

介质阻挡电晕放电去除二氧化硫的研究

孙岩洲, 邱毓昌, 袁兴成

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Study of SO₂ Removal Using Dielectric Barrier Corona Discharge

SUN Yan-zhou, QIU Yu-chang, YUAN Xing-cheng

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

摘要: 工频高压下线管结构反应器可能出现局部电晕放电及气隙中稳定阻挡放电。根据 $V-q$ Lissajous 图形计算了放电功率。随外加电压上升, 放电由电晕放电进入稳定阻挡放电, 放电电流幅值达数 mA, 放电功率密度为数百 $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-3}$, 去除 SO₂ 的能量效率可达 $30 \text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。实验表明, 稳定阻挡放电时, 较高的电压及较大的放电空间可提高能量利用率。

关键词: 阻挡放电; 电晕放电; 放电功率; 去除二氧化硫
中图分类号: TM8 **文献标识码:** A

Abstract: The dielectric barrier corona discharge in a wire-cylinder reactor is studied. The discharge power is calculated using the $V-q$ Lissajous figure. With increasing the applied voltage, the discharges change from corona to stable barrier discharge. In the stable barrier discharge stage, the amplitude of continuous discharge current reaches some mA, and the power density hundreds of $\text{mW}\cdot\text{cm}^{-3}$. It is shown that higher voltage and larger discharge space in the stable discharge stage can improve energy utilization factor of SO₂ removal.

Key words: dielectric barrier discharge(DBD); corona discharge; discharge power; SO₂ removal

1 引言

目前低温等离子体技术在环境保护方面应用广泛, 电晕放电和介质阻挡放电是在大气压下产生低温等离子体的两种有效手段^[1-3]。电晕放电可采用尖-板或线-管等电极形成不均匀电场来获得, 放电较为均匀稳定, 但不易实现大功率密度的运行; 介质阻挡放电(DBD)是有固体绝缘介质插入放电空间的一种气体放电, 固体介质抑制了电弧的形成, 通常表现为随机丝状放电。在尖-板或线-管结构中加入介质, 可将电晕放电和介质阻挡放电结合在一起, 为实现大功率密度的均匀稳定放电提供途径, 笔者对这

种放电的参数与特性进行实验研究。二氧化硫是一种无色而有刺激性气味的有毒气体, 空气中二氧化硫的含量在 $10^{-6} \text{ g}/\text{m}^3$ 量级时, 就会使人感到不适及呼吸困难。以往的脱硫技术多采用正脉冲高压放电在放电管中对动态气流进行模拟烟气处理^[4], 而工频高压比脉冲高压更易获得, 为此笔者研究工频下介质阻挡放电去除环境中二氧化硫有害气体的效果。

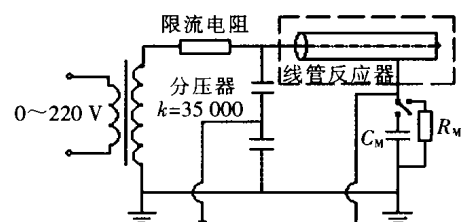
2 放电电流测量及功率计算

放电反应器采用线-管电极结构, 在玻璃管中心固定一根细导线, 作为高压电极, 在管外壁用导线绕成螺管状作为接地电极。试验所用的玻璃管分大管和小管两种, 大管的外直径为 35 mm, 内直径为 31 mm, 管壁厚 2 mm; 小管的外直径为 10.8 mm, 内直径为 8 mm, 壁厚 1.4 mm。细导线直径均为 0.15 mm, 有效放电管长为 400 mm。

试验电路见图 1, 用分压比 $k=35\,000$ 的分压器测量电压信号, 放电管与地之间串入 50Ω 电阻 R_M 获得放电电流信号, 附加 $1 \mu\text{F}$ 电容 C_M 用以测量放电电荷值。采用 TDS220 示波器记录信号, 外加电压及放电电流(或电荷)分别输入示波器的两个通道。

