

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.08.001

高温混合气体临界击穿场强的计算研究

李世欣

(环境保护部核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要: 针对高温混合气体临界击穿场强的计算问题, 首先对所采用的零维模型进行了介绍, 在此基础上, 对纯空气、空气与PA₆蒸气的混合气体、空气与POM蒸气的混合气体在内的不同组分气体介质的临界击穿场强进行了计算, 并对计算结果进行了理论上的分析。所涉及到的内容主要包括高温体粒子组分的获取, 玻尔兹曼方程的近似求解和电子能量分布函数(EEDF)的计算, 碰撞截面数据的选择, 电子碰撞电离系数和吸附系数的计算。其中重点在于对玻尔兹曼输运方程的近似求解和分析不同气体介质对临界击穿场强的影响。
关键词: 临界击穿场强; 零维模型; 玻尔兹曼方程; 电子能量分布函数

Research on the Calculation of Critical Breakdown Field Strength of High Temperature Gas Mixtures

LI Shixin

(Nuclear and Radiation Safety Center, MEP, Beijing 100082, China)

Abstract: Aiming at the calculation of the critical breakdown field strength of high-temperature gas mixtures, the zero-dimensional model adopted in this paper is introduced at first. Based on the zero-dimensional model, the critical breakdown field strength of gas mixtures with different components, including the pure gas, the mixture of air & PA6 vapor and the air & POM vapor are calculated. The results are analyzed theoretically. The main contents include the acquisition of particle composition under high temperature, the approximate solution of Boltzmann equation, the calculation of electron energy distribution function(EEDF), the selection of collision cross section data and the calculation of ionization coefficient and adsorption coefficient. The emphasis is on the approximate solution of the Boltzmann transport equation and the analysis of the effect of different gas media on the critical breakdown field strength.

Key words: critical breakdown field strength; zero-dimensional model; Boltzmann equation; electron energy distribution function(EEDF)

0 引言

大容量空气直流断路器在开断过程中, 电弧会在跑弧道内不断运动, 电弧运动过的后方, 如果介质恢复不充分, 则会引起电弧后方的背后击穿现象。背后击穿直接会导致电弧在灭弧室内的来回往复运动, 加剧电弧对金属电极的烧蚀作用, 进一步削弱灭弧室的介质恢复能力, 严重时反复的背后击穿会导致开断失败。

事实上, 针对高温气体临界击穿场强的研究工作最早出现在高压断路器中SF₆介质的研究中。以

SF₆及其混合气体为研究对象, 文[1]基于上述方法最早计算了不同情况下的临界击穿强度, 并且他们通过对比实验所得的电离与吸附系数随电场强度的变化曲线, 验证了计算结果的有效性。文[2]通过考虑更多的化学反应, 进一步细化了该模型, 但是其工作仅限于3 000 K情况下, 对于实际工程的指导意义不大。文[3]进行了相对完善的研究工作, 不但计算的温度范围涵盖了介质恢复过程中300~3 000 K的温度区间, 而且额外考虑里电子与离子之间的作用, 之前的工作仅考虑了电子与中性粒子之间的相互作用。文[4]引入了最新的碰撞截面数据, 对SF₆

的临界击穿场强进行了计算。文[5]进一步优化计算方法,完整地考虑了电子和离子的相互作用。

但是以上研究工作的对象均为高压SF₆断路器,对于中低压断路器中的空气介质和常见的应用于断路器中由于产气材料,例如聚甲醛(POM)和聚酰胺(PA6)的蒸发而产生的高温下混合气体的击穿场强鲜有涉及。直到2004年,文[6]报道了计算空气介质的高温临界击穿场强,系统地阐释了高温气体临界击穿场强的计算方法,并且通过整理前人的击穿试验,利用实验结果验证了空气临界击穿场强计算的有效性。其研究工作发现,除了前人已经指出的NO的影响之外,O₂的分解也是引起临界击穿场强降低的另外一个因素。文[7]计算了空气中混合铜蒸汽对击穿特性的影响,但是由于缺乏Cu₂O的碰撞截面数据,计算结果的有效性有待商榷。

