

从物理过程分析镀层不同金属含量对金属化膜自愈能量的影响

左强林, 雷乔舒

(无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214177)

摘要: 本文从物理过程的角度, 分析铝锌金属化膜中镀层铝锌含量对自愈能量的影响。把自愈过程转换成镀层材料的升华过程, 通过固液气形态转换所需的能量, 分析得到了在镀层厚度不变的情况下, 铝锌膜需要的自愈能量随着铝含量增加而增加, 随着锌含量的增加而减小; 在镀层厚度一样的情况下, 纯铝膜和纯锌膜所需要的自愈能量相差 55.5%; 通过推导, 得到了在方阻一定的情况下, 金属化膜所需要的自愈能量与其不同金属含量的变化规律, 与镀层厚度不变的规律一致。在方阻一定的情况下, 纯锌膜和纯铝膜的自愈能量只相差 15.2%, 比镀层厚度不变的情况下小得多。

关键词: 镀层厚度; 自愈能量; 气化潜热; 升华; 方阻

Analysis on Influence of Different Metal Contents of Coating Layer on Self-healing Energy of Metallized Film From Physical Process

ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu

(Wuxi Sun King Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214177, China)

Abstract: In this paper, the influence of the coated zinc and aluminium content of coating of zinc and aluminium metallized film on the self-healing energy is analyzed from the point of view of physical process. The self-healing process is transformed into sublimation process of the coating material, and the energy required is by the solid-liquid-gas form transformation is analyzed. The self-healing energy required by the aluminium-zinc film increases with the increase of aluminum content and decreases with the increase of zinc content under the condition that the thickness of the coating remains unchanged. In case of same coating thickness, the difference of self-healing energy between pure aluminum and pure zinc film is 55.5%. It is obtained through derivation that, under a certain square resistance, the self-healing energy required by the metallized film varies with its metal content, which is consistent with the constant thickness of the coating. In case of a definite square resistance, the difference of self-healing energy between pure zinc and aluminum film is only 15.2%, which is much smaller than that when the coating thickness is unchanged.

Keywords: coating thickness; self-healing energy; gasification latent heat; sublimation; square resistance

0 引言

随着柔性直流输电技术的发展和国际形势的变化, 采用自愈式金属化膜结构的直流支撑电容器也迎来了新的发展契机, 各高校、厂家纷纷对柔性直流支撑电容器进行深入研究, 包括对柔性直流输电电容器中的金属化膜进行理论计算和仿真分析、工艺技术研究等^[1-5]。随着碳达峰、碳中和双碳指标的落地规

划, 新能源汽车和高铁用干式自愈式金属化膜电容器, 也在如火如荼发展。这些前瞻性领域都离不开自愈式电容器技术, 也将自愈式金属化膜电容器的重要性推到了前所未有的新高度和热度。

自愈式电容器的核心在于自愈, 自愈这个概念来自于高电压技术中的流体击穿, 也就是说电介质击穿后可以自我恢复。金属化膜在自愈过程中必然伴随着镀层电极的蒸发, 也就是说, 自愈必然带来电

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2401504)。

容器元件的绝缘电阻下降^[6],自愈能量越大,电极蒸发越多,绝缘电阻下降越快^[7-11]。绝缘电阻的不断降低,最终导致局部过热或自愈失效,这就是金属化膜的击穿。自愈能量越大,自愈对电介质的危害就越大。文献表明^[12-13],影响自愈能量的主要因素有^[14]:自愈时的电压、电容、金属化膜的方阻、膜层间压强等,前两个是正相关,后两个是负相关。直流支撑电容器的电容、元件并联数多,解决自愈问题的技术难度大。

