



# 团体标准

T/CES XXX-XXXX

## 基于大气压低温等离子体的绝缘纸处理 方法

Method for treating insulating paper with atmospheric pressure low-temperature  
plasma

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

目 次..... I

前 言..... II

引 言..... III

1 范围..... 1

2 规范性引用文件..... 1

3 术语和定义..... 1

4 符号、代号和缩略语..... 2

5 一般要求..... 2

    5.1 运行环境要求..... 2

    5.2 处理系统组成..... 2

    5.3 电气保护要求..... 3

6 等离子体处理工艺方法与步骤..... 3

    6.1 处理平台..... 3

    6.2 步骤..... 4

## 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》给出的规则起草。

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这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会等离子体工作组归口。

本文件起草单位：国网江苏省电力有限公司南京供电分公司、南京工业大学、中国电力科学研究院有限公司、国网江苏省电力有限公司电力科学研究院、南京电气高压套管有限公司、中天光伏材料有限公司、南京珀斯佩特电子科技有限公司、中天科技电缆附件有限公司。

本文件主要起草人：王赫、方志、李勇、祝曦、张灿、朱雷、许洪华、申张亮、崔行磊、陈锐、汤浩、黄新宇、刘立宝、洪文杰、解向前、代业厅、李龙、孙立群、季学彪、许力、戚满顺、陆舆、管秀晗。

本文件为首次发布。

## 引 言

大气压低温等离子体（APLTP）技术，能在常温常压下产生富含高能粒子的放电区域。该技术无需真空、可控性强，适合对大面积多孔纤维材料进行改性。将其应用于变压器、高压电缆等设备的绝缘纸处理，通过改变绝缘纸表面及内部物理形貌和化学成分，达到降低介电常数、提升电气强度和防水特性等效果。随着电工材料研究的发展，等离子体改性技术的机制与效果得到了更深层理解，有力推动了其在含油纸复合绝缘结构的装备中应用。

现今并无等离子体处理绝缘材料相关标准，并且现有的绝缘纸标准只规定了绝缘纸制备和性能要求，如国际电工委员会（IEC：International Electrotechnical Commission）和我国国家标准（GB/T），为传统电工用绝缘纸及纸板的生产、制造和性能评价提供了基本的技术要求。这些要求涵盖了绝缘纸的抗张强度、工频耐压电气强度、介质损耗因数等方面，以保障电力设备在常规工况下绝缘系统的可靠性并防止绝缘失效。

现有标准适用于传统未经处理的绝缘纸性能要求。然而，随着等离子体表面改性技术的发展，改性绝缘纸展现出超疏水率等非传统新特性。为规范等离子体工艺在绝缘纸上的应用效果，必须细化等离子体放电工艺的控制参数，明确针对改性过程中的技术要求，从而实现等离子体改性绝缘纸实际工程应用可靠性与安全性的准确预测和规范。

# 基于大气压低温等离子体的绝缘纸处理方法

## 1 范围

本文件规定了大气压低温等离子体处理绝缘纸的总体要求、处理工艺方法。

本文件适用于采用大气压低温等离子体技术，对变压器、高压电缆等含油纸复合绝缘结构的电力设备中使用的绝缘纸进行改性处理。

## 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/T 2900.16-2025 电工术语 电力电容器

GB/T 2900.73-2008 电工术语接地与电击防护

GB/T 12113-2023 接触电流和保护导体电流的测量方法

GB/T 12914-2018 纸和纸板 抗张强度的测定

GB/T 16927.1-2011 高电压试验技术 第1部分：一般定义及试验要求

GB/T 19264.1-2011 电气用压纸板和薄纸板 第1部分：定义和一般要求

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**大气压低温等离子体** atmospheric pressure low temperature plasma

