘子红外测试温度分布特征研究[J]. 智慧电力, 2025, 53(1): 31-37.
Zhou Liwei, Ye Haoliang, Li Te, et al. Temperature distribution characteristics of composite insulator infrared test under visible light interference[J]. Smart Power, 2025, 53(1): 31-37.
- [6] Reynders J P, Jandrell I R, Reynders S M. Review of aging and recovery of silicone rubber insulation for outdoor use[J]. IEEE

- Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 620-631.
- [7] 刘泽洪. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 1-7.
Liu Zehong. Present situation and prospects of applying composite insulators to UHF transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 1-7.
- [8] 夏令志, 程 洋, 牛 雷, 等. 交流特高压酥朽复合绝缘子异常发热特性及成因分析[J]. 电测与仪表, 2026, 63(5): 68-78.
Xia Lingzhi, Cheng Yang, Niu Lei, et al. Analysis on abnormal heating characteristics and causes of AC UHV decay-like composite insulator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2026, 63(5): 68-78.
- [9] 沈 瑶, 刘兴杰, 梁 英, 等. 基于硅橡胶分子链陷阱变化的复合绝缘子老化现象[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5545-5554.
Shen Yao, Liu Xingjie, Liang Ying, et al. Aging phenomenon of composite insulators based on chemical traps' change of silicone rubber molecular chain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5545-5554.
- [10] 缪 金, 秦 军, 陈峻宇, 等. 基于高光谱成像的复合绝缘子表面污秽成分识别方法[J]. 浙江电力, 2025, 44(1): 124-132.
MIAO Jin, QIN Jun, CHEN Junyu, et al. A method for identifying surface contamination components of composite insulators based on hyperspectral imaging[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(1): 124-132.
- [11] 祝青林, 于贵瑞, 蔡 福, 等. 中国紫外辐射的空间分布特征[J]. 资源科学, 2005, 27(1): 108-113.
Zhu Qinglin, Yu Guirui, Cai Fu, et al. Spatialization research on ultraviolet radiation in China[J]. Resources Science, 2005, 27(1): 108-113.
- [12] 刘丁华. 高海拔环境紫外辐射对硅橡胶材料性能的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
Liu Dinghua. Effect of UV radiation on performance of silicone rubber material at high altitude[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [13] 陈晓春, 郑敏聪, 李建华. 合成绝缘子硅橡胶伞群材料的老化特性及其红外光谱研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(s1): 57-62.
Chen Xiaochun, Zheng Mincong, Li Jianhua. Aging characteristics of silicone rubber composite insulator sheds studied by infrared spectroscopy[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(s1): 57-62.
- [14] 傅 佳, 覃永雄, 王 勇, 等. 248 nm 紫外激光照射高温硫化硅橡胶实验及老化机理探讨[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 277-282.
Fu Jia, Qin Yongxiong, Wang Yong, et al. 248 nm ultraviolet laser radiation experiment of high temperature vulcanized silicone rubber and its accelerated ageing mechanism[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 277-282.
- [15] Huh C S, Youn B H, Lee S Y. Degradation in silicone rubber used for outdoor insulator by UV radiation[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2000: 367-370.
- [16] Farhadinejad Z, Ehsani M, Ahmadi-joneidi I, et al. Effects of UVC radiation on thermal, electrical and morphological behavior of silicone rubber insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1740-1749.
- [17] Lin Ying, Yin Fanghui, Liu Yuhang, et al. Effect of ultraviolet a radiation on surface structure, thermal, and mechanical and electrical properties of liquid silicone rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136(24): 47652.
- [18] 祁 黎, 颜景莲, 欧阳旭丹, 等. 复合绝缘子硅橡胶材料老化试验研究[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 91-94.
Qi Li, Yan Jinglian, Ouyang Xudan, et al. Research on ageing test of silicone rubber material for composite insulators[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 91-94.
- [19] 刘 俊. 典型气候条件下复合绝缘子的老化特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
Liu Jun. Research on aging characteristics of composite insulators under typical climate conditions[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [20] Joneidi I A, Jadidian J, Karimpour R, et al. Effects of ultraviolet radiation and artificial pollution on the leakage current of silicon rubber insulators[C]//2011 Electrical Insulation Conference, 2011: 304-308.
