

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.02.015

矿用典型绝缘材料击穿特性及寿命模型的研究

李艳文^{1,2}, 李媛媛^{1,2}, 田慕琴^{1,2}, 雷志鹏^{1,2}, 宋建成^{1,2}, 曾君湘^{1,2}

(1. 太原理工大学煤矿电气设备与智能控制山西重点实验室, 太原 030024;

2. 太原理工大学矿用智能电器技术国家地方联合工程实验室, 太原 030024)

摘要: 矿用高压电气设备的绝缘部分在实际运行过程中, 往往同时经受电、热、机械和环境等因子的联合作用。这些因子将引起绝缘老化, 最终导致绝缘损坏。针对这一问题, 首先选取矿用高压电气设备常用的3种绝缘材料电缆用乙丙橡胶、浇注式干式变压器用环氧树脂和电机槽绝缘用DMD(dacron mylar dacron)绝缘纸为研究对象, 试验中测量了3种绝缘材料的击穿特性, 基于Weibull分布分析并得到了描述3种绝缘材料击穿特性的形状参数和尺度参数。利用电老化反幂函数寿命模型, 得到3种绝缘材料的耐电压寿命指数。最后结合聚合物分子的致密性、分子结构对3种绝缘材料的击穿机理进行了分析。研究的内容对于矿用电气设备的绝缘结构设计以及剩余寿命评估均具有实际指导意义。

关键词: 矿用绝缘材料; 击穿特性; Weibull分布; 电老化寿命模型; 击穿机理

Study on Breakdown Characteristic and Life Model of Typical Insulation Materials Used in Coal Mine

LI Yanwen^{1,2}, LI Yuanyuan^{1,2}, TIAN Muqin^{1,2}, LEI Zhipeng^{1,2},
SONG Jiancheng^{1,2}, ZENG Junxiang^{1,2}

(1. Shanxi Key Laboratory of Mining Electrical Equipment and Intelligent Control, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. National & Provincial Joint Engineering Laboratory of Mining Intelligent Electrical Apparatus Technology Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Due to the electrical, thermal and mechanical stresses as well as environment, the insulation of high-voltage electrical apparatus in coal mine suffers from aging, which can lead to insulation degradation and premature failure. According to the problem mentioned above, three typical insulation materials have been selected, including ethylene propylene rubber(EPR), Epoxy resin and dacron mylar dacron(DMD) insulation paper. Their breakdown characteristics also have been measured. Then, based on the Weibull distribution, shape parameter and scale parameter have been analyzed. The voltage life indexes of three insulation materials have been calculated by mean of electrical life model. Finally, combined with the density of polymer molecules and molecular structure, the breakdown mechanisms of three kinds of insulation materials are analyzed. The research on the breakdown characteristics and life model of typical insulation materials used in high-voltage electrical apparatus of coal mine is of significant meaning to design the insulation structure and estimate the residual life.

Key words: insulation materials used in coal mine; breakdown characteristics; Weibull distribution; electric aging life model; breakdown mechanism

收稿日期:2018-08-15; 修回日期:2018-10-10

基金项目:国家自然科学基金(51577123,51377113);山西省研究生创新基金项目(800104-02100746)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51577123,51377113),Graduate Students Innovation Foundation of Shanxi Province(800104-02100746).

0 引言

现代化煤矿已经大范围使用 10 kV 电气设备, 这些电气设备运行正常与否对煤矿安全生产有着直接的影响。煤矿井下环境特殊, 电气设备连续运行的同时往往受到电、热、机械和环境多因子的共同作用, 使其绝缘加速老化, 导致绝缘水平下降, 使用寿命缩短。据多年来有关数据统计, 电气设备的多数故障是由绝缘的劣化损坏引起的^[1-2]。此外, 由于受能源结构优化调整以及新能源大力发展的制约, 同时煤炭资源配置机制缺陷等问题依然存在, 使得近年来我国煤炭行业发展处于低潮期, 电气设备的更新换代减慢, 导致设备的使用年限增长, 设备的绝缘老化问题加重, 设备的使用寿命受到更严重的挑战。因此, 出于经济性和安全性考虑, 很有必要对电气设备进行绝缘诊断和剩余寿命评估^[3]。而研究电气设备绝缘材料的击穿特性, 并求取耐电压寿命指数可以为电气设备绝缘的诊断和剩余寿命的评估提供理论性依据。

