

# 氧化锌压敏电阻器的失效模式

王茂华<sup>1</sup>, 胡克鳌<sup>1</sup>, 张南法<sup>2</sup>

(1. 上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室, 上海 200030; 2. 常州市创捷防雷电子有限公司, 江苏常州 213016)

**摘要:** 在生产和应用中, 氧化锌压敏电阻器经常出现的几种失效模式为: 与电极层相关的失效, 平均功率过应力失效与受潮失效。通过对这些失效现象的进一步分析和研究, 掌握了产生这些现象的机理和规律, 并可以增加压敏电阻的电极层厚度, 降低其电阻; 对于 34 mm×34 mm 的 SPD 用电阻片, 可用  $I_n$  为 15 kA 作为标称放电电流; 受潮失效后的压敏电阻, 不会导致电路故障, 通过侧面绝缘处理, 可防止受潮失效。

**关键词:** 无机非金属材料; ZnO 压敏电阻; 失效模式; 机理

**中图分类号:** TN306      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-2028 (2005) 09-0062-03

## Failure Modes of ZnO-based Varistor

WANG Mao-hua<sup>1</sup>, HU Ke-ao<sup>1</sup>, ZHANG Nan-fa<sup>2</sup>

(1. State Key Lab of MMCs, Shanghai Jiaotong University Shanghai 200030, China; 2. Changzhou Chuangjie Lightning Protection Co., Ltd, Changzhou 213016, China)

**Abstract:** Studied were several failure modes frequently occurring in the production and application of zinc oxide varistors, including electrode-related failures, average power dissipation overstress failures, moisture degradation. The experiments discover the characteristics and mechanism of the above-mentioned failure modes, and the electrode's resistance of varistors can be decreased by increasing its thickness; for the varistors used in surge protective devices,  $I_n=15$  kA can be taken for the standard impulse current; the moisture degradation of varistors can not give rise to the electrical circuit failure, and the moisture degradation of varistors can be prevented by insulation treatment in the side.

**Key words:** inorganic non-metallic materials; ZnO varistor; failure modes; mechanism

ZnO 压敏电阻器是一种陶瓷半导体器件, 用于保护线路免遭暂态过电压的损害。自从 1968 年日本松下公司开发出 ZnO 压敏电阻器, 进入工业化生产以来, 已有 30 多年的历史。由于其造价低廉, 制作方便, 且有非线性系数大, 残压低, 响应时间快, 漏流小等优良性能, 故在通信、电力、家电、工业控制等领域得到了广泛的应用。随着电子信息技术的不断发展, 对过电压的保护需要更加迫切, 所以在生产和使用过程中, 必须提高产品的可靠性, 避免失效现象的产生, 因此研究 ZnO 压敏电阻器的失效模式, 掌握其失效规律, 从生产技术和应用技术两方面来降低压敏电阻器在使用中的失效概率, 有着重要的经济和工程技术意义。

已往的文献资料, 对电阻体在电应力作用下的老化失效研究得比较多, 对其它失效现象, 则很少涉及,

笔者论述了实际生产中经常出现的三种失效模式, 并介绍了实验研究的结果。

### 1 与电极层相关的失效

由于金属银具有很好的导电性和导热性, ZnO 压敏电阻器的电极层是银, 对银电极层的基本要求:

(1) 银电极层的方阻  $\leq 5 \text{ m}\Omega/\square$ , 这个电阻包括电极层的本体电阻和电极层与电阻体的接触电阻两部分;

(2) 银层对陶瓷表面的附着力  $\geq 343 \text{ N/cm}^2$ ;

(3) 银电极层与引线(引片)的可焊性好;

(4) 银电极层的制备工艺不会破坏电阻体的技术性能。

银电极层的电阻值高, 大电流冲击时, 电阻体表

面在极短的时间里, 将会产生高热, 引起环氧树脂包封层开裂, 引线周围银层烧蚀, 严重时电阻体炸裂, 从而导致 ZnO 压敏电阻器的失效, 根据实验测试结果, 以  $\phi 20$  mm 的压敏电阻片为例, 若银电极层的方阻为  $8 \text{ m}\Omega/\square$ , 则极限通流量为  $5\sim 6 \text{ kA}$ , 要达到  $10 \text{ kA}$  的通流量, 方阻应为  $3 \text{ m}\Omega/\square$ 。因此, 在实际生产中, 为避免以上电阻体的失效, 增大通流能力, 可采用两次印银一次烧银, 增大烧银后银层的厚度, 减少银电极层的方阻。

