

ICS 29.060.20
CCS K 13

团 体 标 准

T/CEEMA—0601—2026

高压电缆交联聚乙烯绝缘剩余寿命工程评估 技术导则

Technical guidelines for engineering assessment of residual life of
cross-linked polyethylene insulation in high-voltage cables

2026-02-09 发布

2026-02-09 实施

中国电力设备管理协会 发布

目 次

前 言	11
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 电极系统和周围媒质	2
5 试样要求	3
6 电气试验设备	4
7 升压方式	4
8 剩余寿命评估方法	5
9 试验程序	6

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国电力设备管理协会电缆及连接件专业委员会提出。

本文件由中国电力设备管理协会归口。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件主要起草单位：国网天津市电力公司电力科学研究院、国网电力科学研究院有限公司、国网天津市电力公司、天津大学、中国电力科学研究院有限公司、国网福建省电力有限公司电力科学研究院、国网上海市电力公司电力科学研究院、国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院、国网江苏省电力有限公司南京供电分公司、国网江西省电力有限公司电力科学研究院、远东电缆有限公司、远东海缆有限公司、宁波东方电缆股份有限公司、特变电工电气装备集团有限公司、江苏亨通高压海缆有限公司、浙江万马高分子材料集团有限公司、远程电缆股份有限公司。

本文件主要起草人：宋鹏先、高凯、孟峥峥、李忠磊、李季、张翀、杨黎明、朱晓辉、唐庆华、朱智恩、杨泽超、李文鹏、郑钟楠、隽永飞、周瑜晓、杨卓然、卢雨欣、徐静、周锋、王方舒、许茂、江贞星、陈文卿、刘永光、周柏杰、李隆基、蔡凡一、魏占朋、梅文杰、邓天宇、丁旋、李旭、于洋、朱明正。

本文件为首次发布。

高压电缆交联聚乙烯绝缘剩余寿命工程评估技术导则

1 范围

本文件规定了测定电压等级为 66 kV~500 kV 交流电缆的交联聚乙烯绝缘剩余寿命评估的试验方法,包括电极系统和周围媒质、试样要求、电气试验设备、升压方式、剩余寿命评估方法、试验程序。

本文件适用于电压等级为 66 kV~500 kV 交流电缆的交联聚乙烯绝缘剩余寿命评估,其他电压等级的交流电缆交联聚乙烯绝缘剩余寿命评估可参照执行。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 2536 电工流体 变压器和开关用的未使用过的矿物绝缘油

