

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2015.11.026

# 氧化锌压敏电阻在不同电流 环境下老化规律研究<sup>①</sup>

王 星<sup>1,2</sup>, 杨仲江<sup>1</sup>, 栾 健<sup>2</sup>, 王 迪<sup>3</sup>

1. 南京信息工程大学 大气物理学院, 南京 210044;

2. 辽宁省防雷技术服务中心, 沈阳 110001; 3. 辽宁省气象服务中心, 沈阳 110001

**摘要:** 通过试验室模拟氧化锌压敏电阻在不同电流环境下的老化过程, 依据氧化锌压敏电阻的非线性特性与双肖特基势垒理论分析试验现象, 得到其老化规律: 在直流老化中正反向压敏电压与漏电流参数呈不对称变化, 温度线性上升; 交流老化中正反方向压敏电压与漏电流呈对称变化, 温度呈上升—稳定—上升的趋势; 冲击老化中压敏电压呈上升—稳定—急速下降的趋势, 漏电流以稳定—急速上升的趋势变化, 非线性系数始终下降的变化规律. 该结论在氧化锌压敏电阻避雷器的使用和检测中具有一定参考意义.

**关键词:** 氧化锌压敏电阻; 直流; 交流; 冲击电流; 老化劣化

**中图分类号:** P427.42

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9868(2015)11-0175-08

雷电是一种以放电为主, 集多种物理现象相结合的雄伟壮观且破坏力巨大的自然现象. 据有关部门统计, 每年电力系统由于雷电直接和间接造成的经济损失高达数十亿元<sup>[1-3]</sup>. 电涌保护器(SPD)是目前对低压电源系统雷电防护最有效的手段之一. 氧化锌压敏电阻以其优良的非线性特性、响应时间快、吸收大电流能力强、限制电压低和无续流等特点, 使其成为电涌保护器的核心元器件, 现在已被广泛应用于大型电气设备、电力系统、低压电源系统和信息系统的电涌防护中<sup>[4-8]</sup>. 而 SPD 在不同电流环境下运行时存在老化劣化的问题, 当 SPD 老化到一定程度时, 必须将其及时更换, 否则会由于 SPD 击穿造成电源系统短路从而引发严重事故<sup>[9-12]</sup>.

目前国内外学者对于氧化锌压敏电阻的老化机理进行了大量的研究工作. 清华大学吴维韩等人<sup>[13]</sup>在《金属氧化物非线性电阻特性和应用》一书中, 系统地对氧化锌压敏电阻的基础理论、导电机理、冲击破坏机理、老化机理做了详细的阐述; Eda 等人<sup>[14-15]</sup>发现在进行老化试验时, 氧化锌压敏电阻的温度越高, 冷却后测得的热激电流的越大, 此外介电常数的改变会导致压敏片电容值的变化, 他们利用离子迁移模型解释了在直流电压作用下正反偏肖特基势垒高度不对称而引起的极性效应; 张从春等人<sup>[16]</sup>在离子迁移理论的基础上提出了线性链理论, 即氧化锌压敏电阻的老化过程是由于晶界层被击穿, 出现不可逆的现象, 从而形成了稳定的抗性线性链, 导致非线性特征逐渐消失.

本文依据氧化锌压敏电阻的非线性特性与双肖特基势垒理论, 利用南京信息工程大学雷电冲击试验室设备, 模拟氧化锌压敏电阻在直流、交流以及冲击电流 3 种环境下的老化过程, 记录样品静态参数以及温

① 收稿日期: 2014-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41175003); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD).

作者简介: 王 星(1979-), 女, 辽宁辽中人, 硕士研究生, 主要从事雷电防护科学与技术方向的研究.

度的变化,对比分析得到老化规律.

## 1 氧化锌压敏电阻特性

### 1.1 氧化锌压敏电阻基本结构

氧化锌压敏电阻属于最常见的金属氧化物压敏电阻,是以电阻率为  $0.001 \sim 0.1 \Omega \cdot m$  和尺寸为  $10 \sim 30 \mu m$  氧化锌晶粒为主要成分的半导体陶瓷块.临近的氧化锌颗粒交界处会形成二极管效应.由于存在大量的杂乱颗粒,使得氧化锌压敏电阻等同于大量背向相连的二极管组成的结合体.压敏陶瓷内部晶界位置中含有大量金属氧化物形成大量界面态,这样每一微观单位就是一个背靠背肖特基势垒<sup>[17]</sup>.