金属化膜损伤机理的研究主要通过模拟自愈,研究薄膜自愈过程发生的机理和影响因素,李化等相关文章^[15-19]系统地研究了金属化膜电容器的自愈成因及其影响参数,但较少文章从物理特性去分析金属化膜对自愈性能的影响。目前自愈式电容器所用的金属化膜,基本上都是铝膜,也就是说镀层是由铝层和铝层构成的。国内一般都是先镀铝,后镀锌,目前还不能实现混合镀,国际上有铝铝混合蒸镀,这方面国内还有差距。一方面由于铝的熔点比铝的熔点高,镀层铝含量对自愈能量影响较大。另一方面镀层结构和镀膜厂家的工艺不尽相同,如果还涉及到元件或单元,电容器的设计和工艺差别更大,研究的成果很难具有普适性。此外,自愈能量还与电容的大小有关,在实验室条件下,电容很难达到实际分析的效果。本文从物理上分析自愈所需的能量,回到自愈的本质,同时把金属化膜的方阻作为自愈能量的一个关键的制约因素。

金属化膜的自愈过程现在基本上都认为是金属镀层从固态直接到气态的升华过程,升华过程很短。一般而言,物体的升华所需要的能量大于物体从固态-液态-气态所需的能量,这个能量来源于金属化膜的自愈^[20]。所以自愈面积越大,自愈能量就越大,自愈能量越大,容衰就越快。从这个过程看,每一次自愈,除了电容损失外,还伴随着一定的损耗增加和绝缘电阻下降,当这些变化积累到一定程度,就会导致自愈失效,因此控制自愈能量,对于延缓自愈失效很关键。

研究金属化膜自愈能量的文献很多^[21-24],但都是从电性能或外特性的角度研究的,制约因素很多。本文从铝、锌材料本身的物理特性出发,分析铝铝镀层厚度和铝铝含量对金属化膜自愈能量的影响规律,以及方阻对自愈能量的影响,给减小自愈能量提供参考。

1 镀层厚度对自愈能量的影响

从物理的角度看,自愈过程就是金属化膜击穿

后镀层从固态到气态的升华过程,这个过程需要的能量可以认为就是自愈能量。也就是说自愈能量应该不小于金属熔化热、熔化潜热、气化热和汽化潜热。包括铝和锌加热到熔点所需的熔化热、熔化需要的熔化潜热、加热到沸点的气化热、汽化需要的气化潜热。字母符号的意义见表1。铝铝复合镀层的自愈能量计算公式为

$$W_{s1} = W_{r1} + W_{q1} + W_{f1} + W_{h1} \quad (1)$$

$$W_{s2} = W_{r2} + W_{q2} + W_{f2} + W_{h2} \quad (2)$$

表1 本章的符号说明
Table 1 Description of symbols in this chapter

符号	意义	符号	意义
W_{s1}	铝金属的自愈能量	W_{s2}	锌金属的自愈能量
W_{r1}	铝金属的熔化热	W_{r2}	锌金属的熔化热
W_{q1}	铝金属的熔化潜热	W_{q2}	锌金属的熔化潜热
W_{f1}	铝金属的气化热	W_{f2}	锌金属的气化热
W_{h1}	铝金属的气化潜热	W_{h2}	锌金属的气化潜热
m_1	铝金属的质量	m_2	锌金属的质量
c_1	铝金属的比热容	c_2	锌金属的比热容
θ_1	铝金属的熔点	θ_2	锌金属的熔点
θ_{f1}	铝金属的沸点	θ_{f2}	锌金属的沸点
c_{r1}	铝金属的熔化热	c_{r2}	锌金属的熔化热
c_{q1}	铝金属的气化热	c_{q2}	锌金属的气化热

从铝铝两种材料的相关数据^[25]可以知道,汽化潜热 $W_h \gg W_f \gg W_q \gg W_r$,实际上铝铝镀层的自愈能量近似等于各自汽化潜热。将相关数据代入,可以得到

$$W_{s1} = m_1 [c_1(\theta_1 - 20) + c_{r1}(\theta_{f1} - \theta_{r1}) + c_{f1} + c_{q1}] = 13\,467.3 \gamma_1 d_1 \quad (1)$$

$$W_{s2} = m_2 [c_2(\theta_2 - 20) + c_{r2}(\theta_{f2} - \theta_{r2}) + c_{f2} + c_{q2}] = 2\,260 \gamma_2 d_2 \quad (2)$$