概括而言,对于空气介质,目前仅有文[6]作了相关研究,但是对于空气混合POM与PA6尚未见研究,而二者对于临界击穿场强的影响是影响空气直流断路器开断过程背后击穿的一个重要因素。

1 临界击穿场强的计算原理

文中用来计算不同气体介质在不同温度、不同压力情况下的临界击穿场强的零维模型^[1]的基本原理可以概括为:首先计算得到不同气体介质高温情况下的粒子组分,然后通过所得的粒子组分,基于玻尔兹曼方程获得不同电场强度情况下电子的能量分布函数,在已知能量分布函数的基础上计算得到不同电场强度对应的电子电离与吸附反应的常数,最终电子电离与吸附反应达到平衡情况下的电场强度即为气体的临界击穿场强。以下将从高温气体粒子组分的计算、电子能量分布函数的计算、电离与吸附系数的计算和空气临界击穿场强的计算4个方面对临界击穿场强的计算原理进行阐述。

1.1 高温气体粒子组分的计算

随着气体温度从室温不断升高到4 000 K,粒子内部会发生分解以及电离反应等多种反应,导致粒子组分发生变化。而粒子组分的变化会对电子能量分布函数以及电子碰撞的反应速率产生影响,因此高温气体的粒子组分是计算高温气体临界击穿场强的必要数据。

电弧等离子体粒子组分构成的计算是基于局域热力学平衡态假设进行的,即电弧内部任一位置电子、离子和中性粒子具有相同的动能和温度,整个系统处于化学平衡态,各种物性参数(包括粒子化学组分构成,热力学属性和输运系数)仅仅是温度和

压强的函数。电弧等离子体粒子组分构成通过系统最小吉布斯自由能方法计算得到。文中通过采用吉布斯自由能最小化的原理计算获得空气和空气与PA6、空气与POM不同比例混合之后的粒子组分。具体而言,在纯空气中,计算涉及到的中性粒子种类包含H, O, N, H₂, O₂, N₂, NO, CO, H₂O, CO₂;在空气和PA6的混合气体计算中涉及到的中性粒子种类包含H, C, O, N, H₂, C₂, O₂, N₂, NO, CH, CO, C₃, H₂O, CO₂, HCN, HNC, CH₃, CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, NH₃;在空气和POM的混合气体计算中涉及到的中性粒子种类包含H, C, O, N, H₂, O₂, N₂, NO, CO, H₂O, CO₂, CH₄, NH₃。

目前的计算当中考虑的粒子种类比较多,但由于计算涉及的温度区间为300~4 000 K,所以在这一区间内,气体的粒子组分以中性粒子为主。在这些中性粒子中,部分粒子因为摩尔分数很小,对于临界击穿场强的影响有限。

一个大气压力下,不同气体介质中粒子组分的摩尔分数随温度的变化见图1。从图1可以看出,在空气当中,起主导作用的是O, O₂, NO和N₂这几种粒子;在空气和PA6蒸气的混合气体中,起主导作用的粒子为H₂, N₂, H, O, CO, H₂O和CO₂;在空气和POM蒸气的混合气体中,起主导作用的粒子为H, O, H₂, O₂, N₂, NO, H₂O, CO和CO₂。

从1图中还可以看出,3种介质中N₂的摩尔分数在整个温度区间内都比较稳定,在相对较高温度时(2 500~3 000 K)才会有少量分解生成N原子;另外一个比较明显的现象是,在空气/POM和空气/PA6中,由于有机产气材料引入了C、H元素,CO₂和H₂O也成为了主要粒子且存在于整个温度区间;还可以看到,由于产气材料PA6和POM化学组成上的差异,2种混合其中H元素的含量和产生温度也有所不同,具体表现为含氢量较高的空气/PA6在H₂、H、H₂O的含量上要明显高于含氢量较低的空气/POM,在较低温度下就可以生成这2种产物,进而也会对介质的临界击穿场强造成影响。

