

直流开断工况下金属氧化压敏电阻 冲击老化及失效特性研究

龙辰, 白云帆, 吴益飞, 吴翊, 纽春萍, 荣命哲

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为了探究直流开断过程中金属氧化物压敏电阻(MOV)的老化及失效特性,搭建了 MOV 老化失效实验平台,研究了在重复脉冲作用下,MOV 的阈值电压、泄漏电流、非线性系数以及残压的变化规律。研究发现,阈值电压 U_{1mA} 随冲击次数增多先上升后下降,整体变化不超过 1%,泄漏电流 $I_{75\%}$ 随冲击次数增加接近线性增长,而非线性系数 α 随冲击次数增加逐步减小,且下降速度与冲击能量正相关,残压 U_{res} 变化小于 5%。采用泄漏电流作为标准可以更直观地反映 MOV 的老化情况。通过分析不同能量下多次冲击后的 MOV 失效情况,建立了冲击能量与失效统计次数 $N_{50\%}$ 之间的关系。利用有限元仿真,建立了 MOV 失效模型,研究了微观晶粒中电流、温度及应力的分布规律以及失效阈值,并通过实验验证了失效模型的准确性。结果表明,模型在失效阈值预测方面的误差为 8%,在各种能量冲击下的温度预测方面的误差均小于 5%。

关键词: 金属氧化物压敏电阻;老化;失效;直流开断

中图分类号: TM51 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202509006 **文章编号:** 0253-987X(2025)09-0053-12

Study on the Impulse Aging and Failure Characteristics of Metal Oxide Varistors under Direct Current Interruption Conditions

LONG Chen, BAI Yunfan, WU Yifei, WU Yi, NIU Chunping, RONG Mingzhe

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To investigate the aging and failure characteristics of metal oxide varistors (MOVs) during DC interruption, this study establishes an experimental platform for MOV aging and failure. The changes in threshold voltage, leakage current, nonlinear coefficient, and residual voltage of MOVs under repeated pulse actions are examined. The finding reveals that the threshold voltage U_{1mA} initially increases and then decreases with the increase in the number of impacts, with an overall change of no more than 1%. The leakage current $I_{75\%}$ shows close to linear growth with an increasing number of impacts, while the nonlinear coefficient α gradually decreases as the number of impacts increases, with the rate of decrease positively correlated to the impact energy. The residual voltage U_{res} changes by less than 5%. Using leakage current as a standard can more intuitively reflect the aging condition of MOVs. By analyzing the failure conditions of MOVs after multiple impacts at different energy levels, a relationship between impact energy and the statistical failure count $N_{50\%}$ is established. A finite element simulation is

收稿日期: 2025-02-21。 作者简介: 龙辰(1997—),男,博士生;吴益飞(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目:

国家自然科学基金资助项目(52377158,52025074,U2241260)。

网络出版时间: 2025-05-15

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20250514.1537.005>

used to develop a MOV failure model, investigating the distribution of current, temperature, and stress within microcrystals, as well as the failure threshold, with experimental validation of the model's accuracy. The results indicate that the prediction error for the failure threshold is 8%, and the prediction error for temperature under various energy impacts is less than 5%.

Keywords: metal oxide varistors; degradation; failure; direct current interruption

随着可再生能源的快速发展和电力需求的不断增加,直流输电技术因其低损耗、高效率 and 灵活性而日益受到重视^[1-3]。直流断路器作为直流电力系统中至关重要的保护设备,能够迅速隔离故障,确保系统的安全与稳定运行^[4-6]。

典型的直流电路断路器(DCCB)拓扑结构如图1(a)所示,由主支路、转移支路和能量耗散支路组成。在系统正常运行中,电流通过主支路,从而产生极小的功率损耗。当发生短路故障或接收到来自上级系统的断开命令时,电流首先被强制转移到转移支路,然后又被引导到能量耗散支路,从而使系统能量有效地被耗散。直流断路器根据其电流转移方式的不同可大体分为机械式、混合式以及固态式。然而,其能量耗散分支的组成通常是一致的,核心组件为金属氧化物压敏电阻(metal oxide varistors, MOV)^[7-9]。

图1(b)所示为MOV在直流断路器中耗能波形的示意图,其电流波形近似三角波。当MOV两端电压逐步升高到阈值电压后,电流迅速转移至MOV。当MOV电压高于系统电压后,电流逐步下降,电压维持在残压附近,该过程通常持续数ms。电流降至0后,系统电压持续施加在MOV两端直至隔离开关断开。

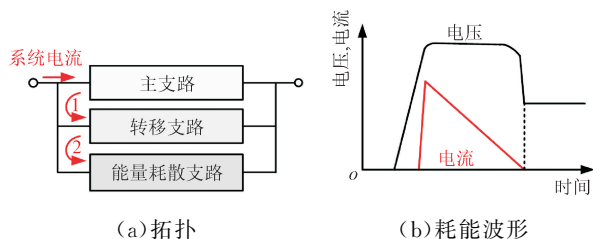


图1 典型直流断路器拓扑及耗能波形示意图

Fig.1 Typical DC circuit breaker topology and energy dissipation waveform diagram

MOV的主要成分是ZnO,并含有少量的Bi₂O₃、Sb₂O₃及其他氧化物,这些成分通过高温烧结形成多晶陶瓷体^[10],其微观结构由晶粒、晶界、晶间相和气孔组成。如图2(a)所示在n型半导体晶粒中,晶粒的费米能级高于夹在其中的晶界的费米

能级。因此,电子从晶粒流向晶界,在晶界处被缺陷和掺杂物捕获,导致局部费米能级升高,直到整个结构的费米能级趋于一致。达到平衡时,被捕获的电子在晶界处形成负的表面电荷层,而在晶界两侧留下了带正电的施主离子,形成耗尽层。这种结构导致晶粒的能带在晶界附近发生向上的弯曲,产生一个电场,并在晶界处形成势垒 ϕ_b ,被称为双肖特基势垒(DSB),其中 e 为电子电荷, U 为外施电压。

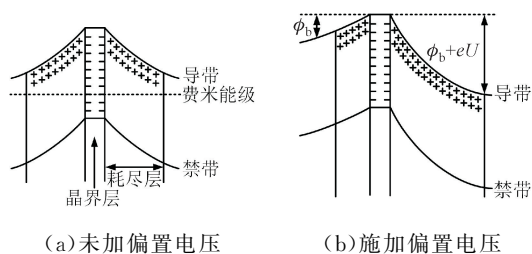


图2 双肖特基势垒示意图

Fig.2 Diagram of the double Schottky barrier

如图2(b)所示,在外施电压 U 的作用下,正偏势垒高度降低,反偏势垒高度升高。在较低的电压作用下,施加电场不足以克服肖特基势垒,电流保持在低值,电子或空穴难以通过结区,形成了较大的电阻。随着电压的升高,施加电场逐渐超过肖特基势垒的高度,电子能够更容易地通过界面,导致电流迅速增加。因此,在较高的电压下,ZnO压敏电阻的电流增大显著,电阻值降低,形成了如图3所示的伏安特性,其中 ρ_{gb} 为晶界层电阻率, ρ_g 为晶粒电阻率。