采用小管, 当工频高压峰值 V_p 分别为 10 kV 和 13 kV 时, 外加电压和放电电流波形分别见图 2(a), (b)。

因为线-管电极间的总电容 C 很小(10 pF), 故未放电时外加电压产生的容性电流很小(仅数十 μA),



至示波器的通道 1 至示波器的通道 2

图 1 放电电流和电荷测量图

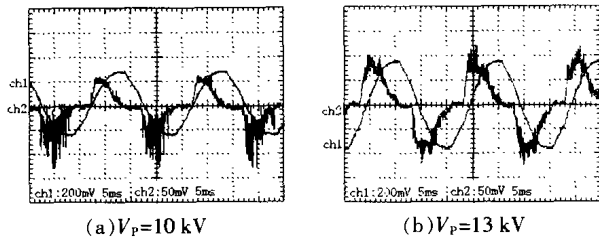


图2 电压和放电电流波形

所以由图2中看到的电流即为放电电流。放电电流在气隙中表现为传导电流,并在玻璃表面积累电荷,从而在玻璃介质中形成位移电流。图2(a)中电流的正半周连续而负半周叠加有脉冲,观察发现,仅环绕细导线的电离活性区(直径约1mm)出现发光,具有电晕放电特性^[5];图2(b)中放电电流幅值约2mA,管中气隙均出现稳定发光,放电电流在宏观上呈现较为连续的波形,放电进入稳定阻挡放电。

试验中采用V-q的Lissajous图形法计算放电功率, V_p=13kV时V-q的Lissajous图形见图3。设示波器x轴的灵敏度为k_x V/div, y轴灵敏度为k_y V/div, 分压器的变比为k, 而Lissajous图形所围面积为S, 电源频率为f, 则放电的功率可表示为:

$$P = f C_M k_x k_y k S \quad (1)$$

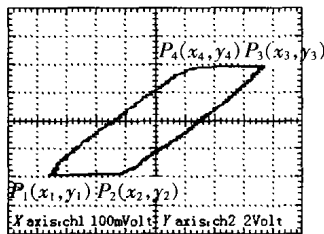


图3 V_p=13 kV时V-q Lissajous图

式(1)就是功率计算的依据, 计算结果仅为反应器中的放电功率, 不包括升压变压器的损耗。

3 去除二氧化硫的试验

线-管反应器去除二氧化硫的试验在密闭的实验箱中进行, 见图4。

密闭的实验箱是一个1m×1m×0.5m的有机玻璃箱, 实验箱里SO₂气体的浓度采用500D型气体分析仪测量, 分析仪测量准确度为0.2mg/m³, 试验时每隔1s采集一次数据, 所得数据送微机存储并显示。流量计控制注入实验箱的SO₂气体的浓度, 每次试验开始时实验箱的SO₂浓度相同, 均为

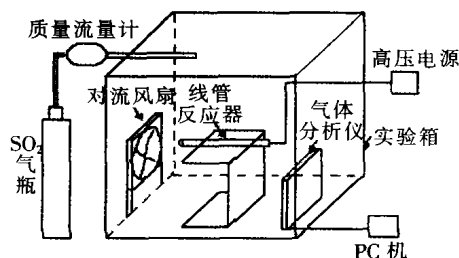


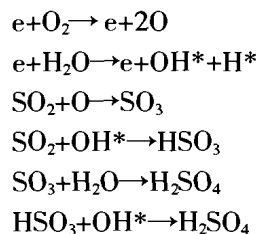
图4 去除SO₂试验示意图

30 mg/m³, 所以箱中SO₂的质量为15 mg。实验箱中安装了电扇, 线-管反应器两侧有通气孔, 放电反应器产生的活性基团可从线-管反应器两侧扩散到实验箱中以去除SO₂, 放电一段时间后SO₂浓度降为零。密闭箱中SO₂向外界的泄漏很小, 若不加电压, 约4h, SO₂浓度才由30 mg/m³下降为零。在外加不同峰值电压V_p下, 测得放电功率P和去除SO₂所需时间t以及放电能耗E, 放电数据见表1。