在特定气氛环境下，利用外加电场使气体击穿放电产生低温等离子体，在媒质参与下，对材料表面及本体进行物理轰击、化学接枝、交联聚合等改性处理的工艺过程。

### 3.2

**等离子体发生器** plasma generator

用人工方法获得等离子体的设备。

### 3.3

**绝缘纸** insulating paper

以植物纤维为主要原材料，用于电力设备内部绝缘及支撑的薄片状材料。

### 3.4

### 媒质 precursor

在等离子体放电空间中添加的,能够在高能粒子碰撞下发生解离并在绝缘纸表面和纤维内部沉积形成薄膜的化学单体(如八甲基环四硅氧烷 OMCTS)。

### 3.5

#### 体积分数 volume fraction

在等离子体放电的混合气态体系中,媒质的体积与工作气体总体积之比。

### 3.6

#### 放电功率 discharge power

##### $P(W)$

在放电过程中,高压电源系统单位时间内向放电反应间隙注入并实际消耗的有效电能。

注: $P$ 系根据放电电压和电流的波形积分求出:

$$P = \frac{\int_t^{t+T} u(t)i(t)dt}{T}$$

$u(t)$ 与 $i(t)$ 分别为放电电压和电流的波形。

$T$ 为周期时间。

### 3.7

#### 等离子体聚合 plasma polymerization

利用等离子体放电把单体电离离解,使其产生各类活性种,由这些活性种之间或活性种与单体之间进行加成反应形成聚合膜。

## 4 符号、代号和缩略语

下列符号、代号和缩略语适用于本文件。

APLTP: Atmospheric-pressure Low-temperature Plasma (大气压低温等离子体)

## 5 一般要求

### 5.1 运行环境要求

处理设备工作环境温度应控制在常规室温范围(15℃~30℃),并在处理过程中保持一致,相对湿度应保持在较低水平(相对湿度≤60%)以减少空气水分对放电稳定性的影响。设备需具备良好的接地与绝缘防护,并配备尾气收集与通风装置以处理未反应完全的化学气体及可能产生的臭氧。

### 5.2 处理系统组成

大气压等离子体处理系统应至少包含:气路系统(含工作气体源、媒质发生与恒温装置、质量流量控制器)、高压电源(如交流、纳秒/微秒级脉冲电源)、以及低温等离子体发生器(包含高压电极、接地电极及阻挡介质层)。

### 5.3 电气保护要求

5.3.1 应具备在线监测等离子体源放电电压、电流及异常电弧的警告与断电保护功能。

5.3.2 对于目标处物体具备短路、断路保护，保护接地阻抗等其它电气安全性要求应符合 GB/T 2900.73-2008 规定。

5.3.3 设备和测试应用平台环境，需要与建筑大地可靠相接。

## 6 等离子体处理工艺方法与步骤

### 6.1 处理平台

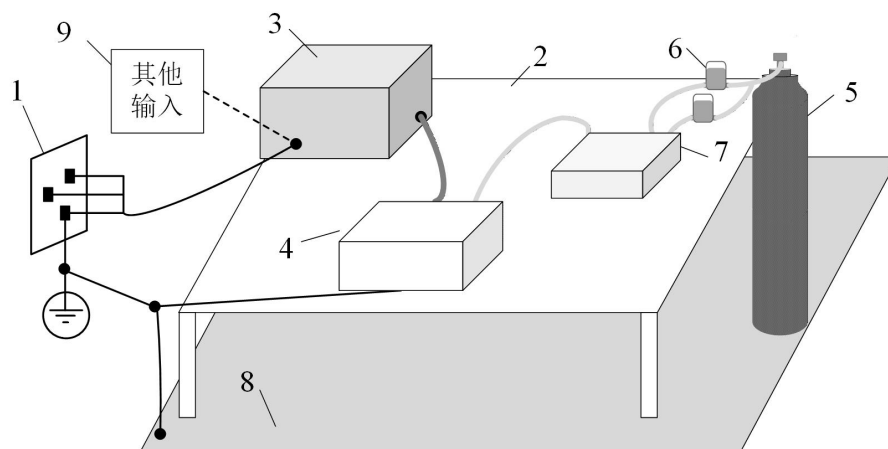


图 1 等离子体处理绝缘纸平台示意图

测试接线平台部分参考 GB/T 12113-2023 规范，其中：

- 1 市电供电
- 2 绝缘平台
- 3 激励电源
- 4 等离子体发生器
- 5 气瓶
- 6 流量计
- 7 气腔室
- 8 接地导电平面
- 9 其他能量输入方式，如电池，太阳能等