针对电气绝缘材料的击穿特性, 文[4]中利用逐步升压法研究了聚乙烯、聚酰亚胺和聚偏二氟乙烯等有机绝缘材料的电老化寿命, 得到的试验结果与恒定电压法吻合。文[5]针对聚乙烯, 研究了电压波形和升压速率对其击穿特性的影响, 结果发现升压速率越快, 击穿场强越大, 且直流下的击穿场强大于交流下的击穿场强; 文[6]基于 Weibull 概率分布, 采用逐步升压法对变压器油纸绝缘模型的击穿特性进行了研究, 试验结果表明利用逐步升压法求取油纸绝缘模型的电老化寿命时试验数据分散性小; 文[7]对两种不同电力电缆用交联聚乙烯, 分别对未老化和 6 种不同老化状态的试样进行工频击穿试验, 研究其工频击穿特性。可见, 对于绝缘材料击穿特性的研究已有很多, 但是, 针对矿用 10 kV 电气设备中大量使用的其他绝缘材料的击穿特性的研究却相对较少; 而在煤矿井下这种特殊的环境下, 这些绝缘材料易受多种因子(电、热、机械和环境)的联合作用而快速老化进而引发事故, 因此研究这些绝缘材料的击穿特性对于矿用电气设备的安全可靠运行及寿命评估具有重要意义。

文中针对矿用 10 kV 电气设备典型绝缘材料(矿用电缆用乙丙橡胶绝缘、浇注式干式变压器用环氧树脂和电机槽绝缘用 DMD 绝缘纸)使用寿命评估问题, 从绝缘材料击穿特性着手, 采用逐步升压法, 分别试验测量并分析 3 种绝缘材料的工频击穿特性,

基于 Weibull 分布对试验所得数据进行统计分析, 求取每种绝缘材料的耐电压寿命指数并得到它们的反幂函数寿命模型, 最后结合聚合物分子的致密性、分子结构和尺寸对 3 种绝缘材料的击穿机理进行了分析。

1 试验设置

1.1 工频击穿试验

工频击穿试验可以用逐步升压法, 也可以用恒定电压法^[8]。

采用恒定电压法进行击穿试验时, 匀速升高电压至小于绝缘材料击穿电压的某一适当值, 保持电压不变直到试样击穿为止, 记录击穿时间和试验电压值。

采用逐步升压法进行击穿试验时, 每隔时间 T 升高一次电压, 直至试样击穿为止, 记录击穿电压值和时间。逐步升压法基本原理见图 1。利用逐步升压法进行击穿试验是基于固体绝缘失效的累积效应。根据 Nelson 模型, 如果将固体绝缘的击穿看作是施加于介质上不同电压的累积作用的结果, 则认为试样的剩余寿命只取决于当前电压强度及该电压下的击穿概率^[9-10]。

