

# 大电流真空电弧特性的研究与分析

修士新 金 黎 王季梅

西安交通大学电气工程学院, 710049 西安

## MEASUREMENT AND RESEARCH ON HIGH CURRENT VACUUM ARC

Xiu Shixin Jin Li Wang Jimei

Xi'an Jiaotong University

Xi'an, 710049 China

**ABSTRACT** Effect of axial magnetic field, gap length, contact diameter and material on high current vacuum arc are presented in this paper. It is referable to design of high voltage and high-power vacuum breaker.

**KEY WORDS** High Current Vacuum arc Gap length Axial magnetic field

**摘要** 本文分析并介绍了大电流时纵向磁场、触头开距、触头半径等对电弧特性的影响,可为高压大容量真空断路器设计提供参考。

**关键词** 大电流真空电弧 触头开距 纵向磁场

由于真空开关的一系列优点以及触头材料和结构上的改进,它在中压领域获得了广泛应用。根据我国电力工业的发展规划,电网的短路容量将越来越大,因此要求真空开关向高电压大容量发展。

到目前为止,我国已能生产 10kV 50kA 和 35kV 31.5kA 的真空断路器,110kV 40kA 的真空断路器也已初步研制成功。国外真空断路器额定电流可达 3000~4000A,单个灭弧室在 13.8kV 下的分断能力可达 100kA,试验室中可达 200kA。

本文介绍对大电流真空电弧特性进行的有关测试,分析其规律,可为高电压大容量真空断路器设计提供参考。

### 1 纵向磁场对真空电弧的影响

在一定的条件下,若使真空电弧由集聚型变成扩散型,其关键因素就是在触头间加足够强的纵向磁场。纵向磁场的引入可使真空电弧在大电流时变为扩散型,同时具有燃弧时间短、电弧电压低、电弧能量小、阴极斑点分布均匀、触头烧蚀轻、电流过零后介质强度恢复迅速等特点。采用纵向磁场技术及改进触头材料是提高真空断路器分断能力的重要措施。

为了研究纵向磁场对电弧形态的作用,对直径为 60mm 的对接式触头,在开断电流峰值 15kA,触

头分离电流为 9kA 的情况下,分别进行施加纵向磁场(磁通密度  $B_{AX} = 31\text{mT}$ )和不加纵向磁场( $B_{AX} = 0$ )的试验。图 1 给出了两种情况下开断电弧的降压<sup>[2]</sup>。从图 1 可见,在电流接通 1.5ms 后,电弧电压  $U_a$  建立,出现柱状电弧。

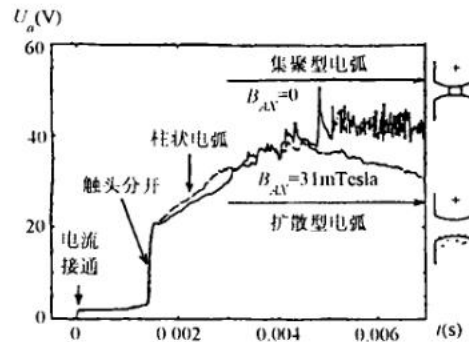


图 1 两种情况下的电弧比较  
Fig. 1 Arcing modes for two case

当  $B_{AX} = 0$  时,柱状电弧一直保持,最终转化为集聚型,电弧电压  $U_a$  出现高频振荡,其值在 40V 以上,阳极斑点出现,触头有很大烧蚀。对于  $B_{AX} = 31\text{mT}$  的情况,触头分离至柱状电弧形成,二者电弧电压接近,但过 3~4ms 后,电弧转变为扩散型,电弧电压平稳,无高频振荡且弧压值较低,此时很多阴极斑点布满触头表面。

图 2 是以直径为 10cm 的平板触头为例测得的阳极现象与外加纵向磁场的关系图<sup>[3]</sup>,其中  $d$  为开距,阴影部分表示有弱的阳极斑点活动区域,但不导致阳极严重熔化且当电流接近于零点时立即消失。从图中可以看出,在相同电流和开距下电弧形态不完全相同,随着  $B_{AX}$  的增加,扩散型电弧区域将扩展到更大的电流和开距。要实现起始集聚型电弧直接转变成扩散型电弧,必须有足够的外加纵向磁场。起始集聚型电弧经阳极喷流型或阳极斑点型电弧再转

