

物理学

大气中针板放电电晕层的研究

刘志强 刘 铁 苗欣宇 郭 威

(河北大学静电研究所,保定 071002)

摘 要 通过对针板电晕放电实验,得到发光图像,并针对发光图像,描述了电晕层形貌。利用 photoshop 软件读取发光照片数据,测量出电晕层的灰度值和厚度。结果表明,在放电起晕后电晕发光强度在层内相对均匀,随着放电电压增大,在针尖处会产生一个明亮而不均匀的区域。发光强度随距针尖距离的变化规律为首先缓慢减小,然后迅速减小,最后又变得缓慢减小。当电晕区不同定点出现发光后,其发光强度随电压的增大表现出近似线性增强的趋势。起晕后电晕层厚度快速增长,随后会出现一个稳定区,当电压继续增大,电晕层厚度由平直向上升发展。

关键词 电晕放电 发光图像 灰度 电晕层厚度

中图分类号 O461.2; **文献标志码** A

在极不均匀电场中,电极曲率半径较小处附近局部场强很大而产生局部的自持放电,称为电晕放电^[1]。电晕放电是产生等离子体的一种最常见方式。电晕放电的放电过程中可产生高能电子和大量的活性粒子,与电晕区内的 N_2 , O_2 , H_2O 等各种分子发生非弹性碰撞使之解离、激发和电离,从而产生大量具有很强化学活性的粒子,如 OH , H_2O , O , H , N , O_3 , N^+ , N_2^+ , O_2^- 等。这些活性粒子氧化有毒污染气体分子,使其转化成酸雾或气溶胶粒子,通过对其进行适当的收集处理,从而可达到脱除污染物的目的^[2,3]。目前电晕放电广泛地应用于各种领域,例如静电除尘、臭氧的产生和有害气体的处理等。其中由于针板式电晕放电在污染物去除上具有能耗低、去除率高、适用范围广等特点,对污染治理方面具有很好的实用价值,所以备受人们的关注。国内外学者已经对其进行了大量的基础研究^[4-9]。但目前对针板式电晕放电的研究主要集中在机理分析、模拟仿真和影响因素上,对电晕层本身的研究还较少有相关报道。而电晕放电的电晕

层厚度和强度是影响污染物脱除效率的主要问题。故实验利用自制针板式放电装置,在大气中进行电晕放电,由发光图像描述了电晕层的形貌,通过读取发光照片数据的方法,量取电晕层不同位置的灰度值和电晕层厚度,并对其进行了研究。

1 实验装置及方法

实验在自然空气中进行,由自制的针板式放电装置进行电晕放电。选取针尖半径为 $250\ \mu m$ 的钨针为针电极,直径 $60\ mm$ 的圆形铝制接地极板为板电极,并固定针板间距为 $3\ cm$ 。实验装置如图 1 所示。实验采用 $(0 \sim 60)\ kV$ 连续可调的负高压直流电源。用相机对针电极处的电晕层进行分别拍照,相机拍照参数为光圈值 $f/3.2$,曝光时间 $2\ s$,ISO—80,焦距 $8\ mm$ 。选取发光图像灰度值 5 作为量取电晕层的边界值。利用 photoshop 软件对发光照片图像的电晕层灰度和电晕层厚度进行测量。实验环境为室温 $T = (20 \sim 25)\ ^\circ C$,相对湿度为 $RH = (40 \sim 60)\ %$,空气压力为 $P = 0.1\ MPa$ 。