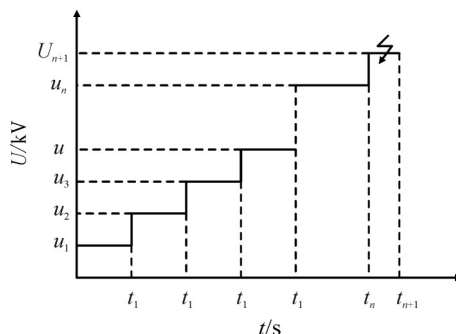


图1 逐步升压法击穿试验示意图

Fig. 1 The step-stress test method

1.2 试样和试验系统

对于电缆用乙丙橡胶, 试验中所用的试样是由满足 GB 7594.8—1987 要求的 DCJ30M 乙丙橡胶胶片通过平板硫化机加热加压硫化制得, 厚度约为 0.2 mm; 对于浇注式干式变压器用环氧树脂, 试样选择市场上常见的耐温等级为 F 级的环氧树脂板, 厚度为 0.2 mm; 对于电机槽绝缘用 DMD 绝缘纸, 试样是从电机厂获得的新的 6641/F 级 DMD 绝缘纸, 厚度为 0.2 mm。试验用的铜制试验电极按 GB 1408.1—2006 设计^[11], 电极表面抛光, 高低压电极均为直径为 25 mm, 高度 25 mm 的圆柱体, 其边缘倒角半径为

(3.0 ± 0.2) mm。3种材料的试样均制备为边长为50 mm的正方形,为了防止发生沿面闪络,试验时将试样浸入硅油中。

工频电压下进行击穿试验的电路图,见图2。高压供电电源为100 kV SF₆气体绝缘工频试验变压器;保护电阻为20 kΩ的水电阻,用以防止试样击穿时较大的过电流损坏变压器;分压器分压比1 000:1,电压表为100 kV的交直流静电电压表,测量精度为 ± 0.1 kV;油杯中盛放硅油,然后将试样和电极一起浸入硅油中,以防止电极边缘的电晕放电对测量结果的影响。

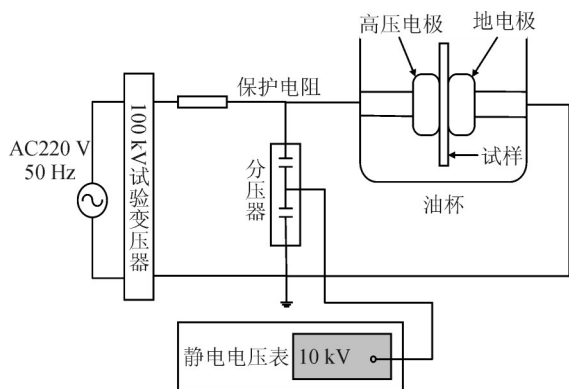


图2 击穿试验电路图

Fig. 2 Schematic diagram of breakdown voltage test

1.3 试验方案

试样预处理:试样在温度为(23 ± 2)℃,相对湿度为(50 ± 5)%条件下处理不少于24 h。对于乙丙橡胶和环氧树脂板先用酒精擦拭试样表面,消除可能存在的表面电荷,再进行预处理。

加压方式:相比于恒定电压法,逐步升压方法不仅降低了试验时电压等级选择的盲目性,而且减小了试验数据的分散性,因此本实验选择逐步升压法进行工频击穿试验。

试验分组:根据每级加压时间不同,每种绝缘材料均分为4组,每组包含9个试样,进行重复试验。4组试样每级历时时间分别为20、40、60和80 s;逐步升压时,升压步长1 kV,升压速度为500 V/s,直到试样击穿,记录击穿电压 U_b 。

2 试验结果和分析讨论

按照文1.3节中的试验方案对3种试样分别进行工频击穿试验,记录每一个试样的击穿电压 U_b 。利用击穿电压除以试样厚度($U_b/d=E$),即可得到击穿场强 E ,将每组试样中的9个击穿场强数据按升序排序用以统计分析。击穿累积概率 F 通过下面的秩函数进行估算。

$$F(i, n) = \frac{i - 0.44}{n + 0.25} \quad (1)$$

式(1)中: n 为击穿的总试样数,把击穿数值从低到高进行排列; i 是试样序号。

绝缘材料的电场强度具有一定的分散性,绝缘击穿实验中常用Weibull分布对试验数据进行分析^[12]。两参数Weibull分布的累积概率分布可表示为

$$F(x) = 1 - \exp[-(x/\alpha)]^b \quad (2)$$

式(2)中: $x(x>0)$ 为随机变量场强 E ; $F(x)$ 为失效数据的累积概率值; b 为形状参数,表征失效数据的分散性, b 越大说明试验数据分散性越小; a 为尺度参数,代表累积概率值为63.2%的 x 值,通常取 a 为试品的平均击穿场强。