1.2 电子能量分布函数(EEDF)的计算

1.2.1 电子能量分布函数和玻尔兹曼方程

电子能量分布函数可以通过对零维空间的玻尔兹曼方程二阶球谐近似获得。关于这一求解方法,早期的工作中利用ELENDF代码可以实现,但是这一方法求解效率较低,尤其是在低电场强度、高电子数密度的情况下收敛时间较长。文中的研究工作中需要在单一情况中的一个时间点,对数万个网格的电子能量分布函数进行计算,利用该计算

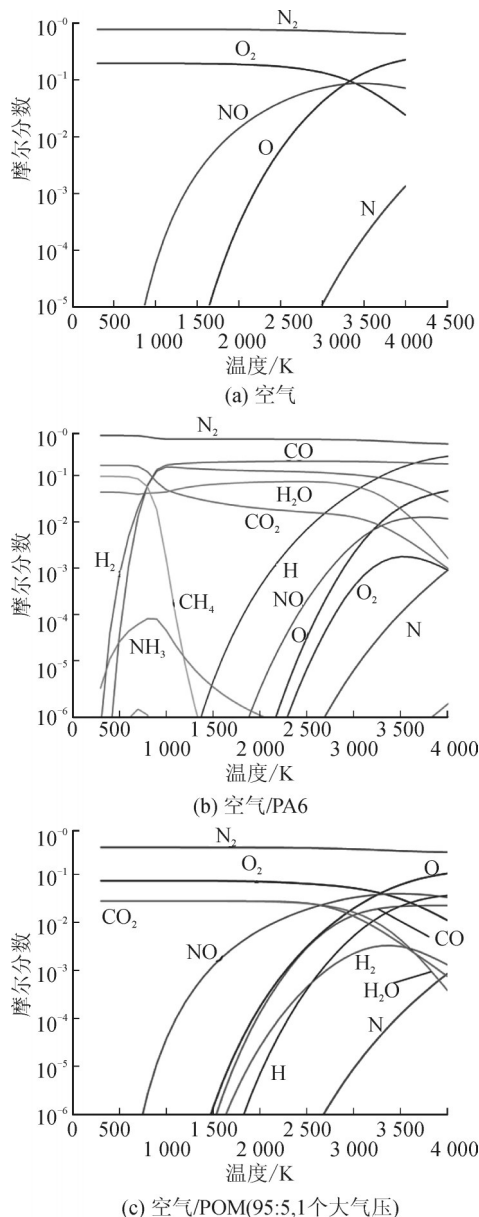


图1 不同气体介质中粒子组分的摩尔分数随温度的变化(1个大气压)

Fig. 1 Variation of particle mole fractions with temperature in different gases(1atm)

方法并不现实。因此对于电子能量分布函数的计算采用法国 Laplace 实验室提供的 Bolsig+ 软件,利用该软件可以实现对电子能量分布函数的高速求解。

1.2.2 碰撞截面的选取

从电子能量分布函数的计算方法可以看到,表征电子和重粒子之间相互作用的基础数据是电子与重粒子之间的碰撞截面,它也是计算电子能量分布函数的最基本数据。文中计算中主要包括以下几种碰撞截面的数据:动量转移碰撞截面;电子的转动、振动以及能级激发碰撞截面;电离碰撞截面以及吸附碰撞截面。但是,通过对比发现不同的数据来源中碰撞截面的数据差异较大,而这些差异将

会直接带来电子能量分布函数计算的误差,因此在计算之前对碰撞截面的数据进行有效性验证必不可少。文[25]提出了等离子体数据交流计划(GEC Plasma Data Exchange Project),这一计划旨在通过不同数据的交叉对比以及与试验结果的比对,确定最佳的碰撞截面数据组。该计划将数据进行了整理,并总结在 LAPALACE 实验室的数据库中^[1]。

