

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.12.032

直流小电流下不同气体电弧的图像特性分析

陈志彬¹, 姜旭¹, 史宗谦², 马占峰¹, 严旭¹, 贾申利²

(1. 西安西电电气研究院有限责任公司, 西安 710075; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 电弧图像能够直观的反映出电弧的形貌及运动特性。为了获得不同气体介质中的电弧状态及其影响因素,文中利用可拆可视化小型样机,对直流小电流下不同气体电弧的形貌进行了拍摄和对比,并分析了电弧电压的变化规律。研究表明,随着电弧电流的减小,电弧半径减小,电弧亮度降低;随着腔体充气压力的增大,电弧中心的亮度升高,电弧电压增大;触头开距的增大,使得电弧长度增加,电弧电压升高; CO_2 和 N_2 电弧燃烧较不稳定, N_2 电弧射流引起的热气体径向喷射力更强, CO_2 电弧受开距的影响更为显著。电弧图像的辅助分析方法,为实验现象的理解提供了参考,同时也为环保型气体电弧特性的研究提供了支撑。

关键词: 电弧图像; 灭弧气体; 形貌特性; 直流; 电弧电压

Analysis on the Image Characteristics of Different Gases Arc Under DC Lower Current

CHEN Zhibin¹, JIANG Xu¹, SHI Zongqian², MA Zhanfeng¹, YAN Xu¹, JIA Shenli²

(1. Xi'an XD Electric Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710075, China;

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

Abstract: Arc appearances and changing characteristics can be reflected from the arc images. In order to obtain the states of the arc and the influencing factors to them, a lower current flexible model prototype with two observation windows is adopted, the arc appearance in different gases are captured and compared, and the variations of the arc voltage are analyzed. The research shows that arc radiuses and arc brightness decrease with the arc current getting lower, arc voltage and arc brightness increase with the filling gas pressure increasing. The enlargement of the contact distance makes the increase of the arc length and leads to the rising of the arc voltage. CO_2 and N_2 arcs are burning more unstably, the spurt power of the hot gas caused by the jets is larger in N_2 arc, and the effect of the contact distance is remarkable to the CO_2 arc. The analysis method assisted by the arc images gives a reference for understanding the experimental phenomena and provides a support for researching the arc characteristics of the environment-friendly gases.

Key words: arc images; arc extinguishing gases; appearance characteristics; DC; arc voltage

0 引言

六氟化硫(SF_6)气体是一种人工合成气体^[1],凭借其良好的绝缘与灭弧性能,广泛地用作高压开关设备的绝缘和灭弧介质^[2-5]。然而,由于 SF_6 气体是一种强温室效应气体^[6],具有很强的吸收红外线的的能力,难于被光分解或化学分解,排放到大气中后能存在 3 200 多年^[7]。因此近些年来,国内外研究者一直在寻找可以替代 SF_6 气体的环保型气体。文[8]中通过

实验研究表明,充满 CO_2 的负荷开关拥有优于 N_2 、Air、He 的开断性能,但是与 SF_6 相比要差一些;文[9]中发现同样实验条件下, CO_2 比 SF_6 的弧后电流高出一个数量级;当 CO_2 与 SF_6 混合使用时,文[10]中发现混合气体开断电流后恢复较慢,且会产生 SO_2F_2 等有毒物质;文[11]中利用汤逊脉冲法测得, CF_3I 气体的临界耐电强度比纯净 SF_6 约高 21%,70%的 $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ 混合气体的有效电离系数和纯净 SF_6 基本相同;文[12-13]中通过计算对比了 SF_6/CF_4 、 $\text{SF}_6/\text{C}_2\text{F}_6$ 、 SF_6/N_2 3 种混合气体的开断能力,并指出 $\text{SF}_6/$

