第 50 卷 第 12 期：5368-5377　　高电压技术　　Vol.50, No.12: 5368-5377
2024 年 12 月 31 日　　High Voltage Engineering　　December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20230434

受潮对 ZnO 阀片的多重雷击耐受性能影响

郭　蕾[1]，刘　聪[1]，黄　林[1]，王东阳[1]，马御棠[2]
（1. 西南交通大学电气工程学院，成都 611756；2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院，昆明 650000）

摘　要：ZnO 阀片是避雷器的核心组件，易遭受环境中潮气的侵入，并在多重雷击下发生严重的破坏。为此针对受潮对 ZnO 阀片的多重雷击耐受性能的影响进行了研究。首先，搭建了 ZnO 阀片多重雷击实验平台与人工受潮实验平台，制备了不同受潮状态样品，对样品进行 4 重雷击实验，测试得到了实验过程中样品的直流参数和红外温升变化结果；然后，分析了受潮对 ZnO 阀片的多重雷击电特性影响，结合直流参数并基于微裂纹研究了受潮下 ZnO 阀片电特性劣化过程；最后，基于样品的冲击表面温度分布图和冲击热性能参数，统计了冲击破坏形式，并结合样品微观结构变化情况分析了受潮阀片冲击热特性变化与热应力对阀片的破坏。实验结果表明：阀片受潮加速其多重雷击损坏速率，损坏速率最高为正常阀片的 7.5 倍；受潮阀片的冲击红外温升增大但分布更均匀，最大温升为正常阀片的 1.75 倍；阀片受潮劣化主要由其内部微裂纹与水分共同形成的高电导电阻通道导致，并会对阀片造成随干燥而恢复的可逆缺陷和腐蚀性不可逆缺陷。

关键词：多重雷击；氧化锌阀片；受潮劣化；雷击耐受性能；微裂纹

Effect of Moisture on the Multiple Lightning Strike Resistance of ZnO Valve Discs

GUO Lei[1], LIU Cong[1], HUANG Lin[1], WANG Dongyang[1], MA Yutang[2]
(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;
2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000, China)

Abstract: The ZnO valve is the core component of a lightning arrester and is susceptible to moisture intrusion in the environment and severe damage under multiple lightning strikes. In this paper, the effect of moisture on the multiple lightning strikes of ZnO valve discs is investigated. Firstly, an experimental platform for ZnO valve discs multiple lightning strikes and an artificial moisture experimental platform were built. Then, samples were prepared in different moisture states, four lightning strikes experiments were conducted on the samples, and the DC parameters and infrared temperature rise of the samples during the experimental process were tested. Finally, based on the impact surface temperature distribution and impact thermal performance parameters of the samples, the impact damage forms were calculated, and the changes in the impact thermal properties of the damped valves and the damage caused by thermal stress were analyzed in conjunction with the microstructural changes of the samples. The experimental results show that the moisture of the valve disc accelerates its multiple lightning damage rate, and the damage rate is up to 7.5 times that of the normal valve disc; the impact infrared temperature rise of the damped valve disc increases but is more uniformly distributed, and the maximum temperature rise is 1.75 times that of the normal valve disc; the deterioration of the valve disc by moisture is mainly caused by the high electrical conductivity resistance channel formed by the internal microcracks and moisture together, and can cause reversible defects on the valve disc that recover with drying and Corrosion irreversible defects.

Key words: multiple lightning strikes; zinc oxide valve discs; deterioration by moisture; lightning strike tolerance; mcrocracking

0　引言

雷击是引起线路跳闸的主要因素，且自然界中雷电大多呈现多重特性，根据电网统计数据表明多重雷占比高达 80%，严重威胁着电力系统的安全运行[1-4]。氧化物避雷器由于其良好的非线性特性，成为目前一种不可或缺的防雷设备，ZnO 阀片作为避雷器内的关键部件，其性能直接关系着避雷器的可靠性[5-7]。而 ZnO 阀片易遭受环境中潮气的侵入，使其性能劣化，并在遭受多重雷击时，出现极严重的破坏现象，导致避雷器直接失效，严重影响电力系统的稳定运行[8-9]。

基金资助项目：云南电网有限责任公司科技项目(YNKJXM20191243)。
Project supported by Science and Technology Project of Yunnan Power Grid Co., Ltd. (YNKJXM20191243).

当前，已有学者对 ZnO 阀片遭受多重雷击后电气特性与老化机理开展了研究。Haryono T 等研究了氧化锌阀片在施加多次雷击过程中其 50 Hz 的电压和电流特性变化情况，对比了损坏前后阀片性能变化[10]。肖扬等人通过对压敏电阻片施加多脉冲冲击，并分析电气参数、温度变化以及外观损坏形式，研究了压敏电阻片的损坏机理[11]。张宁通过电镜扫描等手段测试了氧化锌压敏陶瓷在雷电冲击下的微观结果变化情况，在微观层面研究了其冲击老化机理[12]。周利军通过测定多重雷击下氧化锌阀片的势垒变化情况，并结合双肖特基势垒模型分析了其冲击老化过程[13]。但多重雷击下的研究对象主要为正常阀片，针对受潮阀片的研究，却主要集中在阀片受潮后的识别与参数变化方面。如杜林等研究了不同受潮时间下阀片受潮前后伏安特性曲线和 FDS 等相关参数变化情况[14]。王建文等研究了氧化锌压敏电阻器瓷料配方、生产工艺和包装工艺对其耐潮湿性能的影响[15]。邓维通过对 500 kV 氧化锌避雷器电阻片进行了不同受潮情况下的升温实验,分析了 500 kV 氧化锌避雷器在阀片受潮下的温度分布特性[16]。高峰提出了一种通过阻性电流判断氧化锌阀片受潮的方法，并给出了不同受潮状态下阀片阻性电流变化规律[17]。然而在阀片服役过程中，受潮阀片在多重雷击下面临更大的威胁，但目前针对受潮对 ZnO 阀片的多重雷击耐受性能方面缺乏相关研究。

因此，为探究受潮对 ZnO 阀片多重雷击耐受性能的影响，本文搭建了 ZnO 阀片多重雷击冲击实验平台，设计了阀片受潮劣化实验方案，首先研究了不同受潮时长、受潮后再干燥下阀片实验前后电特性变化，再对实验样品进行 4 重雷击实验，测量实验过程中 ZnO 阀片的直流参数及红外温升数据；并从电特性和热特性两方面进行实验分析。研究成果可为受潮对阀片多重雷击耐受性能的影响分析提供依据。

1　ZnO 阀片受潮冲击劣化实验

1.1　ZnO 阀片多重雷击实验平台

本文搭建了 ZnO 阀片多重雷击模拟实验平台，针对 ZnO 阀片开展多重雷击实验。该实验平台由中国航天科工集团北京华天机电研究所有限公司研制，实验平台原理图如图 1 所示，包括多重雷击电流发生器、多重雷击数据监测装置、多重雷击自动控制系统和样品实验平台 4 大模块。