表1 外施电压对脱硫的影响

	V _p /kV	P/W	t/s	E/(W·h)
大管	10	1.5	2080	0.87
	14	3.4	860	0.81
	18	10.0	190	0.53
	21	16.0	110	0.49
小管	10	1.5	2230	0.93
	13	2.7	890	0.67
	15	4.2	550	0.64
	17	6.0	390	0.65

低温等离子体去除二氧化硫的机理较为复杂, 涉及的化学反应很多^[6,7], 主要在于非平衡态等离子体中会产生大量强氧化性的N, O, OH*等活性基团, 这些活性基团与SO₂发生一系列化学反应从而去除SO₂, 其简要过程可表示如下:



试验没有添加氨水等催化剂, 所以生成产物主要为H₂SO₄。

4 实验结果的分析

对于表1中大管的介质阻挡电晕放电, 当外施电压较低时(V_p<17kV), 在管中细导线周围产生电晕, 仅环绕细导线的电离活性区出现发光; 但当V_p升高到18kV时, 管中气隙出现稳定发光, 表明在活性区外的气隙中也存在电离, 相当于电离活性区加大, 由于介质抑制了电弧的出现, 所以形成稳定阻挡放电。可以看出, 仅电晕放电时, 能耗较高; 而当V_p大于18kV时, 能耗下降, 计算去除SO₂能量利用率可达30 g/(kW·h)。当外加电压更高时(V_p>24kV), 管中出现类似火花的强烈丝状放电, 放电功率波动不易测量, 并且玻璃介质温升较大。所以反应器在稳定阻挡放电时可高效可靠运行。

对于表1中小管的放电, 也有类似的特点。由于气隙较小, 观察发现当V_p>12kV时, 就已经进入稳定阻挡放电, 此时的能耗比电晕放电时小, 但对照大管的稳定阻挡放电, 又稍微偏高, 分析认为是外加电压低且放电空间相对较小的原因。(下转第258页)

表2 MOA 的伏安特性

电流 /A	电压 /kV		电流 /A	电压 /kV	
	三星型	四星型		三星型	四星型
10^{-5}	18.27	9.90	300	34.11	16.30
10^{-4}	21.69	11.75	500	35.00	16.72
10^{-3}	24.00	13.00	1 000	39.62	20.34
1.5×10^{-3}	25.10	13.60	5 000	45.00	23.10
100	32.55	15.55	15 000	51.97	26.68

表3 MOA 限压效果和所需通流容量比较

	单相重燃 过电压 /p.u.		两相重燃 过电压 /p.u.		通流容量 /kJ	
	相对地	相间	相对地	相间	单相重燃	两相重燃
三星型	2.380	2.518	2.937	5.865	0.019	1.934
四星型	2.358	2.516	2.197	4.026	0.261	13.657

进行模拟。

由以上计算结果可以看出,对于单相重燃过电压,三星型和四星型 MOA 的限压效果相差很小;但对两相重燃过电压,可以明显看出四星型 MOA 的限压效果好,特别是对于相间过电压而言,四星型 MOA 可以将相间过电压由 6 p.u. 降到 4 p.u.,三星型避雷器对于相间过电压几乎没有限制作用。就所需的通流容量来讲,不论是发生单相重燃还是两相重燃,四星型 MOA 吸收的能量都要比三星型 MOA 大很多(最大可达 13 kJ),但仍在其可以承受的范围之内。

5 结语

利用一典型的 10 kV 带并联无功补偿装置的低电压系统,研究了切除其并联无功补偿装置时,开关发生重燃所产生的暂态过电压过程。着重研究影响单相重燃和两相重燃过电压大小的因素。从计算结果中可以知道,单相重燃相对地过电压的最大值与发生重燃的时间有关,与燃弧时间无关;而两相重燃相对地和相间过电压的最大值与发生重燃的时间和燃弧时间都有关系;一次重燃时,相对地过电压的最大