收稿日期:2016-06-24; 修回日期:2016-08-20

CF_4 气体混合比在 40%~60% 之间时会获得相对较好的灭弧效果;文[14-15]中计算分析了 $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2/\text{CO}_2$ 混合气体,以及纯 CHF_3 和 CF_4 的有效电离系数和子漂移速度等关键参数,并经过大量的绝缘特性实验得出, $\text{c-C}_4\text{F}_8/\text{CF}_4$ 在混合比大于 50/50 时的耐电强度比纯净 SF_6 的约高 1.2%~32.6%,而温室效应指数(GWP)会比纯净的 SF_6 的约低 63.6%~68.2%^[16-18]。

可见, N_2 和 CO_2 气体不仅作为单纯气体而备受关注,而且常作为混配气体或缓冲气体而被广泛采用。基于此,文中利用可拆可视化小型样机^[19-20],在直流小电流条件下,对高速摄影仪拍摄的 4 种不同气体电弧图像进行了对比,重点研究了 Ar 、 N_2 、 CO_2 与 SF_6 气体电弧在形貌、亮度、射流和稳定性上的差异,分析了气体种类、电流大小、气压及开距对电弧特性的影响,为纯气体的应用及环保型混合气体的研制提供了基础。

1 实验平台及条件

1.1 可拆式模型样机

实验用小电流可拆式模型样机见图 1。其腔主体材料为不锈钢,规格为: $\phi 125\text{ mm}$ (内径) $\times \text{L}400\text{ mm}$,最大可承受 0.5 MPa 的压力。腔体前后相对安装的石英玻璃观察窗,可方便地观察电极及拍摄电弧图像,右侧的手轮用于调节动、静电极之间的开距。腔体上方安装了正压表、真空表及电磁泄压阀压力显示表。腔体下方与机械真空泵对接,可对实验腔抽真空,所能达到的真空度约为 100 Pa。实验中所使用的电极由无氧铜加工而成,电极端面均为平面,阳极直径为 40 mm,阴极直径为 20 mm,电极两端都加工有外螺纹,可直接与导电杆结合,且方便更换。

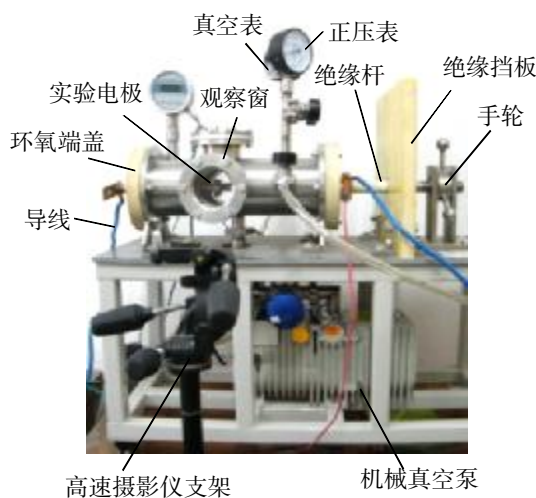


图 1 小电流可拆式模型样机图

Fig. 1 Lower current flexible model prototype

1.2 实验原理图

实验电流由高压合成回路引弧支路产生,通过调节电容器组的充电电压来改变实验电流,见图

2。实验前,闭合充电开关 HK_2 ,交流电源经过调压器 T 升压后,通过整流器 B 变为直流对电容器组 C_1 充电,充电至所需电压后,断开 HK_2 ,电源准备就绪。实验时,闭合引弧开关 HK_1 ,由电容器组 C_1 、电抗器组 L_1 、电阻 R_1 以及样机 SD 构成放电回路。