2 实验结果与分析

2.1 电晕层的形貌

通过实验观察可以看出,电晕放电发光具有与日晕相似的光层,并伴随发出嗤嗤的声音。由发光

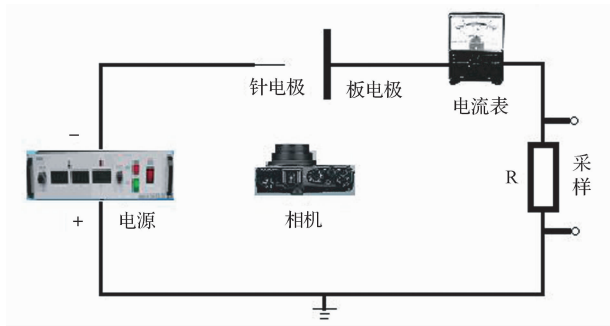


图 1 实验装置示意图

图像分析电晕层形貌,图 2 所示放电电压分别为 14 kV、24 kV、34 kV 时的三个发光图像。起晕后针电极周围出现电晕发光,由于电压值相对较小,针电极周围的电场较弱,电位梯度较小,电子在放电场中所获得的能量也同时较小,所以此时电晕发光强度很弱,电晕层的灰度值比较均匀,即电晕发光强度在层内相对均匀。当放电电压为 24 kV 时电晕层厚度明显加大,这时针电极处的电场强度变大,电位梯度增大,在发光图像中有一个明亮而不均匀的区域,并且明亮区域在电晕层的中心位置。电压继续增大,明亮区域逐渐偏移电晕中心位置,并且发光呈现出刷状。这是因为电子崩从电场强的阴极出发,向电场弱的区域移动,沿着电场电子彼此发散,放电空间一般不只有一个电子崩,它们汇到一起,形成一个发光区。在实验中未看到羽毛状的形态,是由于羽毛状的分支是淡的、弥散的,它们相互汇合,组成一个亮区,其中各分支不能彼此区分。电压提高到一定程度,超过了特里切尔脉冲的临界频率(最大脉冲频率值,即临界脉冲频率,约为几个 10^6 脉冲/秒),放电过程过渡到电流恒定的辉光。这一电晕形式是稳定的,它一般固定在中心处。放电区域分成亮的球形负辉光,不太亮的正柱,中间有一薄的黑层(法拉第暗区)^[10]。亮的部分直径比较小而亮,且有明显的轮廓。发光图像在灰度值为 5 的范围内各个像素点的灰度值相对连续,而在此范围外像素点的灰度值相对间断并出现明显的颗粒感,所以实验中选取灰度值为 5 作为电晕层与外围区的界限。

2.2 电晕层针电极方向灰度值分布

图 2 中三幅发光图像在针电极方向的灰度值分

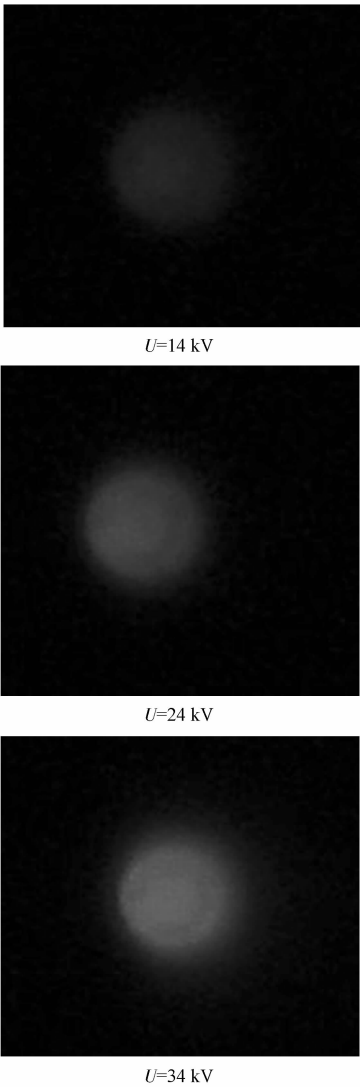


图 2 针板放电发光图像

布如图 3 所示。由图 3 可知,34 kV 时的灰度值大于 24 kV 与 14 kV 时的灰度值,即在距针尖相同距离下,电压越大发光强度越大,并且发光强度随着距针尖距离的加大而减小。在发光图像中电晕层的灰度值是逐渐过渡的。这是由于电晕层的强电场到外围区的弱电场的过渡不是突变的,而是逐渐变化的。因此,空间电离和激发由强到弱的变化也是逐渐过渡的^[11]。发光强度随距针尖距离的变化规律为首先缓慢减小,然后迅速减小,最后又变得缓慢减小。由于在 34 kV 发光图像的中心明亮区域中有明显的暗区,所以其灰度值分布曲线中针尖处灰度值会出现跳跃,在距针尖 0.225 73 mm 处从 79

