

文章编号:1672-6952(2013)03-0088-04

## 磁场对电晕放电电极间区域的影响

米俊锋<sup>1</sup>, 詹小平<sup>2</sup>, 杜胜男<sup>1</sup>, 董 美<sup>1\*</sup>

(1. 辽宁石油化工大学石油天然气工程学院, 辽宁抚顺 113001;

2. 成都理工大学工程技术学院, 四川乐山 614007)

**摘 要:** 通过用两种磁场形式影响负电晕放电, 研究了磁场对负电晕放电不同区域的影响。研究表明: 磁场的应用可改变电晕区的放电强度, 增加放电电流; 磁场对荷电区的影响并不能改变放电电流的大小, 揭示了放电电流增加的原因; 磁场的应用加强电晕区内的电场强度, 所以磁场的应用可使负电晕放电的起晕电压降低。

**关键词:** 负电晕放电; 电晕区; 荷电区; 电离

**中图分类号:** TE08; X513 **文献标志码:** A doi:10.3696/j.issn.1672-6952.2013.03.024

## The Influence of Magnetic Field on Different Inter-Electrode Area of Corona Discharge

MI Junfeng<sup>1</sup>, ZHAN Xiaoping<sup>2</sup>, DU Shengnan<sup>1</sup>, DONG Mei<sup>1\*</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun Liaoning 113001, China;

2. The Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology, Leshan Sichuan 614007, China)

Received 1 November 2012; revised 28 December 2012; accepted 12 April 2013

**Abstract:** By using two forms of magnetic field to have an effect on negative corona discharge, the influence of magnetic field on different inter-electrode area of corona discharge was studied. The research showed that the charging intensity is changed and the discharge current is increased when the magnetic field is applied to the corona zone. But the discharge current is not changed when the magnetic field is applied to the charging region. This well explained the reasons for the increase of the discharge current. Meanwhile, the research shows that the onset voltage of negative corona discharge is decreased when the magnetic field is applied. The main reason is due to that the electric field intensity of the corona region is enhanced when the magnetic field is applied.

**Key words:** Negative corona discharge; Corona zone; Charging region; Ionization

\* Corresponding author. Tel.: +86-13504981908; e-mail: 260824403@qq.com

电晕放电技术在化工<sup>[1]</sup>、杀菌<sup>[2]</sup>、制备臭氧<sup>[3]</sup>、物质分离<sup>[4]</sup>等方面都得到了广泛应用。在现有研究中, 研究人员一般通过利用磁场影响电晕放电<sup>[5-7]</sup>的方法增加放电电流, 虽然在一定程度上增加了放电电流, 但是对磁场增加放电电流的机理并没有进行深入研究。本文通过研究磁场对负电晕放电电极间区域的影响, 揭示了电流增加的原因。同时, 通过比较不同边缘曲率半径的磁铁对放电电流的影响, 确定了放电电极的放电位置。

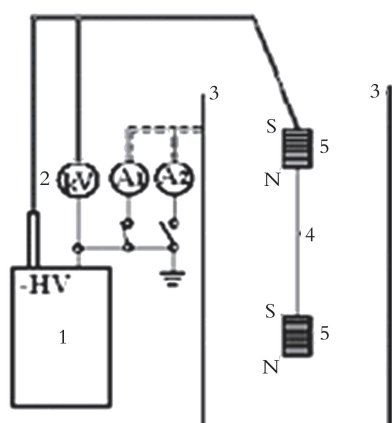
## 1 实验装置

本文共设计了两套实验装置, 分别如图 1 和图 2 所示。磁铁分别置于放电电极附近和收集极附近。在第一套实验装置(图 1)中, 放电电极 4 的材质为不锈钢丝, 其直径为 0.5 mm, 长度为 10 mm。两个圆柱永磁铁串 5 安装在线电极的两端, 永磁铁串由烧结钕铁硼强力磁铁构成, 其主要成分为稀土(Re)、铁(Fe)、硼(B), 在其表面镀有镍涂层。永磁铁串的高度为 10 mm, 直径为 6 mm, 由 10 个棱角边缘曲率半径为 0.2 mm 的盘形的永磁铁组成。收集极 3 为长度 100 mm、内径 56 mm、外径 60 mm 的不锈钢筒。两个磁铁串之间的距离保持 10 mm。放电电极被安装在不锈钢收集极 3 的中间。