铝铝镀层的自愈能量公式为

$$W_s \approx W_{s1} + W_{s2} = 1.347 \gamma_1 d_1 + 0.226 \gamma_2 d_2 \quad (3)$$

式(3)中: W_s 的单位是 mJ/dm^2 ,下标 1、2 分别代表铝和铝的相关参数(下同);密度 γ 的单位是 g/cm^3 ;金属镀层厚度 d 的单位是 nm 。式(3)是本文的核心,是后续分析的基础。

考虑到镀层的铝含量和铝含量都是按重量计算的,设镀层铝含量为 a ,则有: $\frac{\gamma_1 d_1}{\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2} = a$,

$\frac{\gamma_2 d_2}{\gamma_1 d_1} = \frac{1-a}{a}$ 。令 $d_1 + d_2 = d$,代入式(3)可以得到

$$W_{s1} \approx \frac{3.026 \times (a + 0.202)}{a} d_1 \quad (4)$$

$$d_1 = \frac{1.608a}{a+0.608}d \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)并化简可以得到

$$W_{s1} = 4.866 \left(1 - \frac{0.406}{a+0.608} \right) d \quad (6)$$

从式(6)可以看出,在镀层厚度 d 不变的情况下,镀层的自愈能量随着铝含量 a 增大而缓慢增加。式(6)的曲线如图1所示。需要注意,图1的曲线只是表示趋势,自愈能量只是一个相对值。

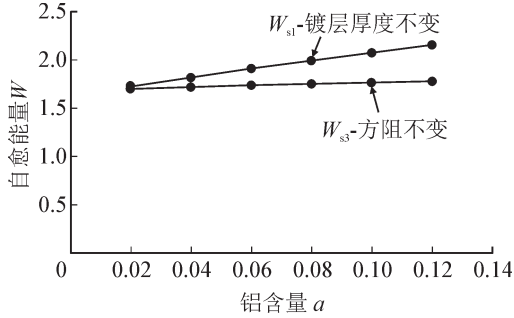


图1 铝含量与自愈能量的关系

Fig. 1 Relationship between aluminum content and self-healing energy

同理, $\frac{\gamma_2 d_2}{\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2} = b$, 则 $(\gamma_2 d_2)/(\gamma_1 d_1) = \frac{1-b}{b}$, 代入式(3)并化简可以得到

$$W_{s2} \approx \frac{8 \times (-b + 1.202)}{b} d_2 \quad (7)$$

$$d_2 = \frac{0.608b}{-b+1.608}d \quad (8)$$

将式(8)代入式(7)并化简可以得到

$$W_{sh2} = 4.866 \left(1 - \frac{0.406}{-b+1.608} \right) d \quad (9)$$

实际上,对于锌铝膜,如果铝含量为 a ,则锌含量 $b=1-a$,代入式(5)-(6),可以直接得到式(8)-(9)。式(9)的结果如图2所示。

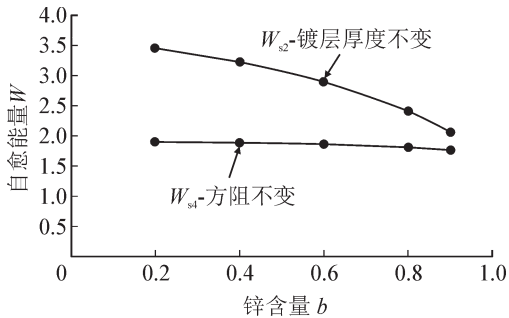


图2 锌含量与自愈能量的关系

Fig. 2 Relationship between zinc content and self-healing energy

从式(9)和图2可以看出,在镀层厚度 d 一定的情况下,随着锌的含量增加,镀层的自愈能量减小。这是可以理解的,从前面的分析可以看出,铝

升华需要的能量大于锌。对于纯铝膜 $a=1$,代入式(6),可以得到 $W_{s1}=3.638d$,对于纯锌膜, $b=1$,代入式(9)可以得到 $W_{s2}=1.617d$,两者相差 55.5%。