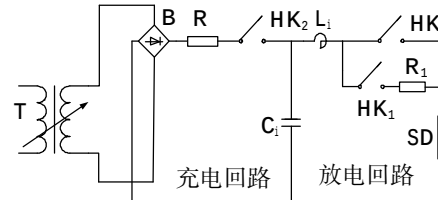


图 2 实验原理图

Fig. 2 Schematic for experiments

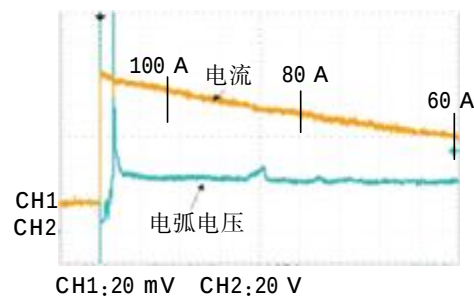
1.3 实验条件

利用手轮调整好触头开距后,在两触头间固定一段细铜丝,采用铜丝引弧的方式来产生电弧。实验气体有 Ar 、 N_2 、 CO_2 、 SF_6 4 种;充气压力分别为 1、3、5 atm(1 atm=1 个标准大气压,下文同);触头开距为 10、15 mm;电流为峰值 120 A 的衰减电流。在电弧产生前,手动高速摄影仪记录电弧形态,运用示波器记录电弧电压和电流数据。为了提高实验准确性,增加了抽真空时间,然后充入实验气体。如此往复充抽气几次后,将实验气体充到所需要气压值,这样很大程度上保证了腔体内气体的纯度。

2 实验结果与对比分析

2.1 电流与电弧电压波形

Ar 电弧在 5 atm、15 mm 触头开距下的电压、电流波形见图 3。



CH1:20 mV CH2:20 V

图 3 实验电流与 Ar 电弧电压波形图

Fig. 3 Waveforms of experimental current and Ar arc voltage

图 3 中给出了峰值 120 A 的实验电流衰减到 100、80、60 A 时所对应的位置。从电弧电压的变化波形可以看出,除在引弧阶段出现电弧电压的突变外,燃弧阶段电弧电压基本处于平稳状态。其他 3 种气体电弧的电压变化趋势相同,此处不赘述。

2.2 不同情况下的电弧图像

2.2.1 气体种类的影响

4 种气体介质在同一实验条件下的电弧形态见图 4(3 atm,100 A,10 mm)。由图 4 可以看出, Ar 和 N_2

的电弧半径比较接近,均大于另外两种气体电弧半径,且 SF_6 的电弧半径最小。当阳极和阴极产生的射流相对时,汇流处的热气流会向电弧的径向喷射。 N_2 电弧产生的径向喷射力更强,也说明了 N_2 电弧燃烧的相对剧烈。此外,4 种气体介质在相同条件下的电弧电压 SF_6 最高 48.68 V, Ar 最低 29.29 V, N_2 与 CO_2 居中,分别为 55.2、51.2 V。

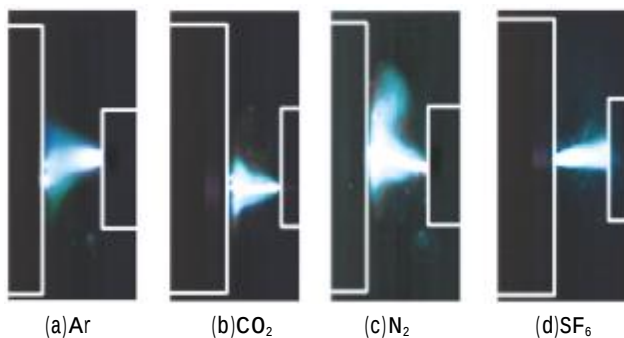


图 4 不同气体电弧形貌的对比图

Fig. 4 Images of the arc in different gases

2.2.2 电流大小的影响

Ar 电弧在不同电流下的电弧形貌见图 5(5 atm, 15 mm)。由图 5 可以看出,随着电弧电流的减小,电弧半径在逐渐减小,同时电弧亮度也在逐渐减小,电弧变得不稳定,当电流减小到一定值时,电弧能量将不足以维持电弧的燃烧,电弧熄灭。3 种电流下的 Ar 电弧电压分别为 35.7、34.6、33.8 V,随着电弧电流的减小,电弧电压也在减小,但变化不明显。