收稿日期: 2012-11-01

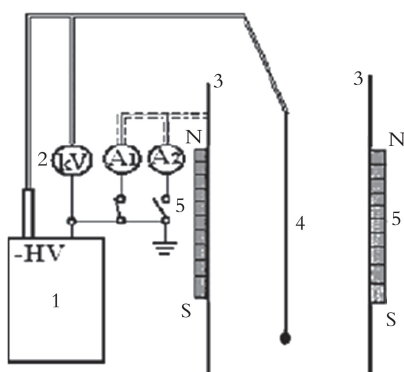
作者简介: 米俊锋(1980-), 男, 辽宁抚顺市, 讲师, 博士。

\* 通信联系人。



1. 高压电源;2. 电压表;3. 收集极;4. 放电极;5. 磁串

图1 磁铁被安装在放电极附近的实验装置示意图



1. 高压电源;2. 电压表;3. 收集极;4. 放电极;5. 筒磁铁

图2 磁铁被安装在收集极附近的实验装置示意图

在第二套实验装置(图2)中,磁铁被紧密地安装在收集极的外侧;放电极4为不锈钢材质,长度为40 mm,直径为0.5 mm;收集极3的材质为不锈钢,外径为42 mm,内径为40 mm,长度为50 mm;其外侧的筒磁铁5的高度为30 mm,内径为42 mm,外径为52 mm。线电极置于筒电极中心。

两套装置的供电系统由高压电源1、开关和电缆线组成。

电流、电压的测量系统:在两套实验装置中,电压表2用于测量两极电压,两块万用表则接在筒电极和接地线电极之间,分别用于测量起晕电压和放电电流。

磁场的测量:通过高斯计测量磁铁棱角边缘处的磁场强度和放电极附近的磁场强度。在利用第一套实验装置进行的实验(实验1)中,用置于放电极附近的两磁场中间位置的磁场强度代表放电区内的磁场强度。在利用第二套实验装置进行的实验(实验2)中,取放电极的三等分点和两个端点位置进行测量,取平均值后作为放电极附近的磁场强度。

在实验1中,磁铁的最大磁通量密度为0.43 T,也就是说磁铁棱角边缘的磁场强度为0.43 T,放电极附近磁通量密度为0.28 T。很明显,在线电极附近磁通量密度最大,即磁场对电晕区的影响较明

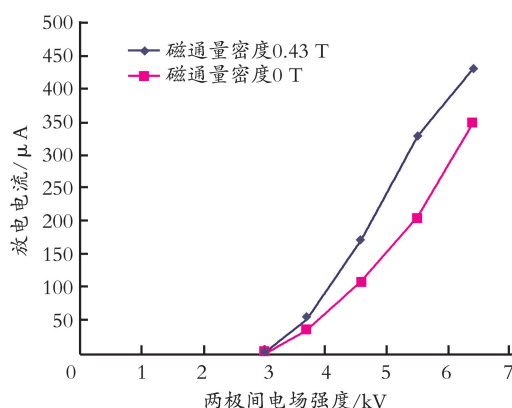
显,对荷电区影响较弱。

在实验2中,能提供的最大的磁通量密度为0.59 T,而放电极附近磁通量密度为0.30 T。在实验1中,磁通量密度从放电极到收集极逐渐减小,在电晕区内最强;在实验2中,磁通量密度从线电极到筒电极逐渐增加,电晕区内磁场最弱。

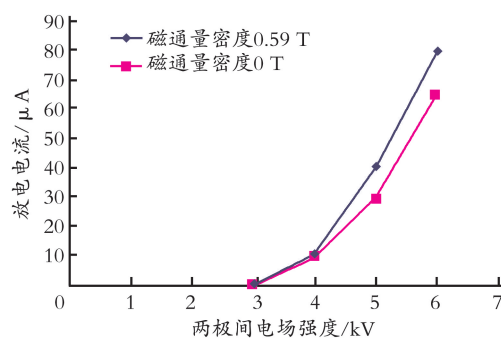
## 2 实验结果

### 2.1 消磁前后放电电流的变化

磁铁被安装在不同位置时,不同磁场强度下的 $I-V$ 特性曲线(伏-安特性曲线)如图3所示。



(a) 磁铁安装在放电极附近



(b) 磁铁安装在收集极外侧

图3 不同磁场强度下的 $I-V$ 特性曲线

利用加热的方法对图1中的磁盘进行消磁处理,并对消磁前后的放电电流进行了比较。通过图3(a)可以看出:消磁线磁通量密度大时放电电流大,磁通量密度小时放电电流小,无磁时放电电流最小。其可能的原因是:(1)磁场的应用使自由电子做拉莫运动,改变电晕区的电离强度,使放电电流增加;(2)在高温消磁过程中,磁铁表面的杂质在磁铁表面形成一层氧化膜,阻碍磁铁棱角处的放电,使放电电流变小。

为了明确放电电流发生变化的原因,利用第二套实验装置进行实验,得到了 $I-V$ 特性曲线,如图3(b)所示。最大磁通量密度为0.59 T、电晕区平均磁通量密度为0.30 T时,放电电流的最大增幅为约25%(增长幅度比实验1小很多),而实验前后放电