- [21] Jin Fubao, Zhou Yuanxiang, Liang Bin, et al. Effect of UV radiation aging on creepage discharge characteristics of high temperature vulcanized silicon rubber at high altitude[J]. Plasma Science and Technology, 2019, 21(5): 054003.
- [22] Yoshimura N, Kumagai S, Nishimura S. Electrical and environmental aging of silicone rubber used in outdoor insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 632-650.
- [23] 孙文健, 李亚伟, 刘轩东, 等. 高海拔地区紫外线辐射对复合绝缘子表面憎水性的影响机制[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 996-1000.
Sun Wenjian, Li Yawei, Liu Xuandong, et al. Influence mechanism of UV on surface hydrophobicity of composite insulators in high altitude areas[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 996-1000.
- [24] 邱志贤. 高压复合绝缘子及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
Qiu Zhixian. High-voltage composite insulators and their applications[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [25] 王绍武. 污秽地区有机外绝缘特性的研究[D]. 北京: 清华大学, 2001.
Wang Shaowu. Polymeric outdoor insulation in polluted environment[D]. Beijing: Tsinghua University, 2001.
- [26] 张 瑾. 耐高温硅橡胶的制备及其性能研究[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2019.
Zhang Jin. Study on preparation and properties of hightemperature-resistant silicone rubber[D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2019.
- [27] 李 昂. 橡胶的老化现象及其老化机理[J]. 特种橡胶制品, 2009, 30(5): 56-67.
Li Ang. Study on rubber aging and its mechanism[J]. Special Purpose Rubber Products, 2009, 30(5): 56-67.
- [28] Lee S. Physical aging in amorphous polymers and other materials [M]. Amsterdam: Elsevier, 1978.

- [29] 吴 兑. 太阳紫外线辐射及其生物效应[J]. 气象, 2001, 27(4): 54-57.
Wu Dui. Surface sunny ultraviolet radiation and biology effect[J]. Meteorological Monthly, 2001, 27(4): 54-57.
- [30] 覃永雄. 特高压输电用HTV硅橡胶紫外照射特性和老化机制研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
Qin Yongxiong. Research on the UV irradiation characteristics and aging mechanisms of HTV silicone rubber used in UHV transmission[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [31] 李国芳. 紫外老化对高温硫化硅橡胶力学和电气性能影响的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
Li Guofang. Research on the impact of UV aging on the mechanical and electrical properties of high-temperature vulcanized silicone rubber[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
- [32] 李国芳, 虞 澜, 覃永雄, 等. 复合绝缘子高温硫化硅橡胶紫外辐射研究[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2015, 33(4): 18-25.
Li Guofang, Yu Lan, Qin Yongxiong, et al. Study on UV radiation on high temperature vulcanization silicone rubber composite insulators[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, 2015, 33(4): 18-25.
- [33] 刘云鹏, 王秋莎, 律方成, 等. 紫外辐射对高温硫化硅橡胶性能影响初探[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2634-2638.
Liu Yunpeng, Wang Qiusha, Lyu Fangcheng, et al. Influence of UV radiation on HTV silicon rubber performance[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2634-2638.
- [34] Hackam R. Outdoor HV composite polymeric insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(5): 557-585.
- [35] 王锦旗, 宋玉芝, 郑建伟, 等. 紫外辐射时空变化规律研究进展[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(28): 11919-11926.
Wang Jinqi, Song Yuzhi, Zheng Jianwei, et al. Advances in temporal and spatial variation of ultraviolet radiation[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(28): 11919-11926.
- [36] Li Yuanyuan, Feng Jianlin, Wu Shaopeng, et al. Review of ultraviolet ageing mechanisms and anti-ageing methods for asphalt binders[J]. Journal of Road Engineering, 2022, 2(2): 137-155.
- [37] 徐艳玲. 强紫外—大温差耦合作用下沥青老化机理及流变行为研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
Xu Yanling. Research on asphalt aging mechanism and rheological behavior under the combined effects of intense UV radiation and large temperature variations[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024.
- [38] 王 辉, 丁 磊, 任 冶. 沥青紫外光室内外老化时间等效换算研究[J]. 公路与汽运, 2020(1): 52-54.