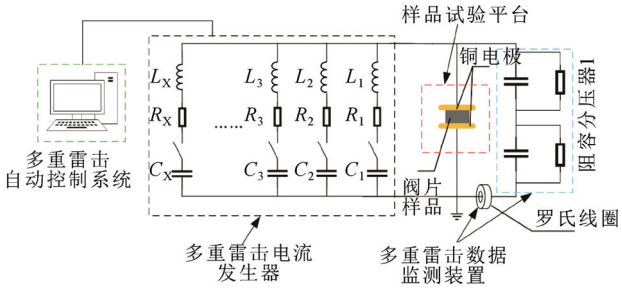


图 1　ZnO 阀片多重雷击实验平台原理图

Fig.1　Schematic diagram of the ZnO valve plate multiple lightning strike experimental platform

其中多重雷击电流发生器由 12 个独立的冲击电流放电电路组成，通过自动控制系统可实现 1~12 重的雷击电流冲击，产生的电流最大幅值为 40 kA，电流波形均为 8/20 μs，雷击时间间隔 50~200 ms 范围内可调；多重雷击数据监测装置主要由阻容分压器和罗氏线圈构成，可实现对每次冲击后多重雷的电压与电流波形、幅值与阀片冲击后残压进行测量及显示。

1.2　样品选择及受潮样品制备

实验样品采用南阳某避雷器厂家生产的 ZnO 阀片，其直径为 42 mm，高度为 20 mm，额定电压为 3 kV，标称电流为 10 kA，连续工作电压为 2.4 kV，2 ms 方波电流冲击耐受能力为 400 A，实验所用的 ZnO 阀片为同一批次阀片，且初始直流参考电压均在(4.60±0.05) kV 范围内。

为探究受潮对 ZnO 阀片冲击劣化性能的影响，本实验采用蒸煮法对上述阀片样品进行人工受潮[18]。受潮实验设备主要包括电磁炉、蒸锅、试品支架及阀片试品，人工受潮实验示意图见图 2，样品受潮时待蒸锅中水完全沸腾后再将阀片样品放置于支架并开始受潮计时，达到受潮设定时间后，取出样品并采用一次性棉布擦拭阀片样品表面水分，并将其放置于恒温箱(设置恒定温度为 25 ℃)内待其温度降至室温。受潮阀片样品和正常阀片样品实物对比如图 3(a)、3(b)所示，可以看出，受潮样品表面颜色更深，且有明显水渍痕迹。同时，为进一步探究受潮的影响，对部分受潮阀片样品进行干燥实验，选取受潮阀片样品放置在高温箱内(高温箱设置为 150 ℃)干燥，每隔 2 h 后取出待其冷却后测试其 U_{1mA}，直至阀片的 U_{1mA} 不再出现恢复现象，即认定受潮阀片已完全干燥。

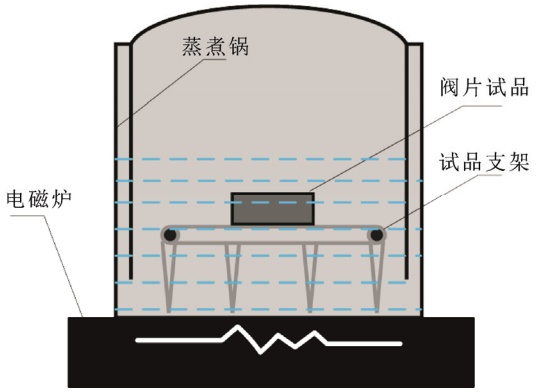


图 2 人工受潮实验示意图

Fig.2 Diagram of the artificial damping experiment

1.3 实验方法与测试方法

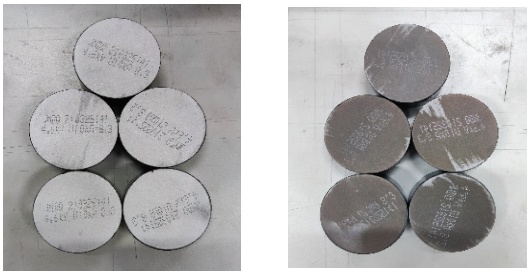
为探究不同受潮时长、受潮再干燥后样品的受潮劣化及多重雷击耐受性能变化，设置了两次受潮实验，如表 1 所示。

实验 1 为探究不同受潮时长、受潮再干燥后样品的受潮劣化情况，选取 4 组正常 ZnO 阀片分别进行受潮 2 h、受潮 4 h、受潮 6 h 和受潮 8 h 的受潮实验，再对 4 组试品进行干燥实验，分别记录实验前后的 ZnO 阀片的 U_{1mA}，为减少实验偶然性，每组阀片各 4 个。

实验 2 探究了不同受潮时长、受潮再干燥后 ZnO 阀片的多重雷击耐受性能。本文重新设置了 4 个实验组及 1 个对照组，4 个实验组分为 3 组受潮组和 1 组受潮再干燥组，其中 3 组受潮组分别是受潮 2 h，受潮 4 h 和受潮 8 h 的受潮阀片样品，受潮再干燥组为受潮 8 h 后再干燥的样品，对照组采用正常阀片样品，其中为减少实验偶然性，每组阀片各 4 个，对 5 组阀片样品进行多重雷击实验。

根据标准 GB/T 21714.1—2015 和 GB/T 11032—2020，本文选取多重雷击电流波形为标准 8/20 μs 的负极性雷电波，多重雷击重数为 4 重，多重雷击脉冲时间间隔为 50 ms[19-20]，电流幅值为阀片标称电流 I_N=10 kA，其中实验波形如图 4 所示，图 4(a)其并非实际波形，而是系统生成的瀑布模式图，以便呈现所有电流波形，供实验人员查看波形。由于实验过程较长，设定阀片样品 4 重雷击每冲击 3 次(12 个冲击脉冲)为一轮；考虑充电电容充放电时间，每次冲击时间间隔设为 2 min，且每轮雷电冲击后需在室温条件下静置使阀片冷却后再进行下一轮雷电冲击实验。

在每轮雷电冲击后需对阀片样品进行直流参数和红外温升测试，红外温升需在冲击后立即进行测试，直流参数测试需待阀片冲击冷却后测试。本文选用 FOTRIC 红外成像仪对 ZnO 阀片冲击后的表面红外温升进行测量，该仪器可直接测得物体表面温度，自动标示记录所测区域温度最大与最小的点。选用 MOA-Ⅱ避雷器电阻片直流参数测试仪进行阀片直流参数测试，其电流分辨率为 1 μA，电压分辨为 1 V，量程分别为 0~3 mA 与 0~5 kV，每次测量需将阀片试品放置在恒温箱内保证测量时环境温度一致。