2 方阻不变的条件下铝、锌含量与自愈能量的关系

前面分析了镀层厚度不变的情况下,金属化膜需要的自愈能量与金属含量的关系,然而实际上金属化膜的厚度难以准确测量,一般用方阻来表征。方阻对金属化膜的耐压、损耗^[8]影响很大。研究锌、铝含量对金属化膜需要的自愈能量的影响,离不开方阻这个约束条件。锌铝金属化膜的方阻由铝层电阻和锌层电阻组成,如图3所示。

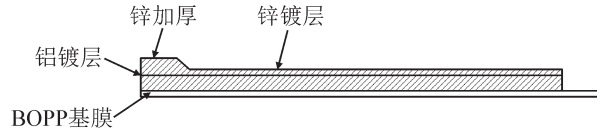


图3 方阻与镀层的关系

Fig. 3 Relationship between square resistance and coating

从图3可以看出,根据电阻的定义,方阻等于铝镀层电阻和锌镀层电阻的并联得到的电阻值。

考虑到 $R = \rho \frac{1 \times 1}{1 \times d} = \frac{\rho}{d}$, 这样就有

$$R_{\square} = \frac{\frac{\rho_1}{d_1} \times \frac{\rho_2}{d_2}}{\frac{\rho_1}{d_1} + \frac{\rho_2}{d_2}} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\rho_1 d_2 + \rho_2 d_1} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\frac{\rho_1}{\gamma_2} \gamma_2 d_2 + \frac{\rho_2}{\gamma_1} \gamma_1 d_1} \quad (10)$$

将 $(\gamma_2 d_2)/(\gamma_1 d_1) = \frac{1-a}{a}$ 代入式(10)可以得到

$$R_{\square} = \frac{\rho_1 \rho_2}{\frac{\rho_1}{\gamma_2} \gamma_2 d_2 + \frac{\rho_2}{\gamma_1} \gamma_1 d_1} = \frac{\rho_1 \rho_2}{d_1} \times \frac{1}{\frac{\rho_1 \gamma_1}{\gamma_2} \times \frac{1-a}{a} + \rho_2} \quad (11)$$

将相关物理数据代入式(11)可以得到:

$$R_{\square} = \frac{1379.43}{d_1} \times \frac{1}{\frac{10.04(1-a)}{a} + 51.96} = \frac{32.87}{d_1} \times \frac{a}{a+0.24} \quad (12)$$

式(12)可以变为

$$d_1 = \frac{32.87}{R_{\square}} \times \frac{a}{a+0.24} \quad (13)$$

将式(13)代入式(4)可以得到

$$W_{s3} = \frac{3.026(a+0.202)}{a} \times \frac{32.87}{R_{\square}} \times \frac{a}{a+0.24} = \frac{99.48}{R_{\square}} \times \frac{a+0.202}{a+0.24} \quad (14)$$

为了便于分析,将式(14)进一步化简,可以得到

$$W_{s3} = \frac{99.48}{R_{\square}} \left(1 - \frac{0.038}{a+0.24} \right) \quad (15)$$

将 $b=1-a$ 代入式(15)可以得到

$$W_{s4} = \frac{99.48}{R_{\square}} \left(1 - \frac{0.038}{1.24-b} \right) \quad (16)$$

铝含量对金属化膜自愈能量的影响见图1。从图1可以看出,随着铝含量增加,金属化膜需要的自愈能量呈上升的趋势,不管是镀层厚度一定还是方阻不变,规律都一样,只不过方阻不变的情况下,金属化膜需要的自愈能量变化更缓慢而已。