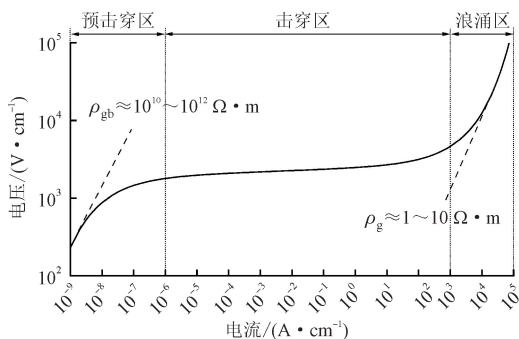


图3 MOV伏安特性

Fig.3 Volt-ampere characteristic of MOV

在实际高压直流开断场景中,系统能量大,断路器中的耗能组件往往由多组 MOV 串、并联组成,均流问题会导致部分 MOV 耗能超过额定。多次动作后的老化效应累加,最终导致失效。失效一旦发生,该失效 MOV 近似等效于短路,失效串的等效电阻降低,分担更大的电流。同时,由于该串中缺少一个耗能单元,其余单元需要共同分担多余的电压。两者共同作用,使失效串的其余单元消耗远超额定的能量,引发连锁失效,导致开断失败的严重后果。

目前,国内外已经开展了较多关于 MOV 老化的研究。Eda 等研究了直流和交流偏压对 ZnO 陶瓷的老化现象,分析了其伏安特性、介电性能及热激发电流的变化,提出肖特基势垒的变形及离子迁移机理^[11]。He 等研究了 ZnO 中 DSB 的电气退化机制,强调了氧缺陷的迁移对势垒降低和漏电流增加的影响^[12]。Hock 等研究了 MOV 在直流断路器中的均流、温升、能量处理和加速老化等特征,但是其能量冲击间隔短,有热量累积^[13]。Khanmiri 等研究了 MOV 在长时间电压和热应力下的退化过程,揭示了不同退化程度的 MOV 在实际工作条件下的能量吸收能力^[14-15]。Wang 等对 MOV 进行了直流断路器的加速冲击老化试验,对其宏观参数和微观组织变化进行了详细分析^[16]。文献[17]研究了 MOV 在 10 000 次 60~100 J/cm³ 的脉冲能量注入下的耐久行为,但是只给出了老化前后的参数对比。

关于 MOV 的失效也已经有许多研究基础。Eda 等最早对 MOV 在大电流作用下的破坏过程进行了仿真计算^[18]。Tsukamoto 等在 MOV 的 2 ms 方波、4/10 μs 脉冲和 10/350 μs 重复脉冲应用中测试电流波形与冲击承受能力之间的关系,并讨论了其机械和电气失效机制^[19]。Belda 等对 MOV 进行了连续的能量冲击直到故障,并分析了这些破坏的机理和原因^[20]。

在直流开断场景下,MOV 耗能电流波形的脉冲宽度、峰值不同,能量吸收产生的焦耳热等因素对 MOV 造成的老化与雷击工况不同,定量详细研究仍然较少。本文针对中压直流断路器的 MOV 进行老化冲击实验,对其失效行为进行了分析研究,建立了有限元失效仿真模型。

1 实验平台搭建

根据国际电工委员会标准,避雷器可以采用以下 3 种波形进行耗能测试:持续时间为 2~4 ms 的矩形脉冲、持续时间为 2~4 ms 的正弦半波脉冲以及

8/20 μs 雷电脉冲。本文选用 2 ms 正弦半波对 MOV 进行能量冲击,理由如下:首先,正弦半波的放电时间尺度接近于直流断路器中 MOV 的耗能时常;其次,正弦半波的电流峰值相较于矩形波,更接近实际的电流峰值。

本文设计的 MOV 脉冲老化的测试平台如图 4 所示,包含充电回路、实验回路、负载以及测量与控制模块。充电回路作用是给电容预充电,其中也包含了电容 C 的放电回路。实验回路依靠 LC 振荡电路产生正弦半波,由电容 C、电感 L 与高速机械开关(HSS)构成。负载为待测 MOV 样品,测量与控制模块用于数据采集以及 HSS 控制,电压信号采集使用 TT-SI 9010 差分探头,电流信号采集使用 PEM CWT300 罗氏线圈。

本文测试中对 MOV 样品施加半波时间为 2 ms 的正弦半波,以模拟直流开断的实际工况。LC 振荡电路固有周期的计算公式如下

$$T = 2\pi \sqrt{LC}$$
 (1)

选取电路参数 C 为 2 mF, L 为 200 μH。

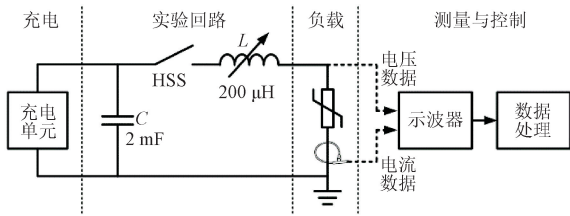


图 4 MOV 脉冲老化实验平台原理图

Fig. 4 Schematic diagram of MOV impulse degradation experimental platform

脉冲老化实验的实际流程如图 5 所示,在施加脉冲老化前,测量 MOV 阀片的静态参数与泄漏电流,主要测试样品在泄漏电流范围(0~75 mA)内的伏安特性。随后,利用脉冲测试平台为 MOV 样品施加老化脉冲,若样品未失效,则将其置于室温下冷却 24 h 后重复上述操作,若样品失效,则记录其失效情况。

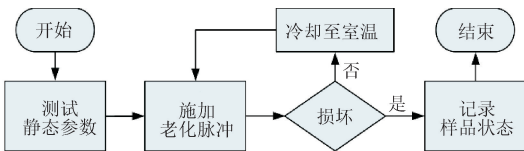


图 5 MOV 老化失效实验流程图

Fig. 5 Flowchart of MOV aging and failure experiment

实验选取中压直流断路器广泛使用的阀片,其阈值电压 U_{1mA} 为 2.4 kV,直径 D 为 105 mm、额定耗能量 W_0 为 10 kJ。

为模拟样品在直流开断中的实际吸能情况,选取 3 种不同的脉冲能量,分别对应正常开断过程中额定耗能的 1 倍、1.5 倍以及 2 倍,每组 10 片。相应的电流峰值与电容的充电电压如表 1 所示。

表 1 MOV 冲击老化实验参数

Table 1 Experimental parameters of pulse aging			
实验组	充电电压/kV	电流峰值/kA	脉冲能量/kJ
1	4.23	3	10
2	4.61	4.5	15
3	4.99	6	20

2 实验结果

2.1 老化实验结果

本文选取了 10、15、20 kJ 这 3 种不同能量,通过比较不同脉冲下阈值电压 U_{1mA} 、非线性系数 α 以及泄漏电流 $I_{75\%}$ 、残压 U_{res} 4 种静态参数与老化冲击次数关系,分析 MOV 冲击老化过程中性能的变化。本节选取承受冲击次数最多的样品,以便观察关键参数变化特性。