变为扩散型电弧也需要一定的纵向磁场,除非开断电流小于8~9kA。

上述情况表明,大电流分断时,当纵向磁场在某

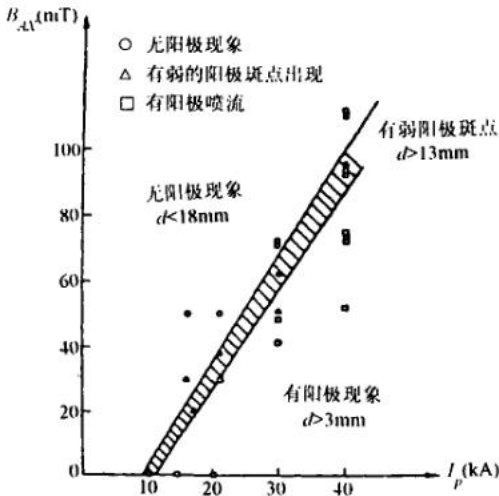


图2 大电流真空电弧出现阳极现象与所加纵向磁场的关系

Fig. 2 Anode involvement observed in high current vacuum arcs with AM field

○无阳极现象 △有弱的阳极斑点出现 □有阳极喷流

一水平值以下时,有明显的阳极现象出现,随着纵向

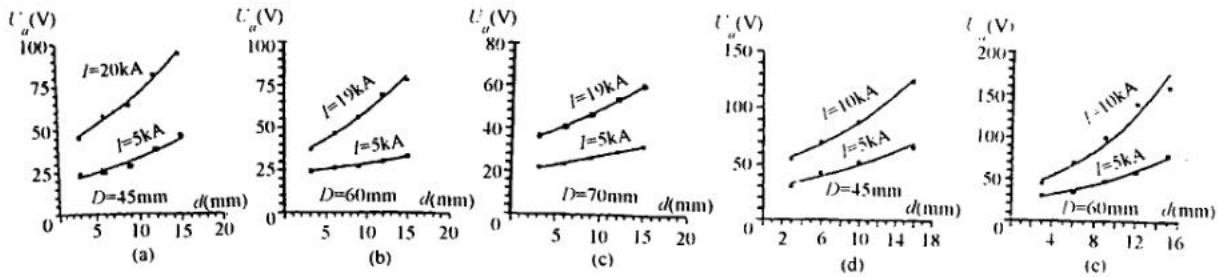


图3 电弧电压与开距间的关系

Fig. 3 Relationship between arc voltage and gap length

压的影响更为显著。以图3(b)为例,对于电流I为5kA,触头开距由3mm增大到15mm时,电弧电压则由20V上升到30V,增加了50%;当电流为19kA时,开距由3mm增加到15mm时,电弧电压则由35V上升到85V,上升率高达142%。

利用光电—微机采集系统对各种磁控触头及开距,特别是大开距时的电弧特性进行研究时发现,在大开距下,杯状横向磁场触头和纵向磁场触头的电弧扰动情况严重。在正弦电流波的前1/4周,电弧扭曲并向触头边缘伸张,弧压上有大的噪声分量,这表明此时磁控能力较弱。利用双探针阵列测得的弧柱区内的电子密度与电弧电压具有较强的相关性,而弧柱外电子密度沿径向呈指数规律衰减,且纵向磁

场值的增加,阳极活动减弱,当纵向磁场值超过某一临界值后,起始柱状电弧可直接转变为扩散型,完全不出现阳极现象。

进一步的试验及对纵向磁场 $B_{AX}$ 与分断电流 $I_p$ 的研究表明,当 $B_{AX} > 3.9(I_p - 9)$ 时<sup>[3]</sup>,可保证起始集聚型电弧不经其它形态直接转变为扩散型。公式中 $B_{AX}$ 的单位是mT, $I_p$ 的单位是kA(幅值)。

### 2 触头开距及触头直径对真空电弧的影响

在1~20kA工频交流电流的范围内我们对实用的真空灭弧室试品的电弧电压进行了测量。图3为不同电弧电流下电弧电压 $U_a$ 与开距 $d$ 间的关系,其图中(a)、(b)、(c)为杯状纵向磁场结构灭弧室的测量结果,(d)、(e)为杯状横向磁场结构灭弧室的测量结果。