#### 6.1.1 处理要求

6.1.1.1 市电参数  $220\text{V} \pm 10\text{V}$ 、 $50\text{Hz}$ 。

6.1.1.2 激励电源应能稳定驱动高压电极产生低温等离子体。其输出的激励电压幅值、频率等波形参数以及功率应具备可调和监控功能，以便根据工作气体类型及绝缘纸的厚度匹配电源输出参数。

6.1.1.3 等离子体发生器的放电间隙及阻挡介质厚度应合理配置。阻挡介质应具备良好的耐电晕及绝缘性能；放电间隙应可调，其设置原则是在确保工作气体顺畅流通和绝缘纸平稳走带的前提下，维持放电的均匀性，避免电弧产生造成绝缘纸损伤。

6.1.1.4 气体流量调控装置应具备高精度和宽调节范围，并配有输出监控系统。其量程设置应完全覆盖不同工艺配气需求下的流量极值，确保工作气体按预定比例、稳定地输送至气腔室。

6.1.1.5 系统的接地设计应符合高压电气设备安全规范。接地电极或接地导线平面的有效覆盖面积应不小于整个等离子体放电操作区域的面积，并必须与建筑大地或综合接地网实现可靠的等电位连接，接地电阻应满足设备安全运行的要求。

6.1.1.6 激励电源的能量输入方式不局限于市电供电，同样适用于电池，太阳能等其他能源形势的能量输入方式。

## 6.2 步骤

### 6.2.1 绝缘纸预处理

在进行等离子体处理前，对绝缘纸进行干燥处理。宜将绝缘纸平整置于真空干燥箱中，在规定温度及真空度下（90℃~105℃、绝对压力 $\leq 100$  Pa）持续干燥 $\geq 48$  h。干燥完毕后，应将其保存在干燥皿中备用，以降低含水率对等离子体放电均匀性和处理效果的影响。处理前应检查发生器放电是否正常，确保后续放电处理的稳定性。

### 6.2.2 发生器准备与气体置换

6.2.2.1 放置试样：打开等离子体发生器，将预处理后的绝缘纸平整铺设在发生器下方处理区域，确保绝缘纸无褶皱，且纸张边缘不起翘。

6.2.2.2 密闭与吹扫：闭合发生器，开启气路通入工作气体。在不施加电压的情况下，以大流量进行气体置换，吹扫时间一段时间，确保充分排尽发生器放电区域残余气体，避免后续影响放电。

### 6.2.3 进气配比与放电改性

6.2.3.1 调节气路配比：通过质量流量控制器调节工作气体的流量，精确控制进入发生器的媒质体积分数，确保放电的均匀性及活性粒子的浓度，避免媒质浓度过高引发放电抑制或浓度过低导致反应不充分。

6.2.3.2 放电：开启高压电源，缓慢调节电压幅值和频率等波形参数，直至放电间隙中呈现均匀、弥散的等离子体，避免出现集中的明亮放电细丝。

6.2.3.3 计时处理：应根据绝缘纸的厚度及设备的放电功率设定适宜的处理时间。处理时间必须能够确保在纸张表面及内部纤维形成特定结构，同时应严防因处理时间过长产生热效应和高能粒子刻蚀损伤，导致纤维素分子链断裂和机械强度下降。

### 6.2.4 后处理与存储

等离子体处理完成后，切断高压电源，保留工作气体继续吹扫以清除发生器内残留的活性自由基和废气。随后取出改性绝缘纸，立即装入真空封装袋或置于干燥皿中保存。