(a) 受潮前 ZnO 阀片样品图 (b) 受潮后 ZnO 阀片样品图

图 3 ZnO 阀片受潮前后对比图

Fig.3 ZnO valve discs before and after moisture

表 1 ZnO 阀片样品受潮实验方案

Table 1 Experimental programme for ZnO valve disc samples subjected to moisture

实验	样品受潮	样品处理	实验类型
实验 1	受潮 2、4、6、8 h	受潮+干燥	
实验 2	受潮 2、4、8 h	受潮	多重雷击
	受潮 8 h 再干燥	受潮+干燥	多重雷击
	正常阀片		多重雷击

根据相关文献研究及标准规定，在氧化锌阀片冲击实验过程中，当阀片直流参考电压 U_{1mA} 变化率超过 10%[20]，即认定阀片已经损坏，失去保护性能。

2 受潮 ZnO 阀片电特性变化结果

由于实验 1 和实验 2 中每组实验工况下的 4 个阀片实验结果相近，因此选择每组实验工况中的一个阀片实验结果进行数据分析。

2.1 受潮下 ZnO 阀片电特性变化结果

ZnO 阀片受潮前后 U_{1mA} 的变化情况见图 5。

由图 5 可知，受潮 2、4、6、8 h 的阀片样品 U_{1mA} 分别降低了 38、48、54、58 V。再对受潮阀片样品再进行干燥，干燥后样品的 U_{1mA} 出现回升，受潮 2、4、6、8 h 的阀片样品干燥后 U_{1mA} 分别增加了 17、21、25、27 V。可以看出，受潮再干燥后的

阀片 U_{1mA} 出现了恢复现象，但这种恢复不是完全性恢复，相较于阀片受潮后降低的 U_{1mA}，干燥后的 U_{1mA} 恢复效果在 45%左右。

2.2　受潮下 ZnO 阀片多重雷击电特性变化结果

2.2.1　对照组阀片多重雷击电气特性变化结果

对照组 ZnO 阀片样品在 4 重冲击下的 U_{1mA} 随冲击次数的变化情况如图 6 所示。

4 重雷电冲击实验时，在第 30 次冲击时听到明显的放电声音，后期观察阀片外表面绝缘釉出现破裂。由图 6 可知，阀片损坏后阀片的 U_{1mA} 下降了 44.4%，远超损坏标准要求。

2.2.2　实验组阀片多重雷击电特性变化结果

受潮组 ZnO 阀片样品在 4 重冲击下的 U_{1mA} 随冲击次数的变化情况如图 7 所示，由于在多重冲击下受潮样品损坏太快，因此在受潮组样品多重雷击实验中，更改测试设定为阀片 4 重雷击每冲击一次(3 个冲击脉冲)后进行直流参数和红外温升测试，直至阀片损坏。