### 1.2 双肖特基势垒理论

双肖特基势垒模型是在半导体内部晶粒之间晶界层的位置形成的半导体-半导体接触,由一对背靠背的肖特基势垒组成.模型中正反两侧的势垒都有可能受到来自通过半导体电流的影响而发生畸变,在不同的外部条件下,当双肖特基势垒中单侧或两侧势垒畸变到一定程度时会造成压敏电阻特性的改变.

### 1.3 压敏电阻老化判定机理

由于压敏电阻在老化过程中非线性特性会不断发生变化而导致压敏电阻片逐渐劣化为线性电阻,从而失去保护能力.为保证后级线路中的设备处于有效的保护中而必须及时更换老化失效的压敏电阻器.根据相关规定要求,将压敏电阻、漏电流等重要参数的测试数值变动超过 10% 的压敏电阻判定为已经失效的压敏电阻.

## 2 不同环境下氧化锌压敏电阻老化机理及试验分析

### 2.1 直流老化试验

#### 2.1.1 直流老化机理

ZnO 压敏电阻的  $I-U$  特性主要是由晶粒边界的肖特基势垒控制,所以经直流负荷后  $I-U$  特性曲线的蜕变应归因于肖特基势垒的变化.在双肖特基势垒中,对  $I-U$  特性曲线起主导作用的是反向偏压肖特基势垒,故蜕变后反方向(加电压方向与负荷时的相反)  $I-U$  曲线的变化要用负荷时的正向偏压肖特基势垒的蜕变来解释;而正方向  $I-U$  曲线的变化就得用反向偏压肖特基势垒的蜕变来解释<sup>[18-19]</sup>.

#### 2.1.2 直流老化试验器材

FC-2G 防雷元件测试仪,该仪器适用于氧化锌压敏电阻与金属陶瓷放电管等过压防护元件直流参数的测量.

LPL-1 型 SPD 直流型热稳定测试仪,由南京信息工程大学自主研发,是一种集检测、科研、教学于一体的多功能试验仪器.该仪器操作简便数据显示直观,适用于模拟氧化锌压敏电阻在直流条件下的老化劣化环境,实时监控压敏电阻器的老化劣化过程.

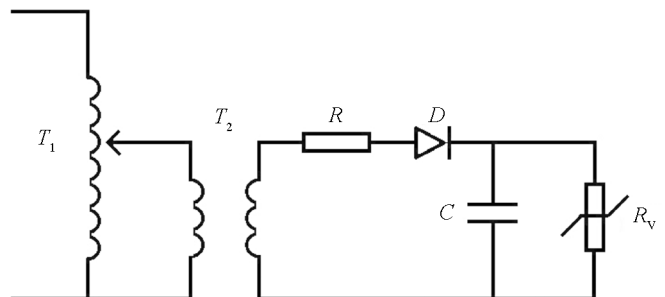
辅助器材:计时器、红外测温枪、电烙铁、焊锡丝、导线若干.

试验对象是同生产批次同型号规格的三片压敏电阻片,其主要参数是:最大持续工作电压  $U_c = 420 V$ ,标称放电电流  $I_n = 20 kA$ ,最大放电电流  $I_{max} = 40 kA$ ,电压保护水平  $U_p = 2 kV$ .

需测试的静态参数有:压敏电阻、漏电流、试样的温度.

#### 2.1.3 直流老化试验过程与分析

直流老化试验设备接线图见图 1.



$T_1$ . 调节变压器;  $T_2$ . 升压变压器;  $R$ . 电阻;

$D$ . 二极管;  $C$ . 电容;  $R_v$ . 压敏电阻.

图 1 直流老化试验接线图

在直流环境下采用热稳定的方法使压敏电阻片加速老化. 将导线焊接到压敏电阻片两级的接线端子上, 导线的另一端分别连接到 LPL-1 型 SPD 热稳定测试仪的接线端. 在试验中试样  $S_1, S_2, S_3$  两端的电流值分别为 20, 30, 40 mA, 电流方向为正极到负极施加 10 次, 每次施加时间为 1 min, 每次施加结束后冷却至室温并分别从正、负两个方向测量压敏电阻片试样的各项相关参数(表 1).