从图中可看出,电弧电压 $U_a$ 随电弧电流 $I_a$ 的增大而上升;电弧电压随着开距的加大而上升,而且随着电弧电流的增大,电弧电压对开距的变化更为敏感,亦即在大电流情况下,触头开距对电弧电

场电子密度沿径向衰减要比横向磁场快<sup>[5]</sup>。

通过对不同开距下电弧电压与纵向磁场的研究发现,开距的增加不仅使电弧电压幅值有所上升,而且使与最小电弧电压对应的临界磁场和出现高频噪声的临界磁场值都有所改变。通过图4<sup>[1]</sup>可以看出,触头开距的增加,保持最低电弧电压所需的临界磁场值增大。

综合Kutzner<sup>[7]</sup>和Mitchell<sup>[8]</sup>的理论可以认为,当触头直径一定时,触头开距越大,则阳极关于阴极中心所对应的立体角 $\omega$ (由触头开距和触头直径决定)越小,近阳极区的离子缺乏严重,等离子体密度越小,从而电弧电压越高,其中噪声也越大,而且出现明显噪声时的临界电流值也越小。

触头直径的增加,可使临界磁场值显著降低,同时出现高频振荡分量的磁场值与临界磁场值更加接近

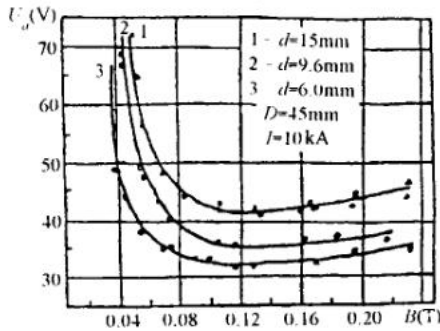


图 4 不同开距下电弧电压与纵向磁场的关系  
Fig. 4 Relationship between arc voltage and AM field for different gap length

近,即触头直径的增加,使临界磁场以下的曲线变得更快。图 5 为  $I=13.3\text{kA}, d=12\text{mm}$  时,在不同触头直径下电弧电压  $U_a$  与纵向磁场  $B$  的关系<sup>[1]</sup>。

图 6 给出了不同触头直径  $D$  下,开距  $d$  与极限

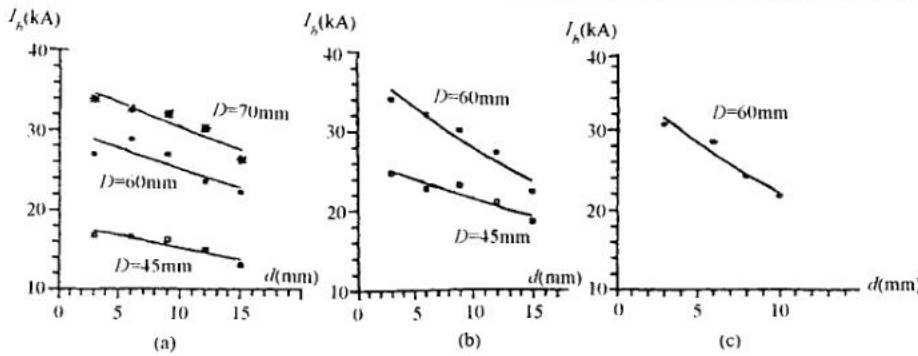


图 6 极限开断电流与开距的关系  
Fig. 6 Relationship between maximal breaking current and gap length

触头开距较大时,弧后电流较大且电弧电流增加到某一临界值时,弧后电流急剧上升;在较小的触头开距下,弧后电流比较小,而且在实验电流范围内没有观察到弧后电流的上升。

经分析计算,随着开距的增大,纵向磁感应强度变小,且分布更趋于不均匀,使电弧在阳极前的收缩更加严重,形成阳极斑点时的电流值减小。因此在大电流开断时,开距越大,则阳极斑点存在的时间越长,弧后电流也越大。

通过对触头直径为 45mm 的杯状纵向磁场灭弧室(触头材料为铜铬 50%,匝数为 1/3)进行测试<sup>[6]</sup>,得到不同开距下弧后电流  $i_{pr}$  与开断电流  $i_b$  的关系曲线,如图 7 所示。