从图 7 中可以看出，受潮组在进行 4 重冲击时，损坏速率更快，通过最后一次的直流参数可以看出阀片的损坏情况十分恶劣，直流参数变化剧烈。

受潮再干燥组 ZnO 阀片样品在 4 重冲击下的直流参数随冲击次数的变化情况如图 8 所示。

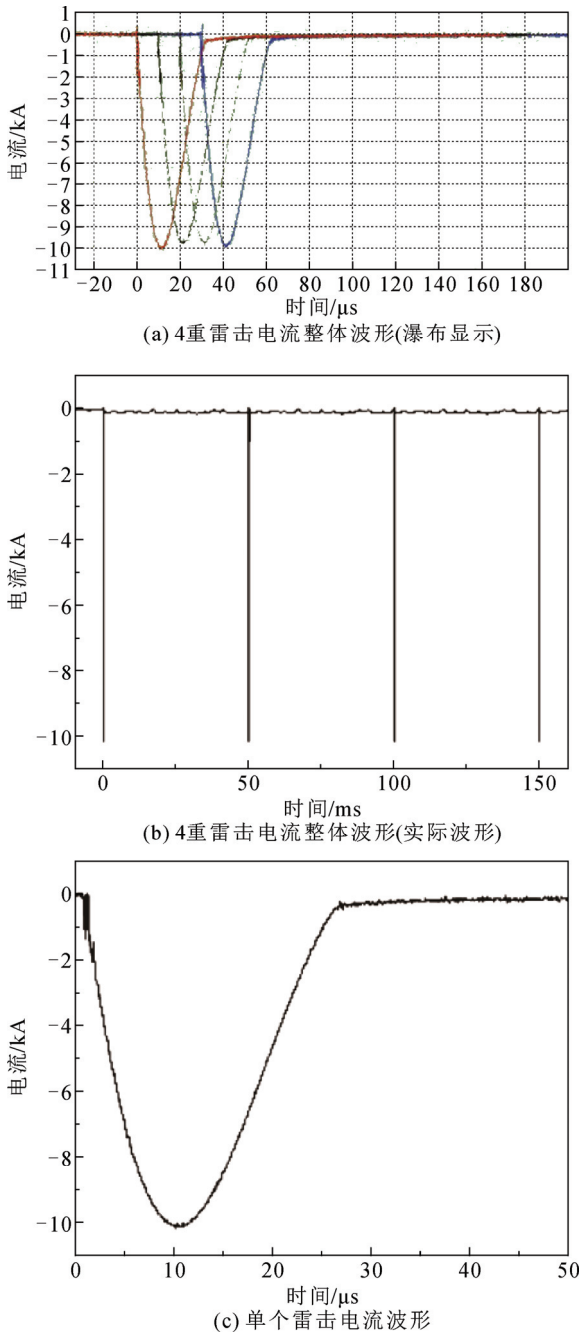


图 4　多重雷击电流波形图

Fig.4　Multiple lightning current waveforms

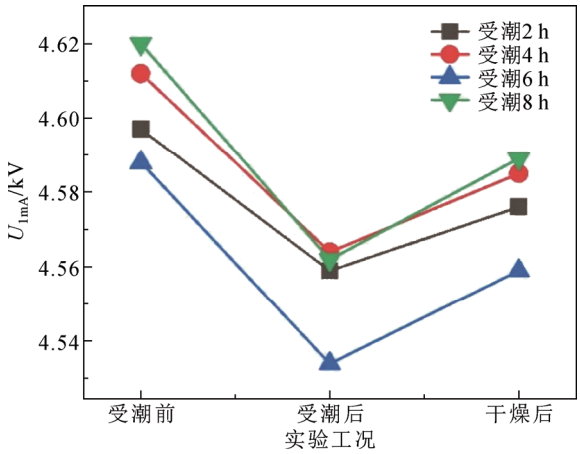


图 5　ZnO 阀片受潮前后 U_{1mA} 变化图

Fig.5　ZnO valve piece before and after moisture U_{1mA} change graph

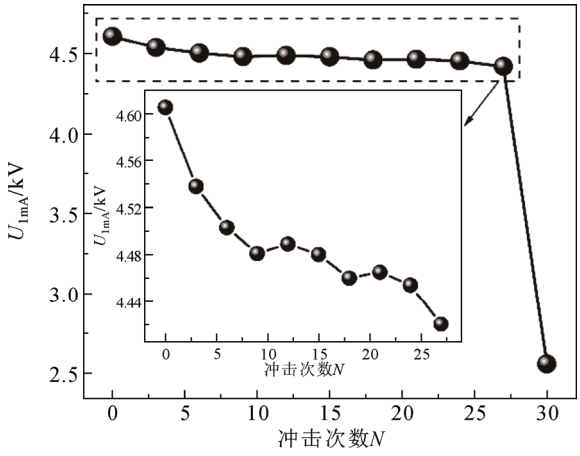


图 6　对照组阀片 4 重冲击下 U_{1mA} 变化图

Fig.6　Variation of U_{1mA} under 4-fold impact of the control valve piece

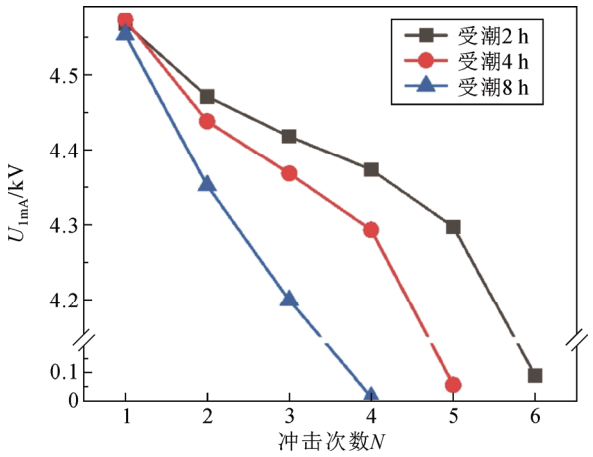


图 7 受潮组阀片 4 重冲击下 U_{1mA} 变化图

Fig.7 Variation of U_{1mA} under four impacts of the damped set of valves

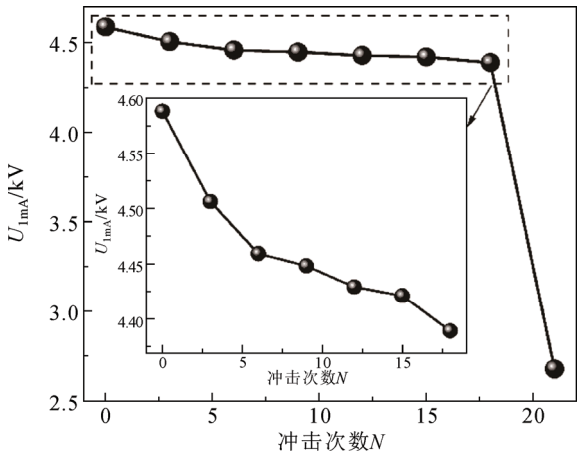


图 8 受潮 8 h 再干燥样品 4 重冲击下 U_{1mA} 变化图

Fig.8 Variation of U_{1mA} under four impacts of a damp 8 h re-dried sample

受潮再干燥阀片在 4 重的冲击下在 21 次损坏，较受潮组阀片冲击次数存在明显的增大，但仍然略低于对照组阀片。

2.3 受潮对 ZnO 阀片多重雷击电特性影响分析

2.3.1 受潮下 ZnO 阀片电特性劣化分析

ZnO 阀片内部的微观结构中存在大小不等孔径极小的气隙及微小裂纹[21]，这些微缺陷主要由于 ZnO 阀片烧结生产过程中内部冷却收缩效应的不均匀性导致。本文认为这种微裂纹是阀片受潮电气性能劣化的主要原因。

在受潮环境下，水分会通过上述的微裂纹进入到 ZnO 阀片内部，并与阀片内部的氧离子结合发生如式(1)所示的化学反应，从而使微裂纹成为高电导的电阻通道[22]。

$$H_2O+O_O^- \rightarrow 2(OH)_O^- \tag{1}$$

正常阀片的部分区域电路模型如图 9 所示，图中 R_1 和 R_3 为晶粒电阻，R_2 和 R_4 为晶界层电阻，其中晶界层电阻在小电流时呈现高阻态，决定着电路模型整体电阻情况，C_1 和 C_2 为晶界层电容，R_0 为受潮前阀片部分区域电路模型的整体电阻。

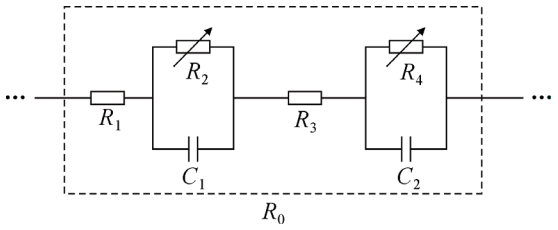


图 9 ZnO 阀片部分区域电路模型图

Fig.9 Model circuit diagram of part of the zinc oxide valve area

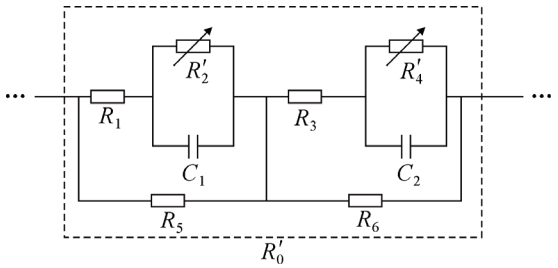


图 10 受潮后 ZnO 阀片部分区域电路模型图

Fig.10 Model circuit diagram of part of the ZnO valve area after exposure to moisture

ZnO 阀片内部的微裂纹随机分布，假设其中有两条较长的裂纹，正常情况并不会形成电阻通道。但由于阀片受潮，水分扩散进 ZnO 阀片内部，式(1)所述的化学反应产生的 OH^- 使这两道微裂纹形成了导电性能良好通道电阻 R_5 和 R_6；同时 OH^- 离子会进一步扩散在晶界处，晶界层中的金属氧化物会被碱性 OH^- 离子腐蚀破坏，导致晶界层电阻降低，阀片的部分区域电路模型变成图 10 所示。图中，R_5 和 R_6 为受潮导致的通道电阻，R_2' 和 R_4' 为受潮后晶界层电阻，R_0' 为受潮后阀片部分区域电路模型的整体电阻。

对受潮阀片再干燥时，水分蒸发微裂纹重新恢复常态，此时高电导性的通道电阻消失，但由于晶界层被腐蚀破坏，阀片的部分区域电路模型变成图 11 所示。图中 R_0'' 为受潮再干燥后阀片部分区域电路模型的整体电阻。