级始终没有变化。另外,电晕区磁场强度和最大磁场强度都大于实验 1。所以可以推断:磁场的应用使放电电流得到一定幅度的增加,增加幅度约为 20%,磁铁表面的氧化膜才可能是影响磁铁消磁前后放电电流变化的主要原因。

另外,更换第二套实验装置中的环形磁铁,减小放电电极附近磁场的强度,当磁铁边缘棱角处的磁场强度为约 0.08 T、电晕区磁场的磁通量密度接近 0 T 时,放电电流几乎没有增长,所以可以断定只有磁场影响放电电极附近时,即电晕区受到磁场影响的时候,才能使放电电流发生变化,而磁场对荷电区的影响则不能使放电电流增加。

## 2.2 磁场对电晕区的影响

在实验 1 和实验 2 中可以看出,如果不考虑消磁前后磁铁表面的变化,则磁场对电晕区的影响是放电电流增加的原因。

在传统的电晕放电中,由于电场中存在库仑力,自由电子沿电力线方向运动。而在电晕区磁场的实验中,在线电极附近,电力线和磁力线几乎是垂直的,自由电子在库仑力和洛伦兹力的共同作用下进行拉莫运动。自由电子的轨迹变成一个复杂的螺旋,螺旋的回旋半径呈周期性变化,回旋中心的运动轨迹垂直于电力线和磁力线的运动轨迹。如果考虑自由电子和空气分子的弹性和非弹性碰撞,则自由电子的运动轨迹十分复杂。在电晕区磁场的实验中,自由电子在电晕区中的运动轨迹被延长。换言之,在电晕区磁场的实验中,因为自由电子的拉莫运动,电晕区中的自由电子和空气分子的碰撞明显增加,使电子雪崩更加剧烈,从而使空气电离增强,放电电流增大<sup>[7-9]</sup>。

## 2.3 磁场对极间非电晕区的影响

在非电晕区中,由于自由电子本身的动能较低,所以自由电子和空气分子的碰撞不能使空气电离。在上述两个实验中,当电晕区内磁场强度较大时,有利于放电电流的增加,因此导致大量的自由电子和负离子进入非电晕区,在非电晕区中负离子的浓度有很大程度的增加。J. D. Moon<sup>[5]</sup>、D. Xu 等<sup>[7]</sup>也得出了磁场导致高能电子束在极间的旋转和漂移,使高能电子在极间停留的时间更长,导致电流增加的结论。换言之,磁场的应用使极间电荷整体的迁移速度  $V$  减慢,所以极间积累更多的负电荷,使极间电荷浓度  $\rho$  提高。

通过理论推导可说明高能电子在极间停留时间并不能导致放电电流的增加。电流密度  $J(\text{A}/\text{m}^2)$  与迁移速度  $V(\text{m}/\text{s})$  和电荷浓度  $\rho(\text{C})$  的关系为:

$$J = V\rho \quad (1)$$

假设磁场的应用使极间非电晕区中的负离子和自由电子的迁移速度减慢,电荷密度得到提高。根据式(1),可以初步判定电流密度并不增加,所以极间非电晕区自由电子的偏转并不影响电流大小。

根据电流连续性原理可解释这一问题。假设在极间非电晕区时间  $t$  内从电晕区进入极间非电晕区的自由电子和负离子的总电量为  $Q$ ,由于在极间非电晕区中,自由电子并不能使空气分子产生电离,所以根据电流连续性原理,来自电晕区的所有电荷在  $t$  时间内都将到达收集极。所以,电晕放电电流  $I(I = Q/t)$  保持不变,再次说明自由电子在极间非电晕区的偏转不能使放电电流增加。同理,负离子的偏转也不能使放电电流增加,而且负离子的质量远大于自由电子,所以负离子的偏转可以忽略。

## 2.4 磁场对起晕电压及极间电场强度的影响

在上面的两个实验中,磁场的应用使负电晕放电起晕电压有所降低,一般降低幅度在 1 kV 以上。Jae-Duk Moon<sup>[5]</sup>应用外部磁场进行的实验,也使放电电流有一定程度的增加,负电晕放电起晕电压降低。负电晕放电起晕电压低的原因可能是因为极间电场分布发生了变化。在负电晕放电中,电晕区是线周围 1~2 mm 的等离子区,空间电荷及电场分布如图 4 及图 5 所示<sup>[10]</sup>。