2.1.1 阈值电压 U_{1mA} 受冲击老化影响

不同能量下阈值电压与脉冲次数的关系如图 6 所示。由于本文所选 MOV 阀片之间存在微小的 U_{1mA} 差异,因此在描述不同脉冲下 U_{1mA} 与脉冲次数的关系时,对 MOV 的阈值电压进行了归一化处理

$$\Delta U_{1mA} = \frac{U_{1mA} - U_0}{U_0} \times 1\,000\%_0 \tag{2}$$

式中: U_0 为第 1 次测试得到的阈值电压。

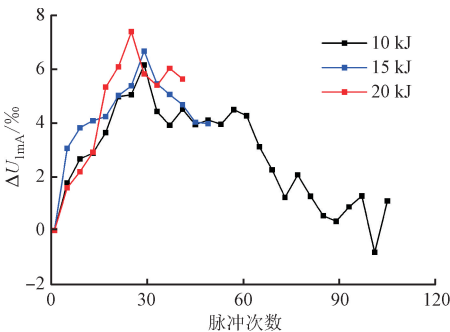


图 6 阈值电压随脉冲次数的变化关系
Fig. 6 Relationship between threshold voltage ΔU_{1mA} and number of pulses

从图 6 中可以看出,随着脉冲次数的增加, U_{1mA} 在各个脉冲能量等级下都呈现出先升高后下降的趋势,10、15、20 kJ 能量下 ΔU_{1mA} 的峰值分别为 6.8‰、6.8‰ 和 7.4‰。根据离子迁移理论,随着冲击次数的增加,冲击电流促使耗尽层中的正电荷向晶界表

面迁移,这些电荷随后会被晶界附近的缺陷所捕获。随着脉冲次数的增加,界面态所捕获的自由电子数和表面态吸附的电子数均减少,导致肖特基势垒降低,从而引发 MOV 阈值电压的下降。

MOV 阈值电压在老化初期反常升高,可能原因是:在冲击老化的初期阶段,大量电子注入正偏的肖特基势垒中,这些电子在向晶界深部扩散的过程中会被陷阱捕获;而对于反偏势垒,由于陷阱的作用,晶界中短时间内不会发生电子注入,此时反偏肖特基势垒中产生的空穴会导致耗尽层宽度的减小和费米能级的降低,从而引起势垒高度下降。

尽管脉冲老化过程中 U_{1mA} 持续变化,但这一变化幅度始终保持在 1‰ 以内。由于 U_{1mA} 呈现先升高后降低的趋势,在失效发生前,阀片的 U_{1mA} 与初始值非常接近,相差不超过 5‰,表明 U_{1mA} 电压在整个老化过程中相对保持稳定。MOV 的老化对 U_{1mA} 的影响较小,而主要对内部晶粒产生损伤、使粒子分布的变化。

2.1.2 泄漏电流 $I_{75\%}$ 受冲击老化影响

MOV 的泄漏电流 $I_{75\%}$ 是指 0.75 倍的 U_{1mA} 下的泄漏电流。在交流系统过电压防护用途中,通常要求不大于 50 μA ,主要描述交流用保护避雷器在工频额定电压下的工作状态,是 MOV 老化的重要参数之一。

从图 7 可以看出,随着脉冲老化进行, $I_{75\%}$ 整体呈不断上升的趋势。脉冲冲击对 MOV 内部微观结构的破坏与能量大小有着密切的关系。一方面,在整个实验冲击次数相同的情况下,冲击能量越大的实验组的泄漏电流越大。另一方面,冲击能量越大的实验组累计能够承受至失效的脉冲次数越少。20 kJ 能量组的样品在第 40 次脉冲时失效,15 kJ 能量组的样品在第 50 次失效,10 kJ 能量组的样品承受了超 100 次脉冲。

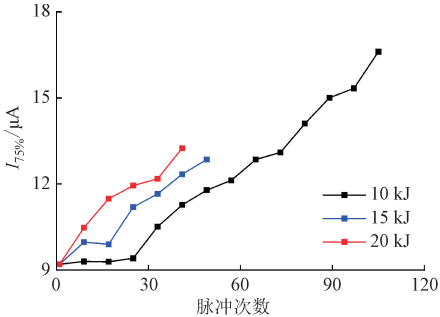


图 7 泄漏电流 $I_{75\%}$ 随脉冲次数的变化关系
Fig. 7 Relationship between leakage current $I_{75\%}$ and number of pulses

2.1.3 非线性系数 α 受冲击老化影响

非线性系数 α 是描述 MOV 非线性伏安特性的重要参数,表示为

$$\alpha = \frac{\lg I_1 - \lg I_2}{\lg U_1 - \lg U_2} = \frac{\lg(I_1 - I_2)}{\lg(U_1 - U_2)} \quad (3)$$

式中: I_1 、 I_2 分别取 0.1 和 1 mA; U_1 和 U_2 为 I_1 、 I_2 对应的电压。 α 是 MOV 的重要指标之一,非线性系数越大,MOV 的非线性越好,残压越低,性能越优异。

非线性系数 α 随脉冲次数的变化关系如图 8 所示。可以发现,在整个脉冲老化过程中,非线性系数整体呈现持续下降的趋势。对 3 种不同脉冲能量下的非线性系数进行线性拟合,得到 10、15 和 20 kJ 实验组中 α 的斜率分别为 -0.038 、 -0.045 和 -0.052 。这表明,单次脉冲能量越大, α 下降的速度也越快,MOV 的老化越快。

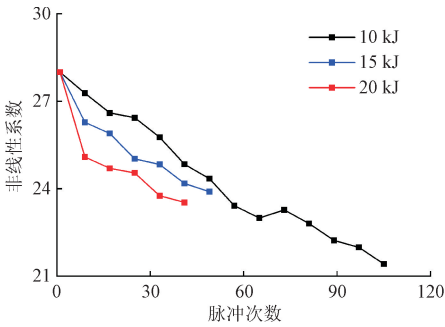


图 8 非线性系数 α 随脉冲次数的变化关系

Fig.8 Relationship between the nonlinear coefficient α and the number of pulses

在整个老化过程中, U_{1mA} 的变化幅度保持在 1% 以内,可以认为 U_2 近似保持不变。由式(3)可知,非线性系数主要由 0.1 mA 电流下对应的电压 $U_{0.1mA}$ 决定。 $U_{0.1mA}$ 与 $I_{75\%}$ 均体现 MOV 在预击穿区(小于 U_{1mA}) 的参数变化,趋势表现出高度的一致性,背后的原理具有统一性,即 MOV 在该区域电压下的肖特基势垒尚未被击穿,电流密度 J 与外施电压 U 之间的关系可以表示为

$$J = A^* T^2 e^{-\frac{\phi_b + \xi_b}{k_B}} T (1 - e^{-\frac{eU}{k_B T}}) \quad (4)$$

