

# 氧化锌陶瓷电阻

## Znic oxide ceramic resistance

徐业彬, 袁方利, 程杰, 冯士芬, 许成金, 季幼章

中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031

**摘要:** 氧化锌陶瓷电阻是由 ZnO 晶粒及其他晶粒组成的复合烧结体, 无高阻晶界层。它具有线性的电压—电流特性, 电阻率可调, 电阻温度系数小且为正, 耐浪涌能量大。本文讨论了氧化锌陶瓷电阻的性能, 以及性能与配方、工艺的关系, 探讨了氧化锌陶瓷电阻的微观结构和导电模型。

**关键词:** 氧化锌陶瓷, 电阻, 电性能, 微观结构, 导电机理

### 1 引言

在 10 ~ 110kV 输电线路中, 不设接地系统, 当发生单相接地故障时, 为了抑制故障电流和正常相的异常电压, 必须采用中性点接地电阻器。目前常用的中性点接地电阻器是金属栅格状电阻串联, 再用瓷绝缘子支撑起来绝缘。该电阻器的不足之处在于: 由于金属栅格状电阻的电阻率很小, 只有几百  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ , 要做一个阻值为几百  $\Omega$  的中性点接地电阻器, 不仅体积、重量很大, 需占据较大空间, 而且绝缘和防腐性能差。氧化锌陶瓷电阻应运而生, 氧化锌陶瓷电阻具有线性的电压—电流特性, 可调的电阻率, 小的正电阻温度系数, 较大的耐浪涌能量, 是一种新型的电子陶瓷元件。

氧化锌陶瓷电阻在上世纪 80 年代中期由日立公司的山崎武夫等人开发出来, 并已实现商品化。我所于 1989 年起开展这方面的研究, 已从实验室进入中试阶段。本文讨论了氧化锌陶瓷电阻的性能, 以及性能与配方、工艺的关系, 探讨了氧化锌陶瓷电阻的微观结构及导电机理。

### 2 发展新型中性点接地电阻器的背景

中性点接地电阻器要求体积小、安全、可靠、可清洗、防污染、与气体绝缘开关和变压器要协调、耐腐蚀防止电阻体生锈、无油、耐雪的结构。因而发展了 SF<sub>6</sub> 气体绝缘氧化锌陶瓷电阻的中性点接地电阻器。通常金属电阻器的电阻率为几百  $\mu\Omega \cdot \text{cm}$ , 而氧化锌陶瓷电阻器的电阻率是几百  $\Omega \cdot \text{cm}$ , 这样电阻器的长度将显著减小。

### 3 氧化锌陶瓷电阻的性能

借助于混合具有绝缘材料性能的导电颗粒, 能够控制导电陶瓷的电导率。

### 3.1 氧化锌陶瓷电阻的制备

氧化锌陶瓷电阻以 ZnO 作为主要原材料, 添加 MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉料, 按一定比例称量、振磨, 造粒后压片。坯料尺寸为  $\Phi 68.2 \times 12.4$ , 在 1300 ~ 1500℃ 烧结, 保温 2 小时, 降温速度为 40 ~ 200  $^{\circ}\text{C}/\text{h}$ , 烧成后抛光两面, 被银浆或喷涂铝形成欧姆电极, 侧面涂绝缘油成电阻片。

通过改变配方和工艺, 可以调节电阻率、线性系数、电阻温度系数和能量密度, 从而获得满足实际需要的性能。氧化锌陶瓷电阻的电阻率可以在 1 ~ 1000  $\Omega \cdot \text{cm}$  范围内调节, 在有效的使用温度范围内, 氧化锌陶瓷电阻的电阻率与金属、陶瓷的关系如图 1 所示。