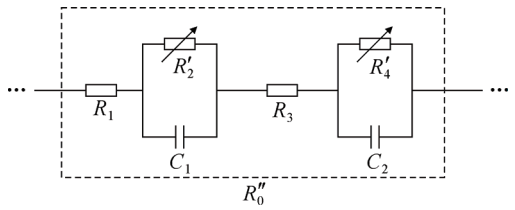


图 11　受潮再干燥后 ZnO 阀片部分区域电路模型图

Fig.11　Circuit model of part of the ZnO valve after moisture and re-drying

通过电路推导得到受潮前、受潮后和受潮再干燥后阀片部分区域电路模型的整体电阻 R_0 、R_0' 和 R_0'' 表达式分别为：

$$R_0 = R_1 + R_2 //C_1 + R_3 + R_4 //C_2 \tag{2}$$

$$R_1' = \left(R_1 + R_2' //C_1\right)//R_5 + \left(R_3 + R_4' //C_2\right)//R_2 \tag{3}$$

$$R_0'' = R_1 + R_2' //C_1 + R_3 + R_4' //C_2 \tag{4}$$

一方面阀片受潮后形成的高导电性通道电阻会与高阻的混联单元并联，大大降低了高阻混合单元的电阻，另一方面受潮腐蚀会导致晶界层电阻降低，由此可知 3 种情况下部分区域电路模型电阻情况如下：

$$R_0 > R_0'' > R_0' \tag{5}$$

阀片 U_{1mA} 定义为 1mA 电流下阀片两端电压，与阀片电阻成正相关，由式(5)可知受潮后阀片 U_{1mA} 会出现下降，干燥后阀片 U_{1mA} 有所恢复，但仍低于受潮前，这与 2.1 节实验结果贴合。

2.3.2　受潮 ZnO 阀片多重雷击电特性分析

由图 6 可知，对照组阀片在第 30 次后损坏，U_{1mA} 从初试的 4.606 kV 下降至 2.56 kV，下降了 44.1%，整体平均下降幅度为 68.2 V。根据 U_{1mA} 变化情况可将对照组阀片冲击老化过程分成老化前期(N 为 0~9)，U_{1mA} 陡降；老化中期(N 为 9~24)，U_{1mA} 缓降，呈振荡下降趋势；老化后期(N 为 24~30)，U_{1mA} 陡降。

从图 7 可知，受潮组阀片在几次冲击后就达到损坏，且破坏情况特别恶劣，且老化过程不存在明显的老化前中后期区别，阀片 U_{1mA} 随冲击急剧下降，受潮 2 h 阀片在第 6 次冲击损坏，U_{1mA} 下降了 98.07%，整体平均下降幅度为 746.67 V；受潮 4 h 阀片在第 5 次冲击损坏，U_{1mA} 下降了 98.8%，整体平均下降幅度为 903.6 V；受潮 8 h 阀片在第 4 次冲击损坏，U_{1mA} 下降了 99.7%，整体平均下降幅度为 1 135 V。此外，受潮阀片冲击损坏速率(定义为冲击耐受次数的倒数)为对照组的 5 倍、6 倍、7.5 倍(且由于更改每轮冲击次数设定，受潮组阀片实际损坏速率更高)。由此可见，受潮阀片的多重耐受性能劣化严重，U_{1mA} 整体平均下降幅度最高为对照组 16.64 倍，冲击损坏速率最高为对照组 7.5 倍；另外受潮时长对阀片多重雷击耐受性能影响不大，受潮阀片多重雷击均极快达到损坏。

进一步分析认为，受潮阀片多重冲击耐受性能劣化主要由于阀片内部的由水分形成的高电导的电阻通道导致，当大电流冲击阀片时，高电导通道会形成局部短路，破坏阀片整体性能；此外进一步使阀片泄漏电流增大，加剧阀片冲击发热，尤其在多重雷击下，阀片内部电热损伤发展更快累积更剧烈，阀片雷击破坏性能更剧烈，多重雷击对受潮阀片的冲击破坏性更大，这部分会在第 3 章继续分析。

由图 8 可知，受潮 8 h 再干燥组阀片在第 21 次冲击后损坏，U_{1mA} 从初试的 4.589 kV 下降至 2.676 kV，下降了 41.5%，整体平均下降幅度为 90.57 V。较对照组阀片 U_{1mA} 整体平均下降幅度为对照组 1.33 倍，冲击损坏速率为对照组 1.43 倍；但较受潮组阀片多重冲击耐受性能有所恢复。

本文分析认为受潮对阀片多重雷击耐受性能的影响来自两部分，一是由其内部的水分导致的可逆缺陷，这种缺陷的表现形式主要以微裂纹和水分共同形成的高电导通道体现；另一种是受潮过程中的产生的不可逆缺陷，主要来至于 OH^- 对晶界层中金属氧化物的化学腐蚀，从而破坏晶界层电阻使阀片整体性能下降。由实验数据可知，其中可逆缺陷对受潮阀片多重雷击耐受性能影响最大，且随着受潮阀片内水分的烘干，可逆缺陷不再会对阀片的多重雷击耐受性能产生影响。但受不可逆缺陷的影响，导致受过潮的阀片在多重雷击耐受性能上仍然低于正常阀片。

3　受潮对 ZnO 阀片的多重雷击热特性影响分析

3.1　受潮对 ZnO 阀片多重雷击温升及热应力影响分析

对照组、受潮 8 h 和受潮 8 h 再干燥阀片 4 重雷击老化前中后期表面温度分布如图 12 所示。对照组和受潮 8 h 再干燥阀片老化前中后期表面温度分布图选取方式为：首先分别统计阀片在老化前中后 3 期内雷击后表面最高温的平均值，再选取对应老化阶段内与表面最高温的平均值最相近的温度分布

图片，其代表阀片对应老化阶段的表面温度分布图。由于受潮 8 h 阀片只进行了 4 次雷击，其老化前中后期表面温度分布图分别认定为第 1 次、第 2 次和第 4 次雷击后温度分布图。

从图 12 可知，老化前中后期受潮阀片的冲击后表面温度较正常阀片更高，且受潮阀片老化前中后期表面最高温分别为正常阀片的 1.75、1.35 和 1.31 倍。随着冲击老化，对照组和受潮 8 h 再干燥组阀片冲击温升均升高，而受潮 8 h 阀片先降低再升高，主要由于受潮 8 h 阀片冲击前期内部水分导致阀片温升较高，冲击后高温导致水分蒸发，冲击温升回落至正常，后期由于阀片老化，冲击后温升进一步增长。对照组阀片冲击后高温集中在外边沿区，内部温度分布均匀且较外边沿低；老化前期阀片内部存在高温红点，随着冲击老化，阀片内部高温红点增多，表面温度分布不均匀度提高。受潮组阀片冲击后内部和外边沿温度分布均匀，且随着冲击老化温度分布均匀度变化不大；但受潮 8 h 再干燥阀片冲击后内部出现许多接近室温的蓝紫色低温点。