式中: A^* 为理查德常数; T 为温度; k_B 是玻尔兹曼常数; ϕ_b 为势垒高度; ξ_b 为导带与费米能级之差; e 为电子电荷。

因此, α 和 $I_{75\%}$ 的变化均能够反映出样品整体势垒高度的变化。在脉冲老化逐渐累加的过程中,离子迁移会不断引起肖特基势垒高度下降,进而导致 α 的降低和 $I_{75\%}$ 的升高。 U_{1mA} 与 α 变化幅度之间的差异也表明,在老化过程中,泄漏电流区域的伏安

特性变化更为显著。

综合考虑数据采集难度,采用泄漏电流作为标准可以更简单、直观地反映 MOV 的老化情况。

2.1.4 残压 U_{res} 受冲击老化影响

残压是 MOV 耗能时的峰值电压,国际电工委员会标准 60099—4 通常要求样品残压变化不能超过 5%。残压过高在直流开断中可能会导致触头断口的重击穿以及电力电子器件过压损坏,造成开断的失败等严重后果。

图 9 所示为样品残压变化 ΔU_{res} 随脉冲次数的变化关系。在所有实验组中,样品的残压变化很小,均在标准要求的范围内。其原因可能是每次实验中的充电电压不一致导致的耗能量或电流峰值不一致,从而引起的残压波动。

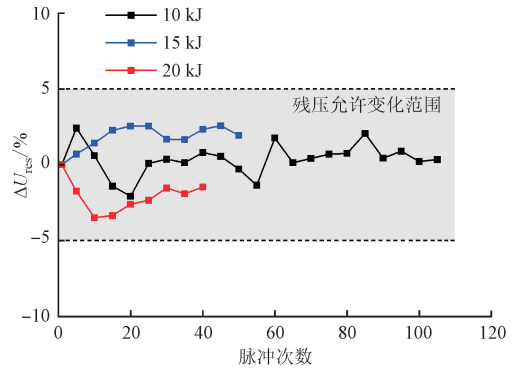


图 9 残压变化 ΔU_{res} 随脉冲次数的变化关系

Fig.9 Relationship between the variation of residual pressure ΔU_{res} and number of pulse

2.2 失效结果分析

2.2.1 典型失效类型及失效波形

MOV 的失效主要包括破裂、穿孔和热失控。由于没有持续的电流流经 MOV,在脉冲施加过程中不会发生热失控现象,因此本文仅对破裂和穿孔失效进行分析。

破裂的主要原因是阀片内部温度分布不均匀,导致产生较大的热应力,超过了 MOV 材料的承受能力。在实验过程中,发生破裂的样品通常会破裂成多个碎片,如图 10 所示。

实验中的典型波形如图 11 所示,在破裂时刻 t_{break} ,样品发生破裂失效,随后回路继续呈欠阻尼态振荡放电,失效的 MOV 表现出低阻性耗能,高电压也无法维持。

穿孔失效是由于 MOV 部分区域的温度过高,超过了材料的熔点,从而导致局部产生穿孔。发生穿孔失效的样品表面通常会呈现圆形小孔,如图 12 所示。



图 10 发生破裂的 MOV 样品
Fig. 10 Fractured MOV samples

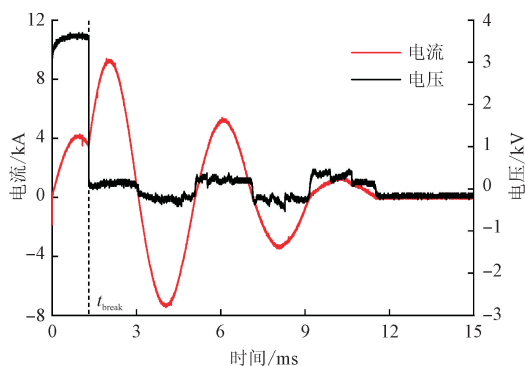


图 11 实验中的典型破裂波形
Fig. 11 Typical waveforms of fracture in experiment



图 12 发生穿孔的 MOV 样品
Fig. 12 Punctured MOV samples

实验中的典型穿孔波形如图 13 所示。 t_1 时刻电容放电, MOV 开始耗能。 t_2 时刻放电完成, MOV 建立稳定的关断电压, 由于样品的泄漏电流未切断, 仍

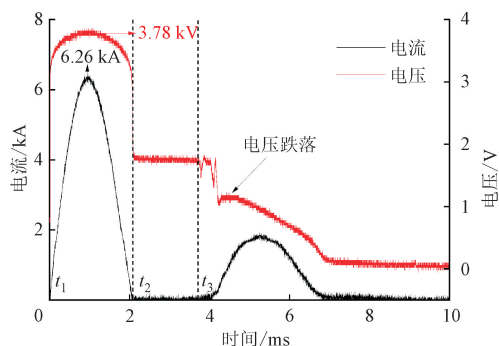


图 13 实验中的典型穿孔波形

Fig. 13 Typical waveforms of puncture in experiment

有功耗。 t_3 时刻, 样品局部热点温度升至熔点, 样品局部熔融形成贯穿电极的导电通道, 电流重新导通且峰值达 2 kA, 电压在 3 ms 内迅速跌落, 直至电容能量耗尽。

将破裂与穿孔进行对比, 可以发现两种失效均存在以下现象: ① 电流急剧升高或重新导通; ② 电压跌落。

显然, 破裂是一种更激烈的失效表征, 主要体现在以下两个方面: 一方面, 从失效形态上看, 破裂的样品在巨大的应力作用下会碎成多个部分, 而穿孔样品则没有类似爆炸的现象, 仅在样品上出现一个熔融孔。另一方面, 从电流和电压的变化特点来看, 破裂发生时, 电流几乎瞬间增大, 电压则迅速跌落。在穿孔的情况下, 电流逐渐增大, 电压缓慢下降, 呈现出一个渐变的过程。在本文实验中, 破裂失效占据了绝大部分, 穿孔失效仅发生过一次。

2.2.2 不同能量冲击下失效结果统计

选取 4 种冲击能量, 每个实验组设置 10 个 MOV 样品进行冲击脉冲失效统计, 脉冲老化过程中的未失效概率与脉冲数的关系如图 14 所示。其中, $N_{50\%}$ 为失效统计次数。