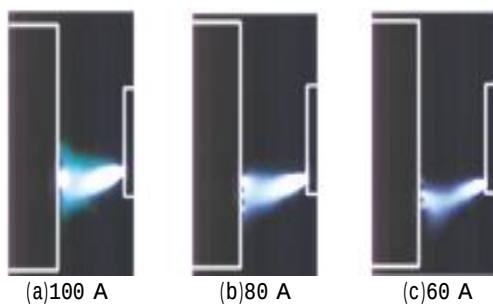


图 5 Ar 电弧在不同电流下的形貌图

Fig. 5 Images of the Ar arc at different current

2.2.3 充气压力的影响

不同充气压力下, CO_2 与 SF_6 电弧形貌图见图 6 (10 mm)。由图 6 可以看出,随着腔体充气压力的增大,电弧半径在逐渐减小,电弧中心的亮度则越来越大,意味着弧柱中心的温度随着充气压力的增加而升高。电弧半径的减小,一方面说明了电弧边缘区域冷却效果的增强,另一方面也体现了灭弧介质对电弧局限作用的加大。此外,随着气体压力的增加,电弧电压略有增加。

2.2.4 电极开距的影响

N_2 和 SF_6 电弧在开距为 10、15 mm 时的电弧形貌见图 7。由图 7 可以看出,随着触头开距的增大,

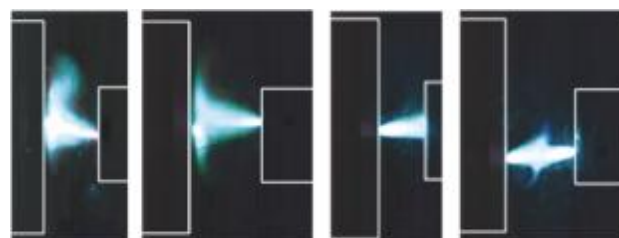


(a) 1 atm CO_2 (b) 3 atm CO_2 (c) 5 atm CO_2 (d) 1 atm SF_6 (e) 3 atm SF_6

图 6 CO_2 、 SF_6 电弧在不同充气压力下的形貌图

Fig. 6 Images of the CO_2 , SF_6 arcs at different pressure

电弧长度增加,电弧的亮度有所降低,电弧半径变化不大。随着开距的增大,电弧电压升高, N_2 电弧电压从 55.2 V 升至 58.4 V, SF_6 电弧电压从 48.7 V 升至 55.2 V。 N_2 电弧电压测量结果较 SF_6 电弧电压略高,是由于 N_2 电弧强烈的射流交汇引起电弧路径更长造成的,从图像中可以明显地观察到。



(a) 10 mm N_2 (b) 15 mm N_2 (c) 15 mm SF_6 (d) 15 mm SF_6

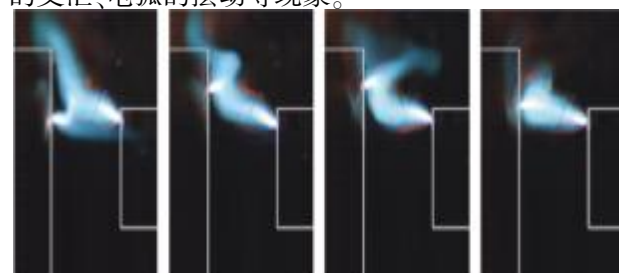
图 7 N_2 、 SF_6 电弧在不同开距下的形貌图

Fig. 7 Images of N_2 , SF_6 arcs at different contact distances

3 讨论

受到电流、气压、开距等因素的影响,电弧常处于不稳定的燃弧状态,同时受到两极射流和弧根运动的影响,会引起电弧形貌和电弧电压的改变。对于封闭的腔体,如果单纯从外在测得的特性来判断,难免会出现偏差,利用高速摄影仪拍摄电弧图像作为辅助分析,能够清晰的看到电弧变化的同时,增加了对气体特性理解的准确程度。