### 3 110kV 40kA 真空断路器灭弧室电弧测试

西安交通大学研制的 110kV 真空断路器为双

开断电流  $I_b$  的关系。其中(a)对应杯状纵磁玻璃外壳灭弧室,(b)对应杯状纵磁中封式陶瓷外壳灭弧室,(c)对应杯状横磁灭弧室。随着开距的增大,极限开断电流呈下降趋势。

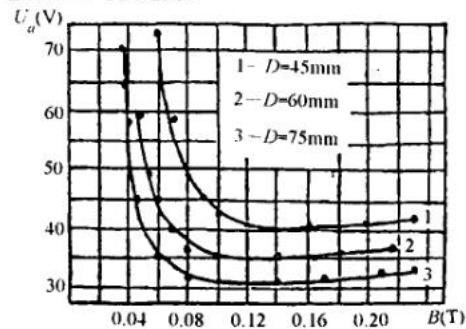


图 5 不同触头直径下电弧电压与纵向磁场的关系  
Fig. 5 Relationship between arc voltage and AM field for different contact diameter

Yanabu 等人对弧后电流与触头开距的关系研究时发现,触头开距对弧后电流有较大影响<sup>[6]</sup>。当

断口,本文所述的测试试品为其中的一个断口灭弧室——63kV 40kA 灭弧室,它采用线圈型纵向磁场结构触头,直径为 120mm,额定开距为 40mm,试验在单频 LC 振荡回路上进行。

#### 3.1 电弧电流与电弧电压的关系

如图 8 所示,在弧压波形的前半部分上叠加了一个高频噪声分量,其幅值较大,极不稳定。它的形成,是由于阳极鞘层的“离子饥饿”引起的<sup>[1]</sup>。

图 9 是电弧电压与电弧电流(有效值)的关系曲线,电弧电流  $I_a$  从 10kA 到 40kA 时,电弧电压  $U_a$  变化不大。

在电流峰值附近,纵向磁场较大,且回路寄生电感及触头线圈电感的影响较小,此时的电弧电压在某一定程度上反映了电弧电压的平均水平。

#### 3.2 开距的影响

对于特定开距,实验中测得了其临界电

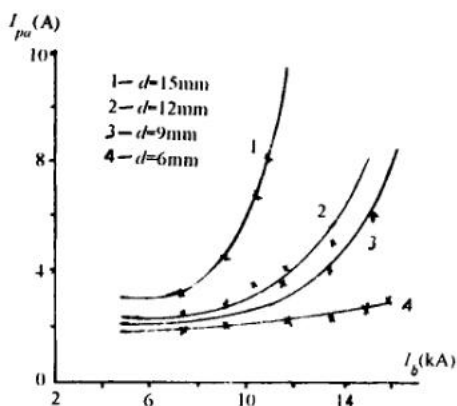


图7 不同开距下弧后电流与开断电流的关系  
Fig. 7 Relationship between post arc current and breaking current for different gap length

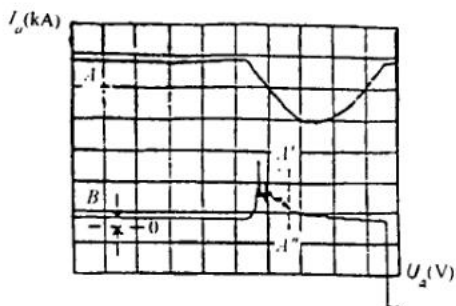


图8 电弧电压与电弧电流示波图  
Fig. 8 Oscillogram of arc voltage and arc current

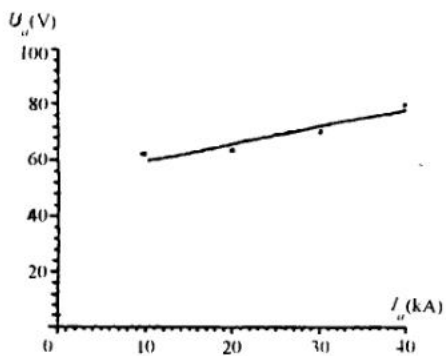


图9 电弧电压与电弧电流的关系  
Fig. 9 Relationship between arc voltage and arc current

流,当电弧电流  $I_a$  (有效值) 大于这个临界值时会出现电弧噪声。临界电流与开距的关系如图 10 所示。

通过对图 10 分析,也可以得出如下解释:开距较大时,磁场沿纵向减弱,对电弧致稳作用变小,大开距下弧柱收缩现象严重,于是开距增大,临界电流值变小。这与本文前面的分析吻合。