GB/T 1408.1—2016 固体绝缘材料电气强度试验方法 第 1 部分:工频下试验

GB/T 5471 塑料 热固性塑料试样的压塑

GB/T 10580 固体绝缘材料在试验前和试验时采用的标准条件

GB/T 17037.3 塑料 热塑性塑料材料注塑试样的制备 第 3 部分:小方试片

GB/T 21218 电气用未使用过的硅绝缘液体

GB/T 29310 电气绝缘击穿数据统计分析导则

GB/T 34987 威布尔分析

GB/T 41632 绝缘液体 电气用未使用过的合成有机酯

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

电气击穿 electric breakdown

当试样承受电应力或电热联合应力作用时,其绝缘性能严重损失,由此引起试验回路电流促使相应的回路断路器动作。

3.2

击穿时间 breakdown time

在连续升压试验和恒定电压试验中,在规定的试验条件下,试样从承受电压的起始时刻到发生电气击穿整个过程的时间。

3.3

闪络 flashover

在电应力或电热联合应力作用下,试样和电极周围的气体或液体媒质绝缘性能丧失,由此引起

的试验回路电流促使相应的回路断路器动作。

注:出现碳化通道或试样内穿孔,则表明发生击穿,否则为闪络。

3.4

剩余寿命 residual life

在规定的电场强度和温度下,交联聚乙烯电缆绝缘从当前状态到发生永久性绝缘失效的持续时间。

注:对未投运电缆,剩余寿命为理论服役年限;对已投运电缆,剩余寿命为可继续安全运行的年限。

3.5

电缆绝缘卷切机 cable insulation winding and cutting machine

用于从成品电缆绝缘上连续切取同心圆筒状绝缘薄片的专用设备。

注:卷切机通过固定电缆导体中心轴、控制旋转速度和进刀精度,实现绝缘层的高精度螺旋切割,以制备厚度均匀、表面平整的片状试样,满足击穿试验的样品要求。

4 电极系统和周围媒质

4.1 电极系统

4.1.1 通则

4.1.1.1 金属电极宜选用上下两个不等直径或等直径的柱状金属电极,不宜使用球-板电极或球-球电极。

4.1.1.2 金属电极应始终保持表面清洁、光滑和无缺陷。对片状绝缘材料进行试验时,电极装置应垂直于试样表面,且上下两电极平行。

4.1.1.3 金属电极材料可选用经表面抛光处理的钨铜、黄铜或不锈钢。为了在击穿时尽量减小电极损伤,宜采用钨铜电极或不锈钢电极。

4.1.1.4 接到电极上的导线既不应使得电极发生倾斜或其他移动或使得试样上压力变化,也不应使得试样周围的电场分布受到显著影响。

4.1.2 不等直径电极

根据 GB/T 1408.1—2016 中 5.2.1.1 的要求执行。

4.1.3 等直径电极

根据 GB/T 1408.1—2016 中 5.2.1.2 的要求执行。

4.2 周围媒质

4.2.1 通则

4.2.1.1 试样应在为防止闪络而选取的气体或液体媒质中试验。

4.2.1.2 周围媒质在试验过程中与交联聚乙烯试样不应有显著的相互作用,如在试验过程中引起溶胀。应选取对试验材料影响较小的媒质。

4.2.1.3 周围媒质应具有良好的热稳定性,在 0℃~100℃温度范围内不应发生物理相变或化学反

应。

4.2.1.4 气体媒质宜采用干燥空气，液体媒质宜采用符合 GB 2536 的变压器油、GB/T 21218 的硅液体、GB/T 41632 的酯液体。

4.2.2 干燥空气媒质

4.2.2.1 采用干燥空气作为媒质时，可在设计合理的干燥箱中进行，相对湿度应小于 10%。干燥箱应有足够大的体积来容纳试样和电极。

4.2.2.2 干燥箱内应装有空气循环装置，保证干燥箱内各个位置温度均在设定温度 ± 2 ℃范围内。

4.2.2.3 试验开始前可采用热电偶、红外测温装置或其他测量温度的装置对各个试样温度进行测量，保证试验过程中各个试样温度均在规定温度 ± 2 ℃范围内。

4.2.2.4 应保证各个试样周围媒质的温度在规定温度的 ± 2 ℃内并保持稳定至少 30 min 后，方可开始试验。

4.2.2.5 对于试验电压大于 10 kV 的试样，不宜采用干燥空气作为媒质。

4.2.3 液体媒质

4.2.3.1 采用变压器油、硅液体、酯液体作为媒质时，应保证其具有足够的电气强度以免发生液体媒质的放电甚至闪络。

4.2.3.2 进行高温下的试验时，将电极与样品置于盛有液体媒质的容器中，并将盛液容器置于烘箱内，也可置于液体媒质作为热传递介质的恒温浴中。

4.2.3.3 烘箱应具有良好的空气循环，恒温浴应具有良好的液体循环措施。试验开始前可采用热电偶、红外测温装置或其他测量温度的装置对媒质温度进行测量，保证试验过程中各个试样温度均在规定温度 ± 2 ℃范围内。

4.2.3.4 应保证各个试样周围液体媒质的温度在规定温度的 ± 2 ℃内并大体保持稳定至少 30 min 后，方可开始试验。

4.2.3.5 当多个试样同时进行试验时，宜将每个试样分别置于不同盛液容器中。

5 试样要求

5.1 通则

5.1.1 试样应采用片状，试样厚度应不小于 0.30 mm。

注：试样厚度应为下列之一：a) 试样表面取 10 个位置测量厚度的平均值；b) 试样击穿点附近直接测得的厚度。

5.1.2 试样厚度应保持均匀，对于平均厚度小于等于 1.00 mm 的片状试样，任一位置厚度应处于平均厚度 ± 0.02 mm 范围之内；对于平均厚度大于 1.00 mm 的片状试样，任一位置厚度应处于平均厚度 ± 0.05 mm 范围之内。