电极层与电阻体的结合强度低, 也就是银层附着着力差, 当不大的外力作用, 或温度突变引起机械应力时, 都会引起电极层与电阻体的分离而造成开路失效。附着力受很多因素影响: (1) 银粉的粒度和形状。银粉的颗粒越细, 并且是球形的, 银层的附着力越大, 一般要求银粉粒径为  $0.3 \mu\text{m}$  以下。(2) 银浆配方及生产工艺。银浆要达到一定要求的细度和混合均匀度, 增加银电极层的附着力。为了使银层与电阻基体牢固结合, 需在银浆中加入适量的熔剂, 这种熔剂能在较低的温度下与基体反应, 形成良好的中间过渡层, 增加银层与电阻体结合强度, 但同时会增大银层的方阻, 降低可焊性, 因此应根据实际生产确定最佳熔剂加入量; (3) 烧银温度和时间。因为在烧银过程中, 银层还原不足, 银层电阻增大, 同时也降低银层与基体表面的结合强度, 易产生与电极层相关的失效现象, 生产中应根据银浆和瓷料的具体配方, 确定适宜的烧银曲线。

## 2 平均功率过应力失效

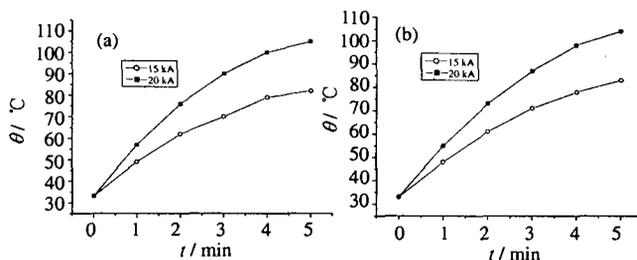
以往无论是压敏电阻的生产厂还是用户, 往往过分强调通流指标, 而对平均功率和热阻这两个指标却重视不够, 结果导致使用不当, 失效概率增大。

例如  $34 \text{ mm}\times 34 \text{ mm}$  方形 SPD 用电阻片承受  $8/20 \mu\text{s}$  冲击电流时, 若冲击没有热量累积效应, 则经过 30 次  $20 \text{ kA}$  冲击, 压敏电压变化率仍不超过 5%, 但按照 IEC61643—1 的规定, 以  $20 \text{ kA}$  作为标称放电电流进行动作负载试验时却烧坏了, 原因在于同组试验的两次冲击间隔只有 1 min, 有热累积效应。若压敏电压  $U_1 = 620 \text{ V}$ ,  $I_p = 20 \text{ kA}$  下的残压比  $R_p = 2.8$ , 则平均功率  $P_0$  为:

$$P_0 = R_p \cdot U_1 \cdot I_p \times 20 \times 10^{-6} / 60 \\ = 2.8 \times 620 \times 20 \times 10^3 \times 20 \times 10^{-6} / 60 = 11.5 \text{ W}$$

而该电阻片平均功率的额定值为  $1.4 \text{ W}$ , 实践证明  $34 \text{ mm}\times 34 \text{ mm}$  方形电阻片可以用  $I_n = 15 \text{ kA}$  作为 SPD 电阻片的标称放电电流, 避免平均功率过应力失效。实际测试结果如图 1, 该图表示电阻体表面温度

与各次冲击的关系。



(a) 第一组; (b) 第二组 两组间隔 30 min

图 1 压敏电阻冲击试验的热效应 (环境温度:  $33^\circ\text{C}$ )

Fig.1 The thermal effect of varistors after current impulse (ambient temperature:  $33^\circ\text{C}$ )

图 1 表明, 以  $15 \text{ kA}$  间隔 1 min 冲击 5 次后, 表面温度为  $75\sim 82^\circ\text{C}$ , 低于电阻片满负荷工作温度  $85^\circ\text{C}$ , 若冲击电流达到  $20 \text{ kA}$ , 则表面温度达到  $105^\circ\text{C}$ 。

从平均功率过应力失效的观点来考虑, 还可得到以下两点推理:

一为在污染严重, 有连续脉冲电压 (尽管它们的幅值并不大) 的电网中工作的压敏电阻器, 失效概率高;

二为压敏电压相同而电位梯度高或直径小的压敏电阻器, 在交流 TOV (暂态过电压) 条件下, 进入热失控的加压比小, 因此, 以同一加压比来考核不同直径的压敏电阻器是不合理的。其理由是显而易见的, 这就是在压敏电压、非线性指数  $\alpha$  以及加压比相同的条件下, 其电功率  $P$  是相同的, 而电阻体的直径越大, 或电阻体的电位梯度越小, 其热阻  $R_t$  (单位功率引起的温升) 越小, 因而电阻体的温度  $T$  也越低。

$$T = T_0 + P \times R_t$$

表 1 是日本松下公司给出的, 表 2 是实测的几种样品的热阻值。

表 1 通用型压敏电阻的热阻  $R_t(\Delta T/\Delta P)$

Tab.1 The thermal resistance of general varistors  $R_t(\Delta T/\Delta P)$

压敏电阻直径 $\phi/\text{mm}$	5	7	10	14	20
热阻 $R_t/(\text{C} \cdot \text{W}^{-1})$	110~125	80~100	60~70	45~55	25~35