为了方便数据的线性拟合,将式(2)两边两次取对数后,令 $Y = \ln[-\ln(1-F)]$, $X = \ln E$,则 Y 和 X 呈线性关系,采用最小二乘法进行线性拟合,得3种绝缘材料击穿场强的Weibull概率分布图,见图3-5(图中 E 单位均为kV/mm)。

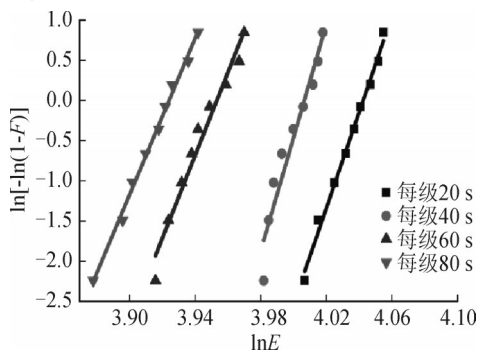


图3 乙丙橡胶试样击穿场强概率分布

Fig. 3 Weibull distribution of EPR

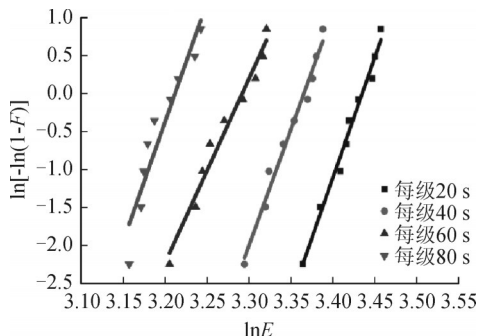


图4 环氧树脂击穿场强概率分布

Fig. 4 Weibull distribution of Epoxy Resin

从图3-5可以看到,每组的数据基本位于拟合直线的两侧,没有偏差太大的点,表明对Weibull分布函数取双对数后的表达式非常适用于击穿数据的处理,另一方面也说明试验得到的数据具有较强的可靠性。对于每一种绝缘材料的四组数据拟合得到的四条直线的斜率不同,说明4组试验的击穿数据的分散性不同,斜率越大,分散性越小。

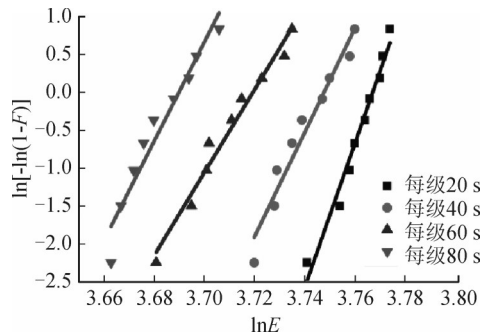


图5 DMD绝缘纸击穿场强概率分布
Fig. 5 WEIBULL distribution of DMD

对乙丙橡胶试样的击穿数据进行分析。如图3所示,4条直线的斜率分别是59.66、70.33、51.58、48.59。比较可知,第2条直线的斜率最大,表现为第3组数据在横轴的跨度最小,即击穿强度的差别最小,为2,因此第3组试样的击穿数据集中,分散性最小;而第4条直线的斜率最小,表现为第2组数据在横轴的跨度最大,即击穿强度的差别最大,为3.15,因此第2组试样的击穿数据分散性最大。造成每组数据分散性不同的原因可能是利用平板硫化机压制试样开模时试样温度突然降低,造成试样收缩,厚度略有差别。