5.1.3 试样表面应光滑，应无目视可见的刀痕、划痕。

5.1.4 试样可为正方形、长方形、圆形，试样中心位置应与电极中心位置对中。

5.1.5 对于不同厚度的试样，试验结果不能直接对比。

5.2 试样准备

5.2.1 对于注塑成型试样，按 GB/T 17037.3 进行制备，设定料筒温度为 140 ℃ ± 10 ℃，注塑压

力宜采用 40 MPa~50 MPa, 注塑时间宜采用 5 s~10 s, 样品注入后保持模具温度为 170 °C~200 °C, 填充压力为 70 MPa~80 MPa, 并持续 4 min 完成交联过程。

注: 适用于评估绝缘材料击穿性能。

5.2.2 对于压塑成型试样, 按 GB/T 5471 进行制备, 设定平板硫化机温度为 110 °C~115 °C, 待粒料完全熔融后将材料压制成片状试样, 保持压强 15 MPa~20 MPa, 温度为 180 °C, 持续 15 min 完成交联过程。

注: 适用于评估绝缘材料击穿性能。

5.2.3 对于成品电缆试样, 宜采用电缆绝缘卷切机。除对样品选取位置另有说明外, 宜选用距离导体侧的电缆绝缘层约 1/3 厚度附近的样品。

5.2.4 对于注塑或压塑成型试样, 宜将试样悬挂于温度为 70 °C、真空度 100 Pa 的真空干燥箱中进行脱气处理, 时间不少于 24 h; 对于成品电缆切片试样, 可不进行脱气处理。

5.2.5 干燥处理

参照 GB/T 10580 对试样进行干燥处理, 干燥温度不低于 70 °C, 相对湿度小于 10%, 处理时间不少于 24 h。

6 电气试验设备

6.1 电压源

6.1.1 采用一个调压器供给一个升压变压器来获得试验电压。试验电压应在试验过程中保持稳定, 误差范围为±3%。

6.1.2 对于使用推荐的电极情况下, 电压源应具有 40 mA 以上的输出电流容量。电源容量范围为: 试验电压为 10 kV 及以下时, 其容量不小于 0.5 kVA; 试验电压为 10 kV~100 kV 时, 其容量不小于 5 kVA。

6.1.3 调压器应使试验电压变化在±20 V/s 以内, 在升压过程中无过冲现象, 在恒压过程中无电压突变现象。

6.1.4 调压器可使用手动调节或自动调节, 对于快速升压过程宜采用自动调节。

6.1.5 试验回路应装有过流保护继电器装置, 使其控制断路器在试样击穿时切断试验回路。

6.1.6 为限制在试样击穿时由电流或电压冲击引起的损伤, 应将一个具有合适值的电阻与电极串联。电阻值的大小应取决于电极所允许的损伤程度, 电阻值宜取 1 MΩ。

6.2 电压测量

6.2.1 记录交流电压的有效值作为电压值。

6.2.2 测量电压值, 可采用高压探头、分压器或电压互感器接到电极或相邻导线上, 电压测量回路的总误差应不超过测量值的 5%。

6.3 击穿时间测量

6.3.1 记录试样从承受电压的起始时刻到发生电气击穿所经过的时间。

6.3.2 可采用连接于变压器低压侧的计时器测量击穿时间, 从电压开始施加时刻开始计时, 并在试样过流保护继电器装置动作时自动停止计时。

7 升压方式

7.1 短时击穿试验

将试验电压由零开始以均匀速度上升直至试样击穿。根据试样厚度选择合适的升压速率（0.2 kV/s、0.5 kV/s、1 kV/s、2 kV/s），以确保试样在短时间内击穿。

当有特殊需求时，可采用其他升压速率。

7.2 长时击穿试验

7.2.1 长时击穿试验电压的选择

按 40%~80% 的短时击穿电压施加于试样上，进行长时击穿试验的样品厚度应与短时击穿试验样品厚度一致。

如不确定试样长时击穿电压的击穿时间，则建议试验电压由高向低进行，即首先按 80% 的短时击穿电压施加于试样上，如被试样品的击穿均发生在 3600 s 之内，则应更换被测试样，并按表 1 规定的台阶逐级降低电压，直至试样击穿时间的平均值或 Weibull 分布特征值 ≥ 3600 s，则该电压为长时击穿试验电压的最大值。Weibull 分布特征值计算参考 GB/T 34987 执行。