表 2 实测压敏电阻的热阻  $R_t(\Delta T/\Delta P)$

Tab.2 The test results of thermal resistance of varistors  $R_t(\Delta T/\Delta P)$

压敏电阻直径 $\phi/\text{mm}$	25	32	34×34	40
热阻 $R_t/(\text{C} \cdot \text{W}^{-1})$	110~125	80~100	8~12	5~10

## 3 受潮失效

氧化锌压敏陶瓷是一种比较亲水的材料, 印制银电极后, 若侧面不采取防潮措施, 就很容易吸收潮气, 结果表现为漏电流增大, 相应的压敏电压和非线性指数下降, 造成受潮失效。即使是环氧树脂包封的产品, 由于这种包封材料是半密封性的, 因此长时间在高湿度环境中暴露, 仍有一定比例的产品出现受潮失效。它的机理是水分子进入 ZnO 陶瓷界面, 在吸附界面形成间断或连续的水膜, 加电条件下水分子电离成离子电流, 电离不断加剧, 表面漏电流增大, 最后失效。

为了弄清受潮失效在应用中可能产生的后果,进行了两项试验,一是以1.1倍加压比进行长时间连续工作电压应力试验(表3),二是进行通流量测试(表4)。

表3 受潮失效后的压敏电阻在1.1倍加压比下连续工作电压应力试验  
Tab.3 The ageing tests of varistors applying 110% of maximum continuous operating voltage after moisture failure

No.	初始值			$I_L / \text{mA}$ (AC 505 V)						交流试验后		
	$U_{1\text{mA}}$	$I_L / \mu\text{A}$	$\alpha$	$I_{0h}$	$I_{2h}$	$I_{18h}$	$I_{42h}$	$I_{114h}$	$U_{1\text{mA}}$	$I_L$	$\alpha$	
1	648.1	316	3.6	1.2	1.2	1.23	1.07	1.03	654.9	408	13.1	
2	636.7	76.4	12.6	1.5	1.3	1.2	0.81	0.85	643	164	4.2	
3	622.8	137	5.4	1.9	1.4	1.4	1.0	1.05	642.2	156	4.4	
4	648.2	487	3.6	1.2	1.7	2.1	1.6	1.45	621	587	4.1	
5	657.4	62.3	11.3	0.9	0.9	0.9	0.6	0.67	662	67.8	16.8	
6	648.1	16.7	55.3	1.0	0.9	0.9	0.6	0.72	655	38.6	37.9	
7	620.8	511	3.8	1.5	1.8	2.1	1.6	1.44	610.8	580	4.2	
8	673.4	236	3.4	0.7	1.8	1.0	1.0	0.91	675	360	3.6	
9	670.9	77.5	11.3	0.6	0.6	0.66	0.6	0.6	672	158	4.7	
10	672.4	26.8	34.1	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	677	60.3	17.7	

注:  $I_L$  在  $0.75 U_{1\text{mA}}$  下测试; AC 漏电流略高于正常产品。

表4 受潮失效后的压敏电阻的通流试验

Tab.4 The current impulse tests of varistors after moisture failure

No.	冲击前			冲击电流		冲击后		
	$I_L / \mu\text{A}$	$U_{1\text{mA}}$	$\alpha$	kA	$I_L / \mu\text{A}$	$U_{1\text{mA}}$	$\alpha$	
1	35.2	814	12.8	7.5	34.9/45.6	813/775	15.9/15.1	
2	9.19	713	29.3	8.1	17.5/20	751/794	16.1/19.0	
3	432	673	5.0	9.3	171/153	826/777	5.9/6.0	
4	11.3	830	34.2	10.8	6.57/10.1	827/783	25.7/19.8	
5	52.6	825	12.2	10.8	8.57/4.1	835/792	25.8/20.9	

从测试结果可以看出:压敏电阻器受潮后,即使漏电流大到  $500 \mu\text{A}$  的样品,在连续交流电压下,加压比高达1.1,也不会出现恶性循环而损坏。相反,表3中样品经实验后,8只样品  $U_{1\text{mA}}$  上升,5只样品的非线性指数  $\alpha$  增大,这说明连续电压应力会消除部分受潮失效现象,可能是因为连续电压应力下,压敏电阻器产生热量,消除了部分受潮现象。