在实验过程中发现, SF_6 和 Ar 电弧比 CO_2 和 N_2 电弧燃烧稳定, CO_2 电弧形貌及电弧电压受开距的影响较为显著。 CO_2 电弧形貌的变化图见图 8(5 atm, 15 mm)。图 8 可以明显的观察到弧根的运动、射流的交汇、电弧的摆动等现象。



(a) 射流相对 (b) 射流交叉 (c) 射流交叉 (d) 射流相对

图 8 不同状态下 CO_2 电弧形貌的变化图

Fig. 8 Images of the CO_2 arc changing in each case

4 结论

利用可拆可视化小型样机及高速摄影仪,重点研究了直流小电流下不同气体电弧受电流大小、充气压力及电极开距影响的特性规律,通过对电弧图像及电弧电压的对比分析,得到如下结论:

1)随着电弧电流的减小,电弧半径减小,电弧亮度降低,电弧变得不稳定。随着腔体充气压力的增大,电弧半径也减小,但电弧中心的亮度升高,电弧电压略有增大。

2)随着触头开距的增大,电弧长度增加,电弧的亮度降低,电弧电压升高,但电弧半径变化不大。 SF_6 和Ar电弧较 CO_2 和 N_2 电弧燃烧稳定, N_2 电喷射流引起的热气体径向喷射力更强, CO_2 电弧受开距的影响更为显著。

3)高速摄影仪拍摄电弧图像的辅助分析方法,能够清晰的看到电弧形貌的变化,可以增加对气体特性理解的准确程度。

4)综合考虑不同条件下的气体电弧特性发现,文中所研究的气体中, CO_2 气体较适合作为环保型混合气体混充气的候选介质。

参考文献:

- [1] 汲胜昌,钟理鹏,刘凯,等. SF_6 放电分解组分分析及其应用的研究现状与发展[J]. 中国电机工程学报,2015,35(9):2318-2332.
JI Shengchang,ZHONG Lipeng,LIU Kai,et al. Research status and development of SF_6 decomposition components analysis under discharge and its application[J]. Proceedings of the CESS,2015,35(9):2318-2332.
- [2] JIANG Xu,LI Xingwen,ZHAO Hu,et al. Analysis of the dielectric breakdown characteristics for a 252 kV gas circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power delivery,2013,28(3):1592-1599.
- [3] 张铎,赵云学,郑宇宏,等.1 100 kV GIS用 SF_6 断路器的研究开发[J]. 高压电器,2013,49(10):26-31.
ZHANG Duo,ZHAO Yunxue,ZHENG Yuhong,et al. Development of 1 100 kV SF_6 circuit breaker for GIS[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(10):36-31.
- [4] JIANG Xu,ZHONG Jianying,ZHANG Youpeng,et al. Simulation of the arc behavior in puffer-type high voltage circuit breaker considering the influence of nozzle ablation[J]. High Voltage Engineering,2013,39(4):827-832.
- [5] 赵虎,李兴文,贾申利. SF_6 及其混合气体临界击穿场强计算与特性分析[J]. 西安交通大学学报,2013,47(2):109-115.
ZHAO Hu,LI Xingwen,JIA Shenli.Calculation and characteristic analysis of critical breakdown field strength of SF_6 and mixtures[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2013,47(2):109-115.
- [6] LI Xingwen,JIA Shenli,YOU Yimin,et al. Experimental study of the arc plasma characteristics in SF_6 , N_2 and CO_2 [J]. IEICE Transactions on Electronics,2011,94(9):1422-1426.
- [7] CHRISTOPHOROU L G,OLTHOFF J K. Electron interactions with SF_6 [J]. Journal of Physical & Chemical Reference Data,2000,29(3):449-473.
- [8] YOKOMIZU Y,SHIRATORI M,ITO K,et al. Interrupting capability of a load-break switch adopting various gases as arc quenching medium[C]//Proceeding of the XIV International Conference on Gas Discharges and Their Applications.Liverpool:IEEE,2002:123-126.
- [9] NISHIWAKI S,KOSHIZUKA T,UCHII T. Discussions on post arc current of A CO_2 circuit breaker[C]//Proceeding of the XVII International Conference on Gas Discharges and their Applications.Cardiff:IEEE,2008:125-128.
- [10] WANG W,RONG M Z,WU Y,et al. Fundamental properties of high-temperature SF_6 mixed with CO_2 as a replacement for SF_6 in high-voltage circuit breakers[J]. Journal of Physics D-Applied Physics,2014,47(25): 903-909.
- [11] JUAREZ A M,BASURTO E,HERNANDEZ-AVILA J L,et al. Electron swarm coefficients of CF_3I and $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$ and their comparison with those of SF_6 [C]//Proceeding of the XVII International Conference on Gas Discharges and their Applications.Cardiff:IEEE,2008:545-548.
- [12] CHERVY B,RIAD H,GLEIZES A. Calculation of the interruption capability of SF_6-CF_4 and $\text{SF}_6-\text{C}_2\text{F}_6$ mixtures-Part I: Plasma properties[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,1996,24(1): 198-209.
- [13] CHERVY B,GONZALEZ J J,GLEIZES A. Calculation of the interruption capability of SF_6-CF_4 and $\text{SF}_6-\text{C}_2\text{F}_6$ mixtures-Part II: Arc decay modeling[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,1996,24(1): 210-217.
- [14] DENG Yunkun,XIAO Dengming. The effective ionization coefficients and electron drift velocities in gas mixtures of CF_3I with N_2 and CO_2 obtained from Boltzmann equation analysis[J]. Chinese Physics B,2013,22(3): 352-357.
- [15] XIAO Dengming,DENG Yunkun. Determination of electron swarm parameters in pure CHF_3 and CF_4 by a time-resolved method[J]. Plasma Science and Technology,2013,15(1): 25-29.
- [16] 张刘春,肖登明,张栋. $\text{C-C}_4\text{F}_8/\text{CF}_4$ 替代 SF_6 可行性的SST实验分析[J]. 电工技术学报,2008,23(6):14-18.
ZHANG Liuchun,XIAO Dengming,ZHANG Dong. SST experimental analysis on the feasibility of $\text{C-C}_4\text{F}_8/\text{CF}_4$ substituting SF_6 as insulation medium[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(6):14-18.
- [17] 邓云坤,肖登明,陈炯. $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$ 混合气体作为 SF_6 替

- 代气体用于 GIS/C-GIS 的绝缘性能分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(9):2288-2293.
- DENG Yunkun, XIAO Dengming, CHEN Jiong. Insulation performance of $\text{CF}_3\text{-I-N}_2$ gas mixtures as alternative for SF_6 in GIS/C-GIS[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(9): 2288-2293.
- [18] 肖登明. 环保型绝缘气体的发展前景[J]. 高电压技术, 2016, 42(4):1035-1046.
- XIAO Dengming. Development prospect of gas insulation based on environmental protection[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4):1035-1046.
- [19] 姜旭, 史宗谦, 李兴文, 等. 不同灭弧介质中等离子体的光谱诊断[C]//2011 输变电年会论文集. 西安: 西安高压电器研究院, 2011: 129-132.
- JIANG Xu, SHI Zongqian, Li Xingwen, et al. Spectral diagnosis of plasma in different arc extinguishing mediums [C]//Proceedings of the 2011 Annual Conference of the Transmission and Distribution. Xi'an: Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, 2011: 129-132.
- [20] JIANG Xu, ZHONG Jianying, ZHANG Youpeng, et al. Study on the arc characteristics in different gases based on spectrum measurement[C]//The Institute of Electronics Information and Communication Engineers, EMD2012. Narashino: IEEE, 2012: 71-75.
- 陈志彬(1979—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为 GIS 产品研发及直流开断技术。
- 姜旭(1982—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为高压开关设备及环保型开关产品的设计与研制。