值可以达到 3.5 p.u.,相间过电压可以达到 6.0 p.u. 以上,此时必须对并联无功补偿装置加以保护。笔者研究了并联电容器加装限流电抗器之后重燃过电压的变化,从结果中可以看出,随着限流电抗器电抗率的增大,单相重燃时相对地过电压的最大值变大;另外,随着系统无功补偿容量的增加,单相重燃相对地过电压的最大值也是增大的。研究结果表明,随着单相重燃相对地过电压最大值随系统无功补偿容量的增加很小,就前述例子而言,当系统补偿无功从 0.5 Mvar 增加到 5 Mvar 时,单相重燃相对地过电压的最大值增加仅约 4%。对于三星型和四星型 MOA 的限压效果和所需的通流容量进行比较的结果中可以看出,四星型 MOA 对单相和两相重燃过电压的限制效果要优于三星型 MOA,可以将重燃时相对地过电压降至 2 p.u. 左右,将相间过电压由 6 p.u. 降到 4 p.u.,但是其所吸收的能量要多。

参考文献:

- [1] Working Group 3.4.17 of the IEEE Surge Protective Devices Committee. Impact of Shunt Capacitor Banks on Substation Surge Environment and Surge Arrester Applications [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1996, 11(4): 1798-1808.
- [2] Bharat Bhargava, Aftab H Khan. Effectiveness of Pre-insertion Inductors for Mitigation Remote Overvoltages due to Shunt Capacitor Energizing [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1993, 8(3): 1226-1238.
- [3] 方瑜. 配电网过电压[M]. 北京:水利电力出版社,1993.
- [4] 盛焯,陈晓东,方国明. 10 kV 真空断路器弧后延时重击穿电压及对电容器绝缘影响的研究 [J]. 高电压技术, 1993(3): 1-5.
- [5] 牛晓民,李云阁,施围. 电磁暂态计算中四星接法 MOA 模型[J]. 西安交通大学学报, 1995(3): 39-45.

作者简介:杜斌(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统计算机仿真及过电压保护。

(上接第 254 页)

另外大管也利于放电空间活性离子的流通。介质阻挡电晕放电适合于局部污染严重环境的空气净化。

5 结论

对于介质阻挡电晕放电,不需脉冲高压电路,施加合适的工频高压,利用稳定阻挡放电区,可获得较大的稳定放电空间。对于去除 SO₂,大管的能量利用率高于小管,稳定阻挡放电区高于电晕区,试验中获得去除 SO₂ 能量利用率可达 30 g/(kW·h)。

参考文献:

- [1] 孙亚兵,任兆杏. 非平衡态等离子体技术在环境保护领域的应用[J]. 环境科学研究, 1998, 11(4): 24-26.
- [2] E Kunhardt. Generation of Large Volume Atmospheric Pressure Nonequilibrium Plasmas [J]. IEEE Trans. on Plasma

Science, 2000, 28(1): 189-200.

- [3] 原乃武,荣命哲,曾征,等. 室内空气净化用高压窄脉冲电源的研究[J]. 高压电器, 2003, 39(2): 10-12.
- [4] 李谦,李劲,梁智明. 正窄脉冲电参数对脉冲电晕脱硫影响的研究[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(7): 79-81.
- [5] E Kuffel, W Zaengl. 高电压工程基础[M]. (邱毓昌,戚庆成译),北京:机械工业出版社,1993.
- [6] Ma Hongbin, Chen Paul, Zhang Minglang, et al. Study of SO₂ Removal Using Non-thermal Plasma Induced by Dielectric Barrier Discharge[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2002, 22(2): 239-253.
- [7] P R Dahiya, S K Mishra, A Veefkind. Plasma Chemical Investigations for NO_x and SO₂ Removal from Flue Gases[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 1993, 21(3): 346-348.

作者简介:孙岩洲(1972-),男,在读博士生,讲师,主要从事高电压技术及气体放电等工作。电话:029-82668626。