1.3 电离与吸附系数的计算

在临界击穿场强的计算中,认为电离反应主导电子的生成,吸附反应主导电子的消失,因此获得2种反应的反应系数是临界击穿场强分析中的重要步骤,文[27]已经给出了计算公式和方法。电离与吸附反应的计算与电子的能量分布函数以及碰撞截面直接相关,因此通过与实验所得的电离与吸附系数进行对比,可以验证文中计算所选的碰撞截面数据的有效性。由于有些反应过程的系数到目前为止还没有通过实验获得,所以文中只对部分目前可以查找到反应系数的实验结果进行了有效性验证,具体结果见图2。

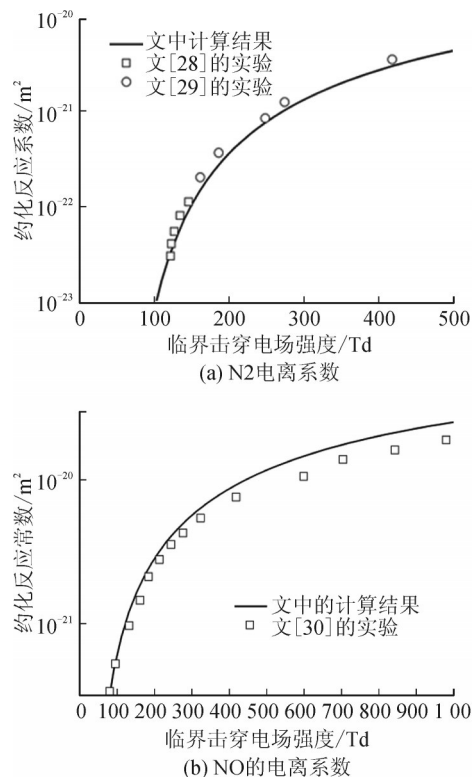


图2 几种粒子常温下反应系数与实验结果对比图

Fig. 2 Comparison between the reaction coefficient of particles at normal temperature and the experimental results

从图2(a)中可以看出,对于N₂的电离系数,文中计算结果在150 Td以下与150 Td以上的场强范围分别与文[28]、文[29]结果吻合较好。对于NO的电离过程,可以看出文中的计算结果与文[30]的实验结

果在 200 Td 以下的电场强度范围吻合较好,但是在 200 Td 以上的范围计算结果略高于实验结果。一般来说,文中研究主要关注的电场范围在 150 Td 以下,因此所利用的 NO 的电离碰撞截面在预测空气的临界击穿特性时具有有效性。

综上所述,在将反应系数的计算结果与前人的实验结果进行对比分析之后,发现取得了很好地吻合,在一定程度上验证了计算中所选取的碰撞截面数据的有效性。

1.4 空气临界击穿场强计算值和实验的对比

以上述方法为计算原理,利用 Bolsig+ 软件在获得气体介质中不同温度、不同压强以及不同电场强度下的电离和吸附系数,二者达到平衡时对应的电场强度即为对应温度、压强情况下的临界击穿场强。

为了保证文中研究结果的有效性,将一个大气压情况下空气不同温度对应的临界击穿场强的计算结果与实验结果进行了对比。实验结果来自于文[31]所进行的高温空气的击穿实验。但由于实验原理的关系,将该实验中的结果与文中临界击穿场强的结果进行直接对比具有一定的困难。因此关注于击穿电压或临界击穿电场与温度的对应关系。首先,将实验中的击穿电压除以密度获得约化击穿电压 V/ρ , V/ρ 与文中计算的约化电场强度 E/N 可以近似地认为具有等价性。其次, V/ρ 的数值通过除以常温常压下的 $(V/\rho)_0$ 进行归一化处理,同理将文中的临界约化电场进行归一化处理 $(E/N)_{cr}/(E/N)_{cr_0}$, 其中下标 cr 意味着电离系数与吸附系数平衡情况下的临界击穿电场强度。不同情况下临界击穿场强的理论与实验结果对比见图 3。