表 1 压敏电阻直流老化前后静态参数数据统计表

阶 段	方向	压敏电压/V			漏流/ $\mu$ A		
		$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_1$	$S_2$	$S_3$
老化前	正向	628.6	627.8	626.0	1.0	1.8	1.5
	反向	631.0	628.2	628.4	1.4	1.6	1.4
老化后	正向	647.9	655.9	663.6	12.0	19.8	71.5
	反向	637.3	639.8	641.7	25.3	48.8	71.5

从表 1 可以看出, 压敏电阻片  $S_1, S_2, S_3$  在直流老化前后正向与反向的压敏电压与漏电流均有增加, 而且在不同极性电流环境下增加程度各有不同. 比较压敏电压和漏电流的数值与其变化量可以看出在直流老化过程中, 压敏电阻片正向与反向压敏电压变化幅度不同, 并且正向数值变化量要高于反向的变化量. 比较相同测量方向不同电流强度下的数值得出: 电流强度越大, 压敏电压的变化量也越大. 产生这种变化规律的原因是双肖特基势垒由于单向的电流正反两侧电子不等量的积累与跃迁引起正反肖特基势垒高度的不同增长, 肖特基势垒高度的不对称增长引起压敏电阻正反方向压敏电压不同速度变化.

从表 2 可以看出, 压敏电阻片  $S_1, S_2, S_3$  在试验过程中温度不断升高, 在累计 10 min 的试验内  $S_1$  的温度从试验初期的 60  $^{\circ}$ C 增至试验结束后的 146.8  $^{\circ}$ C, 试验后压敏电阻片完好, 并且有继续升温的趋势; 试样  $S_2$  仅用了共计 5 min 就从试验初的 71.4  $^{\circ}$ C 快速增长至 168.8  $^{\circ}$ C, 随后压敏电阻片外部阻燃材料明显变形后试样发黑熔穿; 试样  $S_3$  仅通电共 3 min 就从试验初期的 105.5  $^{\circ}$ C 猛增至 175.6  $^{\circ}$ C 的高温, 随后在试样外部阻燃材料突然有明显融化趋势后压敏电阻炸裂.

表 2 压敏电阻直流老化过程中各试样温度统计表

时间/ min	温 度/ $^{\circ}$ C			时间/ min	温 度/ $^{\circ}$ C		
	$S_1$	$S_2$	$S_3$		$S_1$	$S_2$	$S_3$
1	60	71.4	105.5	6	128.6		
2	91.3	116.0	153.3	7	122.9		
3	97.6	129.9	175.6	8	140.0		
4	123.3	142.5		9	150.7		
5	124.9	168.8		10	146.8		

注: 表中空白处表示试样已熔穿或炸裂.

图 2 为压敏电阻直流老化温度趋势图, 结合图 2 比较 3 组试验的试验数据得出: 压敏电阻在直流环境下的老化基本上是一个持续升温且连续老化的过程, 并且所施加的电流强度越大, 压敏电阻从初始状态到完全老化所用的时间越短且温度提升幅度越大.

## 2.2 交流老化试验

### 2.2.1 交流老化机理

在交流电压负荷后,  $I-U$  特性曲线的变化是对称的, 这种对称的变化由肖特基势垒的对称变化

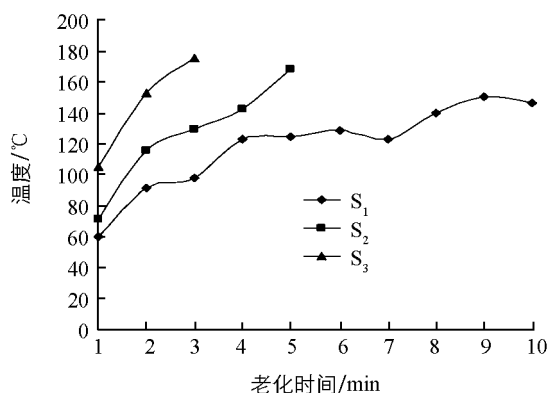


图 2 压敏电阻  $S_1, S_2, S_3$  温度变化趋势图

所决定. 在交流情况下, 在晶界层中正、反方向的电场强度相等, 所以由正、反向偏压引起的离子迁移可以相互抵消, 因此晶界层中的离子迁移不会引起  $I-U$  特性的蜕变. 但是在耗尽层中, 正、反向偏压所产生的电场强度相差是很大的, 正向偏压时电场较弱, 其迁移离子的数量很少; 反向偏压时电场较强, 迁移离子的数量较多, 因此正、反向偏压所引起的迁移离子就不能相互抵消, 于是造成了肖特基势垒的对称蜕变, 蜕变后的  $I-U$  特性曲线也是对称的<sup>[20]</sup>.

### 2.2.2 交流老化试验器材

FC-2G 防雷元件测试仪. LPL-1 型 SPD 交流型热稳定测试仪. 辅助器材: 计时器、红外测温枪、电烙铁、焊锡丝、导线若干.