突然升到 82,之后在距针尖 0.338 6 mm 处又从 82 降到 75。

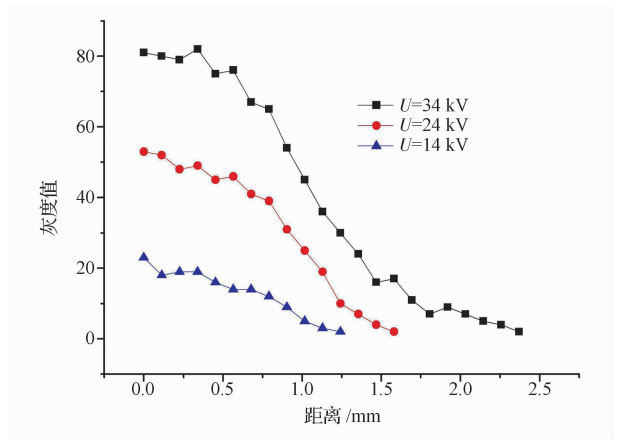


图3 针电极方向的灰度值分布

2.3 电晕层不同位置定点的灰度值

电晕层针电极方向 3 个不同位置定点的灰度值, a 为距针尖的距离,如图 4 所示。在同一电压下距针尖越近其灰度值越大,即发光强度越大;距针尖越远其灰度值越小,即发光强度越小。距针尖 1.8 mm 处的定点在 22 kV 时的灰度值为 1,此后随着电压增大其灰度值开始增大。由图中可知,当电晕区不同定点出现发光后,其发光强度随电压的增大表现出近似线性增强的趋势。通过对数据的线性拟合得到直线方程分别为 $y = 3.023\ 08x - 19.887\ 91$, $R = 0.995\ 18$; $y = 2.046\ 15x - 19.204\ 4$, $R = 0.984\ 64$; $y = 0.518\ 02x - 11.013\ 51$, $R = 0.953\ 68$ 。即距离针尖越近,其直线斜率越大,发光强度的线性关系越良好。

2.4 电晕层的厚度

发光图像选取灰度值为 5 作为电晕区与外围区的界限。以针电极方向发光长度作为电晕层厚度的标准,实验测得电晕层厚度与电压的关系图。

如图 5 所示,当两极间的电压由零逐渐增大时,由于电子运动速度缓慢且运动方向相对离散,在向接地极板运动过程中,不能激发空气粒子辐射跃迁,所以未在针电极周围观察到发光。起晕后针电极出现电晕发光,在 10 kV 的放电照片中出现发光图像并且电晕层厚度快速增长。激发粒子的自发辐射跃迁是电晕层发光的原因,若继续增大电压则电流强度和电场场强将增大,带电粒子运动速度也

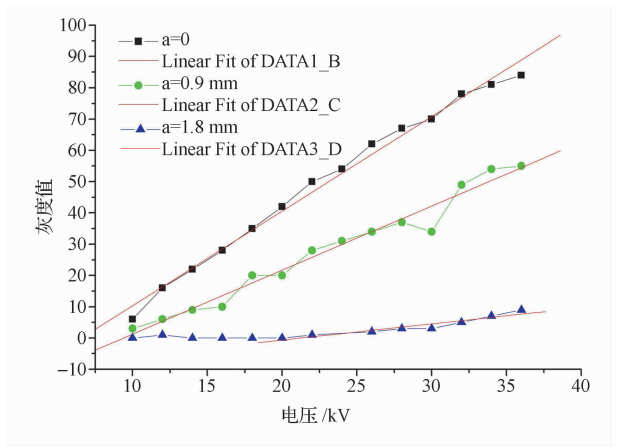


图4 不同位置定点的灰度值

增大,碰撞时粒子能量增强,碰撞电离迅猛发展,同时,这个过程中电子与正离子,正离子与负离子复合增强,以及更多的非稳态粒子跃迁基态或较低能态,从而使辐射光子数显著增多,电晕层的厚度和亮度也都同时增大。电压为 14 kV,它们的电晕层厚度为 2.525 6 mm。当电晕层厚度达到并保持变化不大的平直部分时表明处于稳定的电晕放电。这是由于初崩留下的正空间电荷削弱了阳极方向空间的电场,使流注的向前发展受到抑制。在 24 kV 时的电晕层厚度为 2.834 16 mm,随后加电压继续升高,电晕层厚度由平直向上升发展,在 34 kV 时的电晕层厚度达到 3.885 54 mm,表明电晕放电向预击穿流光过渡。