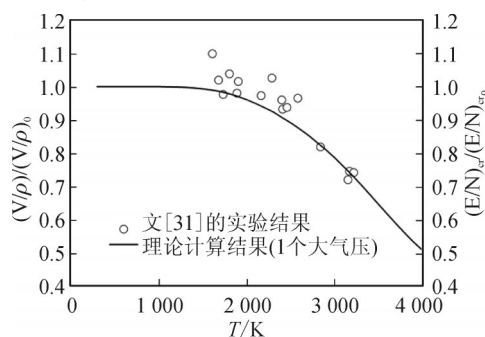


图3 临界击穿场强的计算与实验结果对比图

Fig. 3 Comparison between calculation and experimental results of critical breakdown field strength

从图 3 可以看出,以前述理论为基础,采用 Bolsig+ 软件计算得到的临界击穿场强与通过实验获得的结果有着较好的吻合,从而可以说明文中采用的碰撞截面数据以及二阶玻尔兹曼输运方程的

合理性,该方法能够有效地预测高温气体的临界击穿场强。

2 临界击穿场强的结果及分析

在利用前述方法获得空气中不同温度、不同压强以及不同电场强度下的电离和吸附系数之后,电离与吸附系数达到平衡时对应的电场强度即为对应温度、压强情况下的临界击穿场强。文中首先将给出不同压力下气体介质临界击穿场强随温度的变化曲线,接着给出不同的气体介质在相同压力下临界击穿场强的对比,然后探究空气和产气材料以不同比例混合对于临界击穿场强的影响,最后从理论方面对以上的结果做出解释。

2.1 不同压力下介质临界击穿场强随温度的变化

不同压力下不同气体介质临界击穿场强的计算结果对比见图 4。

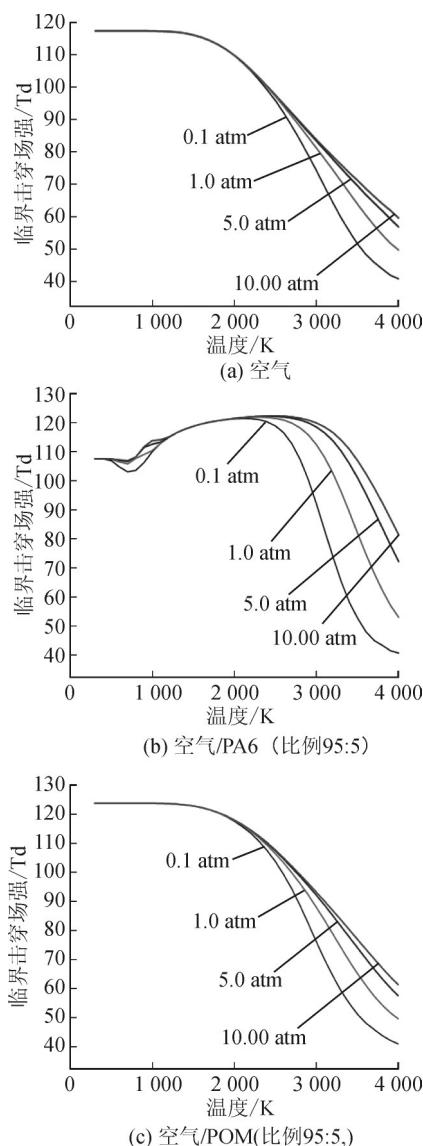


图4 不同压力下高温气体临界击穿场强的计算结果

Fig. 4 Calculation results of critical breakdown field strength of high temperature gases at different pressures

从图4可以看出,在2 000 K以下的温度范围内压力对于约化的临界击穿场强结果基本没影响,这是因为在这一温度区间气体中的组分没有发生明显变化。而在2 000 K以上,可以明显看到压力增大引起了击穿场强随温度变化的滞后,这是因为压力会引起组分变化的延迟。

由于温度对电子能量分布函数影响并不明显,温度对于击穿场强的影响主要体现在其对组分的影响上。以1个大气压情况下的空气为例,在2 000~3 000 K温度区间击穿场强的迅速下降主要是由于NO的生成进而导致电离系数增大引起。而在3 000 K以上,击穿场强的下降主要是由于NO与O₂的分解导致吸附系数减小而引起。