锌含量对金属化膜自愈能量的影响见图2。从图2可以看出,随着锌含量增加,金属化膜需要的自愈能量呈下降的趋势,这与铝含量的变化规律是不一样的,从式(9)和式(16)也可以看出这一点。这是因为铝需要的自愈能量大于锌需要的自愈能量,锌含量增加就意味着铝含量减少。在方阻不变的情况下,金属化膜需要的自愈能量变化比镀层厚度不变的情况变化更缓慢。

对于纯铝膜, $a=1$, 代入式(15)可以得到镀层的自愈能量为 $\frac{96.4}{R_{\square}}$; 对于纯锌膜, $b=1$, 代入式(16)可以得到镀层的自愈能量为 $\frac{83.7}{R_{\square}}$ 。也就是说,在方阻不变的情况下,纯铝膜和纯锌膜的自愈能量仅相差15.2%左右,差别不大。从镀层自愈需要的能量来看,铝含量多少,不是问题的关键。对比镀层厚度不变的相关数据可以看出,厚度不变,铝含量的影响较大。但是单位膜重的金属含量大,对于自愈后薄膜的绝缘电阻下降可能会有一定的影响,这个因素需要考虑。

3 结语

1) 从铝锌的相关数据可以知道,铝锌的气化潜热远大于其气化热熔化潜热、熔化热,气化潜热可以近似视作镀层需要的自愈能量。

2) 在镀层厚度一定的情况下,铝含量越大,金属化膜需要的自愈能量越大;锌含量越大,金属化膜需要的自愈能量越小。在镀层厚度一样的情况下,纯铝膜与纯锌膜需要的自愈能量相差55.5%左右。

3) 在方阻一定的情况下,镀层需要的自愈能量随着铝含量增加而增加,随着锌含量的增加而减小。在方阻一定的情况下,纯铝膜和纯锌膜所需要的自愈能量仅相差15.2%左右,差别不大。

参考文献

- [1] 周洋. 柔性直流输电用电力电子电容器关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2018.
- [2] 许然然. 柔性直流换流阀直流支撑电容器用聚丙烯薄膜

绝缘失效及其抑制方法研究[D]. 天津:天津大学,2020.

- [3] 尹婷,严飞,李浩原,等. 金属化安全膜电容器ESR计算[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(3):41-44.
- YIN Ting, YAN Fei, LI Haoyuan, et al. ESR calculation of metalized safe film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(3):41-44.
- [4] 李浩原,尹婷,严飞,等. 金属化膜电容器极板发热计算[J]. 电力电容器与无功补偿,2015,36(5):37-40.
- LI Haoyuan, YIN Ting, YAN Fei, et al. Calculation for electrode heating of metalized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(5):37-40.
- [5] 储松潮,黄云锴,潘焱尧,等. 柔性直流输电用电力电子电容器的测试与工程应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(1):59-64.
- CHU Songchao, HUANG Yunkai, PAN Yanyao, et al. Testing and engineering application of power electronic capacitor for flexible HVDC[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1):59-64.
- [6] 陈耀红,林福昌,李化,等. 金属化膜电容器击穿机理及自愈模拟试验研究[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会2009年学术年会,2009.
- [7] 王佳昕,李化,王哲豪,等. 金属化膜电容器电极边缘电场畸变研究[J]. 高压电器,2022,58(3):29-36.
- WANG Jiaxin, LI Hua, WANG Zhehao, et al. Research on electric field distortion at the edge of metallized film capacitor electrode[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3):29-36.
- [8] 方田,李化,黄想,等. 工频叠加谐波电压下温度对全膜电容器绝缘介质击穿特性的影响[J]. 高压电器,2022,58(9):142-148.
- FANG Tian, LI Hua, HUANG Xiang, et al. Influence of temperature on the dielectric breakdown characteristics of foil-film capacitor under AC superimposed harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9):142-148.
- [9] 周晨,张翔,刘磊,等. 换流阀阻尼电容器等效温升试验及寿命评估[J]. 电力工程技术,2022,41(5):149-155.
- ZHOU Chen, ZHANG Xiang, LIU Lei, et al. Equivalent temperature rise test and life evaluation of converter valve damping capacitor[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(5):149-155.
- [10] 柴斌,史磊,韦鹏,等. 油浸电容器元件损耗频率特性计算参数的修正[J]. 高压电器,2023,59(11):211-216.
- CHAI Bin, SHI Lei, WEI Peng, et al. Correction on power loss characteristic calculation parameters of oil immersed capacitor elements[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(11):211-216.
- [11] 国江,马跃,林浩,等. 特高压用大容量优比特性电容器内熔丝最小熔断能量试验研究[J]. 高压电器,2022,58(2):42-49.
- GUO Jiang, MA Yue, LIN Hao, et al. Study on minimum