中国电工技术学会等离子体及应用专业委员会成立会议 与 2016 全国“高电压与放电等离子体”学术会议在北京召开

简 讯

2016 年 11 月 25 日下午, 中国电工技术学会等离子体及应用专业委员会第一届委员会成立暨第一次工作会议在北京新大都饭店召开。中国科学院电工所严萍研究员向与会人员致欢迎词, 中国电工技术学会韩毅副秘书长宣读了“关于中国电工技术学会等离子体及应用专业委员会第一届委员会组成方案的批复”(电技学字[2016]第 113 号)文件, 并介绍了学会的业务情况。大会举手表决选举严萍研究员为第一届委员会主任委员、王新新教授等 4 位同志为副主任委员、邵涛研究员为秘书长。新当选的主任委员严萍研究员发表了讲话, 她回顾了两年前申请成立专委会的初衷, 简要介绍了专委会的业务范围和任务, 即立足电工技术, 与高电压绝缘技术、脉冲功率技术、及等离子体物理及应用等方面交叉融合, 强调低温放电等离子体技术的研究和应用。其后, 华北电力大学谢庆副教授介绍了专委会学术会议管理条例; 南京工业大学方志教授介绍了专委会编辑出版条例; 清华大学李和平副研究员介绍了专委会奖励条例; 邵涛研究员介绍了专委会财务与宣传条例。接下来, 专委会委员逐个进行了发言, 委员们普遍认为今后应围绕专委会平台开展更多的学术交流活动。最后, 主任委员严萍研究员发表了总结讲话, 她希望大家今后围绕专委会平台能够互相支持、保持成长、培养年轻人才, 在中国电工技术学会的领导下, 积极组织开展国内外高电压与放电等离子体技术领域的各种活动, 为促进我国高压放电等离子体应用技术的发展做出自己的贡献。

作为专委会的旗舰会议, 2016 全国“高电压与放电等离子体”学术会议于 11 月 26-27 日在北京新大都饭店召开。会议由中国电工技术学会和等离子体及应用专业委员会主办, 中国科学院电工研究所、华中科技大学电气与电子工程学院承办, IFSA 协同创新中心和《高电压技术》杂志社提供支持。参加会议的有来自全国 110 多家高校、科研院所以及企业界的 431 名代表, 会议累计共收到投稿摘要 281 篇、中英文全文论文 132 篇。会议开幕式由大会主席邵涛研究员主持, 韩毅副秘书长代表中国电工技术学会致辞, 肖立业研究员代表大会承办单位致辞, 严萍研究员代表专委会致辞。国家自然科学基金委工材学部五处丁立健主任、关永刚老师也莅临了大会开幕式。

开幕式后, 中国科学院陈维江院士、中国科学院李应红院士、清华大学王新新教授、国家“千人计划”专家孔刚玉教授和西安交通大学李兴文教授相继作了精彩的大会特邀报告, 他们分别介绍了我国发展特高压输电的创新实践、航空等离子体技术研究进展与挑战、帕申定律和气体放电相似性、等离子体在癌症治疗上的进展和机会、高功率脉冲放电等离子体技术及应用。

大会采取邀请报告、口头报告和墙报的形式, 按高电压、脉冲功率和等离子体 3 个主题分别同步进行。会议期间, 有 9 位学者作了邀请报告, 137 位学者作了口头报告, 88 个海报进行了展示和交流。大会共评出 6 篇优秀论文, 9 个优秀口头汇报、12 篇优秀墙报。

该次大会为国内从事高电压与放电等离子体研究的科技工作者以及企业提供了一个活跃的交流平台, 在促进不同学科放电等离子体交叉应用的同时, 还大力推动了高电压与放电等离子体学术界和企业界的交流与融合, 为放电等离子体进一步的应用与产业发展创造了契机。