按表 1 规定的台阶逐级降低电压，选择其他试验电压。

当有特殊需求时，也可采用更小的电压台阶。

表 1 试验电压台阶

起始电压 U_0 , kV	电压台阶, kV
$U_0 \leq 1.0$	10% U_0
$1.0 < U_0 \leq 2.0$	0.1
$2.0 < U_0 \leq 5.0$	0.2
$5.0 < U_0 \leq 10.0$	0.5
$10.0 < U_0 \leq 20.0$	1.0
$20.0 < U_0 \leq 50.0$	2.0
$50.0 < U_0 \leq 100.0$	5.0

7.2.2 长时击穿时间

每个电压下应至少获得 10 个试样的有效击穿时间，可用多个试样击穿时间的平均值或 Weibull 分布特征值作为该电压下的击穿时间。

当试验并非用于例行的质量控制时，应做较多次重复试验，具体次数根据材料的分散性和所用统计分析方法确定。

7.3 击穿判定

宜采用电流作为断路器的动作标准。对于断路器动作后的试样，应检查电极区域内是否存在击穿通道，如试样无击穿点或击穿点位于电极区域以外，则该试样击穿时间为无效数据。

8 剩余寿命评估方法

8.1 试验条件的选取

获得至少 3 个电压、3 个温度下绝缘试样击穿时间的平均值或 Weibull 分布特征值，为表征交联聚乙烯绝缘试样在宽温度范围内的长时可靠性，试验温度宜选择 30℃、50℃、70℃、90℃ 可根据情况选做。

8.2 单一电应力寿命评估

交联聚乙烯绝缘单一电应力寿命评估按式 (1) 计算。

$$t = CE^{-n} \quad (1)$$

式中：

t —— 击穿时间，单位为秒 (s)；

E —— 击穿场强，单位为伏每米 (V/m)；

C —— 常数，取决于电缆绝缘材料以及其它因素的影响，通过试验来确定；

n —— 电寿命指数，反映该温度和电压下绝缘长时可靠性。

8.3 电热联合应力寿命评估

交联聚乙烯绝缘电热联合应力寿命评估按式 (2) 计算。

$$t = AE \left[M - N \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right] \cdot e^{-B \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \quad (2)$$

式中：

E —— 击穿场强，单位为伏每米 (V/m)；

T —— 温度，单位为开尔文 (K)；

t —— 交流电场 E 和温度 T 条件下的交流电缆绝缘特征击穿时间，单位为秒 (s)；

T_0 —— 室温，单位为开尔文 (K)；

A 、 B 、 M 和 N —— 常数。基于试验结果获得寿命模型中 A 、 B 、 M 和 N 参数。

根据电缆绝缘层的实际工作电场强度和温度，采用公式 (2) 进行电缆绝缘寿命评估。

9 试验程序

9.1 短时击穿试验

试验按如下程序进行：

- a) 采用注塑、模塑或电缆卷切方法制备绝缘试样；
- b) 对被试样品进行实验前的处理；
- c) 将处理后的被试样品装入符合 4.1 要求的电极中，安装过程中防止损坏试样；
- d) 将电极与试样放置于符合 4.2 要求的周围媒质中，使试样达到试验温度并保持稳定；
- e) 测试被试样品的短时击穿电压，具体为：按照 7.1 升压方式测得 10~15 个试样短时击穿电压，并按照 GB/T 29310 对试样短时击穿电压进行数据统计分析，宜选取 Weibull 分布概率为 63.2 % 的击穿电压作为被试样品的短时击穿电压。

9.2 长时击穿试验

试验按如下程序进行：

- a) 采用注塑、压塑或电缆卷切方法制备绝缘试样；

- b) 对被试样品进行实验前的处理;
 - c) 将处理后的被试样品装入符合 4.1 要求的电极中, 安装过程中应防止损坏试样;
 - d) 将电极与试样放置于符合 4.2 要求的周围媒质中, 使试样达到试验温度并保持稳定;
 - e) 基于被试样品的短时击穿电压, 确定长时击穿试验电压, 使多个试样击穿时间的平均值或 Weibull 分布特征值不应小于 3600 s。按照 7.3 的方法判定试样是否发生击穿, 并在每个电压下应至少获得 10 个试样的有效击穿时间并记录, 可用多个试样击穿时间的平均值或 Weibull 分布特征值作为该电压下的击穿时间;
 - f) 获得电气强度与击穿时间之间的关系, 或电气强度的自然对数值与击穿时间的自然对数值之间的关系;
 - g) 按照 8.2 和 8.3 中的方法评估交联聚乙烯电缆绝缘的电寿命指数和电热联合应力剩余寿命。
-