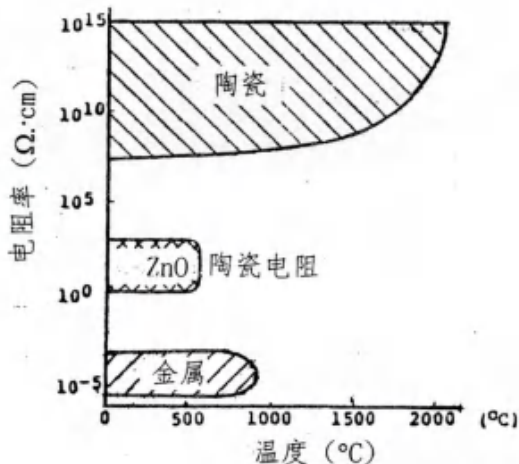


图 1 陶瓷和金属使用温度范围内的电阻率

### 3.2 氧化锌陶瓷电阻的电压—电流特性

由于消除了 ZnO 晶粒间晶界层, 电压—电流具有线性。氧化锌陶瓷电阻的电压—电流特性与氧化锌压敏电阻特性比较示在图 2。利用这一特点, 可将氧化锌陶瓷电阻与氧

化锌压敏电阻组合起来，制造大容量浪涌吸收器，它能避免氧化锌压敏电阻并联使用时电压的微小波动引起电流巨大变化的缺点。日本已研制成功残压在 35 kV 以下，吸收能量 160 kJ 通电 0.2s 的大型浪涌吸收器。

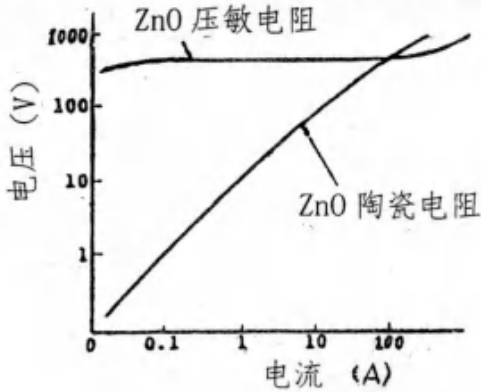


图2 ZnO陶瓷电阻的电压—电流特性

在工艺上，降低降温速度可以提高线性度。配方上，掺入施主杂质如  $Al_2O_3$ ， $Y_2O_3$ ， $Ga_2O_3$ ，可降低 ZnO 晶粒间的接触电阻，提高线性度。

为了保证其线性，必须被欧姆电极银浆或喷铝，否则，非欧姆电极会掩盖材料本质，并改变电阻温度特性。

### 3.3 氧化锌陶瓷电阻的温度特性

氧化锌压敏电阻的电阻值当温度升高时，电阻温度系数为负，当氧化锌压敏电阻并联使用时，由于负电阻温度系数，发热产生的温升使电阻变小，电流会集中在阻值较

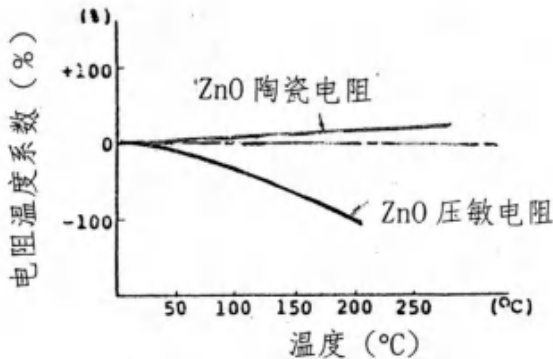


图3 电阻温度系数与温度的关系

小的元件，产生恶性循环，以致热崩溃。在图3示出氧化锌陶瓷电阻具有正的电阻温度系数，数量为  $+10^{-3} / ^\circ C$ ，当并联连接能抑制电流的集中。

在工艺上，控制降温速度可调节电阻温度系数。在配方上，MgO 含量的增加可以使电阻温度系数由负变正，这可能与 MgO 的热膨胀系数较大有关。少量的  $Y_2O_3$  可以提高电阻温度系数的正值。

### 3.4 氧化锌陶瓷电阻的电流容许负荷特性

图4示出中性点接地电阻器电阻元件通过交流电流时，注入能量和陶瓷电阻温升的关系。根据氧化锌陶瓷电阻的温升  $250^\circ C$ ，陶瓷电阻元件的热容量为  $2.6 \sim 3.1 J / cc ^\circ C$ ，可以吸收较多热量。