- fusing energy test of inner fuse for capacitor with large capacity and superior ratio in UHV application[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 42-49.
- [12] 章妙. 金属化膜电容器自愈特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [13] 李化, 章妙, 林福昌, 等. 金属化膜电容器自愈理论及规律研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 218-223.
LI Hua, ZHANG Miao, LIN Fuchang, et al. Study on theory and influence factors of self-healing in metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 218-223.
- [14] 李志元, 王镜然, 徐哲, 等. 直流电压作用下金属化膜电容器的自愈特性及寿命预测[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2929-2937.
LI Zhiyuan, WANG Jingran, XU Zhe, et al. Self-healing characteristics and life prediction of metallized film capacitors under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2929-2937.
- [15] HEYWANG H. Physikalische und chemische vorgänge in selbstheilenden kunststoff - kondensatoren[J]. Colloid and Polymer Science, 1976, 254(2): 139-147.
- [16] BELKO V O, EMELYANOV O A. Self-healing in segmented metallized film capacitors: experimental and theoretical investigations for engineering design[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(2): 024509.
- [17] TORTAI J H, DENAT A, BONIFACI N. Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(2): 159-169.
- [18] 于成龙, 杜涛, 李化, 等. 基于金属化膜自愈特性的电容器寿命研究[J]. 高压电器, 2015, 51(4): 124-128.
YU Chenglong, DU Tao, LI Hua, et al. Study on lifetime characteristics of metallized film capacitors based on self healing property[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(4): 124-128.
- [19] 熊诗成, 鲁军勇, 郑宇锋, 等. 金属化膜电容器寿命预测方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2378-2384.
XIONG Shicheng, LU Junyong, ZHENG Yufeng, et al. Lifetime prediction of metallized film capacitor based on particle filter[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2378-2384.
- [20] 陈季丹, 刘子玉. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [21] 郭天兴. 金属化膜自愈性能的数值计算方法与自愈特性研究[C]//陕西省电网节能与电能质量技术学会2018年学术交流会. 2018.
- [22] TORTAI J H, BONIFACI N, DENAT A, et al. Diagnostic of the self-healing of metallized polypropylene film by model of the broadening emission lines of aluminum emitted by plasma discharge[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(5): 53304.
- [23] 刘泳斌, 曹均正, 黄金魁, 等. 金属化膜电容器可靠性研究进展[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 53-58.
LIU Yongbin, CAO Junzheng, HUANG Jinkui, et al. Study development on the reliability of metallized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 53-58.
- [24] 陈才明, 贾德星. 金属化电容器的腐蚀现象[J]. 电力电容器与无功补偿, 2004(4): 14-17.
CHEN Caiming, JIA Dexing. Corrosion of metallized capacitors [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2004(4): 14~17.
- [25] 化学试剂熔点范围 通用方法: GB/T 617-2006 [S]. 2006.
Chemical reagent - General method for the determination of melting range: GB/T 617-2006 [S]. 2006.
- 作者简介:
左强林(1967—), 男, 正高级工程师, 主要从事电力电容器设计制造工作。E-mail: huazy@sunking-tech.com。
雷乔舒(1979—), 女, 高级工程师, 主要从事电力电容器设计制造工作。