Wang Hui, Ding Lei, Ren Ye. Research on the equivalent conversion of indoor and outdoor UV aging time for asphalt[J]. Highways & Automotive Applications, 2020(1): 52-54.
- [39] 王佳妮. 模拟紫外环境下沥青流变行为及老化机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
Wang Jiani. Study on aging mechanism and rheologic behavior of asphalt under simulate ultraviolet environment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008.
- [40] 崔宇阳. 藏区沥青紫外老化行为与抗老化研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
Cui Yuyang. Study on ultraviolet aging behavior and antiaging of asphalt in tibetan area[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [41] 徐思奕, 曹 丹, 周 城, 等. 硅橡胶基阻燃输电绝缘子的老化及寿命预测[J]. 绝缘材料, 2021, 54(5): 66-71.
Xu Siyi, Cao Dan, Zhou Cheng, et al. Ageing and life prediction of silicone rubber-based flame-retardant transmission insulators[J]. Insulating Materials, 2021, 54(5): 66-71.
- [42] Moghadam S S, Khiabani M. Lifetime prediction of HV silicone rubber insulators based on mechanical tests after thermal ageing[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(3): 711-716.
- [43] 柳 荣, 尹文华, 吴惠琴, 等. 飞机用硅橡胶材料加速老化试验及寿命评估研究[J]. 合成材料老化与应用, 2018, 47(5): 1-3.
Liu Rong, Yin Wenhua, Wu Huiqin, et al. Accelerated aging test and life prediction of silicone rubber materials for aircraft[J]. Synthetic Materials Aging and Application, 2018, 47(5): 1-3.
- [44] Krishnan P S, Salián A, Dutta S, et al. A roadmap to UV-protective natural resources: classification, characteristics, and applications[J]. Materials Chemistry Frontiers, 2021, 5(21): 7696-7723.
- [45] Woessner G, Goeller G, Rieker J, et al. Ultraviolet stabilizers of the 2-hydroxyphenylbenzotriazole class-influence of the solvent on the absorption spectra and photochemical deactivation mechanism[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1985, 89(17): 3629-3636.
- [46] Huang Yanran, Law J C F, Lam T K, et al. Risks of organic UV filters: a review of environmental and human health concern studies[J]. Science of the Total Environment, 2021(755): 142486.
- [47] Carve M, Nugegoda D, Allinson G, et al. A systematic review and ecological risk assessment for organic ultraviolet filters in aquatic environments[J]. Environmental Pollution, 2021(268): 115894.
- [48] 吴茂英. 聚合物光老化、光稳定机理与光稳定剂(下)[J]. 高分子通报, 2006(6): 89-97.
Wu Maoying. Photo-aging and photostabilization of polymers and light stabilizers(II)[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2006(6): 89-97.
- [49] Cempel M, Nikel G. Nickel: a review of its sources and environmental toxicology[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2006, 15(3): 375-382.
- [50] 姚沅航, 王孝鹏, 陈 杰. 受阻胺光稳定剂稳定机理和应用[J]. 塑料科技, 2023, 51(6): 101-106.
Yao Fenghang, Wang Xiaopeng, Chen Jie. Stability mechanism and application of hindered amine light stabilizer[J]. Plastics Science and Technology, 2023, 51(6): 101-106.
- [51] 白福臣, 程凤梅, 叶永成, 等. 受阻胺类光稳定剂的研究进展[J]. 塑料科技, 2002(4): 20-24.
Bai Fuchen, Cheng Fengmei, Ye Yongcheng, et al. Research advance of hindered amine light stabilizer[J]. Plastics Science and Technology, 2002(4): 20-24.
- [52] Zhang Hui, Yang Hao, Shentu Baoqing, et al. Effect of titanium dioxide on the UV-C ageing behavior of silicone rubber[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2018, 135(14): 46099.

- [53] 李麟,隋意,韩建锋,等. 纳米CeO₂对室温硫化硅橡胶涂料抗老化性能的影响[J]. 稀土, 2020, 41(1): 70-77.
Li Lin, Sui Yi, Han Jianfeng, et al. Effect of Nano-CeO₂ on ageing resistant of room-temperature vulcanization silicone rubber coating [J]. Chinese Rare Earths, 2020, 41(1): 70-77.