冲击后阀片表面温度分布的不均匀会造成不同部位存在温升差，较大的温度梯度会在阀片内部产生热应力，从而对阀片内部产生结构性破坏。若设相邻两部位的温升分别为 ΔT_1 与 ΔT_2，则产生的热应力 f 为：

$$f=\frac{Ea}{1-\mu}(|\Delta T_1-\Delta T_2|) \tag{6}$$

式中：E 为杨氏模量，取 6.897×10^7 kPa；a 为热膨胀系数，取 4.86×10^{-6} ℃$^{-1}$；μ 为泊松比，取 0.3；ΔT_1 和 ΔT_2 为阀片相邻两部位的温升。

3 种 ZnO 阀片样品在老化前中后期表面最大温度分布差和热应力如表 2 所示。

由表 2 可知，老化前期受潮 8 h 阀片温度差和热应力最高，主要由于前期水分对阀片冲击温升的影响；老化中后期，对照组阀片由于随着冲击阀片整体温度分布不均匀度的提升，及受潮 8 h 再干燥阀片由于内部低温点的出现，对照组和受潮 8 h 再干燥阀片的温度差较老化前期有明显提高。

3.2 受潮对 ZnO 阀片多重雷击破坏形式分析

阀片的热应力临界值一般取 17.2~48.3 MPa[23]，阀片遭受破坏性热应力(阀片热应力大于热应力临界值)概率 P 的表达式为：

$$P=\frac{f-f_1}{f_2-f_1} \tag{7}$$

式中：f 为阀片热应力；f_1 为热应力临界最小值，取 17.2 MPa；f_2 为热应力临界最大值，取 48.3 MPa；P 为阀片遭受破坏性热应力，其中 P>0，否则 P=0。根据式(7)得到 3 种 ZnO 阀片样品在老化前中后期遭受破坏性热应力概率如表 3 所示。

对照组、受潮 8 h 和受潮 8 h 再干燥阀片 4 重雷击后试品外观如图 13 所示，通过图 13 可以看出 3 类阀片的外观损坏主要集中在阀片的外边沿区，这与电流的集肤效应有关[12]，集肤效应导致阀片外边沿温度高于内部，从而使阀片内外产生明显的温度差，较大的温度梯度会在使阀片产生较高的热应力，从而破坏阀片外观结构。

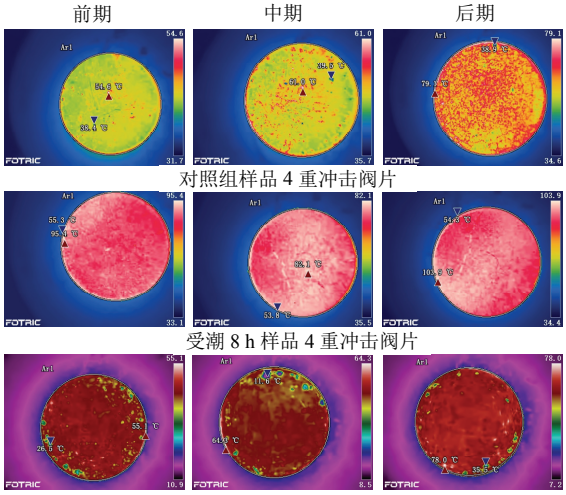


图 12 3 种阀片 4 重雷击后表面温度分布图

Fig.12 Surface temperature distribution after 4 lightning strikes for three valve samples

表 2 3 种阀片样品老化前中后期最大温度差和热应力

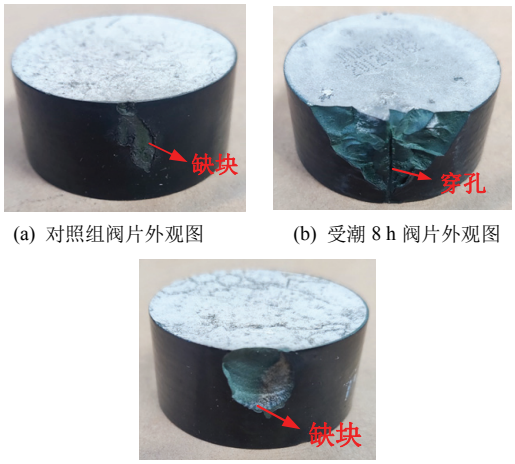
Table 2 Maximum temperature difference and thermal stress before, during and after ageing of three valve samples

样品	前期		中期		后期	
	温度差/℃	热应力/kPa	温度差/℃	热应力/kPa	温度差/℃	热应力/kPa
对照组	16.2	7 757.4	21.5	10 295.3	40.2	19 259.7
受潮 8 h	40.1	19 201.8	28.3	13 551.4	49.6	23 750.9
受潮 8 h 再干燥	28.6	13 695.1	52.7	25 235.3	42.5	20 351.1

表 3 3 种阀片样品老化前中后期遭受破坏性热应力概率

Table 3 Probability of damaging thermal stress to three valve samples before, during and after ageing

样品	前期概率/%	中期概率/%	后期概率/%
对照组	0	0	6.6
受潮 8 h	6.4	0	21.1
受潮 8 h 再干燥	0	25.8	10.1



(a) 对照组阀片外观图　(b) 受潮 8 h 阀片外观图

(c) 受潮 8 h 再干燥阀片外观图

图 13　3 种阀片 4 重雷击后试品外观图

Fig.13　Appearance of the test piece after 4 lightning strikes on three valve samples

统计整个实验过程中阀片的破坏形式，可大致分成 3 类：(1)由于 U_{1mA} 超过标准要求认定阀片损坏，但阀片无明显外观缺陷；(2)阀片外观出现缺块，直流参数明显劣化；(3)阀片外观出现穿孔缺陷，直流参数劣化剧烈，其中类型 2、3 可能出现在同一个阀片上。对上述实验过程中的所有阀片进行样本统计，其中实验阀片破坏类型统计情况如图 14 所示。

结合图 14 和表 3 可知，对照组阀片在 4 重冲击下的破坏类型主要以外观缺块为主；而受潮组阀片在 4 重冲击下破坏类型有穿孔和穿孔+缺块两类，且所有受潮阀片 4 重冲击下均存在穿孔破坏现象；最后针对受潮再干燥组阀片 4 重冲击破坏形式分析，由于受限于样本个数，破坏形式分布规律较为离散，但破坏形式依旧较对照组严重。

3.3　受潮对 ZnO 阀片多重雷击微观特性分析

ZnO 阀片属于一种 II-VI族氧化物陶瓷半导体，其主要成分为氧化锌，添加多种氧化物。微观结构如图 15 所示，一般由氧化锌晶粒、晶界层和尖晶石组成，其中晶粒饱满完整，晶界层清晰分明[24]。

由 3.2 节可知，受潮阀片 4 重冲击下均存在穿孔破坏现象，因此本文针对图 13(b)受潮 8 h 阀片实验后外观图中的穿孔通道进行电镜扫描，测试微观结构如图 16 所示。

通过图 15 和图 16 的对比可以看出，损坏后的受潮阀片穿孔通道内部物质发生溶解，穿孔区域中的晶界层和晶粒均遭到了破坏，已无法分辨。通过图 16(a)可以看出阀片穿孔通道内存在裂痕，其主要