受潮失效不会降低压敏电阻原来的通流能力(表4中 No.3 号样品原来压敏电压为 820 V,受潮后降为 673 V,  $\alpha$  降为 5 的样品,但经 10 kA 8/20  $\mu\text{s}$  电流冲击后,压敏电压反而恢复到 826 V。

上述现象表明,受潮失效的压敏电阻器是可恢复

的,受潮漏电流是一种沿侧面流过的表面电流  $I_s$ ,它与基体电流  $I_L$  相并联,在承受冲击电流时,反而对电阻体起到保护作用,而对于连续工作电压,它仍然是一个大体为数千欧到数兆欧的高电阻,因而不会导致电路故障,但并不是说这种现象是可以允许的,因为漏电流的增大,会造成其它应用问题,因此还是应当避免,经验表明,电阻片在包封前,先进行侧面绝缘处理,可以有效防止受潮失效现象。

## 4 结论

(1) 增加银电极层的厚度,可降低其方阻;或者导电银浆中减少熔剂加入量,也可降低电极方阻,同时可焊性好,可防止冲击电流应力的失效。

(2) 34 mm×34 mm 方形 SPD 用电阻片,按照 IEC61643—1 规定,可以用  $I_n=15 \text{ kA}$  作为标称放电电流,如果将  $I_n=20 \text{ kA}$  作为标称放电电流,由于热累积效应,会发生平均功率过应力失效。

(3) 压敏电阻受潮后,并不影响它的通流能力;在连续交流电压下,也不会损坏,但会引起其它应用问题,在电阻片印制电极后,侧面进行绝缘处理,可有效防止受潮失效。

## 参考文献:

- [1] Gupta T K. Application of zinc oxide varistors [J]. J Am Ceram Soc, 1990, 73(7): 1817-1840.
- [2] 徐廷献. 电子陶瓷材料 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1993. 63-70.
- [3] IEC61643—1. Surge protective devices connected to low-voltage power distribution system. Part 1: Performance requirements and testing methods [S]. 1998.
- [4] Leite E R, Varela J A, Longo E A. New interpretation for the degradation phenomenon of ZnO varistor [J]. J Mater Sci, 1992, 27: 5325-5329.
- [5] Yen A J, Lee Y S, Tseng T Y. Electrical properties of multilayer-chip ZnO varistors in a moist-air environment [J]. J Am Ceram Soc, 1994, 77(11): 3006-3011.

(编辑: 朱盈权)

## 我国电话用户突破7亿户 上网用户突破1亿户

据信息产业部 20 日发布的数据显示,截止到上半年,全国电话用户突破 7 亿户,达到 7.006 06 亿户。其中,固定电话 3.374 38 亿户,移动电话 3.631 68 亿户。

资料显示,改革开放以来,我国电话用户数以跨越式的速度发展:从 1979 年的 203 万户到 1992 年突破 1 000 万户,用了 13 年的时间;从 1 000 万户到 1998 年 8 月突破 1 亿户,用了 6 年时间;从 1 亿户到 2000 年 9 月突破 2 亿户,用了两年时间;从 2 亿户到 2001 年 9 月突破 3 亿户、从 3 亿户到 2002 年 10 月突破 4 亿户,各用了 1 年的时间;从 4 亿户到 2003 年 9 月突破 5 亿、从 5 亿到 2004 年 7 月突破 6 亿、从 6 亿再到 2005 年 6 月突破 7 亿,均用了不到 1 年。

近日,中国互联网络信息中心(CNNIC)在北京发布“第十六次中国互联网络发展状况统计报告”。报告显示,截止到 6 月

30 日,我国上网用户总数突破 1 亿,为 1.03 亿人,半年增加了 900 万人,和上年同期相比增长 18.4%。其中宽带上网的人数增长迅猛,首次超过了网民的一半,达到 5 300 万人,增长率为 23.8%,这也是宽带用户首次超过了拨号上网用户人数。我国网民数和宽带上网人数均仅次于美国,位居世界第二。

根据此次调查,我国上网计算机数达到 4 560 万台,比去年同期相比增长 25.6%。我国 IP 地址近几年的快速增长,总数达到 6 830 万个,超过 4 个 A 类地址,拥有量排名世界第四。

本次报告新增加了即时通讯和网民对互联网最反感的问题调查。结果显示,即时通讯工具的功能需求趋向多媒体;网民最反感的问题是网络病毒,其次是弹出式广告窗口和网络入侵攻击,互联网安全问题日益突出。