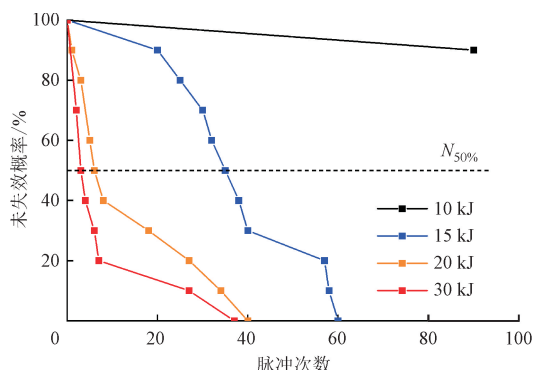


图 14 不同能量冲击下失效结果统计
Fig. 14 Failure results under different energy absorptions

随着脉冲次数的增加, 失效的样品数必然逐渐增加。对于 30 kJ 实验组, 7 次脉冲后已有 80% 样品失效, 而 37 次脉冲后样品全部失效; 20 kJ 实验组, 8 次冲击后有 60% 样品失效, 40 次冲击后样品全部失效; 15 kJ 实验组, 40 次冲击后 70% 样品失效, 60 次冲击后样品全部失效; 10 kJ 实验组, 90 次冲击后仅有 1 个样品失效。综上所述, 随着实验组冲击能量的增大, 绝大部分样品会在更少次数的脉冲下失效, 且样品全部失效所需的冲击次数越少。

由于失效冲击次数具有分散性, 个别性能较

好的样品即便在 20 kJ 乃至 30 kJ 的能量下也能耐受 30 余次冲击。为了使失效次数的数据具有统计性意义,可以类比绝缘强度的定义,使用失效统计次数 $N_{50\%}$ 来表示样品有 50% 概率失效时所对应的冲击次数^[21]。根据这一定义,可以绘制出不同冲击能量下 MOV 失效时的冲击次数曲线,如图 15 所示。

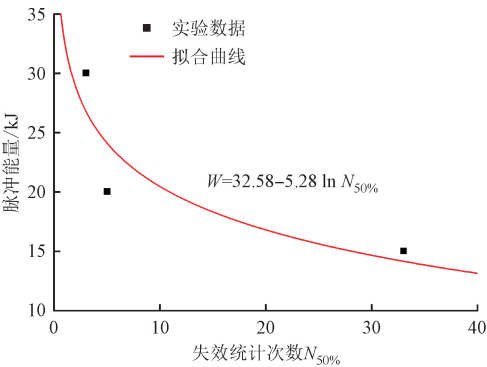


图 15 脉冲能量与失效统计次数 $N_{50\%}$ 的关系
Fig. 15 Relationship between the pulse energy consumption and the number of failure statistics $N_{50\%}$

脉冲能量按照下式进行拟合

$$W = b - k \ln N_{50\%} \tag{5}$$

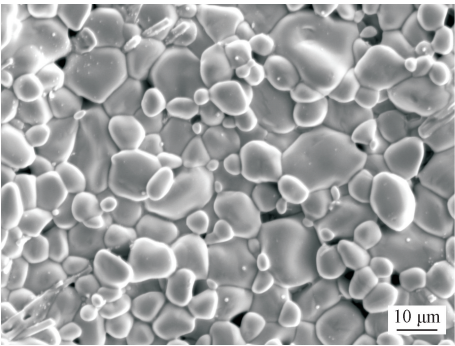
式中: b 、 k 为实验拟合参数。利用该模型可以预测 MOV 样品在不同冲击能量下 50% 概率失效的冲击次数,据此选择合适的额定容量。

3 MOV 冲击失效仿真

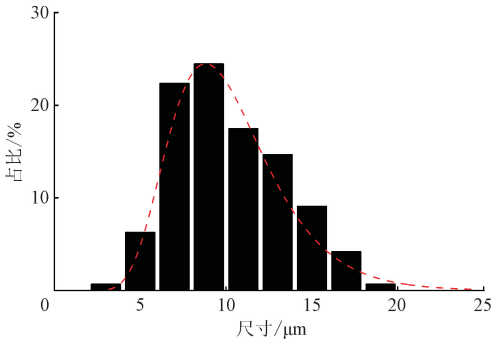
为了模拟 MOV 在直流冲击工况下的失效模式,本文建立了 MOV 多晶有限元失效模型,并将仿真结果与实验结果进行对比分析。

3.1 样品微观结构扫描电镜结果

图 16(a)为失效 MOV 的扫描电镜形貌,图 16(b)为晶粒尺寸统计结果,晶粒平均尺寸为 10.2 μm ,方差为 2.275 μm 。该数据在下文用于有限元建模。



(a)样品微观形貌



(b)晶粒尺寸统计结果

图 16 样品微观结构情况
Fig. 16 Microstructure of the sample

3.2 仿真模型搭建

3.2.1 晶粒微观结构模型

ZnO 压敏电阻的宏观电学特性受晶粒微观结构的几何拓扑特征及其晶界电特性分布的协同影响,其中晶粒尺寸、势垒电压及单晶界非线性系数等参数的随机分布,直接导致器件整体伏安特性的差异。通过重构多晶陶瓷的真实微观网络,可实现其微观形貌、介电参数、宏观性能的全流程仿真,从而将微观结构和宏观特性进行关联,进一步探究其老化及失效机理。

传统的 Voronoi 网络在早期研究中被广泛应用,但由于其几何结构较为简单,无法模拟 MOV 内部晶粒的球度,也无法真实地反映 MOV 微观晶粒的尺寸统计分布^[22]。因此,Neper 软件使用的晶粒生长模型更贴合 MOV 晶粒的实际情况,主要优势有:①能够根据对数正态分布特征生成晶粒分布,更符合实际晶粒的生长规律^[18,23];②能够设置晶粒分布的平均尺寸和标准差,从而更加精确地模拟晶粒的实际分布情况;③能够设置晶粒的圆度。这样生成的微观晶粒模型与实际更接近,有利于提高仿真的准确性。

基于图 16 扫描电镜的结果,本文确定了 MOV 多晶有限元模型的晶粒平均尺寸为 10 μm 。为了减小计算量,在保持原本 MOV 样品截面长宽不变的基础上,将模型的几何尺寸缩小为 2 500 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$,厚度为 10 μm ,如图 17 所示。

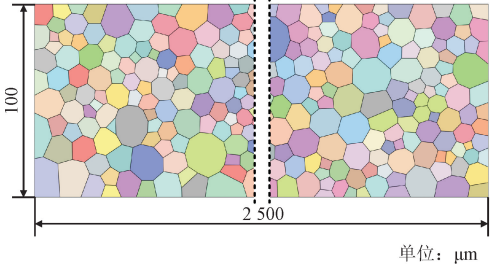


图 17 MOV 微观晶粒模型

Fig. 17 Microscopic grain model of MOV

3.2.2 电热耦合控制方程

模拟能量注入下 MOV 内部多物理场的演化,其中涉及的物理过程电磁热的耦合,包括瞬态电磁场、焦耳热生成、热传导等。

脉冲电流在 MOV 内部的传导遵循麦克斯韦方程,本模型中不涉及磁场,其控制方程为

$$\begin{cases} \nabla \cdot J = 0 \\ J = \sigma E = \sigma \nabla \varphi \end{cases} \quad (6)$$

式中: J 为电流密度; σ 为电导率; E 为电场强度; φ 为电势。

模型的瞬态热传导控制方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_{\text{Joule}} \quad (7)$$