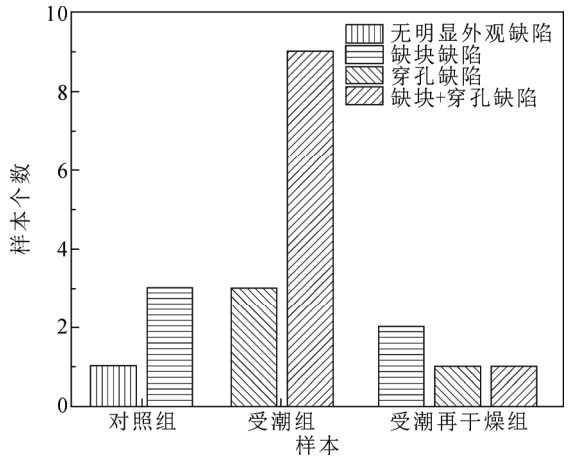
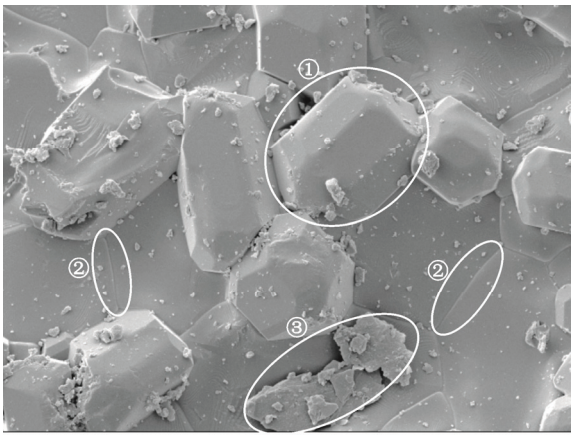


图 14　阀片破坏类型样本统计图

Fig.14　Statistical chart of sample valve damage types



①氧化锌晶粒；②晶界层；③尖晶石

图 15　ZnO 阀片微观结构图

Fig.15　Microstructure of ZnO valve discs

由于冲击瞬间的局部温度差产生的热应力导致。图 16(b)中存在许多细小裂纹及螺纹，裂纹与螺纹的出现说明了损坏样品表面曾有液相物质出现，冲击过后样品冷却过程中溶解的液相物质体积收缩从而导致裂纹和螺纹形成，进一步证明冲击高温对阀片多重雷击损坏过程有着明显影响。而损坏阀片样品内部有着独特的孔洞通道现象，本文认为孔洞的来源是冲击高温下阀片内部水分或者其他物质气化，随着这些气体的扩散而留下了一个个孔洞。综上，受潮阀片多重雷击损坏过程与其冲击下的高温和热应力有着直接联系。

4　结论

1）受潮会使阀片 U_{1mA} 下降，其次对受潮阀片再干燥后阀片的 U_{1mA} 存在恢复现象，但 U_{1mA} 的恢复为不完全恢复；受潮使 ZnO 阀片多重雷击耐受性

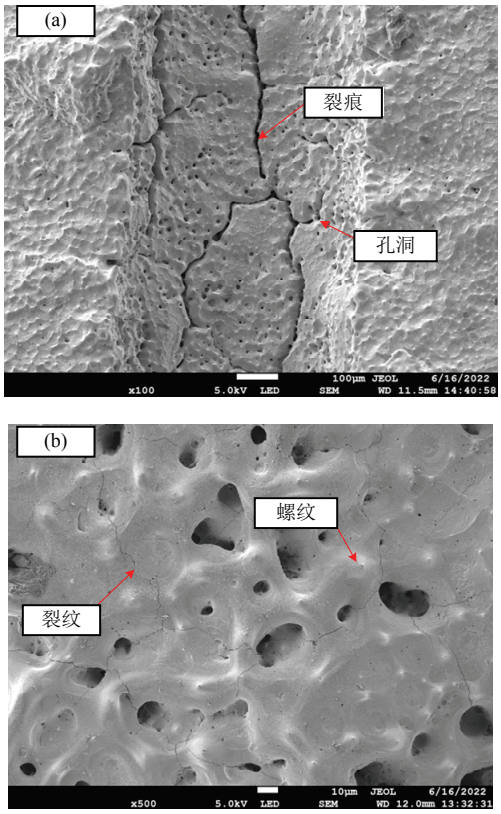


图 16 ZnO 阀片穿孔通道区域微观结构图

Fig.16 Microstructure of the perforated channel area of the ZnO valve sheet

能下降，受潮阀片多重雷击冲击损坏速率较对照组最高提升了 750%；受潮再干燥阀片较受潮阀片多重雷击耐受性能存在恢复，但仍低于对照组阀片。

2）4 重雷击下受潮阀片较正常阀片表面温度更高，其中表面最高温最大为正常阀片的 1.75 倍，其次受过潮的阀片表面温度的分布更均匀，阀片内部与外边沿温升相近；由于受潮阀片冲击过程中内部水分高温蒸发，其表面温升随冲击过程先下降再上升；其次受潮阀片多重冲击破坏形式更加剧烈，且均存在穿孔现象。

3）阀片受潮劣化主要由其内部微裂纹与水分共同形成的高电导电阻通道导致，并会对阀片造成随干燥而恢复的可逆缺陷和腐蚀性不可逆缺陷；受潮阀片多重雷击劣化与其冲击高温和热应力有直接关系，且损坏阀片的微观结构出现明显劣变。

参考文献 References

[1] 陈维江，陈家宏，谷山强，等. 中国电网雷电监测与防护亟待研究的关键技术[J]. 高电压技术，2008，34(10)：2009-2015.
CHEN Weijiang, CHEN Jiahong, GU Shanqiang, et al. Key technologies of lightning detection and protection in China power grid[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(10): 2009-2015.

[2] 郭 蕾，刘 聪，陈 伟，等. 基于暂态接地电阻建模的输电线路雷击响应研究[J]. 电网技术，2023，47(7)：3001-3009.
GUO Lei, LIU Cong, CHEN Wei, et al. Lightning Strike Response of Transmission Lines Based on Transient Earth Resistance Modelling[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 3001-3009

[3] 杜 勇，黄良灿，金 哲，等. 基于 EGM 模型的输电通道雷电绕击风险数字化评估现状与展望[J]. 高电压技术，2022，48(10)：3900-3909.
DU Yong, HUANG Liangcan, JIN Zhe, et al. Review and expectation of lightning shielding failure risk digital evaluation for transmission lines based on EGM[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3900-3909.

[4] 程 祥，陶霰韬，叶 刚，等. 连续雷电冲击下的变压器油纸绝缘老化特性[J]. 高电压技术，2023，49(5)：1958-1966.
CHENG Xiang, TAO Xiantao, YE Gang, et al. Aging characteristics of transformer oil-paper insulation under continuous lightning impulses[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 1958-1966.