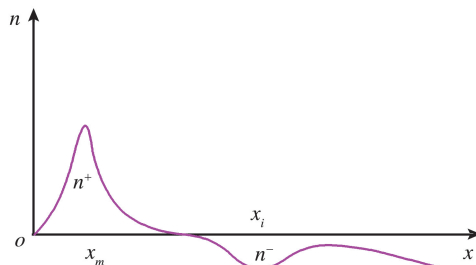
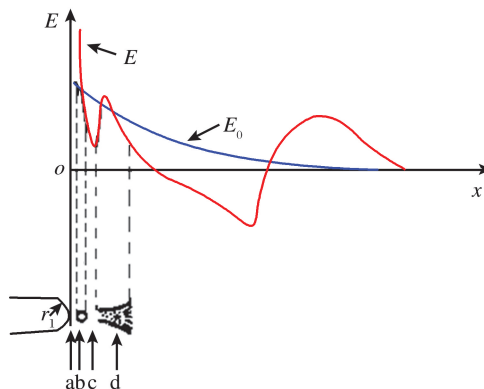


图 4 负电晕放电电极间隙中离子空间电荷及其分布



a. 克鲁克斯暗区; b. 负辉区; c. 法拉第暗区; d. 正柱

图 5 负电晕放电空间电荷对原始电场  $E_0$  的畸变作用及放电可见区域示意图

$n^+$  和  $n^-$  分别表示正负离子的浓度,  $\text{mol}/\text{L}$ ;  $x$  代表从负电极到正电极(筒电极)的轴线距离,  $\text{m}$ ; 图 5 中的图标 a、b、c、d 代表放电的 4 个可见光区;  $r_1$

为放电电极的曲率半径,  $m$ ;  $E_0$  为外加电场,  $E$  为空间电荷电场。可见, 在负电晕放电电晕区中, 外加电场和空间电荷电场方向一致, 对电离有促进作用; 在非电晕区中, 外加电场和空间电荷的电场方向相反, 对离子迁移起到限制作用。而磁场的应用使电离更加剧烈, 所以在负电晕放电过程中, 在电晕区附近积累更多的正离子电荷。电晕区附近正离子空间电荷电场和外加电场方向一致, 所以磁场的应用使负电晕放电电晕区电场强度增加, 起晕电压降低。

### 3 结 论

通过对磁场电晕放电的研究, 得到如下结论:

1) 磁场负电晕放电电流增加的原因: (1) 磁场的

应用使自由电子做拉莫运动, 改变电晕区的电离强度, 增加放电电流; (2) 由于磁铁表面存在杂质, 在高温消磁过程中在磁铁表面形成一层氧化膜, 阻碍磁铁棱角处的放电, 所以放电电流减小。

2) 磁场使放电电流增加的原因: 磁场使自由电子发生偏转或做拉莫运动, 增加自由电子与空气分子的碰撞次数, 但放电电流的增加仅仅使电晕区内部自由电子与空气分子的碰撞次数增加, 使电子雪崩更剧烈, 而与极间非电晕区自由电子和负离子的偏转无关。

3) 磁场的应用增加空间中的正离子电荷, 因此形成一个空间电场, 而此电场在电晕区中的方向与外加电场一致, 因此使电晕放电的起晕电压降低。

### 参 考 文 献

- [1] Yu K, Zou J, Ben Y, et al. Synthesis of NiO-embedded carbon nanotubes using corona discharge enhanced chemical vapor deposition[J]. *Diamond and Related Materials*, 2006, 15:1217-1222.
- [2] Yamamoto M, Nishioka M, Sadakata M. Sterilization by  $H_2O_2$  droplets under corona discharge[J]. *Journal of Electrostatics*, 2002, 56:173-187.
- [3] Yanallah K, Hadj Ziane S, Belasri A, et al. Numerical modeling of ozone production in direct current corona discharge[J]. *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, 2006, 777:125-129.
- [4] Li J, Xu Z, Zhou Y. Application of corona discharge and electrostatic force to separate metals and nonmetals from crushed particles of waste printed circuit boards[J]. *Journal of Electrostatics*, 2007, 65:233-238.
- [5] Moon J D, Lee G T, Chung S H.  $SO_2$  and CO Gas removal and discharge characteristics of a Non-thermal plasma reactor in a crossed DC magnetic field[J]. *IEEE Trans. Ind.*, 1999, IA-35 (5):1198-1204.
- [6] Xu D, Li J, Wu Y, et al. Zhang. Discharge characteristics and applications for electrostatic precipitation of DC corona with spraying discharge electrodes[J]. *Journal of Electrostatics*, 2003, 57:217-224.
- [7] Xu D, Sheng L, Wang H, et al. Study of magnetically enhanced corona pre-charger [J]. *J. Electrostatics*, 2007, 65:101-106.
- [8] 林山杉, 盛连喜, 李明非, 等. 磁增强电晕放电及其对颗粒荷电的研究[J]. *电工技术学报*, 2004, 19(9):42-45.
- [9] Nunes Y, Wemans A, Gordo P R, et al. The influence of magnetic confinement in DC abnormal-glow discharges [J]. *Vacuum*, 2007, 81:1498-1502.
- [10] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.

(Ed.: SJY, CP)