式中: ρ 为材料密度; c_p 为比定压热容; T 为温度; Q_{Joule} 为焦耳热功率。

由于脉冲耗能时间很短,仅有数 ms,近乎可视作绝热过程,因此对流散热及热辐射可近似忽略,以简化计算。

在传热模型的基础上,假设两相邻元素的温度分别为 T_i 和 T_j ,其间温度差导致的热应力 σ_{thermal} 可以表示为^[24]

$$\sigma_{\text{thermal}} = \frac{E_Y \alpha_L (T_i - T_j)}{1 - \mu} \quad (8)$$

式中: E_Y 为杨氏模量,取 6.9×10^4 MPa; α_L 为线性膨胀系数,取 4.86×10^{-6} K⁻¹; μ 为泊松比,取 0.3。

3.2.3 边界条件设置

初始温度设置为环境温度 20 °C。模型的下表面设置为接地,上表面注入与实际实验中相同的法向电流密度,以便与实验结果进行对照。

模型中晶粒材料按照纯 ZnO 设置,晶粒与晶粒之间的边界通过设置接触电阻以等效肖特基势垒,从而使模型具有非线性特征。

文献[25]提出了一个由两个晶粒组成的简化模型,总电阻为两晶粒的晶界层电阻和晶粒电阻之和。由于晶粒电阻较晶界层电阻来说很小,忽略晶粒电阻,总电阻为

$$R_{\text{var}} = \frac{V_{\text{var}}}{I_{\text{var}}} \approx R_b(V) = \frac{\rho_b(V)}{S} \quad (9)$$

式中: V_{var} 为模型总电压; I_{var} 为总电流; R_b 为总电阻; S 为表面积; V 为晶界电压。因此,晶界层的接触电阻 ρ_b 可表示为

$$\rho_b(V) = \frac{V_{\text{var}}}{I_{\text{var}}} S = R_b(V) S \quad (10)$$

由式(10)可知,需要得到描述电阻与电压之间的关系 $R_b(V)$ 。为简化起见,本文将描述电阻和电

压关系的离散数据直接导入有限元模型中。泄漏电流区的数据由测试得到,脉冲电流区的数据由本文脉冲耗能实验测试得到,两电流区之间衔接段的电阻率采用下式进行拟合

$$\rho_b = 10^{c_0 + c_1 (\log E)^{c_2}} \quad (11)$$

式中: c_0 、 c_1 、 c_2 为系数。

随后,需要把外施总电压转化成有限元模型中的微观晶界电压。假设图 17 中垂直方向的平均晶粒数为 N ,则单个晶界电阻的边界条件为

$$\rho'_b(V') = \rho_b(V'N)/N \quad (12)$$

式中: ρ'_b 为单晶界层的电阻; V' 为单晶界层的电压。本文中 N 取值为 1 000。

为了使得模型特性与宏观 MOV 特性相对应,本文引入了并联系数 P ,表示有 P 个相同的模型并联得到宏观的 MOV,同时可以表征电流集中程度。修正后的边界条件为

$$\rho'_b(V') = \rho_b(1\,000V')/(1\,000P) \quad (13)$$

并联系数 P 与电压 V 的关系如图 18 所示。可以发现,在模型即将导通时并联系数最大,这意味着此时的电流集中效应最强,这点在下文仿真结果中也有体现。

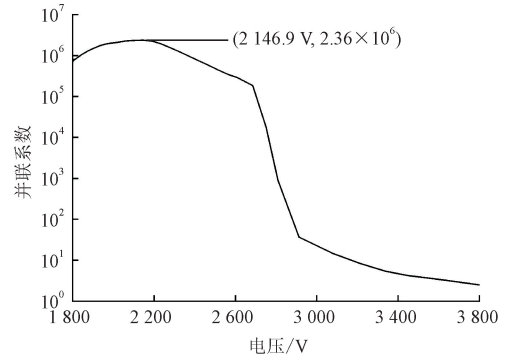


图 18 并联系数 P 随电压的变化关系

Fig. 18 Relationship between parallel coefficient P and voltage

3.3 典型仿真结果

3.3.1 电特性仿真结果

仿真模型与实验伏安特性的对比如图 19 所示。经过误差计算,本文所建立的模型的伏安特性与实验相比电压误差约 5%。

对模型施加与实验相同的 2 ms 正弦半波电流,得到脉冲过程中的电流分布情况如图 20 所示。

如图 20(a) 所示,在脉冲初期,MOV 晶粒间的电流密度小于 10^{-4} A/cm²,且分布均匀,整体处于漏电流区,模型未导通。随着电压上升,电流密度增加,电流局部化效应逐渐显现,尤其在晶粒较大的区

域形成了明显的电流通路,进入 MOV 阀片的非线性区,如图 20(b)所示。进一步增大电压后,电流分布趋于均匀,模型完全导通,但仍可见少数区域电流密度较低,表现为“孤立晶粒”或“坏”特性晶界,如图 20(c)所示。总体而言,在漏电流区,MOV 的电流分布均匀性随着电流升高而降低,而在预击穿区及大电流区,电流分布均匀性则随电流增大而改善。

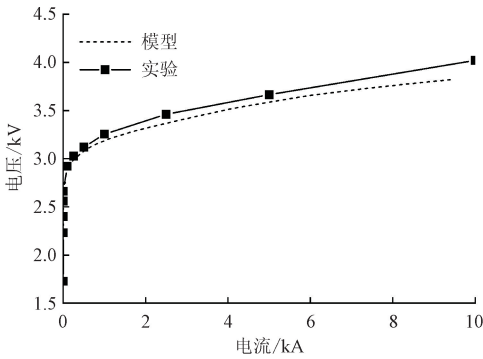
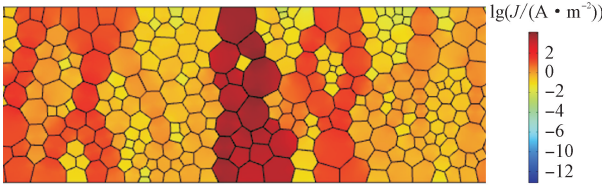
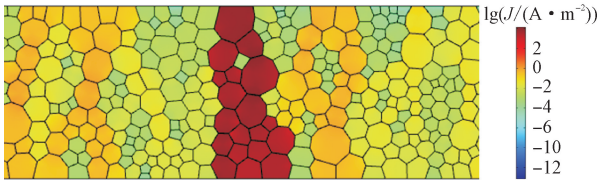


图 19 模型与实验伏安特性的对比

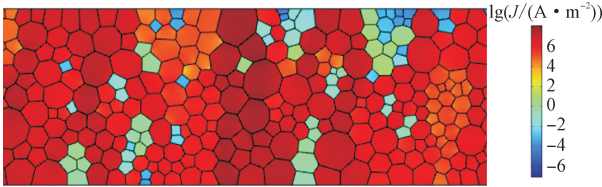
Fig. 19 Comparison of model and experimental volt-ampere characteristics



(a)1 600 V



(b)1 900 V



(c)2 400 V

图 20 不同电压下的局部电流密度对数($\lg J$)