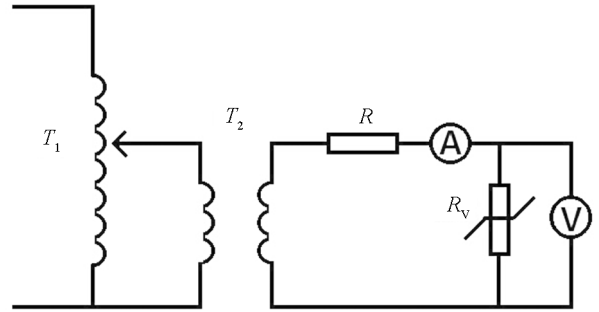
试验对象是同生产批次同型号规格的五片压敏电阻片, 其主要参数是: 最大持续工作电压  $U_C = 420$  V, 标称放电电流  $I_n = 20$  kA, 最大放电电流  $I_{max} = 40$  kA, 电压保护水平  $U_P = 2$  kV.

需测试的静态参数有: 压敏电阻、漏电流、试样温度.

### 2.2.3 交流老化试验过程与分析

交流老化试验设备接线图见图 3.

在交流环境下采用热稳定的方法使压敏电阻片加速老化. 将导线焊接到压敏电阻片两级的接线端子上, 导线另一端分别连接到 LPL-1 型 SPD 热稳定测试仪的两个接线端. 使试样  $S_1-S_5$  两端的电流值分别达到 10, 20, 30, 40, 50 mA, 总共进行 3 次交流老化试验, 每次持续 10 min, 每分钟记录一次当前温度与电压数值, 每次施加结束后冷却至室温并分别进行正、负两个方向测量试样的各项相关参数(表 3).



$T_1$  调节变压器;  $T_2$  升压变压器;  $R$  电阻;  $R_V$  压敏电阻.

图 3 交流老化试验接线图

表 3 交流老化前后压敏电阻静态参数统计表

阶段	方向	压敏电压/V					漏流/ $\mu$ A				
		$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$
老化前	正向	618.7	600.3	617.3	604.1	600.5	1.7	1.1	1.3	1.3	1.0
	反向	619.2	599.5	621.2	605.0	604.2	1.6	1.3	1.2	1.7	1.2
第一次老化	正向	642.8	620.9	644.6	604.4	604.2	1.5	1.3	20.4	71.5	71.5
	反向	645.6	624.4	642.4	605.1	603.9	1.4	1.2	20.2	71.5	71.5
第二次老化	正向	—	625.0	637.7	—	—	—	1.5	71.5	—	—
	反向	—	626.6	640.1	—	—	—	1.5	71.5	—	—
第三次老化	正向	—	630.0	640.5	—	—	—	1.6	71.5	—	—
	反向	—	628.9	643.3	—	—	—	1.6	71.5	—	—

从表 3 中可以看出老化前后每个试样正反方向的压敏电压与漏电流基本保持同步对称变化, 即同时增大或减小, 而且每次老化正反增大或减小的变化量基本保持一致. 在交流环境中由于电流方向的周期性变化, 导致了电流对正反两侧肖特基势垒周期性的交替影响. 正因为这种交替式的影响导致了正反两侧的肖特基势垒在老化过程中保持交互增长同步畸变的状态. 这也是压敏电阻交流老化过程中对称变化的主要原因.

由于在第二次老化试验之后压敏电阻片  $S_1, S_4, S_5$  均已熔穿或炸裂, 所以在此对数据较为完整的压敏电阻片  $S_2, S_3$  进行后续研究, 并用第一次试验结束时炸裂的  $S_4$  的参数作为对比. 通过在压敏电阻片  $S_2, S_3$  的第一次老化试验中测量试样的电压与温度得到表 4(其中  $S_2, S_3, S_4$  所加电流值分别为 20, 30 和 40 mA).

表 4 氧化锌压敏电阻片  $S_2, S_3, S_4$  温度统计表

时间/ min	温 度/ $^{\circ}\text{C}$			时间/ min	温 度/ $^{\circ}\text{C}$		
	$S_2$	$S_3$	$S_4$		$S_2$	$S_3$	$S_4$
1	48.9	67.7	85.2	6	95.9	151.5	184.5
2	65.6	94.1	109.8	7	110	157.3	197
3	81.5	114.5	138.2	8	100.7	170	195.6
4	91.8	115.3	138.7	9	129.8	176.7	
5	100.3	125	164.2	10	138.9	188.1	