- [54] 骆守康. 室温硫化硅橡胶抗紫外及超疏水改性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
Luo Shoukang. Research on UV resistance of room temperature vulcanized silicone rubber and its superhydrophobic surface[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [55] Tawfik M, Tonnellier X, Sansom C. Light source selection for a solar simulator for thermal applications: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018(90): 802-813.
- [56] Van B W. Encyclopedia of color science and technology[M]. Berlin: Springer, 2021.
- [57] Boettner E A, Miedler L J. Simulating the solar spectrum with a filtered high-pressure xenon lamp[J]. Applied Optics, 1963, 2(1): 105-110.
- [58] Searle N Z, Giesecke P, Kinmonth R, et al. Ultraviolet spectral distributions and aging characteristics of xenon arcs and filters[J]. Applied Optics, 1964, 3(8): 923-927.
- [59] 严宁波,梁启彬,何利蓉,等. 荧光紫外灯与氙灯光老化试验的对比和分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2019, 37(5): 39-43.
Yan Ningbo, Liang Qibin, He Lirong, et al. Comparison and analysis of fluorescent UV lamp and xenon lamp aging test[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2019, 37(5): 39-43.
- [60] 颜景莲. 高分子材料实验室老化试验技术详解[J]. 电子世界, 2013(4): 107-108.
Yan Jinglian. Detailed explanation of laboratory aging test techniques for polymer materials[J]. Electronics World, 2013(4): 107-108.
- [61] 马永波,彭述明,龙兴贵,等. 影响高功率脉冲氙灯寿命的因素[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2483-2486.
Ma Yongbo, Peng Shuming, Long Xinggui, et al. Influencing factors of life of high power linear xenon-filled flash lamp[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(10): 2483-2486.
- [62] Wang Wujun, Laumert B. Simulate a "sun" for solar research: a literature review of solar simulator technology[R]. 2014-09-12.
- [63] 李敬敬,张辉辉,李国芳,等. 紫外辐照高温硫化硅橡胶的红外光谱分析和老化机理[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(4): 1063-1070.
Li Jingjing, Zhang Huihui, Li Guofang, et al. Aging mechanism analysis of high temperature vulcanization silicone rubber irradiated by ultraviolet radiation based on infrared spectra[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(4): 1063-1070.
- [64] 陈大华. 高压汞灯原理特性和应用[J]. 灯与照明, 2002, 26(5): 13-15.
Chen Dahua. The features and application of high pressure mercury vapour lamp[J]. Light & Lighting, 2002, 26(5): 13-15.
- [65] 王春川. 人工加速光老化试验方法综述[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009, 27(1): 65-69.
Wang Chunchuan. Overview of artificial accelerated light aging test methods[J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2009, 27(1): 65-69.
- [66] 姜青松,王海波,朱月华. 金属卤化物灯及其发光材料的研究进展[J]. 中国照明电器, 2013(10): 1-5.
Jiang Qingsong, Wang Haibo, Zhu Yuehua. Status and development on metal halide lamps and luminous materials[J]. China Light & Lighting, 2013(10): 1-5.
- [67] GB/T 16422. 2—2022 塑料实验室光源暴露试验方法—第2部分: 氙弧灯[S].
GB/T 16422. 2—2022 Plastics-methods of exposure to laboratory light sources—Part 2: xenon-arc lamps[S].
- [68] Kumagai S, Yoshimura N. Hydrophobic transfer of RTV silicone rubber aged in single and multiple environmental stresses and the behavior of LMW silicone fluid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(2): 506-516.
- [69] 梁曦东,张轶博,殷禹,等. 复合绝缘子的5 000 h多因素试验及长期性能评价[J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2492-2498.
Liang Xidong, Zhang Yibo, Yin Yu, et al. 5 000 h multi-stress test procedure for silicone rubber composite insulators and its applications in long-term performance evaluation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2492-2498.
- [70] Hirano Y, Inohara T, Toyoda M, et al. Accelerated weatherability of shed materials for composite insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(1): 97-103.

梅红伟(1979—),男,博士,副教授,主要研究方向为高电压与绝缘技术、输变电设备状态检测与评估技术(通信作者)(E-mail: meihongwei@sz.tsinghua.edu.cn)。