如果把图 8 中虚线以左记作噪声持续时间  $t_0$ ,发现开距  $d$  对它的影响如图 11 所示,再次证实了纵

向磁场对电弧的致稳作用随开距增大而减弱。

触头开距  $d$  与电弧电压  $U_a$  关系曲线如图 12 所示。在图中所示的开距变化范围内电弧电压的上升趋势不明显,这说明电弧电压在相同电流下对开距的变化不敏感。

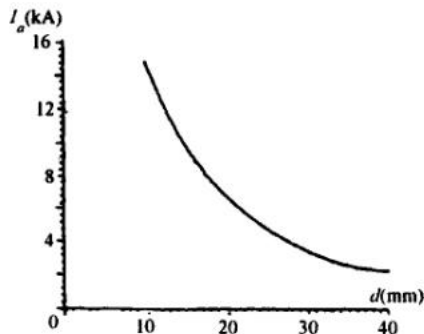


图10 开距与出现电弧噪声的临界电流的关系  
Fig. 10 Relationship between gap length and arc current with arc noise observed

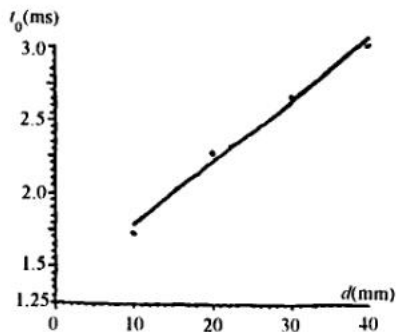


图11 开距与电弧噪声持续时间的关系  
Fig. 11 Oscillating time of arc noise VS gap length

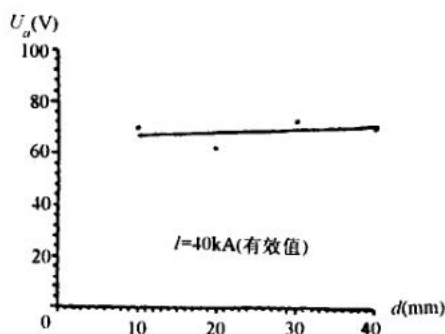


图12 电弧电压与开距的关系  
Fig. 12 Relationship between arc voltage and arc current

#### 4 结束语

影响大电流真空电弧特性的因素很多,且相互作用,除文中所述的外,实际应用中应在一定的触头结构型式下对触头材料进行优选,才能有好的大电

(下转第 36 页 continued on page 36)

量,后者产生附加轴向磁场,其磁力线接近电缆外皮,在电缆外屏蔽层上缠绕的线圈中的净磁通正比于切向电流,所以可以通过线圈上净磁通的大小判断局部放电量。这里所采用的传感器频带上限约为400MHz,传感器和电缆间的互感为1nH,灵敏度小于10PC,定位误差可在1cm以内。

这种方法有不少优点,如对电缆传输性能无影响;能测到无失真的脉冲;传感器能绕着电缆沿任意方向放置;传感器对低频分量不灵敏,远处干扰源的高频干扰沿着电缆传输时被衰减掉,灵敏度较高;能获得较高的定位精度等。但与用高压耦合器测取信号或在接地屏蔽的断开处测取信号的特宽带测量技术相比,它有两个明显的不足:一是只能用于有螺旋接地屏蔽的电缆,二是局部放电源外存在干扰脉冲的特高频分量以及受特高频信号衰减特性的限制,二者决定了传感器与局部放电源的距离,只有在10m以内时,才有较好的灵敏度。因此这种方法只能用于在线监测短电缆及电缆高压附件。

## 6 结束语

在线监测电力设备局部放电的特高频法存在着一些局限性,如需要将传感器放置到局部放电源较近处等,将传感器置于被测设备体内时效果虽好,但需得到设备制造部门的配合。另外,如何根据监测对象的结构及其局部放电的频谱特点选择频段及带宽,体内及体外监测方式的确定,传感器的选择,放电量的标定等一些问题尚需开展进一步的研究。

尽管如此,特高频法因具有能够有效抑制干扰,监测的灵敏度和信噪比高的优点,故在在线监测电力设备的局部放电方面仍具有广泛的应用前景。

(上接第32页 continued from page 32)