从图 4 中可以看出氧化锌压敏电阻片  $S_2, S_3, S_4$  在不同电流强度下温度变化趋势,  $S_2, S_3, S_4$  在老化初期温度变动幅度与升温趋势较大, 升温一段时间后压敏电阻片温度变化幅度降低直至基本维持在一定数值; 在持续了一段时间的稳定期后  $S_4$  的温度突然升高, 并且升高幅度较大, 在接近  $200^{\circ}\text{C}$  时压敏电阻片发生熔穿损坏。

从试验现象中可以得出: 交流老化过程中压敏电阻片的温度呈升高—稳定—再升高的过程, 老化初期压敏电阻片温度升高明显, 这时压敏电阻片的发热量高于散热量, 内部热量开始积累直至温度升高到一个固定数值. 此时压敏电阻片内的温度使试片发生老化的同时又起到了热处理作用加速压敏电阻老化过程. 在稳定期持续到一定程度时老化进行到了最后阶段, 此时热崩溃现象发生, 压敏电阻片温度由稳定继续升高到一个更高的数值直至试片失效, 而且这个数值的大小决定了压敏电阻片是否熔穿或炸裂。

## 2.3 冲击老化试验

### 2.3.1 冲击老化机理

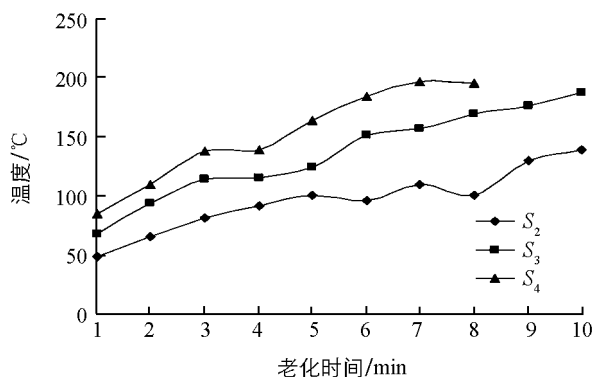
在冲击电流负荷时的蜕变情况与上述交、直流负荷时的蜕变情况有所不同. 在冲击负荷时, 产品经受着大电流的冲击作用, 虽然脉冲宽度很窄(数十微秒到  $2\text{ ms}$ ), 但是, 产品局部的温升是很高的. 由于电压主要施加在晶粒边界区域, 电流密度会变大并首先在晶粒边界区域引起温升, 正是这种温升对  $I-U$  特性的蜕变起了极大的作用. 在脉冲期间, 若脉冲宽度很窄(小于  $2\text{ ms}$ ), 则晶粒边界区域的温升不可能立即传导到晶粒内部, 造成晶粒体内外的非均匀的温度分布, 因此脉冲宽度小于  $2\text{ ms}$  的冲击试验, 主要是针对晶粒边界区(包括晶界层和耗尽层)进行考核. 但是, 当脉冲宽度大于  $2\text{ ms}$  时, 边界区域的温升可以在脉冲期间传到晶粒内部, 晶粒内外的温度分布是均匀的, 这种温度的均匀分布是迅速热传导的结果. 热传导是与产品的显微结构有关的, 倘若产品质量不高, 使热导率下降, 那么经脉冲时边界区域的热量来不及传导至晶体内部, 就会造成产品失效或破坏, 因此大于  $2\text{ ms}$  脉冲宽度的冲击试验, 考核的是显微结构及其均匀性<sup>[21-24]</sup>.

### 2.3.2 冲击老化试验器材

冲击试验主要的试验仪器是冲击试验平台, 试验平台由以下设备组成:

FC-2G 防雷元件测试仪, 该仪器适用于氧化锌压敏电阻与金属陶瓷放电管等过压防护元件直流参数的测量.

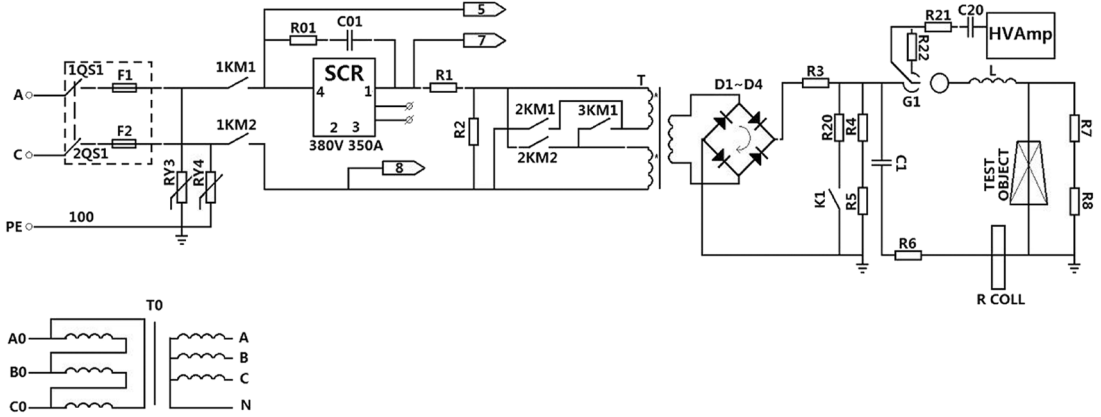
SJTV-ICG-200-10 型冲击大电流发生器, 在显示屏上可以完成设定冲击发生器的直流充电电压、充电时间、触发放电球距、触发方式和极性自动换接等, 并监控和测量其运行状态. 计算机通过光纤与 TDS 系列数字示波器通讯, 示波器采集并记录冲击发生器的输出波形, 计算机进行后续数据处理, 得到符合标准定义的参数.