2.2 不同介质临界击穿场强随温度的变化

1个大气压下3种气体介质的临界击穿场强随温度的变化曲线见图5。

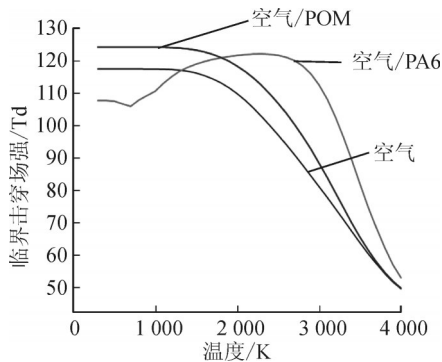


图5 不同气体的临界击穿场强变化曲线
(1个大气压,混合比例95:5)

Fig. 5 Cures of critical breakdown field strength for different gases (latm mixing ratio is 95:5)

从图5中可以看出,从1 500~3 500 K范围内,空气/PA6和空气/POM的临界击穿场强明显高于纯空气,换言之,空气和产气材料蒸气的混合气体相较纯空气可以有效提升断路器的开断能力。而之所以可以提升断路器的开断能力,原因可以大概归结为以下3点:

- 1)有机产气材料蒸发分解产生的氢气具有很好的导热性,可以对电弧起到冷却作用。
- 2)产气材料蒸发后可以增大灭弧室的气压,进而可以产生更强的气流对电弧进行冷却。
- 3)较强的气吹作用有利于电弧进入灭弧室,从而利于电弧熄灭。

另外,还可以看出,空气和空气/POM这2种气体介质的临界击穿场强随温度的变化具有一致性,即:随着温度升高,介质的临界击穿场强不断下降;

但是,对空气/PA6混合气体而言,大致的变化趋势为500~3 000 K,临界击穿场强有一个缓慢的上升,而温度高于3 000 K的范围内,临界击穿场强会随着温度的升高而快速下降,但总体而言,当温度高于2 000 K时,空气/PA6的临界击穿场强要高于空气/POM。这种现象可以由POM(-CH₂O-)和PA6(-C₆H₁₁NO-)的化学构成进行解释,从化学式可以看出,蒸发相同物质的量的2种有机产气材料,氢元素为2:11,从图1(b)、(c)之间对比也可以看出,混合PA6的空气中含氢量要明显高于混合POM的空气,而较高的含氢量有利于提高介质的临界击穿场强,关于这一点下文还会有进一步的解释。

2.3 不同混合比例的空气/产气材料的临界击穿场强

由于空气和产气材料蒸气混合比例的不同,混合气体的粒子组分也会有所差别,进而会对临界击穿场强产生一定的影响,相同的气压之下,不同混合比例下的空气/POM蒸气的临界击穿场强随温度的变化曲线见图6。

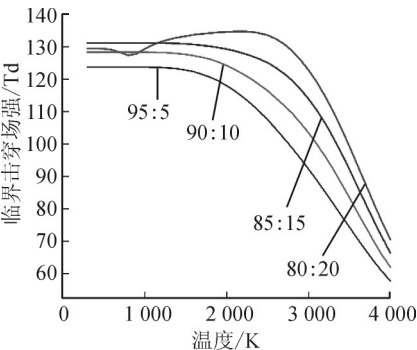


图6 不同混合比例的空气/POM临界击穿场强
随温度的变化(5个大气压)

Fig. 6 Variation of air/pom critical breakdown field strength in different mixing ratio with temperature

从图6可以看出,当空气和POM蒸气的混合比例不低于85:15时,随着有机产气材料蒸气在混合气体中比例的增加,在整个计算涉及到的温度区间内,临界击穿场强的数值会有明显的增大。因为POM蒸气在混合气体比例的提高会直接导致H元素含量的上升,进而生成具有较高吸附截面的H₂O,从而会增大混合气体的吸附系数,提高介质的临界击穿场强。实际上,对于空气/POM混合气体而言,随着有机产气材料蒸气在混合气体中占比升高,考虑到2种产气材料的化学组成,可以将其视为空气和较小比例的PA6蒸气的混合,故而当混合比例高于一定数值(85:15)后,临界击穿场强的曲线会出现和空气/PA6混合气体(图5(b))击穿场强曲线类似的形状。