求取每条直线的斜率和截距可得到 Weibull 概率分布参数 α 和 β ^[13-14],见表1-3。

表1 乙丙橡胶击穿 Weibull 分布参数

Table 1 Weibull distribution parameters of EPR				
参数	第1组每 级 20 s	第2组每 级 40 s	第3组每 级 60 s	第4组每 级 80 s
α/kV	57.00	54.98	52.14	50.65
β	59.66	70.33	51.58	48.59

表2 环氧树脂击穿 Weibull 分布参数

Table 2 Weibull distribution parameters of epoxy resin				
参数	第1组每 级 20 s	第2组每 级 40 s	第3组每 级 60 s	第4组每 级 80 s
α/kV	31.04	28.95	26.90	24.84
β	31.69	30.58	24.26	31.45

表3 DMD绝缘纸击穿 Weibull 分布参数

Table 3 Weibull distribution parameters of DMD				
参数	第1组每 级 20 s	第2组每 级 40 s	第3组每 级 60 s	第4组每 级 80 s
α/kV	43.26	42.41	41.24	40.04
β	95.22	68.92	54.85	65.51

Weibull 分布模型的参数 a 代表的是平均击穿场强。可以看出乙丙橡胶的平均击穿强度最大,环氧树脂板的平均击穿场强最小;同时可以看出,对

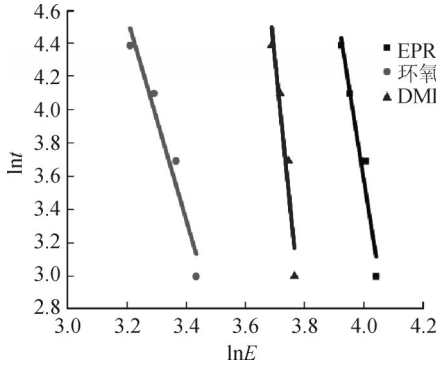
于每一种绝缘材料,平均击穿场强均随着每级电压历时时间的增加而减小,说明了每级电压历时时间选择较为合理。这是因为对于同一种绝缘材料,利用逐级升压法进行击穿试验时,如果选取的每级电压历时时间不同,击穿场强会不同,且击穿场强应随着每级电压历时时间的增加而减小。Weibull 分布模型的 β 值表征的是击穿数据的分散性,且 β 越大说明试样击穿数据分散性越小,从表1-3中数据可知DMD绝缘纸的 β 值最大,环氧树脂板的 b 值最小,说明DMD绝缘纸击穿数据的分散最小,环氧树脂板的击穿数据分散性最大,这可能是由于环氧树脂板材料的均匀性相对较差造成的。

3 寿命模型及击穿机理

3.1 电老化寿命模型曲线

绝缘材料的电老化反幂函数寿命模型 $E^n t = C$ 描述的是寿命 t 和电场强度 E 的关系,其中 n 为耐电压寿命指数,表示了绝缘材料耐受电压的能力。两边取对数后, $\ln E$ 和 $\ln t$ 呈线性关系。

利用每种绝缘材料的4组不同击穿电场强度和击穿时间数据可以得到每种绝缘材料的电老化寿命曲线。在双对数坐标下绘制3种绝缘材料的电老化寿命曲线见图6(图6中: t 单位为s; E 单位为kV/m)。



注: t 单位为s; E 单位为kV/m。

图6 电老化寿命模型
Fig. 6 Electrical aging life model of EPR, epoxy resin and DMD

由图6可得到每种绝缘材料的电老化寿命曲线的斜率,即各自的耐电压寿命指数 n ,分别为11.125、9.043、17.211,此结果与文[15-16]得到的试验结果相比略有差异,这是由于试验环境和方法略有不同引起的,且该结果是基于统计学方法得到的,存在这样的差异也是合理的。这样就可得到3种绝缘材料的电老化反幂函数寿命模型如下。