图 4  $S_2, S_3, S_4$  温度变化趋势

选择同一厂家生产的同生产批次同型号同尺寸的氧化锌压敏电阻产品若干,其主要参数是:最大持续工作电压  $U_c=420\text{ V}$ ,标称放电电流  $I_n=20\text{ kA}$ ,最大放电电流  $I_{\max}=40\text{ kA}$ ,电压保护水平  $U_p=2\text{ kV}$ .

### 2.3.3 冲击老化试验过程与分析

图 5 为冲击老化试验设备接线图.当冲击设备发生  $8/20\ \mu\text{s}$  的冲击电流波,幅值为  $20\text{ kA}$  时,对试样进行多次冲击得到表 5 中数据.



$8/20\ \mu\text{s}$  时,  $C1: 40\ \mu\text{F}/72\text{ kV}$ ,  $R6: 0.2\ \Omega$ ,  $L=1$ ;  $10/350\ \mu\text{s}$  时,  $C1: 640\ \mu\text{F}/18\text{ kV}$ ,  $R6: 0.74\ \Omega$ .

图 5 冲击老化试验接线图

表 5 冲击过程中压敏电压、漏电流和非线性系数变化

冲击次数	压敏电压/ V	漏电流/ $\mu\text{A}$	非线性系数	冲击次数	压敏电压/ V	漏电流/ $\mu\text{A}$	非线性系数
5	718.1	0.73	57.00	30	750.0	9.62	17.67
10	730.7	1.32	47.86	35	740.0	14.12	11.9
15	734.3	1.18	49.53	40	727.0	20.65	6.16
20	739.6	2.44	38.47	45	710.0	25.65	2.88
25	740.2	6.70	23.18	50	520.3	200.13	1.95

从图 6 可以看出:氧化锌压敏电阻在冲击老化过程中压敏电压的变化过程一般经历一个上升—稳定—急速下降的过程,从试验开始到第 6 次冲击之间,压敏电阻的压敏电压从初始的  $628.6\text{ V}$  逐步上升至  $726.9\text{ V}$ ,上升过程比较平缓;在第 6 次冲击知道第 45 次冲击之间,试样的压敏电压基本保持在  $720\text{ V}$  到  $750\text{ V}$  范围内摆动,并保持一个稳定的状态;在第 45 次冲击之后试样的压敏电压急剧下降,在 5 次冲击之内从第 45 次的  $670\text{ V}$  快速降至第 50 次的  $520.3\text{ V}$ .

从图 7 中可见:漏电流的变化基本保持稳定—陡增的趋势,在前 45 次冲击过程中始终稳定保持很小幅度增长的过程,从第一次冲击的  $1.01\ \mu\text{A}$  缓慢增加至第 45 次冲击的  $25.65\ \mu\text{A}$ ,在此区间漏电流始终在  $1.01\ \mu\text{A}$  到  $25.65$  之间缓慢增加,偶有极小浮动;在老化试验的后半漏电流的变化与压敏电压的突变大体保持同步,在第 46 次冲击到第 50 次冲击公 5 次冲击试验之间,压敏电阻片的漏电流从第 45 次的  $25.65\ \mu\text{A}$  剧增至第 50 次的  $200.13\ \mu\text{A}$ ,变化极为剧烈.

从图 8 中可以得到,在压敏电阻冲击老化过程中,虽然有时数据有抖动,但试样的非线性系数  $\alpha$  随冲击的次数增加大体上始终保持不断下降的趋势,从试验初期第一次冲击时的 50 连续下降到第 50 次冲击的 1.95.