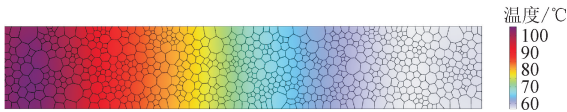
Fig. 20 Logarithm of current density at different voltages

3. 3. 2 温度及应力仿真结果

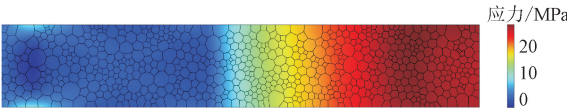
由于电流分布的不均匀性,焦耳热在晶粒间的

分布也不均匀,进而导致模型内部温度的非均匀分布,温度的不均匀分布进一步引发了热应力的局部差异。在本文仿真中,以第一主应力(拉应力)达到 138 MPa 或温度达到 820 ℃作为 MOV 失效的判定标准^[26]。

在耗能 28 kJ、电流峰值 6 kA 条件下,应力最大时的分布情况如图 21 所示。图 21(a)的温度场分布显示,该热源集中现象由电流聚集引发的焦耳热主导。图 21(b)揭示了第一主应力的复杂特性:高温区因热膨胀受晶界约束形成以压应力为主的应力状态,第一主应力小于 5 MPa;而低温区在温度梯度与晶粒各向异性膨胀耦合作用下,特定晶向产生显著拉伸应力分量,导致第一主应力极值出现在该区域。



(a)局部温度分布



(b)局部热应力分布

图 21 晶粒温度及热应力分布

Fig. 21 Temperature and thermal stress distribution

这一现象可通过热应力张量分解进行定量解释:热膨胀引起的总应力 σ_{thermal} 可分解为与体积膨胀相关的静水压力分量和与形状畸变相关的偏应力分量。其中第一主应力作为偏应力的最大特征值,其极值位置由材料刚度张量与温度梯度的相互作用决定。具体表现为低温梯度区域因弹性约束松弛更易释放拉伸型偏应力,而与温度场的绝对数值无直接线性关联。

图 22 所示为晶粒温度与最大应力随时间的变化曲线。最高温度的极值出现在 1.84 ms,达到 117.27 ℃,而此时的平均温度仅 85.28 ℃。最高温度先上升后略微下降的现象,可能是由于在耗能末期,晶粒自身的焦耳热功率减小,而热量通过热传导向周围晶粒传递较大,导致温度出现轻微下降。平均温度在整个耗能过程中逐步上升,在最后时刻达到 86.05 ℃,最大应力的极值出现在 1.84 ms,达到 28 MPa,尚未满足失效判据,归根到底原因在于没有考虑气孔对应力的影响,详细的模型改进方法将在下文阐述。

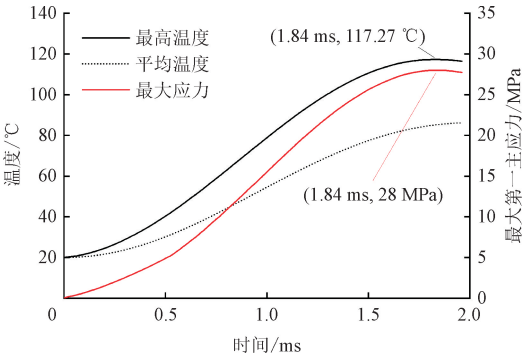


图 22 晶粒温度及应力曲线

Fig. 22 Temperature and stress curves

3.3.3 气孔对模型的影响

气孔对于应力分布有着非常大的影响。对于 MOV 来说,气孔可以视为初始裂纹和缺陷。应力集中系数 K_t 与孔曲率半径 ρ_r 的关系为

$$K_t = 1 + 2 \sqrt{a/\rho_r} \tag{14}$$

式中: a 为孔隙长半轴长度; ρ_r 为孔隙尖端的曲率半径。

图 23 所示为考虑气孔后模型应力分布情况。增加气孔后,气孔边界上的第一主应力急剧增大,可见气孔缺陷会引发显著的应力集中效应,导致 MOV 的失效阈值能量显著降低。

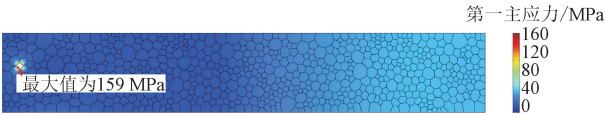


图 23 增加气孔后模型应力分布

Fig. 23 Stress distribution of the model with pores

3.3.4 耗能量对最大应力及平均温度的影响

通过改变仿真注入电流,研究了耗能量对最大应力及耗能后平均温度的影响。图 24 所示为有气孔及无气孔情况下最大第一主应力与耗能量之间的关系曲线,两组应力能量曲线都近似呈线性。这是因为耗能过程中,所有能量都转换为焦耳热引起温升,而温升与第一主应力之间呈线性关系,温度随耗能量的线性增长。应力与耗能量的线性拟合式如下

$$\sigma_{1max} = 4.82W - 6.3 \tag{15}$$

式中: σ_{1max} 为最大第一主应力,MPa; W 为耗能量, kJ。

由此可以得到 MOV 恰好失效的能量阈值,即最大应力达到 138 MPa 时的耗能量,为 29.94 kJ。对比式(5)的经验公式,代入 $N_{50\%} = 1$ 后,得出的失

效阈值能量为 32.58 kJ。有限元仿真模型与实验结果的误差为 8%。

值得注意的是,在相同能量耗散水平下,含气孔试样的应力强度始终达到无缺陷试样的 4.88 ~ 4.94 倍,且应力放大系数保持相对恒定,符合式(15)的模型,证实了气孔缺陷对应力场的稳定强化作用机制。

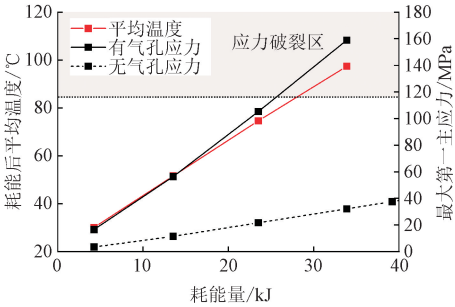


图 24 耗能量对最大应力及耗能后平均温度的影响

Fig. 24 Influence of energy consumption on the maximum stress and the average temperature after energy consumption

3.3.5 温度实验验证

为进一步验证模型温度预测的准确性,使用红外热像仪 Hikmicro K20 对 MOV 耗能后的温度进行测量,图像采集频率为 25 Hz。选择平均温度,主要是因为 MOV 阀片个体差异性会导致温度分布差异,平均温度更具统计性。选择耗能后的温度,主要原因在于:①耗能近似为绝热过程,耗能后的温度足以表征吸能情况;②耗能过程时间短,精确采集成本高。