[5] 李鹏飞，张春龙，吕东波，等. 多脉冲雷电冲击下金属氧化物的破坏形式[J]. 高电压技术，2017，43(11)：3792-3799.
LI Pengfei, ZHANG Chunlong, LÜ Dongbo, et al. Failure modes of metal oxide arrestor under the multi-pulse lightning surges[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3792-3799.

[6] LI C Y, ZHANG C L, ZHANG G, et al. Analysis of the failure mode of surge protector under multi-pulse lightning strikes and its mechanism[J]. Energy Reports, 2022, 8 Suppl 13: 487-497.

[7] 秦 锋，陈 伟，王旭桐，等. 强电磁脉冲下金属氧化物避雷器瞬态响应特性[J]. 高电压技术，2022，48(8)：3326-3333.
QIN Feng, CHEN Wei, WANG Xutong, et al. Transient response characteristics of metal oxide arrester under strong electromagnetic pulse[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3326-3333.

[8] 张 迪，张丕沛，张军阳，等. 基于 ANSYS 的 1 000 kV 金属氧化物避雷器不同运行状况下电位分布的仿真计算[J]. 高电压技术，2018，44(5)：1660-1667.
ZHANG Di, ZHANG Pipei, ZHANG Junyang, et al. Simulation calculation of potential distribution of 1 000 kV metal oxide arrester under different conditions using ANSYS[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1660-1667.

[9] 史志强，邓 维，罗日成，等. 氧化锌避雷器受潮与电气参数的关系[J]. 高压电器，2019，55(4)：233-238，244.
SHI Zhiqiang, DENG Wei, LUO Richeng, et al. Relation between moisture and electrical parameters of zinc oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 233-238, 244.

[10] HARYONO T，SIRAIT K T，TUMIRAN，et al. 多次雷电冲击对氧化锌避雷器阀片性能的影响(英文)[J]. 高电压技术，2011，37(11)：2763-2771.
HARYONO T, SIRAIT K T, TUMIRAN, et al. Effect of multiple lightning strikes on the performance of ZnO lightning arrester block[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(11): 2763-2771.

[11] 肖 扬，杨仲江，刘 健，等. 高电压多脉冲冲击下单片与双片并联的 MOV 性能[J]. 中国电力，2016，49(10)：55-59，73.
XIAO Yang, YANG Zhongjiang, LIU Jian, et al. Performance analysis of single and parallel ZnO varistor under multiply strokes[J]. Electric Power, 2016, 49(10): 55-59, 73.

[12] 张 宁. ZnO 压敏陶瓷在电场作用下的老化研究[D]. 贵阳：贵州大学，2018.
ZHANG Ning. Study on aging of ZnO varistor ceramics under the action of electric field[D]. Guiyang, China: Guizhou University, 2018.

[13] 周利军，魏仁伟，刘 聪，等. 多重雷击下氧化锌避雷器的冲击老

化特性[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3507-3516.
ZHOU Lijun, WEI Renwei, LIU Cong, et al. Impact aging characteristics of zinc oxide arrester under multiple lightning strikes[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3507-3516.

[14] 谭佳雨. 基于电气及介电特性的金属氧化物避雷器老化受潮状态分析[D]. 重庆：重庆大学，2019.
TAN Jiayu. Moisture and aging level evaluation of MOA based on electrical and dielectric properties[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2019.

[15] 王建文，邓一鸣，杨　明，等. ZnO 压敏电阻器耐潮湿性能影响因素的研究[J]. 传感器技术，2000，19(2)：13-16.
WANG Jianwen, DENG Yiming, YANG Ming, et al. Study on the influence factor of the humidity resistance of ZnO varistor[J]. Journal of Transducer Technology, 2000, 19(2): 13-16.

[16] 邓　维，史志强，罗日成，等. 500 kV 氧化锌避雷器电阻片温度分布特性研究[J]. 高压电器，2017，53(9)：192-197.
DENG Wei, SHI Zhiqiang, LUO Richeng, et al. Temperature distribution characteristics of 500 kV zinc oxide arrester resistance sheet[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(9): 192-197.

[17] 高　峰，郭　洁，徐　欣，等. 交流金属氧化物避雷器受潮与阻性电流的关系[J]. 高电压技术，2009，35(11)：2629-2633.
GAO Feng, GUO Jie, XU Xin, et al. Relation between resistive current and MOA affected with damp[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2629-2633.

[18] 周　龙，文远芳，詹琼华. 金属氧化物避雷器受潮时的绝缘特性分析[J]. 绝缘材料通讯，1997(5)：25-27.
ZHOU Long, WEN Yuanfang, ZHAN Qionghua. Analysis of insulation characteristics of metal oxide surge arresters when subjected to moisture[J]. Insulation Materials Communication, 1997(5): 25-27.

[19] 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. 雷电防护　第 1 部分：总则：GB/T 21714.1—2015[S]. 北京：中国标准出版社，2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Protection against lightning—part 1: general principles: GB/T 21714.1—2015[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2016.

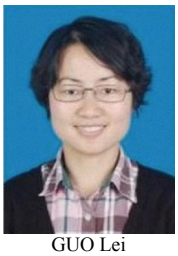
[20] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 交流无间隙金属氧化物避雷器：GB/T 11032—2020[S]. 北京：中国标准出版社，2020.
State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metal-oxide surge arresters without gaps for a. c. systems: GB/T 11032—2020[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2020.

[21] 裴根林，何金良. ZnO 非线性电阻内部的微裂纹在老化中的作用[J]. 电瓷避雷器，2002(1)：28-30，32.
PEI Genlin, HE Jinliang. Effects of interior micro-cracks on the aging of ZnO nonlinear varistors[J]. Insulators and Surge Arresters, 2002(1): 28-30, 32.

[22] SONDER E, LEVINSON L M, KATZ W. Role of short-circuiting pathways in reduced ZnO varistors[J]. Journal of Applied Physics, 1985, 58(11): 4420-4425.

[23] 章会良. ZnO 压敏电阻器大电流性能的研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2007.
ZHANG Huiliang. Research on the large current capacity of zinc oxide varistors[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2007.

[24] 张　欣. 基于多种老化模型的氧化锌压敏电阻损坏模式研究[D]. 南京：南京信息工程大学，2015.
ZHANG Xin. Research on failure mode of zinc oxide varistor based on multiple aging model[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science & Technology, 2015.



郭　蕾(通信作者)
1981—，女，博士，教授，硕导
主要从牵引供电、电力系统建模和电能质量分析等方面的研究工作
E-mail: guolei_mail@swjtu.cn

GUO Lei
Ph.D., Professor
Corresponding author



刘　聪
1998—，男，硕士生
主要从事高电压与绝缘技术的研究工作
E-mail: 1162733728@qq.com

LIU Cong

收稿日期　2023-03-23　修回日期　2024-06-20　　编辑　曹昭君