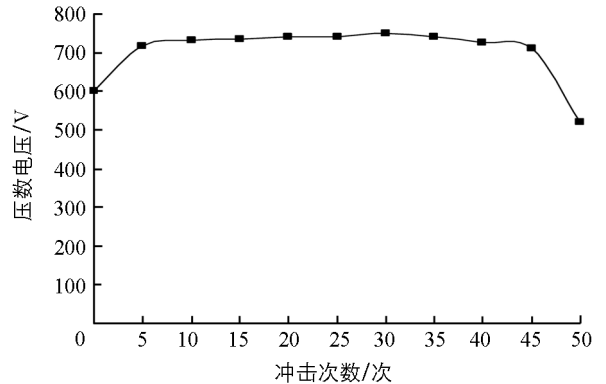


图 6 压敏电压随冲击次数的变化

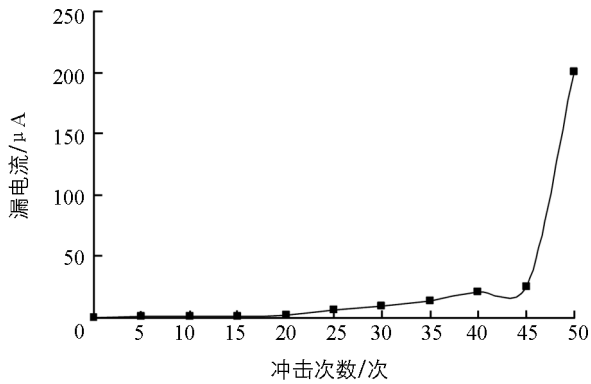


图 7 漏电流随冲击次数的变化

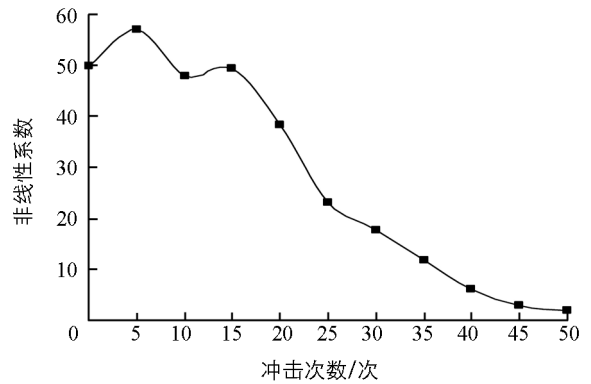


图 8 非线性系数随压敏电压的变化

### 3 结论与讨论

通过以上氧化锌压敏电阻老化试验表明,在不同电流环境下氧化锌压敏电阻的老化呈现不同的规律.

1) 直流老化试验中,氧化锌压敏电阻正反方向的压敏电阻、漏电流等参数呈不对称变化的趋势.样品的温度随老化时间呈直线上升,并且随着电流强度增大,样品老化升温也越快.

2) 交流老化试验中,氧化锌压敏电阻片正反方向的压敏电阻、漏电流等参数保持同步相同幅度的对称变化.样品的温度变化与直流老化不同,呈现升高—稳定—再升高的变化趋势.电流强度越大,压敏电阻老化越快,这一点与与直流老化过程相似.

3) 冲击老化试验中,氧化锌压敏电阻的压敏电压随冲击次数的增加呈现增大—稳定—急剧减小的变化趋势,漏电流则出现平稳少量增加—急剧抬升的现象,非线性系数在试验过程中始终不断下降.与直流老化和交流老化的持续变化不同的是,压敏电阻的冲击老化是一个短时的过程.

由于氧化锌压敏电阻片的配方和工艺也会对其电气性能产生影响,因此本文是在选用相同厂家的氧化锌压敏电阻条件下进行的实验,忽略了试品的工艺条件对于实验结果的影响.