3 结论

文中以计算临界击穿场强的零维模型为基础,通过前文提到的吉布斯能最小化的原理求解得到不同气体介质的粒子组分,通过近似求解玻尔兹曼方程得到电子能量分布函数和粒子的电离和吸附系数,进而求得气体介质在一定条件下的临界击穿场强。

基于以上方法,得到了空气,空气/POM,空气/PA6在一定条件下临界击穿场强随温度的变化,从电子吸附和电离2个角度探讨了不同介质和不同混合比例对于临界击穿场强的影响。综合以上讨论,得出以下2点结论:

1)对于空气/POM、空气/PA6介质而言,断路器零区内H₂O都是对电子的吸附起主导作用的粒子,而对于电子的电离过程,不同的气体介质会有较大的差异,对于空气/POM介质而言,低温区域(2 000 K以下)电离过程由N₂和O₂主导,高温区域(2 000 K以上)则由NO主导,而对空气/PA6介质而言,小于1 000 K时,CO₂对电子电离过程作用比较明显,在1 000~3 500 K这一温度区间内以N₂和CO为主导。

2)在一定的混合比例范围内(对空气和POM混合蒸气而言,该比例不小于85:15),有机产气材料的加入可以有效提高空气介质的临界击穿场强,有利于增强断路器的开断能力;但是当进一步提高有机产气材料蒸气在混合气体中的比例(对空气和POM混合蒸气而言,比例低于85:15)时,临界击穿场强则会出现劣化现象。

参考文献:

- [1] KLINE L E, DAVIES D K, CHEN C L, et al. Dielectric properties for SF₆ and SF₆ mixtures predicted from basic data[J]. Journal of Applied Physics, 1979, 50(11): 6789-6796.
- [2] YAN J D, FANG M T, LIU Q S. Dielectric breakdown of a residual SF₆ plasma at 3 000 K under diatomic equilibrium[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(1): 114-119.
- [3] CLITEUR G J, HAYASHI Y, HAGINOMORI E, et al. Calculation of the uniform breakdown field strength of SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(6): 843-849.
- [4] YOUSFI M, ROBIN-JOUAN P, KANZARI Z. Breakdown electric field calculations of hot SF₆ for high voltage circuit breaker applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(6): 1192-1200.
- [5] ROBIN-JOUAN P, YOUSFI M. New breakdown electric field calculation for SF₆ high voltage circuit breaker applications[J]. Plasma Science & Technology, 2007, 9(6): 690-694.
- [6] TANAKA Y. Prediction of dielectric properties of N₂/O₂ mixtures in the temperature range of 300~3 500 K[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(6): 851-859.
- [7] TANAKA Y. Influence of copper vapor contamination on dielectric properties of hot air at 300~3 500 K in atmospheric pressure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3): 504-512.
- [8] YAN J D, FANG M T, LIU Q S. Dielectric breakdown of a residual SF₆ plasma at 3 000 K under diatomic equilibrium[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1997, 4(1): 114-119.
- [9] CLITEUR G J, HAYASHI Y, HAGINOMORI E, et al. Calculation of the uniform breakdown field strength of SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(6): 843-849.
- [10] YOUSFI M, ROBIN-JOUAN P, KANZARI Z. Breakdown electric field calculations of hot SF₆ for high voltage circuit breaker applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(6): 1192-1200.
- [11] ROBIN-JOUAN P, YOUSFI M. New breakdown electric field calculation for SF₆ high voltage circuit breaker applications[J]. Plasma Science and Technology, 2007, 9(6): 690.
- [12] WANG W Z, MURPHY A B, RONG M Z, et al. Investigation on critical breakdown electric field of hot sulfur hexafluoride/carbon tetrafluoride mixtures for high voltage circuit breaker applications[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(10): 3301.
- [13] WANG W Z, TU X, MEI D H, et al. Dielectric breakdown properties of hot SF₆/He mixtures predicted from basic data [J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(11): 3503.
- [14] ZHAO H, LI X W, JIA S L, et al. Dielectric breakdown properties of SF₆~N₂ mixtures at 0.01~1.6 MPa and 300~3 000 K[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(14): 143301.
- [15] ZHONG L L, YANG A J, WANG X H, et al. Dielectric breakdown properties of hot SF₆~CO₂ mixtures at temperatures of 300~3 500 K and pressures of 0.01~1.00 MPa[J]. Physics of Plasmas, 2014, 21(5): 3506.
- [16] WANG X H, ZHONG L L, YAN J, et al. Investigation of dielectric properties of cold C₃F₈ mixtures and hot C₃F₈ gas as substitutes for SF₆[J]. the European Physical Journal D, 2015, 69(10): 1-7.
- [17] LI X W, ZHAO H, WU J, et al. Analysis of the insulation characteristics of CF₃I mixtures with CF₄, CO₂, N₂, O₂ and air[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(34): 5203.
- [18] LI X W, ZHAO H, JIA S L, et al. Prediction of the dielectric strength for C-C₄F₈ mixtures with CF₄, CO₂, N₂, O₂ and air by Boltzmann equation analysis[J]. Journal of Physics D:

-
- Applied Physics, 2014, 47(42): 5204.
- [19] ZHAO H, LI X W, JIA S L, et al. Prediction of the critical reduced electric field strength for carbon dioxide and its mixtures with 50% O₂ and 50% H₂ from Boltzmann analysis for gas temperatures up to 3 500 K at atmospheric pressure[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(32): 5203.
- [20] TANAKA Y. Prediction of dielectric properties of N₂/O₂ mixtures in the temperature range of 300~3 500 K[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2004, 37(6):851.
- [21] TANAKA Y. Influence of copper vapor contamination on dielectric properties of hot air at 300~3 500 K in atmospheric pressure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(3):504-512.
- [22] SUN H, RONG M Z, WU Y, et al. Investigation on critical breakdown electric field of hot carbon dioxide for gas circuit breaker applications[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(5):5201.
- [23] RONG M Z, SUN H, YANG F, et al. Influence of O₂ on the dielectric properties of CO₂ at the elevated temperatures[J]. Physics of Plasmas, 2014, 21(11):2117.
- [24] SUN H, WU X, RONG M Z, et al. Investigation on the dielectric properties of CO₂ and CO₂-based gases based on the boltzmann equation analysis[J]. Plasma Science and Technology, 2016 (3):217-222.
- [25] PITCHFORD L C. GEC plasma data exchange project[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(33): 0301.
- [26] PANCHESHNYI S, BIAGI S, BOKDAGE M C, et al. Electron scattering cross sections and swarm parameters for low temperature plasma modeling[J]. Chemical Physics, 2012, 398(1):148-153.
- [27] ZHANG H T, LI D W, LUO B, et al. Influence of the gassing materials on the dielectric properties of air[J]. Plasma Science and Technology, 2017, 19(5):68-73.
- [28] FOLKARD M A, HAYDON S C. Experimental investigations of ionization growth in nitrogen[J]. Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics, 1973, 6(1): 214.
- [29] DANIEL T N, HARRIS F M. The spatial growth of ionization currents in nitrogen at voltages up to 500 kV[J]. Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics, 1970, 3(3):363.
- [30] LAKSHMINARASIMHA C S, LUCAS J. The ratio of radial diffusion coefficient to mobility for electrons in helium, argon, air, methane and nitric oxide[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1977, 10(3): 313.
- [31] ROTHARDT L, MASTOVSKY J, JAHN G, et al. Breakdown experiments in air and nitrogen above 1 500 K[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1981, 14(4):715.