乙丙橡胶的电老化反幂函数寿命模型为

$$E^{11.125} t = e^{27.494} \tag{3}$$

环氧树脂的电老化反幂函数寿命模型为

$$E^{9.043}t = e^{29.509} \quad (4)$$

DMD绝缘纸的电老化反幂函数寿命模型为

$$E^{17.211}t = e^{46.465} \quad (5)$$

式(3)~(5)中: e 为自然常数; E 是电场强度,单位为kV/mm; t 为寿命时间,单位为s。

利用得到的寿命曲线可以对绝缘材料在一定的场强下的寿命进行粗略的估算。例如:某矿用10 kV(单相对地电压为6 kV)乙丙橡胶电缆,绝缘层厚为3.5 mm,则绝缘层受到的电场强度 E 为1.71 kV/mm。将此电场强度带入式(3),可得到寿命时间 t 为70.73年。相对于电缆的平均寿命为20~30年,此值较大,这是因为本次估算是理想情况下即只受电场的作用时得到的,而实际运行中,电缆绝缘往往还受到热、水分等其他因素的作用。

3.2 击穿机理的分析

固体绝缘材料在制作的过程中,难免会在电介质内部形成各种缺陷,比如:气隙、裂纹,杂质等。这些缺陷处的介电常数要比周围均匀介质的介电常数低,使得电场容易再此集中^[17],另一方面这些缺陷处的击穿强度较低,使得局部放电首先发生在这些缺陷处,长期的局部放电将产生大量的可以自由移动的空间电荷,最后导致绝缘材料的局部损坏和击穿^[18]。

3种绝缘材料的击穿强度具有一定的差异,这是因为聚合物的介电强度与聚合物结构单元的敛集密度、分子结构类型和尺寸有很大的关系^[19]。

该试验所用的环氧树脂和乙丙橡胶同属于三维网状结构,但乙丙橡胶的击穿强度明显大于环氧树脂,这是由于以下两个原因:一方面,乙丙橡胶的分子量(几十万以上)要远大于环氧树脂(几千以下),分子量增加时,聚合物的主链增长,分枝增加,结晶尺寸下降,使得交联链数和结晶数目增多,分子的敛集密度增加。分子的敛集密度与物质的自由体积有关,自由体积可理解为分子排列的不紧密型或空洞。敛集密度增加聚合物内部的缺陷下降,局部放电或击穿就不易发生,因此,相同条件下乙丙橡胶击穿强度大于环氧树脂。另一方面,环氧树脂分子中含有活性极大的环氧基、羟基及醚键等极性基团,而乙丙橡胶主链是由化学性能稳定的饱和烃组成,分子结构没有无极性取代基。而相同空间电荷分布,极性材料对周围介质的极化能量要比非极性材料的极化能量要大得多,因而空间电荷脱陷时释放的能量也要大得多^[20]。因此,环氧树脂要比乙丙橡胶的击穿强度低。

试验用的环氧树脂板是由玻璃纤维布用环氧树脂粘合加温加压制成的。而往往纤维填充的聚合物击穿电场较低。在环氧树脂和玻璃纤维的界面处存在一定的空隙,这些空气成为绝缘弱点。在一定的电场作用下,这些空隙首先发生放电,放电产生的局部高温及气体破坏周围材料;此外放电产生的气体增加了空隙的压力,在电应力和压应力的共同作用下,沿纤维的薄弱方向开裂损坏,形成击穿通道。这也是该试验中环氧树脂板的击穿强度最低的原因^[21]。

DMD绝缘纸是由聚酯纤维和聚酯薄膜粘合而成。聚酯薄膜和聚酯纤维虽然同属于聚酯材料,但由于工艺的不同,聚酯纤维表面更粗糙,属于孔洞性质的材料。这样,当给DMD绝缘纸施加外电压时,大部分电压集中在电容相对较小的纤维上,当电压增大到一定程度时,聚酯纤维由于空隙的存在先击穿,击穿产生的热薄膜温度上升,使薄膜分子结构松弛,进而引发薄膜的击穿^[22]。