#### 参考文献:

- [1] 马 明,吕伟涛,张义军,等.我国雷电灾害及相关因素分析[J].地球科学进展,2008,23(08):856—865.
- [2] 韩 伟,王建文,王学辉,等.电源线路浪涌保护器(SPD)安全性能的分析探究[J].电瓷避雷器,2008(6):22—30.
- [3] 邢晓东,谢道华,胡明.压敏电阻陶瓷材料的研究进展[J].电子元件与材料,2004,23(2):21—24.
- [4] 李家启,申双和,刘 俊,等.重庆地区地闪活动空间分布及其趋势分析[J].西南大学学报:自然科学版,2012,34(5):77—84.
- [5] 蒋勇军,况明生,李林立,等.重庆市自然灾害的综合区划及评价[J].西南师范大学学报:自然科学版,2003,28(4):627—632.
- [6] 李家启,江孟蜀,王代新,等.基于库仑定律的经验保护角法形成机理分析[J].西南师范大学学报:自然科学版,2012,37(11):28—31.
- [7] 李家启,王代新,江孟蜀,等.基于 IEC62305 避雷针最大保护角法防雷效果分析[J].西南大学学报:自然科学版,2012,34(11):43—46.
- [8] 李家启.基于 LLS 的雷电流参数随海拔变化特征分析[J].西南大学学报:自然科学版,2013,35(5):77—84.
- [9] 栾 健,李家启,肖稳安,等.基于信息扩散理论的雷电天气关注度研究[J].西南师范大学学报:自然科学版,2013,38(9):143—149.
- [10] 栾 健,李家启,肖稳安,等.闪电定位资料的误差订正[C].第九届长三角气象科技论坛,2012.
- [11] 栾 健,李家启,肖稳安,等.闪电定位系统监测小幅度值闪电的特征分析[C].中国气象局第 29 届年会,第十届防雷减灾论坛——雷电灾害与风险评估,2012.
- [12] 李家启,栾 健,王 鹏,等.闪电定位资料质量控制中小幅度值地闪范围的研究[J].高电压技术,2014,40(3):727—731.

- [13] 吴维韩, 何金良, 高玉明. 金属氧化物非线性电阻特性和应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 169—173.
- [14] EDA K, IGA A, MATSUOKA M. Degradation Mechanism of Non-Ohmic zinc Oxide Ceramics [J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(5): 2678—2684.
- [15] EDA K, MATSUOKA M. Thermally Stimulated Current in Non-Ohmic ZnO Ceramics [J]. Journal of Applied Physics, 1977, 16(11): 195—196.
- [16] 张丛春, 周东祥, 龚树萍.  $Sb_2O_3$  掺杂对 ZnO 压敏陶瓷晶界特性和电性能的影响 [J]. 硅酸盐学报, 2001, 29(6): 602—605.
- [17] 李盛涛. ZnO 压敏电阻片的基础研究和技术发展动态 [J]. 电瓷避雷器, 1998(3): 42—48.
- [18] FUJIWARE Y, SHIBUYA Y, IMATAKI M. Evaluation of Surge Degradation of Metal Oxide Surge Arrester [J]. IEEE Trans. on PAS, 1982, 101(4): 978—985.
- [19] KAZUO EDA. Destruction Mechanism of ZnO Varistors Due to High Currents [J]. Journal of Applied Physics, 1984, 56(10): 2948—2955.
- [20] DARVENIZA M, et al. Laboratory Studies of The Effects of Multipulse Lightning Current on Metal Oxide Arresters [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1993(8): 1035—1044.
- [21] GUPTA T K, CARLSON W G. Barrier Voltage and Its Effect on Stability of ZnO Varistors [J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(11): 7401—7409.
- [22] KANAI H, IMAI M. A High-Resolution Transmission Electron Microscope Study of Zinc Oxide Varistors [J]. Journal of Materials Science, 1985, 20(11): 3957—3966.
- [23] 杨仲江, 张 彬. 氧化锌压敏电阻老化过程中非线性系数变化的研究 [J]. 电子元件与材料, 2011, 30(9): 27—30.
- [24] 张 彬, 杨仲江. 直流作用下氧化锌压敏电阻极性效应分析 [J]. 电子元件与材料, 2012, 31(9): 19—22.

## Research on the Degradation of Carbon Resistors in Different Current Conditions

WANG Xing<sup>1,2</sup>, YANG Zhong-jiang<sup>1</sup>,  
LUAN Jian<sup>2</sup>, WANG Di<sup>3</sup>

1. Institute of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Liaoning Lightning Protection Technical Service Center, Shenyang 110001, China;

3. Liaoning Meteorological Service Center, Shenyang 110001, China

**Abstract:** The degradation of carbon resistors was simulated under different current conditions in laboratory. The results of the experiment were analyzed according to the nonlinear characteristics of the carbon resistor and the double Schottky barrier theory. In direct current degradation, forward and reverse varistor voltage and leakage current were asymmetric, and the temperature showed a linear increase. In alternating current degradation, forward and reverse varistor voltage and leakage current were symmetric, and the temperature changed in an increasing-stability-dropping pattern. In impulse current degradation, the varistor voltage showed an increasing-stability-dropping trend and the leakage current exhibited a stability-rocketing trend, while the nonlinear coefficient steadily declined. The above conclusion should be of reference significance in the application and testing of carbon resistor surge protective devices.

**Key words:** carbon resistor; direct current; alternating current; impulse current; degradation