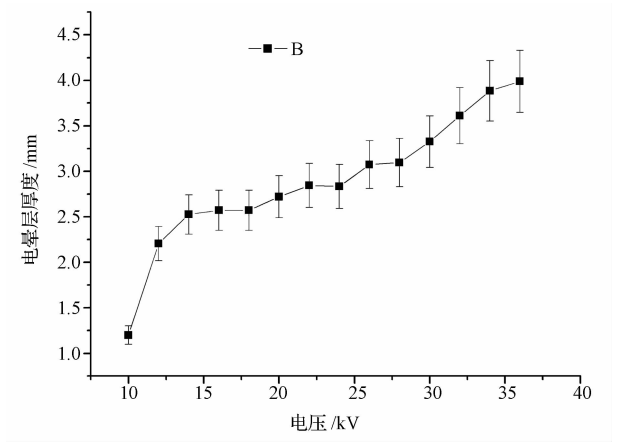


图5 电晕层厚度与电压的关系

3 结论

1) 起晕后电晕发光强度在电晕层内相对均匀。随着放电电压的增大,在针尖处会产生一个明亮不均匀区域。

2) 在距针尖相同距离下,34 kV 时的灰度值大于 24 kV 与 14 kV 时的灰度值。发光强度随距针尖距离的变化规律为首先缓慢减小,然后迅速减小,最后又变得缓慢减小。由于发光图像暗区的存在,在 34 kV 灰度值分布曲线中距针尖较近处会出现灰度值跳跃的数据点。

3) 在同一电压下距针尖越近发光强度越大,距针尖越远发光强度越小。当电晕区出现发光后,其发光强度随电压的增大表现出近似线性增强的趋势。距离针尖越近,其直线斜率越大,发光强度的线性关系越良好。

4) 起晕后电晕层厚度快速增长,随后在 14 kV 后会出现一个稳定区,当电压继续增大到 24 kV 电晕层厚度由平直向上升发展。

参 考 文 献

- 1 周泽存. 高电压技术. 北京:中国电力出版社,1988
- 2 Lee Y H, Jung W S, Choi Y R. Application of pulsed induced plasma chemical process to an industrial incinerator. *Environmental Science & Technology*, 2003; 37(11): 2563—2567
- 3 王学海, 方向晨. 烟气同时脱硫脱硝的研究进展. *当代化工*, 2008; 37(2): 197—199
- 4 Adamiak K, Atten P. Simulation of corona discharge in pointplane configuration. *Journal of Electrostatics*, 2004; 61: 85—98
- 5 宿鹏浩, 朱益民, 陈海丰. 发射光谱研究多针对板正电晕放电形貌. *光谱学与光谱分析*, 2008; 28(9): 1998—2002
- 6 Koh W H, Park I-H. Numerical simulation of point-to-plane corona discharge using a Monte Carlo method. *Vacuum*, 2010; (84): 550—553
- 7 张庆海, 武占成, 潘晓东, 等. 电晕放电辐射场仿真研究. *系统仿真学报*, 2007; 19(12): 2819—2822
- 8 高翔, 余权, 吴祖良, 等. 喷嘴-平板直流电晕放电中的 OH ($A^2 \Sigma^+ \rightarrow X^2 \Pi, 0-0$) 光谱研究. *强激光与粒子束*, 2007; 19(4): 700—704
- 9 王晓臣, 朱益民. 多针对板负电晕放电电极间距确定. *高电压技术*, 2003; 29(7): 40—42
- 10 杨津基. 气体放电. 北京:科学出版社, 1983
- 11 胡志强, 甄汉生, 施迎难. 气体电子学. 北京:电子工业出版社, 1985

Research on Corona Layer of Needle-plate Discharge in Atmosphere

LIU Zhi-qiang, LIU Tie, Miao Xin-yu, GUO Wei

(Electrostatic Research Institute of Hebei University, Baoding 071002, P. R. China)

[Abstract] In the experimet the images of needle-plate corona discharge are obtained. The gray value and thickness of corona layer was measured by reading luminescence data using photoshop software. The result shows that corona luminous intensity is relatively uniform after corona. With the discharge voltage increasing, a bright and uneven area is created in the tip place. With the increase of needlepoint distance, luminous intensity initially decreased slowly, following diminished rapidly and finally declined slowly. When corona area appeared luminous at different points, its intensity approximate linearly increases with the increase of the voltage. The thickness of corona layer rapidly grew, then there would be a stable region, with the increase of voltage, thickness of corona layer developed from flat to ascending.

[Key words] corona discharge luminous image gray level thickness of corona layer