4 结论

利用逐步升压法对矿用10 kV电气设备典型绝缘材料乙丙橡胶、环氧树脂和DMD绝缘纸的电击穿特性进行了研究,基于Weibull概率分布对试验数据进行分析,得到了它们的电老化反幂函数寿命模型和电老化耐受指数,最后结合聚合物分子的致密性、分子结构和尺寸对3种绝缘材料的击穿机理进行了分析,主要结论如下:

1)采用逐步升压法进行工频击穿试验,所得试验数据分散性较小,可靠性较高,适用于矿用固体绝缘材料电老化寿命模型的试验分析。

2)对不同材料进行逐级升压试验时,每级电压历时时间需要经过反复摸索才能确定。对于同一种绝缘材料,每组试样的平均击穿场强随着每级电压历时时间的不同而不同,且击穿场强随着每级电压历时时间的增加而减小。

3)基于Weibull概率分布求得乙丙橡胶、环氧树脂和DMD绝缘纸的耐电压寿命指数分别为11.125、9.043和17.211,对于矿用电气设备的绝缘结构设计以及剩余寿命评估均具有实际指导意义。

4)环氧树脂的击穿电压低于乙丙橡胶,这与环氧树脂的分子量低和环氧树脂分子中的极性基团多有关;环氧树脂板的击穿强度最低与填充的玻璃纤维和环氧树脂界面处存在空隙有关;DMD绝缘纸的击穿是由表明粗糙具有空洞性质的聚酯纤维首先放电引起的。

参考文献:

- [1] 张建华, 王贻平, 郭守贤. 高压电气设备绝缘在线监测系统现场校验技术研究[J]. 华东电力, 2009, 37(9):1499-1503.
ZHANG Jianhua, WANG Yiping, GUO Shouxian. Field checking technology for on-line insulation monitoring systems for high voltage electrical equipment[J]. East China Power, 2009, 37(9):1499-1503.
- [2] 张丽然, 楚爱霞. 煤矿企业中电气设备的绝缘在线监测与状态检修[J]. 煤炭技术, 2013, 32(3):58-60.
ZHANG Liran, CHU Aixia. On-line insulation monitoring and state overhaul of coal mining enterprises in electrical equipment[J]. Coal Technology, 2013, 32(3):58-60.
- [3] 王志强, 周长亮, 李文文. 等. 船用丁基橡胶绝缘电缆剩余寿命评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34):189-195.
WANG Zhiqiang, ZHOU Changliang, LI Wenwen. Residual life assessment of butyl rubber insulated cables in ship-board[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34):189-195.
- [4] KHACHEN W, LAGHARI J R. Estimating lifetime of PP, PI and PVDF under artificial void conditions using step-stress test[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(5):1022-1025.
- [5] LAIFAOU A, HERZINE M S, ZEBBOUDJ Y, et al. Breakdown strength measurements on cylindrical polyvinyl chloride sheaths under AC and DC voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2014, 21(5):2267-2273.
- [6] 杨丽君, 廖瑞金, 李 剑, 等. 用逐步升压法和 WEIBULL 参数估计油纸绝缘寿命[J]. 高电压技术, 2004, 30(6):4-6.
YANG Lijun, LIAO Ruijin, LI Jian. Estimating lifetime of oil paper insulation under electrical aging conditions using step-stress[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6):4-6.
- [7] 阎孟昆, 罗俊华, 杨黎明, 等. 抗水树 XLPE 电力电缆的工频击穿特性[J]. 高电压技术, 2009, 35(10):2395-2400.
YAN Mengkun, LUO Junhua, YANG Liming. Power frequency breakdown characteristics of water—tree retardant XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10):2395-2400.
- [8] 曹晓珑, 钟立生. 电气绝缘技术基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
CAO Xiaolong, ZHONG Lisheng. Electrical insulation technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [9] TANG L C. Analysis of step-stress accelerated-life-test data: A new approach[J]. IEEE Transaction on Reliability, 1996, 45(1):69-74.
- [10] LAGHARI J R. A short method of estimating lifetime of polypropylene film using step-stress test[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(6):1180-1182.
- [11] 绝缘材料电气强度试验方法. 第1部分: 工频试验: GB/T 1408.1—2006[S]. 2006.
- [12] 杨 贤, 冯 达, 李 冲, 等. 基于威布尔分布的油纸套管寿命预测模型[J]. 高压电器, 2005, 51(1):103-109.
YANG Xian, FENG Da, LI Chong, et al. Life prediction model for oil-impregnated paper bushing based on weibull distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1):103-109.
- [13] 蒋仁言. Weibull 模型族特性、参数估计和应用[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
JIANG Renyan. Weibull model family characteristics, parameter estimation and application[M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [14] IEEE guide for the statistical analysis of thermal life test data: ANSI/IEEE Std101—1987[S]. 1987.
Electrical Strength of insulating material test methods-Part 1: Test at power frequencies: GB/T 1408.1—2006[S]. 2006.
- [15] 蒋佩南, 钱跃新, 王佳坤, 等. 评定挤塑电缆 n 值的新方法及其验证试验[J]. 电线电缆, 1983(4):26-33.
JIANG Peinan, QIAN yuexin, WANG jiakun, et al. A new method for evaluating the life index of extruded cable[J]. Electric Wire & Cable, 1983(4):26-33.
- [16] 王维政, 李淑文, 郑殿春, 等. 环氧树脂浇注绝缘电老化试验研究[J]. 电工技术杂志, 1994(3):37-39.
WANG Weizheng, LI Shuwen, ZHENG Dianchun, et al. Electrical aging study of epoxy resin casting insulation[J]. Electric Engineering, 1994(3):37-39.
- [17] HUNTER A. An investigation into partial discharge activity within three-phase belted cables[D]. Southampton: University of Southampton, 2013.
- [18] 李 丹, 胡海云. 基于局部放电理论的聚合物电介质击穿动力学理论研究[J]. 物理学报, 2014, 63(11):274-279.
LI Dan, HU Hanyun. Theoretical study on breakdown dynamics of polymer dielectric materials based on partial discharge theory[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(11):274-279.
- [19] 雷清泉. 聚合物电介质的结构与电性能[M]. 哈尔滨: 哈尔滨电工学院, 1981.
LEI Qingquan. Structure and performance of polymer electrolyte[M]. Haerbin: Harbin Electric Institute, 1981.
- [20] 郑飞虎, 张冶文, 肖 春. 聚合物电介质的击穿与空间电荷的关系[J]. 材料科学与工程学报, 2006, 24(2):316-320.
ZHEN Feihu, ZHANG Zhiwen, XIAO chun. The relationship between dielectric breakdown and space charge of polymer[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2006, 24(2):316-320.
- [21] 敖 明, 李中华. 高压固体复合绝缘材料电击穿试验研究[J]. 高电压技术, 1999, 25(1):21-22.
AO Ming, LI Zhonghua. Test of electrical breakdown of HV compound insulation material[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(1):21-22.
- [22] 吴庆海. DMD 复合绝缘材料击穿电压低于所用聚酯薄膜击穿电压的研究[J]. 绝缘材料, 1989, 22(3):30-32.
WU Qin Hai. Research on the lower breakdown voltage of DMD composite insulation than polyester film[J]. Insulating Materials, 1989, 22(3):30-32.

李艳文(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为矿用高压乙丙橡胶电缆多因子老化特性的研究。

雷志鹏(1983—), 男, 讲师, 主要从事高电压电缆故障的状态评估及其局部放电特性分析的研究(通信作者)。