图 25 所示为耗能 15 kJ 后的热像仪图片,黑线所框出部分为待测 MOV,经图像处理计算得到平均温度为 57 °C。

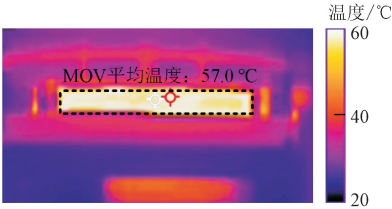


图 25 耗能 15 kJ 后 MOV 热成像图

Fig. 25 Thermal imaging after energy consumption of 15 kJ

表 2 所示为不同耗能量下实验与仿真温度结果及误差,可以发现误差均小于 5%,再次验证了有限元仿真结果的准确性。

表 2 不同耗能下的 MOV 实验及仿真温度
Table 2 Experiment and simulation temperature of MOV under different energy consumption

实验组	耗能/kJ	实测温度/℃	仿真温度/℃	误差/%
1	10	42.8	43.41	1.43
2	15	57.0	54.79	3.88
3	20	68.4	66.17	3.26

4 结 论

本文研究了中压直流断路器用 MOV 的冲击老化及失效特性,主要结论如下。

(1)MOV 冲击老化中阈值电压 U_{1mA} 随冲击次数增多先上升后下降,整体变化不超过 1%。泄漏电流 $I_{75\%}$ 随冲击次数增加接近线性增长,而非线性系数 α 随冲击次数增加逐步降低。冲击能量越大,变化速度越快,两者共同表明势垒高度出现下降。残压 U_{res} 变化小于 5%,始终在规范要求范围内。采用泄漏电流作为标准可以更直观地反映 MOV 的老化情况。

(2)破裂相比于穿孔是一种更剧烈的失效模式。在 2 ms 半波冲击老化中,破裂占据失效的绝大多数情况。建立了冲击能量与失效统计次数 $N_{50\%}$ 之间的拟合关系,利用该函数关系可以选择 MOV 合适的额定容量。

(3)建立了 MOV 有限元失效分析模型,研究了微观晶粒中电流、温度及应力的分布规律,发现气孔缺陷区域的应力放大倍数可达 4.9 倍。通过实验验证了有限元仿真的准确性,结果表明,模型在失效阈值预测方面的误差为 8%,在各种能量冲击下的温度预测方面的误差均小于 5%。

参考文献:

[1] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.

[2] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.

[3] 李兴源,曾琦,王渝红,等. 柔性直流输电系统控制研究综述 [J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3025-3037.
LI Xingyuan, ZENG Qi, WANG Yuhong, et al. Control strategies of voltage source converter based direct current transmission system [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3025-3037.

[4] 余占清,曾嵘,屈鲁,等. 混合式直流断路器的发展现状及展望 [J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2617-2626.
YU Zhanqing, ZENG Rong, QU Lu, et al. Development status and prospect of hybrid DC circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2617-2626.

[5] 吴益飞,胡杨,易强,等. 中压直流开断技术研究综述 [J]. 供用电, 2018, 35(6): 12-16.
WU Yifei, HU Yang, YI Qiang, et al. Review on MVDC interruption technologies [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6): 12-16.

[6] 何俊佳,袁召,赵文婷,等. 直流断路器技术发展综述 [J]. 南方电网技术, 2015, 9(2): 9-15.
HE Junjia, YUAN Zhao, ZHAO Wenting, et al. Review of DC circuit breaker technology development [J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(2): 9-15.

[7] 徐政,肖晃庆,徐雨哲. 直流断路器的基本原理和实现方法研究 [J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 347-357.
XU Zheng, XIAO Huangqing, XU Yuzhe. Study on basic principle and its realization methods for DC circuit breakers [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 347-357.

[8] 吴翊,荣命哲,钟建英,等. 中高压直流开断技术 [J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 337-346.
WU Yi, RONG Mingzhe, ZHONG Jianying, et al. Medium and high voltage DC breaking technology [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 337-346.

[9] 严俊,许建中,赵成勇. 高压直流断路器中能量吸收支路设计方法综述 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4301-4314.
YAN Jun, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong. A review of design methods for energy absorption path design in high voltage direct current circuit breakers [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4301-4314.

[10] MAHAN G D, LEVINSON L M, PHILIPP H R. Theory of conduction in ZnO varistors [J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(4): 2799-2812.

[11] EDA K, IGA A, MATSUOKA M. Degradation mechanism of non-Ohmic zinc oxide ceramics [J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(5): 2678-2684.

- [12] HE Jinliang, CHENG Chenlu, HU Jun. Electrical degradation of double-Schottky barrier in ZnO varistors [J]. AIP Advances, 2016, 6(3): 030701.
- [13] HOCK P, BELDA N, HINRICHSEN V, et al. Investigations on metal-oxide surge arresters for HVDC circuit breaker applications [EB/OL]. (2025-01-20). http://www.promotion_offshore.net/fileadmin/PDFs/104_WP10_Paper_1NMR_word_Congress_Hook_Belda.pdf.
- [14] KHANMIRI D T, BALL R, MOSESIAN J, et al. Degradation of low voltage metal oxide varistors in power supplies [C]//2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 2122-2126.
- [15] KHANMIRI D T, BALL R, LEHMAN B. Degradation effects on energy absorption capability and time to failure of low voltage metal oxide varistors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5): 2272-2280.
- [16] WANG Xinyi, LIU Ying, LV Yilei, et al. Investigation of impulse aging of energy-absorption elements for hybrid DC circuit breakers [J]. Applied Sciences, 2023, 13(17): 9784.
- [17] BRÖKER M, HINRICHSEN V. Testing metal-oxide varistors for HVDC breaker application [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 346-352.
- [18] EDA K. Destruction mechanism of ZnO varistors due to high currents [J]. Journal of Applied Physics, 1984, 56(10): 2948-2955.
- [19] TSUKAMOTO N, ISHII M. Repetitive impulse withstand performance of metal-oxide varistors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(4): 1674-1681.
- [20] BELDA N A, SMEETS R P P, NIJMAN R M. Experimental investigation of electrical stresses on the main components of HVDC circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(6): 2762-2771.
- [21] NOGUEIRA T A, DE SALLES C, NETO E T W, et al. Short duration current impulse waveform effects on the degradation and energy absorption capability of zinc oxide varistors [J]. Electric Power Systems Research, 2023, 220: 109336.
- [22] CHEN Qingheng, HE Jinliang, TAN Kexiong, et al. Influence of grain size on distribution of temperature and thermal stress in ZnO varistor ceramics [J]. Science in China: Series E Technological Science, 2002, 45(4): 337-347.
- [23] ONREABROY W, SIRIKULRAT N, BROWN A P, et al. Properties and intergranular phase analysis of a ZnO-CoO-Bi₂O₃ varistor [J]. Solid State Ionics, 2006, 177(3/4): 411-420.
- [24] HE Jinliang. Metal oxide varistors: from microstructure to macro-characteristics [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc, 2019.
- [25] TOPCAGIC Z, TSOVILIS T, KRIZAJ D. Modeling of current distribution in zinc oxide varistors using Voronoi network and finite element method [J]. Electric Power Systems Research, 2018, 164: 253-262.
- [26] BARTKOWIAK M, COMBER M G, MAHAN G D. Failure modes and energy absorption capability of ZnO varistors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 152-162.

(编辑 杜秀杰)