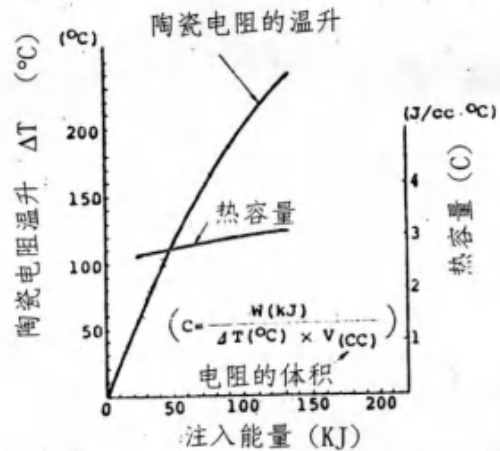


图4 ZnO陶瓷电阻的温升与注入能量的关系

### 3.5 氧化锌陶瓷电阻的能量密度

氧化锌陶瓷电阻的能量密度在  $400 \sim 800 J / cm^3$  之间。在工艺上，增加样品的均匀性，适当降低降温速度可以提高能量密度。加入  $TiO_2$  可以提高能量密度，但使线性度变差。

### 3.6 氧化锌陶瓷电阻的应用

采用氧化锌陶瓷电阻，作为  $SF_6$  气体绝缘中性点接地电阻器的组成见表1。表2给出了陶瓷型中性点接地电阻器特性。

表 1 66kV 普通型与陶瓷型中性点接地电阻器尺寸比较

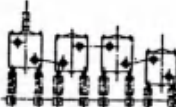



序号	项目	普通型中性点接地电阻器	陶瓷型中性点接地电阻器
1	构造	金属栅格状电阻  2.9m×5.5m×1.6m	氧化锌陶瓷电阻  3.0m×1.1m×1.1m
2	电阻元件形状	金属栅格状 	圆柱形片 
3	体积	100%	15%
4	重量	100%	45%
5	占地面积	100%	15%

表 2 陶瓷型中性点接地电阻器特性

序号	项目	35kV 中性点接地电阻	66kV 中性点接地电阻	110kV 中性点接地电阻
1	额定电压 (kV)	$35 / \sqrt{3}$	$66 / \sqrt{3}$	$110 / \sqrt{3}$
2	额定电流 (A)	100	150	150
3	电阻值 ( $\Omega$ )	202	254	423
4	通电时间 (s)	15	15	15
5	频率 (Hz)	50	50	50
6	污染物 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	0.06	0.06	0.06

成，并有少量气孔。陶瓷形貌如图 5 所示，晶粒大小为  $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 。在单个晶粒之间，存在电阻等于或小于 ZnO 晶粒电阻的晶界，因此，氧化锌陶瓷电阻中没有氧化锌压敏电阻中因富铋相形成的高阻晶界层，其电压—电流特性其本为线性。