流分断效果。用于纵向磁场结构的触头材料大多为CuBiAl、CuBiAgFe、CuBi、CuTeSe和CuCr之类的合金,前四种适合于分断较大电流,可接近200kA,但耐压性能较差,而CuCr类材料耐压性能好,但分断电流能力一般不超过50kA。

利用纵向磁场技术与相应的触头材料配合也是发展大容量真空灭弧室的重要措施。

## 5 参考文献

- 1 王季梅. 真空开关理论及其应用. 西安交通大学出版社, 1986
- 2 Schulman *et al.* Evaluation of AC axial magnetic fields needed to prevent anode spot in vacuum arc between opening contacts. IEEE

## 7 参考文献

- 1 吕建 *et al.* 局部放电测量系统的脉冲响应研究. 高电压技术, 1987; (1)
- 2 Stone G C *et al.* Partial implementation of ultrawideband partial discharge detectors. IEEE Trans on Elect. Insul., 1992; 27(1)
- 3 Lightle D *et al.* Monitoring of gas at ultra high frequency. Proceedings of the 6th ISH, 1989; 1~4
- 4 Judd M D *et al.* The excitation of UHF signals by partial discharges in GIS. IEEE Trans on Diele and Elect. Insul., 1996; 3(2)
- 5 Hampton B F *et al.* Diagnostic measurement at UHF in gas insulated substations. IEE Proceedings, 1988, 135(2): 137~144
- 6 Pearson J S *et al.* Partial discharge diagnostics for gas insulated substations. IEEE Trans on Diele and Elect Insul., 1995; 2(5): 893~905
- 7 刘卫东 *et al.* 特高频在线检测GIS局部放电. '95全国设备诊断技术学术会议论文集(上), 武汉, 1995
- 8 Sellars A G *et al.* UHF detection of leader discharges in SF<sub>6</sub>. IEEE Trans on Diele and Elect Insul., 1995; 2(1): 143~154
- 9 Sellars A G *et al.* The UHF technique of partial discharge detection using a PD simulator. IEEE Trans on Diele and Elect Insul., 1995; 2(1): 46~53
- 10 Sedding H G *et al.* A new sensor for detecting partial discharges in operating turbine generators. IEEE Trans on Energy Conversion, 1991; 6(4): 700~706
- 11 Massatake Kawada *et al.* An experiment of the detection of partial discharges by microwave. Proceedings of 1994 International Joint Conference, 1994; 383; 386
- 12 Pompili *et al.* Early stages of negative PD in dielectric liquids. IEEE Trans on Diele and Elect Insul., 1995; 2(4): 602~613
- 13 龙家聪. BGF-1局部放电运行监测器及其应用的研究. 电气设备绝缘在线测试技术和应用实例资料选编, 1988
- 14 覃剑 *et al.* 浇注式变压器局部放电在线监测的研究. 高电压技术, 1995; 21(3)
- 15 Wouters P A A F *et al.* New on-line partial discharge measurement technique for ploymer insulated cables and accessories. Proceedings of the 8th ISH, 1993; (3): 105~108

收稿日期: 1996-11-17

覃剑 博士研究生, 1995年清华大学高电压技术专业获硕士学位, 现从事电力设备故障诊断研究

王昌长 教授, 从事高电压绝缘测试及电力设备诊断教学及科研工作, 现在美国作访问学者。

邵伟民 工程师, 1989年西安交通大学电器专业毕业。现从事输变电设备的科研及管理工作。

Trans on CPMT, 1994; 17(1)

- 3 Schulman *et al.* Effect of an axial magnetic field upon development of the vacuum arc between opening electric contacts. IEEE Trans on CPMT, 1993; 16(2)
- 4 孙云升. 西安交通大学硕士论文, 1992
- 5 武建文. 西安交通大学博士论文, 1995
- 6 何银胜. 西安交通大学硕士论文, 1994
- 7 Kutzner J. Voltage-current characteristics of a diffusion vacuum arc. Physica, 1981; 104c: 116-123
- 8 Mitchell G R. High-current vacuum arcs, I: Theoretical outline. Proceedings of IEE, 1970; 117: 2315-2326

收稿日期: 1996-05-26。

修士新 博士生, 从事高电压及大容量真空灭弧理论方面的研究。

金黎 博士生, 从事真空电弧理论方面的研究。

王季梅 教授, 博士生导师, 从事真空电弧及熔断理论方面的研究。