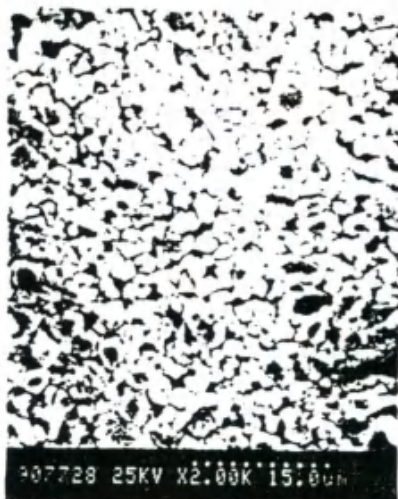


图 5 ZnO—MgO—Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 陶瓷电阻的形貌

## 4 氧化锌陶瓷电阻的微观结构和导电机理

### 4.1 微观结构

氧化锌陶瓷电阻是一种复合烧结体，由晶粒和晶界组

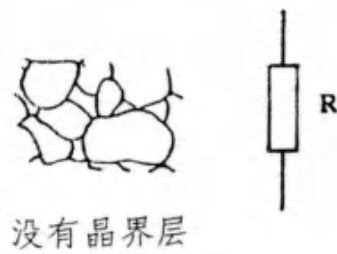


氧化锌陶瓷电阻是以 ZnO 为主原料，添加 AgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等材料烧结而成，陶瓷中存在 ZnO 晶粒及其他如 ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>、Zn<sub>2</sub>Ti<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 等晶粒。图 6 为 ZnO 添加 MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 及 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 后的 X 射线衍射谱，其主晶相为 ZnO、ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>，或少量 MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>，其余在 32° ~ 34°、50° ~ 55° 间的几个峰与 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 有关，查衍射卡，可能为 ZnY<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 或 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 形成的化合物，导致氧化锌陶瓷电阻的电阻温度系数增加。

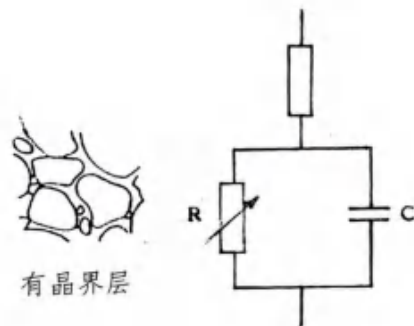
#### 4.2 导电机理

ZnO 晶粒电阻率为 1 ~ 10 Ω · cm，固溶部分施主的 ZnO 晶粒电阻率将更小，因而起导电作用，而其他晶粒如正尖晶石结构 ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 为绝缘体，氧化锌陶瓷电阻是导电晶粒与绝缘晶粒组成的复杂串联网路，故其导电模型为渗流模型。改变杂质的含量，就可以改变绝缘相的含量，改变陶瓷中导电通路的多少，因而改变电阻率。烧结温度影响陶瓷的收缩率，影响了 ZnO 晶粒导电通路的数量，因而影响电阻率，这都是渗流模型的充分体现。

但由于陶瓷的电阻率与工艺、配方密切相关，而且用渗流模型计算时以绝缘相的体积百分比为主，所以要根据渗流模型定量地预言掺杂量及烧结温度与电阻率的关系是困难的，但该模型可以定性地反映其变化趋势。图 7 为氧化锌陶瓷电阻的等效电路。



(a)



(b)

(a) 陶瓷电阻，(b) 压敏电阻  
图 7 ZnO 陶瓷电阻的等效电路

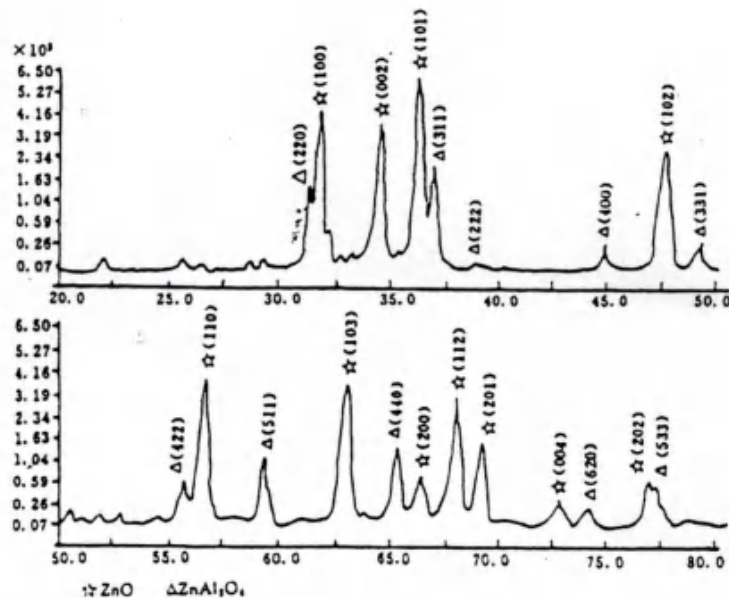


图 6 ZnO 陶瓷电阻的 X 射线衍射谱